

# RELE PROTEKSI

*PRINSIP DAN APLIKASI*



*HENDRA MARTA YUDHA*

Hendra Marta Yudha  
Proteksi Rele: Prinsip dan Aplikasi

@2008, Dipublikasikan oleh Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas  
Sriwijaya

TIDAK SATUPUN DARI BAGIAN BUKU INI DAPAT DIREPRODUKSI DALAM  
BENTUK APAPUN TANPA IZIN

DITULIS OLEH : Hendra Marta Yudha, Ir, MSEE.  
ALAMAT : Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Unsri  
Jl. Raya Prabumulih KM 32 Inderalaya  
OI – 30662; Telp (0711) 580283- 318373  
E-mail : [hmymsc@yahoo.com](mailto:hmymsc@yahoo.com)  
[hmymsc@fkkpsdm.unsri.ac.id](mailto:hmymsc@fkkpsdm.unsri.ac.id)  
Website : [http://hendra\\_fteunsri.dikti.net/](http://hendra_fteunsri.dikti.net/)

## KATA PENGANTAR

Rele Proteksi merupakan bagian penting dalam sebuah sistem tenaga elektrik, tidak memiliki manfaat pada saat sistem berada dalam kondisi normal, namun sangat dibutuhkan bilamana sistem tengah mengalami gangguan dan kondisi tidak normal. Rele Proteksi dibutuhkan untuk menginisiasi pemutusan dan mengisolasi daerah yang mengalami gangguan dan menjaga agar daerah yang tidak mengalami gangguan tetap dapat menjalankan fungsinya.

Penulis,  
Hendra Marta Yudha, Ir, MSEE

## DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	ii
BAB 1 PENDAHULUAN DAN PHILOSOFI UMUM	1
1.1 PENDAHULUAN DAN PHILOSOFI UMUM	1
1.2 TIPIKAL RELE PROTEKSI DAN SISTEM RELE	3
1.3 KEANDALAN	6
1.4 SELEKTIVITAS	7
1.5 ZONA PROTEKSI	8
1.6 STABILITAS	9
1.7 KECEPATAN	9
1.8 SENSITIVITAS	10
1.9 PROTEKSI UTAMA DAN PROTEKSI CADANGAN	11
1.10 FAKTOR- FAKTOR YANG MEMPENGARUHI SISTEM PROTEKSI	12
1.11 KLASIFIKASI RELE	13
1.12 UNJUK KERJA RELE	15
1.13 INFORMASI UNTUK APLIKASI RELE	16
1.14 TATANAMA DAN NOMOR PERALATAN	18
1.15 DEFINISI DAN TERMINOLOGI	21
1.16 SISTEM KONTAK RELE	24
1.17 INDIKATOR OPERASI	24
1.18 TIPIKAL HUBUNGAN RELE DAN PMT	25
BAB 2 SATUAN-SATUAN DASAR: HARGA PERUNIT DAN PERSEN	28
2.1 PENDAHULUAN	28
2.2 DEFINISI PERUNIT DAN PERSEN	29
2.3 ALJABAR VEKTOR	29
2.4 MANIPULASI BESARAN-BESARAN KOMPLEKS	31
2.5 BESARAN RANGKAIAN DAN KONVENSI	34
2.6 NOTASI IMPEDANSI	41
BAB 3 PERHITUNGAN GANGGUAN	44
3.1 PENDAHULUAN	44
3.2 KOMPONEN SIMETRIS - ANALISIS JARINGAN TIGA FASA	44
3.3 PERSAMAAN DAN RANGKAIAN EKIVALEN UNTUK BERBAGAI TIPE GANGGUAN	50
3.4 DISTRIBUSI TEGANGAN DAN ARUS DALAM SISTEM AKIBAT GANGGUAN	56
3.5 PENGARUH SISTEM PENTANAHAN PADA BESARAN URUTAN NOL	60
BAB 4 SUMBER-SUMBER MASUKAN RELE	69
4.1 PENDAHULUAN	69
4.2 RANGKAIAN EKIVALEN CT DAN VT	71
4.3 APLIKASI TRANSFORMATOR ARUS UNTUK PROTEKSI	73
4.4 UNJUK KERJA CTS PADA KOMPONEN AC SIMETRIS	73
4.5 BURDEN SEKUNDER SELAMA GANGGUAN	77

4. 6	RINGKASAN EVALUASI UNJUK KERJA CT PADA KEADAAN TUNAK	78
4. 7	CONTOH UNJUK KERJA CT PADA KEADAAN TUNAK	79
4. 8	UNJUK KERJA CT AKIBAT PENGARUH UN-ENERGIZE	82
4. 9	TRANSFORMATOR ARUS PENJUMLAHAN FLUKS TOROIDA	83
4.10	UNJUK KERJA CT PADA KOMPONEN ARUS DC	84
4.11	EVALUASI UNJUK KERJA CT	86
4.12	FLUKS RESIDU CT DAN TRANSIEN SUSIDENCE	87
4.13	CT BANTU PADA RANGKAIAN SEKUNDER CT	88
4.14	APLIKASI TRANSFORMATOR TEGANGAN DALAM PROTEKSI	89
<b>BAB 5</b>	<b>DASAR-DASAR PROTEKSI</b>	<b>92</b>
5. 1	PENDAHULUAN	92
5. 2	PRINSIP DIFERENSIAL	92
5. 3	MASALAH DASAR SISTEM PROTEKSI	95
5. 4	RELE-RELE ARUS LEBIH-WAKTU	96
5. 5	RELE-RELE ARUS-TEGANGAN INSTANTANEOUS	99
5. 6	RELE-RELE DAYA PENGINDERA ARAH	101
5. 7	RELE-RELE JARAK DAN DIAGRAM R – X	101
5. 8	PROTEKSI CADANGAN : JARAK JAUH vs LOKAL	105
<b>BAB 6</b>	<b>PROTEKSI ARUS LEBIH DAN GANGGUAN TANAH</b>	<b>107</b>
6. 1	PENDAHULUAN	107
6. 2	PROSEDUR KOORDINASI	107
6. 3	PRINSIP-PRINSIP TINGKATAN ARUS – WAKTU	108
6. 4	MARJIN TINGKATAN	106
6. 5	STANDAR RELE ARUS LEBIH I.D.M.T	118
6. 6	KOMBINASI I.D.M.T DAN ELEMEN INSTANTANEOUS SETELAN TINGGI	120
6. 7	RELE ARUS LEBIH VERY INVERSE (VI)	122
6. 8	RELE ARUS LEBIH EXTREMELY INVERSE (EI)	122
6. 9	RELE ARUS LEBIH INDEPENDENT (DEFINITE) TIME	123
6.10	PERHITUNGAN PENYETELAN RELE ARUS LEBIH	123
6.11	PROTEKSI GANGGUAN TANAH	129
6.12	RELE ARUS LEBIH BERARAH	134
<b>BAB 7</b>	<b>PROTEKSI GENERATOR</b>	<b>137</b>
7. 1	PENDAHULUAN DAN POTENSI MASALAH	137
7. 2	HUBUNGAN-HUBUNGAN GENERATOR	138
7. 3	PROTEKSI UTAMA GANGGUAN FASA-STATOR	139
7. 4	PROTEKSI UTAMA GANGGUAN FASA UNIT TRANSFORMATOR	145
7. 5	PROTEKSI CADANGAN GANGGUAN FASA	147
7. 6	PROTEKSI CADANGAN ARUS URUTAN NEGATIF	148
7. 7	PROTEKSI GANGGUAN TANAH STATOR	149
7. 8	PROTEKSI PENURUNAN ATAU KEHILANGAN PENGUATAN	155
7. 9	PROTEKSI GENERATOR TERHADAP GANGGUAN	

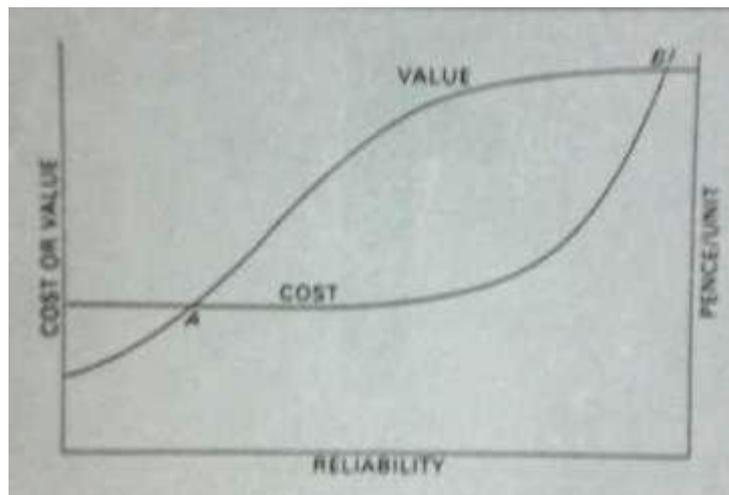
SISTEM DAN BAHAYA OPERASIONAL.	159
7.10 PROTEKSI GROUND FIELD	163
7.11 PROTEKSI GENERATOR PADA KONDISI OFF-LINE	164
7.12 PROTEKSI OUT-OF-STEP	164
7.13 BEBERAPA GENERATOR TERHUBUNG LANGSUNG PADA SEBUAH TRANSFORMATOR	164
7.14 PROTEKSI GENERATOR TURBIN PEMBAKARAN	165
7.15 PROTEKSI SINKRONOUS KONDENSER	165
7.16 SISTEM TRIPPING PADA GENERATOR	166
7.17 RINGKASAN PROTEKSI	166
<b>BAB 8 PROTEKSI TRANSFORMATOR, REAKTOR DAN KAPASITOR</b>	<b>167</b>
<b>SHUNT</b>	<b>167</b>
8.1 TRANSFORMATOR	
8.2 FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PROTEKSI DIFERENSIAL	167 168
8.3 INRUS MAGNETISASI	170
8.4 KARAKTERISTIK RELE DIFERENSIAL TRANSFORMATOR	
8.5 APLIKASI DAN HUBUNGAN RELE DIFERENSIAL PADA TRANSFORMATOR	171
8.6 CONTOH HUBUNGAN PROTEKSI DIFERENSIAL UNTUK BANK TRANSFORMATOR DUA BELITAN HUBUNGAN WYEI –	172 176
<b>DELTA</b>	
8.7 PERUBAH TAP BEBAN TRANSFORMATOR	176
8.8 CONTOH: PROTEKSI DIFERENSIAL UNTUK BANK TRANSFORMATOR MULTI BELITAN	180 180
8.9 APLIKASI ALAT BANTU UNTUK MENYEIMBANGKAN ARUS	182
8.10 PARALEL CT PADA RANGKAIAN DIFERENSIAL	
8.11 HUBUNGAN KHUSUS RELE DIFERENSIAL TRANSFORMATOR	184
8.12 PROTEKSI DIFERENSIAL BANK TRANSFORMATOR TIGA FASA DARI UNIT TRANSFORMATOR SATU FASA	184
8.13 PROTEKSI DIFERENSIAL TANAH (URUTAN NOL) TRANSFORMATOR	184
8.14 PERALATAN GUNA PEMINDAHAN SISTEM PEMUTUSAN	185
8.15 DETEKSI GANGGUAN MEKANIS TRANSFORMATOR	186
8.16 PROTEKSI PENTANAHAN TRANSFORMATOR	187
8.17 PROTEKSI DIFERENSIAL TANAH DENGAN RELE TANAH	187
8.18 PROTEKSI BANK TRANSFORMATOR DENGAN PENGGESER FASA TERKENDALI	193
8.19 PROTEKSI ARUS LEBIH PADA TRANSFORMATOR	193
8.20 BEBAN LEBIH PADA TRANSFORMATOR MELALUI STANDAR KETAHANAN GANGGUAN	194
8.21 CONTOH: PROTEKSI ARUS LEBIH PADA TRANSFORMATOR	197
8.22 PROTEKSI THERMAL SEBUAH TRANSFORMATOR	203
8.23 TEGANGAN LEBIH PADA TRANSFORMATOR	204

8.24 RINGKASAN: TIPE PROTEKSI TRANSFORMATOR	205
8.25 REAKTOR	209
8.26 KAPASITOR	211
<b>BAB 9 PROTEKSI MOTOR</b>	<b>213</b>
9.1 PENDAHULUAN	213
9.2 POTENSI-POTENSI BAHAYA PADA MOTOR	213
9.3 KARAKTERISTIK MOTOR YANG MEMPENGARUHI PROTEKSI	214
9.4 RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR INDUKSI	215
9.5 PROTEKSI MOTOR SECARA UMUM	217
9.6 PROTEKSI GANGGUAN FASA	217
9.7 PROTEKSI DIFERENSIAL	219
9.8 PROTEKSI GANGGUAN TANAH	221
9.9 PROTEKSI THERMAL DAN ROTOR TERKUNCI	222
9.10 PROTEKSI ROTOR TERKUNCI PADA MOTOR MOTOR BESAR	224
9.11 MOTOR DAN KETIDAK SEIMBANGAN SISTEM	225
9.12 KETIDAK SEIMBANGAN DAN PROTEKSI PERUBAHAN FASA	230
9.13 PROTEKSI TEGANGAN KURANG	230
9.14 PENUTUP BALIK DAN BUS PENGALIH	231
9.15 PENGASUTAN BERULANG DAN PROTEKSI JOGGING	232
9.16. PROTEKSI MOTOR SINKRON	233
9.17. RINGKASAN: TIPIKAL PROTEKSI UNTUK MOTOR	233
DAFTAR ACUAN	234
LAMPIRAN	235

## BAB 1 PENDAHULUAN DAN PHILOSOFI UMUM

### 1.1 PENDAHULUAN DAN PHILOSOFI UMUM

Kegunaan sistem tenaga elektrik adalah untuk mendistribusikan energi elektrik ke berbagai titik beban. Sistem tenaga elektrik harus didesain dan dikelola sehingga dapat mendistribusikan energi elektrik dengan tingkat ketersediaan yang tinggi dan ekonomis. Dua hal ini merupakan suatu yang sangat kontradiktif, hal ini dapat dilihat dari hubungan keduanya seperti yang disajikan dalam Gambar 1-1. Dalam gambar diperlihatkan relasi antara keandalan dan biaya untuk berbagai jumlah pelanggan. Sangat penting untuk dipahami bahwa sistem hanya viable antara dua titik persinggungan A dan B. Diagram dalam Gambar 1-1 memperlihatkan hubungan penting antara desain dan tingkat keandalan sistem dan besarnya biaya yang dibutuhkan untuk mencapai tingkat keandalan yang diinginkan. Dengan kata lain tingkat keandalan tidak dapat dicapai dengan cara mengurangi biaya, tetapi dibutuhkan kompromi antara keduanya, dengan tetap mempertimbangkan faktor-faktor lainnya.



Gambar 1-1: Hubungan antara keandalan suplai, biaya dan harga bagi konsumen

Jaminan ketersediaan suplai daya dapat lebih baik dengan cara memperbaiki desain, meningkatkan margin kapasitas dan mengatur rangkain alternatif untuk mensuplai beban. Membagi sistem kedalam beberapa subsistem dengan kendali dan sistem proteksi yang baik, memiliki fleksibilitas dalam operasi normal dan memberi jaminan pemutusan minimum pada saat sistem mengalami gangguan atau kondisi tidak normal. Sistem Tenaga Elektrik memerlukan investasi yang sangat besar. Guna memperoleh tingkat pengembalian investasi yang memadai, sistem harus dibebani seoptimal mungkin. Untuk alasan inilah perlu disadari bahwa operasi sistem tenaga elektrik harus berada dalam kisaran titik A dan B seperti dalam Gambar 1-1, namun demikian sangat

penting untuk tetap menjaga ketersediaan sistem sebaik mungkin, sehingga tingkat layanan kepada konsumen dapat tercapai, dengan demikian dapat diperoleh tingkat pengembalian investasi yang diharapkan. Terbebas dari gangguan dan kegagalan sistem tidak mungkin dapat dihindari secara total, semakin luas sistem berarti semakin banyak komponen sistem yang terlibat, sehingga kemungkinan terjadinya gangguan dan kegagalan juga meningkat. Sebuah sistem tidak didesain dan dikelola secara baik bilamana sistem tersebut tidak diproteksi secara baik. Hal ini merupakan ukuran tentang pentingnya suatu sistem proteksi.

Jenis gangguan yang sering kali terjadi pada sistem tenaga elektrik yang menggunakan saluran udara terbuka adalah hubung singkat satu fasa ke tanah yang diakibatkan oleh induksi tegangan akibat sambaran petir atau akibat gangguan dahan atau pohon yang menyentuh konduktor. Dalam sistem distribusi yang menggunakan saluran udara, gangguan akibat tumbang dahan atau pohon merupakan penyebab utama munculnya gangguan jenis ini. Dalam banyak kasus flashover yang terjadi akibat kondisi-kondisi diatas tidak menghasilkan kerusakan permanen bila sirkit yang mengalami gangguan dengan cepat dapat diisolir. Pada umumnya, setelah sirkit tersebut diisolir, arc yang terjadi dapat dipadamkan secara alami, dan sirkit kemudian dihubungkan kembali. Dalam banyak kasus, kejadian ini hanya mengakibatkan gangguan sementara dan dip tegangan. Tipikal waktu gangguan adalah antara 0,5 sampai 2 menit. Gangguan yang terjadi, umumnya mengakibatkan perubahan yang cukup berarti pada besaran sistem, sehingga dapat digunakan untuk membedakan antara kondisi yang dapat ditolerir atau tidak dapat ditolerir. Perubahan besaran ini meliputi: arus lebih, tegangan lebih atau kurang, daya, faktor daya atau sudut fasa, impedansi frekuensi, temperatur, tekanan dan besaran lainnya. Indikator umum yang menunjukkan adanya gangguan adalah perubahan arus yang terjadi secara tiba-tiba, sehingga proteksi arus lebih adalah jenis proteksi yang paling luas penggunaannya.

Proteksi adalah science, skill dan seni dalam aplikasi dan setting rele dan atau fuse untuk mendapatkan sensitivitas maksimum dalam mendeteksi kondisi yang tidak normal, tetapi tetap beroperasi pada kondisi normal atau kondisi yang masih dapat ditolerir. Pendekatan dasar yang digunakan dalam buku ini adalah bagaimana mendefinisikan kondisi yang dapat ditolerir dan tidak dapat ditolerir yang mungkin muncul dan untuk mendefinisikan perbedaan (penanganan) oleh rele atau fuse sehingga dapat mendeteksi keadaan tersebut.

Sangat penting untuk disadari bahwa ‘time window’ dalam mengambil keputusan pada suatu sistem proteksi sangat sempit, dan bila terjadi gangguan, pemeriksaan untuk verifikasi atau prosedur pengambilan keputusan yang memerlukan tambahan waktu tidak diperkenankan. Sangat vital:

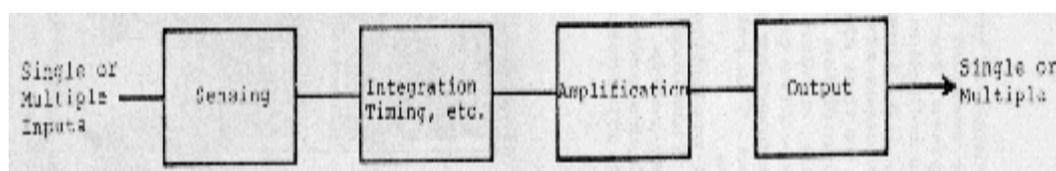
1. *Bahwa sistem proteksi harus melakukan keputusan secara benar baik pada saat gangguan yang terjadi tidak dapat ditolerir sehingga aksi seketika harus dilaksanakan, atau pada saat gangguan dapat ditolerir atau pada keadaan transien yang dapat diabsorsi sistem tenaga; dan*

2. *Bahwa sistem proteksi hanya beroperasi bila diharuskan untuk mengisolir areal yang mengalami gangguan secepat mungkin dengan tetap melayani areal yang tidak mengalami gangguan semaksimal mungkin.*

Waktu gangguan ini mungkin dan seringkali berhubungan dengan high extraneous noise yang seharusnya tidak menjadikan peralatan 'fool' atau mengakibatkan kesalahan operasi. Kegagalan operasi dan kesalahan operasi, keduanya dapat mengakibatkan bertambah banyak peralatan yang mengalami kerusakan, meningkatkan jumlah bahaya bagi manusia, dan kemungkinan pemutusan pelayanan yang lebih lama. Keadaan ini membuat Insinyur Proteksi menjadi konservatif, dan mereka cenderung menggunakan peralatan proteksi yang memiliki sejarah keandalan yang baik. Masalah dan kegagalan peralatan proteksi selalu mungkin terjadi, karena tidak ada hal yang sempurna. Untuk meminimisasi kemungkinan kerusakan dan kegagalan akibat gagalnya sistem proteksi dalam praktek seringkali digunakan beberapa rele atau sistem rele yang beroperasi secara paralel. Hal ini dapat ditempatkan pada lokasi yang sama (primary backup), atau pada Gardu yang sama (local backup), dan atau pada Gardu yang berbeda (remote backup). Dalam banyak aplikasi ketiga cara dapat digunakan secara bersama. Pada sistem tenaga listrik tegangan tinggi, konsep ini diperluas lagi dengan menggunakan peralatan pengukur arus/tegangan yang terpisah, belitan pemutus (tripping coil) yang terpisah, dan sumber batere yang terpisah pula. Semua peralatan proteksi yang terpasang harus dikoordinasikan dengan baik sehingga pada saat terjadi gangguan rele utama harus beroperasi lebih dahulu bila gangguan yang terjadi berada dalam zona operasi rele utama tersebut. Apabila sistem proteksi utama gagal, sistem proteksi cadangan harus bekerja untuk mengisolir gangguan yang terjadi, oleh karena itu dibutuhkan suatu sistem proteksi yang memiliki kapabilitas redundan yang tinggi.

## 1. 2 TIPIKAL RELE PROTEKSI DAN SISTEM RELE

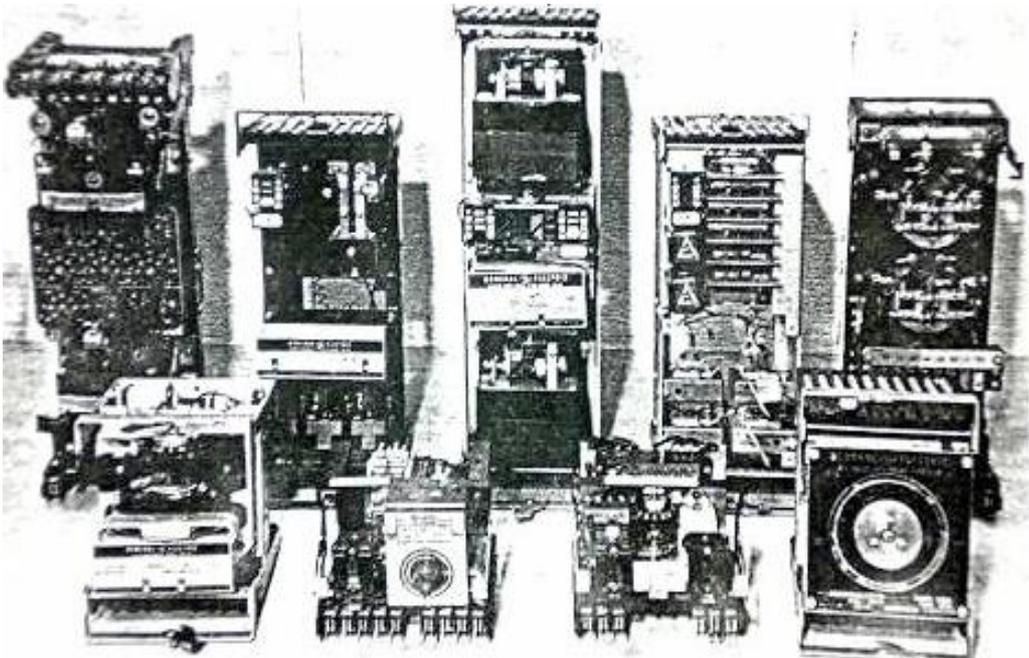
Tipikal representasi logic dari rele diberikan dalam Gambar 1-2. Komponen-komponen sistem dapat berupa elektromekanik, solid state, atau kombinasi keduanya. Fungsi logic yang digunakan sangat umum, sehingga dalam setiap unit dapat berupa kombinasi keseluruhan atau dalam banyak kasus tidak dibutuhkan keseluruhannya.



Gambar 1-2: Presentasi logig dari sebuah Rele Proteksi

Desain khusus dan fitur yang ada sangat variatif dan tergantung kebutuhan, fabrikasi berbeda, dan prioda desain particular yang berbeda. Awalnya, semua rele proteksi memiliki tipe yang sama, yaitu tipe elektromekanis yang sampai sekarang masih banyak digunakan, namun tipe solid state juga semakin luas penggunaannya.

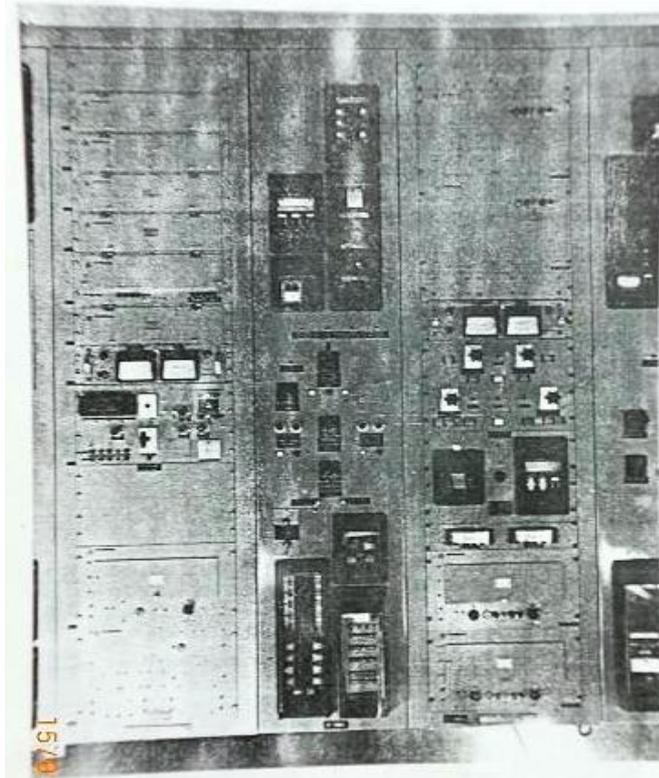
Meski kecenderungan ini semakin meningkat, mungkin membutuhkan waktu yang lama sebelum tipe elektromekanis betul-betul ditinggalkan. Peralatan tipe solid state memiliki keunggulan dalam akurasi waktu, sensor frekuensi, dan untuk sistem yang butuh keputusan logic yang lebih dari satu, seperti proteksi 'pilot'. Solidstate umumnya digunakan pada sistem tenaga tegangan rendah dimana rele dan PMT keduanya merupakan satu kesatuan.



Gambar 1-3: Tipikal representatif rele proteksi yang dipergunakan bagi proteksi sistem tenaga

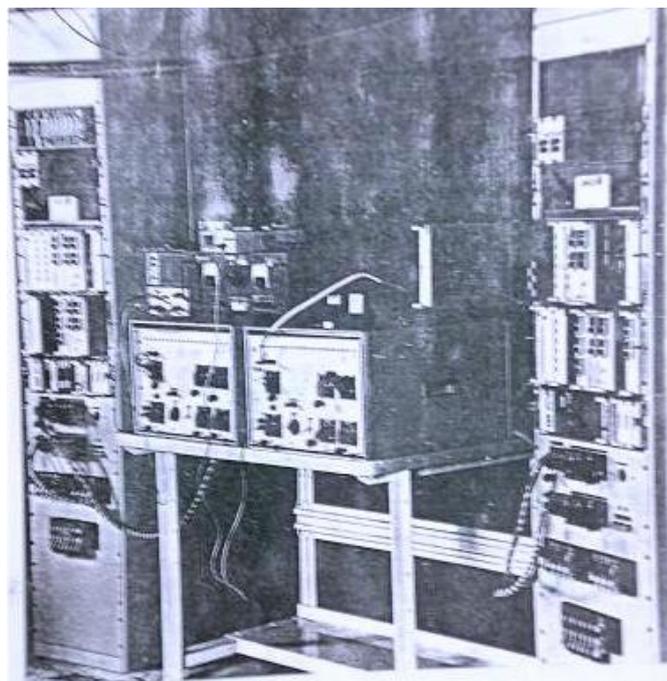
Penggunaan rele elektromekanis dalam sistem ini dirasakan kurang akurat, kadangkala tidak sensitif, dan sukar melakukan pengujian. Saat ini rele tipe solidstate semakin banyak dipakai dalam sistem tenaga listrik. Karakteristik dasar dari desain rele perlu dipahami, penjelasan lebih detil mengenai hal ini diberikan pada bab berikutnya. Bagi yang belum mengenal rele proteksi, sebuah koleksi rele tipe elektromekanis diperlihatkan dalam Gambar 1-3. Rele-rele ini telah dilepaskan dari kasingnya. Unit-unit rele maupun kasingnya, sama seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1-3. Penyambungan rele dengan sirkit-sirkit pendukung dan sirkit lainnya dilakukan melalui plug atau saklar yang tersedia.

Ketiga bagian dari suatu pengendali-papan saklar sistem proteksi bagi sirkit 500 kV diperlihatkan Gambar 1-4. Gambar 1-4 ini mengilustrasikan kombinasi dari rele solid state dan elektromekanis. Rele solid state pada umumnya terpasang dalam rak-rak seperti ditunjukkan dalam gambar. Pintu-pintu yang tersedia memungkinkan akses guna memperbaiki atau mengganti sirkit pada papan sirkit yang ada dan selain itu dilengkapi dengan fasilitas pengujian.



Gambar 1-4: Tipikal rele proteksi, kendali dan saklar instrumentasi pada Gardu sistem tenaga modern

Dua panel rele solid state yang sedang dalam pengujian diperlihatkan Gambar 1-5. Penutup muka dari panel tengah dibuka sehingga bagian dalam dari panel dapat diakses. Salah satu bagian dari rele sedang dikeluarkan



Gambar 1-5: Tipikal rele solid state untuk proteksi saluran Transmisi pada saat sedang dalam pengujian pabrik

### 1. 3 KEANDALAN

Pentingnya mempertahankan tingkat keandalan sistem tenaga elektrik telah dikemukakan dalam subbab 1.1. Kesalahan operasi pada suatu sistem tenaga elektrik dapat terjadi disebabkan oleh salah satu dari keadaan berikut:

- a. Kesalahan desain
- b. Kesalahan Instalasi
- c. Penuaan

#### 1. 3.1 Desain

Hal ini merupakan sesuatu yang sangat penting. Keadaan sebuah sistem tenaga elektrik harus dipahami dengan baik untuk menghasilkan sebuah desain yang baik. Pengujian secara komprehensif sangat dibutuhkan, dan pengujian ini harus mencakup semua aspek dari suatu sistem proteksi sedekat mungkin sebagaimana kondisi sesungguhnya. Untuk sistem proteksi umumnya, sangat perlu untuk melakukan pengujian pada rele, transformator arus dan peralatan bantu lainnya. Pengujian harus dapat mensimulasikan kondisi gangguan yang mungkin terjadi.

#### 1. 3.2 Instalasi

Instalasi sebuah sistem proteksi yang baik sangat dibutuhkan, tetapi kompleksitas rangkaian dalam sebuah instalasi sistem proteksi akan menyulitkan dalam melakukan pemeriksaan dan pengujian sistem. Pengujian menjadi hal yang mutlak diperlukan untuk menguji apakah instalasi terpasang secara benar dan seluruh komponen sistem bekerja sesuai dengan fungsinya. Mengingat sangat sulit untuk mensimulasikan seluruh kondisi gangguan secara benar, pengujian ini harus dilaksanakan untuk melihat kondisi instalasi sistem. Inilah gunanya pengujian ditempat, yang dapat dilakukan secara terbatas dan sederhana dan langsung guna membuktikan bahwa koneksi yang dilakukan telah benar dan bebas dari kemungkinan kerusakan peralatan.

#### 1. 3.3 Penuaan Dalam Operasi

Setelah bagian-bagian sistem diinstal dengan sempurna, penuaanpun dapat terjadi sejalan dengan waktu yang akan mengganggu fungsi sistem. Sebagai contoh, kontak-kontak mungkin menjadi rusak dan atau terbakar akibat seringnya beroperasi atau akibat kontaminasi dari lingkungan sekitar. Koil atau bagian lain dari rangkaian menjadi terbuka, komponen-komponen bantu mungkin gagal dan sistem mekanistertutup dengan debu atau mengalami korosi yang akan menghambat pergerakan sistem. Salah satu kesulitan dalam sebuah sistem proteksi adalah menentukan kapan sebuah sistem dibutuhkan, dan hal ini baru dapat diketahui saat sistem mengalami kegagalan dalam merespon gangguan yang terjadi pada sistem tenaga tersebut. Karena alasan inilah maka

rele proteksi harus selalu diuji dari waktu ke waktu untuk menjamin agar sistem tetap dapat bekerja pada saat dibutuhkan.

Pengujian sistem proteksi dilaksanakan tanpa harus mengganggu hubungan-hubungan permanen rangkaian. Hal ini dapat dilakukan dengan cara melakukan pengujian perblok atau pengalihan. Bila diperlukan pemutusan temporer, maka untuk menghindari kesalahan penyambungan ulang digunakan bendera penanda yang diletakkan pada titik-titik atau terminal penyambungan. Kualitas personel yang melaksanakan pengujian juga sangat menentukan. Personel harus benar-benar menguasai tugasnya dan memiliki kompetensi yang dibutuhkan dan bekerja mengikuti standar kerja yang diharuskan. Sirkuit-sirkuit yang penting, khususnya yang vulnerable harus dipantau secara kontinyu seperti rangkaian pemutus Pemutus Tenaga dan sirkuit pengendalinya.

#### 1. 4 SELEKTIVITAS

Proteksi disusun dalam zona operasi tertentu, yang mencakup keseluruhan sistem tenaga elektrik tanpa terkecuali sehingga tidak ada daerah yang tidak terlindungi. Bila terjadi gangguan, sistem proteksi dibutuhkan untuk memilih dan memutuskan Pemutus Tenaga yang terdekat dengan titik gangguan. Sifat pemutusan yang selektif ini dikenal juga dengan sebutan diskriminasi yang dapat dicapai dengan dua metoda, yaitu:

##### a. Sistem Tingkatan Waktu

Sistem proteksi pada zona yang berdekatan diatur untuk beroperasi dengan tingkatan waktu operasi yang berbeda-beda melalui pengaturan urutan kerja peralatan, sehingga pada saat terjadi gangguan, meski sejumlah peralatan proteksi akan beroperasi merespon adanya gangguan, namun hanya peralatan proteksi yang relevan dengan zona gangguan yang akan menyelesaikan keseluruhan urutan proses pemutusan, sedangkan sistem lain tidak akan menyelesaikan urutan pemutusannya dan akan kembali keposisi awalnya.

##### b. Sistem Unit

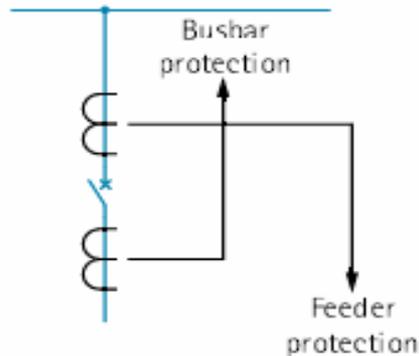
Dimungkinkan untuk mendesain sistem proteksi yang hanya akan merespon kondisi gangguan yang berada dalam zona yang didefinisikan. Proteksi seperti ini atau daerah proteksi ini dapat diterapkan dalam suatu sistem tenaga elektrik, mengingat bahwa operasi sistem tidak dipengaruhi oleh waktu, maka operasi sistem dapat lebih cepat. Proteksi Unit umumnya dicapai dengan membandingkan besaran-besaran sistem dalam batasan daerah operasi tertentu. Beberapa sistem proteksi diturunkan dari sifat 'keterbatasan' dari konfigurasi sistem tenaga dan mungkin saja dapat diklasifikasikan sebagai proteksi unit.

Metoda manapun yang digunakan harus selalu diingat bahwa selektifitas bukanlah bagian dari desain rele, hal ini merupakan suatu fungsi penerapan koordinasi yang benar antara Transformator Arus (CT) dan rele dengan suatu pilihan penyetelan yang tepat

dengan mempertimbangkan beberapa hal, seperti arus gangguan, arus beban maksimum, impedansi sistem dan sebagainya sesuai dengan kebutuhan.

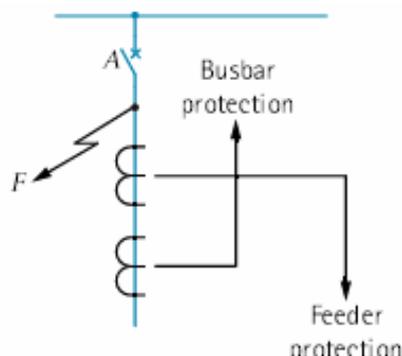
### 1. 5 ZONA PROTEKSI

Idealnya, zona proteksi seperti yang disebutkan terdahulu harus overlap melewati Pemutus Tenaga (PMT atau CB) seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 1-6, dimana PMT menjadi bagian dari kedua zona.



Gambar 1-6: Lokasi CT pada kedua sisi PMT

Karena alasan fisis, kondisi ideal ini kerap kali sukar dicapai, sehingga dalam beberapa kasus hanya dimungkinkan CT berada pada salah satu sisi PMT, seperti pada Gambar 1-7. Keadaan ini mengakibatkan bagian antara CT dan PMT A menjadi tidak terlindungi dengan baik bilamana terjadi gangguan didaerah tersebut. Dalam Gambar 1-7, gangguan pada titik F akan mengakibatkan proteksi busbar bekerja dan membuka PMT, namun demikian gangguan tetap berlanjut karena suplai datang dari arah penyulang.

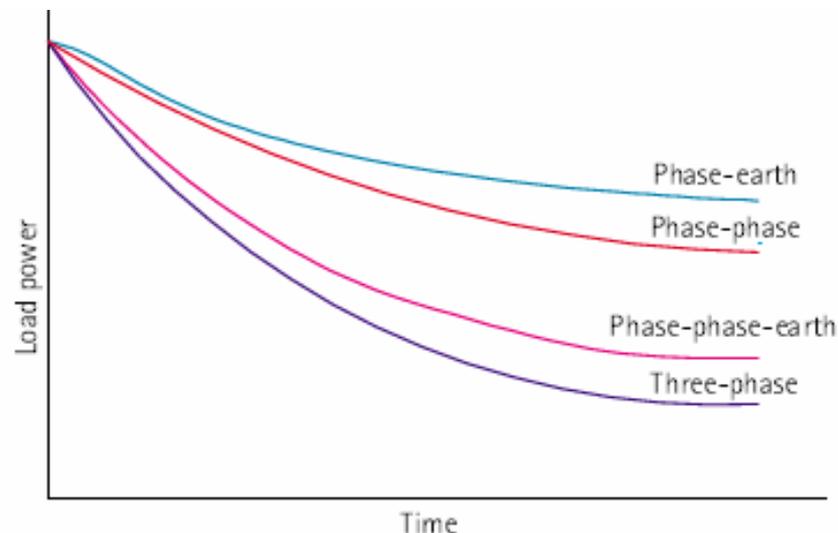


Gambar 1-7: Lokasi CT pada satu sisi PMT

Proteksi Penyulang, bila merupakan proteksi tipe Unit tidak akan bereaksi, karena gangguan ini tidak berada dalam zona operasinya. Masalah ini diatasi dengan membentuk zona tambahan, yang akan bereaksi bilamana pembukaan PMT tidak sepenuhnya dapat menghentikan aliran arus gangguan. Waktu tunda dibutuhkan dalam



kemungkinan pembebanan sistem. Dalam Gambar 1-9 diperlihatkan tipikal relasi antara pembebanan sistem dan waktu pemutusan gangguan untuk berbagai tipe gangguan. Dapat dilihat bahwa, gangguan fasa memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap stabilitas sistem bila dibanding dengan gangguan tanah. Oleh karena itu diperlukan waktu pemutusan yang lebih cepat.



Gambar 1-9: Tipikal besar daya yang dapat ditransmisikan sebagai fungsi dari waktu pemulihan

Tidak cukup hanya untuk menjaga stabilitas sistem, kerusakan yang tidak diharapkan harus pula dihindari. Daya rusak dari semburan akibat gangguan membawa arus yang sangat besar yang dapat mengakibatkan konduktor tembaga terbakar atau melelehkan laminasi inti transformator atau mesin-mesin elektrik dalam waktu singkat. Meski lokasinya jauh dari sumber gangguan itu sendiri, arus gangguan yang sangat besar dapat menimbulkan kerusakan pada pembangkit bilamana gangguan ini dibiarkan lebih dari beberapa menit. Terlihat bahwa peralatan proteksi harus beroperasi sesegera mungkin. Kecepatan menjadi hal penting, namun pertimbangan ekonomis tetap menjadi perhatian. Oleh karena alasan tersebut, sistem distribusi yang tidak begitu terpengaruh oleh kecepatan operasi sistem proteksi biasanya menggunakan metoda perbedaan waktu pada sistem proteksinya, namun pada sistem transmisi EHV memerlukan peralatan proteksi yang memiliki kecepatan operasi tinggi, pertimbangan penentuan kecepatan operasi hanya dipengaruhi oleh faktor kebenaran operasi rele.

## 1. 8 SENSITIVITAS

Sensitivitas adalah sebuah terminologi yang kerap dipergunakan yang mengacu pada arus operasi minimum yang diperlukan untuk dapat mengoperasikan sistem proteksi. Sistem proteksi dikatakan sensitif bila arus operasi utama yang dibutuhkannya rendah. Bilamana terminologi ini diterapkan pada rele individual, maka sensitifitas ini tidak mengacu pada penyetelan arus atau tegangan, namun pada besarnya konsumsi VA pada arus operasi minimum. Berbagai tipe elemen rele umumnya merupakan kumparan yang

memiliki range penyetelan arus yang cukup lebar, koil yang ada memiliki impedansi yang berbanding terbalik terhadap kuadrat harga arus penyetelan, sehingga VA untuk setiap penyetelan tetap sama. Hal ini merupakan masukan yang benar yang dibutuhkan untuk menggerakkan rele dan juga menjadi ukuran sensitifitas rele tersebut.

## 1. 9 PROTEKSI UTAMA DAN PROTEKSI CADANGAN

Keandalan sistem tenaga elektrik telah didiskusikan pada subbab sebelumnya. Banyak kasus dapat menjadi faktor penyebab kegagalan proteksi dan selalu ada kemungkinan kegagalan PMT. Karena alasan inilah, sangat umum untuk selalu menambahkan pada sistem proteksi utama suatu sistem proteksi lain sebagai cadangan bagi sistem utama dan untuk menjamin bahwa proses pengisoliran gangguan dapat terlaksana. Proteksi cadangan mungkin diperoleh secara otomatis sebagai bagian dari skema proteksi utama, atau terpisah sebagai sebuah peralatan tambahan. Skema proteksi dengan perbedaan tingkatan waktu seperti pada proteksi arus lebih atau jarak adalah contoh dari proteksi cadangan yang menjadi bagian dari proteksi utamanya. Seksi atau bagian dari daerah yang mengalami gangguan yang akan diisolir dibedakan berdasarkan tingkatan waktu, tetapi bilamana rele gagal atau PMT gagal untuk membuka, maka rele berikutnya yang terletak paling dekat dengan daerah gangguan diharapkan dapat menyelesaikan urutan operasi pemutusannya sehingga PMT dapat terbuka, dengan cara interupsi satu seksi lebih jauh, maka cadangan proteksi dapat diperoleh. Metoda pembukaan satu seksi kebelakang dimungkinkan, namun hal ini tidak berguna bila gangguan justru terjadi pada PMT. Untuk sistem interkoneksi, hal ini menjadi lebih rumit, operasi diatas akan dilakukan berulang sehingga semua jaringan paralel dapat diisolir keseluruhan.

Jika sistem tenaga diproteksi dengan proteksi utama menggunakan skema unit, proteksi cadangan tidak akan diperoleh secara langsung, oleh karena itu hal biasa bila sebagai tambahan bagi proteksi utama dipasang pula proteksi arus lebih tingkatan waktu sebagai proteksi cadangan lokal untuk mengantisipasi kemungkinan gagalnya proteksi utama, yang akan memutus PMT terdekat bilamana PMT yang mengalami gangguan. Bagaimanapun proteksi cadangan bekerja lebih lambat dari proteksi utamanya, tergantung pada konfigurasi sistem tenaga elektrik tersebut dan mungkin sedikit tidak selektif. Untuk beberapa sirkit penting kinerja seperti ini tidaklah cukup baik, meski hanya sebagai proteksi cadangan atau dalam beberapa kasus tidak saja memiliki efek dari masukkan yang beragam. Dalam kasus seperti ini, biasanya dipasang duplikasi sistem proteksi kecepatan tinggi. Cara seperti ini akan menghasilkan cadangan bersama yang sempurna guna menutupi kegagalan peralatan proteksi akibat kegagalan PMT atau mengurangi waktu penundaan. Proteksi bagi kegagalan PMT dapat diuji dengan melihat bahwa arus gangguan meningkat dalam interval waktu yang sempit dari proteksi utama. Jika ini terjadi, maka sambungan lain ke seksi busbar akan diisolir, keadaan ini dapat ditangani sebagai suatu kegagalan busbar. Kondisi ini membutuhkan proteksi cadangan dengan waktu penundaan minimum, dan membatasi operasi pemutusan hanya pada satu Gardu, bandingkan dengan alternatif pemutusan satu seksi lebih jauh.

Tambahan dan tipe proteksi cadangan yang akan digunakan tergantung pada resiko kegagalan yang mungkin terjadi dan berhubungan dengan masalah ekonomis sistem. Pada sistem Distribusi dimana waktu pemutusan gangguan tidak kritis, proteksi cadangan remote dengan waktu tunda sudah cukup, tetapi untuk sistem Transmisi EHV dimana stabilitas sistem menjadi sesuatu yang penting, kecuali bila gangguan dapat diisolir secepat mungkin, maka proteksi cadangan lokal diperlukan. Idealnya proteksi cadangan terpisah dengan proteksi utama. CT, PT, rele bantu, koil pemutusan dan suplai dc juga digandakan. Kondisi ini sedikit sukar diterapkan. Tipikal kompromi yang sering menjadi pilihan adalah sebagai berikut:

- a. CT Terpisah (hanya belitan sekunder dan inti) digunakan untuk masing-masing rele proteksi. Cara ini hanya memerlukan tambahan dan ruang yang lebih besar akibat penggunaan kombinasi beban.
- b. Menggunakan PT Bersama. Mengingat bahwa keamanan keluaran PT sangat penting, karena itu dibutuhkan suplai daya terpisah untuk masing-masing rele dan dilengkapi dengan sistem pemantau kegagalan suplai daya dengan memasang rele pemantau yang akan mengaktifkan alarm bila terjadi kegagalan pada suplai daya dan juga operasi yang tidak diharapkan pada sistem proteksi.
- c. Suplai Pemutus Terpisah bagi kedua sistem proteksi. Duplikasi batere dan koil pemutus pada PMT juga diperlukan. Rangkaian harus dipantau secara kontinyu.
- d. Proteksi Utama dan Cadangan (atau duplikasi proteksi utama) harus beroperasi dengan prinsip yang berbeda, sehingga pada saat terjadi gangguan yang mengakibatkan kegagalan pada salah satu sistem, maka sistem lainnya tidak mengalami hal yang sama.

## 1.10 FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI SISTEM PROTEKSI

Ada 4 faktor utama yang mempengaruhi suatu sistem proteksi, yaitu:

### 1. 10. 1 Ekonomi

Masalah ekonomi merupakan masalah penting. Proteksi tidak menghasilkan sesuatu dan tidak dibutuhkan pada kondisi normal, sayangnya gangguan dan masalah tidak selalu muncul, jadi dapat dengan mudah diputuskan untuk tidak membuang-buang uang untuk proteksi bila tidak ada masalah. Setiap engineer berharap sistem proteksi tidak dibutuhkan, namun bila muncul gangguan, proteksi menjadi sangat vital dan berarti.

### 1. 10. 2 Faktor Personalitas

Apa, bilamana, dan dimana kondisi yang tidak diharapkan akan terjadi pada sistem tenaga hampir tidak mungkin diramalkan, dan kemungkinan terjadi sangat tidak terbatas. Dengan demikian engineer harus mampu mendesain suatu sistem proteksi

yang dapat mengatasi semua kemungkinan yang terjadi berdasarkan perhitungan dan pengalaman masa lampau. Hal ini menjadikan proteksi sebagai sebuah SENI selain sebagai SCIENCE. Meskipun telah banyak teknologi yang dikembangkan, dan sistem proteksi yang disarankan namun belum ada standard yang berlaku untuk itu. Jadi sistem proteksi sangat merepleksikan personalitas dari engineer yang mendesainnya.

### 1. 10. 3 Lokasi Pemutus dan Peralatan Masukan

Proteksi hanya dapat diterapkan dimana PMT atau peralatan pemutus lain dan CT beserta PT berada guna mengisolir dan memantau informasi mengenai gangguan dan masalah dalam sistem tenaga.

### 1. 10. 4 Indikasi Gangguan

Masalah, gangguan dan kondisi yang tidak dapat ditolerir harus memiliki perbedaan yang signifikan dengan kondisi normal dan mampu ditolerir. Beberapa sinyal atau perubahan besaran harus mampu ditangani dan rele dapat mendeteksi perubahan itu. Besaran-besaran yang harus ditangani antara lain : arus, tegangan, impedansi, reaktansi, daya, faktor daya, arah arus atau daya, frekuensi, temperatur, dan tekanan. Perubahan yang cukup signifikan dari besaran diatas mungkin menjadi indikasi adanya masalah atau kondisi tidak normal dan rele harus dapat beroperasi.

Kunci dari selektivitas dan aplikasi proteksi yang pertama adalah menentukan besaran apa yang harus ditangani untuk membedakan keadaan normal dan tidak normal. Dari informasi ini, rele atau sistem rele dapat menentukan apakah harus bereaksi atau tidak. Jika tidak terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara kondisi normal dan tidak normal, maka proteksi tidak mungkin bereaksi. Contoh yang sering terjadi pada sistem distribusi. Pada saat terjadi accident atau keadaan yang mengakibatkan jaringan ter-energize atau terjadi hubung tanah, hal ini tidak boleh terjadi, namun bila gangguan ini sangat kecil atau mendekati nol, sedangkan besaran lain tidak berubah, maka dalam kondisi ini tidak satupun rele yang mampu mendeteksinya.

## 1.11 KLASIFIKASI RELE

Rele dapat diklasifikasikan dengan berbagai cara, seperti berdasarkan fungsi, masukan, karakteristik kerja atau berdasarkan prinsip operasi. Berdasarkan fungsi, ada 5 fungsi dasar rele, yaitu:

### 1. 11. 1 Rele Proteksi

Rele proteksi dan sistem pendukungnya serta fuse beroperasi bila terjadi ketidaknormalan pada sistem. Rele proteksi digunakan pada semua bagian dari sistem tenaga

listrik, yaitu mulai dari generator, bus, transformator, sistem Transmisi, sistem Distribusi dan Penyulang, Motor, Beban, Bank kapasitor, Reaktor, dan sebagainya.

### 1. 11. 2 Rele Regulasi

Rele jenis ini berhubungan dengan sistem pengendalian peubah Tap transformator dan governor. Rele ini digunakan pada kondisi normal dan tidak bereaksi bila ada gangguan kecuali bila gangguan yang terjadi berlangsung cukup lama.

### 1. 11. 3 Rele Sinkronisasi dan Recloser

Rele sinkronisasi, penguji sinkronisasi, dan recloser adalah tipe rele yang termasuk sebagai 'programming'. Rele jenis ini digunakan untuk keperluan energize atau restoring jaringan setelah gangguan guna menghubungkan bagian sistem setelah sistem deenergize.

### 1. 11. 4 Rele Pemantau

Rele jenis ini dipergunakan untuk verifikasi kondisi sistem atau kondisi rele proteksi. Rele digunakan untuk memantau gangguan, tegangan sistem, arah daya/ arus, namun tidak secara langsung mendeteksi gangguan. Dalam sistem proteksi, rele ini dibutuhkan untuk memantau kontinuitas sirkit seperti pada pilot wire atau sirkit tripping. Alarm juga memiliki fungsi monitoring pula.

### 1. 11. 5 Rele Bantu

Unit-unit bantu yang digunakan sepenuhnya pada sistem proteksi pemakaiannya sangat bervariasi. Secara umum ada 2 katagori, yaitu: contact multiplication dan circuit isolation. Dalam sistem rele dan sistem kendali rele bantu diperlukan untuk:

- a. Memperbanyak keluaran guna keperluan multi tripping, alarm, dan mengoperasikan peralatan lain.
- b. Kontak-kontak yang akan melayani arus dan tegangan tinggi pada sistem sekunder.
- c. Isolasi elektrik dan mekanik pada sirkit sekunder.

### 1. 11. 6 Klasifikasi Lain Rele

Rele dapat pula diklasifikasikan berdasarkan masukan yang diberikan, seperti arus, tegangan, frekuensi dan thermis. Rele dapat juga diklasifikasikan berdasarkan prinsip operasinya, seperti: elektromekanik, solid state, digital, diferensial percentage, multistrait dan unit product. Berdasarkan karakteristik kerja rele dapat dibedakan atas:

rele jarak, reaktansi, directional overcurrent, inverse time, phase, ground, definite, high speed, slow speed, phase comparison, over-current, under/over voltage.

## 1.12 UNJUK KERJA RELE

Sangatlah sulit untuk menentukan secara spesifik atau mengevaluasi unjuk kerja rele dengan teknik statistik. Seperti yang dikemukakan, rele terhubung pada sistem tenaga dan energize, tetapi rele tidak aktif (dalam mode diam) sampai suatu kondisi yang tidak diinginkan terjadi pada zona operasinya. Jadi tidaklah mungkin untuk mengetahui dari pengalaman atau kondisi normal apakah sebuah rele akan bereaksi dengan benar dan beroperasi dengan benar pada keadaan yang dibutuhkan. Hal ini menjadi alasan utama mengapa pemeliharaan sistem rele sangat dibutuhkan. Dengan tingkat gangguan yang relatif rendah, muncul pertanyaan ‘akankah rele bekerja secara benar bila gangguan terjadi?’ Apabila terjadi kegagalan atau kondisi yang tidak diinginkan pada sistem tenaga, maka bukti bahwa rele bekerja belum akan didapat sampai kejadian berikutnya terjadi. Oleh karena itu, pemeliharaan rele hanyalah untuk menjamin rele dapat bekerja, bukan untuk memperbaiki kesalahan. Tidak heran bila ada rele yang telah digunakan lebih dari 40 tahun.

Apabila terjadi gangguan pada sistem tenaga, rele utama diharapkan bekerja dan mengisolir gangguan. Namun demikian, rele-rele yang daerah operasinya berada disekitar titik gangguan akan menerima sinyal gangguan dan mulai pula bereaksi. Rele-rele ini tidak akan menginisiasi pembukaan PMT apabila rele utama mampu bekerja secara benar. Informasi mengenai unjuk kerja rele cadangan ini tidak akan didapat apabila rele tidak trip, namun demikian rele ini tetap penting. Hampir semua sistem proteksi mampu merespon gangguan yang terjadi, tetapi hanya 1 rele yang sebetulnya mengaktifkan tripping koil dari PMT meski tidak ada bukti tentang ini. Unjuk kerja rele terdokumentasi apabila ada bukti yang memperlihatkan tentang itu. Unjuk kerja dapat digolongkan dalam 3 katagori utama, yaitu:

### 1. 12. 1 Operasi Benar

Operasi benar diperlihatkan oleh:

- Paling sedikit terdapat 1 buah rele primer yang beroperasi dengan benar.
- Tidak ada satupun rele cadangan yang bekerja karena gangguan yang sama.
- Areal gangguan dapat diisolir secepat yang diharapkan.

Hampir 99% atau hampir semua rele beroperasi dengan benar dan diinginkan, yaitu sesuai dengan rencana dan program. Operasi yang benar tapi tidak diinginkan menjelaskan beberapa kasus rele dan peralatan pendukungnya bekerja namun operasinya tidak diharapkan. Sebagai contoh terjadinya black-out total pada suatu sistem, hal ini sebetulnya tidak diharapkan.

### 1. 12. 2 Operasi Salah

Operasi yang salah dapat terjadi akibat kesalahan atau kegagalan fungsi atau operasi sistem proteksi yang tidak diharapkan. Kondisi ini dapat menyebabkan pengisoliran yang tidak dibutuhkan. Alasan terjadinya operasi tidak benar dapat berupa satu atau beberapa kombinasi hal-hal berikut ini:

- Aplikasi rele yang salah.
- Setting yang salah
- Kesalahan personal
- Masalah peralatan atau kegagalan (rele, breaker, CT, PT, batere, wiring, pilot channel, auxilliary, etc).

### 1. 12. 3 Tanpa Kesimpulan

Tanpa kesimpulan merujuk kepada kasus dimana satu atau beberapa rele nampaknya beroperasi yang dibuktikan dengan terbukanya PMT, tetapi tidak ada penyebab yang dapat dipastikan. Tidak ada bukti sistem mengalami masalah atau gangguan, tidak ada kerusakan peralatan. Kasus tanpa kesimpulan membutuhkan investigasi yang cukup lama dan pada umumnya kasus ini tidak dicatat dan dilaporkan. Namun demikian, penggunaan peralatan modern, seperti oscillograph dan data recording membuktikan atau menjadi kunci bukti terjadinya hal tersebut.

## 1.13 INFORMASI UNTUK APLIKASI RELE

Aspek tersulit yang kerap ditemui dalam penggunaan rele adalah akurasi yang dibutuhkan. Hal ini sangat berarti dan menolong dalam solusi praktis dan dibutuhkan bagi personal yang terlibat dalam menyelesaikan masalah yang mungkin ada. Beberapa informasi yang dibutuhkan, antara lain:

### 1. 13. 1 Konfigurasi Sistem

Diagram segaris dari sistem tenaga, atau diagram tiga fasa dan wiring diagram sistem secara lengkap dibutuhkan. Lokasi PMT, CT, VT, Generator, Bus/Rel, dan sebagainya harus tergambar secara jelas dan lengkap.

### 1.13. 2 Impedansi dan Hubungan Antar Peralatan, Frekuensi, Tegangan Dan Urutan Fasa Sistem

Informasi mengenai besaran frekuensi, tegangan dan urutan fasa serta parameter lain dibutuhkan pula dalam aplikasi rele. Informasi ini umumnya tergabung dalam konfigurasi sistem

### 1. 13. 3 Masalah dan Proteksi Terpasang

Apabila instalasi sistem tenaga baru terpasang, maka data ini mungkin tidak ada, namun harus diketahui. Informasi mengenai proteksi yang telah ada dan masalah yang ada harus diketahui agar update atau penambahan yang dilakukan dapat lebih baik.

### 1. 13. 4 Prosedur Operasi dan Pemakaian

Penambahan atau perubahan harus dikonfirmasi pada sistem yang ada, prosedur dan keinginan yang akan mempengaruhi proteksi.

### 1. 13. 5 Pentingnya Peralatan Yang Diproteksi

Hal ini seringkali diperlihatkan oleh ukuran dan level tegangan sistem. Contoh, sistem Transmisi tegangan tinggi umumnya diproteksi oleh 'pilot' protection kecepatan tinggi dan sistem tegangan rendah diproteksi dengan time overcurrent. Namun demikian, hal ini harus diklarifikasi sebagai kebutuhan sistem. Secara umum dapat dikatakan, semakin penting peralatan yang dilindungi semakin cepat proteksi yang dibutuhkan.

### 1. 13. 6 Analisis Gangguan Sistem

Studi gangguan sangat penting dalam aplikasi sistem proteksi. Untuk proteksi gangguan fasa dibutuhkan studi gangguan tiga fasa, sedangkan untuk proteksi gangguan-tanah diperlukan studi gangguan satu fasa ke tanah. Studi harus mencakup tegangan urutan nol dan tegangan/arus urutan negatif. Hal ini dibutuhkan terutama bila sensor arah gangguan tanah diperlukan. Pada jaringan, informasi mengenai besar gangguan dari sisi ujung jaringan pada saat breaker terbuka diperlukan dalam banyak kasus. Arus yang tercatat haruslah arus yang akan melalui rele atau fuse bukan arus gangguan total yang terjadi. Studi harus mencantumkan satuan dan besaran yang ada dan digunakan.

### 1.13.7 Beban Maksimum dan Batasan Ayunan Sistem

Beban maksimum yang diperbolehkan lewat pada peralatan dalam waktu singkat atau dalam operasi darurat, dimana peralatan proteksi tidak boleh bekerja harus dinyatakan secara khusus. Apabila diketahui, maksimum ayunan sistem dimana sistem tenaga dapat bertahan setelah terjadi gangguan transien tersebut perlu dicantumkan.

### 1.13. 8 Lokasi CT dan PT, Ratio dan Hubungannya

Data ini biasanya telah diperlihatkan pada diagram satu garis sistem, namun data yang ada biasanya tidak lengkap atau kurang jelas. Apabila terdapat peralatan multi ratio,

maka ratio atau tap yang harus digunakan harus pula dinyatakan dengan jelas. Pentanahan dari PT atau peralatan lain yang bertegangan harus dinyatakan dengan jelas pula.

### 1. 13. 9 Pengembangan Sistem Kedepan

Perkembangan sistem atau perubahan yang mungkin akan direncanakan terjadi harus pula teridentifikasi.

### 1. 14 TATANAMA DAN NOMOR PERALATAN

Tatanama dan singkatan sering digunakan di Amerika. Fungsi dari berbagai tipe rele dan peralatan lain diidentifikasi dengan menggunakan standar tatanama ANSI/IEEE sebagai berikut. Fasa dari sistem tiga fasa ditandai dengan huruf A, B, C atau a, b, c atau r, s, t (Eropa). Penggunaan angka 1, 2, 3 dihindarkan, karena angka-angka ini dipergunakan pula untuk mengidentifikasi hal lainnya. Angka 1 untuk mengidentifikasi urutan positif, angka 2 untuk urutan negatif. Huruf kapital dipergunakan disisi masukan dari bank transformator, sedangkan pada sisi lain digunakan huruf kecil.

Penomoran dengan menggunakan akhiran (suffix) lebih disukai dalam identifikasi fungsi dasar dari peralatan listrik, seperti: PMT, rele, saklar dan seterusnya. Bila peralatan dengan tipe sama digunakan dalam sirkit atau sistem yang sama, maka untuk membedakannya ditambahkan angka/nomor untuk identifikasinya. Huruf yang disertakan setelah nomor identifikasi peralatan merupakan informasi tambahan dalam penggunaan peralatan tersebut. Sayangnya hal ini menyebabkan huruf yang sama digunakan dengan konotasi dan arti yang sangat berbeda. Namun demikian hal ini dapat diketahui dengan mudah dari aplikasinya.

Huruf-huruf dan singkatan berikut sering digunakan sebagai berikut:

A	Alarm
AC or ac	Arus bolak balik
B	Rel, bus, batere, blower
PB	Bypass
BT	Bus tie
C	Arus, close, control, capacitor
CC	Closing coil, coupling capacitor
CS	Control switch, contactor switch
CT	Current transformer
CCTV	Coupling capacitor voltage device
D	Down, direct, discharge
DC/dc	Direct current
E	Exciter, excitation
F	Field, feeder, fan

G*	Ground, generator
GND	Ground
H	Heater, housing
L	Line, lower, level, liquid
M	Motor, metering
MOC	Mechanism-operated contact
MOS	Motor-operated switch
N*	Neutral, network
NC	Normally closed
NO	Normally open
O	Open
P	Power, pressure
PB	Pushbutton
PF	Powerfactor
R	Raise, reactor
S	Speed
T	Transformer, trip
TC	Trip Coil
U	Up
V	Voltage, vacuum
VAR	Reactive Power
VT	Voltage Transformer
W	Watts, water
X,Y,Z	Auxiliary relay

Nomor peralatan yang sering digunakan diberikan dalam daftar berikut ini. Secara lengkap nomor peralatan yang umum digunakan diberikan dalam standar IEEE C37.2-1979.

- 1 Master element: umumnya digunakan untuk peralatan yang dioperasikan manual. Yang umum menggunakan adalah PMT tipe spring return to center control switch, dimana kontak saklar adalah 101T (trip), 101c (close), 101SC (tertutup bila turned to close dan tetap tertutup bila dibuka, terbuka bila turned to trip dan tetap terbuka bila dibuka). Apabila terdapat beberapa breaker, breaker ini diidentifikasi dengan menggunakan nomor 101, 201, 301 dan seterusnya.
- 2 Time delay starting atau closing relay: kecuali untuk fungsi-fungsi peralatan dengan nomor identifikasi 48, 62 dan 79.
- 3 Checking atau interlocking relay.
- 4 Master contactor
- 5 Stopping device
- 6 Starting circuit breaker.
- 7 Anode circuit breaker
- 8 Control power disconnecting device
- 9 Reversing device

- 10 Unit sequence switch
- 11 Overspeed device
- 12 Synchronous-speed device
- 13 Underspeed device
- 14 Speed atau frequency matching device
- 17 Shunting atau discharge switch
- 18 Accelerating atau decelerating device
- 19 Starting to running transition contactor
- 20 Electrically operated valve
- 21 Distance relay
- 22 Equalizer circuit breaker
- 23 Temperature control device
- 24 Synchronizing atau synchronism check device
- 25 Apparatus thermal device
- 26 Undervoltage relay
- 27 Flame detector
- 28 Isolating contactor
- 29 Annunciator relay
- 30 Separate excitation device
- 31 Directional power relay
- 32 Position switch
- 33 Master sequence device
- 36 Polarity atau polarizing voltage device
- 37 Undercurrent atau underpower relay
- 40 Field relay
- 41 Field circuit breaker
- 42 Running circuit breaker
- 43 Manual transfer or selector device
- 46 Reverse-phase atau phase balance relay
- 47 Phase sequence voltage relay
- 48 Incomplete sequence relay
- 49 Machine atau transformer thermal relay
- 50 Instantaneous overcurrent atau rate of rise relay
- 51 Ac time overcurrent relay
- 52 Ac circuit breaker: dengan mekanisme pembukaan kontak sebagai berikut:
  - a) 52a, 52aa: terbuka bila kontak-kontak breaker terbuka, tertutup bila kontak-kontak breaker tertutup.
  - b) 52b, 52bb : tertutup bila kontak-kontak breaker terbuka, terbuka bila kontak-kontak breaker tertutup. (52aa dan 52 bb beroperasi hanya sebagai mekanisme pergerakan start dan dikenal sebagai kontak berkecepatan tinggi)
- 53 Exciter atau dc generator relay
- 55 Power factor relay
- 56 Field application relay
- 57 Short circuiting or grounding device

- 58 Overvoltage relay
- 59 Voltage atau current balance relay
- 62 Time delay stopping atau opening relay
- 63 Pressure switch
- 64 Ground detector relay
- 65 Governor
- 66 Notching atau jogging device
- 67 AC directional overcurrent relay
- 68 Blocking relay
- 69 Permissive control device
- 70 Rheostat
- 71 Level switch
- 72 DC circuit breaker
- 73 Alarm relay
- 76 DC overcurrent relay
- 77 Pulse transmitter
- 78 Phase angle measuring atau out of step protective relay
- 79 AC reclosing relay
- 80 Flow switch
- 81 Frequency relay
- 82 DC reclosing relay
- 83 Automatic selective control atau transfer relay
- 84 Operating mechanism
- 85 Carrier atau pilot wire receiver relay
- 86 Lockout relay
- 87 Differential protective relay
- 88 Line switch
- 89 Regulating device
- 90 Voltage directional relay
- 91 Voltage and power directional relay
- 92 Field changing contactor
- 93 Tripping atau trip free relay.

### 1.15 DEFINISI DAN TERMINOLOGI

Beberapa definisi dan terminologi penting yang sering digunakan dalam pembahasan tentang sistem proteksi antara lain:

#### Burden

Pengenaan beban oleh rangkaian rele pada sumber daya atau sumber yang dinyatakan dengan perkalian antara tegangan dan arus (VA atau Watt) dalam berbagai kondisi, baik dalam penyetelan ataupun dalam rating arus atau tegangan. Rating keluaran dari transformator pengukuran dinyatakan dengan VA dan selalu dalam rating arus atau tegangan. Besaran sangat penting, yang menyatakan

kemampuan pengenaan beban oleh rele, dan pengenaan ini harus selalu dalam batasan rating arus yang ada.

#### Diskriminasi

Kualitas dimana sistem proteksi mampu membedakan antara kondisi dimana rele beroperasi atau rele tidak harus beroperasi.

#### Drop-Out

Rele dikatakan drop-out bila rele bergerak dari posisi energise keposisi sebaliknya.

#### Drop-Out atau Ratio Pick-up

Ratio antara harga batas dari besaran karakteristik dimana rele reset dan beroperasi. Harga ini seringkali disebut harga diferensial rele.

#### Kuantitas Energising

Besaran elektrik, baik arus atau tegangan baik secara terpisah ataupun kombinasi keduanya yang dapat menjadi besaran energising yang dapat diterapkan sebagai penggerak rele agar rele dapat pick-up.

#### Karakteristik Waktu Operasi

Kurva yang memperlihatkan hubungan antara berbagai perbedaan harga dari besaran karakteristik yang dapat diterapkan kepada rele dan relasi waktu operasi dari besaran yang diterapkan tersebut.

#### Kurva Karakteristik

Kurva yang memperlihatkan besaran-besaran operasi dari besaran karakteristik yang berhubungan dengan berbagai variasi harga atau kombinasi dari besaran-besaran energising

#### Penyetelan Efektif

Penyetelan dari sebuah sistem proteksi yang telah mempertimbangkan pengaruh CT. Penyetelan efektif dapat dinyatakan dalam terminologi besaran arus primer atau arus sekunder dari CT yang didesain untuk keperluan tersebut..

#### Proteksi Utama

Sistem proteksi yang diharapkan akan beroperasi pada saat terjadi gangguan dalam daerah proteksinya.

#### Pick-Up

Rele dikatakan pick-up bila rele berubah dari un-energise menjadi energise.

#### Peralatan Proteksi

Peralatan, termasuk rele proteksi, transformator dan peralatan bantu lain yang dipergunakan dalam suatu sistem proteksi.

### Penyetelan

Harga terendah dari besaran karakteristik atau energising yang diperlukan rele untuk dapat beroperasi dalam berbagai kondisi khusus. Beberapa harga biasanya dinyatakan untuk rele tersebut dan dinyatakan dalam harga langsung, persen atau rating atau multiples.

### Proteksi Unit

Suatu sistem proteksi yang didesain untuk hanya beroperasi pada kondisi tidak normal dengan zona perlindungan yang terdefinisi secara jelas.

### Rele Instantaneous

Sebuah rele yang beroperasi dan reset tanpa memerlukan waktu tunda.

Catatan: Setiap rele memerlukan waktu untuk beroperasi, karena itu definisi diatas dapat didiskusikan sesuai dengan karakteristik operasinya.

### Rele Inverse Time Delay

Rele tipe ini memiliki waktu operasi berbanding terbalik dengan fungsi besaran karakteristik elektrik rele tersebut.

### Rele Bantu

Beban yang ditimbulkan oleh rangkaian yang terhubung

### Rele Proteksi

Suatu rele yang didesain untuk dapat menginisiasi pemutusan bagan sistem tenaga elektrik atau untuk memberikan sinyal, pada saat terjadi gangguan atau kondisi tidak normal. Rele proteksi juga termasuk lebih dari satu unit rele elektrik dan asesories lainnya.

### Sistem Proteksi Gangguan Tanah

Suatu sistem proteksi yang didesain hanya akan bereaksi bilamana terjadi gangguan tanah pada sistem tersebut.

### Waktu Operasi

Dengan rele de-energisi dan dalam kondisi awalnya, waktu yang dibutuhkan antara saat besaran karakteristik dirasakan dan saat dimana rele beroperasi.

### Waktu Tunda

Waktu yang dibutuhkan untuk menunda operasi sebuah sistem rele.

### Zona Proteksi

Bagian dari suatu proteksi sistem tenaga yang diberi suatu sistem proteksi atau bagian dari suatu sistem proteksi.

## 1. 16 SISTEM KONTAK RELE

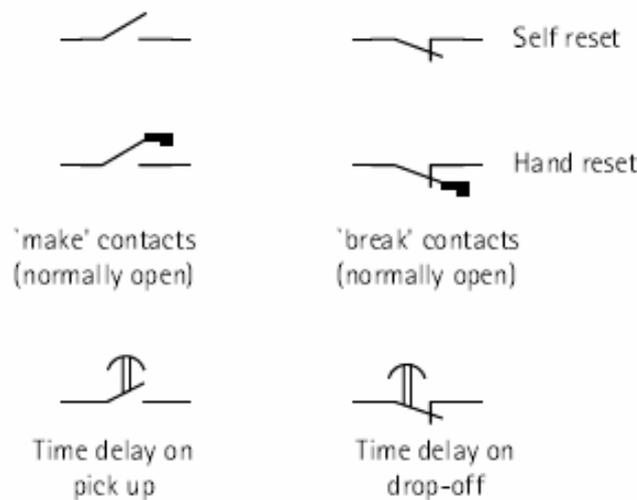
Terdapat dua tipe sistem kontak rele, yaitu:

### a. Reset Sendiri

Kontaktor tetap bekerja selama besaran pengendalinya diterapkan dan akan kembali keposisi awal bilamana besaran pengendali hilang atau berkurang

### b. Reset Elektris atau Manual

Kontaktor akan tetap dalam posisi operasi meskipun besaran pengendali telah hilang atau berkurang. Kontak dapat dikembalikan keposisi awal dengan cara manual atau dengan bantuan elemen elektromagnetis



Gambar 1-10: Indikasi dari kontak-kontak dalam sebuah diagram

Kebanyakan elemen rele proteksi merupakan tipe reset sendiri dan bila diperlukan dapat dibuat kontak keluaran yang reset manual. Rele dengan kontak tipe reset manual dibutuhkan untuk menjaga sinyal tetap kontinyu atau untuk penguncian. Kontak-kontak pada diagram digambarkan dalam posisi yang berhubungan dengan tidak beroperasinya atau de-energise. Kontak 'pembuat' adalah suatu posisi tertutup bila rele pick-up, dimana kontak membuka adalah kondisi menutup pada saat rele de-energise dan terbuka saat rele pick-up. Contoh dari konvensi ini diperlihatkan pada Gambar 1-10

## 1. 17 INDIKATOR OPERASI

Sebagai petunjuk bagi personel sistem tenaga elektrik, sistem proteksi dilengkapi pula dengan indikator. Menurut standar Inggris indikator ini disebut 'flag', sedangkan Amerika menyebutnya sebagai 'target'. Tidak setiap keadaan rele diberi indikator. Hanya kondisi operasi pemutusan saja yang diberi indikator. Dengan beberapa pengecualian, umumnya digunakan komponen bistable untuk keperluan ini, baik yang beroperasi secara mekanis maupun elektrik. Indikator mekanis terdiri dari sebuah jendela kecil yang dapat membuka atau menutup guna menunjukkan kondisi operasi rele.

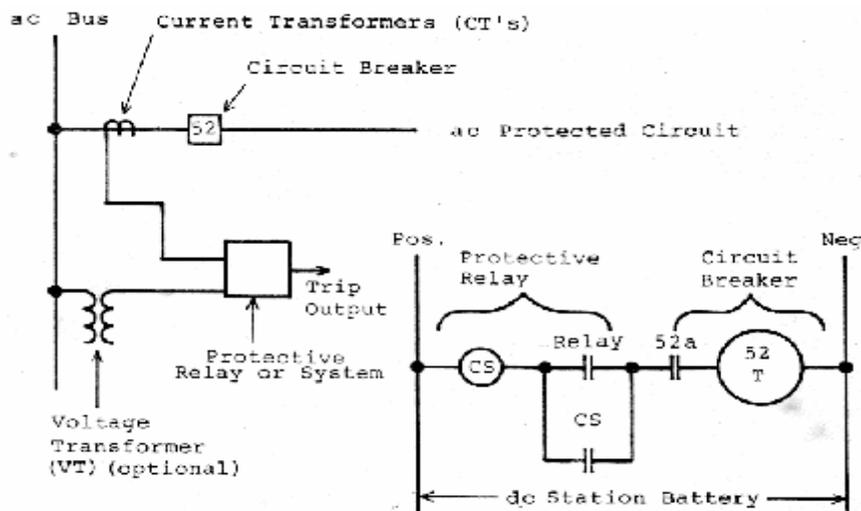
Sebagai flag biasanya digunakan striping diagonal berwarna merah dengan latar belakang putih. Indikator elektrik sederhana berupa elemen jangkar yang akan tertarik bila rele energise. Jangkar akan membuka jendela untuk menandai operasi tersebut. Alternatif indikator lain berupa silinder magnetis permanen.

### 1. 18 TIPIKAL HUBUNGAN RELE DAN PMT

Rele proteksi yang digunakan dihubungkan ke sistem tenaga elektrik melalui CT dan atau VT. Peralatan masukkan ini atau transformator-transformator ini digunakan untuk memisahkan rele dari sistem yang bertegangan tinggi dan mengurangi magnitude tegangan atau arus sampai level sekunder sesuai dengan kemampuan rele proteksi. Secara skematis tipikal hubungan rele proteksi dan PMT diperlihatkan dalam Gambar 1-11 berikut. Dalam Gambar ditunjukkan diagram skematik dari 'on line' ac dan skematis sirkit tripping dc.

Sistem rele proteksi dihubungkan ke sistem tenaga elektrik melalui CT yang umumnya disertai dengan PMT dan bila dibutuhkan juga dilengkapi VT (PT). Dalam gambar keduanya digunakan pada rel daya Gardu, namun pada sistem tegangan tinggi, VT dihubungkan pada jaringan Transmisi. PMT didalam gambar diberi nomor 52 sesuai dengan sistem penomoran standar ANSI/IEEE.

Pada dc skematik, kontak-kontak selalu diperlihatkan dalam posisi de-energise Dengan demikian bila PMT tertutup dan dalam keadaan beroperasi, kontaktor 52a tertutup. Pada saat terjadi gangguan yang diikuti dengan beroperasinya sistem rele, kontak keluaran rele menutup dan akan menyebabkan koil trip PMT 52T energize, yang fungsinya membuka kontak-kontak PMT dan memutuskan sirkit daya yang dihubungkan oleh PMT tersebut.



Gambar 1-11: Tipikal hubungan rele proteksi dan Pemutus Tenaga

Kontak-kontak rele tidak didesain untuk memutuskan arus koil tripping PMT, jadi dalam prakteknya digunakan rele bantu CS yang berfungsi sebagai seal in atau bypass dari kontak-kontak rele seperti diperlihatkan dalam gambar. Bila PMT terbuka, saklar 52a akan terbuka untuk deenergize koil tripping 52T. Interupsi gangguan yang dikerjakan oleh PMT akan membuka kontak-kontak rele proteksi sebelum membuka kontak 52a.

Kontaktor Bantu (CS) yang dipergunakan sebagai suplemen dalam sebuah sistem proteksi rele dapat dihubungkan dengan tiga cara, yaitu:

a. Series sealing

Koil dari kontaktor serial membawa arus pemutus yang diinisiasi oleh rele proteksi dan kontaktor akan menutup kontak-kontak yang terpasang paralel dengan kontak-kontak rele proteksi. Keadaan ini membuat kontak-kontak rele protektif tetap pada posisinya dan menjaga agar rangkaian pemutus tetap tertutup, meski terjadi getaran pada kontak utamanya. Tidak ada waktu tambahan untuk operasi dan indikator tidak akan beropersai sampai arus betul-betul melewati koil pemutusan. Kelemahan dari metoda ini adalah semua elemen seri harus memiliki kecocokan dengan rangkaian pemutus.

b. Shunt reinforced

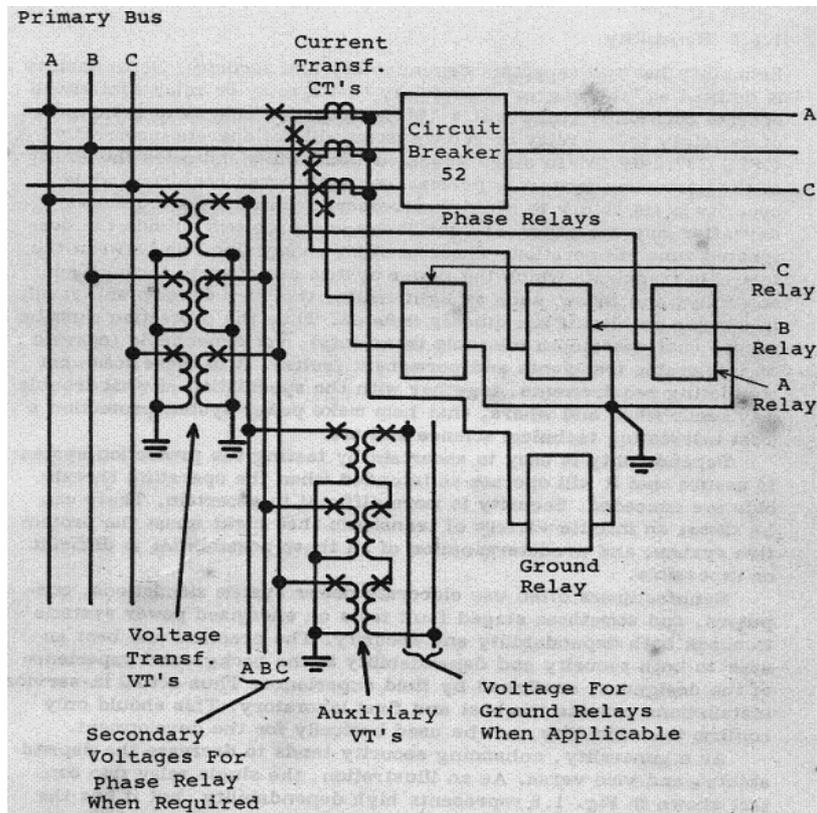
Disini dipergunakan kontak sensitif yang diatur untuk memutus PMT dan secara simultan meng-energise unit tambahan, yang kemudian mendorong kontak-kontak yang akan meng-energise koil pemutus. Harus dicatat bahwa dibutuhkan dua kontak untuk kebutuhan rele proteksi, karena tidak diperkenankan untuk mengenergise koil pemutus dan kontaktor penguat secara paralel. Jika hal ini terjadi, dan lebih dari satu rele proteksi yang terhubung pada koil pemutus PMT yang sama, seluruh rele bantu akan energise secara paralel untuk setiap operasi rele dan indikator akan membingungkan. Duplikasi kontak utama kerap dipergunakan untuk mengurangi jumlah titik kontak.

c. Shunt reinforced with sealing.

Ini adalah pengembangan dari cara b, agar memungkinkan rele dengan torka rendah dapat digunakan atau dimana dapat terjadi kemungkinan munculnya loncatan bunga api pada kontak atau untuk alasan lain.

Tipe-tipe peralatan interuptor yang beroperasi secara baik berdasarkan arus lebih yang lewat selama gangguan atau atas dasar operasi dc trip koil. Tipe pertama didesain sebagai trip seri, direct acting, direct release, indirect release dan over current release. Pada umumnya semua built-in pada unit rele arus lebih, dimana level arus yang dipilih dapat disesuaikan. Tipe-tipe ini umumnya digunakan pada sistem tegangan rendah. Pada sistem tegangan tinggi, setiap Gardu dimana rele terpasang dilengkapi dengan batere yang berfungsi sebagai catu daya bagi trip koil. Suplai dc ini menjadi salah satu bagian yang amat penting dalam sistem proteksi dan memerlukan perhatian dan tingkat pemeliharaan yang tinggi untuk menjaga tingkat keandalannya. Kebanyakan rele

proteksi dikemas sebagai suatu unit fasa individual dan unit ground, sehingga untuk sistem tiga fasa dan gangguan tanah dibutuhkan 4 buah rele. Dalam Gambar 1-12 diperlihatkan tipikal hubungan rele tersebut.

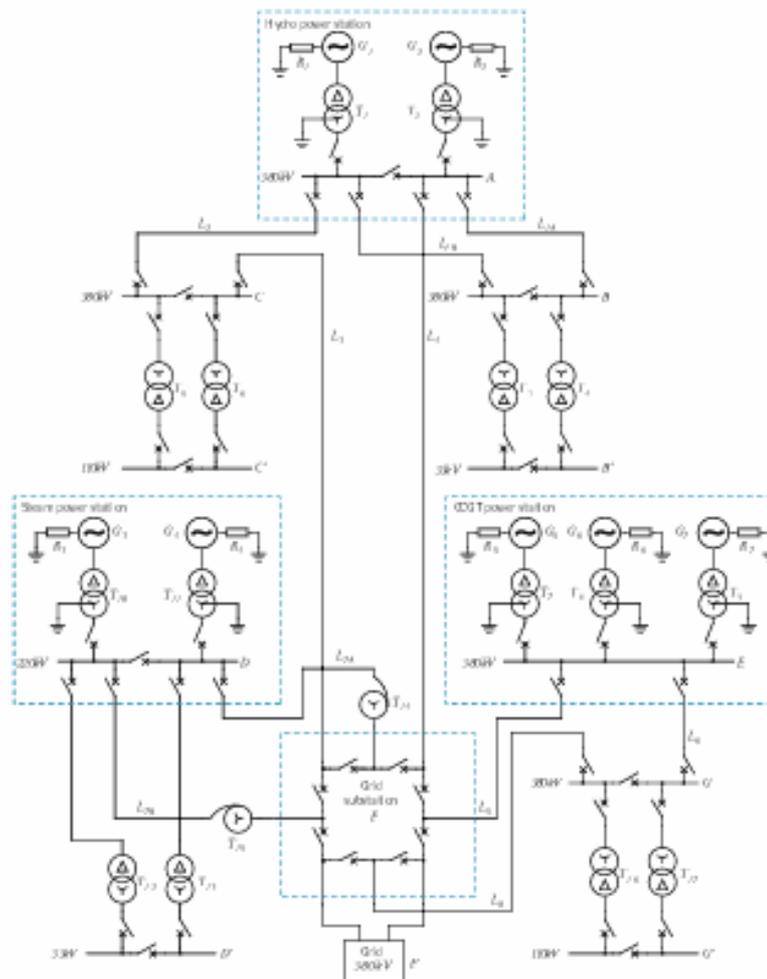


Gambar 1-12: Tipikal hubungan rele-rele Fasa dan rele Tanah untuk proteksi sistem tenaga

## BAB 2 SATUAN-SATUAN DASAR: HARGA PERUNIT DAN PERSEN

### 2.1 PENDAHULUAN

Sistem tenaga elektrik beroperasi pada tegangan tertentu. Umumnya satuan yang dipergunakan untuk menyatakan besaran tegangan ini adalah kilovolt (kV). Sistem seperti ini berfungsi pula untuk mendistribusikan sejumlah besar daya elektrik. Satuan yang dipergunakan untuk menyatakan daya elektrik ini adalah kilovolt-ampere (kVA) dan megavolt-ampere (MVA). Besaran-besaran ini, dan besaran lain seperti kilowatt (kW), kilovars (kVAR), ampere (A), Ohm ( $\Omega$ ), fluks dan lainnya biasanya dinyatakan dalam per-unit (pu) atau dalam persen (%) dari harga dasarnya atau harga acuannya. Penggunaan besaran pu dan persen kerap digunakan karena mudah menyatakan dan menghitungnya, terutama bila terdapat perbedaan level tegangan dan ukuran peralatan dalam sistem tersebut.



Gambar 2-1: Tipikal jaringan Sistem Tenaga Elektrik

Komponen utama dari sebuah sistem tenaga elektrik adalah sistem pembangkitan, sistem Transmisi dan sistem Distribusi. Tipikal sebuah sistem tenaga elektrik diperlihatkan dalam Gambar 2-1. Insinyur sistem tenaga elektrik sangat memperhatikan operasi sistem dan pengaruh gangguan terhadap sistem yang bila terjadi dapat menyebabkan kerusakan pembangkit dan menghentikan suplai energi elektrik. Gangguan-gangguan ini dapat berupa hubung singkat, konduktor terbuka atau ayunan sistem yang disebabkan oleh sambaran petir, kegagalan pembangkit atau kesalahan manusia. Untuk dapat sesegera mungkin dalam mengisolir gangguan yang terjadi, sistem tenaga elektrik dibagi-bagi dalam zona proteksi tertentu dan rele digunakan untuk memantau besaran-besaran elektrik pada zona-zona tersebut. Bila terjadi perubahan besaran elektrik di zona tertentu, rele akan menginisiasi proses pemutusan guna mengisolir zona tersebut.

