



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah susunan perangkat proteksi secara lengkap yang terdiri dari perangkat utama dan perangkat-perangkat pendukung lain yang dibutuhkan untuk melakukan fungsi tertentu berdasarkan prinsip - prinsip proteksi sesuai dengan definisi yang terdapat pada standar IEC 6255-20. Sistem proteksi juga dapat diartikan sebagai kumpulan alat atau koleksi perangkat seperti sekering, relai, dan lain-lainnya di luar perangkat trafo arus, perangkat pemutus tenaga yang biasa disingkat PMT, kontaktor dan lain sebagainya. Dalam kinerjanya sistem proteksi yang baik harusnya mampu :

- a. Melakukan koordinasi dengan sistem TT (GI/transmisi/pembangkit).
- b. Mengamankan peralatan dari kerusakan yang diakibatkan oleh gangguan.
- c. Membatasi terjadinya kecelakaan.
- d. Secepatnya dapat membebaskan pemadam karena gangguan.
- e. Membatasi daerah pemadaman.
- f. Mengurangi frekuensi pemutusan permanen karena gangguan.

Selain itu, setiap peralatan atau alat pada sistem proteksi harus memiliki kepekaan, kecermatan dan kecepatan dalam bereaksi yang baik terhadap gangguan yang terjadi. Adapun fungsi dari sistem proteksi sendiri adalah sebagai berikut :

- a. Mendeteksi jika terjadi nya gangguan.
- b. Mencegah kerusakan peralatan dan jaringan.
- c. Pengamanan manusia dari bahaya
- d. Meminimumkan daerah pemadaman jika terjadi nya gangguan pada sistem ataupun jaringan.



### 2.1.1 Faktor Keandalan Sistem Proteksi

Kebutuhan perangkat sistem proteksi dengan tingkat keandalan yang tinggi merupakan salah satu faktor pertimbangan yang sangat penting dalam perencanaan jaringan sistem tenaga listrik. Dari berbagai pengalaman di lapangan terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi keandalan sistem proteksi jaringan tenaga listrik, yaitu sebagai berikut :

#### 1. Perancangan

Desain atau perancangan sistem proteksi adalah tahapan atau proses yang sangat penting yang dapat menentukan baik tidak suatu sistem proteksi. Pada waktu perencanaan, sistem proteksi harus sudah bisa dipertanggung jawabkan bahwa sistem proteksi yang dirancang tersebut pasti dapat bekerja sesuai parameter operasi dan konfigurasi jaringan yang telah ditetapkan sebelumnya. Sistem proteksi tersebut harus senantiasa berada pada posisi siaga (*standby*) pada waktu kondisi normal, tidak ada gangguan yang harus di tanggulang. Disini suatu relai tidak boleh bekerja terhadap arus beban normal maupun arus gangguan yang terjadi diluar daerah proteksinya. Secara umum faktor-faktor yang perlu diperhatikan pada waktu perencanaan sistem proteksi adalah semua parameter sistem tenaga, karakteristik sumber daya, sistem pentanahan, jenis gangguan, metode operasi dan jenis perangkat proteksi yang akan digunakan.

#### 2. Setelan

Setelan relai (arus dan waktu) juga merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam aplikasi proteksi sistem tenaga listrik. Seorang teknisi tenaga listrik, khusus nya ahli sistem proteksi , harus mampu menentukan setelan yang tepat terhadap setiap relai proteksi sesuai lokasinya pada sistem tenaga dan memperhitungkan semua parameter sistem tenaga, seperti level arus gangguan, beban normal dan berbagai parameter lain yang dibutuhkan sistem proteksi kinerja dinamis. Perlu juga dipertimbangkan bahwa jaringan



sistem tenaga bisa berubah seiring dengan perubahan waktu mengikuti beban, jenis dan meningkatnya jumlah pembangkit baru yang terhubung dengan jaringan, perkembangan perkotaan, dan lain sebagainya sebagai faktor yang perlu pula untuk diperhatikan pada waktu penyetelan relai. Oleh karena itu secara periodik, setelan relai proteksi harus ditinjau secara berkala dan jika perlu di tata ulang mengikuti perkembangan sistem sehingga alat proteksi tersebut senantiasa siap kerja sesuai kebutuhannya. Untuk menghindari kegagalan operasi sistem proteksi maka para pengelola sistem tenaga listrik harus selalu melakukan pemeliharaan dan pemantauan terhadap alat-alat proteksi yang terpasang dan juga perkembangan sistem.

### 3. Instalasi

Instalasi sistem proteksi juga merupakan faktor yang sangat penting dan harus dilakukan secara benar dan rapi mengikuti prosedur instalasi sesuai standar instalasi yang berlaku. Mengingat beragamnya diagram sistem interkoneksi dan hubungannya dengan fungsi masing-masing pengawatan maka sistem instalasi harus dibuat dengan menggunakan gambar dan diagram yang menunjukkan setiap fungsi pengawatan sehingga pada waktu pengujian dan pemeliharaan operator tidak mengalami kesulitan. Oleh karena itu pengetesan dilapangan merupakan hal penting yang perlu dilakukan dari pengawatan dan dari satu titik ke titik lain sehingga sistem dapat bekerja dengan benar tanpa perlu menirukan semua jenis gangguan. Pengetesan instalasi ini harus ditujukan untuk memastikan bahwa semua instalasi sudah terlaksana dengan benar dan baik. Pengetesan harus bisa dibatasi sesederhana mungkin dan langsung dapat membuktikan kebenaran dari koneksi pengawatan, setelan relai dan memastikan bahwa semua peralatan bebas dari kerusakan.

