

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Secara umum, saluran distribusi tenaga listrik dapat diklasifikasikan menurut nilai tegangan, jenis konstruksi dan susunan rangkaian. (Suhadi, 2008a).

Sistem distribusi merupakan salah satu bagian dalam sistem tenaga listrik, yaitu dimulai dari sumber daya atau pembangkit tenaga listrik sampai kepada para konsumen. Pada masa sekarang ini dimana kebutuhan akan tenaga listrik meningkat, maka diperlukan suatu sistem pendistribusian tenaga listrik dari pembangkit sampai kepada para konsumen yang memiliki keandalan yang tinggi. Tenaga listrik yang didistribusikan tersebut tidak hanya tegangan menengah dan rendah saja, namun juga tegangan tinggi dan ekstra tinggi. Namun yang umum disebut sistem distribusi adalah sistem tegangan menengah (primer) dan tegangan rendah (sekunder).

Dalam melakukan distribusi tenaga listrik diperlukan beberapa komponen-komponen utama yang menunjang distribusi tenaga listrik, yaitu:

1. Gardu Induk (GI)
2. Gardu Hubung (GH)
3. Gardu Distribusi (GD)
4. Jaringan Distribusi Primer
5. Jaringan Distribusi Sekunder

Gardu Induk (GI)

Gardu induk merupakan suatu komponen penting dalam distribusi tenaga listrik yang berfungsi sebagai pengatur daya. Gardu induk juga berfungsi mentransformasikan daya listrik yang dihasilkan dari pusat-pusat pembangkit ke gardu induk lain dan juga ke gardu-gardu distribusi yang merupakan suatu interkoneksi dalam distribusi tenaga listrik. Contoh gambar gardu induk pada daerah kerja Area Pengatur Distribusi Bandung dapat dilihat pada lampiran B.

Gardu Hubung (GH)

Gardu hubung berfungsi menerima daya listrik dari gardu induk yang telah diturunkan menjadi tegangan menengah dan menyalurkan atau membagi daya listrik tanpa merubah tegangannya melalui jaringan distribusi primer (JTM) menuju gardu atau transformator distribusi. Merupakan satu gardu yang terdiri dari peralatan-peralatan hubung serta alat-alat kontrol lainnya, namun tidak terdapat trafo daya. Alat penghubung yang terdapat pada gardu hubung adalah sakelar beban yang selalu dalam kondisi terbuka (*normally open*), sakelar ini bekerja atau menutup hanya jika penyulang utama mengalami gangguan. Contoh gambar gardu hubung dapat dilihat pada lampiran B.

Gardu Distribusi (GD)

Gardu distribusi adalah suatu tempat atau bangunan instalasi listrik yang didalamnya terdapat alat-alat: pemutus, penghubung, pengaman, dan trafo distribusi untuk mendistribusikan tegangan listrik sesuai dengan kebutuhan tegangan konsumen. Peralatan-peralatan ini adalah dalam menunjang mencapai

pendistribusian tenaga listrik secara baik yang mencakup kontinuitas pelayanan yang terjamin, mutu yang tinggi, dan menjamin keselamatan bagi manusia.

Fungsi gardu distribusi adalah sebagai berikut :

1. Menyalurkan atau meneruskan tenaga listrik tegangan menengah ke konsumen tegangan rendah.
2. Menurunkan tegangan menengah menjadi tegangan rendah selanjutnya didistribusikan ke konsumen tegangan rendah.
3. Menyalurkan atau meneruskan tenaga listrik tegangan menengah ke gardu distribusi lainnya dan ke gardu hubung.(<http://deelectrical.wordpress.com>)

2.1.1 Klasifikasi menurut nilai tegangan

Menurut nilai tegangannya, sistem distribusi dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu:

1. Sistem distribusi tegangan menengah / primer

Sistem distribusi primer terletak di antara gardu induk dengan gardu pembagi. Sistem ini memiliki tegangan sistem lebih tinggi dari tegangan terpakai untuk konsumen. Standar tegangan untuk jaringan distribusi primer ini adalah 6 kV, 10 kV, dan 20 kV (sesuai standar PLN). Sedangkan di Amerika Serikat standar tegangan untuk jaringan distribusi primer ini adalah 2,4 kV, 4,16 kV, dan 13,8 kV.

Saluran distribusi tegangan menengah terbagi menjadi 2 bagian yaitu saluran utama dan saluran cabang. Saluran utama biasa disebut sebagai penyulang utama merupakan bagian dari jaringan distribusi tegangan menengah dengan luas penampang terbesar. Sedangkan saluran cabang

merupakan percabangan dari penyulang utama. Saluran cabang memiliki luas penampang saluran yang lebih kecil dari saluran utama.

2. Sistem distribusi tegangan rendah / sekunder

Sistem distribusi sekunder berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik dari gardu-gardu pembagi (gardu distribusi) ke pusat-pusat beban (konsumen tenaga listrik). Standar tegangan untuk jaringan distribusi sekunder adalah 127/220 V untuk sistem lama, 220/380 V untuk sistem baru, dan 440/550 V untuk keperluan industri.

2.1.2 Klasifikasi menurut jenis konstruksi

Menurut jenis konstruksinya, sistem distribusi dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu:

1. Konstruksi atas tanah / saluran udara (*overhead line*)

Saluran udara atau *overhead line* adalah sistem penyaluran tenaga listrik melalui kawat penghantar yang ditopang pada tiang listrik. Saluran udara dapat dibedakan menjadi 2 macam, yaitu:

a. Saluran kawat udara,

Apabila konduktor saluran udara telanjang atau tanpa isolasi pembungkus maka disebut dengan saluran kawat udara.

b. Saluran kabel udara,

Apabila konduktor saluran udara terbungkus isolasi maka disebut dengan saluran kawat udara.

Penggunaan saluran udara mempunyai beberapa keuntungan, meliputi lebih mudah dalam pemasangan, dapat digunakan untuk penyaluran tenaga listrik di atas 66 kV, lebih fleksibel dan leluasa apabila akan diadakan

perluasan beban, serta mudah dalam proses pengatanganan dan pendeteksian bila terjadi gangguan hubung singkat.

Namun di sisi lain, saluran udara mempunyai beberapa kekurangan meliputi mudah terpengaruh oleh kondisi atmosfer maupun kemungkinan tertimpa pohon, sukar untuk menempatkan saluran udara di wilayah yang penuh dengan bangunan tinggi, tegangan drop lebih tinggi akibat efek kulit, induktansi dan kapasitansi, serta biaya pemeliharaan lebih mahal karena perlu jadwal pengecatan dan penggantian material listrik bila terjadi kerusakan.

2. Konstruksi bawah tanah / saluran bawah tanah (*underground line*)

Saluran bawah tanah adalah sistem penyaluran tenaga listrik menggunakan kabel tanah (*ground cable*) yang dipasang di dalam tanah. Saluran bawah tanah mempunyai beberapa keuntungan seperti tidak terpengaruh oleh kondisi atmosfer maupun kemungkinan tertimpa pohon, tidak mengganggu pandangan, lebih sempurna dan lebih indah dipandang, mempunyai batas umur pakai dua kali lipat dari saluran udara, tegangan drop lebih rendah dibandingkan saluran udara karena masalah induktansi bisa diabaikan, serta biaya pemeliharaan lebih murah karena tidak perlu adanya pengecatan.

Sedangkan kekurangan dari penggunaan saluran bawah tanah meliputi biaya investasi pembangunan lebih mahal dibandingkan dengan saluran udara, usaha pencarian titik gangguan tidak mudah jika terjadi gangguan hubung singkat, perlu pertimbangan-pertimbangan teknis yang lebih

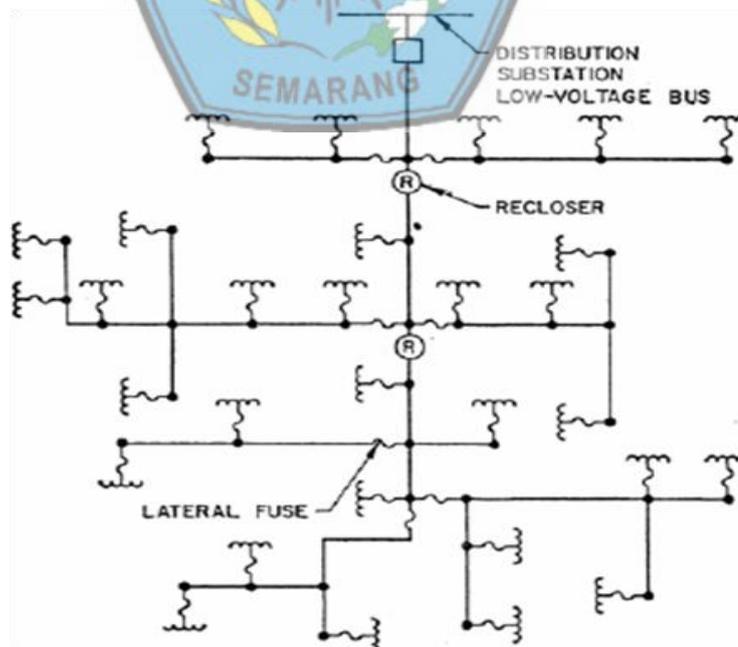
mendalam di dalam perencanaan, serta dapat terpengaruh bila terjadi bencana banjir, desakan akar pohon, dan ketidakstabilan tanah.

2.1.3 Klasifikasi menurut susunan rangkaian

Menurut susunan rangkaiannya, sistem distribusi dapat dibedakan menjadi empat macam yaitu:

1. Jaringan distribusi radial

Bentuk jaringan distribusi radial seperti yang terlihat pada Gambar 2.1 merupakan bentuk dasar yang paling sederhana dan paling banyak digunakan. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu, dan dicabang-cabang ke titik-titik beban yang dilayani. Catu daya berasal dari satu titik sumber. Arus beban yang mengalir sepanjang saluran menjadi tidak sama besar karena terdapat pencabangan-pencabangan ke titik-titik beban pada saluran.



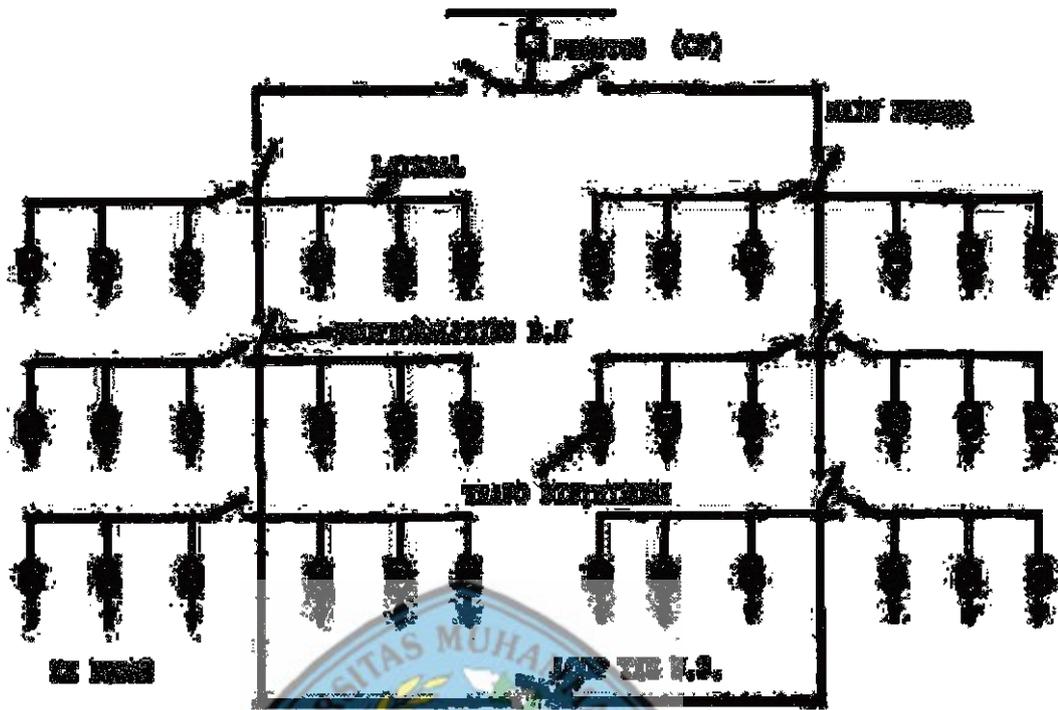
Gambar 2.1 Jaringan distribusi tipe radial

Oleh karena kerapatan arus beban yang tidak sama besar pada setiap titik sepanjang saluran maka ukuran luas penampang konduktor yang digunakan pada jaringan bentuk radial tidak harus sama. Saluran utama (dekat sumber) yang menanggung arus beban besar membutuhkan konduktor yang ukuran penampangnya relatif besar. Sedangkan saluran cabang yang dilalui arus beban yang lebih kecil hanya membutuhkan konduktor yang ukurannya lebih kecil.

Kelebihan jaringan bentuk radial selain bentuknya yang sederhana juga biaya investasi yang relatif murah. Sedangkan kelemahan dari jaringan bentuk radial adalah kualitas pelayanan daya relatif jelek karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar. Kontinuitas pelayanan daya pun tidak terjamin, dikarenakan antara titik sumber dan titik beban hanya terdapat satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami gangguan, maka seluruh rangkaian sesudah titik gangguan akan mengalami “*black out*” secara total.