## 2. 2 DEFINISI PERUNIT DAN PERSEN

Persen artinya 100 kali pu. Keduanya dapat digunakan dan pilihan sistem yang akan digunakan tergantung kepada pemakainya, penggunaan % atau pu harus dinyatakan dalam setiap analisis yang dikerjakan.

Harga pu dari besaran elektrik yang digunakan merupakan ratio besaran tersebut terhadap besaran acuan atau besaran dasar, ratio ini tanpa dimensi dan merupakan bilangan desimal. Besaran aktual, seperti tegangan (V), arus (I), daya (P), daya reaktif (Q), volt-ampere (VA), resistansi (R), reaktansi (X) dan impedansi (Z) dapat dinyatakan dalam pu atau % sebagai berikut:

$$\text{Besaran dalam pu} = \frac{\text{Besaran Aktual}}{\text{Besaran Dasar atau acuan}} \quad 2-1$$

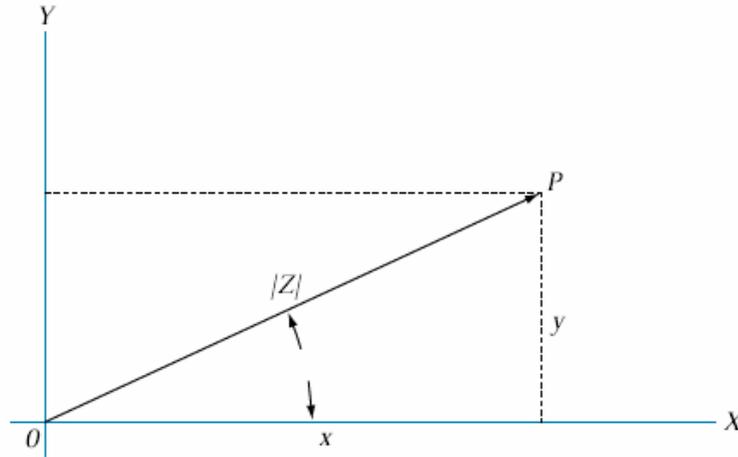
$$\text{Besaran dalam \%} = \text{besaran dalam pu} \times 100 \quad 2-2$$

Dimana besaran aktual merupakan harga skalar atau kompleks dari besaran elektrik tersebut yang dinyatakan dengan satuan yang sesuai, seperti: volt, ampere, ohm atau watt, sedangkan besaran dasar atau acuan adalah besaran tertentu yang dipilih sesuai dengan kebutuhan dan ditetapkan sebagai acuan. Jadi sistem pu atau % adalah besaran tanpa dimensi yang dapat berupa bilangan skalar atau kompleks.

## 2. 3 ALJABAR VEKTOR

Suatu vektor menggambarkan suatu besaran baik dalam magnitud maupun arah. Gambar 2-2 memperlihatkan vektor  $\vec{OP}$  yang memiliki magnitud sebesar  $|Z|$  dengan sudut sebesar  $q$  terhadap sumbu axis OX. Besaran ini dapat dipecah menjadi dua komponen x dan y. Magnitud atau harga skalar dari vektor  $\vec{Z}$  disebut dengan modulus

$|Z|$  dan sudut  $q$  disebut argumen atau amplitudo. Metoda konvensional untuk mengekspresikan vektor  $\vec{Z}$  adalah  $|Z|\angle q$ . Bentuk ini merupakan representasi yang spesifik dari suatu vektor untuk penggambaran secara grafis atau dikonversikan dalam bentuk lain.



Gambar 2-2: Vektor  $\vec{OP} = \vec{Z} = |Z|\angle\theta$

Agar sebuah vektor dapat berguna, maka vektor tersebut harus diekspresikan dalam bentuk aljabar. Vektor  $\vec{Z}$  pada Gambar 2-2 merupakan penjumlahan secara vektoris komponen x dan y. Secara aljabar vektor ini dapat ditulis sebagai berikut:

$$\vec{Z} = x + jy \quad 2-3$$

Dimana  $j$  menunjukkan bahwa komponen  $y$  tegak lurus terhadap komponen  $x$ . Tatanama dalam sistem kelistrikan, sumbu axis  $OX$  adalah sumbu REAL atau sefasa, dan sumbu vertikal  $OY$  disebut sumbu imajiner atau sumbu kuadratur. Simbol  $j$ , yang bersatu dengan komponen  $y$ , dapat pula dikatakan sebagai sebuah operator yang memperlihatkan perputaran sebesar  $90^\circ$  berlawanan dengan arah putaran jarum jam. Jika vektor tersebut diputar  $180^\circ$ , artinya fungsi operator  $j$  bekerja dua kali, dengan kata lain bilamana  $j = \sqrt{-1}$ , maka  $jj$  atau  $j^2 = -1$

Representasi dari sebuah besaran vektor secara aljabar dalam koordinat rektanguler disebut besaran kompleks, oleh karena itu  $x + jy$  adalah besaran kompleks dan dalam bentuk rektanguler  $|Z|\angle q$ , dimana:

$$|Z| = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{sedangkan} \quad q = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad 2-4a$$

Dan

$$x = |Z| \cos q \quad \text{dengan} \quad y = |Z| \sin q \quad 2-4b$$

Dalam bentuk lain vektor  $\vec{Z}$  dapat juga dinyatakan dalam bentuk sebagai berikut:

$$\vec{Z} = |Z|(\cos q + j \sin q) \quad 2-5$$

Mengingat bahwa  $\cos q$  dan  $\sin q$  dapat dinyatakan dalam bentuk eksponensial dimana:

$$\sin q = \frac{e^{jq} - e^{-jq}}{2j} \quad \text{dan} \quad \cos q = \frac{e^{jq} + e^{-jq}}{2}$$

Sehingga vektor  $\vec{Z}$  dapat dinyatakan dalam bentuk sebagai berikut:

$$\vec{Z} = |Z|e^{jq} \quad 2-6$$

Oleh karena itu sebuah besaran vektor dapat pula dituliskan dalam bentuk trigonometri ataupun eksponensial.

## 2. 4 MANIPULASI BESARAN-BESARAN KOMPLEKS

Besaran kompleks dapat dinyatakan dalam salah satu dari empat bentuk berikut:

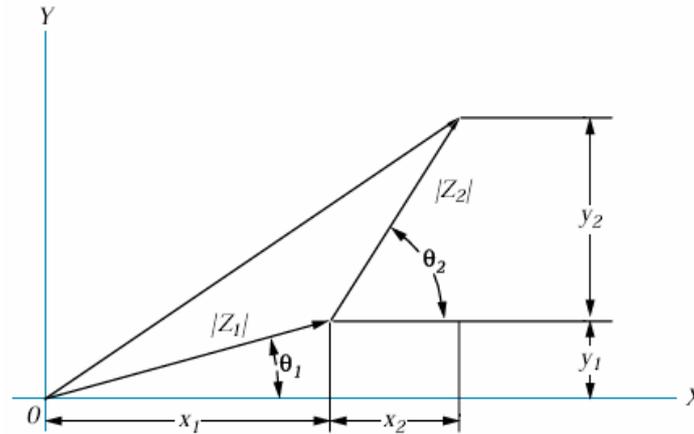
- a. Konvensional  $|Z|\angle q$
- b. Rektangular  $x + jy$
- c. Trigonometrik  $|Z|(\cos q + j \sin q)$
- d. Eksponensial  $|Z|e^{jq}$

Modulus  $|Z|$  dan argumen  $q$  keduanya dikenal sebagai koordinat polar, sedangkan  $x$  dan  $y$  disebut sebagai koordinat kartesian. Dapat dilihat bahwa, jika diperoleh besaran dalam salah satu koordinat, maka besaran dalam koordinat lainnya pun dapat diperoleh. Manipulasi besaran kompleks dapat dilakukan dengan menggunakan salah satu bentuk koordinat diatas.

### 2. 4.1 Penjumlahan dan Pengurangan

Gambar 2-3 memperlihatkan penjumlahan dua vektor  $\vec{Z}_1 = |Z_1|\angle q_1$  dan  $\vec{Z}_2 = |Z_2|\angle q_2$ . Vektor resultan adalah penjumlahan masing-masing komponen dari kedua vektor, sehingga dengan menggunakan koordinat kartesian diperoleh:

$$\begin{aligned} \vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 &= (x_1 + jy_1) + (x_2 + jy_2) \\ &= (x_1 + x_2) + j(y_1 + y_2) \end{aligned} \quad 2-7$$



Gambar 2-3: Penjumlahan dua vektor

Sedangkan untuk pengurangan, dengan cara yang sama diperoleh:

$$\begin{aligned} \vec{Z}_1 - \vec{Z}_2 &= (x_1 + jy_1) - (x_2 + jy_2) \\ &= (x_1 - x_2) + j(y_1 - y_2) \end{aligned} \quad 2-8$$

Dari diagram yang disajikan dalam Gambar 2-3 dan persamaan diatas dapat dilihat besaran kompleks dalam bentuk rektangular dapat dimanipulasi secara aljabar.

#### 2. 4.2 Pembagian dan Perkalian

Menggunakan bentuk rektangular dan berdasarkan hukum-hukum aljabar, perkalian dua buah vektor dapat dilaksanakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \vec{Z}_1 \vec{Z}_2 &= (x_1 + jy_1)(x_2 + jy_2) \\ &= x_1x_2 + jx_1y_2 + jx_2y_1 + j^2y_1y_2 \end{aligned}$$

Mengingat bahwa  $j^2 = -1$ , maka

$$\vec{Z}_1 \vec{Z}_2 = (x_1x_2 - y_1y_2) + j(x_1y_2 + x_2y_1) \quad 2-9$$

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa  $x_1x_2$  adalah fungsi cosinus dan  $y_1y_2$  adalah fungsi sinus. Jadi bagian real dari vektor resultan hasil perkalian sama dan identik dengan  $|Z_1||Z_2|\cos(q_1 + q_2)$  dan bagian imajiner sama dan idektik dengan  $|Z_1||Z_2|\sin(q_1 + q_2)$ . Bila dikonversi dalam bentuk konvensional, menggunakan koordinat polar, maka:

$$\vec{Z}_1 \vec{Z}_2 = |Z_1| |Z_2| \angle q_1 + q_2 \quad 2-10$$

Dengan katalain perkalian dua buah vektor, dilakukan dengan cara mengalikan kedua modulusnya dan menjumlahkan kedua argumen, sedangkan untuk pembagian dilakukan dengan cara membagi kedua modulus dan memperkurangkan kedua argumennya sebagai berikut:

$$\frac{\vec{Z}_1}{\vec{Z}_2} = \frac{|Z_1|}{|Z_2|} \angle q_1 - q_2 \quad 2-11$$

### 2. 4.3 Bilangan Komplek

Bilangan kompleks mungkin didefinisikan sebagai sebuah konstanta yang merepresentasikan komponen-komponen real dan imajiner dari suatu besaran fisis. Parameter impedansi dari sebuah rangkaian elektrik adalah sebuah bilangan kompleks yang memiliki komponen real dan imajiner yang masing-masing menyatakan besaran resistansi dan reaktansi. Kerap kali kita dibingungkan oleh vektor dan bilangan kompleks. Sebuah vektor, seperti yang didefinisikan pada bagian terdahulu mungkin saja merupakan bilangan kompleks. Dalam konteks ini, vektor merupakan penyederhanaan dari suatu besaran fisis yang memiliki magnitud konstan dan arah yang konstan. Bilangan kompleks, bila merupakan sebuah besaran fisis, rangsangan dan respon dari sebuah operasi yang dikenal sebagai operator kompleks. Dalam konteks ini, terlihat jelas bedanya dengan vektor. Karena bilangan kompleks dalam setiap kalkulasi diasumsikan mengikuti aturan pasif, metoda untuk merepresentasikannya ditentukan oleh bagaimana bentuk variabel tersebut.

### 2. 4.4 Operator-Operator

Operator-operator adalah bilangan kompleks yang dipergunakan untuk menggerakkan suatu vektor melewati sudut tertentu tanpa merubah magnitud atau karakter dari vektor tersebut. Suatu operator bukanlah sebuah besaran fisis dan tidak memiliki dimensi. Simbol  $j$ , yang tergabung dengan komponen kuadratur dari besaran kompleks, merupakan sebuah operator yang memutar sebuah vektor sebesar  $90^\circ$  berlawanan dengan arah putaran jarum jam. Operator lainnya yang kerap dipergunakan adalah sebuah operator yang dapat memutar sebuah vektor sebesar  $120^\circ$ , yang dinyatakan dengan simbol-simbol  $a$ ,  $h$  dan  $l$ . Simbol  $a$  adalah simbol yang lebih sering dipergunakan untuk menyatakan operator tersebut dan dalam buku ini hanya akan menggunakan simbol  $a$ .

Operator-operator dibedakan oleh satu fitur lebih. Operator adalah akar dari satuan. Menggunakan teorema De Moivre's, akar ke n dari satuan diberikan dengan menyelesaikan ekspresi berikut:

$$1^{1/n} = (\cos 2pm + j \sin 2pm)^{1/n}$$

Dimana m adalah bilangan integer. Darimana:

$$1^{1/n} = \cos \frac{2pm}{n} + j \sin \frac{2pm}{n}$$

Dimana m merupakan bilangan 1, 2, 3,.....(n-1). Dari ekspresi diatas j adalah akar ke 4 dan a adalah akar ke 3 dari kesatuan, dimana masing-masing memiliki empat dan tiga harga nyata. Berikut ini diberikan beberapa fungsi yang berguna dari operator a.

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{2p}{3}}$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{4p}{3}}$$

$$1 = 1 + j0 = e^{j0}$$

$$a - a^2 = j\sqrt{3}$$

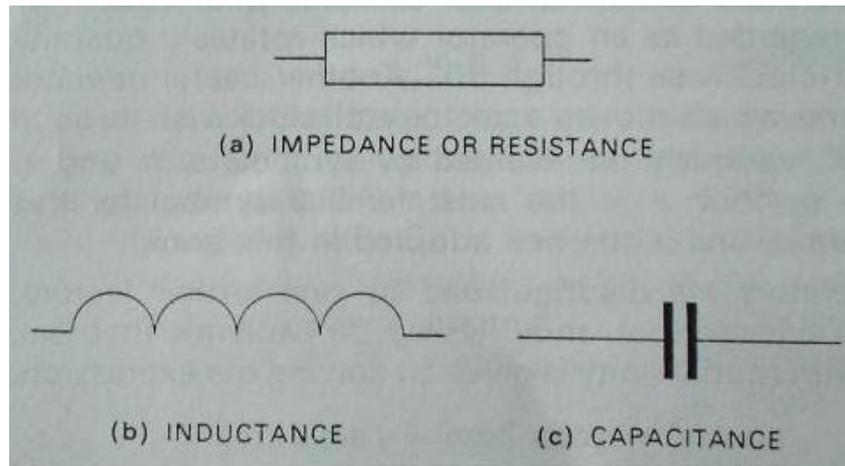
$$1 + a + a^2 = 0$$

$$j = \frac{a - a^2}{\sqrt{3}}$$

$$1 - a = j\sqrt{3}a^2$$

## 2. 5 BESARAN RANGKAIAN DAN KONVENSI

Analisis rangkaian merupakan sebuah studi mengenai respon suatu rangkaian pada kondisi tertentu, sebagai contoh terjadinya hubung singkat. Variabel rangkaian adalah tegangan dan arus. Secara konvensional, arus mengalir bila tegangan diterapkan, tetapi dalam hal ini terjadi dualitas antara variabel dan yang mana sebagai penyebab lainnya. Bila terdapat rangkaian, maka terjadi pemindahan energi. Suatu rangkaian dapat dinyatakan sebagai sebuah sumber energi atau pemakai energi. Bagian-bagian dari rangkaian disebut sebagai elemen. Sumber dapat dikatakan sebagai elemen aktif dan pemakai sebagai elemen pasif. Beberapa elemen rangkaian bersifat disipatif, dimana elemen ini secara kontinyu mengkonsumsi energi yang diberikan, misalnya resistansi. Elemen lain mungkin memiliki sifat sebagai sumber dan sekaligus pemakai energi, contohnya induktor dan kapasitor. Elemen-elemen rangkaian terhubung satu dan lainnya membentuk suatu jaringan yang memiliki simpul (terminal) dan cabang-cabang (kumpulan elemen terhubung seri) membentuk sebuah sirkit tertutup.



Gambar 2-4: Simbol-simbol umum elemen rangkaian

Dalam Gambar 2-4 diperlihatkan beberapa simbol elemen rangkaian. Dalam teori rangkaian ac tunak, kemampuan rangkaian untuk menerima aliran arus yang berasal dari sumber tegangan yang diberikan disebut sebagai impedansi rangkaian. Karena tegangan dan arus adalah dwiguna maka parameter rangkaianpun dwiguna, yang disebut dengan admitansi. Tegangan dan arus merupakan fungsi sinusoidal terhadap waktu dan memiliki frekuensi tunggal dan konstan. Parameter rangkaian (baik impedansi maupun admitansi) adalah sebuah sistem linear, bilateral (bebas arah arus) dan konstan dalam harga untuk frekuensi yang konstan.

### 2. 5.1 Variabel Rangkaian

Tegangan dan arus merupakan fungsi sinusoidal terhadap waktu, bervariasi pada frekuensi tunggal dan konstan, keduanya berhubungan dengan vektor berputar dan dapat digambarkan sebagai sebuah vektor bidang (vektor yang didefinisikan dengan dua sumbu koordinat) pada sebuah vektor diagram. Sebagai contoh, harga sesaat dari  $e$ , sebuah tegangan yang bervariasi terhadap waktu adalah:

$$e = E_m \sin (wt + d) \quad 2-12$$

Dimana:

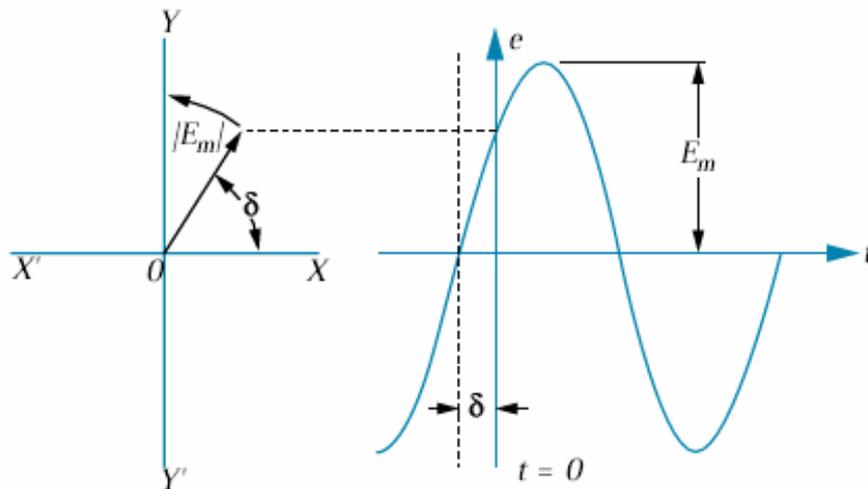
$E_m$  adalah amplitudo maksimum dari gelombang

$w = 2\pi f$  adalah kecepatan angular

$f$  = merupakan frekuensi dan

$d$  = adalah argumen untuk menyatakan amplitudo tegangan pada waktu  $t = 0$

Pada  $t = 0$ , harga aktual dari tegangan adalah  $E_m \sin d$ . Sehingga bila  $E_m$  merupakan modulus dari suatu vektor dengan argumen  $d$ , maka  $E_m \sin d$  adalah komponen imajiner dari vektor  $|E_m| \angle d$ . Dalam Gambar 2-5 diperlihatkan ilustrasi besaran ini sebagai vektor dan juga sebagai fungsi sinusoidal.



Gambar 2-5: Representasi sebuah fungsi sinusoidal

Arus yang dihasilkan dari penerapan tegangan pada sebuah rangkaian elektrik tergantung pada impedansi rangkaian. Jika tegangan merupakan fungsi sinusoidal dan diberikan dalam frekuensi tertentu, bila impedansi konstan maka arus akan mengalir pada impedansi tersebut juga bervariasi secara harmonis pada frekuensi yang sama, sehingga dapat diperlihatkan pada sebuah diagram vektor yang sama dan dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$i = \frac{|E_m|}{|Z|} \sin(\omega t + d - f) \quad 2-13$$

Dimana

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$X = \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad 2-14$$

$$f = \tan^{-1} \frac{X}{R}$$

Dari persamaan 2-13 dan 2-14 dapat dilihat bahwa pergeseran angular  $f$  antara vektor arus dan tegangan dan magnitud arus  $|I_m| = \frac{|E_m|}{|Z|}$ , tergantung pada  $\vec{Z}$ . Dalam bentuk

bilangan kompleks impedansi  $\vec{Z}$  dapat dituliskan sebagai  $\vec{Z} = R + jX$ , bagian komponen real  $R$  adalah resistansi dan bagian komponen imajiner  $X$  adalah reaktansi. Jika reaktansi rangkaian adalah induktif (dimana  $\omega L > 1/\omega C$ ) arus tertinggal (lag) terhadap tegangan sebesar sudut  $f$ , sebaliknya bilamana reaktansi rangkaian kapasitif ( $\omega L < 1/\omega C$ ), arus mendahului (lead) terhadap tegangan sebesar sudut  $f$ .

Konvensi yang digunakan dalam menggambarkan kedua vektor diagram adalah dengan memilih salah satu vektor sebagai acuan dan merelasikan vektor lainnya dengan vektor acuan ini berdasarkan sudut lag dan lead. Besaran  $|Z|$  yang disebutkan sebagai impedansi rangkaian adalah sebuah operator kompleks dan dibedakan dari sebuah vektor karena besaran ini tidak memiliki arah. Konvensi lain yang digunakan dalam menjelaskan besaran-besaran sinusoidal ini, antara lain besaran *efektif* atau root mean square (rms), yang kerap kali ditulis dengan simbol (tanpa akhiran) sebagai berikut:

$$|I| = \frac{|I_m|}{\sqrt{2}} \quad 2-15$$

$$|E| = \frac{|E_m|}{\sqrt{2}}$$

Harga rms adalah harga yang memiliki efek pemanasan yang sama seperti besaran arus searah yang mengalir dalam rangkaian tersebut.

## 2. 5.2 Tegangan Rise, Tegangan Jatuh, Arah Aliran Arus dan Notasi

Untuk menjelaskan kondisi suatu rangkaian elektrik kerap kali mengacu pada perbedaan potensial antara dua titik dalam rangkaian tersebut. Bila terdapat beda potensial, maka arus akan mengalir dan energi elektrik akan ditransfer atau diserap oleh rangkaian tersebut. Oleh karena alasan tersebut terminologi tegangan rise dan tegangan jatuh akan digunakan untuk mendefinisikan secara akurat dan alamiah mengenai beda potensial. Tegangan rise adalah suatu kenaikan potensial yang diukur antara dua titik searah dengan aliran arus dalam suatu rangkaian dan energi ditransfer dari titik tersebut keseluruhan. Jadi tegangan rise adalah tegangan pengendali dari suatu rangkaian yang mengandung elemen aktif dan merupakan sumber energi elektrik bagi rangkaian tersebut. Tegangan jatuh adalah suatu beda potensial yang diukur searah dengan aliran arus antara dua titik dalam suatu rangkaian, dan energi diserap oleh elemen rangkaian tersebut. Dengan katalain tegangan jatuh adalah tegangan pasif yang muncul pada elemen rangkaian yang mengandung elemen pasif dan karenanya energi akan diserap pada bagian elemen tersebut.

Menurut Hukum Kirchhoff pertama 'Dalam sebuah rangkaian tertutup jumlah tegangan rise (pengendali) sama dengan jumlah tegangan jatuh.' Hal ini diperlihatkan dengan persamaan dasar berikut ini:

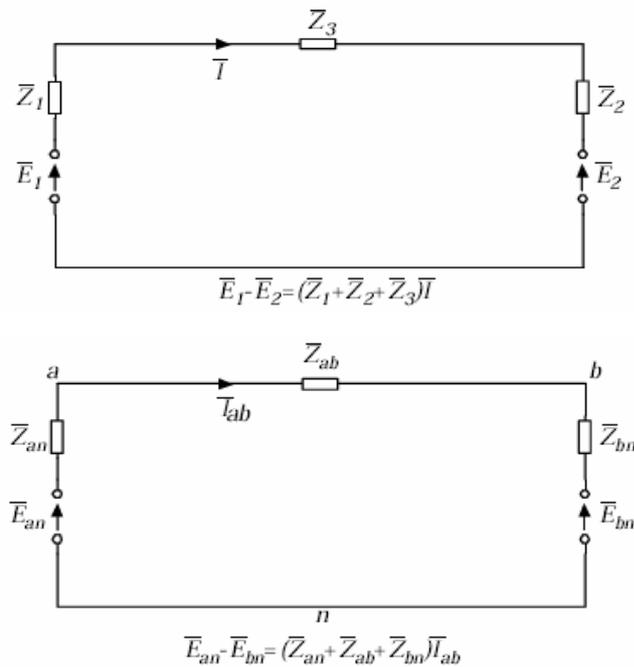
$$iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = e \quad 2-16$$

Bagian kiri dari persamaan diatas adalah representasi tegangan jatuh pada elemen rangkaian, masing-masing resistor, induktor dan kapasitor, sedangkan bagian kanan

adalah representasi dari tegangan rise. Dalam bentuk tunak, persamaan diatas dapat dituliskan menjadi:

$$\sum \vec{E} = \sum \vec{I}\vec{Z} \quad 2-17$$

Persamaan diatas dikenal dengan persamaan kesamaan tegangan. Untuk kebutuhan analisis formal atau perhitungan, dibutuhkan notasi yang menunjukkan arah aliran arus positif dan menyatakan arah positif dari tegangan jatuh dan tegangan rise. Untuk kebutuhan ini, dikenal dua metoda, yaitu: 1. Metoda dua akhiran, yang digunakan untuk analisis simbolik dan 2. Metoda satu akhiran atau metoda diagramatik untuk kebutuhan perhitungan numeris.



Gambar 2-6: Pemodelan Rangkaian Elektrik

Dalam metoda 2 akhiran, arah arus positif diasumsikan bergerak dari simpul a menuju simpul b dan arus dinyatakan dengan  $\vec{I}_{ab}$ . Dalam metoda digramatik arah aliran arus diperlihatkan oleh arah anak panah. Tegangan rise adalah positif bila arahnya searah dengan aliran arus. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 2-6, terlihat bahwa  $\vec{E}_1$  dan  $\vec{E}_{an}$  dalah tegangan rise positif. Dalam diagram, arah ini diperlihatkan dengan arah anak panah, sedangkan untuk metoda dua akhiran,  $\vec{E}_{an}$  dan  $\vec{E}_{bn}$  menunjukkan bahwa tegangan rise dalam arah na dan nb. Tegangan jatuh juga dalam arah positif bilamana searah dengan arah aliran arus. Dari Gambar 2-6a dapat dilihat bahwa  $(\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_3)\vec{I}$  adalah total tegangan jatuh dalam loop berdasarkan arah aliran arus dan harus sama dengan  $\vec{E}_1 - \vec{E}_2$ . Dalam Gambar 2-6b, tegangan jatuh antara simpul a dan b dinyatakan dengan  $\vec{V}_{ab}$  yang menunjukkan bahwa tegangan simpul b lebih

rendah dari simpul a dan berharga positif bila arus mengalir dari a ke b. Sebaliknya dengan  $\vec{V}_{ba}$  adalah tegangan dengan harga yang berlawanan., secara simbolik:

$$\vec{V}_{ab} = \vec{V}_{an} - \vec{V}_{bn}$$

dan

2-18

$$\vec{V}_{ab} = \vec{V}_{an} - \vec{V}_{bn}$$

Dimana n adalah titik acuan bersama.

### 2. 5.3 Daya

Perkalian antara beda potensial yang membentang dan arus yang melalui cabang sebuah rangkaian terukur sebagai perubahan energi persatuan waktu antara kedua titik pada cabang rangkaian tersebut. Jika beda potensial ini adalah tegangan jatuh positif, cabang tersebut merupakan elemen pasif dan akan menyerap energi yang ada. Perubahan energi persatuan waktu ini dikenal dengan sebutan daya, dan berdasarkan konvensi, daya berharga positif bila energi diserap dan negatif bila energi disuplai. Untuk menentukan apakah energi diserap atau disuplai, diperlukan perhitungan daya rata-rata dari satu siklus penuh. Jika  $e = E_m \sin(\omega t + d)$  dan  $i = I_m \sin(\omega t + d - f)$ , maka persamaan daya rata-rata adalah:

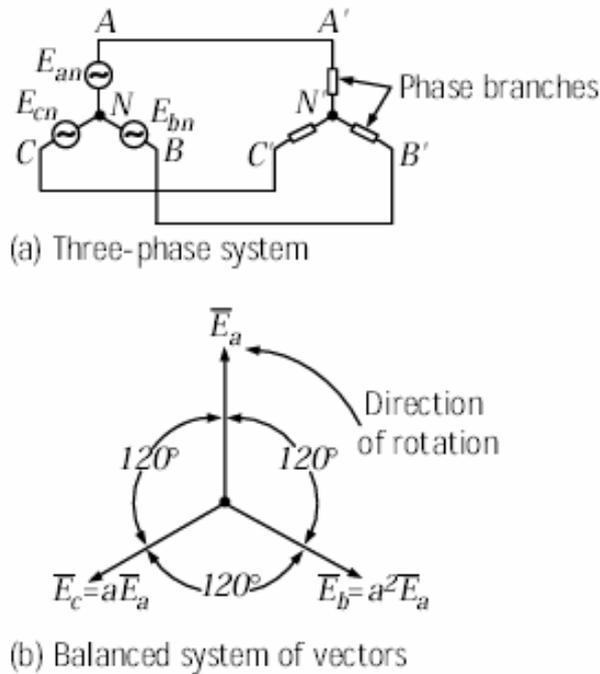
$$\begin{aligned} p &= e i = E_m \sin(\omega t + d) I_m \sin(\omega t + d - f) \\ p &= P[1 - \cos 2(\omega t + d)] + Q \sin 2(\omega t + d) \end{aligned} \quad 2-19$$

Dimana:  $P = |E||I| \cos f$  dan  $Q = |E||I| \sin f$

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa dalam satu siklus besaran P bervariasi antara 0 ke 2P dan besaran Q bervariasi dari -Q ke +Q dan bentuk gelombangnya menjadi dua kali bentuk gelombang tegangan atau arus. Harga rata-rata dari perubahan daya dalam satu siklus konstan, yang besarnya sama dengan P yang sephasa dengan tegangan dikenal dengan sebutan daya aktif, sedangkan harga rata-rata dari Q adalah nol, yang berarti energi disimpan dalam setengah siklus pertama dan disuplai kembali ke rangkaian pada setengah siklus berikutnya dan dikenal sebagai daya reaktif. Bila P dan Q konstan yang menyatakan perubahan daya dalam sebuah rangkaian dan merupakan hasil dari perkalian antara vektor tegangan dan arus, maka bila  $\vec{S}$  merupakan vektor perkalian  $\vec{E}\vec{I}$  dengan  $\vec{E}$  sebagai vektor acuan dan  $f$  sebagai sudut antara  $\vec{E}$  dan  $\vec{I}$  didapat:

$$\vec{S} = \vec{P} + j\vec{Q} \quad 2-20$$

Besaran  $\vec{S}$  dikenal sebagai daya semu dan terminologi ini dipergunakan untuk menjelaskan rating dari sebuah rangkaian.



Gambar 2-7 Sistem Tiga Fasa

#### 2. 5.4 Sistem Satu Fasa dan Polifasa

Suatu sistem dikatakan satu fasa atau polifasa tergantung kepada sumber daya yang menjadi pemasok sistem tersebut apakah satu fasa atau polifasa. Suatu sumber dikatakan satu atau polifasa tergantung apakah sumber tersebut memiliki tegangan pengendali satu atau polifasa. Sebagai contoh, suatu sumber tiga fasa adalah sebuah sumber yang memiliki tiga tegangan pengendali bolak balik dengan urutan fasa A, B, dan C. Setiap tegangan pengendali fasa berhubungan dengan cabang-cabang terkait seperti diperlihatkan dalam Gambar 2-7a.

Jika sistem polifasa memiliki tegangan seimbang yang ketiganya memiliki magnitud yang sama dan mencapai harga maksimum pada interval waktu sama serta memiliki impedansi cabang yang idektik, sistem seperti ini disebut dengan sistem seimbang. Sistem dikatakan tidak seimbang bilamana kondisi tersebut tidak terpenuhi.. Bilamana sistem fasa banyak seimbang, perhitungan menjadi lebih sederhana karena hanya membutuhkan perhitungan pada salah satu fasanya saja, penyelesaian bagi fasa lainnya dilakukan secara simetri. Sistem daya pada umumnya beroperasi sebagai suatu sistem tiga fasa seimbang. Karena alasan tersebut tegangan pada masing-masing fasa memiliki magnitud yang sama dan dapat direpresentasikan sebagai tiga buah vektor yang terpisah  $120^\circ$  atau  $2\pi/3$  radian, seperti diperlihatkan dalam Gambar 2-7b.

Karena ketiga tegangan simetris, maka ketiganya dapat diekspresikan dengan salah satu dari ketiganya, seperti:

$$\begin{aligned}\vec{E}_a &= \vec{E}_a \\ \vec{E}_b &= a^2 \vec{E}_a \\ \vec{E}_c &= a \vec{E}_a\end{aligned}\tag{2-21}$$

Dimana adalah sebuah operator vektor  $e^{j2\pi/3}$ . Lebih jauh, jika impedansi masing-masing fasa juga identik dalam suatu sistem seimbang, maka arus-arus yang dihasilkanpun seimbang.

## 2. 6 NOTASI IMPEDANSI

Dari diagram sistem tenaga elektrik dapat dilihat bahwa terdapat beberapa level tegangan dalam sistem yang sama, sehingga tidaklah praktis bila kita menggunakan kapasitas MVA pembangkit sebagai acuan untuk menentukan besaran pu atau persen sistem. Sebelum kita melakukan perhitungan, parameter sistem harus mengacu pada suatu besaran dasar dan merespresentasikannya sebagai suatu besaran yang menyatukan impedansi sistem, baik dalam besaran ohmik, persen atau pu. Besaran dasar adalah daya dan tegangan. Umumnya besaran yang digunakan adalah besaran daya tiga fasa dalam MVA dan tegangan line dalam kV. Besaran dasar bagi impedansi merupakan hasil dari kedua besaran dasar tersebut, yaitu:

$$Z_b = \frac{(kV)^2}{MVA} \Omega\tag{2-22}$$

Impedansi dasar dapat dihitung dalam besaran satu fasa atau tiga fasa. Harga pu atau persen dari setiap impedansi yang ada dalam sistem adalah ratio antara besaran aktual dan besaran dasar, karenanya:

$$Z_{pu} = Z_{\Omega} \times \frac{MVA_{dasar}}{(kV_{dasar})^2}\tag{2-23}$$

$$Z_{\%} = Z_{pu} \times 100$$

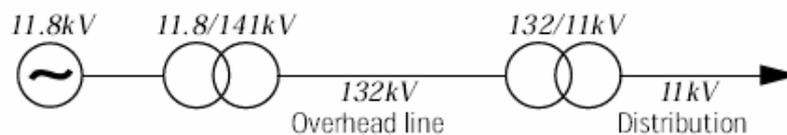
Dengan transposisi sederhana dari persamaan diatas dapat ditentukan harga ohmik impedansi, harga pu dan persen. Seperti dinyatakan diatas, sistem mungkin saja bekerja dengan level tegangan yang berbeda dan sangat mungkin pula rating MVA pembangkitan berbeda pula. Sehingga pemilihan besaran dasar yang menjadi berbeda pula, karena itu diperlukan perhitungan untuk merubah sebuah besaran sistem dari besaran dasar yang satu ke besaran dasar yang baru, sebagai berikut:

$$Z_{pu(MVA\text{ dasar-baru})} = Z_{pu(dasar\text{-}lama)} \times \frac{MVA_{\text{dasar-baru}}}{MVA_{\text{dasar-lama}}}$$

2-24

$$Z_{pu(kV\text{ dasar-baru})} = Z_{pu(dasar\text{-}lama)} \times \left( \frac{kV_{\text{dasar-lama}}}{kV_{\text{dasar-baru}}} \right)^2$$

Pemilihan notasi impedansi tergantung pada kompleksitas sistem, notasi impedansi pembangkit dan pertimbangan kondisi sistem. Jika sistem cukup sederhana dan didominasi oleh sistem transmisi dan data diberikan dalam ohmik, dengan demikian metoda ohmik dapat digunakan dalam perhitungan. Namun demikian, pemilihan tegangan dasar dan menyatukan impedansi dengan dasar ini, sebagai pendekatan perhatikan contoh berikut ini.



Wrong selection of base voltage

11.8 kV                      132 kV                      11 kV

Right selection

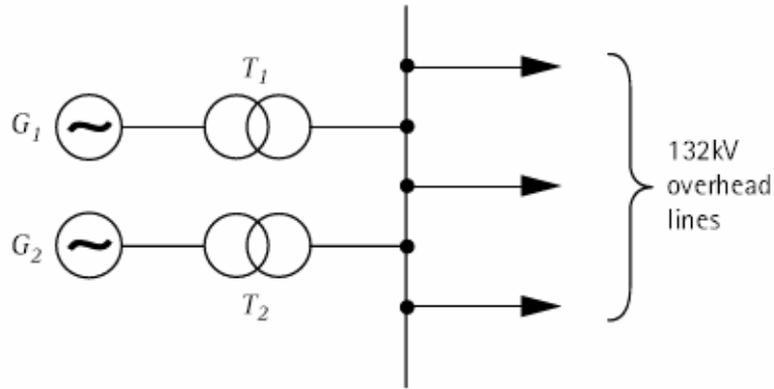
11.8 kV                      141 kV                       $\frac{141}{132} \times 11 = 11.7 \text{ kV}$

Gambar 2-8: Pemilihan Tegangan Dasar,  $kV_{\text{dasar}}$

Dari Gambar 2-8 dapat dilihat bahwa tegangan dasar dari ketiga rangkaian dipengaruhi oleh ratio transformator. Oleh karena itu dalam mengacu impedansi ohmik dari satu sisi ke sisi lain transformator dilakukan dengan mengalikan harga ohmik impedansi dengan kuadrat ratio tegangan antara kedua belitan transformator tersebut. Metoda pu merupakan metoda yang sangat cocok digunakan karena memiliki berbagai kelebihan. Dua alasan utama kenapa sistem ini dipilih adalah:

- i. Impedansi akan sama dilihat dari sisi manapun bila ratio tegangan dasar dari kedua sisi transformator sama dengan ratio belitan transformator.
- ii. Kebingungan akibat harus dilakukan perkalian dengan 100 dalam perhitungan menggunakan persen dapat dihindarkan.

Sebagai contoh, dalam Gambar 2-9, Generator  $G_1$  dan  $G_2$  mempunyai reaktansi subtransien 26% pada rating 66,6 MVA, 11 kV dan Transformator  $T_1$  dan  $T_2$  dengan ratio tegangan 11/145 kV dengan impedansi 12,5% pada 75 MVA.



Gambar 2-9: Contoh Sistem Tenaga Elektrik Sederhana

Dengan memilih dasar MVA sebesar 100 MVA dan tegangan dasar 132 kV, tentukan persen impedansi dari besaran dasar yang baru.

a. Reaktansi Generator pada harga dasar yang baru:

$$26 \times \frac{100}{66,6} \times \frac{(145)^2}{(132)^2} = 47,1\%$$

b. Reaktansi Transformator pada harga dasar yang baru:

$$12,5 \times \frac{100}{75} \times \frac{(145)^2}{(132)^2} = 20,1\%$$

Tegangan dasar pada Generator dan Rangkaian masing-masing 11 kV dan 145 kV yang merupakan ratio belitan Transformator. Harga pu dari besaran diatas dapat pula dicari dengan membagi besaran tersebut dengan 100, sedangkan besaran ohmic dapat dihitung menggunakan persamaan 2-19.

## BAB 3 PERHITUNGAN GANGGUAN

### 3.1 PENDAHULUAN

Sistem tenaga pada umumnya diperlakukan sebagai suatu jaringan tiga fasa seimbang. Bila terjadi gangguan, keseimbangan sistem akan terganggu, sehingga menyebabkan timbulnya tegangan dan arus ketidakseimbangan dalam jaringan tersebut. Hal ini tidak terjadi pada gangguan tiga fasa, karena gangguan ini melibatkan ketiga fasa jaringan yang sama pada lokasi yang sama, hal ini disebut sebagai gangguan seimbang. Dengan menggunakan metoda komponen simetris dan menerapkan teori dan konsep pergantian sistem sebelum dan setelah gangguan, sehingga dimungkinkan untuk menganalisis berbagai kondisi sistem pada saat terjadi gangguan.

Dari segi pemakaian peralatan proteksi sangat penting untuk mengetahui distribusi arus gangguan yang melalui sistem dan perbedaan tegangan yang terjadi pada seluruh bagian sistem akibat gangguan. Lebih jauh, batasan harga dari arus pada setiap titik dimana terdapat rele proteksi harus diketahui. Jika gangguan tersebut harus diisolir. Informasi yang umum dibutuhkan adalah:

- i. Arus gangguan maksimum pada titik dimana rele terpasang.
- ii. Arus gangguan minimum pada titik dimana rele terpasang.
- iii. Arus gangguan maksimum yang akan melalui rele terpasang.

Untuk mendapatkan informasi besaran-besaran diatas, batasan stabilitas generator dan kondisi operasi yang mungkin termasuk metoda pentanahan sistem harus diketahui dan gangguan selalu diasumsikan dengan impedansi gangguan nol guna mendapatkan arus maksimum pada kondisi sistem tersebut.

### 3.2 KOMPONEN SIMETRIS - ANALISIS JARINGAN TIGA FASA

Dengan menggunakan prinsip super posisi, dapat dilihat bahwa suatu vektor sistem tiga fasa dapat digantikan dengan tiga set vektor tiga fasa seimbang. Masing-masing terdiri dari dua set vektor tiga fasa yang memiliki urutan fasa berlawanan dan satu set vektor tanpa urutan fasa. Ketiga set vektor ini masing-masing disebut dengan vektor urutan positif, negatif dan nol. Persamaan dan relasi antara besaran fasa dan besaran urutan diberikan berikut ini:

$$\vec{E}_a = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_0$$

$$\vec{E}_b = a^2 \vec{E}_1 + a \vec{E}_2 + \vec{E}_0$$

$$\vec{E}_c = a \vec{E}_1 + a^2 \vec{E}_2 + \vec{E}_0$$

3-1

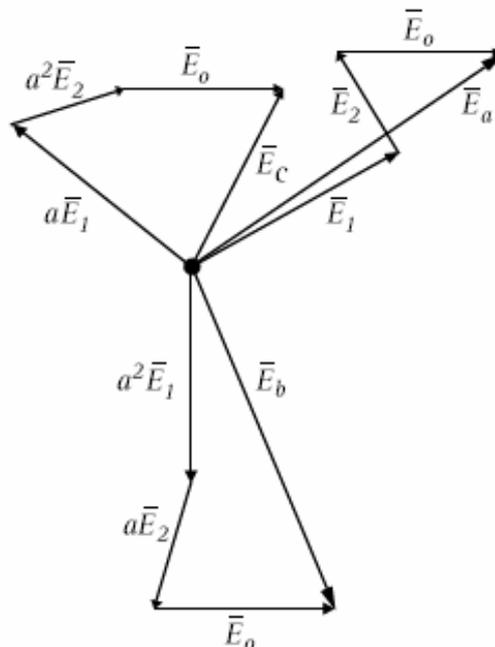
dan

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{2}(\vec{E}_a + a\vec{E}_b + a^2\vec{E}_c)$$

$$\vec{E}_2 = \frac{1}{2}(\vec{E}_a + a^2\vec{E}_b + a\vec{E}_c) \quad 3-2$$

$$\vec{E}_0 = \frac{1}{2}(\vec{E}_a + \vec{E}_b + \vec{E}_c)$$

Dimana semua besaran mengacu pada besaran fasa A. Hubungan yang sama didapatkan untuk besaran arus. Dalam Gambar 3-1 diperlihatkan ilustrasi dari resolusi sebuah vektor sistem tiga fasa tak seimbang.

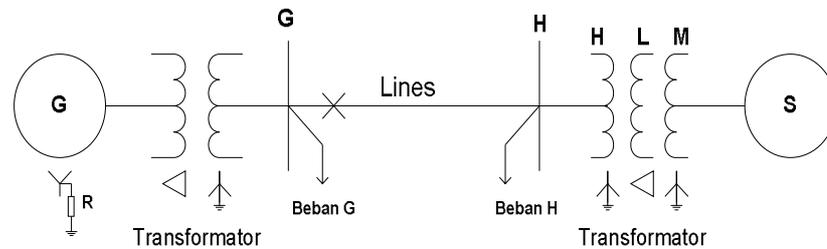


Gambar 3-1: Ilustrasi dari resolusi dari sebuah vektor sistem tiga fasa tak seimbang.

Bila gangguan terjadi pada suatu sistem tenaga, ketiga impedansi menjadi tidak sama lagi (kecuali dalam gangguan tiga fasa) dan menghasilkan arus dan tegangan yang tak seimbang pula, ketidak seimbangan terbesar terjadi pada titik gangguan. Seperti dikemukakan diawal, gangguan dapat dipelajari dengan cara menghubungkan singkat seluruh tegangan penggerak dalam sistem dan menggantikan hubungan pada titik gangguan dengan sebuah sumber tegangan penggerak yang sama dengan tegangan sesaat sebelum gangguan terjadi. Karenanya, impedansi sistem lainnya masih dianggap seimbang, dilihat dari titik gangguan dan titik gangguan dapat dianggap sebagai titik dimana injeksi arus dan tegangan tidak seimbang dilakukan kedalam sistem. Pendekatan ini diperlukan untuk mendefinisikan kondisi gangguan dan memungkinkan sistem direpresentasikan dengan jaringan urutan dengan menggunakan metoda komponen simetris. Jaringan kemudian dinyatakan dalam jaringan urutan positif, negatif dan nol dan hanya tegangan dan arus urutan yang muncul didalam sirkuit tersebut, dimungkinkan pula tidak terdapat hubungan antara ketiganya.

### 3. 2.1 Sumber-Sumber Urutan Positif

Diagram satu garis dari sistem tenaga atau areal yang akan dikaji adalah titik awal untuk membentuk jaringan urutan. Dalam Gambar 3-2 diperlihatkan diagram segaris sebuah sistem tenaga listrik sederhana



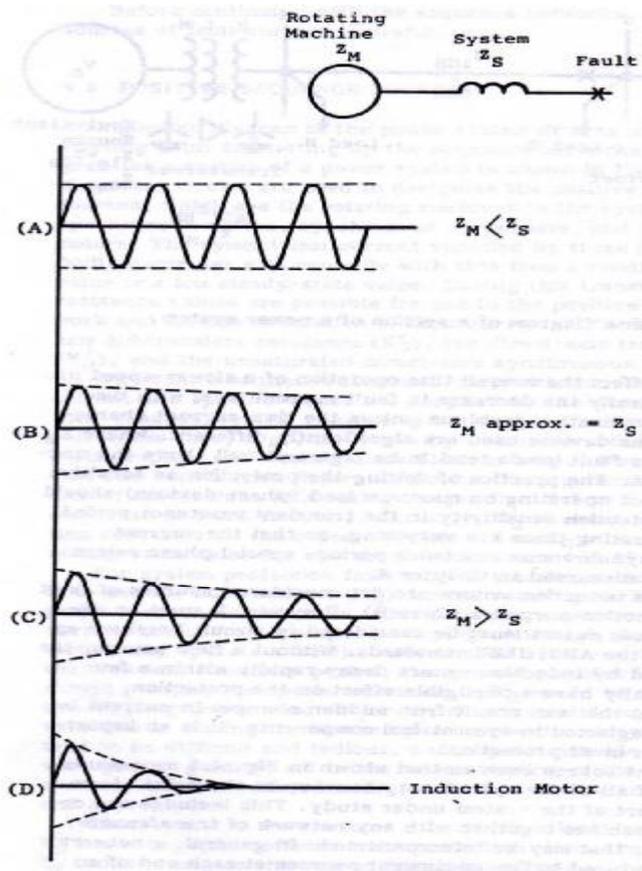
Gambar 3-2: Diagram satu garis sebuah sistem tenaga listrik

Lingkaran menyatakan sumber urutan positif, dapat berupa Generator, Motor sinkron, Kondensor sinkron dan mungkin saja Motor induksi. Arus simetris yang disuplai oleh sistem tenaga akibat adanya gangguan akan berubah secara eksponensial dari harga awal yang cukup tinggi sampai mencapai harga tunak. Selama prioda peralihan ini ada tiga besaran reaktansi yang dapat digunakan: 1). Reaktansi (sumbu langsung) subperalihan,  $X_d''$ ; 2). Reaktansi peralihan,  $X_d'$ ; dan 3) reaktansi sinkron,  $X_d$ . Harga  $X_d$  dinyatakan dalam per-unit rating kVA mesin, yaitu antara 0,7 sampai 3,0 p.u, dengan time konstan antara 0,035 sampai 0,05 detik, sedangkan  $X_d'$  berkisar antara 1,5 – 2,5 kali harga  $X_d''$ , dengan time konstan 0,6 – 1,5 detik. Harga  $X_d$  adalah 4 – 15 kali  $X_d''$  (harga ini adalah harga saturasi bila gangguan bertahan).

Untuk studi hubung singkat, digunakan  $X_d''$  untuk reaktansi jaringan urutan positif, dan akan diperoleh arus gangguan maksimum yang diperlukan dalam penggunaan rele berkecepatan tinggi. Untuk rele berkecepatan rendah, rele baru akan bereaksi setelah reaktansi mencapai harga peralihannya, namun pada umumnya dalam suatu studi gangguan tetap dipergunakan harga  $X_d''$ , kecuali pada kasus khusus, dapat pula dipergunakan harga  $X_d'$  bilamana diperlukan program khusus untuk menentukan besar penurunan arus gangguan bagi rele-rele proteksi berkecepatan rendah, namun hal ini sulit dan lamban serta tidak memberikan keuntungan yang berarti.

Perhatikan Gambar 3-3 yang memperlihatkan pengaruh mesin berputar pada arus gangguan simetris. Kasus A dan B, adalah kasus yang kerap terjadi, sehingga penggunaan  $X_d''$  akan menghilangkan pengaruh pada sistem proteksi. Dalam kasus ini besarnya  $Z_s$  cenderung menghilangkan pengaruh sumber penurunan. Kasus C mempengaruhi waktu operasi rele proteksi kecepatan rendah, tetapi secara umum

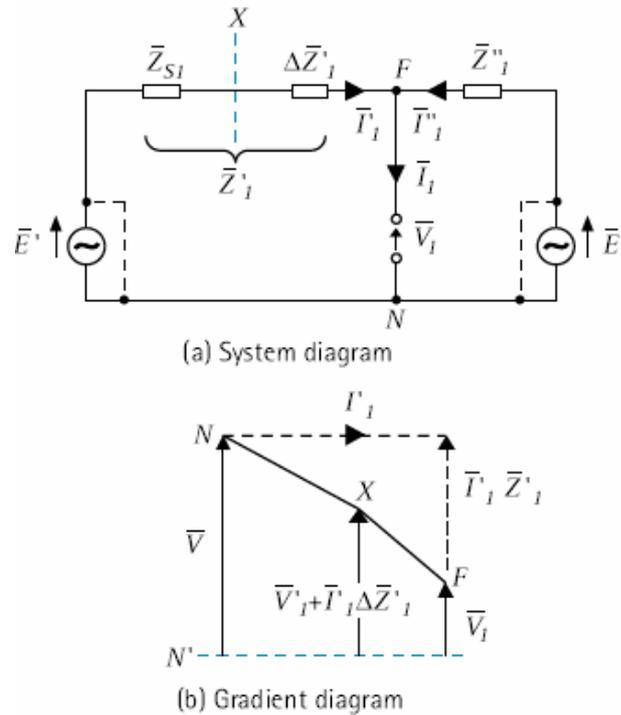
penurunan level arus gangguan tidak akan menimbulkan masalah dalam koordinasi kecuali karakteristik arus-waktu dari rele proteksi yang digunakan sangat berbeda. Bila  $Z_M$  predominan, maka arus gangguan cenderung besar dan dapat melebihi arus beban maksimum. Dalam praktek, setting rele dibuat sesensitif mungkin, tetapi rele tidak boleh beroperasi pada beban maksimum dan harus memiliki sensitivitas proteksi yang baik pada prioda reaktansi peralihan. Bila waktu operasi rele terlampau lama sehingga arus gangguan telah mencapai prioda reaktansi sinkron, maka dibutuhkan rele fasa khusus.



Gambar 3-3: Pengaruh mesin berputar pada arus gangguan simetris

Motor Induksi tidak termasuk sumber arus gangguan guna keperluan proteksi (kasus D), namun demikian perlu penekanan khusus bahwa Motor ini harus diperhatikan pada aplikasi Pemutus Tenaga sesuai dengan standar ANSI/IEEE. Offset dc yang dapat dihasilkan akibat perubahan arus bolak balik yang sangat tiba-tiba dalam sirkit bolak balik pada komponen simetris diabaikan. Hal ini perlu diperhatikan pada semua sistem proteksi. Sumber ekuivalen yang direpresentasikan dengan lingkaran yang diberi notasi S, seperti diperlihatkan Gambar 3-2 merepresentasikan sirkit ekuivalen dari sistem yang tidak diperlihatkan pada titik atau bagian mana studi dilakukan. Hal ini termasuk satu atau beberapa mesin berputar berikut dengan Transformator, jaringan, dan sebagainya yang mungkin teriterkoneksi. Secara umum, sistem dapat direduksi menjadi dua sumber ekuivalen pada kedua ujung titik gangguan yang menjadi studi dengan sirkit

ekivalen penghubung antara kedua sumber. Bila penghubung ini sangat besar atau tidak terbatas, hal ini memperlihatkan bahwa hampir tidak ada atau kecil kemungkinan terjadinya pengalihan daya antara keduanya. Akan lebih mudah bila ekspresi sumber ekivalen ini dinyatakan dengan MVA hubung singkatnya.



Gambar 3-4: Jaringan urutan positif dari sebuah sistem sederhana dengan gangguan di F

### 3. 2.2 Jaringan Urutan Positif

Dalam kondisi normal hanya tegangan dan arus urutan positif yang ada dalam sistem dan karenanya hanya ada impedansi urutan positif pula. Bilamana terjadi gangguan, arus pada cabang yang mengalami gangguan berubah dari 0 menjadi  $\vec{I}_1$  dan tegangan urutan positif sepanjang cabang tersebut berubah dari  $\vec{V}$  menjadi  $\vec{V}_1$ . Mengganti cabang yang mengalami gangguan dengan sumber tegangan yang sama dengan tegangan gangguan dan menghubungkan singkat semua tegangan sistem pada kondisi normal akan mengakibatkan mengalirnya arus  $\Delta \vec{I}_1$  kedalam sistem dan

$$\Delta \vec{I}_1 = - \frac{(\vec{V} - \vec{V}_1)}{\vec{Z}_1} \quad 3-3$$

Dimana  $\vec{Z}_1$  adalah impedansi urutan positif dari sistem dilihat dari titik gangguan, arus gangguan yang mengalir dari sistem menuju titik gangguan sama dengan  $-\Delta \vec{I}_1$  oleh karena itu:

$$\vec{V}_1 = \vec{V} - \vec{I}_1 \vec{Z}_1 \quad 3-4$$

adalah relasi antara arus urutan positif dan tegangan pada cabang selama terjadi gangguan. Dalam Gambar 3-4, yang menggambarkan sebuah sistem sederhana, tegangan jatuh  $\vec{I}_1' \vec{Z}_1'$  dan  $\vec{I}_1'' \vec{Z}_1''$  adalah sama dengan  $(\vec{V} - \vec{V}_1)$ , dimana arus-arus  $\vec{I}_1'$  dan  $\vec{I}_1''$  menuju titik gangguan dari sebelah kiri dan kanan titik gangguan dan impedansi  $\vec{Z}_1'$  dan  $\vec{Z}_1''$  adalah impedansi total dilihat dari masing-masing sisi titik gangguan. Tegangan  $\vec{V}$  umumnya sama dengan tegangan sirkit terbuka pada sistem dan dapat dilihat bahwa  $\vec{V} \approx \vec{E}' \approx \vec{E}''$ . Jadi tegangan urutan positif akibat adanya gangguan adalah lebih besar dititik sumber seperti diperlihatkan dalam diagram Gradien pada Gambar 3.4b.

### 3. 2.3 Jaringan Urutan Negatif

Dengan alasan hanya besaran urutan positif yang muncul dalam sistem tenaga pada kondisi normal dan besaran urutan negatif hanya akan muncul selama terjadi gangguan tidak seimbang. Jika tidak ada besaran urutan negatif yang muncul dalam cabang yang mengalami gangguan akibat gangguan tersebut, maka kemudian bila gangguan muncul, perubahan tegangan adalah  $\vec{V}_2$ , dan arus  $\vec{I}_2$  yang dihasilkan mengalir dari jaringan menuju titik gangguan adalah:

$$\vec{I}_2 = \frac{-\vec{V}_2}{\vec{Z}_2}$$

atau

$$\vec{V}_2 = -\vec{I}_2 \vec{Z}_2 \quad 3-5$$

Impedansi dalam jaringan urutan negatif adalah sama dengan impedansi dalam jaringan urutan positif. Dalam mesin-mesin elektrik  $\vec{Z}_1 \neq \vec{Z}_2$ , namun pada sistem-sistem besar perbedaan ini diabaikan. Diagram jaringan urutan negatif diperlihatkan dalam Gambar 3-5 sama dengan diagram urutan positif, dengan dua perbedaan penting, yaitu: tidak ada sumber tegangan pengendali sebelum gangguan dan tegangan urutan negatif  $\vec{V}_2$  lebih besar pada titik gangguan.

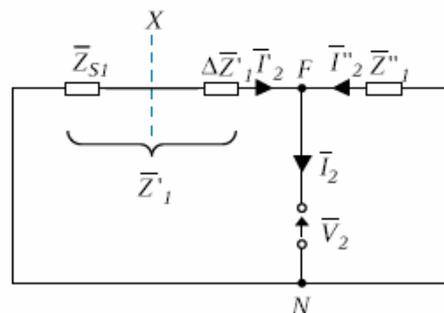
### 3. 2.4 Jaringan Urutan Nol

Relasi tegangan dan arus yang berlaku dalam jaringan urutan nol sama dengan pada jaringan urutan negatif pada saat terjadi gangguan, karenanya:

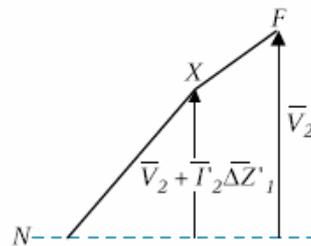
$$\vec{V}_0 = -\vec{I}_0 \vec{Z}_0$$

3-6

Demikian juga dengan diagram urutan nol seperti diperlihatkan pada Gambar 3-5, dimana harga  $\vec{I}_0$  menggantikan  $\vec{I}_2$  dan seterusnya. Arus dan tegangan dalam jaringan urutan nol tanpa co-fasa, artinya semuanya dalam fasa yang sama. Sehingga untuk arus urutan nol agar dapat mengalir dalam sistem harus ada jalan balik penghubung, baik melalui konduktor netral atau melalui tanah. Dalam hal ini harus diingat pada saat menentukan rangkaian urutan nol. Secara umum  $\vec{Z}_1 \neq \vec{Z}_0$  dan harga  $\vec{Z}_0$  sangat variatif tergantung pada jenis pembangkit, cara dan hubungan lilitan dan metoda pentanahan sistem.



(a) Negative sequence network



(b) Gradient diagram

Gambar 3-5: Jaringan Urutan Negatif dengan Gangguan dititik F

### 3. 3 PERSAMAAN DAN RANGKAIAN EKIVALEN UNTUK BERBAGAI TIPE GANGGUAN

Tipe gangguan yang penting yang sering terjadi dalam suatu sistem tenaga elektrik, antara lain:

- Satu Fasa – Tanah
- Dua Fasa
- Dua Fasa – Tanah
- Tiga Fasa (tanpa atau melibatkan tanah)

Keempat tipe gangguan diatas disebut sebagai gangguan shunt tunggal karena hanya terjadi pada satu lokasi dan hubungan jaringan urutan sebagaimana gangguan yang terjadi sebagaimana kondisi gangguan tersebut. Dari persamaan awal dan diagram

rangkaian dimungkinkan untuk menentukan besaran tegangan dan arus pada setiap cabang dari sistem tersebut. Dengan mengabaikan arus beban dan dengan asumsi gangguan yang terjadi tanpa melibatkan impedansi gangguan, maka persamaan untuk mendefinisikan setiap gangguan dapat dinyatakan sebagai berikut:

a. Satu Fasa – Tanah (A – E)

$$\begin{aligned} I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \\ V_a &= 0 \end{aligned} \qquad 3-7$$

b. Dua Fasa

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ I_b &= -I_c \\ V_b &= V_c \end{aligned} \qquad 3-8$$

c. Dua Fasa – Tanah

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ V_b &= 0 \\ V_c &= 0 \end{aligned} \qquad 3-9$$

d. Tiga Fasa (tanpa atau melibatkan tanah)

$$\begin{aligned} I_a + I_b + I_c &= 0 \\ V_a &= V_b \\ V_b &= V_c \end{aligned} \qquad 3-10$$

Dari persamaan-persamaan diatas dapat dilihat bahwa setiap tipe gangguan terdapat tiga persamaan yang mendefinisikan setiap kondisi gangguan. Seluruh tegangan dan arus adalah besaran satu fasa (fasa – netral) dan diasumsikan tidak terdapat arus beban yang mengalir. Bila terdapat impedansi ganggua, maka besaran impedansi ini harus dimasukkan kedalam persamaan. Sebagai contoh, bila terjadi gangguan satu fasa – tanah yang melibatkan impedansi gangguan  $\vec{Z}_f$ , maka persamaan 3-7 menjadi:

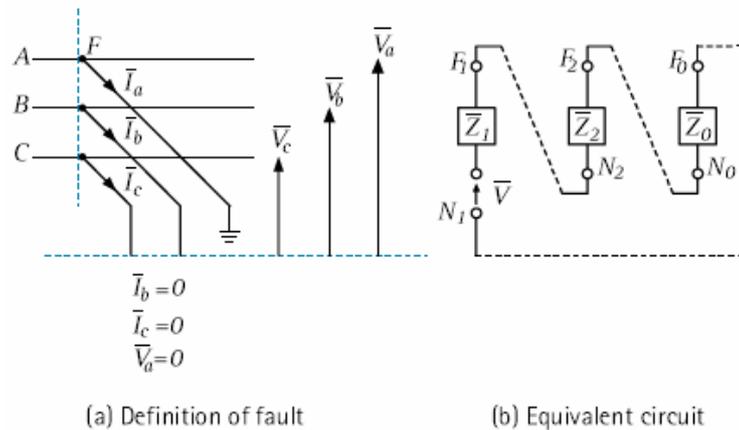
$$\begin{aligned} I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \\ V_a &= I_a Z_f \end{aligned} \qquad 3-11$$

### 3. 3.1 Gangguan Satu Fasa – Tanah (A – E)

Tinjau suatu gangguan yang didefinisikan oleh persamaan 3-7 dan diagram rangkaian pada Gambar 3-6. Konversi persamaan 3-7 kedalam besaran urutan dengan menggunakan persamaan 3-1 dan 3-2, didapat:

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{1}{3} \vec{I}_a \quad 3-12$$

$$\vec{V}_1 = -(\vec{V}_2 + \vec{V}_0) \quad 3-13$$



Gambar 3-6: Representasi Gangguan satu fasa - tanah

Substitusi untuk  $\vec{V}_1$ ,  $\vec{V}_2$  dan  $\vec{V}_0$  kedalam persamaan 3-13 dari persamaan 3-4, 3-5 dan 3-6 didapat:

$$\vec{V} - \vec{I}_1 \vec{Z}_1 = \vec{I}_2 \vec{Z}_2 + \vec{I}_0 \vec{Z}_0$$

Tetapi dari persamaan 3-12, dimana  $I_1 = I_2 = I_0$ , oleh karena itu:

$$\vec{V} = \vec{I}_1 (\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_0) \quad 3-14$$

Batasan yang terdapat didalam persamaan 3-14 menunjukkan bahwa rangkaian pengganti untuk menunjukkan kondisi gangguan didapat dengan cara menghubungkan jaringan-jaringan urutan secara seri seperti diperlihatkan dalam Gambar 3-6b

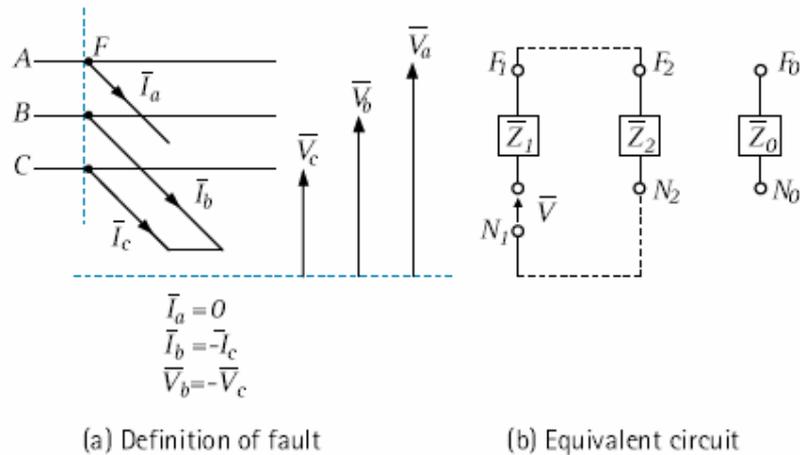
### 3. 3.2 Gangguan Dua Fasa (B – C)

Dari persamaan 3-8 dan menggunakan persamaan 3-1 dan 3-2, didapat:

$$\vec{I}_1 = -\vec{I}_2 \quad 3-15$$

$$\vec{I}_0 = 0$$

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_2 \quad 3-16$$



Gambar 3-7: Representasi Gangguan dua Fasa (B – C)

Dari persamaan jaringan 3-4 dan 3-5, persamaan 3-16 dapat ditulis menjadi sebagai berikut:

$$\bar{V} - \bar{I}_1 \bar{Z}_1 = -\bar{I}_2 \bar{Z}_2$$

Dengan mensubstitusi harga  $\bar{I}_2$  dari persamaan 3-15 didapat:

$$\bar{V} = \bar{I}_1 (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \tag{3-17}$$

Batasan yang terdapat didalam persamaan 3-15 dan 3-17 menunjukkan bahwa dalam rangkaian pengganti untuk menunjukkan kondisi gangguan tidak terdapat jaringan urutan nol, dan jaringan urutan positif dan negatif terhubung secara paralel seperti diperlihatkan dalam Gambar 3-7.

### 3. 3.3 Gangguan Dua Fasa – Tanah (B – C – E)

Kembali, dari persamaan 3-9 dan persamaan 3-1 dan 3-2 didapat:

$$\bar{I}_1 = -(\bar{I}_2 + \bar{I}_0) \tag{3-18}$$

dan

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 = \bar{V}_0 \tag{3-19}$$

Substitusi harga  $\bar{V}_2$  dan  $\bar{V}_0$  menggunakan persamaan jaringan 3-5 dan 3-6:

$$\bar{I}_2 \bar{Z}_2 = \bar{I}_0 \bar{Z}_0$$

Maka, dengan menggunakan persamaan 3-18, diperoleh:

$$\vec{I}_0 = -\frac{\vec{Z}_2 \vec{I}_1}{\vec{Z}_0 + \vec{Z}_2} \quad 3-20$$

$$\vec{I}_2 = -\frac{\vec{Z}_0 \vec{I}_1}{\vec{Z}_0 + \vec{Z}_2} \quad 3-21$$

Selanjutnya, mensetarakan dengan  $\vec{V}_1$  dan  $\vec{V}_2$  serta persamaan 3-4, menghasilkan:

$$\vec{V} - \vec{I}_1 \vec{Z}_1 = -\vec{I}_2 \vec{Z}_2$$

Atau

$$\vec{V} = \vec{I}_1 \vec{Z}_1 - \vec{I}_2 \vec{Z}_2$$

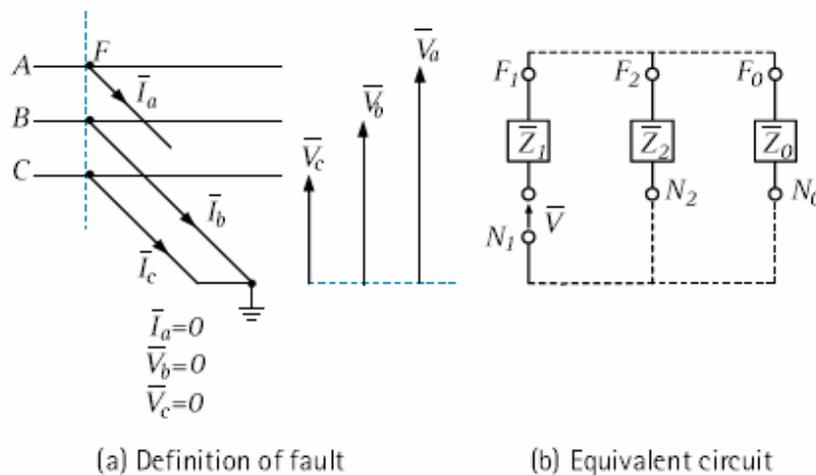
Substitusi  $\vec{I}_2$  dari persamaan 3-21:

$$\vec{V} = \left[ \vec{Z}_1 + \frac{\vec{Z}_0 \vec{Z}_2}{\vec{Z}_0 + \vec{Z}_2} \right] \vec{I}_1$$

Atau

$$\vec{I}_1 = \vec{V} \frac{(\vec{Z}_0 + \vec{Z}_2)}{\vec{Z}_1 \vec{Z}_0 + \vec{Z}_1 \vec{Z}_2 + \vec{Z}_0 \vec{Z}_2} \quad 3-22$$

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa gangguan dua fasa tanah dapat direpresentasikan dengan cara menghubungkan ketiga jaringan urutan secara paralel seperti diperlihatkan dalam Gambar 3-8b.



Gambar 3-8: Representasi Gangguan dua Fasa Tanah (B – C - E)

### 3. 3.4 Gangguan Tiga Fasa (A – B – C atau A – B – C – E)

Bila diasumsikan gangguan melibatkan tanah, dari persamaan 3-10 dan 3-1, 3-2 didapat:

$$\begin{aligned} \vec{V}_0 &= 0 \\ \vec{V}_1 &= 0 \\ \vec{V}_2 &= 0 \end{aligned} \tag{3-23}$$

Dan

$$\vec{I}_0 = 0 \tag{3-24}$$

Substitusi  $\vec{V}_2 = 0$  kedalam persamaan 3-5 menghasilkan:

$$\vec{I}_2 = 0 \tag{3-25}$$

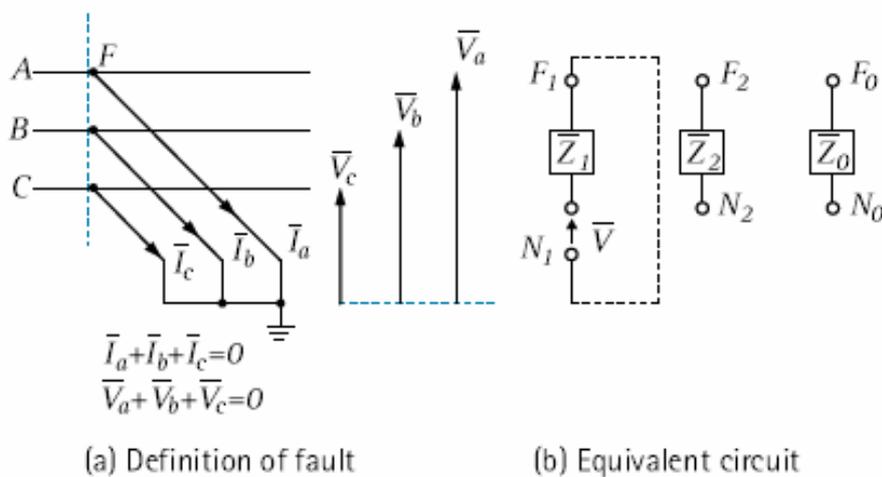
dan substitusikan  $\vec{V}_1 = 0$  kedalam persamaan 3.4 menghasilkan:

$$0 = \vec{V} - \vec{I}_1 \vec{Z}_1$$

atau

$$\vec{V} = \vec{I}_1 \vec{Z}_1 \tag{3-26}$$

Lebih jauh, dari persamaan 3-24,  $\vec{I}_0 = 0$ , dan diikuti dengan persamaan 3-6 bahwa  $\vec{V}_0$  adalah nol bilamana  $\vec{Z}_0$  terbatas. Rangkaian pengganti untuk gangguan tiga fasa diperlihatkan dalam Gambar 3-9.



Gambar 3-9: Representasi Gangguan Tiga Fasa (A – B –C atau A – B – C – E)

### 3. 4 DISTRIBUSI TEGANGAN DAN ARUS DALAM SISTEM AKIBAT GANGGUAN

Dalam perhitungan gangguan harus pula diperhatikan pengaruh gangguan tersebut pada cabang-cabang jaringan diluar daerah yang mengalami gangguan, sehingga proteksi dapat diterapkan secara tepat guna mengisolir daerah yang mengalami gangguan. Oleh karena, perhitungan gangguan tidak hanya terbatas pada arus gangguan itu sendiri, distribusi arus gangguan juga harus diperhatikan. Tegangan abnormal mungkin saja muncul dalam sistem karena gangguan dan hal ini dapat mempengaruhi operasi sistem proteksi. Oleh karena itu pengetahuan mengenai distribusi tegangan dan arus pada sistem saat terjadi gangguan diperlukan guna penerapan sistem proteksi.. Pendekatan yang dilakukan dalam studi gangguan sistem guna penerapan peralatan proteksi dapat diringkas sebagai berikut:

- a. Dari diagram sistem dan data batasan operasi stabil Generator dan kondisi yang mungkin bagi sistem tersebut. Bila tidak diperoleh data lengkap, dapat dilakukan beberapa asumsi.
- b. Dengan asumsi gangguan terjadi pada setiap titik rele, maka perhitungan arus gangguan minimum dan maksimum untuk setiap tipe gangguan dapat dilakukan. Gangguan diasumsikan tanpa melalui impedansi gangguan.
- c. Dengan menghitung distribusi arus gangguan untuk setiap tipe gangguan pada beberapa titik dalam sistem, dimana rele terpasang.
- d. Perhitungan variasi tegangan yang terjadi pada titik dimana rele terpasang, atau batasan stabilitas sistem pada saat terjadi gangguan dibutuhkan guna menentukan klas sistem proteksi yang akan dipergunakan, contoh: rele kecepatan tinggi atau tidak, rele unit atau lainnya dan sebagainya.

#### 3. 4.1 Distribusi Arus

Arus fasa pada setiap cabang jaringan dapat dihitung dari distribusi arus urutan pada rangkaian pengganti untuk gangguan tersebut. Arus urutan umumnya dihitung dalam pu dalam cabang yang mengalami gangguan. Mengingat bahwa dalam sistem tenaga pada kondisi normal impedansi urutan positif dan negatif sama, pembagian arus urutan dalam kedua jaringan identik. Hargaimpedansi dan konfigurasi jaringan urutan nol pada umumnya berbeda dengan urutan positif dan negatif, karenanya distribusi arus urutan nol dihitung secara terpisah.

Jika  $C_0$  dan  $C_1$  adalah faktor distribusi urutan positif dan nol, maka arus aktual dalam cabang jaringan urutan didapat dengan mengalikan arus aktual dalam cabang yang mengalami gangguan dengan faktor distribusi yang bersesuaian. Dengan alasan ini, jika  $\vec{I}_1$ ,  $\vec{I}_2$  dan  $\vec{I}_0$  adalah arus urutan pada cabang jaringan disebabkan gangguan pada beberapa titik dalam jaringan, maka arus fasa pada cabang tersebut dapat diekspresikan dengan menggunakan konstanta distribusi dan arus urutan. Berikut ini disajikan variasi

gangguan shunt, menggunakan persamaan 3-1 dan persamaan gangguan yang ada didapat:

a. Satu Fasa – Tanah (A – E)

$$\begin{aligned}\vec{I}'_a &= (2C_1 + C_0)\vec{I}_0 \\ \vec{I}'_b &= -(C_1 - C_0)\vec{I}_0 \\ \vec{I}'_c &= -(C_1 - C_0)\vec{I}_0\end{aligned}\quad 3-27$$

b. Dua Fasa (B – C)

$$\begin{aligned}\vec{I}'_a &= 0 \\ \vec{I}'_b &= (a^2 - a)C_1\vec{I}_1 \\ \vec{I}'_c &= (a - a^2)C_1\vec{I}_1\end{aligned}\quad 3-28$$

c. Dua Fasa – Tanah (B – C – E)

$$\begin{aligned}\vec{I}'_a &= -(C_1 - C_0)\vec{I}_0 \\ \vec{I}'_b &= \left[ (a - a^2)C_1 \frac{\vec{Z}_0}{\vec{Z}_1} - a^2C_1 + C_0 \right] \vec{I}_0 \\ \vec{I}'_c &= \left[ (a^2 - a)C_1 \frac{\vec{Z}_0}{\vec{Z}_1} - aC_1 + C_0 \right] \vec{I}_0\end{aligned}\quad 3-29$$

d. Tiga Fasa (A – B – C atau A – B – C – E)

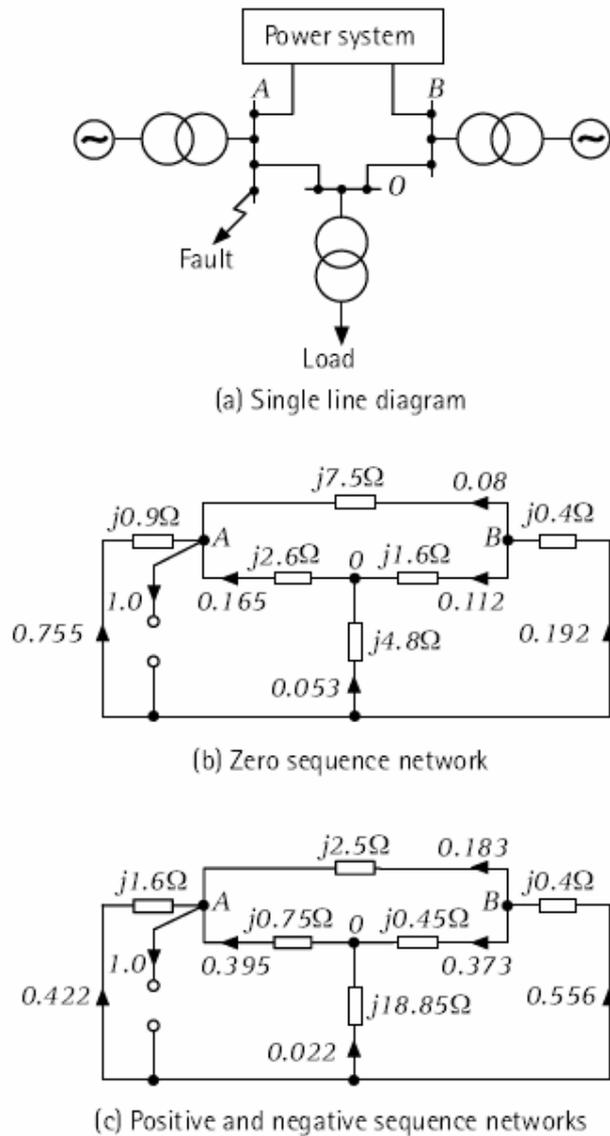
$$\begin{aligned}\vec{I}'_a &= C_1\vec{I}_1 \\ \vec{I}'_b &= a^2C_1\vec{I}_1 \\ \vec{I}'_c &= aC_1\vec{I}_1\end{aligned}\quad 3-30$$

Sebagai contoh penggunaan teknik arus distribusi, tinjau sistem seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 3-10a dan jaringan urutan ekuivalen dalam Gambar 3-10b dan 3-10c. Gangguan diasumsikan pada titik A dan diinginkan untuk menentukan besarnya arus pada cabang OB akibat adanya gangguan. Dalam setiap cabang diberikan harga faktor distribusinya, dimana arus pada cabang yang mengalami gangguan besarnya diambil 1,0 pu. Dari diagram diperlihatkan bahwa faktor distribusi urutan nol  $C_0$  adalah 0,112 dan faktor distribusi urutan positif  $C_1$  adalah 0,373. Untuk gangguan tanah pada titik A, besarnya arus fasa pada cabang OB, dengan menggunakan persamaan 3-27 adalah:

$$\begin{aligned}\vec{I}'_a &= (0,746 + 0,112)\vec{I}_0 \\ &= 0,858\vec{I}_0\end{aligned}$$

dan

$$\begin{aligned}\vec{I}_b = \vec{I}_c &= -(0,373 + 0,112)\vec{I}_0 \\ &= -0,261\vec{I}_0\end{aligned}$$



Gambar 3-10: Tipikal Sistem Tenaga Elektrik

Dengan menggunakan metoda reduksi jaringan dan asumsi bahwa seluruh impedansi adalah reaktif, dapat dilihat bahwa  $\vec{Z}_1 = \vec{Z}_0 = j0,68 \Omega$ . Oleh karena itu, dari persamaan 3-14, maka arus pada cabang yang mengalami gangguan  $|I_a| = \frac{|V|}{0,68}$ , dengan asumsi bahwa  $|V| = 63,5 \text{ V}$ , maka:

$$|I_0| = \frac{1}{3}|I_a| = \frac{63,5}{3 \times 0,68} = 31,20 \text{ A}$$



$$\begin{aligned}\vec{V}_1 &= \vec{V} - \vec{I}_1 [\vec{Z}_1 - j\{(0,395 \times 0,75) + (0,375 \times 0,45)\}] \\ &= \vec{V} - \vec{I}_1 [\vec{Z}_1 - j0,464]\end{aligned}$$

$$\vec{V}_2 = -\vec{I}_2 [\vec{Z}_1 - j0,464]$$

Dari diagram distribusi urutan nol dalam Gambar 3-7b, diperoleh:

$$\begin{aligned}\vec{V}_0 &= -\vec{I}_0 [\vec{Z}_0 - j\{(0,165 \times 2,60) + (0,112 \times 1,60)\}] \\ &= -\vec{I}_0 [\vec{Z}_0 - j0,608]\end{aligned}$$

Akibat gangguan tanah pada titik gangguan  $\vec{I}_1 = \vec{I}_2 = \vec{I}_0 = -j31,20 \text{ A}$ , bila  $|V| = 63,5 \text{ V}$  dan besaran ini dijadikan vektor acuan, lebih lanjut  $\vec{Z}_1 = \vec{Z}_0 = -j0,68 \Omega$ , maka:

$$\vec{V}_1 = 63,5 - (0,216 \times 31,2)$$

$$= 56,76 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\vec{V}_2 = 6,74 \angle 180^\circ \text{ V}$$

$$\vec{V}_0 = 2,25 \angle 180^\circ \text{ V}$$

Dan menggunakan persamaan 3.1 didapat

$$\vec{V}_a' = \vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_0$$

$$= 56,76 - (6,74 + 2,25)$$

$$= 47,80 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\vec{V}_b' = a^2 \vec{V}_1 + a \vec{V}_2 + \vec{V}_0$$

$$= 56,76 a^2 - (6,74 a + 2,25)$$

$$= 61,50 \angle -116,40^\circ \text{ V}$$

$$\vec{V}_c' = a \vec{V}_1 + a^2 \vec{V}_2 + \vec{V}_0$$

$$= 56,76 a - (6,74 a^2 + 2,25)$$

$$= 61,50 \angle 116,40^\circ \text{ V}$$

Vektor tegangan ini diperlihatkan dalam Gambar 3-11.

### 3. 5 PENGARUH SISTEM PENTANAHAN PADA BESARAN URUTAN NOL

Telah kita lihat bersama pada pembahasan awal bahwa arus urutan nol mengalir ketanah selama terjadi gangguan tanah dan arus ini dipengaruhi oleh bagaimana sistem

pentanahan dilakukan. Karena besaran ini unik sesuai dengan gangguan tanah yang terjadi, besaran ini dapat dipakai dalam menentukan peralatan proteksi.

### 3. 5. 1 Tegangan dan Arus Residu

Arus-arus dan tegangan-tegangan residu eksistensinya tergantung kepada dua faktor, yaitu:

- a. Hubungan sistem pentanahan pada dua atau lebih titik.
- b. Perbedaan potensial antara titik pentanahan akibat mengalirnya arus ketanah.

Dalam kondisi operasi normal terdapat kapasitansi antara fasa - fasa dan antara fasa - tanah. Kapasitansi ini mungkin simetris dan terdistribusi secara uniform sepanjang sistem. Jadi bila kondisi (a) terpenuhi, jika tegangan pengendali simetris maka jumlah vektor arus akan sama dengan nol dan tidak arus yang akan mengalir pada kedua titik pentanahan sistem. Pada saat terjadi gangguan tanah pada sistem, maka terjadi ketidakseimbangan pada sistem, maka kondisi (b) terjadi. Dari definisi yang diberikan diatas, maka tegangan dan arus residu adalah vektor penjumlahan dari arus fasa dan tegangan fasa, karenanya:

$$\vec{I}_R = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c$$

Dan

$$\vec{I}'_R = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c$$

dan

$$\vec{V}'_R = \vec{V}_{ae} + \vec{V}_{be} + \vec{V}_{ce}$$

3-32

Dari persamaan

$$\vec{I}_R = 3\vec{I}_0$$

$$\vec{V}_R = 3\vec{V}_0$$

3-33

Lebih jauh, harus diingat bahwa

$$\vec{V}_{ae} = \vec{V}_{an} + \vec{V}_{ne}$$

$$\vec{V}_{be} = \vec{V}_{bn} + \vec{V}_{ne}$$

$$\vec{V}_{ce} = \vec{V}_{cn} + \vec{V}_{ne}$$

3-34

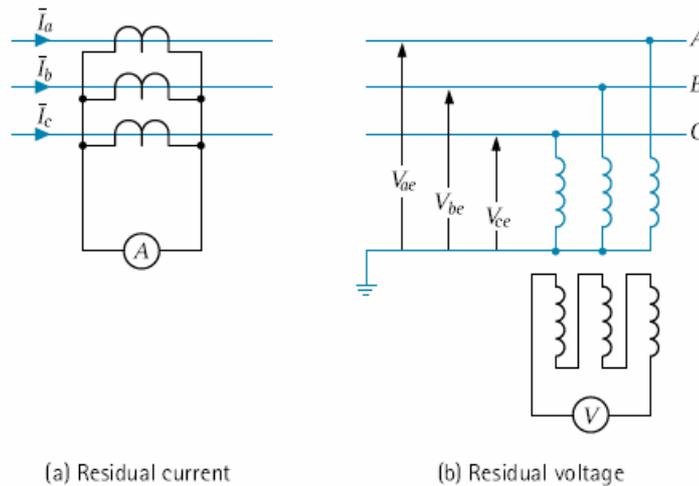
Karenanya, jika  $\vec{V}_{bn} = a^2 \vec{V}_{an}$ ,  $\vec{V}_{cn} = a \vec{V}_{an}$ , maka

$$\vec{V}_R = 3\vec{V}_{ne}$$

3-35

dimana  $\vec{V}_{ne}$  = pergeseran tegangan netral

Pengukuran besaran residu dilaksanakan menggunakan Transformator tegangan dan arus dengan cara koneksi seperti diperlihatkan dalam Gambar 3-12. Bilamana rele dihubungkan ditiitk mana voltmeter dan amperemeter dihubungkan, maka rele ini akan mampu mendeteksi gangguan tanah yang terjadi.