### 4. Pengetesan

Pengetesan relai proteksi merupakan suatu tahapan yang juga sangat penting dan harus dilakukan secara lengkap, mencakup semua aspek skema



proteksi, khususnya sebelum jaringan sistem tenaga dioperasikan. Pengetesan harus dilakukan sebisa mungkin sesuai dengan kondisi yang mirip dan mendekati keadaan real jaringan yang akan di proteksi. Meskipun pengetesan jenis relai proteksi sesuai dengan standar yang belaku sudah dilakukan di pabrik pembuat namun sebelum instalasi sistem proteksi dioperasikan maka sistem proteksi tersebut harus terlebih dahulu dikomisioning untuk menguji kebenaran semua instalasi pengawatan, setelan-setelan dan semua fungsi lain sesuai kebutuhan. Pengetesan komissioning harus dilakukan secara lengkap mulai dari relai, trafo arus, trafo tegangan, dan semua sistem tenaga listrik tersebut. Sebelum pengetesan dilakukan, terlebih dahulu dilakukan pemeriksaan kesesuaian pengawatan instalasi dengan gambar-gambar yang tersedia.

#### 5. Pemburukan

Meskipun pada awal pengoperasian instalasi sistem semua bejalan dengan baik, namun seiring perjalanan waktu maka faktor penuaan paralatan dapat mengambil peranan dalam menentukan kesalahan operasi. Seiring perjalanan waktu kontak-kontak yang mungkin sering bekerja dapat menjadi kasar, terbakar atau berkarat karena kontaminasi udara, yang bisa berakibat misalnya kumpara relai dan rangakain lainnya menjadi rangkaian terbuka atau ada perangkat penunjang lain yang rusak atau bagian-bagian mekanis yang sudah berubah bentuk. Mengingat periode waktu kerja relai dapat berlangsung dalam waktu tahunan dan buka orde hari, maka selama periode tersebut suatu relai proteksi bisa saja mengalami kerusakan yang tidak terdeteksi dan baru disadari setelah terjadinya kegagalan proteksi, dimana dia gagal bereaksi terhadap gangguan yang terjadi, faktor ini juga menentukan mengapa perlu dilakukan pengetesan secara periodik. Agar pengujian dapat dilakukan tanpa mengganggu sistem koneksi atau dalam keadaan operasi maka instalasi selalu disediakan terminal-terminal atau *test-block* yang diperlukan untuk pengetesan. Terminal-terminal tersebut



digunakan sebagai terminal pengujian dimana para para teknisi tidak perlu mencabut satu atau lebih pengawatan dari tempatnya.

#### 6. Kinerja Proteksi

Kinerja sistem proteksi perlu dinilai secara statistik dan dilakukan secara berkala. Untuk keperluan ini masing-masing sistem gangguan diklarifikasi sebagai kejadian idealnya hanya kejadian ini yang perlu dialokasikan dengan men-*tripping circuit breaker* secara tepat sesuai klasifikasi dan kriteria yang telah ditentukan sebelumnya. Dengan klasifikasi dan kriteria ini diharapkan kinerja proteksi dapat dinilai tepat dan benar. Prinsip penilaian ini menghasilkan evaluasi yang teliti terhadap kinerja sistem proteksi secara keseluruhan, yang pada akhirnya dapat digunakan untuk menilai kinerja kinerja relai proteksi. Semua jenis relai diharapkan dapat bekerja pada masing-masing sistem gangguan dan harus tetap berperilaku secara benar untuk setiap kerja yang benar dan konsisten. Keandalan lengkap tidak mungkin tercapai hanya dengan melakukan perbaikan konstruksi pada relai proteksi. Bila level keandalan suatu perangkat tunggal dianggap tidak mencukupi maka peningkatan keandalan dapat dilakukan dengan sistem berlapis, yaitu dengan menduplikasi perangkat proteksi tersebut. Idealnya, proteksi utama dibuat secara independent dan dirancang dapat bekerja mandiri untuk meningkatkan keandalan dengan pengertian bila probabilitas gagal masing - masing perangkat adalah  $x$  per unit. Maka jumlah probabilitas kegagalan dari dua peralatan secara bersamaan adalah  $x^2$ . Dengan nilai  $x$  yang kecil maka  $x^2$  kemungkinan bisa diabaikan yang secara teoritis dapat dikatakan tidak akan mengalami gagal.

#### 2.1.2 Persyaratan Sistem Proteksi

Agar sistem proteksi dapat bekerja secara optimal ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi oleh sistem proteksi tersebut, adapun persyaratan yang harus dipenuhi adalah sebagai berikut :



## 1. Selektivitas

Selektivitas suatu sistem proteksi jaringan tenaga adalah kemampuan relai proteksi untuk melakukan tripping secara tepat sesuai rencana yang telah ditentukan pada waktu mendesain sistem proteksi tersebut. Dalam pengertian lain, suatu sistem proteksi sistem tenaga harus bisa bekerja secara selektif sesuai klasifikasi dan jenis gangguan yang harus diamankan. Selektivitas sistem proteksi terkait juga dengan kemampuan diskriminasi yang dalam praktiknya dapat dilakukan dengan dua cara yang dijelaskan di bawah ini :