2. Jaringan distribusi ring (*loop*)

Jaringan distribusi ring atau *loop* merupakan jaringan distribusi bentuk tertutup. Pada titik beban terdapat dua alternatif saluran berasal lebih dari satu sumber. Susunan rangkaian penyulang membentuk ring sehingga memungkinkan titik beban dilayani dari dua arah penyulang. Dengan begitu kontinuitas pelayanan menjadi lebih terjamin. Kualitas dayanya pun menjadi lebih baik karena rugi tegangan dan rugi daya pada saluran menjadi lebih kecil. Adapun bentuk jaringan distribusi seperti terlihat dalam Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Jaringan distribusi tipe loop

Terdapat 2 macam bentuk jaringan distribusi *loop*, yaitu:

a. Bentuk *open loop*

Suatu jaringan distribusi dikatakan berbentuk *open loop* jika diperlengkapi dengan *normally-open switch* sehingga dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka.

b. Bentuk *close loop*

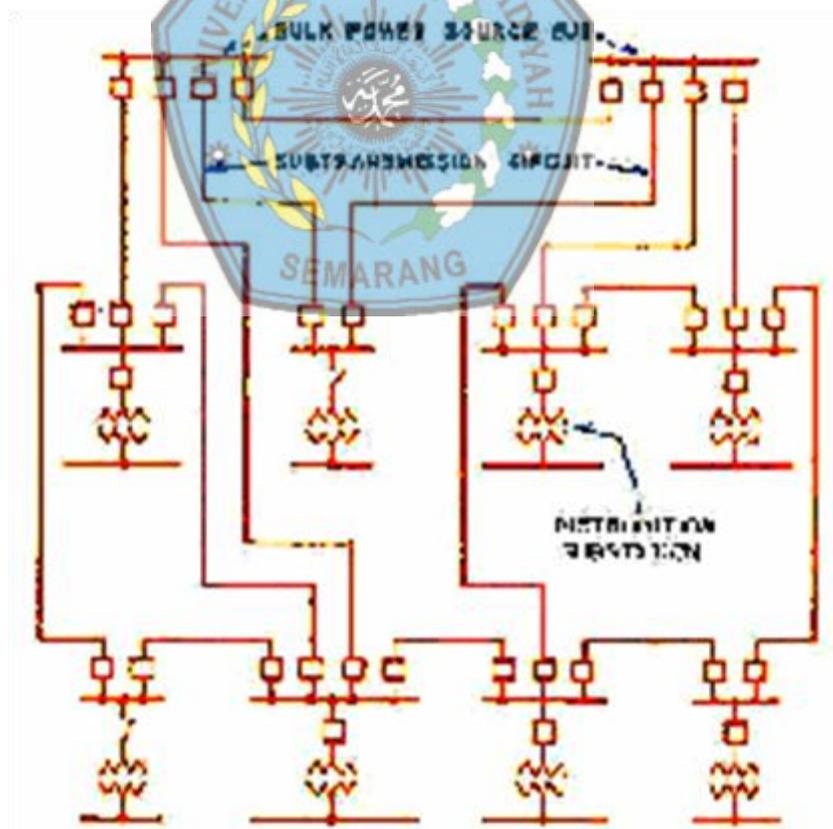
Suatu jaringan distribusi dikatakan berbentuk *close loop* jika diperlengkapi dengan *normally-close switch* sehingga dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.

Dengan bentuk jaringan distribusi *loop* maka kualitas dan kontinuitas pelayanan daya menjadi lebih baik, namun biaya investasi menjadi lebih mahal karena membutuhkan pemutus beban yang lebih banyak. Bila

dilengkapi dengan pemutus beban yang otomatis maka pengamanan dapat berlangsung cepat dan praktis, sehingga daerah gangguan dapat segera beroperasi kembali bila gangguan telah teratasi. Dengan cara ini berarti dapat mengurangi tenaga operator. Bentuk ini cocok untuk digunakan pada daerah beban yang padat dan memerlukan keandalan tinggi.

3. Jaringan distribusi jala (jaring-jaring)

Jaringan distribusi jala atau jaring-jaring merupakan gabungan dari beberapa saluran, dimana terdapat lebih satu sumber sehingga berbentuk saluran interkoneksi. Bentuk jaringan distribusi jala seperti terlihat pada Gambar 2.3 ini adalah kombinasi antara bentuk radial dan *loop*.



Gambar 2.3 Jaringan distribusi tipe jala

Dengan bentuk jaringan jala seperti Gambar 2.3, titik beban memiliki lebih banyak alternatif saluran/penyulang, sehingga bila salah satu penyulang terganggu maka dapat segera digantikan oleh penyulang yang lain. Oleh karena itu kontinuitas penyaluran daya pada jaringan jala paling terjamin dibanding bentuk lain. Selain itu kelebihan lain bentuk jaringan jala yaitu mempunyai kualitas tegangan yang baik, rugi daya saluran amat kecil, dan paling flexible dalam mengikuti pertumbuhan dan perkembangan beban dibanding dengan bentuk lain.

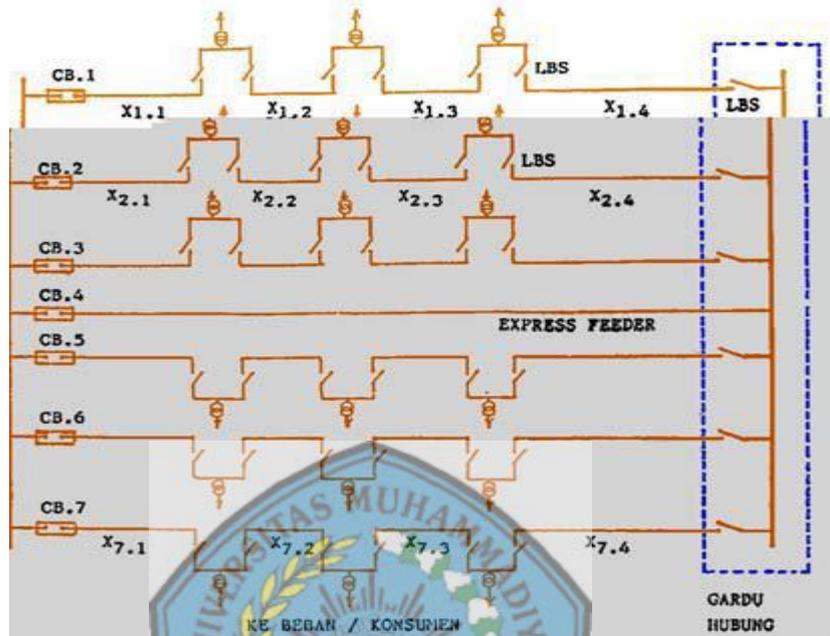
Namun di sisi lain bentuk jaringan jala memerlukan koordinasi perencanaan yang teliti dan rumit, memerlukan biaya investasi yang besar (mahal), serta memerlukan tenaga-tenaga terampil dalam pengoperasiannya.

Dengan mempertimbangkan kelebihan dan kelemahan yang ada, bentuk jala ini hanya layak untuk melayani daerah beban yang benar-benar memerlukan tingkat keandalan dan kontinuitas yang tinggi, antara lain: instalasi militer, pusat sarana komunikasi dan perhubungan, rumah sakit, dan sebagainya. Oleh karena bentuk jaringan jala menghubungkan beberapa sumber sehingga disebut juga sebagai jaringan interkoneksi.

4. Jaringan distribusi *spindle*

Di samping bentuk-bentuk dasar dari jaringan distribusi yang telah disebutkan sebelumnya, telah dikembangkan pula bentuk-bentuk modifikasi yang bertujuan meningkatkan keandalan dan kualitas sistem. Salah satu bentuk modifikasi yang paling terkenal adalah bentuk *spindle*. Bentuk jaringan *spindle* biasanya terdiri atas maksimum 6 penyulang dalam keadaan

dibebani, dan satu penyulang dalam keadaan kerja tanpa beban, seperti terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Jaringan distribusi tipe *spindle*

Dari Gambar 2.4, terlihat ada 6 penyulang yang beroperasi dalam keadaan berbeban yang dinamakan *working feeder* atau saluran kerja, dan satu saluran yang dioperasikan tanpa beban yang dinamakan *express feeder*. *Express feeder* berfungsi sebagai cadangan pada saat terjadi gangguan pada salah satu *working feeder*. Selain itu *express feeder* juga dapat memperkecil terjadinya drop tegangan pada sistem distribusi saat kondisi operasi normal.

2.2 Tinjauan Pustaka

Dalam Jurnal yang berjudul "*Perhitungan Setting GFR*" menjelaskan bahwa dalam memproteksi peralatan listrik, sebuah rele harus memiliki syarat antara lain keterandalan, selektivitas, sensitivitas, kecepatan kerja, ekonomis. Rele yang digunakan untuk mengatasi gangguan hubung singkat tersebut diantaranya

OCR (*over current relay*) dan GFR (*ground fault relay*). Rele arus lebih adalah sebuah jenis rele proteksi yang bekerja berdasarkan prinsip besarnya arus input yang masuk ke dalam peralatan setting rele. Apabila besaran arus yang masuk melebihi harga arus yang telah disetting sebagai standarkerja rele tersebut, maka rele arus ini akan bekerja dan memberikan perintah pada CB untuk memutuskan sistem. (Tirza Nouva”Jurnal Reka Elkomika”,2013)

Rele gangguan tanah adalah suatu rele yang bekerja berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai setting pengaman tertentu dan dalam jangka waktu tertentu bekerja apabila terjadi gangguan hubung singkat fasa ke tanah. Dalam men-setting rele terlebih dahulu kita mengerti dan menganalisis tentang komponen simetris guna mendapatkan nilai impedansi hubung singkat dan arus hubung singkat. Kegunaan metoda komponen simetris adalah bahwa metoda ini mampu memecahkan persoalan-persoalan fasa banyak yang tidak seimbang dalam bentuk sistem yang seimbang. Dalam sistem tiga fasa seimbang, arus-arus dalam penghantar tiga fasa sama besarnya dan beda sudut fasa sebesar 120° . Demikian pula yang terjadi pada tegangan fasa ke netral dan fasa ke fasa. Selain itu untuk menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik maka perlu adanya sistem interkoneksi (Alstom, 2011).

2.3 Pentanahan Netral Sistem Distribusi Tenaga Listrik

2.3.1 Pengertian

Berdasarkan fungsi dari pentanahan, sistem pentanahan dapat dibedakan menjadi dua, yaitu pentanahan sistem (pentanahan netral) dan pentanahan umum (pentanahan peralatan). Pentanahan sistem atau pentanahan netral berfungsi untuk

melindungi peralatan/saluran dari bahaya kerusakan yang diakibatkan gangguan fasa ke tanah, peralatan/saluran dari bahaya kerusakan yang diakibatkan tegangan lebih, perlindungan bagi makhluk hidup terhadap tegangan langkah (*step voltage*), serta untuk kebutuhan proteksi jaringan. Sedangkan pentanahan umum mempunyai fungsi untuk melindungi makhluk hidup terhadap tegangan sentuh dan peralatan dari tegangan lebih.

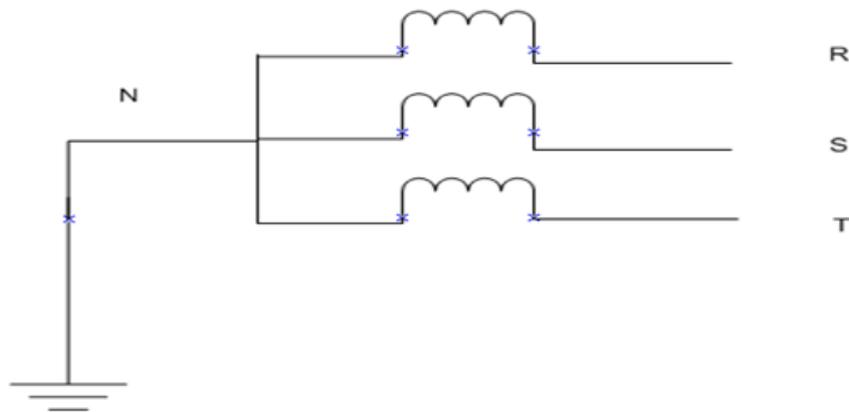
Pada pentanahan sistem (pentanahan netral), bagian yang diketanahkan adalah titik netral sisi TM trafo utama/gardu induk untuk pentanahan sistem dengan tahanan. Sedangkan untuk sistem dengan pentanahan langsung, bagian yang diketanahkan meliputi trafo utama/gardu induk dan kawat netral sepanjang jaringan TM. Dengan pentanahan netral tersebut maka akan diperoleh arus gangguan tanah yang besarnya bergantung pada metode pentanahan netral yang dipilih sehingga alat-alat pengaman dapat bekerja selektif tetapi tidak merusak peralatan di titik gangguan. (Suhadi, 2008b)

2.3.2 Macam-macam metode pentanahan netral

Terdapat empat macam metode pentanahan netral yaitu sebagai berikut (Marsudi, 2006) :

