

Diktat

PROTEKSI SISTEM TENAGA LISTRIK



Oleh:

Dr. Ramadoni Syahputra, S.T., M.T.

**PRODI TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA**

2022

KATA PENGANTAR

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Syukur alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat ALLAH SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan diktat kuliah Proteksi Sistem Tenaga Listrik. Penulisan buku ajar ini merupakan bagian dari kegiatan pembelajaran matakuliah Proteksi Sistem Tenaga Listrik. Dengan penulisan diktat kuliah ini diharapkan dapat membantu para pembaca khususnya mahasiswa jurusan Teknik Elektro untuk lebih mengenal dan memahami teori dan aplikasi proteksi dalam sistem tenaga listrik.

Penyelesaian diktat kuliah ini tidak lepas dari beberapa pihak yang telah banyak membantu. Oleh karena itu bersama ini penulis menyampaikan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Prof. Dr. Gunawan Budiyanto, MP., sebagai Rektor Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,
2. Ir. Aris Widyo Nugroho, M.T., Ph.D., sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta,
3. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, yang telah banyak membimbing dan membantu penulis dalam melaksanakan tugas yang diberikan kepada penulis,
4. Dik Indah Soesanti, S.T., M.T., yang telah banyak membantu dan memberikan masukan yang sangat berguna dalam penyelesaian diktat ini,
5. Ibunda dan ayahanda yang selalu mendoakan penulis,
6. Seluruh Dosen dan Karyawan Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, dan
7. Semua pihak yang telah membantu.

Penulis menyadari bahwa diktat kuliah ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu segala kritik dan saran yang bersifat membangun akan penulis terima dengan lapang dada.

Akhirnya, semoga diktat kuliah ini dapat bermanfaat dalam proses pembelajaran di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Yogyakarta, Maret 2022

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	.....	i
DAFTAR ISI	.....	ii
1. PENGANTAR SISTEM TENAGA LISTRIK	.....	1
1.1. Pendahuluan	.....	1
1.2. Komponen Sistem Tenaga Listrik	.....	1
2. PENDAHULUAN SISTEM PROTEKSI	.....	3
2.1. Umum	.....	3
2.2. Gangguan Dalam Sistem Tenaga Listrik	.....	3
2.3. Zona Proteksi	.....	5
2.4. Statistik Gangguan	.....	6
3. PRINSIP DAN KARAKTERISTIK OPERASI RELE	.....	8
3.1. Definisi Operasi	.....	8
3.2. Indikator Operasi	.....	8
3.3. Kumparan Seal-In, Kumparan Holding, Dan Rele Seal-In	.....	9
3.4. Tunda Waktu Dan Definisinya	.....	10
4. ARUS, TEGANGAN, ARAH, KESEIMBANGAN ARUS (ATAU TEGANGAN), DAN RELE DIFERENSIAL	.....	16
4.1. Umum	.....	16
4.2. Rating Kontinyu Dan Waktu-Singkat	.....	16
4.3. Rating Kontak	.....	16
4.4. Beban (<i>Burdens</i>)	.....	17
5. RELE JARAK	.....	25
5.1. Umum	.....	25
5.2. Rele Jarak Jenis Impedans	.....	25
5.3. Rele Jarak Jenis Reaktans	.....	30
5.4. Rele Jarak Jenis Mho	.....	32

6. PROTEKSI SALURAN TRANSMISI	33
6.1. Umum	33
6.2. Pengaruh Dari Metode Pengetanahan Netral Sistem Dan Konfigurasi Rangkaian Pada Skema Alat-Alat Proteksi.....	33
7. PROTEKSI TEGANGAN LEBIH	63
7.1. Umum	63
7.2 Parameter Petir Dan Saluran Transmisi	63
7.3. Sistem Perlindungan Terhadap Sambaran Petir Menggunakan Lightning Masts	66
7.4. Proteksi Tegangan Lebih Menggunakan Arester	68
8. ANALISIS GANGGUAN	71
8.1. Umum	71
8.2. Sistem Distribusi Tenaga Listrik	71
8.3. Gangguan Sistem Distribusi	72
DAFTAR PUSTAKA	75

1. PENGANTAR SISTEM TENAGA LISTRIK

1.1 PENDAHULUAN

Salah satu cara paling ekonomis, mudah dan aman untuk mengirimkan energi adalah melalui bentuk energi listrik. Energi listrik dapat secara kontinyu dikirimkan dari satu tempat ke tempat lain yang jaraknya berjauhan dalam suatu sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik merupakan kumpulan dari komponen-komponen atau alat-alat listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi, dan beban, yang dihubungkan dan membentuk suatu sistem.

Industri tenaga listrik telah dimulai sejak tahun 1882 ketika pusat pembangkit daya listrik pertama yang bernama Pearl Street Electric Station mulai beroperasi di kota New York, Amerika Serikat. Selanjutnya industri tenaga listrik sangat pesat perkembangannya, dan stasiun-stasiun pembangkitan dan jaringan transmisi dan distribusi telah bermunculan di berbagai negara.

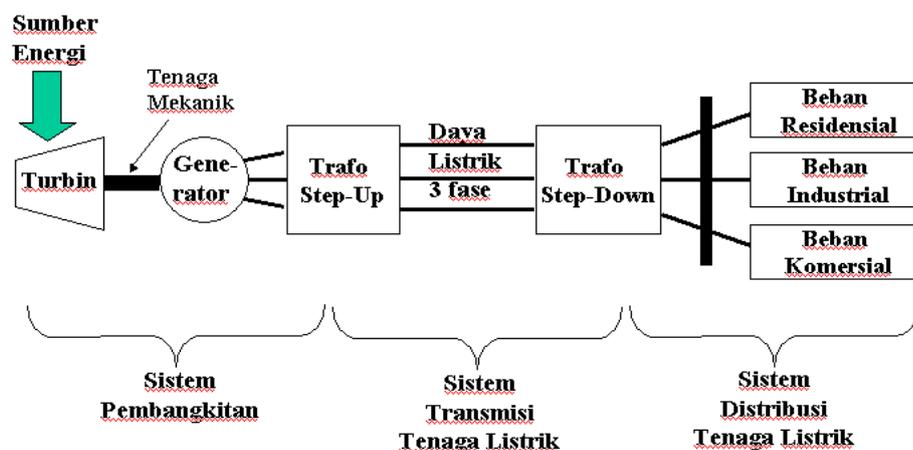
Energi listrik merupakan energi yang sangat bermanfaat. Tidak dapat dipungkiri lagi bahwa manusia dewasa ini sudah demikian besar tingkat ketergantungannya terhadap energi listrik. Sehingga energi listrik bagi kebutuhan hidup manusia dewasa ini sudah hampir "setara" dengan oksigen. Bahkan ukuran kemajuan suatu negara dapat diukur dari tingkat konsumsi energi listriknya. Sebagai contoh Amerika Serikat yang merupakan negara sebagai negara yang sangat maju pada tahun 2000 mempunyai kapasitas terpasang pembangkit listrik total sekitar 1200 GW atau $1,2 \times 10^{12}$ Watt. Dapat dibandingkan dengan negara kita tercinta, Indonesia, yang masih merupakan negara berkembang pada akhir tahun 2004 untuk sistem Jawa-Bali mempunyai kapasitas terpasang pembangkit listrik sekitar 20 GW. Konsumen listrik di Indonesia sebagian besar berada di Jawa-Bali, sehingga sebagian besar pembangkit listriknya terpusat di pulau Jawa dan Bali.

1.2 KOMPONEN SISTEM TENAGA LISTRIK

Secara umum definisi sistem tenaga listrik meliputi sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi, yang secara garis besar ditunjukkan pada gambar 1.1. Belakangan ini sistem distribusi jika dilihat dari skala nasional, diperkirakan sama dengan biaya investasi fasilitas pembangkitan. Sistem distribusi bersama-sama dengan sistem pembangkitan berdasarkan pengalaman biasanya menelan biaya investasi hingga 80% dari total investasi yang dikeluarkan untuk sistem tenaga listrik.

Siklus aliran energi listrik pada sistem tenaga listrik dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada pusat pembangkit, sumber daya energi primer seperti bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batubara), hidro, panas bumi, dan nuklir diubah menjadi energi

listrik. Generator sinkron mengubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik tiga fasa. Melalui transformator *step-up*, energi listrik ini kemudian dikirimkan melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban.



Gambar 1.1. Komponen utama sistem tenaga listrik.

Peningkatan tegangan dimaksudkan untuk mengurangi jumlah arus yang mengalir pada saluran transmisi. Dengan demikian saluran transmisi bertegangan tinggi akan membawa aliran arus yang rendah dan berarti mengurangi rugi panas (*heat loss*) I^2R yang menyertainya. Ketika saluran transmisi mencapai pusat beban, tegangan tersebut kembali diturunkan menjadi tegangan menengah melalui transformator *step-down*.

Di pusat-pusat beban yang terhubung dengan saluran distribusi, energi listrik ini diubah menjadi bentuk-bentuk energi terpakai lainnya seperti energi mekanis (motor), penerangan, pemanas, pendingin, dan sebagainya.

Latihan:

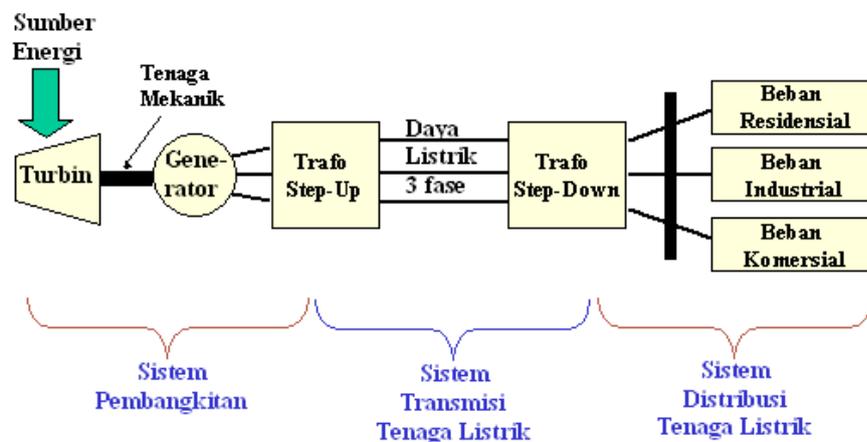
1. Gambarkan dan jelaskan komponen pokok sistem tenaga listrik serta jelaskan fungsinya masing-masing.
2. Jelaskan arti penting energi listrik bagi umat manusia dewasa ini.
3. Kemajuan suatu negara dapat diukur dari tingkat konsumsi energi listriknya. Analisislah apakah pernyataan tersebut dapat diterima. Buktikan dengan data-data tentang konsumsi energi listrik berbagai negara, baik negara maju maupun negara berkembang. Data-data dapat didapatkan dari berbagai sumber misalnya jurnal ilmiah, majalah, atau internet.

2. PENDAHULUAN SISTEM PROTEKSI

2.1 UMUM

Peran rele proteksi (*protective-relaying*) dalam perancangan dan operasi sistem tenaga listrik dapat dijelaskan dengan mempelajari latar belakangnya secara utuh.

Sistem tenaga listrik merupakan kumpulan dari komponen-komponen atau alat-alat listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi, dan beban, yang dihubung-hubungkan dan membentuk suatu sistem.



Gambar 2.1 Skema sistem tenaga listrik

Ada tiga aspek sistem tenaga listrik yang dapat dijadikan sebagai latar belakang diperlukannya rele proteksi (atau sistem proteksi). Ketiga aspek tersebut adalah:

1. Operasi normal
2. Pencegahan kegagalan elektrik
3. Mengurangi pengaruh kegagalan elektrik

Istilah “operasi normal” diasumsikan bahwa sistem beroperasi tanpa adanya kegagalan peralatan, kesalahan operator dalam mengoperasikan peralatan, dan lain-lain.

2.2 GANGGUAN DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK

Hubungan singkat (*short circuits*) dan kondisi abnormal lainnya sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Arus besar yang diakibatkan hubung singkat dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan jika rele proteksi dan pemutus tenaga (CB) tidak tersedia untuk proteksi tiap seksi sistem tenaga.

Hubung singkat (*short circuits*) biasanya dikatakan sebagai “gangguan” oleh para Engineer. Istilah “gangguan (*faults*)” dapat berarti “kerusakan (*defect*)”. Beberapa

“kerusakan”, selain hubung singkat, juga dikatakan sebagai gangguan, contohnya kegagalan konduksi suatu konduktor.

Jika sebuah gangguan terjadi pada komponen sistem tenaga, piranti proteksi yang bekerja otomatis dibutuhkan untuk mengisolasi elemen terganggu secepat mungkin, guna menjaga bagian sistem yang sehat dapat bekerja normal. Jika gangguan hubung singkat terjadi dalam waktu yang lama, maka dapat menyebabkan kerusakan terutama pada bagian-bagian penting sistem. Arus gangguan hubung singkat yang sangat besar dapat menyebabkan kebakaran.

Skema proteksi meliputi pemutus tenaga (circuit breakers, CB) dan rele proteksi (protective relays) untuk mengisolasi bagian sistem yang terganggu terhadap bagian yang sehat. CB dapat memutuskan hubungan elemen sistem terganggu dan tergantung pada kerja rele proteksi. Rele proteksi berfungsi mendeteksi dan melokalisir gangguan dan memerintahkan CB untuk memutuskan elemen terganggu.

Rele proteksi tidak mengantisipasi atau mencegah terjadinya gangguan, tetapi beroperasi hanya setelah gangguan terjadi. Biaya perlengkapan proteksi umumnya mencapai sekitar 5% dari total biaya sistem tenaga listrik. Sebagian besar gangguan pada saluran transmisi dan distribusi disebabkan oleh tegangan lebih karena petir atau surja hubung, atau karena gangguan eksternal berupa benda yang dapat menimpa saluran. Tegangan lebih karena petir atau surja hubung menyebabkan *flashover* pada permukaan isolator sehingga menyebabkan hubung singkat.

Jenis-jenis gangguan Yang terjadi dalam sistem tenaga listrik diantaranya sebagai berikut:

a. Gangguan Simetris,

yaitu gangguan hub singkat 3 fase, baik 3 fase ke tanah atau tanpa ke tanah.

b. Gangguan Taksimetris, yaitu terdiri dari

- gangguan satu fase ke tanah
- gangguan dua fase ke tanah
- gangguan fase ke fase
- gangguan hubung terbuka (*open circuited phases*)
- gangguan kumparan (*winding faults*)

Gangguan Simultan yaitu dua atau lebih gangguan yang terjadi secara simultan pada sistem tenaga listrik. Pada gangguan simultan, dapat terjadi jenis gangguan yang sama atau berbeda secara bersamaan.

Proteksi berdasarkan pengambilan besaran ukur

a. Proteksi primer

yaitu proteksi yang langsung mengolah besaran ukurnya.

b. Proteksi sekunder

yaitu proteksi yang tidak langsung mengolah besaran ukurnya.

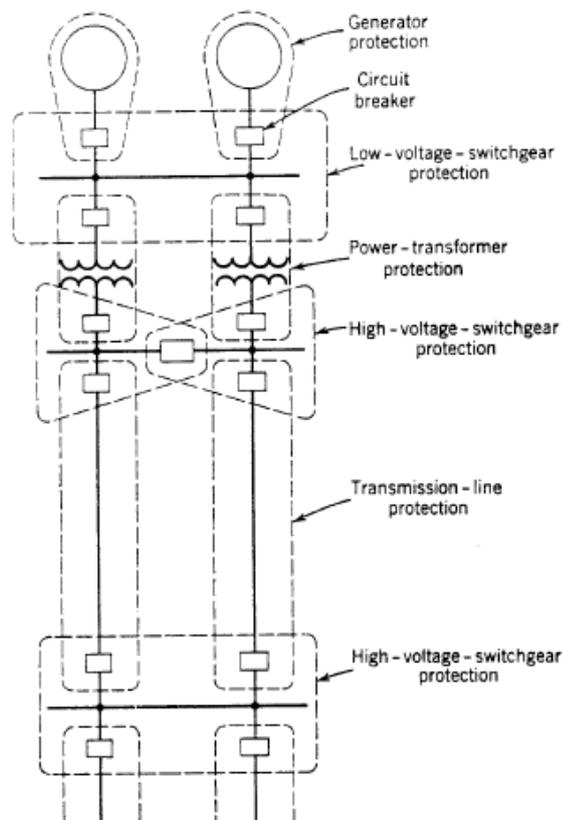
Suatu sistem proteksi harus memenuhi beberapa kriteria sebagai berikut:

1. Selectivity or discrimination
2. Reliability (keandalan)
3. Sensitivity (kepekaan)
4. Stability (kestabilan)
5. Fast Operation (kecepatan operasi)

2.3 ZONA PROTEKSI

Daerah pengamanan (zona proteksi) dalam sistem tenaga listrik meliputi:

- Generator
- Transformator Daya
- Bus bar
- Saluran Transmisi, subtransmisi, dan Distribusi.



Gambar 2.2 Zona proteksi sistem tenaga listrik

Jadi, sebuah sistem tenaga listrik dibagi ke dalam beberapa zona proteksi. Suatu zona proteksi meliputi satu atau dua elemen sistem tenaga. Zona proteksi dirancang agar elemen sistem tenaga yang berdekatan dapat terlindungi, sehingga tidak ada bagian yang terlewatkan.

2.4 STATISTIK GANGGUAN

Gangguan pada komponen sistem tenaga listrik berdasarkan pengalaman diberikan pada Tabel 2.1. Pada Tabel 2.2 ditunjukkan statistik gangguan hubung singkat pada saluran transmisi udara.

Tabel 2.1 Statistik gangguan pada komponen sistem tenaga.

Elemen	% Total Gangguan
Saluran udara	50
Kabel bawah tanah	9
Transformator	10
Generator	7
Switchgear	12
CT, PT, Rele, Perlengkapan kendali, dll	12

Tabel 2.2 Statistik gangguan hubung singkat pada saluran transmisi udara

Jenis gangguan	Simbol Gangguan	% Total Gangguan
Fase ke Tanah	L-G	85
Fase ke Fase	L-L	8
Dua Fase ke Tanah	2L-G	5
Tiga Fase	3- Φ	2

2.5 KLASIFIKASI RELE PROTEKSI

Rele proteksi berdasarkan teknologinya dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Rele elektromagnetik
2. Rele Statik
3. Rele Berbasis Mikroprosesor

Sedang klasifikasi rele proteksi berdasarkan fungsinya adalah:

1. Rele arus lebih (*overcurrent relays*)
2. Rele tegangan jatuh (*undervoltage relays*)

3. Rele impedansi (*impedance relays*)
4. Rele frekuensi jatuh (*underfrequency relays*)
5. Rele arah (*directional relays*),
6. dan lain-lain.

Skema proteksi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Proteksi arus lebih (*Overcurrent protection*)
2. Proteksi jarak (*Distance protection*)
3. Proteksi arus pembawa (*Carrier-current protection*)
4. Proteksi diferensial (*Differential protection*)

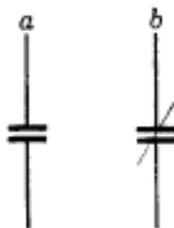
3. PRINSIP DAN KARAKTERISTIK OPERASI RELE

3.1 DEFINISI OPERASI

Gerakan mekanis dari mekanisme operasi suatu peralatan hubung adalah bagaimana membuatnya menjadi terhubung (*close*) atau terbuka (*open*). Bilamana dikatakan bahwa rele “beroperasi”, maka berarti bahwa rele akan terhubung atau terbuka, yang merupakan aksi yang diperlukan pada keadaan tertentu.

Sebagian besar rele mempunyai pegas kendali (*control spring*), atau dikendalikan oleh grafitasi sehingga dianggap posisi yang diberikan ketika diberikan energi kembali. Pada kondisi ini, sebuah kontak dikatakan “*closed*” jika kontak tersebut terhubung dan dikatakan terbuka “*open*” jika kontak tersebut terbuka. Istilah *closed* dan *open* merupakan istilah standar dalam bidang teknik.

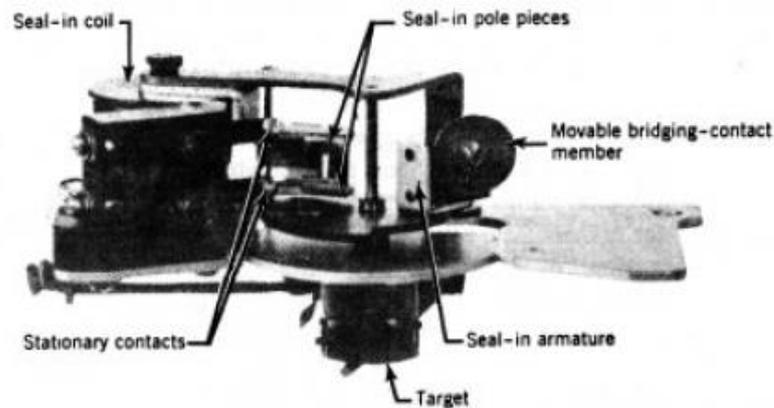
Standar istilah lain yang juga digunakan adalah penggunaan simbol “a” untuk kontak *open* dan simbol “b” untuk kontak *closed*. Dalam diktat ini banyak digunakan simbol a dan b tersebut, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Simbol dan penunjukan kontak

3.2 INDIKATOR OPERASI

Umumnya suatu rele proteksi disertai dengan suatu indikator yang menunjukkan bilamana rele beroperasi untuk mentriapkan pemutus tenaga (*circuit breaker*). Indikator operasi atau target seperti itu biasanya berupa elemen berwarna tertentu yang akan bergerak secara mekanik melalui gerakan mekanisme operasi rele atau secara elektrik melalui aliran arus kontak, dan terlihat ketika rele beroperasi. Indikator operasi terbut dapat direset secara manual setelah indikasinya tercatat, selanjutnya siap untuk operasi berikutnya. Salah satu tipe indikator ditunjukkan pada Gambar 3.2.

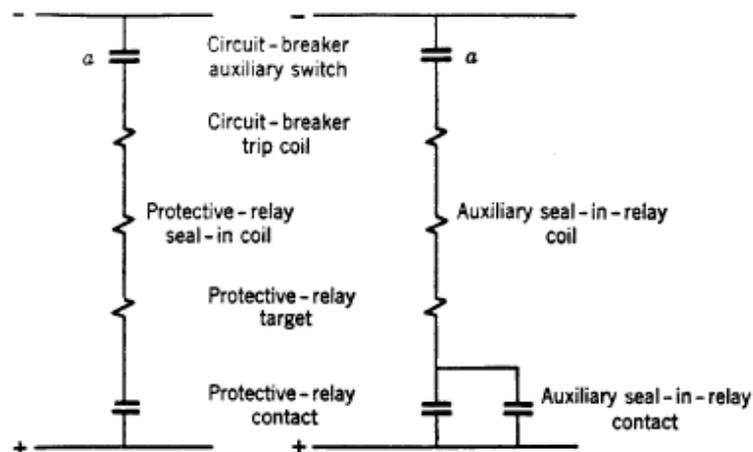


Gambar 3.2 Salah satu jenis mekanisme kontak

Indikator operasi umumnya beroperasi secara elektrik, karena lebih dapat dijamin bahwa bilamana dialiri arus maka kontak akan beraksi. Indikator operasi dengan cara mekanik biasanya digunakan penutupan kontak rele selalu melengkapi rangkaian trip dimana tripping tidak tergantung pada penutupan kontak yang lain. Suatu indikator mekanik biasanya digunakan dengan rangkaian seri yang terdiri dari kontak-kontak rele lain bilamana diperlukan untuk memberikan indikasi bahwa suatu rele beroperasi.

3.3 KUMPARAN SEAL-IN, KUMPARAN HOLDING, DAN RELE SEAL-IN

Guna melindungi kontak terhadap kerusakan yang disebabkan oleh kecerobohan dalam pengoperasian yang menyebabkan terganggunya aliran arus kumparan-trip rangkaian, maka beberapa rele dilengkapi dengan mekanisme *holding* yang terdiri dari sebuah kumparan kecil yang terhubung seri dengan kontak. Kumparan ini akan menimbulkan elektromagnetik kecil yang beraksi pada angker kecil pada kontak bergerak yang dipasang untuk menjaga agar kontak terhubung kuat pada saat terjadi aliran arus kumparan trip. Kumparan ini disebut kumparan "seal-in" atau "holding". Gambar 3.3 menunjukkan struktur kumparan "seal-in" atau "holding".