### a. Waktu Bertingkat

Sistem proteksi yang ditempatkan berurutan sepanjang jalur distribusi atau jalur transmisi diatur sedemikian sehingga mereka akan bekerja pada waktu bertingkat atau *time grading* sesuai lokasi relai proteksi terhadap gangguan. Relai yang terdekat dengan gangguan akan bekerja lebih cepat jika dibandingkan relai yang lebih jauh. Sementara itu bila relai tersebut tidak bekerja maka relai di belakangnya akan bekerja dengan waktu yang lebih lama. Meskipun semua relai merasakan gangguan namun hanya relai yang paling dekat yang akan mengisolasi gangguan tersebut. Relai-relai lain meskipun sama-sama sudah siap trip namun akhirnya akan reset keposisi semula sebab gangguan sudah diisolasi oleh saluran didepannya. Disini kecepatan tanggap masing-masing relai selalu tergantung pada level dan letak gangguan dan pada umumnya lebih lambat dibanding relai proteksi dengan sistem unit.

### b. Sistem Unit Proteksi

Unit proteksi adalah sistem proteksi yang dirancang untuk mengamankan satu segmen jaringan berdasarkan daerah proteksinya. Sistem proteksi ini berespon hanya terhadap gangguan yang berada pada daerah pengamanan yang sudah ditetapkan. Jenis-jenis proteksi yang dapat diterapkan sebagai unit proteksi antara lain adalah *restricted earth fault* (REF) dan *differential protection*



termasuk relai gangguan tanah kumparan delta yang banyak digunakan untuk memproteksi trafo daya. Unit proteksi dapat juga diterapkan sepanjang saluran sistem tenaga dengan tingkat kecepatan proteksi yang lebih tinggi dari sistem proteksi waktu bertingkat. Relai unit proteksi tidak tergantung jenis dan level gangguan. Unit proteksi umumnya menggunakan prinsip perbandingan besaran listrik pada batas-batas daerah yang telah ditetapkan sesuai dengan lokasi titik-titik hubung trafo arus. Perbandingan bisa dilakukan langsung dengan menggunakan kawat penghubung termasuk kabel pilot atau melalui sistem komunikasi. Namun perlu juga dicatat bahwa faktor selektivitas relai bukanlah satu-satunya faktor yang paling menentukan. Tetapi perlu juga diperhatikan faktor - faktor koordinasi relai yang harus dibuat secara benar dan tepat seperti misalnya pemilihan setelan arus, variasi perubahan arus gangguan, arus beban maksimum, impedansi sistem dan faktor lain terkait yang dapat memengaruhi koordinasi relai proteksi.

## 2. Stabilitas

Stabilitas sistem proteksi biasanya terkait dengan skema unit proteksi yang dimaksudkan untuk menggambarkan kemampuan sistem proteksi tertentu untuk tetap bertahan pada karakteristik kerjanya dan tidak terpengaruh faktor luar diluar daerah proteksinya, misalnya arus beban lebih dan arus gangguan lebih. Dengan kata lain, stabilitas dapat juga didefinisikan sebagai kemampuan untuk tetap konsisten hanya bekerja pada daerah proteksi dimana dia dirancang tanpa terpengaruh oleh berbagai parameter luar yang tidak merupakan besaran yang perlu diperhitungkan.



### 3. Kecepatan

Fungsi sistem proteksi adalah untuk mengisolasi gangguan secepat dan sesegera mungkin. Tujuan utamanya adalah mengamankan kontinuitas pasokan daya dengan menghilangkan setiap gangguan sebelum gangguan tersebut berkembang ke arah yang membahayakan stabilitas dan hilangnya sinkronisasi sistem yang pada akhirnya dapat meruntuhkan sistem tenaga tersebut. Bila pembebanan sistem tenaga naik, pergeseran fasa antara dua busbar yang berbeda juga naik dan karena itu bila gangguan terjadi maka kemungkinan besar akan terjadi kehilangan sistem sinkronisasi. Makin singkat waktu yang dibolehkan pada gangguan maka kontinuitas pelayanan sistem akan semakin baik. Gambar 2.1 memperlihatkan relasi atau hubungan antara sistem pembebanan (stabilitas limit daya) dengan waktu *clearing* gangguan untuk berbagai jenis gangguan dapat dicatat bahwa gangguan fasa mempunyai pengaruh lebih kuat terhadap stabilitas sistem daripada gangguan fasa ke tanah dan karena itu perlu dihilangkan secara lebih cepat. Namun sama dengan faktor pertimbangan lain, faktor stabilitas bukan satu-satunya pertimbangan dalam penerapan relai. Faktor ekonomi juga perlu dipertimbangkan sebab dengan semakin cepatnya kita mengisolasi gangguan maka kemungkinan kerusakan peralatan instalasi tenaga (yang mahal) akan semakin kecil. Hal ini mengingat energi panas yang dipancarkan selama gangguan terhadap peralatan adalah sebanding dengan pangkat dua dari besar arus dikalikan durasi waktu terjadinya gangguan tersebut. Dengan demikian proteksi harus bekerja secepat mungkin, namun disamping pertimbangan keamanan, kecepatan operasi relai lebih banyak ditekankan pada aspek ekonomi. Jaringan distribusi yang biasanya tidak begitu membutuhkan *clearance* gangguan dengan sangat cepat, biasanya hanya perlu dilengkapi dengan proteksi kerja waktu bertingkat. Tetapi stasiun pembangkit dan jaringan tegangan ekstra tinggi membutuhkan moda proteksi dengan kecepatan tertinggi yang bisa dicapai. Disini kecepatan kerja relai





proteksi hanya hanya dibatasi kemampuan untuk tetap dapat bekerja secara tepat dan teliti. Bila hanya mengandalkan waktu kerja secara bertingkat maka akan ada bagian saluran yang seharusnya diamankan secara cepat namun tidak mendapatkan perlindungan sebagaimana mestinya. Untuk mengatasi kekurangan skema waktu bertingkat maka dalam praktiknya sistem unit proteksi banyak digunakan untuk mengamankan sistem tenaga listrik.