Gambar 3-12: Pengukuran besaran residual

### 3. 5.2 Ratio Sistem $Z_0 / Z_1$

Ratio sistem  $Z_0 / Z_1$  didefinisikan sebagai ratio antara impedansi urutan nol dan urutan positif yang dilihat dari titik gangguan. Ratio ini bervariasi tergantung pada bagaimana metoda pentanahan sistem, posisi gangguan dan pengaturan operasi sistem. Bilamana ingin menentukan distribusi besaran residu yang melalui sistem dapat dilakukan dengan menggunakan titik gangguan sebagai titik acuan dan sebagai titik dimana injeksi besaran-besaran tidak seimbang diberikan ke sistem. Residu tegangan diukur terhadap besaran tegangan fasa-netral sistem dalam kondisi normal dan arus residu dibandingkan dengan besaran arus gangguan tiga fasa pada titik gangguan. Dapat dilihat bahwa karakteristik dari besaran ini dapat diekspresikan menggunakan terminologi ratio  $Z_0 / Z_1$  sistem

Impedansi urutan positif sistem pada umumnya reaktansi, dimana impedansi urutan nol dipengaruhi oleh cara pentanahan sistem, yang mungkin terdiri dari komponen resistansi dan reaktansi. Dengan demikian ekspresi dari ratio  $Z_0 / Z_1$  dinyatakan dengan:

$$\frac{\vec{Z}_0}{\vec{Z}_1} = \frac{X_0}{X_1} - j \frac{R_0}{X_1} \quad 3-36$$

Ekspresi arus residu dalam terminologi arus tiga fasa dan ratio  $Z_0/Z_1$  masing-masing adalah:

a. Satu Fasa – Tanah (A – E)

$$\vec{I}_R = \frac{3\vec{V}}{2\vec{Z}_1 + \vec{Z}_0} = \frac{3}{(2+K)} \frac{\vec{V}}{\vec{Z}_1}$$

Dimana  $\vec{K} = \vec{Z}_0 / \vec{Z}_1$

$$\vec{I}_{3\phi} = \frac{\vec{V}}{\vec{Z}_1}$$

Jadi

$$\frac{\vec{I}_R}{\vec{I}_{3\phi}} = \frac{3}{(2+K)} \quad 3-37$$

b. Dua Fasa – Tanah (B – C – E)

$$\vec{I}_R = 3\vec{I}_0 = -\frac{3\vec{Z}_1}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_0} \vec{I}_1$$

$$\vec{I}_1 = -\frac{\vec{V}(\vec{Z}_1 + \vec{Z}_0)}{2\vec{Z}_1\vec{Z}_0 + \vec{Z}_1^2}$$

Karena

$$\vec{I}_R = -\frac{3\vec{V}\vec{Z}_1}{2\vec{Z}_1\vec{Z}_0 + \vec{Z}_1^2} = -\frac{3}{(2\vec{K} + 1)} \frac{\vec{V}}{\vec{Z}_1}$$

Maka

$$\frac{\vec{I}_R}{\vec{I}_{3\phi}} = -\frac{3}{(2\vec{K} + 1)} \quad 3-38$$

Dengan cara sama, tegangan residu dapat ditentukan dengan cara mengalikan persamaan 3-37 dan 3-38 dengan  $-\vec{K}\vec{V}$ , didapat:

a. Satu Fasa – Tanah (A – E)

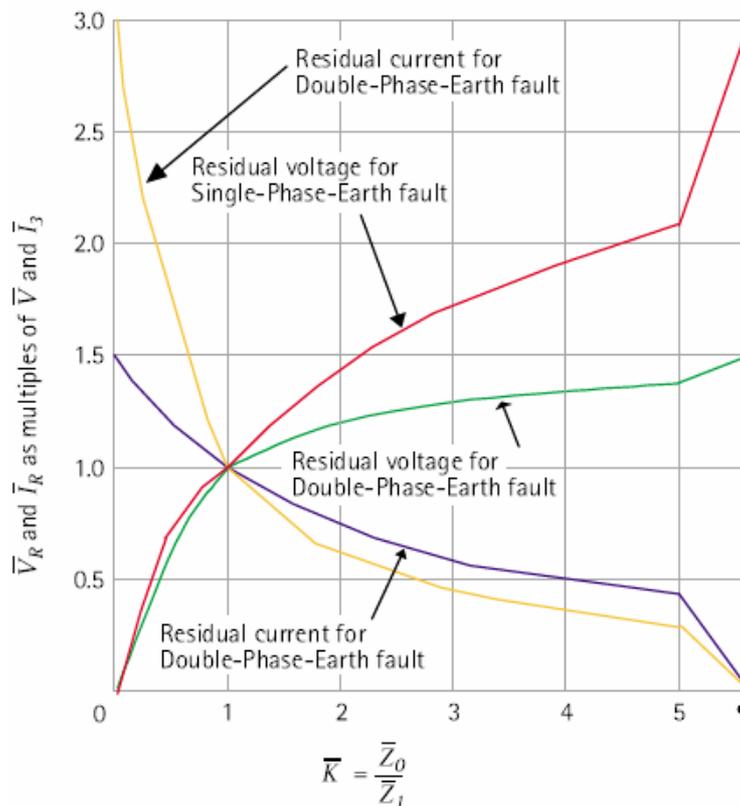
$$\vec{V}_R = -\frac{3}{(2+K)} \vec{V} \quad 3-39$$

b. Dua Fasa – Tanah (B – C – E)

$$\vec{V}_R = \frac{3}{(2\bar{K} + 1)} \vec{V}$$

3-40

Kurva yang diperlihatkan dalam Gambar 3-13 menunjukkan variasi dari besaran residu terhadap ratio  $Z_0 / Z_1$ . Arus residu pada bagian-bagian sistem tenaga dapat ditentukan dengan cara mengalikan arus yang diperoleh dari kurva dengan faktor distribusi urutan nol yang sesuai. Dengan cara yang sama, tegangan residu dihitung dengan cara memperkurangkan tegangan yang didapat dari kurva dengan tiga kali tegangan jatuh urutan nol yang diukur dari titik yang diinginkan dan titik gangguan.



Gambar 3-13: Variasi besaran residu pada titik gangguan

3. 5.3 Variasi Besaran-Besaran Residu

Variasi besaran residu pada sistem yang disebabkan oleh perbedaan dalam sistem pentanahan dapat dengan mudah dipahami dengan menggunakan diagram vektor. Tiga contoh telah dipilih, masing-masing adalah gangguan solid – netral terisolasi; gangguan solid – pentanahan dengan resistansi dan gangguan melalui resistansi – netral dengan pentanahan solid. Ketiganya diperlihatkan pada Gambar 3-14, 3-15 dan 3-16.

a. Gangguan Solid – Netral Terisolasi

Dari Gambar 3-14 dapat dilihat bahwa kapasitansi ketanah pada gangguan fase terhubung karena gangguan dan mengakibatkan ketidakseimbangan yang menimbulkan arus kapasitif mengalir menuju titik gangguan, kembali melalui fasa dan melewati kapasitansi fasa menuju tanah.

Pada gangguan

$$\vec{V}_{aF} = 0$$

Dan

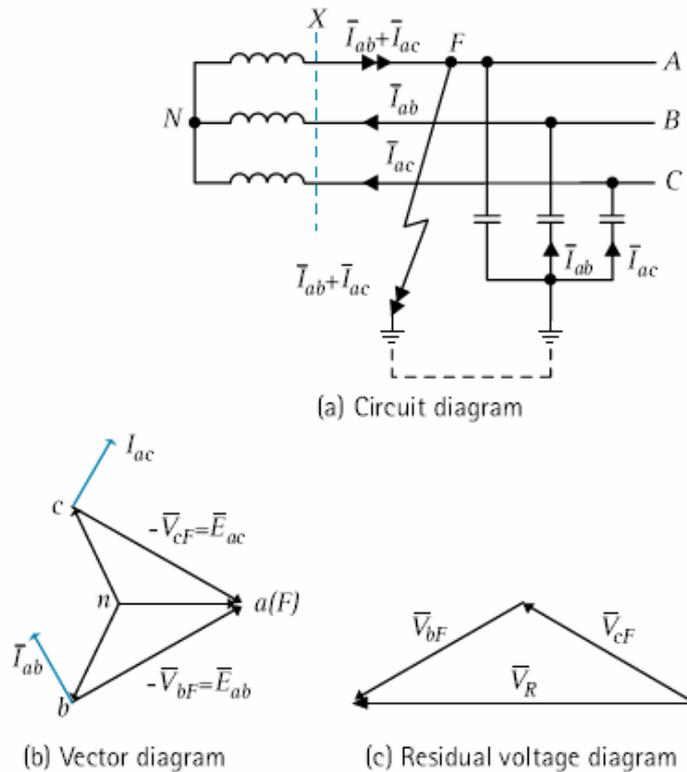
$$\begin{aligned} \vec{V}_R &= \vec{V}_{bF} + \vec{V}_{cF} \\ &= -3\vec{E}_{an} \end{aligned}$$

Pada sumber

$$\vec{V}_R = 3\vec{V}_{ne} = -3\vec{E}_{an}$$

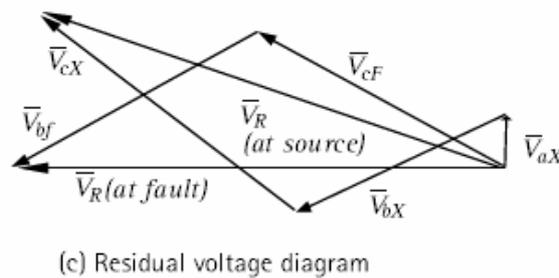
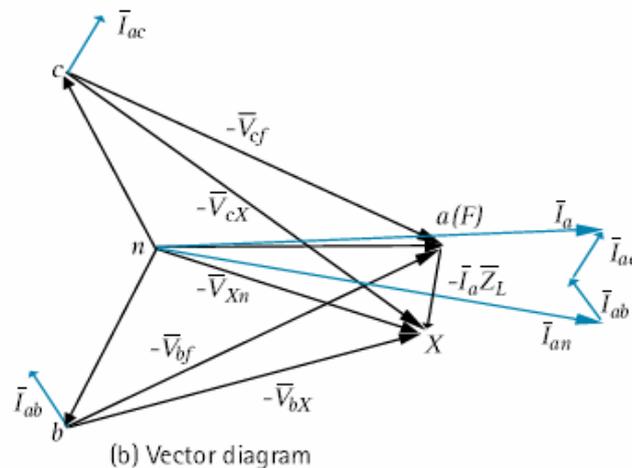
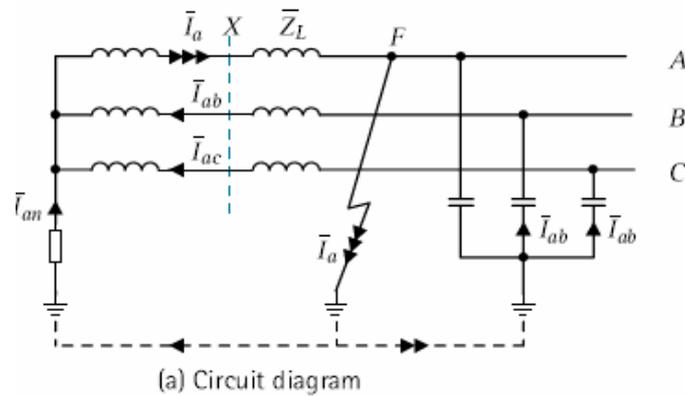
Karena

$$\vec{E}_{an} + \vec{E}_{bn} + \vec{E}_{cn} = 0$$



Gambar 3-14: Gangguan Solid – Netral Terisolasi

Jadi, bila netral sistem terisolasi, tegangan residu menjadi tiga kali dari tegangan fasa – netral pada kondisi normal dari fasa yang mengalami gangguan dan tidak terdapat variasi tegangan antara  $\bar{V}_R$  sumber dan  $\bar{V}_R$  pada gangguan. Dalam praktek, terdapat impedansi bocor antara netral dan tanah dan arus residu masih dapat dideteksi pada titik X dengan menggunakan rele yang cukup sensitif.



Gambar 3-15: Gangguan Solid – Netral ditanahkan melalui resistansi

### b. Gangguan Solid – Netral Ditanahkan Melalui Resistansi

Gambar 3-15 memperlihatkan bahwa kapasitansi dari fasa yang terganggu dihubung singakt oleh gangguan dan kombinasi arus netral dan arus kapasitansi fasa memberikan

$\vec{I}_a$  pada fasa yang mengalami gangguan. Dengan rele dilokasi X, dengan hubungan seperti dalam Gambar 3-12, arus residu  $\vec{I}_{an}$  adalah arus loop antara netral – tanah.

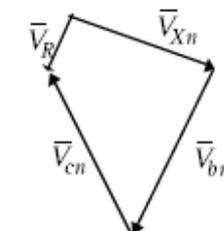
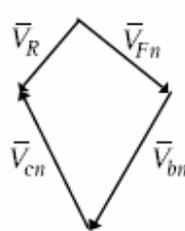
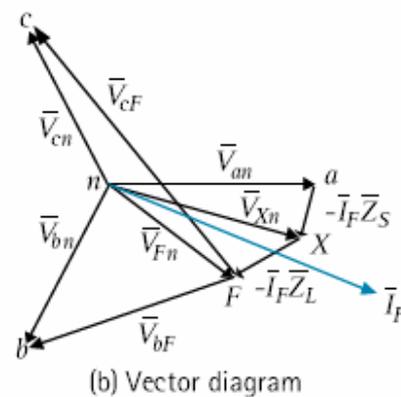
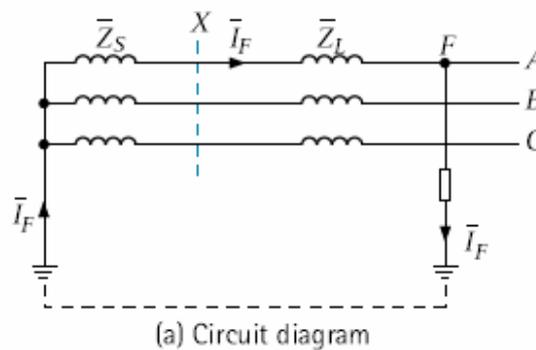
Pada titik gangguan:

$$\vec{V}_R = \vec{V}_{bF} + \vec{V}_{cF} \text{ karena } \vec{V}_{Fe} = 0$$

Pada sumber:

$$\vec{V}_R = \vec{V}_{aX} + \vec{V}_{bX} + \vec{V}_{cX}$$

Dari diagram tegangan residu, terlihat jelas bahwa hanya terjadi sedikit variasi pada tegangan residu antara sumber dan gangguan kebanyakan tegangan residu menurun sepanjang resistor netral. Oleh karena itu derajat variasi dari besaran residu tergantung pada resistor netral.



Gambar 3-16: Gangguan Melalui Tahanan – Netral Solid

c. Gangguan Melalui Resistansi – Netral Ditanahkan Solid

Kapasitansi dapat diabaikan, karena kapasitansi gangguan fasa tidak terhubung, arus sirkulasi kapasitif dapat diabaikan.

Pada titik gangguan:

$$\vec{V}_R = \vec{V}_{Fn} + \vec{V}_{bn} + \vec{V}_{cn}$$

dan pada lokasi rele:

$$\vec{V}_R = \vec{V}_{Xn} + \vec{V}_{bn} + \vec{V}_{cn}.$$

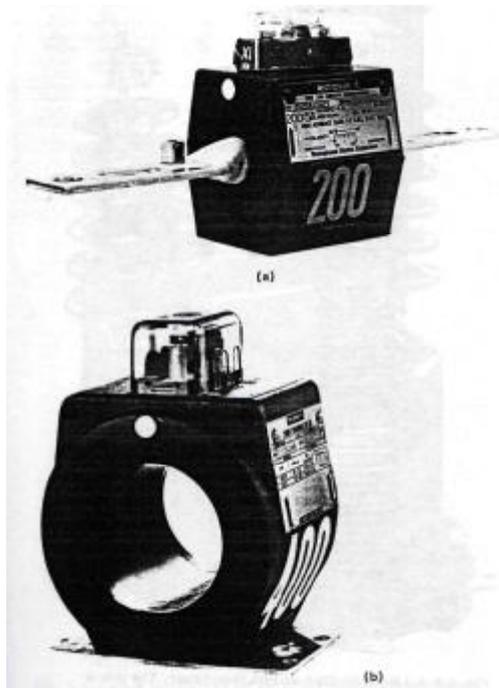
Dari diagram tegangan residual yang diperlihatkan dalam Gambar 3-16, terlihat bahwa tegangan residu lebih besar pada daerah gangguan dan mengecil mendekati sumber. Jika resistansi gangguan mendekati nol, dikatakan gangguan adalah gangguan solid dan  $\vec{V}_{Fn}$  mendekati nol dan tegangan jatuh pada  $\vec{Z}_s$  dan  $\vec{Z}_L$  menjadi besar. Harga ultimate dari  $\vec{V}_{Fn}$  akan tergantung pada efektivitas pentanahan dan merupakan fungsi ratio  $Z_0 / Z_1$  sistem

## BAB 4

### SUMBER-SUMBER MASUKAN RELE

#### 4.1 PENDAHULUAN

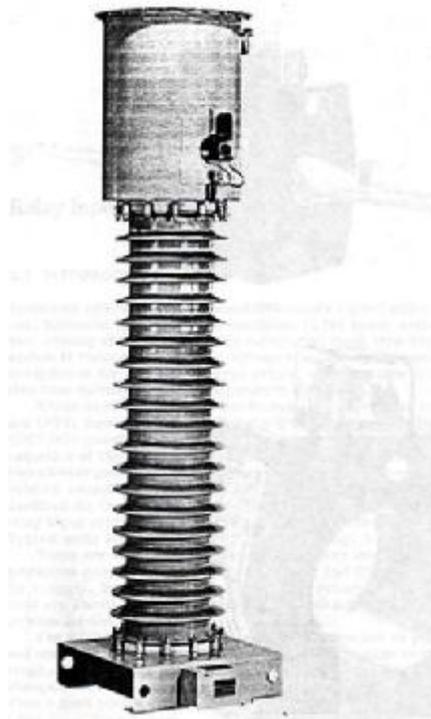
Rele proteksi membutuhkan reproduksi yang akurat dari kondisi normal, keadaan layak (dapat dipertahankan) dan keadaan tak layak (tak dapat dipertahankan) dalam sistem tenaga agar rele mampu mendeteksi dan beroperasi dengan benar. Informasi sistem tenaga ini kebanyakan didapat melalui Transformator-Transformator tegangan dan Transformator-Transformator arus, kecuali untuk rele-rele jenis temperatur yang menerima informasi mereka dari indikator-indikator thermcouples atau indikator temperatur.



Gambar 4-1: Tipikal CT tegangan rendah  
(a). Tipe bar dan (b). Tipe through

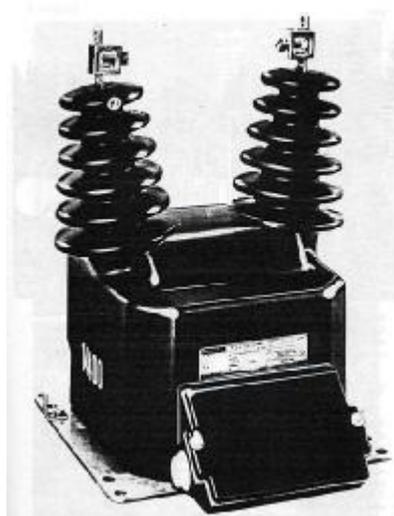
Peralatan-peralatan diatas, seperti: Transformator-Transformator arus (CTs), Transformator-Transformator tegangan (VTs, dulunya PTs), dan Transformator-Transformator tegangan kapasitor gandeng (CCVTs), merupakan pemisah atau penyekat dari sistem tegangan tinggi dan penurun besaran primer menjadi besaran yang dapat diterima rele proteksi. Jadi sisi primer dari Transformator yang dihubungkan kedalam suatu sistem tenaga harus memiliki kemampuan isolasi yang sesuai dengan sistem tersebut. Untuk kesesuaian aplikasi dan disain rele, bagian sekunder Transformator distandarkan. Sumber-sumber masukan rele ini merupakan bagian

penting dari sebuah 'team' proteksi. Tipikal tipe CT diberikan dalam Gambar 4-1 sampai Gambar 4-5.



Gambar 4-2 : CT tipe Oil-filled

Beberapa cara lain untuk menyediakan informasi utama ke rele-rele proteksi dengan menggunakan perangkat elektronik, pipa cahaya, dan fiber optic. Sejauh ini perangkat tersebut masih merupakan proyek-proyek penyelidikan utama yang belum diketahui kemampuannya dalam operasi praktis. Hasil proyek-proyek ini benar-benar menjanjikan di masa depan

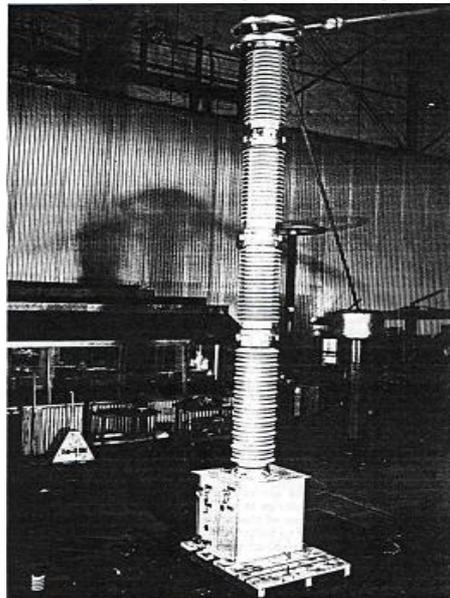


Gambar 4-3 : VT atau PT digunakan pada Sistem tegangan rendah

Masalah-masalah sistem yang tidak dapat ditolerir mungkin dalam kondisi peralihan atau tetap yang dapat menyebabkan perubahan besaran tegangan atau arus primer dalam rentang yang sangat lebar, hal ini terutama terjadi pada besaran arus, yang dapat berubah secara tiba-tiba dari beberapa Ampere menjadi beberapa ratus Ampere pada saat terjadi gangguan. Sedangkan besaran tegangan selama gangguan dapat turun yaitu dari nilai rata-rata menjadi nol.



Gambar 4-4 : Tipikal Gardu Hubung 115 kV dengan VT yang terpasang diatas pipa setinggi 10 ft

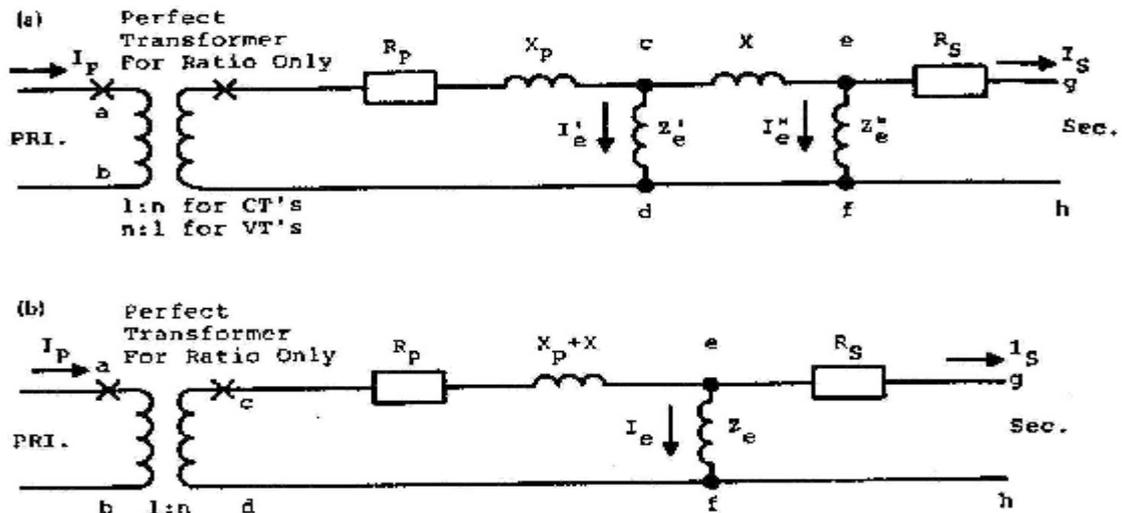


Gambar 4-5 : CCVT yang sedang dalam pengujian dan kalibrasi

#### 4. 2 RANGKAIAN EKIVALEN CT DAN VT

Diagram ekuivalen suatu Transformator (instrumen Transformator) ditunjukkan dalam Gambar 4-6. Impedansi penguatan (permagnetan)  $Z_e$  dalam Gambar 4-6a ditunjukkan dalam dua bagian.  $Z_e'$  adalah impedansi yang merepresentasikan fluks linkage antara inti Transformator dengan reaktansi bocornya  $X$ .  $Z_e''$  merepresentasikan fluks linkage yang

tidak mencapai inti.  $X_p$  adalah reaktansi bocor yang merepresentasikan fluksi yang tidak dapat memotong inti Transformator.  $R_p$  dan  $R_s$  merupakan tahanan-tahanan lilitan primer dan sekunder.



Gambar 4-6: Diagram ekivalen sebuah CT

Untuk Transformator tegangan, nilai dari  $(R_p + R_s)$  dan  $j(X_p + X)$  dijaga rendah guna meminimisasi susut dan pergeseran sudut fasa dari primer ke sekunder. Transformator arus terdiri dari dua tipe : yaitu Transformator dengan fluks linkage yang signifikan pada inti (Gambar 4-6a) dan tipe dengan fluks bocor yang dapat diabaikan (Gambar 4-6b). Pada kedua tipe, impedansi shunt  $Z_e$  harus dijaga tetap tinggi guna menekan susut arus dari primer ke sekunder.

Transformator sempurna atau Transformator ideal yang ditunjukkan dalam diagram adalah untuk memperlihatkan perubahan perbandingan (ratio) tanpa susut atau impedansi. Dalam Gambar semua impedansi berada pada basis sekunder dengan tatanama perunit.

Besaran-besaran primer direduksi sebesar  $n$  perbandingan belitan untuk mendapatkan besaran tegangan dan arus sekunder yang berfungsi sebagai sumber energi bagi rele-rele proteksi dan perlengkapan lainnya. Impedansi-impedansi beban ini biasa disebut burden. Terminologi ini dapat mengacu pada sebuah peralatan atau total beban yang terhubung, termasuk impedansi sekunder instrumen Transformator karena hal itu penting. Untuk peralatan tersebut, burden sering diekpresikan dalam volt-ampere pada besaran tegangan atau arus tertentu. Impedansi beban  $Z_B$  adalah:

$$Z_B = \frac{VA}{I^2} \text{ Ohm untuk CTs atau } Z_B = \frac{V^2}{VA} \text{ Ohm untuk VTs}$$

dimana VA adalah VA burden sedangkan I atau V adalah arus atau tegangan dimana burden diukur.

#### 4.3 APLIKASI TRANSFORMATOR ARUS UNTUK PROTEKSI

Di Amerika Serikat, sebagian besar Transformator arus mempunyai rating sekunder 5A. Rating lainnya, tetapi tidak umum digunakan adalah 1A, namun demikian di beberapa negara lain rating 1A ini digunakan pula. Keuntungan penggunaan rating yang rendah ini akan muncul bilamana dibutuhkan kondisi lead sekunder antara CTs dan rele-rele, seperti pada instalasi tegangan tinggi (HV). Bagaimanapun, perubahan rating Transformator arus tanpa perlu mengurangi energi yang dibutuhkan bagi pengoperasian rele. Dengan VA konstan, penurunan arus berarti kenaikan tegangan dan kebutuhan tingkat isolasi yang lebih tinggi antara primer dan sekunder. Secara keseluruhan, untuk sebagian besar sistem, keuntungan-keuntungan yang ada digantikan oleh kerugian. Untuk saat ini dan masa mendatang kecenderungan penggunaan rele solid state dengan burden yang sangat rendah dibutuhkan standarisasi lain agar dapat lebih berguna. Ukuran unjuk kerja suatu Transformator arus adalah kemampuan dari CTs tersebut untuk menghasilkan/mereproduksi besaran primer ke besaran sekunder dengan akurat, baik dalam magnitudo maupun bentuk gelombang. Terdapat dua bagian dari unjuk kerja, yaitu :

1. Unjuk kerja pada komponen AC simetris dan ;
2. Unjuk kerja pada komponen DC offset. CTs modern memiliki kemampuan reproduksi bentuk gelombang yang benar selama CTs tidak mengalami kejenuhan.

#### 4.4 UNJUK KERJA CTS PADA KOMPONEN AC SIMETRIS

Untuk komponen simetri, unjuk kerja ditentukan dengan melihat arus terbesar yang dapat direproduksi tanpa mengalami kejenuhan yang akan menyebabkan kesalahan perbandingan. Kesalahan sudut fasa umumnya tidak terlalu kritis dan berpengaruh pada kerja rele. Apabila CTs tidak mengalami saturasi, diasumsikan bahwa  $I_e$  dapat diabaikan.

$$I_s = \frac{I_p}{R_c} \text{ Ampere atau } I_s = I_p \text{ per Unit}$$

dimana  $R_c$  adalah perbandingan Transformator arus atau sama dengan  $n$  dalam Gambar 4-6. Untuk CTs yang dihubungkan dalam lead fase pada sistem tenaga dengan beban yang melewatinya, ratio  $R_c$  dipilih sedemikian rupa sehingga arus sekunder tidak melebihi 5 A sekunder. Hal ini diperoleh berdasarkan pengalaman yang ditunjukkan dengan penggunaan tanda skala standar 5A bagi instrumen bergerak. Bila dipilih ratio yang akan menghasilkan arus dibawah 5A pada beban maksimum, maka segala instrumen yang terhubung pada sirkit tersebut tidak akan mencapai skala yang sesuai.

Instrumen dapat saja terhubung atau tidak terhubung melalui sirkit rele, namun penggunaan ini terus berlangsung, dimana standar rating CTs dan rele selalu 5A.

Namun demikian, arus eksitasi CTs,  $I_e$ , tidak pernah nol apabila CT energise baik melalui primer maupun sekunder. Oleh karena itu harus dipastikan bahwa besaran ini diabaikan. Hal ini dapat dilakukan dengan tiga metoda, yaitu:

- (1). Metoda klasik;
- (2). Kurva unjuk kerja CT; dan
- (3). Klas akurasi berdasarkan standar ANSI /IEEE bagi rele.

#### 4. 4. 1 Unjuk Kerja Berdasarkan Analisis Klasik

Formula klasik dari suatu Transformator adalah:

$$V_{ef} = 4,44 f N A \beta_{maks} \times 10^{-8} \quad V$$

dimana  $f$  adalah frekuensi dalam Hertz,  $N$  adalah jumlah lilitan sekunder,  $A$  adalah luas penampang inti besi dalam  $\text{inc}^2$ , dan  $\beta_{maks}$  adalah kerapatan fluks pada inti besi dalam  $\text{Garis}/\text{inc}^2$ . Namun demikian, kebanyakan besaran ini tidak tersedia, dan metoda ini hanya digunakan oleh perancang CT.  $V_{ef}$  adalah tegangan yang dibutuhkan oleh CT untuk dapat menghasilkan arus disisi sekunder menuju beban.

Beban yang terhubung pada CT terdiri dari tahanan sekunder CT,  $R_s$ , impedansi leading  $Z_{ld}$ , dan peralatan lain (rele, dan sebagainya),  $Z_r$ . Tegangan yang diperlukan beban adalah :

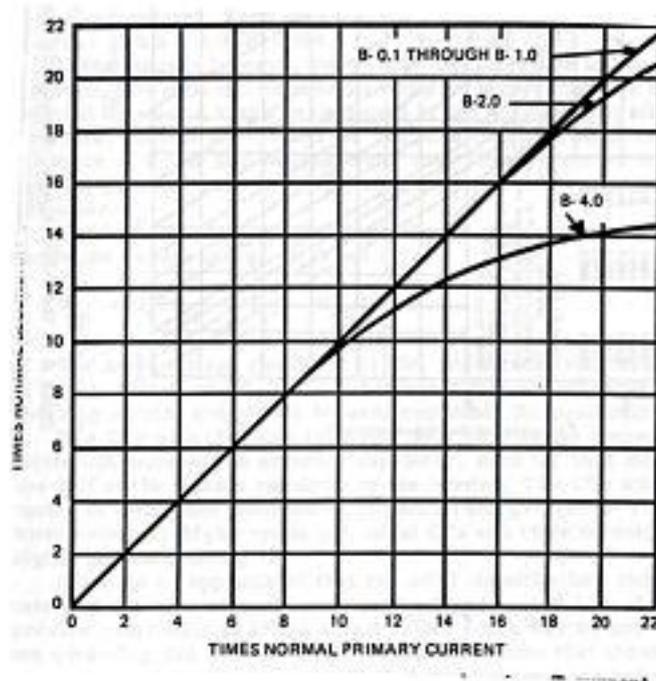
$$V_{ef} = I_s (R_s + Z_{ld} + Z_r) \quad V$$

#### 4. 4. 2 Unjuk Kerja Berdasarkan Kurva Karakteristik CT

Perhitungan unjuk kerja dengan menggunakan rangkaian ekuivalen dalam Gambar 4-6a sukar dilakukan, meskipun harga  $X$  diketahui. Standar ANSI/IEEE nomor C57.13 tentang CTs mengetahui kondisi ini, oleh karena itu CTs yang memiliki fluks linkage signifikan dengan tipe inti dimasukkan dalam KLAS T. CTs yang memiliki satu atau beberapa belitan primer yang mengelilingi inti, juga dimasukkan dalam KLAS T. Unjuk kerja CTs tipe ini dapat ditentukan dengan baik melalui pengujian.

CTs dirancang agar dapat meminimisasi fluks linkage pada inti, seperti pada tipe langsung, bar dan tipe bushing (Gambar 4-1), dimana rangkaian ekuivalennya didapat dari modifikasi sirkit ekuivalen Gambar 4-6b. Sirkit ekuivalent digambarkan dengan menempatkan reaktansi bocor  $X$  didepan cabang reaktansi permagnetan, dan cabang-cabang ini dapat diparalel dengan  $Z_e$ . Dengan sirkit ekuivalen seperti ini, unjuk kerja CT dapat dihitung. CTs ini dirancang sebagai CTs KLAS C.

Evaluasi berdasarkan kurva unjuk kerja memerlukan pengujian kurva seperti diperlihatkan dalam Gambar 4-7 untuk KLAS T, atau kurva permagnetan (eksitasi) seperti dalam Gambar 4-8 untuk KLAS C. B-1 sampai B-6 pada Gambar 4-8 menunjukkan standar beban. Angka memperlihatkan impedansi beban dalam OHM pada faktor kerja 0,5. B-1 adalah beban sebesar  $1\Omega$ , B-8 adalah beban  $8\Omega$ , demikian seterusnya.



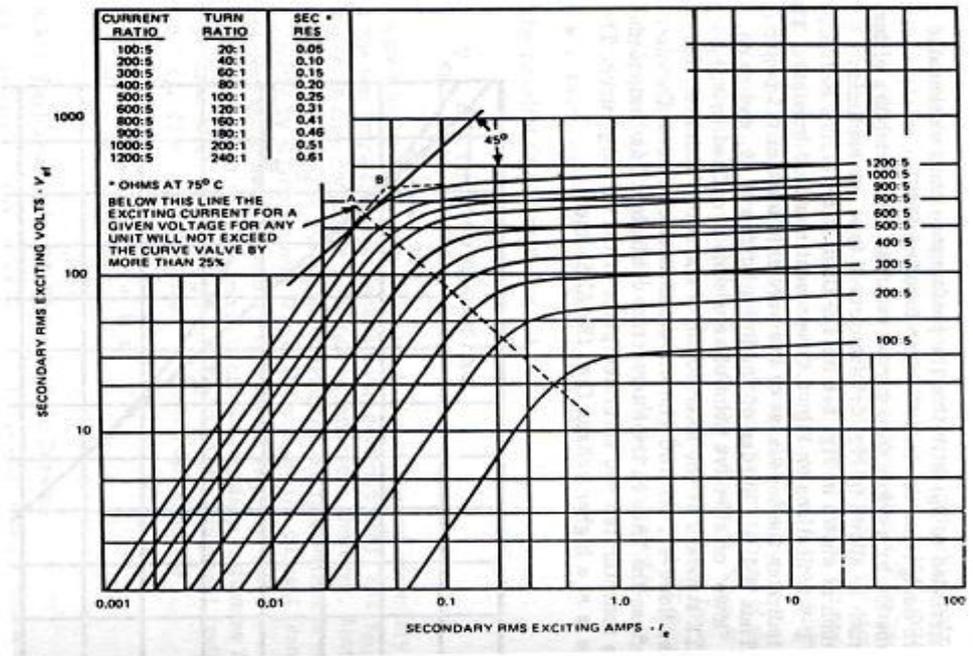
Gambar 4-7 : Tipikal kurva ratio arus lebih CT klas T

Lutut atau titik efektif saturasi didefinisikan oleh standar ANSI/IEEE sebagai perpotongan kurva dengan garis tangen  $45^\circ$ . Namun demikian, IEC mendefinisikan daerah lutut sebagai perpotongan antara garis lurus yang ditarik dari bagian tidak jenuh dan bagian yang telah mengalami kejenuhan dari kurva permagnetan. Daerah lutut dari IEC memiliki tegangan lebih tinggi dari daerah lutut dari standar ANSI.

#### 4. 4. 3 Unjuk Kerja Berdasarkan Klas Standar Akurasi ANSI/IEEE

Dalam beberapa aplikasi, penggunaan gambaran klas akurasi dari ANSI/IEEE dibutuhkan untuk menjamin unjuk kerja rele dengan baik. Seperti dikemukakan, ada dua kelas standar, yaitu : kelas T, dimana unjuk kerjanya tidak mudah untuk dihitung, untuk itu digunakan kurva pengujian pabrik ; dan kelas C, dimana unjuk kerjanya dapat dihitung. Penggambaran ini diikuti oleh indikator tegangan terminal sekunder,  $V_{gh}$ , dimana Transformator dapat menghasilkan arus sekunder ke beban standar 20 kali dari rating arus standar tanpa melampaui 10% koreksi rasio. Angka 10% ini tidak akan terlampaui untuk arus dari 1 sampai 20 kali rating arus standar sekunder CT pada

burden standar atau dibawah burden standar. Untuk rele, klas tegangan yang digunakan adalah 100, 200, 400 dan 800, sesuai dengan standar burden B-1, B-2, B-4 dan B-8 secara beturut-turut. Beban-beban ini pada faktor daya sebesar 0,5, dengan satuan burden OHM, diperoleh dengan cara membagi rating tegangan dengan 20 kali rating arus sekunder. Jadi bila rating tegangan adalah 800 Volt, dengan burden B-8, maka:  $8\Omega \times 5A \times 20 = 800\text{ V}$ .



Gambar 4-8 : Tipikal kurva eksitasi CT Klas C Multiratio

Jika arus lebih rendah, maka proporsi burden menjadi lebih besar, namun demikian hal ini tidak terpakai untuk arus yang lebih tinggi karena impedansi internal yang diabaikan akan mempengaruhi unjuk kerja. Dengan demikian untuk rating tegangan 400 V, CT akan mampu melakukan arus sebesar 100 A dengan burden 4  $\Omega$  atau lebih kecil dengan ratio kesalahan tidak lebih dari 10%. CT tersebut mampu melewatkan arus sebesar 50 A dengan burden 8  $\Omega$  dan kesalahan tidak lebih dari 10%.

Untuk rating tegangan tersebut, lebih umum digunakan tegangan terminal dibanding tegangan eksitasi, atau :

$$V_{gh} = I_s (Z_{ld} + Z_r) \quad V$$

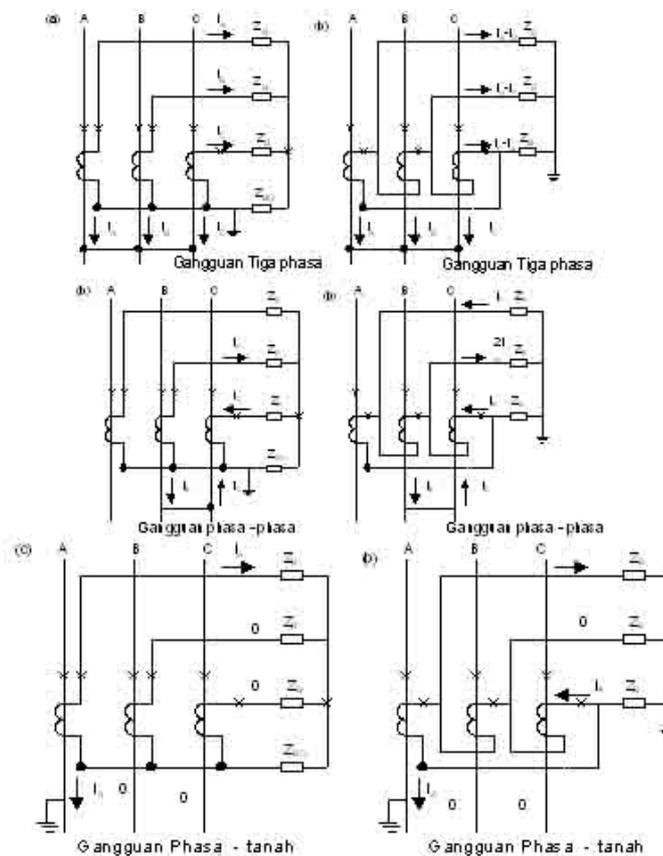
Untuk klas tegangan lebih rendah seperti 10, 20, dan 50 dengan standar burden B-O,1, B-O,2, dan B-O,5 pada faktor daya sebesar 0,9 terutama digunakan untuk pengukuran dan untuk keperluan proteksi harus digunakan secara hati-hati.

Dua CTs dengan rasio yang sama dan kedua sisi sekundernya dihubungkan secara seri akan menaikkan ketelitian menjadi lebih baik. Masing-masing CT hanya menyumbang setengah dari tegangan yang dibutuhkan burden. Dua CTs dengan sirkit primer

terhubung seri dan sekunder terhubung paralel dapat menghasilkan ratio lebih rendah dengan ratio individual tinggi dari CTs dan rating ketelitian tinggi.

Harus dipahami bahwa klasifikasi ANSI hanya menunjukkan bahwa koreksi ratio atau kesalahan tidak akan melampaui 10%; tidak memberikan informasi aktual, yang dapat berapa saja tetapi tidak akan melebihi 10%. Penting juga diingat bahwa klas ketelitian ini hanya berlaku untuk belitan penuh, dan akan menurun bila digunakan tap yang lebih rendah. Kebanyakan Transformator klas C adalah tipe bushing multi ratio dengan 5 tap sekunder, seperti diperlihatkan dalam Gambar 4-8. Unjuk kerja pada tap rendah akan menurun secara signifikan dan terbatas. Secara umum, penggunaan rasio tap rendah seharusnya dihindarkan, dan apabila terpaksa digunakan harus diperiksa lebih dahulu.

Menurut standar, pabrikasi CT dimaksudkan untuk memenuhi kebutuhan rele akan: 1. Klas ketelitian; 2). Rating thermis dan short-time mechanical; 3). Tahanan; 4). Kurva-kurva seperti dalam Gambar 4-7 untuk kelas T dan Gambar 4-8 untuk kelas C.



Gambar 4-9: Burden pada CT untuk beberapa tipe hubungan dan gangguan

#### 4. 5 BURDEN SEKUNDER SELAMA GANGGUAN

Burden yang dirasakan oleh CT untuk beberapa jenis gangguan dan hubungan pengkawatan ditunjukkan dalam Gambar 4-9.  $Z_B$  adalah jumlah dari seluruh sirkit yang terhubung antara CTs dan rele ditambah rele dan perangkat lain yang terhubung. Diasumsikan bahwa burden untuk setiap fasa adalah sama, namun hal ini mungkin tidak

seluruhnya benar. Bila CTs dihubungkan Delta (Gambar 4-4b), burden CT pada fasa A adalah  $(I_A - I_B)Z_B - (I_C - I_A)Z_B$  dan dapat disederhanakan menjadi  $[2I_A - (I_B + I_C)]Z_B$ . Untuk gangguan tiga fasa dimana  $I_A + I_B + I_C = 0$ , jadi  $(I_B + I_C) = -I_A$ . Selanjutnya substitusikan harga ini, burden menjadi  $4I_A Z_B$ .

Karena rele-rele fasa diatur untuk mendapatkan besaran pada arus gangguan tiga, sedangkan rele gangguan tanah diatur untuk merasakan arus gangguan satu fasa ke tanah, diagram gangguan fasa-fasa jarang digunakan. Dari diagram terlihat bahwa burdennya sama dengan burden untuk gangguan tiga fasa, dengan arus gangguan fasa-fasa yang lebih kecil, arus gangguan tiga fasa adalah arus gangguan yang terbesar.

#### 4.6 RINGKASAN EVALUASI UNJUK KERJA CT PADA KEADAAN TUNAK

Pertama dengan asumsi arus eksitasi diabaikan dan tentukan arus sekunder maksimum dari persamaan 5-2 untuk gangguan maksimum dimana proteksi diharapkan bekerja. Tentukanlah burden total yang terhubung ke CTs.

Jika estimasi unjuk kerja dilakukan menggunakan standar ANSI, hitung tegangan maksimum yang dibutuhkan CT berdasarkan persamaan 5-5, dan bandingkan hasilnya dengan rating CT sesungguhnya. Agar lebih teliti, tentukan dengan menggunakan CTs tipe T, tentukan unjuk kerja dari arus primer maksimum dan burden berdasarkan kurva seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4-7 yang didapat dari pabrikasi CTs.

Untuk tipe C, hitung tegangan yang harus dihasilkan pada gangguan maksimum menggunakan persamaan 5-4 dan tentukan magnitude kurva eksitasi yang ada disertakan pada CT, seperti diperlihatkan Gambar 4-8. Perbandingan antara  $I_e$  dengan arus sekunder yang dibutuhkan menunjukkan unjuk kerja CT. Jika  $V_{ef}$  lebih rendah dari kemampuan CT, maka  $I_e$  akan kecil dan memiliki pengaruh minimum pada  $I_s$ . Sebaliknya apabila  $V_{ef}$  melebihi kemampuan CT, maka  $I_e$  akan sangat berarti dan  $I_s$  bagi rele akan lebih rendah dari yang diharapkan atau dibutuhkan dan unjuk kerja CT akan terpengaruh. Distorsi dari bentuk gelombang akan tinggi bila CTs dioperasikan melebihi 'lutut' kurva saturasi. Hal ini mungkin mengganggu kerja atau operasi dari beberapa desain rele.

Dalam banyak kasus, dalam praktek penambahan impedansi burden dan arus secara aljabar, tetapi secara teoritis mereka harus digabungkan secara phasor. Jika unjuk kerja adalah marjinal, penggabungan secara phasor; sebaliknya, penjumlahan langsung lebih mudah dan memuaskan. Burden pada umumnya mendekati uniti faktor daya bilamana  $I_e$  tertinggal  $90^\circ$ , sehingga kombinasi  $I_e$  dan  $I_s$  pada sudut yang tepat adalah perkiraan yang tepat.

Beberapa rele, seperti pada rele arus lebih-waktu elektromekanik, cenderung jenuh pada arus tinggi, jadi impedansi internal menurun dan menjadi lebih resistiv. Untuk rele jenis ini pabrik menyediakan data burden pada beberapa tingkatan arus. Sebagai contoh : untuk jenis rele dengan sensitivitas 0,5 A memiliki impedansi  $9,5\Omega$  pada 0,5 A;  $9,3\Omega$

pada 1,5 A;  $5,3 \Omega$  pada 5 A ; dan  $3,5 \Omega$  pada 10 A (dengan 20 TAP). Penyusutan burden membantu unjuk kerja sebuah CT.

#### 4. 7 CONTOH UNJUK KERJA CT PADA KEADAAN TUNAK

Tinjau C100, 600:5 multiratio CTs yang akan digunakan dengan rele arus lebih yang akan dipergunakan untuk proteksi jaringan dengan gangguan tiga fasa maksimum sebesar 2500 A pada sisi primer dan minimum arus gangguan pada primer 350 A. Beban maksimum pada penyulang adalah 90 A.

Dengan beban tersebut maka akan lebih baik untuk memilih CTs dengan ratio yang lebih rendah, tetapi sering kali CTs dipilih sebelum data sistem yang memadai diketahui. Pemilihan CT ratio tinggi tap multi dilakukan untuk mengantisipasi daerah operasi yang memungkinkan. Bagaimanapun, hal tersebut dapat memberikan masalah-masalah dalam sistem proteksi.

Pilihan pertama yang akan dipilih adalah CT dengan ratio tap 100 : 5 ( 20 : 1). Dengan CT ini, arus maksimum beban pada sekunder adalah  $90/20 = 4,5$  A. Untuk rele gangguan fasa, dapat dipilih tap 5, yang memberikan harga arus diatas arus beban maksimum seperti yang diperlukan untuk menghindari operasi dalam keadaan beban maksimum. Pada tap rele seperti ini burden adalah 2,64 VA. Lead resistansi mulai dari rele sampai ke CT adalah  $0,4\Omega$ . Dengan menganggap arus eksitasi nol, arus pick-up rele disisi primer pada tap 5 adalah  $5 \times 20 = 100$  A.

Bagaimanapun, tanpa mengabaikan arus eksitasi, arus pick-up rele disisi primer akan menjadi lebih besar. Total impedansi sekunder yang ditambahkan secara langsung adalah :

Burden rele, $2,64/5^2$	$0,106 \Omega$
Resistansi leading	$0,400 \Omega$
CT resistansi sekunder	<u><math>0,082 \Omega</math></u> (lihat Gambar 4-10)
Total CT sekunder	$0,588 \Omega$

Tegangan yang diperlukan untuk menghasilkan arus sekunder sebesar 5A adalah:  $5 \times 0,588 = 2,94$  Volt. Dari karakteristik CT pada Gambar 4.10 harga  $I_e$  untuk tegangan 2,96 Volt pada kurva 100/5 sekitar 0,22 A. Jika  $I_s$  langsung ditambahkan ke  $I_e$ , totalnya adalah 5,22 dan arus primer yang dibutuhkan untuk mengoperasikan rele hanya sebesar  $20 \times 5,22$  atau 104,4 A.

Jika  $I_s$  dan  $I_e$  ditambahkan pada  $90^\circ$  , totalnya adalah  $\sqrt{(5)^2 + (0,22)^2} = 5,005$  , yang akan memberikan arus primer sebesar  $20 \times 5,005 = 100,10$  A. Dengan arus gangguan minimum sebesar 350 A, maka untuk kedua cara penjumlahan didapat masing-masing

$350/104,4 = 3,35$  atau  $350/100,10 = 3,5$  kali arus pick-up rele. Angka ini dapat diterima. Namun demikian, mari kita lihat untuk arus gangguan maksimum. Dengan mengabaikan arus sekunder maka  $I_e$  haruslah  $2500/20 = 125A$ . Dengan memilih tap 20 kali burden rele adalah 580 VA, jadi untuk arus yang lebih tinggi total burden adalah :

Burden rele, $580/100^2$	0,058 $\Omega$
Resistansi leading	0,400 $\Omega$
CT resistansi sekunder	<u>0,082</u> $\Omega$
Total CT sekunder	0,540 $\Omega$

Dan tegangan yang diperlukan untuk melewati arus sebesar 125 A yang melalui rele adalah  $125 \times 0,54 = 67,5$  V. Seperti yang dapat dilihat dari Gambar 4.10, Hal ini tidak mungkin, CTs pada 100 : 5 tap hanya dapat menghasilkan 12 sampai 15 Volt sebelum mencapai titik jenuh dan dari kurva maksimum sekitar 20 sampai 25 Volt. Jadi kombinasi ini tidak dapat digunakan.

Sekarang mari kita lihat bila kita pilih CT dengan ratio tap 400 : 5. Dengan ini arus beban maksimum pada sekunder adalah  $90/80 = 1,13$  A. Dengan memilih tap rele pada 1,5 A, dimana burdennya adalah 3,5 VA. Dengan tap ini dan dimisalkan tidak ada arus eksitasi, arus pick-up primer akan menjadi  $1,5 \times 80 = 120$  A. Total burden adalah:

Burden rele, $3,5/1 \times 5^2$	1,556 $\Omega$
Resistansi leading	0,400 $\Omega$
CT resistansi sekunder	<u>0,211</u> $\Omega$ ( Gambar 3-10)
Total CT sekunder	2,167 $\Omega$

Tegangan yang diperlukan untuk melalukan arus sebesar 1,5 A dalam rele adalah  $V_{ef} = 1,5 \times 2,167 = 3,25$  V, dan dari gambar 5.10,  $I_e = 0,024$  A. Untuk kasus terburuk dengan cara penambahan langsung, arus pic-up primer adalah  $80 \times 1,524 = 121,92$  A. Angka ini dapat diterima, karena besarnya masih dibawah arus gangguan minimum 350A ; Arus gangguan ini menghasilkan 2,9 kali arus pick-up rele.

Untuk arus gangguan maksimum, dengan mengabaikan arus eksitasi  $I_e$ , arus sekunder akan menjadi  $2500/80 = 31,25$  A dan diasumsikan bahwa burden rele pada tingkat ini tidak jauh berbeda, tegangan sekunder  $V_{ef}$  yang diperlukan adalah  $31,25 \times 2,167 = 67,72$  Volt. Harga ini mendekati kurva 'lutut' saturasi,  $I_e$  untuk tegangan 68 V adalah sekitar 0,16 A, harga ini tidak mengalami penurunan arus gangguan yang dirasakan rele, yaitu 20 kali arus pick-up rele.

Apabila tap 1,5 A tidak tersedia, maka dapat digunakan tap 2,0 dari CT dengan ratio tap 400: 5. Dengan pemilihan ini dan dengan pengabaian  $I_e$ , arus pick-up primer adalah sebesar  $80 \times 2 = 160$  A. Dengan anggapan burden rele sama seperti pada pemilihan tap 1,5, total burden adalah :

Burden rele, $3,5/2^2$	0,875 $\Omega$
Resistansi leading	0,400 $\Omega$
CT resistansi sekunder	<u>0,211 <math>\Omega</math></u>
Total CT sekunder	1,486 $\Omega$

$V_{ef} = 2 \times 1,486 = 2,972$  Volt, dimana  $I_e = 0,022$  A, jadi dengan penambahan langsung , arus pick-up primer menjadi  $80 \times 2,022 = 161,76$  A. Harga ini dapat diterima karena arus gangguan minimum adalah 2,16 kali pick-up.

Untuk arus gangguan maksimum, arus sekunder akan menjadi  $2500/80 = 31,25$  A,  $V_{ef} = 31,25 \times 1,486 = 46,438$  V, dimana  $I_e = 0,11$  A, dan besaran ini tidak mengurangi arus yang dirasakan oleh rele. Evaluasi yang dilakukan dengan standar ANSI memperoleh hasil yang sama. Bila dipilih CT dengan ratio tap 100 : 5 dan tap rele 5, tegangan terminal berdasarkan analisis awal, dengan menggunakan persamaan 5-5, untuk arus gangguan maksimum :

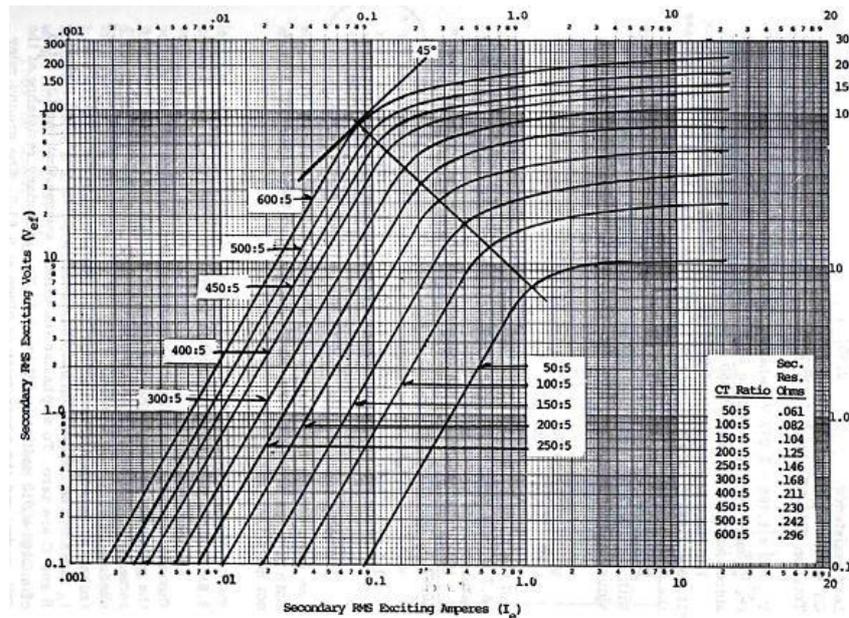
$$V_{gh} = \frac{2500}{20}(0,058 + 0,4) = 57,25 \text{ V}$$

tetapi dengan CT C100 pada ratio tap 100 : 5 yang hanya dapat mensuplai 100 ( $100/600$ ) = 16,7 Volt dan karena suplai yang dibutuhkan adalah 57,25 V, maka CT akan mencapai titik jenuh seperti ditunjukkan sebelumnya.. Apabila digunakan CT dengan ratio tap 400 : 5, CT C100 hanya dapat mensuplai 100 ( $400/600$ ) = 66,67 V. Bagaimanapun tegangan yang diperlukan adalah :

$$V_{gh} = \frac{2500}{80}(1,56 + 0,4) = 61,25 \text{ V, untuk tap rele 1,5}$$

$$V_{gh} = \frac{2500}{80}(0,875 + 0,4) = 57,25 \text{ V, untuk tap rele 2,0}$$

Keduanya ini termasuk dalam rating 66,67 Volt. Jadi rasio kesalahan < 10 %.



Gambar 4-10: Tipikal kurva eksitasi untuk CT multi ratio 600 : 5 Klas C100

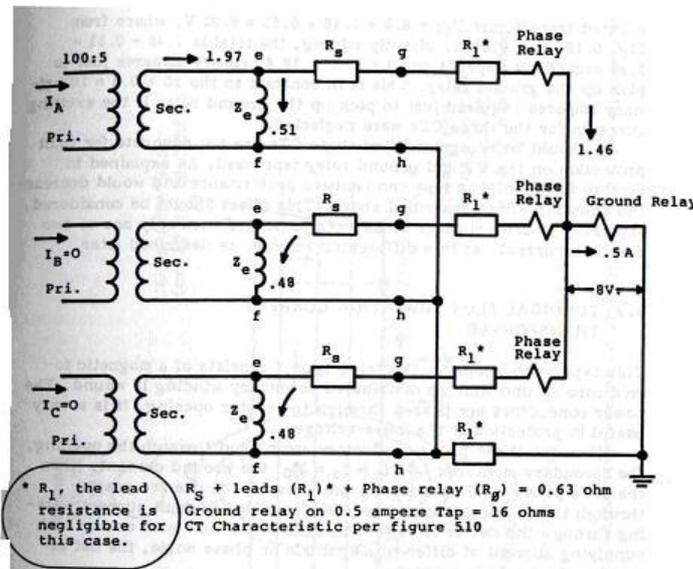
#### 4. 8 UNJUK KERJA CT AKIBAT PENGARUH UN-ENERGIZE

Suatu CT dengan sekunder terhubung tetapi dengan primer tidak dilalui arus atau arus permagnetan dieksitasi dari sekunder dan akan membutuhkan arus  $I_e$ . Hal ini terjadi bila CT diparalelkan dalam suatu sirkuit diferensial atau selama terjadi gangguan satu fasa ke tanah. Sebagai contoh kasus gangguan satu fasa ke tanah diilustrasikan seperti dalam Gambar 4-11. Bila terjadi gangguan pada fasa A, CT yang terpasang pada fasa A akan dialiri arus  $I_A$ , tetapi arus pada fasa B dan C adalah nol. Untuk mengetahui pengaruh tersebut, misalkan digunakan perbandingan tap 100 : 5 dari suatu CT tipe C100 multi ratio dengan perbandingan 600:5. Tahanan sekunder dari CT leading dan resistansi rele fasa 0,63  $\Omega$ . Rele tanah memiliki resistansi 16  $\Omega$  pada tap 0,5 A lagging 68°.

Dengan demikian untuk melakukan arus pick-up melalui rele gangguan tanah dibutuhkan tegangan sebesar  $0,5 \times 16 = 8$  volt. Tegangan ini, sedikit berkurang akibat adanya rangkaian rele-rele fasa, yang akan terjadi pada CT-CT yang terdapat di fasa B dan C yang akan mengeksitasi keduanya. Tegangan  $V_{ef}$  tergantung pada arus, yang tergantung pada besarnya tegangan, jadi penentuan yang pasti dilakukan dengan proses 'cut dan try'. Sebagai try pertama, misalkan bahwa  $V_{ef} = 8$  V. Dari karakteristik CT (lihat Gambar 4-6), harga  $I_e$  untuk 8 V adalah = 0,49 A. Arus ini akan melewati impedansi rele fasa yang akan mengakibatkan drop tegangan sehingga harga  $V_{ef} = 8 - (0,49 \times 0,63) = 7,69$  V, dimana untuk tegangan sebesar itu harga  $I_e = 0,47$ . Iterasi berikutnya menghasilkan harga  $I_e = 0,48$  A yang dibutuhkan untuk mengeksitasi CT pada fasa B dan C. Arus primer lainnya akan membantu mengoffset ini.

Jadi arus yang mengalir pada rangkaian fasa A merupakan penjumlahan dari arus pickup rele tanah dan arus eksitasi pada fasa B dan C. Dengan penjumlahan langsung besar arus ini adalah :  $0,50 + 0,48 + 0,48 = 1,46$  A, dengan penambahan secara fasor didapat :

$0,5 \angle 68^\circ + j0,48 + j0,48 = 1,44 \angle 82,4^\circ$ . dapat dilihat bahwa perbedaannya tidak terlalu berarti. Tegangan yang membangkitkan fasa A Transformator arus dengan  $V_{eff} = 8,0 + 1,46 \times 0,63 = 8,92$  V dimana dari gambar 5.10,  $I_e = 0,51$  A. Penambahan secara langsung menghasilkan jumlah total  $1,46 + 0,51 = 1,97$  A sekunder atau  $20 \times 1,97 = 39,4$  A primer yang hanya untuk mendapat rele ground. Hal ini sesuai untuk  $20 \times 0,5 = 10$  A primer yang perlukan hanya untuk mendapat rele ground jika pembangkitan arus untuk 3 CTs diabaikan.



Gambar 4-11: Diagram ekivalen untuk hubungan rele tiga fasa dan rele tanah. Arus-arus yang diperlihatkan adalah arus pada saat terjadi gangguan satu fasa ke tanah

Perlu diketahui bahwa CTs ini tidak memadai untuk melindungi kesalahan dalam CT dan tap rele grond yang digunakan. Seperti dijelaskan pada bagian 4.4.3 tap-tap yang lebih tinggi dapat memperbaiki penampilan dan akan mengurangi efek langsung yang digambarkan diatas. Efek ini akan dipertimbangkan secara khusus dimana nomor CTs diparalelkan dengan hanya satu atau dua arus yang dibawa, seperti dalam perbedaan bagan, seperti yang telah digambarkan sebelumnya.

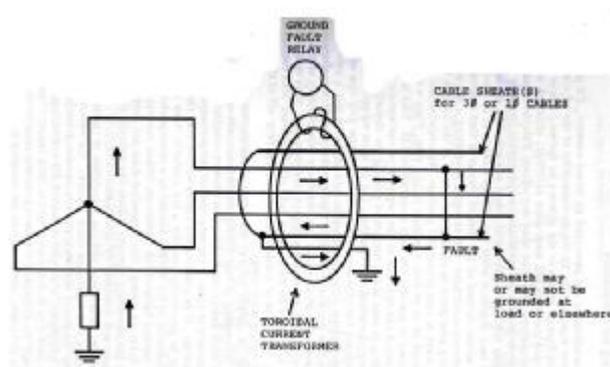
#### 4. 9 TRANSFORMATOR ARUS PENJUMLAHAN FLUKS TOROIDA

Jenis ini, juga dikenal dengan sebutan jenis cincin, terdiri atas kawat melingkar (Toroida) magnetik melingkari inti yang menjadi distributor pada lilitan sekunder yang melingkar. Penghantar tenaga melewati sepanjang inti terbuka. Hal ini sangat dibutuhkan/berguna dalam proteksi pada tegangan yang lebih rendah.

Kawat tiga fasa konduktor/penghantar melalui pembukan pengukuran sekunder  $I_a + I_b + I_c = 3 I_o$ , arus tanah. Ketika fasa konduktor konduktor yang sama pada dua pertemuan akhirmelalui sepanjang pembukaan arus bersih untuk pengisian atau keluaran arus yang melewati sepanjang pertemuan = nol. Untuk sebuah kesalahan

dalam dengan satu atau kedua arus penyuplai yang berbeda besran dan sudut fasa, nilai bersih atau penjumlahan seimbang = arus salah.

Penjumlahan arus gaya lebih baik dari pada penjumlahan tersendiri dari Transformator arus sekunder terpisah. Keuntungannya bahwa perbandingan CT bebas dari pengisian arus atau KVA dari jaringan sirkuit, dn menghindari kesulitan-kesulitan dari ketidakseimbangan penjenuhan CT individual atau tampilan dengan pararel CTs. Kerugiannya adalah pembatasan ukuran konduktor dapat dilewati sepanjang pembukaan. Suatu contoh/replika perbandingan dari CT ini adalah 50:5, dan pembukaan maksimum berkisar 8 inch untuk diameternya.



Gambar 4-12 : Tipikal Penggunaan CT jenis Toroid untuk Proteksi Gangguan

Umumnya CT digunakan dengan 0,25 A untuk unit arus lebih. Penggabungan terdapat alat pemungut (pick-up) primer untuk 5 A yang lebih baik daripada 2,5 A jika arus gugah (exciting moment) diabaikan. Penerapan yang lebih mendalam akan dibicarakan pada pelajaran selanjutnya.

Logam bersarung atau kabel berpelindung yang melewati sepanjang CT Toroida dapat menyebabkan atau menghasilkan arus salah dalam pembatalan. Hal-hal ini digambarkan pada Gambar 4-12. Penerapan ini terdapat tidak hanya untuk kabel tiga fasa yang ditunjukkan, tetapi untuk kabel satu fasa. Pembatalan mungkin sebagian atau keseluruhan, hal tergantung pada pelindung pembumian. Komponen pelindung dari arus salah dapat dipindahkan dengan melewati sepanjang CT dengan cara menghubungkan penghantar/konduktor seperti yang ditunjukkan.

#### 4. 10 UNJUK KERJA CT PADA KOMPONEN ARUS DC

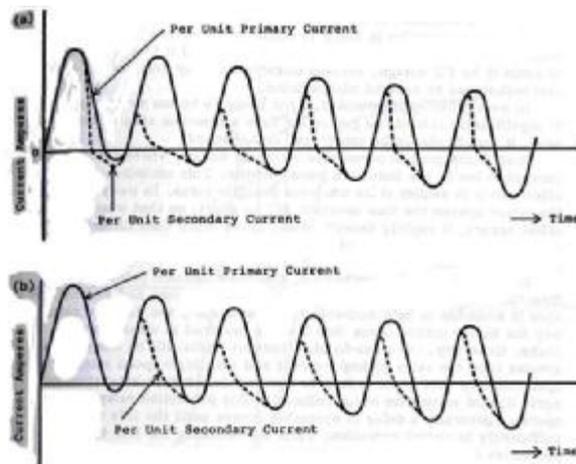
Sejak Transformator dilimpahkan oleh arus langsung, tampilan CT dirusak berat oleh komponen DC untuk arus AC. Ketika perubahan arus terjadi pada sistem AC primer, satu atau lebih arus tiga fasa akan mengalami beberapa geseran DC, walaupun tidak ada yang mencapai maksimum dan yang satunya (arus tiga fasa) tidak akan mengalami pergeseran. DC ini dihasilkan dari keperluan untuk menghilangkan dua syarat yang bertentangan yang mungkin terjadi:

- Pada jaringan induksi tinggi, gelombang arus harus mendekati maksimum ketika gelombang tegangan mendekati atau sama dengan nol, dan
- Arus sesungguhnya pada waktu penggantian adalah yang dihilangkan oleh kondisi jaringan terdahulu. Sebagai contoh, arus yang diperkuat dengan arus menjadi nol dahulu untuk menutup rangkaian sejenak ketika gelombang tegangan nol yang menampilkan suatu masalah.

Pada syarat 1 arus harus mendekati atau maksimum pada saat itu. Sehingga arus lawan dihasilkan untuk memenuhi nol seperti yang diminta oleh syarat 2. Ini adalah komponen DC yang seimbang dan berlawanan dengan yang diminta oleh arus DC pada syarat 1, dengan dua penambahan menuju nol pada saat penutupan rangkaian.

Karena telah dilengkapi fungsi ini, DC tidak lagi syaratkan tetapi ini dapat menghilangkannya dengan penghilangan yang tergantung pada waktu konstan  $L/R$  dari sistem tenaga. Penghilangan DC mengakibatkan segala sesuatu seperti arus AC frekuensi rendah ketika melewati transformator arus. Hal ini dapat menjenuhkan besi sehingga reproduksi sekunder dari arus primer dapat dibatasi dan diubah sama sekali. Hal ini digambarkan pada Gambar 4-13 untuk laju 20 waktu pergeseran arus penuh dengan beban (beban) menahan. Beban (beban) jenis ini menyebabkan penurunan yang tajam untuk arus sekunder sepanjang tiap rotary/lingkaran.

Setelah penjenahan terjadi, penghilangan dari komponen DC menyebabkan/menghasilkan dalam pemulihan CT sehingga selama setiap putaran berikutnya arus sekunder sekin mendekati primer. Hal ini dapat diasumsikan bahwa tidak ada penjumlahan AC. Hal tersebut mungkin terjadi tetapi jarang terjadi dimana arus sekunder sangat jadi pada praktek nya mencapai nol untuk beberapa putaran/lingkaran pada kasus yang sangat sederhana.



Gambar 4-13 : Tipikal kemungkinan distorsi pada arus sekunder CT akibat dari kejenuhan DC :  
 (a) Beban resistif besar ; (b) Beban resistif yang lebih kecil

Induktansi pada beban (beban) menghasilkan/ terjadi dalam penurunan yang lebih teratur dan kontinyu, ketika beban yang lebih rendah mereduksi/ mengurangi cacat. Beberapa akibat yang dapat terjadi ditunjukkan pada Gambar 4-13 seperti yang

ditunjukkan, kejenuhan tidak terjadi secara tiba-tiba, jadi pada mulanya arus sekunder mengikuti arus primer, sebelum arus sekunder tersebut mengalami pengurangan dan cacat oleh penjenuhan.

Waktu untuk penjenuhan dan pengkalkulasian (perhitungan) dari arus sekunder sangat kompleks dan tergantung pada banyak faktor kealamian dari arus salah, kekonstanan dan arus ini disain dari transformator arus dan burden (beban) yang terhubung. Metode yang mudah untuk mengkalkulasikan tampilan dari inti cicin CT tersedia dsari laporan IEEE “ Trancient respon of curent transformer atau tanggapan sekilas untuk transformator arus” . Dari pendapat / asas praktik dan sebagai aturan utama dari asas ibu jari, CTs yang digunakan untuk penilaian dapat diharapkan untuk reproduksi dengan keakuratan arus primer yang banyak untuk satu setengah lingkaran./ putaran atau lebih sebelum penilaian penjenuhan DC.

#### 4. 11 EVALUASI UNJUK KERJA CT

Umumnya, unjuk kerja CT paling kritis pada titik pengambilan keputusan bagi rele. Pada Proteksi diferensial arus titik keputusan ini terletak pada CT yang terletak didekat suatu gangguan eksternal, dengan frekuensi yang sangat tinggi nilai kesalahannya, kesalahan maksimum. CT yang terdekat harus menghasilkan arus yang tinggi untuk perbandingan dengan arus sekunder pada CTs yang lain, Yang mana hanya dapat dibawa sebagian dari arus total. Bagan-bagan ini memerlukan perhatian yang besar untuk penampilan CT.

Jika DC jenuh seperti terjadi pada kesalahan luar yang besar sehingga rele tidak dapat beroperasi, dan ini tidak praktis untuk menghindari dari kesalahan dalam desain CT, macam-macam perbedaan mendisain rele menggunakan beberapa teknik untuk mencegah kesalahan operasi.

Pada banyak penerapan yang lain tidak terlalu menurut aturan dan/atau mencegah perlindungan yang penting dari sudut praktis. Bagaimanapun, ini seharusnya selalu dipertimbangkan dan diamati. Kesalahan-kesalahan utama cenderung terjadi didekat tegangan maksimum dimana kesalahan arus rendah pada sistem tenaga induktif. Kekurangan DC diimbangi, maka nilai maksimum jarang terjadi. Dibanyak bagian dari sistem tenaga waktu konstan akan pendek, maka ketika keseimbangan DC terjadi, kerusakan akan cepat terjadi. Juga, kesalahan yang lain dari perbedaan sistem proteksi adalah tidak mencapai nilai maksimum pada keputusan kritis dari sistem proteksi.

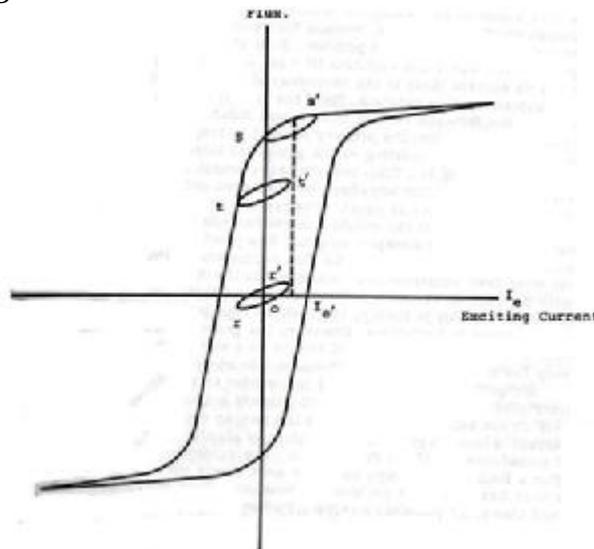
Sebagai contoh pada proteksi saluran, keputusan rele dikendalikan dari CTs, sehingga kesalahan arus biasanya rendah, dan tahanan saluran tersedia untuk membantu menyederhanakan efek. Juga keputusan tidak mungkin terlalu kritis sejak waktu terlibat untuk menghilangkan pengendalian kesalahan. Umumnya kesalahan-kesalahan arus yang tinggi akan beberapa kali lebih besar dan dengan kecepatan operasi rele yang tinggi dapat mengambil tempat sebelum penjenuhan Transformator arus DC terjadi. Seharusnya penjenuhan terjadi sebelum rele proteksi saluran beroperasi, umumnya

penundaan dalam operasi terjadi hingga CTs cukup untuk memperoleh izin operasi. Dengan demikian kecenderungan untuk jenis sistem proteksi ini biasanya “ dibawah jangkauan” dan dalam waktu dekat lebih baik dari “ jangkauan lebih”.

Penjenuhan AC seharusnya selalu dihindari, khususnya pada saat rele bekerja. Pada awalnya, efek dari arus sekunder dikurangi untuk mengurangi jangkauan rele. Ini mungkin atau tidak mungkin menjadi kritis di beberapa aplikasi. Untuk kesalahan-kesalahan yang besar, beberapa penjenuhan tidak mungkin membuat persoalan yang serius selama peraturan-peraturan tidak cukup untuk mencegah atau menunda operasi rele secara penting. Bentuk gelombang distorsi umumnya tidak begitu kritis untuk disain rele elektromekanik. Ini mungkin atau tidak mungkin benar untuk disain yang kompak.

#### 4. 12 FLUKS RESIDU CT DAN TRANSIEN SUSIDENCE

Ketika Transformator arus diberikan energi oleh beban untuk awal the excursion dalam lingkungan histeris adalah simetris dengan variasi flux seperti  $r'$  dalam Gambar 4-14 kesalahan dengan arus yang lebih tinggi menghasilkan penambahan flux dan a wider excursion. Jika kesalahan diabaikan dan arus primer nol, secara tak langsung arus singkat mengalirkan dalam sekunder ini adalah arus jatuh yang dikeluarkan, yang mana merupakan fasa luar dengan kesalahan arus primer sekunder melalui beban resistive sebelum terjadi gangguan.



Gambar 4-14 : Tipikal loop histerisis dan fluks residu pada CT

Waktu konstan untuk hal ini biasanya pendek terhadap beban resistive kecuali digunakan celah udara dalam inti CT. Arus singkat dapat ditunda keluar pada sensitivitas tinggi rele-rele kecepatan harus lebih dalam bagan-bagan pemutus arus dan dapat menyebabkan kesalahan operasi untuk waktu singkat diprogram dalam bagan ini khususnya untuk sistem proteksi tegangan tinggi gangguan kesalahan dan hilangnya  $I_c$

sampai nol meninggalkan flux pada CT. Ini disebut flux sisa, seperti pada bagian 5 dalam Gambar 4-14. Sekarang, jika CT dikuatkan kembali dengan mengalirkan arus murni ke beban, penyimpangan flux dapat disimpulkan, tapi dari flux sisa pada 5 dengan loop seperti  $ss'$ , dimana variasi flux  $ss' = rr'$ , bagaimanapun, hal ini tidak dapat dilanjutkan dalam loop  $ss'$  karena ini dapat memakai arus langsung untuk mempertahankannya dalam ordinat ini. Jadi itu bergeser turun ke posisi simetris  $tt'$ , dimana  $tt = ss' = rr$ . Selama pergeseran ini arus DC kecil/rendah mengalir dalam rangkaian sekunder menurut waktu konstan beban sekunder sampai beban berubah atau terjadi kesalahan lainnya, Flux akan berubah loop  $tt'$  yang tidak terbatas. Jika harus dibuka untuk menguatkan kembali arus primer ke nol, flux sisa akan bernilai tetap pada sementara gangguan dan selama mengalami loop  $tt'$ . Arus Transformator ini, dalam proses pengenergian akan mempunyai flux sisa yang terdapat antara nol sampai titik jenuh pada loop positif atau loop negatif.

Pada sebuah kesalahan terdahulu sisa dapat menambah juga mengurangi capabilitas CT sebagai contoh, fluks sisa titik s atau t adalah tertutup untuk tingkatan kejenuhan pada penyimpangan fluks tetapi jarak yang jauh dari pada penyimpangan penjenjuran adalah kiri. Penampilan ini tergantung pada  $\frac{1}{2}$  siklus kesalahan berikutnya terjadi. Sejak teori ini tidak dapat diramalkan flux sisa dapat menyebabkan kejenuhan dan masalah masalah proteksi. Bagaimanapun pengalaman secara umum di AS. Tidak bisa menunjukkan bahwa ini tidak menjadi masalah yang serius hanya pada beberapa kasus yang di uji. Dimana hal ini bisa menyebabkan masalah-masalah tersebut celah udara CT telah digunakan untuk meminimalkan residu ini, bagaimana dua performance mereka untuk aplikasi secara umum tidak terlalu baik dimana mereka tidak dengan cepat jenuh seperti desain non celah. percepatan arusnya terlalu tinggi sehingga terdapat arus rugi-rugi pada akurasi Steady State dan Transformator dari transient DC. Secara tidak langsung arus CT setelah kesalahan ini hilang secara perlahan dengan celah udara dan ini lebih menimbulkan suatu masalah dalam rele pemutus arus seperti di sekelilingnya. Pada saat ini CT dengan celah udara, paling sedikit digunakan di Amerika Serikat.

#### 4. 13 CT BANTU PADA RANGKAIAN SEKUNDER CT

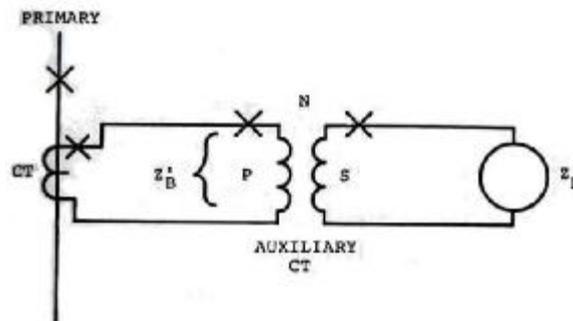
Transformator arus bantu kadangkala dibutuhkan untuk:

- Ratio yang berbeda dari CT yang telah ada.
- Dan atau pergeseran fasa arus.
- Isolasi rangkaian.

CT tambahan harus digunakan untuk menurunkan arus ke beban untuk meminimisasi impedansi pembebanan pada CT utama, seperti diperlihatkan dalam Gambar 4-15.  $Z_B'$  adalah impedansi pada CT utama yang merepleksikan impedansi yang terhubung pada CT tambahan,  $Z_B$ . Dengan mengabaikan susut pada CT tambahan, didapat:

$$Z'_B = \frac{Z_B}{N^2}$$

dimana N adalah dari CT tambahan. Jadi untuk hubungan penurunan dengan perbandingan P : S sebesar 10 : 5, N = 2 dan  $Z'_B = 0,25 Z_B$ . Namun demikian, dengan hubungan penaik dengan hubungan penaik, dimana P : S adalah 5 : 10,  $Z'_B = 4,0 Z_B$ . Dengan tahanan leading tinggi, dan CT penurun tambahan yang mendekati CT utama dapat digunakan untuk mengurangi/ mereduksi tahanan lead beban. CT tambahan tidak menyebabkan tambahan susut pada CT utamanya.



Gambar 4-15: CT Tambahan dipakai untuk merubah ratio CT utama

#### 4.14 APLIKASI TRANSFORMATOR TEGANGAN DALAM PROTEKSI

Transformator tegangan mempunyai gulungan primer yang terhubung langsung ke sistem tenaga ( VTs) atau menyebarkan ke bagian kapasitor yang terhubung antara fasa dan ground ( CCVTs). Bentuk-bentuk unit diilustrasikan dalam Gambar 4-1 sampai dengan Gambar 4-5, dengan skema hubungan pada Gambar 4-16

Rele pelindung menggunakan tegangan biasanya dihubungkan dari fasa ke fasa sehingga batas normal Transformator adalah 120 Volt line ke line. Pencabangan mungkin menyediakan 69,3 Volt atau 120 Volt line ke netral. Jika tersedia, sekunder ganda terutama menyediakan untuk mendapatkan uruan tegangan fasa nol untuk rele ground. Ini ditunjukkan pada Gambar 4-16a. Jika hanya ada sebuah Transformator bagian sekunder yang sesuai. Pelengkap ground bintang – pelengkap delta tegangan transformator dapat dihubungkan ke sekunder bus a,b,c pada Gambar 4-16a untuk  $3V_0$ , mirip dengan hubungan yang ditunjukkan. Contoh tipikal ditunjukkan dalam gambar 1.10. CCVTs secara umum mempunyai sekunder ganda untuk kedua fasa dan tegangan  $3V_0$ .

Gambar 4-16 Tipikal sumber tegangan untuk rele – rele rangkaian sekunder untuk kapasitor perangkat Transformator(CCVT) peralatan dengan skema sederhana hanya untuk konsep.

- fasa sekunder dan tegangan netral dengan tiga sekunder ganda (VTs) pas dihubungkan keground



Beberapa CCVTs dapat menunjukkan penurunan ketika sistim tegangan tiba-tiba dikurangi jadi tegangan sekunder untuk sementara bukan gambaran primer. Hal ini disebabkan oleh energi jatuh dalam kompensasi sekunder atau reaktor tunang ( $L$ ) dan rangkaian yang disatukan transient ini dapat menjadikan frekuensi berbeda dari sistem frekuensi atau tidak directional. Hal ini bukan suatu masalah bagi mekanik listrik rele tapi dapat menyebabkan masalah bagi tipe keadaan tunak. Rancangan CCVTs modern sesuai untuk mengatasi masalah ini.

## BAB 5 DASAR-DASAR PROTEKSI

### 5.1 PENDAHULUAN

Teknik proteksi terbaik saat ini dan untuk lebih dari lima puluh tahun lalu yang dikenal adalah proteksi diferensial. Pada proteksi diferensial besaran elektrik yang masuk dan keluar dari daerah proteksi atau areal proteksi dibandingkan melalui transformator arus (CT). Apabila selisih antara kedua besaran pada semua sirkit sama dengan nol, artinya tidak ada gangguan atau diasumsikan tidak terjadi masalah. Bila, selisihnya tidak nol, artinya terdapat masalah dan perbedaan arus dapat mengoperasikan rele-rele yang bersangkutan. Secara umum, gangguan internal dapat menghasilkan arus operasi yang berarti, meskipun gangguan yang terjadi adalah gangguan ringan.

Proteksi diferensial dapat dipakai pada hampir semua bagian sistem tenaga, seperti : generator, motor-motor, bus, transformator, line, kapasitor, reaktor dan kadang kala kombinasi dari komponen tersebut. Apabila ingin memasang peralatan proteksi pada salah satu komponen tersebut, maka rele diferensial menjadi pertimbangan pertama, dan dipilih sebagai proteksi primer.

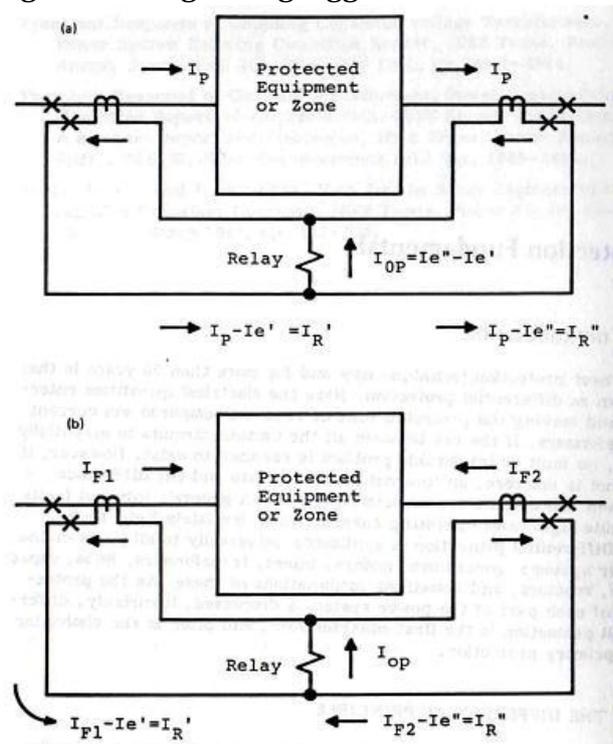
### 5.2 PRINSIP DIFERENSIAL

Teknik dasar dari proteksi diferensial diperlihatkan dalam Gambar 5-1 dan guna penyederhanaan hanya dua sirkit dari daerah proteksi yang diperlihatkan dalam gambar. Sirkit-sirkit ganda mungkin saja digunakan, namun prinsip dasarnya adalah sama. Jumlah arus yang menuju daerah proteksi akan sama dengan jumlah arus yang meninggalkan daerah proteksi pada saat operasi normal. Demikian pula halnya bila digunakan sistem differential tegangan.

Pada operasi normal dan untuk semua gangguan eksternal, arus-arus sekunder pada Gambar 5-1a dalam rele proteksi adalah perbedaan arus-arus eksitasi dari CT yang terhubung.  $I_p$  adalah arus primer yang menuju atau meninggalkan zona proteksi.  $I_p - I_e$  adalah arus sekunder yang besarnya sama dengan arus primer dibagi dengan ratio CT dikurang arus eksitasi. Meski digunakan CT dari tipe dan ratio yang sama, arus rele  $I_{op}$  akan selalu ada meskipun kecil dan tidak pernah nol. Hal ini karena adanya susut antara zona proteksi dan perbedaan kecil antara CTs. Dengan asumsi bahwa tidak ada CT yang mengalami kejenuhan berarti bila dilalui arus-arus ac simetris maksimum. Dengan CT dan ratio yang berbeda, perbedaan yang cukup besar akan muncul dan harus diminimisasi dan atau pengaturan arus pick-up (angkat) rele tidak akan beroperasi pada setiap kondisi.

Selama gangguan eksternal unjuk kerja transien dari beberapa CT akibat kenaikan arus yang tiba-tiba dan komponen dc offset dapat menghasilkan arus-arus operasi transien yang besar. Oleh karena itu sukar dan tidak praktis digunakan rele instantaneuous. Rele-rele time-delay dapat digunakan dengan kehati-hatian yang tinggi.