1. Pentanahan langsung

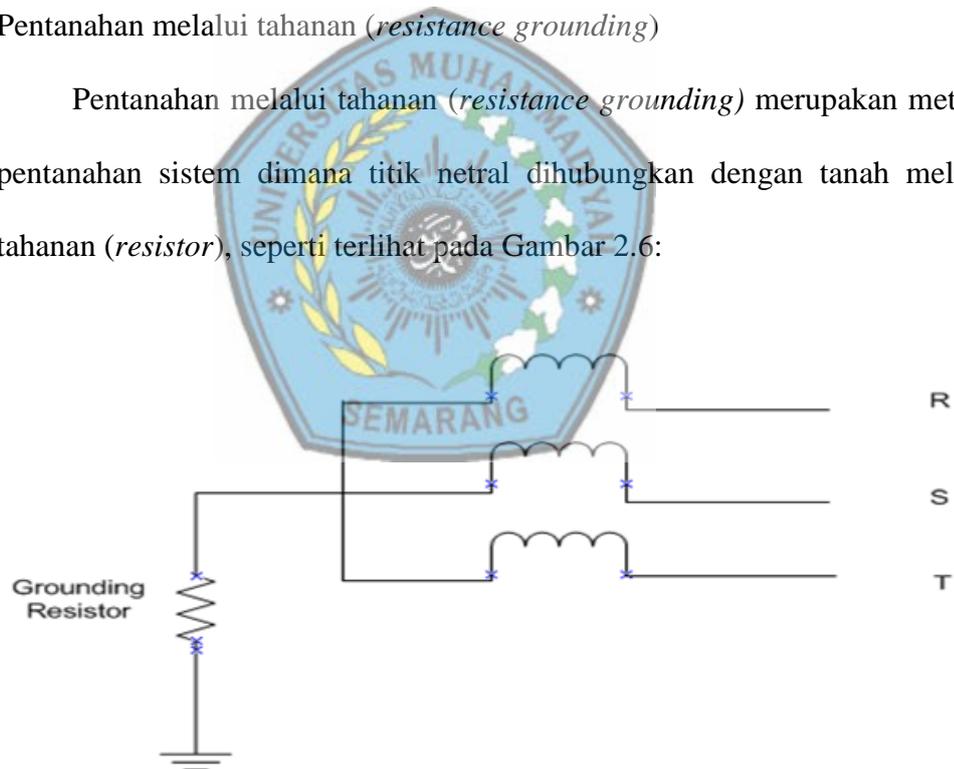
Pentanahan langsung merupakan salah satu metode pentanahan netral sistem dimana titik netral sistem dihubungkan langsung dengan tanah, tanpa memasukkan harga suatu impedansi, seperti terlihat pada Gambar 2.5:



Gambar 2.5 Rangkaian pengganti pentanahan langsung

2. Pentanahan melalui tahanan (*resistance grounding*)

Pentanahan melalui tahanan (*resistance grounding*) merupakan metode pentanahan sistem dimana titik netral dihubungkan dengan tanah melalui tahanan (*resistor*), seperti terlihat pada Gambar 2.6:

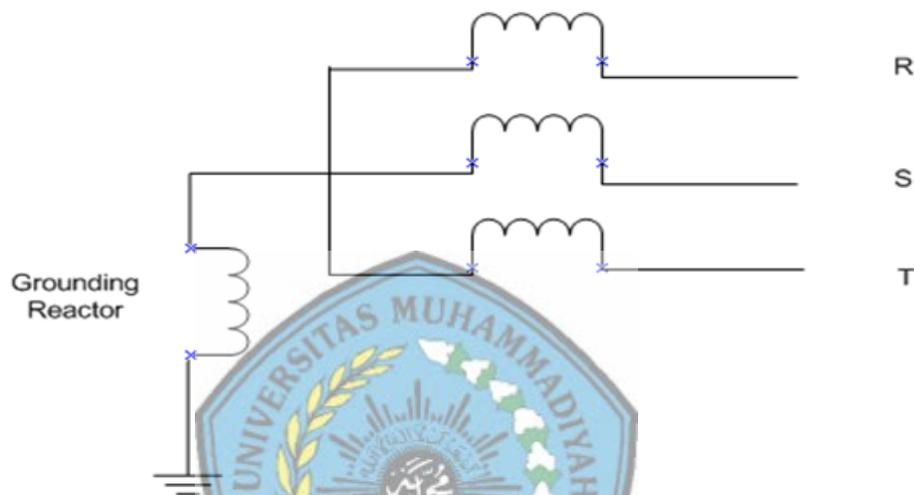


Gambar 2.6 Rangkaian pengganti pentanahan melalui tahanan

Pada umumnya nilai tahanan pentanahan lebih tinggi dari pada reaktansi sistem pada tempat dimana tahanan itu dipasang.

3. Pentanahan melalui reaktor (*reactor grounding*)

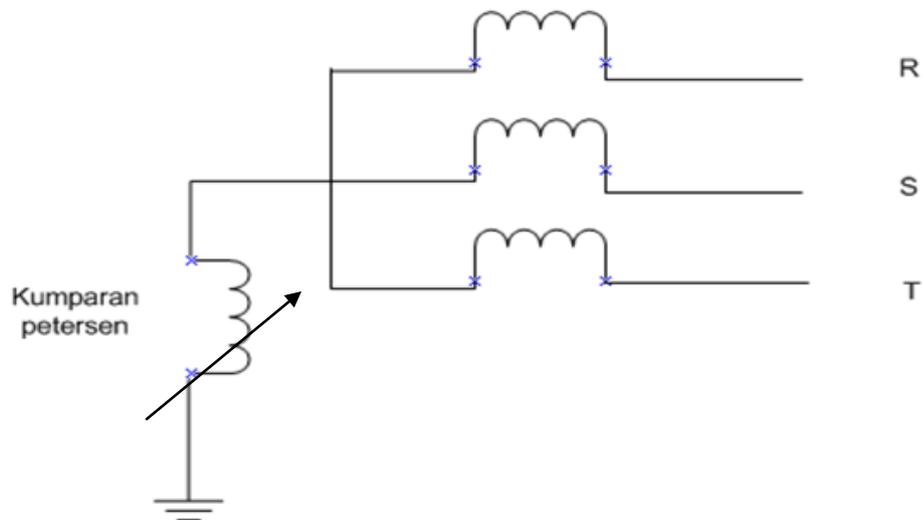
Pentanahan dengan reaktor merupakan metode pentanahan dengan memasang reaktor di antara titik netral sistem dengan tanah, seperti terlihat pada Gambar 2.7:



Gambar 2.7 Rangkaian pengganti pentanahan melalui reaktor

4. Pentanahan dengan kumparan petersen (*petersen coil*).

Pentanahan dengan kumparan petersen atau *resonant grounding* merupakan metode pentanahan sistem dimana titik netral dihubungkan ke tanah melalui kumparan petersen (*petersen coil*). Kumparan petersen merupakan reaktor yang mempunyai harga reaktansi yang dapat diatur dengan menggunakan tap, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8. Nilai reaktansi kumparan petersen biasanya bernilai sangat tinggi.



Gambar 2.8 Rangkaian pengganti pentanahan dengan kumparan petersen

2.3.3 Faktor-faktor yang mempengaruhi pemilihan metode pentanahan

Faktor-faktor yang harus diperhatikan dalam pemilihan metode pentanahan titik netral dari suatu sistem tenaga listrik meliputi (SPLN 2: 1978):

1. Selektivitas dan sensitivitas dari rele gangguan tanah

Rele gangguan tanah atau biasa disebut *ground fault relay* (GFR) merupakan rele yang bertugas untuk mendeteksi bila terjadi gangguan atau hubung singkat ke tanah. Keberhasilan dari rele gangguan tanah bergantung dari besarnya arus gangguan ke tanah.

Pada sistem yang netralnya ditanahkan langsung, arus gangguan ke tanah tidak dibatasi sehingga nilainya sangat besar dan memudahkan kerja pemutus daya untuk melokalisir lokasi gangguan.

Pada sistem yang netralnya ditanahkan dengan reaktansi, umumnya arus gangguan ke tanah sekurang-kurangnya 25% dan dibawah 60% dari nilai arus gangguan tiga fasa.

Sistem yang diketanahkan dengan tahanan, arus gangguan tanah besarnya 5% sampai dengan 25% dari arus gangguan tiga fasa sehingga kepekaan rele pengaman menjadi berkurang dan lokasi gangguan tidak cepat diketahui.

Sedangkan sistem yang ditanahkan melalui kumparan petersen akan mempunyai arus gangguan tanah yang sangat kecil sehingga sukar dibaca oleh rele gangguan tanah apabila terjadi gangguan hubung singkat ke tanah yang permanen.

2. Pembatasan arus gangguan ke tanah

Arus gangguan ke tanah yang besar dapat mengakibatkan kerusakan-kerusakan pada peralatan, misalnya kerusakan penghantar. Untuk sistem-sistem dengan pemutus arus yang lambat, pembatasan besar arus gangguan ini perlu diperhatikan. Hal ini dikarenakan bila arus gangguan terlalu kecil dapat menyebabkan rele tidak dapat bekerja. Pembatasan arus gangguan ke tanah merupakan suatu ukuran koordinasi yang akan menentukan metode pentanahan dari suatu sistem tenaga listrik. Namun ketidakstabilan dari sistem akibat arus gangguan tanah yang besar saat ini tidak perlu lagi dipertimbangkan dalam metode pentanahan bila dilengkapi dengan rele dan pemutus arus yang bekerja cepat.

3. Pengaruh metoda pentanahan pada besarnya tegangan dinamis yang mengenai alat-alat proteksi surja

Lightning arrester berfungsi sebagai pengaman instalasi atau peralatan listrik pada instalasi dari gangguan tegangan lebih akibat sambaran petir

maupun oleh surja hubung. Lightning arrester dibagi ke dalam dua kelompok, yaitu *grounded neutral rated arrester* dan *ungrounded neutral arrester*. Jenis *grounded neutral rated arrester* dipergunakan pada sistem yang dibumikan secara efektif. Sedangkan *ungrounded neutral rated arrester* digunakan pada sistem yang tidak dibumikan secara efektif.

Lightning arrester sensitif terhadap tegangan lebih sehingga tegangan dinamis pada arrester tidak boleh melampaui tegangan pengenal arrester untuk segala keadaan operasi sistem. Tegangan dinamis kawat fasa ke tanah dari suatu sistem tiga fasa akan menjadi tidak seimbang dalam keadaan gangguan tanah, dan besarnya tegangan ini tergantung dari kondisi sistem pada saat terjadinya gangguan dan besarnya impedansi pentanahan. Pada sistem yang ditanahkan secara efektif, maka rating tegangan pengenal arrester diambil 80% dari tegangan fasa-fasa maksimum. Sedangkan pada sistem dengan pentanahan melalui tahanan dan kumparan petersen menggunakan arrester dengan rating tegangan pengenal paling tidak sama dengan tegangan fasa-fasa dalam sistem.

4. Pembatasan tegangan lebih transien

Saat terjadi gangguan ke tanah dapat menyebabkan timbulnya *arcing ground*. *Arcing ground* dapat menimbulkan tegangan lebih yang sangat berbahaya karena dapat merusak alat-alat. Pada umumnya *arcing ground* hanya terjadi pada sistem yang tidak ditanahkan. Di samping itu munculnya *arcing* pada pemutus dapat menimbulkan tegangan lebih yang tinggi. Tegangan transien maksimum yang disebabkan oleh *switching* tergantung

dari sistem pentanahan yang digunakan. Tegangan transien yang paling tinggi terjadi pada sistem yang netralnya tidak ditanahkan, kemudian menyusul sistem yang ditanahkan dengan kumparan petersen. Untuk sistem yang ditanahkan dengan reaktansi atau tahanan, dimana reaktansi urutan nol dibagi reaktansi urutan positifnya lebih kecil dari 10, pada umumnya mempunyai tegangan lebih rendah.

2.4 Gangguan pada Sistem Tenaga Listrik

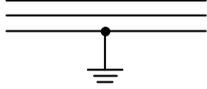
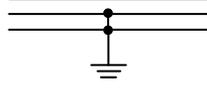
2.4.1 Penyebab gangguan

Suatu sistem tenaga listrik yang sangat luas cakupan areanya menyebabkan timbulnya gangguan tidak bisa dihindari. Pada sistem tenaga listrik, frekuensi terjadinya gangguan hampir sebagian besar dialami pada saluran udara (*overhead line*). Gangguan ini dapat terjadi karena kesalahan manusia, gangguan dari dalam, maupun gangguan dari luar.

Gangguan karena kesalahan manusia misalnya kelalaian pada saat mengubah jaringan sistem maupun lupa membuka pentanahan setelah perbaikan. Gangguan dari dalam misalnya gangguan-gangguan yang berasal dari sistem atau gangguan dari alat itu sendiri, seperti faktor ketuaan, arus lebih, tegangan lebih sehingga merusak isolasi peralatan. Gangguan dari luar misalnya gangguan yang berasal dari alam, diantaranya cuaca, gempa bumi, petir dan banjir, gangguan karena binatang maupun pohon atau dahan/ranting.

Adapun statistik frekuensi gangguan yang terjadi pada saluran udara terlihat dalam Tabel 2.1. (Perdana, 2008)

Tabel 2.1 Frekuensi gangguan pada saluran udara

Jenis Gangguan	Gambar	% Kejadian
L – G		85
L – L		8
L – L – G		5
L – L – L		≤ 2

Dari Tabel 2.1 terlihat bahwa pada saluran udara gangguan yang sering terjadi (85%) adalah gangguan fase ke tanah. Gangguan fase ke tanah pada umumnya dimulai dengan adanya loncatan busur api karena petir yang kemudian mengalir arus gangguan dari sistem ke tanah. Gangguan ini umumnya merupakan gangguan yang temporer. Gangguan dua fase pada umumnya terjadi karena kawat putus dan mengenai fase lainnya. Sedangkan gangguan tiga fase biasanya merupakan gangguan tiga fase yang simetris yang disebabkan kesalahan operasi dari petugas, misalnya waktu pemeliharaan atau perbaikan jaringan untuk pengamanannya ketiga fase yang akan diperbaiki diketanahkan. Setelah selesai perbaikan atau pemeliharaan, petugas lupa melepas pentanahan tersebut sehingga waktu diberi tegangan kembali terjadi hubung singkat tiga fase.