#### 4. Sensitivitas

Sensitivitas adalah istilah yang sering dikaitkan dengan harga besaran penggerak minimum, seperti level arus minimum, tegangan, daya dan besaran lain dimana relai atau skema proteksi masih dapat bekerja dengan baik. Suatu relai dikatakan sensitif bila parameter operasi utamanya rendah. Artinya, semakin rendah besaran parameter penggerak maka perangkat tersebut dikatakan semakin sensitif. Sensitivitas pada relai elektromekanikal terdahulu biasanya dikaitkan dengan kepekaan dari perangkat Bergeraknya terhadap daya yang diserap dalam bentuk Volt-Ampere dimana relai bekerja. Semakin kecil VA yang dibutuhkan maka relai elektromekanikal tersebut semakin sensitif. Pada relai-relai numerik, sensitivitas tidak dikaitkan pada perangkat kerasnya tetapi lebih pada aplikasi dan parameter trafo arus atau trafo tegangan yang digunakan.

### 2.1.3 Klasifikasi Sistem Proteksi

Kebanyakan dari peralatan sistem proteksi adalah relai, adapun fungsi dari relai itu sendiri adalah :

- a. Melindungi peralatan dari gangguan yang terjadi dalam sistem, agar tidak mengalami kerusakan.



- b. Melokalisir akibat dari gangguan yang terjadi, dan menghambat agar tidak sampai meluas ke sistem.

Untuk dapat memenuhi fungsinya pada butir a, peralatan pengaman harus bekerja cepat agar pengaruh gangguan yang merupakan hubung singkat dapat segera dihilangkan sehingga pemanasan berlebihan yang akan timbul sebagai akibat arus hubung singkat dapat segera dihentikan. Untuk memenuhi fungsinya pada butir b, peralatan pengamanan yang paling dekat dengan tempat gangguan saja yang bekerja. Secara teknis dapat dikatakan bahwa peralatan pengaman harus bersifat selektif. Ditinjau dari letaknya dalam sistem ada 4 (empat) kategori pengaman yaitu :

1. Pengaman Generator
2. Pengaman Saluran Transmisi
3. Pengaman Transformator Dalam Gardu Induk
4. Pengaman Sistem Distribusi

Dewasa ini, sistem PLN sebagian besar masih menggunakan relai-relai elektromekanik, walaupun juga ada beberapa yang telah menggunakan relai elektronik. Relai elektromekanik terdiri dari rangkaian listrik yang menggerakkan suatu mekanisme yang pada akhirnya harus men-tripkan PMT dengan jalan menutup kontak pemberi arus trip kumparan (*coil*) dan PMT. Sedangkan relai elektronik kerjanya lebih cepat jika dibandingkan dengan relai elektromekanik jika ditinjau dari segi pengaman peralatan adalah lebih baik.

## **2.2 Pengaman Sistem Distribusi**

Sistem pengaman (proteksi) bertujuan untuk mencegah atau membatasi kerusakan pada jaringan beserta peralatannya, dan keselamatan umum yang disebabkan karena gangguan dan meningkatkan kelangsungan pelayanan pada konsumen. Cara, macam dan tingkat pengaman yang diterapkan tergantung pada banyak faktor, dan merupakan kompromi praktis yang memungkinkan untuk cukup memenuhi kebutuhan dan yang sebanding dengan biayanya.



Macam dan karakteristik beban sangat mempengaruhi perencanaan “pengaman”, macam dan karakteristik beban pulalah yang banyak menentukan perencanaan suatu sistem distribusi. Untuk daerah padat pembebanannya seperti dipusat perkotaan, jaringan yang dibutuhkan adalah kabel tanah dengan sistem tertutup, dan dengan demikian layak untuk dipergunakan pengaman yang lebih tinggi tingkatnya dan lebih mahal, sebaliknya untuk daerah luar kota pada umumnya yang kepadatan beban nya rendah , jaringan yang diperlukan cukup saluran udara radial, dengan pengaman yang lebih sederhana dan murah, sesuai tingkat keandalan yang masih dapat diterima pemakainya. Jadi perencanaan suatu sistem pengamanan pada hakikat nya tidak dapat dipisahkan, melainkan harus sudah terpadu (*integrated*) dalam perencanaan sistem distribusinya. Adapun macam-macam pengaman yang digunakan pada jaringan distribusi adalah sebagai berikut :

1. Fuse (sekring)

Merupakan peralatan pengaman bagian dari saluran dan peralatan dari gangguan hubung singkat antar fasa (dapat pula sebagai pengaman hubung tanah bagi sistem yang diketanahkan langsung dan bagi peralatan pada sistem dengan tahanan rendah).

2. Circuit Breaker dengan Relai Arus Lebih

Sebagai pengaman utama sistem terhadap gangguan hubung singkat antar fasa (dan hubungkan tanah bagi sistem yang diketanahkan langsung).

3. Circuit Breaker dengan Relai Arus Tanah Dengan Arah

Pengaman utama terhadap gangguan hubung tanah bagi sistem yang diketanahkan langsung dan diketanahkan dengan tahanan rendah.