Gambar 3.3 Metode seal-in kontak alternatif

3.4 TUNDA WAKTU DAN DEFINISINYA

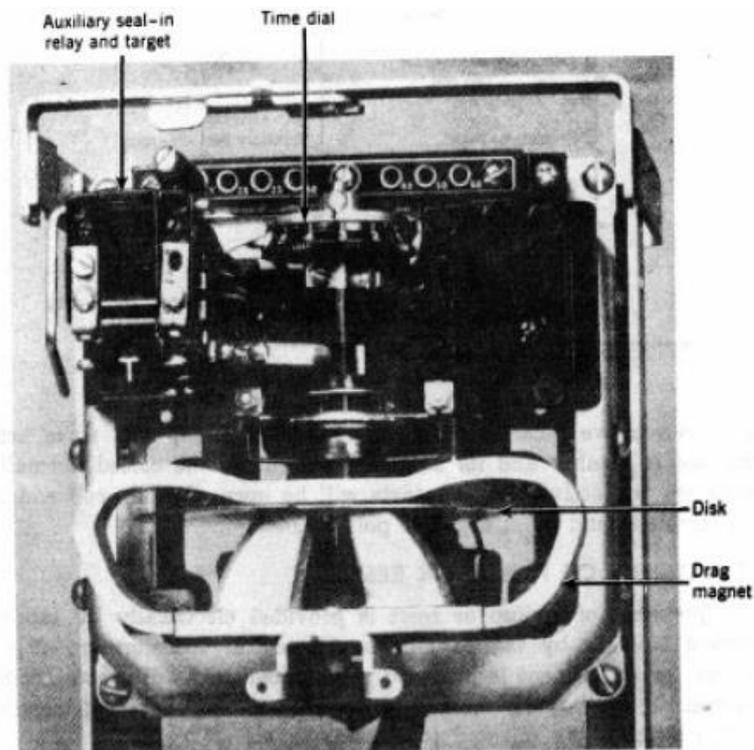
Beberapa rele mempunyai tunda waktu yang dapat diatur, sedang yang lain adalah "rele seketika (*instantaneous*)" atau "rele kecepatan tinggi (*high speed*)". Istilah "seketika (*instantaneous*)" berarti tanpa tunda waktu yang disengaja dan dioperasikan untuk rele-rele yang beroperasi pada waktu yang minimum sekitar 0,1 detik. Istilah "kecepatan tinggi (*high speed*)" mengandung arti bahwa rele beroperasi kurang dari 0,1 detik dan biasanya 0,05 detik atau kurang. Waktu operasi rele kecepatan tinggi biasanya dinyatakan dalam siklus berdasarkan frekuensi sistem tenaga, misalnya "satu siklus" adalah 1/60 detik dalam sistem frekuensi 60 Hz. Pada dasarnya hanya istilah "seketika (*instantaneous*)" yang digunakan, akan tetapi karena kecepatan rele semakin mengalami peningkatan, istilah "kecepatan tinggi (*high speed*)" dirasa penting untuk membedakan satu rele dengan rele lainnya yang lebih lambat.

Tunda waktu diperoleh pada rele tipe induksi dengan magnet pengerem (*drag magnet*) yang merupakan magnet permanen yang tersusun sehingga rotor rele memotong fluks antar kutub-kutub magnet, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4. Hal ini akan menyebabkan efek memperlambat pergerakan rotor pada salah satu arahnya. Pada rele lainnya, digunakan berbagai peranti mekanik misalnya *dash pots*, *bellows*, dan mekanisme pelepasan.

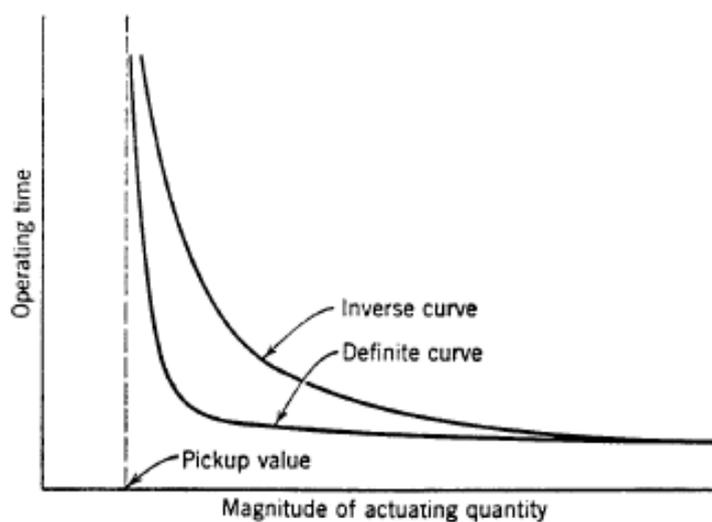
Terminologi untuk mengekspresikan bentuk kurva waktu operasi *versus* besaran pergerakan (*actuating quantity*) juga dipengaruhi oleh perkembangan rele dari tahun ke tahun.

Pada awalnya hanya digunakan istilah "waktu tertentu (*definite time*)" and "waktu kebalikan (*inverse time*)". Kurva waktu kebalikan (*inverse-time*) adalah waktu dimana waktu

operasi menjadi berkurang bilamana magnitudo pergerakannya bertambah, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.4 Rele arus-lebih tipe induksi, menunjukkan rotor cakran dan magnet pengerem.



Gambar 3.5 Kurva waktu operasi versus magnitudo besaran pergerakan

3.5 RELE BESARAN-TUNGGAL JENIS ATRAKSI-ELEKTROMAGNETIK

Dalam pembahasan ini maka akan dikemukakan rele jenis *plunger* dan rele jenis *attracted-armature* a-c atau d-c yang bergerak berdasarkan sumber arus listrik atau sumber tegangan listrik.

3.5.1 Prinsip Operasi

Gaya elektromagnetik diterapkan pada elemen bergerak sebanding dengan kuadrat fluks pada celah udara. Jika pengaruh penjenuhan diabaikan, maka total gaya pergerakan dapat dinyatakan sebagai

$$F = K_1 I^2 - K_2,$$

dengan, F = gaya netto.

K_1 = konstanta konversi gaya.

I = magnitudo arus rms dalam kumparan pergerakan.

K_2 = gaya lawan (misalnya gesekan).

Bilamana berada di ambang terbuka, gaya netto adalah nol, dan karakteristik operasinya adalah:

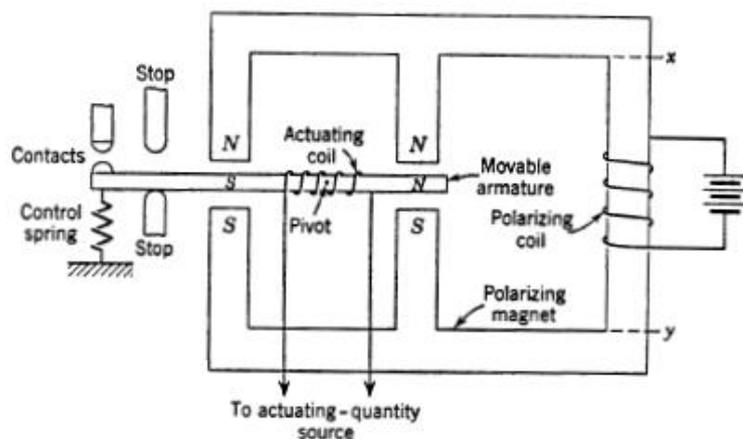
$$K_1 I^2 = K_2,$$

atau

$$I = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} = \text{constant}$$

3.5.2 Rele Arah dari Jenis Atraksi Elektromagnetik

Rele arah dari jenis atraksi elektromagnetik digerakkan oleh arus dc atau arus ac yang disearahkan. Penggunaan sebagian besar rele seperti itu adalah untuk proteksi rangkaian dc dimana besaran pergerakannya diperoleh dari langsiran atau langsung dari rangkaian. Gambar 3.6 menunjukkan skema prinsip operasi rele jenis ini. Sebuah angker bergerak terlihat dimagnetisasi oleh arus yang mengalir pada kumparan pergerakan yang mengelilingi armatur, dan dengan polaritas seperti itu maka semakin mendekati kontak.



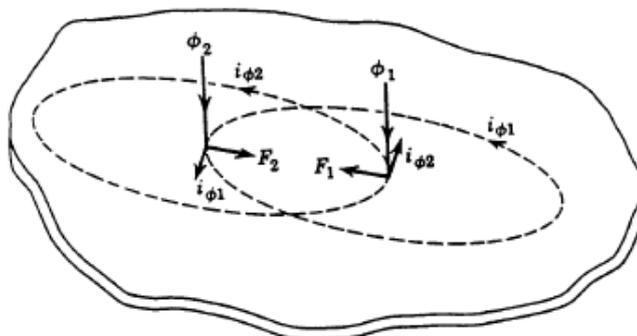
Gambar 3.6 Rele arah dari jenis atraksi elektromagnetik

3.6 RELE JENIS INDUKSI

Rele jenis induksi merupakan rele paling banyak digunakan untuk tujuan rele proteksi dengan menggunakan besaran ac. Rele jenis ini tidak menggunakan besaran dc.

Rele jenis induksi adalah motor induksi fase-belah dengan kontak. Gaya pergerakan dikembangkan dalam sebuah elemen bergerak, yang dapat berupa cakram atau bentuk lain dari rotor material konduksi arus non-magnetik, melalui interaksi fluks elektromagnetik dengan arus eddy yang terinduksi dalam rotor oleh fluks tersebut.

Gambar 3.7 menunjukkan gaya yang dihasilkan pada bagian rotor yang menembus dua fluks ac yang berdekatan. Berbagai besaran diperlihatkan sesaat bilamana kedua fluks berarah ke bawah dan magnitudonya membesar. Masing-masing fluks menginduksikan tegangan di sekitar dirinya dalam rotor, dan arus mengalir dalam rotor yang diakibatkan oleh dua tegangan. Arus yang dihasilkan oleh fluks bereaksi dengan fluks yang lain, dan sebaliknya, untuk menghasilkan gaya yang beraksi pada rotor.



Gambar 3.7 Produksi torsi dalam suatu rele induksi

Besaran-besaran yang terdapat dalam Gambar 3.7 dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\phi_1 = \phi_1 \sin \omega t$$

$$\phi_2 = \phi_2 \sin (\omega t + \theta),$$

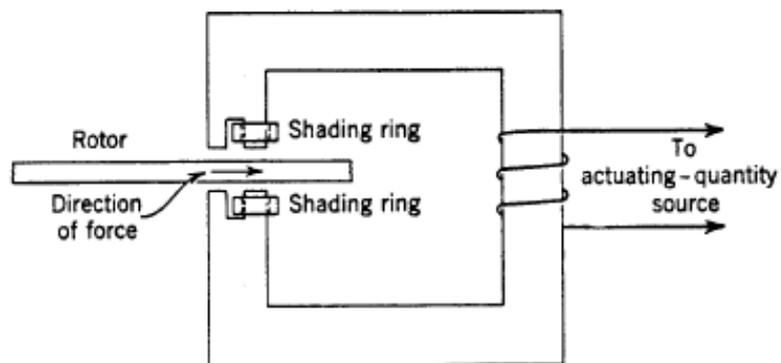
dengan θ adalah sudut fase dimana antara by which ϕ_1 mendahului ϕ_2 .

3.7 JENIS-JENIS STRUKTUR PERGERAKAN

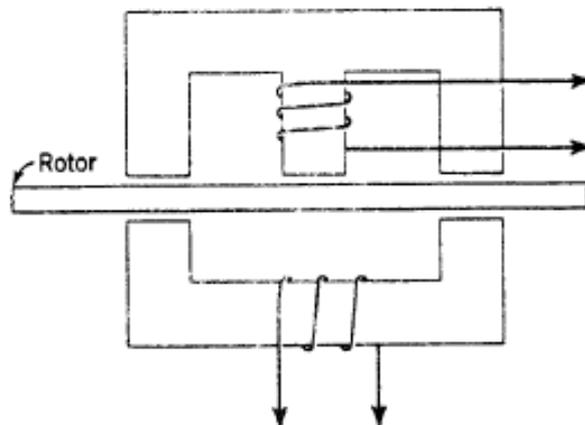
Jenis-jenis struktur pergerakan (*actuating*) berbeda yang digunakan dalam rele umumnya digolongkan sebaga:

- (1) struktur "shadedpole"
- (2) struktur "watthour-meter"
- (3) struktur "induction-cup" dan struktur "double-induction-loop", dan
- (4) struktur "single-induction-loop".

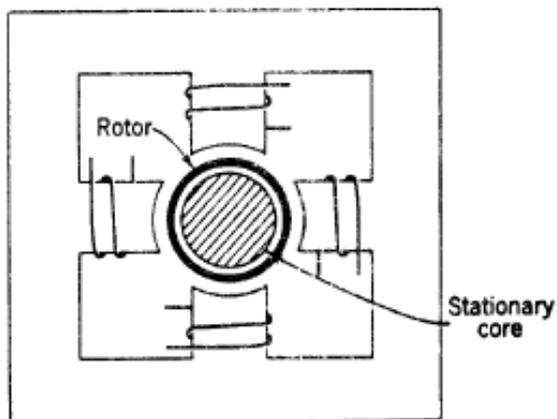
Masing-masing jenis struktur tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.8 sampai 3.12.



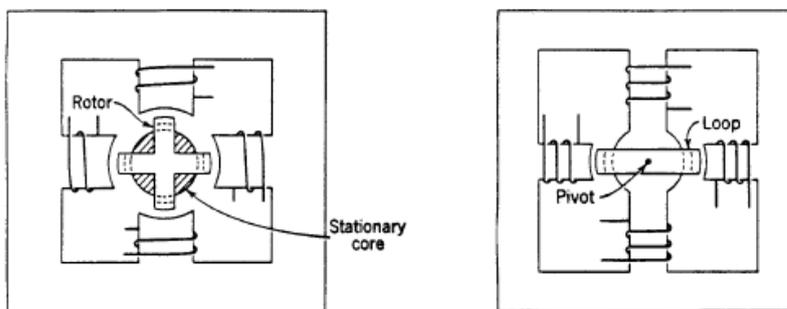
Gambar 3.8 Struktur shaded-pole.



Gambar 3.9 Struktur watt-hour-meter.



Gambar 3.10 Struktur induction-cup



(a) Struktur double-induction-loop dan
 (b) struktur single-induction-loop

4. ARUS, TEGANGAN, ARAH, KESEIMBANGAN ARUS (ATAU TEGANGAN), DAN RELE DIFERENSIAL

4.1 UMUM

Beberapa sifat dan karakteristik berbagai jenis rele proteksi yang akan diuraikan dalam bab ini yaitu yang membedakan antara suatu rele dengan rele lainnya baik dari segi aplikasi maupun kualitas rele tersebut.

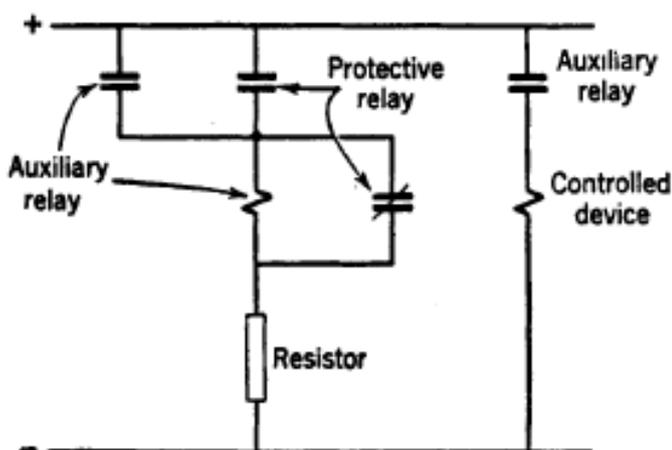
4.2 RATING KONTINYU DAN WAKTU-SINGKAT

Seluruh rele mempunyai rating kumparan arus dan/atau tegangan sebagai panduan untuk aplikasinya. Untuk rele yang memenuhi standar terkini, rating kontinyu mengkhhususkan bahwa sebuah rele akan tahan terhadap operasi kontinyu pada temperatur ambang 40 °C. Rele yang mempunyai kumparan arus juga mempunyai rating arus 1 detik, karena rele seperti itu biasanya digunakan untuk arus-lebih yang singkat.

4.3 RATING KONTAK

Kontak rele proteksi didasarkan pada kemampuannya untuk emnutup dan membuka rangkaian induktif atau non-induktif arus rangkaian dan tegangan rangkaian da atau dc pada besaran tertentu.

Bilamana rele jenis "over dan under" dengan kontak "a" dan "b" digunakan untuk mengontrol operasi beberapa pelayanan yang lain, rele dapat berkurang resiko kerusakannya dengan menggunakan susunan seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Rangkaian kontrol rele jenis "over-dan-under".

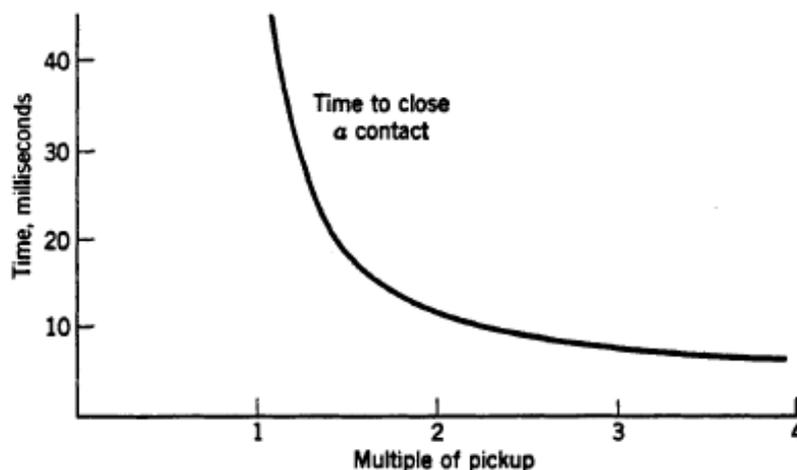
4.4 BEBAN (*BURDENS*)

Impedans kumparan aktuator rele harus diketahui agar dapat ditentukan kapasitas sumber trafo tegangan dan arus sehingga kapasitas dan keakuratannya dapat disesuaikan dengan catu beban rele bersama-sama dengan beban lain. impedans rele tersebut biasanya dinyatakan dalam bentuk daftar dalam publikasi rele.

4.5 KARAKTERISTIK WAKTU

Kurva waktu tipikal untuk rele kecepatan tinggi ditunjukkan pada Gambar 4.2. Dapat dicatat bahwa dalam gambar tersebut terlihat sebagai kurva inverse, tetapi waktu operasi 3 siklus (basis 60 Hz) dicapai hanya dalam waktu singkat di atas nilai pickup, sehingga rele dapat dikatakan sebagai rele kecepatan tinggi (*high speed relay*).

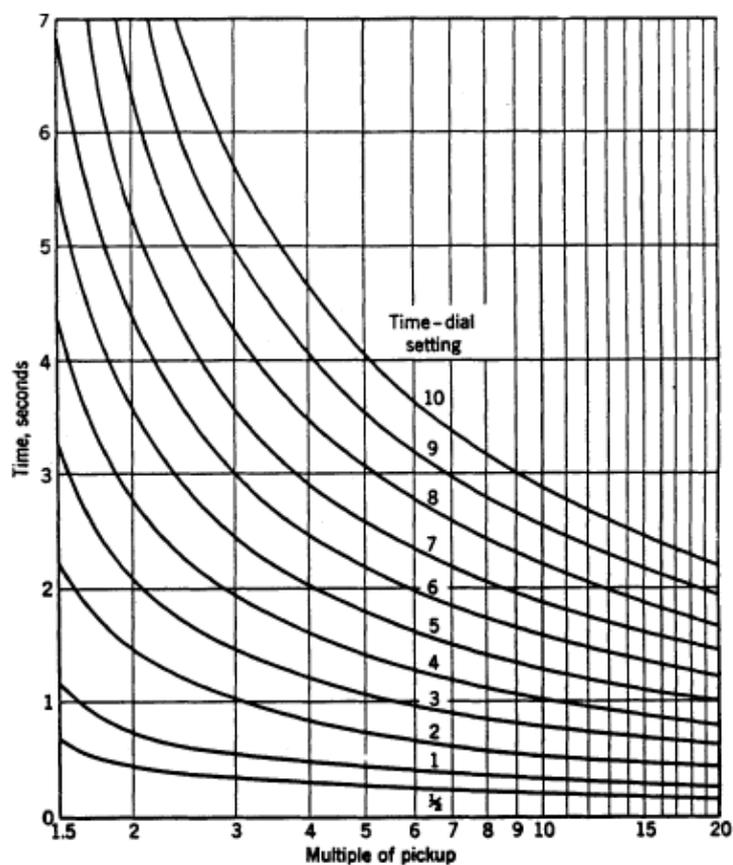
Gambar 3 menunjukkan keluarga kurva waktu-inverse yang digunakan secara luas pada rele jenis induksi. Sebuah kurva ditampilkan untuk setiap bagian utama skala tersebut. Setiap kurva pada bagian tengahnya dapat diperoleh dengan interpolasi karena pengaturannya adalah kontinyu.



Gambar 4.2 Kurva rele kecepatan-tinggi.

Berdasarkan Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 dapat dicatat bahwa grafik tersebut digambarkan merupakan perkalian dari nilai pickup, sehingga kurva yang sama dapat digunakan untuk setiap nilai pickup.

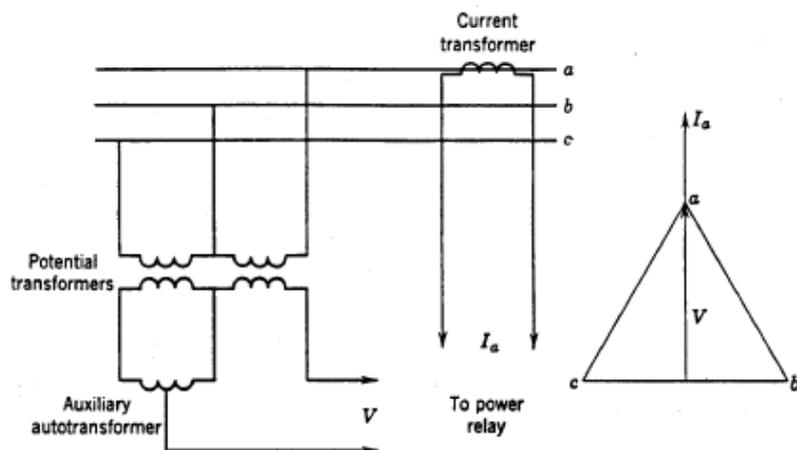
Hal ini tidak mungkin dilakukan pada rele jenis induksi, dimana pickup diatur oleh tap kumparan, karena ampere-lilit pada pickup adalah sama untuk setiap tap.



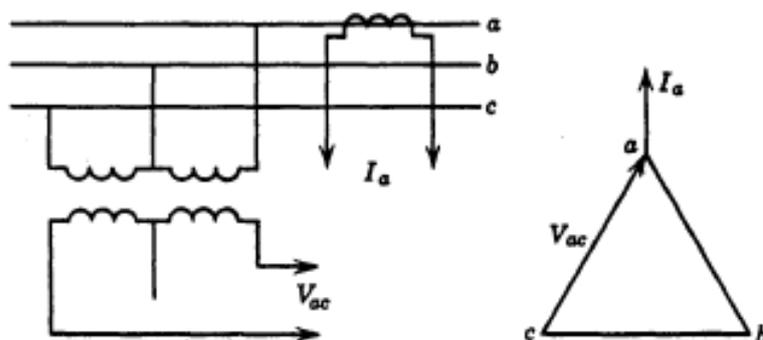
Gambar 4.3 Kurva waktu-Inverse.

4.6 RELE DAYA

Rele yang harus merespon daya umumnya digunakan untuk proteksi terhadap kondisi selain hubung singkat (*short circuits*). Rele seperti ini terhubung dengan polaritas menurut tegangan rangkaian, dan hubungan arus dan karakteristik relai dipilih sehingga torsi maksimum dalam rele terjadi bilamana beban dengan faktor daya *unity* dicapai. Rele akan pickup untuk daya yang mengalir pada satu arah melalui rangkaian dan akan kembali lagi untuk arah yang berlawanan dari aliran daya.



Gambar 4.4 Hubungan dan vektor diagram rele daya untuk tegangan fase ke netral tidak tersedia.

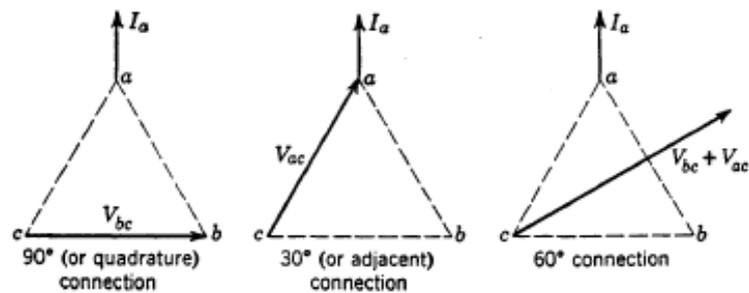


Gambar 4.5 Hubungan dan vektor diagram rele daya untuk tegangan fase ke fase.