2.4.2 Analisa gangguan berdasarkan metode komponen simetris

Menurut teorema Fortescue, suatu sistem tak seimbang yang terdiri dari n fasor-fasor yang berhubungan dapat diuraikan menjadi n buah sistem dengan fasor-fasor seimbang yang dinamakan komponen-komponen simetris dari fasor-fasor aslinya. N buah fasor pada setiap himpunan komponen-komponen simetris sama panjang, dan sudut-sudut di antara fasor-fasor yang bersebelahan dalam himpunan itu sama besar. (Sulasno, 2001)

Jadi dalam sistem tenaga listrik tiga fase, tiga fasor tak seimbang dapat diuraikan menjadi tiga sistem fasor yang seimbang. Himpunan-himpunan seimbang dari komponen-komponen itu adalah:

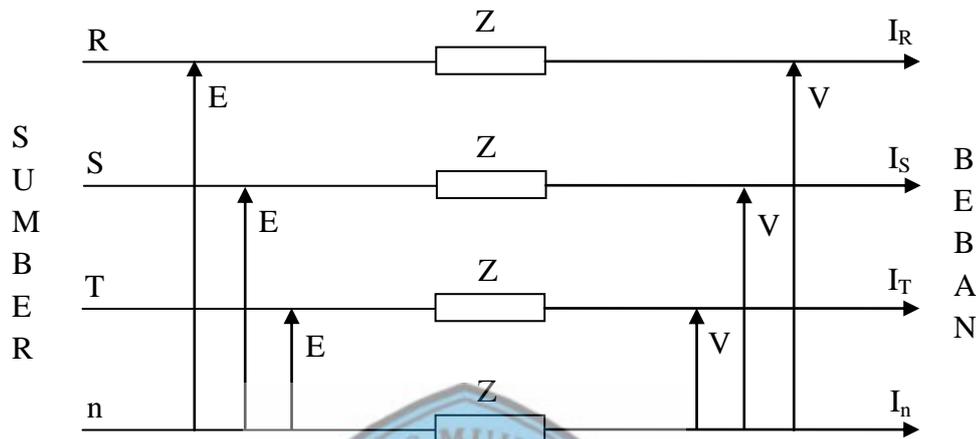
Komponen-komponen urutan positif (*positive sequence components*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor-fasor aslinya.

Komponen-komponen urutan negatif (*negative sequence components*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor-fasor aslinya.

Komponen-komponen urutan nol (*zero sequence components*) yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan pergeseran fasa nol antara fasor satu dengan yang lain.

Komponen simetris lazim digunakan dalam menganalisa gangguan-gangguan dalam suatu sistem kelistrikan. Biasanya ketiga fase dari sistem diberi

nama seperti R, S, dan T. Adapun penggambaran ketiga fasor dari urutan fase tegangan, arus dan impedansi dalam jaringan sistem tiga fase empat kawat dapat dilihat dalam Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Fase tegangan, arus dan impedansi pada sistem tiga fase empat kawat

Ketiga himpunan komponen simetris dinyatakan dengan subskrip tambahan 1 untuk komponen urutan positif, 2 untuk komponen urutan negatif, dan 0 untuk komponen urutan nol. Demikian pula untuk fasor arus dan impedansi yang dinyatakan dengan I dan Z juga mempunyai subskrip seperti pada tegangan. Komponen urutan positif dari V_R , V_S , dan V_T adalah V_{R1} , V_{S1} , dan V_{T1} , demikian pula untuk komponen urutan negatif adalah V_{R2} , V_{S2} , dan V_{T2} , sedangkan komponen urutan nol adalah V_{R0} , V_{S0} , dan V_{T0} . Gambar 2.10 menunjukkan himpunan komponen simetris dari tiga fasor tegangan yang tidak seimbang.

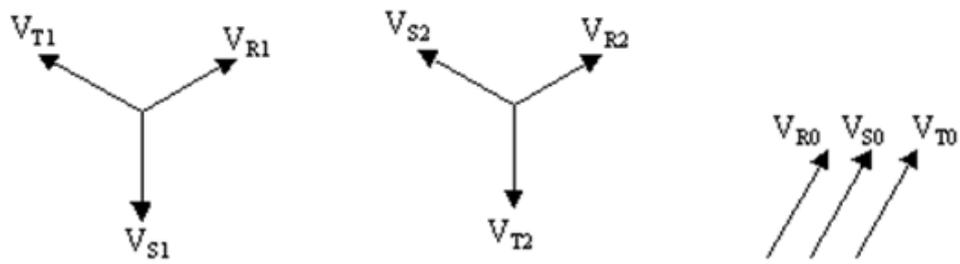


Diagram Urutan Positif Diagram Urutan Negatif Diagram Urutan Nol

Gambar 2.10 Diagram komponen simetris dari tiga fasor tegangan yang tidak seimbang

Karena fasor asli yang tak seimbang merupakan jumlah komponen-komponen simetrisnya, maka dapat dinyatakan dalam persamaan suku-suku komponennya:

$$V_R = V_{R1} + V_{R2} + V_{R0} \quad (2.1)$$

$$V_S = V_{S1} + V_{S2} + V_{S0} \quad (2.2)$$

$$V_T = V_{T1} + V_{T2} + V_{T0} \quad (2.3)$$



Tegangan urutan nol hanya mengalirkan arus urutan nol, impedansi pada arus urutan nol disebut sebagai impedans urutan nol. Tegangan urutan positif hanya mengalirkan arus urutan positif, impedansi pada arus urutan positif disebut sebagai impedans urutan positif. Tegangan urutan negatif hanya mengalirkan arus urutan negatif, impedansi pada arus urutan negatif disebut sebagai impedans urutan negatif.

Dalam penerapan komponen simetris pada sistem tiga fasa memerlukan suatu satuan fasor dan operator yang akan memutar rotasi dengan fasor lainnya yang berbeda fasa 120°. Bila dipakai vektor/fasor satuan adalah “a”, maka:

$$1 = a^0 = 1\angle 0 = 1\angle 0 \times 120^\circ = 1 + j0$$

$$a^1 = 1\angle 120^\circ = 1\angle 1 \times 120^\circ = -0,5 + j0,866$$

$$a^2 = 1\angle 240^\circ = 1\angle 2 \times 120^\circ = -0,5 - j0,866$$

$$a^3 = 1\angle 360^\circ = 1\angle 3 \times 120^\circ = 1 + j0$$

$$a^n = 1\angle n \times 120^\circ = \cos(n \times 120^\circ) + j\sin(n \times 120^\circ)$$

Dengan berpedoman pada Gambar 2.10, diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$\begin{array}{lll}
 V_{R1} = V_{R1} & V_{R2} = V_{R2} & V_{R0} = V_{R0} \\
 V_{S1} = V_{R1} & V_{S2} = V_{R2} & V_{S0} = V_{R0} \\
 V_{T1} = V_{R1} & V_{T2} = V_{R2} & V_{T0} = V_{R0}
 \end{array} \tag{2.4}$$

Apabila persamaan (2.4) disubstitusikan ke persamaan (2.1), (2.2), dan (2.3), maka didapatkan persamaan:

$$V_R = V_{R1} + V_{R2} + V_{R0} \tag{2.4}$$

$$V_S = V_{R1} + V_{R2} + V_{R0} \tag{2.5}$$

$$V_T = V_{R1} + V_{R2} + V_{R0} \tag{2.6}$$

Atau dalam bentuk matriks:

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

Untuk memudahkan dimisalkan:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

maka:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

Dengan mengalikan kedua sisi persamaan (2.8) dengan A^{-1} didapat:

$$\begin{bmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Dari persamaan (2.9) di atas menunjukkan cara menguraikan tiga fasor tak simetris menjadi komponen simetrisnya. Adapun bentuk persamaan fungsinya menjadi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_{R0} &= \frac{1}{3} (V_R + V_S + V_T) \\ V_{R1} &= \frac{1}{3} (V_R + a^2 V_S + a V_T) \\ V_{R2} &= \frac{1}{3} (V_R + a V_S + a^2 V_T) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Adapun komponen V_{S0} , V_{S1} , V_{S2} , V_{T0} , V_{T1} , dan V_{T2} dapat diperoleh dengan menurunkan persamaan (2.4). Selain itu dari persamaan-persamaan himpunan fasor-fasor yang berhubungan terdahulu dapat pula digunakan untuk menuliskan fasor-fasor arus sebagai ganti dari fasor-fasor tegangan. Berikut dituliskan fasor untuk arus:

$$I_R = I_{R1} + I_{R2} + I_{R0} \quad (2.11)$$

$$I_S = I_{R1} + I_{R2} + I_{R0} \quad (2.12)$$

$$I_T = I_{R1} + I_{R2} + I_{R0} \quad (2.13)$$

Atau dalam bentuk matriks:

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Bentuk persamaan fungsinya menjadi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_{R0} &= \frac{1}{3}(I_R + I_S + I_T) \\ I_{R1} &= \frac{1}{3}(I_R + a^2 I_S + a I_T) \\ I_{R2} &= \frac{1}{3}(I_R + a I_S + a^2 I_T) \end{aligned} \quad (2.15)$$

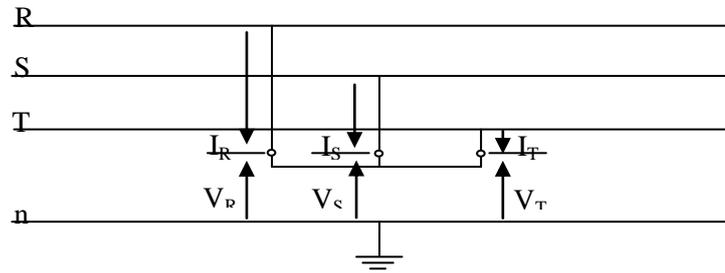
Dalam suatu sistem tiga fase, jumlah arus saluran adalah sama dengan arus I_n dalam jalur kembali lewat netral. Sehingga:

$$I_R + I_S + I_T = I_n \quad (2.16)$$

Dari persamaan komponen simetris yang telah dijabarkan di atas, dapat digunakan untuk melakukan perhitungan besar arus gangguan dalam sistem tenaga listrik sebagai berikut.

1. Gangguan tiga fase (L – L – L)

Dalam sistem tenaga listrik, gangguan tiga fase terjadi apabila ketiga fase saling terhubung singkat seperti Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Gangguan tiga fase terhubung singkat

$$I_R + I_S + I_T = 0$$

$$V_R - V_S = 0; V_R - V_T = 0; V_S - V_T = 0$$

$$V_R = V_S = V_T$$

(2.17)

Persamaan urutan tegangannya adalah:

$$V_{R0} = \frac{1}{3}(V_R + V_S + V_T) = V_R$$

$$V_{R1} = \frac{1}{3}(V_R + aV_R + a^2V_R) = \frac{1}{3}(1 + a + a^2)V_R = 0$$

$$V_{R2} = \frac{1}{3}(V_R + a^2V_R + aV_R) = \frac{1}{3}(1 + a^2 + a)V_R = 0$$

(2.18)

Arus urutan nol:

$$I_{R0} = \frac{1}{3}(I_R + I_S + I_T) = 0$$

$$V_{R1} = E_R - I_{R1}Z_1$$

$$0 = E_R - I_{R1}Z_1$$

$$\text{maka: } I_{R1} = E_R/Z_1$$

$$V_{R2} = -I_{R2}Z_2, \text{ karena } V_{R2} = 0, \text{ maka } I_{R2} = 0$$

$$I_R = I_{R0} + I_{R1} + I_{R2} = 0 - E_R/Z_1 + 0$$

$$I_R = E_R/Z_1$$

$$I_S = a^2E_R/Z_1$$

$$I_S = aE_R/Z_1$$

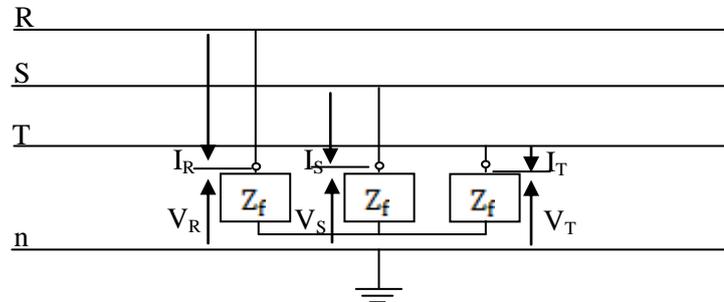
(2.19)

Arus Gangguan :

$$I_f = I_R = I_S = I_T$$

(2.20)

Apabila saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fase terdapat impedansi gangguan seperti Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Gangguan tiga fase terhubung singkat melalui impedansi gangguan

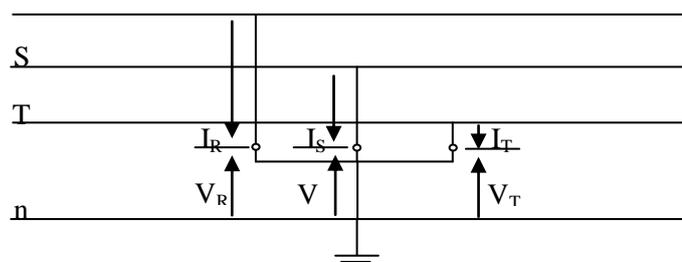
Maka jika diuraikan berdasar komponen-komponen simetrisnya seperti sebelumnya akan menghasilkan persamaan arus gangguan tiga fase melalui impedansi sebagai berikut:

$$I_f = \frac{E_R}{(Z_1 + Z_f)} \quad (2.21)$$

Dari persamaan (2.20) hingga (2.21) di atas terlihat bahwa arus maupun tegangan pada kondisi gangguan tiga fase baik secara langsung maupun melalui impedansi gangguan tidak mengandung arus urutan nol maupun impedansi netral. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa pada gangguan tiga fase, sistem pentanahan netral tidak ada pengaruhnya.

