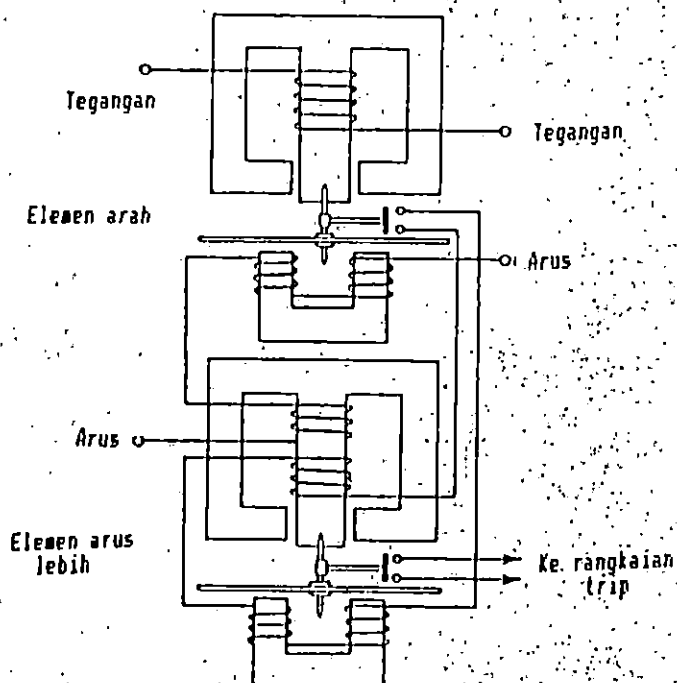


PROTEKSI GANGGUAN ARUS TAK NORMAL PADA SISTEM TENAGA LISTRIK



oleh :
Drs. Jamin Sembiring

MIL	PERPUSTAKAAN IKIP PADANG
DITERIMA OLEH	29-8-95
SUMBER BARGA	h/
KOLEKSI	KIKI
NO. INVENTARIS	1562 (h/95. P2/2)
NO. KAS	62.31 Sem P2

FAKULTAS PENDIDIKAN TEKNOLOGI DAN KEJURUAN
INSTITUT KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN PADANG

1994

MILIK UPT PERPUSTAKAAN
IKIP PADANG

KATA PENGANTAR

Kebutuhan tenaga listrik yang pesat dewasa ini disertai keandalan yang tinggi mendorong pihak pengusaha listrik melakukan interkoneksi antara sistem yang berdekatan. Secara ekonomis interkoneksi seperti itu menguntungkan karena mesin yang diperlukan sebagai cadangan guna melayani beban puncak menjadi lebih sedikit.

Interkoneksi antar sistem akan menimbulkan beberapa masalah, antara lain bahwa arus yang mengalir akan menjadi lebih besar jika terjadi gangguan atau kesalahan khususnya hubung singkat di salah satu sistem.

Untuk mengatasi masalah di atas, sistem perlu dilengkapi dengan alat proteksi yang dapat mengamankan sistem dari berbagai bentuk gangguan. Unit proteksi itu berupa rele dan pemutus rangkaian (Circuit Breaker) beserta assesorinya.

Tipe dan karakteristik rele yang dipergunakan sebagai alat proteksi sudah tentu disesuaikan dengan bentuk, sifat, dan jenis gangguan yang akan terjadi.

Dalam buku ini mulai dari Bab I sampai Bab IV dibahas masing-masing mengenai sifat umum rele, prinsip kerja, konstruksi, dan penerapannya. Adapaun perhitungan praktis mengenai arus hubung singkat yang dibicarakan pada bab terakhir (Bab V), itu semua berdasarkan pengoperasian, bukanlah prinsip perbaikan apalagi prinsip perluasan sistem. Materi-materi bahasan yang disebutkan di atas sebagian kami angkat dari materi perkuliahan Proteksi Sistem Tenaga yang kami berikan selama 4 tahun terakhir ini.

Pada kesempatan ini kami mengucapkan banyak terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu kami dalam penyusunan buku ini, terutama kepada sahabat saya Drs. Ridwan, M.Sc.Ed. yang telah meluangkan waktunya mengedit dan memberi nasehat yang benar-benar bermanfaat untuk penyempurnaan buku ini.

Akhirnya, harapan kami semoga buku ini bermanfaat bagi semua pihak, terutama yang terlibat dalam bidang Teknik Elektro.

Padang, Oktober 1994.

Penulis,

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
BAB :	
I. RELE ELEKTRO MEKANIK	1
A. SIFAT UMUM RELE	1
B. KONSTRUKSI UMUM RELE	6
II. MACAM-MACAM RELE DAN PRINSIP KERJA	11
A. RELE ARUS LEBIH TIPE INDUKSI DAN GANGGUAN TANAH..	11
1. Rele Induksi Kumputan Ganda	14
2. Sifat Penting Rele Kumputan Ganda	17
B. RELE DAYA TERARAH	23
C. RELE JARAK	29
D. RELE BIAS	36
E. RELE ARUS LEBIH DENGAN PENAHAN LUAR	39
F. RELE TIPE TRANSLAY	41
G. RELE FASE URUTAN NEGATIF	46
H. PENGATURAN RELE	53
III. PROTEKSI BUSBAR, FEEDER DAN JARINGAN	55
A. BUSBAR	55
B. PENGAMAN KEBOCORAN RANGKA	56
C. PENGAMAN DIFRENSIAL	58
D. PENGAMAN ARAH INTERLOK	60
E. PEMILIHAN DAN PENAMPILAN PENGAMAN	61
F. KABEL SALURAN	62
IV. PENERAPAN RELE PENGAMAN PADA JARINGAN TRANSMISI	65
A. SEBAB DAN JENIS GANGGUAN	65
B. RELE PENGAMAN	66
1. Pertimbangan Mengenai Kemampuan Pengaman	66
2. Pertimbangan Mengenai Sistem Tenaga	68

	Halaman
3. Penerapan Sistem Pengaman	69
a. Sistem Rele Arus Lebih	69
b. Sistem Rele Jarak	70
c. Sistem Pengaman Seimbang	72
d. Sistem Rele Pilot	72
C. PENGAMAN MENURUT SISTEM SALURAN TRANSMISI	78
1. Saluran Radial	78
2. Saluran Tertutup	79
3. Saluran Ganda Paralel Dengan Dua Terminal	79
4. Saluran Multi Terminal	80
5. Saluran Kabel	81
6. Saluran Dengan Kapasitor Seri	82
D. PENGAMAN MENURUT SISTEM PENTANAHAN	82
1. Sistem Tak Ditanahkan	82
2. Sistem Pentanahan Dengan Tahanan	83
a. Sebab-sebab Terjadinya Arus Urutan Nol	83
b. Sistem Rele Pengaman	84
3. Sistem Pentanahan Dengan Gulungan Peterson	83
4. Sistem Pentanahan Langsung (Efektif)	86
a. Rangkaian Ganda Paralel	86
b. Hubung Singkat Dua Fase	87
c. Penutupan Kembali Satu Fase	87
d. Rele Arus Lebih Hubung Singkat-Tanah	87
e. Pembukaan Pemutus Beban	88
E. PENUTUPAN KEMBALI	88
1. Waktu Penutupan Kembali	88
2. Waktu Tanpa Tegangan	89
3. Waktu Tanpa Arus	89
F. SISTEM PENUTUPAN KEMBALI	90
1. Sistem Penutupan Satu Fase	90
2. Sistem Penutupan Tiga Fase	91
3. Sistem Penutupan Fase Banyak	92
4. Sistem Penutupan Bertahap Dengan Pembukaan Menurut Skala Prioritas	92
5. Penutupan Tiga Fase Dipaksakan	93

G. RELE PELEPAS SISTEM	93
1. Sistem Pelepas Hubung Singkat Tetap	93
2. Sistem Pelepas Keadaan Tak Serempak	94
3. Sistem Pelepas Frekuensi Tak Normal	94
V. PERHITUNGAN PRAKTIS ARUS HUBUNG SINGKAT	95
A. PENDAHULUAN	95
1. Tujuan Perhitungan	95
2. Tipe Jaringan	96
3. Tipe Gangguan	96
4. Tingkat Keakuratan	96
B. MENGATASI ARUS HUBUNG SINGKAT	97
1. Gangguan Berada Jauh Dari Generator	98
2. Arus Puncak Taksimetris Maksimum	101
3. Gangguan Pada Terminal Generator	102
C. PERHITUNGAN ARUS HUBUNG SINGKAT	103
1. Gangguan Tiga Fase Seimbang	104
2. Gangguan Fase-Fase	104
3. Gangguan Tanah Satu Fase dan Dua Fase	105
4. Penentuan Sistem Impedansi	105
5. Kombinasi Impedansi	107
D. HARGA IMPEDANSI ELEMEN-ELEMEN SISTEM	108
1. Jaringan Memanjang	109
2. Generator Sinkron	109
3. Transformator	110
4. Hantaran Udara	111
5. Kawat Tanah	112
6. Busbar	112
7. Motor Sinkron dan Kondenser	112
8. Motor Induksi	113
9. Kapasitor	113
10. Impedansi	114
11. Pemutus (Switchgear)	114
12. Gangguan Bunga Api	115

E. CONTOH PERHITUNGAN HUBUNG SINGKAT	115
1. Nilai X dan R	117
2. Gangguan Pada Titik A Busbar Tegangan Tinggi...	117
3. Gangguan Pada Titik B Busbar Tegangan Rendah...	117
4. Gangguan Pada Titik C Terminal Motor	118
5. Arus Yang Diserap Oleh Motor Tegangan Rendah...	118
Gangguan Pada Titik B	119
Gangguan Pada Titik C	119
Gangguan Pada Titik A	120
F. KESIMPULAN	120
DAFTAR KEPUSTAKAAN	123

BAB I RELE ELEKTROMAKNET

A. SIFAT UMUM RELE

Rele proteksi adalah alat yang berfungsi mengindera (sense) adanya gangguan/kesalahan pada suatu sistem tenaga listrik. Karena ada kesalahan, rangkaian kemudi (trip circuit) dari pemutus rangkaian mendapat catu daya dari transduser, lalu pemutus rangkaian tersebut membuka kontaknya, sehingga rangkaian yang terganggu itu akan lepas. Transduser yang digunakan sebagai pencatu daya bagi pemutus rangkaian ini ialah transformator arus.

Pada dasarnya suatu gangguan adalah setiap keadaan sistem yang menyimpang dari kondisi normal, misalnya naiknya arus dan turunnya tegangan pada suatu sistem tenaga listrik misalnya pada generator, motor, saluran transmisi maupun saluran distribusi. Gangguan atau kesalahan pada umumnya dapat berupa hubung singkat dan atau hubung terbuka.

Pada hubung singkat terbentuk hubungan yang memintas. Gangguan hubung terbuka menyatakan suatu penghantar putus. Kondisi kerja tak normal mencakup beban lebih dan tegangan kurang yang disertai oleh turunannya. Gangguan terbuka lebih jarang terjadi dibandingkan dengan gangguan hubung singkat, malahan gangguan terbuka berubah menjadi hubung singkat oleh kejadian-kejadian yang mengikutinya.

Rele-rele merupakan unsur logika dari sistem perlindungan. Sinyal-sinyal tingkat rendah yang dihasilkan oleh transduser adalah reproduksi yang cukup teliti dari tegangan dan arus yang sebenarnya pada suatu sistem.

Bila suatu gangguan terutama gangguan hubung singkat dibiarkan berlangsung agak lama pada suatu sistem daya, banyak pengaruh buruk yang akan terjadi, antaranya:

1. Berkurangnya batas-batas kestabilan.
2. Rusaknya perlengkapan-perlengkapan yang berada di dekat gangguan tersebut.
3. Kemungkinan terjadi ledakan bagi peralatan-peralatan yang mengandung minyak, sehingga menimbulkan kebakaran.
4. Terpecah-pecahnya keseluruhan daerah pelayanan sistem daya itu.

Pengaruh mana yang lebih menonjol dalam suatu kasus tertentu banyak tergantung dari pada sifat dan kondisi kerja sistem daya tersebut.

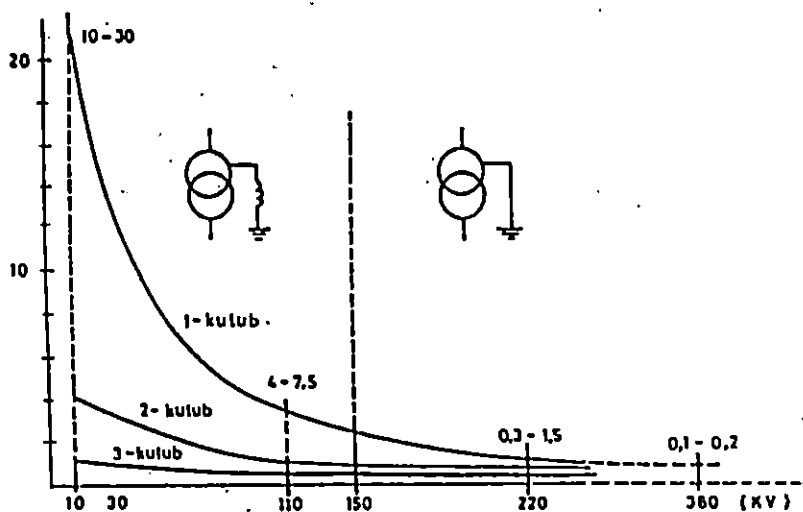
Pemutus-pemutus rangkaian merupakan mata rantai terakhir dalam proses menghilangkan suatu gangguan. Bila rangkaian kemudi (trip circuits) pemutus rangkaian telah diberi daya oleh relenya, pemutus rangkaian itu membuka dengan sangat cepat. Keseluruhan proses, yaitu dari dimulainya gangguan hingga dibebaskannya sistem itu dari gangguan, memakan waktu antara 30 sampai 100 millidetik, tergantung dari jenis sistem pengaman yang dipakai.

Sifat-sifat suatu rele merupakan ukuran yang penting dalam perilaku dan kualitasnya. Untuk dapat melaksanakan fungsinya dengan baik, sebuah rele harus memenuhi sejumlah persyaratan yang diperlukan, antaranya adalah:

1. Selektif, mampu membedakan arus yang mengalir ke tempat terjadinya gangguan di dalam seksi yang diamankan.

2. Bekerja cepat (quick action), harus dapat memberikan keputusannya secepat mungkin, apakah sistem perlu diputuskan atau tidak.
3. Sensitif, mampu mendeteksi adanya gangguan sedini mungkin pada daerah yang menjadi tanggung jawab pengamanannya.
4. Sangat reliable dalam operasional, sederhana, kokoh, serta terencana dengan baik.
5. Harga yang murah namun handal dalam kualitas dan operasional.

Dalam gambar 1 di bawah ini ditunjukkan data statistik dari berbagai kesalahan selama setahun pada hantaran udara di Indonesia. Nampak bahwa jumlah kesalahan yang terjadi tergantung pada besar tegangan sistem, metode pembumian netral serta macam kesalahan itu sendiri.

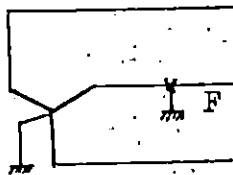
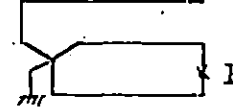
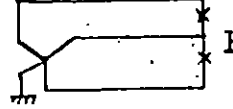
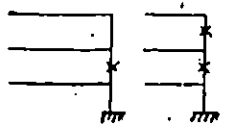



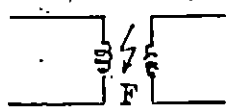
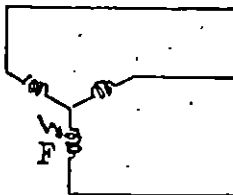
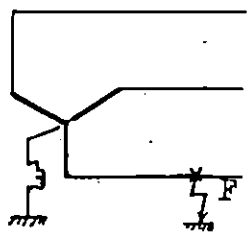
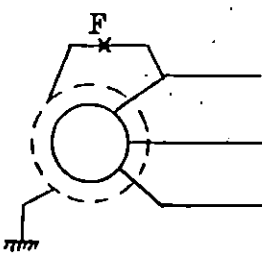
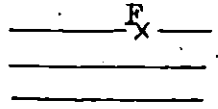
Gambar 1. Jumlah kesalahan pada saluran udara

K. T. Sirait (1987:1)

Dalam tabel di bawah ini dimuat ringkasan mengenai macam, penyebab, akibat serta representasi rangkaian untuk berbagai kesalahan dalam sistem tenaga listrik.

MACAM, PENYEBAB, AKIBAT DAN REPRESENTASI RANGKAIAN UNTUK BERBAGAI KESALAHAN DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK.

KESALAHAN	PENYEBAB	AKIBAT	RANGKAIAN
1	2	3	4
1. Hubung singkat satu fase	Hubungan galvanis antara penghubung dengan titik nol sistem atau dengan bumi untuk sistem hubungan bintang (Y) yang dibumikan	Pembebanan termik dan dinamik karena arus hubung singkat yang menetap. Selain itu juga terjadi penurunan tegangan beban dinamik	
2. Hubung singkat dua fase	Hubungan galvanis antara dua penghantar sistem.		
3. Hubung singkat tiga fase	Hubungan galvanis antara ketiga penghantar sistem.		
4. Hubung singkat 2 atau 3 fase dengan sentuh bumi.	Hubungan antara 2 atau 3 penghantar dengan bumi.		
5. Hubungan singkat.	Hubungan galvanis antara 2 atau 3 penghantar suatu sistem melalui bumi pada suatu tempat dari bangunan atau jaringan		

1	2	3	4
<p>6. Hubung singkat pada kumparan.</p>	<p>Hubung singkat antar penghantar dari kumparan yang berbeda.</p>	<p>Kumparan rusak dan terbakar, atau inti besi terbakar.</p>	
<p>7. Hubung singkat pada lilitan.</p>	<p>Hubung singkat antar penghantar dalam sebuah kumparan</p>	<p>Beban dinamik dan termik karena arus hubung singkat, arah medan dalam rotor menjadi terbalik.</p>	
<p>8. Hubung bumi</p>	<p>Hubungan galvanis antar penghantar dan bumi untuk sistem yang tidak dibumikan atau yang dibumikan melalui impedansi yang besar.</p>	<p>Peningkatan tegangan lewat, sehingga terjadi tegangan tembus. Akibat lanjut berupa suatu hubung singkat.</p>	
<p>9. Hubung rangka</p>	<p>Hubungan galvanis antara dua penghantar dan rangka mesin yang dibumikan.</p>	<p>Peningkatan tegangan, inti besi terbakar, hubung singkat pada kumparan, atau suatu hubung-tanah ganda.</p>	
<p>10. Penghantar putus.</p>	<p>Penghantar yang putus secara tidak sengaja.</p>	<p>Beban lebih dan pembebanan yang tidak simetrik</p>	

1	2	3	4
11. Beban lebih	Pembebanan terhadap salah satu fase mesin melampaui nilai nominal dalam suatu bagian bangunan.	Pemanasan dan penuaan mesin yang cepat.	
12. Tegangan lebih.	Penerapan tegangan mesin melebihi nilai nominal, pengaruh atmosfer hubungan bumi yang intermitten.	Beban lebih hubung-bumi dan tembus akibat lewat denyar	

B. KONSTRUKSI UMUM RELE

Menurut konstruksi dan karakteristik kerjanya, rele proteksi dapat dibagi dalam beberapa kelompok yaitu:

- a. Solenoid; sistem operasinya tergantung dari pada gerakan inti besi plunger pada sumbu kumparan berbentuk solenoid.
- b. Armatur tarik; armaturnya digerakkan oleh gaya tarik medan maknetik yang dibangkitkan oleh kumparan rele.
- c. Induksi; bagian berputar adalah suatu cakram logam (metal disc) atau silinder yang bebas berputar karena adanya interaksi arus eddy dan medan maknetik yang dibangkitkannya.
- d. Elektrodinamik; bagian yang berputar terdiri dari kumparan bebas berputar dalam medan maknetik.
- e. Kumparan putar; bagian berputar adalah sebuah kumparan bebas berputar pada celah udara maknet permanen.
- f. Thermal; gerakannya tergantung dari aksi panas yang dibangkitkan oleh arus yang mengalir melalui elemen rele.

- g. Tegangan kurang, arus kurang, dan daya kurang; rele ini bekerja apabila terjadi tegangan kurang, arus kurang, dan daya kurang.
- h. Terarah atau arus balik; rele ini akan bekerja apabila arus terpakai berbeda fase secara khusus terhadap tegangan terpakai serta rele dikompensasi agar dapat bekerja dalam keadaan tegangan kurang (turun dari tegangan normal).
- i. Terarah atau daya balik; rele ini bekerja apabila arus dan tegangan berbeda fase secara spesifik dan tidak dilengkapi dengan kompensasi turunnya tegangan.
- j. Diferensial; beroperasi apabila terjadi beda fase atau perbedaan kuantitatif dua atau lebih besaran listrik.
- k. Jarak (distance); kerjanya diatur oleh perbandingan antara tegangan dengan arus atau antara komponen-komponen arus yang berhubungan secara khusus terhadap tegangan.

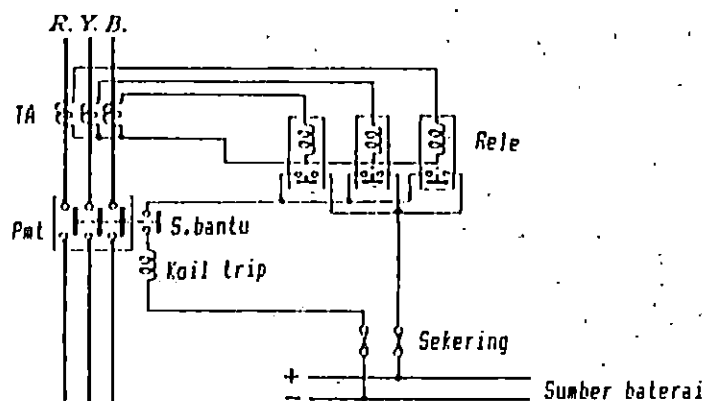
Karakteristik penting lainnya dari suatu rele adalah waktu operasinya. Karakteristik ini dapat ditetapkan sebagai waktu yang berlalu antara jatuhnya kekuatan kerja rele dan kerja kontak-kontak tripnya.

Apabila dipandang dari segi waktu kerjanya, rele-rele itu dapat dikelompokkan dalam beberapa kelompok:

- a. Simultan (instantaneous), kerja sempurna rele terjadi setelah diabaikan interval waktu yang kecil dari pengaruh arus atau besaran lain yang menyebabkan bekerja.
- b. Waktu tunda nyata (definite time-lag), waktu kerjanya tidak tergantung dari besar arus atau besaran-besaran listrik lainnya.

- c. Waktu tunda balik (*inverse time-lag*), yaitu waktu kerjanya (operasinya) hampir berbanding terbalik dengan besar arus atau besaran-besaran listrik lainnya.
- d. Waktu tertunda definite terbalik (*inverse-definite time lag*), waktu operasinya benar-benar berbanding terbalik dengan nilai arus terkecil atau besaran listrik lainnya.

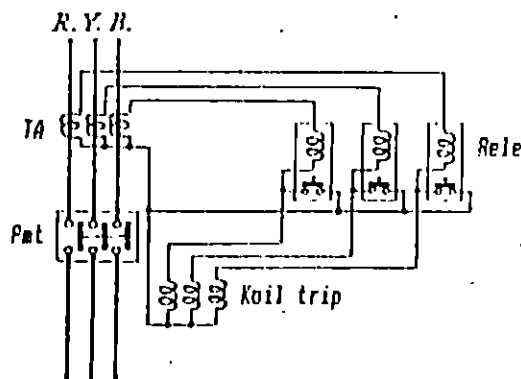
Umumnya rele dilengkapi dengan alat pengubah nilai arus atau besaran listrik lainnya yang diperlukan agar bekerja. Bila rele dilengkapi dengan waktu tunda, ini berarti waktu kerja dapat diatur. Harga nominal besaran ini disebut *setting rele*. Nilai setting biasanya dinyatakan dalam bentuk nilai langsung atau sebagai persentase dari nilai dasar.



Gambar 2. Rele dengan rangkaian bantu.

G.W. Stubbing (1964:118)

Kontak-kontak rele proteksi dapat dibagi dalam dua grup, yaitu Normally Open (NO) dan Normally Closed (NC). Yang pertama ini sering disebut *Circuit Closing*, dan grup yang ke dua disebut *Circuit Opening*. Kedua jenis kontak ini dapat mereset diri sendiri, reset secara manual atau secara elektrik.

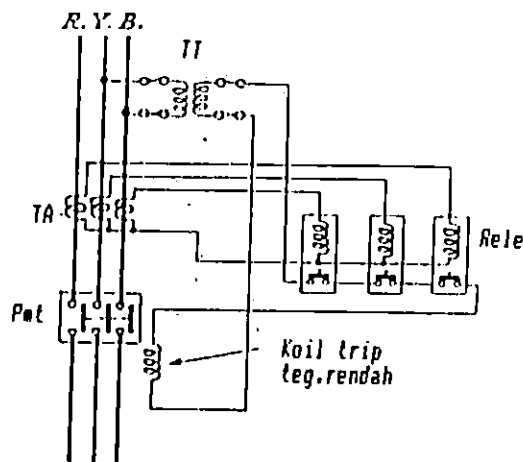


Gambar 3. Diagram rele dengan rangkaian kontak tripping pakai transformator arus
G.W. Stubbing (1964:119)

Rele NO biasanya digunakan apabila pemutus rangkaian (circuit breaker) ditrip secara otomatis oleh arus yang bersumber dari baterai. Rangkaian trip bantu semacam itu ditunjukkan dalam gambar 2.

Rele NC biasanya digunakan jika sumber tenaga untuk mentrip pemutus secara otomatis diperoleh dari transformator arus atau apabila breaker ditrip melalui tegangan kurang. Gambar 3 memperlihatkan susunan trip rele yang disebutkan di atas. Kontak rele menghubungkan singkatkan trip koil terhadap pemutus. Tetapi jika rele bekerja, hubung singkat tersebut terbuka, dan arus dari transformator arus mengalir di dalam trip koil lalu membuka pemutus. Gambar 4 memperlihatkan hubungan rangkaian tripping bila rele diperlukan bekerja pada kondisi atau pada keadaan tegangan kurang. Kontak-kontak rele dihubungkan secara seri dengan koil

tegangan kurang, lalu apabila rele bekerja, koil rangkaian ini putus (broken), sehingga pemutus rangkaian secara otomatis akan tertrip.



Gambar 4. Diagram rele dengan rangkaian kontak terbuka pakai transformator tegangan

G.W. Stubbing (1964:119)

BAB II

MACAM-MACAM RELE DAN PRINSIP KERJA

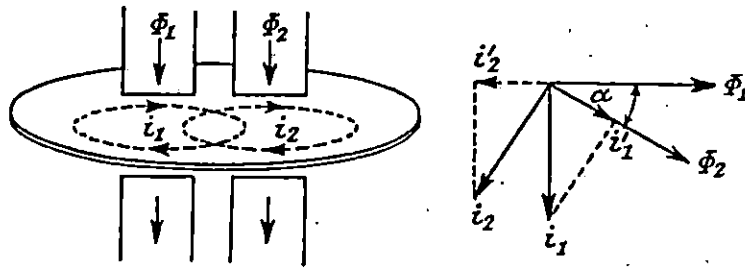
A. RELE ARUS LEBIH TIPE INDUKSI DAN GANGGUAN TANAH

Komponen utama rele tipe ini adalah berupa sistem maknetik kompon, dua medan maknetik bolak-balik yang berbeda fase dan ruang, serta cakra non maknetik yang bebas berputar dalam sistem maknet. Rele akan bekerja akibat dari kopel yang dibangkitkan oleh adanya interaksi salah satu medan maknet dengan arus yang terinduksi dalam cakra. Oleh karena itu susunan sederhana yang ditunjukkan dalam gambar 5, nampak bahwa kedua fluks θ_1 dan θ_2 berbeda fase sebesar α , menginduksikan gaya gerak listrik (GGL) dalam cakra, yang mengakibatkan arus eddy i_1 dan i_2 bersirkulasi.

Arus eddy ini praktis saling tegak lurus dengan fluks yang menimbulkannya, dan masing-masing mempunyai komponen arus yang sefase dengan fluks yang lain. Karena pengaruh arus eddy, fluks itu akan membangkitkan kopel penggerak pada piringan (cakra). Fluks θ_1 menginduksikan arus eddy i_1 dalam cakra serta komponen arusnya i_1^1 , yang sefase dengan θ_2 membangkitkan kopel sebanding dengan $\theta_2 \cdot i_1^1$ atau dengan kata lain, kopel sebanding dengan $\theta_2 \cdot i_1 \cdot \sin \alpha$.