4.7 RELE ARAH UNTUK PROTEKSI HUBUNG-SINGKAT

Karena hubung singkat mempunyai arus yang tertinggal dari posisi faktor daya unity, biasanya dalam sudut yang besar, maka diperlukan rele arah untuk proteksi hubung-singkat yang tersusun untuk mengembangkan torsi maksimum pada kondisi arus tertinggal (*lagging*) seperti itu.

Tiga kombinasi arus dan tegangan konvensional yang digunakan untuk rele fase diilustrasikan dalam Gambar 4.6, dimana besaran yang ditunjukkan adalah untuk rele fase tunggal, atau untuk tiga elemen rele polifase.



Gambar 4.6 Hubungan konvensional rele fase arah.

4.8 RELE KESEIMBANGAN ARUS (ATAU TEGANGAN)

Secara umum terdapat dua jenis berbeda dari rele keseimbangan arus yang digunakan. Berdasarkan produksi torsi aktuator, maka dibedakan menjadi:

- (a) jenis arus lebih (*overcurrent*) dan
- (b) jenis arah (*directional*)

Jenis arus lebih dari reel keseimbangan arus mempunyai satu arus lebih yang tersusun untuk menghasilkan torsi dalam arah yang berlawanan terhadap elemen arus lebih yang lain. Kedua elemen beraksi pada struktur pergerakan yang sama.

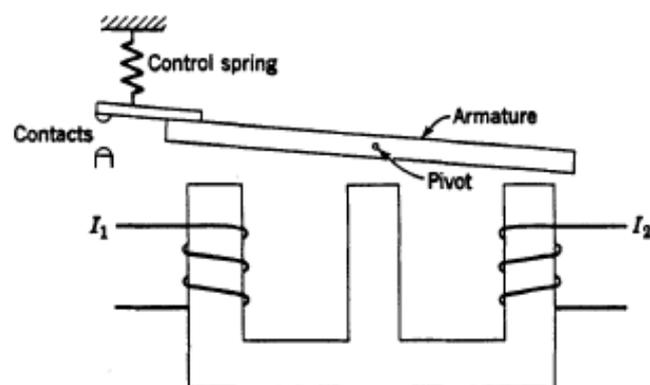
Gambar 4.7 menunjukkan secara skematik atraksi elektromagnetik jenis balok kesetimbangan. Struktur lain yang biasa digunakan adalah rele jenis induksi yang mempunyai dua elemen arus lebih yang beraksi berlawanan pada suatu rotor.

Jika kita abaikan pengaruh torsi negatif pegas kontrol, persamaan torsinya adalah:

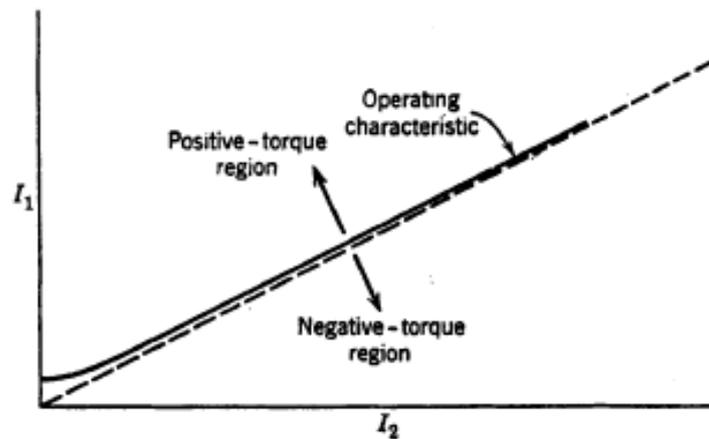
$$T = K_1 I_1^2 - K_2 I_2^2$$

Bilamana rele berada di ambang operasi, torsi netto adalah nol, dan:

$$K_1 I_1^2 - K_2 I_2^2$$



Gambar 4.7 Rele keseimbangan arus jenis balok-kesetimbangan.



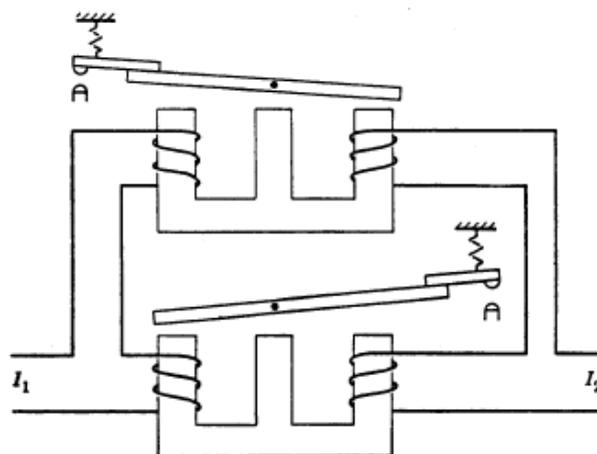
Gambar 4.8 Karakteristik operasi rele keseimbangan arus.

Oleh karenanya, karakteristik operasi rele menjadi

$$\frac{I_1}{I_2} = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} = \text{constant}$$

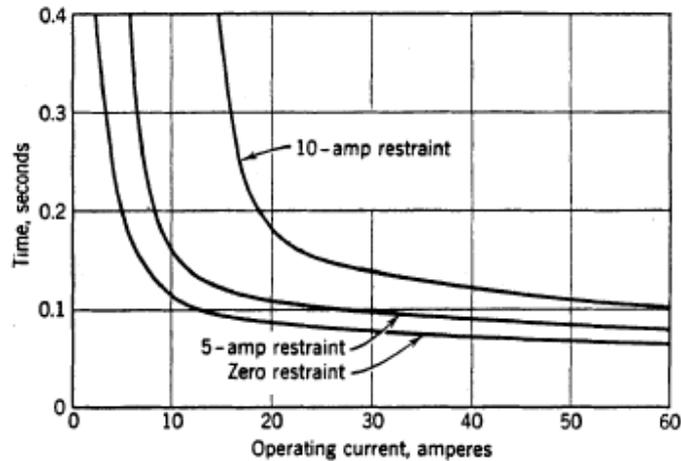
Karakteristik operasi rele seperti itu dengan menyertakan pengaruh pegas kontrol ditunjukkan pada Gambar 4.8.

Pengaruh pegas kontrol memerlukan nilai minimum I_1 untuk pickup dan I_2 adalah nol, tetapi pengaruh pegas semakin berkurang dan semakin tidak kelihatan pada nilai arus yang lebih tinggi. Rele akan pick up untuk rasio I_1 dan I_2 yang direpresentasikan oleh titik di atas karakteristik operasi.



Gambar 4.9 Dua elemen rele keseimbangan arus.

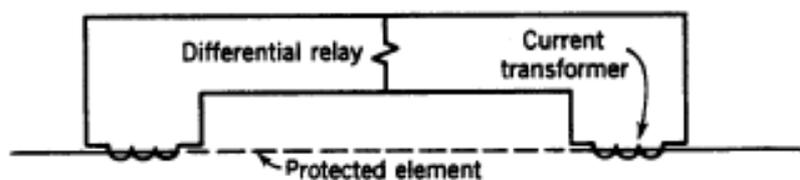
Kurva waktu versus arus yang menggambarkan karakteristik kerja rele keseimbangan arus ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Kurva waktu-arus rele keseimbangan arus.

4.9 RELE DIFERENSIAL

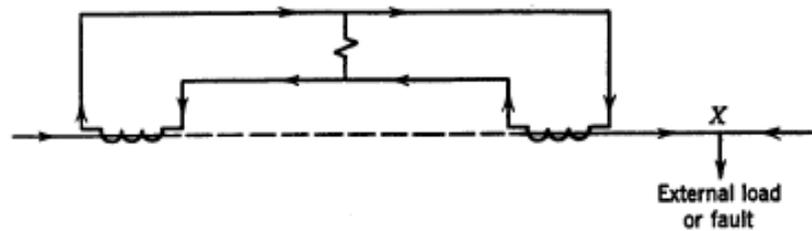
Rele diferensial digunakan pada bebrbagai bentuk, tergantung apda perlengkapan yang dilindungi. Definisi rele tersebut ialah bahwa rele akan beroperasi bilamana terdapat perbedaan vektor antara dua atu lebih besaran elektrik yang sama yang melampaui besar yang ditentukan di awal.



Gambar 4.11 Aplikasi sederhana rele diferensial.

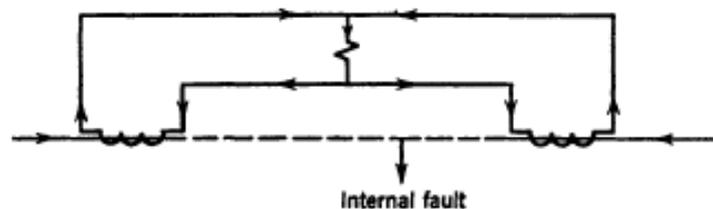
Aplikasi terbanyak rele diferensial adalah jenis diferensial-arus. Aplikasi sederhana rele diferensial diperlihatkan pada Gambar 4.11. Bagian yang digambarkan dengan garis putus-putus dari rangkaian merepresentasikan elemen sistem yang diproteksi oleh rele diferensial. Elemen sistem tersebut dapat berupa panjangnya rangkaian, belitan generator, bagian dari bus, dan lain-lain. Sebuah transformator arus (current transformer, CT) ditunjukkan pada setiap hubungan ke elemen sistem. Sisi sekunder CT saling terinterkoneksi, dan kumparan rele arus lebih terhubung pada rangkaian sekunder CT. Rele ini dapat berupa janis ac yang banyak digunakan dan dibahas dalam uraian ini.

Sekarang, tinjau arus yang melalui rangkaian primer baik ke beban atau ke lokasi hubung singkat pada X. Kondisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.12. Jika kedua CT mempunyai rasio yang sama, dan terhubung dengan baik, arus sekundernya hanya akan bersirkulasi di antara dua CT sebagaimana ditunjukkan dalam arah panah, dan tidak ada arus yang mengalir melalui rele diferensial.



Gambar 4.12 Kondisi beban eksternal atau gangguan.

Tetapi, hubung singkat dapat terjadi antara dua CT seperti terlihat pada Gambar 4.13. Jika arus mengalir dalam bentuk hubung singkat dari kedua sisi, penjumlahan arus sekunder CT akan mengalir melalui rele diferensial. Hal ini tidak diperlukan bahwa arus hubung singkat mengalir ke gangguan dari kedua sisi untuk menyebabkan arus sekunder mengalir melalui rele diferensial. Aliran pada satu sisi saja, atau beberapa arus yang sama mengalir keluar pada satu sisi bilamana arus yang lebih besar masuk ada sisi yang lain, akan menyebabkan arus yang berbeda (diferensial). Dengan kata lain, arus diferensial akan sebanding dengan beda vektor antara arus yang masuk dan yang meninggalkan rangkaian yang diproteksi, dan jika arus dipertahankan pada nilai pick up rele, maka rele akan beroperasi.

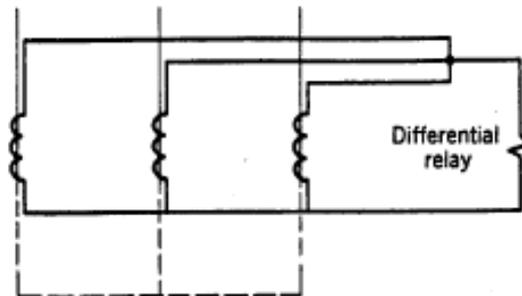


Gambar 4.13 Kondisi gangguan internal.

Uraian di atas adalah langkah sederhana untuk mengembangkan prinsip elemen sistem yang mempunyai beberapa hubungan.

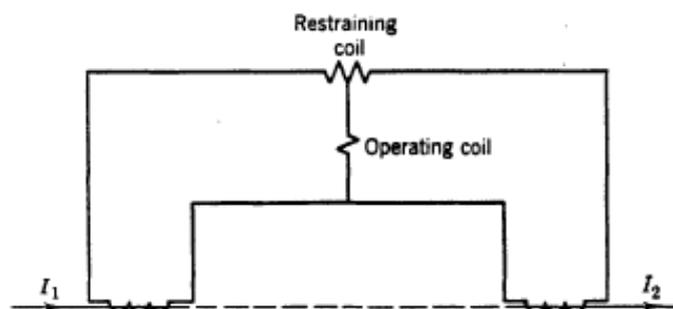
Sebagai contoh, perhatikan Gambar 4.14, dimana terdapat hubungan tiga fase. Keadaan ini diperlukan hanya untuk resio CT yang sama, dan saling terhubung sehingga

rele tidak menerima arus bilamana total arus yang meninggalkan elemen rangkaian secara vektorial sama dengan total arus yang masuk ke elemen rangkaian.



Gambar 4.14 Aplikasi beda arus tiga terminal.

Bentuk yang paling mahal dari rele diferensial adalah jenis diferensial prosentase. Rele jenis ini pada dasarnya sama dengan rele kesetimbangan arus jenis arus lebih yang telah diuraikan sebelumnya, tetapi terhubung pada rangkaian yang berbeda, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Rele diferensial prosentase pada rangkaian dua terminal.

5. RELE JARAK

5.1. UMUM

Barangkali rele yang paling populer dan serbaguna dalam keluarga rele adalah rele jarak (*distance relay*). Pada bagian-bagian terdahulu, pembahasan mengenai rele selalu dilakukan perbandingan antara suatu arus terhadap arus yang lain, dan kita meninjau karakteristik operasinya sebagai rasio dari kedua arus tersebut.

Pada rele jarak, terdapat keseimbangan antara tegangan dan arus, rasionya dinyatakan dalam impedans. Impedans merupakan ukuran elektrik panjang suatu saluran transmisi. Oleh karenanya rele jarak biasa digunakan pada saluran transmisi daya listrik.

5.2 RELE JARAK JENIS IMPEDANS

Karena jenis rele ini meliputi unit jenis-impedans, maka pertama-tama kita bahas mengenai istilah impedans sesuai dengan namanya. Umumnya istilah impedans dapat diterapkan hanya untuk resistans, reaktans, atau kombinasi keduanya. Dalam terminologi rele proteksi, rele impedans mempunyai karakteristik yang berbeda dari rele resistans, reaktans, atau kombinasi keduanya. Istilah impedans mempunyai pengertian khusus. Pada rele impedans, torsi yang dihasilkan oleh elemen arus sebanding dengan torsi elemen tegangan. Elemen arus menghasilkan torsi (*pickup*) positif, dimana elemen tegangan menghasilkan torsi (*reset*) negatif. Dengan kata lain, rele impedans adalah rele arus lebih yang menahan tegangan.

Jika kita meninjau pengaruh pegas-kontrol K_3 , maka persamaan torsinya adalah:

$$T = K_1 I^2 - K_2 V^2 - K_3$$

dengan I dan V masing-masing adalah magnitudo rms arus dan tegangan. Pada titik keseimbangan, bilamana rele berada di ambang operasi, torsi nettonya adalah nol, dan

$$K_2 V^2 = K_1 I^2 - K_3$$

Dengan membaginya dengan faktor $K_2 I^2$, kita peroleh:

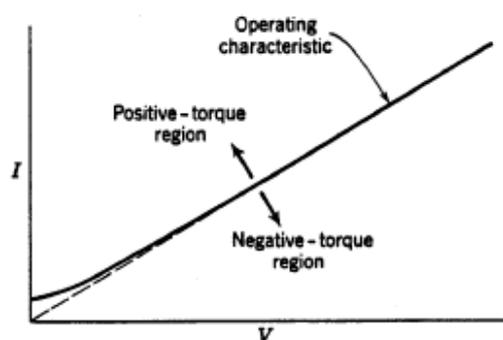
$$\frac{V^2}{I^2} = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2}$$

$$\frac{V}{I} = Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2}}$$

Biasanya pengaruh pegas-kontrol diabaikan, karena pengaruhnya muncul hanya pada magnitudo arus di bawah arus normalnya. Sebagai konsekuensinya, jika kita ambil K_3 adalah nol, maka persamaan sebelumnya menjadi:

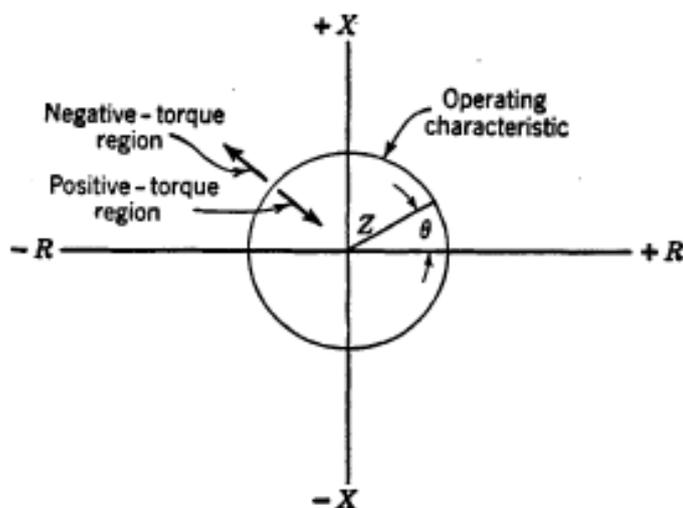
$$Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} = \text{constant}$$

Dengan kata lain, rele impedans pada ambang operasi pada nilai konstanta V terhadap I yang diberikan, yang mengekspresikan impedans. Karakteristik operasi terkait dengan tegangan dan arus pada rele jarak ditunjukkan pada Gambar 5.1



Gambar 5.1 Karakteristik operasi rele impedans.

Suatu cara yang jauh lebih bermanfaat untuk menunjukkan karakteristik operasi rele jarak adalah dengan menggunakan diagram R-X. Karakteristik operasi rele impedans, yang mengabaikan pengaruh pegas-kontrol, diperlihatkan pada Gambar 5.2.

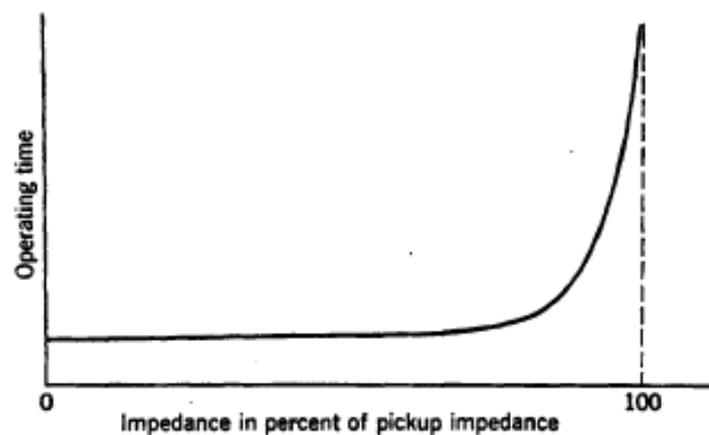


Gambar 5.2 Karakteristik operasi rele impedans pada diagram R-X.

Nilai numerik dari rasio V terhadap I yang ditunjukkan adalah merepresentasikan panjang vektor jari-jari, yaitu Z , dan sudut fase θ antara V dan I menentukan posisi vektor. Jika I sefase dengan V , maka vektornya berada pada sumbu $+R$, tetapi jika I berbeda fase 180 derajat dengan V , maka vektornya berada pada sumbu $-R$. Jika I tertinggal dari V , vektornya adalah komponen $+X$, dan jika I mendahului V , maka vektornya adalah komponen $-X$. Karena operasi rele impedans dalam prakteknya tidak tergantung pada sudut fase antara V dan I , maka karakteristik operasinya adalah berupa lingkaran dengan berpusat di titik asal $(0, 0)$.

Jika nilai Z kurang dari jejari lingkaran maka akan menghasilkan torsi positif, dan jika nilai Z lebih besar dari jejarinya maka akan menghasilkan torsi negatif, tanpa memperhatikan sudut fase antara V dan I . Pada arus yang sangat rendah, dimana karakteristik operasi pada Gambar 5.1 berangkat dari garis lurus karena pegas kontrol, pengaruh pada Gambar 2 membuat jejari lingkaran menjadi lebih kecil. Hal ini dalam prakteknya tidak berpengaruh signifikan, akan tetapi karena aplikasi yang lazim dari rele seperti itu jarang terjadi jika tergantung pada operasi arus yang rendah. Meskipun rele impedans dengan tunda waktu melekat hanya sekali-sekali terjadinya, maka dipertimbangkan hanya untuk rele impedans jenis kecepatan-tinggi.

Karakteristik waktu-operasi rele impedans kecepatan tinggi ditunjukkan pada Gambar 5.3.

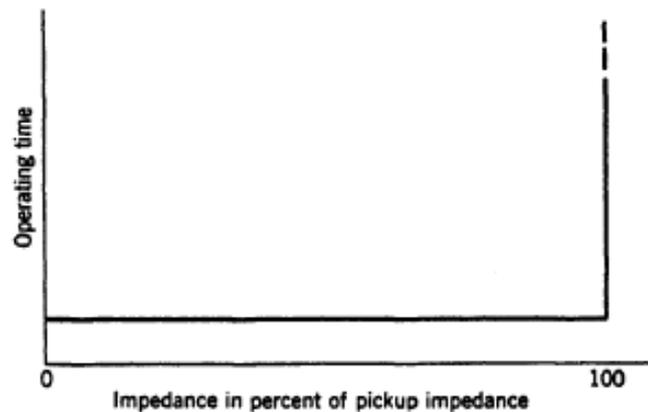


Gambar 5.3 Karakteristik waktu operasi versus impedans rele impedans kecepatan tinggi untuk suatu nilai arus

Kurva pada Gambar 5.3 menunjukkan nilai tertentu dari suatu magnitudo arus. Kurva untuk arus yang lebih besar akan menghasilkan garis yang berada di bawah kurva tersebut, sebaliknya Kurva untuk arus yang lebih kecil akan menghasilkan garis yang

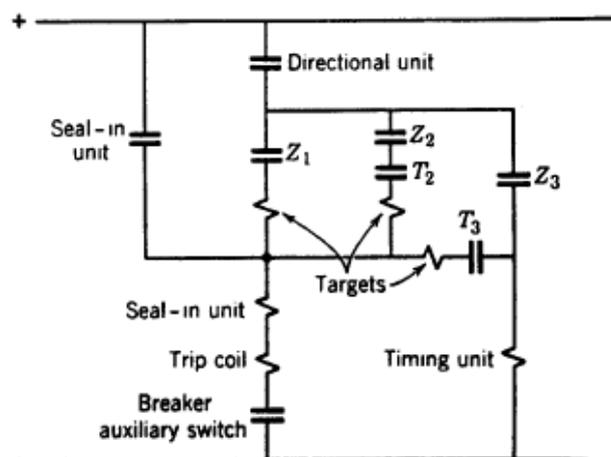
berada di atas kurva tersebut. Akan tetapi, secara umum waktu operasi untuk arus biasanya mengalami aplikasi keadaan normal rele jarak sesingkat yang didefinisikan sebagai kecepatan tinggi, dan variasi arusnya diabaikan.

Dalam kenyataannya, peningkatan waktu pada saat imedans mendekati nilai pickup selalu diabaikan, dan kurva waktunya ditunjukkan secara sederhana pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4 Representasi penyederhanaan dari Gambar 5.3.

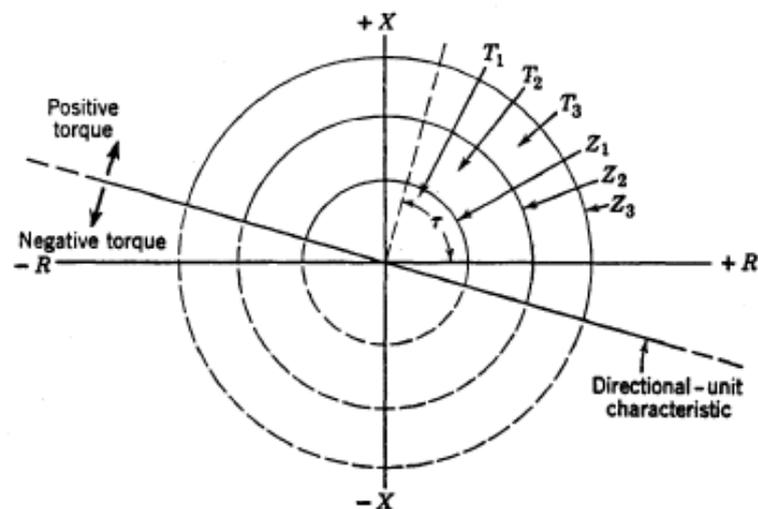
Berbagai jenis struktur aktuators digunakan dalam konstruksi rele impedans. Rele inverse-time menggunakan shaded-pole atau struktur watt-metric. Rele kecepatan-tinggi dapat menggunakan struktur atraksi magnetik balok kesetimbangan atau tangkup-induksi atau struktur loop-ganda. Untuk proteksi saluran transmisi, rele jarak fase tunggal jenis impedans terdiri dari unit adah fase tunggal, tiga unit rele impedans kecepatan tinggi, dan satu unit pewaktuan (*timing*), bersama-sama dengan target, unit seal-in, dan alat-alat tambahan lainnya.