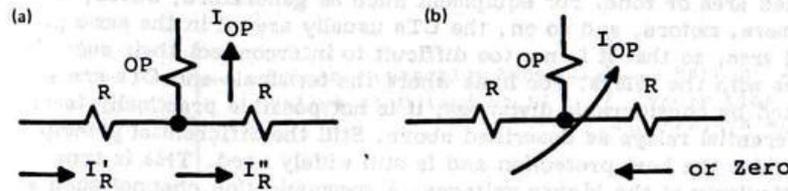
Untuk gangguan internal, Gambar 5-1b memperlihatkan bahwa arus operasi rele diferensial esensinya adalah jumlah arus-arus masukan yang menuju gangguan. Besaran ini merupakan arus gangguan total dengan basis arus sekunder. Kecuali untuk gangguan internal yang sangat kecil, pemindaian yang baik dapat digunakan untuk mendeteksi masalah dalam zona diferensial. Untuk memicu agar rele diferensial dapat beroperasi tidak memerlukan sumbangan arus gangguan dari semua sirkit, terutama untuk sirkit-sirkit yang tidak mengalami gangguan.



Gambar 5-1: Ilustrasi skema diferensial arus untuk memproteksi sebuah zona dengan dua sirkit : (a). Kondisi normal; (b). Gangguan internal

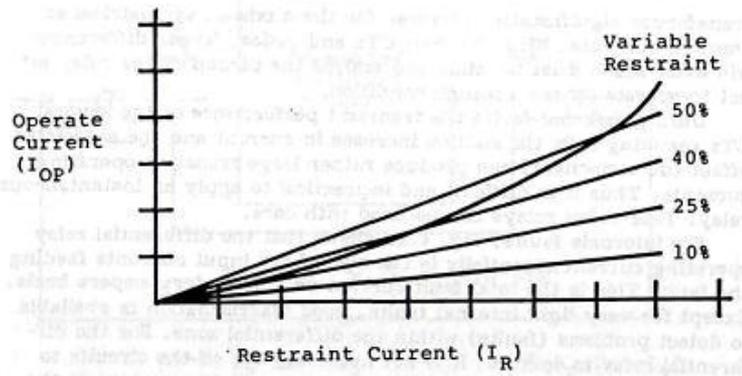
Untuk memperoleh sensitivitas yang tinggi terhadap adanya gangguan internal ringan dengan sekuritas yang tinggi terhadap gangguan-gangguan eksternal, maka kebanyakan digunakan rele diferensial tipe persentase. Gambar 5-2 memperlihatkan skema sederhana dari rele jenis ini. Sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 5-1. Rangkaian sekunder dari CT dihubungkan dengan belitan penahan ® dari rele. Arus-arus yang merintang operasi rele tersebut. Selain itu, yang berhubungan dengan kumparan penahan adalah kumparan kerja. Arus pada kumparan ini yang akan mengoperasikan rele diferensial. Rele diferensial dapat berupa rele diferensial tetap atau variabel presentase. Tipikal karakteristik beberapa tipe rele jenis ini diperlihatkan pada Gambar 5-3. Absis dari kurva karakteristik tersebut adalah arus penahan, yang dapat berupa arus

smaller  $I_R''$  atau arus larger  $I_R'$  tergantung desain. Ordinat dari kurva karakteristik adalah arus operasi  $I_{OP}$  yang dibutuhkan untuk menggoperasikan /menggerakkan rele. Rele diferensial persentase tipe tetap yang ada, yaitu antara 10 dan 50% dan memiliki Tap untuk merubah persentase.



Gambar 5-2: Rele Diferensial Percentage : (a). Gangguan Eksternal; (b). Gangguan internal

Untuk rele diferensial persentase 50%, arus gangguan eksternal 10 A membutuhkan selisih atau arus operasi sebesar 5A atau lebih agar rele dapat beroperasi. Untuk tipe 10%, diperlukan selisih atau arus operasi sebesar 1A. Rele tipe persentase variabel tidak memiliki Tap persentase. Pada arus yang rendah, persentase rendah pada tingkatan ini unjuk kerja CT berada pada tingkat terbaik. Pada arus-arus gangguan yang besar, dimana unjuk kerja rele tidak sebaik pada saat arus rendah, dibutuhkan persentase yang tinggi. Hal ini dapat meningkatkan sensitivitas dan skuritas rele.



Gambar 5-3: Tipikal Karakteristik beberapa tipe Rele Diferensial

Perlu untuk dikenali bahwa karakteristik seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 5-3 digunakan hanya untuk gangguan eksternal atau aliran arus langsung. Rele diferensial sangat sensitif terhadap gangguan internal dimana arus-arus pada kumparan penahan dalam arah berlawanan atau salah satu arus Nol, seperti dalam Gambar 5-2. Rele-rele ini dikalibrasi dengan arus langsung satu kumparan penahan dan kumparan operasi sedangkan kumparan lain tidak dialiri arus. Tipikal arus-arus angkat untuk rele-rel diferensial dalam orde 0.14A sampai 3.0A, tergantung dari tipe, Tap, dan aplikasi.

Seperti dapat dilihat, prinsip diferensial membandingkan keluaran-keluaran dari CTs pada semua sirkit yang menuju atau meninggalkan daerah proteksi. Untuk peralatan-

peralatan seperti generator, bus, transformator, motor dan sebagainya, CT yang digunakan berada pada areal yang sama, sehingga tidak sulit untuk melakukan interkoneksi antara sisi sekunder CT dengan rele. Untuk line (jaringan), dimana terminal dan CTs terpisah oleh jarak tertentu, tidaklah praktis menggunakan rele diferensial seperti yang dikemukakan diatas. Namun rele diferensial masih mungkin digunakan secara luas terutama pada tegangan tinggi. Penggunaan canel komunikasi seperti pilot wire, power line carrier, audio tone over wire, atau gelombang mikro dimungkinkan untuk membandingkan semua informasi diterminal-terminal tersebut.

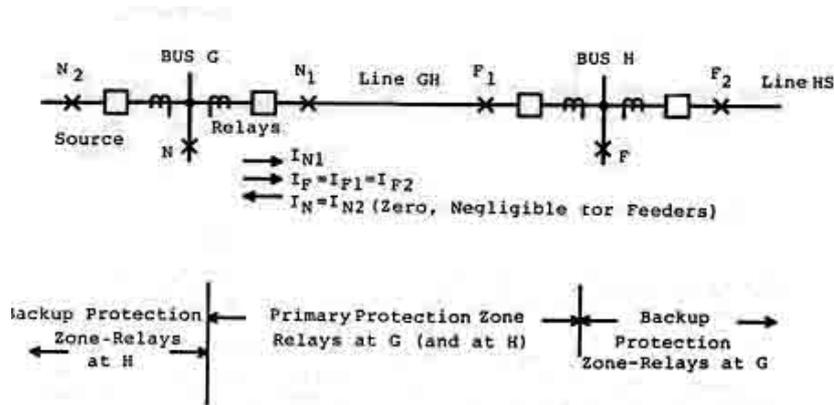
### 5. 3 MASALAH DASAR SISTEM PROTEKSI

Bagaimana dan dimana prinsip diferensial tidak dapat dipergunakan atau kurang praktis bila digunakan, masalah proteksi ini diperlihatkan dalam Gambar 5-4. Rele-rele pada stasiun G untuk melindungi line GH harus beroperasi dengan cepat untuk semua gangguan yang terjadi didaerah antara kedua terminal jaringan. Daerah ini adalah daerah proteksi primer dari rele-rele pada G dan sama halnya dengan rele-rele di H. Gangguan  $F_1$  adalah gangguan yang berada di daerah utama, tetapi gangguan  $F$  dan  $F_2$  adalah gangguan-gangguan eksternal dan harus dihilangkan oleh operasi rele-rele lain. Namun demikian, untuk rele di G, arus-arus yang dirasakan oleh rele sama karena jarak antara ketiga gangguan relatif sama dan berdekatan, sehingga  $I_F = I_{F1} = I_{F2}$ . Oleh karena, rele-rele di G tidak dapat menentukan magnitude arus (tegangan) apakah gangguan tersebut  $F_1$ , dimana rele-rele tersebut harus beroperasi dengan cepat, atau gangguan tersebut  $F$  maupun  $F_2$ , dimana operasi rele-rele harus ditunda. Masalahnya sekarang adalah bagaimana membedakan antara gangguan internal  $F_1$  terhadap gangguan eksternal  $F$  dan  $F_2$ . Ada dua cara penyelesaian yang dapat digunakan, yaitu: 1). Penyelesaian dengan waktu; 2). Penyelesaian dengan komunikasi

#### 5. 3. 1 PENYELESAIAN DENGAN WAKTU

Penyelesaian dengan waktu dilaksanakan dengan cara menunda operasi rele-rele di G untuk gangguan-gangguan yang terjadi didekat atau pada bus H. Penundaan ini memungkinkan rele-rele primer untuk bus H dan line disebelah kanan bus H untuk beroperasi menghilangkan gangguan seperti  $F$  dan  $F_2$ . Sayangnya hal ini menyebabkan pula penundaan operasi rele bilamana gangguan internal pada line GH yang berada didekat bus H, seperti gangguan  $F_1$ .

Pengaturan rele-rele, baik rele phasa maupun rele tanah, penanganan seperti ini disebut dengan koordinasi atau selektivitas. Teknik ini dicapai dengan mengatur rele-rele primer untuk dapat beroperasi dengan cepat bila terjadi gangguan dekat ( $N_1$ ), dan ditunda untuk kebutuhan koordinasi dengan rele-rele di H bila gangguan terjadi didekat bus H. Hal ini umumnya dilakukan dengan menggunakan rele-rele arus lebih waktu terbalik, dimana waktu operasi meningkat bilamana magnitude arus menurun, atau dapat pula digunakan rele-rele instantaneous dan waktu tunda tetap.



Gambar 5-4: Masalah Proteksi pada Rele Proteksi pada Gardu G untuk melindungi saluran GH

### 5. 3. 2 PENYELESAIAN DENGAN KOMUNIKASI

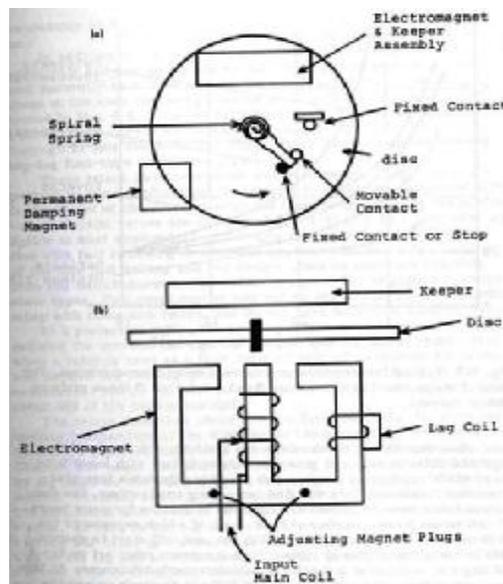
Penyelesaian cara kedua ini adalah tipe proteksi diferensial seperti dikemukakan diatas. Rele-rele di H digunakan untuk memproteksi line GH yang ditandai dengan arah aliran daya atau informasi sudut phase relatif baik untuk gangguan internal ( $F_1$ ) maupun eksternal ( $F_2$  dan  $F$ ). Informasi ini dikomunikasikan melalui suatu kanal ke rele-rele di G. Dengan cara sama, rele-rele di G mendapatkan informasi yang dikomunikasikan ke H. Bila gangguan berada dalam daerah utama (Gangguan antara  $N_1$  sampai  $F_1$ ), rele-rele pada G dan H keduanya beroperasi dengan kecepatan tinggi. Untuk gangguan-gangguan eksternal (pada bus G atau H, disebelah kanan H, atau disebelah kiri G), rele-rele dikedua bus tidak beroperasi. Cara ini merupakan dasar pengenalan terhadap pilot relaying yang akan dibahas kemudian.

### 5. 4 RELE-RELE ARUS LEBIH-WAKTU

Rele arus lebih, satu dari rele proteksi pertama yang dikenal dan dikembangkan 60 sampai 70 tahun lalu dan digunakan secara luas dalam banyak aplikasi dari suatu sistem tenaga. Asal mula rele ini merupakan suatu watthour meter yang digunakan untuk mengukur energi listrik, dilengkapi dengan kontak-kontak dan sebuah piringan yang dapat berputar. Saat ini, sebagaimana beberapa tahun sebelumnya, desain rele telah berubah, kecuali penggunaan prinsip piringan induksi. Salah satu tipe rele diperlihatkan dalam Gambar 5-5.

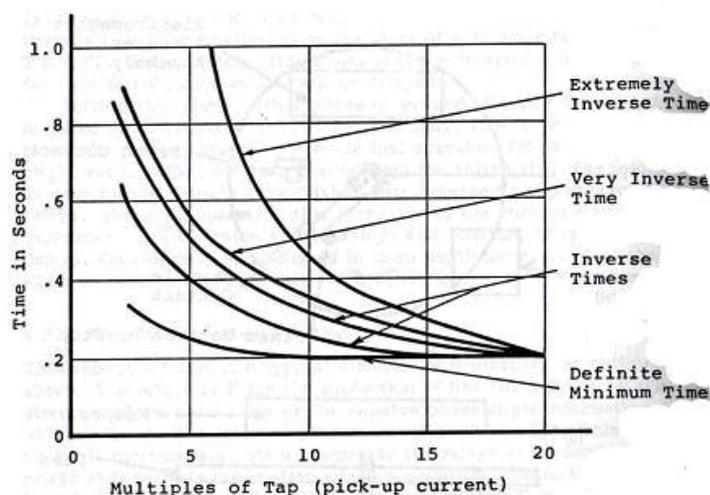
Arus bolak balik atau tegangan diberikan ke koil utama yang akan menghasilkan fluks magnetik, yang sebagian besar akan melalui celah udara dan piringan menuju penjaga kemagnetan yang terletak diatas piringan. Fluks ini akan kembali melalui piringan menuju kaki-kaki elektromagnet yang berada disisi koil utama. Jumlah lilitan dari kumparan lag disalah satu kaki yang lebih pendek akan menyebabkan pergeseran waktu dan phasa pada fluksi yang akan mengakibatkan piringan berputar. Putaran ini diredam oleh sebuah magnet permanen. Pegas spiral dipergunakan untuk mengembalikan posisi

kontak-kontak setelah arus operasi hilang atau menurun dibawah harga arus angkat rele. Kontak-kontak akan menyentuh batang piringan pada keadaan normal dapat membuka atau menutup pada keadaan tidak energise.



Gambar 5-5: Rele arus lebih-waktu-terbalik tipe piringan induksi : (a). pandangan atas; (b). pandangan sisi

Kombinasi ini menghasilkan operasi yang sangat cepat pada arus-arus tinggi dan operasi yang lambat pada arus-arus rendah, dengan karakteristik waktu terbalik. Karakteristik-karakteristik ini selalu diperbaiki, beberapa karakteristik arus waktu dari rele arus lebih diberikan dalam Gambar 5-6.



Gambar 5-6: Tipikal karakteristik Rele arus lebih-waktu-terbalik

Versi rele solid state juga tersedia dengan karakteristik umum dan kurva-kurva yang merupakan duplikat dari kurva karakteristik diatas, dengan burden rendah, range

penggunaan yang lebar, dan kurva karakteristik yang bisa diatur. Meskipun penggunaan rele versi solid state ini makin luas penggunaannya, rele tipe elektromekanik masih tetap akan dipakai untuk waktu-waktu mendatang.

Semua rele memiliki sejumlah Tap, masing-masing Tap mewakili arus minimum (tegangan) dimana unit rele mulai beroperasi, yang disebut arus angkat minimum. Jadi sebuah rele yang diatur pada Tap 2, akan mulai bekerja pada saat arus mencapai  $2.0 \pm$  toleransi pabrikasi. Dengan arus sebesar ini, waktu akan sangat lama dan sukar untuk memeriksa kecuali arus dipertahankan pada harga yang sangat akurat. Sedikit perubahan atau deviasi perubahan pada level ini akan menghasilkan perubahan waktu yang sangat berarti, karenanya dalam pabrikasi tidak diperlihatkan kurva waktu dibawah 1,5 atau 2 kali arus angkat minimum. Dalam prakteknya, bagian ini bukanlah merupakan bagian kurva yang dipergunakan dalam proteksi.

Absis dari kurva karakteristik menunjukkan pengali Tap atau arus angkat. Ini digunakan agar mudah menggunakan satu skala untuk semua Tap. Sebagai contoh, dengan penunjukkan Tap = 5, dengan pengali 5 pada kurva menunjukkan 25A, dengan Tap 2, pengali 5 menunjukkan 10A demikian seterusnya. Sebagai tambahan dari Tap, spasing bagi kontaktor untuk bergerak dapat diatur dan ditandai oleh suatu skala yang dikenal dengan sebutan "time lever" atau time dial. Dengan ini dapat diperoleh waktu operasi yang berbeda untuk level arus yang sama, kurva untuk karakteristik ini tidak diberikan disini. Setiap tipe rele dilengkapi dengan kurva karakteristik arus waktu, umumnya dengan kurva time dial dari  $\frac{1}{2}$  sampai 11. Kurva-kurva ini diberikan dalam kertas semilog atau kertas log-log guna koordinasi berbagai tipe fuse.

Rele-rele ini memiliki overtravel dan waktu reset, yang mungkin sangat dibutuhkan untuk beberapa aplikasi. Overtravel dari unit elektromekanik adalah perjalanan dari kontak-kontak setelah arus-arus menurun dibawah harga arus angkat. Tipikal harga yang ada dalam orde antara 0,03 sampai 0,06 detik, dalam kebanyakan aplikasi selalu diabaikan. Waktu reset sangat dibutuhkan dalam koordinasi dengan penutup baill cepat atau pada gangguan yang berulang cepat. Waktu reset ini sebagai fungsi dari penyetelan time dial dan desain. Datanya umumnya tersedia dari pabrik. Harga ini umumnya diabaikan pada rele-rele tipe solid state. Reset cepat mungkin berguna apabila diperlukan koordinasi dengan Fuse dan rele-rele yang tidak memiliki karakteristik fast-reset.

Pada rele proteksi, pembukaan Pemutus Tenaga umumnya akan mengurangi arus pada rele sampai nol, hal ini tidak sepenuhnya benar bila rele digunakan sebagai deteksi gangguan dan diatur agar beroperasi untuk semua gangguan didalam daerah proteksi utamanya. Kebanyakan rele-rele arus lebih tipe piringan induksi tidak akan mulai mereset ulang sampai arus turun mencapai 60% dari arus angkat.

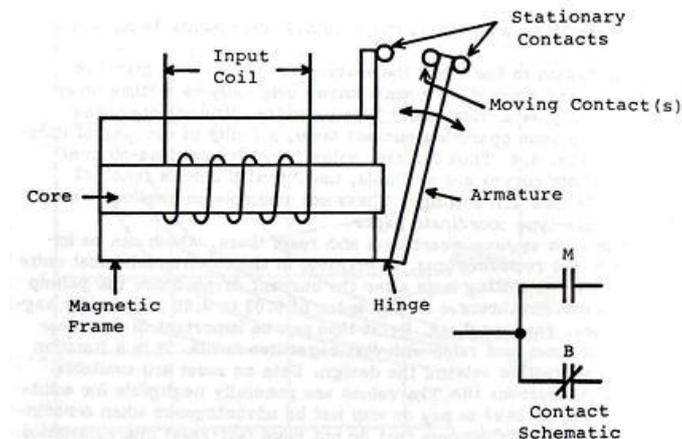
Rele-rele yang dikemukakan diatas adalah rele tanpa penunjuk arah, yang akan beropersai secara bebas tanpa tergantung arah arus. Bilamana hal ini tidak diharapkan, sebuah elemen arah terpisah dapat digunakan. Unit piringan induksi mendapatkan torka rotasional dengan membuat loops lagging pada elektromagnet guna memperoleh pergeseran fluksi. Selama kumparan lg atau ekivalennya terbuka, tidak ada arus yang

mampu membuat piringan beroperasi. Apabila digunakan sirkit direksional sebagai penutup, operasi sistem akan mengikuti kurva karakteristik. Piringan induksi tipe ini dan ekivalen solid state dipergunakan untuk arus lebih, tegangan lebih, tegangan kurang, kombinasi tegangan kurang dan lebih, dan daya atau tipe lainnya.

### 5. 5 RELE-RELE ARUS-TEGANGAN INSTANTANEOUS

Rele-rele ini digunakan pada banyak areal proteksi sebagai unit arus lebih atau unit tegangan kurang dan atau lebih untuk keperluan tripping atau sebagai detektor gangguan untuk sekuriti. Tipikal tipe rele yang umum digunakan adalah tipe clapper atau rele telepon (Gambar 5-7), rele plunger atau selenoid (Gambar 5-8), dan rele cup induksi atau silinder induksi (Gambar 5-9).

Terminologi ‘rele telepon’ muncul karena asal penggunaannya yang luas pada sistem pertukaran telepon. Saat ini sistem ini telah digantikan oleh saklar elektronik solid state modern. Namun demikian rele jenis ini masih dipergunakan sebagai rele bantu, dalam sistem ac maupun dc.

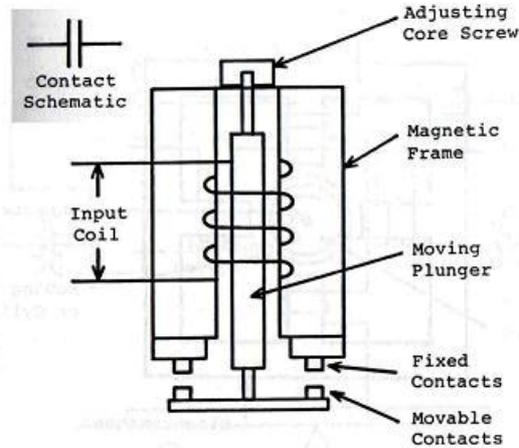


Gambar 5-7: Rele tipe “clapper” elektromekanis atau rele telepon

Contoh tipe solenoid yang dipergunakan dalam sistem dc adalah rele yang dipergunakan sebagai penutup pada saklar kontak (CS) seperti ditunjukkan dalam **Gambar 1-9**. Dengan suatu suatukumparan ac dan konstruksi selenoid, tipe ini digunakan sebagai unit tripping instantaneous. Prinsip operasi dari tipe selenoid diatas berdasarkan hal berikut : Arus atau tegangan yang diberikan ke kumparan akan menghasilkan fluks, yang akan menarik jangkar atau plunger, sehinggann kontak bergerak akan beroperasi. Kontak-kontak multiple dapat digunakan, khususnya pada jenis telepon.

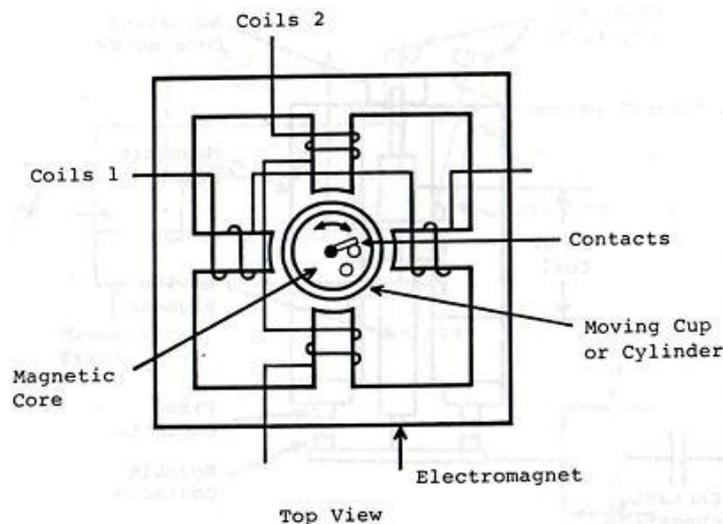
Pada jenis ac, rele memiliki Tap atau atau suatu bagian yang dapat digunakan untuk merubah harga angkat. Untuk pelayanan tripping, seringkali dropout menjadi masalah, dan kebanyakan dari unit ini tidak drop out setelah menutup kontak-kontak pada operasi sampai arus (Tegangan) turun dalam orde mencapai 60% dari harga angkat. Ini

merupakan masalah, model dengan jenis dropout tinggi seperti Gambar 5-8 juga tersedia. Tipe ini akan reset pada harga angkat 90% atau lebih tinggi. Umumnya, detektor gangguan harus menggunakan tipe dropout tinggi.



Gambar 5-8: Tipikal rele plunger elektromekanis

Unit cup induksi atau silinder induksi seperti pada Gambar 5-9, pada dasarnya adalah sebuah motor dua fasa dengan dua kumparan seperti diperlihatkan pada elektromagnetik empat kutub. Ditengan-tengah terdapat inti magnet, dikelilingi atau diatasnya terdapat silinder atau cup yang dapat bergerak, dengan kontak-kontak bergerak dan pegas untuk keperluan reset. Apabila fluksi yang dihasilkan oleh kumparan 1 dan 2 sefasa, tidak akan terjadi perputaran. Seperti halnya dengan unit arus lebih instantaneous, pergeseran fasa didesain pada sirkit salah satu kumparan, dengan demikian torka operasi akan dihasilkan apabila arus melebihi harga angkat. Rotasi yang terjadi terbatas hanya beberapa milimeter, namun cukup jauh untuk dapat menutup kontak-kontak yang ada. Tipikal waktu yang tersedia dalam orde 16 sampai 20 mili detik.



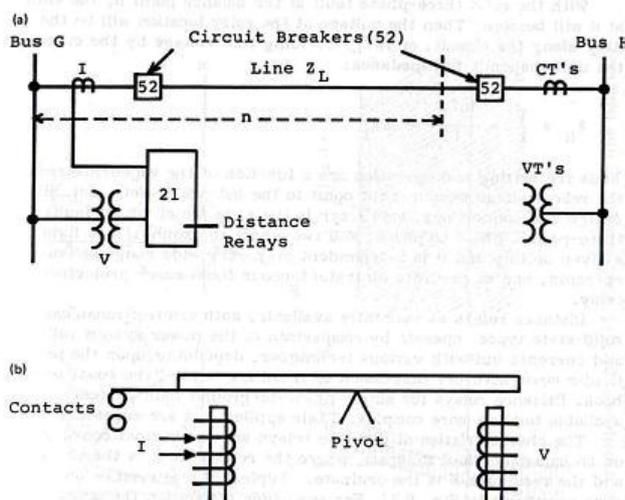
Gambar 5-9: Tipikal rele silinder atau cup induksi elektromekanis

### 5. 6 RELE-RELE DAYA PENGINDERA ARAH

Unit cup induksi dan silinder induksi digunakan untuk menentukan arah aliran daya dan magnitude. Arus operasi dilalukan pada salah satu belitan, dan arus atau tegangan acuan dilalukan pada belitan lainnya. Apabila relasi fasa teridentifikasi, unit akan beroperasi. Karena unit ini adalah suatu unit pengindera arah yang sensitif, oleh karena itu unit ini banyak digunakan pada hampir semua aplikasi dengan unit pemindai gangguan seperti rele arus lebih – waktu atau arus lebih instantaneuous. Tipe lainnya memiliki Tap belitan untuk beroperasi bila level daya melebihi harga seting.

### 5. 7 RELE-RELE JARAK DAN DIAGRAM R – X

Pada dasarnya, rele-rele jarak membandingkan tegangan dan arus sistem tenaga. Rele akan bekerja apabila ratio kedua besaran dibawah harga setingnya. Pada kondisi seimbang dan untuk semua gangguan fasa, ratio tegangan dan arus yang dirasakan rele adalah impedansi dari sirkit tersebut, karena  $V/I = Z$ . Jadi rele ini diset sebagai fungsi dari impedansi tetap sepanjang zona proteksi sistem tenaga tersebut. Desain rele sekarang (tidak diproduksi lebih lanjut) memberikan pengertian dasar yang baik mengenai prinsip dan aplikasi yang umum digunakan. Tipe terbaru ini diperlihatkan dalam Gambar 5-10. Sebuah batang seimbang memiliki kumparan tegangan energise untuk menahan gerakan, dan kumparan arus operasi untuk menutup kontak-kontak. Dengan desain dan pengaturan tegangan pada kumparan penahan dapat diatur sama dengan daya yang dihasilkan oleh kumparan arus operasi untuk gangguan tiga fasa dititik pengatur ditunjukkan sebagai  $nZ_L$ . Titik treshold ini disebut sebagai titik keseimbangan atau treshold operasi atau titik keputusan dari rele. Untuk semua gangguan antara rele dan titik n, arus I akan membesara dan V akan menurun atau mendekati sama dengan bila gangguan dititik n. Kenaikan arus I akan menyebabkan ujung batang akan menyentuh dan menutup kontak-kontaknya.



Gambar 5-10: Prinsip operasi Rele jarak memakai nitbeam impedansi-seimbang:  
 (a). Aplikasi rele jarak pada aluran GH; (b). Penggunaan unit batang seimbang untuk penyederhanaan penjelasan kerja rele

Untuk gangguan eksternal disebelah kanan titik n, arus akan lebih kecil dari arus gangguan pada titik n, dan tegangan akan lebih besar. Dengan demikian torka atau daya tarik dari kumparan tegangan akan lebih besar dari daya tarik kumparan arus, sehingga rele tidak bekerja.

Dengan gangguan solid tiga fasa dititik keseimbangan n, tegangan pada titik n sama dengan NOL. Sehingga tegangan pada lokasi rele akan menurun sepanjang sirkit sebesar  $InZ_L$ . Dengan membagi harga tegangan ini dengan arus I, impedansi respon adalah :

$$Z_R = \frac{V}{I} = \frac{InZ_L}{I} = nZ_L$$

Jadi pengaturan dan operasi merupakan fungsi impedansi yang diukur dari rele sampai ke titik keseimbangan n. Dengan desain dan hubungan yang dibuat, hal ini berlaku untuk semua gangguan fasa, tiga fasa, fasa-fasa, dan dua fasa ke tanah. Hal ini menghasilkan pengaturan yang tetap dan independen untuk jangkauan dengan range arus gangguan yang sangat luas, dan juga diperoleh rele proteksi dengan jangkauan tetap instanteneous.

Rele jarak, tipe solid state maupun elektromekanik, beroperasi dengan membandingkan arus dan tegangan sistem, namun teknik yang dipergunakan berbeda-beda, tergantung pabrikasi dan pembuatannya. Rele jarak untuk proteksi gangguan satu fasa ke tanah juga tersedia, namun lebih rumit dan kompleks.

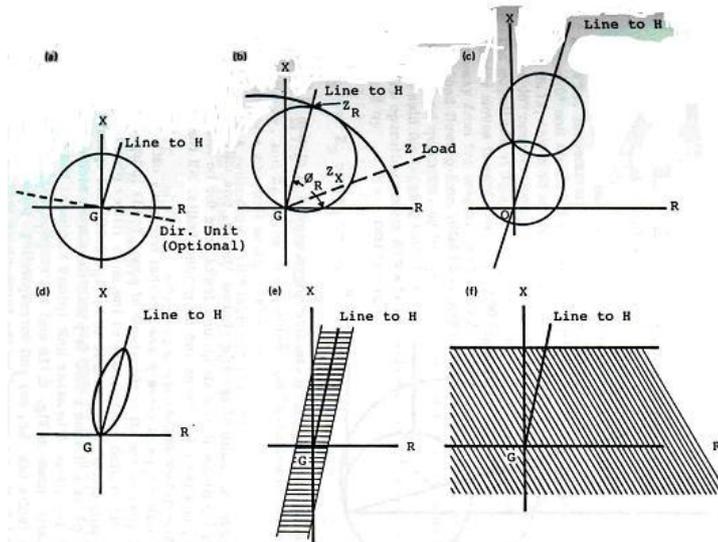
Karakteristik rele jarak lebih mudah dipahami dalam bentuk diagram impedansi R-X, dimana absis adalah resistansi R dan ordinat adalah rektansi X. Tipikal karakteristik dalam bentuk ini diperlihatkan dalam Gambar 5-11, dimana titik asal merupakan lokasi rele, dengan areal operasi pada kuadran pertama. Bila ratio antara arus dan tegangan sistem jatuh didalam lingkaran atau dalam areal crosshatchet, unit akan beroperasi.

Tipe elementary seperti yang dikemukakan dalam Gambar 5-10 memiliki karkateristik impedansi seperti pada Gambar 5-11a. Desain ini telah ketinggalan, operasi rele dapat terjadi di keempat kuadran, oleh karena itu dibutuhkan rele arah agar operasi rele hanya untuk gangguan didaerah sebelah kanan bus G pada Gambar 5-10.

Semua karakteristik yang diperlihatkan adalah dalam penggunaan praktis, dimana rele tipe MHO merupakan rele yang umum dan universal. Aplikasi untuk proteksi primer pada line GH dalam Gambar 5-10 membutuhkan dua unit pada bus G dan dua unit pada bus H. Pada zona 1, rele beroperasi instanteneous dan n lebih kecil dari 1, umumnya 0,9. Pada zona 2, n diatur lebih dari 1.0 sehingga diperlukan waktu tunda untuk kebutuhan koordinasi dengan proteksi pada bus H dan disebelah kanannya.

Kebanyakan rele jarak adalah rele jarak jenis satu fasa, sehingga dibutuhkan tiga buah rele untuk mengkover semua kemungkinan gangguan. Untuk rele-rele seperti in, karakteristik, seperti lingkaran MHO pada Gambar 5-11b adalah valid untuk semua unit kecuali untuk gangguan pada fasa khusus, masing-masing beroperasi untuk fasa ab dan

gangguan fasa ab ke tanah, fasa bc dan gangguan fasa bc ke tanah, dan fasa ca dan gangguan fasa ca ke tanah. Ketiganya beroperasi untuk gangguan tiga fasa.



Gambar 5-11: Prinsip operasi rele jarak dijelaskan dengan menggunakan unit impedansi batang seimbang : (a). Imedansi; (b). MHO; (c). Ofset MHO's; (d). Lens; (e). Double blinder; (f). Reaktansi.

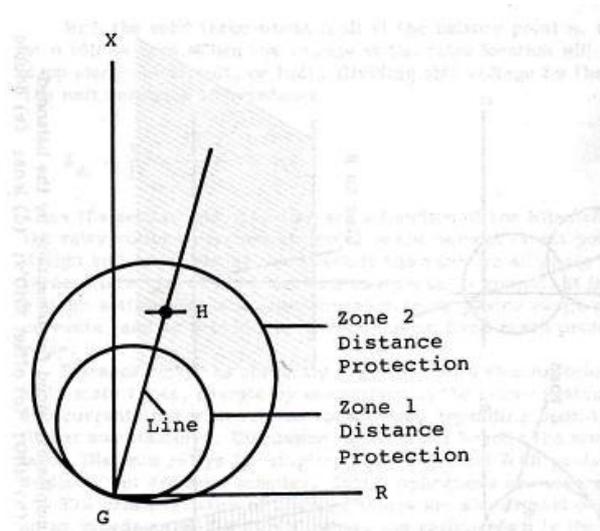
Jenis lainnya adalah tipe tiga fasa, jadi hanya satu rele dengan dua unit operasi yang akan bekerja untuk semua kombinasi gangguan antar fasa yang mungkin terjadi. Salah satu bagian dari 2 unit operasi dari rele tipe tiga fasa ini memiliki karakteristik lingkaran MHO seperti pada Gambar 5-11b dan bekerja untuk semua gangguan tiga fasa dan beberapa gangguan fasa-fasa-tanah yang terjadi dan masih berada didalam lingkaran. Unit lainnya memiliki karakteristik arc seperti yang disajikan dalam Gambar 5-11b dan hanya akan bekerja untuk gangguan fas-fasa, seperti ab-bc,ca dan fasa-fasa-tanah yang tidak termasuk dalam unit pertama. Areal kerja dari rele hanya pada kuadran pertama untuk gangguan didalam sektor antara vektor garis, karkateristik rele dan sumbu X. Ini sama dengan rele arah, seperti pada unit MHO. Unit fasa-fasa tidak akan bereaksi pada arus seimbang sehingga tidak mungkin beroperasi untuk gangguan tiga fasa, beban, ayunan, dan sebagainya. Rele dapat diatur bebas terhadap beban dan ayunan, sedangkan MHO dan unit yang sejenis harus diatur terhadap beban maksimum dan ayunan.

Apabila beban mengalir dari G ke H, maka rele pada G akan merasakan sebagai berikut :

$$Z_{load} = \frac{V_{LN}}{I_{load}} = \frac{120}{\sqrt{3} \cdot 5} = 13,86 \Omega \text{ sekunder .}$$

Dengan dasar beban 5A dan tegangan line-line 120V pada sisi sekunder dari CT dan VT. Dalam banyak kasus beban pada line memiliki arus yang tertinggal antara 0° sampai 30°. Dalam diagram R-X, seperti dalam Gambar 5-12, beban ini merupakan sebuah phasor pada kuadran pertama dengan sudut antara 0° sampai 30° berlawanan arah

jarumjam dari sumbu +R. Pada beban berat,  $Z_{load}$  kecil. Jadi pada beban berat phasor impedansi bergerak menuju titik asal. Pada beban ringan phasor bergerak kekanan atau menjauhi asal.



Gambar 5-12: Rele jarak tipe Mho digunakan pada Gardu G guna perlindungan saluran GH

Bila beban mengalir dari H ke G, atau keluar dari G, maka akan muncul pada kuadran kedua, atau disebelah kiri pada diagram R-X dan diatas sumbu -R untuk beban tertinggal. Titik operasi pada karakteristik lingkaran MHO dapat ditentukan dengan cara berikut :

$$Z_X = Z_R \cos(\phi_R - \phi_X)$$

dimana  $Z_X$  adalah impedansi dari titik asal ke sembarang titik pada lingkaran dengan sudut  $\phi_X$ , dan  $Z_R$  adalah jangkauan rele pada sudut  $\phi_R$ . Sebagai contoh, berapa kjangkauan unit MHO sepanjang line sudut  $75^\circ$  bila beban maksimum pada jaringan 5A sekunder pada sudut  $30^\circ$  tertinggal. Dari persamaan diatas, impedansi beban adalah  $13,86 \Omega$  sekunder, harga ini adalah harga  $Z_X$  dengan  $\phi_X = 30^\circ$ , maka :

$$13,86 = Z_R \cos(75^\circ - 30^\circ)$$

$$Z_R = 19,60 \Omega \text{ sekunder}$$

Harga ini dapat ditransfer dalam harga primer dengan menggunakan persamaan :

$$Z_{R(sec)} = \frac{Z_{R(pri)} R_C}{R_v}$$

dimana  $R_c$  dan  $R_v$  adalah ratio CT dan PT. Bila tegangan line adalah 115 kV dengan perbandingan CT 600 : 5, maka:

$$Z_{R(\text{pri})} = \frac{Z_{R(\text{sec})} R_v}{R_c} = \frac{19,6 (1000)}{1200} = 163,3 \quad \Omega \text{ primer}$$

Bila digunakan line dengan tipikal impedansi 0,8  $\Omega$ /mi, maka untuk impedansi diatas setara dengan jaringan sepanjang 204 km.. Catatan menarik yang perlu diingat bahwa salah satu jenis rele jarak memiliki jangkauan maksimum pada impedansi 20  $\Omega$  sekunder, dari persamaan diatas. Daya MVA yang direpresentasikan oleh beban 5 A adalah:

$$\text{MVA} = \frac{\sqrt{3} \text{ kV} \times I}{1000} = \frac{\sqrt{3} (115) (5) (120)}{1000} = 119,5 \text{ MVA}$$

Apabila rele jarak diatur untuk menjangkau lebih beberapa line atau diterakan pada line yang panjang, umumnya line tegangan ekstra tinggi, sangat mungkin untuk impedansi maksimum beban berada pada lingkaran operasi. Pada aplikasi, variasi karakteristik rele, seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 5-11c-e, digunakan untuk restrict operasi rele pada areal beban, tetapi memiliki jangkauan line yang panjang.

Karakteristik rele jarak yang diperlihatkan dalam Gambar 5-11f adalah tipe reaktansi. Tipe ini memerlukan unit tambahan, untuk menghindarkan unit reaktansi beroperasi pada beban dan gangguan dibelakang rele. Karakteristik blinder ganda seperti pada Gambar 5-11e merupakan komposisi dari karakteristik dua reaktansi dengan pergeseran fasa. Unit sebelah kiri beroperasi untuk mengkover areal yang luas disebelah kanan, sedangkan unit sebelah kanan beroperasi untuk mengkover areal disebelah kiri. Rele beroperasi hanya bila kedua unit beroperasi, dan operasi pada areal antara keduanya.

## 5. 8 PROTEKSI CADANGAN : JARAK JAUH vs LOKAL

Pentingnya cadangan dan redundansi dalam sistem proteksi telah disebutkan dalam bab I dan akan didiskusikan lagi pada bab lainnya. Cadangan didefinisikan sebagai “proteksi yang beroperasi secara bebas dalam komponen tertentu dalam sistem proteksi primer atau utama”. Cadangan dapat berupa duplikasi proteksi primer atau dapat pula beroperasi hanya bila proteksi primer gagal atau dalam keadaan pemeliharaan (IEEE 100-1984). Beberapa tipe dapat diilustrasikan dengan mengacu pada sistem proteksi yang terdapat pada bus G untuk line GH seperti diperlihatkan dalam Gambar 5-4. Rele-rele yang diaplikasikan pada bus G seperti terlihat pada prinsipnya untuk mendapatkan proteksi primer pada line GH. Untuk gangguan yang terjadi sepanjang line GH, pada umumnya beberapa rele primer akan beroperasi. Hal ini merupakan cadangan primer redundansi. Untuk komponen sistem utama dan penting, khususnya pada sistem tegangan tinggi dan ekstra tinggi, memerlukan proteksi terpisah, beroperasi berdasarkan CTs yang berbeda (dan kadangkala dengan VTs yang berbeda), sumber DC berbeda, dan berbeda operasi sirkit tripping pada PMT. Salah satu sistem proteksi didesain sebagai proteksi primer, dan yang lain sebagai sekunder, kadangkala ada salah kata karena keduanya akan beroperasi bersama pada kecepatan tinggi.

Untuk sistem jaringan sederhana seperti dalam Gambar 5-4, dapat dilihat bahwa rele pada bus G harus diatur untuk dapat beroperasi bila gangguan eketernal F, F2, dan gangguan lain yang terjadi diluar line HS guna mendapatkan proteksi untuk gangguan F1. Jadi rele G merupakan proteksi primer untuk line GH, dan merupakan proteksi cadangan bagi bus H dan line HS. Hal ini disebut cadangan jarak jauh. Bila F, F2, dan seterusnya adalah gangguan-gangguan yang tidak dapat dibersihkan oleh rele primer dan PMT yang terhubung, rele-rele pada G harus beroperasi dan memisahkan sumber G dari gangguan. Demikian pula halnya dengan semua sumber gangguan harus segera diisolir oleh operasi cadangan rele pada terminal-terminal terdekat.

Pada tahun belakangan ini, dibutuhkan sistem proteksi cadangan pada bus lokal dan untuk membuka semua pemutus disekeliling bus, dibanding dengan cadangan jarak jauh. Cara ini disebut cadangan lokal, yang juga berhubungan dengan kegagalan pemutus. Pada aplikasi tipe ini, pemutus bus H pada line GH harus bekerja bukan pemutus pada bus G untuk membersihkan gangguan-gangguan F2 dan seterusnya, harus rele-rele primer dan atau pemutus H pada line HS gagal beroperasi. Untuk cadangan lokal harus terpisah, pengaturan rele independen, sebagaimana layaknya untuk cadangan jarak jauh. Hal ini tersedia bila sistem rele primer dan sekunder independen seperti yang dikemukakan diatas. Hal ini mungkin tidak digunakan dalam sistem tegangan rendah.

## BAB 6 PROTEKSI ARUS LEBIH DAN GANGGUAN TANAH

### 6.1 PENDAHULUAN

Proteksi terhadap arus lebih merupakan sebuah sistem proteksi yang pertama dipergunakan. Darisini dikembangkan prinsip-prinsip tingkatan arus lebih, yaitu suatu pemisahan proteksi gangguan. Hal ini seharusnya tidak dibingungkan dengan proteksi beban lebih, yang umumnya menggunakan rele dengan waktu operasi didasarkan atas derajat kapabilitas termis dari elemen yang diproteksi. Sedangkan proteksi arus lebih secara langsung akan mengisolir gangguan, meski penyetelan umumnya tetap mengadopsi pengukuran dari proteksi beban lebih.

### 6.2 PROSEDUR KOORDINASI

Agar aplikasi rele arus dapat dilakukan secara benar diperlukan pengetahuan mengenai besarnya arus gangguan yang dapat mengalir pada setiap bagian dari jaringan sistem tenaga. Mengingat bahwa pengujian skala besar umumnya tidak dilakukan karena alasan praktis, maka digunakan analisis sistem. Pada umumnya dalam analisis sistem tenaga pemodelan menggunakan reaktansi transien dari mesin-mesin elektrik  $X'_d$  dan bekerja pada arus simetris sesaat. Data yang dibutuhkan dalam studi penyetelan rele, antara lain:

- a. Diagram segaris dari sistem yang menunjukkan rating dan tipe peralatan proteksi serta CT yang dipergunakan.
- b. Impedansi dalam besaran ohmik, persen atau pu dari Transformator Daya, mesin-mesin berputar dan sirkit penyulang.
- c. Besar arus gangguan minimum dan maksimum yang mungkin akan mengalir pada masing-masing peralatan proteksi.
- d. Arus pengasutan dari Motor dan arus pengasutan serta waktu stalling dari Motor induksi.
- e. Arus beban puncak maksimum yang akan melalui peralatan proteksi.
- f. Kurva kinerja Transformator Arus (CT)

Penyetelan Rele ditentukan pertama kali agar dapat memberikan waktu operasi pemutusan terpendek pada level gangguan maksimum dan kemudian diperiksa apakah operasi ini juga dapat memuaskan untuk arus gangguan minimum yang mungkin terjadi. Disarankan untuk selalu menggambarkan kurva Rele dan peralatan proteksi lainnya, seperti Fuse yang beroperasi secara seri pada skala yang sama. Umumnya lebih mudah bila dipergunakan suatu skala yang berhubungan dengan kemungkinan arus yang terjadi pada dasar tegangan yang rendah atau menggunakan dasar tegangan yang dominan. Alternatif lain adalah dalam  $MVA_{\text{dasar}}$  yang sama atau skala arus yang

berbeda untuk setiap tegangan sistem. Aturan dasar untuk mendapatkan koordinasi Rele yang benar dapat dinyatakan sebagai berikut:

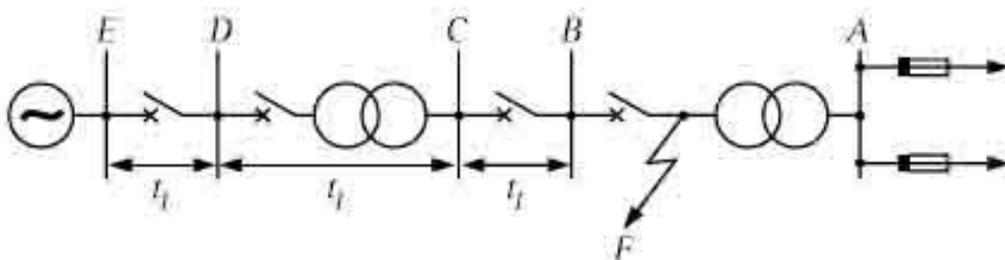
- i. Bila memungkinkan, gunakan Rele yang memiliki karakteristik operasi yang sama bila Rele terpasang secara seri.
- ii. Yakinkan bahwa Rele terjauh dari sumber memiliki setelan arus yang sama atau lebih rendah dari Rele dibelakangnya, mengingat arus primer yang dibutuhkan untuk mengoperasikan Rele didepan adalah sama atau lebih kecil dari arus primer yang diperlukan untuk mengoperasikan Rele berikutnya.

### 6. 3 PRINSIP-PRINSIP TINGKATAN ARUS – WAKTU

Dari sekian banyak metode yang mungkin digunakan untuk mendapatkan koordinasi Rele yang benar ,baik menggunakan tingkatan waktu, arus atau kombinasi keduanya. Tujuan utama dari metode tersebut adalah memperoleh pemisahan yang benar. Dengan kata lain, setiap metode harus dapat memilih dan mengisolasi hanya bagian sistem yang mengalami gangguan dan menjaga bagian lainnya tetap beroperasi.

#### 6. 3. 1 Pemisahan Berdasarkan Waktu

Pada metode ini, pada setiap Rele yang mengendalikan suatu pemutus tenaga (PMT) diberikan interval waktu operasi yang meyakinkan bahwa PMT yang paling dekat dengan titik gangguan yang akan membuka pertamakali. Dalam Gambar 6-1 diberikan ilustrasi penggunaan metode ini pada sebuah sistem distribusi radial sederhana. PMT diletakkan pada B, C, D dan E yang merupakan titik-titik awal dari suatu seksi atau awal dari titik injeksi setiap seksi dari sebuah sistem tenaga. Masing-masing unit proteksi dilengkapi dengan Rele arus lebih tipe ‘definite time delay’ dimana operasi Rele diinisiasi oleh elemen ‘time delay’.



Gambar 6-1: Sistem Radial menggunakan pemisahan berdasarkan waktu

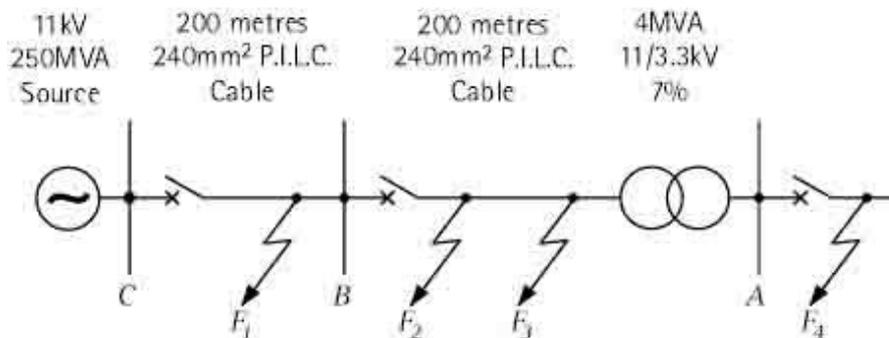
Bila penyetelan elemen arus dilakukan berdasarkan arus gangguan maka elemen ini tidak akan berperan dalam menentukan pemisahan yang diinginkan. Karena alasan, Rele jenis ini kerap kali dijelaskan sebagai Rele dengan ‘independent definite time delay relay’

karena waktu operasinya dalam pemakaiannya tidak tergantung pada besar kecilnya level arus gangguan. Elemen 'time delay' yang akan menentukan pemisahan.

Rele pada B disetel dengan waktu tunda terkecil yang memungkinkan Fuse yang terpasang disisi sekunder Transformator A bekerja lebih dahulu bila gangguan yang terjadi disisi sekunder Transformator A. Tipikal besarnya waktu tunda 0,25s sudah memadai. Jika gangguan terjadi dititik F, Rele pada B akan beroperasi dalam 0,25s dan berdasarkan urutan operasinya, PMT pada B akan membuka guna mengisolir gangguan sebelum Rele-Rele pada C, D dan E mempunyai cukup waktu untuk menyelesaikan urutan operasinya. Kelemahan utama dari pemisahan berdasarkan waktu ini adalah bila gangguan terjadi dekat pada sumber tenaga, maka waktu operasi pemutusan membutuhkan waktu yang cukup lama sedangkan arus gangguan yang terjadi dalam level (MVA) tertinggi.

### 6. 3. 2 Pemisahan Berdasarkan Arus

Pemisahan berdasarkan arus didasarkan pada kenyataan bahwa besar arus gangguan bervariasi terhadap lokasi gangguan, karena perbedaan besarnya impedansi antara titik gangguan dan sumber. Karenanya, tipikal Rele yang mengendalikan PMT disetel untuk beroperasi pada besaran tertentu sehingga Rele yang terdekat dengan titik gangguan yang akan mengoperasikan PMT nya, seperti disajikan dalam Gambar 6-2.



Gambar 6-2: Sistem Radial menggunakan pemisahan berdasarkan Arus

Untuk gangguan pada F<sub>1</sub>, arus gangguan hubung singkat yang terjadi adalah:

$$I = \frac{6350}{Z_s + Z_{L1}}$$

Dimana Z<sub>s</sub> dan Z<sub>L1</sub> Masing-masing adalah impedansi sumber dan impedansi kabel antara C dan B, dengan harga masing-masing sebagai berikut:

$$Z_s = \frac{(11)^2}{250} = 0,485\Omega \text{ dan } Z_{L1} = 0,24\Omega$$

Sehingga

$$I = \frac{6350}{0,485 + 0,24} = 8.800A$$

Dengan demikian Rele yang mengendalikan PMT disisi C disetel untuk beroperasi pada arus gangguan sebesar 8.800A yang secara teoritis akan mampu melindungi keseluruhan kabel antara C dan B. Namun demikian, ada dua hal yang akan mempengaruhi metode koordinasi dengan cara ini, yaitu:

- i. Sangat tidak praktis untuk membedakan gangguan yang terjadi antara titik F<sub>1</sub> dan F<sub>2</sub>, mengingat jarak keduanya hanya beberapa meter karena itu perubahan arus gangguan hanya sebesar 0,1%.
- ii. Dalam prakteknya akan terdapat variasi dalam level sumber gangguan, tipikali antara 250MVA dan 130MVA. Pada level yang rendah arus gangguan tidak akan melebihi 6.800A, meski gangguan tersebut terjadi pada kabel yang dekat dengan C, sehingga bila Rele di setel pada arus 8.800A maka tidak akan ada bagian kabel yang terproteksi dengan baik.

Oleh karena itu pemisahan berdasarkan arus tidak mencapai tingkatan pemisahan yang benar antara PMT pada C dan B, namun persoalan menjadi berbeda bila terdapat impedansi yang cukup signifikan antara kedua PMT. Hal ini dapat dilihat bila kita tinjau kembali tingkatan yang dibutuhkan antara PMT pada B dan A, seperti terlihat pada Gambar 6-2. Misalkan gangguan terjadi di F<sub>4</sub>, besar arus gangguan yang terjadi diberikan oleh:

$$I = \frac{6.350}{Z_S + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_T}$$

Dimana Z<sub>S</sub>, Z<sub>L1</sub>, Z<sub>L2</sub> dan Z<sub>T</sub> masing-masing adalah impedansi sumber, Impedansi Kabel antara C dan B, Impedansi Kabel antara B dan Transformator 4MVA dan Impedansi Transformator, dengan besaran sebagai berikut:

$$Z_S = \frac{(11)^2}{250} = 0,485\Omega ; Z_{L1} = 0,24\Omega ; Z_{L2} = 0,04\Omega \text{ dan } Z_T = 0,07 \frac{(11)^2}{4} = 2,120\Omega$$

Dengan demikian

$$I = \frac{6.350}{(0,485) + (0,24) + (0,04) + (2,12)} = 2.200A$$

Berdasarkan ini, Rele yang mengendalikan PMT pada B disetel untuk beroperasi pada arus gangguan sebesar 2.200A ditambah dengan margin keamanan agar tidak beroperasi bila gangguan terjadi di F<sub>4</sub> dan harus dipisah dengan Rele di A. Bila

diasumsikan margin keselamatan 20% dan 10% lagi untuk variasi perbedaan impedansi sistem, sangat masuk akal bila disetel pada 130% x 2.200A atau sebesar 2.860A untuk Rele di B. Sekarang bila gangguan terjadi di F<sub>3</sub> yang merupakan bagian ujung dari kabel yang memasok Transformator A, arus gangguan yang terjadi adalah:

$$I = \frac{6.350}{Z_S + Z_{L1} + Z_{L2}}$$

Jika diasumsikan level MVA gangguan adalah 250MVA, maka:

$$I = \frac{6.350}{(0,485) + (0,24) + (0,04)} = 8.300A$$

Alternatif lain bila level MVA sebesar 130MVA, maka:

$$Z_S = \frac{(11)^2}{130} = 0,93\Omega$$

$$I = \frac{6.350}{(0,930) + (0,24) + (0,04)} = 5.250A$$

Dengan kata lain, untuk kedua level sumber, rele di B akan bekerja secara benar untuk semua gangguan yang terjadi sepanjang kabel 11 kV yang memasok Transformator A.

### 6. 3. 3 Pemisahan Berdasarkan Waktu dan Arus

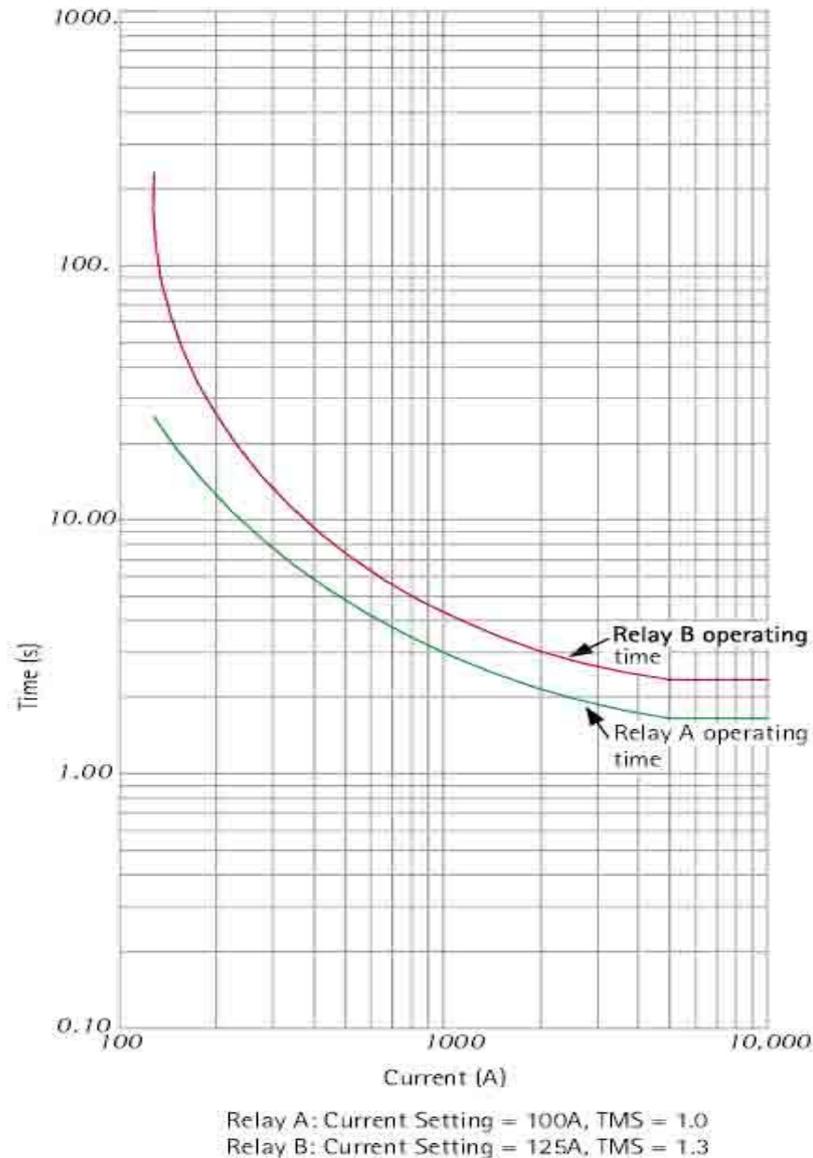
Dua metode yang dikemukakan sebelumnya masing-masing memiliki kelemahan. Pada kasus pemisahan berdasarkan waktu, kelemahan dapat terjadi untuk gangguan pada titik tertentu dimana waktu pemutusan menjadi sangat lama untuk level gangguan yang besar, sedangkan dalam pemisahan berdasarkan waktu hanya dapat diaplikasikan pada sistem yang memiliki perbedaan impedansi antara dua PMT yang ditinjau.

Gambar 6-3 memperlihatkan karakteristik dua rele dengan penyetelan arus/waktu yang berbeda. Untuk variasi arus gangguan yang cukup besar antara dua sisi ujung penyulang, waktu operasi tercepat dapat dicapai oleh rele yang terdekat dengan sumber, dimana level gangguan terbesar terjadi. Dengan cara seperti ini kelemahan diskriminasi berdasarkan arus dan waktu dapat diselesaikan.

Pemilihan karakteristik rele arus lebih umumnya diawali dengan pemilihan karakteristik yang benar untuk masing-masing rele, diikuti dengan pemilihan penyetelan arus rele dan akhirnya margin perbedaan dan penyetelan waktu dari rele dapat ditentukan.

Untuk memberikan gambaran yang lebih baik, berikut ini diberikan ilustrasi lebih jelas menggunakan sistem pada Gambar 6-4, yang merupakan sistem yang identik dengan

yang diperlihatkan dalam Gambar 6-1, kecuali dengan tambahan tipikal parameter sistem .



Gambar 6-3: Karakteristik rele untuk penyetelan yang berbeda

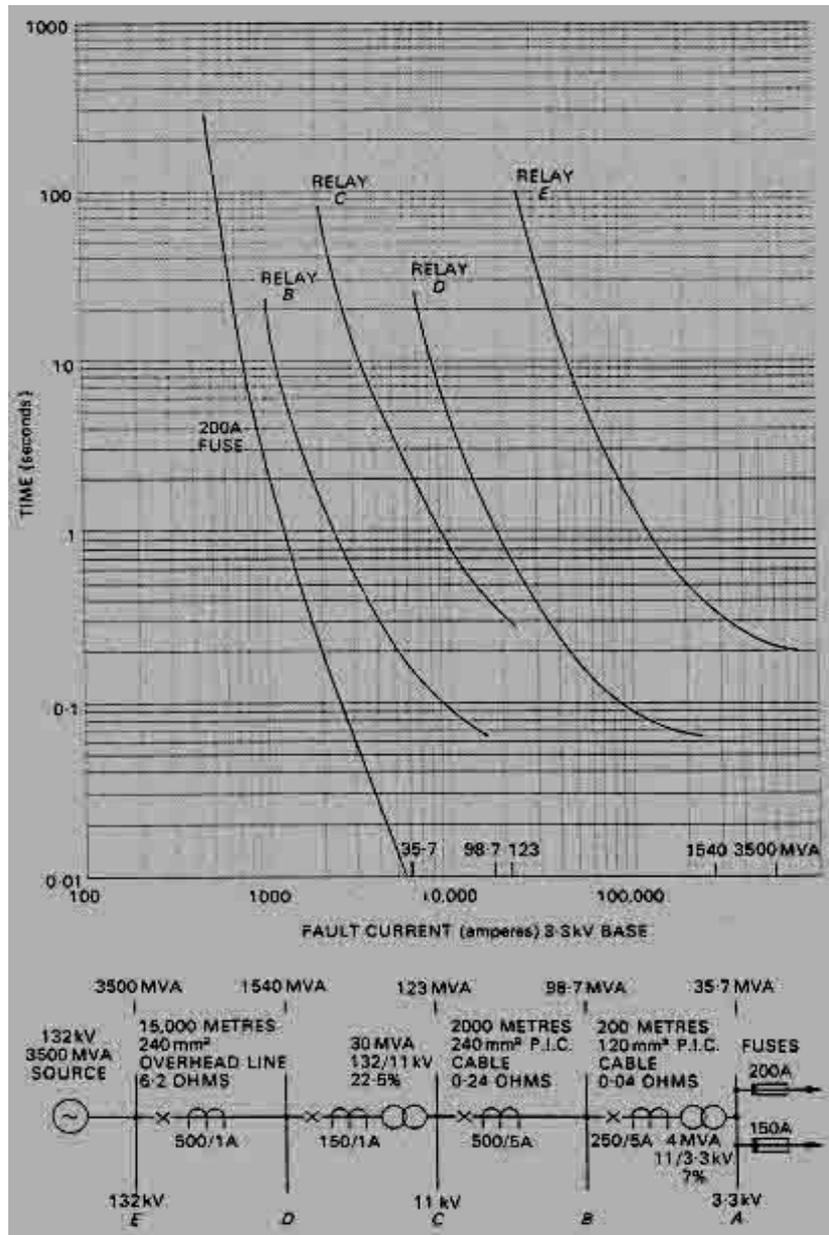
Agar analisis sistem dapat dilaksanakan, sebelum studi koordinasi Rele dari sistem yang ditunjukkan dalam Gambar 6-4 dilaksanakan, maka semua impedansi sistem harus mengacu pada besaran dasar yang sama. Bila digunakan  $MVA_{\text{dasar}}$  10 MVA, maka akan diperoleh:

Impedansi Transformator 4 MVA pada dasar 10 MVA adalah:

$$Z_{T4MVA} = 7 \times \frac{10}{4} = 17,5\%$$

Impedansi kabel antara B dan A serta antara C dan B, pada 11 kV dengan dasar 10MVA:

$$Z_{LBA} = \frac{0,04 \times 100 \times 10}{(11)^2} = 0,33\% \text{ dan } Z_{LCB} = \frac{0,24 \times 100 \times 10}{(11)^2} = 1,98\%$$



Gambar 6.4: Tingkatan Arus dan Waktu

Impedansi Transformator 30 MVA pada dasar 10MVA:

$$Z_{T30MVA} = 22,5 \times \frac{10}{30} = 7,5\%$$

Impedansi jaringan 132 kV pada dasar 10 MVA:

$$Z_{LED} = \frac{6,20 \times 100 \times 10}{(132)^2} = 0,36\%$$

Impendansi sumber pada  $MVA_{\text{dasar}}$ : 10 MVA diperoleh:

$$Z_s = \frac{100 \times 10}{3.500} = 0,29\%$$

Grap dalam Gambar 6-4 memperlihatkan penggunaan ‘kurva pemisahan’ yang merupakan bantuan penting dalam memperoleh koordinasi proteksi yang memuaskan. Dalam contoh ini, dipilih tegangan dasar 3,3 kV dan kurva pertama merupakan gambaran kurva Fuse 200A, yang diasumsikan dapat dipergunakan untuk memproteksi rangkaian Outgoing dari sistem 3,3 kV. Setelah kurva karakteristik operasi Fuse dapat digambarkan, selanjutnya tingkatan dari Rele-Rele arus lebih untuk masing-masing Gardu dari sistem Radial tersebut dapat dilakukan:

Gardu B; Ratio CT 250/5A

Karakteristik Rele arus lebih diasumsikan berupa Rele ‘extremely inverse’, misal Rele CDG 14. Rele ini harus terpisahkan dengan Fuse 200A pada level gangguan sebesar:

$$\frac{10 \times 100}{(17,5 + 0,33 + 1,98 + 7,5 + 0,36 + 0,29)} = 35,7\text{MVA}$$

Yaitu dengan arus sebesar 6.260A pada tegangan 3,3kV atau 1.880A pada tegangan 11kV. Dari Karakteristik operasi Rele CDG 14 memperlihatkan bahwa pada penyetelah plug (PMS) sebesar 100% arus adalah 250A, 4,76 MVA pada tegangan 11kV dan pada penyetelan pengali waktu (TMS) pada 0,2 didapat tingkatan pemisahan yang cukup dengan Fuse 200A.

Gardu C; Ratio CT 500/5A

Karakteristik Rele arus lebih diasumsikan berupa Rele ‘extremely inverse’, misal Rele CDG 14. Rele ini harus terpisahkan dengan Rele pada Gardu B pada level gangguan sebesar:

$$\frac{10 \times 100}{(1,98 + 7,5 + 0,36 + 0,29)} = 98,7\text{MVA}$$

Yaitu dengan arus sebesar 17.280A pada tegangan 3,3kV atau 5.180A pada tegangan 11kV. Dari Karakteristik operasi Rele CDG 14 memperlihatkan bahwa pada penyetelah plug (PMS) sebesar 100% arus adalah 500A, 9,52 MVA pada tegangan 11kV dan pada penyetelan pengali waktu (TMS) pada 0,7 didapat tingkatan pemisahan yang cukup dengan Rele pada Gardu B.

**Gardu D; Ratio CT 150/1A**

Karakteristik Rele arus lebih diasumsikan berupa Rele ‘extremely inverse’, misal Rele CDG 14. Rele ini harus terpisahkan dengan Rele pada Gardu C pada level gangguan sebesar:

$$\frac{10 \times 100}{(7,5 + 0,36 + 0,29)} = 123\text{MVA}$$

Yaitu dengan arus sebesar 21.500A pada tegangan 3,3kV atau 538A pada tegangan 132kV. Dari Karakteristik operasi Rele CDG 14 memperlihatkan bahwa pada penyetelah plug (PMS) sebesar 100% arus adalah 150A, 34,2 MVA pada tegangan 132kV dan pada penyetelan pengali waktu (TMS) pada 0,25 didapat tingkatan pemisahan yang cukup dengan Rele pada Gardu C.

**Gardu E; Ratio CT 500/1A**

Karakteristik Rele arus lebih diasumsikan berupa Rele ‘extremely inverse’, misal Rele CDG 14. Rele ini harus terpisahkan dengan Rele pada Gardu D pada level gangguan sebesar:

$$\frac{10 \times 100}{(0,36 + 0,29)} = 1.540\text{MVA}$$

Yaitu dengan arus sebesar 270.000A pada tegangan 3,3kV atau 6.750A pada tegangan 132kV. Dari Karakteristik operasi Rele CDG 14 memperlihatkan bahwa pada penyetelah plug (PMS) sebesar 100% arus adalah 500A, 114 MVA pada tegangan 132kV dan pada penyetelan pengali waktu (TMS) pada 0,9 didapat tingkatan pemisahan yang cukup dengan Rele pada Gardu D. Perbandingan antara waktu operasi Rele pada Gambar 6-1 dan pemisahan waktu yang diperoleh dari kurva dalam Gambar 6-4 pada kondisi gangguan maksimum menunjukkan perbedaan tingkatan waktu yang cukup signifikan. Perbedaan ini dapat dilihat dalam ringkasan pada Tabel 6-1 berikut ini:

Tabel 6-1: Perbandingan waktu operasi Rele pada Gambar 6-1 dan 6-4

Letak Rele	Level Gangguan (MVA)	Waktu Operasi Rele dari Gambar 6-1 (s)	Waktu Operasi Rele dari Gambar 6-3 (s)
B	98,7	0,25	0,07
C	123	0,65	0,33
D	1540	1,05	0,07
E	3500	1,45	0,25

Gambaran ini menunjukkan bahwa untuk gangguan yang dekat dengan lokasi Rele, dengan karakteristik waktu terbalik dapat dicapai penurunan waktu operasi pengisoliran gangguan yang cukup besar, demikian pula untuk gangguan yang jletaknya jauh dari

lokasi proteksi Rele, penurunan waktu operasi masih diperoleh, seperti diperlihatkan dalam Tabel 6-2 berikut:

Tabel 6-2: Penurunan Waktu Operasi Rele

Letak Rele	Level Gangguan (MVA)	Penurunan Waktu Operasi Rele dari Gambar 6-3 (s)
B	98,7	0,17
C	123	0,32
D	1540	0,86
E	3500	0,39

Finalisasi dari studi koordinasi adalah menentukan waktu operasi rata-rata bagi setiap Rele arus lebih pada level gangguan arus minimum dan maksimum serta membandingkan hasil ini dengan waktu operasi seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 6-1 yang menggunakan Rele arus lebih waktu pasti seperti disajikan dalam Tabel 6-3 berikut:

Tabel 6-3: Perbandingan Waktu Operasi Rele pada level gangguan maksimum/minimum

Letak Rele	Level Gangguan (MVA)		Waktu Operasi Rele dari Gambar 6-3 (s)		Waktu Operasi rata-rata (s)
	Min	Max	Min	Max	
B	35,7	98,7	0,07	0,17	0,12
C	98,7	123	0,33	0,42	0,375
D	123	1540	0,07	0,86	0,465
E	1540	3500	0,25	0,39	0,32

Dari perbandingan ini terlihat jelas bahwa bila terdapat variasi level gangguan sepanjang sistem, kinerja Rele arus lebih waktu terbalik jauh lebih baik dari rele arus lebih waktu pasti.

#### 6.4 MARJIN TINGKATAN

Interval waktu operasi antara dua Rele yang letaknya berdekatan tergantung pada beberapa faktor:

- i. Waktu interupsi arus gangguan dari PMT.
- ii. Waktu overshoot dari Rele.
- iii. Kesalahan-Kesalahan.
- iv. Final margin dari operasi lengkap.

##### 6.4.1 Waktu Interupsi PMT

Untuk menginterupsi gangguan, PMT harus memutus arus gangguan sebelum Rele pemisah berhenti energise.

#### 6. 4. 2 Overshoot

Bila Rele deenergise, operasi mungkin berlanjut, dengan waktu sedikit lebih panjang sampai energi yang tersimpan terdisipasi. Contoh: Sebuah Rele piringan induksi akan memiliki energi kinetik yang tersimpan dalam gerakan piringan. Rele statik memiliki energi yang tersimpan dalam kapasitor. Desain Rele dibuat agar dapat meminimisasi dan mengabsorpsi energi ini, tetapi beberapa kelonggaran masih dimungkinkan. Waktu overshoot bukanlah waktu sesungguhnya dimana operasi Rele terjadi, tetapi waktu yang diperlukan oleh Rele masih dalam kondisi energise untuk mencapai operasi penuhnya.

#### 6. 4. 3 Kesalahan-Kesalahan

Hampir semua peralatan pengindera, seperti Rele dan CT memiliki derajat kesalahan karakteristik waktu operasi. Karakteristik waktu operasi salah satu dari keduanya yang terlibat dalam tingkatan Rele mempunyai kesalahan positif atau negatif, seperti halnya pada CT yang mungkin memiliki kesalahan phasa dan ratio akibat adanya arus eksitasi yang dibutuhkan untuk menginisiasi inti. Hal ini diterapkan pada Rele arus lebih dengan waktu tunda pasti. Penyetelan dan tingkatan Rele dilaksanakan dengan asumsi ketelitian dari kurva kalibrasi yang dipublikasikan oleh pabrikan, tetapi karena ada beberapa kemungkinan kesalahan beberapa toleransi diperbolehkan.

#### 6. 4. 4 Marjin Final

Setelah semua toleransi dibuat, tingkatan Rele tentunya hanya gagal dalam melengkapi urutan operasinya. Beberapa tambahan toleransi atau marjin keselamatan dibutuhkan untuk meyakinkan bahwa celah kontak-kontak ada (atau sebagaimana adanya).

#### 6. 4. 5 Rekomendasi Waktu

Jumlah total waktu yang diperbolehkan untuk memenuhi kondisi diatas tergantung pada kecepatan operasi PMT dan kinerja Rele. Tingkat marjin normal adalah 0,5s. Untuk PMT kecepatan tinggi dan Rele dengan waktu overshoot rendah dapat menggunakan waktu 0,4s dan dalam kondisi terbaik waktu terbaik yang ada dan dapat digunakan adalah 0,35s.

Dalam beberapa kasus, daripada menggunakan marjin tingkatan tetap, lebih baik mengadopsi besaran waktu tetap, memperhitungkan waktu operasi PMT dan overshoot Rele, serta menambahkan waktu ini dengan variabel waktu yang dibutuhkan akibat kesalahan CT, Rele dan marjin keselamatan. Waktu 0,25s dipilih untuk besaran waktu tetap, ditambahkan 0,1s untuk waktu interupsi arus gangguan PMT, 0,05s bagi waktu overshoot Rele dan 0,1s untuk marjin keamanan.

Oleh karenanya, untuk interval waktu  $t$  yang dibutuhkan antara Rele-Rele arus lebih waktu terbalik dapat menggunakan persamaan berikut:

$$t' = 0,25t + 0,25s$$

dimana  $t$  adalah waktu operasi nominal dari Rele yang terdekat dengan titik gangguan.

Sepanjang pembahasan Rele arus lebih dengan waktu tunda pasti, diasumsikan bahwa Rele ini memiliki Klas kesalahan E10, sebagaimana yang didefinisikan dalam standar Inggris BS 142:1966. Batasan normal kesalahan bagi rele E10 adalah  $\pm 10\%$ , tetapi toleransi harus dilakukan terhadap pengaruh temperatur, tegangan, frekuensi dan berangkat dari referensi. Oleh karenanya, untuk interval waktu  $t'$  yang dibutuhkan antara Rele arus lebih waktu tunda tetap dapat menggunakan persamaan berikut:

$$t' = 0,2t + 0,25s$$

dimana  $t$  adalah waktu operasi nominal dari Rele yang terdekat dengan titik gangguan.

Tabel 6-4: Definisi Karakteristik rele standard

Relay Characteristic	Equation (IEC 60255)
Standard Inverse (SI)	$t = TMS \times \frac{0.14}{I_r^{0.02} - 1}$
Very Inverse (VI)	$t = TMS \times \frac{13.5}{I_r - 1}$
Extremely Inverse (EI)	$t = TMS \times \frac{80}{I_r^2 - 1}$
Long time standard earth fault	$t = TMS \times \frac{120}{I_r - 1}$

(a): Relay characteristics to IEC 60255

## 6. 5 STANDAR RELE ARUS LEBIH I.D.M.T

Karakteristik pemutusan arus/waktu rele I.D.M.T bervariasi sesuai dengan kebutuhan waktu pemutusan yang diperlukan dan karakteristik dari peralatan proteksi lain yang dipergunakan dalam jaringan. Untuk keperluan ini, IEC 60255 mendefinisikan sejumlah karakteristik standar sebagai berikut:

- Standard Inverse (SI)
- Very Inverse (VI)
- Extremely Inverse (EI)
- Definite Time (DT)

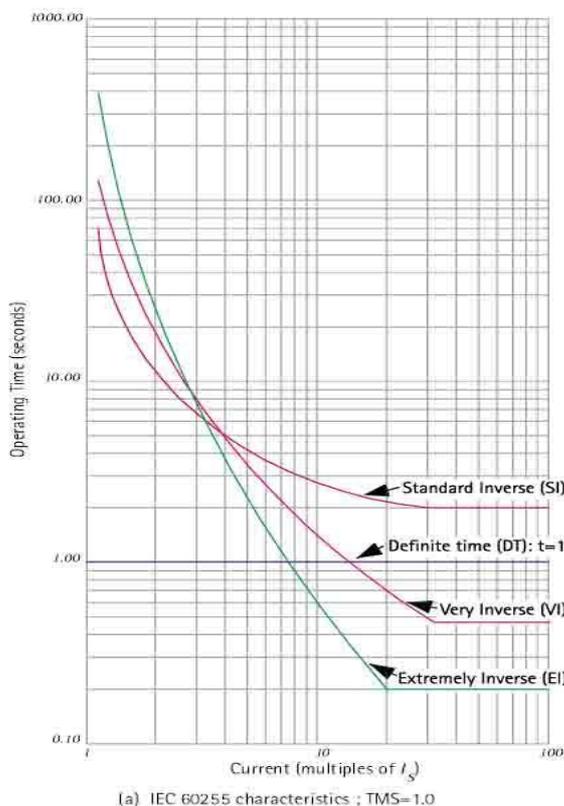
Penjelasan matematis dari kurva diberikan dalam Tabel 6-4 dan kurva berdasarkan penyetelan dasar arus dan penyetelan time multiplier 1 detik diperlihatkan dalam Gambar 6-5(a). Karakteristik pemutusan untuk penyetelan TMS berbeda menggunakan kurva SI ditunjukkan dalam Gambar 6-6.

Tabel 6-5: Definisi Karakteristik rele standard

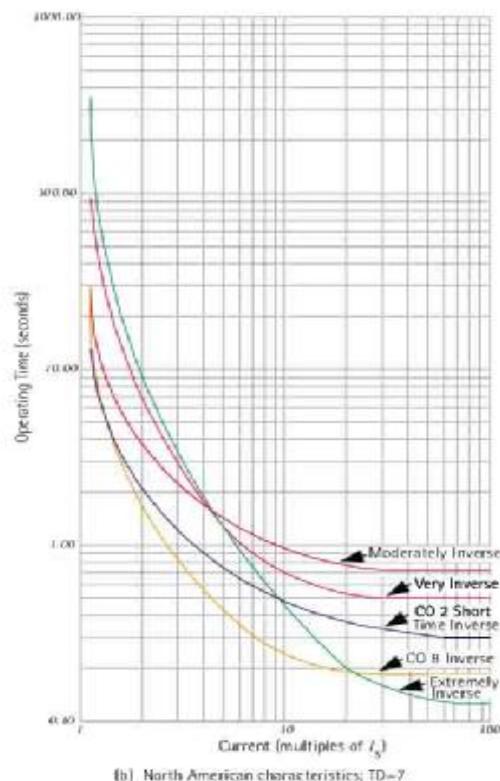
Relay Characteristic	Equation (IEC 60255)
IEEE Moderately Inverse	$t = \frac{TD}{I_r^{0.02}} \left( \frac{0.0515}{I_r^{0.02} - 1} \right) + 0.174$
IEEE Very Inverse	$t = \frac{TD}{I_r^{0.02}} \left( \frac{19.61}{I_r^{0.02} - 1} \right) + 0.491$
Extremely Inverse (EI)	$t = \frac{TD}{I_r^{0.02}} \left( \frac{28.2}{I_r^{0.02} - 1} \right) + 0.1217$
US CO8 Inverse	$t = \frac{TD}{I_r^{0.02}} \left( \frac{5.95}{I_r^{0.02} - 1} \right) + 0.18$
US CO2 Short Time Inverse	$t = \frac{TD}{I_r^{0.02}} \left( \frac{0.02394}{I_r^{0.02} - 1} \right) + 0.01694$

$I_r = (I/I_s)$ , where  $I_s$  = relay setting current  
 TMS = Time multiplier Setting  
 TD = Time Dial setting  
 (b): North American IDMT relay characteristics

Meskipun pada kurva hanya menunjukkan harga diskret dari TMS, penyetelan lanjut dapat dimungkinkan untuk rele elektromekanis.

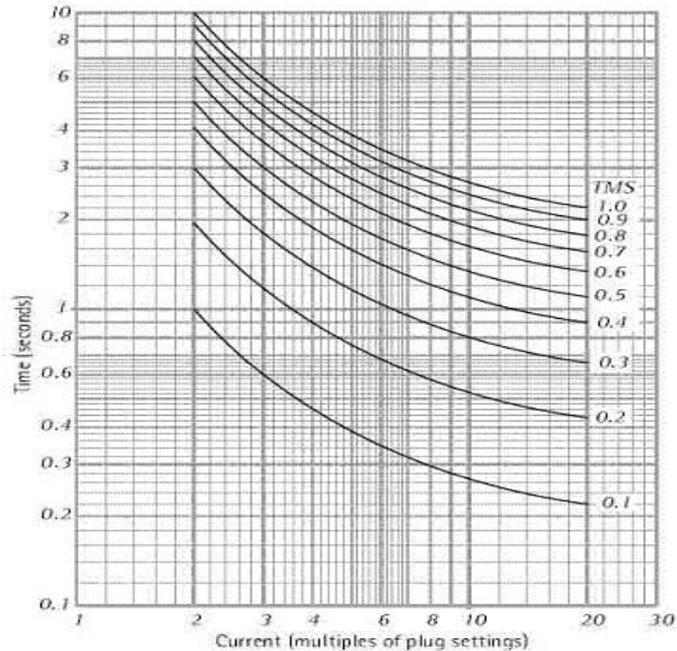


Gambar 6-5a:



Gambar 6-5b:

Untuk tipe rele lainnya, langkah penyetelan mungkin sangat terbatas untuk mendapatkan pengaturan yang kontinyu. Sebagai tambahan, pada umumnya hampir semua rele arus lebih dilengkapi dengan elemen penyetelan instantaneuous. Dalam banyak kasus, penggunaan kurva standar SI telah memberikan hasil yang memuaskan, namun bila diskriminasi yang diinginkan tidak dapat dicapai, maka dapat digunakan kurva VI atau EI, penjelasan lebih lanjut akan diberikan.

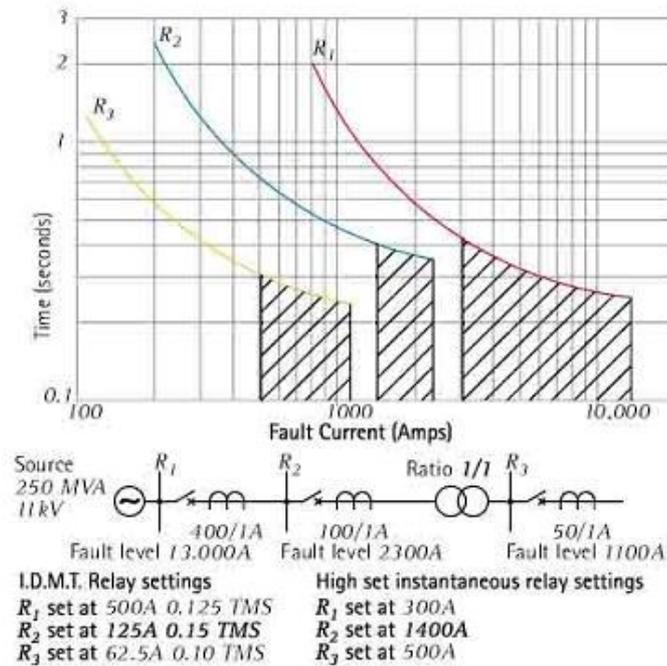


Gambar 6-6:

Rele-rele untuk desain sistem tenaga bagi utilitas North American menggunakan kurva-kurva ANSI/IEEE. Dalam Tabel 6-5 diberikan penjelasan matematis dari karakteristik ini dan pada Gambar 6-5b diperlihatkan standar kurva pada time dial setting 1

## 6. 6 KOMBINASI I.D.M.T DAN ELEMEN INSTANTANEOUS SETELAN TINGGI

Elemen instantaneuous setelan tinggi dapat dipergunakan bilamana impedansi sumber kecil. Hal ini membuat reduksi waktu pemutusan pada level gangguan tinggi dimungkinkan. Hal ini juga meningkatkan diskriminasi keseluruhan sistem dengan membiarkan kurva diskriminasi berada dibelakang penyetelan tinggi elemen instantaneuous lebih rendah, seperti diperlihatkan pada Gambar 6-7. Salah satu keuntungan dari elemen ini adalah untuk menurunkan waktu operasi dari rangkaian proteksi menjadi sebagaimana diperlihatkan dalam areal dibawah kurva diskriminasi. Jika impedansi sumber konstan, maka dimungkinkan untuk memperoleh proteksi kecepatan tinggi sepanjang seksi dari sirkit yang diproteksi. Waktu pemutusan yang cepat dapat meminimisasi kemungkinan kerusakan pada lokasi gangguan. Dalam Gambar 6-7 ini pula diilustrasikan keuntungan lain yang didapat dengan menggunakan elemen ini



Gambar 6-7

Sebagai contoh, dalam Gambar 6-7, rele R<sub>2</sub> terdiskriminasi dengan rele R<sub>3</sub> pada 500A dan bukan pada 1100A, memungkinkan rele R<sub>2</sub> diset pada TMS 0,15 bukan 0,2 dengan margin pemisah antar rele tetap sebesar 0,4 detik. Hal serupa untuk rele R<sub>1</sub> terdiskriminasi terhadap rele R<sub>2</sub> pada 1400A bukan pada 2300A lain yang didapat dengan menggunakan elemen ini

### 6. 6.1 TRANSIEN JANGKAUAN LEBIH

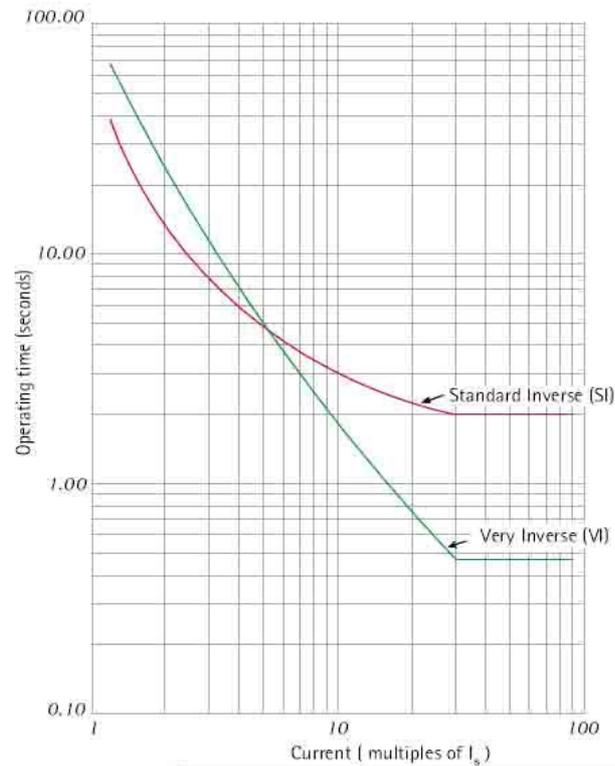
Jangkauan rele adalah bagian dari sebuah sistem proteksi jika gangguan terjadi. Rele yang beroperasi untuk gangguan yang terletak diluar zona utamanya disebut jangkauan lebih. Bila menggunakan elemen arus lebih instantaneuous, kehati-hatian terhadap pemilihan penyetelan harus mempertimbangkan kemungkinan terjadi hal seperti ini. Arus inisiasi yang disebabkan oleh adanya arus dc.offset pada gelombang arus gangguan mungkin dapat melebihi harga pickup rele dan akan mengakibatkan rele beroperasi. Hal ini mungkin terjadi meski harga rms waktu tunak arus gangguan untuk gangguan yang terjadi pada zona proteksi rele lebih kecil dari harga penyetelan. Fenomena ini dikena dengan sebutan jangkauan lebih dan didefinisikan sebagai:

$$\% \text{ jangkauan transien} = \frac{I_1 - I_2}{I_2} \times 100\%$$

Dimana:

I<sub>1</sub> = arus pickup rele pada rms tunak

I<sub>2</sub> = arus rms tunak pada waktu dc offset menyebabkan rele pickup



Gambar 6-8: komparasi antara kurva rele-rele SI dan VI

### 6. 7 RELE ARUS LEBIH VERY INVERSE (VI)

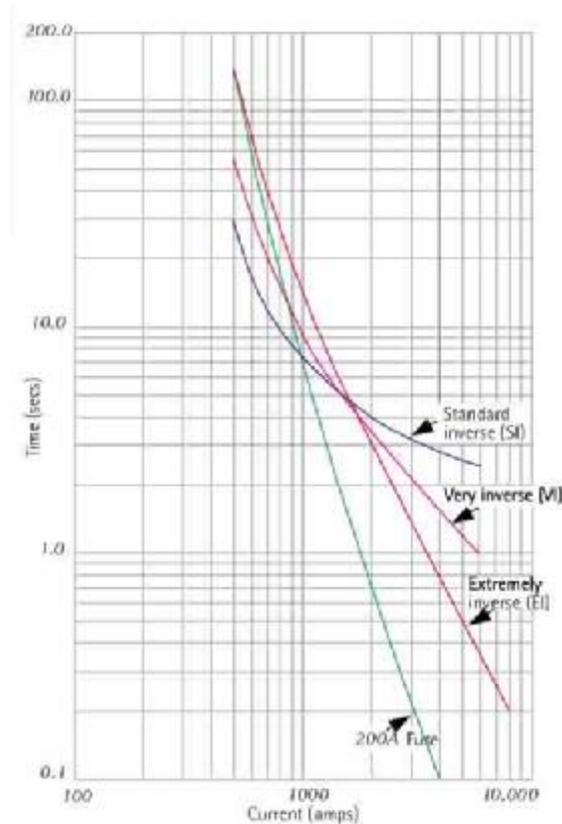
Rele arus lebih very inverse cocok dipergunakan bilamana terdapat penurunan besar arus gangguan sebagai fungsi jarak letak gangguan, yaitu dimana terjadi kenaikan yang cukup substansial pada impedansi gangguan. Karakteristik operasi VI memperlihatkan penurunan waktu operasi hampir duakali lipat untuk penurunan arus dari 7 kali menjadi 4 kali seting arus rele. Hal ini memungkinkan penggunaan TMS yang sama untuk beberapa rele yang terpasang seri.