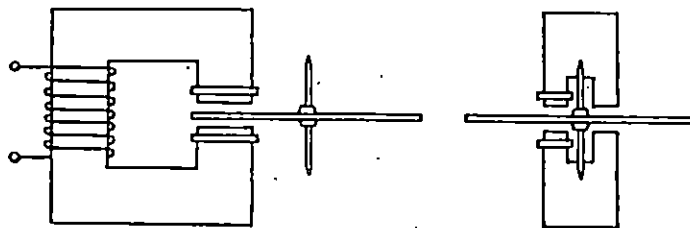
Dengan cara yang sama, kopel yang dibangkitkan oleh interaksi θ_2 dan i_2^1 adalah sebanding dengan $\theta_1 \cdot i_2 \cdot \sin \alpha$. Kopel total pada cakra juga sebanding dengan jumlah kedua besaran itu, dan i_1 sebanding dengan θ_1 , serta i_2 sebanding dengan θ_2 . Kopel gerak total pada cakra menjadi sebanding dengan $\theta_1 \cdot \theta_2 \cdot \sin \alpha$. Dapat dimengerti bahwa semakin besar sudut fase α antara kedua fluks bolak-balik, komponen

arus i_1^1 dan i_2^1 akan lebih besar, konsekuensinya, piringan akan memakai kopel yang lebih besar.



Gambar 5. Prinsip kerja rele induksi
G.W. Stubbing (1964:131)

Berdasarkan teori rele induksi di atas, terjadinya perbedaan antara kopel penggerak dan kopel pengendali disebabkan karena putaran di dalam fluks magnetik bolak-balik. Hal ini dapat dipahami. Kopel penggerak terbangkit karena perbedaan kedua fluks baik dalam ruang maupun waktu. Kopel pengereman dinamis disebabkan karena gerakan piringan akan memperbesar gaya tarikan antara masing-masing medan dan arus eddy.



Gambar 6. Skema rele induksi kutub bayangan
G.W. Stubbing (1964:133)

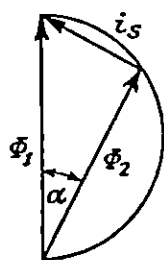
Secara umum ada dua metode untuk mendapatkan kopel kerja yang diperlukan sebagaimana dijelaskan di atas. Satu diantaranya dari rele induksi kutub bayangan, dan yang lainnya rele induksi tipe kumparan ganda.

Rele induksi tipe kutub bayangan (shaded pole) sederhana diperlihatkan pada gambar 6 di atas. Komponennya terdiri dari batang aluminium atau batang tembaga yang bebas berputar pada celah udara elektromagnet. Separuh dari masing-masing kutub magnet dikelilingi tembaga melengkung atau cincin yang disebut ring bayangan (shading ring). Fluks bolak-balik pada setengah inti magnet bayangan. Oleh karena reaksi arus induksi pada ring tertinggal dibelakang fluks setengah inti lainnya, maka kedua fluks magnetik bolak-balik yang dibangkitkan itu berbeda ruang dan waktu yang diperlukan untuk menghasilkan kopel penggerak pada cakram.

Rangkaian magnetik dapat dipandang seolah-olah terdiri dari dua bagian, satu dengan ring bayangan dan yang satu lagi tanpa ring bayangan. Dengan adanya lilitan-ampere menyebabkan arus pada kumparan magnetik sama besarnya untuk kedua bagian tersebut. Fluks lilitan ampere pada bagian yang terdiri dari ring bayangan akan bertambah, sebagian memproduksi fluks magnetik dan sebagian lagi dalam keseimbangan lilitan-ampere pada ring bayangan yang disebabkan karena fluks ini. Bila dianggap bahwa ring bayangan adalah non induktif, arus yang di dalamnya berbeda fase 90° dengan fluks yang membangkitkannya. Vektor diagram kondisi ini ditunjukkan pada gambar 7 di bawah ini. Fluks ϕ_1 adalah fluks pada inti tanpa ring bayangan, ϕ_2 adalah fluks pada bagian dengan ring bayangan, dan i_s adalah arus yang diinduksikan dalam ring bayangan.

Sekarang, karena kopel sebanding dengan $\phi_1 \cdot \phi_2 \sin \alpha$ yang juga adalah sebanding dengan luas segitiga pada ϕ_1

digambarkan dengan setengah lingkaran. Luas segitiga ini adalah maksimum, misalnya sebesar ϕ_1 bila $\alpha = 45^\circ$.



ϕ_1 = fluks pada seksi tanpa bayangan

ϕ_2 = fluks pada seksi bayangan

i_s = arus pada ring bayangan

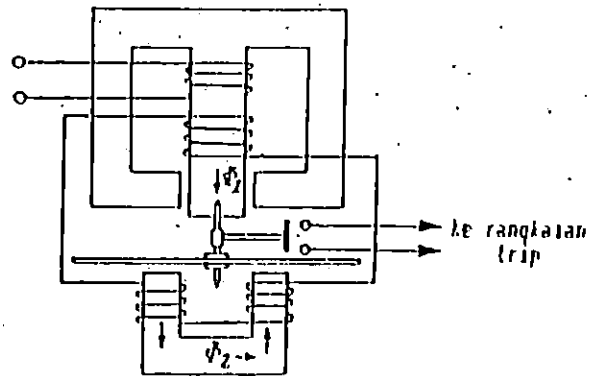
Gambar 7. Vektor diagram rele kutub bayangan
G.W.Stubbing (1964:133)

Bila ϕ_1 dan ϕ_2 adalah sebanding dengan arus I pada kumparan rele, kopel akan sebanding dengan kuadrat arus. Bila hubungan ini berlaku bagi nilai arus di atas tingkat beban penuh rele, kejenuhan magnetik pada inti magnetik akan berakibat pada fluks yang sebanding dengan akar kuadrat arus dengan arus yang melebihi rating beban penuh, sehingga kopel pada keadaan ini akan hampir berbanding langsung dengan arus

1. Rele Induksi Kumparan Ganda

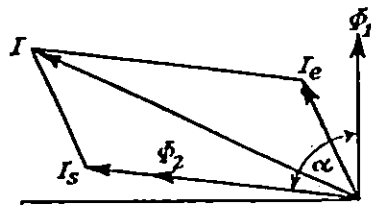
Umumnya rele induksi yang diproduksi dewasa ini adalah tipe dua kumparan. Susunan atau skema tipe ini ditunjukkan pada gambar 8 di bawah ini.

Komponen penting terdiri dari sebuah piringan logam yang diatur sedemikian rupa sehingga dapat berputar bebas di antara kutub elektromagnet. Elektromagnet bagian atas dilengkapi dengan dua buah lilitan yang berfungsi sebagai transformator arus biasa. Satu adalah lilitan primer, memikul arus kerja rele, yang satu lagi yaitu lilitan sekunder yang mendapat energi dari induksi primer serta disambungkan ke belitan elektromagnet bagian bawah.



Gambar 8. Rele induksi arus lebih tipe kumparan ganda
G.W. Stubbing (1964:134)

Dengan susunan seperti ini fluks bocor elektromagnet sebelah atas dan fluks yang dibangkitkan oleh elemen yang lain mempunyai beda fase yang cukup besar yaitu untuk membangkitkan arus eddy yang perlu pada rele piringan untuk membangkitkan kopel yang diperlukan. Vektor diagram rele induksi kumparan ganda ditunjukkan pada gambar 9 dibawah ini.



I = arus rele.

I_s = arus pada kumparan sekunder rele.

I_e = arus penguat rele.

ϕ_1 = Fluks akibat I_s .

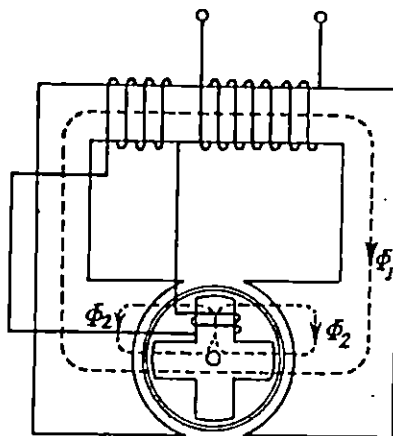
ϕ_2 = fluks akibat I_e .

Gambar 9. Vektor diagram rele induksi kumparan ganda
G.W. Stubbing (1964:135)

Fluks Φ_2 yang diinduksikan pada maknet bagian bawah oleh arus pada kumparan sekunder maknet sebelah atas Φ_1 sebesar sudut α . Kopel penggerak, yang disebabkan oleh kedua fluks Φ_1 dan Φ_2 , keduanya dipisahkan oleh sudut fase α , yang terbangkit dengan cara yang persis sama pada rele induksi tipe kutub bayangan sebagaimana dijelaskan sebelumnya.

Perbedaan antara rele induksi kumparan ganda dengan tipe kutub bayangan adalah bahwa dengan memakai arus pada rangkaian kumparan sekunder rele kumparan ganda membangkitkan fluks bantu Φ_2 , sudut pemisah α antara Φ_1 dan Φ_2 jauh lebih besar, lebih mudah didapatkan dari pada rele tipe kutub bayangan. Kopel kerja kedua rele itu sebanding dengan $\sin \alpha$, oleh karena itu rele kumparan ganda lebih unggul dibandingkan dengan tipe kutub bayangan.

Bentuk lain dari rele arus lebih tipe induksi dobel kumparan digambarkan secara skematik pada gambar 10 di di bawah ini.



Gambar 10. Skema rele induksi kumparan ganda dengan rotor silinder.

G.W. Stubbing (1964:136)

Rele tipe ini, rotornya terbuat dari aluminium ringan berbentuk silender bergerak diantara celah udara elektromagnetik berbentuk U yang memikul kumparan utama dan elektromagnetik berbentuk tanda silang (cross) yang berada di dalam. Mempunyai kumparan yang dapat membangkitkan fluks secara induksi dari kumparan utama. Sebagian dari fluks utama Φ_1 dan Φ_2 bersirkulasi, dan aksinya pada rotor silinder persis sama seperti dijelaskan pada rele tipe induksi.

2. Sifat Penting Rele Kumparan Ganda

Sifat yang penting dari rele induksi tipe kumparan ganda yaitu bahwa kerjanya dapat diatur dengan cara membuka atau menutup rangkaian kumparan sekunder. Bila rangkaian ini terbuka, tidak ada fluks yang dapat dibangkitkan oleh elektromagnet bantu, namun arus besar pada kumparan primer bisa timbul, akibatnya tidak ada kopel yang terbangkit. Dengan cara membuka rangkaian belitan primernya, rele dobel kumparan dapat diatur agar tidak bekerja (tidak beroperasi).

Pada rele induksi modern, pergerakan kontak tripping membuka atau menutup rangkaian trip dengan putaran piringan atau silinder di bawah pengaruh kopel kerja.

Dilengkapi dengan magnet permanen, yang disusun sedemikian rupa sehingga keliling piringan atau penampang silinder bergerak dalam celah udara antara kutub-kutub yang berhadapan untuk membangkitkan suatu efek pengereman arus eddy terhadap gerakan rele. Fungsi magnet permanen

adalah untuk memeriksa gerakan yang berlebihan apabila arus besar pada koil rele terganggu sebelum rele bekerja sempurna. Tambahan pula, dipasang pegas helikal terhadap gerakan spindel yang mengembalikan gerakan ke posisi reset bila kopel kerja dilepas. Untuk mengatasi kopel pegas yang sedikit memutar piringan dibuat dengan cara mengatur piringan sehingga kopel gerak juga bertambah.

Pengaturan nilai setting arus sebuah rele induksi model biasa, yaitu dengan cara memasang tap-tap pada kumparan rele utama itu sendiri, atau pada transformator kecil yang ada di dalamnya yang dihubungkan ke kumparan utama. Tap-tap dipasang sedemikian proporsional sehingga lilitan-ampere yang ditanggung oleh arus yang sama terhadap nilai setting adalah sama untuk seluruh setting.

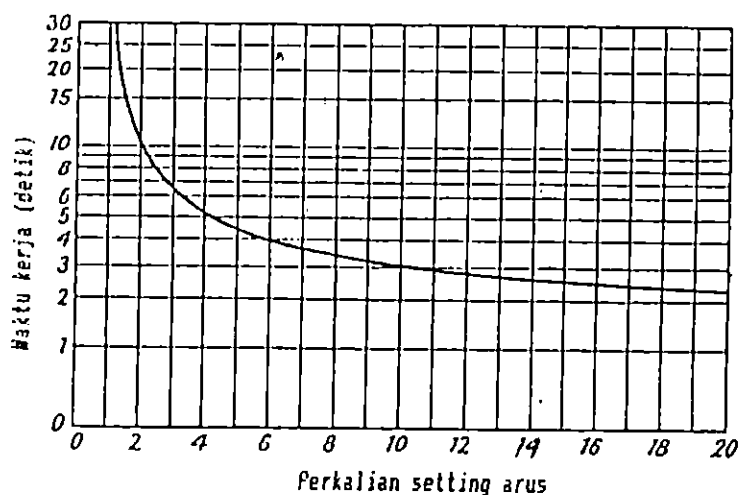
Nilai arus yang diberikan ke masing-masing tap dinyatakan dalam persentase beban penuh transformator arus. Posisi steker (titik sambung) biasanya direncanakan untuk mendapatkan tujuh tap pilihan, range arus lebih 50% sampai 200%, dan gangguan tanah 10% sampai 40% atau 20% sampai 80%. Pengaturan setting arus dilakukan dengan cara menempatkan steker di antara pegas berbeban pada nilai yang diperlukan. Bila steker ditarik dengan tujuan merubah setting, sementara rele bekerja, rele secara otomatis mengambil setting yang besar, sehingga dapat dipastikan bahwa rangkaian sekunder transformator arus tidaklah terbuka, dan bahwa rele tetap beroperasi selama proses perubahan setting.

Karena kecepatan putaran (rotasi) piringan sebanding dengan kopel gerak, tiap penambahan nilai arus di atas nilai setting rele mengakibatkan bertambahnya kecepatan rotasi piringan, dan konsekuensinya yaitu berkurang waktu operasi rele. Dalam keadaan normal, karakteristik arus-waktu rele akan mendekati kebalikan hukum kuadrat, lalu kecepatan kerja lebih cepat, akan terjadi yang lebih besar dari pada arus kecil yang mendekati nilai tap. Konsekuensinya, bila rele mengamankan arus hubung singkat yang besar, rele akan trip hampir secara simultan. Karakteristik tipe ini diperlihatkan pada rele arus lebih tipe induksi, karena dua atau lebih rele yang bekerja secara seri pada sebuah sistem tidak akan memberikan derajat pembeda walaupun rangkaian dalam keadaan terganggu.

Dalam perencanaan rele modern, rele dibuat dengan standard yang tepat, kejenuhan maknetik perlu diperhitungkan penambahan nilai kopel yang mempercepat kecepatan putar piringan dapat dihindari. Rele tipe terakhir ini dikenal sebagai *inverse definite minimum time lag relay*. Kurva arus-waktu seperti ini diperlihatkan pada gambar 11 di bawah ini.

Karakteristik tersebut digambarkan dalam bentuk yang biasanya nampak pada plat nama rele dan menunjukkan waktu yang agar rele menutup kontak tripnya pada nilai-nilai arus lebih yang berbeda. Skala horizontal menandakan perkalian setting arus dan menyatakan banyaknya/berapa kali rele arus melebihi setting arus. Waktu yang

diperlukan rele untuk mengoperasikan setiap bagian perkalian setting arus yang sama adalah sama bagi semua setting arus.



Gambar 11. Kurva karakteristik arus-waktu rele induksi
G.W. Stubbing (1964:138)

Perlu diketahui bahwa bagi nilai arus lebih yang kecil, waktu operasi bervariasi, berbanding terbalik dengan arus. Tetapi bila arus bertambah, arus hampir konstan pada nilai minimum terbatas.

Metode standard menyatakan rating waktu rele induksi adalah digunakan sebagai basis waktu yang diperlukan agar rele bekerja pada nilai arus sepuluh kali melebihi arus settingnya, sehingga rele tiga detik dapat didefinisikan sebagai rele yang bekerja dalam tiga detik pada arus yang ekuivalen dengan sepuluh kali nilai settingnya.

Bila diperhatikan asimtot kurva waktu kerja bagi arus, ternyata bahwa hanya sedikit lebih banyak dari nilai setting nya, sehingga hal seperti itu dapat dikatakan praktis normal atau wajar mengkalibrasi rele pada perkalian arus sebesar 1,3.

Pengaturan waktu kerja suatu rele dengan perkalian tertentu, biasanya dilengkapi dengan tombol pengaturan setting waktu yaitu untuk mengatur kecepatan perpindahan rele di mana rele telah berpindah ke posisi komplet. Tombol pengatur waktu dikalibrasi dari 0 sampai 1. Pada rele tiga detik dengan kelebihan arus 30% dari nilai set, rele akan bekerja dalam waktu 30 detik bila pengali waktu diset pada 1, dan akan lebih singkat bila diset pada pengalihan setting yang lebih rendah.

Berdasarkan penjelasan di atas, dapat dimengerti karena dalam rele induksi tipe kumparan ganda tersedia setting pemisah untuk kedua fungsi arus dan waktunya, pemilihan waktu rele untuk arus tertentu tidak perlu dibaca secara langsung dari kurva plat nama rele itu. Perhitungan singkat biasanya perlu mentranspose arus ke dalam suatu perkalian setting arus dan mengubah waktu kerja ke dalam nilai nyata (aktual), tergantung dari pengali setting waktu yang dipakai.

Sebagai contoh, adalah perlu menentukan waktu kerja sebuah rele arus lebih 5 Ampere, dengan waktu 3 detik, mempunyai arus setting 125%, dan setting pengali waktu 0,6 dihubungkan ke rangkaian catu melalui sebuah transformator arus dengan perbandingan arusnya 400 : 5 Amper bilamana rangkaian memikul arus ganggu 400 Amper, prosedur pelaksanaannya adalah sebagai berikut ini:

- a. Ubah arus ganggu primer di dalam koil arus yaitu dengan mengabaikan rugi kemagnetan pada transformator arus. Arus itu diperoleh dengan mengalikan arus ganggu dengan perbandingan transformator arus, didapat:

$$\frac{4000 \times 5}{400} = 50 \text{ Amper}$$

- b. Nyatakan arus rele sebagai suatu perkalian setting

arusnya, maka: $\frac{50 \times 100}{5 \times 125} = 8 \text{ Amper}$

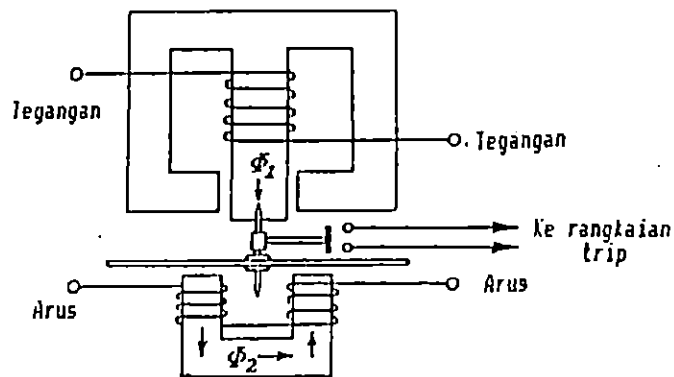
- c. Dari plat nama rele terbaca waktu kerja bagi suatu perkalian arus 8. Dengan menggunakan gambar 11 di atas sebagai contoh karakteristiknya, didapat waktu 3,2 detik.

- c. Tentukan waktu kerja aktual rele dengan mengalikan waktu di atas dengan perkalian setting waktu rele sebagaimana yang digunakan di atas tadi, maka:

$$3,2 \times 0,6 = 1,92 \text{ detik.}$$

B. RELE DAYA TERARAH

Prinsip kerja rele daya terarah ini sama dengan prinsip kerja rele arus lebih kumparan ganda yang dijelaskan sebelum ini. Jika pada rele arus lebih kopel gerakanya timbul akibat interaksi medan maknetik yang berasal dari arus pada kumparan rele, kecuali karena dibatasi oleh kejenuhan maknetik, tergantung dari kuadrat arus rele. Pada rele daya, rele direncanakan seperti itu sehingga kopel kerjanya diperoleh melalui interaksi medan maknetik yang berasal baik dari sumber tegangan maupun arus yang diproteksi itu. Pada waktu yang sama adalah responsive terhadap arah aliran daya. Pada dasarnya rele ini adalah sebuah Wattmeter, serta arah kopel yang terbagkit pada rele tergantung dari pada arah arus relatif terhadap tegangan yang digabungkan tersebut.

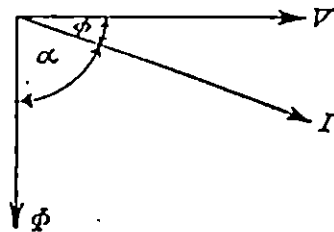


Gambar 12. Skema rele arah daya.

G.W. Stubbing (1964:140)

Elemen aktual rele dapat dianggap sama seperti elemen rele arus lebih tipe induksi double kumparan dengan mensubsitusikan sebuah koil tegangan untuk koil arus utama, menukar kumparan sekunder elektromagnet sebelah atas, dan melewati arus kerja ke dalam kumparan elektromagnetik

sebelah bawah seperti ditunjukkan dalam gambar 12 di atas. Koil tegangan pada maknet sebelah atas dihubungkan langsung atau melalui sebuah transformator tegangan ke rangkaian sumber tegangan, dan θ_1 yang dibangkitkan oleh arus hampir 90° tertinggal dari tegangan. Sementara itu θ_2 dengan arus eddy yang diinduksikan dalam logam piringan membangkitkan sebuah kopel yang besarnya ditentukan oleh besarnya arus kerja dan tegangan yang adalah sebanding dengan $\theta_1 \cdot \theta_2 \sin \alpha$, di mana $\sin \alpha$ ekuivalen dengan $(90^\circ - \theta)$. Kopel akan sebanding dengan $V \cdot I \cos \theta$, yang mana perkalian itu adalah besarnya daya pada rangkaian. Vektor diagram kondisi ini ditunjukkan dalam gambar 13. Arah kopel akan tergantung dari arah aliran daya dalam rangkaian terhadap rele yang dipasang.



Gambar 13. Vektor diagram rele daya arah.

Freeman (1980:227)

Rele daya terarah boleh satu fase atau tiga fase. Yang terakhir ini terdiri dari dua buah Wattjammeter yang dipasang pada tuas. Setting daya rele diperoleh dengan cara mengatur tekanan pegas helikal atau dengan alat set-steker yang dihubungkan ke tap-tap kumparan sebelah bawah, tergantung dari perencanaan rele. Variasi waktu tunda, sebagaimana pada rele arus lebih tipe induksi, juga dapat

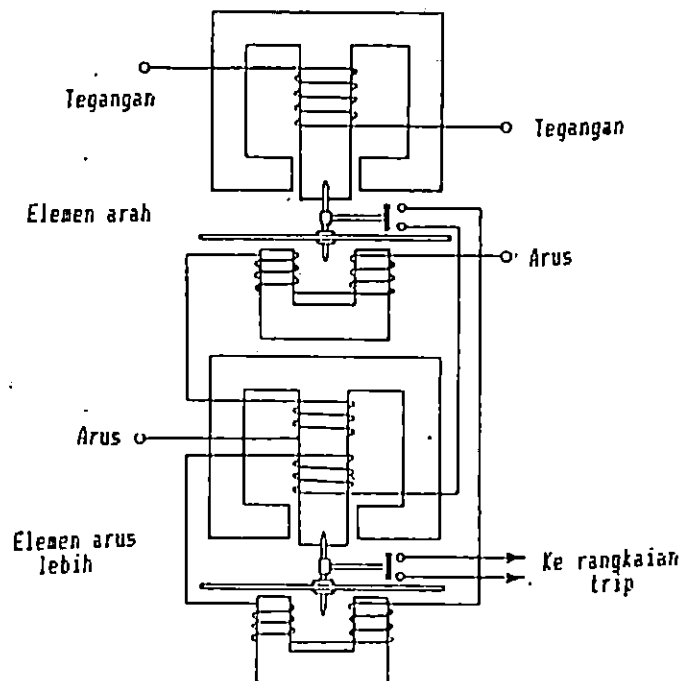
diperoleh dengan pengaturan besarnya sudut pergeseran yang dibutuhkan oleh piringan untuk menutup kontak tripnya.

Rele daya arah biasanya dipakai untuk mengontrol aliran daya dalam suatu rangkaian pada kondisi beban normal atau untuk pembalikan proteksi daya peralatan sinkron. Rele ini tak cocok digunakan untuk proteksi hubung singkat, karena tipe Wattmeter yang dipakai itu sensitif terhadap turunnya tegangan sumber dan pada kondisi hubung singkat yang parah biasanya menimbulkan jatuh tegangan, kemungkinan kopel yang terbangkit tak mampu untuk mengerjakan rele. Rele arah yang digunakan sebagai rele pendeteksi gangguan biasanya disusun sedemikian rupa sehingga rele itu hampir bebas dari fluktuasi tegangan, lalu tak dapat digolongkan atau disebut sebagai *rele daya arah yang benar*. Rele semacam itu akan dijelaskan pada paragraf berikutnya berkaitan dengan rele arus lebih arah dan rele tegangan gangguan tanah.

Rele arah, sama seperti rele induksi yang telah dibicarakan sebelumnya kecuali jika dibuat dengan sensitivitas yang sangat tinggi, sehingga dengan tegangan rendah dapat mengantisipasi beberapa gangguan yang mungkin terjadi. Kopel yang memadai dibangkitkan oleh kumparan arus, yaitu dalam rangka koordinasi menutup kontak-kontak, perhatikan gambar 14 dibawah ini.

Rele arus lebih induksi dengan elemen berupa rotor silendris ditunjukkan dalam gambar 14. Elemen ini konstruksinya sama dengan rele arus lebih rotor silendris yang diuraikan pada halaman sebelumnya, kecuali bahwa elektromagnet berbentuk huruf U dan berbentuk tanda silang

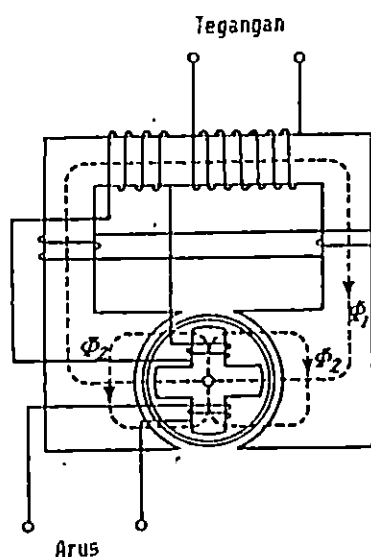
(cross) yang dilengkapi dengan dua kumparan, satu diperkuat oleh induksi dari kumparan tegangan elektromagnet utama, dan satu lagi dari sumber arus. Fluks Φ_1 dari kumparan tegangan utama dan resultan Φ_2 dari kedua kumparan elektromagnet silang, bersirkulasi, dan reaksinya pada rotor silendris persis sama seperti yang dijelaskan pada rele daya tipe arah pada halaman sebelumnya. Selanjutnya elemen tipe seperti ini dilengkapi dengan kumparan interkoneksi pada kedua bagian elektromagnet utama yang dipakai untuk memodifikasi fase fluks horizontal melalui celah udara, sehingga dengan faktor kerja satu, arus eddy terinduksi pada silinder. Oleh fluks tegangan, fluks sefase dengan yang dibangkitkan oleh arus.



Gambar 14. Rele arus lebih terarah.

G.W. Stubbing (1964:142)

Elemen-elemen terarah modern biasanya direncanakan agar bekerja dengan turun tegangan sebesar 2% dari harga normal, walaupun arus kira-kira 20% dari beban penuh normal. Sudut putaran piringan diusahakan agar sangat kecil, sehingga gerakan merespon terhadap arah arus yang mengalir pada rangkaian yang diproteksi adalah praktis cepat. Tidak perlu pengaturan setting elemen-elemen sebagaimana biasanya yaitu agar bekerja dengan sensitif.



Gambar 15. Skema elemen silider tipe induksi.

G.W. Stubbing (1964:143)

Rele arus lebih atau elemen gangguan tanah adalah identik dengan rele induksi dobel kumparan, baik arus maupun pengaturan setting waktunya. Kedua rele dibuat sedemikian rupa sehingga tripping final arus tidak terlaksana sebelum memenuhi kondisi di bawah ini:

- a. aliran arus pada arah pengoprerasian elemen arah.
- b. arus mencapai atau lebih besar dari pada yang ditetapkan.
- c. arus tetap bertahan selama satu periode waktu setting arus lebih atau elemen gangguan tanah.