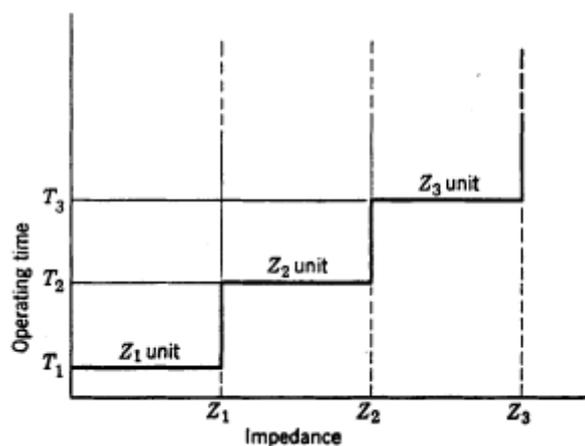
Gambar 5.5 Skema hubungan rangkaian-kontak rele jarak jenis impedans.

Gambar 5.5 menunjukkan secara skematik rangkaian kontak rele jarak jenis impedans. Tiga unit impedans diberi label yaitu Z_1 , Z_2 , dan Z_3 . karakteristik operasi ketiga unit tersebut secara terpisah dapat diatur sendiri-sendiri.

Pada diagram R-X yang ditunjukkan pada Gambar 5.6, lingkaran Z_1 adalah yang terkecil, lingkaran Z_3 yang terbesar, dan lingkaran Z_2 di tengah-tengahnya. Jelaslah bahwa setiap nilai impedans di dalam lingkaran Z_1 akan menyebabkan ketiga unit impedans beroperasi. Gambar 5.6 juga menunjukkan hubungan karakteristik operasi unit arah dan karakteristik unit impedans pada diagram R-X yang sama. Karena unit arah mengizinkan trip hanya dalam region torsi positif, bagian yang tidak aktif karakteristik unit impedans dibuat dalam bentuk garis putus-putus. Hasilnya adalah bahwa tripping akan terjadi hanya untuk kedua titik berada di dalam lingkaran dan di atas karakteristik unit arah.



Gambar 5.6 Karakteristik operasi dan tunda-waktu rele jarak jenis impedans.



Gambar 5.7 Waktu operasi versus karakteristik impedans rele jarak jenis impedans.

Jika diperhatikan aplikasi rele jarak pada proteksi saluran transmisi, kita dapat melihat waktu operasi versus karakteristik impedansnya seperti ditunjukkan pada Gambar 5.7. Karakteristik tersebut biasanya disebut karakteristik impedans-waktu bertahap.

5.3 RELE JARAK JENIS REAKTANS

Unit rele-reaktans dari suatu rele jarak jenis reaktans mempunyai elemen arus-lebih yang membangkitkan torsi positif, dan elemen arah tegangan-arus yang saling berlawanan atau membantu elemen arus-lebih, tergantung pada sudut fase antara arus dan tegangan. Dengan kata lain, rele reaktans merupakan rele arus lebih dengan pengendalian arah. Elemen arah tersusun untuk membangkitkan torsi negatif bilamana arus tertinggal dari tegangan 90 derajat. Struktur tangkup induksi atau loop induksi ganda merupakan pilihan terbaik untuk aktuator rele kecepatan tinggi bagi rele jarak jenis ini.

Jika kita meninjau pengaruh pegas-kontrol $-K_3$, maka persamaan torsi adalah:

$$T = K_1 I^2 - K_2 V I \sin \theta - K_3$$

dengan θ didefinisikan positif jika I tertinggal dari V. Pada titik keseimbangan, torsi total adalah nol, dan karenanya;

$$K_1 I^2 = K_2 V I \sin \theta + K_3$$

Selanjutnya kedua sisi persamaan di atas dibagi dengan I^2 , kita peroleh:

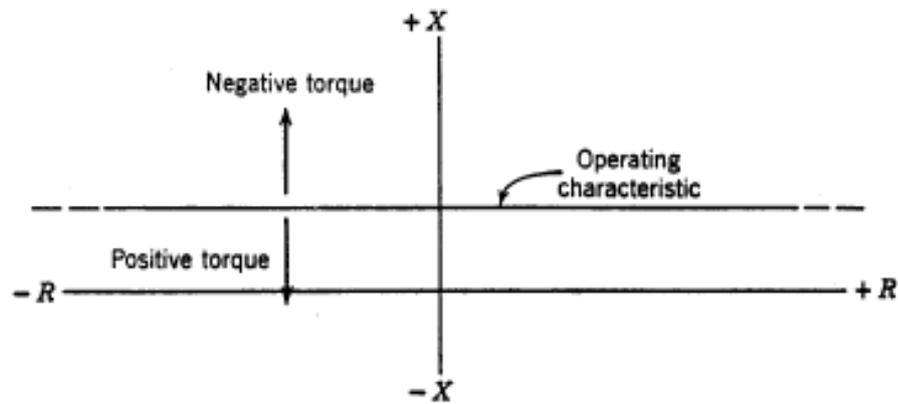
$$K_1 - K_2 \frac{V}{I} \sin \theta + \frac{K_3}{I^2}$$

$$\frac{V}{I} \sin \theta - Z \sin \theta - X = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2}$$

Jika kita abaikan pengaruh pegas kontrol, maka,

$$X = \frac{K_1}{K_2} = \text{constant}$$

Dengan kata lain, rele ini mempunyai karakteristik operasi seperti ini sehingga seluruh vektor jejari impedans yang berada pada karakteristik ini mempunyai komponen X yang konstan. Hal ini dijelaskan secara singkat pada Gambar 5.8.

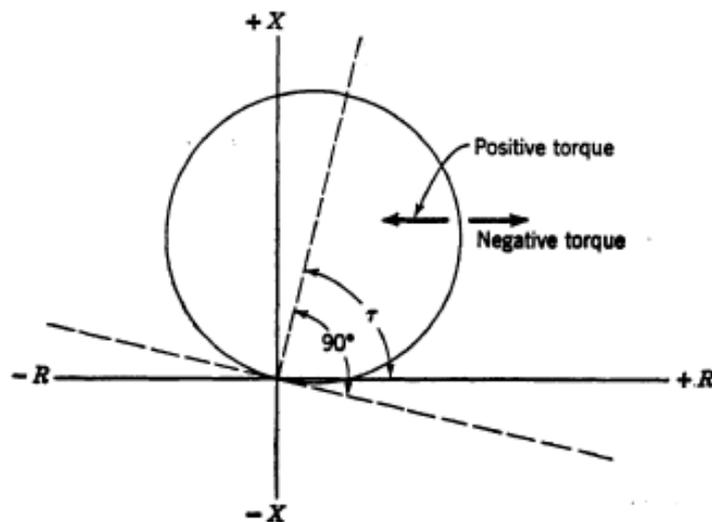


Gambar 5.8 Karakteristik operasi rele reaktans.

Jika kita abaikan pengaruh pegas-kontrol,

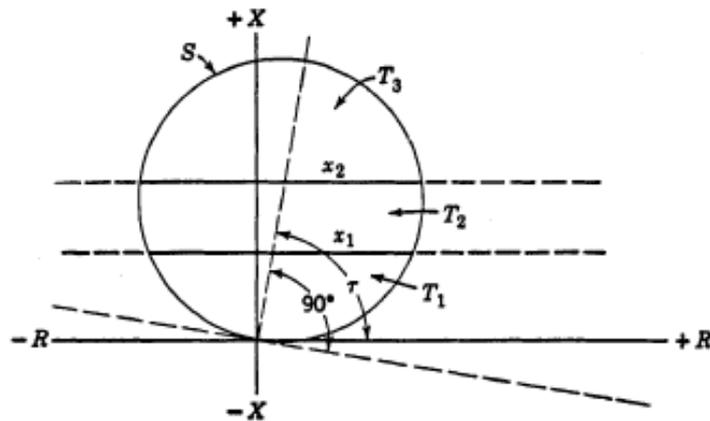
$$Z = \frac{K_1}{K_2} \cos (\theta - \tau)$$

Karakteristik operasi yang diuraikan dalam persamaan ini ditunjukkan pada Gambar 5.9. Diameter lingkaran ini dalam prakteknya tidak tergantung pada tegangan atau arus, kecuali pada arus dan tegangan yang rendah bilamana pengaruh pegas-kontrol disertakan dalam perhitungan, sehingga menyebabkan diameter menjadi lebih besar.



Gambar 5.9 Karakteristik operasi rele arah dengan pengendalian tegangan.

Rele jarak jenis reaktans secara lengkap mempunyai karakteristik operasi seperti ditunjukkan pada Gambar 5.10.

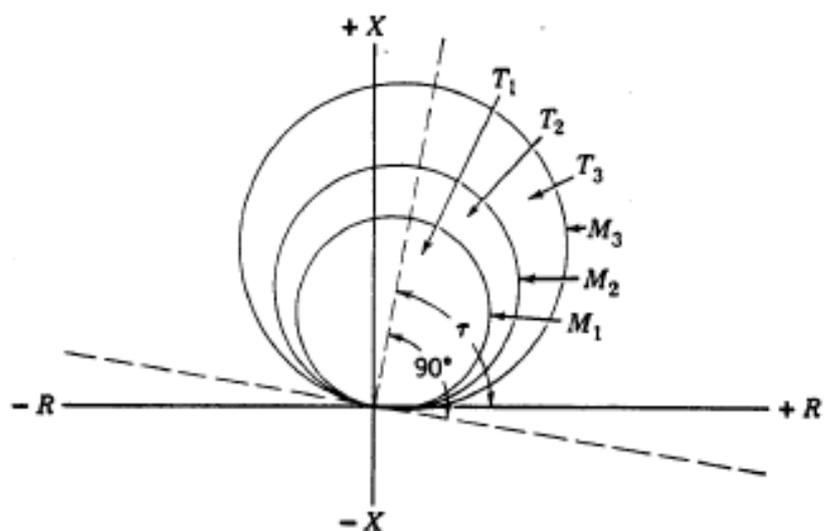


Gambar 5.10 Karakteristik operasi rele jarak jenis reaktans.

5.4 RELE JARAK JENIS MHO

Selain jenis impedans dan jenis reaktans, rele jarak juga mempunyai jenis mho. Karakteristik operasinya diturunkan dari hubungan dengan deskripsi unit starting rele jarak jenis reaktans. Struktur yang digunakan dalam rele jenis ini biasanya struktur silinder induksi atau struktur loop induksi ganda.

Rele jarak secara lengkap untuk proteksi saluran transmisi tersusun dari tiga unit mho kecepatan tingi (M_1 , M_2 , dan M_3) dan unit pewaktuan, terhubungseperti halnya dalam rele jarak jenis impedans, kecuali bahwa tanpa unit arah terpisah, karena unit mho sudah bersifat berarah. Karakteristik operasi rele jenis ini ditunjukkan pada Gambar 5.11.



Gambar 5.11 Karakteristik operasi rele jarak jenis mho.

6. PROTEKSI SALURAN TRANSMISI

6.1 UMUM

Proteksi dibutuhkan untuk melindungi tiap elemen dari sistem serta mengamankan secepat mungkin dari gangguan yang sedang terjadi, sebab gangguan dapat membahayakan sistem, antara lain menyebabkan jatuhnya generator-generator dalam sistem. Bagi pihak konsumen akibatnya adalah terganggunya kerja dari alat-alat listrik, terutama didalam industri-industri yang mengakibatkan terganggunya produksi.

Pada umumnya sistem transmisi beroperasi dengan netral trafonya diketanahkan, baik secara langsung atau melalui suatu impedansi. Karena sebagian besar gangguan (70-80%) adalah gangguan tanah, maka rele gangguan tanah harus dipasang selain rele fasa untuk proteksi pada kawat transmisi. Arus residu atau arus urutan nol bersama-sama dengan tegangan urutan nol dipakai sebagai sumber penggerak dari rele tanah itu.

Tujuan dari proteksi terutama untuk mencegah terjadinya gangguan atau memadamkan gangguan yang telah terjadi serta melokalisirnya, dan membatasi pengaruh-pengaruhnya, biasanya dengan mengisolir bagian-bagian yang terganggu itu tanpa mengganggu bagian-bagian yang lain. Didalam sistem atau rangkaian yang konstruksinya cukup baik, proteksi yang ada padanya akan memperlihatkan fungsi-fungsinya dengan sangat memuaskan, dan bilamana rangkaian diubah atau diperluas, maka proteksinya juga harus mengalami perubahan.

6.2 PENGARUH DARI METODE PENGETANAHAN NETRAL SISTEM DAN KONFIGURASI RANGKAIAN PADA SKEMA ALAT-ALAT PROTEKSI

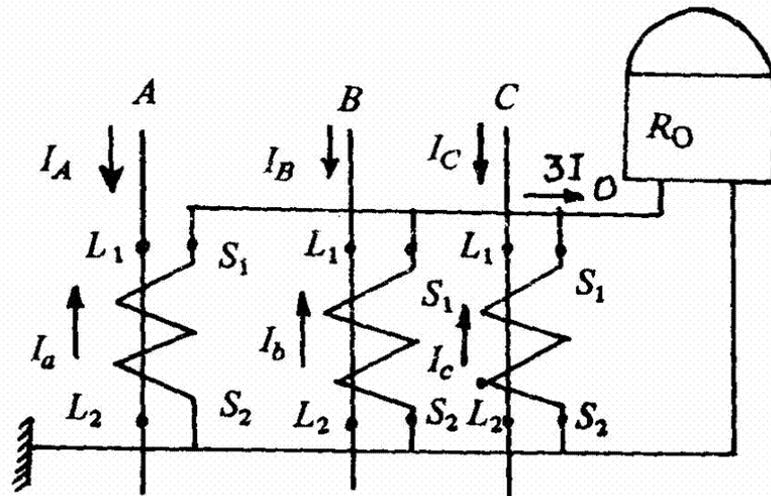
Pada umumnya, prinsip deteksi terhadap gangguan didasarkan pada arus gangguan, dimana harganya cukup besar untuk menggerakkan rele. Pada sistem yang diketanahkan besar arus gangguan tanah ditentukan oleh impedansi pengetnahan sistem itu. Sistem yang mempunyai tegangan 110 kV ke atas biasanya diketanahkan langsung jadi arus gangguan satu fasa ke tanah besar.

Sistem dengan tegangan 70 kV ke bawah sering beroperasi dengan netral yang dikompensasi (jadi arus gangguan tanah kecil) atau diketanahkan dengan tahanan (arus gangguan tanah cukup besar).

Konfigurasi dari rangkaian juga menentukan jenis alat proteksi yang harus digunakan. Proteksi rangkaian radial dengan suplai hanya dari satu ujung adalah yang paling sederhana. Rangkaian radial dengan suplai dari dua ujung atau bentuk loop memerlukan elemen arah pada sistem proteksinya.

6.3 FILTER ARUS URUTAN NOL

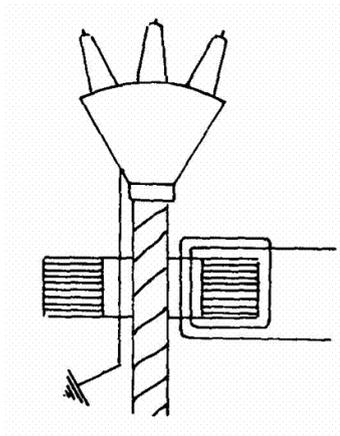
Filter arus urutan nol adalah suatu pengaturan rangkaian yang terdiri-dari 3 buah trafo arus dan sebuah rele yang dihubungkan seperti pada gambar 7.1. Dalam keadaan kerja normal, arus yang mengalir melalui rele merupakan jumlah vektor dari ketiga arus fasa dan dalam sistem yang seimbang sama dengan nol, atau $I_r = I_a + I_b + I_c = 0$.



Gambar 6.1. Hubungan trafo arus untuk membentuk Filter Arus Urutan Nol
 R_0 = rele urutan nol

Jadi selama dalam keadaan kerja normal atau gangguan tiga fasa dan setiap gangguan fasa ke fasa (tanpa tanah) rele tidak bekerja. Hanya pada gangguan satu fasa ke tanah dan dua fasa ke tanah akan mengalir arus urutan nol melalui rele dan mengakibatkan bekerjanya alat proteksi.

Pengaturan ini digunakan bagi proteksi terhadap gangguan satu fasa ke tanah dalam sistem yang netralnya diketanahkan. Agar skema proteksi ini lebih murah harganya, ketiga trafo arus dapat diganti oleh sebuah trafo arus jenis cincin (*ring type transformer*) seperti terlihat pada gambar 6.2. Primer dari trafo arus inti ini terdiri-dari sebuah kabel tiga urat sedangkan belitan sekundernya digulung pada inti toroidal dan dihubungkan pada sebuah rele. Pada keadaan kerja normal atau gangguan antara fasa jumlah vektor dari fluks magnet sama dengan nol di dalam inti jadi tak ada gaya gerak listrik (ggl) yang diinduksikan pada sekunder. Tetapi bila suatu gangguan satu fasa ke tanah terjadi, mereka membentuk fluks yang tak dikompensasi, jadi pada sekunder terbentuk ggl dan mengakibatkan bekerjanya rele.



Gambar 6.2. Trafo arus jenis cincin atau trafo arus urutan nol kabel

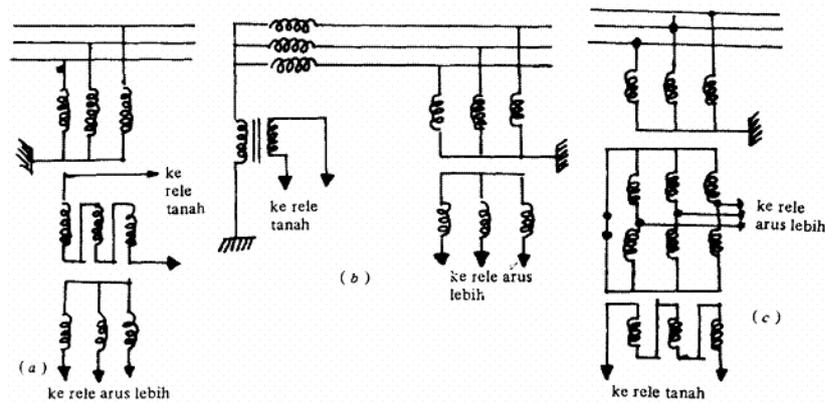
6.4 RELE ARAH GANGGUAN TANAH (*DIRECTIONAL EARTH FAULT RELAY*)

Rele arah (*directional relay*) digunakan apabila arus gangguan mengalir dari banyak jurusan ke titik gangguan melalui lokasi dari rele. Rele yang digunakan untuk rele arah gangguan tanah mempunyai jenis yang sama seperti yang digunakan untuk proteksi pada arus lebih. Kumparan arusnya adalah dari elemen arah dihubungkan guna mendeteksi arus residu dari trafo arus, dan kumparan tegangan dihubungkan pada tegangan yang sesuai guna memberikan kopel yang sesuai pula. Jadi pada proteksi gangguan tanah, dengan arus residu I_r dan tegangan residu V_r , kopel pada rele ini akan sebanding dengan $I_r \times V_r \cos(Q - \alpha)$ dimana Q adalah sudut kopel maksimum dari rele dan α adalah sudut antara tegangan dan arus yang dipakai.

Arus residu untuk proteksi saluran didapat dari penjumlahan arus-arus fasa yang menggunakan trafo arus tiga fasa atau sebuah trafo arus jenis (*core balace current transformer*). Bila arus-arus fasanya dinyatakan dengan I_A, I_B, I_C jumlah vektornya adalah :

$$I_A + I_B + I_C = 0 \text{ pada keadaan normal.} \quad (6.1)$$

$$I_A + I_B + I_C = I_r \text{ pada keadaan gangguan satu fasa ke tanah.} \quad (6.2)$$



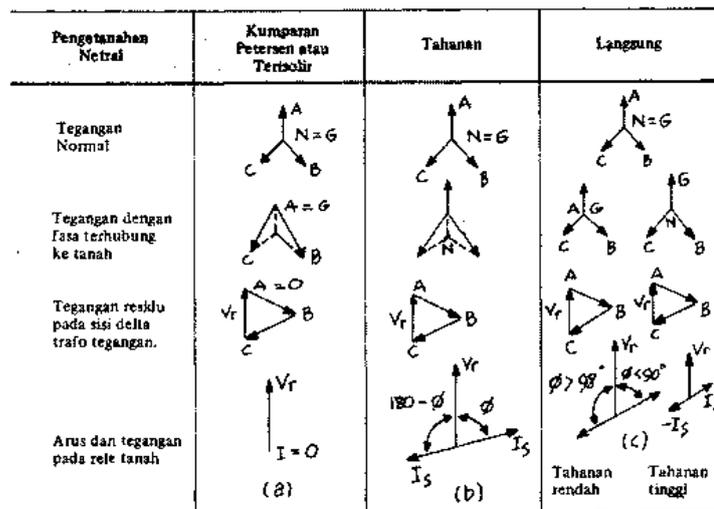
Gambar 6.3. Beberapa metode untuk memperoleh tegangan residu atau tegangan netral ke tanah. (a) Dengan tiga buah trafo fasa tunggal, belitan tersier dihubungkan delta-terbuka. (b) Dengan trafo fasa tunggal dihubungkan pada netral trafo daya. (c) Dengan tiga buah trafo fasa tunggal terhubung bintang dan trafo bantu terhubung delta-terbuka.

Tegangan residu V_r dapat diperoleh dengan beberapa cara seperti dalam gambar 6.3. Bila tegangan fasa tanah dari ketiga kawat dinyatakan dengan V_A, V_B, V_C , maka jumlah ketiga vektor adalah :

$$V_A + V_B + V_C = 0 \text{ pada keadaan normal.} \quad (6.3)$$

$$V_A + V_B + V_C = V_r \text{ pada keadaan gangguan satu fasa ke tanah.} \quad (6.4)$$

Pada gambar 6.4 memperlihatkan pengaruh dari metode pengetnahan dan impedansi gangguan terhadap besar tegangan residu. Dalam diagram vektor gambar 6.4 itu terlihat bahwa pada sistem yang terisolir dan sistem yang diketanahkan dengan kumparan petersen proteksi gangguan tanah dengan elemen arah (*directional earth fault protection*) tidak dapat digunakan, sebab harga tegangan residunya tinggi, arus residunya kecil (mendekati harga nol), oleh karena itu kopel pada rele menjadi kecil sekali.



Gambar 6.4. Diagram vektor dari tegangan dan arus dalam rele arah gangguan tanah

Pada sistem yang diketanahkan langsung, tegangan residu tak pernah dapat melebihi tegangan fasa netral yang normal. Tetapi bila gangguan tanah itu mempunyai tahanan yang lebih tinggi, tegangan residu yang disuplay di relay akan berkurang seperti terlihat pada gambar 6.4.c. Jadi bila tahanan gangguan tanah itu tinggi, arus residu juga rendah, sehingga kopel pada relay akan rendah pula, walaupun faktor daya dari gangguan harganya mendekati 1.

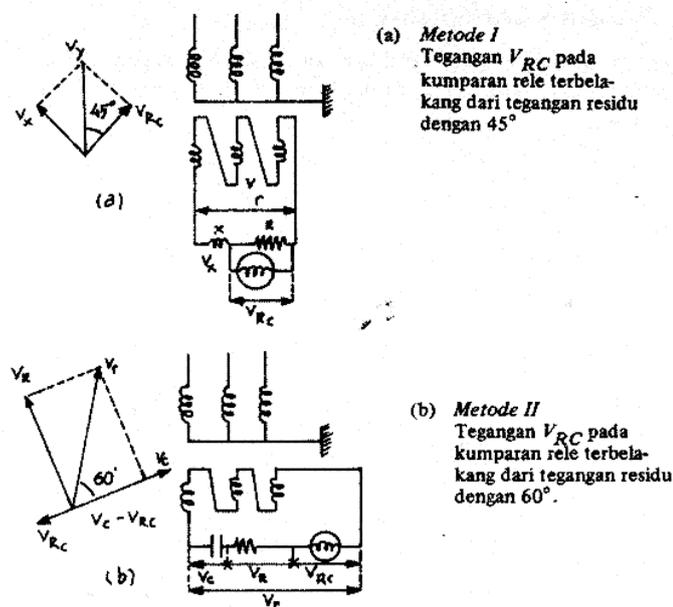
Apabila tahanan gangguan sama dengan nol arus akan membesar dan tegangan residu akan mendekati tegangan fasa netral (tergantung dari harga R dan X), tetapi faktor daya mungkin bisa mempunyai harga rendah.