Gambar 6-8 memperlihatkan komparasi antara kurva rele-rele SI dan VI. Kurva VI lebih steeper dan karenanya lebih cepat bila dibandingkan dengan kurva SI untuk penurunan arus yang sama. Hal ini dapat memungkinkan untuk memperoleh margin diskriminasi dengan TMS rendah untuk seting arus yang sama dan karenanya waktu pemutusan pada sumber dapat diminimisasi.

### 6. 8 RELE ARUS LEBIH EXTREMELY INVERSE (EI)

Dengan karakteristik seperti ini, waktu operasi mendekati berbanding terbalik secara kuadratis terhadap arus. Hal ini sangat cocok dipergunakan untuk memproteksi penyulang distribusi yang kerap mengalami arus puncak pada saat pensaklaran sebagaimana sering terjadi pada sirkit yang dipergunakan untuk mensuplai refrigerator,

pompa, pemanas air dan lainnya yang tetap terhubung meski terjadi pemutusan yang cukup lama. Gambar 6-9 memperlihatkan kurva karakteristik dari rele jenis ini



Gambar 6-9: Kurva karakteristik rele arus lebih extremely inverse

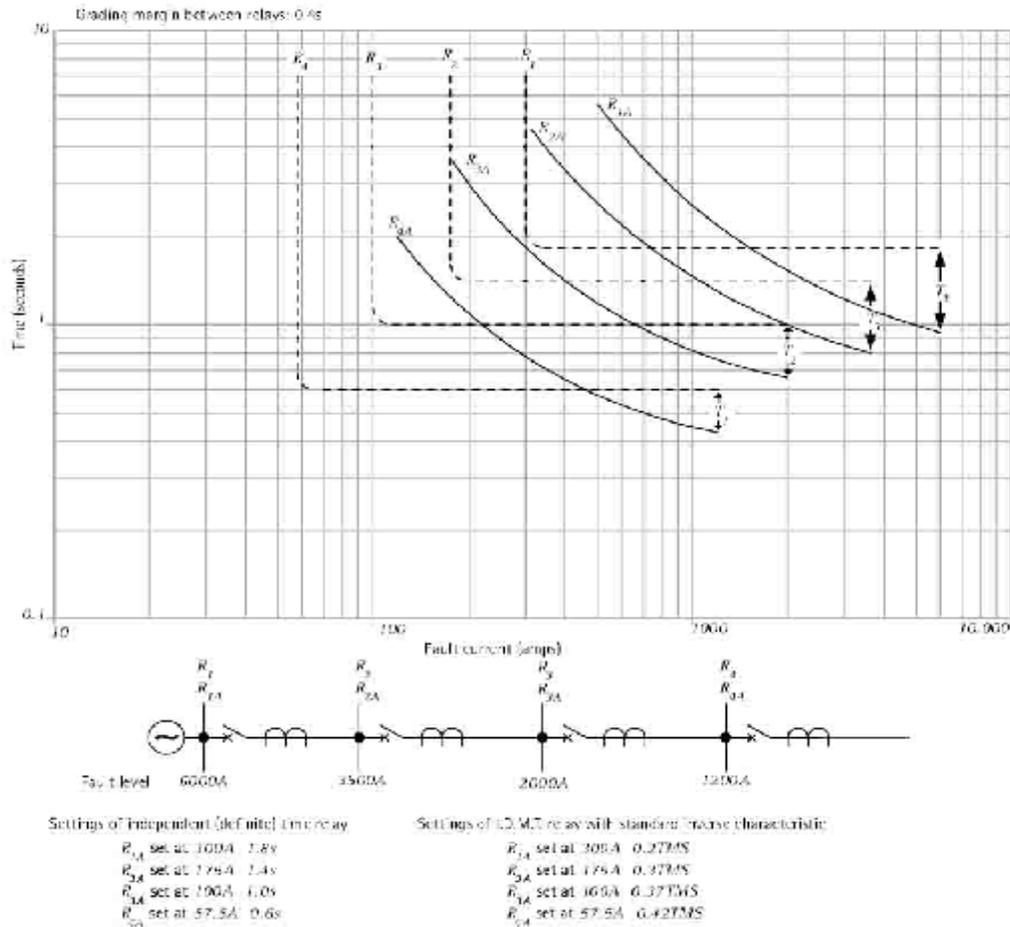
### 6. 9 RELE ARUS LEBIH INDEPENDENT (DEFINITE) TIME

Rele arus lebih pada umumnya juga dilengkapi dengan elemen-elemen yang memiliki karakteristik independent atau definite time. Karakteristik seperti ini memungkinkan rele yang terpasang seri dikoordinasikan dalam situasi dimana besar arus gangguan yang terjadi sangat variatif akibat perubahan impedansi sumber. Karakteristik arus/waktu dari kurva seperti ini diperlihatkan dalam Gambar 6-10, bersama dengan karakteristik standar I.D.M.T untuk memperlihatkan bahwa waktu operasi singkat dapat diperoleh dengan rele inverse pada harga arus gangguan tinggi, dimana rele definite time memiliki waktu operasi rendah untuk arus gangguan rendah. Garis vertikal T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> dan T<sub>4</sub> memperlihatkan penurunan waktu operasi dapat diperoleh dengan rele Inverse pada level arus gangguan tinggi

### 6. 10 PERHITUNGAN PENYETELAN RELE ARUS LEBIH

Koordinasi yang benar dari Rele arus lebih pada suatu sistem tenaga memerlukan perhitungan dan penggambaran pada kertas log yang tepat dari perkiraan penyetulan

Rele, berkenaan dengan arus atau waktu, untuk mendapatkan margin tingkatan yang cocok antara Rele-Rele yang letaknya bersisian.



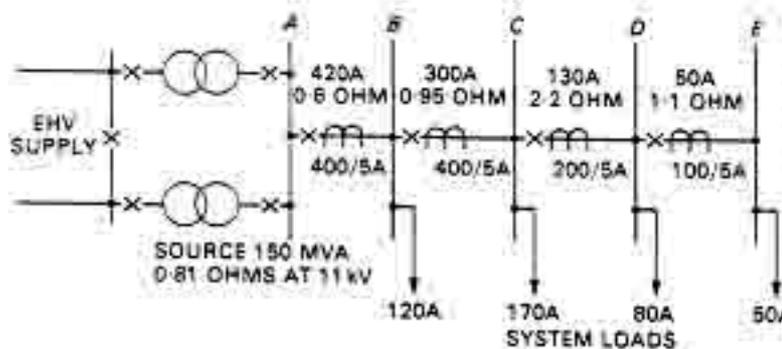
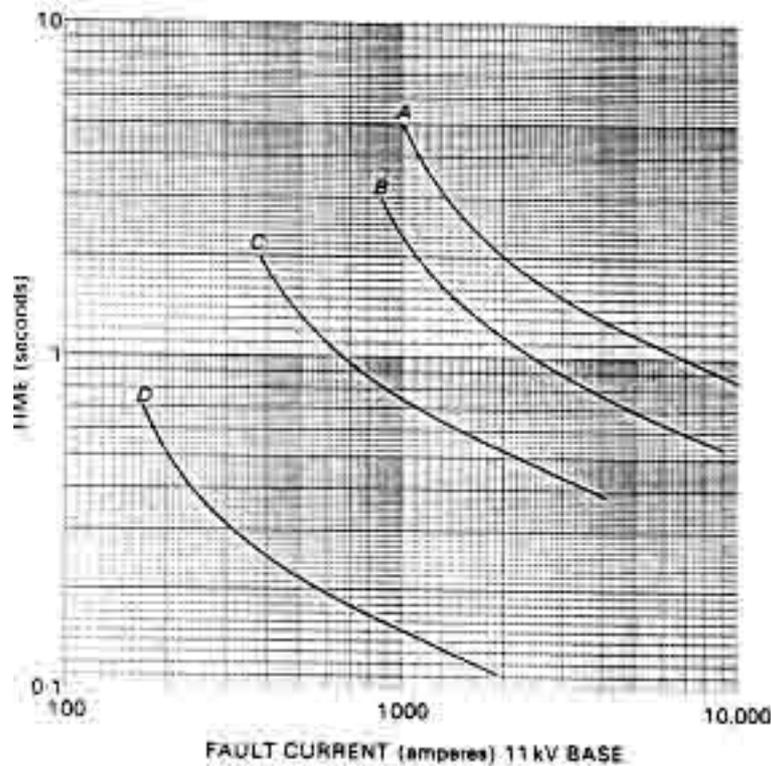
Gambar 6-10:

### 6. 10.1 Rele-Rele Waktu Pasti

Pemilihan setelan bagi Rele waktu pasti menimbulkan sedikit kesulitan. Elemen arus lebih harus diberi penyetelan yang rendah dengan margin yang cukup rasional daripada arus gangguan yang mungkin mengalir ketitik gangguan dari bagian sistem sampai kepada kebutuhan proteksi cadangan pada saat pelayanan minimum. Penyetelan harus cukup tinggi untuk menghindari operasi Rele pada saat beban maksimum, margin yang cukup untuk melakukan arus pengasutan motor besar atau inrus peralihan Transformator. Penyetelan waktu yang akan dipilih harus cukup bagi margin tingkatan seperti didiskusikan dalam bagian 6.4.

### 6. 10.2 Rele-Rele Waktu Terbalik

Apabila sistem tenaga terdiri dari beberapa seksi kabel yang terhubung seri sehingga total impedansinya rendah, besaran arus gangguan akan dikendalikan oleh impedansi Transformator atau Pembangkit dan tidak terlalu bervariasi terhadap lokasi gangguan.



Gambar 6-11: Sistem Distribusi Radial 11 kV

Dalam kasus seperti ini, dimungkinkan untuk membuat tingkatan pada Relé waktu terbalik dengan cara Relé Waktu Pasti, namun demikian bilamana arus gangguan cukup bervariasi terhadap lokasi gangguan, dimungkinkan menggunakan fakta ini guna membuat tingkatan dalam arus dan waktu guna meningkatkan kinerja Relé. Hal ini merupakan salah satu kelebihan utama dari Relé Waktu Terbalik terhadap Relé Waktu Pasti bila digunakan pada sistem dimana terdapat variasi yang cukup besar pada arus gangguan antara kedua ujung penyulang, karena waktu operasi tercepat dapat dicapai oleh Relé yang terdekat dengan sumber dimana level gangguan tertinggi terjadi.

Perhitungan dalam bentuk tabulasi merupakan cara terbaik dalam membuat tingkatan Relé arus lebih. Sistem distribusi dalam Gambar 6-11 adalah contoh sistem yang akan dipergunakan untuk memperlihatkan cara ini. Dalam contoh ini, Busbar A pada Gardu

11 kV dipasang oleh dua Transformator Grid yang terhubung pada sistem EHV yang impedansi sumber dapat diabaikan. Jadi daya hubung singkat pada busbar 11 kV pada Gardu A dengan kedua Transformator bekerja adalah 150MVA yang terhubung dengan impedansi sumber  $0,81\Omega$ .

Gardu A seperti diperlihatkan mensuplai Gardu B, C, D dan E melalui sistem distribusi Radial termasuk bagian-bagian penyulang dengan impedansi seperti dalam diagram. Beban masing-masing disuplai oleh Gardu yang bersesuaian, dengan distribusi arus sebagaimana diperlihatkan dalam diagram tersebut.

Data sebagai bahan analisis disajikan dalam Tabel 6-6. Impedansi total termasuk impedansi sumber, dari sumber menuju masing-masing Gardu diberikan dalam kolom kedua. Pada kolom ketiga diberikan besar impedansi yang berhubungan dengan hubung singkat busbar pada Gardu A menurun sampai asumsi harga minimum, dalam contoh ini harga minimum diperoleh dalam operasi sistem hanya dipasang dengan sebuah Transformator. Dalam kolom empat dan lima berisi data arus gangguan maksimum dan minimum. Arus beban maksimum yang ditransmit melalui masing-masing Gardu menuju penyulang berikutnya disajikan dalam kolom keenam.

Tabel 6-6: Data sistem dalam Gambar 6-11

Lokasi	Impedansi Total		Arus Gangguan (A)		$I_{L-Maks}$ (A)	Ratio CT	Setelan Arus Rele	
	Min	Maks	Maks	Min			Persen	$I_{primer}$ (A)
A	0,81	1,62	7.850	3.920	420	400/5A	125	600
B	1,41	2,22	4.500	2.860	300	400/5A	125	500
C	2,36	3,17	2.690	2.003	130	200/5A	100	200
D	4,56	5,37	1.395	1.182	50	100/5A	100	100

Dari data ini dapat ditentukan ratio CT yang tepat dan pemilihan penyetelan Rele arus lebih. Perlu dicatat bahwa penyetelan arus primer harus diatas estimasi arus beban maksimum, dan juga mempertimbangkan kemungkinan peningkatan beban kedepan, beban tinggi yang tak diduga, peralihan beban puncak dan reset ulang Rele setelah gangguan, dengan prospektif sirkit pembawa arus beban maksimum. Penyetelan Rele harus berada dibawah arus gangguan minimum yang diberikan dalam kolom 5 dari Tabel 6-6.

Rele arus lebih diharapkan mempunyai tingkatan proteksi guna melindungi sistem terhadap gangguan dan tidak memberikan proteksi beban lebih yang akurat. Paling tidak pengukuran terhadap proteksi beban lebih ditujukan untuk melindungi kabel terhadap pembebanan lebih. Karena alasan ini penyetelan Rele primer tidak selalu dibuat setinggi mungkin jika hanya arus gangguan yang menjadi pertimbangan. Sekali setelah penyetelan arus Rele dipilih, berikutnya adalah menentukan dan menghitung penyetelan pengali waktu Rele (TMS) seperti diperlihatkan dalam Tabel 6-7a dan 6-7b.

Tabel 6-7a: Perhitungan Penyetelan Waktu Rele pada D dan C

Rele	Lokasi Gangguan							
	D				C			
	PSM	T <sub>c</sub>	TMS	T <sub>a</sub>	PSM	T <sub>c</sub>	TMS	T <sub>a</sub>
D	13,95	2,6	0,05	0,13				
C	6,975	3,6	0,175	0,63	13,45	2,6	0,175	0,455
B					5,38	4,1	0,233	0,955
A								

Tabel 6-7b: Perhitungan Penyetelan Waktu Rele pada D dan C

Rele	Lokasi Gangguan							
	B				A			
	PSM	T <sub>c</sub>	TMS	T <sub>a</sub>	PSM	T <sub>c</sub>	TMS	T <sub>a</sub>
D								
C								
B	9	3,15	0,233	0,735				
A	7,5	3,45	0,358	1,235	13,08	2,65	0,358	0,95

Tingkatan dihitung untuk besaran arus gangguan maksimum yang sesuai, dimana, karena bentuk ‘terbalik’ dari kurva karakteristik Rele, yakinkan bahwa margin tingkatan akan meningkat sesuai dengan kenaikan setiap besaran arus gangguan terendah. Dimulai dari Rele pada D yang terjauh dari sumber daya, PMS Rele dihitung dari kemungkinan besarnya arus gangguan maksimum yang mungkin dirasakan oleh Rele ini dan penyetelan arus Rele adalah:

Gardu D, Ratio CT 100/5A

Arus pada Rele CDG 11 (standar IDMT), penyetelan 100% adalah = 100A

Level arus gangguan maksimum pada busbar Gardu D = 1,395A

Oleh karena itu PSM Rele:

$$PSM_D = \frac{1.395}{100} = 13,95$$

Selanjutnya dari Gambar 6-11 waktu operasi Rele standar IDMT pada 13,95 kali PSM dan TMS 1,0 adalah 2,6 s. Setelah Rele pada D tidak ada Rele lainnya, namun sedikit waktu tunda dibutuhkan untuk memberikan tingkatan yang cukup terhadap sistem proteksi disisi tegangan rendah. Lebih lanjut, lintasan penutupan kontak-kontak Rele D tidak boleh terlalu kecil untuk menghindari kemungkinan beroperasi akibat adanya guncangan mekanis.

TMS sebesar 0,05 adalah harga terendah yang dapat digunakan dan akan diambil dalam contoh ini dirasakan cukup untuk memberikan tingkatan dengan proteksi tegangan rendah. Karenanya, waktu operasi sesungguhnya dari Rele pada D diperoleh sebagai berikut:

$$0,05 \times 2,6 = 0,13s$$

Margin tingkatan sebesar 0,05 akan digunakan dalam contoh ini, sehingga Rele pada Gardu C memiliki waktu operasi bila terjadi gangguan pada Gardu D sebagai berikut:

Gardu C, Ratio CT 200/5A

Arus pada Rele CDG 11 (standar IDMT), penyetelan 100% adalah = 200A

Level arus gangguan maksimum untuk memberikan tingkatan antara Rele pada C dan D adalah = 1,395A, oleh karena itu PSM Rele:

$$PSM = \frac{1,395}{200} = 6,975$$

Selanjutnya dari Gambar 6-11, waktu operasi Rele standar IDMT pada 6,975 kali PSM dan TMS 1,0 adalah 3,6 s. Tingkatan waktu yang diperlukan:  $t_D + 0,5 = 0,13 + 0,50 = 0,63s$ . Oleh karena itu TMS Rele yang diperlukan:

$$TMS = \frac{0,63}{3,6} = 0,175 \text{ TMS}$$

Perhitungan berikutnya dilakukan untuk Rele C dengan gangguan terletak desekitar Gardu C, diperoleh harga PSM sebagai berikut:

Arus gangguan maksimum didekat busbar Gardu C adalah: 2.690A

$$PSM = \frac{2,690}{200} = 13,45$$

Selanjutnya dari Gambar 6-11, waktu operasi Rele standar IDMT pada 13,45 kali PSM adalah 2,6 s. Dimana harga ini bersama dengan TMS yang dihitung untuk Rele C sebesar 0,175, memberikan harga aktual dari waktu operasi Rele C pada saat terjadi gangguan yang dekat dengan Rele pada level gangguan maksimum, yaitu:

$$0,175 \times 2,6 = 0,455s$$

Tingkatan untuk Rele lainnya dihitung dengan cara yang sama seperti telah dikemukakan untuk kedua Rele diatas. Dalam Tabel 6-7a dan 6-7b diberikan secara lengkap harga-harga penyetelan untuk keseluruhan Rele. Dalam tabel ini beberapa

harga disetel dengan tingkat ketelitian sangat tinggi bila dibanding dengan kondisi praktis, hal ini diberikan untuk memperlihatkan contoh teoritis dari kecenderungan pelaksanaan tingkatan sesungguhnya dan tidak dibingungkan dengan metode estimasi yang dilakukan.

Dapat dicatat bahwa, meski terjadi peningkatan waktu pemutusan secara berurutan dari D ke A, waktu operasi Rele A untuk gangguan yang dekat dengan busbar lebih kecil tiga langkah dibanding dengan Rele D, peningkatan kinerja ini diperoleh sebagai akibat dari penggunaan karakteristik Rele arus/waktu terbalik.

Dari Gambar 6-11 dapat dilihat secara jelas bahwa pada level gangguan maksimum yang terjadi pada setiap busbar Gardu, margin tingkatan sebesar 0,5s dapat dipenuhi dan Rele juga dapat beroperasi secara memuaskan dalam level gangguan minimum.

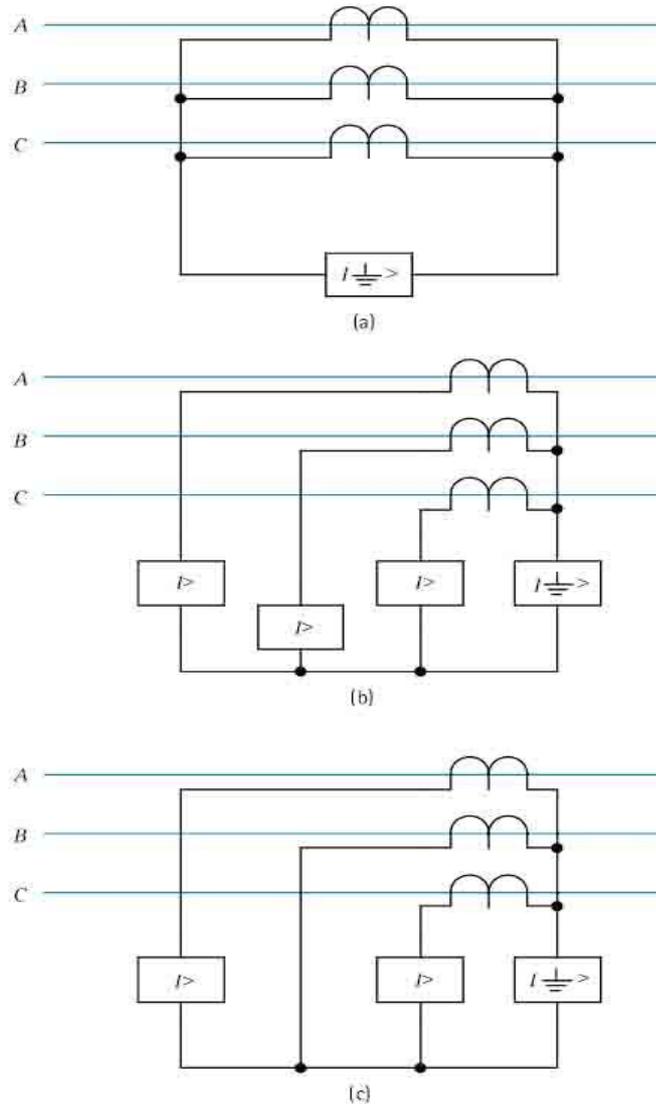
## 6. 11 PROTEKSI GANGGUAN TANAH

Dalam deskripsi terlebih dahulu, perhatian sepenuhnya hanya kepada proteksi arus lebih. Proteksi yang lebih sensitif terhadap gangguan tanah dapat dilakukan menggunakan Rele yang hanya akan merespon terhadap adanya arus residu sistem, karena komponen residual hanya muncul bilamana arus gangguan mengalir ketanah. Oleh karena itu Rele gangguan tanah tidak terpengaruh sama sekali terhadap arus beban, baik dalam kondisi seimbang maupun tidak dan dapat disetel yang hanya dibatasi oleh desain peralatan. Pernyataan ini hanya berlaku dengan syarat jika perhatian penyetelan hanya beberapa persen dari rating sistem, karena kebocoran tidak seimbang atau arus kapasitif menuju tanah mungkin menimbulkan besaran residu dalam orde ini.

Secara keseluruhan, penyetelan rendah memungkinkan bagi Rele Gangguan Tanah menjadi sangat berguna, tidak hanya terhadap gangguan tanah, tetapi lebih jauh terhadap hampir semua gangguan, tetapi mungkin dibatasi magnitudnya oleh besarnya impedansi pentanahan atau oleh tahanan pentanahan. Komponen residual diekstraksi dengan cara menghubungkan CT jaringan secara paralel seperti diperlihatkan dalam Gambar 6-12.

Hubungan sederhana seperti diperlihatkan dalam Gambar 6-12a dapat diperluas dengan cara menghubungkan elemen-elemen aruslebih pada ujung-ujung terminal masing-masing fasa, seperti diperlihatkan dalam Gambar 6-12b dan menyisipkan Rele Gangguan Tanah diantara titik bintang dari group Rele Fasa dan CT.

Rele Aruslebih kerap kali hanya dipasang pada dua dari tiga fasa yang ada, karena cara ini sudah cukup mendeteksi setiap gangguan fasa yang terjadi. Cara seperti ini tidak berpengaruh terhadap Rele Gangguan Tanah. Hubungan seperti ini diperlihatkan dalam Gambar 6-12c.



Gambar 6-12: Hubungan Residu dari CT untuk Rele Gangguan Tanah

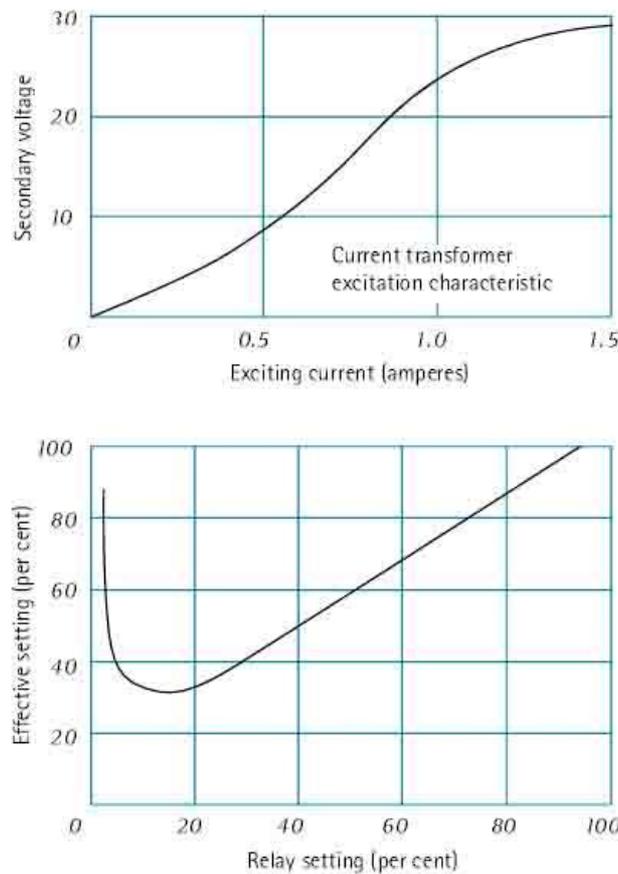
### 6. 11. 1 Penyetelan Efektif Rele-Rele Gangguan Tanah

Penyetelan primer suatu Rele Aruslebih biasanya dapat diambil sebagai penyetelan Rele dikali dengan ratio CT. CT diasumsikan mampu bekerja dengan ratio ketelitian yang terjaga dan dinyatakan dengan persen rating arus, penyetelan primer akan sama dengan penyetelan Rele. Rele Gangguan Tanah mungkin menggunakan elemen yang sama dengan yang dipergunakan dalam Rele Fasa dan akan memiliki konsumsi VA yang sama dalam penyetelan, tetapi akan memiliki burden yang lebih tinggi pada arus nominal atau rating, karena penyetelan yang rendah. Sebagai contoh, suatu Rele yang disetel pada 20% akan memiliki impedansi 25 kali lebih besar dibanding elemen yang sama yang disetel 100%. Seringkali burden ini melebihi rating burden dari CT. Hal ini tampaknya mengharuskan penggunaan CT yang lebih besar, tetapi hal ini mungkin tidak diperlukan, karena CT yang menangani burden fasa dapat mengoperasikan Rele Gangguan Tanah dan kenaikan kesalahan dapat ditolerir.

Tabel 6-8: Perhitungan Penyetelan Efektif

Penyetelan PMS		Teg. Koil pd setelan (V)	Arus eksitasi $I_e$	$3I_e$	Penyetelan Efektif	
%	Arus (A)				Arus (A)	%
5	0,25	12	0,583	1,75	2,0	40
10	0,50	6	0,405	1,215	1,715	34,3
15	0,75	4	0,30	0,90	1,65	33
20	1,0	3	0,27	0,81	1,81	36
40	2,0	1,5	0,17	0,51	2,51	50
60	3,0	1,0	0,12	0,36	3,36	67
80	4,0	0,75	0,10	0,30	4,3	86
100	5,0	0,60	0,08	0,24	5,24	105

Tidak hanya itu, arus eksitasi yang sebanding untuk mengenergise CT juga meningkat akibat burden yang besar dari Rele Gangguan Tanah, tetapi tegangan jatuh pada Rele ini mempengaruhi CT lain yang terpasang dalam group paralel, baik Rele ini membawa arus primer atau tidak. Oleh karena itu arus eksitasi total adalah hasil perkalian antara susut dalam salah satu CT dengan jumlah CT yang terpasang paralel.



Gambar 6-13: Penyetelan Efektif Rele Gangguan Tanah

Penjumlahan susut permagnetan ini dapat lebih besar bila dibandingkan dengan arus operasi Rele, dan dalam kasus yang lebih ekstrim dimana seting arus rendah atau CT yang dipergunakan memiliki kinerja yang kurang baik, mungkin menyebabkan peningkatan Output pada Rele. Arus penyetelan efektif pada hubungan sekunder adalah penjumlahan arus penyetelan Rele dan susut total arus eksitasi. Dengan kata lain, penyetelan efektif adalah jumlah vektor arus penyetelan Rele dan total arus eksitasi, tetapi untuk Rele elektromagnetik lebih kurang adalah jumlah aritmatik sudah cukup mendekati, karena kesamaan faktor kerja. Sebagai pelajaran, dalam menghitung penyetelan efektif untuk range besaran penyetelan dari sebuah Rele, proses diperlihatkan dalam Tabel 6-8 yang hasilnya disajikan dalam Gambar 6-13.

### 6. 11. 2 Contoh Rele Gangguan Tanah

Ratio CT 300/5A

Tegangan knee-point: 30 Volt

Arus eksitasi pada knee-point: 1,5A

Burden CT pada setelan: 3 VA

Dapat dilihat bahwa penyetelan optimum Rele pada contoh diatas adalah 13%, tetapi sedikit peningkatan dalam penyetelan efektif terjadi atas Rele pada penyetelan 20%. Mungkin terpikirkan bahwa batasan penyetelan Rele dapat dilaksanakan antara 10% sampai dengan 40%, penyetelan optimum dapat diketahui dengan melaksanakan pengujian sebelum pemasangan. Harus diingat bahwa, meski kemungkinan arus gangguan tanah dibatasi oleh impedansi pentanahan netral, namun Rele tetap akan merasakan arus yang cukup besar, khususnya jika CT memiliki harga emf saturasi yang tinggi. Dalam kasus ini Rele mungkin mengalami pemanasan selaman gangguan sistem. Semakin rendah penyetelan Tap, semakin tinggi tahanan belitan koil, sehingga pemanasan pada penyetelan Tap rendah cenderung tinggi. Berkenaan dengan hal tersebut, penyetelan Tap katakanlah pada 20% tidaklah sama jika diperoleh dari batasan 10% - 40% dengan pada batasan 10% - 80%. Hal ini berhubungan dengan lilitan yang digunakan, untuk batasan pertama memiliki jumlah belitan dua kali dari jumlah lilitan batasan kedua dan ukuran konduktor lebih kecil. Bila pemilihan Tap 20% dipilih dari batasan 10% - 40%, hanya setengah lilitan yang akan dipergunakan dan tahanan belitan akan lebih besar jika dibanding dengan penyetelan berdasarkan batasan 10% - 80%, dimana semua koil akan digunakan.

Batasan penyetelan tinggi cocok dipergunakan untuk aplikasi pada umumnya dan harus digunakan kecuali diketahui bahwa kondisi pelayanan memerlukan penyetelan rendah. Bilamana arus gangguan dapat dibatasi oleh tahanan pentanahan netral, penyetelan batasan rendah dapat dilakukan, meski pada umumnya tidak dilakukan. Pada daerah dimana tahanan pentanahan begitu tinggi dan sensitifitas tinggi diperlukan, penyetelan rendah harus digunakan dan digunakan CT dengan arus eksitasi rendah. Juga perlu dipertimbangkan besarnya arus gangguan tanah maksimum dan dipertimbangkan

apakah diperlukan untuk mendesain CT guna membatasi arus Output maksimum akibat kejenuhan.

### 6. 11. 3 Tingkatan Waktu pada Rele-Rele Gangguan Tanah

Tingkatan waktu pada Rele-Rele Gangguan Tanah dapat diatur dengan cara yang sama seperti halnya pada Rele-Rele Gangguan Fasa. Karakteristik arus primer/waktu tidak dapat dijaga proporsional terhadap karakteristik Rele dengan sesuatu seperti ketelitian seperti halnya pada Rele gangguan fasa. Sebagaimana diperlihatkan di awal, kesalahan ratio dari CT pada penyetelan Rele mungkin sangat besar. Pengaruh impedansi Rele yang relatif tinggi dan penjumlahan susut eksitasi Rele pada rangkaian residual memperbesar kenyataan yang ada tersebut, pada penyetelan, kerapatan fluksi pada CT berhubungan dengan belokan bawah dari karakteristik eksitasi. Impedansi penguatan pada kondisi ini relatif rendah, mengakibatkan kesalahan ratio menjadi tinggi. Pada kenyataannya CT meningkat kinerjanya dengan kenaikan arus primer, sementara impedansi Rele menurun, dengan arus Input beberapa kali lebih besar dari penyetelan primer, pengali arus seting pada Rele meningkat tinggi dibanding dengan pengali arus seting primer yang berlaku pada rangkaian primer, mengakibatkan waktu operasi Rele lebih singkat dari yang diharapkan.

Dengan jelas dapat dipahami bahwa tingkatan waktu pada Rele gangguan tanah tidaklah sederhana seperti dalam prosedur yang dilaksanakan untuk Rele Fasa sebagaimana disajikan dalam Tabel 6-7a dan 6-7b. Meski faktor-faktor diatas telah dijadikan bahan pertimbangan dan kesalahan perhitungan pada level masing-masing arus, membuat proses menjadi lebih membosankan, atau margin tingkatan yang lebih lama harus diperbolehkan.

### 6. 11. 4 Sensitivitas Proteksi Gangguan Tanah

Dalam beberapa daerah, resistivitas dari lintasan tanah mungkin sangat tinggi disebabkan kekeringan yang berlebihan dan sifat dari tanah itu sendiri. Gangguan sistem ke tanah tidak melibatkan konduktor tanah yang hanya menghasilkan aliran arus yang kecil, tidak cukup untuk mengoperasikan sistem proteksi normal. Kesulitan yang sama terjadi dalam kasus kerusakan pada konduktor jaringan yang setelah jatuh ke pagar atau kejalanan yang kering, akan tetap energise karena arus bocor yang rendah dan sangat membahayakan hidup manusia.

Untuk mengurangi bahaya ini diperlukan sistem proteksi gangguan tanah dengan suatu penyetelan yang lebih baik dari proteksi jaringan normal. Untuk mendapatkan tujuan ini, Rele tidak hanya diset pada arus rendah, tetapi juga dalam burden dasar rendah, seperti diperlihatkan dalam Gambar 6-13, penyetelan arus rendah bagi suatu Rele normal dapat berarti penyetelan efektif yang tak berguna.

Rele-Rele didesain untuk dapat memenuhi keperluan diatas. Menggunakan elemen polarisasi yang sensitif. Burden yang cukup rendah dari Rele yang selalu dapat energise oleh CT yang sama yang dipergunakan untuk rangkaian proteksi konvensional. Dapat dilihat secara jelas bahwa proteksi gangguan tanah yang memiliki penyetelan rendah tidak dapat dibuat bertingkat dengan sistem lain dan karena itu melahirkan aturan tambahan dengan menggunakan waktu tunda yang cukup lama, diatur diatas 10 atau 15s. Meskipun tingkatan dengan sistem proteksi yang lain tidak praktis, sensitifitas Rele gangguan tanah dapat diatur untuk membentuk sebuah sistem tingkatan independen meningkatkan beberapa stage pemisahan.

Arus jatuh peralihan dari residu hubungan CT dapat diharapkan melebihi penyetelan Rele selama gangguan phasa tetapi fungsi yang tidak diharapkan dicegah dengan memperpanjang waktu tunda.

Penggunaan Rele dibatasi oleh arus residual normal yang mungkin mengalir selama kondisi normal. Beberapa pengaruh residual dapat meningkat melebihi primer menimbulkan kebocoran tidak seimbang atau kapasitansi, atau dapat arus jatuh sekunder dari CT pada kondisi beban sistem normal. Besaran arus residu tunak yang terukur dilokasi dan Rele disetel pada besaran yang lebih rendah yang akan menghidarkan operasi dalam keadaan tunak dan juga guna meyakinkan bahwa akan terjadi penyetelan balik setelah operasi transien dari elemen pengukuran arus. Waktu tunda diatur melebihi waktu operasi untuk proteksi hubung singkat dan penyetelan Rele berturut-turut diatur dalam suatu urutan bertingkat.

## 6. 12 KOORDINASI DENGAN FUSE

Waktu operasi dari suatu Fuse adalah fungsi waktu arcing dan pre-arcing dari penyatuan elemen yang mengikuti Hukum  $I^2t$ . Sehingga untuk mendapatkan koordinasi antara dua Fuse yang terpasang secara seri, harus diyakinkan bahwa total  $I^2t$  yang dibutuhkan oleh Fuse yang lebih kecil tidak lebih besar dari waktu pre-arcing  $I^2t$  dari Fuse yang lebih besar. Dari pengujian yang dilakukan secara umum tingkatan antara dua Fuse dapat diperoleh dengan memuaskan bilamana ratio arus antara keduanya lebih dari dua.

Sejauh ini dalam penggunaannya tingkatan antara Rele waktu terbalik dan Fuse sering menjadi perhatian. Pendekatan bilamana dimungkinkan, untuk meyakinkan bahwa Rele menjadi cadangan Fuse dan tidak sebaliknya. Karena sangat sulit untuk menjaga pemisahan yang benar pada besaran arus gangguan tinggi karena kecepatan operasi dari Fuse. Karakteristik Rele terbaik yang lebih cocok dikoordinasikan dengan Fuse adalah Rele Aruslebih 'extremely inverse' CDG 14 yang memiliki karakteristik  $I^2t$  yang mirip. Bila dipergunakan, perlu diingat selalu bahwa untuk mencapai koordinasi yang memuaskan antara Rele dan Fuse, penyetelan arus primer dari Rele harus mendekati tiga kali rating arus Fuse dan margin tingkatan untuk keperluan koordinasi, bila

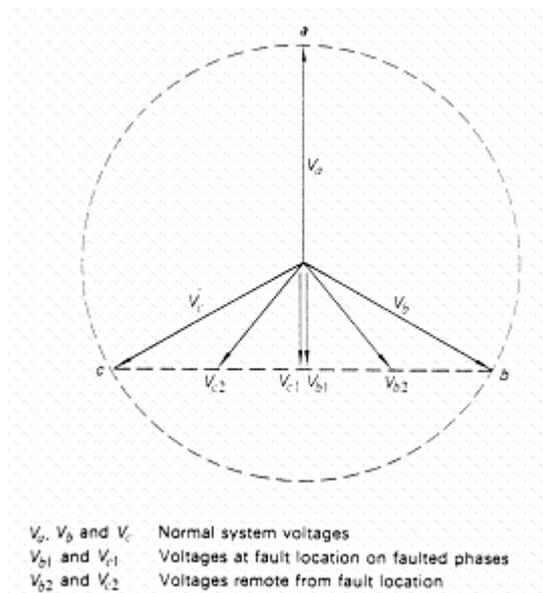
dinyatakan sebagai sebuah besaran tidak boleh kurang dari 0,4s atau bila dinyatakan dalam suatu variabel, harus memiliki harga minimum sebesar:

$$t' = 0,4t + 0,15$$

Dimana t adalah waktu operasi nominal Fuse

### 6. 13 RELE ARUS LEBIH BERARAH

Bilamana arus gangguan dapat mengalir menuju lokasi Rele dalam dua arah, untuk ini diperlukan suatu elemen yang dapat merespon keadaan ini dengan menggunakan suatu elemen pengindera arah. Elemen ini berdasarkan pada prinsip pengukuran daya dimana tegangan sistem dipergunakan sebagai acuan guna mempertahankan arah relatif atau fasa dari arus gangguan.



Gambar 6-14: Tegangan Fasa Untuk Gangguan B – C

Meski memiliki prinsip dasar peralatan pengukuran daya, elemen ini tidak didesain untuk merespon terhadap aliran daya sistem dengan alasan sebagai berikut:

- i. Sistem daya jauh dari beban, bersifat reaktif sehingga faktor daya gangguan selalu rendah. Rele merespon murni pada komponen aktif yang tidak akan menimbulkan torka tinggi dan mungkin lebih rendah dan sedikit menentukan dari seharusnya.
- ii. Tegangan sistem pada titik gangguan akan kolap. Bila gangguan adalah gangguan satu fasa, tegangan sepanjang jaringan menuju titik gangguan menurun. Jadi fasa gangguan B – C akan menyebabkan vektor tegangan fasa B dan C bergerak bersama, kedudukan dari kedua ujung menjadi titik awal line

bc untuk sistem homogen seperti diperlihatkan dalam Gambar 6-14. Pada titik gangguan, vektor akan serupa, tegangan menjadi nol pada titik gangguan, tetapi tegangan gangguan ke tanah akan menjadi separuh dari tegangan fasa-netral. Pada titik lain didalam sistem pergeseran vektor lebih kecil, tetapi pada lokasi Rele pada beberapa titik akan menerima tegangan yang tidak seimbang dalam besar dan posisi fasa.

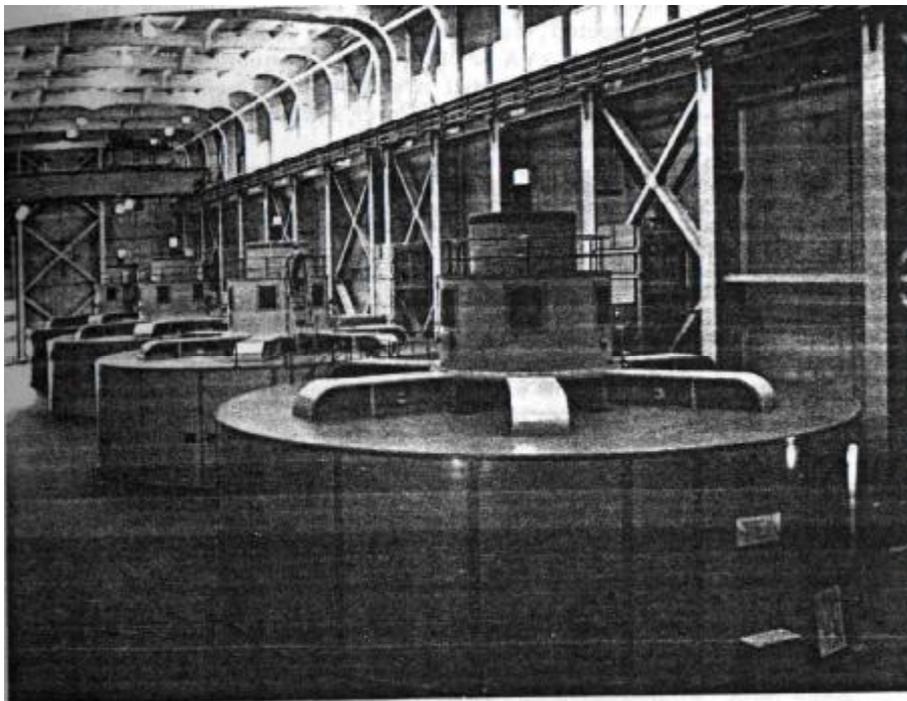
Pengaruh ketidakseimbangan arus dan tegangan yang cukup besar membuat torka yang dihasilkan oleh perbedaan elemen fasa bervariasi cukup besar dan juga berbeda dalam tanda bila besaran yang dipilih untuk diterapkan pada Rele tidak dipilih secara hati-hati. Untuk mengahiri hal ini, masing-masing fasa dari Rele dipolarisasi dengan tegangan yang tidak akan berkurang kecuali dengan cara menutup gangguan tiga fasa dan akan menjaga agar hubungannya terhadap arus tetap memuaskan untuk berbagai kondisi.

## BAB 7 PROTEKSI GENERATOR

### 7.1 PENDAHULUAN DAN POTENSI MASALAH

Generator adalah sebuah objek yang memiliki potensi bahaya yang sangat banyak, untuk itu dibutuhkan atensi dan perhatian lebih dalam hal proteksi. Potensi bahaya/masalah dalam Generator dapat dikelompokkan dalam dua kategori, yaitu: 1). Gangguan internal dalam daerah proteksi, dan 2). Kondisi sistem tidak normal dan atau operasi tidak normal. Diskusi mengenai proteksi yang dikemukakan dalam buku ini diutamakan untuk Generator yang terpisah dari penggerak mulanya. Jadi pada dasarnya proteksi Generator akan sama, baik untuk Generator dengan penggerak mula hydro, batubara, gas atau nuklir.

Ukuran Generator sangat bervariasi dan lokasi Generator pada gardu atau pusat pembangkit umumnya dekat atau pada suplai penggerak mulanya dan atau sedekat mungkin dengan pusat beban. Tipikal Generator dengan penggerak mula berupa PLTA diperlihatkan dalam Gambar 7-1. Pada umumnya, untuk tipe ini digunakan shaft vertikal, atau ada juga yang menggunakan horizontal shaft.



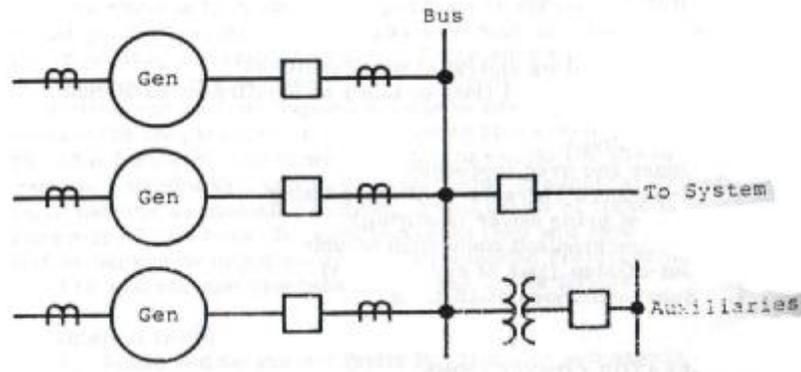
Gambar 7-1: Empat buah Generator hidro shaft – vertikal 100 MVA, 13,8 kV

Dalam buku ini dikemukakan aplikasi beberapa tipe rele proteksi yang digunakan sebagai pengaman Generator. Bagian penting dan vital dari unit-unit ini adalah sistem kendali dan regulasi. Dengan ini memiliki proteksi sendiri pembatas future-future

pengaman dan pada dekade terakhir ini juga dilengkapi dengan pemindal dan sistem dignostik online untuk kebutuhan pemindaian temperatur dari bagian-bagian Generator, mendeteksi arc dengan frekuensi radio dan metoda lainnya, selain itu sistem dilengkapi pula dengan pemindaian polutan, dan kemampuan deteksi dini pada kondisi tidak normal.

Masalah dan proteksi bahaya yang akan dikemukakan antara lain :

1. Gangguan Internal
  - a. Gangguan fasa dan atau gangguan tanah pada stator dan daerah proteksi yang berhubungan.
  - b. Gangguan tanah pada rotor (belitan medan)
2. Kondisi sistem dan atau operasi tidak normal
  - a. Kehilangan eksitasi (kehilangan medan) atau eksitasi kurang
  - b. Beban lebih
  - c. Tegangan lebih
  - d. Frekuensi kurang atau lebih
  - e. Arus tidak seimbang-fasa tunggal
  - f. Kehilangan penggerak mula
  - g. Unit hubungan ketidak serempakan
  - h. Out-of step (kehilangan sinkronisasi)
  - i. Osilasi subsinkronisasi



Gambar 7-2: Unit Generator terhubung langsung pada sebuah bus bersama

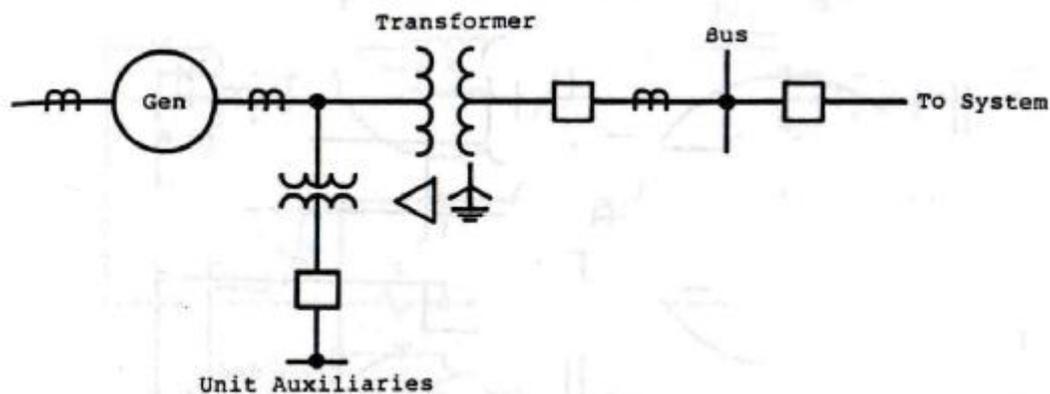
## 7. 2 HUBUNGAN-HUBUNGAN GENERATOR

Hubungan Generator umumnya adalah:

1. Terhubung langsung (satu atau beberapa) melalui Pemutus Tenaga ke Bus aatau Rel daya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7-2. Biasanya Generator terhubung

Wyei, tetapi dapat juga delta. Biasanya digunakan untuk Generator-Generator dengan kVA dan MVA kecil, khususnya pada pembangkit air dan industri yang memiliki pembangkit sendiri. Generator-Generator mungkin terhubung ke pentanahan sistem tenaga secara langsung atau melalui isolasi hubungan Delta dari Transformator.

2. Hubungan Unit, dimana Generator dihubungkan langsung ke Transformator tanpa melalui Pemutus Tenaga seperti ditunjukkan pada Gambar 7-3. Hubungan tipe ini sering digunakan untuk Generator ukuran besar. Kebanyakan Generator terhubung Wyei, sedikit sekali yang terhubung Delta. Hubungan ini dapat dilakukan untuk satu atau beberapa Generator terpisah (cross-compound) yang digerakkan oleh suatu sistem penggerak mula. Generator dapat pula dihubungkan ke sistem melalui sebuah AutoTransformator.



Gambar 7-3: Generator terhubung sebagai sebuah unit

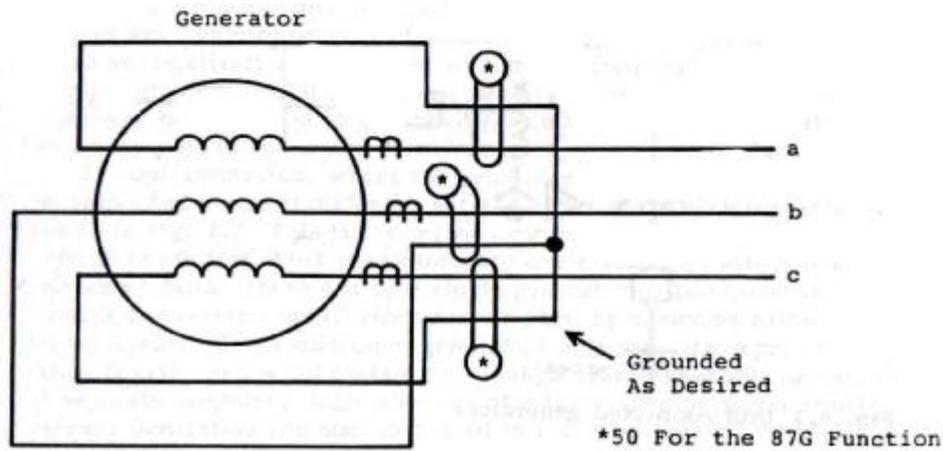
### 7.3 PROTEKSI UTAMA GANGGUAN FASA-STATOR

Gangguan fasa jarang terjadi, dan bila terjadi gangguan fasa, maka akan mengalir arus gangguan yang sangat besar. Proteksi Differensial direkomendasikan untuk digunakan bagi proteksi segala tipe Generator, kecuali bagi Generator kecil dengan ukuran dibawah 1 MVA. Proteksi Differensial sangat sensitif untuk gangguan fasa, namun tidak dapat diandalkan pada proteksi gangguan tanah, dan tergantung pada tipe pentanahan.

#### 7.3.1 Proteksi Diferensial Untuk Generator Kecil

Metoda yang tersedia untuk Generator kecil ditunjukkan dalam Gambar 7-4. Kemampuan dibatasi oleh kemampuan untuk melewati kedua konduktor pada lubang atau jendela dari CT yang dipakai. Tipikal diameter lubang CT adalah maksimum 8 inchi. Apabila penggunaan pengaman tipe ini dimungkinkan akan diperoleh sensitivitas dan kecepatan proteksi yang tinggi dan unjuk kerja CT tidak perlu matching.

karena CT hanya etrlibat per fasa. Ratio CT tipe Toroidal yang umum dipakai 50:5, yang tidak bergantung pada arus beban Generator. Tipikal sensitivitas kurang lebih 5 A arus primer dapat dicapai. Hal ini memungkinkan proteksi yang baik untuk arus gangguan fasa dan tanah sepanjang level gangguan untuk gangguan didalam daerah differensial lebih besar dari sensitivitas.



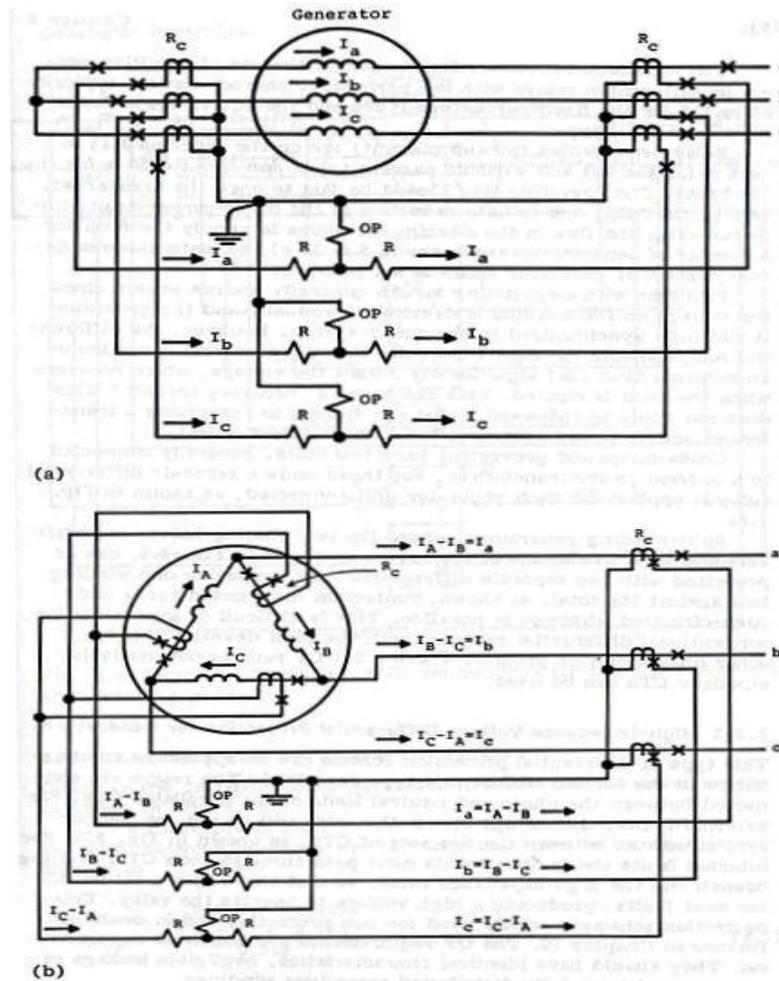
Gambar 7-4: Proteksi Differensial untuk Generator ukuran kecil menggunakan CT tipe toroida dan rele arus lebih seketika

Skema ini tidak memberikan proteksi untuk hubungan-hubungan dari CT ke pemutus Generator kecuali CT dipasang disisi rel dari pemutus dan sisi netral Generator dipindah ketitik tersebut. Cara ini kurang praktis, sehingga proteksi lain dibutuhkan guna melindungi area antara CT dan pemutus. Secara umum, skema yang ditunjukkan pada Gambar 7-4 lebih sensitif sepanjang ratio CT Generator lebih dari 150 : 5 sampai 200 : 5. Bila CT Toroidal tidak dapat digunakan, tetapi masih ingin menggunakan proteksi Diffrensial, maka digunakan skema pada Gambar 7-5.

### 7. 3. 3 Proteksi Diferensial Multi CT Sebagai Proteksi Generator

Untuk Generator-Generator ukuran menengah dan besar, guna memperoleh proteksi yang sensitif dan cepat digunakan rele differensial (87G). Skema ini menghasilkan proteksi utama untuk Generator dan sirkit koleganya. Rele dihubungkan dengan dua set CT, satu set CT digunakan untuk netral, dan satu lagi untuk fasa. Untuk Generator-Generator dengan pemutus-pemutusnya (lihat Gambar 7-2), pada CT di sisi fasa umumnya terletak sangat dekat dengan Generator, biasanya diletakkan pada terminal Generator. Tipikal koneksi untuk tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 7-5, baik untuk hubungan Wyei maupun Delta.

Apabila CT dapat dihubungkan pada masing-masing ujung belitan bagi Generator hubungan Delta seperti pada Gambar 7-5b, maka Proteksi Differensial (selanjutnya disingkat PD) dapat digunakan untuk proteksi belitan Generator. Hubungan ini akan sama seperti hubungan dalam Gambar 7-5a. Namun hubungan ini tidak dapat melindungi titik sambungan atau sirkit fasa yang berada didaerah proteksi.



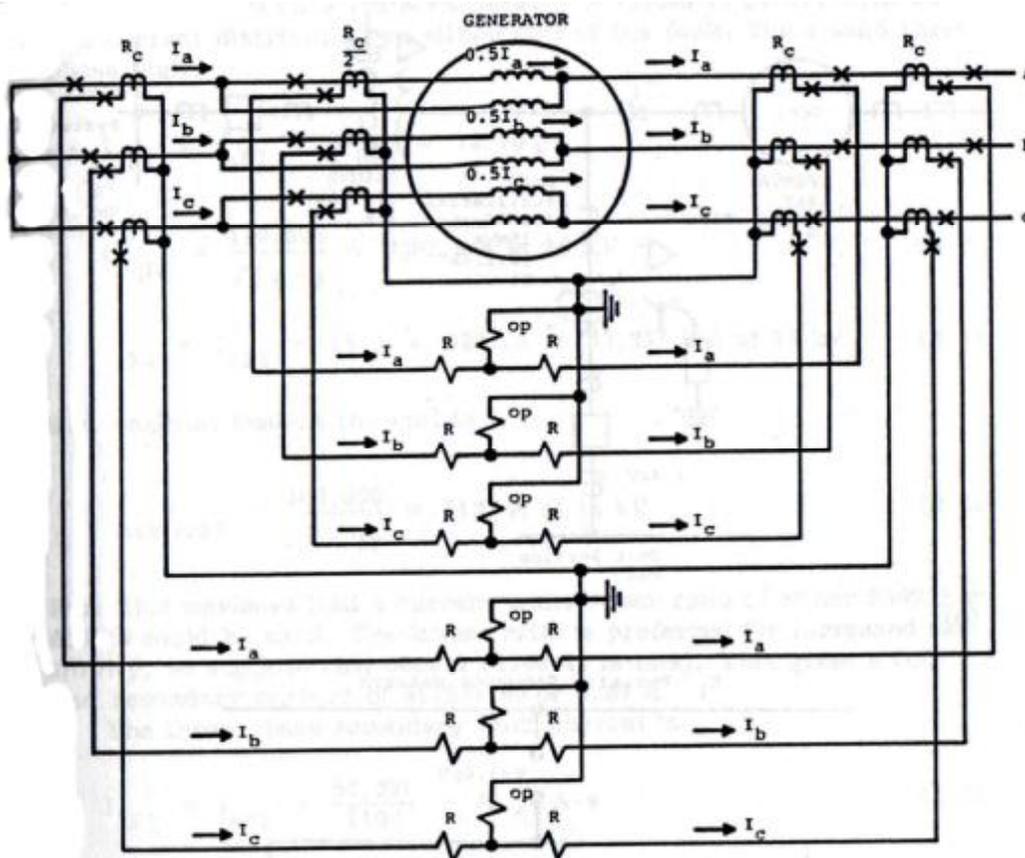
Gambar 7-5: Tipikal hubungan rele diferensial (87) untuk proteksi Generator hubungan Wyei dan Delta : (a). hub

Biasanya CT differensial memiliki ratio yang sama, dengan tipe dan pabrikasi sama guna mengurangi kesalahan akibat ketidakcocokkan pada saat terjadi gangguan eksternal. Hal ini mungkin untuk Generator dengan hubungan bagian seperti pada Gambar 7-3, tetapi sangat sukar untuk Generator dengan hubungan seperti pada Gambar 7-2, dimana CT pada sisi netral menggunakan tipe yang sama dan berhubungan dengan pemutus dengan tipe lainnya. Lebih baik tidak menghubungkan peralatan lain pada sirkuit differensial dan menjaga agar burden serendah mungkin. Umumnya, impedansi dari belitan penahan pada rele differensial rendah, impedansi total dari seluruh sirkuit yang terhubung menjadi rendah dan akan menaikkan margin unjuk kerja CT.

Rele differensial dengan karakteristik persentase rendah direkomendasikan untuk dipakai agar mendapatkan sensitivitas proteksi Generator, digunakan tipe persentase tetap tipe 10 sampai 25 % atau ekuivalennya, dan tipe lebih rendah untuk rele tipe variable persentase.

Sensitivitas rele atau arus angkat rele dalam orde 0,14 sampai 0,18, untuk tipe 10% dan tipe variable dan 0,5 A untuk rele tipe 25 %. Waktu operasi harus cepat untuk membuka Pemutus, memutus medan, dan mengionisasi pengurangan masukkan penggerak mula. Sayangnya, fluksi sisa pada mesin berlanjut terus mensuplai gangguan untuk beberapa detik (dalam orde 8 sampai 16 detik), jadi tidak mungkin memutus seketika sebuah gangguan Generator.

Masalah adanya aliran masuk magnetisasi, pada umumnya tidak mengakibatkan kerusakan, karena tegangan pada mesin meningkat secara gradual dan Generator terhubung serempak dengan sistem tenaga. Namun demikian, rele differensial harus memilih imunitas yang baik untuk menghindari operasi tidak benar pada gangguan eksternal yang mengakibatkan penerunan tegangan, yang akan kembali normal setelah gangguan dibebaskan. Hal ini akan menyebabkan suatu “aliran masuk kembali”. Hal ini tidak terjadi pada unit-unit yang dimaksudkan untuk mengenergize Transformator dan atau sistem tenaga pada tegangan penuh (black start).



Gambar 7-6: Tipikal hubungan rele Diferensial (87G) untuk proteksi Generator belitan terpisah

Generator-Generator cross-compound terdiri dari 2 unit, umumnya terhubung pada Transformator Daya. Untuk sistem seperti ini dibutuhkan rele differensial terpisah untuk masing-masing Generator, seperti ditunjukkan pada Gambar 7-5a.

Generator dengan belitan terpisah, dimana setengah belitan seperti ditunjukkan Gambar 7-6, dapat diproteksi dengan rele differensial terpisah. Dengan membandingkan setengah belitan terhadap total seperti pada gambar, proteksi untuk belitan pendek dan belitan terbuka dimungkinkan. Hal ini sulit dilakukan dan hampir tidak mungkin dilakukan untuk rele differensial konvensional sampai gangguan yang terjadi berkembang ke fasa lain dan atau tanah. Bilamana CT dengan ratio 2:1 tidak ada maka dapat dipakai CT bantu sehingga didapat ratio yang diinginkan.

### 7. .3.3 Proteksi Diferensial Tegangan Tinggi Untuk Proteksi Generator

Skema proteksi differensial tipe ini dapat pula digunakan sebagai alternatif dari tipe differensial arus yang telah dijelaskan lebih dahulu. Rele dihubungkan antara fasa dan netral meleui paralel CT. Untuk gangguan eksternal, tegangan yang melalui CT akan rendah, karena sirkulasi arus antara kedua set CT, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7-5. Untuk gangguan internal, arus gangguan akan melalui masing-masing CT mengeksitasi cabang dan ele impedansi tinggi sehingga CT saturasi untuk semua gangguan, menghasilkan tegangan yang cukup tinggi untuk dapat mengoperasikan rele. Skema proteksi cara ini kebanyakan digunakan untuk proteksi busbar. CT yang dibutuhkan harus dipilih lebih teliti. CT harus mempunyai karakteristik yang identik. Dan memiliki belitan sekunder terdistribusi penuh.

### 7. .3.4 Contoh Diferensial Arus Generator

Tinjau sebuah unit Generator yang terhubung pada sistem tenga 345 kV, seperti pada Gambar 7-7. Untuk gangguan 3 fasa yang terjadi pada bus 18 kV pada titik F<sub>1</sub>, jaringan urutan positif diperlihatkan dalam gambar dan reaktansi total dari titik gangguan dapat dihitung sebagai berikut :

$$X_{1F1} = \frac{0,131 \times 0,124}{0,255} = 0,064 \text{ pu}$$

Harga ini dihitung pada MVA dasar 100 MVA. Harga yang ditulis dalam tanda kurung memperlihatkan distribusi arus pada masing-masing bagian, untuk gangguan tiga fasa solid :

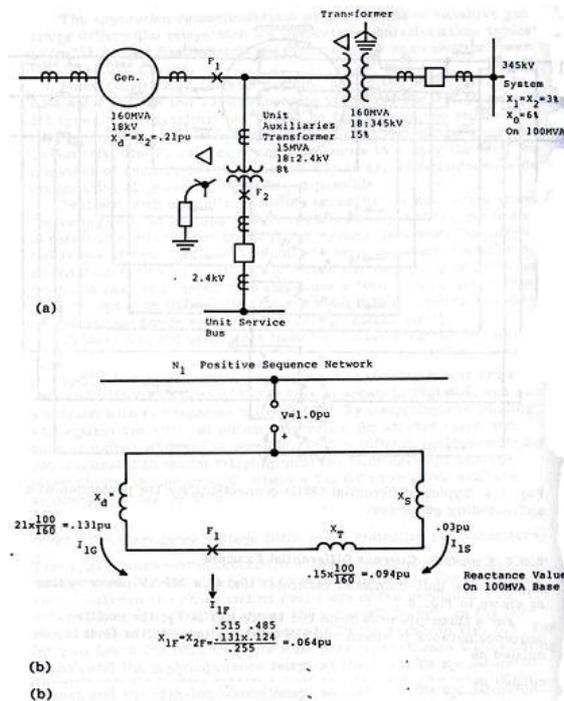
$$I_{1F1} = I_{aF1} = \frac{1}{0,064} = 15,76 \text{ pu}$$

$$I_{1\text{pu}} = \frac{100.000}{\sqrt{3} \times 18} = 3207,5 \text{ A pada } 18 \text{ kV}$$

$$I_{1F1} = I_{aF1} = 15,76 \times 3207,5 = 50.357,3 \text{ A pada tegangan } 18 \text{ kV}$$

Beban maksimum pada unit tersebut adalah:

$$I_{\text{maks. beban}} = \frac{160.000}{\sqrt{3} \times 18} = 5132 \text{ A pada tegangan 18 kV}$$



Gambar 7-7: Tipikal contoh dari sebuah Generator unit

Dengan arus maksimum beban sebesar ini dapat dipilih CT dengan ratio 5500:5 atau 8000:5. Ratio lebih rendah diperlukan untuk meningkatkan sensitivitas, jadi dapat dipakai CT tersebut, arus sekunder beban penuh menjadi 5132/110 atau 4,67 A Arus gangguan tiga fasa disisi sekunder menjadi :

$$I_{IF1} = I_{aF1} = \frac{50.357,3}{1100} = 45,78 \text{ A - s}$$

Apabila gangguan  $F_1$  berada dalam zona operasi rele differensial 87G (lihat Gambar 7-7), maka arus sebesar 45,78 A ini akan mengalir menuju koil operasi.

Untuk gangguan eksternal  $F_1$  seperti terlihat, arus yang mengalir melalui belitan penahan rele differensial hanya arus gangguan yang merupakan arus gangguan yang datang dari Generator, yakni:

$$I_{IFi-gen} = \frac{50.357,3 \times 0,485}{1100} = 22,2 \text{ A - s}$$

Ini menunjukkan gangguan internal dan arus gangguan total bila gangguan tiga fasa terjadi sebelum Generator diparalel ke sistem 345 kV. Untuk keadaan ini, arus gangguan dapat dihitung dengan cara lain, yaitu:

$$I_{IF1-Gen} = \frac{1.0}{0,131} = 7,62 \text{ pu}$$

$$I_{IF1-Gen} = 7,62 \times 3207,5 = 24.438,11 \text{ A pada tegangan 18 kV}$$

$$= \frac{24.438,1}{1100} = 22,2 \text{ A - s}$$

Teknik dan prosedur yang sama dapat dilakukan bagi Generator yang dihubungkan secara langsung seperti Gambar 7-2, untuk proteksi Diferensial seperti diperlihatkan Gambar 7-9.

#### 7. 4 PROTEKSI UTAMA GANGGUAN FASA UNIT TRANSFORMATOR

Kembali, proteksi Diferensial direkomendasikan dan diperlihatkan sebagai rele 87TG pada Gambar 7-8. Karena tidak ada pemutus antara Generator dan Transformator, rele differensial dihubungkan dengan cara memasukkan Generator sebagai bagian yang harus diamankan. Karena kedua unit harus diputus pada saat terjadi gangguan baik disisi Generator maupun Transformator. Hal ini menjadikan sebuah proteksi tambahan bagi Generator. Untuk Generator, gangguan fasa akan mengoperasikan 87G dan 87TG secara paralel. Pada unit Generator yang lebih besar tambahan rele differensial 87T kadangkala diperlukan untuk pengaman Transformator. Jadi dua sistem proteksi utama diberikan baik untuk Generator maupun untuk Transformator.

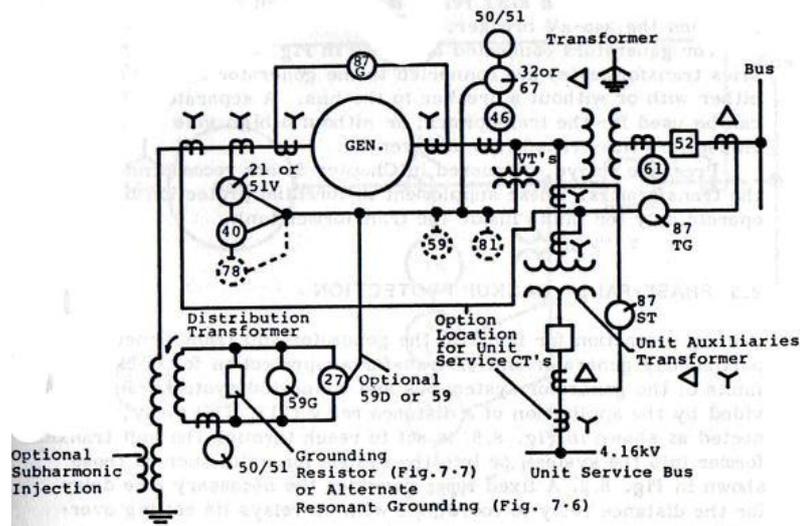
Pada Gambar 7-8, sisi tegangan tinggi dari CT pada unit Transformator bantu tercakup pada differensial 87TG, jadi pada unit ini dan bus 4,16 kV dirasakan sebagai gangguan eksternal. Alternatif lain, bagian tegangan rendah dari CT Transformator bantu digunakan, sehingga Transformator ini menjadi bagian dari daerah proteksi rele 87TG. Alternatif yang sama juga dipakai bila terdapat proteksi differensial tambahan 87T.

Penting diingat bahwa memasukkan unit Transformator bantu baik untuk rele 87TG maupun 87T dalam daerah perlingkungannya umumnya tidak memperbaiki atau menambah proteksi Transformator. Hal ini dapat dilihat dengan cara berikut. Misal terjadi gangguan tiga fasa solid pada sisi tegangan rendah 4,16 kV baik Transformator atau pada titik F<sub>2</sub> dalam Gambar 7-7. Untuk gangguan pada titik ini, reaktansi urutan positif sistem ditambah Transformator adalah:

$$X_{IF2} = 0,064 + 0,08 \times \frac{100}{15} = 0,064 + 0,533 = 0,597 \text{ pu}$$

$$I_{IF2} = I_{aF2} = \frac{1.0}{0,597} = 1,675 \text{ pu}$$

$$= 1,675 \times 3207,5 = 5372,7 \text{ A pada tegangan 18 kV}$$



Gambar 7-8: Tipikal proteksi major untuk Generator Unit dan Generator besar pada sistem utilitas

Bila digunakan ratio CT yang sama, dengan perbandingan 1100:1 .Maka arus gangguan pada sisi sekunder menjadi  $5372,7/1100 = 4,88$  A sekunder. Rele differensial Transformator tidak sesensitif pada Generator, karena pada Transformator digunakan tipe dan ratio CT yang berbeda, pengaruh operasi aliran masuk magnetisasi, dan seterusnya. Untuk kebanyakan rele, arus sebesar 4,88 A mungkin berada diatas arus angkat minimum, tetapi rendahnya harga gangguan memberikan sensitivitas marginal dan harga angkat multiples yang sangat rendah.

Ilustrasi diatas memperlihatkan perlunya dilakukan pemisahan rele differensial bagi unit Transformator bantu, yang ditunjukkan sebagai rele 87ST pada Gambar 7-8. Untuk aplikasi seperti ini arus maksimum Transformator menjadi:

$$I_{STmax \text{ beban}} = \frac{15.000}{\sqrt{3} \times 18} = 481,13 \text{ A pada tegangan } 18 \text{ kV}$$

Jadi CT dengan ratio 500 : 5 harus digunakan untuk 87ST, bukan CT dengan 1100 : 1 yang dipakai pada 87TG. Dengan ratio 500: 5 (100:1) gangguan F2 menghasilkan arus operasi sebesar  $5372,7/100 = 53,73$  A yang menghasilkan sensitivitas dan kecepatan operasi yang baik bagi pengaman Transformator. Rele 87ST juga harus mampu men 'shut-down' Generator serta melepas pemutus 345 KV.

Untuk Generator yang dihubungkan seperti pada Gambar 7-2, unit Transfor-mator bantu dihubungkan pada bus Generator , dalam banyak kasus, menggunakan atau tanpa menggunakan pemutus ke Bus. Rele differensial terpisah dapat digunakan untuk pengaman Transformator, atau bila tanpa pemutus disisi tegangan tinggi, proteksinya termasuk pada proteksi differensial Transformator dan Bus.

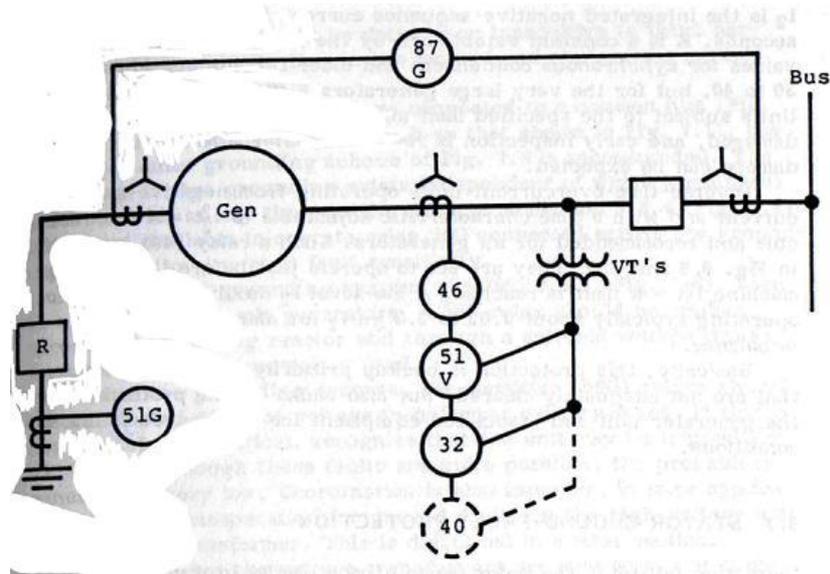
## 7. 5 PROTEKSI CADANGAN GANGGUAN FASA

Proteksi cadangan untuk gangguan yang terjadi pada Generator dan Transformator, dan terutama setelah proteksi Generator dan atau Transformator pada saat gangguan tidak dibebaskan pada sistem Bus Generator dan sistem terhubung, dapat menggunakan rele jarak (21). Rele ini dapat dihubungkan seperti dalam Gambar 7-8, rele diatur untuk melindungi Transformator sampai ke sistem, atau sampai kesistem untuk unit seperti diperlihatkan pada Gambar 7-2. Pewaktu tetap memberikan waktu tunda yang dibutuhkan oleh rele jarak untuk berkoordinasi dengan seluruh rele lainnya yang diatur melebihi jangkauannya.

Seperti diperlihatkan pada Gambar 7-8 penggunaan CT pada ujung netral dari Generator memberikan proteksi cadangan bagi Generator. Hal ini bila tersedia, tetapi bila CT tidak tersedia atau tidak memungkinkan, rele 21 dapat dihubungkan ke CT yang terhubung kesisi tegangan tinggi dari Generator. Dengan tegangan yang diperoleh dari VT yang terhubung pada Bus Generator sebagaimana ditunjukkan. Penyetelan rele dilakukan dari titik ini terbebas dari lokasi CT, jadi hanya impedansi dari unit Transformator dalam Gambar 7-8 ditambah impedansi sistem bila dibutuhkan.

Untuk proteksi unit Generator saja, rele jarak (21) dapat dihubungkan ke CT dan VT pada Bus sitem Generator dan diatur hanya untuk mendeteksi Generator. Hal ini hanya memberikan proteksi pada Generator atau unit Generator –Transformator, dan tidak ada cadangan untuk gangguan sistem yang tidak dibebaskan, tidak diperlukan waktu tunda untuk aplikasi dengan cara ini, sehingga didapat proteksi yang lebih cepat. Kedua cara penggunaan diatas dipakai pada Generator besar dan sangat penting.

Alternatif yang lebih mahal dan umum digunakan pada Generator ukuran medium dan kecil adalah pengendali tegangan atau rele arus lebih –waktu-terbalik penahan tegangan, 51 V. Rele ini dapat dihubungkan pada CT yang terhubung ke Netral seperti dalam Gambar 7-8 atau Generator seperti pada Gambar 7-9. Fungsi dari tegangan adalah untuk menjaga atau cakupan operasi arus lebih sampai tegangan Generator menurun akibat gangguan. Operasi normal adalah disekitar lutut kurva saturasi besi Generator. Jadi reaktansi sinkron menentukan beban.  $X_{d(sat)}$  menjadi lebih rendah dari gangguan yang bertahan, yaitu  $X_{d(non sat)}$ , dengan demikian arus gangguan tiga fasa bertahan lebih rendah dari arus beban maksimum. Hal ini terjadi bila regulator tidak menaikkan tegangan saat tegangan menurun akibat gangguan bertahan. Satu tipe penahan unit arus lebih tidak bekerja sampai tegangan turun mencapai harga tertentu, umumnya berkisar 80 % dari tegangan normal. Tipe lain yaitu dengan cara merubah karakteristik waktu arus lebih dengan tegangan. Rele tidak akan merespon pada saat beban maksimum bila tegangan normal, tetapi akan beroperasi pada arus rendah bila mana gangguan mengakibatkan tegangan turun. Pada umumnya, rele jenis ini (51V) digunakan pada salah satu dari ketiga fasa untuk cadangan gangguan tiga fasa dengan rele urutan negatif (46) untuk gangguan tidak simetri.



Gambar 7-9: Tipikal proteksi untuk Generator yang terhubung dengan bus

## 7.6 PROTEKSI CADANGAN ARUS URUTAN NEGATIF

Arus urutan negatif dalam sebuah Generator melintasi celah udara dan muncul pada rotor atau medan sebagai arus dengan frekuensi ganda. Arus ini cenderung mengalir dipermukaan struktur rotor, jepitan non magnetik, dan areal lain yang memiliki impedansi rendah. Mengakibatkan panas lebih dan pada akhirnya melelehkan jepitan sehingga masuk ke celah udara, mengakibatkan kerusakan.

Standar ANSI mensyaratkan batasan yang diekspresikan sebagai  $I_2^2 t = K$ , dimana  $I_2$  adalah integrasi arus urutan negatif yang mengalir dalam waktu  $t$  detik.  $K$  adalah suatu konstanta yang besarnya tergantung pada desain mesin yang bersangkutan. Tipikal harga  $K$  untuk kondensor sinkron dan turbin Generator tua berkisar antara 40 sampai 50, tetapi untuk Generator besar harga  $K$  berkisar 5 sampai 10. Generator harus beroperasi berdasarkan batasan spesifik dan bila batasan melebihi 200% akan mengakibatkan kerusakan, dan inspeksi menyeluruh direkomendasikan. Bila diatas 200% kemungkinan kerusakan dapat diharapkan.

Rele arus lebih-waktu –terbalik beroperasi berdasarkan arus urutan negatif dan bila dimungkinkan dengan satu pengaturan karakteristik waktu terhadap  $I_2^2 t = K$ , hal ini direkomendasikan untuk semua Generator. Seperti rele (46) yang ditunjukkan pada Gambar 7-8 dan Gambar 7-9. Rele – rele tersebut diatur untuk beroperasi sebelum batas harga  $K$  mesin tersebut dicapai. Selain itu terdapat pula tambahan untuk level  $I_2$  rendah, yang beroperasi tipikali sekitar 0,03 sampai 0,2 Pu  $I_2$  guna mengaktifkan alarm ketidakseimbangan berlanjut.

Pada dasarnya , proteksi ini merupakan cadangan utama untuk gangguan sistem yang tidak dibebaskan , tetapi juga cadangan proteksi untuk unit Generator dan peralatan pendukungnya terhadap gangguan tidak simetri dan kondisi.

## 7. 7 PROTEKSI GANGGUAN TANAH STATOR

Kegagalan isolasi merupakan kasus utama kegagalan Generator. Gangguan dapat saja diawali dengan gangguan antar belitan dan berkembang menjadi gangguan tanah atau dimulai dengan gangguan tanah, jadi proteksi gangguan tanah sangat penting, meski sayangnya gangguan ini sangat jarang terjadi.

Beberapa pembatas gangguan digunakan kecuali untuk Generator ukuran kecil, tegangan rendah. Hal ini dapat membatasi gangguan. Secara umum reaktansi urutan nol Generator lebih rendah dari reaktansi urutan + dan - , karenanya arus gangguan tanah akan lebih besar dari gangguan tiga fasa bila Generator tidak diketanahkan melalui impedansi.

### 7. 7. 1 Proteksi Gangguan Dengan Pentanahan Impedansi Tinggi

Pentanahan Impedansi Tinggi merupakan standar bagi Generator kecil dan digunakan pada sistem industri. Pada bab ini diskusi akan dipusatkan pada pentanahan tahanan tinggi dimana arus gangguan dibatasi sekitar 1 sampai 10 A primer , Harga ini merupakan harga batas terbakarnya besi pada Generator untuk menghindari biaya perbaikan.

Skema sistem pentanahan yang digunakan diperlihatkan pada Gambar 7-8. Sebuah rele tegangan lebih-waktu- terbalik, 59G dihubungkan melalui tahanan guna merespon tegangan  $3V_0$  yang merupakan akibat adanya gangguan pada Generator dan sistem sampai kebelitan Delta dari Transformator. Sebagai contoh lihat kasus 75.3. Dari contoh kasus didapat tegangan sebesar 138 V bila terjadi gangguan fasa tanah Solid, sehingga rele 59G dapat beroperasi . Hal ini sangat tipikal, harga angkat rele 59G berkisar 5 sampai 16 V agar didapat sensitivitas yang tinggi . Rele harus ditala atau tidak sensitif terhadap harmonisa ketiga, yang mengalir ke netral dan sistem bersamaan dengan urutan nol.

Bilamana beberapa Generator dihubungkan pada sebuah Bus bersama, atau seperti pada suatu sistem industri, maka direkomendasikan untuk menggunakan skema pentanahan –tahanan-tinggi (lihat 7.8) keuntungan cara ini pentanahan tersedia secara bebas tidak masalah mesin mana yang sedang operasi , lihat kembali contoh pada kasus **75.4 (Gambar 7-11)**, tegangan 208 V cukup untuk dapat mengaktifkan rele 59G yang dihubungkan melalui tahanan pentanahan guna mendapatkan sensitivitas gangguan yang baik.

Bagi sistem pentanahan Resonan, yang hanya dipakai pada beberapa kasus unit Generator, Rele 59G harus dipasang melalui reaktor pentanahan dan melalui VT yang sesuai bila digunakan suatu reaktor primer.

Dengan cara pentanahan seperti ini, sensitivitas rele 59G harus dikoordinasikan dengan VT fuse utama . Bila hal ini tidak tersedia atau tidak praktis, maka unit dapat saja trip akibat gangguan pada VT. Meskipun gangguan tersebut mungkin saja terjadi, namun probabilitasnya sangat kecil. Koordinasi merupakan hal penting dalam beberapa aplikasi guna menghindari kesalahan operasi akibat gangguan tanah pada sisi tegangan tinggi dari Transformator tenaga. Hal ini akan didiskusikan berikut.

Dalam banyak kasus hubungan VT adalah Wye –wye, namun VT hubungan delta terbuka dapat pula dipakai untuk tegangan 3 fasa. Bila digunakan VT hubungan Wye-wye, sisi primer harus ditanahkan, kecuali bila sekunder diperlukan untuk penunjuk urutan nol, sisi sekunder VT tidak ditanahkan dan diisolasi. Pentanahan salah satu cara memberikan sebuah pengamanan. Sebaliknya, rele 59G mungkin beroperasi akibat gangguan tanah sirkit sekunder VT, dan 59G harus dikoordinasikan dengan sekunder fuse VT.