4. Circuit Breaker dengan Relai Arus Tanah

Pengaman Utama terhadap gangguan hubung tanah bagi sistem yang diketanahkan dengan tahanan tinggi.

5. Circuit Breaker dengan Relai Recloser

Pengaman pelengkap untuk membebaskan gangguan yang bersifat temporer atau sementara.



#### 6. Pemisah Manual

Alat pemutus untuk mengurangi daerah yang mengalami pemadaman karena gangguan dan mengurangi lamanya pemadaman.

#### 7. AS (*Automatic Sectionalizer*)

Merupakan alat pemutus atau pembatas daerah yang mengalami pemadaman karena gangguan.

#### 8. Indikator gangguan

Digunakan untuk mempercepat lokalisasi gangguan.

### 2.3 Pengaman Pada Jaringan Tegangan Menengah

Ada beberapa jenis pengaman yang di gunakan pada jaringan tegangan menengah, yaitu sebagai berikut:

#### a. Pengaman Lebur

Pengaman lebur atau yang biasa disebut juga dengan *fuse cut out* (FCO) merupakan pengaman bagian dari saluran dan peralatan dari gangguan hubung singkat yang terjadi antar fasa, dapat pula sebagai pengaman hubung singkat fasa ke tanah bagi sistem yang ditanahkan langsung. Berdasarkan bentuk fisiknya pengaman lebur dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu:

1. Tipe Tertutup (*enclosed*)
2. Tipe Terbuka (*Open*)
3. Tipe Elemen Terbuka (*Open link*)

Berdasarkan cara kerjanya, pengalaman kerja dapat dibedakan lagi menjadi beberapa jenis yaitu sebagai berikut:

1. Tipe *Expulsion*
2. Tipe *Limiting*

Karakteristik pengenalan lebur sendiri mempunyai sepasang garis lengkung yang disebut arus waktu lengkung yang berada di bawah disebut



waktu lebur minimum (*minimum melting time*), lengkung diatas disebut maksimum waktu bebas maksimum (*maximum clearing time*). Untuk pengaman lebur itu sendiri dibedakan menjadi dua tipe yaitu tipe cepat (K) dan tipe lambat (T). Perbedaan dari tipe K dan tipe T terletak pada kecepatan rasio-nya.

b. Relai Arus Lebih

Relai arus lebih merupakan peralatan pengaman utama pada sistem distribusi tegangan menengah terhadap gangguan hubungan singkat antar fasa. Relai arus lebih merupakan suatu relai yang bekerja berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi nilai *setting* atau nilai penyetelan pengaman tertentu dalam waktu tertentu. Relai arus lebih dapat dibedakan menjadi beberapa jenis jika dilihat dari karakteristik waktu nya, yaitu sebagai berikut:

1. Tanpa penundaan waktu (*instaneous*)
2. Dengan penundaan waktu
3. Dengan penundaan waktu tertentu (*definite time OCR*)
4. Dengan penundaan waktu berbanding terbalik (*inverse time OCR*)
5. Kombinasi 1 dan 2

c. Relai Gangguan Tanah

Relai gangguan tanah atau *ground fault relai (GFR)* adalah pengaman utama terhadap gangguan hubung singkat fasa ke tanah untuk sistem yang diketanahkan langsung atau melalui tahanan rendah.

d. Relai Gangguan Tanah Berarah

Relai ganggaun tanah berarah (*directional ground fault relai*) adalah pengaman utama terhadap gangguan hubung singkat fasa ke tanah untuk sistem yang diketanahkan melalui tahanan tinggi.

e. Penutup Balik Otomatis (*Automatic Circuit Recloser*)

Penutup balik otomatis atau yang biasa disebut juga dengan PBO digunakan sebagai pelengkap untuk pengamanan terhadap gangguan temporer atau sementara dan membatasi luas daerah yang mengalami pemadaman akibat



gangguan. Berdasarkan peredam busur apinya penutup balik otomatis dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu:

1. Media Minyak.
2. Vacuum.
3. SF6.

Penutup balik otomatis dapat dibedakan menjadi 2 jenis berdasarkan pengendalinya (*control*) yaitu sebagai berikut:

1. PBO hidrolik (Control Hidraulik).
2. PBO teknologi elektrik.

f. Saklar Seksi Otomatis

Saklar seksi otomatis (SSO) atau yang biasa juga disebut dengan *sectionalizer* merupakan alat pemutus untuk mengurangi luas daerah yang mengalami pemadaman yang di akibatkan oleh gangguan. Ada 2 jenis saklar seksi otomatis yaitu dengan pengindera arus atau yang disebut juga dengan *automatic sectionalizer* dan pengindera tegangan yang disebut juga dengan *automatic vacuum switch (AVS)*. Agar saklar seksi otomatis dapat berfungsi dengan maksimal, harus dikoordinasi dengan pemutus balik otomatis (PBO) yang ada pada sisi hulu. Apabila saklar seksi otomatis tidak dikoordinasikan dengan pemutusn balik otomatis maka saklar seksi otomatis hanya akan berfungsi sebagai saklar biasa.