Kontrol aktual kerja rele diperoleh dengan menyambungkan kontak-kontak trip elemen arah secara seri dengan rangkaian sekunder gangguan tanah, sehingga arus yang terakhir itu tidak memulai kerja sampai arus sekunder rangkaian tertutup. Dengan susunan seperti ini, selanjutnya, jika aliran daya dalam arah normal, rele arus lebih atau gangguan tanah tak boleh bekerja. Sebaliknya, jika arus berbalik arah, elemen-elemen arah menutup kontaknya, dan rele arus lebih atau gangguan tanah bekerja dengan karakteristik waktu seperti yang ditunjukkan pada gambar 11.

Agar supaya rele lebih sensitif pada faktor kerja yang rendah, dan kurang responsif terhadap jatuhnya tegangan pada keadaan terhubung singkat, rele arus lebih terarah biasanya dihubungkan ke rangkaian yang diproteksi dengan cara bahwa tegangan terpakai masing-masing fase tertinggal dari arus kerjanya sebesar 30° . Susunan seperti ini didapat dengan cara menghubungkan koil tegangan rele di antara kedua fase rangkaian sebagai pengganti dari satu fase ke tanah. Oleh sebab itu elemen yang dipadukan dengan arus fase koil merah, tegangannya disambungkan melintasi fase merah dan biru, arus fase kuning melintasi fase kuning dan merah, dan arus fase biru dihubungkan dengan fase biru dan kuning.

Elemen gangguan tanah terarah dihubungkan ke rangkaian yang diproteksi melalui transformator arus dan tegangan

dengan koil arus disambungkan ke rangkaian sisa transformator arus, dan koil tegangan melalui kumparan delta-terbuka suatu transformator tegangan tiga fase.

C. RELE JARAK

Prinsip kerja rele jarak berbeda dengan rele-rele yang dibicarakan sebelumnya, di mana kerjanya tidak diatur oleh besarnya arus atau daya pada rangkaian yang diproteksi, tetapi oleh perbandingan tegangan terhadap arus. Kopel kerja yang dibangkitkan oleh arus dilawan oleh kopel penahan, dan rele bekerja secara tepat bila perbandingan $\frac{V}{I}$ lebih kecil dari yang diharapkan. Pemakaian aktual rele jarak ini akan dijelaskan secara detail pada bab selanjutnya. Pada bagian ini dijelaskan secara ringkas saja.

Jika terjadi gangguan di sembarang tempat pada suatu rangkaian, perbandingan antara tegangan dan arus pada fase yang terganggu akan sebanding dengan impedansi atau jarak len yang terganggu dari titik pengukuran terhadap lokasi gangguan. Secara teoritis, perbandingan tegangan dan arus akan konstan pada sembarang tempat gangguan, dengan mengabaikan arus gangguan dan hanya akan berubah jika jarak gangguan dari titik pengukuran berubah.

Oleh sebab itu gangguan terdekat ke titik pengukuran merupakan nilai terendah perbandingan tegangan-arus, sebaliknya bila gangguan semakin jauh dari titik pengukuran, perbandingan tegangan-arus akan lebih besar. Jika misalnya suatu rele jarak dipasang pada ujung sumber daya sebuah jaringan suplai, nilai perbandingan tegangan-arusnya ($\frac{V}{I}$)

dapat diatur, sehingga rele bekerja dengan cepat bagi gangguan hubung singkat di sembarang tempat di dalam seksi jaringan, dan tetap tak akan bekerja untuk suatu nilai hubung singkat di luar seksi.

Ada keterbatasan praktis pemakaian rele jarak jauh yang bekerja secara simultan pada jaringan suplai yang jauh. Karena perubahan nilai resistansi menyebabkan rele tidak mampu mendapatkan impedansi yang benar-benar akurat yang akhirnya menyalahi setting rele.

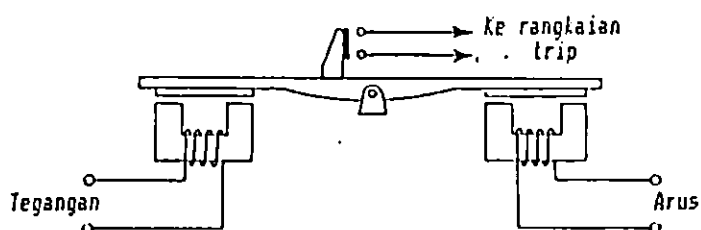
Biasanya untuk mendapatkan perbedaan arus yang diperlukan agar rele tersebut bekerja memproteksi gangguan secara simultan, dilakukan dengan cara mengeset rele agar bekerja pada jarak yang lebih pendek dari jarak sesungguhnya, yaitu dengan memakai rele jarak yang mempunyai sifat waktu tunda.

Berdasarkan uraian di atas diketahui bahwa ada dua bentuk atau tipe rele jarak yang dipakai untuk memproteksi jaringan power suplai. Bentuk pertama yaitu rele yang bekerja secara simultan mengatasi gangguan (tanpa waktu tunda) yang letaknya dekat dengan rele tersebut, rele seperti itu disebut *definite distance relay*. Rele yang lain ialah yang bekerja mengatasi gangguan yang berada jauh dari rele, tetapi mempunyai waktu tunda yang sebanding dengan jarak gangguan dari rele terpasang, dan dikenal sebagai *rele-jarak waktu (a time-distance relay)*.

Bentuk sederhana rele jarak definite (*definite distance relay*) diperlihatkan secara diagram pada gambar 16 di bawah ini. Rele tersebut pada dasarnya terdiri dari dua buah elektromagnet yang masing-masing mendapat energi dari

transformator arus dan transformator tegangan pada rangkaian yang diamankan. Armature kedua elektromagnet itu dikopel secara mekanik terhadap batang penyangga. Satu ujung batang penyangga dilengkapi dengan sebuah lempeng brid untuk mentrip kontak-kontak. Berdasarkan susunan umum kedua rele itu dapat dilihat bahwa kedua elektromagnet itu cenderung atau mengikat penyangga pada arah yang berlawanan. Pada kondisi normal, tarikan yang disebabkan oleh elemen tegangan lebih besar dari pada yang disebabkan elemen arus, lalu beam diam tanpa gerakan, dan kontak tripping terbuka.

Pada keadaan hubung singkat, akan terjadi penurunan tegangan ke rele, bersamaan dengan itu terjadi penurunan arus. Jika pertambahan arus dan turunnya tegangan seperti itu, maka perbandingan tegangan terhadap arus adalah kurang dari nilai setting rele, kemudian penarikan elemen arus akan mengatasi tarikan penahan elemen terganggu dan menyebabkan bergerak dengan arah menutup kontak trip. Penyangga dilengkapi dengan sedikit gaya mekanik untuk menjaga agar kontak-kontak trip terbuka apabila ke dua elektromagnet tidak mendapat energi.



Gambar 16. Skema rele jarak tipe definite.

G.W. Stubbing (1964:146)

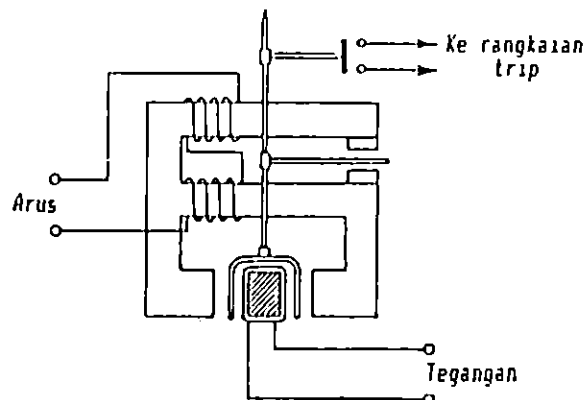
Penarikan elektromagnet dengan cara seperti di atas, masing-masing adalah sebanding dengan V^2 dan I^2 , dan dengan mengabaikan kontrol mekanis, rele bekerja dengan kondisi:

$$k_1 V^2 < k_2 I^2$$

atau bila
$$\frac{V}{I} < \sqrt{\frac{k_1}{k_2}}$$

atau
$$Z < \sqrt{\frac{k_1}{k_2}}$$

Konstanta k_1 dan k_2 tergantung dari lilitan-ampere dari ke dua elektromagnet, dan konstanta ini dapat diatur dengan cara memasang tap pada koil sehingga rele bekerja bila impedansi Z rangkaian jatuh sampai nilai khusus/spesifik. Rele dengan karakter seperti ini disebut *rele jarak-impedansi-tipe definite* karena jarak gangguan dari rele ditentukan oleh pengukuran impedansi rangkaian ke titik gangguan.



Gambar 17. Skema rele reaktansi tipe definite

G.W. Stubbing (1964:148)

Tipe lain rele definite diperlihatkan secara diagram pada gambar 17. Rele seperti ini dikenal sebagai *rele jarak reaktansi tipe definite*, karena jarak gangguan diukur oleh rele yang ditentukan oleh reaktansi rangkaian.

Konstruksi rele tersebut terdiri dari kombinasi elemen arus dan elemen tegangan, bekerja dalam gerakan bersama. Elemen arah adalah berupa elemen induksi kutub bayangan dan membangkitkan sebuah kopel dalam sektor berbentuk vane yang berhubungan dengan gerakan spindel. Elemen Wattmeter terdiri dari silinder berbentuk rotor, disambungkan ke spindel yang sama dan bergerak di dalam celah antara elektromagnet berbentuk U, diperkuat oleh kumparan arus dan inti elektromagnet berbentuk silang, diperkuat oleh kumparan tegangan.

Kopel yang dibangkitkan oleh kedua elemen rele tipe reaktansi adalah saling berlawanan arah, karena itu elemen arus mengerjakan kopel dan sebanding dengan I^2 , dan elemen Wattmeter menahan kopel sebanding dengan $V.I \cos \theta$, di mana θ adalah sudut fase antara tegangan dan arus I . Rele bekerja apabila:

$$k_1 I V \sin \theta > k_2 I^2$$

atau bila

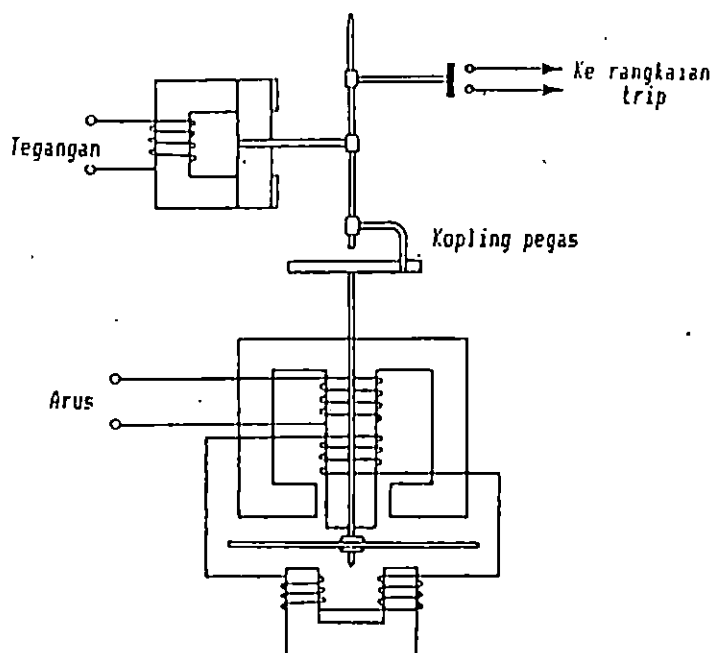
$$Z \sin \theta > \frac{k_2}{k_1}$$

atau

$$X > \frac{k_2}{k_1}$$

di mana X dan Z adalah berupa reaktansi dan impedansi ekuivalen masing-masing rangkaian. Konstanta k_1 dan k_2 mengatur nilai set rele. Pengaturan aktual nilai setting rele dapat dilaksanakan dengan cara merubah resistansi yang terhubung seri dengan kumparan tegangan rele.

Rele jarak-waktu dalam operasinya mempunyai waktu tunda yang sebanding (proporsional) dengan impedansi atau jarak len antara tempat rele terpasang dan tempat terjadinya gangguan, dilukiskan dalam gambar 18 di bawah ini.



Gambar 18. Skema rele impedansi waktu-jarak.
G.W.Stubbing (1964:149)

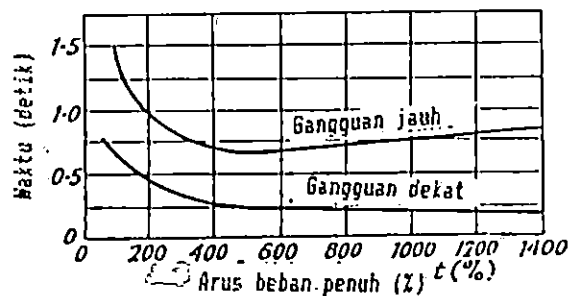
Prinsip kerja rele jarak-waktu sangatlah sederhana. Pada keadaan terjadi beban lebih atau hubung singkat, arus induksi cakera/piringan mulai bekerja pada kecepatan yang tergantung dari nilai arus, dan karena terjadi rotasi, kopling pegas (per) akan membelit sampai tekanan pegas mampu menolak armature jauh dari kutub elektromagnet.

Segera setelah hal itu terjadi, spindel membawa armature dan kontak bergerak cepat merespon torsi pegas, lalu kerja rele sempurna. Tegangan maknet direncanakan seperti itu. Akibat kejenuhan maknetik, gaya yang perlu

untuk melepaskan armature praktis sebanding dengan tegangan dan karena gaya tarik (tension) pegas hampir sebanding dengan kecepatan gerak yang diberikan kepadanya, putaran cakera diperlukan untuk mengerjakan rele yang sebanding dengan tegangan.

Waktu kerja rele berubah dan berbanding terbalik terhadap besarnya arus, dan berbanding langsung dengan tegangan penahan elektomaknet, sehingga waktu kerja rele itu dapat ditulis: $k_1 \cdot \frac{V}{I}$, di mana k_1 adalah konstanta setting. Karena perbandingan $\frac{V}{I}$ ekuivalen dengan impedansi len antara rele dan lokasi gangguan, waktu kerja rele akan berubah-ubah sebanding dengan jarak gangguan dari rele.

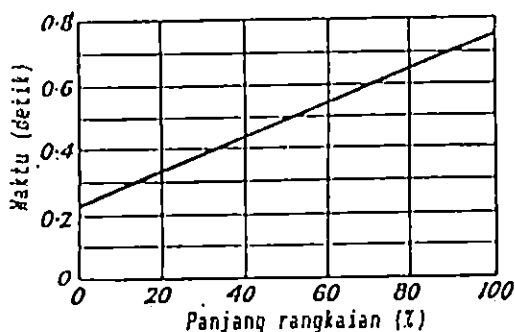
Karakteristik rele waktu-jarak untuk suatu impedansi konstan diperlihatkan pada gambar 19. Kurva sebelah atas menyatakan waktu kerja rele untuk beberapa nilai arus bagi suatu lokasi gangguan yang berada pada ujung rangkaian, yaitu dengan impedansi penuh. Kurva sebelah bawah menyatakan waktu kerja bagi gangguan-gangguan rangkaian yang dekat ke rele yaitu rangkaian impedansi nol.



Gambar 19. Karakteristik waktu-arus rele impedansi waktu-jarak.

G.W. Stubbing (1964:150)

Karakteristik waktu kerja rele bila bekerja pada gangguan yang terjadi pada sembarang tempat pada suatu rangkaian diperlihatkan pada gambar 19. Kurva ini dipakai pada aplikasi rele jarak-waktu untuk proteksi cadangan sebagaimana dijelaskan pada halaman sebelumnya.



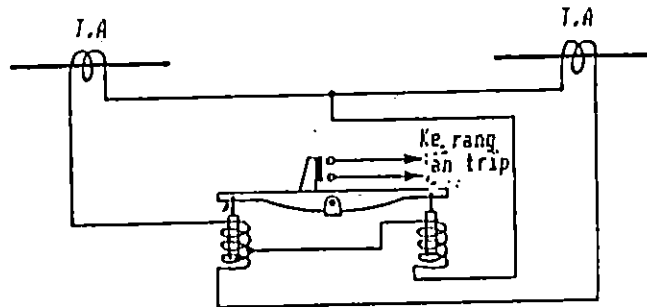
Gambar 20. Karakteristik waktu-jarak rele impedansi waktu-jarak.

G.W. Stubbing (1964:151)

D. RELE BIAS

Rele bias atau sering disebut rele difrensial persentase direncanakan agar bekerja pada rangkaian tipe balans untuk mencegah atau mengamankan kerja tak normal (incorrect operation) gangguan besar yang diakibatkan kesalahan transformator arus atau kesalahan pada arus primer akibat kondisi rangkaian. Karakteristik rele ini adalah bahwa suatu gaya penahan dipakaikan ke rele yang gunanya untuk menahan arah non kerja akibat kenaikan arus primer.

Tipe paling sederhana rele bias salah satu diantaranya adalah yang dipakai untuk pengamanan rangkaian tipe difrensial yang dibuat berdasarkan prinsip beam solenoid ditunjukkan pada gambar 21 di bawah.



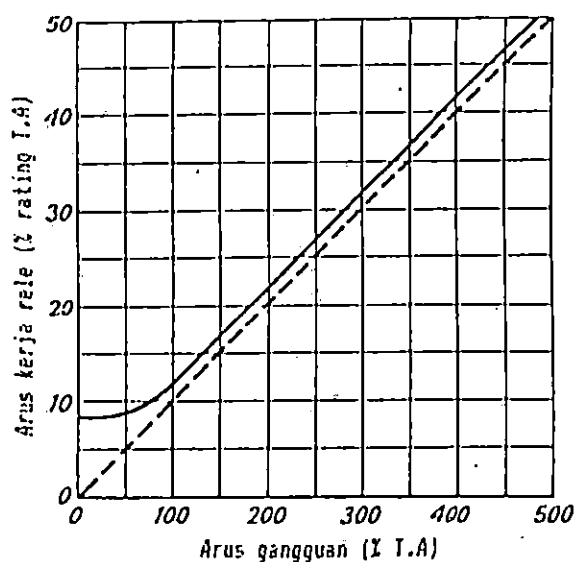
Gambar 21. Rele bias tipe beam.

G.W. Stubbing (1964:151)

Kedua koil solenoid menanggung arus, masing-masing hampir sebanding dengan arus primer utama dan perbedaan arus pada titik ekipotensial sekunder transformator arus. Beam diusahakan dengan kemiringan mekanis sedikit, yang memenuhi setting bila arus hanya ada pada primer satu transformator arus. Perbandingan setting akan dipenuhi oleh perbandingan jumlah lilitan kedua koil. Dengan susunan seperti itu ternyata bahwa gaya cenderung menahan beam dari kenaikan kerja sesuai dengan kenaikan arus sekunder, dan bahwa untuk nilai arus sekunder yang sangat besar, perbedaan arus diperlukan untuk memiringkan beam dan menutup kontak trip cenderung mempertahankan perbandingan konstan terhadap arus primer.

Karakteristik khusus rele tipe ini diperlihatkan pada gambar 22, dan menunjukkan berapa arus yang diperlukan agar rele bekerja karena kenaikan beban atau arus gangguan. Persinggungan (perpotongan) kurva kerja pada sumbu nol, arusnya besar, terutama sekali akibat simpangan mekanis dan konstanta perbandingan garis putus-putus, di mana kurva kerja adalah bersifat asimtot, kemiringannya tergantung dari

perbandingan jumlah lilitan pada kedua koil solenoid dan menyatakan besarnya pemakaian bias listrik kepada rele.



Gambar 22. Karakteristik khusus rele bias tipe beam.
G.W. Stubbing (1964:152)

Penyimpangan utama rele induksi didapat dengan menggunakan dua buah elemen induksi untuk mendorong kopel lawan pada piringan logam non maknetik terhadap mana kontak trip dilekatkan. Kumparan yang menanggung arus sekunder utama koil, ditap di tengah-tengah. Yang disebutkan terakhir ini disambungkan ke koil kerja, sama seperti rele beam tipe balans, dan membangkitkan kopel penahan yang cenderung menahan gerakan pada arah non kerja. Elemen koil kerja yang karena perbedaan arus pada rangkaian sekunder transformator arus pembeda, mendesak kopel pada piringan rele, cenderung menutup kontak trip. Bilamana gaya dorong maknet koil kerja melebihi maknet penahan dan nilai yang ditetapkan, rele bekerja dan menutup kontak tripnya. Arus eddy maknet pemutus biasanya bersatu dalam rele yaitu untuk mendapatkan

karakteristik waktu-terbalik terhadap gerakan untuk memastikan atau menjamin stabilitas sistem pada keadaan transien surge.

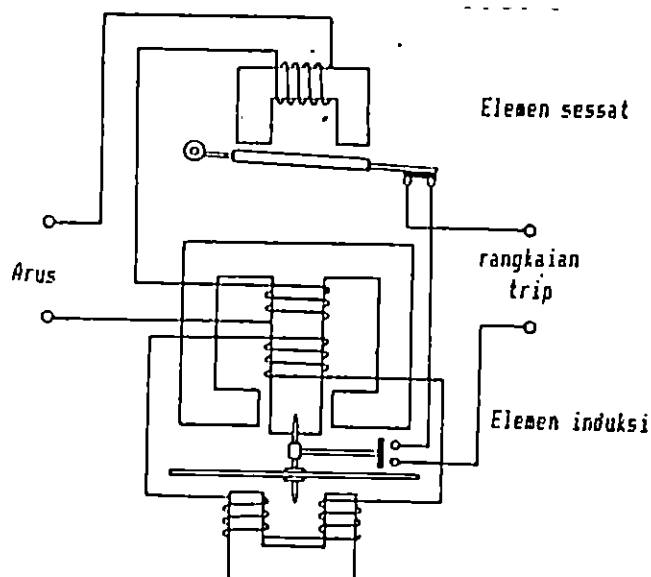
Karakteristik bias suatu rele biasanya dinyatakan sebagai persentase rating transformator arus dan boleh disebut sebagai kenaikan nilai tripping rele untuk setiap kenaikan 100% beban atau arus. Bagi contoh yang diberikan pada gambar 22, bahwa rele mempunyai 10% karakteristik bias karena pada beban 100% nilai trip mendekati 11%, pada beban 200%, nilai trip adalah 21%, dan pada beban 300%, operasi rele itu 31% dari rating transformator arus.

Dalam prakteknya beberapa rele dilengkapi dengan pengaturan setting tap pada kumparan penahannya sehingga karakteristik perubahan persentase bias dapat dipilih. Juga, dalam beberapa hal, setting tap dipasang pada kumparan koil kerja yaitu dalam rangka memberikan pengaturan terhadap arus kerja minimum rele pada kondisi beban penuh normal rangkaian yang diproteksi.

E. RELE ARUS LEBIH DENGAN PENAHAN LUAR

Pada sistem transmisi besar kadang-kadang perlu dilengkapi dengan suatu peralatan yang mampu menjaga rele arus lebih apabila nilai arus ganggu melebihi kemampuan pemutus yang memutuskan rangkaian. Tujuan rele seperti ini adalah untuk mengijinkan pemutus bekerja pada kondisi beban lebih dengan kemampuannya memutuskan rangkaian dan untuk mencegahnya bekerja selama mengalir arus gangguan yang besar yang diamankan oleh pemutus berkapasitas pemutusan

yang besar walau dipasang di mana saja pada jaringan yang lebih dekat ke sumber suplai. Rele memerlukan pengunci, diperlihatkan pada gambar 23 di bawah ini.



Gambar 23. Rele arus lebih dengan penahan dihubung singkat atau terkunci.

G.W. Stubbing (1964:154)

Rele mempunyai dua komponen, satu adalah armature (jangkar maknet), diset agar bekerja secara simultan pada keadaan arus ganggu maksimum, elemen kedua ialah rele arus lebih dengan arus dan setting waktu dapat diukur. Belitan kerja kedua elemen dan kontak pemutus jangkar serta kontak-kontak elemen induksi dihubungkan secara seri. Dengan arus ganggu yang melebihi arus setting jangkar, elemen induksi tercegah dari lepasnya pemutus oleh pembukaan kontak-kontak secara tiba-tiba pada elemen yang dimaksud itu. Apabila gangguan tiada lagi (aman), elemen jangkar segera reset, dan karena elemen induksi lambat mereset kembali, pemutus rangkaian akan lepas. Sifat yang disebutkan terakhir ini adalah merupakan keuntungan, karena bila arus ganggu tak berhenti mengalir, elemen induksi tersebut mengijinkan rangkaian yang

terganggu diatasi oleh sistem dengan kapasitas pemutusan rendah, dan sebelum pemutusan dilakukan, breaker menutup kembali (reclosed).

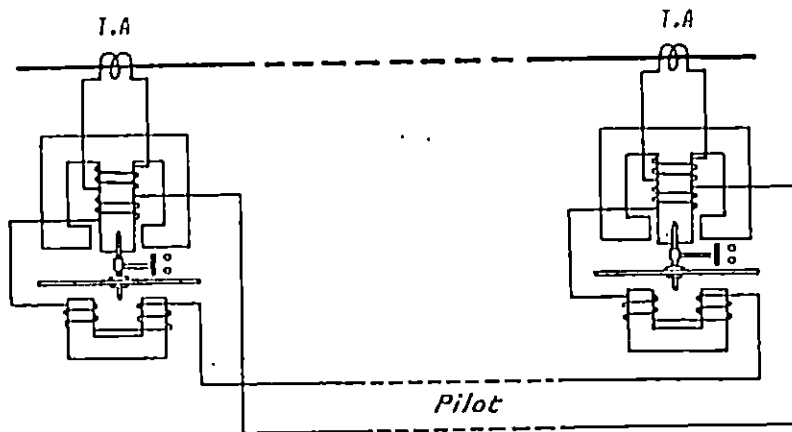
F. RELE TIPE TRANSLAY

Rele Translay digunakan untuk mengamankan keseimbangan. Prinsip kerja rele ini dapat dimengerti dengan mempelajari kembali rele arus lebih induksi. Rele ini dikembangkan oleh Metropolitan Vickers Electric Co, Ltd.

Telah dijelaskan bahwa rele induksi dobel kumparan dapat dicegah agar tidak bekerja oleh karena pembukaan rangkaian kumparan sekundernya. Dengan rangkaian terbuka ini, tegangan induksi pada kumparan sekunder akan tergantung dari nilai arus primer, karena celah udara kelistrikan dan rangkaian maknetik transformator arus rele adalah sama. Jika rangkaian utama kedua rele direncanakan identik dan menanggung arus yang sama, tegangan yang sama akan terinduksi dalam belitan sekunder mereka itu, dan kedua belitan disambungkan sehingga tegangan mereka adalah berlawanan arah, tidak ada arus mengalir pada kedua sekunder dan tidak ada kopel didorong terhadap piringan kedua rele. Hubungan rele untuk ini ditunjukkan dalam gambar 24.

Bila arus pada kumparan utama berbeda nilainya, tegangan yang tak sama besarnya akan terinduksi pada kumparan sekunder dan arus akan bersirkulasi diantara kedua kumparan, menyebabkan kopel terdorong pada piringan masing-masing rele. Arah arus sekunder saling berlawanan dalam kedua rele, dan akibatnya kopel pada satu rele akan cenderung menutup

trip rangkaian, sementara itu, pada rele lain, kopel akan menahan gerakan dalam posisi normal tak terproteksi (normal unprotected position). Rele induksi yang dihubungkan dengan cara seperti ini dapat digunakan untuk memutuskan sikuit breker yang digabungkan dengan rele yang menanggung arus primer yang lebih besar.

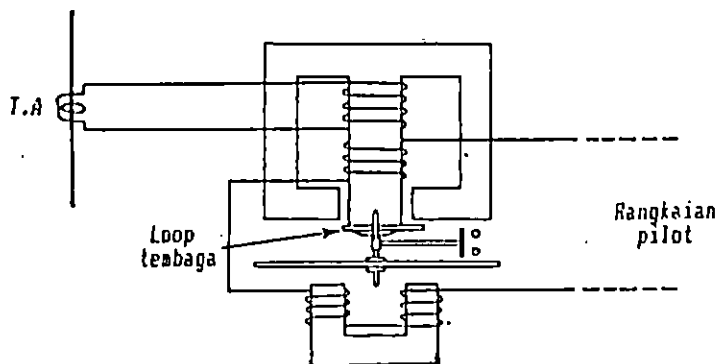


Gambar 24. Diagram prinsip kerja rele Translay.
Freeman (1980:276)

Penggunaan atau pemakaian aktual rele Translay akan diuraikan secara detail pada bab berikutnya, tetapi sifat-sifat khusus rele yang melengkapi karakteristik bias untuk kompensasi ketidakseimbangan len transformator arus (for lack of balance), pada arus gangguan besar dan juga mencegah agar tidak bekerja oleh adanya arus kapasitansi.