Rele arus lebih –waktu – terbalik (50/51) pada sirkit sekunder (Gambar 7.8) merupakan alternatif dan atau proteksi gangguan tanah cadangan . Ratio CT sekunder dipilih agar dapat memberikan arus rele yang sama seperti yang mengalir pada Netral Generator untuk suatu gangguan tanah . Jadi dengan menggunakan contoh 7-9, CT dengan ratio 400:5 (80:1) akan memberikan :

$$I_{50/51} = \frac{464,38}{80} = 5,80 \text{ A}$$

Dimana arus gangguan primer pada netral adalah 6,19 A, yang direpleksikan melalui Trafo distribusi arus sebesar 464.38 A

Rele ini harus diset diatas arus ketidakseimbangan maksimum yang mengalir pada sirkit netral pada saat normal Tipikal arus biasanya lebih kecil dari 1 A pada Netral Generator , Setting rele 51 harus 1,5 sampai 2 kali arus ini. Rele 50 menyediakan proteksi seketika dan harus diatur diatas arus ketidakseimbangan normal netral sebagaimana arus maksimum diatas yang merupakan hasil dari sistem gangguan tanah primer, kadangkala lebih besar. Pada bagian 7.7.2 diberikan diskusi lebih lanjut mengenai tipe gangguan. Tipikal setting rele 51 harus 2 sampai 3 kali maksimum. Dalam beberapa aplikasi digunakan dua rele 51, satu untuk menyediakan cadangan pemutusan unit, lainnya untuk menginisiasi pemutus kegagalan rele (bila digunakan) berhubungan dengan pemutus utama, seperti dapat dilihat pada Gambar 7-8, atau pemutus – pemutus bila primer dihubungkan ke Ring atau pemutus dan pengaturan setengah.

Rele 59G pada sistem pentanahan impedansi tinggi menyediakan proteksi gangguan tanah untuk sekitar 90 – 95 % belitan stator .

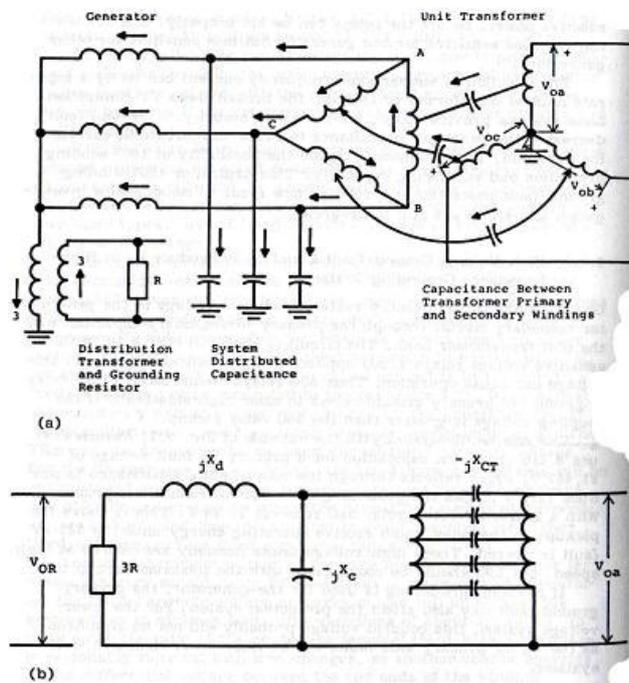
Tambahan proteksi diperlukan untuk gangguan tanah yang mungkin terjadi dibagian ujung Netral bagian stator. Beberapa metoda dapat digunakan dengan dua tipe dasar, yaitu : 1) menggunakan tegangan harmonisa ketiga atau 2) infeksi tegangan subharmonik. Ketidakseimbangan pada kondisi normal pada Netral Generator mungkin mengandung beberapa tingkat harmonisa, dan harmonisa ketiga yang paling dominan. Harmonik – harmonik ini berlalu sama seperti urutan nol, dan dapat mengalir melalui tahanan pentanahan atau VT hubungan delta terbuka yang dipakai untuk mendapatkan  $3V_0$ . Salah satu skema proteksi menghubungkan rele tegangan kurang (27) tanggap terhadap harmonisa ketiga yang diparalel dengan rele 59G seperti diperlihatkan dalam Gambar 7-8. Kontak normal tertutup rele 27 terpasang seri dengan rele pengindera tegangan dihubungkan dengan VT Generator . Apabila tegangan normal atau mendekati normal dihasilkan Generator., kontak-kontak rele 27 terbuka oleh tegangan normal harmonisa ketiga, dan kontak –kontak supervisi rele tertutup. Bilamana terjadi gangguan tanah didekat Netral Generator, gangguan ini mereduksi tegangan harmonisa ketiga, sehingga rele 27 reset menunjukkan adanya gangguan .

Skema lain menerapkan sebuah rele tegangan lebih 27 yang tanggap terhadap harmonisa ketiga yang melewati VT Generator hubungan delta terbuka, rele harus diatur diatas maksimum tegangan normal harmonisa ketiga. Untuk gangguan - gangguan tanah –Netral, tegangan harmonisa ketiga akan terdistribusi ulang dan meningkat pada terminal Generator. Skema ini memberikan proteksi terbatas dimana tegangan harmonisa ketiga beban penuh normal tinggi, dan koordinasi waktu guna menghindari operasi akibat tegangan harmonisa ketiga yang tinggi pada saat terjadi gangguan – gangguan eksternal.

Tegangan harmonisa ketiga pada terminal dan netral Generator dapat bervariasi pada beban maksimum dan minimum. Umumnya , tegangan harmonisa ketiga pada beban penuh paling tidak 50% lebih besar pada saat beban rendah, dengan variasi antara 2 :1 sampai 5 :1 . Dalam banyak kasus, perbandingan antara tegangan harmonisa ketiga pada terminal dan Netral adalah konstan terhadap perubahan beban, jadi terdapat skema lain operasi pada tegangan differensial antara kedua belitan. Gangguan tanah yang terjadi di dekat terminal dan netral merusak keseimbangan, dengan menurunnya tegangan harmonisa ketiga pada ujung gangguan. Hal ini menyebabkan beroperasinya rele tegangan lebih 59D (Gambar 7-8).

Skema-skema diatas membutuhkan data spesifik mengenai tegangan harmonisa ketiga sepanjang jangkauan operasi Generator, baik besaran daya aktif maupun reaktif, sebelum rele dapat diset dengan baik. Sebuah skema mungkin akan sensitif buat Generator, namun kurang sensitif untuk Generator lain. Injeksi arus frekuensi subharmonik dapat dengan cara netral Transformator terpisah atau melalui hubungan delta terbuka dari VT. Beberapa sistem menyediakan pengkodean guna meningkatkan pengamanan gangguan tanah menurunkan kapasitansi Generator mengakibatkan

kenaikan pada arus untuk dideteksi. Skema ini memberikan kemungkinan proteksi belitan 100 % dan kemampuan pemindaian. Proteksi netral atau proteksi belitan 100 % terhadap gangguan tanah merupakan hal baru, beberapa kajian masih terus dilakukan.

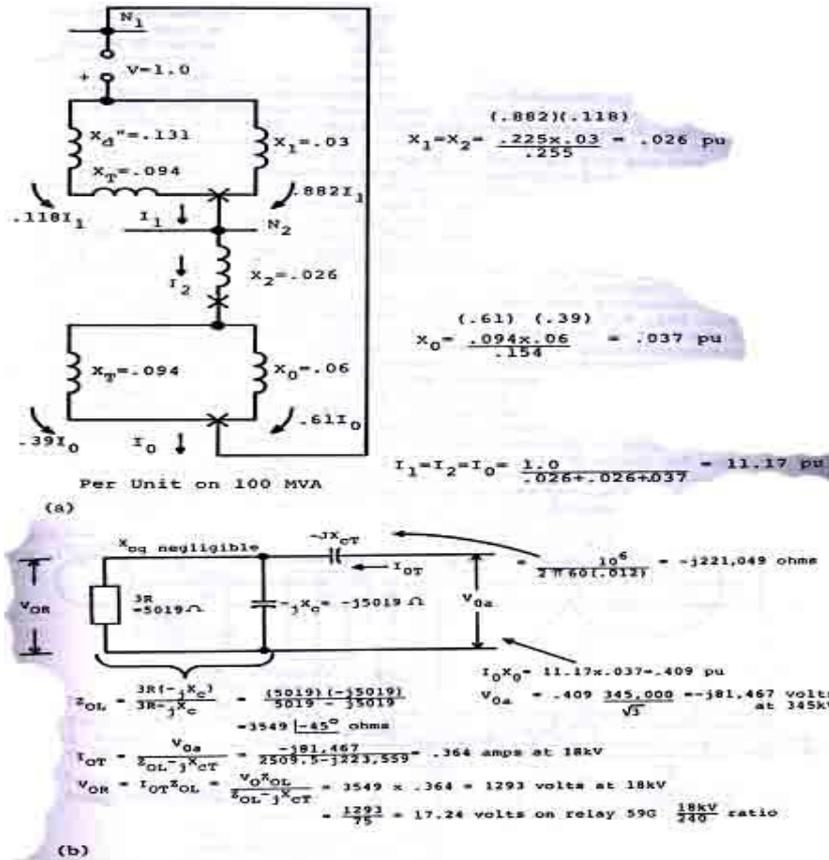


Gambar 7-10: Kopling kapasitor yang melalui bank Transformator untuk gangguan tanah sisi primer : (a). diagram sistem 3 fasa; (b). sirkit ekivalen

### 7.7.2 Kopling Gangguan Tanah Tegangan Tinggi Guna Meperoleh $V_0$ Pada Sistem Pentanahan Impedansi Tinggi

Gangguan tanah pada sistem primer menghasilkan suatu tegangan pada sirkit sekunder Generator melalui primer ke kapasitansi sekunder dari unit bank Transformator. Sirkit diperlihatkan dalam Gambar 7-10. Dengan menggunakan rele tegangan (796) yang sensitif pada sistem pentanahan resistensi tinggi, tegangan ini dapat mengakibatkan operasi. Jadi rele 59G harus memiliki waktu tunda agar rele gangguan tanah utama dapat membebaskan gangguan disisi tegangan tinggi bilamana kopling tegangan lebih tinggi dari harga angkat rele 59G.

Hal ini apat diilustrasikan dengan contoh Gambar 7-7. Bila diasumsikan kapasitansi Transformator antara belitan primer dan sekunder,  $X_{CT}$  adalah  $0,012 \mu F/\text{fasa}$ . Dengan menggunakan harga  $3R = 5019 \text{ ohm}$  dari Gambar 7-9, tegangan melalui tahanan pentanahan dapat dihitung seperti dalam **Gambar 8-11**. Perhitungan arus-arus gangguan tanah ke fasa 9 pada sisi primer bus 345 kV diperlihatkan pada Gambar 7-11a. Gambar 7-11b memperlihatkan perhitungan untuk tegangan gangguan primer  $V_0$  sebesar 81,467 V, yang direpleksikam melalui kapasitansi antar belitan yang menghasilkan tegangan sebesar 1293 V sepanjang pentanahan sisi primer Transformator distribusi.



Gambar 7-11: Contoh gangguan line-netral yang menimbulkan tegangan diantara sistem pentanahan impedansi tinggi. : (a). Jaringan urutan; (b). Jaringan pentanahan dan perhitungan tegangan

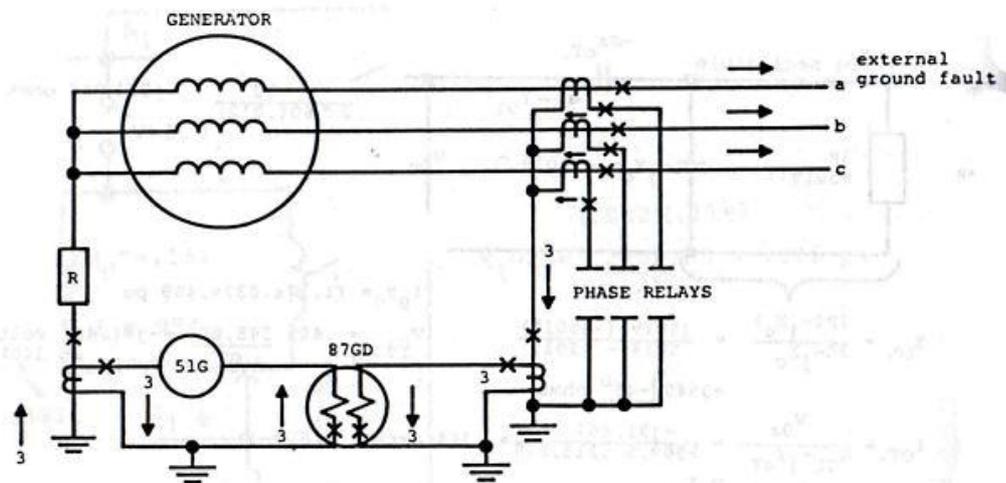
Dengan suatu ratio 18:240 kV, rele 59G akan merasakan tegangan sebesar 17,24 V. Harga ini diatas harga angkat rele, sehingga rele akan menerima energi operasi sampai gangguan pada bus 345 kV dibebaskan. Gangguan tegangan tinggi, dibebaskan dengan kecepatan tinggi, tetapi rele 59G harus dikoordinasikan dengan waktu cadangan maksimum. Bila Generator menggunakan pentanahan Resonan gangguan tanah primer dapat mempengaruhi sistem proteksi. Untuk sistem bertegangan rendah, kopling tegangan ini tidak akan cukup berarti, dimana  $V_0$  untuk gangguan-gangguan sisi primer akan jauh lebih rendah dari tegangan EHV sistem.

### 7.7.3 Proteksi Gangguan Tanah Dengan Pentanahan Impedansi Rendah

Generator-Generator yang dihubungkan seperti pada Gambar 7-2, pada umumnya ditanahkan melalui impedansi rendah, proteksi gangguan tanah pada kasus Generator mungkin dilakukan dengan rele differensial 87G, tergantung tingkat gangguan dan sensitivitas rele differensial.

Sensitivitas tinggi dan kecepatan operasi untuk gangguan tanah dapat diperoleh dengan menambahkan differensial urutan nol. Sebuah tipe yang relatif bebas dari ratio dan unjuk kerja CT diperlihatkan dalam Gambar 7-12. Rele arus lebih tipe pengali, 87GD, beroperasi berdasarkan perkalian dua arus. Seperti dapat dilihat dari gambar, untuk gangguan eksternal arus-arus pada rele dalam arah berlawanan dan rele tidak akan bekerja. Untuk gangguan tanah internal, arus urutan nol dari sistem berbalik sehingga rele beroperasi. Salah satu tipe rele memiliki arus angkat minimum 0,25 dikali 0,5 A pada masing-masing koil. Dengan energi operasi maksimum diperoleh bila arus-arus ini sefasa, rele akan beroperasi dengan arus-arus tinggi keluar fasa sebesar  $\pm 90^\circ$  dan dengan magnitude yang berbeda sepanjang perkalian waktu dari cosinus sudut antara arus-arus lebih besar dari perkalian Tap. Bila sistem tidak ditanahkan, maka skema yang ditunjukkan pada Gambar 7-12 tidak akan beroperasi, karena sistem tidak mensuplai arus urutan nol pada gangguan internal terjadi. Pada kasus seperti ini CT tambahan dapat digunakan untuk mendapatkan energi operasi internal dengan harga satu sumber arus urutan nol.

Tambahan dan proteksi cadangan digunakan rele 51 G seperti ditunjukkan pada Gambar 7-9 dan Gambar 7-12. Rating arus primer CT harus satu setengah arus gangguan tanah maksimum dengan rele 51G diset mendekati 0,5 A. Dibutuhkan koordinasi waktu dengan rele-rele lain yang dihubungkan ke bus Generator.



Gambar 7-12: Proteksi Diferensial tanah (urutan nol) untuk Generator menggunakan rele arus lebih tanah-berarah

Apabila beberapa Generator hubungan Wyei dihubungkan pada sebuah bus bersama, seperti dalam Gambar 7-2. Hal ini dapat menimbulkan kesulitan untuk secara selektif mengisolir gangguan dengan minimum gangguan. Meski satu atau seluruh netral Generator ditanahkan dengan cara sama, arus gangguan pada netral yang ditanahkan pada dasarnya adalah sama bebas dari lokasi gangguan pada areal tersebut. Oleh karenanya, untuk gangguan pada areal antara Generator ke pemutus, pada bus, pada

sistem dibawah bus, tingkat gangguan pada dasarnya sama. Hal ini benar untuk semua sistem pentanahan.

Dengan pentanahan impedansi rendah dan arus gangguan yang cukup untuk mengoperasikan rele-rele differensial dari bus dan Generator, maka akan diperoleh isolasi minimum, lalu rele 51G pada netral Generator memberikan cadangan atau proteksi "last resort" yang mungkin tidak selektif. Kemungkinan lain adalah menempatkan rele pengindra arah gangguan tanah sensitif pada terminal Generator untuk memindai Generator. Dengan ini operasi rele hanya ada bila gangguan terjadi pada mesin bersangkutan dan tidak bereaksi bila gangguan dari mesin lain, bus atau sistem. Kembali rele 51G yang terpasang pada netral ditanahkan menghasilkan cadangan tidak selektif. Aplikasi ini mungkin mustahil atau sulit dilakukan dengan sistem pentanahan impedansi tinggi. Pentanahan yang dilakukan hanya pada salah satu dari Generator dengan sebuah sistem tidak ditanahkan mengakibatkan kecendrungannya operasi tidak ditanahkan apabila unit Generator tersebut dikeluarkan dari operasi baik secara manual atau akibat kerja sistem proteksi. Jadi pentanahan multiple pada masing-masing unit lebih baik guna menghindarkan keadaan tanpa ditanahkan akibat tripping gangguan atau kegagalan memindahkan sistem pentanahan. Kemungkinan lain adalah menggunakan sistem pentanahan distribusi delta terbuka dengan sebuah tahanan guna memberikan level arus gangguan tanah primer tinggi.

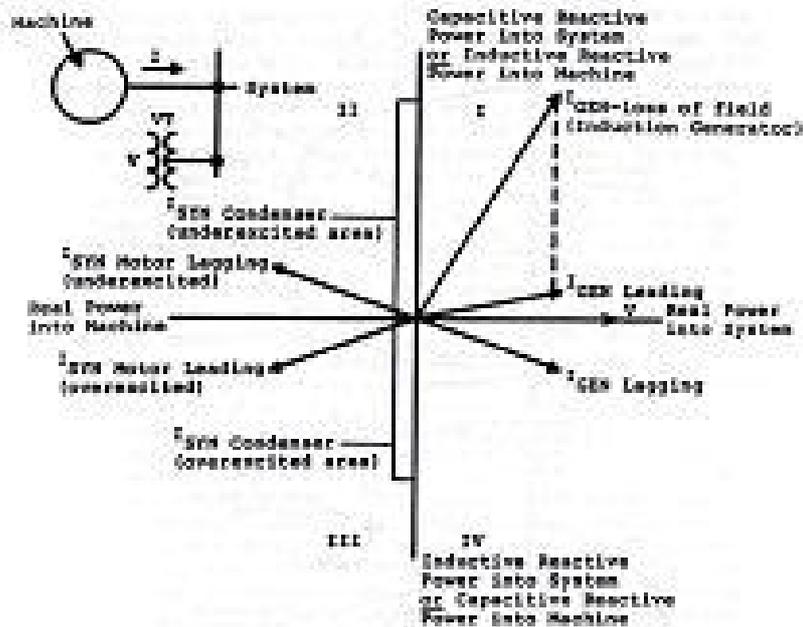
## 7. 8 PROTEKSI PENURUNAN ATAU KEHILANGAN PENGUATAN

Proteksi untuk menghindarkan ketidakstabilan operasi, potensi kehilangan sinkronisasi, dan kemungkinan kerusakan adalah penting dan berlalu untuk semua mesin sinkron, proteksi sistem penguatan merupakan bagian yang telah tersedia pada saat pembelian unit Generator, tetapi proteksi tambahan direkomendasikan untuk diberikan sebagai proteksi cadangan atau tambahan. Rele jarak biasanya digunakan untuk keperluan tersebut.

Biasanya, medan Generator diatur sedemikian rupa sehingga daya lagging diberikan kesistem tenaga. Pada diagram yang disajikan dalam Gambar 7-13 diberikan ringkasan operasi sistem sinkron. Dengan tegangan terminal V diberikan pada sumbu horizontal, arus Generator lagging diberikan /ditunjukkan pada kuadran IV, daerah ini adalah daerah operasi normal Generator. Apabila penguatan berkurang atau hilang, fasor arus bergerak menjadi leading atau pada kuadran I.

Pada keadaan ini, stabilitas Generator berkurang atau rendah. Apabila Generator kehilangan penguatan total dan sistem dapat mensuplai cukup daya reaktif tanpa menyebabkan tegangan jatuh yang cukup besar pada terminal Generator, maka mungkin Generator akan beroperasi sebagai Generator induksi. Sebaliknya, Generator kehilangan sinkronisasi. Perubahan ini tidaklah seketika tetapi memerlukan perioda waktu yang tergantung pada unit dan sistem terhubung. Bilamana medan Generator trip akibat gangguan, alarm dini memungkinkan operator mengembalikan medan

Generator dan menghindari kehilangan biaya dan waktu akibat penghentian dan pengasutan ulang. Bila medan Generator tidak dapat dikembalikan lagi, maka Generator harus dihentikan.



Gambar 7-13: Arus dan diagram relasi daya pada sebuah mesin sinkron

Generator memiliki suatu karakteristik yang dikenal dengan sebutan kurva kemampuannya. Tipikal kurva kemampuan Generator ditunjukkan pada Gambar 7.14a, zona operasi pada dasarnya dibatasi oleh temperatur, pada kurva ini didesain berdasarkan batasan termis, karena pemanasan lebih bervariasi sesuai operasi. Tiga lengkungan lingkaran mendefinisikan batasan tersebut. Pada salah satu area operasi batasannya adalah pemanasan lebih pada belitan rotor ; area kedua belitan stator, dan yang ketiga inti besi stator.

Seperti disebut diawal, Generator harus dioperasikan berhati-hati pada leading atau zona reaktif negatif. Batasan tambahan disini adalah batasan stabilitas tunak (istilah asingnya SSSL), yang didefinisikan sebagai sebuah lengkungan lingkaran, dimana titik pusat dan jari – jari adalah:

$$\text{Pusat} = \frac{1}{2} V^2 \left( \frac{1}{X_s} - \frac{1}{X_d} \right)$$

$$\text{Jari - jari} = \frac{1}{2} V^2 \left( \frac{1}{X_s} + \frac{1}{X_d} \right)$$

Dimana  $V$  adalah tegangan fasa – netral terminal Generator,  $X_s$  impedansi ekuivalen total sistem, dan  $X_d$  reaktansi sinkron tidak jenuh. Batasan ini adalah batasan daya yang dinyatakan dalam perunit, dengan  $X_d$  dan  $X_s$  pada dasar Generator.

Tipikal kurva stabilitas tunak yang diberikan pada Gambar 7-14a, bervariasi sesuai dengan Generator dan sistem terhubung, seperti halnya dengan tegangan akan bervariasi selama operasi variasi ini kecil dibanding sistem – sistem penguat Generator memiliki pembatas penguatan minimum guna mencegah regulator penguat penguat memberikan penguatan dibawah ambang batasnya. Regulator ini tipikal diset diatas stabilitas tunak seperti ditunjukkan pada Gambar 7-14.

Dalam penggunaan rele jarak, kurva daya ini harus dikonversikan kebentuk impedansi yang diplot pada sumbu R – X. Konversi persamaan tersebut adalah :

$$Z_{\Omega} = \frac{kV_B^2 Z_{pu}}{MVA_B} \qquad Z_{R(sec)} = \frac{Z_{R(pri)} R_c}{R_v}$$

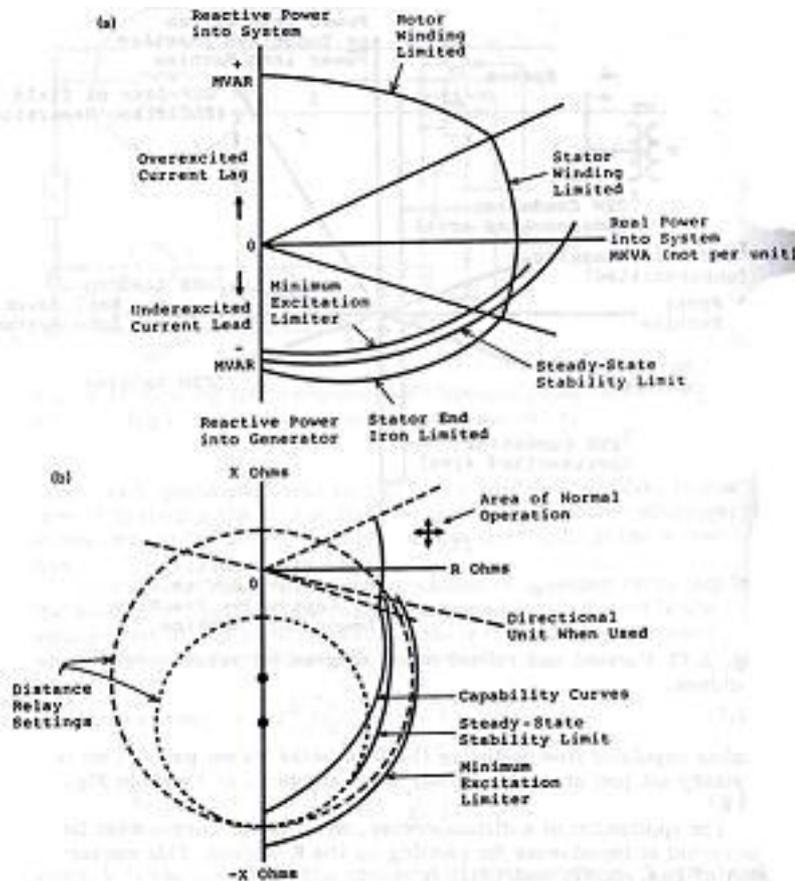
$$Z_{rele} = \frac{kV^2 R_c}{MVA R_v} \quad \Omega$$

$R_c$  dan  $R_v$ , Masing – masing ratio CT dan VT yang digunakan pada rele jarak. Bila kurva diplot dalam impedansi Ohm primer faktor  $R_c/R_v$  tidak perlu digunakan. Dari harga MVA pada sudut yang terindikasi dari kurva kemampuan, persamaan diatas mengkonversi besaran itu dalam OHM. Harga konversi ini kemudian diplot kedalam diagram R-X pada sudut tersebut. Konversi ini ditunjukkan pada Gambar 7-14b, baik untuk kurva kemampuan underexcited dan kurva stabilitas. Untuk kurva stabilitas konversi dapat dilakukan dengan lebih mudah bila harga  $X_s$  dan  $X_d$  diketahui. Selanjutnya, Pusat lingkaran stabilitas dari titik asal adalah  $\frac{1}{2} (X_s - X_d)$  dengan jari-jari  $\frac{1}{2} (X_s + X_d)$ . Bila diplot pada sisi OHM sekunder,  $X_s$  dan  $X_d$  harus dalam besaran OHM sekunder.

Perlu dicatat bahwa diagram R-X pada Gambar 7-14b, titik asal adalah terminal Generator, dengan diplot dibawah titik asal dan  $X_s$  diatas; Juga terlihat bahwa kenaikan atau daya lebih tinggi diindikasikan dengan jarak yang lebih panjang dari titik asal seperti terlihat pada Gambar 7-14a, tetapi dengan vektor impedansi lebih pendek pada Gambar 7-14b. Jadi dalam diagram daya, operasi daya yang aman adalah diantara kurva kemampuan dan kurva stabilitas, tetapi diluar kurva pada Gambar 7-14b. Eksitasi minimum membatasi operasi pada level daya rendah dari batas stabilitas. Area operasi normal seperti diperlihatkan pada Gambar 7-14b, bilamana terjadi kehilangan atau kekurangan penguatan, fasor impedansi bergerak perlahan mengikuti penurunan fluk menuju kuadran IV. Rele jarak (40) melingkupi areal ini memberikan suatu fungsi pendeteksi yang baik untuk keadaan tersebut. Beberapa mode setting yang mungkin, antara lain:

Untuk keadaan kehilangan penguatan total, rele jarak diatur sebagaimana ditunjukkan pada lingkaran kecil pada Gambar 7-14b. Garis tengah lingkaran dalam orde  $X_d$ , dengan bagian atas lingkaran 50 sampai 70 % dan  $X_d'$  dibawah titik asal.  $X_d'$  adalah reaktansi peralihan Generator. Rele akan beroperasi bilamana vektor impedansi bergerak menuju

lingkaran. Waktu operasi antara 0,2 sampai 0,3 detik untuk dapat menghentikan Generator secara penuh. Untuk mendeteksi penguatan rendah, kehilangan sebagian atau kehilangan total, garis tangan diset tersedia didalam setting batasan eksitasi minimum, tetapi diluar kurva batas stabilitas dan kemampuan Generator.



Gambar 7.14: Tipikal kurva kapabilitas dan stabilitas Generator dan konversinya ke diagram R-X untuk aplikasi rele (40): (a). Kurva kapabilitas dan stabilitas pada sumbu daya; (b). Kurva daya yang telah dialihkan dalam diagram R-X dengan proteksi rele jarak

Disini ditunjukkan oleh lingkaran diameter besar garis putus-putus. Tidaklah mudah untuk membuat setting seperti disarankan; penelian yang baik dan kompromi mungkin diperlukan . Unit pengindera arah diperlukan untuk menghindarkan operasi gangguan didekan dan ayunan transien stabil.

Operasi rele (40) adalah dibawah garis putus-putus pengindera arah dan diantara garis putus lingkaran operasi. Apabila tersedia, unit tegangan kurang diatur akan jatuh antara 87 dan 80% tegangan normal digunakan untuk mensupervisi operasi rele. Bila sistem daya dapat mensuplai daya reaktif ke Generator tanpa menyebabkan penurunan tegangan , Alarm dibunyikan sehingga dapat dilakukan upaya perbaikan , diikuti dengan penghentian setelah waktu tunda dilampau. Tipikal waktu tunda yang digunakan bervariasi tergantung sistem dan mesin, berkisar antara 10 detik sampai 1 menit. Bila tegangan turun sampai dibawah tegangan setting, dimulai prosedur tripping

dengan waktu operasi antara 0,2 sampai 0,3 detik Untuk Generator besar dan unit-unit penting, kombinasi (1) dan (2) digunakan dengan menerapkan dua rele kehilangan medan (40).

## 7.9 PROTEKSI GENERATOR TERHADAP GANGGUAN SISTEM DAN BAHAYA OPERASIONAL.

Pada subbab sebelumnya telah didiskusikan proteksi cadangan untuk mengatasi kemungkinan tidak terbebasnya atau penundaan gangguan menggunakan rele 21, 46 dan 51V. Dalam subbab berikut ini akan dikemukakan beberapa masalah dan proteksi untuk keadaan lain yang mungkin terjadi. Secara umum, hal ini terjadi pada sistem atau unit Generator yang terhubung ke sistem besar. Pembahasan diawali dengan Generator kecil.

### 7.9.1 Generator-Generator Industri

Generator ukuran kecil, khususnya yang digunakan pada pembangkit yang dipergunakan pada industri atau sumber daya sendiri, mungkin mengalami beberapa masalah berikut, karena unit selalu terhubung ke utilitas, tindakan pertama pada masalah sistem penghubung adalah memisahkan dari penghubung dengan cepat. Dalam banyak kasus, hal ini dapat dilakukan dengan rele frekuensi kurang, kecuali bila penghubung mengambang (yaitu, Generator lokal mensuplai semua beban local). Hal ini merupakan kondisi operasi normal yang jarang dilakukan. Tipekal seting rele UFR adalah antara 59 sampai 59,5 Hz pada sistem 60 Hz dengan waktu tindak yang cukup untuk menghilangkan setiap operasi transien tetapi lebih kecil dari setiap waktu penutupan ulang yang dipergunakan oleh sistem. Rel pengindera arah daya pada bagian penghubung mungkin atau mungkin tidak berguna, tergantung pada sistem dan operasinya.

### 7.9.2 Operasi Diluar Frekuensi

Pada Generator utilitas, gangguan pada sistem seringkali dapat menghasilkan pemisahan yang mengakibatkan ketidakseimbangan antara Generator dan beban. Hal ini disebabkan oleh ketidakseimbangan antara Generator dan beban. Hal ini disebabkan oleh kelebihan atau kekurangan daya untuk mensuplai beban. Pada kasus pertama, rele frekuensi lebih dengan kemungkinan mengakibatkan tegangan lebih sebagai akibat penurunan demand baban. Operasi dalam mode seperti ini tidak akan menghasilkan pemanasan lebih kecuali rating daya dan tegangan mencapai 105 % lebih. Pengemдали Generator harus dengan cepat mengatur penyesuaian unit terhadap beban.

Dengan pembangkitan yang tidak mencukupi beban terhubung, mengakibatkan penurunan frekuensi, pada waktu demand beban berat. Penurunan tegangan menyebabkan regulator tegangan menaikkan penguatan. Hal ini cepat menimbulkan

terjadinya pemanasan lebih pada rotor maupun stator. Pada saat bersamaan lebih banyak demand daya dibutuhkan, dengan Generator yang tidak mampu memenuhi kebutuhan pada waktu frekuensi menurun. Sistem pelepasan beban harus mampu mengatur pembebanan sesuai kemampuan pembangkitan sebelum kondisi kritis terjadi.

Proteksi arus lebih akan mengamankan rotor, tetapi proteksi bahan bakar dibutuhkan untuk mengamankan stator. Pengaman yang digunakan adalah rele arus lebih waktu terbalik ekstrim (50/51) yang diatur untuk memenuhi dan beroperasi sebelum batas termis waktu singkat armatur Generator dicapai. Hal ini dapat dikendalikan dengan suatu high drop out unit arus lebih seketika yang diset sekitar 115 % dari rating arus Generator untuk mencegah operasi dibawah batasan arus tersebut.

Diskusi diatas berhubungan dengan masalah elektik Generator. Masalah lain yang ada, yaitu masalah yang terjadi pada operasi turbin uap pada saat frekuensi berbeda dari sinkronous. Sudu turbin didesain dan ditala guna mendapatkan operasi yang efisien pada rating frekuensi rotasi. Operasi dengan beban yang memiliki frekuensi berbeda dapat mengakibatkan resonansi pada sudu dan kerusakan kelelahan pada sudu-sudu panjang (18 sampai 44 inc) dari unit turbin tekanan rendah. Tipikal batasan frekuensi untuk mesin unit tekanan rendah 60 Hz dengan panjang sudu antara 18 sampai 25 inchi adalah sekitar 58,5 sampai 61,5 Hz untuk operasi kontinyu, tetapi dapat pula antara 56 dan 58,5 Hz, hanya untuk operasi singkat yang tidak lebih dari 10 menit dapat diperbolehkan. Untuk turbin dengan sudu sepanjang 25 samapi 40 inchi, tipikal range frekuensi antara 59,5 dan 60,5 Hz untuk operasi kontinyu, untuk operasi singkat sepanjang umur pakai turbin dalam waktu 60 menit dengan frekuensi antara 58,5 dan 59,5, dan hanya 10 menit bila frekuensi antara 56 dan 58,5 Hz. Untuk unit seperti ini, disarankan dipakai rele frekuensi kurang. Satu aplikasi menggunakan unit tiga langkah, tingkat pertama tanpa waktu tunda diatur pada frekuensi 56 Hz, tingkat kedua dengan waktu tunda 2 menit di set pada frekuensi 58,4 Hz, dan tingkat ketiga dengan waktu tunda 6 menit diset pada frekuensi 59,4 Hz.

### 7.9.3 Tegangan Lebih

Generator sebagaimana Transformator harus dihindarkan terhadap tegangan lebih kecuali untuk sesaat atau peralihan. Dengan operasi normal dekat lutut kurva kejenuhan besi tegangan lebih kecil saja menyebabkan arus eksitasi yang cukup besar pada Transformator, dan meningkatkan kerapatan fluks dan mengakibatkan pola fluksi menjadi tidak normal pada Generator. Hal ini akan menyebabkan kesulitan dan kerusakan yang berkembang. Arus eksitasi medan pada rating keluaran akan lebih besar dari pada saat tanpa beban, jadi sangat penting untuk mengurangi penguatan sesuai dengan pengurangan beban. Biasanya, hal ini dikerjakan oleh sistem pengaturan, tetapi sinyal tegangan yang salah, kehilangan fuse VT, atau kegagalan lain pada sistem dapat terjadi pada tegangan lebih tinggi.

Prioda bahaya utama adalah waktu Generator dilepas dari sistem dan putaran berubah. Tegangan Generator secara proposional berhubungan dengan frekuensi dan fluk magnetic sehingga proteksi tegangan lebih harus memiliki suatu harga angka konstan sebagai fungsi dari ratio tegangan terhadap frekuensi, tipe v/f, proteksi tambahan yang dapat ditambahkan pada kendali Generator disarankan menggunakan dua tingkatan unt v/f. satu tingkat diseting berkisar 110 % rating tegangan untuk mengaktifkan alarm dengan sub urutan trip mendekati 1 menit. Tingkat lainnya diset berkisar 120 % rating tegangan untuk trip pada orde 6 menit. Sebuah suplai VT lebih disukai.

#### 7.9.4 Operasi Motoring

Apabila suplai penggerak mula mengalami kerusakan atau tidak tersedia sementara Generator terhubung pada sistem tenaga dan penguatan gen tersedia, sitem tenaga akan mengendalikan unit Generator sebagai motor sinkron . Hal ini sangat berbahaya terutama bila penggerak mula yang digunakan adalah turbin uap dan air. Untuk turbin uap hal ini akan mengakibatkan pemanasan lebih dan berpotensi merusak turbin dan sudu-sudu turbin. Rendahnya aliran air pada turbin air dapat menyebabkan kavitasi pada sudu-sudu turbin. Hal ini dapat pula terjadi bila dilakukan penutupan aliran uap dan air secara tiba-tiba pada waktu pengurangan beban fasa atau oleh tripping turbin yang tidak disertai pembukaan pemutus Generator.

Sejumlah cara pemindahan disertai sebagai bagian Generator dan pengendalinya, tetapi direkomendasikan untuk menambahkan rele daya balik (32) seperti diperlihatkan pada Gambar 7-8, pengaman tersebut adalah rele pengindera arah daya dihubungkan agar dapat beroperasi apabila daya mengalir menuju Generator. Tipikal sensitivitas adalah ½ % dari ratig daya operasi pada orde 2 detik.

#### 7.9.5 Generator Keluar Dari Sinkronisasi

Pada beberapa tahun terakhir beberapa kasus kerusakan Generator yang diakibatkan kurang hati-hatian dalam menghubungkan Generator ke sistem tenaga. Hal ini dapat terjadi oleh penutupan pemutus tenaga yang salah pada saat unit penyusunan gigi, atau oleh sinkronisasi yang tidak semestinya. Proteksi biasanya mungkin beroperasi pada kebanyakan kasus tetapi tidak perlu untuk segala kemungkinan. Hal ini meningkatkan bahaya-bahaya bila sebagian dari proteksi tidak tersedia atau berguna pada frekuensi rendah dari star up atau shut down. Karena unit atau pemutus Generator mungkin merupakan masalah, sangat penting bahwa pemutus terdekat dibuka secepatnya oleh kegagalan pemutus lokal dan atau dengan tripping jarak jauh. Tambahan proteksi untuk ini adalah dengan menggunakan 3 unit rele arus lebih-waktu terbalik-pengindera arah (67). Satu pada fasa dihubungkan untuk beroperasi pada daya balik ke Generator.

Dengan basis arus yang mengalir keluar dari Generator ke sistem tenaga, karakteristik rele dan hubungannya harus memberikan suatu zona operasi dari sekitra 30° sampai

60° melalui perputaran 180° menjadi 210° sampai 240° mendahului. Tipikal angkat arus haruslah berkisar 0,5 pu dengan arus 2,0 pu, waktu operasi berkisar 0,25 detik. Aplikasi ini dapat menggantikan proteksi motoring (32) dan lebih sensitive terhadap kondisi yang diuraikan diatas.

#### 7.9.6 Kutub Pemutus Falshover

Dimana potensi terjadi flashover pada kutub-kutub pemutus tenaga sebelum sinkronisasi atau setelah pemisahan dari sistem tenaga, tambahan proteksi ketidakcocokan kutub direkomendasikan. Kondisi ini sepertinya untuk terjadi tanpa gangguan dan beban rendah, sehingga arus demikian rendah. Pada suatu kasus flashover kutub pemutus 500 kV suatu jaringan 150 mile yang dibuka disuatu ujung memberikan arus kecepatan ratingnya. Arus urutan negatif  $I_2$  berada 12 % diatas arus rating Generator. Hal ini dapat dibebaskan hanya oleh pengurangan penguatan dengan cepat. Cadangan local dan pemutusan jarak jauh pada sisi lain dari jaringan akan membebaskan sistem, tetapi tidak Generator proteksi urutan negatif mungkin merespon, tetapi dengan waktu respon lama, atau mungkin tidak bereaksi.

Proteksi kegagalan kutub pemutus (GI) yang sensitive bila ada digunakan untuk membandingkan level magnitud dari ketiga fasa rele akan beroperasi bila salah satu arus pada fasa berada dibawah harga seting, sedangkan arus paada fasa lain diatas harga seting tipikal sensitivitas memberikaan reaksi bilamana arus salah satu fasa lebih kecil 20 sampai 60 mA, lainnya ditas 40 sampai 200 mA. Besaran ini dilihat dari sisi tegangan tinggi tranformator . Suatu rele dengan level perbedaan 3 : 1 dan dengan waktu operasi berkisar ½ detik disarankan.

Bilamana digunakan dua pemutus Generator pada sistem tegangan tinggi, seperti pada rel konfigurasi Ring atau rel dengan pemutus setengah. Maka akan dapat dipenuhi sirkulasi arus ketidakseimbangan pada bus untuk dapat mengoperasikan proteksi yang sensitive ini. Untuk aplikasi seperti ini operasi tidak seimbang harus disupervisi oleh detector level tegangan urutan nol, atau dengan seting lebih tinggi.

#### 7.9.7 Osilasi Subsinkronous

Aplikasi kompensator seri pada jaringan transmisi EHV menghasilkan peningkatan transmisi daya dan stabilitas tetapi mungkin mengakibatkan osilasi subsinkronous. Hal ini mungkin terjadi pada Generator yang dihubungkan pada jaringan transmisi HVDC.

Frekuensi natural sistem  $f_n$  dengan reaktansi kapasitif  $X_c$  dan reaktansi induktif  $X_l$  didapat hubungan :

$$f_n = f_s \frac{X_c}{X_l}$$

Dimana  $f_s$  adalah frekuensi sinkronous atau frekuensi normal sistem. Karena  $X_c$  lebih kecil dari  $X_l$ , maka  $f_n$  subsinkronous. Hal ini menimbulkan masalah pada sistem, terutama pada Generator rotasi rotor pada frekuensi sinkronous berputar lebih cepat dari medan magnetik yang dihasilkan oleh frekuensi subharmonik. Hal ini mengakibatkan slip negatif dan mempengaruhi resistensi negatif, dengan Generator cenderung beroperasi sebagai motor induksi. Bilamana  $f_n$  mendekati  $f_s$ , slip menjadi kecil dan resistansi negatif besar. Bila resistansi ini lebih besar dari resistansi sistem, sirkit akan mengalami eksitasi sendiri, dan arus subsinkronous membesar. Hal ini akan mengakibatkan pemanasan lebih pada sistem. Satu penyelesaian yaitu menggunakan belitan penahan muka tahanan rendah untuk mengurangi resistansi rotor. Pengaruh lain dari frekuensi ini adalah menghasilkan torka osilasi pada Generator dengan torka peralihan tambahan akibat operasi pensaklaran dan gangguan pada jaringan sistem. Hal ini berbahaya karena torka ini mungkin mengakibatkan kerusakan pada rotor.

Beberapa pengukuran dapat diambil untuk mengurangi hal tersebut, dan rele proteksi dapat dikembangkan untuk mendeteksi resonansi subsinkronous. Salah satu pengukuran, yaitu mengukur pergerakan torsional, lainnya memindai tingkat arus-arus subsinkronous pada jangkar. Hal ini merupakan sebuah fenomena kompleks dan diukur dari apa yang akan dibahas dalam buku ini, terlebih lagi hal ini terjadi hanya pada beberapa sistem dengan kapasitansi serie.

## 7.10 PROTEKSI GROUND FIELD

Deteksi gangguan tanah pada eksiter dan medan sangat penting dan umumnya merupakan bagian dari yang diberikan oleh pabrik, bukan ditata oleh pengguna. Namun bila peralatan ini tidak diberikan, atau dibutuhkan tambahan sistem pengaman, rele proteksi sebagai pengaman dapat dipakai.

Untuk unit-unit dengan sikat, rele (64) dengan sikuit pembagi tegangan dapat dihubungkan melalui medan dan eksiter dengan rele sensitive tipe DC terhubung antara jaringan jembatan dan tanah. Apabila terjadi gangguan tanah pada medan dan eksiter, maka pada rele akan merasakan tegangan yang dapat menyebabkan operasi rele tersebut. Untuk menghindari tidak beroperasinya rele pada gangguan tanah dititik nol, salah satu cabang jaringan mengandung resistor non linear yang akan merubah titik buta ini dengan variasi tegangan dari medan.

Generator dengan eksiter tanpa sikat dilengkapi dengan suatu peralatan pengganti sikat pada slip ring untuk mengukur tingkat isolasi medan secara periodik. Isolasi medan eksiter diperiksa secara berkala/kontinyu. Keadaan yang tidak normal akan mengaktifkan alarm sehingga operator bisa melakukan tindakan, tetapi dapat pula digunakan untuk perintah tripping.

## 7. 11 PROTEKSI GENERATOR PADA KONDISI OFF-LINE

Seluruh sistem proteksi Generator harus dipelajari/diteliti apakah dalam kondisi mampu operasi selama proses membawa Generator ke rating dan tegangan dalam operasi sinkronisasi dengan sistem tenaga. Untuk beberapa tipe sistem, seperti turbin uap, proses ini mencakup pula operasi penurunan dalam beberapa jam. Jadi proteksi harus aktif antara  $\frac{1}{4}$  sampai  $\frac{1}{2}$  rating frekuensi dan di atasnya . Apabila rele dan atau unjuk kerja instrumen Transformator dirusak pada frekuensi ini, maka proteksi suplemen sementara dibutuhkan.

## 7. 12 PROTEKSI OUT-OF-STEP

Pada kebanyakan Generator, kehilangan langkah merupakan masalah bagi sistem dengan pusat elektrik keluar dari areal transmisi . Sekali tegangan dari sumber Generator berayun sebesar  $180^\circ$ , maka tidak mungkin untuk memulihkan kembali sistem tersebut dan pemisahan harus dilakukan. Deteksi kehilangan langkah dan tripping tidak dibahas disini . Tidak ada rele pada Generator yang dapat dipergunakan untuk kasus ini.

Bagi Generator-Generator besar dan sistem transmisi tegangan tinggi, pusat kelistrikan sistem dapat dipindah ke unit Transformator atau ke Generator. Pada sistem seperti ini, proteksi kehilangan langkah harus ditambahkan pada Generator, karena tidak ada peralatan proteksi lain yang cukup mampu merespon gangguan tersebut. Pengaturan lingkaran besar dari unit kehilangan medan (40) akan beroperasi untuk ayunan mendekati melewati dan pada bus.

## 7. 13 BEBERAPA GENERATOR TERHUBUNG LANGSUNG PADA SEBUAH TRANSFORMATOR: PENTANAHAN DAN PROTEKSI

Kebanyakan metoda ini digunakan pada Generator tandens yang penggerak mulanya berupa turbin uap. Dua unit Generator dapat diparalel dan dihubungkan pada belitan delta bersama unit Transformator, atau setiap Generator mungkin dihubungkan secara terpisah pada belitan delta sebuah unit Transformator tiga belitan. Untuk hubungan paralel, hanya salah satu Generator saja ditanahkan, umumnya dengan pentanahan impedansi tinggi. Generator lain dibiarkan tidak ditanahkan. Gangguan tanah pada salah satu unit akan mengakibatkan operasi rele gangguan tanah pada salah satu unit akan mengakibatkan operasi rele gangguan tanah seperti yang telah dikemukakan diatas. Lokasi gangguan tidak akan sama, untuk semua gangguan tanah dimanapun. Kedua unit Generator harus dihentikan, karena tidak ada pemutus yang memisahkan keduanya.

Dengan Generator dihubungkan secara terpisah pada belitan Transformator, masing-masing unit harus ditanahkan untuk proteksi gangguan tanah. Proteksi Generator dilakukan terpisah. Dengan tidak adanya pemutus antara Generator dan transformator,

proteksi differensial trnsformator menyeluruh digunakan dengan memakai tipe multirestraint dan dihubungkan seperti pada bab 7.8.

Masing-masing unit harus memiliki proteksi kehilangan medan (40). Dan hanya membutuhkan satu rele urutan negatif (46), dan satu rele jarak (21) atau rele tiga fasa sebagai proteksi cadangan. Proteksi ini dapat dihubungkan ke unit mana saja. Hal ini dapat digunakan apabila kedua unit selalu dioperasikan bersama. Bila salah satu unit dapat beroperasi sedangkan unit lainnya dihentikan, maka masing-masing unit harus dilengkapi dengan semua proteksi yang diperlukan, seperti dijelaskan diatas dan ringkasannya diberikan dalam Gambar 7-8.

#### 7. 14 PROTEKSI GENERATOR TURBIN PEMBAKARAN

Unit tipe ini meningkatkan sumber daya, khususnya didaerah dimana batu bara atau air terbatas atau mahal dan gas serta minyak mudah diperoleh. Pada awalnya, unit tipe ini relatif kecil dalam ukuran dan digunakan pada beban puncak, tetapi unit ini ikut juga digunakan untuk beban dasar terutama untuk ukuran 100 MVA keatas. Proteksi yang digunakan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 7.9. Proteksi suplemen tambahan seprti yang diberikan dalam Gambar 7.8.

Unit ini dapat mengalami kondisi motoring bilamana sistem kahilangan pembakaran pada turbin. Umumnya keadaan ini tidak sekuritis bila penggerak mulanya adalah uap atau hidro, kecuali bila digunakan pengurang kecepatan. Sistem tidak didesain untuk mengalami putaran balik. Tipikal pengaturan untuk proteksi motoring (32) diatur pada orde 7 sampai 8 % dari rating daya mesin.

#### 7. 15 PROTEKSI SINKRONOUS KONDENSER

Sinkronous kondeser selalu beroperasi sebagai sebuah motor tanpa beban yang berfungsi sebagai pensuplai reaktansi kapasitif ke sistem (Gambar 7-13) . Proteksi untuk unit ini ditunjukkan pada Gambar 7-9, dengan tambahan diperlihatkan dalam Gambar 7-8 sebagaimana diperlihatkan oleh sistem dan operasi yang dibutuhkan. Proteksi kehilangan medan harus diatur dengan lingkaran operasi agar diperoleh suatu impedansi yang dilihat dari terminal dengan eksitasi nol atau

$$Z = \frac{1}{I_{\text{hubung singkat}}} \text{ pu}$$

Operasi untuk mensuplai reaktansi kapasitif akan mengakibatkan unit rele jarak beroperasi, tetapi tripping dikendalikan oleh unit tegangan. Tidak ada proteksi bagi reaktansi induktif menuju sistem (overeksiter), karena unit pengindra arah terbuka dan unit jarak dapat atau tidak dapat beroperasi.

## 7.16 SISTEM TRIPPING PADA GENERATOR

Secara umum tripping secepatnya direkomendasikan bila terjadi gangguan pada Generator. Artinya pembukaan pemutus utama dan pemutus medan serta menutup katub-katub turbin atau gerbang aksi ini mengakibatkan pelepasan beban yang tiba-tiba, yang bilamana dilakukan pada beban penuh akan mengalami kerusakan pada sistem mekanis. Untuk gangguan fasa dan tanah, kecuali mungkin dengan impedansi tinggi atau sistem pentanahan resonan, tripping secepatnya merupakan suatu keharusan. Karena keterbatasannya arus gangguan tanah, kadangkala dilakukan penundaan tripping. Masalahnya adalah, setiap gangguan berindikasi kerusakan dan berkembang menjadi gangguan fasa, dan atau terjadi gangguan kedua yang akibatnya lebih merusak dan berbahaya. Meski tripping seketika telah dilakukan energi pada masa berputar akan terus menyebabkan gangguan dan kerusakan berlanjut untuk beberapa periode.

Alternatif lain untuk menghasilkan tripping seketika secara penuh adalah:

- a. Mengizinkan penghentian dimana pemutus utama dan medan di tripping setelah turbin menghentikan katub atau gerbang di tutup
- b. Alarm dengan waktu tunda tetap agar tersedia waktu bagi operator melakukan tindakan
- c. Hanya alarm

Perlu diingat lagi, hal ini hanya boleh dilakukan hanya untuk gangguan tanah dimana sistem menggunakan pentanahan impedansi tinggi dan sebagai sebuah sistem individual pilihan.

## 7.17 RINGKASAN PROTEKSI

Generator khususnya Generator-Generator berukuran besar, sangat kritis terhadap sistem proteksi dan integritas. Oleh karena itu proteksi sangat penting mengenai sekuriti keterandan. Meski kemungkinan gangguan yang terjadi sangat kecil, namun proteksi lengkap dengan cadangannya harus tetap dipertimbangkan. Ini merupakan sebuah opsi yang sangat tergantung pada sistem dan kondisi individual, jadi setiap instalasi menunjukkan variasi perbedaan satu dengan lainnya.

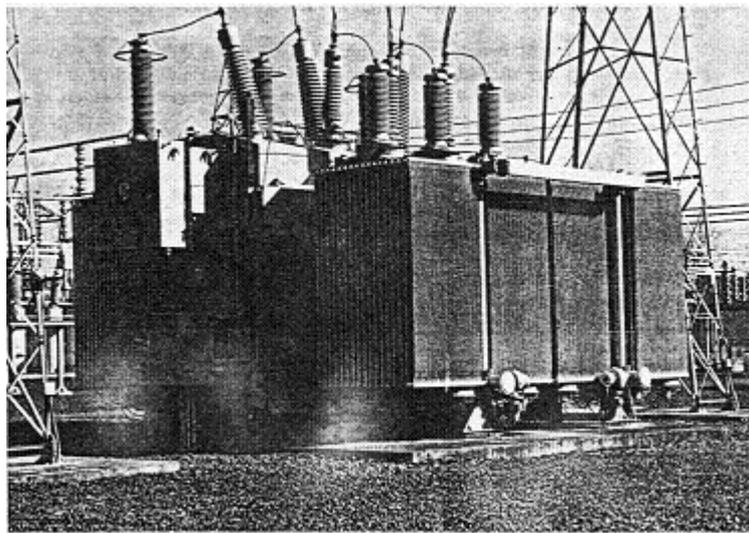
Seperti telah dikemukakan, peralatan proteksi yang telah didiskusikan pada Gambar 7-8 dan Gambar 7-9, keseluruhannya diterapkan oleh pengguna, berlainan dengan proteksi yang telah diberikan oleh pabrikan Generator maupun penggerak mula. Peralatan yang diberikan tidak umum dan mewakili pemakaian umum suatu industri. Gambar 7.8, memeperlihatkan proteksi maksimum yang normal digunakan pada Generator besar dan menengah. Gambar 7-9 menunjukkan proteksi minimum yang direkomendasikan oleh Generator kecil, khususnya bagi Generator yang digunakan pada industri, yang umunya terisolasi dari sistem tenaga yang besar.

## BAB 8

### PROTEKSI TRANSFORMATOR, REAKTOR DAN KAPASITOR SHUNT

#### 8.1 TRANSFORMATOR

Transformator hampir ada disemua bagian sistem tenaga elektrik, antara semua tingkatan tegangan dan dengan tipe, ukuran dan hubungan yang berbeda. Transformator kecil dengan daya antara 3 sampai 200 kVA dapat dilihat tergantung pada tiang-tiang dibanyak daerah. Sebuah Ototransformator 325 MVA dengan tegangan 230/115/13,8 kV pada belitan tersier diperlihatkan dalam Gambar 8-1.



Gambar 8-1: Bank Ototransformator 3 fasa 325 MVA, 230/115 kV

Biasanya, Pemutus Tenaga atau peralatan Pemutus lain yang berada pada atau didekat terminal belitan bank Transformator. Namun, faktor ekonomis kadangkala mengharuskan tidak digunakannya Pemutus, dengan demikian bank Transformator dapat dihubungkan langsung ke Rel atau Bus, Line atau Generator. Proteksi diferensial, bilamana memungkinkan, memberikan proteksi terbaik untuk gangguan fasa dan gangguan tanah, kecuali pada sistem yang tidak ditanahkan atau dimana arus gangguan dibatasi dengan pentanahan impedansi tinggi. Pada keadaan ini, proteksi Diferensial hanya memberikan proteksi gangguan fasa. Umumnya, proteksi Diferensial digunakan pada bank Transformator 10 MVA dan lebih besar. Kuncinya adalah seberapa berharganya Transformator itu didalam sistem. Jadi proteksi Diferensial mungkin diperlukan untuk unit Transformator kecil.

#### 8.2 FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PROTEKSI DIFERENSIAL

Beberapa faktor yang harus diperhatikan dalam penggunaan proteksi Diferensial, antara lain:

1. Arus inrus magnetisasi. Ini merupakan fenomena umum yang dapat terjadi pada suatu gangguan internal (arus menuju tetapi tidak keluar dari Transformator).
2. Level tegangan yang berbeda dan karenanya CT yang digunakan dari tipe, ratio dan karakteristik unjuk kerja yang berbeda pula.
3. Pergeseran fasa pada bank Transformator hubungan Y -  $\Delta$
4. Tap Transformator untuk kendali tegangan.
5. Pergeseran fasa dan atau Tap tegangan pada Transformator regulasi

### 8.3 INRUS MAGNETISASI

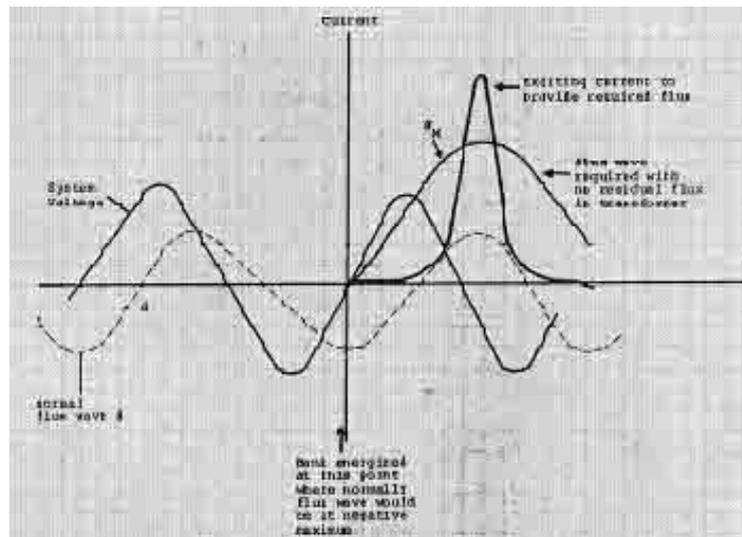
Apabila tegangan sistem diberikan pada sebuah Transformator pada waktu dimana fluks tunak normal akan memiliki perbedaan dari yang ada pada Transformator, maka akan terjadi transien arus yang disebut inrus magnetisasi. Fenomena ini ditunjukkan pada Gambar 8-2, untuk Transformator tanpa magnet sisa. Dalam gambar diperlihatkan Transformator energise pada waktu tegangan sistem nol. Dengan rangkaian reaktif tinggi, fluks akan pada atau mendekati harga maksimum negatif, tetapi Transformator tidak memiliki fluks, maka fluks dimulai dari nol dan mencapai harga  $2\phi$  pada prioda siklus pertama. Untuk mendapatkan fluksi yang dibutuhkan arus eksitasi yang sangat besar seperti ditunjukkan. Untuk mencapai efisiensi maksimum, Transformator dioperasikan mendekati kejenuhan sehingga harga fluks lebih besar dari  $\phi$  normal yang menghasilkan kejenuhan hebat dan suatu arus eksitasi yang besar.

Bila sebuah dienergise kembali, terdapat kemungkinan yang sangat besar meskipun deenergise beberapa fluks  $\phi_R$  tertinggal pada inti besi. Fluks ini dapat positif atau negatif. Bila Gambar 8-2, fluks sisa adalah  $+\phi_R$  yang ada karena proses energise sebelumnya, fluks maksimum yang dibutuhkan akan menjadi  $2\phi + \phi_R$  menghasilkan arus inrus magnetisasi terbesar maksimum. Bila  $\phi_R$  negatif, fluks maksimum yang diperlukan adalah  $2\phi - \phi_R$  dengan arus inrus yang lebih kecil. Fenomena ini acak. Bilamana Transformator telah energise didekat atau pada tegangan positif maksimum (kurva d pada Gambar 8-2), fluks yang dibutuhkan pada waktu ini adalah nol. Jadi arus penguatan normal yang mengalir dengan meniadakan atau tanpa inrus transien. Arus penguatan normal pada suatu Transformator dalam orde 2 sampai 5 % arus beban penuh. Maksimum inisial arus inrus, mungkin paling tinggi 8 sampai 30 kali arus beban penuh. Tahanan pada rangkaian pensuplai dan Transformator dan susut besi pada Transformator mengurangi puncak arus inrus, sehingga pada akhirnya menurunkan kembali keharga arus eksitasi normal. Konstanta waktu, bervariasi mulai dari 10 siklus sampai maksimum 1 menit pada rangkaian induktif sangat tinggi.

Faktor-faktor ini akan berpengaruh terhadap inrus, antara lain: ukuran Transformator, ukuran dan sifat sumber sistem tenaga, tipe inti besi Transformator, sejarah sebelumnya dan ratio L/R dari sistem dan Transformator. Pada sirkit tiga fasa beberapa inrus akan selalu terjadi pada satu atau beberapa dari ketiga fasa dengan tegangan berbeda fasa  $120^\circ$ , meskipun hal ini mungkin atau mungkin tidak maksimum atau nol pda salah satu fasa. Gambar 8-3 menunjukkan suatu tipikal transien arus inrus apabila bank

Transformator energise dari terminal Y atau  $\Delta$ . Suatu studi yang pernah dilakukan memperlihatkan komponen harmonisa kedua dari gelombang arus inrus 15% atau lebih dari arus dasar. Akhir-akhir ini peningkatan desain inti dan inti baja menghasilkan penurunan seluruh arus harmonisa pada Transformator, dengan kemungkinan arus harmonisa kedua paling rendah 7%.

Inrus dapat terjadi pada 3 kondisi dan ketiganya dijelaskan sebagai: 1). Awal pertama; 2). Receiver dan; 3). Simpatitik.



Gambar 8-2: Penomena arus inrus magnetisasi

### 8. 3. 1 Awal Pertama Inrus

Hal ini mungkin terjadi bilamana Transformator dienergise setelah prioda lebih dahulu deenergise. Ini telah dikemukakan diatas dan memiliki potensi menghasilkan arus inrus maksimum.

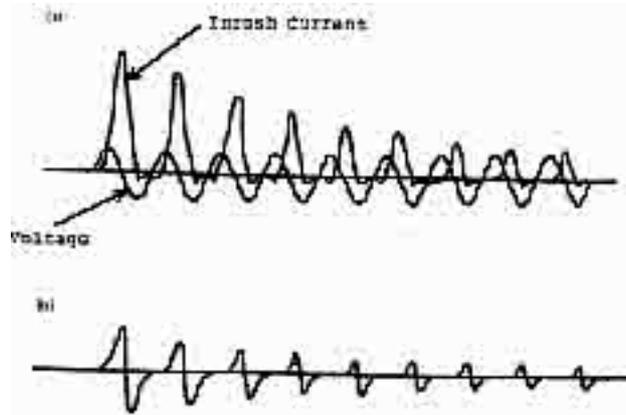
### 8. 3. 2 Pemulihan Inrus

Selama gangguan atau sesaat tegangan dip, inrus mungkin terjadi bila tegangan kembali normal. Hal ini disebut pemulihan inrus. Kasus terburuk adalah gangguan eksternal tiga fasa solid didekat bank Transformator. Selama gangguan tegangan menurun mendekati nol pada Transformator, dan pada saat gangguan telah dibebaskan, tegangan mendadak kembali keharga normalnya, hal ini dapat menimbulkan inrus magnetisasi, namun harga maksimumnya tidak akan lebih besr dari permulaan inrus karena Transformator energise sebagian.

### 8. 3. 3 Inrus Magnetisasi Simpatitik

Inrus magnetisasi dapat terjadi pada sebuah Transformator energise bila Transformator didekatnya sedang energise. Kasus umum yang kerap terjadi yaitu saat memparalel

Transformator kedua terhadap bank Transformator yang telah beroperasi. Komponen dc dari arus inrus dapat pula membuat jenuh Transformator energise, mengakibatkan arus inrus nyata. Arus peralihan ini, bilamana dijumlahkan dengan arus inrus dari bank Transformator yang tengah energise, menghasilkan suatu keseimbangan arus simetris total yang rendah pada harmonisa. Arus ini adalah arus yang mengalir pada sumber ke kedua bank Transformator.



Gambar 8-3: Tipikal arus inrus magnetisasi Transformator  
a). Arus fasa ke belitan terhubung wyei  
b). Arus fasa ke belitan terhubung delta

#### 8. 4 KARAKTERISTIK RELE DIFERENSIAL TRANSFORMATOR

Prinsip dasar proteksi dari Rele Diferensial telah dikemukakan pada bab sebelumnya. Untuk penggunaan pada Transformator Rele Diferensial menjadi sedikit kurang sensitif dan dengan karakteristik Rele Diferensial tipe Percentage antara 20 dan 60%. Hal ini memungkinkan penggunaan CT dengan ratio, tipe, karakteristik berbeda, perbedaan level arus energise primer, dan perbedaan Tap Transformator bila digunakan tipe ini. Untuk menghindarkan operasi yang tidak diinginkan akibat terjadi arus inrus magnetisasi Rele harus:

1. Didesain tidak sensitif terhadap transien arus inrus.
2. Menggunakan arus inrus harmonik untuk mencegah operasi.
3. Mencegah operasi untuk sementara selama prioda energise.

Untuk bank Transformator kecil, yang digunakan pada subtransmisi tegangan rendah dan sistem distribusi, digunakan Rele Diferensial elektromekanik dengan piringan induksi dengan karakteristik tipikal 50% dan dengan waktu operasi antara 0,08 sampai 0,10 detik (5 sampai 6 sikle untuk frekuensi 60 Hz). Tipe ini cukup imun terhadap arus inrus. Umumnya pada sistem seperti ini, arus inrus tidak membahayakan dan transien yang terjadi dapat diredam dengan cepat karena adanya resistansi sistem. Rele Diferensial piringan induksi tidak dapat beroperasi dengan efisien bilamana terdapat distorsi gelombang offset yang tinggi, dan Rele juga tidak mampu beroperasi pada

sistem dc. Keuntungan dari Rele jenis ini adalah selain desain yang sederhana harganya relatif rendah. Namun demikian, adalah tidak mungkin untuk meyakini bahwa Rele benar-benar tidak akan bekerja pada arus inrus, meski dari pengalaman Rele ini betul-betul umum. Salah seorang peneliti pernah mengatakan bahwa Rele jenis ini memiliki catatan panjang dan patut ditiru dalam hal unjuk kerja yang baik sepanjang penggunaannya. Tipikal arus angkat Rele adalah 2,5 sampai 3,0 A.

Untuk bank Transformator ukuran besar, bank Transformator pada sistem tegangan tinggi dan atau dimana diperlukan Rele yang tidak akan beroperasi pada saat terjadi arus inrus, maka digunakan Rele Diferensial yang tahan terhadap harmonisa. Untuk gangguan dimana tingkat harmonisa rendah, sehingga penanganan harmonisa memberikan fungsi yang efektif untuk menekan arus inrus dari arus-arus gangguan. Harmonisa kedua, yang merupakan komponen utama pada gelombang inrus digunakan untuk menahan atau mencegah operasi Rele. Pada beberapa tipe desain digunakan sendiri, pada desain lain, dikombinasikan dengan harmonisa lain. Tipikal arus angkat untuk Rele-Rele jenis ini bervariasi antara 0,75 sampai 2,5 A dengan waktu operasi 0,015 sampai 0,03 detik.

Ketidak pekaan sementara atau pemutusan Rele Diferensial tidak direkomendasikan sebagai proteksi terbatas. Kadangkala digunakan untuk memecahkan masalah sampai didapatkan sebuah penyelesaian yang dapat lebih memuaskan, dapat lebih efektif. sebuah kontak tipis pada saklar pengendali pemutus dapat dimasukkan sebuah resistor pada sirkit koil operasi guna mengurangi kepekaan Rele atau menghubungkan singkat sementara koil operasi Rele selama pemutus dalam keadaan tertutup. Sebuah unit trip 'high-set instantaneous' dapat dipakai untuk dioperasikan pada waktu terjadi arus gangguan internal pada saat energise.

## 8. 5 APLIKASI DAN HUBUNGAN RELE DIFERENSIAL PADA TRANSFORMATOR

Zona proteksi Diferensial untuk semua kasus mencakup seluruh sirkit yang masuk atau keluar daerah, dengan satu Rele untuk setiap fasa untuk semua daerah tersebut. Untuk Transformator dua belitan dengan satu set CT yang berhubungan dengan belitan, dua Rele dengan kumparan penahan dapat dipakai. Untuk Transformator multi belitan, seperti bank Transformator 3 belitan, Auto Transformator dengan belitan tersier terhubung ke rangkaian eksternal, atau dimana Pemutus ganda dan CT mensuplai suatu belitan tunggal (seperti pada rel tipe Ring atau konfigurasi Pemutus dan 1/2) maka digunakan Rele dengan kumparan multi penahan. Rele Diferensial, tersedia dalam berbagai jumlah belitan penahan, mulai dari 1, 2, 3, 4 dan lebih dari 6 dengan satu belitan operasi. Karakteristik Rele tersebut hampir sama.

Aplikasi dasar utama dari Rele adalah:

1. Menggunakan belitan penahan untuk masing-masing sirkit sumber gangguan.

2. Hindarkan memparalel CT dari penyulang dengan CT dari sumber gangguan.
3. Paralel CT penyulang dengan hati-hati.

Alasan dan logika dari ketiga hal diatas akan nampak pada bahasan nanti. Arus yang melalui belitan penahan Rele Diferensial harus sefasa dan harus memiliki perbedaan minimum antara arus beban dan gangguan eksternal. Idealnya perbedaan pada kedua keadaan adalah nol, namun dengan ratio CT dan level tegangan yang berbeda, dalam praktek hampir tidak mungkin membuat perbedaan ini sama dengan nol. Ada dua langkah yang disarankan guna mendapatkan hubungan yang benar dan penyetelan yang baik.

1. Phasing: menggunakan unit Y -  $\Delta$ , untuk meyakinkan arus sekunder dari Rele pada fasa yang sama.
2. Ratio Adjustment: pemilihan ratio CT dan atau Tap Rele untuk mengurangi arus perbedaan yang akan mengalir pada sirkit operasi Rele.

Rekomendasi dan kriteria yang diberikan diatas akan lebih baik dijelaskan dengan contoh.

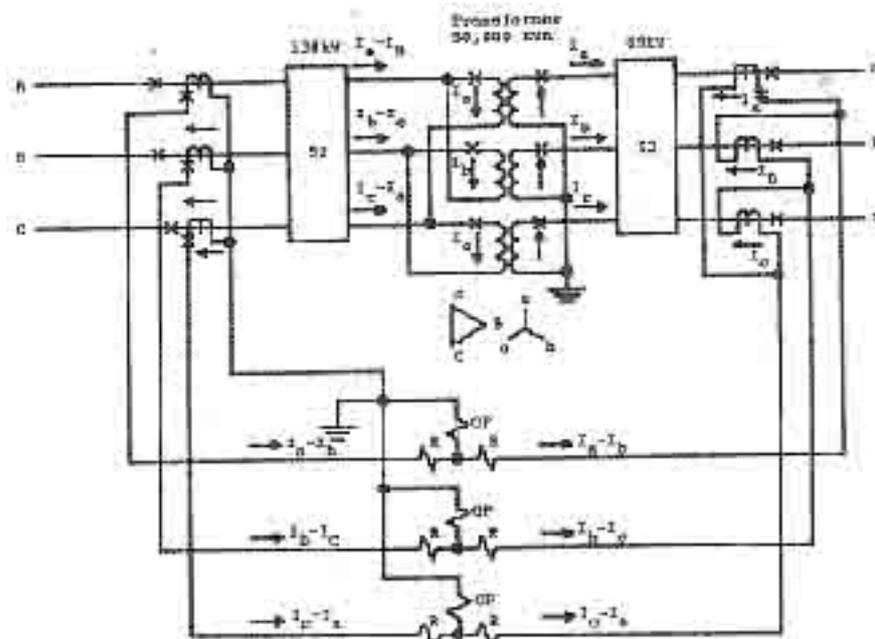
## 8. 6 CONTOH HUBUNGAN PROTEKSI DIFERENSIAL UNTUK BANK TRANSFORMATOR DUA BELITAN HUBUNGAN WYEI - DELTA

Tinjau bank Transformator hubungan Y -  $\Delta$  seperti diperlihatkan pada Gambar 8-4. Tegangan ABC hubungan  $\Delta$  mendahului tegangan/arus ABC hubungan Y sebesar 300, mengikuti standar ANSI, fasa ABC di sisi tegangan tinggi dan abc disisi tegangan rendah. Arus-arus fasa sekunder pada Rele Diferensial dapat diperoleh dengan menghubungkan satu set abc CT dalam hubungan Y atau  $\Delta$  dan satu set ABC CT dalam hubungan  $\Delta$  dan Y berturut-turut. Meski hubungan Y abc CT akan menghasilkan operasi yang salah untuk gangguan tanah eksternal. Arus urutan nol yang disuplai oleh pentanahan Y Transformator ke gangguan eksternal pada sisitem abc dapat mengalir melalui hubungan Y CT abc ke kumparan penahan Rele kembali melalui kumparan operasi. Hal ini karena arus urutan nol bersirkulasi pada hubungan  $\Delta$  Transformator dan tidak mengalir pada sistem ABC untuk menghasilkan penahan balansing gangguan eketernal yang tepat, karenanya CT belitan Transformator yang terhubung Y harus dihubungkan secara  $\Delta$ . Hal ini akan menyebabkan sirkulasi arus urutan nol hanya pada hubungan CT dan tidak melalui Rele.

### 8. 6. 1 Langkah Pertama: Phasing

Kedua set CT harus dihubungkan sehingga arus sekunder yang menuju belitan penahan Rele sefasa untuk setiap arus beban atau gangguan eksternal. Bila diasumsikan arus tiga fasa seimbang mengalir melalui Transformator. Arah arus tidaklah penting selama arus-

arus tersebut mengalir menuju bank Transformator. Hal ini diperlukan sekali dan memudahkan untuk mengawali sisi wyei Transformator, dalam Gambar 8-4, bila  $I_a$ ,  $I_b$ , dan  $I_c$  mengalir disisi Y dan menuju kekanan kedalam sistem abc, dengan polaritas Transformator seperti dalam gambar, arus-arus tersebut akan mengalir pada belitan tegangan tinggi ABC sebagai  $I_a - I_b$ ,  $I_b - I_c$  dan  $I_c - I_a$ , mengalir kekanan pada fasa A,B dan C berturut-turut.



Gambar 8-4: Hubungan Rele Diferensial untuk proteksi bank Transformator dua belitan

Dengan CT abc terhubung delta seperti dijelaskan diatas, CT ABC harus dihubungkan wyei, dengan polaritas masing-masing CT diperlihatkan dalam gambar, arus sekunder  $I_a - I_b$ ,  $I_b - I_c$  dan  $I_c - I_a$  mengalir menuju belitan penahan Rele Diferensial. Untuk gangguan eksternal arus-arus ini harus mengalir keluar kesisi lain belitan penahan dan terus kekanan kembali kesisi wyei abc, sedangkan  $I_a$ ,  $I_b$ , dan  $I_c$  mengalir kearah kiri sekunder CT. Bagian terakhir adalah menghubungkan CT abc dalam hubungan delta untuk memperoleh arus-arus sekunder yang tepat. Ini adalah langkah pertama phasing.

Secara ringkas, phasing dilakukan dengan asumsi arus seimbang mengalir disirkuit wyei Transformator. Arus ditansfer melalui Transformator kesisi delta, hubungkan CT disisi delta dalam hubungan wyei dan ke koil penahan Rele membawa arus tersebut melalui Rele kekoil penahan lain, dan hubungan CT pada sisi wyei Transformator dalam hubungan delta guna mendapatkan arus-arus koil penahan. Apabila bank Transformator dihubungkan delta pada kedua sisinya, maka CT pada kedua sisi Transformator harus dapat dihubungkan wyei ke Rele Diferensial. Untuk wyei ditanahkan, bank Transformator wyei - ditanahkan tanpa tersier, atau dengan tersier yang tidak dihubungkan ke terminal, maka hubungan CT yang dibutuhkan adalah hubungan delta untuk kedua sisi Transformator. Mungkin saja digunakan CT hubungan wyei jika bank Transformator terdiri dari 3 Transformator 2 belitan

independen dihubungkan Wyei - Wyei ditanahkan keduanya. Meski jenis Transformator yang digunakan adalah bank Transformator 3 fasa, maka direkomendasikan menggunakan CT hubungan delta. Pada bank Transformator yang dihasilkan dari interaksi fluksi karena konstruksi.

Pada titik ini muncul sebuah pertanyaan dapatkah Rele Diferensial memberikan proteksi untuk gangguan tanah bilamana CT terhubung delta. Jawabannya adalah, untuk gangguan tanah Rele dapat beroperasi bilamana arus-arus urutan positif dan negatif terlibat pada gangguan tersebut. Rele Diferensial beroperasi pada komponene gangguan total pada gangguan internal jadi pada saat terjadi gangguan satu fasa ketanah arus gangguan total adalah  $I_1 + I_2 + I_0$  dan  $I_1 = I_2 = I_0$ , sehingga Rele dengan CT terhubung delta akan menerima  $I_1 + I_2$  atau  $2 I_1$ , untuk gangguan internal. Dengan mengacu pada Gambar 8-4, sebuah gangguan internal satu fasa ketanah disisi 69 kV akan memberi masukan arus urutan positif dan negatif dari sisi 138 kV, dan arus urutan positif, negatif dan nol dari sisi 69 kV. CT yang terhubung delta disisi 69 kV akan mengeliminir arus urutan nol dari sisi 69 kV, namun penjumlahan dari arus-arus urutan positif dan negatif dari kedua sisi penjumlahan keduanya mengalir melalui belitan operasi pada Rele Diferensial. Untuk gangguan internal satu fasa ke tanah pada sisi 138 kV, arus-arus urutan positif, dan negatif disuplai dari sisi 69 kV, dan komponen urutan positif, negatif, dan nol disuplai dari sisi 138 kV. Pada keadaan ini, Rele Diferensial akan menerima penjumlahan semua arus-arus urutan  $I_1 + I_2 + I_0$ , karena CT terhubung Wyei.

### 8.6.2 Langkah Kedua: Pemilihan Tap dan Ratio CT

Sangat penting untuk mengurangi ketidak seimbangan arus yang mengalir melalui koil operasi pada waktu operasi normal dan gangguan eksternal. Kebanyakan Rele Diferensial Transformator memiliki Tap untuk memudahkan tujuan diatas. Hal ini untuk memberikan perbedaan pada arus penahan dalam orde 2 atau 3 sampai L. Persen ketidak seimbangan M, dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$M = 100 \times \frac{I_H/I_L - T_H/T_L}{S} \tag{8-1}$$

dimana  $I_H$  dan  $T_L$  adalah arus sekunder dan Tap Rele. H dan L menunjukkan sisi Transformator. H untuk sisi tegangan tinggi, dan L untuk sisi tegangan rendah dari belitan Transformator, sedangkan S adalah ratio Tap sisi tegangan tinggi terhadap Tap sisi tegangan rendah. Tanda minus tidaklah penting, sehingga bila  $T_H/T_L$  lebih besar dari  $I_H/I_L$ , tanda minus akan tetap memberikan angka positif. Rating arus untuk Transformator 50 MVA adalah:

$$I_H = \frac{50.000}{\sqrt{3} 138} = 209,18 \text{ A} \tag{8-2}$$

bilamana dipilih ratio CT 250:5, maka

$$I_H = \frac{209,18}{250/5} = 4,18 \text{ A} \quad 8-3$$

arus ini adalah arus sekunder disisi kiri belitan penahan pada Gambar 8-4 :

$$I_L = \frac{50.000}{\sqrt{3} \cdot 69} = 418,37 \text{ A} \text{ arus prime pada tegangan } 69\text{kV} \quad 8-4$$

bila CT yang dipakai adalah CT dengan ratio 500:5, maka:

$$I_L = \frac{418,37}{500/5} = 4,18 \text{ A}$$

ini adalah arus sekunder pada sisi 69 kV di sekunder CT atau:

$$I_L = \frac{418,37}{500/5} \times \sqrt{3} = 7,25 \text{ A} \quad 8-5$$

adalah arus sekunder disisi kanan belitan penahan pada Gambar 8-4, dengan demikian :

$$\frac{I_H}{I_L} = \frac{4,18}{7,25} = 0,577 \quad 8-6$$

seandainya Tap yang terdapat pada Rele dapat siset pada  $T_H = 5$  dan  $T_L = 9$ , maka:

$$\frac{T_H}{T_L} = \frac{5}{95} = 0,556 \quad 8-7$$

dengan demikian persen ketidakcocokan M adalah :

$$M = 100 \times \frac{0,577 - 0,556}{0,556} = 3,78\% \quad 8-8$$

Hasil ini menunjukkan kecocokan yang baik dengan karakteristik Rele Diferensial antara 20 dan 60%. Angka 3,78% memberikan margin keamanan yang cukup untuk mengantisipasi kesalahan yang dapat terjadi pada Rele dan CT. Teoritis, persen ketidakcocokan ini dapat mendekati persentase dari Rele Diferensial, namun tentu saja hal ini akan mengurangi margin keamanan yang ada. Dalam pemilihan ratio CT ini, sangat penting untuk menjaga ratio ini serendah mungkin untuk mendapatkan sensitivitas yang tinggi, tetapi (1). Tidak mengizinkan beban maksimum melebihi rating arus kontinyu Rele atau CT sebagaimana dinyatakan oleh pabrikan, dan (2). Gangguan

eksternal simetris maksimum tidak menyebabkan kesalahan ratio arus Transformer lebih dari 10%.

Untuk (1), beban maksimum harus merupakan arus tertinggi termasuk operasi darurat jangka waktu pendek. Transformator biasanya memiliki beberapa rating, yaitu: normal, dengan fan, dengan sirkulasi paksa, dan sebagainya. Pada kebanyakan Rele Diferensial Transformator koil penahan memiliki rating kontinuous 10 A atau lebih. Untuk (2), unjuk kerja CT telah dikemukakan pada bab sebelumnya. Secara umum, burden dari Rele Diferensial untuk keadaan gangguan eksternal sangat rendah. Lebih praktis untuk memakai CT terpisah dalam proteksi Diferensial dan tidak menghubungkan atau mengurangi Rele-Rele lain atau peralatan lain pada sirkit tersebut. Hal ini memberikan burden minimum dan total yang rendah untuk membantu unjuk kerja CT.

Meskipun, arus yang melalui Rele Diferensial pada waktu gangguan eksternal hanya merupakan bagian arus gangguan total yang mengalir melalui bank Transformator menuju titik gangguan. Jadi arus ini dibatasi oleh impedansi bank Transformator. Sebaliknya, pada gangguan internal, arus gangguan adalah total arus gangguan, tetapi pada keadaan ini tidak semua arus mengalir melalui CT, kecuali pada kasus gangguan tunggal. Beberapa CT mungkin mengalami saturasi pada saat gangguan internal. Meski hal ini tidak diinginkan, namun hal ini tidak menjadikan masalah dalam operasi Rele kecuali saturasi tersebut sangat mengganggu, selama arus operasi gangguan biasanya beberapa kali lebih besar dari arus angkat Rele.

## 8. 7 PERUBAH TAP BEBAN TRANSFORMATOR

Biasanya, Tap yang ada memungkinkan untuk memodifikasi ratio tegangan 10% dari tegangan dan atau untuk kendali VAR. Rele Diferensial dapat digunakan seperti diatas. Ratio CT dan pemilihan Tap Rele harus dibuat pada harga tengah dari range perubah Tap dan dengan harga M yang rendah. Penjumlahan harga M dan setengah dari range Tap pengubah harus berada diantara karakteristik Rele persentage. Jadi dalam contoh pada Gambar 8-4, misalkan bank Transformator memiliki Tap 10% untuk merubah tegangan 69 kV menjadi maksimum 10% atau minimum -10%. Dengan memilih ratio dan Tap dipilih pada harga tengah dari range Tap yang ada dengan harga  $M = 3,78\%$ , maka maksimum ketidakcocokan akan menjadi  $10\% + 3,78\%$ , yaitu  $13,78\%$ , yang akan terjadi pada Tap tegangan maksimum atau minimum. Harga ini masih berada pada karakteristik Diferensial persentage.

## 8. 8 CONTOH: PROTEKSI DIFERENSIAL UNTUK BANK TRANSFORMATOR MULTI BELITAN

Pada Gambar 8-5 diperlihatkan bank Transformator 3 belitan hubungan Y -  $\Delta$  - Y. Diskusi ini juga berlaku untuk sebuah Autotransformator dengan tersier  $\Delta$ . Dengan ketiga belitan terhubung ke rangkaian eksternal, diperlukan Rele Diferensial

Transformator dengan 3 belitan penahan. Hal ini memerlukan satu set CT untuk masing-masing rangkaian, terhubung pada belitan penahan berbeda, jadi zona proteksi adalah areal diantara beberapa CT. Rele Diferensial tipe 2 belitan dapat pula digunakan pada Transformator multi belitan bila:

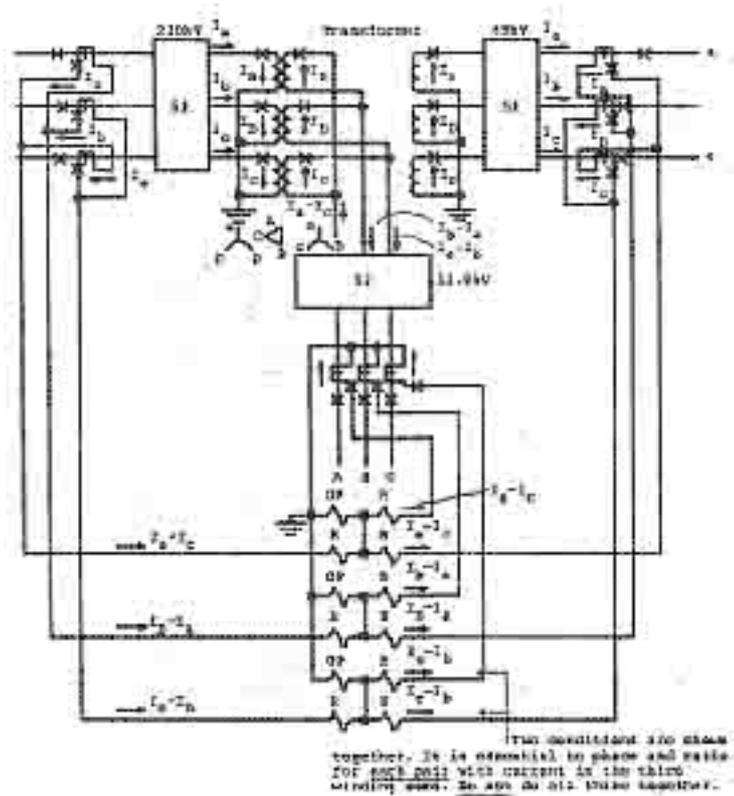
1. Belitan ketiga adalah belitan tersier dan tidak terhubung ke rangkaian eksternal.
2. Sirkuit yang terhubung ke belitan tersier dipandang sebagai bagian zona proteksi. Hal ini mungkin bilamana tidak terdapat Pemutus tambahan, atau belitan digunakan untuk mensuplai Transformator tambahan, dan seterusnya.
3. Belitan tersier memiliki reaktansi sangat tinggi sehingga gangguan pada sistem bersangkutan tidak akan cukup besar untuk mengoperasikan Rele Diferensial Transformator.