Sistem yang diketanahkan melalui tahanan akan memberikan keadaan yang memuaskan, sebab besar tegangan polarisasi untuk rele bisa diaga, begitu juga arus gangguan dapat dibuat cukup memadai (kecuali bila tahanan gangguan terlampau tinggi), dan faktor dayanya hampir sama dengan satu, seperti pada gambar 7.4.b.

Bagi sistem yang diketanahkan langsung, diperlukan kompensasi terhadap sudut fasa pada rele sebesar $12,5^\circ - 15^\circ$. Dalam gambar 6.5 terlihat 2 skema bagaimana menambah faktor daya dari persamaan kopel rele itu.

Skema yang pertama (metode I) memakai dua impedansi yang sama, satu bersifat resistif, sedangkan yang satunya bersifat reaktif, yang dihubungkan pada broken-delta dari trafo tegangan, seperti pada gambar 6.5.a. Kumparan tegangan dari rele gangguan tanah dihubungkan paralel pada bagaian resistif. Dengan demikian tegangan kumparan rele dan tegangan resistor adalah sama dan dalam keadaan terbelakang dari tegangan residu V_r kira-kira sebesar 45° dan besar kopel adalah kira-kira $0,7 I_F V_{RC}$. Tetapi apabila gangguan

dengan faktor daya 0,7 terbelakang maka kopel menjadi $I_F V_{RC}$ atau menjadi 1,4 kali kopel untuk gangguan yang mempunyai faktor daya satu.

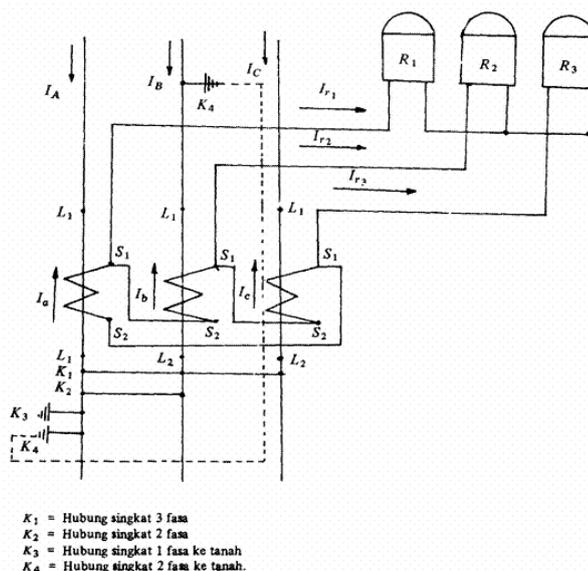


Gambar 6.5. Kompensasi sudut fasa pada rele arah gangguan tanah

Metode yang kedua (metode II) dengan memakai suatu rangkaian yang menggunakan suatu kapasitor dihubungkan seri dengan suatu resistor dan kumparan rele, seperti terlihat dalam gambar 6.5.b. Pada vektor diagramnya terlihat bahwa V_r diuraikan dalam dua komponen, dimana yang satu bersifat resistif yang sefasa dengan arus, sedangkan yang lain adalah kombinasi dari tegangan jatuh dari kapasitor dan kumparan rele. Disini terlihat bahwa tegangan dari kumparan rele dapat diukur untuk mendahului tegangan residu 120° atau terbelakang 60° (dengan membalik hubungan kumparannya) seperti yang diinginkan, dimana harga kapasitasnya harus dipilih sesuai dengan karakteristik dari kumparan rele.

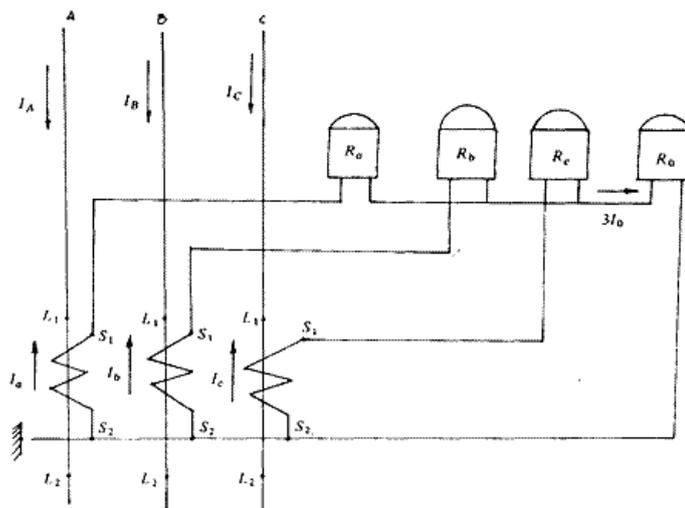
6.5 PROTEKSI GANGGUAN TANAH PADA SISTEM YANG DIKETANAHKAN LANGSUNG

Pada sistem yang diketanahkan langsung, arus gangguan fasa ke tanah umumnya mempunyai nilai yang sangat besar, karena itu rele pengaman harus membuka (*trip*) dengan segera.



Gambar 6.6.a. Contoh skema proteksi untuk semua gangguan hubung singkat

Skema proteksi pada gambar 6.6.a dapat dipakai untuk proteksi semua jenis gangguan hubung singkat, tetapi untuk proteksi gangguan satu fasa ke tanah, sensitivitasnya kurang tinggi. Untuk gangguan tiga fasa yang terjadi pada titik K_1 semua rele bekerja. Apabila terjadi gangguan fasa-fasa di titik K_2 menyebabkan relay R_1 dan R_2 bekerja. Sedangkan gangguan dua fasa ke tanah dari fasa A dan B di titik K_4 arus gangguan mengalir melalui trafo arus dalam fasa A yang menyebabkan bekerjanya rele dari fasa ini.



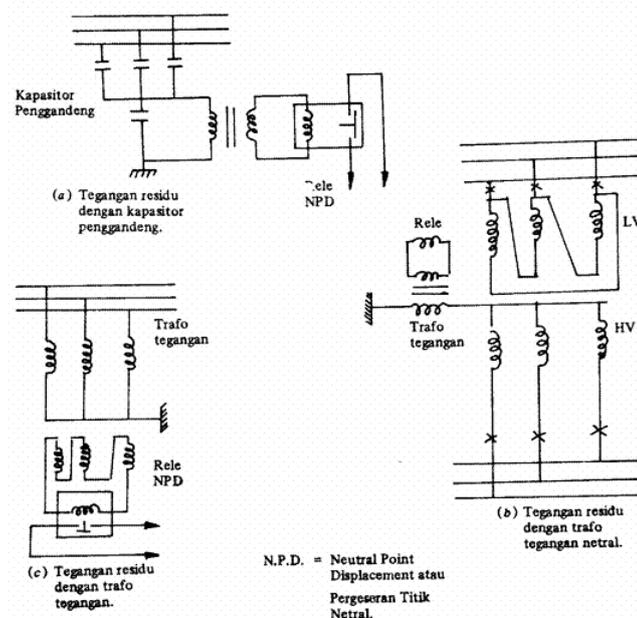
Gambar 6.6.b. Suatu bentuk skema proteksi seperti Gambar 6.6.a, dengan dilengkapi dengan sebuah rele urutan nol agar lebih sensitif terhadap gangguan satu fasa dan 2 fasa ke tanah

Agar proeksi terhadap gangguan satu fasa ke tanah lebih baik dan lebih sensitif, maka perlu diberikan rele tanah R_0 , yang ditambahkan pada skema proteksi dari gambar 6.6.a, yang dipasang seperti pada gambar 6.6.b, untuk melayani arus urutan nol dari gangguan tanah itu.

Tetapi bila khusus diinginkan proteksi terhadap gangguan satu fasa ke tanah saja, maka dapat digunakan filter arus urutan nol, dengan demikian rele akan mempunyai sensitivitas yang lebih tinggi terhadap gangguan itu.

6.6 PROTEKSI TERHADAP GANGGUAN TANAH PADA SISTEM YANG NETRALNYA TIDAK DIKETANAHKAN

Pada sistem-sistem yang masih kecil biasanya sisi delta dan sisi bintang dari trafo dayanya tidak diketanahkan. Dalam hal ini gangguan satu fasa ke tanah pada sistem delta yang masih kecil tidak membahayakan, dan biasanya gangguan itu bisa hilang sendiri (*self clearing*), jadi sebenarnya tidak memerlukan pengaman terhadap gangguan tanah. Atau bisa juga pada sistem interkoneksi yang diketanahkan, karena sautu hal sebagian dari sistem itu terlepas (sengaja atau tak sengaja), dan mungkin bagian yang terlepas itu menjadi sistem dengan netral terapung. Proteksi dalam hal ini diperlukan untuk gangguan tanah yang menetap, yang mana dapat membahayakan terhadap fasa-fasa sehat dengan naiknya tegangan dari fasa-fasa itu menjadi tegangan fasa-fasa dan juga untuk menghindarkan terjadinya busur tanah.



Gambar 6.7. Proteksi untuk sistem yang tidak diketanahkan terhadap gangguan tanah

Gangguan tanah dapat dideteksi dan dibuka dengan bekerjanya pemutus daya dengan menggunakan rele pergeseran titik netral yang didisain untuk menangkap tegangan residu ke tanah pada trafo dengan menggunakan trafo tegangan atau kapasitor penggandeng (*coupling capacitor*).

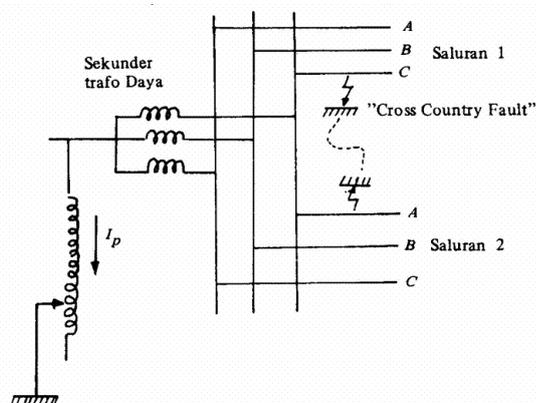
Skema pengaturannya ditunjukkan dalam gambar 6.7 Rele akan bekerja baik terhadap gangguan dalam (internal) dan biasanya diperlengkapi dengan suatu kelambatan waktu (*time delay*) guna menjamin diskriminasi atau menjamin selektivitasnya.

6.7 PROTEKSI TERHADAP GANGGUAN TANAH PADA SISTEM-SISTEM DENGAN KUMPARAN PETERSEN

6.7.1 Kebutuhan Akan Proteksi Pada Sistem Yang Diketanahkan Dengan Kumparan Petersen

Kumparan petersen ditala terhadap kapasitansi ke tanah dari sistem, dimana arus gangguan tanah di kompensasi oleh arus kumparan petersen yang induktif sehingga arus gangguan menjadi kecil. Dengan demikian gangguan dapat dengan segera ditekan atau dipadamkan. Pemadaman sendiri dapat terjadi bila gangguan itu temporer, dan dapat beroperasi terus tanpa adanya resiko kerusakan pada peralatan sistem.

Jadi dengan kumparan petersen sebenarnya sistem itu telah dilindungi terhadap gangguan tanah, meskipun masih belum hilang karena arus gangguan telah menjadi kecil. Tetapi walaupun demikian gangguan itu harus dilenyapkan dan diperbaiki dengan peralatan proteksi yang dapat menunjukan lokasi dari titik gangguan tersebut. Bila pengenalan waktu dari kumparan petersen kontinu, gangguan tanah diperbolehkan bertahan terus sampai diperbolehkan waktu yang baik untuk mengisolir bagian yang terganggu sebelum gangguan itu berkembang menjadi gangguan dua fasa ke tanah pada lokasi yang berlainan yang disebut *cross country fault*, seperti pada gambar 6.8.

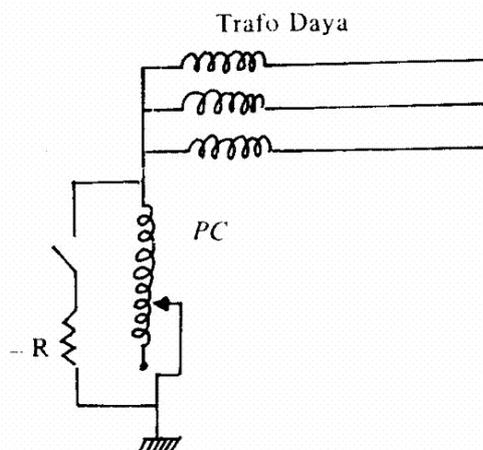


Gambar 6.8. Gangguan 2 fasa ke tanah yang disebut cross country fault pada sistem yang diketanahkan dengan kumparan petersen

Gangguan ini timbul disebabkan terjadinya kerusakan tembus (*break down*) pada isolator (yang telah buruk keadaannya) karena adanya kenaikan tegangan dari fasa-fasa yang tak terganggu menjadi $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa sebelum gangguan. Karena kumparan petersen tak dapat berfungsi terhadap gangguan dua fasa ke tanah, maka diperlukan juga tindakan pencegahan ke arah itu dengan bantuan alat proteksi.

Gangguan yang menetap tidak boleh terlalu lama dibiarkan dari waktu yang telah ditetapkan, dan titik gangguan harus segera dilokalisasi dan diperbaiki. Proteksi untuk menunjukkan adanya gangguan dan letaknya gangguan tersebut memerlukan rele khusus dan harus sensitif sekali karena arus gangguannya kecil. Komponen watt dari arus residu bisa diharapkan untuk mendiskriminasikan gangguan dan menunjukkan lokasi atau letak dari gangguan.

Kumparan petersen yang mempunyai pengenalan waktu singkat harus diperlengkapi dengan suatu peralatan untuk menghubungkan singkat kumparan petersen ke tanah. Dengan pengaturan ini, bila gangguan itu lebih lama dari waktu yang telah ditentukan, maka titik netral sistem dihubungkan ke tanah, baik secara langsung maupun melalui tahanan yang paralel dengan kumparan petersen itu, agar gangguan dapat dideteksi oleh rele yang akan memberikan instruksi pada pemutus daya untuk mentripnya. Gambar 7.9.



Gambar 6.9. Kumparan petersen dengan tahanan paralel
 PC = kumparan petersen
 R = tahanan paralel

6.7.2 Penunjukan Atas Adanya Gangguan Tanah

Penunjukan atas adanya gangguan tanah dapat diketahui dengan bantuan penunjukan terhadap tegangan ke tanah dari ketiga fasa sistem. Peralatan-peralatan yang dipergunakan untuk menunjukkan adanya gangguan tanah itu terdiri-dari :

1. Sebuah trafo tegangan netral dengan disertai suatu voltmeter penunjuk / perekam dan kadang-kadang juga dengan suatu alat alarm. Belitan bantu dari kumparan petersen dapat dipakai untuk membantu mengukur tegangan netral.
2. Sebuah trafo arus pada sisi yang diketanahkan dari kumparan petersen dengan disertai suatu *ammeter* penunjuk/perekam.
3. Tiga buah trafo tegangan fasa tunggal yang dihubungkan antara fasa-fasa ke tanah, atau sebuah *three phase five limb transformer*, yang memberi tenaga pada tiga buah volt meter yang menunjukkan tegangan fasa ke tanah, dan dari belitan open delta dapat digunakan untuk mengoperasikan satu tanda alarm.

Bila suatu gangguan menetap tidak bisa padam sendiri ada dua cara untuk menghilangkan gangguan tersebut, yaitu :

1. Dengan memasang rele otomatis yang mengakibatkan terjadinya pembukaan pada pemutusan daya yang terdekat dengan titik gangguan.
2. Membiarkan gangguan tersebut untuk beberapa waktu, sementara mencari letak gangguan kemudian mengisolirnya untuk diperbaiki.

6.7.3 Alat Penghubung Singkat Kumparan Petersen

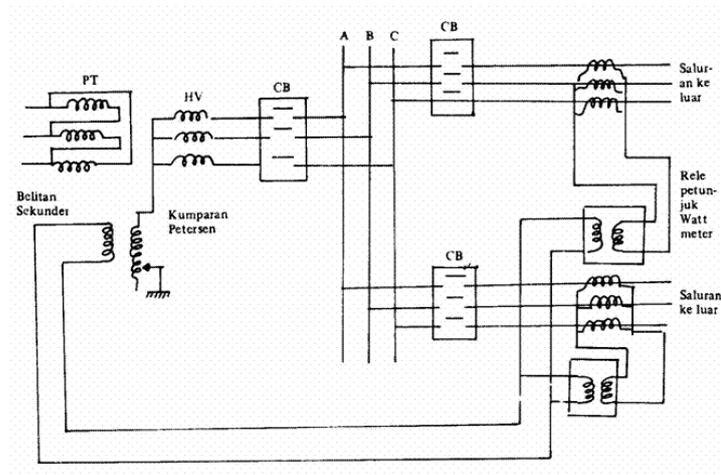
Suatu metode untuk memberikan pembukaan pada bagian yang terganggu bilamana terjadi gangguan tanah yang menetap pada sistem transmisi adalah dengan membuat suatu hubung singkat pada kumparan petersen melalui suatu resistor yang bertahanan rendah. Apabila setelah lewat waktu yang telah ditetapkan gangguan itu masih belum hilang, maka kumparan petersen itu dihubung singkat, seperti ditunjukkan pada gambar 7.9. Sehingga dengan menghubungkan singkat kumparan petersen diperoleh arus yang cukup besar untuk menggerakkan rele.

6.7.4 Penunjukan Saluran Yang Terganggu dan Lokasi Gangguan

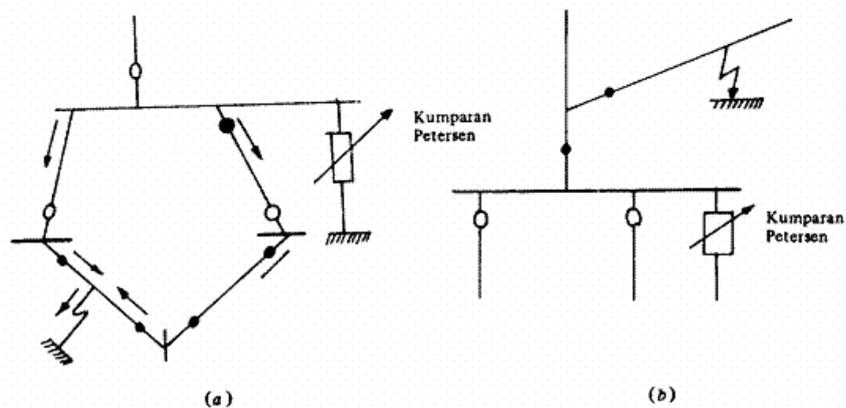
Suatu metode untuk menunjukan saluran mana yang terganggu bila sistem mempunyai banyak saluran diperlihatkan oleh gambar 7.10, dimana rele yang dipakai adalah rele tipe watt-meter. Kumparan arus dari rele ini diberi tenaga oleh arus residu dari trafo arus dari ketiga fasa dan kumparan tegangan dari belitan sekunder dari kumparan petersen. Jika rele ditempatkan pada gardu induk yang jauh dari kumparan petersen, kumparan tegangan diberi daya dari kumparan tegangan residu dari suatu trafo yang dihubung pada sistem.

Seperti diketahui dalam jala-jala dari suatu sistem yang terisolir atau yang memakai kumparan petersen, arus gangguan kapasitif atau arus gangguan residu mengalir dari titik gangguan ke jala-jala. Dengan demikian gangguan itu dapat dilokalisir secara pasti dengan

menentukan arah alirannya oleh rele arah gangguan tanah. Untuk maksud ini dipasang rele-rele pada ujung-ujung dari saluran-saluran ke luar.

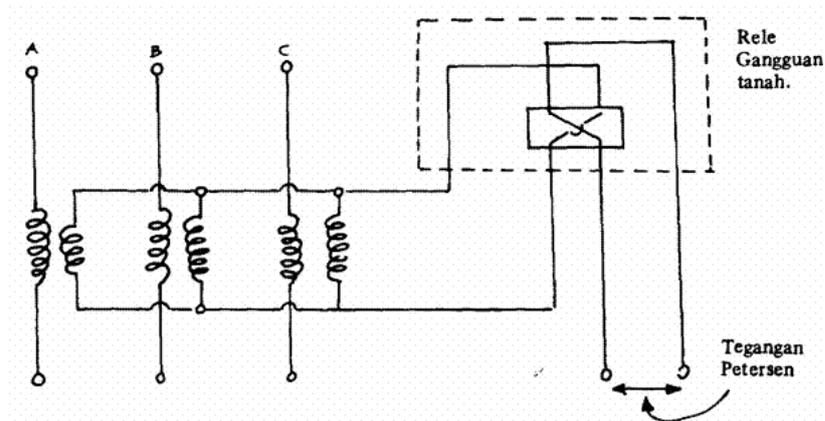


Gambar 6.10. Metode untuk menunjukan saluran yang terganggu pada sistem yang diketanahkan dengan kumparan petersen



Gambar 6.11.a. Penunjukan gangguan tanah pada jala-jala berbentuk mesh Gambar 6.11.b. Penunjukan gangguan tanah pada cabang.

Di dalam jala-jala berbentuk mesh rele gangguan tanah dipasang pada kedua ujung saluran. Pada saluran yang terganggu kedua rele bekerja, sedang pada saluran yang tidak terganggu hanya sebuah rele bekerja, yaitu rele dimana arus meninggalkan rele tersebut, seperti pada gambar 6.11.a. Pada cabang dari saluran hanya pada titik penyambungan yang bekerja, seperti pada gambar 6.11.b.



Gambar 7.12. Hubungan dari rele gangguan tanah pada trafo arus dalam suatu rangkaian penjumlahan

Rele-rele itu di desain sebagai rele daya (*earth leakage relay*). Kumparan tegangan dari rele dihubungkan pada titik terbuka dari kumparan yang terhubung delta dari suatu trafo tegangan. Kumparan arus diberi tenaga oleh arus residu atau arus gangguan tanah dengan bantuan trafo arus atau dari suatu hubungan penjumlahan tiga buah trafo arus dalam konduktor, seperti pada gambar 6.12. Rele gangguan tanah harus diatur untuk kondisi dari sistem dan harus diatur dengan pertolongan percobaan gangguan tanah (*earth fault test*).

6.8 PROTEKSI UNTUK MELOKALISIR TITIK GANGGUAN TANAH

Arus gangguan tanah bisa sangat kecil disebabkan panjangnya saluran seperti pada jala-jala pedesaan (*rural network*) atau karena adanya impedansi pengetanahan dan karena keadaan pengetanahan yang sangat jelek. Arus gangguan mungkin bisa lebih kecil daripada penyetulan minimum yang umum digunakan pada rele gangguan tanah dari jenis induksi.

Oleh karena itu guna mengetahui adanya gangguan diperlukan suatu bentuk proteksi yang lebih sensitif, yang dapat bekerja pada arus gangguan tanah, meskipun hanya sebesar 5 – 10 ampere.

Didalam sistem transmisi yang menggunakan kumparan petersen, apabila kumparan ini ditala sempurna, maka arus gangguan ini hanya terdiri dari komponen rugi-rugi dan beberapa harmonis tinggi. Harmonis-harmonis ini dapat diabaikan sebab pengaruhnya pada rele gangguan tanah tidak begitu penting. Arus gangguan tanah ini menjadi tidak berbahaya lagi, sehingga sistem dapat beroperasi terus pada keadaan gangguan yang menetap. Tetapi keadaan ini tidak boleh dibiarkan terlalu lama karena dapat berkembang menjadi gangguan dua fasa ke tanah.

Rele arus bocor (*earth leakage relay*) digunakan pada sistem radial untuk memberikan tanda bagi saluran yang terganggu atau untuk melepaskannya.

Penggunaan rele tanah tipe watt-meter sudah cukup baik untuk proteksi gangguan tanah. Rele ini akan memberikan suatu penunjukan bagi saluran yang terganggu. Rele tanah tipe watt-meter ini digerakan oleh tegangan netral ke tanah dan arus residu. Sensitivitasnya dipengaruhi oleh tahanan ke tanah pada titik gangguan.

6.9 PENGARUH TAHANAN KONTAK PADA TITIK GANGGUAN BAGI OPERASI DARI RELE ARUS BOCOR

Telah diketahui bahwa arus gangguan tidak berubah banyak bila penalaan dari kumparan petersen tidak begitu tepat. Pada harga R biasanya lebih besar dibandingkan dengan r . karena itu perubahan arus I hanya kecil saja bila r berubah-ubah (umumnya harga r antara 0 – 1000 ohm).

Dengan demikian rele bekerja pada arus yang tetap. I_r adalah tegangan ke tanah dari konduktor yang terkena gangguan, I_R adalah tegangan netral ke tanah, maka $I_r + I_R = E_{ph}$. Dalam gambar 7.13, terlihat vektor SA terbagi oleh potensial tanah (titik G) dalam perbandingan $R : r = SG : AG$.