Rangkaian kemagnitan dan kelistrikan rele Translay sederhana ditunjukkan pada gambar 25. Dari gambar itu nampak bahwa selain terdapat kumparan utama dan sekunder, ada sepotong tembaga melengkung membentuk kumparan satu lilitan tertutup, mengitari kutub salien elektromagnet sebelah atas. Dapat dipandang sebagai resultan kedua komponen, satu diantaranya lewat melalui celah pada magnet sebelah atas,

dan yang satu lagi meninggalkan kutub salien ke dalam celah di mana piringan berputar. Pengaruh tembaga melengkung adalah menyebabkan komponen yang melaluinya tertinggal fase dari komponen tetap pada rangkaian maknet sebelah atas yang berkaitan dengan teori rele arus lebih induksi kutub bayangan yang dijelaskan sebelum ini.



Gambar 25. Ilustrasi kerja rele Translay dan tunggal transformator arus.

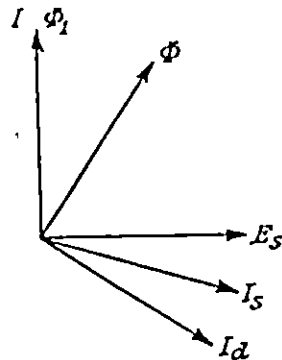
Freeman (1980:278)

Vektor diagram rele ini ditunjukkan pada gambar 26. Fluks θ_1 adalah fluks utama yang menaikkan GGL E_s , dan θ adalah fluks bocor, tertinggal fase dari θ_1 karena tembaga lengkung. Arus eddy yang terinduksi pada piringan oleh sebab θ akan berbeda fase 90° dengan θ , ditandai dengan I_d .

Kopel akan sebanding dengan $I_s \cdot I_d$; I_s = arus sekunder, dan terhadap sudut cosinus berbeda diantara kedua arus ini. Arus sekunder yang disebabkan oleh perbedaan tegangan sekunder kedua rele yang diinterkoneksi akan tertinggal dari E_s . Namun, karena kapasitansi kawat penghubung kumparan sekunder kedua rele, arus mengalir di dalam kawat penghubung tersebut sementara itu arus pada kumparan utama adalah sama,

arus tersebut akan mendahului E_s , dan bila sudut antara I_s dan I_d lebih dari 90° , kopel akan menahan rele bekerja.

Sifat pembiasan rele Translay, yang melengkapinya penahanan otomatis pada arus gangguan yang besar, didapat dengan ketidaksimetrisan posisi tembaga lengkung dalam hubungannya terhadap celah udara elektromagnet sebelah atas.



Φ_1 = Fluks utama menunjukka E_s

E_s = GGL sekunder

I_s = Fluks bocor pada celah

I_d = Arus yang diinduksikan pada piringan oleh Φ .

Gambar 26. Vektor diagram rele Translay.

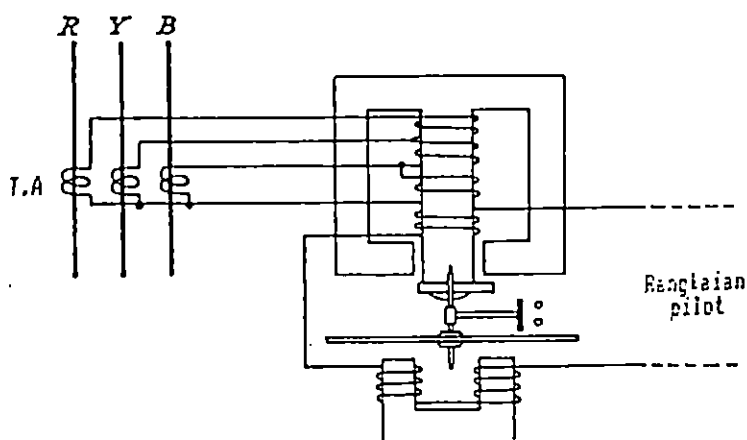
G.W. Stubbing (1964:157)

Dengan susunan seperti ini kopel penahan kerja rele dibangkitkan oleh arus yang diinduksikan pada tembaga lengkung oleh kumparan primer rele. Kopel penahan oleh karena tembaga lengkung bertambah besar sesuai dengan kenaikan arus ganggu pada rangkaian yang diamankan, tetapi pada keadaan gangguan dalam (internal fault), pengaruh melemahnya arus sirkulasi dalam kumparan sekunder pada elektromagnet sebelah atas menyebabkan induksi dalam loop tembaga nilainya kecil, akibatnya efek penahanannya pada rele akan menjadi berkurang

Rele translay digunakan untuk pengamanan keseimbangan

suatu rangkaian tiga fase, dapat dilengkapi dengan kumparan primer khusus, sehingga satu buah rele dapat digunakan masing-masing untuk set tiga fase transformator arus untuk melengkapi pengamanan gangguan fase dan gangguan tanah. Rele yang digunakan untuk tujuan ini ditunjukkan dalam gambar 27.

Dari gambar ini kelihatan bahwa rele dilengkapi dengan suatu pembagian seksi kumparan primer yang terdiri dari koil dua fase dan satu koil residu yang kepadanya satu set transformator arus tiga fase disambungkan. Elektromagnet sebelah atas terdiri dari kumparan primer dan sekunder. Pada beban normal setimbang, GGL induksi dalam kumparan sekunder rele oleh arus dalam kedua koil fase kumparan primer berlawanan arah terhadap yang dinyatakan pada pilot interkoneksi pada ujung rangkaian sehingga tidak ada sirkulasi arus pada kumparan sekunder dan rele tetap tidak kerja. Rele hanya akan bekerja bila terjadi suatu gangguan di dalam area pengamanan pada kondisi yang tidak ada keseimbangan GGL pada rangkaian pilot dan arus bebas bersirkulasi dalam kumparan rele.



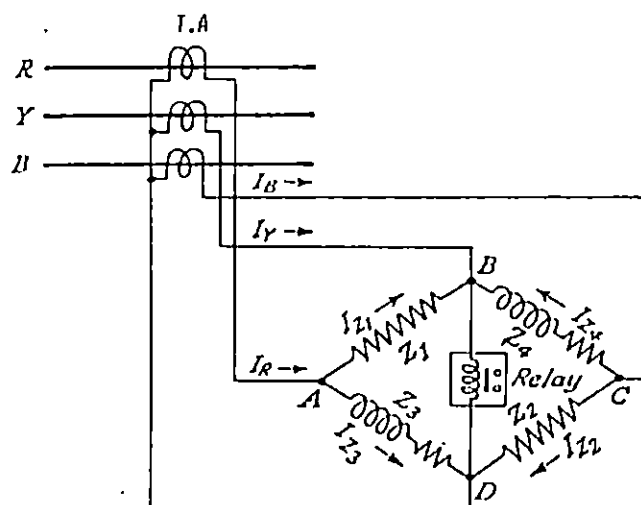
Gambar 27. Skema rele Translay bekerja dari set trafo arus tiga fase.

G.W. Stubbing (1964:158)

G. RELE FASE URUTAN NEGATIF

Rele fase urutan negatif, atau disebut juga rele fase tak seimbang, ialah sebuah rele yang dibuat hanya responsif terhadap urutan negatif yang terdapat pada rangkaian tiga fase beban tak seimbang atau kondisi gangguan.

Sebagaimana dijelaskan pada bab berikutnya bahwa sebuah generator atau motor memerlukan alat pengaman yang mampu memutuskan mesin tersebut dari busbar suplai apabila terjadi gangguan atau beban tak seimbang. Alat pengaman harus mempunyai nilai setting yang lebih kecil dari rating beban penuh mesin karena arus tak seimbang yang relatif kecil dapat menimbulkan bahaya. Rele gangguan tanah dihubungkan ke rangkaian mesin untuk merespon aliran arus fase urutan negatif bila terjadi beban tak seimbang antara satu fase dengan netral, tetapi jika terjadi ketidakseimbangan antara kedua fase, rele tak seimbang bekerja pada fase urutan negatif. Diagram pengaman fase tak seimbang ditunjukkan pada gambar 28.



Gambar 28. Rele fase takseimbang responsif terhadap arus urutan negatif dan urutan nol

G.W. Stubbing (1964:160)

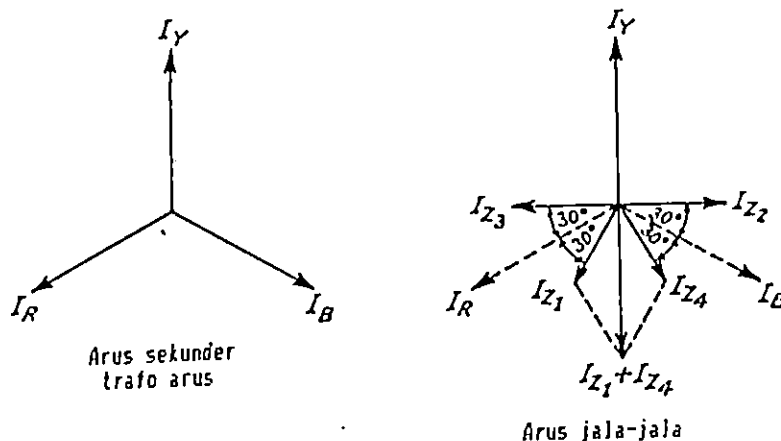
Peralatan ini mengandung jaringan resistansi-reaktansi yang mendapat energi dari transformator arus tiga fase, dan sebuah rele satu kutub yang mempunyai karakteristik waktu terbalik terhadap jaringan. Jaringan terdiri dari empat buah unit impedansi yang nilainya ekuivalen dihubungkan dalam formasi jembatan. Impedansi Z_1 dan Z_2 dipasang pada sisi yang berlawanan, dan unit Z_3 dan Z_4 keduanya mengandung resistansi dan reaktansi. Karena keseimbangan nilai resistansi dan reaktansi pada Z_3 dan Z_4 , dan arus yang mengalir pada kedua cabang tertinggal 60° dibelakang arus cabang Z_1 dan Z_2 . Rele yang disambungkan antara titik B dan D untuk tujuan praktis nilai impedansinya dapat diabaikan.

Dari hubungan gambar 2B dapat dilihat bahwa arus dari fase R transformator arus dibagi menjadi dua bagian yang sama pada titik A, satu bagian mengalir melalui cabang Z_1 dan rele, terus ke netral titik D, dan yang lain mengalir melalui cabang Z_3 langsung ke titik D. Karena impedansi Z_1 dan Z_2 sama besarnya, kedua cabang akan menanggung arus yang sama besarnya akan tetapi antara satu dengan lainnya berbeda fase 60° , dan jumlah vektornya sama dengan I_R , maka arus pada masing-masing cabang akan sama dengan $\frac{I_R}{\sqrt{3}}$. Arus yang mengalir pada cabang Z_1 akan mendahului I_R sebesar 30° dan arus cabang Z_3 akan tertinggal dari I_R sebesar 30° . Dengan cara yang sama arus dari fase B transformator arus terbagi dua pada titik C sehingga arus $\frac{I_B}{\sqrt{3}}$ tertinggal dari I_B sejauh 30° , akan mengalir melalui cabang Z dan rele, terus ke netral D, serta arus $\frac{I_B}{\sqrt{3}}$ mendahului I_B sejauh 30° mengalir melalui cabang Z_4 terus ke titik D. Arus

dari fase Y transformator arus masuk ke jaringan pada titik D dan mengalir langsung melalui rele ke ujung D. Oleh sebab itu, arus total yang mengalir melalui rele jarak:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{rele}} &= \left(\frac{I_R}{\sqrt{3}} \text{ mendahului } I_R \text{ sebesar } 30^\circ \right) + \\
 &+ \left(\frac{I_B}{\sqrt{3}} \text{ tertinggal dari } I_B \text{ sebesar } 30^\circ + I_Y \right) \\
 &= I_{Z_1} + I_{Z_4} + I_Y
 \end{aligned}$$

Gambar 28 menunjukkan vektor analisis dari sekunder transformator arus selama kondisi beban normal yaitu apabila hanya terdapat arus urutan positif saja. Arus pada rele yaitu $I_{Z_1} + I_{Z_4} + I_Y$, tetapi karena resultan I_{Z_1} dan I_{Z_4} sama besarnya dengan I_Y namun berlawanan arah, sehingga tak ada arus yang mengalir ke dalam rele, dan rele tetap tak bekerja untuk arus urutan positif.

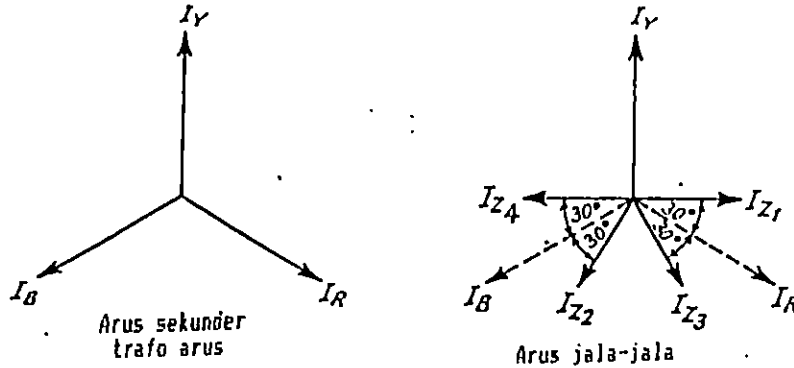


Gambar 29. Vektor diagram arus urutan negatif.

Freeman (1980:290)

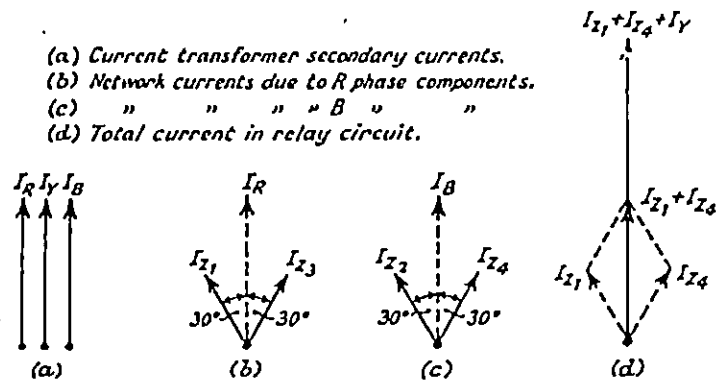
Gambar 30 memperlihatkan distribusi arus pada jaringan dan rangkaian rele untuk arus urutan negatif. Arus pada rele

besarnya adalah $I_{Z1} + I_{Z4} + I_Y$, tetapi komponen I_{Z1} dan I_{Z4} berbeda fase 180° dan 90° dari I_Y . Karena kedua arus I_{Z1} dan I_{Z4} sama besarnya dan berlawanan arah, maka akan saling menghilangkan, dan arus I_Y masuk ke rele dan menyebabkan rele itu bekerja.



Gambar 30. Vektor diagram arus urutan positif
Freeman (1980:294)

Gambar 31 menunjukkan kondisi bila arus urutan nol mengalir di dalam rangkaian. Dan pada rele kembali arus sebesar $I_{Z1} + I_{Z4} + I_Y$, dan komponen I_{Z1} dan I_{Z2} masing-masing terpisah sebesar 60° , resultannya ekuivalen dan sefase dengan I_Y sehingga arus ekuivalen menjadi 2 kali arus urutan nol dalam satu fase sekunder transformator arus lewat melalui rele dan membuatnya bekerja.

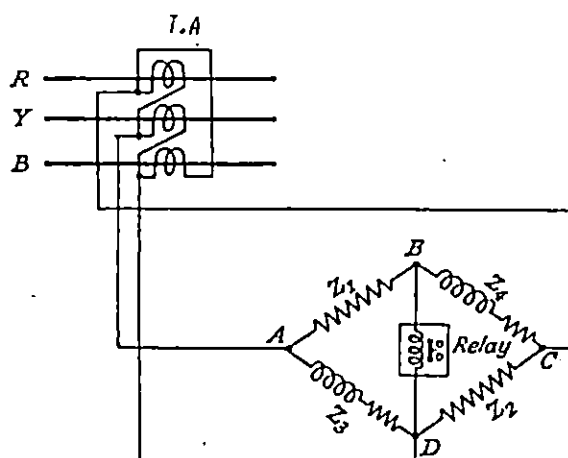


Gambar 31. Vektor diagram arus urutan nol.

G.W. Stubbing (1964:162)

Dari penjelasan pada paragraf di atas, kelihatan bahwa rele yang dilukiskan pada gambar 27 dapat mengamankan gangguan arus urutan nol maupun arus urutan negatif. Jika rangkaian semacam ini dipergunakan sebagai pengaman generator, biasanya pengaman tersebut dibatasi hanya bekerja terhadap gangguan arus urutan negatif saja yaitu dengan cara melihat sekunder transformator arus dalam hubungan delta seperti yang ditunjukkan dalam gambar 32 di bawah ini. Tujuan membuat sekunder transformator arus dalam hubungan delta adalah untuk menghilangkan arus urutan nol pada jaringan.

Perbedaan bentuk rele fase urutan negatif yang dikembangkan oleh Metropolitan Vickers Electrical, Co, diperlihatkan pada gambar 33. Rele ini konstruksinya sama seperti rele arus lebih double kumparan yang dijelaskan sebelumnya, kecuali kumparan primer rele dipasang suatu tap. Setengah dari kumparan primer mendapat energi langsung dari fase Y transformator arus, sedangkan setengah yang lainnya disambungkan ke fase R melalui sebuah transformator bantu.

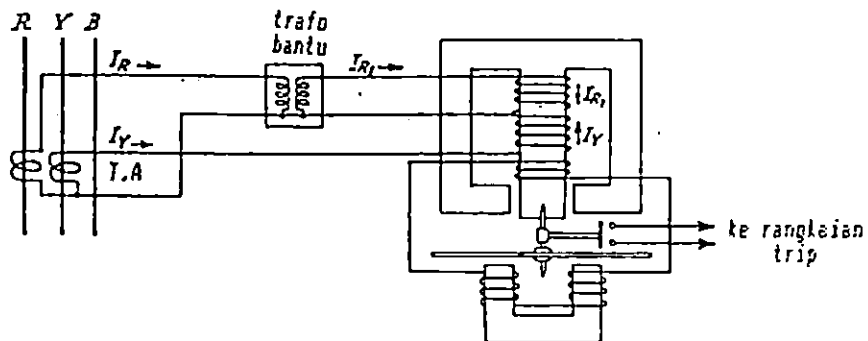


Gambar 32. Jaringan fase tak seimbang. rele dibuat hanya responsif terhadap arus urutan nol saja.

G.W. Stubbing (1964:163)

Transformator bantu dibuat dengan celah udara pada rangkaian magnetiknya sehingga arus yang masuk ke rele tertinggal dari fase R arus sekunder transformator arus sebesar 120° , bukan 180° seperti jika melalui transformator biasa.

Dengan mempelajari vektor diagram gambar 34, diketahui bahwa hubungan fase arus I_R , berubah karena adanya celah udara transformator bantu, arus I_R sesungguhnya sefase dengan arus sekunder I_Y fase Y transformator arus. Hubungan arus kedua bagian kumparan primer rele ini diatur seperti itu sehingga pada kondisi beban normal, bila yang ada hanya arus urutan positif saja fluks mereka itu saling berlawanan arah dan rele tak menerima kopel kerja dan tak akan bekerja bagi semua nilai arus urutan positif.

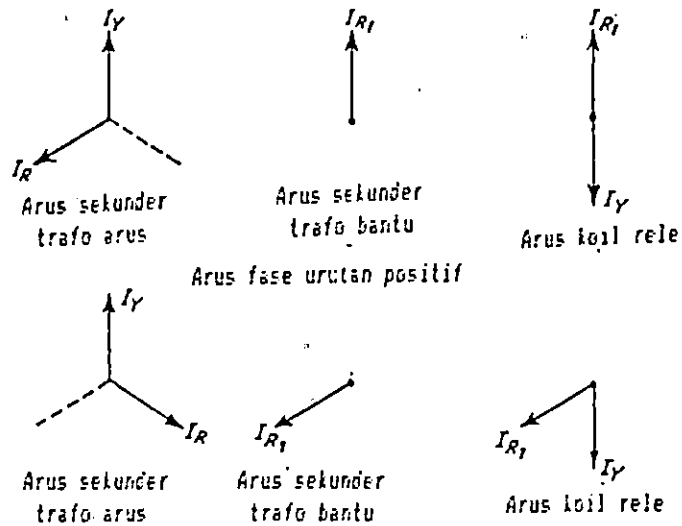


Gambar 33. Rele fase arus urutan negatif.

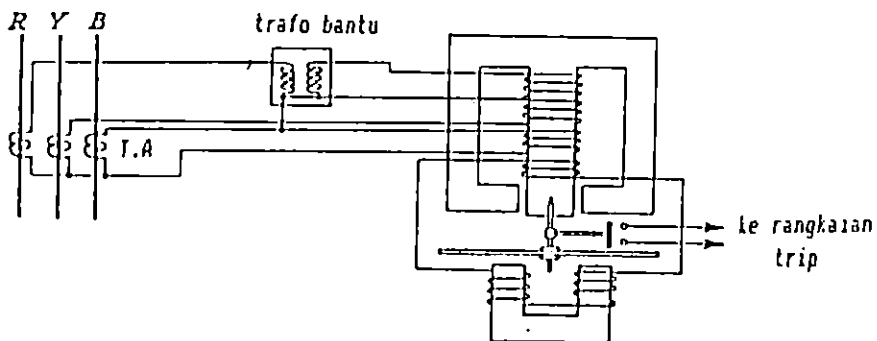
G.W.Stubbing (1964:164)

Pada kondisi arus fase urutan negatif arus pada kedua bagian koil kumparan primer tak terlalu lama dalam arah yang berlawanan dan resultan fluks menghasilkan arus pada kumparan sekunder rele dan membangkitkan kopel gerak piringan menyebabkan piringan itu bekerja.

Rele yang dibicarakan di atas dapat dibuat agar responsif terhadap arus urutan nol sebagaimana bagi arus urutan negatif yaitu dengan cara menambahkan transformator arus pada len tiga fase lainnya, seperti ditunjukkan dalam gambar 35.



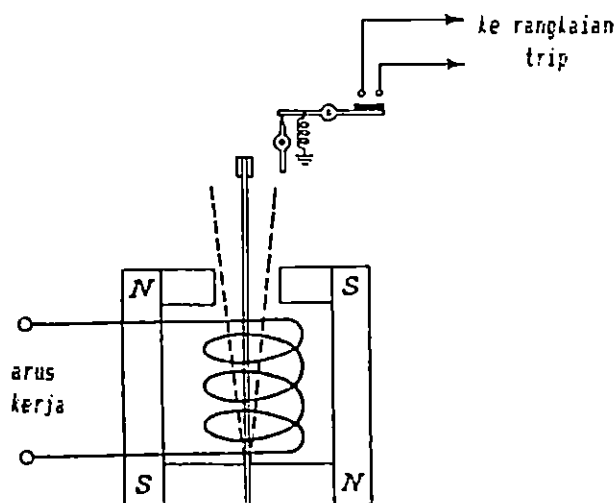
Gambar 34. Vektor diagram rele urutan negatif
G.W. Stubbing (1964:164)



Gambar 35. Rele arus urutan negatif dan nol
Freeman (1980:267)

H. PENGATURAN RELE (TUNED RELAYS)

Dalam beberapa hal khusus suatu rele memerlukan pengaturan (berbentuk roda gigi) agar rele hanya responsif terhadap arus yang berfrekuensi normal, tidak terpengaruh oleh arus berfrekuensi tinggi yang bisa timbul pada sekunder transformator arus yaitu pada keadaan gangguan surge pada sistem yang diamankan. Untuk mendapatkan batas (range) frekuensi yang diperlukan itu, rele tersebut diatur secara mekanis, rangkaianannya diperlihatkan pada gambar 36.

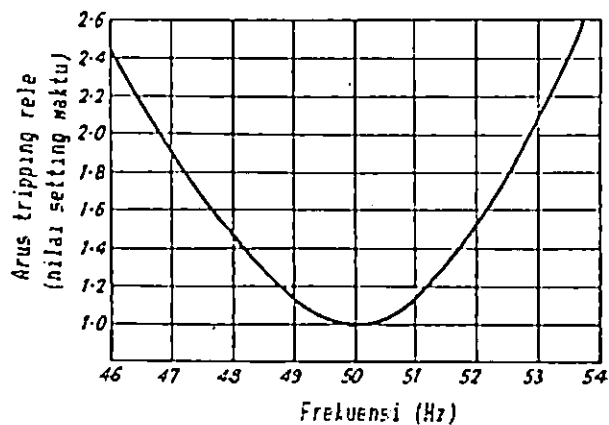


Gambar 36. Sekema rele yang diatur secara mekanis
G.W. Stubbing (1964:166)

Rele itu terdiri dari sepotong material maknet (a reed of magnetic material) yang bebas berputar dalam sebuah koil dan di dalam medan maknet. Koil itu menanggung arus kerja. Frekuensi getaran natural batang maknet dibuat sama dengan frekuensi sistem dan diset agar bergetar bilamana arus frekuensi normal mengalir pada koil kerja tetapi tetap bertahan tak terpengaruh oleh adanya arus-arus yang berfrekuensi tinggi. Amplitudo getaran (vibrasi) batang

tergantung dari besarnya arus yang mengalir pada koil kerja dan bilamana melewati batas yang ditetapkan, batang tersebut melepaskan togel, akibatnya kontak trip menutup.

Variasi arus yang diperlukan untuk mengoperasikan rele bagi perubahan frekuensi yang kecil diperlihatkan pada gambar 37. Dari kurva ini nampak bahwa sensitivitasnya praktis konstan terhadap variasi frekuensi yang kecil.



Gambar 37. Kurva respon frekuensi rele pengaturan batang
G.W. Stubbing (1964:166)

BAB III

PROTEKSI BUSBAR, FEEDER DAN JARINGAN TRANSMISI

A. BUSBAR

Busbar adalah satu bagian penting dari suatu pembangkit dan gardu distribusi. Busbar pada pembangkit merupakan bagian yang vital karena umumnya sumber tenaga dikumpulkan disana. Gangguan yang terjadi tiap saat pada busbar dapat mengakibatkan terputusnya suplai daya jika tidak dilengkapi dengan pengaman yang handal dan bekerja cepat.

Pengaman busbar yang terpasang biasanya berupa pengaman arus lebih dan pengaman gangguan tanah yang termasuk pada kelompok pengaman peralatan individu. Pengaman ini tentu saja berfungsi mengamankan busbar dari gangguan-gangguan yang mungkin timbul sewaktu-waktu. Namun demikian, pengaman yang disebutkn di atas tidak akan mampu mengamankan semua bentuk gangguan terutama bagi sistem distribusi modern yang mempunyai banyak cabang distribusi.

Pengamanan yang dilakukan di area busbar bukan hanya terhadap busbar itu sendiri, tetapi juga terhadap seluruh peralatan yang terdapat di situ yang antara satu alat dan lainnya digabungkan sedemikian rupa yang membentuk satu kesatuan (unit) pengaman, misalnya saklar-saklar (switches) dan pemutus rangkaian (CB).

Bila terjadi gangguan di setiap bagian di dalam busbar, semua peralatan yang terhubung dengan bagian itu haruslah dilepas agar selamat dari bahaya yang mungkin terjadi.

Biasanya pengaman busbar direncanakan agar responsif hanya terhadap gangguan tanah saja. Biasanya netralnya ditanahkan. Busbar yang merupakan suatu bagian integral dari pemutus-penghubung biasanya dipisahkan secara fase. Busbar tersebut ditutup dalam sebuah kotak yang terbuat dari pelat baja atau logam sheet berbentuk kubikel.

Ada dua macam pengaman busbar yang dikenal yaitu pengaman kebocoran rangka (frame leakage) dan arus difensial. Kedua jenis pengaman ini dapat dipastikan bekerja hanya bila terjadi gangguan tanah.