Kedua langkah, phasing dan Pemilihan Tap dan ratio CT juga dapat dipakai pada multi belitan. Sangat penting, bahwa langkah kedua dilakukan berpasangan, yaitu: hubungkan dan set CT dan Rele pada kedua belitan Transformator, abaikan dan diasumsikan arus pada belitan lain nol. Lanjutkan dengan pasangan belitan yang lain. Pada contoh hal ini akan coba diterapkan. Pada Gambar 8-5, terdapat dua belitan wyei ditanahkan dan satu belitan delta. Dari diskusi sebelumnya, CT pada belitan yang terhubung wyei harus dihubungkan delta untuk menghindari operasi pada waktu gangguan tanah eksternal. CT pada belitan yang terhubung delta harus dihubungkan secara bintang untuk mengakomodasi pergeseran fasa 300. Langkah pertama phasing adalah memilih kedua pasangan. Meskipun ini berubah-ubah pada contoh ini pasangan harus termasuk delta dan salah satu dari wyei.

Diawali dengan belitan wyei sebelah kiri, diasumsikan bahwa arus seimbang  $I_a$ ,  $I_b$ , dan  $I_c$  mengalir kekanan rangkaian. Arus tersebut melalui pasangan belitan wyei - delta dan menuju sistem ABC menjadi  $I_a - I_b$ ,  $I_b - I_a$  dan  $I_c - I_b$ . Arus-arus disisi kanan belitan wyei diasumsikan nol, CT terhubung wyei pada sistem ABC memberikan arus-arus yang sama di sekunder pada belitan penahan Rele Diferensial. Arus-arus sekunder harus disuplai melalui sebelah kiri belitan penahan. Hal ini dapat dicapai dengan jalan menghubungkan CT dalam hubungan delta. Bilamana langkah phasing ini telah selesai, pasangan kedua adalah belitan bintang disebelah kiri dan belitan wyei disebelah kanan dengan nol pada rangkaian delta.

Sekarang  $I_a - I_c$  pada koil penahan belitan wyei; hal sama untuk  $I_b - I_a$  dan  $I_c - I_b$ . Dengan  $I_a$ ,  $I_b$ , dan  $I_c$  mengalir kekanan menuju kanan belitan wyei, CT dapat dihubungkan seperti kebutuhan dalam hubungan delta. Hal ini melengkapi langkah pertama. Bank Transformator multi belitan umumnya memiliki rating MVA berbeda untuk belitan yang berbeda, dan hal ini dipergunakan untuk menentukan ratio CT. Misalkan rating Transformator pada Gambar 8-5 masing-masing 60, 40, dan 25 MVA dengan tegangan 230/69/13,8 kV. Maka rating arus untuk masing-masing belitan akan menjadi:

$$I_H = \frac{60.000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 150,61 \text{ A} \qquad \qquad \qquad 8-9$$



Gambar 8-5: Hubungan Rele Diferensial untuk proteksi belitan bank Transformator 3 fasa

bilamana dipilih ratio CT 150 : 5, maka arus sekunder menjadi

$$I_H = \frac{150,61}{150/5} = 5,02 \text{ A}$$

atau

$$I_H = \frac{150,61}{150/5} \sqrt{3} = 8,70 \text{ A} \quad \text{pada belitan penahan} \quad 8-10$$

sedangkan:

$$I_M = \frac{40.000}{\sqrt{3} \cdot 69} = 334,70 \text{ A} \quad 8-11$$

bila CT yang dipakai adalah CT dengan ratio 400:5, maka arus sekunder menjadi:

$$I_M = \frac{334,7.0}{400/5} = 4,18 \text{ A} \quad \text{sekunder}$$

atau

$$I_M = \frac{334,70}{400/5} \sqrt{3} = 7,25 \text{ A pada belitan Rele} \quad 8-12$$

dan

$$I_L = \frac{25.000}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 1045,92 \text{ A pada tegangan 13,8 kV} \quad 8-13$$

bila dipilih ratio CT 1200 : 5, maka arus sekunder menjadi:

$$I_L = \frac{1045,92}{1200/5} = 4,36 \text{ A pada CT dan Rele} \quad 8-14$$

Rating arus ini berguna dalam memilih ratio CT, tetapi tidak dapat digunakan seperti pada pemilihan Tap Rele dan menghitung ketidakcocokan. Sangat esensial dalam hal ini untuk memilih harga MVA dan melakukannya pada pasangan dengan MVA belitan lain NOL. Hanya bila hal ini dilakukan akan diperoleh keseimbangan arus Rele Diferensial yang benar untuk semua kombinasi arus selama pembebanan dan gangguan, juga pada waktu salah satu belitan tidak digunakan. Harga yang dipilih tidak penting pada bagian ini. Jadi untuk contoh, diasumsikan bahwa daya 40 MVA pertama mengalir dari 230 kV menuju 69 kV dengan MVA nol pada sistem 13,8 kV. Hal ini lebih menyenangkan dan persamaan 8-12 memberikan arus pada koil penahan kiri. Pada sisi 230 kV, koil penahan kanan, arus yang seimbang adalah:

$$I_{230} = \frac{40.000}{\sqrt{3} \times 230 (30)} \times \sqrt{3} = 5,80 \text{ A sekunder} \quad 8-15$$

Seandainya bahwa Rele memiliki Tap termasuk 5 dan 6, dengan menggunakan Tap tersebut, % ketidakcocokan adalah:

$$M = 100 \times \frac{5,8/7,25 - 5/6}{5/6} \cdot 100 = \frac{0,8 - 0,83}{0,8} \cdot 100 = 4,17\% \quad 8-16$$

Hal ini masih berada pada karakteristik Rele Diferensial Transformator. Dengan memilih Tap 5 pada belitan penahan sisi 230 kV, dan Tap 6 pada sisi 69 kV belitan penahan terbentuk. Selanjutnya untuk pasangan lain, misal dipilih daya 25 MVA dari sistem 230 kV menuju 13,8 kV, yang akan memberikan 4,36 A pada belitan penahan 13,8 kV, sedang pada sisi 230 kV adalah:

$$I_{230} = \frac{25.000}{\sqrt{3} \times 230 (30)} \times \sqrt{3} = 3,60 \text{ A} \quad 8-17$$

dengan memilih Tap 6 pada sisi 13,6 kV, harga ketidakcocokan adalah :

$$M = 100 \times \frac{3,62/4,36 - 5/6}{1,67} 100 = \frac{0,83 - 0,83}{0,83} 100 = 0\% \quad 8-18$$

CT cocok. Pada pemilihan Tap yang tersedia pada bagian Rele Diferensial Transformator, pemeriksaan harus dilakukan untuk melihat bahwa arus beban maksimum tidak melebihi rating arus kontinyu sesuai pabrikasi. Hal ini melengkapi langkah kedua. Sekali lagi pemilihan seting dalam pasangan akan memberikan operasi benar [tidak ada pemutusan/trip] untuk setiap beban campuran atau gangguan antara beberapa belitan. Langkah terakhir adalah untuk meyakinkan bahwa unjuk kerja CT terhadap gangguan internal sebagaimana pada gangguan eksternal seperti dikemukakan pada 8. 6. 2.

## 8. 9 APLIKASI ALAT BANTU UNTUK MENYEIMBANGKAN ARUS

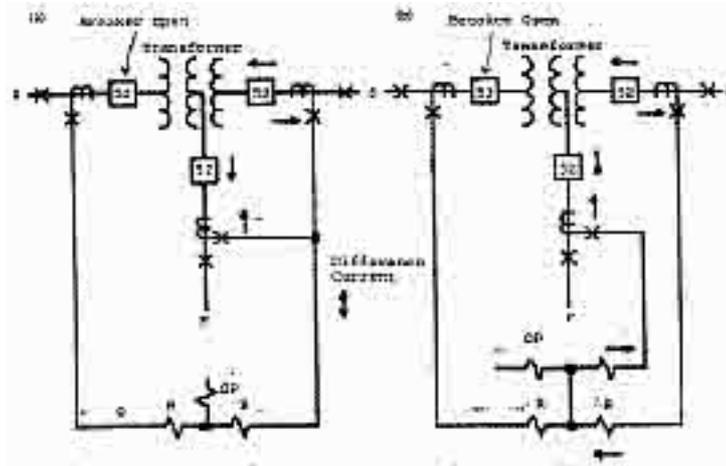
Pada suatu saat, mungkin sukar untuk mendapatkan harga kecocokan M yang dapat diterima pada waktu menggunakan CT dan atau Tap Rele Diferensial tertentu. Dalam kasus ini dibutuhkan penggunaan CT pembantu atau Transformator penyeimbang arus. Lebih baik menggunakan ini untuk mengurangi arus ke Rele bila mungkin. Mengurangi arus sekunder ke Rele berarti mengurangi beban Rele sebesar kuadrat ratio arus. Apabila arus meningkat menuju Rele, beban Rele meningkat sebesar kuadrat ratio arus. Hal ini tidak termasuk beban dari alat bantu, yang harus ditambahkan ke beban total sekunder pada CT.

## 8. 10 PARALEL CT PADA RANGKAIAN DIFERENSIAL

Pada bagian 8. 5, direkomendasikan bahwa sebuah koil penahan dipergunakan untuk setiap sumber dan memparalel sebuah sumber dan penyulang harus dihindarkan. Hal ini kadangkala dilakukan atau dipertimbangkan untuk digunakan pada bank Transformator multi belitan atau dua bank pada zona proteksi sama. Kesulitan yang mungkin dialami diilustrasikan pada Gambar 8-6. Tidak ada masalah dalam memparalel dua set CT seperti ditunjukkan selama sirkit ketiga belitan Transformator digunakan. Nmun, dengan kemungkinan operasi darurat, dimana Pemutus sebelah kiri terbuka, penahan hilang dari Rele dan Rele Diferensial beroperasi sebagai unit arus lebih yang sensitif, seperti ditunjukkan dalam Gambar 8-6a, arus mengalir dari sumber disebelah kanan menuju penyulang harus nol. Hal ini sulit dilakukan dengan CT dan level tegangan yang berbeda, meski dengan tingkat kecocokan sempurna.

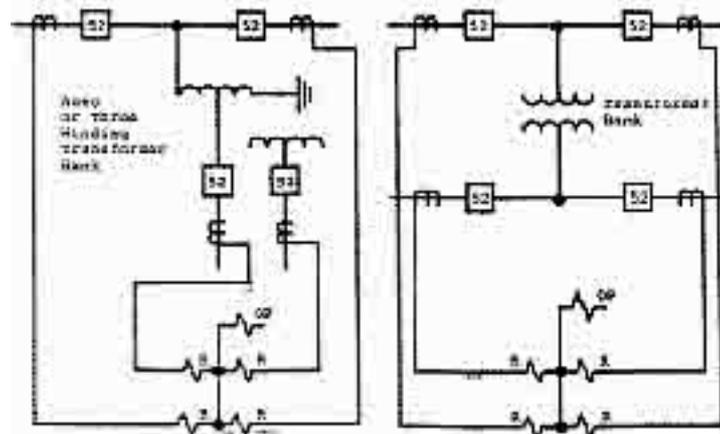
Perbedaan pada arus-arus penguat CT akan mengalir ke Rele Diferensial sebagaimana dijelaskan pada bab sebelumnya. Dengan kata lain, tidak ada penahan yang efektif untuk keadaan ini. Hubungan ini mungkin secara marginal aman untuk aliran beban, namun sangat rentan akan kesalahan operasi pada saat terjadi gangguan eksternal pada penyulang. Memparalel CT mungkin dilakukan jika Transformator tidak akan pernah beroperasi dengan Pemutus sebelah kiri terbuka. Ini tidak direkomendasikan, karena selalu ada kemungkinan dalam operasi terjadi situasi tidak biasa, sehingga memaksa

operator melakukan pembukaan Pemutus kiri tanpa direncanakan. Sebaliknya dengan rekomendasi penahan untuk setiap sirkit seperti dalam Gambar 8.6b. Penggunaan penahan penuh seperti ditunjukkan.



Gambar 8.6. Potensi kehilangan belitan penahan akibat paralel suatu sirkit pada proteksi Diferensial: (a). Tanpa belitan penahan; (b). Dengan belitan penahan penuh

Rangkaian CT pada penyulang mungkin diparalel pada skema diferensial selama dianggap tidak ada arus gangguan yang disuplai melalui sirkit. Perhatian harus diberikan, perlu disadari bahwa pada saat terjadi gangguan eksternal pada salah satu penyulang, beberapa arus sekunder dibutuhkan guna menyeimbangkan perbedaan untuk mengalirkan magnetisasi ke CT penyulang lain yang tidak mensuplai arus primer.



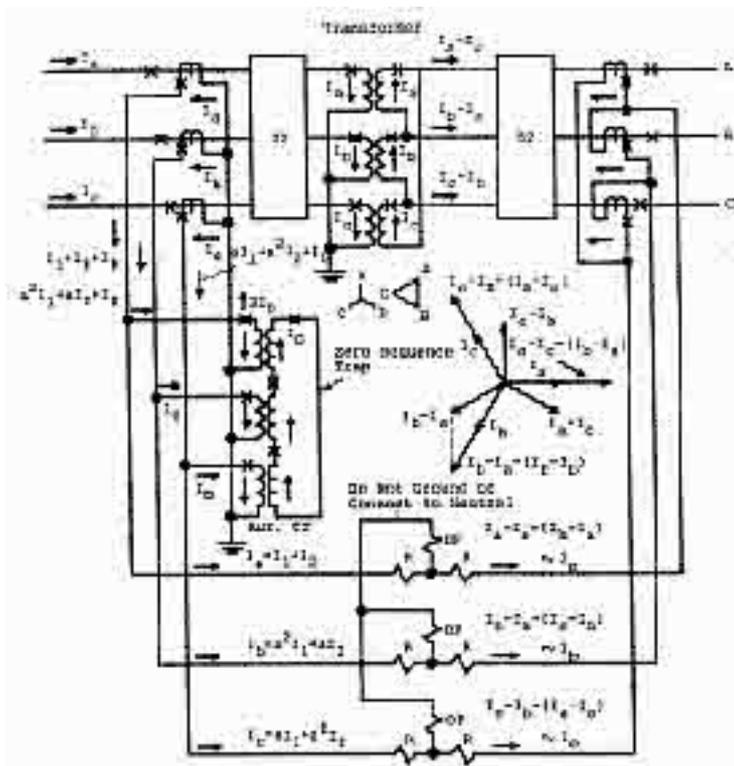
Gambar 8.7. Hubungan satu line sebuah proteksi Diferensial untuk multi hubungan pada Transformator

Tipikal contoh Transformator dengan sirkit diperlihatkan pada Gambar 8-7. Seperti direkomendasikan dan ditunjukkan, setiap sirkit harus dihubungkan kesuatu belitan penahan individu pada Rele Diferensial mengikuti prosedur seperti dijelaskan. Memparalel sirkit dan CT harus dihindarkan, tetapi bila diperlukan, masalah yang

dikemukakan harus ditinjau secara seksama dan didokumentasikan kepada personal operasi.

### 8.11 HUBUNGAN KHUSUS RELE DIFERENSIAL TRANSFORMATOR

Kadangkala, mungkin diperlukan untuk menggunakan CT hubungan bintang pada sebuah sirkit wye yang ditanahkan pada skema diferensial, dibanding menggunakan CT hubungan delta. Hal ini dapat terjadi pada aplikasi dimana zona diferensial diterapkan pada beberapa bank Transformator. Untuk itu, perhatian pertama adalah kemungkinan suatu inrus simpatitik. Zona harus dipelajari untuk melihat apakah ada kemungkinan beroperasi dalam kondisi dimana salah satu bank dapat energise, diikuti oleh energise bank Transformator kedua. Apabila kedua bank Transformator dalam zona proteksi selalu energise secara bersamaan, inrus simpatitik tidak akan terjadi. Kebanyakan dari kasus yang terjadi merupakan hasil dari pengurangan Pemutus Tenaga dan CT untuk penghematan, tetapi mengakibatkan penurunan fleksibilitas sistem.



Gambar 8-8: Hubungan Rele Diferensial khusus menggunakan CT hubungan bintang pada terminal Transformator hubungan wye - ditanahkan

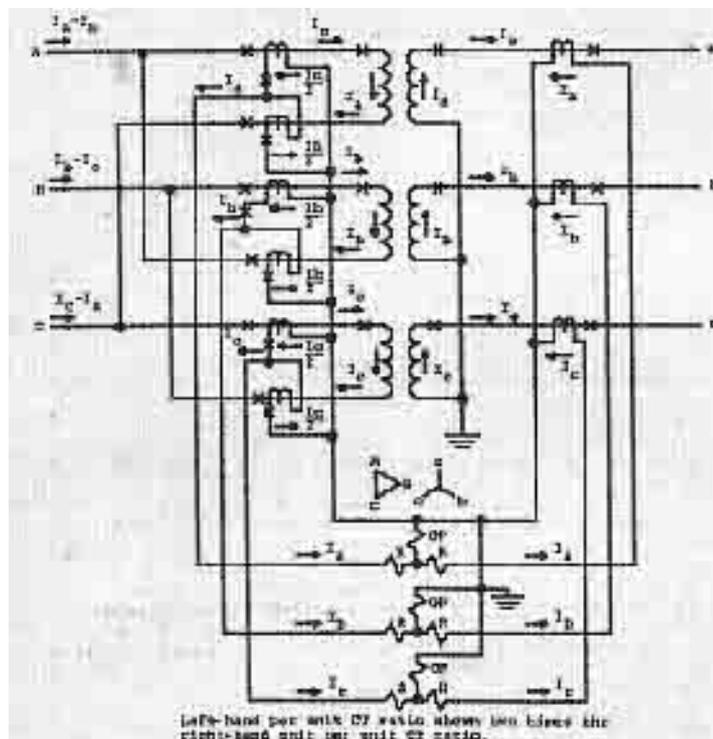
Gambar 8-8 memperlihatkan hubungan perangkat urutan nol untuk mengalihkan arus urutan nol dari Rele diferensial dengan CT terhubung wye pada sisi pentanahan Transformator. Esensi dari hubungan jenis ini adalah bahwa ada suatu jalan untuk arus urutan nol mengalir menuju dan keluar dari sebuah bank pada sekunder CT. Hal ini dilakukan oleh jebakan seperti ditunjukkan. Apabila jalan tidak tersedia pada sekunder

CT, sama dengan terdapat sirkit sekunder terbuka yang mengakibatkan saturasi dan tegangan tinggi dan membahayakan. Hal ini berlaku pula pada arus urutan positif dan negatif; ketidak tersediaan jalan untuk urutan nol akan muncul hanya pada saat terjadi gangguan tanah pada sistem seimbang.

Jebakan urutan nol, terdiri dari 3 CT bantu. Rationya tidak penting sepanjang CT tersebut sama. Perlu diingat bahwa koil operasi netral tidak terhubung ke CT netral atau pentanahan tidak diperlukan untuk arus urutan nol

mengalir untuk mendapatkan operasi Rele yang benar. Menghubungkan koil operasi netral ke CT netral menempatkan koil belitan operasi dan penahan menjadi paralel dengan belitan primer dari jebakan. Hal ini dapat menyebabkan penyimpangan arus pada saat terjadi gangguan tanah eksternal dan kesalahan operasi Rele.

Dengan CT disebelah kiri terhubung wyei seperti ditunjukkan pada Gambar 8.8, diperlukan untuk menghubungkan CT disebelah kanan terhubung delta guna memperoleh arus pada fasa melalui Rele diferensial untuk arus primer eksternal mengalir. Prosedur phasing harus dikerhakan seperti yang dijelaskan diatas, dimulai dengan menyeimbangkan arus-arus  $I_a$ ,  $I_b$ , dan  $I_c$  menuju belitan wyei Transformtor. Membawa arus-arus ini melalui Transformator, dapat dilihat dengan diagram fasor bahwa  $I_a - I_c - (I_b - I_a)$  sefasa dengan  $I_a$ , dan demikian pula untuk fasa-fasa lain. Harga perunit magnitude arus tigakali lebih besar, tetapi hal ini dapat diatur dengan CT dan Tap Rele. Gangguan tanah diantara zona diferensial akan mengoperasikan Rele melalui komponen-komponen arus gangguan positif dan negatif. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 8-8.

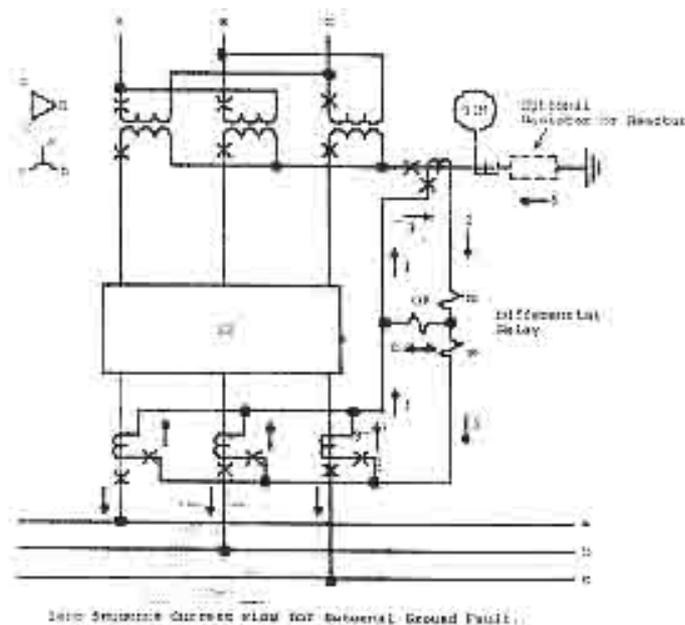


Gambar 8-9: Hubungan Rele Diferensial untuk proteksi tiga Transformator satu fasa hubungan wyei – delta menggunakan CT pada bushing Transformator

## 8. 12 PROTEKSI DIFERENSIAL BANK TRANSFORMATOR TIGA FASA DARI UNIT TRANSFORMATOR SATU FASA

Unit Transformator satu fasa dihubungkan dalam berbagai variasi konfigurasi tiga fasa yang umumnya wyei - delta dan dengan CT dan PMT pendukung seperti pada Gambar 8-4. Jika dibutuhkan atau diperlukan untuk menggunakan CT pada bushing Transformator, maka hubungan diferensial biasa tidak dapat dipergunakan bilamana CT terdapat didalam delta, seperti pada Gambar 8-9. Dua set CT terhubung paralel diperlukan untuk mendapatkan proteksi bagi gangguan tanah pada belitan ini. CT terhubungn bintang dapat digunakan pada kedua sisi fasor arus pada Gambar 8-9 menunjukkan keseimbangan bagi arus-arus simetris mengalir melalui bank. Dalam hal ini suatu ratio perbedaan 2:1 dalam perunit dari CT pada kedua sisi. Hal ini dapat diatur dengan CT atau Tap Rele atau dengan kombinasi keduanya. Karena masing-masing Transformator merupakan unit terpisah, tidak ada kemungkinan terjadinya efek tersier 'hantu' yang mengganggu operasi diferensial.

Untuk bank tiga fasa dimana ketiga belitan dan interkoneksi ketiganya pada tangki bersama, standar hubungan diferensial yang ditunjukkan Gambar 8-4, 8-5, 8-7 atau 8-8 dapat digunakan dengan CT seperti diperlihatkan atau dengan CT seperti pada bushing Transformator tiga fasa pada sisi lain.



Gambar 8-10: Proteksi Diferensial tanah (urutan nol) untuk bank Transformator hubungan delta – wye ditanahkan menggunakan Rele Diferensial konvensional

## 8. 13 PROTEKSI DIFERENSIAL TANAH (URUTAN NOL) TRANSFORMATOR

Skema diferensial tanah memberikan proteksi yang dapat diterima untuk bank Transformator delta - wyei ditanahkan. Hal ini berguna bilamana tidak terdapat atau tidak ada CT pada sisi delta, ini merupakan kasus umum untuk sistem distribusi dan

pengikat pada industri dengan hubungan delta pada sisi tegangan tinggi dan mungkin di proteksi menggunakan Fuse. Skema ini hanya melindungi belitan wyei ditanahkan dan sirkit pendukungnya dan hanya untuk gangguan tanah, yang merupakan gangguan yang umum terjadi dan sering terjadi. Tipikal aplikasinya diperlihatkan pada Gambar 8-10 menggunakan Rele diferensial konvensional. Zona diferensial termasuk sirkit antara kedua set CT. Sirkit delta menahan operasi untuk gangguan yang terjadi pada areal tersebut. Teknik phasing dan rationing seperti pada bab sebelumnya kecuali hanya menggunakan arus urutan nol mengalir ke gangguan eksternal. Arus-arus ini diperlihatkan dalam Gambar 8-10, Rele arus lebih-waktu, 51N diperlihatkan dihubungkan pada CT terpisah. Rekomendasi ini berlaku untuk semua Transformator yang ditanahkan. Hal ini adalah usaha terakhir proteksi gangguan tanah dan harus disetel untuk koordinasi dengan Rele lain yang termasuk jangkauan lebih Rele tersebut. Hal ini akan didiskusikan lebih detail. Rele tersebut dapat dihubungkan ke sirkit diferensial, yang akan menambah burden sirkit diferensial dan dapat mempengaruhi operasinya.

Bilamana sisi delta diproteksi dengan Fuse, gangguan tanah pada zona diferensial mungkin tidak memberikan arus yang cukup untuk dapat memutuskan atau membersihkan gangguan yang datang dari sumber sisi delta. Sebagaimana dinyatakan dimuka gangguan satu fasa ke tanah sebesar 1 pu disisi wyei dirasakan sebagai gangguan fasa ke fasa sebesar 0,577 pu disisi delta, yang akan menyulitkan deteksinya. Setiap gangguan dibatasi oleh impedansi netral dan atau resistansi gangguan yang mengurangi magnitudo gangguan. Jadi dalam banyak kasus, hampir tidak mungkin untuk membersihkan gangguan dengan Fuse sisi tegangan tinggi. Dengan demikian diferensial tanah sangat berguna untuk mengatasi gangguan tanah dalam zona operasinya, masalahnya adalah untuk membersihkan gangguan dari sumber sisi delta tanpa Pemutus lokal, dan dimana Pemutus terdekat berada pada Gardu yang lain.

## 8. 14 PERALATAN GUNA PEMINDAHAN SISTEM PEMUTUSAN

Tanpa adanya peralatan Pemutus, gangguan pada terminal primer Transformator ada beberapa kemungkinan untuk pemutusan. Pemutus jarak jauh guna membersihkan gangguan. Kesemua metoda ini tidak praktis bila digunakan.

### 8. 14. 1 Saklar Gangguan

Saklar gangguan -spring - loaded dihubungkan kesisi suplai delta. Operasi Rele proteksi Transformator untuk melepaskan Saklar dan sumber gangguan sistem. Rele proteksi pada Pemutus jauh akan merasakan gangguan tersebut dan akan beroperasi untuk membersihkan gangguan, dan membuka sumber. Umumnya sebagian besar adalah Saklar tunggal yang menggunakan gangguan satu fasa ke tanah untuk mengoperasikan Rele tanah jauh. Kerap kali, Rele jauh ini dapat beroperasi seketika guna mendapatkan isolasi secepatnya. Hanya ada sedikit instalasi Saklar gangguan 3 fasa ke tanah yang

menggunakan gangguan solid tiga fasa sebagai penggerak. Keuntungannya adalah redundan tinggi; satu atau dua Saklar dapat gagal dan masih mampu membersihkan gangguan. Apabila salah satu Sklar fasa dan Sklar tanah gagal, Rele tanah pada lokasi jauh dapat membebaskan gangguan. Kelemahannya adalah biaya tinggi, pemeliharaan mahal dan menyebabkan arus gangguan tiga fasa menjadi besar. Teknik Saklar tanah praktis dan relatif sederhana, namun demikian, beberapa rasa tak suka menempatkan secara sengaja gangguan pada sistem.

#### 8. 14. 2 Kanal Komunikasi

Rele proteksi Transformator menginisiasi suatu sinyal pemutusan yang ditransmisikan melalui suatu kanal pemindah pemutusan guna mengoperasikan Pemutus jauh. Kanal ini mungkin melalui power line carrier, sirkit telepon atau kanal gelombang mikro atau suatu pilot wire langsung. Sekuritas tinggi sangat penting untuk menghindari operasi pemutusan yang tidak diinginkan akibat sinyal asing pada kanal. Keadaan ini dan biaya yang tinggi adalah kelemahan utama. Tidak mungkin meningkatkan sekuritas dengan deteksi gangguan pada terminal pemutusan Pemutus, mengingat gangguan disisi rendah umumnya akan berada pada level yang rendah pula.

#### 8. 14. 3 Peralatan Pemutus Gangguan Terbatas

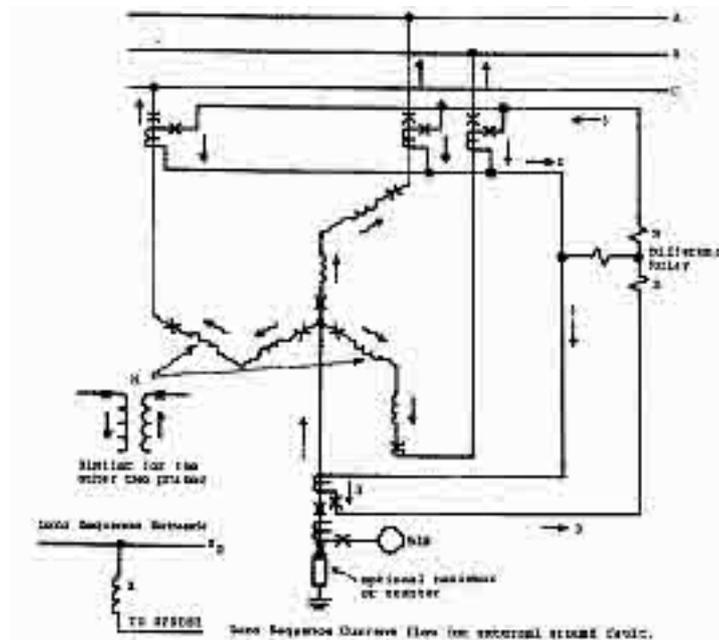
Suatu rangkaian Saklar atau Pemutus dengan kemampuan pemutusan gangguan terbatas diinstal pada Transformator disisi sumber delta. Rele proteksi Transformator menginisiasi pemutusan dari peralatan tersebut langsung atau dengan waktu tunda. Skema disusun berdasarkan probabilitas tinggi bahwa Rele jauh akan beroperasi dan membersihkan setiap arus gangguan yang tinggi dengan kecepatan tinggi dan sebelum Pemutus sirkit atau pemutus dapat membuka. apabila Rele jauh tidak merasakan gangguan atau beroperasi lambat level arus gangguan berada pada kapabilitas pemutusan dari peralatan lokal.

### 8. 15 DETEKSI GANGGUAN MEKANIS TRANSFORMATOR

Akumulasi gas atau perubahan tekanan didalam tangki Transformator adalah indikator adanya gangguan internal atau masalah. Peralatan berikut direkomendasikan untuk dipakai, meski peralatan ini dapat digunakan sebagai proteksi suplemen yang baik. Dalam banyak kasus, peralatan ini lebih sensitif, sehingga dapat bekerja pada saat terjadi gangguan internal kecil yang tidak dapat dideteksi oleh Rele Diferensial atau Rele lainnya. Namun perlu diingat bahwa operasi peralatan ini terbatas untuk masalah didalam Transformator. Peralatan ini tidak akan beroperasi pada saat terjadi gangguan pada bushing Transformator dan hubungan ke CT eksternal. Jadi zona proteksinya hanya didalam tangki, berlawanan dengan zona proteksi Rele Diferensial Gambar 8-4.

### 8. 15. 1 Detektor Gas

Peralatan pendeteksi Gas dapat diterapkan pada Transformator yang dibangun dengan tangki konservator. Tipe ini banyak digunakan di Eropa, tetapi tidak banyak dipakai di USA. Untuk unit Transformator dengan tanpa ruang gas, bila didalam tangki Transformator, peralatan akumulator gas disebut Rele Bucholz yang dihubungkan antara tangki konservator dengan tangki utama. Rele akan mengumpulkan setiap gas yang naik melalui minyak Transformator. Salah satu bagian Rele akan mengakumulasi gas selama prioda waktu tertentu untuk mendapatkan indiksi sensitivitas dari adanya busur api energi rendah. Rele umumnya digunakan untuk menyalakan alarm, selaman gas masih dalam batas yang diizinkan. Bagian lain dari Rele akan bereaksi pada gangguan berat, yang akan memaksa Rele membuka Pemutus pada kecepatan tinggi. Digunakan untuk memutuskan secara paralel dengan peralatan proteksi Transformator yang lain.



Gambar 8-11: Proteksi Diferensial tanah untuk bank Transformator hubungan Zigzag menggunakan Rele Diferensial konvensional

### 8. 15. 2 Perubahan Tekanan

Diterapkan pada Transformator tipe oil immersed. Salah satu tipe akan beroperasi bilamana terjadi perubahan tiba-tiba pada gas diatas minyak, jenis lain akan beroperasi bila terjadi perubahan pada minyak itu sendiri. Keduanya memiliki alat penyeimbang untuk perubahan yang lamban, dimana terjadi perubahan pembebanan dan temperatur. Keduanya sensitif terhadap busur api energi tinggi maupun rendah didalam Transformator dan memiliki karakteristik waktu - terbalik. Cepat untuk gangguan berat dan lambat pada waktu gangguan ringan. Umumnya, peralatan ini digunakan untuk memutus dengan kontak-kontak paralel dengan kontak-kontak pemutus Rele Diferensial serta Rele lain. Namun dapat pula hanya untuk memberikan sinyal alarm.

## 8. 16 PROTEKSI PENTANAHAN TRANSFORMATOR

Untuk mendapatkan suatu sistem pentanahan pada sisi delta suatu bank Transformator sistem tenaga digunakan suatu hubungan shunt pentanahan wyei - delta atau bank Transformator zig-zag. Dengan unit delta - wyei, sisi delta dioperasikan sebagai sebuah belitan tersier tanpa beban untuk mensirkulasikan arus urutan nol. Apabila sisi tersier ini memiliki CT didalam delta, CT ini dapat dihubungkan dengan Rele arus lebih - waktu 51N. Rele ini akan menerima IO untuk gangguan-gangguan tanah keluar dan sistem, oleh karenanya harus dikoordinasikan dengan Rele tanah lainnya. Proteksi Diferensial tanah, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 8-10 tersedia untuk unit pentanahan delta - wyei, dan sebagaimana diperlihatkan Gambar 8-11 digunakan untuk unit zigzag sebuah alternatif dapat digunakan Rele arus lebih - waktu tiga fasa, 51, masing-masing dihubungkan pada satu dari CT disisi jaringan. Karena beban tidak melalui unit ini, ratio CT dan Tap Rele dapat dipilih berdasarkan arus gangguan tanah.

Bank zigzag pada dasarnya mengandung 3 Transformator dengan ratio 1:1 yang terinterkoneksi seperti pada Gambar 8-11. Sirkulasi arus urutan nol diperlihatkan pada gambar tersebut. Arus urutan positif dan negatif tidak akan mengalir, karena arus-arus ini berbeda fasa 120°. Rele yang diaktifkan oleh tekanan tiba-tiba atau gas direkomendasikan dipakai untuk proteksi gangguan internal kecil. Gangguan antar lilitan selalu sulit untuk dideteksi. Pada unit zigzag, hal ini dapat dibatasi oleh impedansi magnetisasi dari fasa yang tidak terganggu. Pentanahan Transformator kerap kali dihubungkan langsung ke Rel atau Transformator daya bersangkutan tanpa peralatan pembatas atau Pemutus gangguan. Contoh tipikal akan hubungan unit pentanahan antara Transformator daya delta dan Pemutus Tenaga disisi kanan seperti pada Gambar 8-8. Aplikasi ini membutuhkan penggunaan penyebab arus urutan nol seperti ditunjukkan dalam gambar, mengingat adanya sumber urutan nol pada kedua sisi bank Transformator wyei - delta dengan pergeseran sebesar 300 melintasi bank.

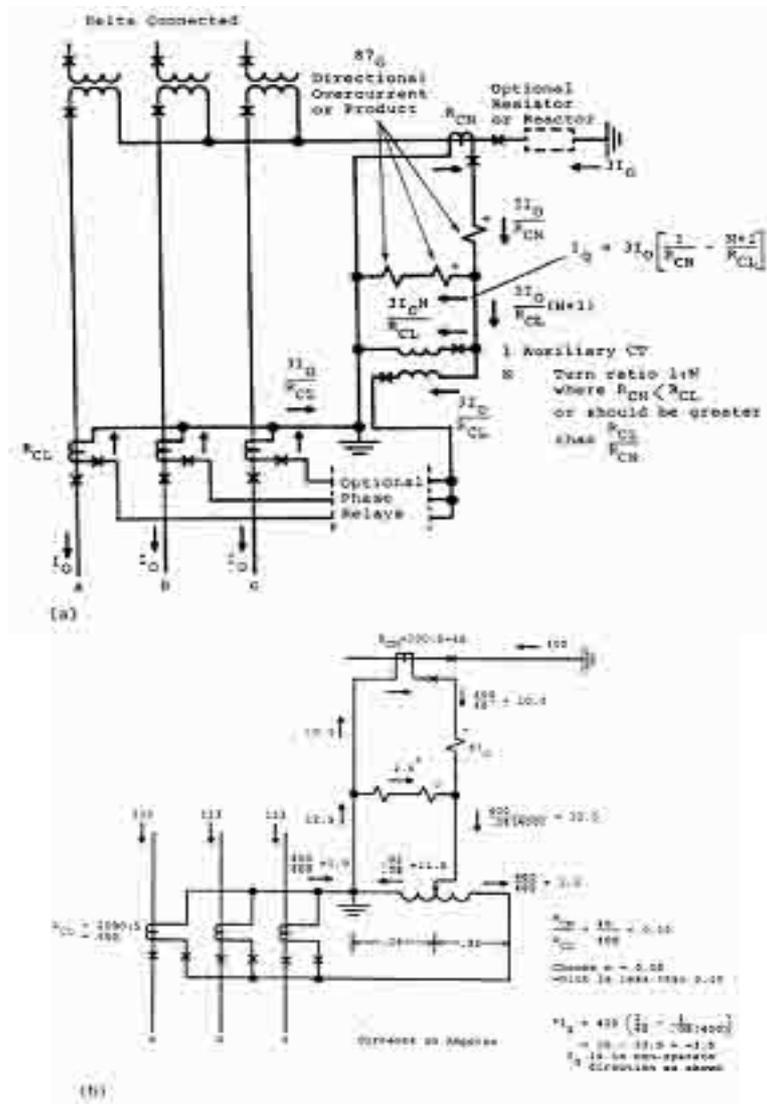
Dengan pentanahan bank antara zona diferensial Transformator sebagaimana diindikasikan, alternatif hubungan yang dapat diterapkan pada Gambar 8-8 adalah menghubungkan CT disebelah kanan dalam hubungan wyei dengan perangkat urutan negatif dan CT sebelah kiri dalam hubungan delta. Satu set CT bantu dapat dipakai sebagai pengganti perangkat urutan nol untuk mendapatkan isolasi terhadap arus urutan nol dan pergeseran 300. Perangkat yang disiapkan hanya terlibat bilamana terjadi gangguan tanah. Beberapa aransemen dapat dilakukan. Untuk melakukan ini, jangan menghubungkan CT utama dalam hubungan wyei dan ke delta - hubungan bantu, maka tidak ada lintasan urutan nol untuk arus-arus gangguan primer.

## 8. 17 PROTEKSI DIFERENSIAL TANAH DENGAN RELE TANAH

Bilamana ratio CT dan atau karakteristik CT tidak cocok untuk pemakaian pada Rele Diferensial konvensional, dapat digunakan sebuah Rele arus lebih berarah dihubungkan secara diferensial. Hal ini dapat digunakan bilamana arus gangguan tanah dibatasi oleh

impedansi netral atau bilamana digunakan CT netral rendah untuk mendapatkan sensitivitas yang tinggi untuk gangguan jauh pada penyulang distribusi. Dua buah penerapan diperlihatkan dalam Gambar 8-12 dan 8-13. Pada Gambar 8-14 dan 8-15 digunakan sebuah Transformator bantu 1:N. Salah satu dari dua diagram memperlihatkan operasi pada saat terjadi gangguan eksternal, lainnya untuk gangguan internal. Kedua tipe adalah ekuivalen dimana  $\frac{1-n}{n} = N$ .

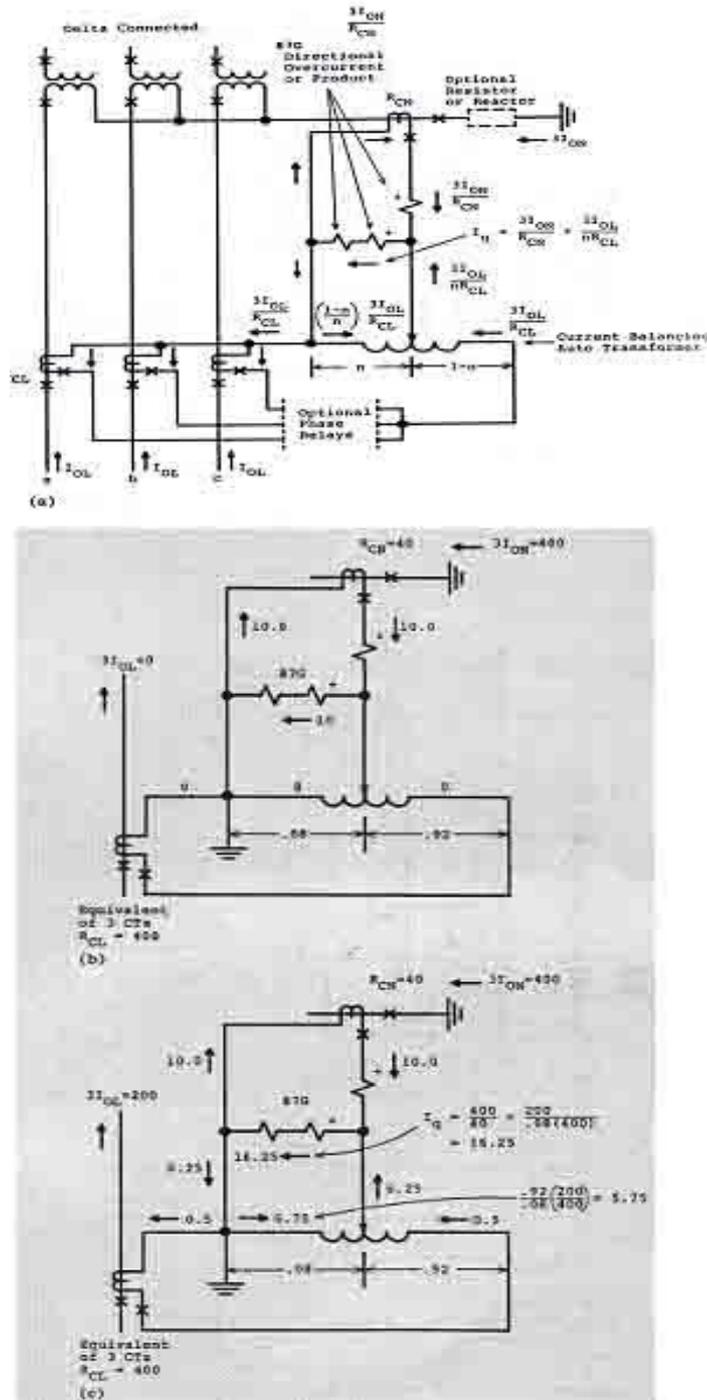
Dua tipe Rele dapat digunakan pada kedua skema, yaitu Rele arus lebih 'product' dan arus lebih berarah. Rele tipe pertama dapat berupa sebuah unit piringan induksi, dimana torka pengendali atau sirkit lag merupakan salah satu dari sirkit yang ada dan belitan lain merupakan belitan utama. Hal ini diperlihatkan dalam diagram sebagai dua koil dengan tanda polaritas +. Operasi Rele merupakan perkalian dari arus pada kedua sirkit dengan cosinus dari sudut antara keduanya.



Gambar 8.12

- (a). Proteksi Diferensial tanah pada bank Transformator delt – wyei ditanahkan menggunakan Rele arus lebih berarah dengan arus urutan nol mengalir akibat gangguan tanah eksternal;
- (b). Contoh aliran arus urutan nol untuk gangguan tanah eksternal (tanpa elemen Rele arah)

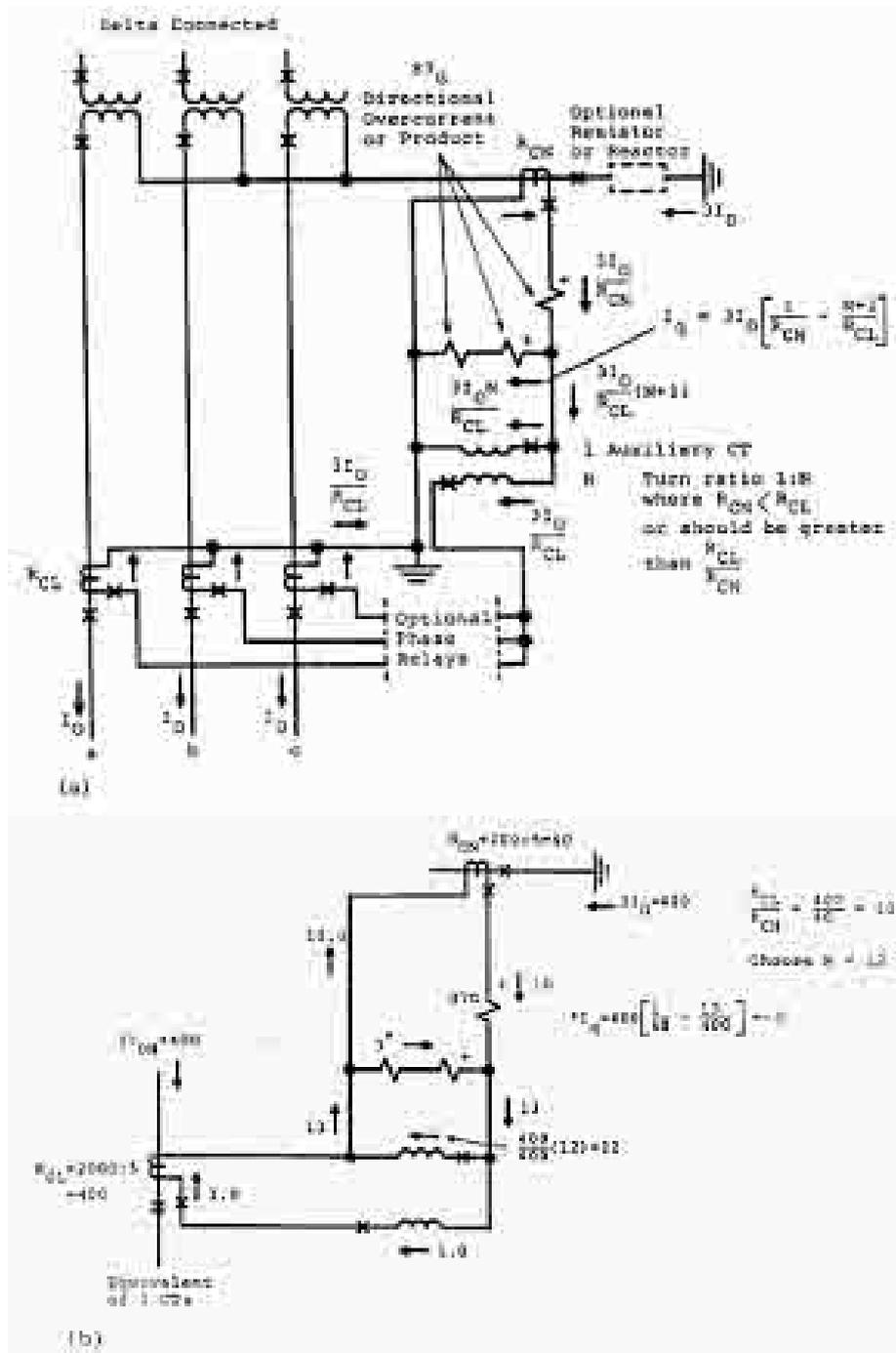
Apabila arus sefasa mengalir menuju tanda polaritas ( $\cos \theta = 1$ ), Rele memiliki torka operasi maksimum untuk menutup kontak. Bila salah satu arus menuju tanda polaritas pada salah satu koil sedangkan lainnya keluar dari tanda polaritas ( $\cos \theta = -1$ ), Rele memiliki torka penahan maksimum.



Gambar 8.13

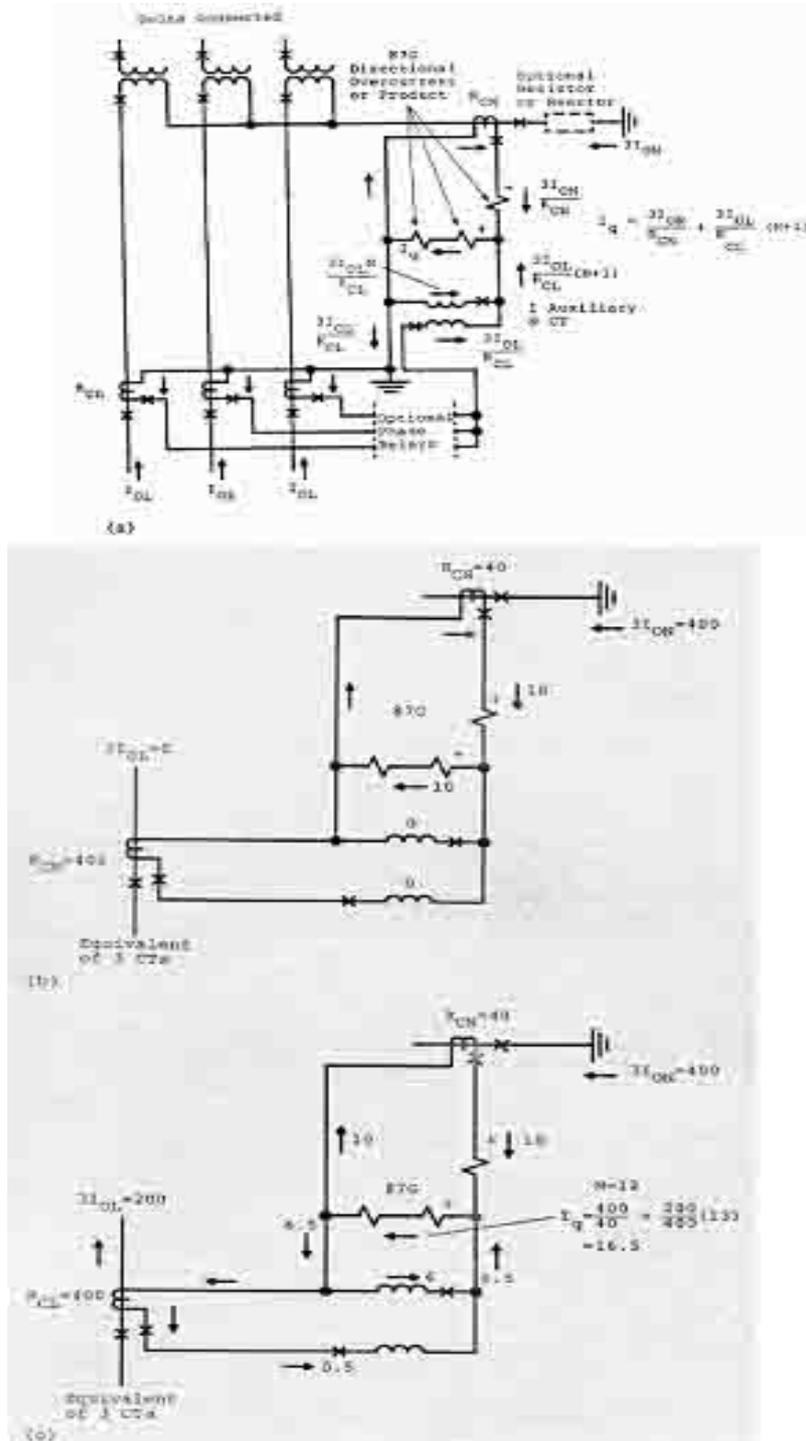
- (a). Operasi sistem Rele Diferensial Gambar 8-12 untuk gangguan internal dengan arus urutan nol mengalir untuk gangguan internal;
- (b). Contoh aliran arus urutan nol pada gangguan tanah internal dengan arus line nol;
- (c). Contoh aliran arus urutan nol pada gangguan tanah internal dengan arus line tidak sama dengan nol

Torka akan sama dengan nol bilamana kedua arus berbeda  $\pm 900$ . Rele ini dapat beroperasi dengan magnituden arus yang jauh berbeda selama perkalian ini lebih besar dari minimum angkat dan dengan kebebasan relatif dari variasi sudut fasa antara  $\pm 900$ . Rele memiliki karakteristik waktu terbalik, beroperasi sangat cepat pada waktu gangguan internal besar.



Gambar 8.14. Proteksi Diferensial tanah untuk bank Transformator delta –weye ditanahkan menggunakan Rele arus lebih berarah dengan CT bantu: (a). aliran arus urutan nol untuk gangguan tanah eksternal; (b). contoh aliran arus urutan nol pada gangguan tanah berarah eksternal

Rele arus lebih berarah memiliki suatu unit arah terpisah yang beroperasi sebagai unit pengali. Unit arus lebih dari Rele adalah tanpa arah dan beroperasi pada magnitudo arus yang melalui koil utamanya. Pada gambar adalah koil tanpa polaritas dan dihubungkan menyeberangi CT, memiliki karakteristik waktu terbalik, beroperasi cepat pada arus besar, tetapi hanya bila unit arah beroperasi.



Gambar 8.15. Operasi sistem Rele Diferensial Gambar 8.14: (a). arus urutan nol mengalir untuk gangguan internal; (b). contoh aliran arus urutan nol pada gangguan tanah inertal dengan arus line nol; (c). contoh aliran arus urutan nol pada gangguan tanah internal dengan arus line tidak sama dengan nol

Transformator bantu dibutuhkan untuk mendapatkan operasi diferensial yang benar, tidak beroperasi bila terjadi gangguan eksternal diluar zona diferensial, beroperasi bila terjadi gangguan tanah dalam zona diferensial.

Diperlihatkan bahwa skema operasi untuk kasus dimana tidak ada arus gangguan tanah yang berasal dari sistem menuju titik gangguan internal. Hal ini biasa untuk aplikasi pada industri dan distribusi. Tanpa arus, seperti pada Gambar 8.13b dan 8.15b, perlu diingat bahwa beberapa dari arus sekunder netral akan dibelokkan untuk mengeksitasi CT jaringan dan CT bantu. Sebagaimana didiskusikan pada bab sebelumnya.

Apabila arus tanah disuplai dari sistem pada gangguan internal, Rele product dapat diterapkan dengan salah satu koil dihubungkan melewati CT jaringan dan koil lain dihubungkan ke CT netral tanpa Rele bantu. Sebagaimana tertera, telah dikemukakan, Rele dapat beroperasi dengan perbedaan yang besar pada arus dan unjuk kerja CT. Rele arus lebih berarah dapat dihubungkan hanya pada CT jaringan untuk dapat beroperasi pada saat terjadi gangguan pada bank Transformator tanpa ada hubungan ke Ctnetral. Dalam banyak kasus penyambungan cara terakhir tidak memberikan sensitivitas tinggi, karena sumber tanah jauh umumnya terlampau lemah.

#### 8.18 PROTEKSI BANK TRANSFORMATOR DENGAN PENGGESER FASA TERKENDALI

Transformator yang dilengkapi dengan kendali pergeseran fasa didesain untuk digunakan pada pemindahan dua sistem tenaga. Desainnya kompleks dan khusus untuk penggunaan tertentu. Proteksi diferensial sukar atau hampir tidak mungkin dipakai pada sistem seperti ini, sehingga Rele yang digerakkan oleh tekanan atau gas digunakan untuk melayani proteksi jaringan, dengan cadangan menggunakan Rele arus lebih. Bilamana dimungkinkan penggunaan Rele Diferensial; mungkin dibutuhkan CT yang diinstal didalam unit tersebut, jadi proteksi sudah menjadi rencana dan bagian dari unit tersebut.

#### 8. 19 PROTEKSI ARUS LEBIH PADA TRANSFORMATOR

Proteksi arus lebih untuk gangguan fasa dan atau gangguan tanah umum digunakan pada Transformator. Proteksi ini dipakai sebagai proteksi utama untuk Transformator kecil atau unit Transformator lain yang tidak menggunakan proteksi diferensial atau sebagai proteksi cadangan unit Transformator besar yang diproteksi dengan Rele Diferensial. Untuk Transformator 10 MVA atau dibawahnya, Fuse utama juga sering digunakan. Proteksi lain adalah Rele arus lebih - waktu - terbalik untuk tegangan tinggi, Rele jarak digunakan untuk memberikan proteksi pada Transformator dan sirkit pendukungnya. Karena jenis proteksi ini dapat beroperasi dengan baik diluar zona proteksi Transformator, aplikasi dan penyetelannya adalah sebauah kombinasi antara proteksi Transformator dan proteksi bagian sistem yang lain. Penekanan disini adalah

proteksi Transformator dan pembahasan akan diperluas pula dengan proteksi peralatan terhubung, seperti penyulang primer dan proteksi jaringan.

Diinginkan untuk menset peralatan proteksi sesensitif mungkin, tetapi Fuse dan Rele arus lebih fasa harus tidak beroperasi pada keadaan yang mash dapat ditolerir. Rele-Rele diatur agar tidak beroperasi pada saat terjadi inrus magnetisasi (kecuali digunakan penahan harmonik), beban maksimum jangka pendek (cold load), atau pada gangguan maksimum tiga fasa sekunder. Tipikal seting antara 150 sampai 200 % dari arus terbesar. Hal ini mungkin membatasi operasi Rele pada gangguan primer.

Dengan kata lain, Rele dan atau Fuse harus mengamankan Transformator terhadap kerusakan akibat gangguan. Arus gangguan yang besar yang melewati Transformator akan mengakibatkan kerusakan termis dan mekanis. Temperatur tinggi dapat mempercepat kerusakan isolasi daya fisik dari arus-arus tinggi dapat menyebabkan tekanan pada isolasi, isolasi usang, dan gesekan-gesekan menyebabkan pergeseran pada belitan. ANSI/IEEE mendefinisikan batasan untuk gangguan tersebut.

## 8. 20 BEBAN LEBIH PADA TRANSFORMATOR MELALUI STANDAR KETAHANAN GANGGUAN

Standar ANSI/IEEE bagi Transformator daya dan distribusi menyatakan beban lebih Transformator - melalui - kapabilitas terhadap gangguan telah dirubah sekitar tahun 1977. Perbandingan perubahan tersebut diberikan pada Tabel 8-1. Pengali arus rating merepresentasikan maksimum arus yang mungkin dan berasal dari suatu sumber infinit. Jadi maksimum arus gangguan simetris yang melalui bank Transformator yang mempunyai impedansi 4% adalah  $1.0/0.04 = 25$  pu atau 25 kali rating arus Transformator.

Tabel 8-1: Standar Kapabilitas Aruslebih Transformator menurut ANSI/IEEE

Multiples of rated current	Transformer impedance (% of rated VA	Maximum current withstand (s)	
		1977 (1980)	1973
25	4	2	2
20	5	2	3
16	6	2	4
≤ 14	≥ 8	2	5

Impedansi sumber tidak pernah nol, tetapi dapat saja sangat kecil dibanding impedansi Transformator, terutama untuk industri dan Gardu distribusi kecil yang terhubung ke sistem tenaga besar. Pada kondisi ini, pengali merepresentasikan batasa maksimum Segera setelah semua batasan dirubah menjadi 2s engineer yang berkecimpung dalam bidang proteksi menemukan bahwa mereka harus menggunakan kurva pembebanan lebih thermis (Gambar 8-16a) yang dipublikasikan pada standar ANSI guna dipakai sebagai penuntun dalam penerapan Rele proteksi pada Transformator daya, khususnya proteksi arus lebih pada Transformator, dan batasan 2s yang merupakan standar baru ini

akan membatasi sama sekali proteksi arus lebih Transformator. Dilema ini memberikan perubahan kedepan yang diterima akhir tahun 1982 dan ringkasannya diberikan dalam Tabel 8-2 dan Gambar 8-16. Perubahan ini tegabung pada standar yang ada. Komplik muncul karena C37.91 menggunakan suatu kurva kerusakan termal, sedangkan C57.12.00 lebih utama mementingkan kerusakan mekanis dari gangguan langsung. Perubahan terakhir seperti pada Gambar 8-16 yang mencakup kedua batasan termis dan mekanis.

Tabel 8-2: Katagori Standar Gangguan Melalui beban lebih Transformator menurut ANSI/IEEE

Category	kVA transformer ratings		Use curve fig 9.16	Frequent faults	Dotted curves apply from
	Singel-phase	Three-phase			
I	5 – 500	15 – 500	a	-	25 to 50I, where $t = 1250f/I^2$
II	501 – 1667	501 – 5000	a atau a + b	10	70 to 100% of maximum possible fault where $I^2t = K$ K is determined at maximum I where $t = 2$
III	1668 – 10.000	5001 – 30.000	a atau a + c	5	50 to 100% of maximum possible fault where $I^2t = K$ K is determined at maximum I where $t = 2$
IV	>10 MVA	>30 MVA	a + c	-	Same as catagori III

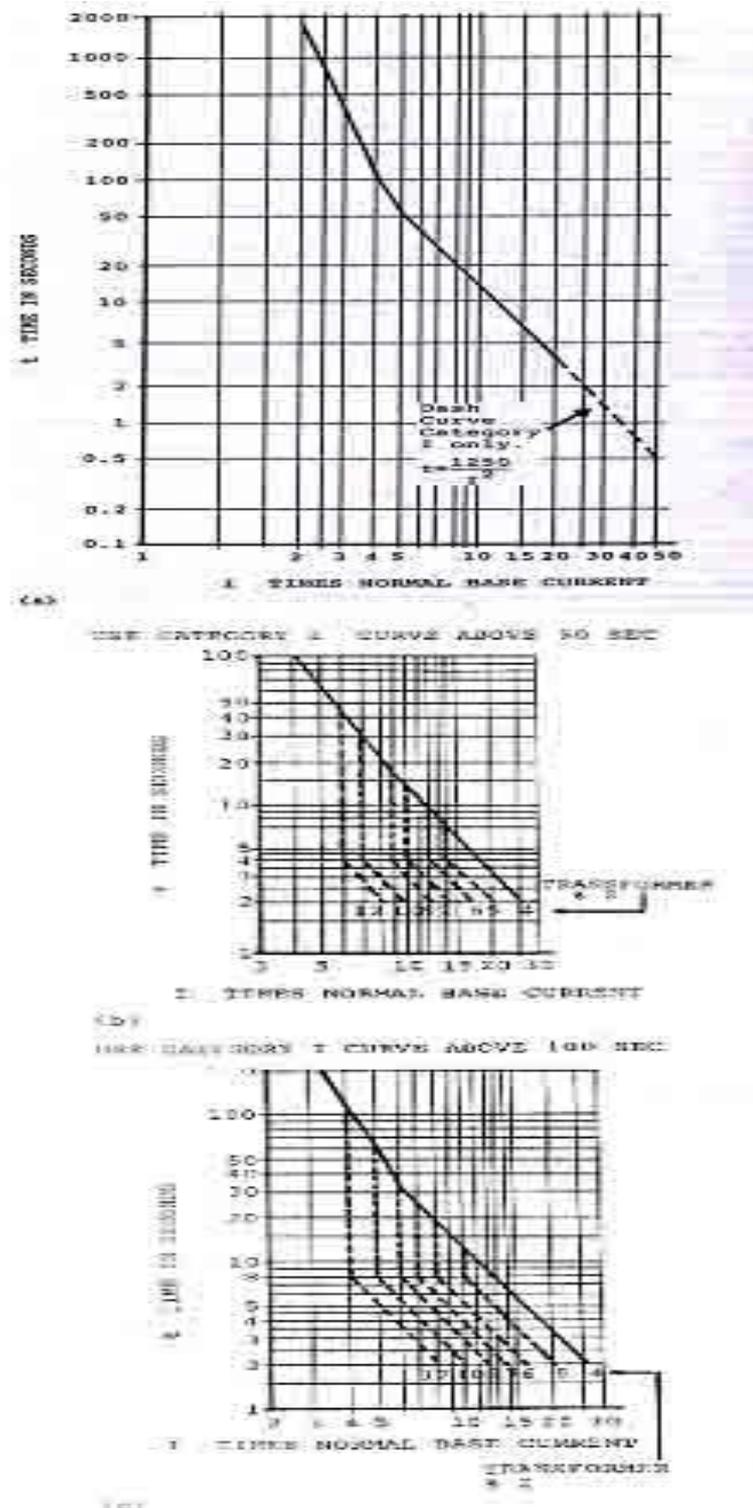
Standar yang baru memiliki 6 kurva; masing-masing satu untuk katagori I dan IV, dan sisanya untuk katagori III dan IV. Kurva dasar ditunjukkan dengan garis penuh pada Gambar 8-16 dan sama untuk semua katagori dan berlaku untuk seluruh impedansi Transformator 4%.

Transformator akan mampu menahan arus 25 kali rating arusnya dalam waktu 2s. Modifikasi kurva ditunjukkan oleh garis putus-putus dan dipakai pada Transformator dengan impedansi  $\pm 4\%$ , tergantung seberapa sering frekuensi gangguan yang terjadi sepanjang umur Transformator. Frekuensi gangguan yang mungkin terjadi selama operasi Transformator adalah estimasi yang didasari pengalaman masa lampau dan keputusan yang ditetapkan. Tuntunan untuk membantu menentukan ini diberikan pada Gambar 8-17. Dalam kasus yang menimbulkan keraguan, maka digunakan kurva frekuensi gangguan.

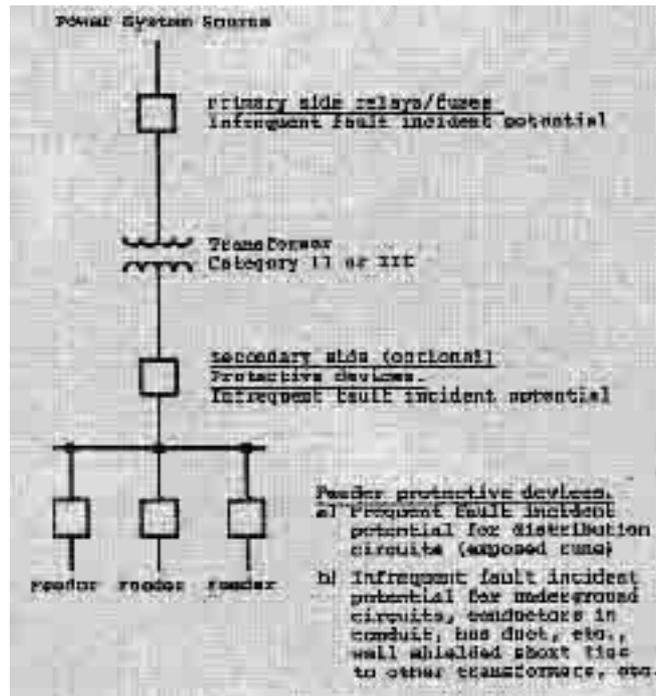
Aplikasi proteksi Transformator untuk memenuhi standar baru ini dapat dilakukan sebagai berikut :

1. tentukan katagori Transformator berdasarkan Tabel 8-2.
2. jika katagori II atau III, tentukan apakah pokok pelayanan kerap kali atau jarang mengalami gangguan Gambar 8-17.
3. pilih kurva yang sesuai dari Gambar 8-16
4. plot ulang kurva ini pada kertas-log-log menggunakan ampere berhubungan dengan Transformator. Dapat digunakan arus primer maupun sekunder. Umumnya, arus sisi sekunder digunakan untuk koordinasi dengan peralatan sekunder lain.

5. pilih Fuse dan atau Rele dengan Tap dan time dial, demikian seterusnya guna melindungi Transformator dan koordinasi dengan peralatan lain. Lebih baik dan lengkap akan diilustrasikan dengan contoh berikut ini



Gambar 8-16a: Kurva gangguan langsung untuk Transformator katagori I yang sering atau jarang mengalami gangguan dan untuk katagori II dan III yang sering mengalami gangguan Gambar 816b dan c : (b). untuk Transformator Katagori II sering mengalami gangguan dan; (c). untuk Katagori II sering gangguan dan IV sering dan jarang gangguan



Gambar 8-17: Acuan yang disarankan untuk menentukan zona yang potensial sering/jarang mengalami gangguan

## 8. 21 CONTOH: PROTEKSI ARUS LEBIH PADA TRANSFORMATOR

Beberapa contoh yang diambil dari revisi IEEE C37.91 merupakan penuntun untuk penggunaan Rele proteksi pada Transformator daya. Penggunaan ini baik dan merupakan tipikal aplikasi sistem tersebut.

### 8. 21. 1 Sebuah Gedung Industri Atau Fasilitas Yang Sama Dilyani

Oleh Transformator 2500 kVA ,12 kV/480 V Dengan Impedansi 5,75%

Proteksi terdiri dari Fuse tenaga pada sisi primer dan Pemutus Tenaga tegangan rendah dengan unit pemutus arus lebih series pada sisi sekunder dan penyulang-penyulang disisi sekunder. Dari Tabel 8-2 Transformator yang akan diproteksi termasuk dalam katagori II dan dengan switchgear metal clad atau metal end clusted, frekuensi gangguan dapat dianggap jarang terjadi, maka digunakan Gambar 8-16a. Kurva ini diplot ulang seperti dalam Gambar 8-18, dimana absis adalah arus sekunder (ampere). Translasi ini adalah:

$$I_{pu} = I_{rated} = \frac{2500}{\sqrt{3} \times 0,48} = 3007 \text{ A pada tegangan 480 Volt} \quad 8-19$$

dan seterusnya untuk variasi waktu:

Waktu (s) dari Gambar 8.16a	Per-unit I dari Gambar 8.16a	Ekivalen I ampere pada 480V (pu x 3007)
1000	2.3	6.916
300	3.0	9.021
100	4.0	12.028
50	5.0	15.035
12.5	10.0	30.070
4.13	17.39	52.296

Untuk 50 detik atau kurang

$$t = \frac{1250}{I^2}, \text{ seperti } \frac{1250}{5^2} = 50 \text{ detik} \quad 8-20$$

Seperti ditunjukkan, arus maksimum yang mungkin dengan sumber infinit adalah:

$$I = \frac{1}{0,0575} = 17,39 \text{ pu} \quad 8-21$$

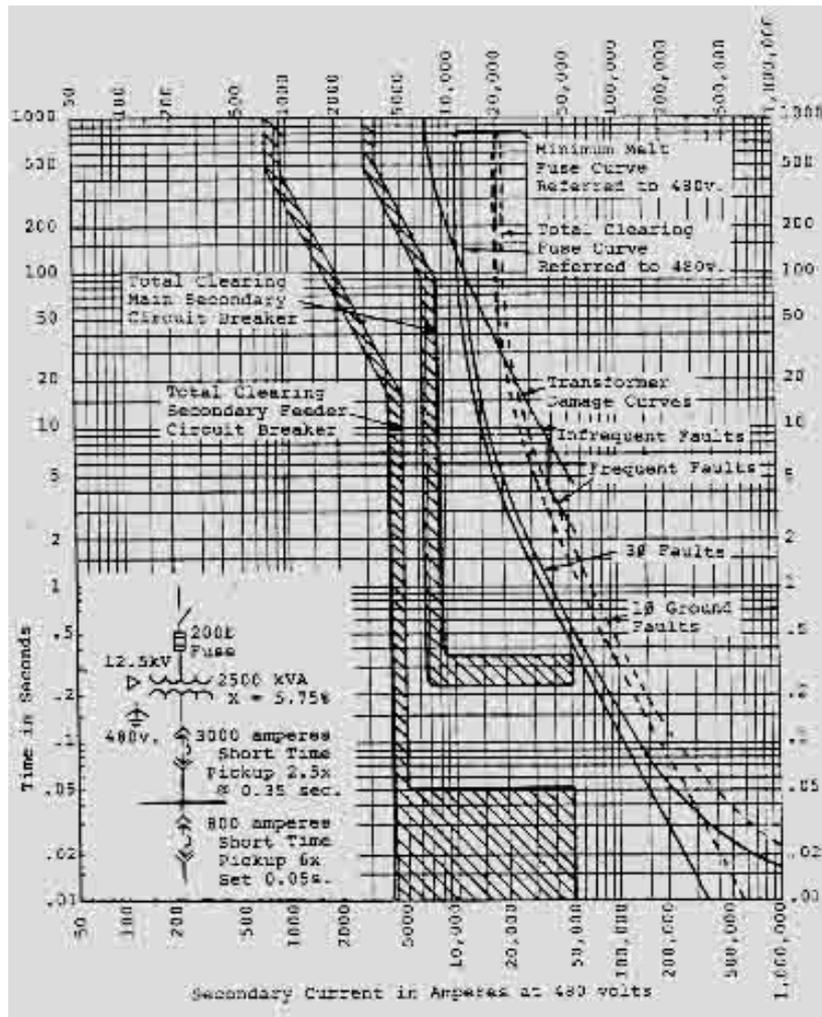
dimana

$$t = \frac{1250}{(17,39)^2} = 4,13 \text{ detik} \quad 8-22$$

jadi hal ini adalah terminasi dari kurva proteksi gangguan - melalui - Transformator. Pada sisi primer rating arus adalah:

$$I_{pu} = I_{rated} = \frac{2500}{\sqrt{3} \times 12} = 120,3 \text{ A pada tegangan } 12 \text{ kV} \quad 8-23$$

Untuk menghindari operasi pada saat inrus magnetisasi, peralihan beban jangka pendek, dan lainnya, namun membutuhkan proteksi untuk gangguan sekunder. Tipikal rating Fuse dipilih berkisar 150% dari rating arus. Jadi  $1,5 \times 120,3 \text{ A} = 180,4 \text{ A}$ , sehingga dapat dipilih Fuse 200A dan karakteristik arus - waktunya dapat dilihat dapat digambarkan, kurva waktu pemutusan dan minimum waktu leleh dapat diperlihatkan. Karena magnitud arus pada sisi primer hanya 57,7% dari arus sekunder untuk gangguan fasa ke fasa, kurva Fuse digerakkan kesebelah kanan dengan mengalikan semua harga dengan 1,73 atau ( $\sqrt{3}$ ) sebagai tambahan dari ratio belitan Transformator. Hal ini diperlihatkan pada Gambar 8-18. Magnitud gangguan tiga fasa keduanya sama dalam perunit. Hal ini diperlihatkan pada Gambar 8-19. Kurva Fuse diperbesar sampai arus-arus terbesar yang mungkin terjadi pada sisi antara Fuse dan Transformator dimana gangguan terjadi.

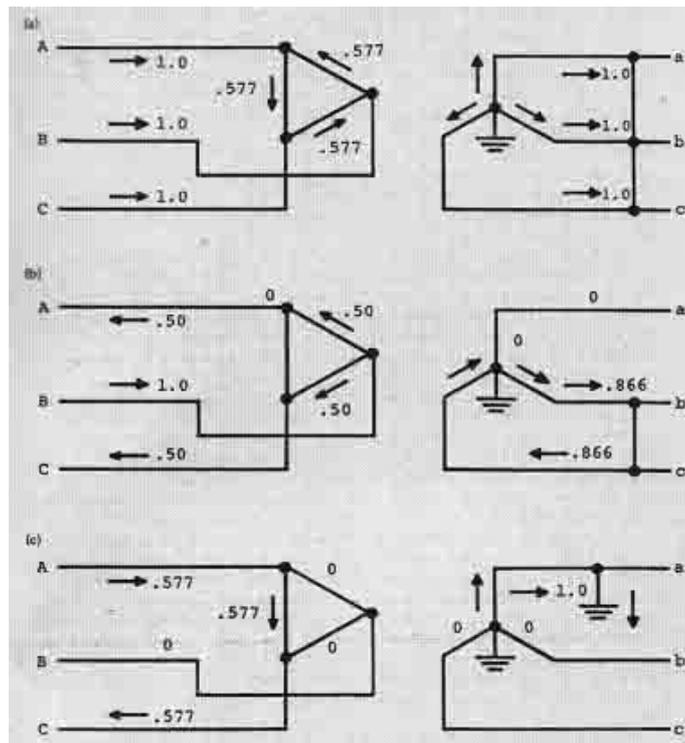


Gambar 8.18. Proteksi arus lebih untuk Transformator katagori II yang melayani sistem sekunder yang sering mengalami gangguan

Sekunder Transformator dan penyulang dilengkapi dengan Pemutus Tenaga yang dilengkapi dengan unit arus lebih direct acting yang memiliki elemen instantaneus (short time) dan long time. Karakteristiknya berupa sebuah pita natara waktu pembersihan total dan waktu reset, seperti ditunjukkan pada Gambar 8-18. Untuk contoh ini, unit long time dari Pemutus Transformator diset pick-up pada 1,2 Irating atau  $1,2 \times 3007 \text{ A} = 3608 \text{ A}$  pada tegangan 408V, dimana waktunya adalah 450 detik. Instantaneus diset pada 2,5 Irating atau  $2,5 \times 3007 \text{ A} = 7518 \text{ A}$  pada tegangan 480 V. Waktu tunda yang dipilih adalah 0,35 detik guna mendapatkan koordinasi dengan penyulang. Pemutus pada penyulang diset pada  $1,2 \times 800 = 960 \text{ A}$ , untuk waktu long time dan short time diset pada  $6 \times 800 \text{ A} = 4800 \text{ A}$  pada 480 V, untuk lebih detail dapat dilihat pada bahasan dalam bab berikutnya.

Gambaran proteksi yang ditunjukkan dalam Gambar 8-18 memperlihatkan proteksi dan koordinasi yang baik, kecuali untuk gangguan ringan disisi sekunder. Kurva Fuse primer memotong Transformator melalui kurva proteksi gangguan pada 13 kA gangguan tiga

fasa, atau pada 23 kA untuk gangguan satu fasa ke tanah. Ini berarti bahwa Transformator tidak dilindungi berdasarkan standar untuk gangguan dengan magnitude sebesar harga diatas atau kurang oleh Fuse. Gangguan mungkin saja terjadi. Bilaman hal ini terjadi pada Transformator, kerusakanpun terjadi dan harus lebih buruk lagi sebelum gangguan dapat dihilangkan dengan Fuse. Bila terjadi gangguan antara dan Pemutus sisi sekunder, hal ini akan menyebabkan gangguan lebih besar, artinya kerusakan akan lebih parah, namun demikian, kemungkinan gangguan pada areal ini sangat kecil.



Gambar 8-19: Tinjauan suatu gangguan melalui bank Transformator delta – wyei  
 (a). Gangguan tiga fasa; (b). gangguan fasa – fasa; (c). gangguan fasa – tanah ,  
 $X_1 = X_2 = X_0$

Tipikal data industri menunjukkan bahwa pada tegangan 480 V, busur akibat gangguan fasa - tanah mungkin terjadi serendah-rendahnya 19% dari rating harga gangguan. Jadi untuk gangguan sekunder maksimum adalah 52,296 A x arus primer adalah  $52,296 \times 0,19 \times 0,577 \times \frac{0,480}{12} = 229A$  pada tegangan 12 kV, hanya diatas rating 200 A, dan diragukan bahwa Fuse akan memberikan perlindungan sampai terjadi kebakaran yang menyebabkan kenaikan arus gangguan. Gangguan sekunder pada bus, harus dapat dihilangkan oleh Pemutus sekunder Transformator dan gangguan pada penyulang oleh Pemutus pada Penyulang dengan cadangan Pemutus pada Transformator. Jadi Fuse primer dapat menjadi cadangan untuk gangguan tersebut bilamana gangguan tersebut dapat dirasakan. Modifikasi kurva gangguan yang sering terjadi dari Gambar 8-16b diperlihatkan pada Gambar 8-18 sebagai perbandingan. Sebagaimana dapat dilihat,

proteksi Fuse primer untuk gangguan langsung atau ganggaa fasa - tanah sekunder sangat marginal.

**8. 21. 2 Suatu Distribusi Atau Sebuah Fasilitas Dilayani Oleh Transformator 115/12 kV, Dengan Impedansi 7,8%**

Proteksi sisi primer menggunakan Fuse. Disisi sekunder tidak dipasang Pemutus Tenaga dan masing-masing penyulang dilengkapi dengan Pemutus balik Otomatis. Transformator ini termasuk Transformator katagori III dan bagian sekunder diperkirakan sering mengalami ganggaa. Sama halnya dengan contoh pada 8.21.1, kurva proteksi gangguan diterjemahkan dari Gambar 8-16a dan c menjadi ampere sekunder seperti pada Gambar 8-20.

$$I_{pu} = I_{rated} = \frac{7500}{\sqrt{3} \times 12} = 360,84 \text{ A pada tegangan 12 kV} \quad \text{8-24}$$

Gangguan sekunder maksimum dengan asumsi bahwa sumber sangat besar bila dibandingkan dengan Transformator; dan diagap infinit ( $x = 0$ ), maka:

$$I_{3j} = I_{jG} = \frac{1}{0,078} = 12,82 \text{ pu} = 4626 \text{ A pada tegangan 12 kV} \quad \text{8-25}$$

Pada sisi primer:

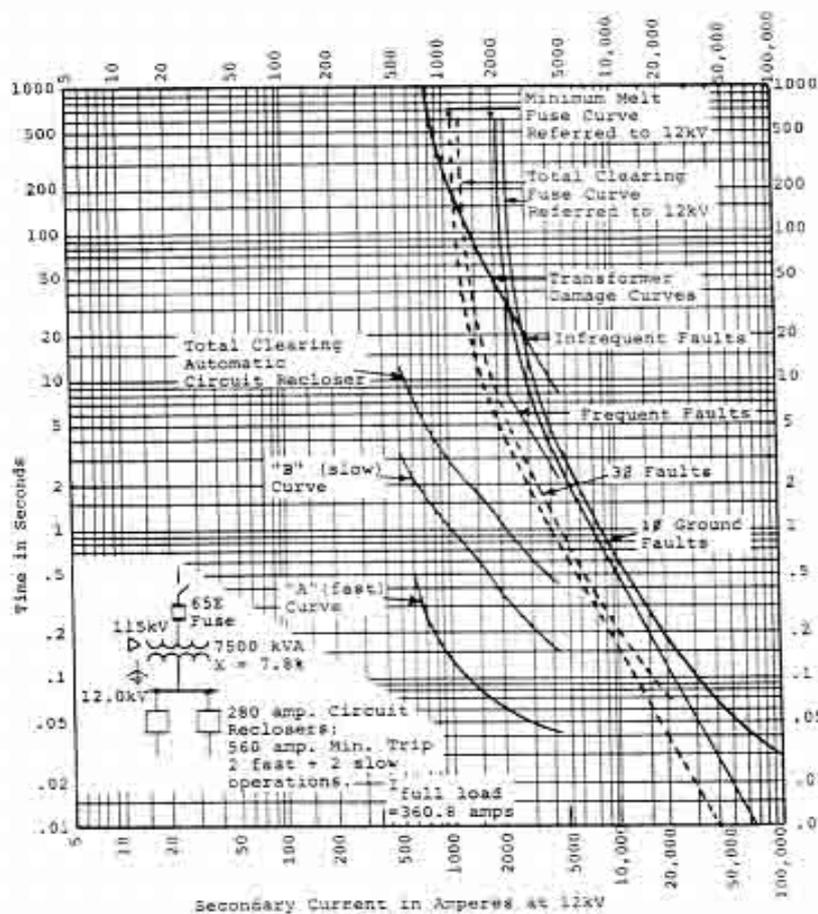
$$I_{pu} = I_{rated} = \frac{7500}{\sqrt{3} \times 115} = 37,65 \text{ A pada tegangan 115 kV} \quad \text{8-26}$$

dan Fuse 65E A dapat digunakan ( $1,73 \times 37,65$ ). Karakteristik Fuse di plot dalam besaran sekunder untuk gangguan 3 fasa dan besaran sekunder untuk gangguan 1 fasa ke tanah.

Titik-titik pada kurva proteksi melalui Transformator adalah:

WAKTU (S) DARI GAMBAR 8.16A	PER-UNIT I DARI GAMBAR 8.16A	EKIVALEN I AMPERE PADA 480V (PU X 3007)
1000	2.3	830
300	3.0	10882.5
100	4.0	1443.4
50	5.0 <sup>A</sup>	1804.2
30.42	6.41 <sup>A</sup>	2313
8	6.41 <sup>B</sup>	2313
3.29	10 <sup>B</sup>	3608.4
2	12.82 <sup>B</sup>	4626

- a. Untuk gangguan jarang terjadi,  $K = 1250$  dari 5.0 sampai 12.82 pu, untuk gangguan sering terjadi,  $K = 1250$  dari 5,0 sampai 6,41 pu
- b. Untuk gangguan sering terjadi,  $K = 328,73$  dari 6,41 sampai 12,82 pu.



Gambar 8-20: Proteksi arus lebih untuk Transformator Katagori III yang melayani sistem sekunder yang sering mengalami gangguan, dengan primer dilengkapi Fuse

Kedua penyulang dengan rating 280 A dan digunakan Pemutus balik otomatis dengan seting minimum 560 A. Kurva karakteristik untuk operasi cepat dan lambat diperlihatkan pada Gambar 8-20. Meski terdapat koordinasi yang baik antara Fuse primer dan Pemutus Balik sisi sekunder, Transformator tetap saja tidak terlindungi dari gangguan fasa tanah sekunder dengan kurva gangguan yang sering terjadi. Demikian pula dengan kurva gangguan yang jarang terjadi, tidak dapat melindungi pada saat gangguan tanah dan arus gangguan 3600 A dan lebih kecil. Kembali pergeseran fasa mealalui bank menyebabkan penurunan arus gangguan tanah sebesar 57,7% (Gambar 8-19). Untuk gangguan yang terjadi pada Penyulang maka Fuse primer berfungsi sebagai cadangan, sangat tidak mungkin Fuse ini beroperasi. Namun demikian, Fuse merupakan proteksi utaman uantuk gangguan-gangguan yang terjadi pada sisi sekunder sampai Pemutus balik, sayangnya, gangguan tanah akan jarang terjadi dengan arus gangguan diatas 3000 A yang potensial untuk dapat merusak Transformator. Hal ini sangat berisiko dan harus dievaluasi ulang.