2. Gangguan tiga fase ke tanah (L – L – L – G)

Dalam sistem tenaga listrik, gangguan tiga fase ke tanah terjadi apabila ketiga fase saling terhubung singkat dengan tanah seperti Gambar 2.13.



Gambar 2.6 Gangguan tiga fase terhubung singkat dengan tanah

Untuk kondisi gangguan tiga fase ke tanah, maka perhitungan arus gangguannya sebagai berikut:

$$I_R + I_S + I_T = 0$$

$$V_R = V_S = V_T = 0$$

maka:

$$V_{R0} = \frac{1}{3}(V_R + V_S + V_T) = 0$$

$$V_{R1} = \frac{1}{3}(V_R + aV_R + a^2V_R) = 0$$

$$V_{R2} = \frac{1}{3}(V_R + a^2V_R + aV_R) = 0$$

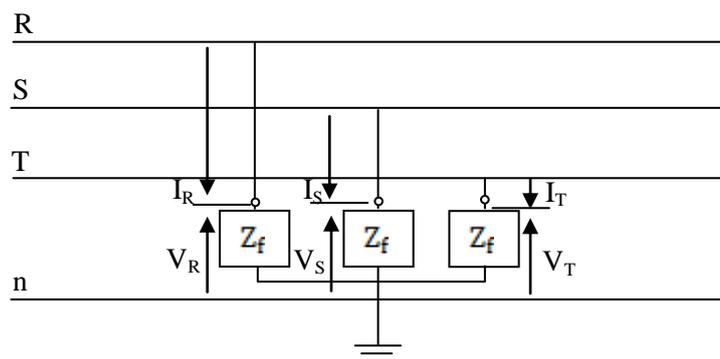
$$I_{R0} = \frac{1}{3}(I_R + I_S + I_T) = 0$$

$$V_{R1} = E_R - I_{R1}Z_1, \text{ maka } I_{R1} = E_R/Z_1 \quad (2.22)$$

$$V_{R2} = -I_{R2}Z_2, \text{ maka } I_{R2} = 0$$

$$\text{Arus gangguan } I_f = I_R + I_S + I_T = 0 \quad (2.23)$$

Apabila saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fase ke tanah terdapat impedansi gangguan seperti Gambar 2.14 di bawah ini



Gambar 2.14 Gangguan tiga fase terhubung singkat ke tanah melalui impedansi gangguan

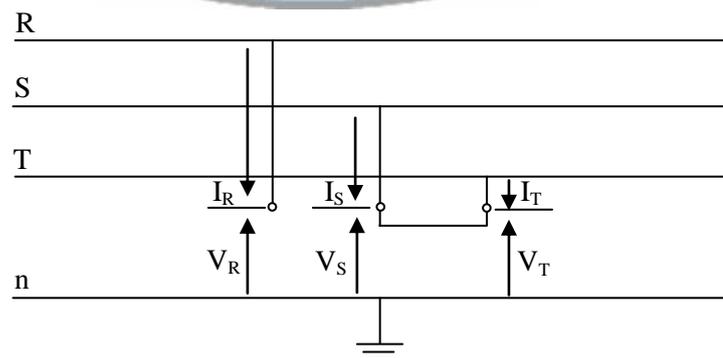
Maka jika diuraikan berdasar komponen-komponen simetrisnya seperti sebelumnya akan menghasilkan persamaan arus gangguan tiga fase ke tanah melalui impedansi sebagai berikut:

$$I_f = \frac{E_R}{(Z_1 + Z_f)} \quad (2.24)$$

Terlihat dari persamaan di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa arus gangguan yang mengalir pada gangguan tiga fase melibatkan maupun tidak melibatkan tanah besarnya sama. Di samping itu meskipun gangguan tiga fase melibatkan tanah, namun tidak ada arus urutan nol yang mengalir, sehingga impedansi pentanahan netral tidak ada pengaruhnya.

3. Gangguan dua fase (L – L)

Dalam sistem tenaga listrik, gangguan dua fase terjadi apabila antar fase saling terhubung singkat seperti Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Gangguan dua fase terhubung singkat

Persamaan pada kondisi gangguan ini adalah:

$$\begin{aligned} V_S &= V_T \\ I_R &= 0 \\ I_S &= -I_T \end{aligned} \tag{2.25}$$

Komponen Simetris tegangannya adalah :

$$\begin{aligned} V_{R0} &= \frac{1}{3}(V_R + V_S + V_T) = \frac{1}{3}(V_R + 2V_S) \\ V_{R1} &= \frac{1}{3}(V_R + aV_R + a^2V_R) = \frac{1}{3}(V_R + (a + a^2)V_S) \\ V_{R2} &= \frac{1}{3}(V_R + a^2V_R + aV_R) = \frac{1}{3}(V_R + (a^2 + a)V_S) \end{aligned} \tag{2.26}$$

Komponen – komponen simetris arus adalah :

$$\begin{aligned} I_{R0} &= \frac{1}{3}(I_R + I_S + I_T) = \frac{1}{3}(I_S + I_T) = \frac{1}{3}(-I_T + I_T) = 0 \\ I_{R1} &= \frac{1}{3}(I_R - aI_T + a^2I_T) = \frac{1}{3}(a^2 - a)I_T \\ I_{R2} &= \frac{1}{3}(I_R - a^2I_T + aI_T) = \frac{1}{3}(a - a^2)I_T \end{aligned} \tag{2.27}$$

$$I_{R0} = 0 \tag{2.28}$$

$$I_{R1} = -I_{R2} \tag{2.29}$$

Persamaan tegangannya menjadi :

$$\begin{aligned} V_{R1} &= E_R - I_{R1}Z_1 \\ V_{R2} &= -I_{R2}Z_2 = I_{R1}Z_1 \\ V_{R0} &= -I_{R0}Z_0 = 0 ; \text{ karena } I_{R0} = 0 \end{aligned} \tag{2.30}$$

Dari persamaan tegangan (2.30) dapat dicari nilai arus gangguan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \underline{V}_{R2} &= \underline{V}_{R1} \\
 I_{R1}Z_2 &= E_R - I_{R1}Z_1 \\
 I_{R1}(Z_1 + Z_2) &= E_R \\
 I_{R1} &= \frac{E_R}{(Z_1 + Z_2)} \\
 I_{R2} &= -\frac{E_R}{(Z_1 + Z_2)}
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

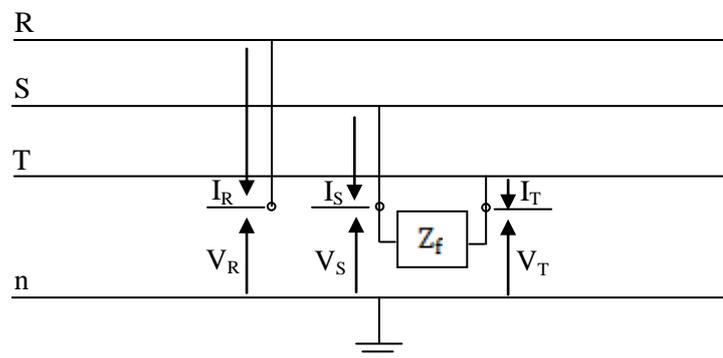
Arus gangguan :

$$\begin{aligned}
 I_f &= I_S = -I_T \\
 I_f &= I_{R0} + a^2 I_{R1} + a I_{R2} \\
 I_f &= I_{R0} + a^2 I_{R1} - a I_{R1} \\
 I_f &= 0 + (a^2 - a) I_{R1} \\
 I_f &= (a^2 - a) I_{R1}
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

Jadi:

$$I_f = I_S = -I_T = (a^2 - a) \frac{E_R}{(Z_1 + Z_2)}
 \tag{2.33}$$

Apabila saat terjadi gangguan hubung singkat dua fase terdapat impedansi gangguan seperti Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Gangguan dua fase terhubung singkat melalui impedansi gangguan

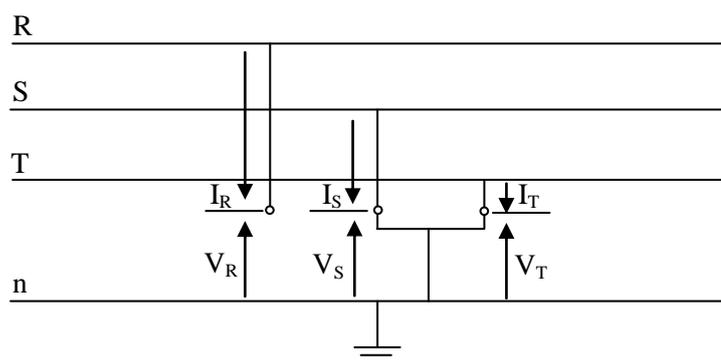
Maka jika diuraikan berdasar komponen-komponen simetrisnya seperti sebelumnya akan menghasilkan persamaan arus gangguan dua fase melalui impedansi sebagai berikut:

$$I_f = (a^2 - a) \frac{E_R}{(Z_1 + Z_2 + Z_f)} \quad (2.34)$$

Dari persamaan arus gangguan di atas terlihat bahwa baik gangguan dua fase langsung maupun melalui impedansi gangguan, impedansi netral tidak berpengaruh pada besar arus gangguan antar fase. Ini dikarenakan tidak ada arus urutan nol yang mengalir, hanya komponen urutan positif dan urutan negatif saja.

4. Gangguan dua fase ke tanah (L – L – G)

Dalam sistem tenaga listrik, gangguan dua fase ke tanah terjadi apabila antar fase saling terhubung singkat dengan tanah seperti Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Gangguan dua fase terhubung singkat dengan tanah

Komponen-komponen simetris tegangan adalah:

$$V_{R0} = \frac{1}{3}(V_R + V_S + V_T) = \frac{1}{3}V_R$$

$$V_{R1} = \frac{1}{3}(V_R + aV_S + a^2V_T) = \frac{1}{3}V_R$$

$$V_{R2} = \frac{1}{3}(V_R + a^2V_S + aV_T) = \frac{1}{3}V_R$$

$$\text{Diperoleh: } V_{R1} = V_{R2} = V_{R0} = \frac{1}{3}V_R \quad (2.35)$$

$$\text{Diperoleh: } V_{R1} = V_{R2} = V_{R0} = \frac{1}{3}V_R \quad (2.36)$$

Dari persamaan tegangan:

$$\begin{aligned} V_{R1} &= E_R - I_{R1}Z_1 \rightarrow I_{R1} = \frac{E_R}{Z_1} - \frac{V_{R1}}{Z_1} \\ V_{R2} &= -I_{R2}Z_2 \rightarrow I_{R2} = -\frac{V_{R2}}{Z_2} \\ V_{R0} &= -I_{R0}Z_0 \rightarrow I_{R0} = -\frac{V_{R0}}{Z_0} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Apabila ketiga persamaan arus dijumlahkan akan didapat:

$$\begin{aligned} I_{R1} + I_{R2} + I_{R0} &= \frac{E_R}{Z_1} - \frac{V_{R1}}{Z_1} - \frac{V_{R2}}{Z_2} - \frac{V_{R0}}{Z_0} \\ 0 &= I_{R1} - \frac{E_R - I_{R1}Z_1}{Z_2} - \frac{E_R - I_{R1}Z_1}{Z_0} \\ 0 &= I_{R1} - \frac{E_R}{Z_2} + I_{R1} \frac{Z_1}{Z_2} - \frac{E_R}{Z_0} + I_{R1} \frac{Z_1}{Z_0} \\ 0 &= I_{R1} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0} \right) - \left(\frac{E_R}{Z_2} + \frac{E_R}{Z_0} \right) \\ I_{R1} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0} \right) &= \left(\frac{E_R}{Z_2} + \frac{E_R}{Z_0} \right) \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$I_{R1}(Z_2Z_0 + Z_1Z_0 + Z_1Z_2) = E_R(Z_0 + Z_2)$$

$$I_{R1} = \frac{E_R(Z_0+Z_2)}{Z_2Z_0+Z_1Z_0+Z_1Z_2}$$

$$I_{R1} = \frac{E_R}{Z_1 + \frac{Z_2Z_0}{Z_0+Z_2}}$$

$$I_{R1} = -(I_{R2} + I_{R0}) = -\left(-\frac{1}{Z_2} - \frac{1}{Z_0}\right)V_{R1}$$

$$I_{R1} = \frac{Z_0+Z_2}{Z_2Z_0} V_{R1} \tag{2.39}$$

Atau:

$$V_{R1} = \frac{Z_2Z_0}{Z_0+Z_2} I_{R1} \tag{2.40}$$

Karena $V_{R1} = V_{R2} = V_{R0}$, maka diperoleh:

$$I_{R2} = \frac{Z_0}{Z_0+Z_2} I_{R1} = \frac{Z_0}{Z_1Z_2+Z_1Z_0+Z_2Z_0} E_R$$

$$I_{R0} = -\frac{Z_2}{Z_0+Z_2} I_{R1} = -\frac{Z_2}{Z_1Z_2+Z_1Z_0+Z_2Z_0} E_R$$

$$I_R = 0$$

$$I_S = I_{R0} + a^2I_{R1} + aI_{R2}$$

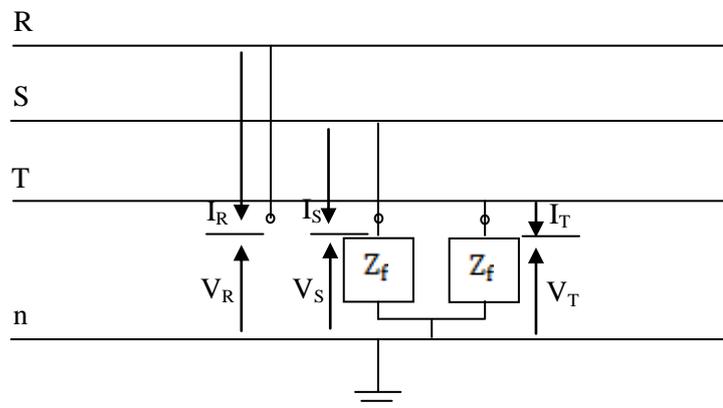
$$I_T = I_{R0} + aI_{R1} + a^2I_{R2}$$

$$I_f = I_n = I_R + I_S + I_T = 0$$

$$I_f = 2I_{R0} + (a^2 - a)I_{R1} + (a + a^2)I_{R2} = 0$$

$$I_f = 3I_{R0} \tag{2.41}$$

Apabila saat terjadi gangguan hubung singkat dua fase ke tanah terdapat impedansi gangguan seperti Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Gangguan dua fase terhubung singkat ke tanah melalui impedansi gangguan

Maka jika diuraikan berdasar komponen-komponen simetrisnya seperti sebelumnya akan menghasilkan persamaan arus gangguan dua fase ke tanah melalui impedansi sebagai berikut:

$$I_f = \frac{3Z_2}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0 + 3Z_f(Z_1 + Z_2)} E_R \quad (2.42)$$

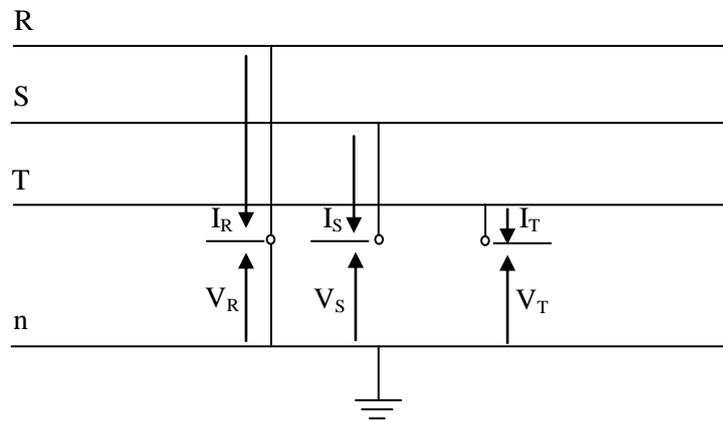
Pada gangguan dua fase ke tanah baik secara langsung maupun melalui impedansi gangguan, impedansi netral berpengaruh pada besar arus gangguan yang terjadi. Ini dikarenakan nilai impedansi netral berpengaruh pada besar

impedansi urutan nol yang terjadi membentuk persamaan . $Z_0 = Z'_0 + 3Z_n$.

Besar impedansi pentanahan netral menentukan besar impedansi urutan nol dan arus urutan nol yang mengalir.

5. Gangguan satu fase ke tanah (L – G)

Dalam sistem tenaga listrik, gangguan satu fase ke tanah terjadi apabila salah satu fase terhubung singkat ke tanah seperti Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Gangguan satu fase terhubung singkat dengan tanah

Keadaan gangguan ini memiliki persamaan:

$$\begin{aligned}
 I_S &= 0 \\
 I_T &= 0 \\
 V_T &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.43}$$

Komponen-komponen simetris arus adalah:

$$\begin{aligned}
 I_{R0} &= \frac{1}{3}(I_R + I_S + I_T) = \frac{1}{3}I_R \\
 I_{R1} &= \frac{1}{3}(I_R + aI_S + a^2I_T) = \frac{1}{3}I_R \\
 I_{R2} &= \frac{1}{3}(I_R + a^2I_S + aI_T) = \frac{1}{3}I_R
 \end{aligned}
 \tag{2.44}$$

Sehingga :

$$I_{R1} = I_{R2} = I_{R0}
 \tag{2.45}$$

Persamaan-persamaan untuk komponen-komponen tegangan:

$$\begin{aligned}
 V_{R1} &= E_R - I_{R1}Z_1 \\
 V_{R2} &= -I_{R2}Z_2 \\
 V_{R0} &= -I_{R0}Z_0
 \end{aligned}
 \tag{2.46}$$

$V_R = V_{R1} + V_{R2} + V_{R0}$, maka pada gangguan ini:

$$0 = E_R - I_{R1}Z_1 - I_{R2}Z_2 - I_{R0}Z_0$$

$$0 = E_R - I_{R1}(Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (2.47)$$

$$I_{R1} = \frac{E_R}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

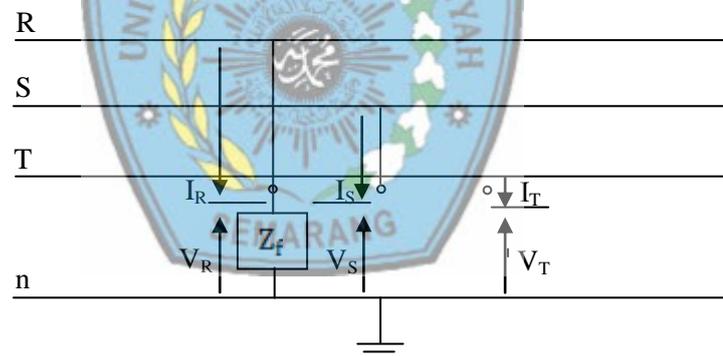
$$I_{R1} = I_{R2} = I_{R0} = \frac{E_R}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$I_R = I_{R1} + I_{R2} + I_{R0} = 3I_{R1}$$

$$I_f = I_R = 3I_{R1} = \frac{3E_R}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Dengan: $Z_0 = Z'_0 + 3Z_n$ (2.48)

Apabila saat terjadi gangguan hubung singkat satu fase ke tanah terdapat impedansi gangguan seperti Gambar 2.20 di bawah ini



Gambar 2.20 Gangguan satu fase terhubung singkat ke tanah melalui impedansi gangguan

Maka jika diuraikan berdasar komponen-komponen simetrisnya seperti sebelumnya akan menghasilkan persamaan arus gangguan dua fase ke tanah melalui impedansi sebagai berikut:

$$I_f = \frac{3}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} E_R \quad (2.49)$$

Dari persamaan (2.48) dan (2.49), terlihat bahwa komponen arus gangguan satu fase ke tanah secara langsung maupun melalui impedansi gangguan terdiri dari komponen urutan positif, negatif dan nol. Impedansi netral mempengaruhi besar arus gangguan satu fase ke tanah yang mengalir karena impedansi netral menentukan besar impedansi urutan nol yang terjadi.

2.4.3 Pengaruh metode pentanahan netral terhadap besar arus gangguan

Dari persamaan-persamaan di atas terlihat bahwa arus urutan nol hanya mengalir bila gangguan yang terjadi melibatkan tanah, meliputi gangguan satu fase ke tanah dan dua fase ke tanah. Khusus pada gangguan tiga fase ke tanah, tidak ada komponen arus urutan nol dan negatif yang mengalir karena gangguan tiga fase ke tanah merupakan gangguan simetris seperti halnya gangguan tiga fase. Impedansi pada arus urutan nol disebut sebagai impedansi urutan nol (Z_0). Besar impedansi urutan nol dipengaruhi oleh nilai impedansi pentanahan netral sistem distribusi. Besar impedansi netral bergantung pada metoda pentanahan netral (pentanahan sistem) yang digunakan. Seperti yang telah diuraikan pada sub bab sebelumnya terdapat 4 macam metode pentanahan netral, yaitu pentanahan langsung, pentanahan melalui tahanan, pentanahan melalui reaktor dan pentanahan melalui kumparan Petersen.

Pada pentanahan langsung, bila terjadi gangguan ke tanah maka arus gangguan ke tanah sangat besar sehingga dapat membahayakan makhluk hidup didekatnya dan kerusakan peralatan listrik yang dilaluinya. Adapun besar arus gangguan ke tanah di atas bisa mencapai 60% dari besar arus gangguan 3 fase. Oleh karena arus gangguan ke tanah yang mengalir sangat besar maka dapat

mempermudah kerja pemutus daya dalam melokalisir lokasi gangguan sehingga letak gangguan cepat diketahui.

Pada pentanahan melalui tahanan, besar arus gangguan ketanah dibatasi oleh tahanan itu sendiri. Dengan demikian pada tahanan itu akan timbul rugi daya selama terjadi gangguan fasa ke tanah. Dengan memilih harga tahanan yang tepat, arus gangguan ketanah dapat dibatasi sehingga besarnya antara 10% sampai 25% dari arus gangguan 3 fase dan besarnya hampir sama bila gangguan terjadi disegala tempat didalam sistem jika tidak terdapat titik pentanahan lainnya. Karena arus gangguan relatif kecil, maka dapat mengurangi kerusakan peralatan listrik akibat arus gangguan yang melaluinya. Namun arus gangguan ke tanah yang relatif kecil menyebabkan kepekaan rele pengaman menjadi berkurang dan lokasi gangguan tidak cepat diketahui.

Pada pentanahan melalui reaktor maka suatu impedansi yang lebih induktif disisipkan dalam titik netral trafo atau generator dengan tanah. Adanya reaktor dapat membatasi besar arus gangguan tanah. Besar arus gangguan ke tanah dibuat agar diatas 25% dari arus gangguan 3 fase. Metode pentanahan melalui reaktor mempunyai keuntungan dari pentanahan melalui tahanan yaitu energi yang disisipkan dalam reaktor lebih kecil sehingga dapat membatasi banyaknya panas yang hilang pada waktu terjadi gangguan.

Pada pentanahan melalui kumparan petersen, besar reaktansi kumparan dapat diatur dengan menggunakan tap. Pentanahan melalui kumparan petersen dapat membuat arus gangguan tanah yang sekecil-kecilnya dan pemadaman busur api dapat terjadi dengan sendirinya sehingga melindungi sistem dari gangguan

hubung singkat fasa ke tanah yang sementara sifatnya (*temporary fault*). Kumputan Petersen berfungsi untuk memberi arus induksi yang mengkompensasi arus gangguan ke tanah, sehingga arus gangguan ke tanah menjadi kecil sekali dan tidak membahayakan peralatan listrik yang dilaluinya. Kecilnya arus gangguan ke tanah yang mengalir pada sistem menyebabkan rele gangguan tanah tidak langsung bekerja dan membuka pemutus dari bagian yang terganggu. Dengan demikian kontinuitas penyaluran tenaga listrik tetap berlangsung untuk beberapa waktu lamanya walaupun sistem dalam keadaan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

2.5 Perlengkapan Pengaman Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Jaringan distribusi bertugas untuk menyalurkan energi listrik dari pusat beban ke pihak pelanggan melalui jaringan listrik tegangan menengah dan tegangan rendah. Karena fungsi tersebut maka jaringan distribusi dilengkapi dengan pengaman untuk menjamin keandalan saat penyaluran energi listrik.

Sistem pengaman memiliki tiga kegunaan yaitu untuk mencegah atau membatasi kerusakan pada jaringan beserta peralatannya, menjaga keselamatan umum akibat gangguan listrik, serta meningkatkan kelangsungan atau kontinuitas pelayanan kepada pelanggan. (Suhadi, 2008b)

Suatu sistem pengaman jaringan distribusi yang baik harus mampu melakukan koordinasi dengan sistem tegangan tinggi (GI/transmisi/pembangkit), mengamankan peralatan dari kerusakan dan gangguan, membatasi kemungkinan terjadinya kecelakaan, secepatnya dapat membebaskan pemadaman karena gangguan, membatasi daerah yang mengalami pemadaman, serta mengurangi

frekuensi pemutusan tetap karena gangguan. Selain itu setiap sistem atau alat pengaman harus mempunyai kepekaan, kecermatan dan kecepatan bereaksi yang baik.

Jenis pengaman yang digunakan pada jaringan tegangan menengah antara lain:

2.5.1 Pengaman lebur

Pengaman lebur atau *fuse cut out* (FCO) adalah pengaman bagian dari saluran dan peralatan dari gangguan hubung singkat antar fasa, dapat pula sebagai pengaman hubung singkat fasa ke tanah bagi sistem yang ditanahkan langsung. Pengaman lebur bekerja berdasarkan panas yang timbul pada elemen lebur karena dilalui arus listrik yang melebihi batas-batas tertentu sehingga elemen lebur tersebut meleleh dan putus. Pengaman lebur biasanya digunakan sebagai pengaman saluran cabang.