## 2.4 Sistem Pentanahan

Gangguan satu fasa ketanah sangat tergantung dari jenis pentanahan dan sistemnya. Gangguan satu fasa umumnya bukan merupakan hubungan singkat secara metalik tetapi melalui tahanan gangguan, sehingga arus gangguan yang sudah dibatasi dengan adanya tahanan gangguan menjadi semakin kecil. Dengan demikian relai gangguan antar fasa tersebut di atas tidak berfungsi. Oleh karena itu harus dipasang relai gangguan tanah secara khusus dan disesuaikan dengan sistem pentanahannya. Pada saat terjadi gangguan satu fasa ketanah pada penyulang yang



tidak terganggu juga akan mengalir arus kapasitansi ke tanah yang tergantung panjang serta jenis jaringannya. Arus kapasitansi inilah yang membatasi penyetelannya, terutama pada pengaman yang hanya menggunakan relai arus lebih saja, yaitu pada sistem dengan pentanahan tahanan rendah. Sistem pentanahan dapat dikelompokkan menjadi beberapa kelompok yaitu:

1. Sistem Pentanahan Mengambang.

Pada sistem ini besarnya arus gangguan satu fasa ketanah relatif sangat kecil tetapi terjadikemencengan tegangan. Bila sistemnya menggunakan relai tegangan urutan nol, relai ini tidak boleh bekerja bila terjadi pergeserantegangan pada keadaan normal atau adanya harmonisa ketiga.

2. Sistem Pentanahan Dengan Tahanan Tinggi.

Pada sistem ini arus gangguan satu fasa ketanah resistif besarnya hanya 23A bila gangguannya metalik, sedangkan pada kenyataannya gangguan satu fasa ketanah selalu melalui tahanan sehingga arus gangguannya tidak jauh berbeda besarnya dengan arus kapasitansi ke tanah. Artinya arus kapasitansi ketanah tidak dapat diabaikan terhadap terhadap arus resistif dan arus gangguannya masih sangat kecil. Adapun relai yang digunakan adalah relai gangguan tanah berarah.

3. Sistem Pentanahan Dengan Tahanan Rendah.

Untuk saluran kabel tegangan menengah (SUTM) dimana arus kapasitansinya cukup besar, maka digunakan tahanan pentanahan 12 ohm atau arus resistifnya sekitar 1000A. Sedangkan untuk SKTM untuk sistem 6kV atau 20kV arus kapasitansinya sangat kecil sehingga pentanahannya menggunakan 40 ohm dan arus resistifnya sebesar 300A.

4. Sistem Pentanahan Langsung.

Penyetelan untuk pengaman gangguan tanah pada sistem ini sama dengan pada sistem pentanahan tahanan rendah tetapi untuk sistem tiga fasa 4 kawat harus dipertimbangkan adanya arus.

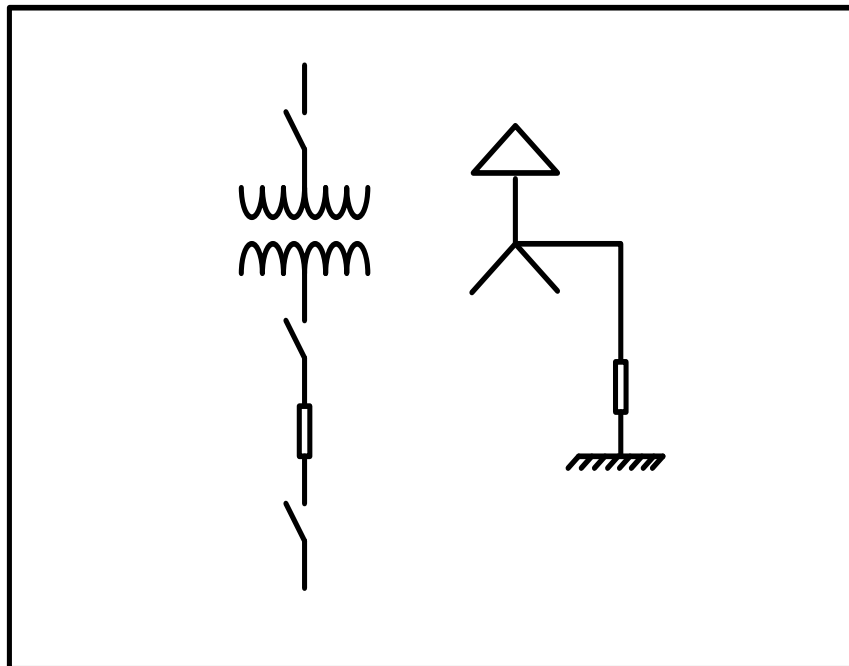
5. Sistem Pentanahan Titik Netral Transformator.



Adapun sistem pentanahan titik netral pada transformator dibedakan menjadi 2 yaitu:

- a. Titik netral ditanahkan melalui tahanan

Dalam pentanahan ini harga tahanan mempunyai harga ohm yang tinggi dibandingkan dengan reaktansi sistem sehingga arus line ke *ground fault* dibatasi oleh resistor tersebut seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.2.