### 8. 21. 3 Gardu Dilayani Oleh Transformator 12/15/20 MVA 115/12,5 kV Dengan Impedansi 10%

Sisi primer memiliki sebuah Pemutus dengan Rele dan Pemutus, tetapi tanpa Pemutus disisi sekunder. Transformator ini juga termasuk Transformator katagori III, sehingga kurva Gambar 8-16a dan c dapat dipergunakan, yang dapat diplot ulang seperti pada Gambar 8-21. Arus gangguan maksimum dengan sumber infinit ( $x = 0$ ) adalah:

$$I_{3j} = I_{jG} = \frac{1,0}{0,1} = 10 \text{ pu} = 5542,6 \text{ A pada tegangan } 12,5 \text{ kV} \quad 8-27$$

Dimana:

$$I_{pu} = I_{rated} = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 12,5} = 554,26 \text{ A pada tegangan } 12,5 \text{ kV} \quad 8-28$$

Harga K pada Tabel 8-2 adalah 1250 untuk gangguan yang jarang terjadi mulai dari arus gangguan 5,0 pu sampai maksimum 10 pu, dan K = 200 untuk gangguan yang jarang terjadi untuk range yang sama. Transformator memiliki 3 rating kVA; yang pertama rating dengan pendingin sendiri; kedua dengan minyak ditekan dan yang ketiga rating pada keadaan dengan 2 pendingin oil tekan dan udara, jasi arus maksimum :

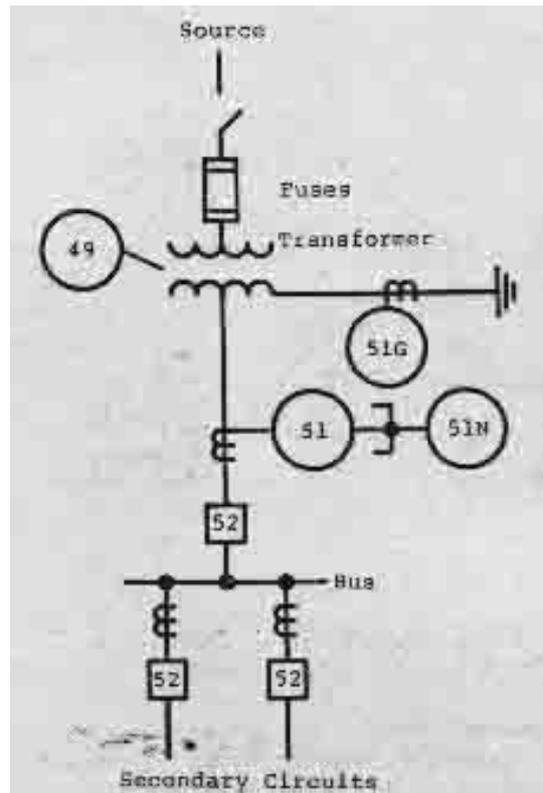
$$I_{mak} = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 115} = 100,4 \text{ A pada tegangan } 115 \text{ kV} \quad 8-29$$

dan dipilih CT dengan ratio 100 : 5 (20 : 1) Rele fasa arus lebih waktu terbalik (51) diset pada Tap 8, sehingga pick-up pada  $8 \times 20 = 120 \text{ A}$  primer, ekuivalen dengan  $1472 \text{ A}$  sekunder. Arus angkat sekunder untuk gangguan satu fasa ke tanah adalah  $1472/0,577 = 2551 \text{ A}$ . Kurva operasi Rele kemudian dapat diplot seperti pada Gambar 8-21, untuk time dial tertentu. Bank Transformator ini terproteksi terhadap gangguan tiga fasa sekunder namun tidak terhadap gangguan satu fasa ketanah sekunder. Pada keadaan ini penggunaan proteksi Diferensial sangat disarankan dan dihubungkan untuk melindungi bank Transformator dan bus sekunder bersama dengan Rele tekanan/gas sebagai proteksi utamanya. Rele arus lebih primer dapat digunakan sebagai cadangan.

### 8. 22 PROTEKSI THERMAL SEBUAH TRANSFORMATOR

Proteksi termal biasanya merupakan salah satu bagian dari Transformator. Umumnya, proteksi ini digunakan untuk memindai dan alarm, tetapi dapat pula untuk memutus. Berbagai tipe indikator termis dapat digunakan untuk mendeteksi panas berlebih pada minyak, tangki, termal tank, kegagalan sistem pendingin, dan sebagainya. Pembahasan mengenai ini tidak terdapat dalam buku ini.





Gambar 8-22: Proteksi Transformator tanpa Pemutus Tenaga disisi primer

## 8. 24 RINGKASAN: TIPE PROTEKSI TRANSFORMATOR

Proteksi yang direkomendasikan dan umum dipakai untuk melindungi diberikan dalam ringkasan berikut ini. Aplikasi untuk berbagai peralatan telah didiskusikan pada masing-masing seksi terdahulu. Harus diingat bahwa ini adalah rekomendasi umum. Proteksi tambahan atau proteksi lebih sederhana dapat pula dipergunakan untuk kasus tertentu, dan sangat tergantung pada kondisi setempat serta pilihan individu.

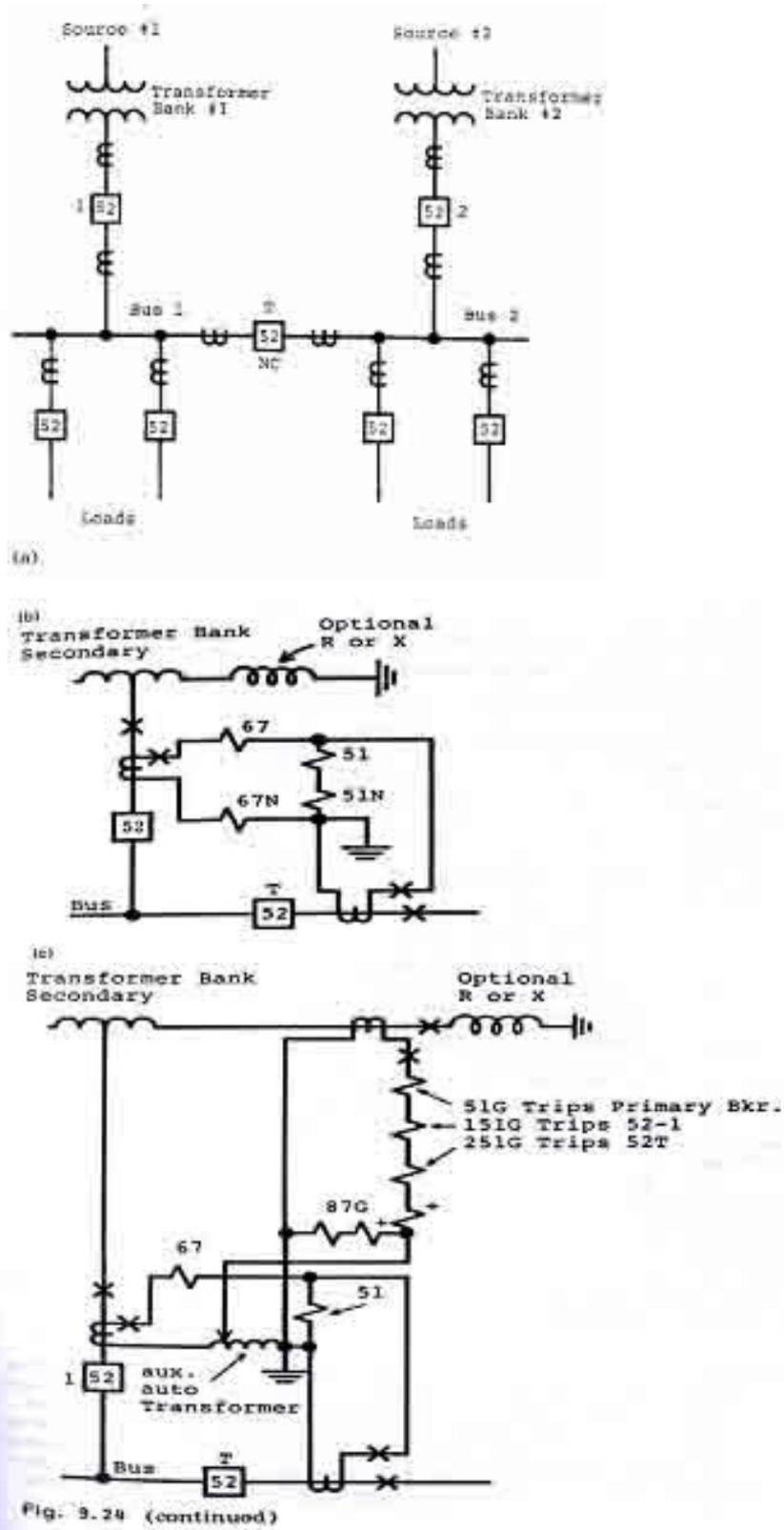
### 8. 24. 1 Unit Transformator Individual

Ringkasan proteksi yang dapat dipakai untuk unit Transformator individual diberikan dalam Gambar 8-22. Untuk bank Transformator besar atau penting pada katagori ini dapat pula digunakan proteksi Diferensial.

Untuk bank Transformator dengan primer dilengkapi Pemutus ringkasan proteksi dapat dilihat dalam Gambar 8-23. Rele 151G menjadi proteksi cadangan bagi gangguan pada Bus dan Penyulang dan harus dikoordinasikan (koordinasi waktu) dengan Rele gangguan tanah pada Penyulang. Sama halnya dengan Rele fasa 51, harus dikoordinasikan dengan Rele fasa Penyulang. Rele 51G diset dengan waktu pemutusan lebih lama dan dikoordinasikan dengan Rele 151G.

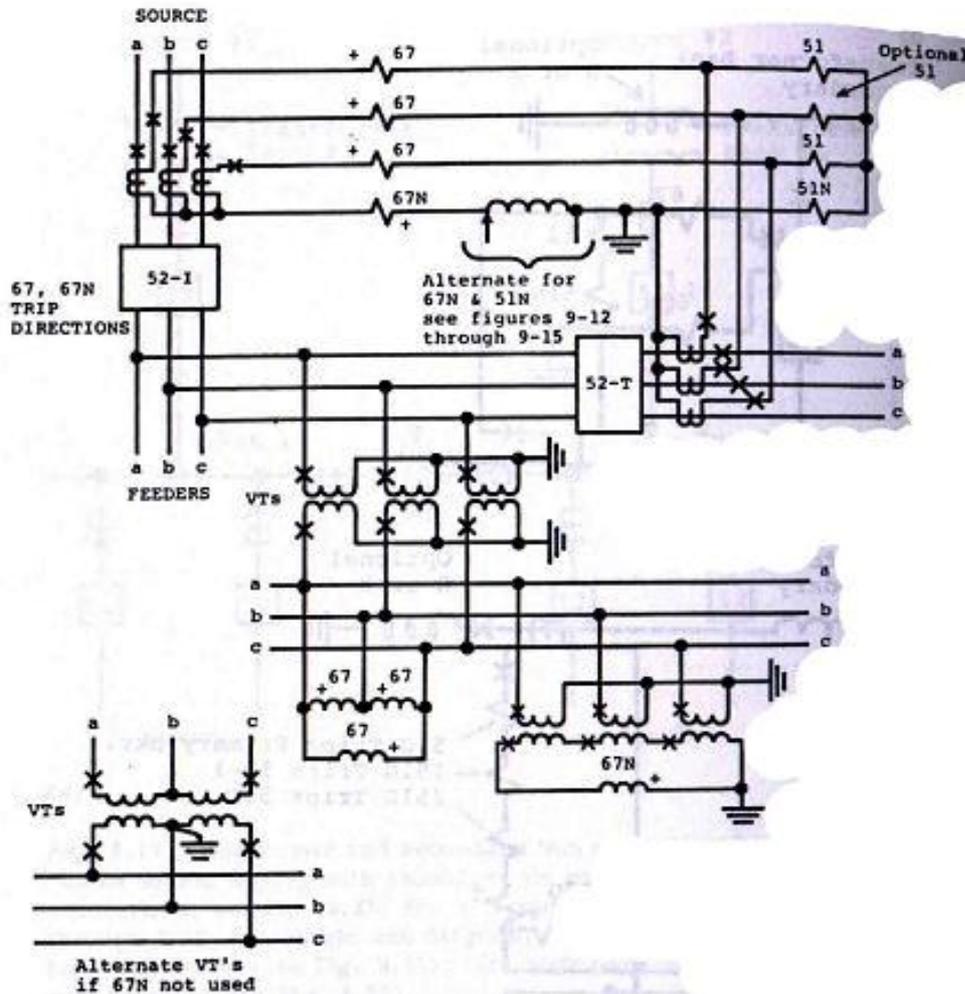


primer Transformator . Apabila digunakan, Rele tanah dapat diset pada waktu dan seting minimum, karena koordinasi tidak diperlukan.



Gambar 8-24: Proteksi Transformator dan Bus sekunder dengan tipikal sumber ganda

Rele-Rele arus lebih - waktu - terbalik (51, 51N) memberikan proteksi pada bus dan proteksi cadangan pada sirkit Penyulang. Rele ini berfungsi sebagai inisiator untuk pemutusan bagi Pemutus 52-1 (52-2) dan 52T.



Gambar 8-25: Hubungan tiga jaringan untuk proteksi cadangan Diferensial

Cadangan gangguan tanah diberikan oleh Rele arus lebih - waktu - terbalik 51G, 151G dan 251G (Gambar 8-24c). Rele 251G memberikan proteksi gangguan tanah dan cadangan bagi Rele tanah pada penyulang dan keduanya harus dikoordinasikan. Rele akan memutus Tie Bus 52T, karena gangguan tidak boleh berada baik pada bus atau pada Penyulang. Apabila gangguan masih ada sedangkan Tie Bus sudah terbuka, maka Rele 151G akan membuka Pemutus 52-1(52-2). Jadi Rele 151G harus dikoordinasikan dengan 251G. Bilamana gangguan masih dirasakan, gangguan berada diantara kedua Pemutus, yaitu pada belitan Transformator, atau pada impedansi pentanahan. Rele 51G diset dengan koordinasi dengan 151G sebagai pertahanan akhir. Rele akan memerintahkan Pemutus pada sisi primer untuk membuka dan menjadikan Transformator keluar dari pelayanan.

## 8. 25 REAKTOR

Reaktor digunakan dalam sistem tenaga pada: (1). Pentanahan netral guna membatasi arus gangguan; (2). Dipasang secara seri untuk mengurangi magnitud arus gangguan fasa; (3). Dipasang shunt sebagai kompensator bagi reaktansi kapasitif pada Transmisi katagori panjang dan sirkit kabel tipe pipe. Penggunaan lain adalah sebagai bank filter harmonisa dan untuk penekan arus arc sekunder pada Rele kutub tunggal.

Aplikasi (1) akan dibicarakan pada bagian ini. Reaktor pembatas gangguan fasa (2) digunakan antara bus dimana masing-masing memiliki tingkat hubung singkat tinggi dan pada Penyulang yang dihubungkan ke Bus dengan kapasitas hubung singkat tinggi. Pada bagian ini akan dibicarakan reaktor shunt.

### 8. 25. 1 Tipe Reaktor

Reaktor shunt terdiri dari dua tipe, yaitu : dry dan oil immersed. Tipe Dry, tersedia untuk tegangan  $\pm 34,5$  kV, biasanya digunakan untuk tersier Transformator. Reaktor tipe ini umumnya satu fasa inti udara, konstruksi dengan belitan exposure guna konveksi natural baik untuk penggunaan didalam maupun diluar. Lokasi reaktor harus didalam arela dimana medan magnet intensitas tinggi tidak menjadi masalah atau bahaya.

Sebagai unit fasa tunggal, gangguan tipe fasa adalah tidak umum, namun mungkin terjadi oleh gangguan simultan pada lebih dari satu reaktor atau oleh suatu gangguan yang menyebar melibatkan Bus. Jadi bahaya utama adalah gangguan tanah dan ganggua antar belitan. Pengaturan umum Reaktor hubungan tersier adalah dalam hubungan weye tidak ditanahkan dengan pentanahan sistem oleh metoda resistor delta - broken

Reaktor tipe oil immersed dapat fasa tunggal ataupun tiga fasa dalam tangki, dengan bentuk seperti sebuah bank Transformator. Tegangan dibatasi, sehingga tipe ini dapat digunakan hubungan jaringan. Pentanahan solid adalah normal. Bahaya utama adalah gangguan tanah dan atau gangguan fasa akibat kegagalan isolasi, gangguan bushing, gangguan antar belitan, oli kurang, dan kehilangan pendinginan.

### 8. 25. 2 Penggunaan Umum Reaktor

Umumnya, reaktor shunt dihubungkan langsung (tanpa Pemutus) ke jaringan, atau apabila saluran diterminasi tanpa Pemutus ke bank Transformator dengan tersier, reaktor mungkin dihubungkan ke tersier. Reaktor juga mungkin dihubungkan ke sebuah Bus. Apabila dihubungkan langsung ke jaringan, masalah unit reaktor memerlukan deenergise jaringan dengan cara memutuskan Pemutus lokal dan memindahkan seluruh Pemutus jauh yang dapat mensuplai arus gangguan. Memutus saklar memberikan isolasi. Saklar Pemisah memakai isolasi manual, atau penggunaan sirkit switcher untuk memutus Reaktor secara otomatis apabila saluran terbuka. Hal ini diperlukan untuk penutup otomatis saluran, namun demikian, operasi sirkit tanpa

Reaktor dapat menimbulkan tegangan lebih. Deenergise sirkit dengan Reaktor shunt menimbulkan suatu osilasi transien antara elemen reaktif dan kapasitif dengan frekuensi umumnya lebih rendah dari 60 Hz. Keadaan ini dapat menjadi masalah untuk beberapa proteksi. Bilamana terdapat sirkit paralel energise, kopling ini dapat menimbulkan tegangan lebih dan atau feroresonansi.

Reaktor-reaktor yang terhubung ke sirkit tersier Transformator umumnya menghasilkan level gangguan sangat rendah pada sirkit tegangan tinggi untuk gangguan Reaktor karena impedansi yang relatif tinggi melalui belitan Transformator ke tersier. Pemutus biasanya digunakan untuk mengisolasi unit hubungan tersier ini. Kembali, pemutusan Reaktor dapat menimbulkan tegangan lebih pada saluran dan sistem lainnya.

### 8. 25. 3 Proteksi Reaktor

Pada dasarnya proteksi Reaktor sama dengan proteksi Transformator, dengan ukuran, tingkat kevitatan terhadap sistem, dan personaliti memberikan pendekatan berbeda dan berbagai variasi.

Pada semua aplikasi, proteksi diferensial (87) adalah proteksi yang paling luas penggunaannya, dengan Rele fasa, atau bila dimungkinkan, digunakan Rele arus lebih tanah sebagai cadangan atau dapat sebagai proteksi utama. Hubungan diferensial ditunjukkan pada Gambar 8.10. Rele arus lebih seketika (50) diset diatas arus inrus dan transien, dan Rele arus lebih waktu terbalik (51) diset dengan berkoordinasi dengan peralatan proteksi lain yang overreach. Rele Impedansi diset untuk melihat ke Reaktor, digunakan baik untuk proteksi utama maupun cadangan. Semua peraltan proteksi harus diset untuk menghindari operasi pada saat energise arus inrus dan tidak beroperasi pada frekuensi osilasi natural yang dapat terjadi bilamana kompensator jaringan deenergise. Pada kasus tertentu Rele-Rele arus urutan neatif juga digunakan.

Gangguan antar belitan menjadi perhatian utama pada suatu Reaktor sebagaimana layaknya seperti pada Generator, Motor dan Transformator. Gangguan tersebut dapat menimbulkan arus yang tidak diharapkan dan merusak areal dimana gangguan terjadi. Indikasi yang ditimbulkan tidak begitu nyata, sampai gangguan mencapai kondisi yang melibatkan fasa dan atau tanah. Untuk Reaktor tipe Dry suatu penyeimbang tegangan menggunakan Rele tegangan lebih (59) membandingkan tegangan netral ke tanah yang diukur dari netral wyei Reaktor yang tidak mendeteksi perubahan impedansi Reaktor. Kemungkinan proteksi yang lebih sensitif untuk mendeteksi gangguan sangat sulit adalah Rele mekanis, tetapi akumulasi gas atau Rele tekanan hanya digunakan pada Reaktor tipe oil immersed. Walaupun dimungkinkan, Rele ini harus digunakan sebagai tambahan untuk proteksi lainnya.

## 8. 26 KAPASITOR

Bank Kapasitor seri maupun shunt, keduanya dipergunakan dalam sistem tenaga. Bank Kapasitor seri yang dipasang pada jaringan Transmisi tegangan tinggi kategori panjang digunakan untuk mengurangi impedansi total antara sumber daya. Hal ini dapat meningkatkan kemampuan transfer daya dan menjaga stabilitas. Proteksi untuk bank Kapasitor seperti ini dapat sama dengan proteksi Transformator. Namun kadang kala, bank Kapasitor ini merupakan bagian dari jaringan Transmisi dan diproteksi sebagai bagian dari jaringan.

### 8. 26. 1 Penggunaan Kapasitor Shunt

Bank Kapasitor terhubung shunt digunakan untuk mengurangi penggunaan VARs oleh beban reaktif dan membantu dalam regulasi dan kendali tegangan sistem tenaga. Bank Kapasitor mungkin dihubungkan dimana sistem membutuhkan, tetapi umumnya bank Kapasitor dipasang pada Gardu Distribusi dan pang Penyulang distribusi. Keuntungan maksimum yang dapat diperoleh oleh sistem tenaga didasarkan atas pemilihan lokasi pemasangan Kapasitor yang sedekat mungkin pada beban-beban reaktif.

Kapasitor shunt adalah Generator VAR yang mensuplai lagging VARs (kVARs) ke sistem, yang dapat pula disuplai oleh mesin-mesin berputar yang diberikan eksitasi lebih, seperti kondenser sinkron. Pengaruh ini telah diperlihatkan dalam *Gambar 8.13 (proteksi generator)*. Kondenser sinkron memberikan kendali variabel, tetapi biaya yang dibutuhkan relatif tinggi. Bank Kapasitor tetap atau dapat dilepas. Kapasitor tetap dihubungkan ke sistem dan tetap terhubung untuk waktu yang lama. Kapasitor switch dapat tetap terhubung atau dilepas dari sistem, yang tergantung pada level tegangan dan pengaturan tegangan.

### 8. 26. 2 Proteksi Kapasitor Shunt

Proteksi utama dari suatu bank Kapasitor adalah Fuse, yang merupakan bagaimana desain dari Kapasitor dan dipasang sebagai bagian dari Kapasitor. Fuse ini sebagai proteksi individual, tetapi bila beberapa Fuse terbuka, kerusakan dapat terjadi pada Kapasitor lain. Oleh karena itu diperlukan tambahan atau proteksi cadangan Fuse fasa atau Rele arus lebih fasa dan tanah (51,51N) antara sistem dan bank Kapasitor memberikan proteksi untuk gangguan pada bank. Proteksi ketidakseimbangan dan ground netral ditanahkan, dimana skema yang dipakai tergantung bagaimana cara pentanahan dan hubungan bank Kapasitor.

Group Kapasitor dapat dihubungkan dalam hubungan wyei - tunggal baik ditanahkan maupun tidak ditanahkan, wyei ganda ditanahkan maupun tidak ditanahkan, atau hubungan delta. Untuk hubungan wyei tunggal tidak ditanahkan, dapat digunakan Rele 59G membenteng pada sekunder delta terbuka dari VT menghubungkan fasa ke tanah. Untuk bank Kapasitor hubungan wyei ganda tanpa ditanahkan sebuah VT atau CT

antara kedua netral dengan sebuah sekunder Rele 59 atau 51 memberikan keseimbangan proteksi yang baik.

Untuk bank Kapasitor wyei ditanahkan, sebuah CT netral dengan suatu resistor dan Rele tegangan lebih 59G memberikan proteksi tidak seimbang. Skema lainnya dan diskusi lebih lengkap diberikan pada IEEE standar C37.99-1980. Rele yang terhubung ke sirkit netral tidak akan sensitif terhadap harmonisa ke 3, atau digunakan filter sebagai kuantitas harmonik normal mungkin dapat orde magnitud sebagaimana kuantitas gangguan ringan.

Proses energise dan deenergise bank Kapasitor dapat menimbulkan tegangan lebih, sehingga perhatian akan hal ini harus diberikan terutama dalam penggunaan Pemutus atau peralatan pensaklaran lain dan pada Rele dan setingnya. Transien dengan magnitud dan frekuensi tinggi dapat terjadi apabila dilakukan pensaklaran bank back to back, yaitu suatu bank Kapasitor dihubungkan ke sistem didekat bank Kapasitor yang telah energise.

## BAB 9 PROTEKSI MOTOR

### 9.1 PENDAHULUAN

Proteksi motor sangat variatif dan sedikit berbeda dengan proteksi peralatan sistem tenaga lainnya. Hal ini disebabkan sangat variatifnya ukuran, jenis dan aplikasi motor. Proteksi sangat tergantung dari seberapa berharganya motor tersebut, yang umumnya sangat erat kaitannya dengan ukuran motor. Pada bab ini akan dikemukakan beberapa jenis proteksi motor dan aplikasinya. Diskusi akan dilakukan untuk motor-motor yang pensaklarannya dilakukan dengan pemutus tenaga, kontaktor atau starter, dan proteksi yang dipergunakan terpisah dari peralatan tersebut dan motor itu sendiri. Artinya proteksi yang akan dibicarakan adalah proteksi bagi motor-motor dengan tegangan masukan mulai dari 480 sampai 600 Volt atau lebih. Tidak termasuk untuk motor-motor yang proteksinya merupakan bagian dari motor tersebut.

### 9.2 POTENSI-POTENSI BAHAYA PADA MOTOR

Potensi-potensi bahaya yang umum diperhatikan, antara lain:

1. Gangguan - phasa dan atau tanah.
2. Kerusakan termis akibat :
  - a. Beban lebih (kontinyu atau intermitent)
  - b. Rotor terkunci (gagal asut, atau jamming)
3. Kondisi tidak normal
  - a. Operasi tidak seimbang
  - b. Tegangan lebih dan tegangan kurang
  - c. Pembalikan phasa
  - d. Penutupan balik kecepatan tinggi (re-energize sewaktu sedang jalan)
  - e. Temperatur yang tidak lazim dan atau lingkungan (dingin, panas, damp)
  - f. Urutan pengasutan yang tidak lengkap.

Potensi diatas umumnya terjadi untuk motor induksi, yang penggunaannya sangat umum dan banyak dipakai. Untuk motor-motor sinkron, potensi bahaya tambahan yang mungkin terjadi adalah:

4. Kehilangan eksitasi (kehilangan medan)
5. Operasi diluar sinkronisasi
6. Kehilangan sinkronisasi

Potensi-potensi bahaya ini dapat diklasifikasikan menurut asal, sebagai berikut:

#### A. Pengaruh Motor

1. Kegagalan isolasi

2. Kegagalan bearing
3. Kegagalan mekanis
4. Untuk motor sinkron – kehilangan medan

**B. Pengaruh beban**

1. Beban lebih (dan beban berkurang)
2. Jamming
3. Inersia tinggi ( $Wk^2$ )

**C. Pengaruh Lingkungan**

1. Temperatur ambien yang tinggi
2. Tingkat kontaminasi yang tinggi
3. Temperatur ambient yang terlalu dingin dan damp

**D. Pengaruh sumber atau sistem**

1. Kegagalan phasa (phasa terbuka)
2. Tegangan lebih
3. Tegangan kurang
4. Pembalikan phasa
5. Kondisi kehilangan sinkronisasi akibat gangguan dari sistem

**E. Pengaruh operasi dan aplikasi**

1. Sinkronisasi, penutupan atau penutupan balik phasa
2. Siklus kerja tinggi
3. Jogging
4. Pembalikan cepat atau plug

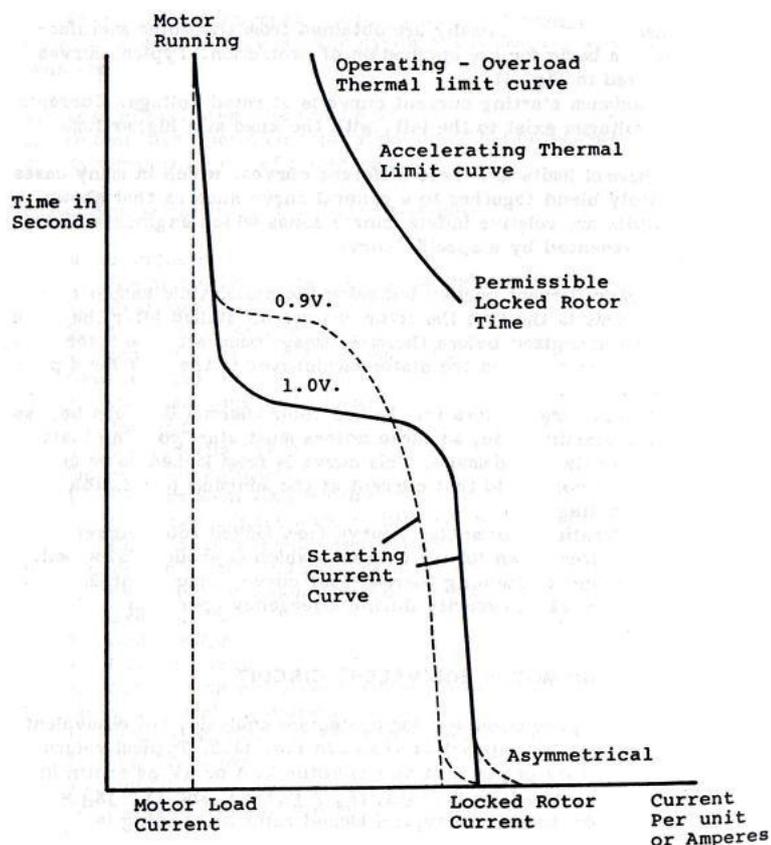
### 9. 3 KARAKTERISTIK MOTOR YANG MEMPENGARUHI PROTEKSI

Karakteristik utama motor yang tersedia dan dilibatkan dalam proteksi motor antara lain:

1. Kurva arus pengasutan
2. Kurva kapabilitas termis, termasuk batasan termis rotor terkunci
3. Konstanta K ( $R_{r2}/R_{r1}$ )

Karakteristik tersebut umumnya diperoleh dari pabrikasi motor dan merupakan dasar dari aplikasi proteksi motor. Tipikal kurva karakteristik motor diberikan dalam Gambar 9.1. Kurva arus pengasutan maksimum diberikan dalam rating tegangan motor. Arus-arus untuk tegangan rendah diberikan pada sebelah kiri, dengan lutut pada level waktu tinggi. Batasan termis diberikan dalam tiga kurva yang berbeda, dalam banyak kasus kurva ini diberikan bersama seperti dalam gambar. Batasan termis adalah zona yang tidak pasti dimana engineer menginginkan kurva yang lebih khusus.

1. Porsi arus terbesar menunjukkan lama waktu diizinkan rotor terkunci. Waktu ini adalah lama waktu rotor dapat tetap berhenti setelah motor energize sebelum terjadi kerusakan termis pada batang rotor, ring penahan rotor, atau stator, yang merupakan waktu desain motor tersebut.. Pada motor-motor besar, batasan termis rotor terkunci dapat lebih singkat dari waktu pengasutan, jadi motor-motor ini harus diasut seketika untuk mengurangi kerusakan termis. Kurva ini dibuat berdasarkan arus rotor terkunci pada tegangan penuh terhadap arus pengasutan pada tegangan minimum yang diizinkan.
2. Kurva percepatan batasan termis dibuat berdasarkan arus rotor terhadap arus torka breakdown motor, yaitu pada 75% kecepatan nominal.
3. Kurva batasan termis operasi atau jalan, merepresentasikan kapasitas beban lebih motor pada saat operasi darurat.



Gambar 9-1: Tipikal karakteristik Motor Induksi

#### 9. 4 RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR INDUKSI

Sebagai alat bantu untuk analisis proteksi dan proteksi motor, diagram ekivalen motor dapat disederhanakan seperti diberikan dalam Gambar 9-2. Tipikal harga parameter motor dalam per-unit dengan dasar kVA dan kV dasar motor adalah  $R_s$  dan  $R_r = 0,01$  pu,  $jX_m = 0,3$  pu, dan  $jX = jX_d'' = 0,15$  pu, berdasarkan besaran ini, tipikal rotor terkunci atau arus pengasutan adalah:



untuk setiap motor, sesuai dengan tipe dan ukuran motor, tetapi tipikal harga ini dapat digunakan apabila data motor sesungguhnya tidak tersedia.

## 9. 5 PROTEKSI MOTOR SECARA UMUM

Proteksi sebuah motor dapat terdiri dari berbagai tipe, bentuk, desain dan dengan berbagai kombinasi, maupun dalam bentuk paket. Masing-masing memiliki fitur yang berbeda yang tidak akan dibicarakan dalam buku ini. Tujuan dasar dan utama dari suatu sistem proteksi motor adalah untuk menjaga motor agar mampu beroperasi diatas kondisi normal tetapi tidak melebihi batasan mekanis dan termis pada waktu beban lebih dan pada waktu motor beroperasi tidak normal serta memiliki sensitivitas pada saat gangguan. Hal ini dapat dicapai dengan cara berikut:

## 9. 6 PROTEKSI GANGGUAN FASA

Rele arus lebih tanpa arah seketika dapat dipergunakan untuk proteksi motor induksi. Gangguan yang terjadi umumnya akan menghasilkan arus gangguan yang lebih besar dari arus pengasutan motor rotor terkunci, kecuali untuk gangguan antar belitan. Arus gangguan dapat mengalir diantara belitan, namun sayangnya hanya sedikit bukti yang dapat dirasakan pada terminal rotor sampai gangguan tersebut berubah menjadi gangguan antar fasa atau antara fasa ke tanah.

Motor merupakan peralatan yang terhubung pada bagian akhir dari suatu sistem tenaga elektrik, oleh karena itu rele instantaneus dapat digunakan dan tidak ada masalah dalam hal koordinasi. Kontribusi motor induksi sebagai sumber gangguan pada sistem relatif kecil ( $1/X_d'' + \text{offset}$ ) dan akan menghilang dengan cepat dalam beberapa siklus, jadi tidak dibutuhkan rele arah. Ratio CT yang dipilih sebagai masukan rele dipilih sehingga arus maksimum motor disisi sekunder berkisar antara 4 dan 5A. Rele fasa instantaneus harus diset berada diatas arus unsimetri rotor terkunci namun masih dibawah arus gangguan minimum. Hal ini dapat dilihat dari persamaan dimana  $I_{LR}$ , arus rotor terkunci adalah:

$$I_{LR} = \frac{1}{X_{1S} + X_d''}$$

dimana  $X_{1S}$  adalah reaktansi (impedansi) total sistem atau sumber motor. Persamaan ini sama dengan persamaan arus pengasutan motor dengan harga impedansi sistem mendekati NOL. Arus gangguan pada motor adalah :

$$I_{3\phi} = \frac{1}{X_{1S}}$$

dan untuk gangguan antar fasa, dengan  $X_{1S} = X_{2S}$  adalah

$$I_{\phi\phi} = 0,866 I_{3\phi} = \frac{0,866}{X_{1S}}$$

bila  $P_R$  adalah ratio antara arus angkat rele dan arus rotor terkunci, yaitu  $P_R = \frac{I_{PU}}{I_{LR}}$ , dimana pada umumnya harga  $P_R$  berkisar antara 1,6 sampai 2,0 atau lebih. Jika  $P_F$  adalah ratio antara arus gangguan minimum dengan arus angkat rele, yaitu  $P_F = \frac{I_{JJ}}{I_{PU}}$ , dengan harga antara 2 sampai 3 atau lebih besar. Dari persamaan-persamaan diatas dapat dilihat bahwa:

$$I_{\phi\phi} = P_F I_{PU} = P_F P_R I_{LR}$$

dan

$$\frac{I_{\phi\phi}}{I_{LR}} = P_F P_R \quad \text{atau} \quad \frac{I_{3\phi}}{I_{LR}} = 1,155 P_F P_R$$

atau arus gangguan tiga fasa pada motor sebesar  $1,155 P_F P_R$  atau lebih besar untuk proteksi arus lebih instantaneous. Apabila harga minimum yang direkomendasikan untuk  $P_R = 1,6$  dan  $P_F = 2$ , maka arus gangguan tiga fasa harus 3,7 kali dari arus rotor terkunci. Bilamana  $P_R = 2,0$  dan  $P_F = 3$ , maka arus gangguan tiga fasa paling tidak sebesar 6,9 kali dari arus rotor terkunci. Lihat kembali persamaan-persamaan diatas, dimana:

$$I_{\phi\phi} = 0,866 I_{3\phi} = \frac{0,866}{X_{1S}} = \frac{P_F P_R}{X_{1S} + X_d''}$$

$$X_{1S} = \frac{0,866 X_d''}{P_F P_R - 0,866}$$

jadi untuk  $P_R = 1,6$  dan  $P_F = 2,0$ , maka

$$X_{1S} = \frac{0,866 X_d''}{1,6 \times 2,0 - 0,866} = 0,371 X_d''$$

dan dengan tipikal harga  $X_d'' = 0,15$  dan  $X_{1S} = 0,056$  pu, atau dengan  $P_R = 2,0$ ;  $P_F = 3$ ; dan  $X_d'' = 0,15$ ,  $X_{1S} = 0,025$  pu. Besaran ini didefinisikan sebagai impedansi sumber yang besarnya seperti diindikasikan atau kurang guna proteksi arus lebih instantaneous. Harga perunit dalam contoh diatas semuanya dalam base kVA dan kV dari motor, dimana:

$$kVA_{\text{rated}} = \frac{(\text{horsepower})(0,746)}{(\text{efisiensi})(\text{faktordaya})}$$

Pada kebanyakan aplikasi, impedansi sumber  $X_{IS}$  untuk keperluan praktis merupakan reaktansi dari transformator pemasok daya bagi motor, dimana bagian primer dari transformator tersebut terhubung pada sebuah utilitas yang besar, yang dapat dikategorikan sebagai sumber daya infinite. Disamping itu, umumnya sumber dari transformator tersebut juga merupakan sumber bagi beban-beban lain dan dengan demikian jauh lebih besar dari motor, sehingga reaktansinya dengan dasar reaktansi motor cenderung kecil. Hal ini dapat diilustrasikan dengan lebih baik dengan menggunakan Gambar 6-18, dimana Transformator 2500 kVA dengan raktansi bocor 5,75% digunakan untuk mensuplai sebuah penyulang 800 A. Misalkan ini adalah motor, dan beban 800 A pada tegangan 480 V sama dengan 665 kVA. Pada 665 kVA, reaktansi transformator menjadi  $= 5,75 (665) / (2500) = 1,538$  atau 0,0153 pu. Harga ini jauh lebih rendah dari batasan reaktansi sumber yang dibutuhkan agar proteksi rele instantaneous menjadi baik.

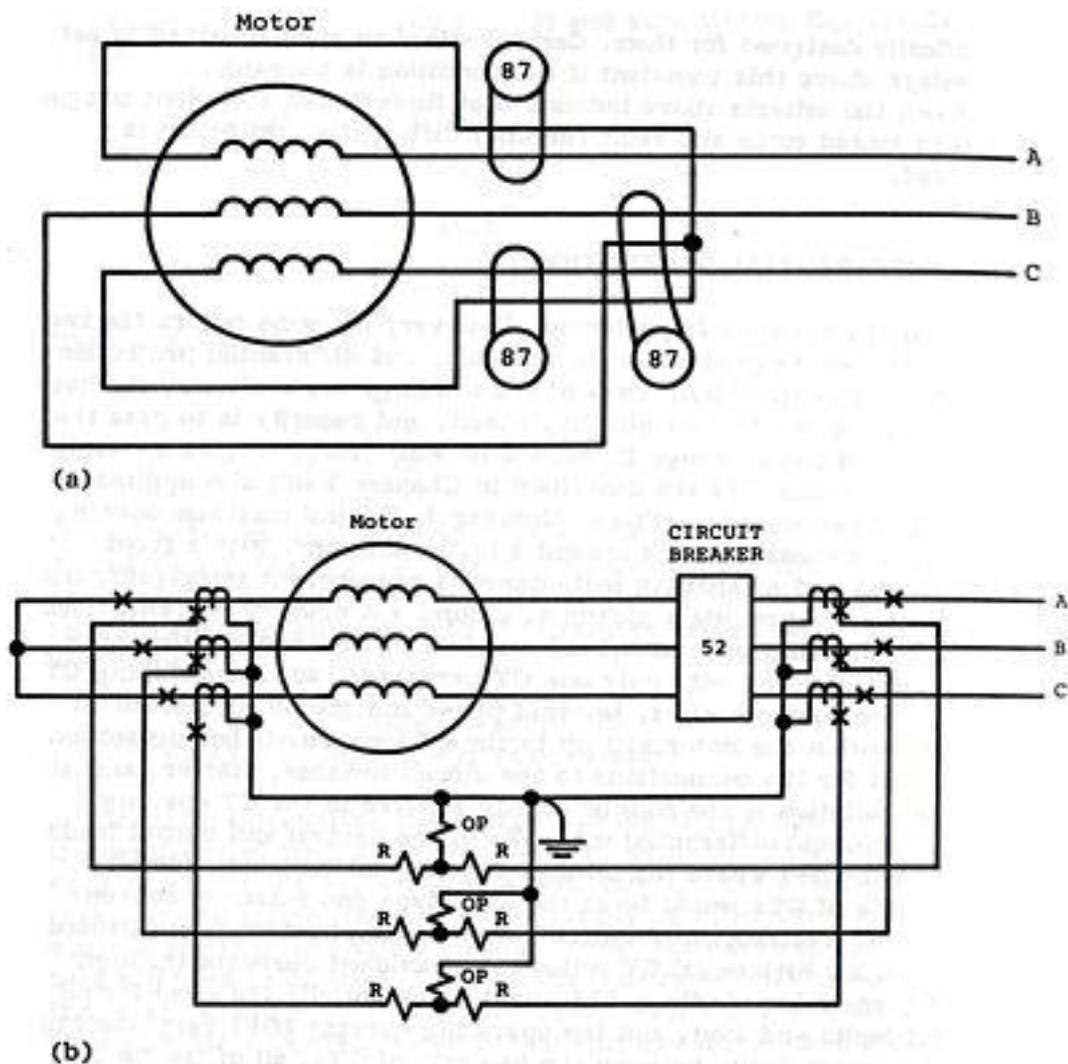
Bilamana rekomendasi kriteria penyetelan  $P_R$  dan  $P_F$  tidak dapat dipenuhi, atau diperlukan rele yang lebih sensitif, rele instantaneous (atau rele kedua) dapat disetel lebih sensitif bila ada penundaan dari timer. Hal ini memungkinkan komponen arus asut tidak simetri menurun. Rekomendasi penyetelan yang disarankan untuk keadaan ini adalah  $P_F = 1,1$  samapai 1,2 dengan waktu tunda sebesar 0,10 detik (setara dengan 6 cycle pada sistem 60 Hz). Pada waktu motor kehilangan tegangan, motor-motor yang sedang beroperasi dialihkan dari sebuah bus ke bus lainnya, atau bila sistem penutupan balik berkecepatan tinggi digunakan untuk mengenergize kembali motor sebelum tegangan yang tersisa turun sampai 33% dari rating tegangan motor, maka akan terjadi transien yang sangat tinggi. Arus ini akan sangat berbahaya bagi motor kecuali motor telah didesain khusus untuk itu. Atensi khusus perlu dilakukan agar penyetelan rele diatas kondisi transien ini bila kondisi ini memang diizinkan.

Bilamana kriteria yang dikemukakan diatas tidak menghasilkan margin yang cukup antara arus gangguan dan arus rotor terkunci, dapat digunakan proteksi diferensial.

## 9. 7 PROTEKSI DIFERENSIAL

Proteksi diferensial lebih disukai, namun proteksi jenis ini tidak dapat diperguna kan untuk semua motor. Untuk motor-motor yang tidak memiliki kedua ujung belitan, maka rele ini tidak dapat digunakan. Bila kedua belitan tersedia, keunggulan diferensial dalam sensitivitas, kecepatan, dan sekuritas dilalukan melalui suatu konduktor belitan melalui suatu CT toroidal seperti diperlihatkan dalam Gambar 9-3a. CT jenis ini telah dijelaskan dalam bab sebelumnya dan juga dipergunakan untuk generator-generator kecil seperti yang dikemukakan *dalam bab 5*. Tipikal maksimum bagian terbuka atau

jendela pada CT ini dengan ukuran diameter sebesar 8 inci. Dengan ratio tetap 50:5 dan rele arus lebih instantaneous sensitif dapat dihasilkan arus angkat primer sebesar 5A. Harga ini adalah sebuah diferensial keseimbangan fluk dari beban dan magnitude arus pengasutan dan dengan hanya satu CT per fasa, maka unjuk kerja kecocokan CT tidak muncul. Proteksi tanah dan fasa internal diperoleh antara Motor sampai kelokasi CT. Proteksi lain dibutuhkan untuk menghubungkan ke Pemutus Tenaga, Starter, dan seterusnya. Kelemahannya adalah keterbatasan yang disebabkan ukuran jendela CT.



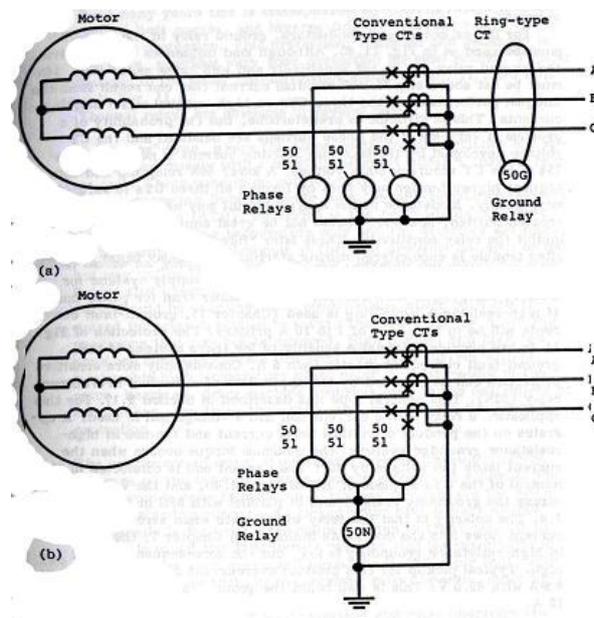
Gambar 9-3: Proteksi Diferensial pada Motor dimana lead netral tersedia  
 a). dengan ring toroidal dan rele arus lebih seketika; b). dengan CT konvensional dan rele Diferensial

Rele Diferensial konvensional dengan CT pada netral dan lead keluaran harus digunakan bilamana tipe Toroidal tidak dapat dipergunakan. Biasanya, dua set CT dengan tipe dan ratio sama, sehingga rele Diferensial dengan dua belitan penahan (87) digunakan, seperti diperlihatkan dalam Gambar 9-3b. Dengan ratio CT sama, maka arus sekunder yang melalui belitan penahan rele (R) secara esensi sama untuk semua gangguan

eksternal dan beban, dan arus operasi (OP) sangat kecil atau mendekati Nol. Untuk gangguan Motor antara kedua set CT, seluruh arus-arus gangguan mengalir melalui belitan operasi (OP) untuk mendapatkan sensitivitas tinggi untuk gangguan fasa maupun tanah, CT sisi jaringan harus seperti pada gambar sehingga zona diferensial termasuk Pemutus dan lead terhubung sebagaimana Motor.

### 9. 8 PROTEKSI GANGGUAN TANAH

Sebagaimana pada proteksi Fasa, rele arus lebih seketika digunakan pula untuk proteksi gangguan tanah. Apabila dimungkinkan, metoda yang disediakan adalah menggunakan CT tipe Ring, dengan ketiga konduktor Motor dilewatkan melalui jendela CT. Hal ini memberikan suatu penjumlahan magnetik dari ketiga arus Fasa sehingga keluaran sekunder CT ke rele adalah arus urutan nol ( $3I_0$ ). Hal ini diperlihatkan pada Gambar 9-4a. Ratio CT, umumnya 50:5, tidak tergantung ukuran Motor, sedangkan CT konvensional pada Fasa harus seukuran beban Motor. Keuntungannya adalah sensitivitas tinggi dan sekuritas baik, tetapi dibatasi oleh ukuran konduktor yang dapat dilewatkan pada jendela CT. Seperti disebut pada seksi sebelumnya, tipikal sensitivitas adalah 5A primer.



Gambar 9-4: Proteksi gangguan tanah pada Motor ; (a). dengan CT tipe Ring dan; (b). CT tipe konvensional

Untuk Motor dan konduktor ukuran besar, rele Tanah pada netral harus digunakan seperti pada Gambar 9-4b. Meskipun beban mempengaruhi ratio CT, rele Tanah dapat disetel lebih sensitif dan baik dibawah beban Motor. Rele 50N, harus diset diatas setiap kesalahan arus residual yang dapat ditimbulkan karean unjuk kerja CT yang tidak sama pada arus asut ofset dengan perbedaan tinggi. Hal ini sukar diketahui, tetapi

kemungkinan munculnya masalah sangat kecil bilamana burden fasa seimbang dan tegangan CT yang disebabkan oleh arus pengasutan maksimum tidak lebih dari 78% tegangan klas akurasi CT. Tap rele 50N, rendah dan konsekuensinya burden menjadi tinggi, dapat dibantu dengan memaksa ketiga CT untuk jenuh berulang kali. Tahanan pada sirkit netral dapat pula membantu. Hal ini menaikkan burdsen, namun tidak boleh terlalu tinggi sehingga mengurangi sensitivitas rele. Hal terakhir ini dapat diperbaikik selama proses start-up. Penundaan waktu harus digunakan sampai arus offset hilang/menurun, tetapi penundaan ini putus untuk gangguan aktual.

Dengan pembatasan gangguan tanah, seperti umumnya pada sistem pensuplai Motor, arus gangguan tanah akan lebih kecil dari gangguan fasa. Jika digunakan pentanahan resistansi tinggi, arus gangguan tanah dalam orde 1 – 10 A. Proteksi pada Gambar 9.4b dapat memberikan sensitivitas yang dapat diterima untuk sistem tersebut bilamana arus gangguan tanah lebih besar dari 5A. Sensitivitas yang lebih baik dapat dicapai bila digunakan rele Pengali (32N). Tipe ini telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Untuk penggunaan disini, sebuah rele dengan suatu koil arus dan koil tegangan dapat dipakai. Rele beroperasi pada perkalian tegangan dan arus, dan untuk penggunaan pada sistem pentanahan resistansi tinggi, torka maksimum terjadi bilamana arus mendahului tegangan sebesar  $45^\circ$ . Koil arus dihubungkan pada netral CT pada tempat rele 50N dalam Gambar 9-4b, dan koil tegangan menyeberangi resistor pentanahan dan paralel dengan rele 59G pada gambar sebelumnya. Polaritas dimana rele akan beroperasi bilamana arus urutan nol mengalir menuju Motor, untuk sistem pentanahan tinggi, arus pada tahanan pentanahan akan kecil, tetapi tegangan urutan nol menjadi besar. Tipikal pick-up untuk rele arus lebih pengali adalah berkisar 7 – 8 mA, dengan tegangan 69,5V. Harga ini jauh dibawah level gangguan tanah, yaitu 1 – 10A.

## 9. 9 PROTEKSI THERMAL DAN ROTOR TERKUNCI

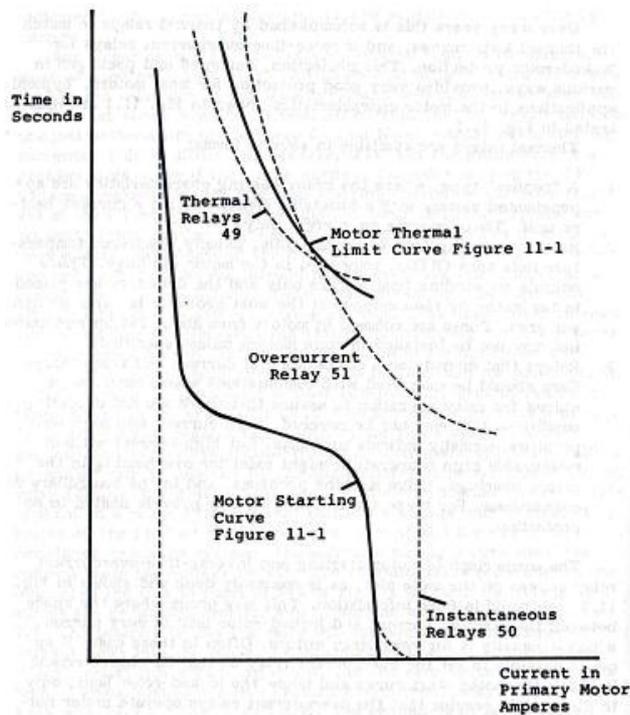
Proteksi ini melibatkan aplikasi rele yang sedekat mungkin cocok dengan kurva termal dan rotor terkunci Motor pada Gambar 9-1. Sekali lagi perlu diingat bahwa kurva termal Motor adalah pendekatan dari representasi zona kerusakan termis untuk operasi umum atau normal. Rele harus beroperasi sebelum batasan ini tercapai atau terlampaui. Selama ini keinginan tersebut dicapai dengan menggunakan rele termis untuk proteksi termis, dan rele arus lebih waktu terbalik untuk proteksi rotor terkunci. Proteksi ini didesain dan dikemas dalam berbagai cara, memberikan proteksi yang baik untuk kebanyakan Motor. Tipikal aplikasi untuk karakteristik Motor yang diperlihatkan pada Gambar 9-1 diilustrasikan pada Gambar 9-5.

Rele Termis tersedia dalam beberapa bentuk:

1. Tipe 'Replica' dimana karakteristik pemanasan Motor dekat dengan elemen bimetal diantara unit arus pemanas. Rele ini beroperasi hanya karena arus saja.
2. Operasi rele berasal dari koil eksplorasi, biasanya berupa Tahanan Pengindera Temperatur atau dalam bahasa aslinya disingkat RTD, disatukan pada belitan Motor. Rele beroperasi hanya karena temperatur belitan dan pengindera

diletakkan pada Motor oleh desainer pada titik panas yang paling mungkin atau pada areal yang berbahaya. Hal ini biasanya dipakai pada Motor-Motor 250 HP keatas, dan mungkin pula tidak terpasang pada Motor ukuran tertentu, kecuali dinyatakan.

3. Rele yang beroperasi berdasarkan kombinasi dari arus dan temperatur. Kehati-hatian harus dilakukan guna meyakinkan bahwa tidak terdapat kondisi yang mungkin tidak terlingkupi. Arus dan temperatur tinggi dapat menunjukkan adanya masalah, tetapi arus tinggi tanpa pengukuran temperatur tinggi mungkin muncul pada pemanasan lebih dari rotor, bantalan, masalah mesin penggerak, dan hubungan pada pengendali. Untuk kombinasi ini memberikan batasan pada proteksi.



Gambar 9- 5: Tipikal proteksi beban lebih, rotor terkunci, dan gangguan pada Motor

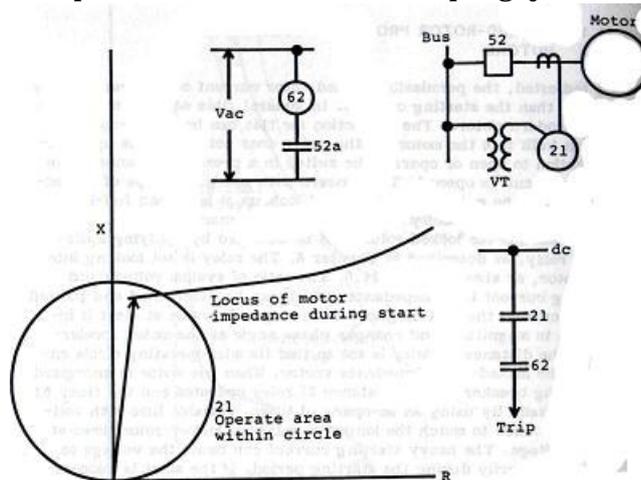
Perbandingan antara kurva pengasutan Motor dan kurva rele arus lebih waktu terbalik yang diplot bersama seperti diperlihatkan pada Gambar 9-5, dapat memberikan informasi yang salah. Hal ini dapat terjadi dimana ruang antara arus pengasutan dan batas arus rotor terkunci sangat sempit, yang umum terdapat pada Motor besar. Seringkali pada kasus ini, kelihatannya mungkin untuk menyetel rele arus lebih sehingga karakteristiknya diatas kurva pengasutan Motor dan dibawah batasan arus rotor terkunci, hanya untuk menemukan pada pelayan bahwa rele arus lebih beroperasi pada saat pengasutan normal dilakukan.

Sesungguhnya, kurva pengasutan Motor dan operasi rele adalah dua kurva karakteristik yang sedikit berbeda. Kurva pengasutan Motor adalah penggambaran dari perubahan arus terhadap waktu mulai dari saat rotor terkunci atau kondisi pengasutan sampai arus

operasi Motor. Karakteristik operasi rele menyatakan waktu operasi untuk berbagai harga arus konstan. Dengan rele arus lebih di setel pada 1,5 kali arus rotor terkunci atau lebih kecil, yang akan mulai beroperasi pada waktu Motor energise, kecuali arus pengasutan turun dibawah arus pick-up sebelum waktu kerja rele tercapai, hal ini akan menginisiasi Pemutusan yang tidak diinginkan. Waktu operasi rele tidak langsung tersedia dari karakteristiknya. Hal ini merupakan perhitungan yang kompleks, namun pabrik telah mengembangkan kriteria bagi penggunaan rele individu.

### 9. 10 PROTEKSI ROTOR TERKUNCI PADA MOTOR MOTOR BESAR

Seperti telah disebutkan, arus rotor terkunci yang diizinkan dapat sangat dekat atau lebih kecil dari arus pengasutan Motor. Secara umum, hal ini terjadi untuk Motor-Motor modern ukuran besar. Proteksi untuk keadaan ini dapat digunakan saklar kecepatan nol yang dibangun sebagai bagian dari Motor. Apabila Motor tidak dapat terakselerasi meski Motor telah energise. Untuk membuka atau mengoperasikan saklar untuk tujuan tersebut, suplai harus terbuka. Masalah yang harus diperhatikan dalam penggunaan proteksi tipe ini adalah Motor tidak dapat diasut dan terkunci paling tidak sampai kecepatan beban penuh, dan kesulitan dalam pengujian dan pemeliharaan.



Gambar 9-6: Proteksi rotor terkunci dengan rele Jarak (21) dan pewaktu

Proteksi untuk rotor terkunci dapat dicapai dengan menerapkan rele Jarak seperti yang telah diperlihatkan dalam bab sebelumnya. Rele diset untuk dapat melihat kedalam Motor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9-6. Ratio tegangan sistem dan arus asut adalah impedansi, yang dapat ditentukan dan diplot sebagai sebuah vektor dalam diagram R – X. Dari harga spesifik pada saat awal pengasutan kemudian berubah membesar baik dalam magnitud maupun sudut fasa sesuai dengan akselerasi Motor. Rele Jarak (21) diset sehingga lingkaran operasi MHO melingkupi vektor impedansi rotor terkunci. Bilamana Motor energise, dengan menutup Pemutus (52), rele Jarak beroperasi dan pewaktu (62) energise. Dengan menggunakan sebuah pewaktu ac, variasi waktu dengan tegangan dapat ditentukan untuk menetapkan lamanya waktu rotor

terkunci yang dapat diizinkan pada waktu tegangan rendah. Arus pengasutan yang besar dapat menyebabkan tegangan jatuh sementara selama prioda pengasutan.

Jika pengasutan berhasil, fasor Impedansi bergerak keluar dari lingkaran operasi rele Jarak (21) sebelum kontak pewaktu menutup. Jika pengasutan tidak sukses, vektor impedansi tetap berada didalam lingkaran dan bilamana pewaktu (62) bekerja, maka inisiasi pemutusan mulai. Penyetelan pewaktu ditentukan berdasarkan kurva waktu rotor terkunci yang diizinkan dari tegangan penuh sampai 75 atau 80% tegangan beban penuh. Proteksi ini tidak mencakup kegagalan akselerasi untuk mencapai kecepatan penuh, atau untuk melepas dengan rotasi kontinyu.

## 9. 11 MOTOR DAN KETIDAK SEIMBANGAN SISTEM

Penyebab umum ketidak seimbangan pada Motor 3 fasa dikarenakan oleh kehilangan fasa akibat Fuse terbuka, konektor atau konduktor terbuka. Ketidakseimbangan pada beban dapat pula mempengaruhi Motor. Ketidak seimbangan tegangan sebesar 3,5% akan mengakibatkan kenaikan 25% atau lebih temperatur Motor. Hal ini terutama akibat arus urutan negatif yang dihasilkan oleh ketidak seimbangan. Arus ini menimbulkan fluks pada celah udara Motor, berputar berlawanan arah putaran Motor sesungguhnya. Efek kulit meyebabkan resistansi tinggi, dan seperti disebut diatas, impedansi urutan negatif merupakan hal penting pada harga rotor terkunci. Jadi arus tinggi akan menimbulkan pengaruh pemanasan.

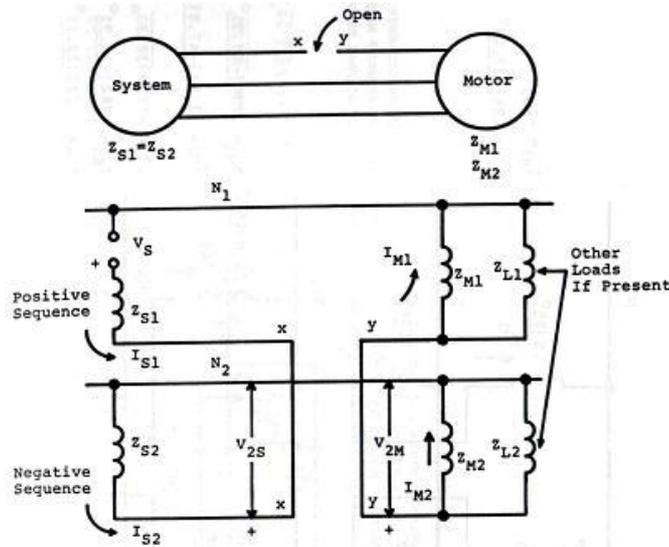
Total pemanasan pada Motor sebanding dengan:  $I_1^2 t + K I_2^2 t$

Dimana  $I_1$  dan  $I_2$  adalah arus-arus urutan positif dan negatif, dan  $K$  adalah:

$$K = \frac{R_{r2}}{R_{r1}} = \text{estimasi konservatif adalah } \frac{175}{I_{LR}^2}$$

Dimana  $R_{r1}$  dan  $R_{r2}$  adalah resistansi urutan positif dan negatif dari rotor Motor.  $I_{LR}$  arus rotor terkunci dalam pu. Persamaan diatas menunjukkan bahwa komponen urutan negatif mempengaruhi kenaikan temperatur Motor.

Jaringan komponen simetris untuk satu fasa terbuka ditunjukkan pada Gambar 9-7. Ini adalah sirkit yang merupakan penyederhanaan dari suatu sistem yang direpresentasikan dengan sebuah sumber dengan impedansinya  $ZS1 = ZS2$ . Untuk kasus-kasus spesifik, sirkit ini dapat diekspansi untuk menunjukkan detail yang ada dari sumber atau beban. Transformator dapat direpresentasikan dengan reaktansinya,  $XTR$  atau  $XT$ . Untuk keadaan fasa terbuka antara Transformator dan Motor,  $XT$  harus ditambahkan secara seri dengan impedansi sumber sebagai harga ekuivalen  $ZS1$  dan  $ZS2$ . Bilamana fasa terbuka terjadi diantara sisitem dan Transformator,  $XT$  tidak termasuk dalam ekuivalen sumber, tetapi ditambahkan secara seri dengan impedansi Motor. Sirkit ini untuk Motor yang tidak ditanahkan, seperti umumnya dipakai. Jaringan urutan nol tidak terlibat pada keadaan satu fasa terbuka, kecuali kedua sisi sistem maupun Motor ditanahkan.



Gambar 9-7: Representasi komponen simetris yang disederhanakan pada fasa terbuka

Distribusi arus untuk fasa terbuka menggunakan jaringan pada Gambar 9-7 yang ditunjukkan dalam Gambar 9-8 untuk beberapa kasus. Tipikal harga perunit impedansi berdasarkan dasar kVA Motor dan adalah:

$$Z_{S1} = Z_{S2} = 0,05 \angle 90^0 \text{ pu}$$

$$Z_{L1} = Z_{L2} = 1,0 \angle 15^0 \text{ pu untuk beban statik}$$

$$Z_{M2} = 0,90 \angle 25^0$$

$$Z_{M1} = 0,15 \angle 85^0$$

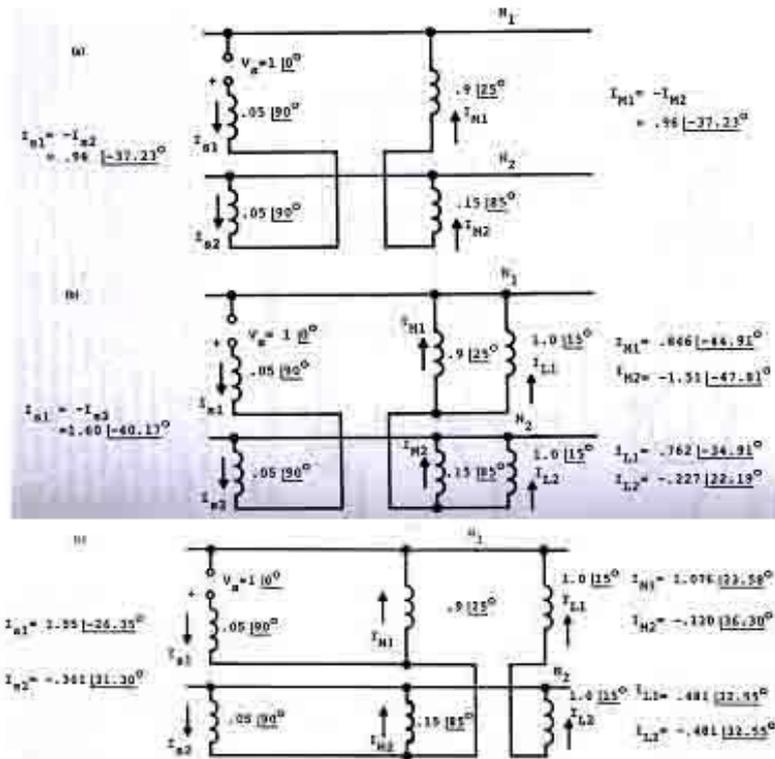
Sudut ini dimasukkan pada perhitungan, tetapi untuk penyederhanaan diasumsikan seluruh impedansi pada sudut sama dan cenderung tidak berubah. Dengan seluruh harga pada 900, contoh ; IS1 = 0,87 tidak 0,96 pu seperti dalam Gambar 9-8a. Dari arus-arus urutan ini, dapat dilihat bahwa pada kedua sisi terbuka Ia = I1 + (-I2) = 0. Arus fasa lain adalah:

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 = -j\sqrt{3} I_1$$

dimana I1 = - I2

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 = +j\sqrt{3} I_1$$

demikian pula pada Gambar 9-8a, arus Ib dan Ic adalah 1,66 pu. Dapat dilihat bahwa fasa terbuka hanya menyebabkan kenaikan arus fasa yang relatif kecil, sehingga rele arus lebih tidak mampu mendeteksi fasa terbuka.

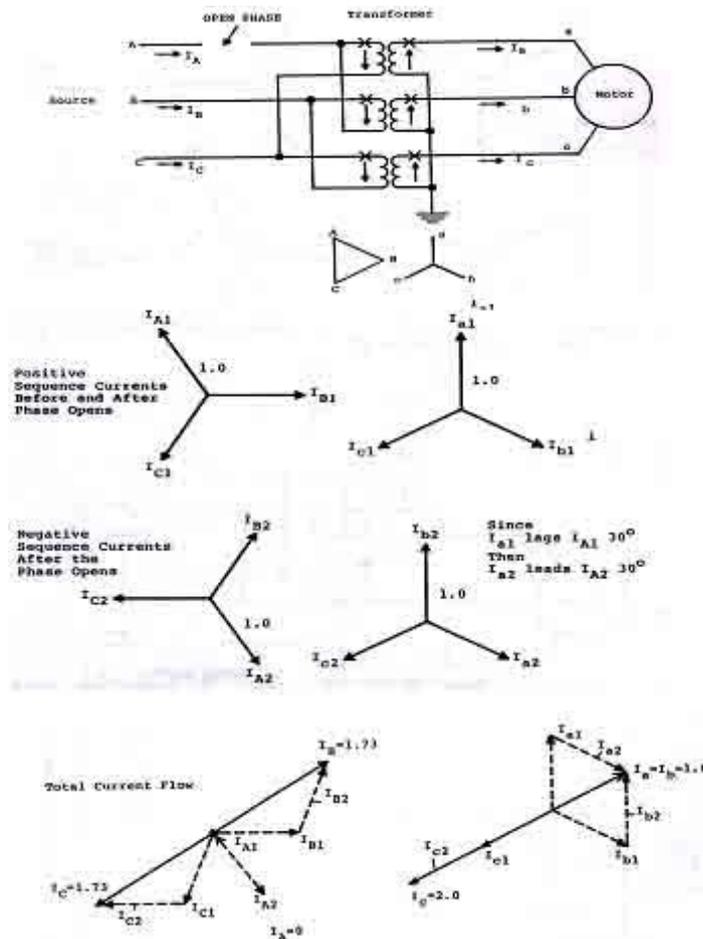


Gambar 9-8: Arus urutan positif dan negatif pada kondisi fasa terbuka dengan dan tanpa beban statis : (a). Fasa terbuka tanpa beban statis; (b). Arus urutan dengan beban statis pada bus Motor pada keadaan fasa terbuka disisi sistem Motor dan beban; (c). Arus urutan dengan beban statis pada bus Motor, pada keadaan fasa terbuka antara Motor dan beban

Apabila beban statik terhubung paralel dengan Motor seperti dalam Gambar 9-7, dan dihitung dalam contoh pada Gambar 9-8b. Putaran Motor yang masih berkelanjutan akan membangkitkan tegangan pada fasa terbuka. Hal ini sama saja dengan memberikan tegangan secara kontinyu pada beban yang terhubung pada fasa tersebut. Daya yang dialihkan sepanjang celah udara Motor akan mengurangi daya shift Motor sehingga terjadi hentakan. Satu contoh memperlihatkan bahwa Motor akan menarik 20% dari rating beban dengan beban statis tiga kali lebih besar dari beban Motor atau pada 50% dari rating beban dengan beban statis sama dengan beban Motor. Dengan kata lain, rendahnya impedansi urutan negatif Motor berarti bahwa bagian terbesar dari arus urutan negatif mengalir ke Motor yang mengakibatkan kenaikan pemanasan. Distribusi ini ditunjukkan dalam Gambar 9-8b. Arus urutan negatif Motor dapat saja lebih rendah, seperti dalam Gambar 9-8c, hanya apabila beban statis adalah beban satu fasa.

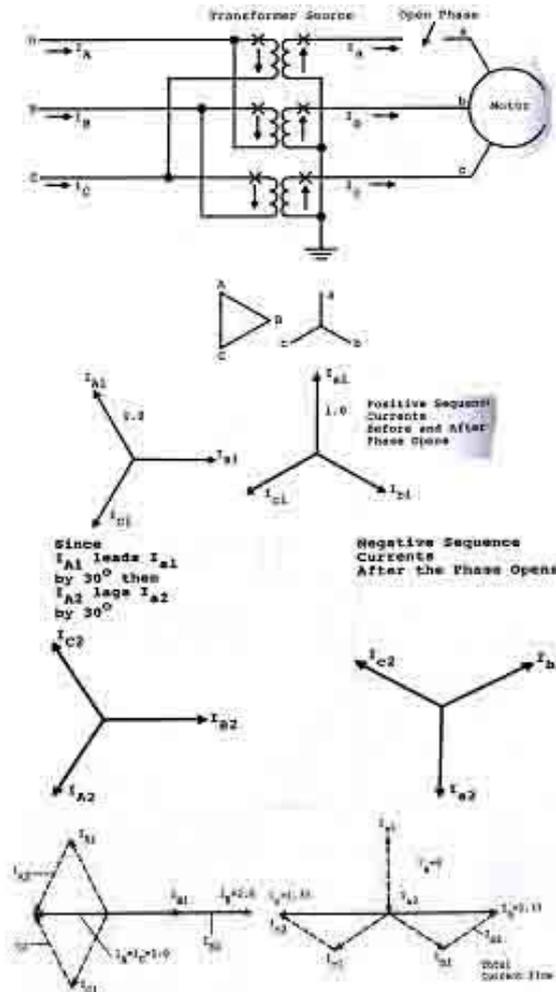
Hal mendasar dalam fasa terbuka adalah bahwa arus urutan positif dan negatif sama dan berlawanan sepanjang arus urutan nol tidak terlibat. Hal ini sangat berguna untuk mengembangkan/membangkitkan arus tidak seimbang melalui bank Transformator hubungan delta – wyei. Hal tersebut, seperti halnya perhitungan pada Gambar 9.8 adalah untuk kondisi sesaat setelah fasa terbuka dan sebelum Motor melambat, stall,

atau impedansi internal berubah, dan seterusnya. Arus untuk keadaan fasa terbuka pada sisi primer Transformator wyei – delta yang mensuplai Motor seperti ditunjukkan pada Gambar 9-9 dan dalam Gambar 9-10 keadaan fasa terbuka pada sekunder sisi Motor. Bilamana arus urutan positif tergeser 300 dalam arah melalui bank, arus urutan negatif tergeser 300 dalam arah yang berlawanan.



Gambar 9-9: Arus tidak seimbang mengalir melalui bank Transformator delta – wyei menuju Motor pada kondisi salah satu fasa terbuka disisi sumber

Arah arus yang diperlihatkan pada sirkit diagram untuk kedua gambar benar bagi diagram fasor. Tanpa spesifikasi fasor diagram tersebut, arus  $I_B$  pada Gambar 9-9 dapat ditunjukkan menuju Motor sebagaimana diperlihatkan., tetapi pada  $\sqrt{3}$  Magnitudnya dengan  $I_C$  pada  $\sqrt{3}$  mengalir menuju sumber. Ini adalah aliran yang sebenarnya, yang ditunjukkan pada Gambar 9-9 oleh diagram fasor, memperlihatkan bahwa  $I_B$  mengalir seperti diperlihatkan, tetapi  $I_C$  berbeda  $180^\circ$  dengan  $I_B$ , keduanya dalam  $\sqrt{3}$  Magnitudnya. Jika  $I_B$  dan  $I_C$  ditunjukkan dalam arah berlawanan dalam sirkit diagram, fasor sebenarnya akan menunjukkan  $I_B$  dan  $I_C$  sefasa. Arus-arus tersebut dapat ditacer melalui Transformator dengan menunjukkan ketidakseimbangan, ingat bahwa 1.0 pu arus dibelitan wyei akan muncul sebagai arus 0,577 pu pada belitan delta.



Gambar 9.10. Arus tidak seimbang mengalir melalui bank Transformator delta – wyei pada kondisi fasa A terbuka disidi Motor atau sekunder

Tegangan urutan negatif bermanfaat pada proteksi Motor. Dari definisi dasar bahwa sanya  $V_2 = - I_2 Z_2$ . Dengan acuan contoh pada Gambar 9-8,

$$\text{untuk kasus a } V_2 = 0,96 \times 0,15 = 0,144 \text{ pu}$$

$$\text{untuk kasus b } V_2 = 1,51 \times 0,15 = 0,227 \text{ pu}$$

$$\text{untuk kasus c } V_2 = 0,12 \times 0,15 = 0,018 \text{ pu}$$

Hal ini menunjukkan bahwa  $V_2$  berguna untuk proteksi kehilangan fasa bilamana fasa terbuka terjadi antara sumber dan titik dimana  $V_2$  diukur, tetapi umumnya tegangan sangat kecil bila fasa terbuka terjadi antara titik pengukuran  $V_2$  dan Motor. Generalisasi ini didasarkan pada relatif rendahnya impedansi sumber dibandingkan dengan impedansi Motor, sebagaimana kasus-kasus yang terjadi.  $V_2$  pada Gambar 9-8a, bila diukur pada sisi sumber untuk gangguan fasa terbuka downstream adalah  $0,96 \times 0,05 = 0,048 \text{ pu}$  dibandingkan terhadap fasa terbuka upstream sebesar  $0,144 \text{ pu}$ .

## 9. 12 KETIDAK SEIMBANGAN DAN PROTEKSI PERUBAHAN FASA

Sebagaimana disarankan pada subbagian 9-11, terdapat berbagai cara yang mungkin untuk mendeteksi ketidak seimbangan sistem, yaitu:

1. perbedaan magnitudo antara arus-arus ketiga fasa.
2. Munculnya arus urutan negatif dan
3. Keberadaan tegangan urutan negatif

Ketiga hal diatas digunakan untuk proteksi. Tipe Penimbang arus (46) membandingkan magnitud arus ketiga fasa dan beroperasi bilamana salah satu arus fasa berbeda cukup signifikan dibandingkan dengan arus fasa yang lainnya. Ini merupakan proteksi yang paling efektif untuk penyulang-penyulang yang mensuplai Motor individu guna mendeteksi terbukanya atau terjadinya ketidak seimbangan. Bila beban lain disuplai oleh sirkit dimana proteksi ini terpasang, kehati-hatian harus dilakukan untuk menjamin bahwa setiap terjadi fasa terbuka atau ketidak seimbangan tidak terjadi kamufalase oleh arus seimbanga yang mensuplai beban. Satu rele harus diterapkan untuk setiap beban atau penyulang. Tipikal sensitivitas minimum dari rele adalah berkisar 1A pada satu fasa dengan arus = nol pada fasa lain atau 1,5 pu pada satu fasa dan 1.0 pu pada fasa lainnya.

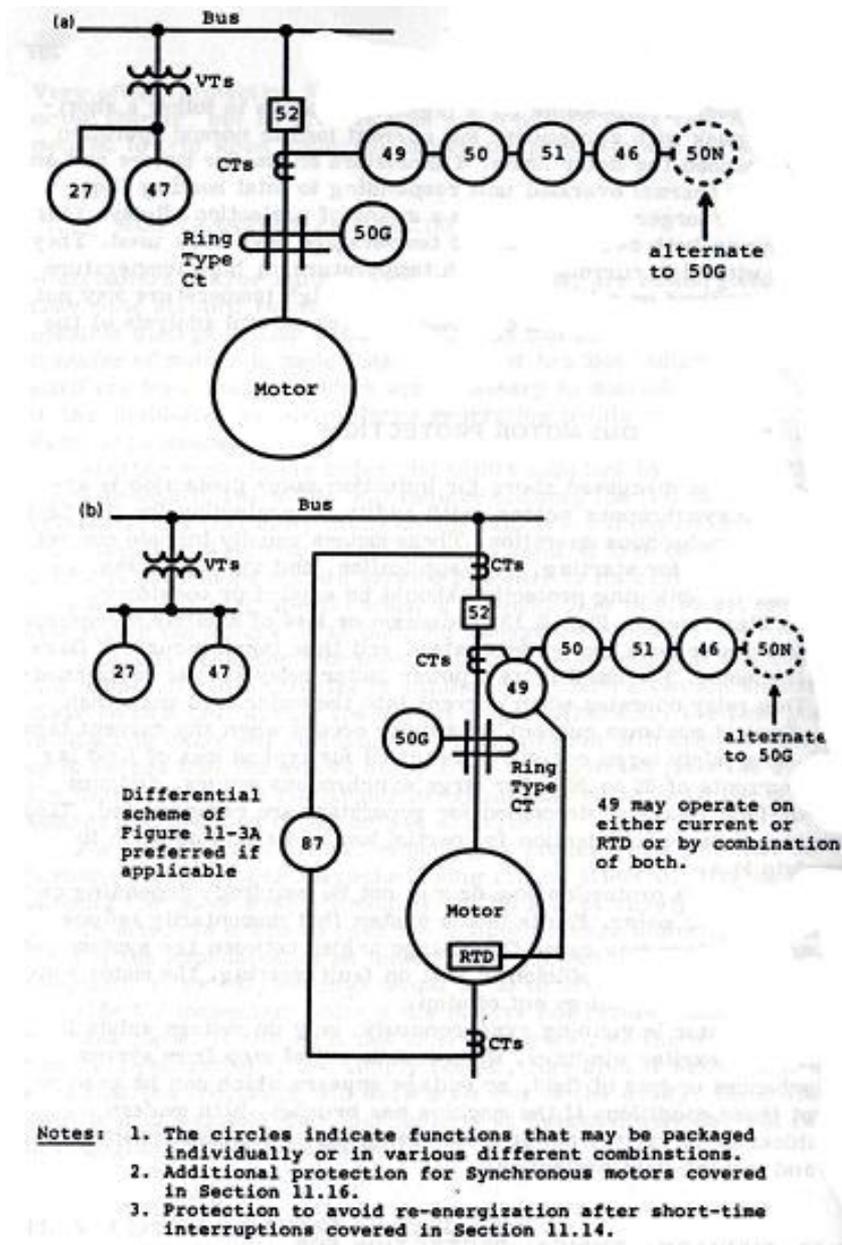
Tipe lain dari rele (46) bereaksi terhadap arus urutan negatif, rele dilengkapi elemen seketika dengan tambahan waktu tunda tetap, atau rele mengikuti karakteristik  $I_2^2 t = K$  seperti digunakan pada proteksi Generator. Tipe ini tidak banyak dipakai dalam proteksi Motor. Tipe tegangan urutan negatif (47) direkomendasikan untuk dipakai mendeteksi ketidak seimbangan fasa dan perubahan fasa pada suplai atau sirkit sumber. Tipikal sensitivitas operasi adalah sekitar 0,05 pu  $V_2$ . Salah satu rele harus dihubungkan melalui VT (hubungan wyei – wyei atau delta terbuka) menuju masing-masing sekunder bus suplai seperti ditunjukkan pada Gambar 9-11.

Penurunan tegangan  $V_2$  umumnya terjadi pada fasa terbuka pada sumber atau upstream sistem. Rele harusnya tidak diaplikasikan untuk fasa terbuka downstream atau antara rele dan Motor, seperti ditunjukkan, harga tegangan  $V_2$  mungkin cukup kecil. Apabila fasa berubah, 1 pu  $V_1$  menjadi 1 pu  $V_2$  sehingga rele urutan negatif bereaksi terhadap adanya perubahan fasa. Rele fasa terbalik juga tersedia untuk Motor kecil. Urutan fasa normal menghasilkan penahan atau torka pembuka kontak, sementara perubahan urutan fasa mengakibatkan operasi atau torka penutup kontak.

## 9. 13 PROTEKSI TEGANGAN KURANG

Tegangan kurang pada Motor dapat berakibat meningkatkan arus dan kegagalan pengasutan untuk mencapai rating kecepatan Motor atau kehilangan kecepatan dan mungkin berhenti berulang, proteksi tegangan kurang termasuk bagian dari peralatan

Starter Motor, tetapi sebuah rele Tegangan kurang waktu terbalik (27) direkomendasikan untuk digunakan guna memutus kondisi ini agar tidak berlangsung lama dan sebagai rele cadangan.



Gambar 9-11: Rekomendasi tipikal proteksi Motor : (a) untuk Motor tanpa lead netral dan tersedia RTD; (b). untuk Motor yang memiliki lead netral dan tersedia RTD

#### 9. 14 PENUTUP BALIK DAN BUS PENGALIH

Apabila Motor, baik Induksi maupun Sinkron, reenergise sebelum Motor benar-benar berhenti berputar, maka dapat terjadi torka transien yang tinggi dengan kemungkinan rusak dan atau merusak. Hal ini terjadi bilamana dilakukan pengalihan sumber masukan Motor dari sebuah penyulang yang mengalami kehilangan tegangan ke bus bantu yang

memiliki tegangan normal. Pengalihan dibutuhkan untuk menjaga agar pelayanan vital ke suplai bantu pusat pembangkit besar atau proses industri kritis.

Contoh lain adalah pabrik Industri disuplai oleh penghubung utilitas tunggal. Masalahnya pada utilitas akan memerlukan pembukaan penghubung. Pengalaman menunjukkan bahwa kebanyakan gangguan pada utilitas adalah transien alami yang disebabkan oleh induksi petir, angin, dan atau kontak dengan dahan/pohon. Utilitas akan khawatir untuk mengembalikan pelayanan ke konsumen, umumnya digunakan penutup balik kecepatan tinggi (sekitar 0,20 – 0,60 detik) dan reenergise Motor, dengan kemungkinan mengalami kerusakan.

Batasan aman untuk menghubungkan kembali sebuah Motor adalah sangat kompleks dan diluar bahasan buku ini. Bila pengalihan cepat dilakukan, atensi khusus yang harus diberikan selama proses desain. Dengan kata lain, police terbaik salah satunya adalah menunda setiap proses energise ulang Motor Induksi atau meyakinkan bahwa Motor secepatnya diputus dari sistem. Untuk Motor Induksi, reenergise tidak boleh dilakukan sebelum tegangan Motor turun sampai 33% atau lebih kecil dari tegangan normalnya. Untuk Motor Sinkron, penutupan balik atau reenergise tidak diperbolehkan sampai resinkronisasi dapat efektif. Artinya membuka suplai Motor tepat pada saat kehilangan suplai.

Efektif artinya untuk membuka Pemutus suplai dalam kondisi ini digunakan sebuah rele frekuensi kurang. Tipikal rele Frekuensi (81) diatur 98 atau 97% dari rating frekuensi, dengan waktu override pengaruh dip tegangan, tetapi sebelum reenergise dilaksanakan. Jika pabrik memiliki Pembangkit lokal, atau ada penghubung antara pembangkit dan penyulang suplai, maka kehati-hatian harus dilakukan untuk meyakinkan bahwa frekuensi menurun pada waktu kehilangan utilitas. Pembangkit yang cukup untuk melayani beban, khususnya pada prioda beban rendah, akan menghasilkan perubahan frekuensi yang dapat diabaikan.

#### 9. 15 PENGASUTAN BERULANG DAN PROTEKSI JOGGING

Pengasutan Motor berulang kali dengan waktu yang tidak cukup diantaranya atau operasi dengan variasi beban yang sangat ekstrim (Jogging) dapat mengakibatkan kenaikan temperatur Motor. Adalah mungkin untuk suatu temperatur tinggi mengikuti beban puncak waktu singkat dengan arus subsequen rendah pada operasi normal dan tidak melebihi batasan Motor. Thermistor pada Motor-Motor kecil dan unit beban lebih thermis terintegrasi bereaksi terhadap panas total untuk Motor besar memberikan sebuah proteksi. Rele (49) yang dapat beroperasi pada arus lebih dan temperatur dapat digunakan untuk proteksi Motor. Rele beroperasi dengan arus tinggi dan temperatur tinggi. Temperatur tinggi tanpa beban lebih atau beban lebih tinggi tanpa temperatur tinggi mungkin tidak akan menyebabkan operasi. Penggunaan ini membutuhkan anlisis mendalam.

## 9. 16. PROTEKSI MOTOR SINKRON

Proteksi yang telah didiskusikan diatas adalah proteksi digunakan untuk motor induksi, namun proteksi ini dapat pula digunakan untuk proteksi motor sinkron, dengan tambahan peralatan proteksi untuk operasi tidak sinkron dan kehilangan medan. Pada motor-motor sinkron juga termasuk kendali dan proteksi untuk pengasutan, aplikasi medan, dan sinkronisasi. Oleh karena itu, proteksi bagi kondisi diatas harus pula menjadi pertimbangan.

Sebagaimana digambarkan dalam Gambar 9-13, kehilangan atau penurunan eksitasi memerlukan daya reaktif dari sistem, dan arus lagging akan mengalir ke motor. Untuk motor-motor kecil, rele faktor daya direkomendasikan untuk digunakan. Rele ini akan bekerja bila arus yang menuju motor ketinggalan lebih dari 300. Tipikal sensitivitas arus maksimum terjadi bila arus tertinggal 1200, sehingga diperlukan arus yang sangat besar bila terjadi kehilangan medan pada arus ketinggalan 300 sampai 900. Untuk motor-motor besar, direkomendasikan untuk menggunakan rele jarak kehilangan medan seperti yang dijelaskan dalam proteksi Generator di bab 5. Hal ini dapat meningkatkan proteksi bagi kehilangan medan sebagian sebagaimana pada kehilangan medan total.

Proteksi kehilangan sinkronisasi bisa diperlukan bisa pula tidak, tergantung pada sistem dan motor. Gangguan pada sistem akan mengurangi tegangan masukan motor sesaat yang akan menyebabkan sudut tegangan antara sistem dan motor berayun cukup besar yang akan menyebabkan pembukaan gangguan, motor tidak akan kembali normal dan akan kehilangan sinkronisasinya. Jika motor berjalan pada kondisi sinkronnya, hanya tegangan dc yang akan muncul pada belitan eksiter dan medan. Bila motor kemudian mengalami kehilangan sinkronisasi akibat gangguan sistem atau kehilangan medan, akan muncul tegangan ac yang akan terdeteksi bilamana mesin merupakan mesin tanpa sikat. Untuk mesin-mesin modern dengan eksiter tanpa sikat, rele faktor daya akan melengkapi proteksi untuk kehilangan medan dan full-out.

## 9. 17. RINGKASAN: TIPIKAL PROTEKSI UNTUK MOTOR

Tipikal proteksi yang direkomendasikan dan umum digunakan untuk proteksi motor-motor listrik secara ringkas dapat dilihat pada Gambar 9-11. Aplikasi dari semua rele yang ada pada Gambar telah dibahas diatas. Ini adalah sebuah rekomendasi, aplikasi dari tipe dan jumlah rele proteksi yang digunakan sangat tergantung pada kondisi lokal, ekonomis, dan individu. Sistem proteksi ini dapat dikurangi atau ditambah.

## DAFTAR PUSTAKA