Dalam jaringan distribusi ada tiga tipe utama dari pengaman lebur yaitu (Suhadi, 2008b):

1. Pengaman lebur tipe “plug”

Pada pengaman lebur tipe “plug”, pita pelebur dipasang pada sebuah “plug” porselen yang dimasukkan di antara dua kontak. Pelebur tipe ini dibatasi pada rating arus 30 Ampere dan digunakan pada trafo-trafo yang kecil.

2. Pengaman lebur tipe pintu

Pengaman lebur tipe pintu dipasang di sebelah dalam pintu. Bila pintu ditutup, elemen pelebur menghubungkan dua kontak. Elemen lebur

dimasukkan ke dalam sebuah tabung fiber. Pengaman lebur tipe pintu sering disebut juga sebagai pengaman lebur tipe ekspulsi.

3. Pengaman lebur tipe terbuka

Pengaman lebur tipe terbuka pada dasarnya sama dengan tipe pintu, namun pada tipe ini tabung fiber yang berisi elemen lebur dipasang di udara terbuka. Susunan ini memungkinkan pelebur dapat memutus arus yang lebih besar tanpa adanya gas-gas pengusir.

Pengaman lebur mempunyai karakteristik arus waktu berupa sepasang garis lengkung. Lengkung yang berada di bawah disebut waktu lebur minimum (*minimum melting time*), lengkung di atas disebut waktu bebas maksimum (*maximum clearing time*). Ada dua tipe pengaman lebur yaitu tipe cepat (K) dan tipe lambat (T). Perbedaan kedua tipe ini terletak pada *speed ratio*-nya.

2.5.2 Rele pengaman

Rele pengaman merupakan suatu alat yang dapat mendeteksi adanya gangguan dan berfungsi sebagai alat pengontrol bekerjanya peralatan pemutus ataupun peralatan indikator bahaya apabila terdapat besaran yang melebihi batas-batas yang telah ditetapkan pada rele tersebut.

Adapun macam-macam rele pengaman dalam jaringan distribusi tenaga listrik antara lain adalah sebagai berikut (Ravindranath dan Chander, 1983):

2.5.2.1 Rele arus lebih

Rele arus lebih atau *overcurrent relay* (OCR) adalah pengaman utama sistem distribusi tegangan menengah terhadap gangguan hubung singkat antar

fasa. Rele arus lebih bekerja berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi nilai settingnya dalam waktu tertentu. Pada dasarnya rele arus lebih merupakan suatu alat yang mendeteksi besaran arus yang melalui suatu jaringan dengan bantuan trafo arus. Rele arus lebih dipasang pada masing-masing fase sehingga setting arus (I_s) harus 1,5 kali lebih besar dari arus beban maksimum, agar rele tidak trip pada saat arus beban melebihi nilai arus beban penuh namun masih aman bagi peralatan. Setting arus rele juga harus 1,5 kali lebih kecil dari kemampuan hantar arus (KHA), agar penghantar aman dari kerusakan. Biasanya ditetapkan $I_s = 1,2 \times I_n$ (I_n = arus nominal peralatan terlemah). Adapun arus yang menyebabkan bekerjanya rele, meliputi:

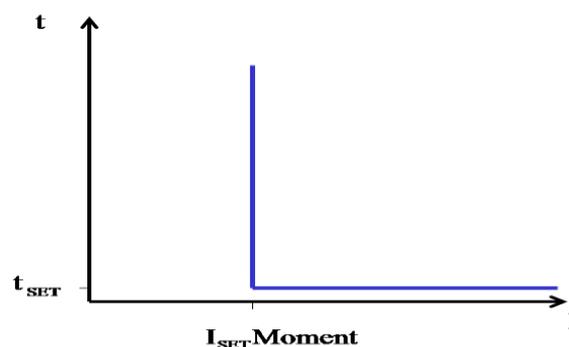
- a. Arus *pick-up* (I_p) adalah nilai arus minimum yang dapat menyebabkan rele bekerja dan menutup kontakannya. Arus ini biasa disebut sebagai arus kerja. Berdasarkan *British Standard* kesalahan *pick-up* berkisar antara 1,03-1,3 dari tiap *setting* arusnya.
- b. Arus *drop-off* (I_d) adalah nilai arus maksimum yang menyebabkan rele berhenti bekerja sehingga kontakannya membuka kembali. Arus ini biasa disebut sebagai arus kembali.

Sistem proteksi harus dirancang dan disetel sedemikian, sehingga memenuhi sistem *safety* dan *security*. Peralatan yang diproteksi harus aman terhadap kerusakan (*safe*) dan tidak boleh trip jika tidak betul-betul diperlukan agar tidak terjadi pemadaman listrik yang sia-sia (*secure*). *Safety* dan *security* yang lebih baik dalam sistem proteksi juga diupayakan dengan memilih

karakteristik rele yang tepat untuk kebutuhan sistem yang ada. Berdasarkan karakteristik waktu rele arus lebih dibagi menjadi 3, yaitu:

1. Rele tanpa penundaan waktu/seketika (*instantaneous relay*)

Rele tanpa penundaan waktu atau *instantaneous relay* adalah rele yang bekerja seketika (tanpa tunda waktu) ketika arus yang mengalir melebihi nilai settingnya. Dengan waktu buka yang sangat pendek, rele ini berguna untuk memutus arus yg besar bila gangguan terjadi di dekat sumber. Dalam waktu $\frac{1}{2}$ sampai 1 siklus, arus gangguan mengandung komponen DC sehingga dapat menyebabkan jangkauan lebih (*overreach*). Hal ini membuat rele akan bekerja (*pick-up*) pada nilai arus AC yang lebih rendah dari nilai *setting*-nya karena mengalami *offset* akibat adanya komponen arus DC sehingga arus tersebut menjadi naik dan terdeteksi oleh rele. Adapun untuk menghindari jangkauan lebih atau *overreach* akibat komponen DC maka rele akan bekerja dalam waktu beberapa mili detik (10 – 20 ms). Karakteristik kurva waktu *instantaneous relay* digambarkan dalam Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Karakteristik rele seketika

Selain itu dalam menentukan setting arus *instantaneous* harus diperhatikan beberapa hal diantaranya:

a. $I_{ins} > I_{transien}$

$I_{transien}$ merupakan arus peralihan yang nilainya cukup besar namun hanya berlangsung singkat. Pada saat terjadi $I_{transien}$ ini rele tidak boleh trip.

b. $I_{ins} < I_{kerusakan\ terbatas\ hantaran}$

Setting arus *instantaneous* harus lebih kecil dari batas arus yang dapat merusak penghantar maupun peralatan di jaringan agar penghantar maupun peralatan tidak rusak ketika gangguan terjadi.

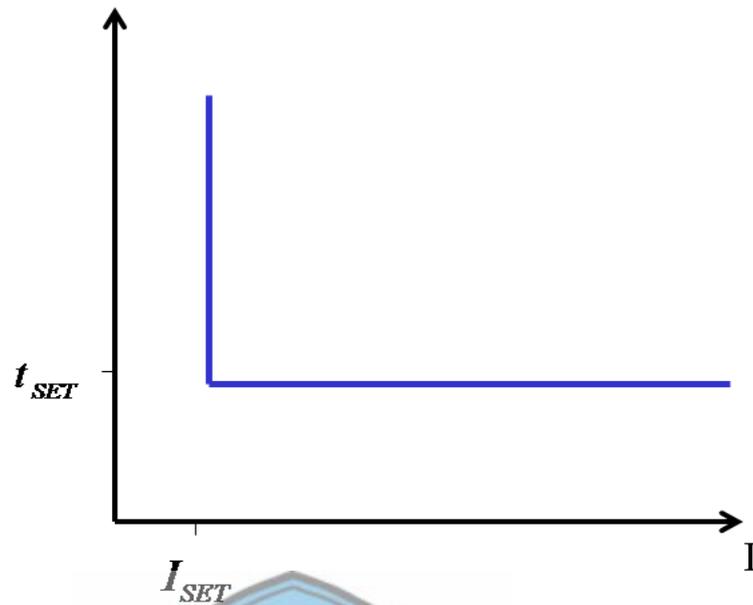
Umumnya jenis rele arus lebih tanpa tunda waktu/seketika jarang berdiri sendiri, namun dikombinasikan dengan rele arus lebih karakteristik yang lain.

2. Rele dengan penundaan waktu

Karakteristik tunda waktu rele terbagi menjadi 2, yaitu:

a. Dengan penundaan waktu tertentu (*definite time OCR*)

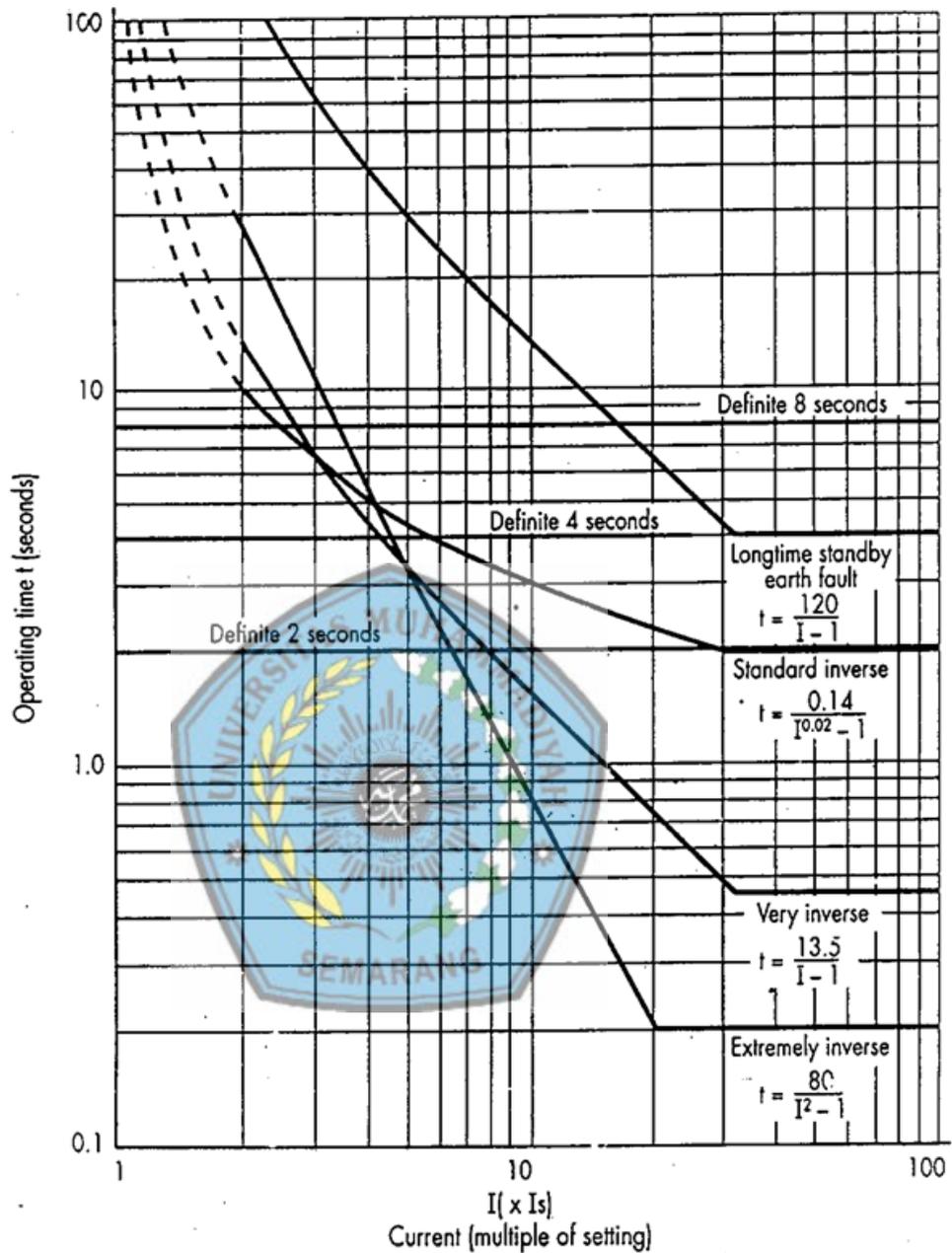
Rele ini akan memberikan perintah pada PMT pada saat terjadi gangguan hubung singkat dan besarnya arus gangguan melampaui nilai settingnya (I_s), dan jangka waktu kerja rele mulai *pick up* sampai kerja rele diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus yang mengenai rele. Karakteristik kurva waktu rele dengan penundaan waktu tertentu digambarkan dalam Gambar 2.22.



Gambar 2.22 Karakteristik rele tunda waktu

b. Dengan penundaan waktu berbanding terbalik (*inverse time OCR*)

Rele ini akan bekerja dengan waktu tunda yang tergantung dari besarnya arus secara terbalik (*invers time*), makin besar arus makin kecil waktu tundanya. Dengan *Time Multiple Setting* (TMS) = 1, maka karakteristik kurva waktu rele dengan tunda waktu terbalik dapat digambarkan dalam Gambar 2.23.