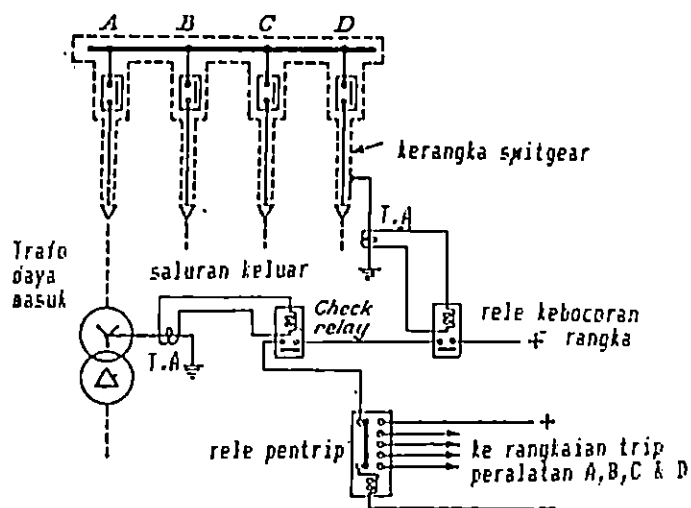
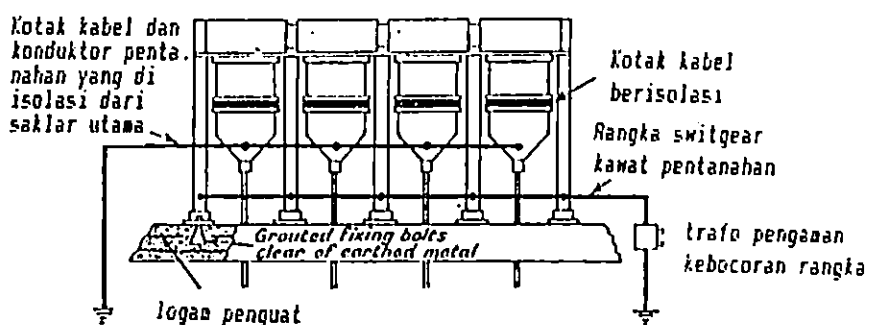
B. PENGAMAN KEBOCORAN RANGKA

Pengaman seperti ini biasanya dipakai pada unit pemutus berukuran kecil, pemutus dipisahkan secara sederhana dari struktur pentanahan dan disambungkan ke stasion utama pentanahan melalui lilitan primer sebuah transformator arus. Lilitan sekundernya dihubungkan ke rele yang bekerja sensitif untuk mentrip peralatan-peralatan bila arus ganggu tanah mengalir pada pemutus.

Pemutus (switchgear) dipasang pada fondasi beton kering agar tidak kontak dengan bagian lainnya. Pengisolasian juga diperlukan bagi kontak-kontak kabel utama, kabel multi inti, dan juga fitting-fitting dengan cara menyambungkannya langsung ke stasion pentanahan utama melalui kawat atau kabel khusus. Yang disebut terakhir ini sangat perlu untuk menjaga agar arus ganggu tanah-rangka pada saat terjadi gangguan akan

lewat melalui primer transformator arus dan tidak terhubung ke tanah melalui cannel-cannel.

Gambar 38 memperlihatkan skema pengaman bocor rangka yang terdiri dari transformator masukan (incoming transformer) dan tiga saluran keluar. Rele pengecek gangguan tanah mendapat energi dari transformator masukan melalui transformator arus.



Gambar 38. Pengaman busbar kebocoran rangka

G.W Stubbing (1964:251)

Transformator arus ini dihubungkan ke titik netral transformator masukan. Kontak-kontak rele dihubungkan secara seri dengan rangka rele kebocoran, sehingga dua buah rele independen harus bekerja sebelum rele tripping melakukan pengisolasian sempurna pada daerah busbar dengan cara melepaskan pemutus rangkaian dari semua peralatan yang tersambung ke busbar.

Pengaman kebocoran rangka dapat diperluas untuk dapat bekerja diskriminatif bila busbar dipisahkan dalam beberapa seksi oleh pemutus arus. Dengan cara seperti ini pengamanan dilakukan secara daerah (zona).

C. PENGAMAN DIFRENSIAL

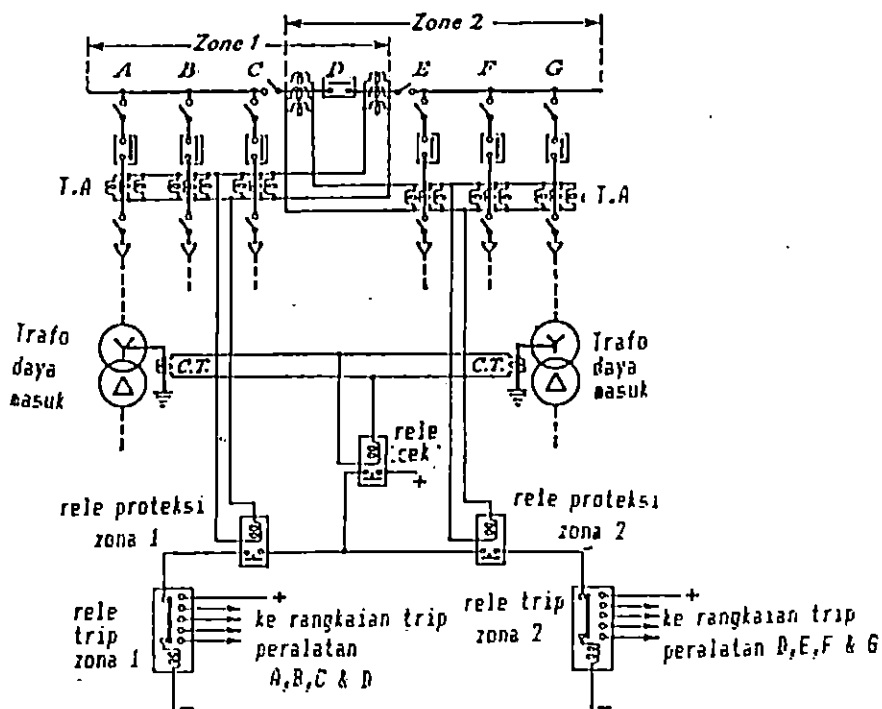
Pengaman busbar yang bekerja berdasarkan prinsip difrensial adalah pengaman yang umum dipakai pada pembangkit daya atau stasion distribusi. Prinsip difrensial semacam ini dipandang cukup sempurna mendiskriminasikan gangguan yang terjadi pada setiap peralatan di busbar.

Fungsi pengaman sesungguhnya adalah menyeimbangkan arus yang masuk ke dalam masing-masing seksi busbar. Dalam keadaan normal, besarnya arus itu sama dengan nol. Bila ada gangguan, arus yang mengalir di dalam seksi akan melebihi batas yang ditetapkan, rele akan merespon perbedaan arus, sehingga gangguan tersebut dapat diatasi.

Pengaman difrensial yang biasanya dipakai untuk memproteksi gangguan tanah hanya membutuhkan tiga buah transformator arus. Rangkaian sekunder sisa (residual

circuit) diparalel dengan rele tipe kerja simultan yang cocok. Agar diperoleh kesetimbangan, diperlukan transformator arus yang mempunyai perbandingan sama.

Gambar 39 memperlihatkan penggunaan pengamanan difrensial khususnya untuk busbar tunggal. Busbar dibagi dalam dua seksi dengan masing-masing peralatan pemutus. Pengamanan dibagi dalam dua zona, sehingga pengamanan yang zonanya terganggu itu sajalah yang memutuskan rangkaian.



Gambar 39. Pengaman difrensial busbar
G.W Stubbing (1964:253)

Rele pemeriksa mendapat catu daya dari trafo arus yang dihubungkan ke netral transformator masukan. Ini adalah bentuk pengecekan yang sederhana (mudah).

Pengaman difrensial dengan rele tipe Translay juga dipakai untuk pengaman busbar. Rele Translay dipasang pada setiap peralatan digabungkan dengan busbar. Untuk memperoleh keseimbangan rangkaian, diparalelkan semua kumparan' sekunder masing-masing rele busbar. Dengan pengaman seperti ini, masing-masing rele mengontrol rangkaian trip masing-masing pemutusnya. Pentripan rele secara bersama tidak dibutuhkan.

D. PENGAMAN ARAH INTERLOK

Pengaman arah interlok kadang-kadang dipakai untuk pengaman busbar. Berdasarkan fakta, prinsip kerjanya adalah jika busbar terganggu, arus mengalir menuju busbar dalam semua saluran masuk, tak ada arus yang meninggalkan busbar tersebut. Namun untuk gangguan dalam, arus akan meninggalkan busbar paling tidak dalam satu rangkaian.

Dengan pengaman arah rele gangguan tanah, tiap rele dilengkapi dengan dua pasang kontak yaitu satu pasang menutup bila arus ganggu mengalir menjauhi busbar, sedangkan pasangan lain diinterkoneksi. Oleh sebab itu jika salah satu atau gabungan menunjukkan adanya arus mengalir menjauhi busbar, rele trip mendapat energi untuk mentrip semua peralatan pada seksi itu. Namun, jika satu dari rele menunjukkan arus ganggu meninggalkan busbar, catu daya ke rele pentrip terganggu, sehingga perlu dilakukan pentripan pemutus.

E. PEMILIHAN DAN PENAMPILAN PENGAMAN

Pemilihan bentuk atau susunan pengaman busbar yang akan dipakai ditentukan oleh tingkat kepentingan stasion tersebut, ruang/ tempat akomodasi yang tersedia bagi peralatan yang diperlukan tersebut serta biaya relatif alat-alat pemutus (switchgear).

Pengaman direncanakan untuk melindungi sistem dari gangguan tanah. Setting gangguan dibuat dalam persentase antara tingkat arus sistem pentanahan netral dengan kondisi minimum sumber tenaga.

Stabilitas pengaman difrensial haruslah sedemikian rupa, di mana rele proteksi tetap tak bekerja untuk arus gangguan maksimum yang dicatu melalui saluran gabungan ke suatu gangguan pada salah satu saluran.

Pengaman biasanya ditugaskan untuk menjaga stabilitas gangguan tiga fasa dan gangguan tanah. Kedua macam tugas tersebut dinyatakan dalam harga arus nyata.

Nilai stabilitas sistem tiga fase setiap pengaman difrensial seharusnya ekivalen dengan arus rangkaian tiga fase pada lokasi busbar. Perhitungannya seharusnya menggunakan nilai reaktansi urutan positif pembangkitan, transformator, serta peralatan lainnya yang bertanggung jawab terhadap gangguan daya pada kondisi maksimum pembangkit.

Untuk tujuan praktis, apabila data yang tersedia tak memenuhi syarat untuk keperluan perhitungan gangguan, pengaman biasanya dibuat stabil agar arus ganggu tiga fase ekivalen dengan kemampuan pemutus.

Nilai kestabilan arus ganggu-tanah pengaman difrensial yang netralnya ditanahkan melalui resistansi, dapat dipandang sama dengan rating arus kombinasi tahanan pentanahan netral bila bekerja pada kondisi pembangkitan daya maksimum.

Pada sistem dengan pentanahan yang baik sekali, kestabilan arus gangguan tanah harus dihitung dari nilai reaktansi urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol pembangkit dan saluran yang terganggu.

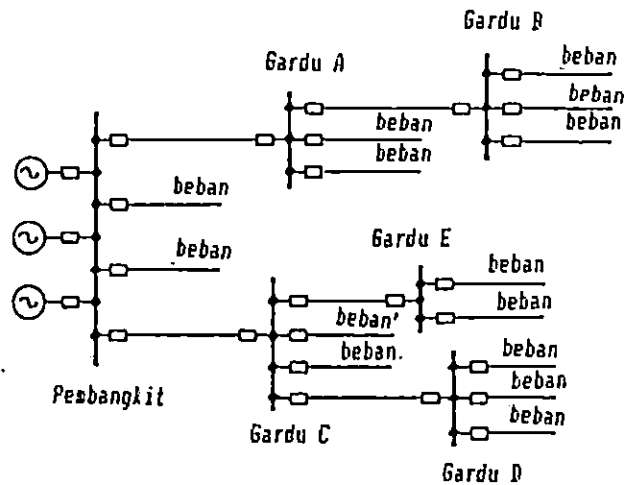
F. KABEL SALURAN

Sistem distribusi bisa dilakukan dengan sistem radial, saluran paralel, ring, atau gabungan antara ketiganya. Sebelum menetapkan pilihan pengaman yang akan dipakai, kiranya perlu terlebih dahulu diperhitungkan kepentingan relatif masing-masing bagian sistemnya dalam rangka suplai daya dan juga arah aliran daya pada berbagai kemungkinan gangguan.

Dengan mempelajari secara cermat dan mendetail suatu diagram sistem distribusi akan terlihat kondisi kerja yang diperlukan setiap peralatan dan akan membantu menentukan pemilihan bentuk pengaman yang cocok atau sesuai dengan fungsi yang diharapkan.

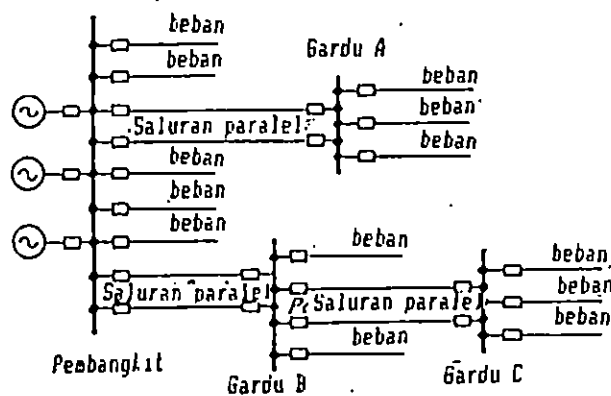
Sistem distribusi radial biasanya dipergunakan pada sistem yang kecil di mana tingkat kontinuitas suplai daya dipandang tidak terlalu penting. Sistem seperti ini terdiri dari satu buah gardu induk (power station), lalu mencatu sejumlah sub gardu induk secara seri. Pada sub gardu induk, suplai dibagi-bagi dalam saluran yang lebih kecil. Seterus-

nya dapat juga menyuplai sub gardu induk yang lebih kecil lagi. Sistem radial ditunjukkan dalam gambar 40.



Gambar 40. Sistem saluran radial
G.W Stubbing (1964:258)

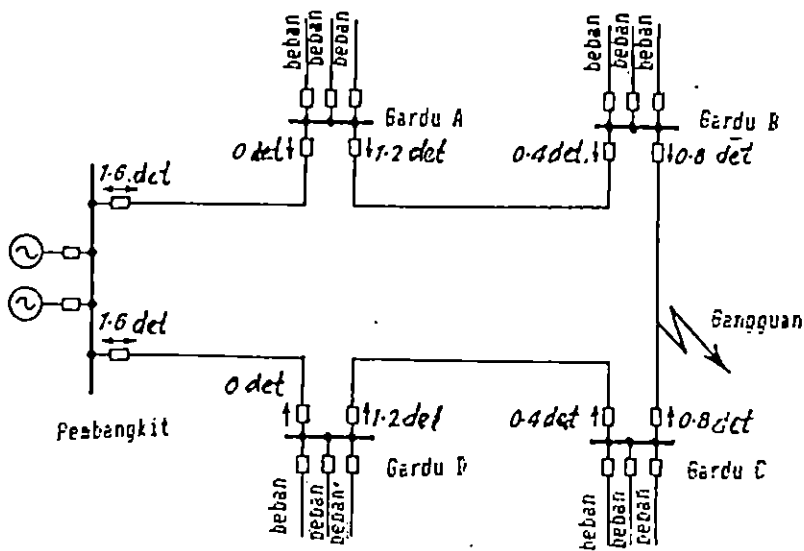
Sistem saluran paralel adalah merupakan pengembangan dari sistem radial. Sistem ini bertujuan selain mempertahankan kontinuitas penyaluran daya juga kebutuhan daya yang bertambah besar. Skema rangkaian radial paralel ini ditunjukkan pada gambar 41 di bawah ini.



Gambar 41. Sistem distribusi radial paralel
G.W Stubbing (1964:258)

Sistem utama-ring digunakan secara ekstensif dalam pengembangan distribusi lokal modern dan terdiri dari sejumlah sub gardu induk yang terhubung seri dengan gardu yang pertama. Gardu terakhir mempunyai sejumlah saluran catu (feeder) tersambung ke sumber yang sama. Keuntungan metode ini adalah layoutnya sederhana.

Alternatif penyaluran daya yang tersedia pada setiap gardu memungkinkan pengaman dan pelayanan daya bekerja secara kontinu. Rangkaian tipe ring ini diperlihatkan pada gambar 42.



Gambar 42. Rangkaian tipe ring
G.W Stubbing (1964:259)

BAB IV.

PENERAPAN RELE PENGAMAN PADA JARINGAN TRANSMISI

A. SEBAB DAN JENIS GANGGUAN

Karena letaknya tersebar di berbagai daerah, saluran transmisi sering mengalami gangguan baik yang disebabkan oleh alam maupun oleh sebab lain. Di Jepang, banyaknya gangguan untuk saluran transmisi di atas 150 kV adalah 1,1 per 100 km per tahun yang disebabkan oleh petir, sedangkan untuk tegangan 60 kV 5,8 per km per tahun yang disebabkan oleh binatang (burung, ular, dan sebagainya). Sayang sekali, data gangguan di Indonesia sampai saat ini belum dapat terkumpul secara lengkap.

Jenis gangguan yang biasa terjadi dapat dibagi dalam dua katagori utama yaitu *hubung singkat* dan *putusnya rangkaian*. Dari jenis-jenis gangguan yang terjadi, yang paling besar jumlahnya adalah hubung singkat satu fase dengan tanah, menyusul hubung singkat dua fase ke tanah, hubung singkat antara dua fase, dan hubung singkat tiga fase, atau hubung singkat tiga fase dengan tanah.

Dalam gangguan putusnya kawat, termasuk putusnya satu atau dua kawat. Kadang-kadang hubung singkat dan putusnya kawat terjadi secara bersamaan. Bahkan kadang-kadang terjadi juga hubung singkat di beberapa tempat sekaligus. Alat yang paling banyak menderita kerusakan adalah isolator.

B. RELE PENGAMAN

Rele pengaman untuk saluran transmisi melindungi saluran dan peralatan terhadap kerusakan dengan cara menghilangkan gangguan yang terjadi secara cepat dan tepat. Kecuali itu, pengaman berusaha membatasi daerah yang terkena gangguan seminimum mungkin, sehingga mutu dan keandalan penyaluran terjamin.

Banyak sekali macam sistem pengaman yang kita kenal termasuk derajat kemampuan pengamanannya. Untuk saluran transmisi yang penting, sering dipakai pengaman jenis *pilot relay*, meskipun rele sistem arus lebih juga dapat dipakai. Oleh karena itu pemilihan jenis rele perlu dilakukan dengan seksama, dengan memperhatikan frekuensi gangguan, pentingnya saluran yang hendak dilindungi, faktor tekno-ekonominya, kekurangan maupun kelebihan jenis satu terhadap yang lain.

1. Pertimbangan Mengenai Kemampuan Pengaman

Beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan rele untuk mengamankan saluran transmisi antara lain adalah:

- a. Koordinasi antara kemampuan kembali ke keadaan normal dan kemampuan mengetahui adanya gangguan. Penting sekali bagi sistem rele pengaman untuk mengetahui adanya gangguan dan mengamankannya dengan memperhatikan kemampuan untuk kembali ke keadaan normal secara otomatis. Misalnya, bila dipakai sistem menutup kembali rangkaian satu fase, maka sistemnya harus dapat mengetahui fase mana yang terganggu.

- b. Kemampuan selektif; sesudah diketahui gangguan yang terjadi secara tepat, gangguan tersebut harus dihilangkan dengan interupsi terbatas pada daerah seminimum mungkin. Bila digunakan sistem *zone-step tripping* maka dapat dipakai sistem rele arus lebih arah. Untuk saluran transmisi rangkaian ganda dapat digunakan sistem pengaman yang memakai input sekunder, misalnya dengan sistem pengaman arus seimbang (*current balance*) kalau *series tripping* diizinkan. Bila diinginkan penjatuhan (*tripping*) dengan kecepatan tinggi, dalam hal *series tripping* tidak diperbolehkan, maka sistem pilot relay harus digunakan.
- c. Kepekaan operasi; rele harus bekerja dengan kepekaan (*sensitivity*) yang tinggi. Artinya dengan tegangan dan arus yang dicatat ia harus dapat mengetahui gangguan yang sulit sekalipun dan dengan kecepatan kerja tertentu.
- d. Waktu bekerja; dalam hal tertentu rele harus bekerja dalam waktu singkat, dalam hal yang lain ia harus bekerja dengan waktu yang tertunda (*time delay*). Semuanya ini tergantung pada batas stabilitas dari sistem dan kecepatan bekerjanya alat-alat pada sistem tersebut.
- e. Pengamanan cadangan (*back-up*); bila rele utama tidak bekerja, harus ada pengamanan cadangan, sehingga gangguan tetap dapat dihilangkan. Pengamanan rele cadangan ini bertugas mengamankan daerahnya sendiri, dan mengamankan daerah-daerah yang bertetangga dengan-

nya, bila rele utama dalam daerah-daerah tetangga tersebut tidak bekerja.

2. Pertimbangan Mengenai Sistem Tenaga

Dalam penerapan rele, beberapa kondisi sistem tenaga perlu mendapat pertimbangan.

- a. Daya terbalik, tegangan dan arus gangguan berubah dengan berubahnya arah daya. Oleh karena itu ada atau tidak adanya perubahan arah daya perlu diperhatikan bila sistem *pilot relay* dipakai pada terminal beban atau terminal yang berubah dayanya.
- b. Rangkaian ganda yang sejajar dan yang bercabang di tengah; sistem pengamanan seimbang (*balance protection*) tidak sesuai untuk saluran ganda yang sejajar atau bila sesuatu cabang dihubungkan pada saluran tersebut. Pada saluran-banyak (*multi circuit*) yang sejajar, perubahan impedansi urutan nol harus dicatat dalam pengetanahan rangkaian tetangga, dan adanya arus yang sama. Bila sumber tenaga dihubungkan dengan cabang saluran di tengah, maka kemampuan rele jarak untuk mengukur jarak ke gangguan berubah pula. Disamping itu arus gangguan dalam daerah yang dilindungi mengalir ke luar daerah tersebut, sehingga rele arah akan terpengaruh.
- c. Sistem pengetanahan dan titik pengetanahan; arus dan tegangan berubah dengan berubahnya sistem pengetanahan (pengetanahan efektif atau tidak). Hal ini berpengaruh terhadap sistem pengamanannya. Untuk sistem yang ditanahkan efektif, sistem rele jarak sering dipakai

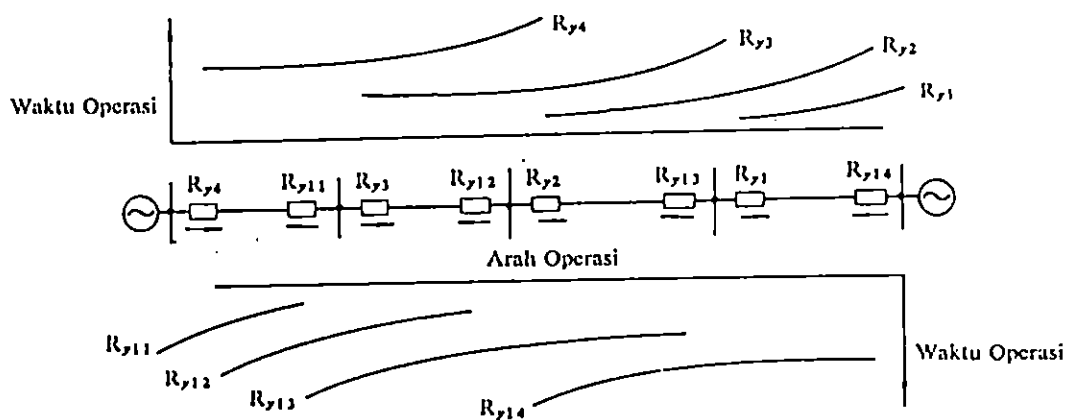
dalam pengamanan terhadap hubung singkat. Untuk sistem yang pentanhanannya tidak efektif, sistem relenya dipilih sedemikian rupa sehingga rele tidak bekerja terhadap arus pemuat atau arus impedansi urutan nol yang semu, karena arus hubung singkatnya kecil. Titik pengetanahannya juga penting dalam pemilihan sistem pengamanan tersebut.

3. Penerapan Sistem Pengaman

Penerapan sistem pengaman adalah sebagai berikut:

a. Sistem Rele Arus Lebih.

Seperti nampak pada gambar 43 arah arus hubung singkat dicatat oleh rele arus. Bila waktu kerja rele arus-lebih yang semakin dekat ke sumber tenaga diset lebih lama, maka rele arus lebih yang berdekatan dengan titik gangguan yang bekerja. Dengan demikian hanya rangkaian yang terkena gangguan saja yang terbuka. Rele arus lebih bekerja pada waktu dan arus lebih tertentu. Gambar 43 itu memperlihatkan sebuah sistem yang sumber tenaganya ada di dua ujung.



Gambar 43. Pengamanan Saluran dengan Rele Arus Lebih

A. Arismunandar (1974:83)

Untuk memungkinkan *selected tripping* dari gangguan dalam waktu sesingkat mungkin, dan bila nilai arus hubung singkat ditentukan terutama pada titik gangguan, sebaiknya dipakai rele dengan karakteristik pengunduran waktu balik (*inverse time delay*).

Bila nilai tersebut ditentukan dalam keadaan operasi, sebaiknya dipakai rele dengan karakteristik pengunduran waktu tertentu (*definite time delay*). Jika arus hubung singkat dan arus beban tidak berbeda, harus digunakan rele arus lebih dengan pembatasan tegangan (*voltage restraint*).

Meskipun sistem rele ini sederhana dan murah harganya, waktu bekerjanya sering lambat sekali, sehingga tidak sesuai untuk pengamanan saluran transmisi yang penting dan sistem yang banyak bagian-bagian yang harus diputuskan (*tripped*). Sistem rele arus lebih biasanya dipakai sebagai pengaman cadangan pada saluran transmisi tegangan rendah dan sebagai pengaman saluran distribusi atau bila biaya untuk pengamanan dengan rele jarak tidak tersedia.

b. Sistem rele jarak

Sistem ini dipakai untuk mengamankan saluran transmisi terhadap hubung singkat antar fase dan fase dengan tanah (dalam hal ditanahkan secara efektif). Gambar 44 menunjukkan contoh penerapan pada sistem penjatuhan daerah secara bertingkat.

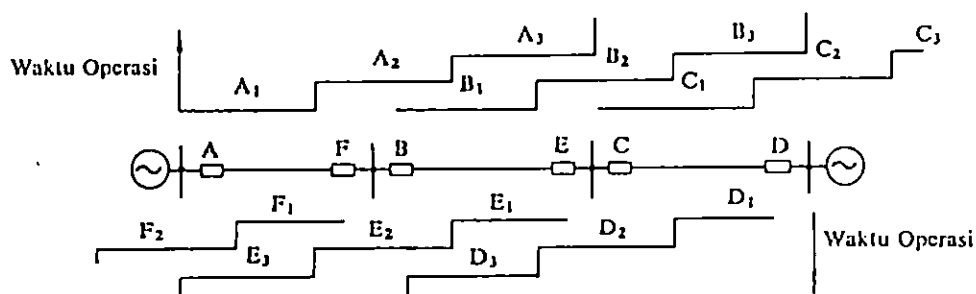
Tingkat pertama A1-F1 dipasang pada jarak 70-90% dari daerah yang dilindungi, sehingga pemutusan dari

daerah tersebut berlangsung dengan kecepatan tinggi.

Guna menjamin bekerjanya pengaman di sekitar terminal tersebut, maka diadakan pengamanan tingkat ke dua. A₂-F₂ dipasang pada jarak 120-150% dari daerah tersebut, dengan waktu tunda tertentu. Tingkat ketiga, A₃-F₃ dipasang pada jarak yang lebih jauh lagi serta penundaan waktu kerja lebih lama dari tingkat ke dua.

Kelebihan sistem ini dibandingkan dengan sistem arus lebih terletak pada kemampuannya untuk bekerja pada kecepatan tinggi (karena rele hanya bekerja untuk daerah yang dilindungi saja), sehingga ia sesuai sekali untuk melindungi saluran-saluran transmisi.

Kelebihannya terhadap rele arus lebih terletak pada ketidaktergantungannya pada besarnya arus hubung singkat. Namun biayanya jauh lebih mahal. Hal yang perlu dicatat dalam penggunaan rele jarak adalah persoalan yang mungkin timbul karena kesalahan dalam pengukuran jarak, misalnya, dalam saluran transmisi dengan banyak terminal, karena bercabang ditengah atau bila salah satu terminalnya mempunyai sumber daya.