Karena r kecil dibandingkan dengan R , maka dengan adanya kumparan petersen dapat dinyatakan sebagai pengurangan tegangan ke tanah dari konduktor yang terganggu. Pada sistem yang tidak ditanahkan, arus gangguan I_{FG} adalah :

$$I_{FG} = \frac{E_{ph}}{\left(r^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}\right)^{1/2}} \quad (6.5)$$

Dan tegangan ke tanah adalah $I_{FG} r$. Disini r diabaikan sebab pengaruhnya kecil.

Sebagai contoh bila arus gangguan tanah dari sistem transmisi 25 KV : $I_{FG} = 20$ amper, dimana $E_{ph} = 14,4$ KV dan $\frac{1}{\omega C} = 720$ ohm, dan bila $r = 720$ ohm, tegangan ke tanah dari konduktor yang terganggu menjadi :

$$I_{FG} r = \frac{E_{ph}}{\sqrt{2}} = 10,2 \text{ kV}$$

Sekarang bila sistem itu diberi kumparan petersen yang ditala sempurna, dimana $R = 7.200$ ohm, maka $I = 2$ amper.

Tegangan ke tanah dari konduktor yang terganggu menjadi hanya :

$$I_{FG} \times \frac{r}{R+r} = 14.000 \times \frac{720}{7200+720} = 1.310 \text{ Volt}$$

Dan ini relatif kecil.

Telah dikatakan diatas bahwa tegangan netral ke tanah dipakai untuk polarisasi dari rele arus bocor. Pada sistem yang diketanahkan langsung nilainya sama dengan tegangan fasa dan hampir sama besarnya dengan tegangan fasa untuk sistem dengan kumparan petersen.

Misalnya dalam contoh tadi, tegangan netral ke tanah menjadi :

$$SG = SA - AG = 14.400 - 1.310 \text{ atau}$$

$$SG = 13.090 \text{ Volt}$$

Dimana vektor :

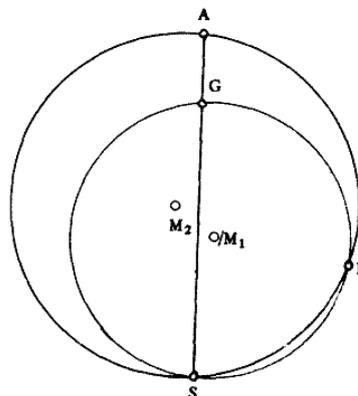
SA = tegangan fasa

AG = tegangan ke tanah dari konduktor yang terhubung ke tanah

Jadi pada umumnya diperoleh :

$$IR = E_{ph} \times \frac{R}{R+r} \approx E_{ph} \left(1 - \frac{r}{R} \right) \quad (6.6)$$

Perbandingan r/R biasanya kecil sekali. Ini berarti bahwa rele arus bocor pada sistem dengan kumparan petersen akan bekerja pada suatu tegangan yang agak konstan.



Gambar 6.13. Diagram lingkaran

Lingkaran M_1 : pergeseran titik netral bila kumparan petersen ada.

Lingkaran M_2 : pergeseran titik netral bila kumparan petersen lepas dan bilaman r berubah-ubah.

Pada gambar 7.13 lingkaran yang lebih kecil dengan pusat M_1 adalah diagram untuk tegangan netral ke tanah dan tegangan fasa ke tanah bila kumparan petersen digunakan, dimana penyetelan penalaannya diubah-ubah oleh L yang berubah-ubah, sementara C , r dan R tetap.

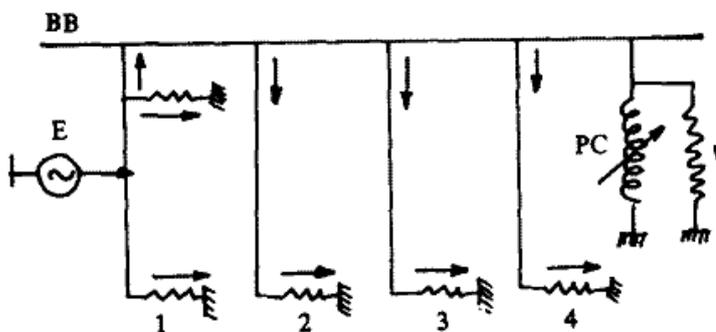
Kedudukan pada penalaan yang sempurna terletak pada titik G , oleh karena itu $AG : DG = r : R$. perpotongan dari dua lingkaran ini di titik P , memberikan tegangan bila kumparan petersen dibuka. Lingkaran yang lebih besar dengan pusat M_2 adalah diagram untuk tegangan-tegangan netral dan fasa ke tanah bila kumparan petersen tidak dipakai. Disini r berubah dan R dan C konstan.

Lingkaran M_1 terbagi oleh SG dalam dua bagian, dimana semua titik sebelah kanan SG adalah pada keadaan kompensasi kurang. Pada semua titik lingkaran sebelah kiri dari SG adalah keadaan kompensasi lebih. Keadaan resonansi berada di titik G . Titik P terletak dibagian kanan dari lingkaran, karena kumparan petersen terbuka pada titik ini.

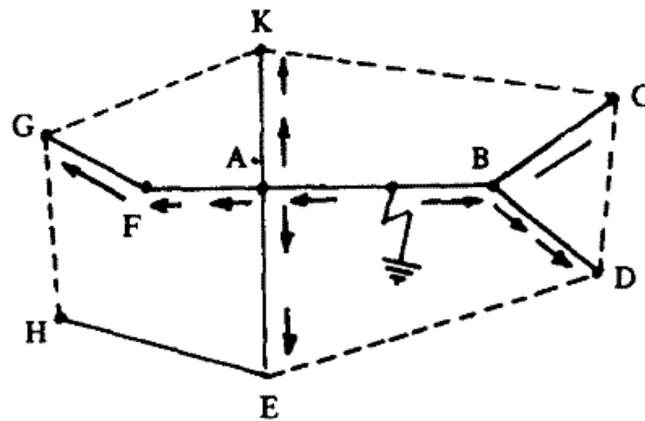
6.10 RELE ARUS BOCOR DAN PRINSIP KERJANYA

Dalam jala-jala yang netralnya terisolir arus kapasitif pada waktu gangguan tanah mempunyai harga yang besar, sedangkan pada sistem yang menggunakan kumparan petersen arus itu kecil, dan hanya terdiri-dari komponen rugi-rugi bila di tala sempurna.

Jadi untuk mendapatkan rele yang selektif rele tersebut harus bekerja berdasarkan komponen rugi-rugi dari arus residu. Ini berarti rele tersebut harus bekerja pada persamaan $E I \cos \theta$, dimana E adalah tegangan netral ke tanah dan $I \cos \theta$ adalah komponen rugi-rugi dari arus residu.



Gambar 6.14. a. jala-jala radial dengan distribusi dari komponen rugi-rugi arus residu. Gangguan pada saluran 1.
 Gambar 6.14. a. jala-jala radial dengan distribusi dari komponen rugi-rugi arus residu. Gangguan pada saluran 1.



Gambar 6.14. b. Distribusi komponen rugi-rugi arus residu pada jala-jala interkoneksi. Gangguan tanah pada saluran AB.

Operasi dari rele arus bocor dalam sistem dengan kumparan petersen ditunjukkan pada gambar 6.14.a. untuk jala-jala radial yang mempunyai 4 buah saluran. *BB* adalah rel dan *PC* adalah kumparan petersen. Tahanan menggambarkan rugi-rugi sistem yang terbagi secara merata sepanjang jala-jala. Bila gangguan tanah terjadi pada saluran 1, distribusi dari arus rugi-rugi ditunjukkan oleh tanda panah. Terlihat bahwa arahnya sama pada semua saluran yang tak terganggu, yaitu menjauhi rel dan berlawanan dengan arah arus pada saluran 1 yang terkena gangguan itu. Dari keadaan ini rele dapat mendeteksi saluran yang terganggu itu.

Begitu juga terhadap operasi rele pada jala-jala yang berbentuk mesh atau interkoneksi, arus rugi-rugi mempunyai harga yang paling besar pada saluran yang terganggu, dan sangat mudah untuk menentukan bagian yang terganggu, seperti pada gambar 6.14.b.

Misalkan bila gangguan terjadi pada saluran *AB*, distribusi dari arus rugi-rugi ditunjukkan oleh tanda panah, dan rele arus bocor akan bekerja pada kedua sisi ujung dari saluran yang terganggu itu, sementara pada saluran-saluran lain rele yang bekerja hanya pada 1 ujung saja, misalnya pada *BC*, hanya pada rele *C* yang bekerja, jadi dapat menunjukkan arah dimana gangguan itu telah terjadi.

Dengan demikian rele arus bocor dapat menunjukkan dengan cepat dimana gangguan tanah telah terjadi, sehingga saluran yang terkena gangguan dapat diisolir guna perbaikan seperlunya. Dalam contoh diatas, hanya saluran *AB* saja yang diputuskan sehingga tidak mengganggu bagian yang lain dari sistem.

Sebetulnya kumparan arus dari rele arus bocor tak perlu dilindungi terhadap kerusakan oleh arus yang terlampau besar, sebab tak ada arus lebih yang terjadi pada sistem yang memakai kumparan petersen.

Pada jala-jala yang disuplay oleh pusat pembangkit dengan kapasitas besar, diperlukan rele pengaman berupa rele arus lebih yang dipasang paralel dengan kumparan dari rele pengaman berupa rele arus lebih yang dipasang paralel dengan kumparan dari rele arus bocor yang akan melindunginya terhadap kerusakan oleh arus hubung singkat yang besar dalam hal terjadi gangguan dua fasa ke tanah.

Sebagaimana tersebut diatas rele arus bocor itu adalah dari tipe watt-mater yang disebut *watt metric ground fault relay* yang bekerja berdasarkan tegangan netral ke tanah dan arus residu. Kumparan arusnya dibuat lebih banyak lilitan dengan kawat yang lebih halus agar lebih menambah sensitivitasnya.

6.10 DISTRIBUSI KOMPONEN WATT DARI ARUS GANGGUAN RESIDU

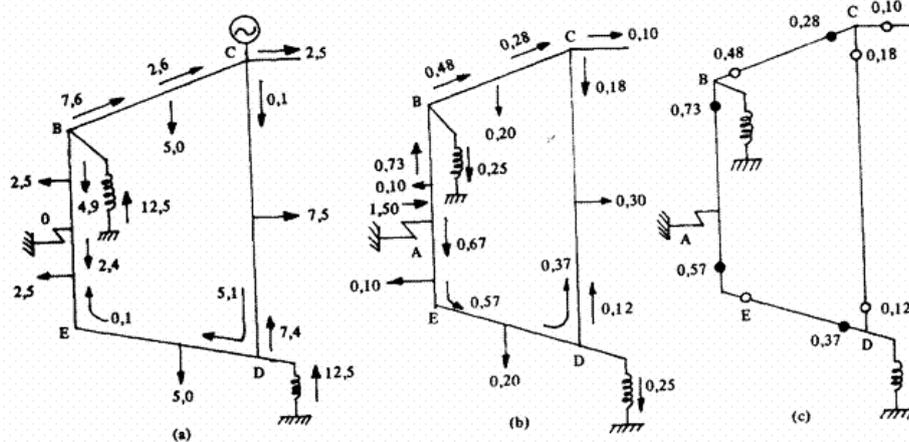
Sebagaimana diatas, komponen arus rugi-rugi dari arus residu bisa diharapkan untuk menunjukan lokasi dari gangguan. Jadi perlu diketahui distribusi dari komponen watt arus tersebut, agar dapat ditentukan kedudukan dari rele-rele.

Pada gambar 6.15 adalah salah satu contoh tentang gambaran dari distribusi komponen reaktif dan komponen watt dari arus gangguan dalam suatu sistem yang ditala sempurna. Pada gambar 6.15.a. memperlihatkan distribusi komponen reaktif. Terlihat bahwa arus urutan nol per fasa dengan arus gangguan kapasitif sama dengan 25 A, diukur dalam 4 buah gardu hubung yang berubah-ubah antara $0,1/3 = 0,033$ dan $7,6/3 = 2,53$ A dan tidak tergantung dari lokasi gangguan.

Pada gambar 7.15.b. adalah distribusi dari komponen rugi-rugi daya (diambil = 6% dari arus gangguan kapasitif, termasuk 2% bagi rugi-rugi kumparan petersen). Distribusi dari komponen watt itu ditunjukkan secara uniform oleh tanda anak panah pada bagian tengah-tengah dari masing-masing seksi.

Untuk suatu lokasi tertentu dari suatu gangguan, komponen watt dari arus urutan nol diukur pada gardu hubung, berubah-ubah antara $\frac{0,28}{3} = 0,093$ dan $\frac{0,73}{3} = 0,243$ A. Arus total yang kembali melalui gangguan = 1,5 A dengan tanda panah menjauhi titik gangguan. Terlihat bahwa pada seksi yang terkena gangguan, kedua ujung dari seksi tersebut mempunyai tanda panah menuju rel.

Bila rele arah digunakan disertai dengan suatu tanda bendera (bendera jatuh bila arus menuju rel), maka bila aliran sesuai dengan yang telah ditentukan, indikasi rele dapat ditandai dalam diagram jala-jala seperti dalam gambar 6.15.c. Dengan mudah kita dapat mengatur *sense of response* dari rele itu, sedemikian rupa sehingga rele-rele dengan respons positif (bendera jatuh) menunjuk kearah gangguan. Seksi yang berisi gangguan tersebut akan dibedakan dengan bekerjanya rele positif pada kedua ujungnya.



Gambar 6.15. Contoh distribusi arus urutan nol dalam sistem yang diketanahkan dengan kumparan petersen dan ditala sempurna.

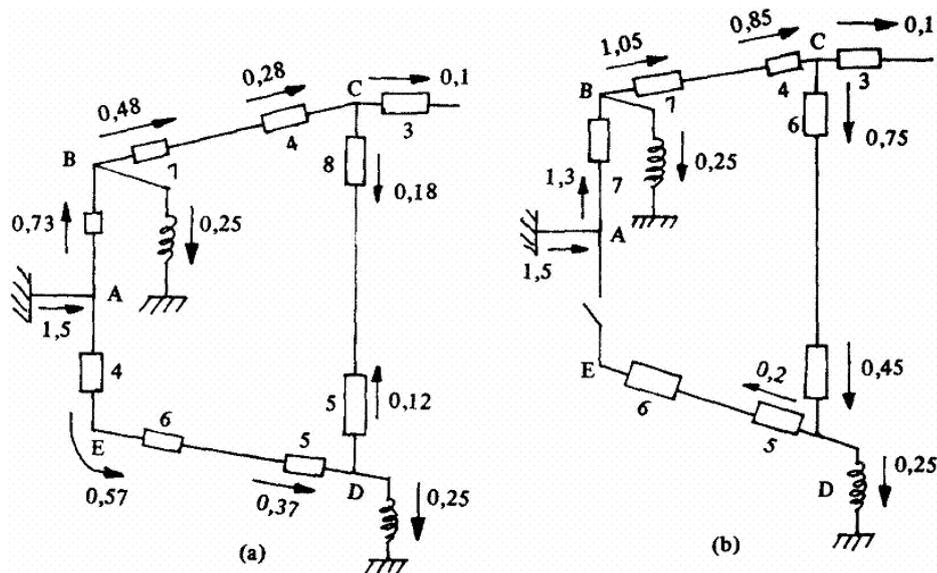
- b. Distribusi dari komponen reaktif
- c. Distribusi dari komponen watt
- d. Penunjukan dari rele gangguan tanah

6.11 KOORDINASI RELE GANGGUAN TANAH TIPE WATT METER

Ada dua tipe utaa dari rele watt-meter yang digunakan dalam sistem yang diketanahkan dengan kumparan petersen, yang satu berdasarkan pada *Ferraris induction disc* dan yang lain berdasarkan prinsip dinamometer.

Pada gambar 6.16 adalah salah satu contoh dalam menempatkan *time grading* dari sistem gambar 6.15. Rele yang pertama kali membuka adalah rele pada gardu *E* yang disetel pada 4 detik. Setelah ring itu terbuka pada gardu *E*, distribusi dari komponen watt menjadi seperti yang terlihat pada gambar 6.16.b. Tiga detik kemudian saluran yang terganggu itu akan diisolir oleh rele pada gardu *B*.

Rele pada gardu *C* yang disetel untuk 4 detik tidak akan bekerja karena gangguan terjadi bukan pada seksinya sehingga arus gangguan yang diterima pada rele *C* tidak cukup seperti yang dibutuhkan. Setelah pemutus daya pada gardu *E* terbuka, barulah rele pada gardu *C* akan bekerja dengan keterlambatan waktu yang dimilikinya yaitu 4 detik kemudian atau menjadi 8 detik sejak dari mulai gangguan, seperti pada gambar 6.16a. Tetapi sebelum rele pada gardu *C* bekerja, rele pada gardu *B* pada sisi gangguan telah bekerja lebih dahulu yaitu 7 detik kemudian setelah gangguan.



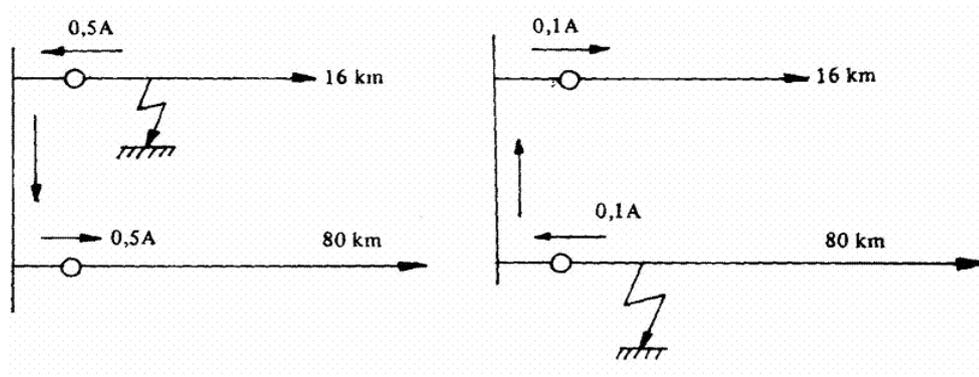
Gambar 6.16. Contoh penentuan kedudukan dari rele arus bocor untuk gambar 6.15.
 a. Ring tertutup
 b. Ring terbuka oleh pemutus daya

6.13 HAL-HAL YANG MENYEBABKAN KETIDAKBENARAN OPERASI DARI RELE GANGGUAN TANAH

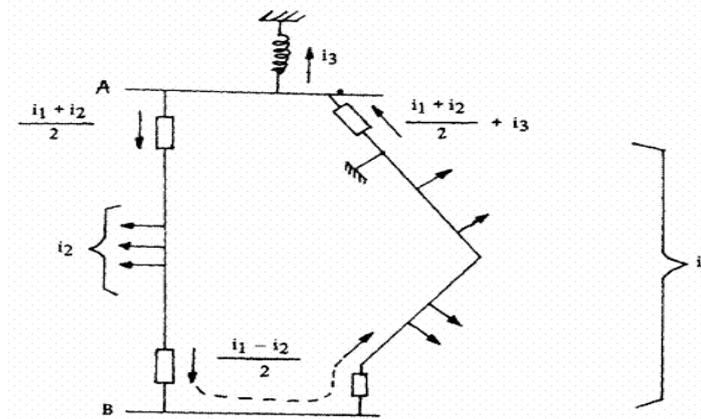
Ada beberapa keadaan dimana rele arah gangguan tanah mungkin bisa gagal dalam operasinya, atau mungkin bisa memberikan penunjukan yang salah walaupun trafo arus atau trafo tegangan mempunyai kesalahan yang dapat diabaikan, seperti :

1. Panjang dari saluran yang dilindungi belum menjamin kebenaran operasi yang pasti. Gambar 6.17 memperlihatkan suatu sistem yang terdiri-dari dua buah saluran dengan panjang yang sangat berbeda. Kumpanan petersen berada pada ujung yang jauh berada dari saluran yang terpanjang. Apabila gangguan tanah yang terjadi pada saluran yang lebih pendek, kumpanan petersen dianggap cukup menghasilkan kopel untuk mengerjakan rele. Tetapi bila gangguan itu terjadi pada saluran yang lebih panjang, mungkin tidak ada penunjukan pada kedua rele.
2. Jangan dianggap bahwa untuk segala keadaan, rele-rele pada kedua ujung dari saluran yang terganggu menunjukkan aliran daya dari gangguan menuju rel. gambar 6.18 merepresentasikan suatu hal dimana dalam salah satu dari dua rele, aliran dayanya terbalik. Dua saluran yang berbeda panjangnya menghubungkan dua gardu A dan pada sistem itu. Kumpanan petersen ditempatkan pada A (distribusi komponen watt ditunjukkan dalam gambar dan rele dari saluran yang terganggu dalam gardu B ditahan oleh arus $\frac{1}{2}(i_1 - i_2)$).

3. Bila kedua saluran dalam gambar 6.18 sama panjangnya yang membuat suatu hubungan rangkaian ganda antara *A* dan *B*, masih ada sejumlah kejadian yang sama yang mungkin bisa menyebabkan operasi dari beberapa rele terbalik. Misalnya bila induktansi dari beberapa fasa tak sama atau tak seimbang oleh transposisi yang kurang sempurna, arus total dari beban yang simetris yang ditransmisikan dari *A* ke *B* akan tidak terbagi sama antara kedua rangkaian itu dan distribusi arus beban antara kedua saluran akan berubah dari fasa ke fasa, kecuali jika konfigurasi jarak dari konduktor fasa yang selaras adalah sama pada kedua rangkaian. Akibatnya adalah jumlah ketiga arus beban yang sama dengan nol untuk seluruh transmisi, tidak sama dengan nol pada suatu transmisi. Keadaan yang ekstrim dari ketidakseimbangan dari distribusi arus beban terjadi bilamana salah satu seksi dari jala-jala terkena gangguan tanah yang disebabkan sebuah konduktor yang putus, dengan hanya satu ujung saja yang terkena tanah.
4. Rele arah gangguan tanah akan gagal memberikan penunjukan yang tepat dari letak gangguan dalam kejadian *Cross Country Fault*.



Gambar 6.17 Gangguan tanah dalam jala-jala yang mempunyai dua saluran yang berbeda panjang



Gambar 6.18. Suatu hal dimana rele arah gangguan tanah tidak benar responsnya.

6.8 PROTEKSI UNTUK MELOKALISIR TITIK GANGGUAN TANAH

Arus gangguan tanah bisa sangat kecil disebabkan panjangnya saluran seperti pada jala-jala pedesaan (*rural network*) atau karena adanya impedansi pengetanahan dan karena keadaan pengetanahan yang sangat jelek. Arus gangguan mungkin bisa lebih kecil daripada penyetelan minimum yang umum digunakan pada rele gangguan tanah dari jenis induksi.

Oleh karena itu guna mengetahui adanya gangguan diperlukan suatu bentuk proteksi yang lebih sensitif, yang dapat bekerja pada arus gangguan tanah, meskipun hanya sebesar 5 – 10 ampere.

Didalam sistem transmisi yang menggunakan kumparan Petersen, apabila kumparan ini ditala sempurna, maka arus gangguan ini hanya terdiri dari komponen rugi-rugi dan beberapa harmonis tinggi. Harmonis-harmonis ini dapat diabaikan sebab pengaruhnya pada rele gangguan tanah tidak begitu penting. Arus gangguan tanah ini menjadi tidak berbahaya lagi, sehingga sistem dapat beroperasi terus pada keadaan gangguan yang menetap. Tetapi keadaan ini tidak boleh dibiarkan terlalu lama karena dapat berkembang menjadi gangguan dua fasa ke tanah.

Rele arus bocor (*earth leakage relay*) digunakan pada sistem radial untuk memberikan tanda bagi saluran yang terganggu atau untuk melepaskannya.

Penggunaan rele tanah tipe watt-meter sudah cukup baik untuk proteksi gangguan tanah. Rele ini akan memberikan suatu penunjukan bagi saluran yang terganggu. Rele tanah tipe watt-meter ini digerakan oleh tegangan netral ke tanah dan arus residu. Sensitivitasnya dipengaruhi oleh tahanan ke tanah pada titik gangguan.

6.9 PENGARUH TAHANAN KONTAK PADA TITIK GANGGUAN BAGI OPERASI DARI RELE ARUS BOCOR

Telah diketahui bahwa arus gangguan tidak berubah banyak bila penalaan dari kumparan petersen tidak begitu tepat. Pada harga R biasanya lebih besar dibandingkan dengan r . karena itu perubahan arus I hanya kecil saja bila r berubah-ubah (umumnya harga r antara 0 – 1000 ohm).