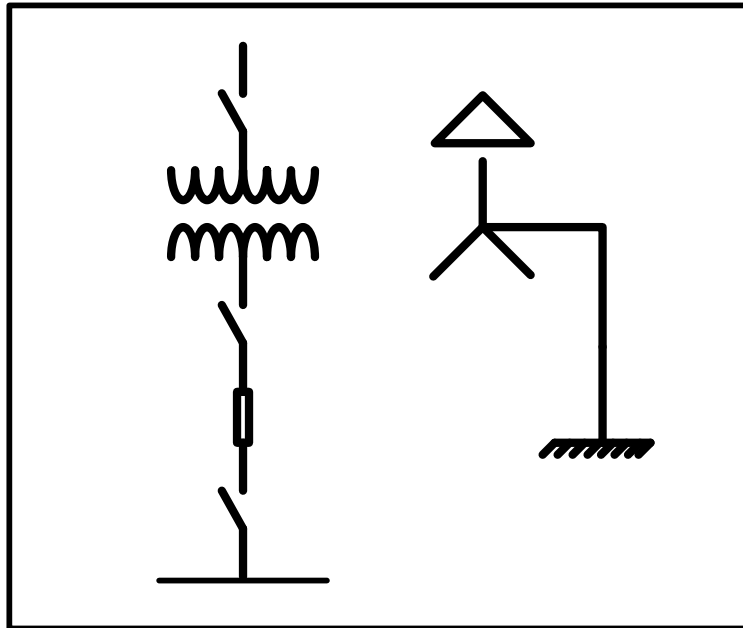


Gambar 2.1 Pentanahan Titik Netral Dengan Tahanan

- b. Titik netral ditanahkan langsung (*Solid Grounding*)

Pentanahan ini iyalah apabila titik netral dari trafo kita hubungkan langsung ketanah seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.3.





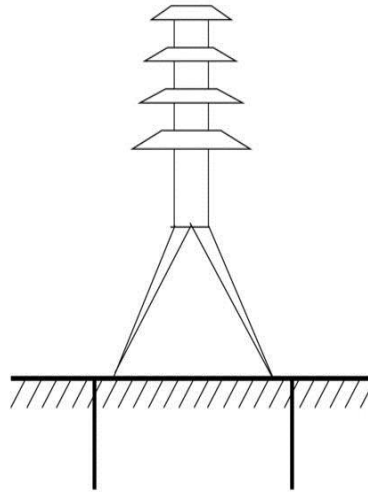
Gambar 2.2 Pentanahan Titik Netral Langsung

#### 6. Sistem Pentanahan Titik Netral Transmisi

Yang dimaksud pentanahan netral transmisi disini ialah penambahan suatu alat pentanahan atau elektroda pentanahan, untuk menurunkan tahanan kaki menara transmisi. Sistem pentanahan titik netral transmisi dapat dikelompokkan menjadi 3 kelompok yaitu :

##### a. *Driven Ground*

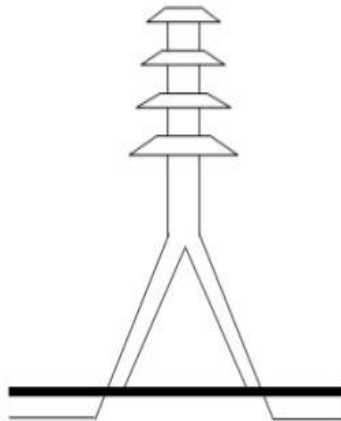
Pentanahan ini ialah menanamkan beberapa buah batang elektroda secara tegak lurus ke dalam tanah disekeliling dasar menara transmisi. Elektroda yang banyak digunakan biasanya berdiameter antara 1-2 inc, dan panjangnya antara 3-15 meter seperti yang tinjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.3 Pentanahan Diven Ground

b. Counter Poise

Pentanahan counter poise ini ialah dengan jalan merentangkan kawat elektroda untuk pentanahan dalam tanah. Kawat ini ditanamkan sedalam 30-90 cm dibawah permukaan tanah seperti yang tunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.4 Pentanahan Counter Poise

7. Sistem Pentanahan *Switchyard*

Yang dimaksud dengan pentanahan *switchyard* disini adalah pentanahan dari peralatan yang ada di *switchyard*. Karena pentingnya peralatan peralatan pada *switchyard*, maka pentanahan harus dapat



diandalakan untuk melindungi peralatan dari kerusakan maupun keselamatan operator atau personalia. Sistem pentanahan switchyard yang banyak digunakan ada 2 macam yaitu :

a. *Rod Grounding*

Pentanahan sistem ini adalah sama dengan *driven ground* yang digunakan pada menara transmisi. Untuk memperoleh tahanan yang lebih kecil maka dapat digunakan batang-batang elektroda yang lebih banyak yang ditanamkan paralel tegak lurus pada permukaan tanah. Makin pendek jarak elektroda dan makin banyak jumlah elektroda yang ditanamkan, maka semakin kecil nilai konduksitasnya.

b. Pentanahan Grid

Pentanahan sistem ini ialah dengan cara menanamkan batang elektroda sejajar dengan tanah. Untuk mengecilkan tahanan pentanahan pada suatu are tertentu, kita tidak dapat dengan terus menerus menambah batang elektroda pentanahan, hal ini karena volume tanah terbatas kemampuannya dalam menerima arus.