Gambar 44. Pengamanan Saluran dengan Rele Jarak

A. Arismunandar (1980:83)

c. Sistem pengaman seimbang

Sistem ini dipakai untuk mengetahui dengan cepat rangkaian mana yang terganggu dalam sebuah rangkaian ganda yang paralel. Pemutusan rangkaian yang terganggu dilakukan oleh rele arah atau rele arus lebih.

Rele ini bekerja bila terdapat perbedaan arah arus lebih tertentu dalam kedua rangkaian (terbaca dari transformator arus). Sistem ini tidak dapat bekerja memutuskan rangkaian dengan cepat bagi seluruh daerah yang dilindungi. Kadang-kadang ia bekerja secara beruntun (series tripping), artinya ujung yang dekat pada tempat gangguan yang diputuskan lebih dahulu, baru yang lain, meskipun kecepatan pemutusan-nya cukup tinggi.

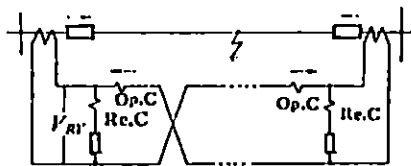
Kelemahan yang lain ialah bahwa sistem ini tidak dapat dipakai bila hanya satu rangkaian yang beroperasi dan bahwa kesalahan pemutusan satu terminal menyebabkan kesalahan pemutusan terminal lainnya. Oleh karena itu sistem ini dipakai pada saluran sistem tegangan rendah.

d. Sistem Rele Pilot.

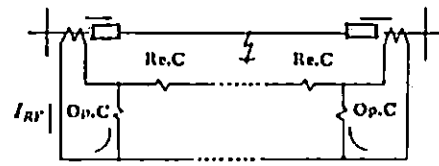
Sistem ini digunakan bila gangguan harus dihilangkan dalam waktu yang singkat, yaitu dengan mengirimkan isyarat tertentu kepada kedua ujung saluran. Bila dilihat dari segi pengiriman isyaratnya dikenal sistem rele pilot kawat, sistem rele power-line-carrier (PLC), sistem rele communication-line carrier dan sistem rele gelombang mikro.

Berdasarkan prinsip dan fungsinya, sistem pilot kawat dibagi menjadi sistem perbandingan arah, sistem perbandingan fase, transfer tripping dan kombinasi berbagai sistem tadi. Berhubung karena kemampuannya dapat menghilangkan gangguan dalam waktu yang singkat dalam daerah yang menjadi lindungannya, maka sistem rele pilot digunakan pada saluran-saluran transmisi yang penting.

Sistem pilot-kawat dipakai untuk pengamanan saluran transmisi udara yang pendek atau melalui kabel, sedang sistem *power-line carrier* untuk saluran transmisi udara. Akhir-akhir ini sistem terakhir tadi juga digunakan untuk saluran transmisi melalui kabel.



Op.C = Gulungan Operasi



Re.C = Gulungan Penghambat

Gbr. 45a. Sistem Rele Pilot Kawat dengan Prinsip Tegangan Berlawanan

Gbr 45b. Sistem Rele Pilot Kawat dengan Prinsip Arus Bersirkulasi

A. Arismunandar (1980:85)

Gambar 45 (a) menunjukkan cara tegangan-berlawanan (opposed voltage), dan gambar 45 (b) menunjukkan cara arus bersirkulasi (circulating current) dari sistem pilot-kawat. Pada cara pertama, dalam keadaan normal

arus tidak mengalir, sedangkan pada cara kedua arus mengalir melalui transformator arus dan kawat pilot.

Pada cara pertama, bila terjadi hubung singkat, terjadi perbedaan arus pada kedua ujung saluran sehingga timbul perbedaan potensial antara kedua ujung tersebut. Akibatnya arus mengalir dalam kumparan kerja (operating coil), sehingga rele bekerja.

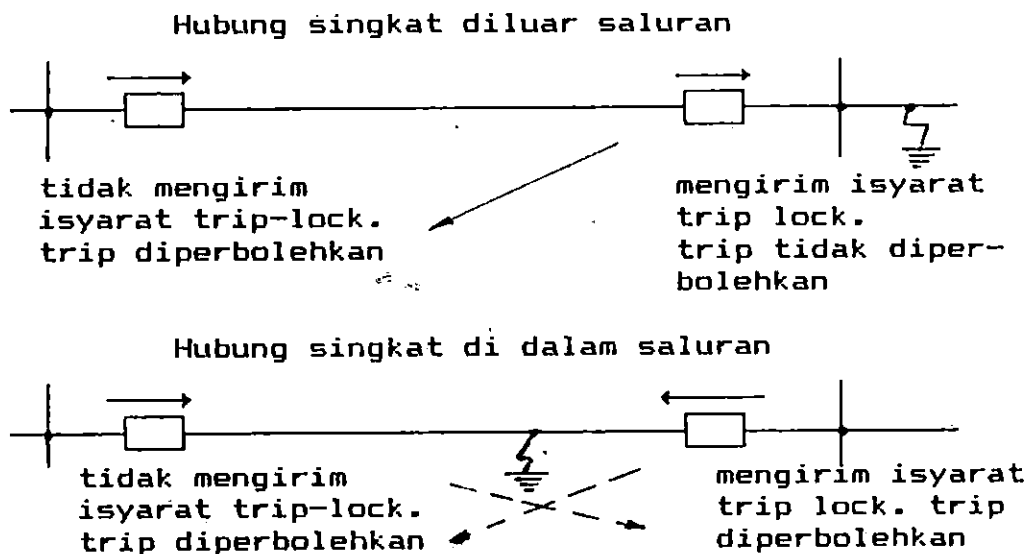
Pada cara kedua, arus yang mengalir dalam keadaan normal bekerja pada kumparan penghambat (restraining coil) dan rele tidak bekerja. Bila ada hubung singkat, terjadi perbedaan arus pada kedua ujung saluran yang menyebabkan bekerjanya rele oleh gulungan kerja. Untuk menghindarkannya dari pengaruh induksi, terutama dalam keadaan hubung singkat, perlu dipasang transformator isolasi.

Bila kawat pilotnya tidak mempunyai isolasi yang cukup terhadap tegangan lebih, maka perlu digunakan alat-alat tambahan misalnya transformator penetral (neutralizing transformer), untuk melindungi keselamatan operator terhadap bahaya tersebut.

Cara di atas dipakai saluran komunikasi untuk mengirimkan isyarat-isyarat, sedangkan pada sistem *carrier relay* digunakan saluran tenaga (power line) atau gelombang mikro. Sistem ini memakai tiga cara, yaitu sistem perbandingan arah, sistem perbandingan fase, dan sistem transfer tripping.

Pada cara perbandingan arah (lihat gambar 45) pilotnya mengisyaratkan kepada peralatan pada ujung

saluran bagaimana rele-arrah menanggapi hubung singkat pada ujung yang lain. Dalam keadaan normal, tidak ada isyarat pilot yang dikirimkan dari sesuatu ujung.



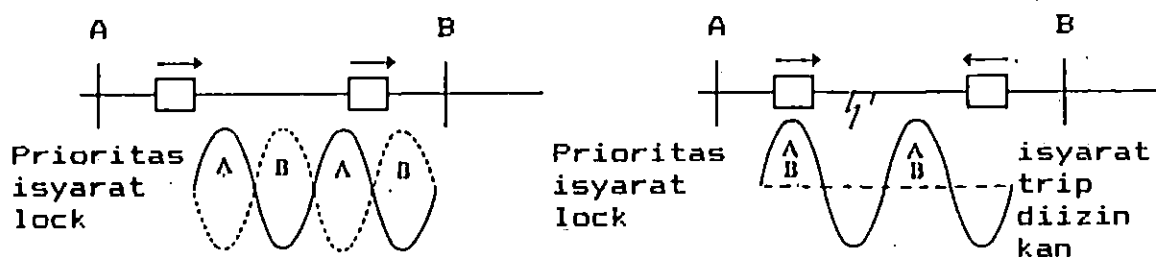
Gambar 46. Prinsip Perbandingan Arah pada Sistem Rele Carrier

A.Arismunandar (1980:86)

Bila terjadi hubung singkat pada saluran tetangga (gambar 45 di atas), sebuah isyarat pilot dikirimkan dari terminal di mana arus hubung singkat keluar dari saluran yang dilindungi, yakni arah tidak-jatuh (non-tripping). Dengan pengiriman isyarat pilot ini maka pemutusan dicegah pada ujung yang lain.

Jika terjadi hubung singkat pada saluran yang dilindungi (gambar 46 bagian bawah), tidak ada isyarat pilot yang dikirimkan sehingga pemutusan pemutus beban terjadi pada kedua ujung di tempat arus hubung singkat mengalir. Rele yang dipakai untuk arah arus hubung singkat adalah rele arah atau rele MHO.

singkat mengalir. Rele yang dipakai untuk arah arus hubung singkat adalah rele arah atau rele MHO.



Gambar 47. Prinsip Perbandingan Fase pada Sistem Rele Carrier

A. Arismunandar (1980:87)

Prinsip dari rele perbandingan-fase terlihat pada gambar 47. Di sini pilotnya dipakai untuk membandingkan hubungan fase antara arus yang memasuki satu terminal saluran dan yang meninggalkan saluran lainnya. Besarnya arus tidak dibandingkan.

Bila terjadi hubung singkat di luar seksi yang dilindungi selalu ada isyarat yang dikirimkan dari gardu A dan B, karena ada perbedaan fase antara kedua ujung sebesar 180° . Dengan demikian maka pemutusan pemutus beban dicegah (locking). Sebaliknya untuk hubung singkat di dalam saluran yang dilindungi, arah arus pada gardu B berubah sehingga gelombang isyarat dari A dan B berimpit. Dengan demikian maka selama setengah gelombang dikirim isyarat pencegah (lock) dan selama setengah gelombang berikutnya dikirim isyarat pemutusan dari satu gardu. Bila selama setengah gelombang terakhir ini tidak diterima isyarat dari ujung saluran yang lain terjadilah pemutusan pemutus beban.

Seperti terlihat pada gambar 48 (a) dan 48 (b) sistem *transferred tripping* melepaskan pemutus beban pada ujung sendiri bila melihat hubung singkat pada saluran yang dilindungi, serta melepaskan pemutus beban pada ujung lainnya dengan mengirimkan isyarat pembukaan pindah.

Dari ketiga sistem di atas cara *perbandingan arah* paling banyak diterapkan. Sistem perbandingan fase mempunyai keuntungannya sendiri, tetapi memerlukan *signal band* yang lebar karena untuk sistem ini diperlukan transmisi isyarat dengan kecepatan tinggi. Sistem *transferred tripping* atau *remote tripping* digunakan bila hubung singkat di daerah yang dilindungi dapat dilihat dari kedua ujung saluran.

Kecuali dalam penggunaan arus urutan nol untuk menjatuhkan rele, sistem pengaman terhadap hubung singkat ke tanah sama saja dengan sistem pengamanan hubung singkat seperti diuraikan di atas. Untuk hubung singkat multi fase dikenal dua macam sistem pengaman.

- (1). Sistem pembukaan prioritas, disini penutupan kembali (*reclosing*) pemutus beban adalah untuk tiga fase (sesudah pembukaan tiga fase). Sistem ini digunakan untuk pengetanahan tidak efektif. Sistem rele yang digunakan untuk melihat adanya hubung singkat adalah rele jenis fase maju (*advance-phase*), jenis rangkaian, dan jenis hubung singkat yang gawat (*severe fault*).

(2). Sistem pembukaan fase terkena hubung singkat. Di sini penutupan kembali pemutus beban dilakukan hanya sesudah membuka fase-fase yang terkena hubung singkat saja. Sistem ini dipakai pada pengetanahan langsung untuk saluran-saluran ganda yang sejajar. Sistem relenya adalah dari jenis perbandingan arah setiap fase, jenis jarak banyak fase (poly phase distance) dan jenis jarak untuk hubung singkat ke tanah dengan kompensasi arus.

C. PENGAMAN MENURUT SISTEM SALURAN TRANSMISI

1. Saluran Radial

Pengaman untuk saluran radial dapat dilakukan dengan rele arus-lebih atau rele jarak. Untuk rele arus-lebih karakteristik terbalik (inverse) dapat dimanfaatkan karena arus-hubung singkat berkurang bila jaraknya bertambah jauh dari sumber tenaga. Rele arus-lebih dibuat terarah (directional) untuk menyederhanakan persoalan mendapatkan selektivitas bila arus-hubung singkat kira-kira sama besarnya dari kedua jurusan dilihat dari tempat rele tersebut. Selektivitas itu tidak mungkin didapatkan bila rele arus-lebih akan membuka pemutus beban untuk hubung singkat dari mana saja arahnya. Pada umumnya karakteristik arah ini tidak diperlukan untuk saluran radial dengan satu sumber tenaga di satu ujung saja. Namun, penggunaan rele dengan karakteristik seperti ini direkomendasikan untuk menampung perubahan pada jaringan dikemudian hari.

Bila ada sumber tenaga pada kedua ujung saluran, maka yang dipakai haruslah rele arah atau rele jarak-arah, karena arah arus hubung-singkat di gardu tengah berubah dengan berubahnya letak hubung singkat itu.

Untuk saluran-saluran yang penting lebih baik dipakai rele pilot karena memungkinkan pembukaan pemutus beban dengan cepat dan agar letak hubung singkat lebih mudah dilihat.

2. Saluran Tertutup

Bila sumber tenaga ada pada satu tempat dalam saluran tertutup, pengamanannya dapat dilakukan dengan rele arah. Rele ini bekerja bila ada arus hubung singkat yang arahnya keluar dari rel sumber tersebut.

Bila sumber tegangan lebih dari dua, maka pengamanannya itu perlu dilakukan oleh rele jarak-arah atau rele pilot.

3. Saluran Ganda Paralel dengan Dua Terminal

Untuk pengamanannya saluran ganda paralel, dipakai rele seimbang atau sistem rele pilot. Rele sistem seimbang dengan arus seimbang tidak dapat dipakai pada gardu beban karena tugasnya hanya mencari rangkaian yang terkena hubung singkat.

Dalam hal terakhir ini sistem yang lebih baik adalah sistem yang mampu melihat arus diferensial antara kedua rangkaian paralel tadi. Caranya adalah dengan menyilangkan hubungan transformator arus dari

kedua saluran, dan memasang kumparan arus sebuah rele arah secara diferensial di antara hubungan-hubungan transformator arus tadi. Bila arus dalam kedua saluran sama vektornya, tidak ada arus ke dalam rele arah, karena arusnya hanya berputar melalui transformator arus saja.

Karena terjadi suatu gangguan, arus pada satu saluran menjadi besar. Maka arus akan mengalir pada satu jurusan dalam rele arah tadi, yang kemudian membuka pemutus beban pada saluran yang arusnya lebih besar.

Sistem rele seimbang mempunyai kelemahan bahwa rele itu sukar mengetahui keadaan tak seimbang akibat hubung singkat yang letaknya jauh. Untuk mengatasi hal itu dipakailah rele pilot

4. Saluran Multi Terminal

Salah satu kesukaran pengamanan saluran berterminal banyak ialah sulit mencatat arus hubung singkatnya. Juga terjadi kemungkinan kesalahan pengukuran jarak oleh rele jarak. Untuk mengatasi kesulitan tersebut dapat ditempuh dengan cara:

a. Saluran diperlakukan seperti saluran paralel.

Bila salurannya dapat dianggap paralel, maka rele seimbang dapat dipakai, meskipun waktu untuk menghilangkan gangguan menjadi lebih lama. Bila terminal bertambah banyak, pemutusannya akan beruntun (*series tripping*). Karena pemutusan beruntun itu keseimbangan saluran tidak didapat.

Untuk mengatasinya diperlukan pemutusan secara bersamaan. Oleh sebab itu lebih baik digunakan sistem pilot perbandingan arah atau sistem pemutusan pindah (remote tripping).

b. Dihindarkan arus keluar dari rangkaian yang terhubung singkat

Untuk itu dipakai rele yang dapat melihat adanya hubung singkat di luar daerah yang menjadi lindungannya, kemudian membukanya dengan cepat. Dengan demikian arus yang mengalir keluar rangkaian saat terjadi hubung singkat dapat dihindari.

Kelemahannya adalah ada penundaan waktu menghilangkan gangguan. Oleh karena itu, bila diperlukan pembukaan rangkaian yang terganggu secara cepat, lebih tepat menggunakan rele pilot kawat atau pemutusan pindah (remote tripping).

5. Saluran Kabel

Pengamanan kabel (saluran bawah tanah) jauh lebih rumit bila dibandingkan dengan saluran udara. Pada kabel tanah sesudah terjadi hubung singkat, diikuti oleh keadaan transien, sehingga menimbulkan suatu komplikasi. Oleh karena itu untuk meniadakan gangguan dengan cepat, sistem yang dipakai haruslah sistem yang tidak menyebabkan kesalahan operasi akibat berubahnya bentuk arus dan tegangan hubung singkat pada keadaan transien. Juga, karena arus pemuat dan arus kompensasi reaktor berbeda pada kedua ujung saluran yang

dilindungi, maka kemungkinan operasi rele karena hubung singkat di luar daerah yang dilindungi harus benar-benar diperhitungkan. Untuk itu lebih cocok menggunakan rele pilot kawat.

6. Saluran dengan Kapasitor Seri

Bila saluran transmisi dengan kapasitor seri, menggunakan rele jarak, perubahan impedansi karena pelepasan muatan kapasitor (discharge) perlu diperhitungkan. Rele jarak yang digunakan tersebut harus dilengkapi dengan rele arah yaitu untuk melihat arah arus dalam daerah yang dilindungi.

D. PENGAMANAN MENURUT SISTEM PENTANAHAN

1. Sistem Tak Ditanahkan

Untuk sistem yang titik netralnya tidak ditanahkan, adanya arus hubung singkat harus dilihat dari arus pemuat urutan nol. Dengan menggunakan transformator arus urutan-nol, rele arah bekerja mendeteksi arus ubung singkat-tanah, terlebih jika arus pemuatnya cukup besar (beberapa Ampere).

Bila transformator arus tadi tidak digunakan maka rele arah hubung singkat-tanah tidak dapat melihat adanya gangguan dengan sempurna, kecuali bila arus pemuatnya sampai beberapa puluh amper. Bila arus pemuat tidak terlalu besar, dapat digunakan sistem rele deteksi denyut yang melihat fase dari denyut yang dibangkitkan.

Karena sukar mengetahui hubung singkat pada sistem yang tidak ditanahkan, dan bila dilihat dari segi penerapan rele, sistem lebih baik ditanahkan.

2. Sistem Pentanahan Dengan Tahanan

Rele deteksi hubung singkat-tanah yang digunakan untuk sistem ini adalah rele tegangan urutan nol, rele arus lebih tanah, dan rele arah tanah. Kedua rele terakhir ini harus mempunyai kepekaan yang tinggi dan harus dapat bekerja dengan daya (arus) yang rendah. Tahanan yang tinggi dan adanya tahanan titik hubung singkat membatasi besarnya arus hubung singkat.

Bila arus hubung singkat-tanah kecil, ketidakseimbang pada rangkaian sekunder dari transformator arus menyebabkan kesalahan bekerja rele. Oleh sebab itu ketidakseimbangan arus harus dihindarkan. Beberapa hal yang perlu diperhatikan adalah sebagai berikut:

a. Sebab-sebab terjadinya arus urutan nol yang semu.

Penyebab yang pertama adalah bahwa dalam rangkaian urutan nol dari transformator arus, ada arus beban yang mengalir karena tidak seragamnya karakteristik transformator arus setiap fase atau karena beban sekunder setiap fase tidak seimbang.

Penyebab yang kedua ialah karena pentransposisian rangkaian paralel tidak baik, sehingga arus yang mengalir dalam tiap fase tidak seimbang. Kondisi ini menimbulkan arus urutan nol semu. Kondisi seperti ini juga akan terjadi bila

salurannya pendek, karena impedansi saluran tiap fase berbeda.

Penyebab yang lain ialah karena kejenuhan inti besi transformator atau generator dan kapasitansi saluran yang tidak seimbang. Dengan demikian ada komponen arus dengan frekuensi dasar, komponen harmonik ke tiga, dan ke empat yang mengalir melalui tahanan pentanahan. Karena ada arus urutan nol semu disebabkan hal pertama dan ke dua tadi, dan karena besar arus urutan nol tersebut sebanding dengan arus yang mengalir dalam saluran transmisi, rele bekerja mengamankan hubung singkat walaupun berada di luar daerah/seksi lindungannya. Hal ini perlu diperhatikan dalam penerapan sistem pengaman yang yang lebih cocok.

b. Sistem rele pengaman.

Untuk menaikkan kepekaan rele dan mengurangi beban transformator arus, maka rele yang terbaik adalah rele-arah hubung-singkat-tanah. Apabila ada gardu yang tidak mempunyai tahanan pentanahan, perlu dipasang sistem penghilang hubung-singkat dengan deteksi tegangan urutan nol, karena arus hubung singkat tanah tidak ada.

Bila diinginkan pemutusan dengan cepat dan serentak, harus digunakan sistem rele pilot hubung singkat tanah.

3. Sistem Pentanahan Dengan Gulungan Petersen

Sistem ini baik sekali untuk menanggulangi hubung singkat satu fase ke tanah yang sifatnya sementara (tidak permanen), karena dapat mematikan busur api yang ditimbulkan oleh hubung singkat itu. Tetapi untuk hubung singkat yang tetap (permanen), sukar sekali melihat adanya arus urutan nol, karena arusnya kecil sekali. Walaupun demikian hubung singkat itu tidak dapat dibiarkan begitu saja, karena dapat mengganggu bagian-bagian sistem lainnya. Oleh sebab itu hubung singkat tersebut harus dicari dengan menggunakan rele hubung singkat-tanah.

Penerapannya dapat dilakukan dalam dua cara yaitu dengan cara penutupan terus-menerus (continuously closing) dan dengan cara hubung singkat.

Pada cara yang pertama, rangkaian tahanan yang dipasang paralel dengan gulungan Petersen ditutup terus untuk memungkinkan bekerjanya rele tanah. Rangkaian tahanan itu dibuka untuk hubung singkat satu fase, lalu ditutup lagi bila hubung singkat-tanah tidak hilang dalam waktu 3 sampai 10 detik.

Rangkaian itu harus segera diputuskan bila hubung singkat tersebut tidak dimatikan secara otomatis oleh gulungan Petersen. Untuk sistem pertama perlu dijaga agar rele tidak bekerja untuk hubung singkat yang bukan satu fase ke tanah. Oleh karena itu rele ini tidak boleh bekerja beberapa saat sesudah tegangan urutan nol tertentu, karena saluran transmisi tidak

boleh dibuka sebelum hubung singkat hilang.

Bila diinginkan penggunaan rele-tanah-arrah, maka karakteristik fase dari elemen arah itu tidak boleh dipengaruhi oleh komponen reaktif dari arus hubung singkat-tanah. Oleh karena itu lebih baik rele konduktansi.

4. Sistem Pentanahan Langsung (Efektif)

Karena arus hubung singkat dalam sistem ini relatif besar, maka arus hubung singkat itu harus segera dihilangkan, yaitu untuk mencegah kerusakan peralatan atau inteferensi elektromagnetis. Besarnya arus hubung singkat satu fase ke tanah dibatasi oleh impedansi saluran transmisi dan peralatan. Dalam penerapan rele pengaman terhadap hubung singkat-tanah untuk sistem pentanahan efektif perlu diperhatikan hal-hal berikut ini:

a. Rangkaian ganda paralel.

Perlu ditambahkan rangkaian kompensasi yaitu untuk menghindarkan kesalahan pengukuran jarak karena impedansi bersama urutan nol. Bila kedua ujung ditanahkan karena satu saluran tidak bekerja, penyetulan rele jarak perlu dirobah jika impedansi urutan nolnya turut berubah.

b. Hubung singkat dua fase.

Rele jarak yang terpasang pada fase yang mendahului (leading) harus mempunyai karakteristik kerja yang berbeda dari rele jarak fase yang lain. Rele ini berfungsi sebagai pengaman tahap pertama bagi daerah yang harus diamankannya

c. Penutupan kembali satu fase.

Penutupan kembali satu fase hanya dilakukan pada fase yang terkena hubung singkat ke tanah. Pembukaan pemutus beban oleh rele jarak karena adanya hubung singkat itu harus dicegah. Oleh karena itu perlu ditambahkan rangkaian prioritas terhadap hubung singkat-tanah. Untuk itu dapat digunakan rele tegangan kurang dan atau rele arus lebih hubung singkat-tanah yang dikombinasikan dengan operasi penghilangan arus hubung singkat.

d. Rele arus lebih hubung singkat-tanah

Rele arus lebih hubung singkat-tanah yang dipakai tidak boleh bekerja terhadap arus urutan nol yang ditimbulkan oleh arus-serbu magnetis dari transformator (magnetic inrush current). Oleh sebab itu rele hanya bekerja terhadap arus frekuensi dasar saja.

e. Pembukaan pemutus beban

Pembukaan pemutus beban karena bekerjanya rele-jarak hubung singkat-tanah harus dicegah. Oleh sebab itu rele tersebut harus digunakan bersama rele arus lebih hubung singkat-tanah.

Berhubung karena pertimbangan di atas, maka untuk memungkinkan menghilangkan hubung singkat dengan cepat, perlu dikombinasikan rele jarak hubung singkat-tanah, sistem perbandingan fase, dan sistem perbandingan arah.

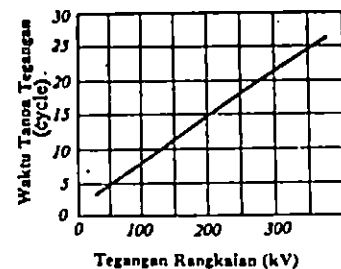
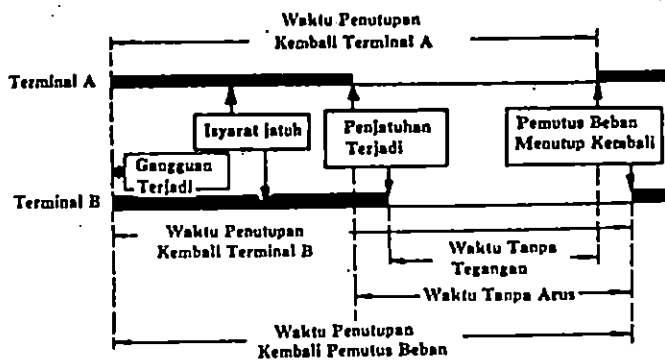
E. PENUTUPAN KEMBALI

Bila gangguan pada saluran transmisi dapat dihilangkan dalam waktu yang singkat, maka kerusakan pada saluran dan isolator dapat dikurangi. Seringkali saluran dapat dipakai kembali tanpa menimbulkan bahaya apapun. Oleh karena itu, bila pemutus beban yang dibuka waktu terjadi gangguan dapat ditutup kembali secara otomatis sesudah dalam waktu tertentu, maka stabilitas dan keandalan sistem dapat dipertahankan. Proses ini disebut *penutupan kembali pemutus beban (reclosing)*.

Dalam hubungan penutupan kembali sebagaimana diterangkan di atas, akan lebih jelas bila difahami beberapa definisi yang diterangkan dengan gambar 48(a) dan gambar 48(b) sebagai berikut:

1. Waktu penutupan kembali adalah waktu antara terjadinya gangguan sampai menutupnya kembali pemutus beban, termasuk waktu tanpa tegangan, dan waktu tanpa arus.

2. Waktu tanpa tegangan adalah waktu saluran yang dilindungi terputus dari semua sumber tenaga. Dalam hal ini kecepatan penutupan kembali pemutus beban perlu diketahui agar busur api pada saluran dapat dibasmi. Contoh waktu tanpa tegangan diperlihatkan pada gambar 48 (b).
3. Waktu tanpa arus, adalah waktu antara pembukaan pemutus beban pada satu terminal saluran dan penutupan pemutus beban pada semua saluran dalam daerah yang dilindungi. Bila terminal banyak, waktu yang dimaksud adalah waktu sampai arus beban mengalir kembali bila gardu utama ditutup kembali.



Gbr 48(a). Diagram urutan waktu penutupan kembali pemutus beban.

Gbr 48(b). Contoh waktu tanpa tegangan minimum.

F. SISTEM PENUTUPAN KEMBALI

Beberapa jenis penutupan kembali yang dikenal adalah penutupan satu fase (hanya satu fase yang terkena gangguan, lalu fase yang terganggu dibuka, kemudian ditutup kembali). Penutupan tiga fase (untuk tiga fase satu rangkaian), dan fase banyak (hanya fase-fase yang terganggu saja dilepas, lalu ditutup kembali).