Dengan demikian rele bekerja pada arus yang tetap. I_r adalah tegangan ke tanah dari konduktor yang terkena gangguan, IR adalah tegangan netral ke tanah, maka $IR + I_r = E_{ph}$. Dalam gambar 7.13, terlihat vektor SA terbagi oleh potensial tanah (titik G) dalam perbandingan $R : r = SG : AG$.

Karena r kecil dibandingkan dengan R , maka dengan adanya kumparan petersen dapat dinyatakan sebagai pengurangan tegangan ke tanah dari konduktor yang terganggu. Pada sistem yang tidak dketanahkan, arus gangguan I_{FG} adalah :

$$I_{FG} = \frac{E_{ph}}{\left(r^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}\right)^{1/2}} \quad (6.5)$$

Dan tegangan ke tanah adalah $I_{FG} r$. Disini r diabaikan sebab pengaruhnya kecil.

Sebagai contoh bila arus gangguan tanah dari sistem transmisi 25 KV : $I_{FG} = 20$ amper, dimana $E_{ph} = 14,4$ KV dan $\frac{1}{\omega C} = 720$ ohm, dan bila $r = 720$ ohm, tegangan ke tanah dari konduktor yang terganggu menjadi :

$$I_{FG} r = \frac{E_{ph}}{\sqrt{2}} = 10,2 \text{ kV}$$

Sekarang bila sistem itu diberi kumparan petersen yang ditala sempurna, dimana $R = 7.200$ ohm, maka $I = 2$ amper.

Tegangan ke tanah dari konduktor yang terganggu menjadi hanya :

$$I_{FG} \times \frac{r}{R + r} = 14.000 \times \frac{720}{7200 + 720} = 1.310 \text{ Volt}$$

Dan ini relatif kecil.

Telah dikatakan diatas bahwa tegangan netral ke tanah dipakai untuk polarisasi dari rele arus bocor. Pada sistem yang dketanahkan langsung nilainya sama dengan tegangan fasa dan hampir sama besarnya dengan tegangan fasa untuk sistem dengan kumparan petersen.

Misalnya dalam contoh tadi, tegangan netral ke tanah menjadi :

$$SG = SA - AG = 14.400 - 1.310 \text{ atau}$$

$$SG = 13.090 \text{ Volt}$$

Dimana vektor :

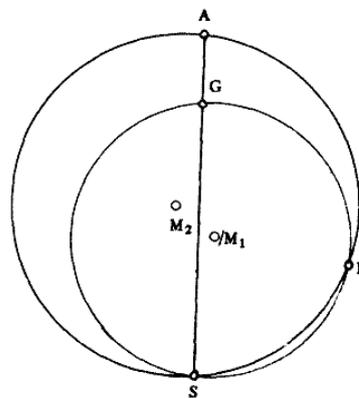
SA = tegangan fasa

AG = tegangan ke tanah dari konduktor yang terhubung ke tanah

Jadi pada umumnya diperoleh :

$$IR = E_{ph} \times \frac{R}{R+r} \approx E_{ph} \left(1 - \frac{r}{R}\right) \quad (6.6)$$

Perbandingan r/R biasanya kecil sekali. Ini berarti bahwa rele arus bocor pada sistem dengan kumparan petersen akan bekerja pada suatu tegangan yang agak konstan.



Gambar 6.13. Diagram lingkaran

Lingkaran M_1 : pergeseran titik netral bila kumparan petersen ada.

Lingkaran M_2 : pergeseran titik netral bila kumparan petersen lepas dan bilaman r berubah-ubah.

Pada gambar 7.13 lingkaran yang lebih kecil dengan pusat M_1 adalah diagram untuk tegangan netral ke tanah dan tegangan fasa ke tanah bila kumparan petersen digunakan, dimana penyetelan penalaannya diubah-ubah oleh L yang berubah-ubah, sementara C , r dan R tetap.

Kedudukan pada penalaan yang sempurna terletak pada titik G , oleh karena itu $AG : DG = r : R$. perpotongan dari dua lingkaran ini di titik P , memberikan tegangan bila kumparan petersen dibuka. Lingkaran yang lebih besar dengan pusat M_2 adalah diagram untuk tegangan-tegangan netral dan fasa ke tanah bila kumparan petersen tidak dipakai. Disini r berubah dan R dan C konstan.

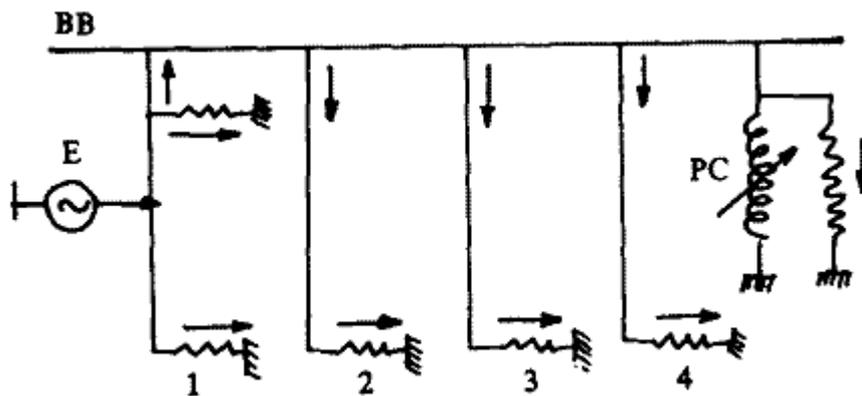
Lingkaran M_1 terbagi oleh SG dalam dua bagian, dimana semua titik sebelah kanan SG adalah pada keadaan kompensasi kurang. Pada semua titik lingkaran sebelah kiri dari

SG adalah keadaan kompensasi lebih. Keadaan resonansi berada di titik G. Titik P terletak dibagian kanan dari lingkaran, karena kumparan petersen terbuka pada titik ini.

6.10 RELE ARUS BOCOR DAN PRINSIP KERJANYA

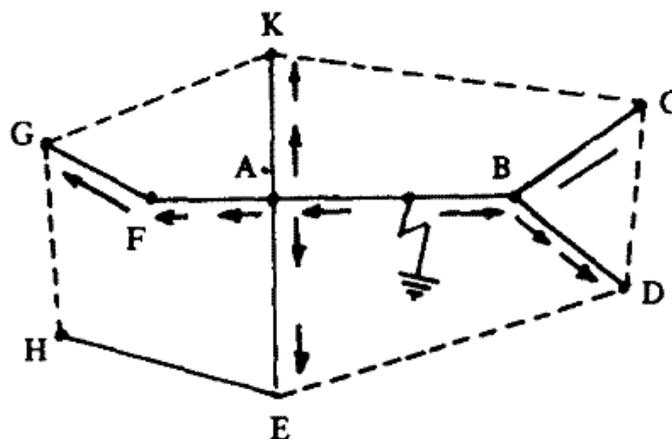
Dalam jala-jala yang netralnya terisolir arus kapasitif pada waktu gangguan tanah mempunyai harga yang besar, sedangkan pada sistem yang menggunakan kumparan petersen arus itu kecil, dan hanya terdiri-dari komponen rugi-rugi bila di tala sempurna.

Jadi untuk mendapatkan rele yang selektif rele tersebut harus bekerja berdasarkan komponen rugi-rugi dari arus residu. Ini berarti rele tersebut harus bekerja pada persamaan $E I \cos \theta$, dimana E adalah tegangan netral ke tanah dan $I \cos \theta$ adalah komponen rugi-rugi dari arus residu.



Gambar 6.14. a.

jala-jala radial dengan distribusi dari komponen
 Gambar 6.14. a. jala-jala radial dengan distribusi dari komponen
 rugi-rugi arus residu. Gangguan pada saluran 1.



Gambar 6.14. b. Distribusi komponen rugi-rugi arus residu pada jala-jala interkoneksi. Gangguan tanah pada saluran AB.

Operasi dari rele arus bocor dalam sistem dengan kumparan petersen ditunjukkan pada gambar 6.14.a. untuk jala-jala radial yang mempunyai 4 buah saluran. *BB* adalah rel dan *PC* adalah kumparan petersen. Tahanan menggambarkan rugi-rugi sistem yang terbagi secara merata sepanjang jala-jala. Bila gangguan tanah terjadi pada saluran 1, distribusi dari arus rugi-rugi ditunjukkan oleh tanda panah. Terlihat bahwa arahnya sama pada semua saluran yang tak terganggu, yaitu menjauhi rel dan berlawanan dengan arah arus pada saluran 1 yang terkena gangguan itu. Dari keadaan ini rele dapat mendeteksi saluran yang terganggu itu.

Begitu juga terhadap operasi rele pada jala-jala yang berbentuk mesh atau interkoneksi, arus rugi-rugi mempunyai harga yang paling besar pada saluran yang terganggu, dan sangat mudah untuk menentukan bagian yang terganggu, seperti pada gambar 6.14.b.

Misalkan bila gangguan terjadi pada saluran *AB*, distribusi dari arus rugi-rugi ditunjukkan oleh tanda panah, dan rele arus bocor akan bekerja pada kedua sisi ujung dari saluran yang terganggu itu, sementara pada saluran-saluran lain rele yang bekerja hanya pada 1 ujung saja, misalnya pada *BC*, hanya pada rele *C* yang bekerja, jadi dapat menunjukkan arah dimana gangguan itu telah terjadi.

Dengan demikian rele arus bocor dapat menunjukkan dengan cepat dimana gangguan tanah telah terjadi, sehingga saluran yang terkena gangguan dapat diisolir guna perbaikan seperlunya. Dalam contoh diatas, hanya saluran *AB* saja yang diputuskan sehingga tidak mengganggu bagian yang lain dari sistem.

Sebetulnya kumparan arus dari rele arus bocor tak perlu dilindungi terhadap kerusakan oleh arus yang terlampau besar, sebab tak ada arus lebih yang terjadi pada sistem yang memakai kumparan petersen.

Pada jala-jala yang disupply oleh pusat pembangkit dengan kapasitas besar, diperlukan rele pengaman berupa rele arus lebih yang dipasang paralel dengan kumparan dari rele pengaman berupa rele arus lebih yang dipasang paralel dengan kumparan dari rele arus bocor yang akan melindunginya terhadap kerusakan oleh arus hubung singkat yang besar dalam hal terjadi gangguan dua fasa ke tanah.

Sebagaimana tersebut diatas rele arus bocor itu adalah dari tipe *watt-meter* yang disebut *watt metric ground fault relay* yang bekerja berdasarkan tegangan netral ke tanah dan arus residu. Kumparan arusnya dibuat lebih banyak lilitan dengan kawat yang lebih halus agar lebih menambah sensitivitasnya.

6.11 ISTRIBUSI KOMPONEN WATT DARI ARUS GANGGUAN RESIDU

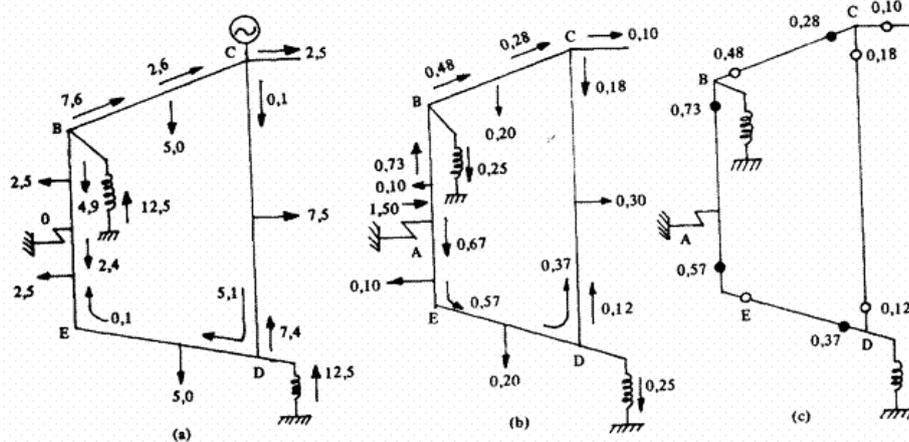
Sebagaimana diatas, komponen arus rugi-rugi dari arus residu bisa diharapkan untuk menunjukan lokasi dari gangguan. Jadi perlu diketahui distribusi dari komponen watt arus tersebut, agar dapat ditentukan kedudukan dari rele-rele.

Pada gambar 6.15 adalah salah satu contoh tentang gambaran dari distribusi komponen reaktif dan komponen watt dari arus gangguan dalam suatu sistem yang ditala sempurna. Pada gambar 6.15.a. memperlihatkan distribusi komponen reaktif. Terlihat bahwa arus urutan nol per fasa dengan arus gangguan kapasitif sama dengan 25 A, diukur dalam 4 buah gardu hubung yang berubah-ubah antara $0,1/3 = 0,033$ dan $7,6/3 = 2,53$ A dan tidak tergantung dari lokasi gangguan.

Pada gambar 7.15.b. adalah distribusi dari komponen rugi-rugi daya (diambil = 6% dari arus gangguan kapasitif, termasuk 2% bagi rugi-rugi kumparan petersen). Distribusi dari komponen watt itu ditunjukkan secara uniform oleh tanda anak panah pada bagian tengah-tengah dari masing-masing seksi.

Untuk suatu lokasi tertentu dari suatu gangguan, komponen watt dari arus urutan nol diukur pada gardu hubung, berubah-ubah antara $\frac{0,28}{3} = 0,093$ dan $\frac{0,73}{3} = 0,243$ A. Arus total yang kembali melalui gangguan = 1,5 A dengan tanda panah menjauhi titik gangguan. Terlihat bahwa pada seksi yang terkena gangguan, kedua ujung dari seksi tersebut mempunyai tanda panah menuju rel.

Bila rele arah digunakan disertai dengan suatu tanda bendera (bendera jatuh bila arus menuju rel), maka bila aliran sesuai dengan yang telah ditentukan, indikasi rele dapat ditandai dalam diagram jala-jala seperti dalam gambar 6.15.c. Dengan mudah kita dapat mengatur *sense of response* dari rele itu, sedemikian rupa sehingga rele-rele dengan respons positif (bendera jatuh) menunjuk kearah gangguan. Seksi yang berisi gangguan tersebut akan dibedakan dengan bekerjanya rele positif pada kedua ujungnya.



Gambar 6.15. Contoh distribusi arus urutan nol dalam sistem yang diketanahkan dengan kumparan petersen dan ditala sempurna.

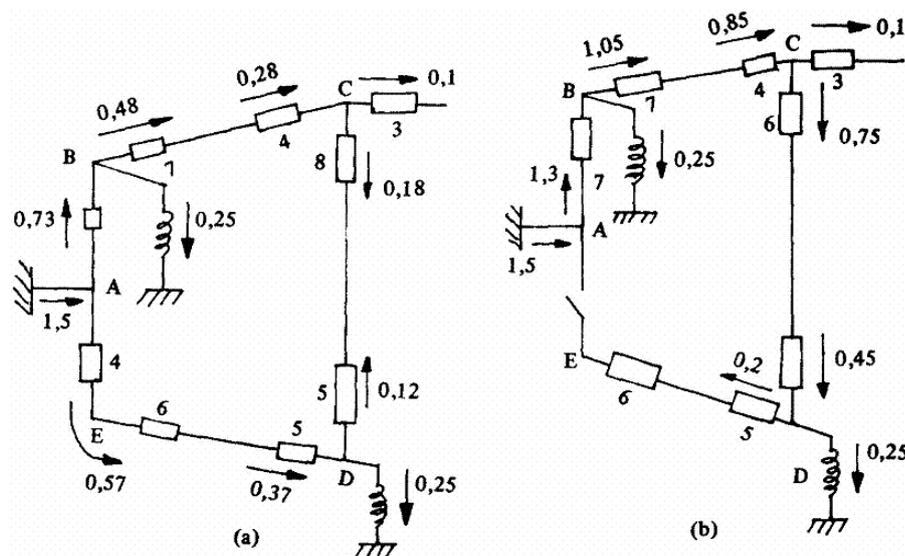
- e. Distribusi dari komponen reaktif
- f. Distribusi dari komponen watt
- g. Penunjukan dari rele gangguan tanah

6.12 KOORDINASI RELE GANGGUAN TANAH TIPE WATT METER

Ada dua tipe utaa dari rele watt-meter yang digunakan dalam sistem yang diketanahkan dengan kumparan petersen, yang satu berdasarkan pada *Ferraris induction disc* dan yang lain berdasarkan prinsip dinamometer.

Pada gambar 6.16 adalah salah satu contoh dalam menempatkan *time grading* dari sistem gambar 6.15. Rele yang pertama kali membuka adalah rele pada gardu *E* yang disetel pada 4 detik. Setelah ring itu terbuka pada gardu *E*, distribusi dari komponen watt menjadi seperti yang terlihat pada gambar 6.16.b. Tiga detik kemudian saluran yang terganggu itu akan diisolir oleh rele pada gardu *B*.

Rele pada gardu *C* yang disetel untuk 4 detik tidak akan bekerja karena gangguan terjadi bukan pada seksinya sehingga arus gangguan yang diterima pada rele *C* tidak cukup seperti yang dibutuhkan. Setelah pemutus daya pada gardu *E* terbuka, barulah rele pada gardu *C* akan bekerja dengan keterlambatan waktu yang dimilikinya yaitu 4 detik kemudian atau menjadi 8 detik sejak dari mulai gangguan, seperti pada gambar 6.16a. Tetapi sebelum rele pada gardu *C* bekerja, rele pada gardu *B* pada sisi gangguan telah bekerja lebih dahulu yaitu 7 detik kemudian setelah gangguan.



Gambar 6.16. Contoh penentuan kedudukan dari rele arus bocor untuk gambar 6.15.

- Ring tertutup
- Ring terbuka oleh pemutus daya

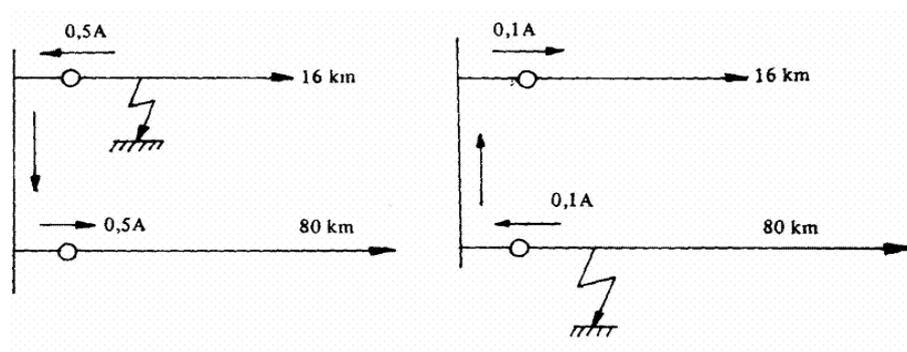
6.13 HAL-HAL YANG MENYEBABKAN KETIDAKBENARAN OPERASI DARI RELE GANGGUAN TANAH

Ada beberapa keadaan dimana rele arah gangguan tanah mungkin bisa gagal dalam operasinya, atau mungkin bisa memberikan penunjukan yang salah walaupun trafo arus atau trafo tegangan mempunyai kesalahan yang dapat diabaikan, seperti :

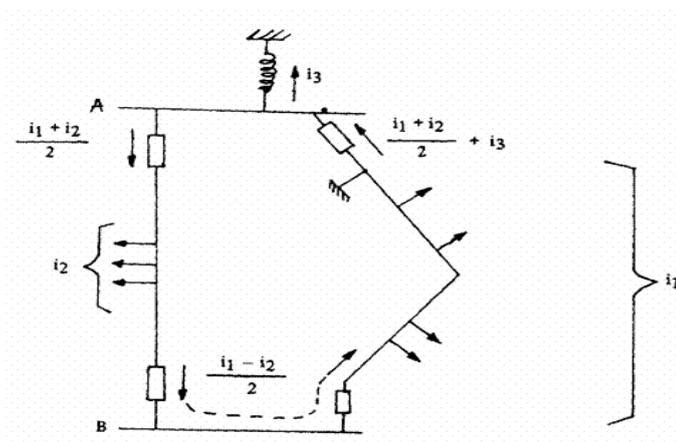
1. Panjang dari saluran yang dilindungi belum menjamin kebenaran operasi yang pasti. Gambar 6.17 memperlihatkan suatu sistem yang terdiri-dari dua buah saluran dengan panjang yang sangat berbeda. Kumputan petersen berada pada ujung yang jauh berada dari saluran yang terpanjang. Apabila gangguan tanah yang terjadi pada saluran yang lebih pendek, kumputan petersen dianggap cukup menghasilkan kopel untuk mengerjakan rele. Tetapi bila gangguan itu terjadi pada saluran yang lebih panjang, mungkin tidak ada penunjukan pada kedua rele.
2. Jangan dianggap bahwa untuk segala keadaan, rele-rele pada kedua ujung dari saluran yang terganggu menunjukkan aliran daya dari gangguan menuju rel. gambar 6.18 merepresentasikan suatu hal dimana dalam salah satu dari dua rele, aliran dayanya terbalik. Dua saluran yang berbeda panjangnya menghubungkan dua gardu A dan pada sistem itu. Kumputan petersen ditempatkan pada A (distribusi komponen watt ditunjukkan dalam gambar dan rele dari saluran yang terganggu dalam gardu B ditahan oleh arus $1/2(i_1 - i_2)$).
3. Bila kedua saluran dalam gambar 6.18 sama panjangnya yang membuat suatu hubungan rangkaian ganda antara A dan B, masih ada sejumlah kejadian yang sama

yang mungkin bisa menyebabkan operasi dari beberapa rele terbalik. Misalnya bila induktansi dari beberapa fasa tak sama atau tak seimbang oleh transposisi yang kurang sempurna, arus total dari beban yang simetris yang ditransmisikan dari A ke B akan tidak terbagi sama antara kedua rangkaian itu dan distribusi arus beban antara kedua saluran akan berubah dari fasa ke fasa, kecuali jika konfigurasi jarak dari konduktor fasa yang selaras adalah sama pada kedua rangkaian. Akibatnya adalah jumlah ketiga arus beban yang sama dengan nol untuk seluruh transmisi, tidak sama dengan nol pada suatu transmisi. Keadaan yang ekstrim dari ketidakseimbangan dari distribusi arus beban terjadi bilamana salah satu seksi dari jala-jala terkena gangguan tanah yang disebabkan sebuah konduktor yang putus, dengan hanya satu ujung saja yang terkena tanah.

4. Rele arah gangguan tanah akan gagal memberikan penunjukan yang tepat dari letak gangguan dalam kejadian *Cross Country Fault*.



Gambar 6.17 Gangguan tanah dalam jala-jala yang mempunyai dua saluran yang berbeda panjang



Gambar 6.18. Suatu hal dimana rele arah gangguan tanah tidak benar responsnya.

7. PROTEKSI TEGANGAN LEBIH

7.1 UMUM

Sampai saat ini untuk melindungi kawat fasa dari sambaran petir telah menggunakan kawat tanah yang dipasang diatas kawat fasa. Apabila terjadi sambaran petir pada kawat fasa maka keadaan ini disebut dengan kegagalan perlindungan (*shielding failure*), dimana kawat tanah gagal melindungi kawat fasa dari sambaran petir. Walaupun untuk mengurangi kegagalan perlindungan pada saluran transmisi telah menggunakan sistem perlindungan sempurna, namun kemungkinan sambaran petir pada kawat fasa masih mungkin terjadi terutama pada menara tension untuk jalur belokan (*aspan*).

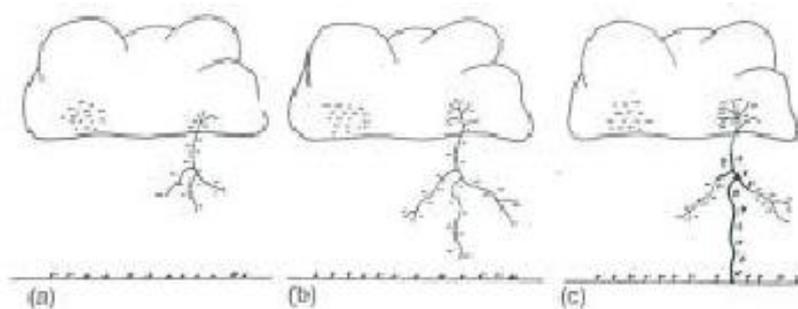
Untuk mengurangi gangguan akibat sambaran petir pada kawat fasa, maka dipasang sistem proteksi tambahan menggunakan elektroda batang penangkal petir yang disebut *lightning mast*. Namun tidak semua menara dapat dilakukan pemasangan lightning masts karena pertimbangan nilai tahanan kaki menara. Penentuan menara yang perlu dipasang *lightning masts* harus dilakukan dengan mempertimbangkan kemungkinan sambaran petir pada menara tersebut dan nilai tahanan kaki menaranya.