Gambar 2.23 Karakteristik rele dengan tunda waktu terbalik

Dari Gambar 2.23 terlihat bahwa karakteristik waktu rele dengan tunda waktu terbalik terbagi atas:

- *Long inverse*

$$\text{Time to trip} = \frac{120}{\left[\frac{I_{hs}}{I_{set}}\right]^{-1}} \quad (2.50)$$

- *Standard inverse*

$$\text{Time to trip} = \frac{0,14}{\left[\frac{I_{hs}}{I_{set}}\right]^{0,02} - 1} \quad (2.51)$$

- *Very inverse*

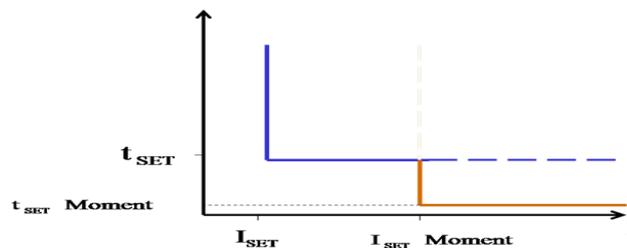
$$\text{Time to trip} = \frac{13,5}{\left[\frac{I_{hs}}{I_{set}}\right]^{-1}} \quad (2.52)$$

- *Extremely inverse*

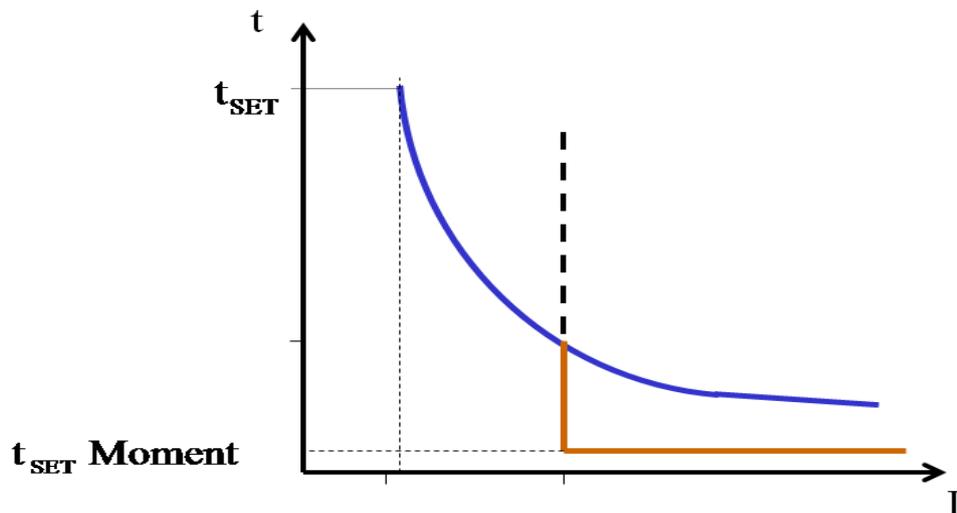
$$\text{Time to trip} = \frac{80}{\left[\frac{I_{hs}}{I_{set}}\right]^2 - 1} \quad (2.53)$$

3. Kombinasi antara keduanya

Rele ini menggunakan kombinasi karakteristik tunda waktu dengan trip seketika. Rele akan bekerja seketika bila arus gangguan yang terjadi sangat besar melebihi setting arus *instantaneous* nya, namun untuk arus gangguan yang tidak terlalu besar bekerjanya rele akan diperpanjang dengan waktu tertentu. Adapun karakteristik kombinasi tunda waktu tertentu dengan seketika ditunjukkan dalam Gambar 2.24, sedangkan karakteristik kombinasi tunda waktu terbalik dengan seketika ditunjukkan dalam Gambar 2.25.



Gambar 2.24 Karakteristik kombinasi seketika dengan tunda waktu tertentu



Gambar 2.25 Karakteristik kombinasi seketika dengan tunda waktu terbalik

2.5.2.2 Rele gangguan tanah

Sering terjadinya gangguan satu fase ke tanah dibandingkan gangguan antar fase menyebabkan pentingnya rele gangguan tanah dipasang pada sistem tenaga listrik. Rele gangguan tanah atau *ground fault relay* (GFR) berfungsi sebagai pengaman utama terhadap gangguan hubung singkat fasa ke tanah untuk sistem yang ditanahkan langsung atau melalui tahanan rendah.

Rele gangguan tanah ini sebenarnya hanyalah rele arus lebih biasa yang mendeteksi arus residu (*residual current*). Arus residu untuk proteksi saluran diperoleh dari penjumlahan arus-arus fase yang menggunakan trafo arus tiga fasa atau sebuah trafo arus jenis. Jika arus-arus fasanya dinyatakan dengan I_R , I_S , dan I_T maka jumlah vektornya adalah:

$$\begin{aligned}
 I_R + I_S + I_T &= 0, \text{ pada keadaan normal} \\
 I_R + I_S + I_T &= I_F, \text{ pada keadaan gangguan fasa ke tanah.}
 \end{aligned}
 \tag{2.54}$$

Kaidah penyetingan rele gangguan tanah lebih sederhana dari pada rele gangguan fase, karena rele hanya mendeteksi arus residu yg bernilai nol pada

keadaan normal. Akan tetapi untuk mengantisipasi agar rele tidak trip akibat adanya arus residu karena beban tidak seimbang, maka biasanya dilakukan perhitungan arus gangguan ke tanah terlebih dahulu untuk menentukan setting rele gangguan tanah. Setting arus rele gangguan tanah biasanya dipilih sekitar 10% dari nilai arus gangguan tanah terkecil atau (0,3 – 0,5) kali nilai arus beban penuhnya. Setting arus rele gangguan tanah sengaja dipilih jauh lebih kecil dari nilai arus gangguan tanah terkecil untuk mengantisipasi apabila terdapat tahanan gangguan saat terjadi gangguan tanah (Wahyudi, 2008).

Rele gangguan tanah ini hanya cocok untuk digunakan pada sistem dengan pentanahan langsung dan dengan tahanan rendah. Untuk sistem dengan pentanahan dengan tahanan tinggi, arus gangguan ke tanah sangat kecil sehingga harus digunakan rele gangguan tanah berarah yang lebih rumit.

2.5.2.3 Rele gangguan tanah berarah

Rele gangguan tanah berarah atau *directional ground fault relay* adalah pengaman utama terhadap hubung singkat fasa ke tanah untuk sistem yang ditanahkan melalui tahanan tinggi. Rele ini bekerja berdasarkan besar arus yang melebihi batas-batas arus yang telah ditetapkan pada rele tersebut. Rele ini sangat peka sekali dan akan trip bila terjadi perbedaan sudut fase tertentu antara arus dan tegangan saluran. Rele ini dapat mendeteksi adanya gangguan ke tanah dengan cara mendeteksi arus dan tegangan urutan nolnya. Apabila terdapat perbedaan sudut fase yang sesuai dengan daerah operasi rele maka rele ini akan trip.

2.5.3 Penutup balik otomatis (PBO)

Penutup balik otomatis (PBO) atau *automatic circuit recloser* berfungsi sebagai pengaman arus lebih terhadap gangguan temporer dalam sistem tenaga listrik dan dapat membatasi luas daerah yang padam akibat gangguan. PBO dapat menutup kembali secara otomatis beberapa kali dan dapat membuka terkunci (*locked out*) tanpa menutup kembali. Perangkat ini merupakan suatu *self contain device*, yaitu perlengkapan untuk pengindra arus, penunda waktu, dan pemutus arus yang terpasang menjadi satu unit (Perdana, 2008). Perangkat ini dapat mengatasi gangguan temporer agar tidak terjadi pemadaman tetap oleh gangguan yang sifatnya sementara. Apabila gangguan yang terjadi bersifat permanen, PBO akan terbuka dan mengunci sesudah beberapa kali kerja dan mengisolasi bagian yang terganggu dari sistem.

Berdasarkan jenis fasenya, PBO dapat diklasifikasikan menjadi 2 jenis meliputi:

1. PBO satu fase

Sesuai namanya jenis PBO ini digunakan untuk proteksi jaringan satu fase, seperti percabangan atau sadapan dari sistem tiga fase. Jenis PBO ini dapat juga digunakan di rangkaian tiga fase dimana beban yang dominan adalah satu fase.

2. PBO tiga fase digunakan bila diinginkan penguncian ketiga fase secara keseluruhan. Terdapat 2 model operasi dari PBO tiga fase, yaitu:



a. *Single phase trip, 3 phase lock-out* PBO tiga fase ini disusun dari 3 buah PBO satu fase yang dipasang di dalam satu tangki yang dihubungkan dengan interkoneksi mekanis yang berfungsi untuk mengunci.

b. *3 phase trip, 3 phase lock-out*

Semua kontak PBO tiga fase ini akan membuka bersamaan untuk setiap operasi buka saat terjadi gangguan. Ketiga fase saling dihubungkan secara mekanis untuk setiap pembukaan dan penutupan kembali dan beroperasi melalui mekanisme yang sama.

PBO menurut peralatan pengendalinya (*control*) dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu:

1. PBO hidraulik (*hydraulic control*)

PBO jenis ini digunakan pada semua PBO fase tunggal dan sebagian besar PBO tiga fase. PBO merasakan adanya arus lebih melalui *trip coil* yang dihubungkan seri dengan jaringan.

2. PBO elektronik

PBO jenis elektronik lebih fleksibel, mudah diatur dan lebih akurat. Pengontrol elektronik dipasang di dalam suatu kotak terpisah dari PBO. Pengontrol elektronik dapat memungkinkan dirubahnya karakteristik waktu arus, tingkat arus trip, dan urutan operasi PBO tanpa harus mengganggu operasi atau menurunkan PBO.

Pada saat terjadi gangguan, arus yang mengalir melalui PBO sangat besar dan melebihi setelan arus trip sehingga menyebabkan kontak PBO terbuka (*trip*) dalam operasi cepat (*fast trip*). Kontak PBO akan menutup kembali setelah

melewati waktu reclose sesuai setting. Tujuan memberi selang waktu ini adalah untuk memberikan waktu pada penyebab gangguan agar hilang, terutama gangguan yang bersifat temporer

Jika gangguan bersifat permanen, PBO akan membuka dan menutup balik sesuai dengan settingnya dan akan *lock-out* (terkunci). Setelah gangguan dihilangkan oleh petugas, baru PBO dapat dimasukkan ke sistem.

Pengindraan gangguan tanah juga tersedia dalam PBO tiga fase. Setelan arus trip minimum gangguan tanah di sisi sumber harus selalu lebih besar dari arus beban maksimum dan harus diatur agar mempunyai operasi cepat yang sama atau lebih kecil dari urutan mekanisme trip gangguan fase.

2.5.4 Saklar seksi otomatis (SSO)

Saklar seksi otomatis (SSO) atau *sectionalizer* merupakan alat pemutus yang dapat mengurangi luas daerah yang padam karena gangguan. Ada dua jenis SSO yaitu SSO dengan dengan arus atau sering disebut *Automatic Sectionalizer* dan SSO dengan dengan tegangan atau disebut *Automatic Vacuum Switch (AVS)*. Agar SSO berfungsi dengan baik, harus dikoordinasikan dengan PBO (*recloser*) yang ada di sisi hulu. Apabila SSO tidak dikoordinasikan dengan PBO, SSO hanya akan berfungsi sebagai saklar biasa. (Suhadi, 2008b)

2.5.5 Pemutus tenaga (PMT)

Pemutus tenaga (PMT) atau biasa disebut *circuit breaker* adalah suatu peralatan pemutus yang dapat mengalirkan serta memutus aliran listrik dalam keadaan normal maupun saat terjadi gangguan. Operasi dari pemutus arus dapat dikomandokan oleh rele-rele pengaman. Rele-rele pengaman yang bertugas

mendeteksi adanya gangguan dan kemudian mengkomando pemutus arus untuk beroperasi.

Pemutus arus harus dapat menyalurkan arus beban nominal secara terus menerus tanpa pemanasan lebih dan harus mampu membuka cepat untuk memutus arus gangguan tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus arus tersebut. Berdasarkan jenis media pemadam busur api yang digunakan, pemutus arus terbagi menjadi 4 macam yaitu (Aslimeri, 2008):

1. Pemutus arus gas

Pemutus arus gas menggunakan gas sebagai media pemutus busur api. Media gas yang digunakan pada tipe pemutus arus ini adalah Gas SF₆ (*Sulphur Hexafluoride*). Sifat-sifat gas SF₆ murni adalah tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun dan tidak mudah terbakar.

2. Pemutus arus udara hembus

Pemutus arus udara hembus atau *air blast circuit breaker* menggunakan hembusan udara sebagai pemadam busur api. Udara tekanan tinggi dihembuskan ke busur api melalui nozzle pada kontak pemisah ionisasi media antara kontak dipadamkan oleh hembusan udara.

3. Pemutus arus minyak

Pemutus arus minyak atau *oil circuit breaker* adalah suatu pemutus arus yang menggunakan minyak sebagai pemadam busur api listrik yang timbul pada waktu memutus arus listrik. Jenis pemutus minyak dapat dibedakan menurut banyak dan sedikit minyak yang digunakan pada ruang pemutusan

yaitu pemutus yang menggunakan banyak minyak (*bulk oil*) dan pemutus yang menggunakan sedikit minyak (*small oil*).

4. Pemutus arus hampa udara

Pemutus arus hampa udara atau *vacuum circuit breaker* merupakan pemutus yang kontak-kontak pemutusnya terdiri dari kontak tetap dan kontak bergerak yang ditempatkan dalam ruang hampa udara. Ruang hampa udara ini mempunyai kekuatan dielektrik yang tinggi dan mampu menjadi media pemadam busur api yang baik.