Mengenai waktu penutupan, ada penutupan cepat dan ada penutupan lambat. Penutupan cepat dimaksudkan agar dapat mempertahankan stabilitas sesudah terjadi gangguan. Penutupan lambat dimaksudkan untuk memungkinkan sistem kembali ke keadaan semula secara otomatis. Sistem yang dikenal adalah:

1. Sistem Penutupan Satu Fase.

Jika tenaga listrik dapat disalurkan oleh kedua fase yang sehat serta sinkronisasi dapat dipertahankan pada saat terjadi hubung singkat satu fase-tanah, maka penutupan kembali rangkaian dapat dilakukan dengan cepat. Untuk itu perlu sekali diperhatikan bahwa penutupan itu harus dilakukan secepat mungkin yaitu sesudah isolasinya kembali kepada keadaan semula.

Waktu tanpa tegangan untuk keadaan seperti ini semakin panjang. Apabila kembalinya isolasi ke keadaan semula relatif lama dibandingkan dengan penutupan tiga fase, tingkat tegangan rangkaian, panjang saluran, dan konstruksi saluran turut berpengaruh. Waktu tanpa tegangan tersebut berkisar antara 15 - 30 gelombang.

Dalam hal penutupan satu fase, operasi rele hubung singkat-tanah harus ditangani dengan hati-hati mengingat bahwa ada arus urutan nol yang mengalir dalam rangkaian sekunder transformator arus, ditimbulkan arus beban selama waktu tanpa tegangan.

2. Sistem Penutupan Tiga Fase.

Untuk rangkaian tiga fase, penutupan dilakukan sesudah pembukaan tiga fase tanpa memperhatikan fase mana yang terganggu. Waktu tanpa tegangan dapat dibuat lebih singkat dari penutupan satu fase. Pada penutupan tiga fase perlu diketahui apakah benar keadaan sinkron dapat dipertahankan waktu rangkaiannya dibuka.

Untuk rangkaian ganda paralel, penutupan tiga fase satu rangkaian biasanya dapat dilakukan bila keadaan sinkron dapat dipertahankan oleh rangkaian lainnya. Untuk mengetahuinya, dilakukan pengukuran arus pada rangkaian lainnya dengan menggunakan rele daya atau rele arus. Untuk membedakan arus beban dari arus pemuat dari saluran yang panjang, sebaiknya digunakan rele daya. Untuk rangkaian tertutup (loop), bagian rangkaian yang akan ditutup dilihat apakah sudah terhubung pada rangkaian tersebut atau belum.

Caranya adalah dengan pengiriman isyarat atau dengan deteksi perbedaan sudut fase. Dalam cara pertama isyarat dikirimkan untuk menyakinkan bahwa semua pemutus beban pada semua gardu benar-benar

tertutup. Isyaratnya dikirim melalui saluran pembawa daya atau pembawa gelombang mikro.

Pengukuran perbedaan fase dapat dilakukan dengan dua cara. Cara pertama dengan membandingkan perbedaan fase tegangan pada kedua terminal yang akan ditutup. Cara yang lain dengan meyakini keadaan sinkron pada terminal yang satu bila terminal lainnya ditutup lebih dahulu.

3. Sistem Penutupan Fase Banyak.

Yang ditutup kembali adalah saluran-saluran yang terganggu bila sekurang-kurangnya ada dua fase normal dalam rangkaian banyak yang sejajar. Oleh sebab itu perlu diketahui dengan pasti fase mana yang terganggu. Untuk itu perlu digunakan sistem perbandingan fase atau sistem rele pilot untuk hubung singkat banyak.

4. Sistem Penutupan Bertahap Dengan Pembukaan Menurut Skala Prioritas

Dalam sistem seperti ini pembukaan dan penutupan kembali disederhanakan yaitu dengan membuka dan menutup kembali saluran dengan hubung singkat fase banyak, baru kemudian yang lain. Sistem ini ada mudaratnya yaitu karena dibutuhkan waktu lama untuk meniadakan semua gangguan, karena hanya dipakai untuk saluran yang kurang penting.

5. Penutupan Tiga Fase Dipaksakan.

Dalam hal ini generator dipaksa untuk dihubungkan kembali pada suatu sistem tertentu, atau suatu sistem dipaksakan untuk dihubungkan dengan sistem yang lain. Untuk itu diperlukan pengetahuan yang mendalam tentang peralatan yang ada serta karakteristik sistem tenaga. Oleh karena itu sistem ini tidak diterapkan secara umum.

G. RELE PELEPAS SISTEM

Perluasan suatu sistem tenaga dengan cara menghubungkannya dengan sistem tenaga lain mempunyai dampak tertentu pula yaitu memperbesar kemungkinan terjadinya gangguan. Untuk menghindarkan atau mengurangi kemungkinan terjadinya gangguan itu perlu dicari titik keseimbangan antara permintaan dan penyediaan daya. Selain itu perlu pula dicari sistem rele pengaman yang memungkinkan pemutusan hubungan apabila terjadi gangguan. Beberapa diantara pelepas hubungan tersebut akan diuraikan di bawah ini.

1. Sistem Pelepas Hubung Singkat Tetap

Pada hubung singkat tetap, rele pengaman berfungsi memutuskan sistem tenaga bila penyebab hilangnya sinkronisasi sistem tidak dapat dihilangkan dalam batas waktu tertentu. Sistem yang dipakai adalah kombinasi antara rele jarak, rele tegangan kurang, dan rele waktu.

2. Sistem Pelepas Keadaan Tak Serempak

Cara ini membatasi keadaan tak serempak dengan melepaskan hubungan bila terjadi gangguan sistem. Sistem yang biasanya dipakai adalah kombinasi antara rele jarak kecepatan tinggi dan rele daya atau rele yang bekerja terhadap perubahan tegangan. Pengaman itu bekerja dengan melihat perubahan tempat kedudukan impedansi secara lambat bila keadaan tidak serempak, sedangkan perubahannya cepat sekali bila terjadi hubung singkat.

3. Sistem Pelepas Frekuensi Tak Normal

Alat pendeteksi frekuensi tak normal adalah rele frekuensi-waktu. Rele ini akan bekerja bila frekuensi tak normal (naik atau turun). Pengaman tersebut dipasang di tempat di mana tegangan fase tidak berubah walau terjadi perubahan beban.

BAB V

PERHITUNGAN PRAKTIS ARUS HUBUNNG SINGKAT

A. PENDAHULUAN

Dalam sistem tenaga listrik bagian yang paling sering terkena gangguan adalah kawat transmisi, bisa mencapai 70% sampai 80% dari seluruh gangguan. Hal ini disebabkan karena panjangnya kawat transmisi itu serta terbentang pada kondisi geografis yang berbeda-beda.

Gangguan yang sering terjadi berupa hubung singkat, disusul oleh gangguan ke tanah atau kawat yang putus. Besarnya arus hubung singkat itu tergantung dari jenis dan sifat gangguan hubung singkat itu sendiri, konfigurasi sistem, metode pengetanahan transformator, dan jarak gangguan dari unit pembangkit.

Perhitungan arus hubung singkat tersebut dapat dilakukan dengan dua metode. Bila sistem diasumsikan seimbang, dipergunakan metode fase per fase. Jika sistem tidak seimbang, dipakai metode komponen simetris. Kadang-kadang kedua metode tersebut dipadukan dan diintegrasikan dalam grafik. Kedua metode perhitungan ini haruslah mempertimbangkan:

1. Tujuan Perhitungan

- a. Menentukan kemampuan pemutus rangkaian menahan dan melewatkan arus.
- b. Menghitung arus kritis terbesar suatu instalasi.
- c. Menetapkan kemampuan kabel menahan panas akibat hubung singkat.
- d. Menetapkan stabilitas dinamik sistem.

2. Tipe Jaringan

Perhitungan bagi jaringan distribusi tegangan rendah lebih mudah dari pada tegangan tinggi apalagi jaringan tegangan ekstra tinggi.

3. Tipe Gangguan

Gangguan 3 fase dapat mengakibatkan arus maksimum. Perhitungan gangguan satu fase-tanah dan dua fase-tanah penting sekali yaitu untuk menetapkan setting rele pengaman. Nilai maksimum dan minimum arus gangguan tersebut perlu juga diketahui.

4. Tingkat Keakuratan

Data-data akurat tentang parameter-parameter rangkaian sangat diperlukan sehingga perhitungan yang berkaitan dengan hal-hal di bawah ini dapat dilakukan dengan cepat.

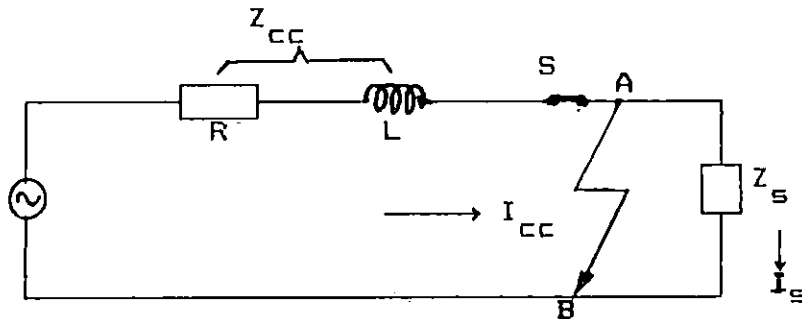
- a. Perhitungan arus maksimum gangguan tiga fase seimbang.
- b. Dengan tingkat akurasi antara 5 sampai 15%.
- c. Untuk menetapkan kemampuan pemutus.
- d. Jaringan tegangan tinggi dan tegangan rendah untuk industri dan komersial atau instalasi pedesaan.

Hal lain yang perlu diperhatikan adalah:

- a. Jika jaringan sangat komplek, gunakan program komputer.
- b. Jika gangguan-tanah tak simetris gunakan analisis komponen simetris.
- c. Untuk memudahkan perhitungan pada tegangan rendah, gunakan nilai arus ganggu jaringan melalui sebuah transformator 630 kVA.

B. MENGATASI ARUS HUBUNG SINGKAT

Suatu jaringan tenaga listrik sederhana terdiri dari sebuah generator satu fase dengan dua buah impedansi. Z_{CC} menyatakan impedansi jaringan, sedangkan Z_S menyatakan impedansi beban seperti diperlihatkan pada gambar 49 di bawah ini.



Gambar 49. Sistem jaringan sederhana

Lythaaal (1990:2)

Bila saklar (S) dalam keadaan tertutup, arus beban I_S bersirkulasi pada rangkaian. Bila terjadi gangguan antara titik A dan B akan timbul arus hubung singkat I_{CC} . Arus hubung singkat tersebut cukup besar dan hanya dibatasi oleh impedansi Z_{CC} .

Arus I_{CC} menyebabkan transien, tergantung dari nilai impedansi Z_{CC} yang terdiri dari reaktansi X dan resistansi R .

$$Z_{CC} = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Dalam keadaan hubung singkat, reaktansi $X = \omega L$, umumnya jauh lebih penting dari pada resistansi R . Perbandingan antara R/X terletak antara 0,15 sampai 0,30. Nilai faktor kerja ($\cos \varphi$) dapat dihitung dengan rumus berikut ini.

$$\cos \varphi = \left[\frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \right]$$

Tegangan transien yang timbul sesudah terjadi hubung singkat dapat diredam dengan kapasitor yang dipasang paralel dengan jaringan, sedangkan nilai arus hubung singkatnya tidak berkurang.

Periode transien yang diakibatkan oleh arus hubung singkat sangatlah bervariasi, tergantung dari pada lokasi gangguan (jauh atau dekat dari generator). Semakin dekat gangguan ke generator semakin banyak periode transien tersebut, sebaliknya semakin jauh gangguan dari generator periode transien semakin kecil.

Kedua jenis gangguan di atas akan dianalisa dengan pendekatan seperti di bawah ini.

1. Gangguan Berada Jauh dari Generator

Gangguan yang berada jauh dari generator sangat sering ditemui pada jaringan sistem tenaga listrik. Apabila hal ini terjadi, berarti impedansi generator jauh lebih kecil dari pada impedansi antara generator dan titik gangguan. Terjadinya transien adalah akibat dari penggunaan tegangan $e = E \sin (\omega t + \varphi)$ terhadap rangkaian induktansi-resistansi.

a. Komponen bolak-balik sinusoidal i_a

$$i_a = I \sin (\omega t + \varphi)$$

I adalah arus maksimum. $I = \frac{E}{Z}$

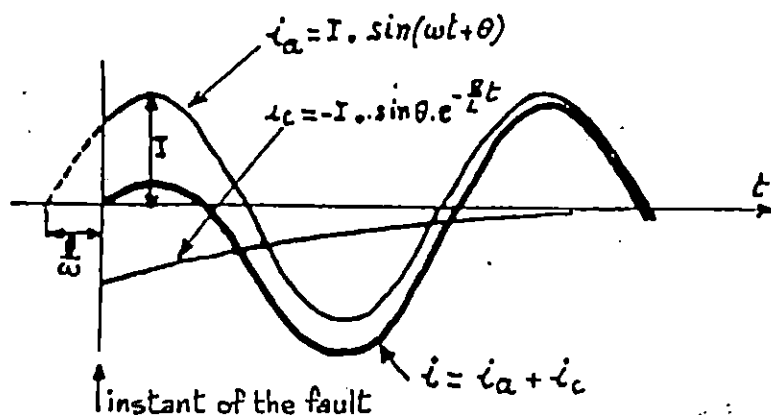
φ adalah sudut fase yang bersifat tertinggal sebesar $\frac{\varphi}{\omega}$ dari tegangan murni sesaat.

b. Komponen arus searah i_c

$$i_c = -I \sin \varphi e^{-\frac{R}{L} t}$$

Harga mula-mulanya tergantung dari besar sudut φ . Seberapa jauh arus komponen ini tertinggal, tergantung dari perbandingan R/L . Lebih tinggi perbandingan L/R lebih besar tertinggalnya.

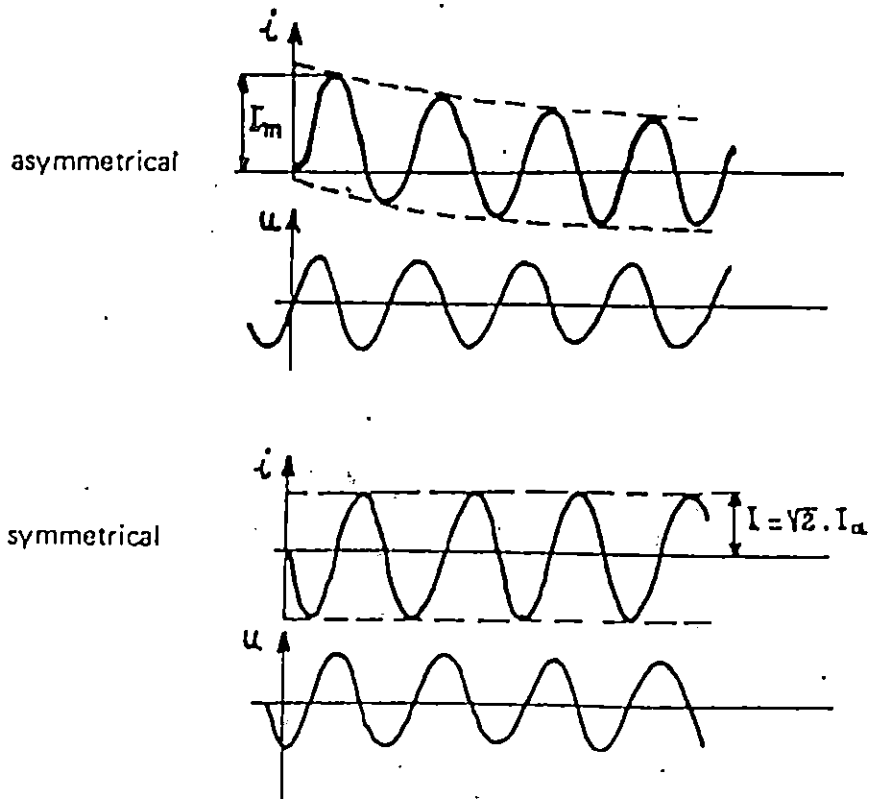
Pada waktu terjadi hubung singkat, arus i adalah nol (arus beban I_s diabaikan), sehingga: $i = i_a + i_c = 0$. Gambar 50 di bawah ini memperlihatkan grafik arus i . Arus ini merupakan jumlah aljabar dari i_a dan i_c .



Gambar 50. Grafik arus
LythaaI (1990:4)

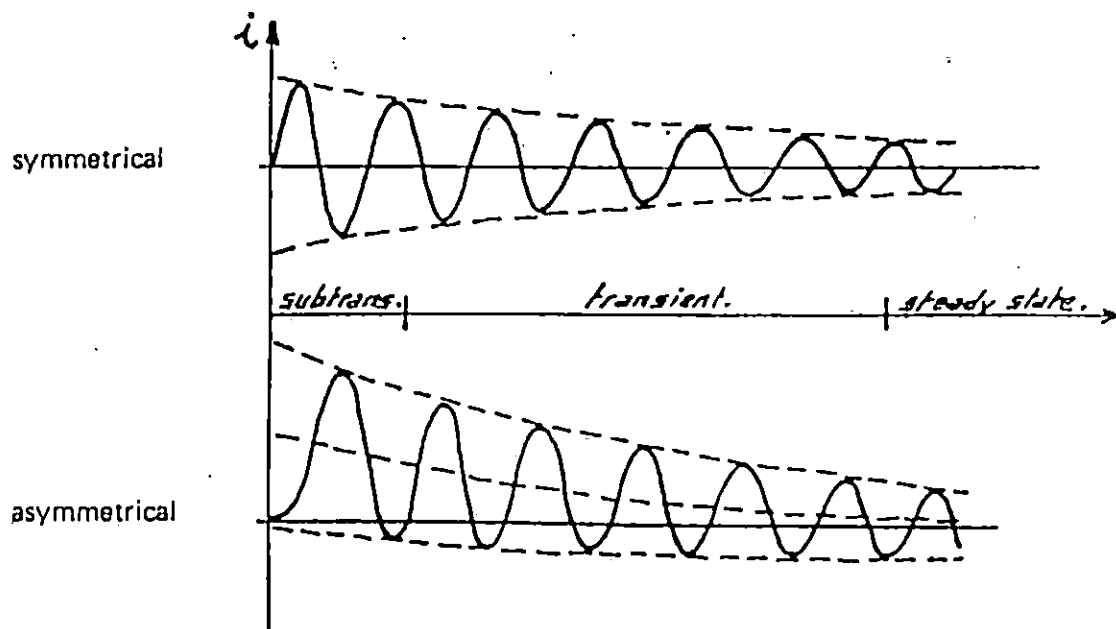
c. Komponen arus searah adalah maksimum, hubung singkat hanya terjadi pada waktu relatif singkat (instant). Apabila komponen arus bolak-balik I_s maksimum, gaya gerak listrik pada saat tersebut praktis menjadi nol ($\cos \varphi$ rendah).

- d. Komponen arus searah adalah nol. Nilai mula sesaat arus hubung singkat bersamaan waktunya dengan komponen arus bolak-balik. Pada saat tersebut gaya gerak listrik mencapai harga maksimum. Ini adalah keadaan simetris dari pada arus.



Gambar 51. Gangguan jauh dari generator

Lythaa1 (1990:5)



Gambar 52. Gangguan pada terminal generator
LythaaI (1990:5)

2. Arus Puncak Taksimetris Maksimum

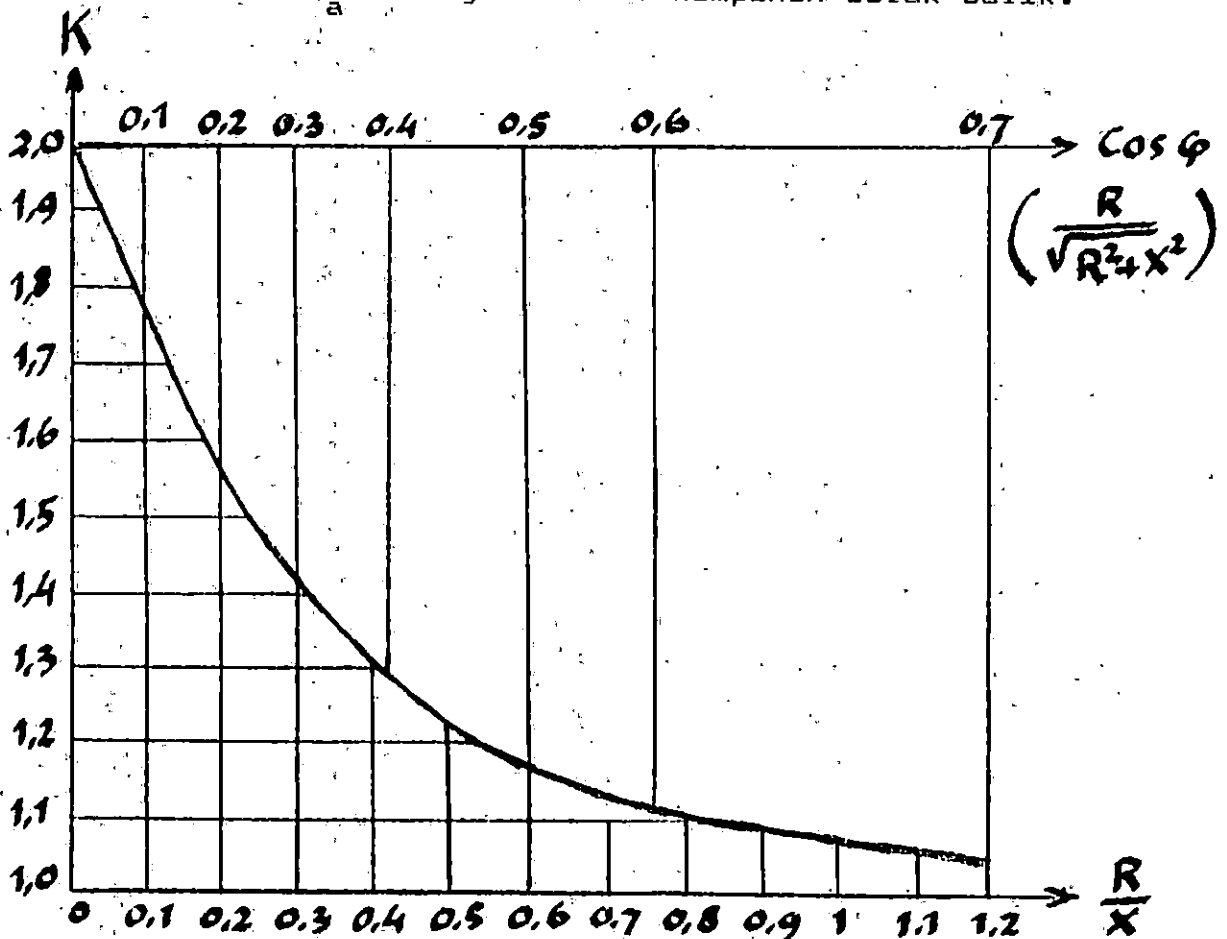
Puncak pertama arus taksimetris akan mencapai nilai maksimumnya apabila ketidaksimetrisan itu menyeluruh. Nilai I_m tergantung dari pada komponen DC. Semakin kecil nilai komponen DC lebih baik. Nilai puncak taksimetris tersebut berubah-ubah sesuai dengan perbandingan R/L .

Untuk menetapkan kapasitas kerja, nilai I_m dan tahanan elektrodinamik perlu dihitung. Tahanan elektrodinamik tersebut dapat diturunkan dari nilai efektif arus hubung singkat simetris I_a dengan menggunakan rumus berikut: $I_m = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_a$

Gambar 53 memperlihatkan nilai faktor K sebagai fungsi perbandingan R/X . Lebih mudah menghitung nilai k dari pada $\cos \varphi$ serta sangat erat hubungannya terhadap nilai rendah tersebut ($< 0,3$).

$$I_m = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_a$$

I_a = harga efektif komponen bolak-balik.



Gambar 53. Amplitudo maksimum arus puncak tak simetris
Lythall (1990:6)

3. Gangguan Pada Terminal Generator

Keadaan transient yang disebabkan oleh adanya arus hubung singkat menjadi sangat kompleks (rumit). Harga gaya gerak listriknya berubah-ubah. Demi penyederhanaan perhitungan, gaya gerak listrik dipandang konstan dan reaktansi internal dari mesin berubah. Reaktansi ini timbul dalam tiga step yaitu:

- a. Reaktansi subtransien timbul selama 1 sampai 200 detik, sesudah terjadinya gangguan.
- b. Reaktansi transien mencapai $1/10$ detik.
- c. Reaktansi mantap (steady state) atau sinkron yang timbul sesudah 0,3 sampai 0,5 detik.

Ke tiga reaktansi ini mempunyai nilai yang terus bertambah besar, lalu mengakibatkan penurunan arus hubung singkat secara progresif. Pada gambar 52 di atas dapat dilihat kondisi ekstrim yaitu simetris dan tak simetris.

Selanjutnya arus hubung singkat merupakan penjumlahan dari empat komponen yaitu; subtransien, transien, steady state, dan arus searah.

C. PERHITUNGAN ARUS-ARUS HUBUNG SINGKAT

Perhitungan ini berdasarkan prinsip berikut:

Arus gangguan ekuivalen dengan arus yang dikeluarkan oleh generator 1 fase, dan gaya gerak listriknya membaaur dengan tegangan nominal pada tempat terjadinya gangguan dalam satu impedansi ekuivalen. Impedansi ekuivalen jaringan itu memanjang di antara sumber dan titik gangguan.

Oleh karena itu dalam menghitung arus gangguan terlebih dahulu harus diketahui nilai-nilai impedansinya, yang dinyatakan dalam rangkaian ekuivalen.

1. Gangguan Tiga Fase Seimbang

Arus I_{CC} dinyatakan dalam nilai efektif simetris yaitu:

$$I_{CC} = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot Z_{CC}} ; \quad Z_{CC} = \sqrt{(\sum R^2) + (\sum X^2)}.$$

V = tegangan jaringan sistem 3 fase

Z_{CC} = impedansi total per fase.

Dalam keadaan hubung singkat nilai P_{CC} :

$$P_{CC} = V \cdot I_{CC} \cdot \sqrt{3} = \frac{V^2}{Z_{CC}}$$

Umumnya gangguan 3 fase mengakibatkan arus maksimum. Dalam hal tertentu, misalnya gangguan fase ke tanah pada terminal sebuah alternator atau transformator dengan hubungan bintang-zigzag, arus ganggu satu fase bisa lebih besar dari arus gangguan 3 fase. Hal ini akibat dari pada berkurangnya fase urutan nol.

2. Gangguan Fase-Fase

Nilai arus ganggu fase-fase lebih kecil dari arus ganggu 3 fase. $I_{CC2} = \frac{V}{Z_d + Z_1}$

Z_d dan Z_1 masing-masing merupakan impedansi urutan positif dan negatif dalam metode komponen simetris.

Untuk jaringan udara, transformator serta alternator bila dalam keadaan subtransien harga $Z_d = Z_1 = Z_{CC}$.

Arus ganggu $I_{CC2} = \frac{V}{2 Z_{CC}}$ dan harganya hanya mencapai $\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,86$ dari arus ganggu 3 fase.

Dalam keadaan hubung singkat, harga resistansi sering lebih kecil dibandingkan dengan harga reaktansi. Namun dengan memasukkan nilai resistansi tersebut dalam perhitungan akan membuat perhitungan tersebut menjadi akurat, sehingga tak boleh mengabaikan. Oleh sebab itu kita tidak hanya memasukkan reaktansi saja dalam perhitungan arus hubung singkat. Nilai resistansi tersebut sangat berguna untuk mendapatkan perbandingan R/X yaitu untuk menetapkan amplitudo arus maksimum puncak pertama.

1). Berdasarkan ketetapan bahwa impedansi terdiri dari reaktansi dan kapasitansi.

4. Penentuan Sistem Impedansi

c. Untuk alternator, Z_0 adalah 5 sampai 10% dari nilai impedansi transien, 7 sampai 15% pada steady state, sehingga jauh lebih kecil dari pada impedansi urutan positif.

$$Z_0 = Z_1 = Z_2.$$

a. Untuk jaringan udara dan kabel tanah $Z_0 = 3 Z_1 = 3 Z_2$.

b. Untuk transformator hubungan bintang-segitiga,

dipergunakan untuk perhitungan arus gangguan. Perhitungan sering berhubungan erat dengan pemilihan setting relé-relé. Nilai impedansi urutan nol dapat digunakan untuk perhitungan arus gangguan 3 fase.