7.2 PARAMETER PETIR DAN SALURAN TRANSMISI

7.2.1 Mekanisme Terjadinya Petir

Petir merupakan hasil pemisahan muatan listrik secara alami di dalam awan-awan badai. Di dalam awan terjadi pemisahan muatan dimana beberapa teori menyatakan bahwasanya didalam awan, kristal es bermuatan positif, sedangkan titiktitik air bermuatan negatif. Mekanisme selanjutnya adalah peluahan petir yang diawali dengan pengembangan sambaran perintis (*stepped downward leader*).

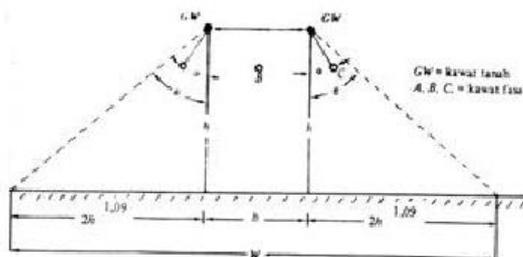
Gerakan ke bawah ini bertahap sampai dekat ke tanah, sehingga muatan negatif yang dibawa oleh *stepped leader* tersebut memperbesar induksi muatan positif di permukaan tanah, akibatnya gradien tegangan antara dasar awan dengan tanah semakin besar. Apabila kedua akumulasi muatan ini saling tarik, maka muatan positif dalam jumlah yang besar akan bergerak ke atas menyambut gerakan *stepped leader* yang bergerak kebawah, akhirnya terjadi kontak pertemuan antara keduanya. Gerakan ke atas muatan positif tersebut membentuk suatu streamer yang bergerak ke atas (*upward moving streamer*), atau yang lebih populer disebut sebagai sambaran balik (*return stroke*) yang menyamakan perbedaan potensial.



Gambar 7.1. Proses terjadinya sambaran petir. a) sambaran perintis mulai b) sambaran perintis mendekati tanah c) sambaran keatas

7.2.2 Perlindungan Saluran Transmisi dari Sambaran Kilat

Suatu saluran transmisi di atas tanah dapat dikatakan membentuk bayang-bayang listrik pada tanah yang berada di bawah saluran transmisi itu. Lebar bayang-bayang listrik untuk suatu saluran transmisi telah diberikan oleh Whitehead seperti ditunjukkan pada gambar 7.2.



Gambar 2. Bidang perlindungan kawat

Lebar bayang-bayang W dirumuskan :

$$W = (b + 4h^{1,09}) \text{ meter} \dots\dots\dots (1)$$

di mana,

b = jarak pemisah antara kedua kawat tanah, meter (bila kawat tanah hanya satu, b = 0)

h = tinggi rata-rata kawat tanah di atas tanah

ht = tinggi kawat tanah pada menara, meter.

Jadi luas bayang-bayang untuk suatu span (L) saluran transmisi, dirumuskan:

$$A = L.(km) \times (b + 4h^{1,09}) \times 10^{-3} (km) \text{ atau}$$

$$A = 0,001 . L . (b + 4h^{1,09}) . km^2 \dots\dots\dots (2)$$

7.2.3 Jumlah Sambaran Kilat ke Saluran Transmisi

Jumlah sambaran kilat ke bumi adalah sebanding dengan n jumlah hari guruh per tahun atau "Iso Keraunic Level" (IKL) di tempat itu. Banyak para penyelidik yang telah

memberikan penelitian ke arah ini dan mengemukakan rumus-rumus yang berlainan. Dalam makalah ini penulis menggunakan rumus :

$$N_g = 0,15.IKL \dots\dots\dots (3)$$

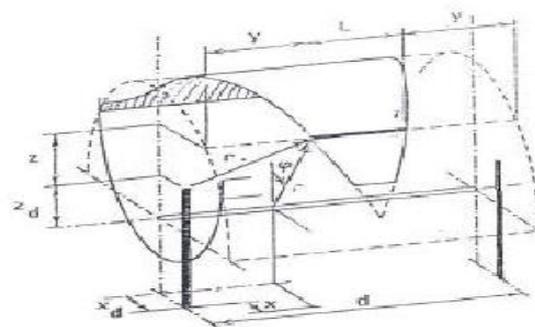
di mana N_g adalah jumlah sambaran per km² per tahun dan IKL adalah jumlah hari guruh per tahun. Jadi jumlah sambaran pada saluran transmisi adalah,

$$N_D = N_g \cdot x \cdot A$$

atau

$$N_D = 0,15.IKL(b + 4h^{1,09}) \text{ sambaran/tahun} \dots\dots (4)$$

Volume keseluruhan dari ruang proteksi dari suatu obyek terdiri atas semua titik dimana obyek mungkin akan tersambar petir dan volume dari sistem perlindungan petir pada obyek tersebut. Volume tersebut dikenal dengan volume atraktif (*attractive volume*), yang memiliki frekuensi tersambar petir dalam jumlah yang sama dengan frekuensi sambaran petir pada obyek (Eriksson 1986). Pada saluran transmisi sistem perlindungan merupakan sistem perlindungan menggunakan kawat horisontal terhadap suatu obyek berupa kawat horisontal (*horizontal line protected by horizontal line*). Untuk pemasangan batang penangkal petir pada kawat transmisi, maka sistem perlindungan yang digunakan adalah kawat horisontal dilindungi oleh dua batang vertikal (*horizontal line protected by two rods*). Gambar luasan melintang dari sistem ini ditunjukkan gambar (7.3).



Gambar 3 Luasan permukaan pada volume atraktif kawat horisontal yang dilindungi oleh dua batang vertikal.

Luasan atraktif ekuivalen dari batang vertikal dan kawat horisontal dipisahkan oleh suatu permukaan yang dihasilkan melalui pergeseran sebuah parabola. Bentuk luasan ini ditentukan oleh panjang kawat dan tinggi batang vertikal. Setelah nilai A_{eq} didapat maka frekuensi sambaran petir yang diharapkan pada sistem perlindungan petir adalah:

$$N = N_g \cdot A_{eq} \text{ sambaran pertahun} \dots\dots\dots (5)$$

Rumusan diatas adalah rumit dan tidak mudah diaplikasikan, oleh karena itu untuk penghitungan berdasar metode luasan atraktif, Petrov dan Alessandro menggunakan persamaan:

$$R_a = 0,56 \cdot [(h + 15)I_p]^{2/3} \dots\dots\dots (6)$$

luas ekuivalen area (A_{eq}) untuk suatu struktur didapatkan dari penghitungan integral:

$$A_{eq} = \pi \int_0^{\infty} R_a^2(i, h) f(i) di \dots\dots\dots (7)$$

dimana $f(i)$ adalah fungsi probabilitas kerapatan arus. Jika arus terdistribusi normal maka :

$$f(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma i} \exp \left[-\frac{(\ln i - \ln \bar{I})^2}{2\sigma^2} \right] \dots\dots\dots (8)$$

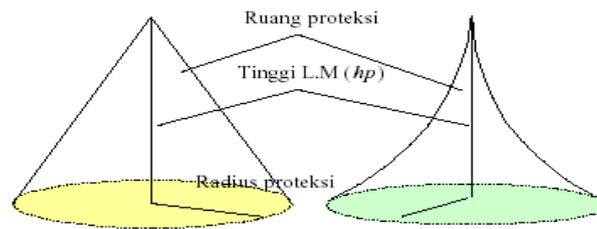
dimana \bar{I} adalah arus median dan σ adalah standar deviasi dari logaritma natural arus. Radius atraktif R_a bergantung pada ketinggian struktur arus puncak I_p . Dengan mensubstitusikan persamaan (8) ke persamaan (7) maka didapatkan

$$A_{eq} = 0,31\pi(h+15)^{4/3} \cdot \exp \left[-\frac{\ln^2 \bar{I}}{2\sigma^2} + \frac{\sigma^2}{2} \left(\frac{4}{3} + \frac{\ln \bar{I}}{\sigma^2} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (9)$$

7.3 SISTEM PERLINDUNGAN TERHADAP SAMBARAN PETIR MENGGUNAKAN LIGHTNING MASTS

7.3.1 Konsep ruang proteksi Lightning masts

Pada masa awal diketemukannya penangkal petir dan beberapa tahun setelah itu, ruang proteksi dari suatu penangkal petir berbentuk ruang kerucut dengan sudut puncak kerucut berkisar antara 30o hingga 60o. Ruang proteksi menurut electrogeometric model hampir sama dengan ruang proteksi berdasarkan konsep lama, yaitu berbentuk ruang kerucut juga, hanya saja bidang miring dari kerucut tersebut melengkung dengan jari-jari tertentu (lihat Gambar 4). Besarnya jari-jari ini sama dengan besarnya jarak sambar dari lidah petir. Jarak sambar dari lidah petir ini ditentukan oleh besarnya arus petir yang terjadi. Dengan demikian, derajat kelengkungan dari bidang miring kerucut dipengaruhi oleh besarnya arus petir yang terjadi.



Gambar 4 Ruang proteksi lightning masts (a) konvensional dan (b) menurut elektro geometri

7.3.2 Penentuan Besarnya Kebutuhan Akan Penangkal Petir

Sambaran petir dapat menimbulkan gangguan pada sistem tenaga listrik. Pada bangunan bertingkat atau menara, efek gangguan akibat sambaran petir ini semakin besar sesuai dengan semakin tingginya bangunan tersebut. Kebutuhan bangunan akan proteksi petir ditentukan dengan cara klasifikasi area tempat bangunan atau dengan perhitungan menggunakan parameter hari guruh dan koefisien N_g , N_d dan N_e . Suatu instalasi proteksi petir harus dapat melindungi semua bagian dari suatu bangunan, termasuk manusia dan peralatan yang ada di dalamnya terhadap bahaya dan kerusakan akibat sambaran petir. Berikut ini akan dibahas cara penentuan besarnya kebutuhan bangunan akan proteksi petir menggunakan standar Peraturan Umum Instalasi Penangkal Petir (PUIPP), *National Fire Protection Association* (NFPA) 780 dan *International Electrotechnical Commission* (IEC)1024-1-1.

1. Berdasarkan PUIPP besarnya kebutuhan tersebut ditentukan berdasarkan penjumlahan indeks-indeks tertentu yang mewakili keadaan bangunan di suatu lokasi dan dituliskan sebagai:

$$R = A + B + C + D + E \dots\dots\dots (10)$$

(Besarnya index di atas, lihat pada lampiran)

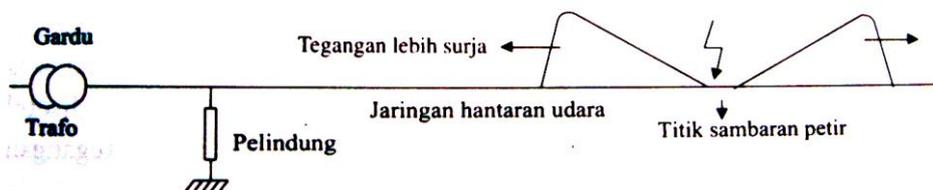
2. Cara penentuan yang digunakan pada standar NFPA 780 hampir sama dengan cara yang digunakan pada PUIPP yaitu dengan menjumlahkan sejumlah indeks yang mewakili keadaan lokasi bangunan kemudian hasil penjumlahan dibagi dengan indeks yang mewakili isokeraunic level di daerah tersebut. Secara matematik dituliskan sebagai:

$$R = \frac{A + B + C + D + E}{F} \dots\dots\dots (11)$$

(Besarnya index di atas, lihat pada lampiran)

7.4 PROTEKSI TEGANGAN LEBIH MENGGUNAKAN ARESTER

Sambaran petir merupakan suntikan muatan listrik yang mengakibatkan timbulnya kenaikan tegangan. Oleh karena itu, perlu dibuat pelindung agar tegangan lebih tersebut tidak menimbulkan kerusakan pada peralatan maupun isolasi gardu.



Gambar 7.5 perlindungan trafo terhadap petir.



Gambar 7.6 foto petir yang menyambar jaringan listrik

Arrester yaitu salah satu jenis pelindung sistem transmisi dan distribusi sistem tenaga listrik dari sambaran petir.

Arrester terdiri atas dua jenis, yaitu :

1. Jenis tabung pelindung (Arrester ekspulsi)
2. Jenis katub

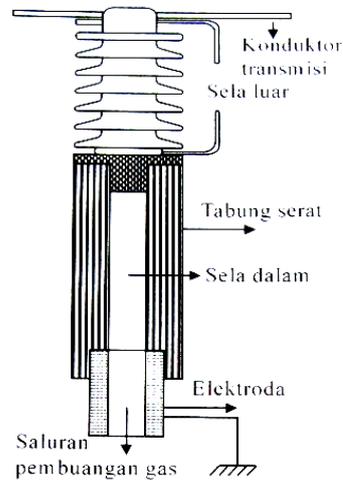
7.4.1 Arrester Jenis Tabung Pelindung (Arrester Ekspulsi)

Arrester ini mempunyai 2 jenis sela (tanduk Api) yaitu :

1. Sela luar

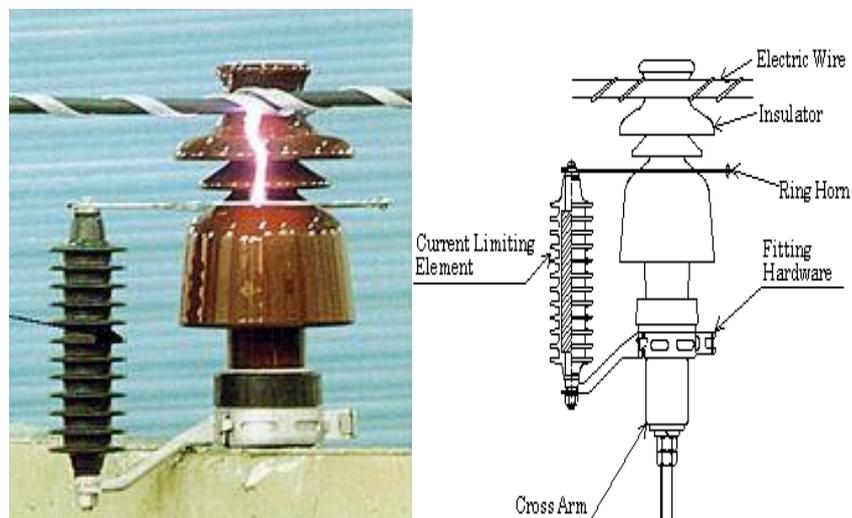
2. Sela Dalam

Bila di terminal Arrester tersambar petir, maka kedua sela terpercik, sehingga muatan listrik dari petir tersebut dapat dibumikan.



Gambar 7.7 Arrester jenis tabung pelindung

Arrester ini dapat melindungi trafo distribusi yang bertegangan 3 – 15 kV, tetapi belum memadai untuk melindungi trafo daya. Arrester ini masih dipengaruhi oleh keadaan udara di sekitar arrester, seperti cuaca dan kelembaban.

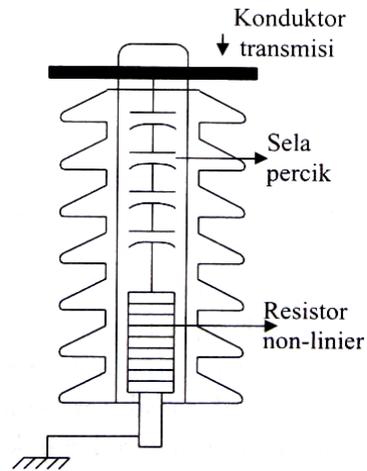


Gambar 9.8 Arrester jenis tabung pelindung

7.4.2 Arrester Jenis Katub

Yaitu arrester yang terdiri atas beberapa sela percik (tanduk api) yang dihubungkan seri dengan resistor tak linier. Sela percik dan resistor tak linier keduanya ditempatkan

dalam tabung isolasi tertutup, sehingga kerja arrester ini tidak dipengaruhi udara sekitar. Resistor tak linier disebut juga resistor kran, yang dibuat dari bahan silikon karbid.



Gambar 7.9 Arrester jenis katup

Arrester jenis katup terdiri atas empat jenis yaitu :

- a. Jenis Gardu
- b. Jenis Saluran (15-69 kV)
- c. Jenis gardu untuk mesin-mesin (2,4-15 kV)
- d. Jenis distribusi untuk mesin-mesin(120-750 V)

8. ANALISIS GANGGUAN

8.1 UMUM

Dalam operasi sistem tenaga listrik terjadinya gangguan tidak dapat dihindarkan. Gangguan terjadi dapat dikarenakan karenakan adanya kejadian secara acak dalam sistem yang dapat berupa berkurangnya kemampuan peralatan, meningkatnya beban dan lepasnya peralat an-peralatan yang tersambung ke sistem. Gangguan yang sering terjadi pada saluran distribusi adalah gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah yang sifatnya temporer, sehingga untuk mengatasinya digunakan *Ground Fault Relay (GFR)* sebagai pendeteksi gangguan yang dikoordinasikan dengan *Recloser* . Sehubungan dengan banyaknya kawat netral yang terputus dikhawatirkan akan berakibat pada mengecilnya arus gangguan sampai dibawah nilai arus setting GFR sehingga, peralatan proteksi tidak akan bekerja saat terjadi gangguan dan ini sangat berbahaya bagi keselamatan manusia dan lingkungan.

8.2 SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

Sistem tenaga listrik terdiri atas tiga bagian utama yaitu, sistem pembangkitan, sistem transmisi dan sistem distribusi. Dari ketiga sistem tersebut sistem distribusi merupakan bagian yang letaknya paling dekat dengan konsumen, fungsinya adalah menyalurkan energi listrik dari suatu Gardu Induk distribusi ke konsumen.

Adapun bagian-bagian dari sistem distribusi tenaga listrik adalah:

1. Gardu Induk Distribusi
2. Jaringan Primer (JTM)
3. Transformator Distribusi
4. Jaringan Sekunder (JTR)

8.2.1 Klasifikasi Sistem Jaringan Distribusi

Jaringan distribusi dikategorikan kedalam beberapa jenis, sebagai berikut:

1. Tegangan pengenalnya :
 - a. JTM 20 kV.
 - b. JTR 380/220 Volt.
2. Konfigurasi jaringan primer
 - a. Jaringan distribusi pola radial
 - b. Jaringan distribusi pola loop
 - c. Jaringan distribusi pola loop radial

- d. Jaringan distribusi pola grid
 - e. Jaringan distribusi pola spindel
3. Konfigurasi penghantar jaringan primer
- a. Konfigurasi penghantar segitiga.
 - b. Konfigurasi penghantar vertikal.
 - c. Konfigurasi penghantar horisontal.
4. Sistem pengetanahan :
- a. Sistem distribusi tanpa pengetanahan
 - b. Sistem distribusi pengetanahan tak langsung
 - c. Sistem distribusi pengetanahan langsung

8.3 GANGGUAN SISTEM DISTRIBUSI

Jenis gangguan hubung singkat yang sering terjadi:

1. Hubung singkat satu fasa ke tanah

$$I_{af} = \frac{3V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f}$$

2. Hubung singkat dua fasa

$$I_{af} = -I_{bf} = \frac{\pm jV_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

3. Hubung singkat dua fasa ke tanah

$$I_{a1} = \frac{E \langle 0^0 \rangle}{(Z_1 + Z_f) + \frac{(Z_2 + Z_f)(Z_0 + Z_f + 3Z_g)}{Z_0 + Z_1 + 2Z_f + 3Z_g}}$$

$$I_{a2} = - \left[\frac{Z_0 + Z_f + 3Z_g}{(Z_0 + Z_f + 3Z_g) + (Z_2 + Z_f)} \right] I_{a1}$$

$$I_{a0} = - \left[\frac{Z_2 + Z_f}{(Z_0 + Z_f + 3Z_g) + (Z_2 + Z_f)} \right] I_{a1}$$

$$I_{bf} = I_{a0} + a_2 I_{a1} + a I_{a2}$$

$$I_{cf} = I_{a0} + a I_{a1} + a_2 I_{a2}$$

4. Hubung singkat tiga fasa

$$I_{af} = I_{a1} = \frac{E \langle 0^0 \rangle}{Z_1 + Z_f}$$

$$I_{bf} = a^2 I_{a1} = \frac{E \langle 240^0 \rangle}{Z_1 + Z_f}$$

$$I_{cf} = a I_{a1} = \frac{E \langle 120^0 \rangle}{Z_1 + Z_f}$$

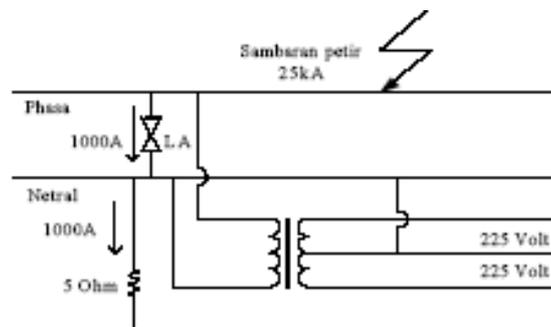
8.4 PERALATAN PROTEKSI PADA SISITEM DISTRIBUSI JTM 20 KV

Peralatan proteksi pada sisitem distribusi JTM 20 kV terdiri dari :

- a. Rele arus lebih (*Over Current Relay/OCR*)
- b. Rele gangguan ke tanah (*Ground Fault Relay/GFR*)
- c. *Recloser*

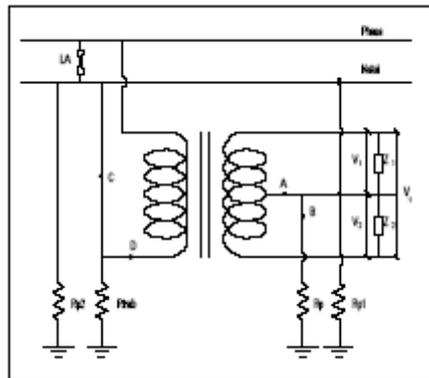
Berhasilnya suatu pengamanan dengan rele gangguan ke-tanah sangat tergantung pada besarnya arus gangguan ke-tanah. Putusnya kawat netral disepanjang jaringan ini bisa menyebabkan arus gangguan ke tanah menjadi lebih kecil dari arus seting peralatan proteksi yang terpasang Karena impedansi urutan nol saluran akan menjadi lebih besar dari pada jaringan saat kondisi normal. Hal ini akan sangat membahayakan keselamatan manusia dan juga bisa menyebabkan kerusakan pada peralatan yang tersambung ke sistem akibat tidak bekerjanya rele proteksi.

8.5 DAMPAK PUTUSNYA KAWAT NETRAL TEHADAP KEAMANAN PERALATAN PELANGGAN DARI PENGARUH SAMBARAN PETIR

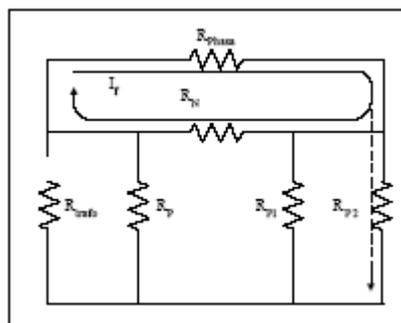


Gambar 8.1. Kawat netral sebagai pengaman peralatan terhadap sambaran petir

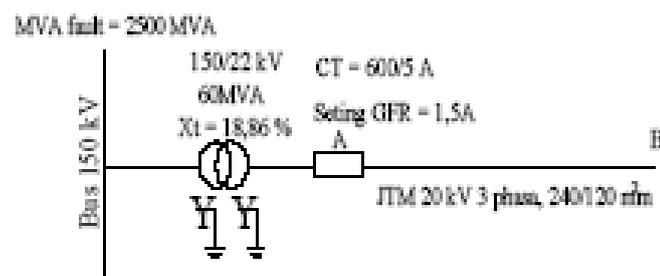
Seperti ditunjukkan pada gambar 8.1, sambaran petir terhadap JTM bisa menimbulkan arus gangguan yang sangat besar, untuk mengatasinya digunakan *lighting arrester (LA)* sebagai alat pengaman yang berfungsi untuk mengeliminir gangguan hubung singkat tersebut. Akan tetapi arus gangguan tersebut tidak dapat sepenuhnya dieliminir oleh *LA*, sehingga perlu adanya pengaman tambahan berupa sistem pengetanahan netral yang baik yaitu, sistem pengetanahan dengan tahanan yang kecil mendekati nol atau pengetanahan langsung. Tujuannya agar arus gangguan akibat sambaran petir bisa diamankan ke tanah secara sempurna.



Gambar 8.2 Rangkaian transformator saat kondisi Normal



Gambar 8.3 Rangkaian ekivalen saat kawat netral JTM trafo distribusi sisi primer putus



Gambar 8.4 Diagram satu garis sistem

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 1985, *Protective Relays Application Guide*, GEC Measurements, London.
- IEEE, 2000, *IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines*, IEEE, New York.
- Ram, B., Vishwakarma, 1995, *Power System Protection and Switchgear*, McGraw-Hill, New Delhi.