Pada gangguan satu fase dan dua fase, impedansi urutan nol (Z_0) sangat menentukan nilai arus, kecuali jika

3. Gangguan Tanah Batu Fase dan Dua Fase

Pemasangan kapasitor secara paralel pada jaringan udara serta jaringan tanah tidaklah banyak membantu pengurangan arus gangguan, kecuali jika impedansi gangguan tanah besar.

2). Persamaan daya hubung singkat

$P_{cc} = \frac{V^2}{Z_{cc}}$ diperlukan berdasarkan definisi bahwa P_{cc} tidak berubah pada titik gangguan. Semua impedansi harus dikalkulasi. Oleh karena itu perhitungan gangguan pada sisi tegangan rendah transformator, impedansi jaringan tegangan tinggi harus dikalikan dengan kuadrat perbandingan transformasi transformator.

$$Z_{LV} = Z_{MV} \left(\frac{LV}{MV} \right)^2.$$

Semua impedansi harus dihitung dengan mengacu kepada tegangan ditempat terjadi gangguan. Dengan cara seperti ini masalah yang rumitpun dapat diatasi. Sumber kesalahan pada perhitungan hubung singkat ialah jika sistem terdiri dari dua tingkat tegangan atau lebih.

3). Metode impedansi relatif

Metode ini adalah didasarkan pada konvensi berikut:

Impedansi-impedansi dalam satuan Ohm dibagi oleh kuadrat tegangan l_{en} ke l_{en} jaringan pada titik dimana mereka dipergunakan. Impedansi seperti ini menjadi impedansi relatif.

- (a). Harga reaktansi dan resistansi relatif jaringan udara dan kabel adalah:

$$R_R = \frac{R \text{ (Ohm)}}{V^2} ; \quad X_R = \frac{X \text{ (Ohm)}}{V^2}$$

- (b). Untuk transformator, impedansi ditetapkan oleh tegangan impedansi e dan daya P_n .

$$Z = \frac{V^2}{P_n} \cdot \frac{e}{100} \quad \text{dengan} \quad Z_R = \frac{1}{P_n} \cdot \frac{e}{100}$$

- (c). Untuk mesin berputar, rumusnya identik, e menyatakan impedansi dalam %.

Sesudah ditemukan kombinasi semua impedansi relatif, daya hubung singkat dihitung dengan rumus:

$$P_{cc} = \frac{1}{\sum Z_R}$$

Bila tegangan adalah V , arus gangguan pada tempat terjadinya gangguan dapat dihitung, yaitu:

$$I_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \sum Z_R}$$

5. Kombinasi Impedansi

Untuk mengubah semua impedansi jaringan memanjang sampai ke titik gangguan menjadi sebuah impedansi ekuivalen, didapat dengan cara mengkombinasikan resistansi dan reaktansi secara terpisah menurut rumus klasik:

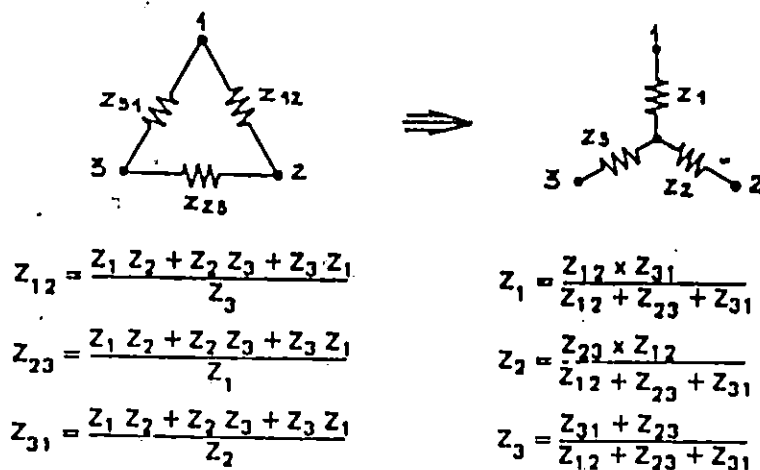
- 1). Jika hubungan seri, impedansi tersebut ditambahkan.

$$X = X_1 + X_2 + \dots \dots \dots X_n$$

- 2). Jika hubungan paralel, impedansi tersebut ditambahkan secara kebalikan.

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \dots + \frac{1}{X_n}$$

- 3). Apabila jaringan dalam bentuk ring, impedansi dalam bentuk konfigurasi delta ditransformasikan sebagai berikut:



D. HARGA IMPEDANSI ELEMEN-ELEMEN SISTEM

Untuk mempermudah perhitungan hubung singkat haruslah terlebih dahulu diketahui nilai-nilai numerik resistansi dan reaktansi semua elemen sistem. Jika beberapa diantaranya tidak diketahui, harga-harga yang tertulis di bawah ini serta yang disusun di annek 1 dapat diadaptasi.

1. Jaringan Memanjang

Pada kebanyakan perhitungan, jaringan yang termasuk menyalurkan energi tidaklah dipermasalahkan tetapi penggunaannya memperlihatkan daya hubung singkat pada jaringan (dalam MVA).

Impedansi ekivalen jaringan adalah:

$$Z = \frac{V^2}{P_{cc}} \quad (\text{Ohm, Volt, VA}).$$

Faktor kerja berada antara 0,15 sampai 0,20, sehingga harga Z hampir sama dengan X. Daya jaringan tegangan tinggi sampai 20 kV pada umumnya berada antara 250 MVA sampai 500 MVA. Pada tegangan 60 kV, harga P_{cc} mencapai 500 sampai 1000 MVA bahkan mencapai 1500 MVA atau lebih.

2. Generator Sinkron

Sebagaimana diketahui ada 3 macam hubung singkat sesuai dengan impedansi komponen 3 fase bolak-balik yaitu subtransien, transien, dan sinkron. Dalam prakteknya perhitungan arus dilaksanakan untuk satu kondisi atau lebih tergantung dari pada tujuan perhitungan yaitu:

- 1). Arus puncak, kemampuan sekering memutuskan arus serta kecepatan pemutus memutuskan tegangan rendah disebabkan keadaan subtransien (1 sampai 1/200 detik).
- 2). Periode transien (0,5 detik) adalah perlu diperhitungkan dalam rangka menetapkan kemampuan pemutus dari circuit pada kabel tanah.

- 3). Pada umumnya harga impedansi mesin-mesin dinyatakan dalam % seperti perbandingan arus hubung singkat I_{cc} terhadap arus nominal I_n .

$$\frac{I_{cc}}{I_n} = \frac{100}{e}$$

Impedansi Z dapat dianggap ekivalen dengan X . Faktor kerja sekitar 0,15. Harga reaktansi generator turbo berbeda dengan generator kutub menonjol (salient pole) kecepatan rendah. Harga e adalah sebagai berikut:

	subtransien	transien	mantap
Generator turbo.	10/20	15/25	150/230
Salient pole.	15/25	25/35	70/120

Berdasarkan data di atas ternyata harga reaktansi keadaan mantap (steady state) sangatlah mengejutkan karena melebihi 100%. Arus hubung singkat menjadi lebih kecil dari pada arus nominal. Namun pada dasarnya arus hubung singkat adalah reaktif.

3. Transformator

Impedansi dihitung berdasarkan tegangan-impedansi e dan dinyatakan dalam persen (%.)

$$Z = \frac{V^2}{P_n} \times \frac{e}{100}$$

Z dapat berbanding dengan X walaupun perbandingan R/X transformator cukup besar (untuk daya rendah).

Tegangan impedansi akan bertambah besar dengan tingkat tegangan primer sebagai berikut:

4% sampai 7% di atas 20 kV (standard nilai annek 1) dan 6 % sampai 12% untuk tegangan di atasnya.

Perlu direkomendasikan kepada para pembuat transformator agar menetapkan harga e sesuai dengan besar-kecilnya transformator, teristimewa bagi transformator khusus. Sebagai contoh, transformator penyearah yang kadang-kadang harga e mencapai 10% sampai 20%.

Transformator-transformator tiga belitan sebaiknya dipisahkan dengan hubungan bintang yang impedansi masing-masing cabang Z_1 , Z_2 , dan Z_3 dihitung dari impedansi Z_{12} , Z_{23} , dan Z_{31} . Impedansi itu diukur dengan cara memberi energi pada masing-masing belitan, belitan ke dua dihubungsingkatkan, sedangkan belitan ke tiga terbuka. Semua nilai impedansi didasarkan pada satu nilai tegangan.

$$Z_1 = \frac{Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}}{2}$$

Z_2 dan Z_3 diperoleh dengan cara mengubah urutan indeks.

4. Hantaran Udara

Reaktansi hantaran udara akan bertambah besar bila tegangannya semakin tinggi. Untuk tegangan tinggi dan rendah (MV dan LV), diperoleh harga $X = 0,3$ Ohm per km. Sedangkan untuk tegangan tinggi dan sangat tinggi (HV dan dan MV), diperoleh harga $X = 0,4$ Ohm per km.

5. Kawat Tanah

Reaktansi kawat tanah tergantung jenis isolasi dan jumlah intinya.

a. Untuk kabel tiga inti tegangan rendah (LV),

$$X = 0,08 \text{ Ohm/km.}$$

b. Untuk kabel tiga inti tegangan tinggi (MV),

$$X = 0,10 - 0,15 \text{ Ohm/km.}$$

c. Untuk kabel satu inti,

$$X = 0,1 - 0,2 \text{ Ohm/km}$$

Sedangkan kapasitansi kabel antara 10 sampai 20 kali lebih besar dari pada hantaran udara.

6. Busbar

Harga reaktansi busbar bervariasi antara 0,12 sampai 0,18 Ohm/km tergantung dari jarak. Untuk perhitungan, harga rata-ratanya dapat diambil sebesar 0,15 Ohm/km.

7. Motor sinkron dan Kondenser

Sifat atau tingkah laku motor sinkron dalam keadaan hubung singkat sama dengan generator. Motor tersebut menyuplai arus ke tempat gangguan. Besar arus tersebut tergantung dari persentase reaktansinya.

	subtransien	transien	sinkron
Motor kecepatan tinggi	15	25	80
Motor Kecepatan rendah	35	50	100
Kondenser sinkron	25	40	160

8. Motor Induksi

Apabila sebuah motor induksi tiba-tiba diputuskan dari sumber, pada terminal motor tersebut masih terdapat tegangan. Tegangan tersebut akan hilang dalam waktu sekitar $1/100$ detik.

Jika terjadi hubung singkat pada terminal, motor membantu arus memperburuk konstanta waktu yang nilai-nilainya mendekati:

- $1/100$ detik bagi motor induksi rotor sangkar tunggal yang berdaya di atas 100 kW.
- $2/100$ detik bagi motor induksi rotor sangkar ganda yang berdaya di atas 100 kW.
- $3/100$ sampai $5/100$ detik bagi motor induksi rotor lilitan yang berdaya besar, misalnya di atas 1000 kW.

Untuk perhitungan hubung singkat, motor induksi dapat diperlakukan sebagai generator. Kontribusi motor ini terhadap arus gangguan harus diperhitungkan

9. Kapasitor

Pemasangan kapasitor bank secara paralel di dekat titik gangguan akan menambah arus gangguan, karena kapasitor tersebut mengosongkan arusnya.

Dengan menganggap bahwa frekuensi osilasi pengosongan kapasitor jauh lebih besar dari pada frekuensi jala-jala, akan terjadi superposisi nilai puncak pertama arus hubung singkat.

Jika saat terjadi gangguan tegangannya nol, arus pengosongan kapasitor juga nol, sehingga arus hubung singkat berbentuk taksimetris. Puncak pertama ampli-

tudonya mencapai harga maksimum. Sebaliknya, jika pada saat terjadi gangguan tegangan bertepatan maksimum, arus pengosongan kapasitor berlawanan arah terhadap puncak pertama arus gangguan simetris yang mempunyai amplitudo kecil.

Tak dapat disangkal, bahwa kapasitor yang berkapasitas tinggi, superposisi yang dihasilkan arus puncak pertama lebih penting dari pada puncak pertama arus taksimetris. Oleh sebab itu kapasitor bank tidak mempengaruhi arus hubung singkat. Namun, kapasitor dapat memperkecil frekuensi natural rangkaian dan dapat mempengaruhi kapasitas pemutusan pemutus.

10. Impedansi

Jika reaktansi khusus dipergunakan untuk membatasi arus hubung singkat, impedansi tersebut perlu diperhatikan/dipertimbangkan dalam perhitungan arus gangguan. Elemen-elemen lain bisa ditambah tanpa mengabaikan impedansi, seperti gulungan primer transformator arus. $X = 0,01$ sampai 1×10^{-2} Ohm sesuai dengan kapasitasnya.

11. Pemutus (Switchgear)

Impedansi alat-alat pemutus seperti: circuit breaker, kontaktor magnetik, dan rele primer, baik tertulis maupun tidak tertulis pada peralatan tersebut, harus dimasukkan dalam perhitungan. Tetapi impedansi alat pemutus dengan pemutusan sesaat, misalnya circuit breaker tegangan rendah dan sekering, biasanya tidak dimasukkan dalam perhitungan.

Dalam prakteknya, impedansi yang dikandung peralatan tersebut termasuk dalam definisi breaking capacity. Ini menandakan *prospektif* arus akan bertambah besar jika peralatan pemutus tersebut dikurangi, tetapi bukan arus efektif saja yang berkurang oleh pengurangan impedansi tersebut, tetapi termasuk resistansi, induktansi dan lain sebagainya.

12. Gangguan Bunga Api (Arcing Fault)

Arus hubung singkat sering dialirkan melalui Arc yang harga resistansinya kecil serta sering berfluktuasi. Kerugian tegangan gangguan arcing bervariasi antara 100 sampai 300 Volt. Untuk tegangan menengah, rugi tegangan dapat diabaikan dan busur api tidak mengurangi arus hubung singkat. Sebaliknya pada tegangan rendah, rugi tegangan ini diperhatikan. Dalam prakteknya, perhitungan nilai arus ganggu I_a untuk tegangan 220 Volt sampai 380 Volt dapat dihitung dengan rumus:

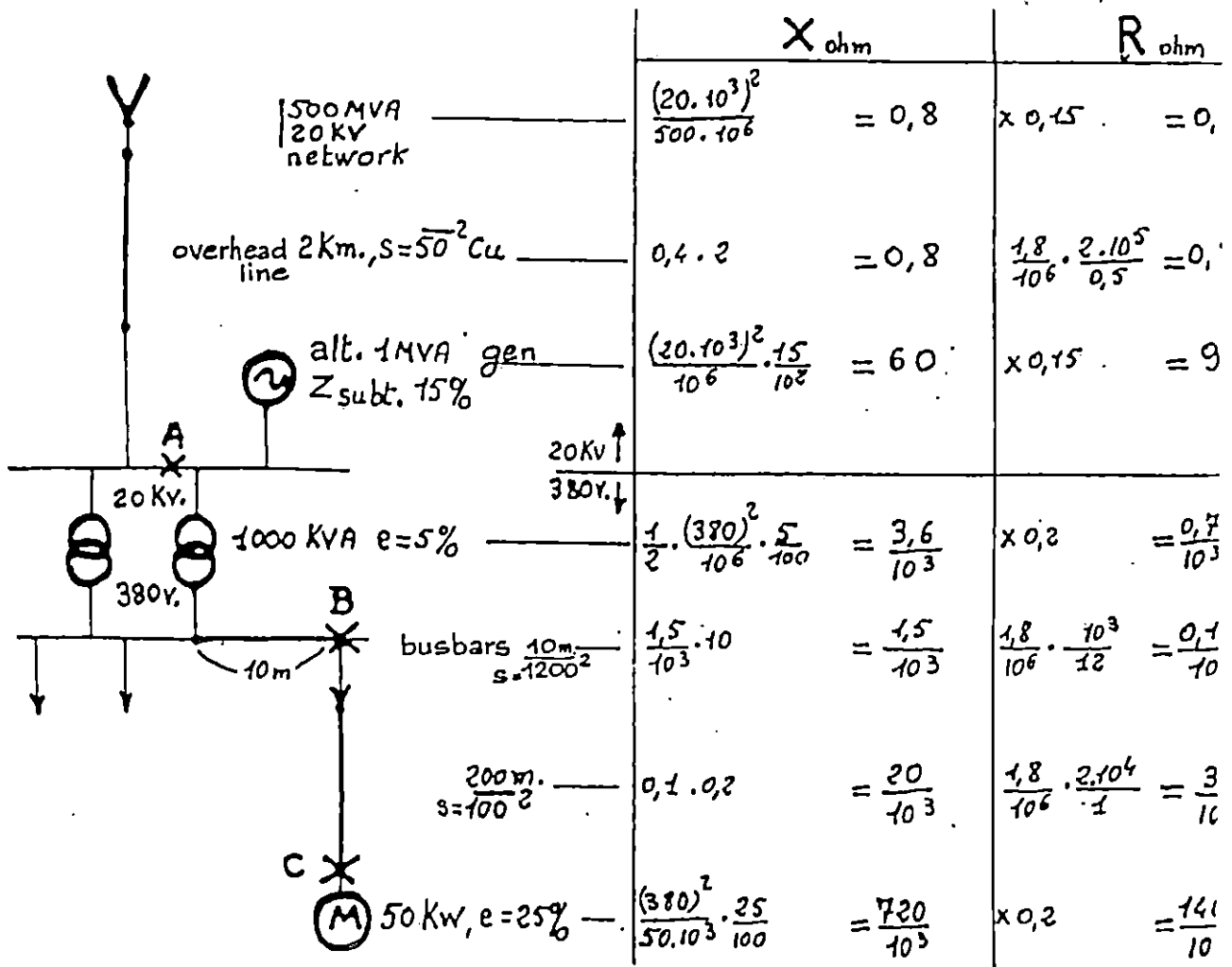
$$I_a = \frac{I_{cc}}{1,3 - 2} \text{ untuk tegangan 220 - 380 Volt.}$$

E. CONTOH PERHITUNGAN HUBUNG SINGKAT

Misalkan busbar tegangan rendah dan tegangan tinggi (LV/HV) gardu induk menerima tegangan suplai 20 kV dari jala-jala melalui jaringan udara sepanjang 2 km. Sebuah generator 1 MVA menyuplai busbar dalam paralel. Dua transformator 1000 kVA diparalel memberi daya ke busbar sisi tegangan rendah. Motor M sebanyak 20 buah dihubungkan

melalui kabel tanah sepanjang 200 m. Misalkan ke 20 motor tersebut dihubungkan melalui kabel yang identik dan sedang bekerja pada saat terjadi gangguan. Perhatikan gambar diagram. Hitunglah arus:

1. Pada titik A di sisi tegangan tinggi busbar (HV), abaikan impedansi.
2. Pada titik B di sisi tegangan rendah busbar (LV) pada jarak 100 m dari transformator.
3. Pada titik C di terminal motor (M).



Gambar diagram.

Dalam contoh ini, reaktansi dan resistansi dihitung berdasarkan tegangan instalasinya. Metode impedansi reaktif tidak dipergunakan.

1. Semua nilai X dan R dari elemen-elemen jaringan dilihat dari sisi diagram rangkaian. Resistansi efektif dihitung untuk jala-jala, busbar, kawat tanah, jaringan, generator, transformator yang dideduksi dari resistansi X dan perbandingan teoritis R/X.

2. Gangguan pada titik A (busbar tegangan tinggi).

Impedansi jaringan dan len adalah paralel dengan impedansi generator, tetapi apabila harganya sangat tinggi dapat diabaikan.

$$X_A = 0,8 + 0,8 = 1,6$$

$$R_A = 0,12 + 0,72 = 0,84$$

$$Z_A = \sqrt{X_A^2 + R_A^2} = 1,8 \Omega$$

Arus pada titik A: $I_A = \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \times 1,8} = 6415$ Amper, dibulatkan menjadi 6500 Amper.

Perbandingan R/X = 0,53. Dari gambar 43 didapat harga K = 1,21, maka arus puncak taksimeteris maksimum adalah:

$$1,21 \times \sqrt{2} \times 6500 = 11,122 \text{ kA.}$$

3. Gangguan pada titik B (Busbar tegangan rendah)

Harga X dan R pada tegangan 20 kV harus dikali dengan kuadrat perbandingan transformasi (C.2) ditambah ke X dan R dari perhitungan 380 Volt. Perbandingan ini adalah:

5. Arus yang Diserap oleh Motor-motor Tegangan Rendah
 Motor-motor sering dipandang sebagai generator bebas
 mempunyai *feedback current* terhadap gangguan yang berarah
 perposisi arus gangguan jala-jala.

4. Gangguan pada titik C (Pada terminal motor M).
 Impedansi kabel tanah ditambahkan ke Z_B .

$$X_C = X_B + 20 \times 10^{-3} = 25,676 \times 10^{-3}$$

$$R_C = R_B + 36 \times 10^{-3} = 37,15 \times 10^{-3}$$

$$Z_C = 45 \times 10^{-3} \text{ di mana } I_C = 4900 \text{ Amper.}$$

Perbandingan $R/X = 0,2$ yang menimbulkan arus puncak tak-
 simetris 82 kA. Apabila gangguan bunga api dimasukkan
 dalam perhitungan (D.12), I_B harus dibagi oleh (A.3)
 sampai (B) arus maksimumnya 29.000 Amper, dan nilai
 minimumnya 19.000 A.

$$R_B = (R_A \times 0,36 + 0,7 + 0,15) 10^{-3}, \text{ di mana:}$$

$$Z_B = 5,8 \times 10^{-3} \text{ dan } I_B = \frac{380 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 5,8} = 37826,4 \text{ A.}$$

Dapat dicatat kurang pentingnya reaktansi up-stream
 tegangan tinggi dibandingkan dengan impedansi kedua trafo
 paralel, atau dengan kata lain, busbar tegangan rendah
 yang panjangnya 10 m tidak diabaikan.

$$Z_B : X_B = (X_A \times 0,36 + 3,6 + 1,5) 10^{-3}$$

$$= 5,7 \times 10^{-3}$$

$$\left[\frac{380}{20000} \right]^2 = 0,36 \times 10^{-3}$$

Gangguan Pada Titik B

Arus yang diserap oleh motor dihitung dengan cara memasukkan impedansi dalam perhitungan motor tambah kabel.

$$X_M = (720 + 20) 10^{-3} = 740 \times 10^{-3}$$

$$R_M = (140 + 36) 10^{-3} = 176 \times 10^{-3}$$

$$Z_M = 760 \times 10^{-3} \text{ di mana } I_M = 290 \text{ Amper.}$$

Untuk 20 motor $I_{MB} = 5800$ Amper. Dengan perbandingan $R/X = 0,24$ menyebabkan arus puncak sebesar 12 kA.

Ternyata arus hubung singkat (transien) pada busbar tegangan rendah (LV) terus bertambah besar dari 37.826 Amper menjadi 43.800 Amper dan arus puncak dari 82 sampai 94 kA.

Untuk memudahkan perhitungan ini, satu hal yang mesti diestimasi bahwa arus yang diserap oleh motor-motor (D.8) adalah 3 kali arus ratingnya (95 Amper) yaitu $3 \times 95 \times 20 = 5700$ Ampere. Arus ini mendekati dengan $I_{MB} = 5800$ Amper.

Gangguan Pada Titik C

Impedansi yang dipandang adalah $1/19 \times Z_m$ ditambahkan ke impedansi kabel.

$$X_{MC} = \left(\frac{176}{19} + 20 \right) 10^{-3} = 58 \times 10^{-3}$$

$$R_{MC} = \left(\frac{176}{19} + 36 \right) 10^{-3} = 45 \times 10^{-3}$$

$$Z_{MC} = 73 \times 10^{-3} \text{ di mana } I_{MC} = 3000 \text{ Amper.}$$

Nilai relatif rendah ini menyebabkan arus total pada C menjadi $3000 + 4915 = 7915$ Amper.

Gangguan Pada Titik A.

Untuk memudahkan perhitungan impedansi ekivalen, dapat diestimasi arus yang diserap motor pada titik A, dengan mengalikan arus yang didapat pada titik B oleh perbandingan transformasi $\frac{T_R}{T_T}$ yaitu:

$$5800 \times \frac{380}{20 \times 10^3} = 110,2 \text{ Amper.}$$

Arus ini bila dibandingkan dengan 6500 Amper yang dihitung pada bagian 2 di atas dapatlah diabaikan.

F. KESIMPULAN

a. Gangguan 3 fase:

$$I_{CC} = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot Z_{CC}} \quad \text{dengan} \quad Z_{CC} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \text{dan}$$

$$P_{CC} = V \cdot I_{CC} \cdot \sqrt{3} = \frac{V^2}{Z_{CC}}$$

b. Impedansi Relatif

$$Z_r = \frac{Z_{CC}}{V^2} \quad P_{CC} = \frac{1}{Z}$$

c. Jaringan Panjang

$$Z = \frac{V^2}{P_{CC}} \quad ; \quad \frac{R}{X} = \pm 0,15$$

d. Generator Sinkron

$$Z = \frac{V^2}{P_n} \times \frac{e}{100} \quad \frac{R}{X} = \pm 0,15$$

e	subtransien	transien	sinkron
Generator turbin	10-20	15-25	150-120
Generator salient pole	15-25	25-35	70-120

e. Transformator

$$Z = \frac{V^2}{P_n} \times \frac{e}{100} \quad \text{untuk trafo distribusi 20 kV/380 Volt.}$$

P kVA	2000	1600	1250	1000	800	630	400	315	200	100
e %	7	6	5,5	5	4,5	4	4	4	4	4
Xz m.Ω	5,4	5,9	6,8	7,7	8,6	9,9	15	19	30	58
Rm.m.Ω	0,9	1,1	1,5	1,9	2,5	2,6	4,6	6,4	11	28

f. Saluran udara

$$\text{LV/MV} \quad X = 0,3 \text{ Ohm/km}$$

$$\text{MV/HV} \quad X = 0,4 \text{ Ohm/km}$$

$$R = \rho \frac{1}{S} \quad \rho = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm } \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} \text{ (Cu)}$$

$$\rho = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm } \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} \text{ (Alu)}$$

$$\rho = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm } \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} \text{ (Almelec)}$$

g. Kabel tanah

Tiga inti X = 0,08 Ohm/km pada LV ; 0,10 - 0,15 pada MV.

Satu inti X = 0,1 - 0,2 Ohm/km

h. Busbar

$$X = 0,15 \text{ Ohm/km}$$

i. Motor-motor Sinkron dan Kondenser

e	subtransien	transien	sinkron
Motor kecep. tinggi	15	25	80
Motor kecep. rendah	35	50	100
Kondenser sinkron	25	40	160

j. Motor Induksi

$$Z = \frac{V^2}{P_n} \times \frac{20 \text{ sd } 25}{100} \quad \text{hanya untuk subtransien}$$

k. Gangguan Bunga Api (Arcing fault)

$$I_d = \frac{I_{cc}}{1 \text{ s.d } 2}$$

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- A. Arimunandar, S. Kuwahara. (1973). Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid II, Tokyo: Japan.
- Baptinov, L. and Tarasov, V. Power Station and Substations, Moscow: Peace Publisher.
- Freeman, P.J. (1980). Transmission and Distributions, Second Edition, London: Billing and Sons Ltd.
- Hutauruk, T.S. (1987). Pengetanahan Netral Sistem Tenaga & Pengetanahan Netral, Jakarta: Erlangga.
- Lythaaal, R.T. (1990). Short Circuit Calculation for Unsymmetrical Faults, London: Newnes Butterworths.
- Marshal, J.L. (1973). Lightning Protections, New York: John Willey and Sons.
- Pabla, A.S. Alih Bahasa Abdul Hadi. (1986). Sistem Distribusi Daya Listrik, Jakarta: Erlangga.
- Perusahaan Umum Listrik Negara Wilayah III Sumbar-Riau. (1985). Relai, Bagian Operasi Pembangkitan.
- Reynaldo Zoro. Prinsip Pengukuran Dari Rele Elektro Mekanik dan Rele Statik, Diktat Kuliah, Bandung: ITB Bandung.
- Stubbing, G.W. (1964). Automatic Protections A.C Circuits, London: Chapman & Hall Ltd.
- Sirait, K.T. (1987). Proteksi Gangguan Arus Tak Normal Pada Sistem Energi Elektrik, Bandung: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Dan Pengukuran Listrik ITB Bandung.
- Sirait K.T. Pakpahan, Parouli.(1980). Proteksi Sistem Tenaga, Bagian I, Bandung: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Dan Pengukuran Listrik ITB Bandung.
- Stevenson, William D. (1982). Elements of Power System Analysis, 4 th Edition, Mc Graw Hill, Inc.
- Weedy, B.M. (1972). Electric Power Systems, Second Edition London: John Wiley & Sons.