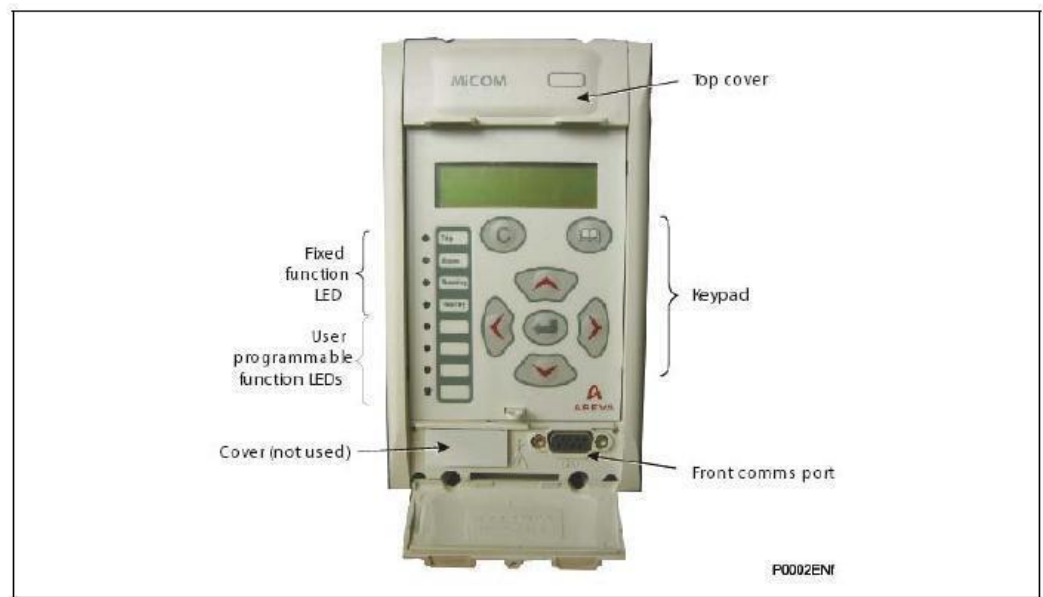
8. Sistem Pentanahan Arrester.

Karena pentingnya fungsi arrester dalam koordinasi isolasi pada instalasi tenaga listrik, maka pemasangan alat ini harus betul - betul memenuhi persyaratan teknis. Karena fungsi arrester adalah untuk mengalirkan arus lebih ketanah apabila terjadi gangguan petir maupun *over voltage* maka sistem pentanahannya harus memenuhi standar yang ditentukan. Dalam praktiknya kebanyakan arrester dilakukan dengan pentanahan local, yaitu rods yang dimasukkan ke tanah dekat dengan arrester. Selanjutnya dari terminal pentanahan arrester dihubungkan ke rods dengan menggunakan konduktor. Untuk sistem yang digunakan pada gardu induk yang bersangkutan, besarnya tahanan pentanahan untuk arrester harus dibuat sekecil mungkin dan harganya dibatasi dibawah 5 ohm. Pemilihan kawat pentanahan harus memenuhi persyaratan dan menurut National Electric Code, besarnya kawat tanah



tidak boleh lebih kecil dari No. 6 AWG. Dan sistem yang tegangannya lebih besar harus memakai kawat yang lebih besar. Untuk tegangan antara 413 kV dianjurkan menggunakan kawat No.2 AWG.

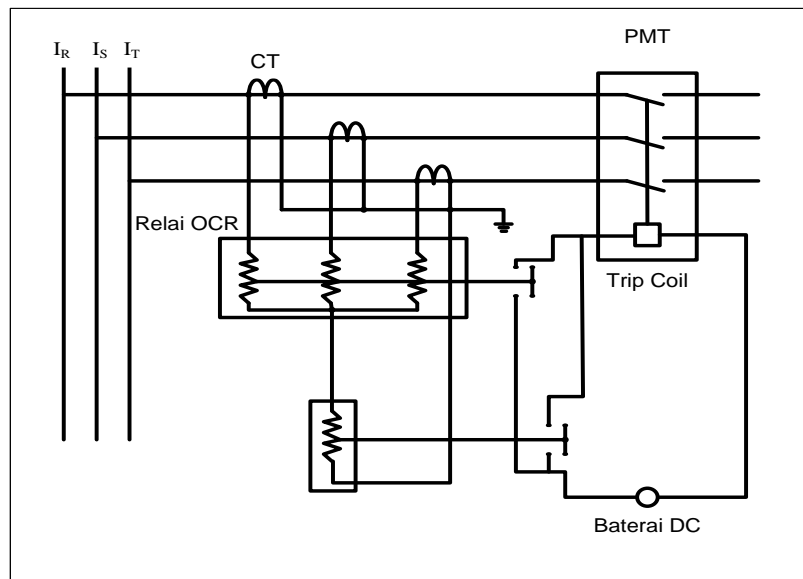
## 2.5 Relai Gangguan Tanah



Gambar 2.5 Relai Gangguan Tanah

### a. Pengertian Relai Gangguan Tanah

Relai gangguan tanah atau yang lebih dikenal dengan nama relai GFR (*Ground Fault Relai*) pada dasarnya mempunyai prinsip kerja yang sama dengan prinsip kerja relai OCR, namun terdapat perbedaan dalam kegunaannya. Jika relai OCR digunakan untuk mendeteksi gangguan hubung singkat yang terjadi antar fasa, maka relai GFR sendiri digunakan untuk mendeteksi gangguan hubung singkat yang terjadi pada fasa ke tanah. Untuk gambar pengawatan relai gangguan tanah di tunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.6 Pengawatan Relai Gangguan Tanah

#### b. Prinsip Kerja Relai Gangguan Tanah

Pada dasarnya, besar arus  $I_s$ ,  $I_r$ , dan  $I_t$  pada kondisi normal adalah seimbang, sehingga pada kawat tanah tidak mengalir arus dan relai gangguan tanah pun tidak bekerja. Bila terjadi hubung singkat ke tanah maka akan timbul ketidakseimbangan arus pada  $I_r$ ,  $I_s$  dan  $I_t$  sehingga pada kawat pentanahan akan mengalir arus urutan nol dan mengakibatkan relai gangguan tanah bekerja.

#### c. Penyetelan Relai Gangguan Tanah

Penyetelan relai gangguan tanah sangat penting bagi keandalan sisten tenaga listrik, hal ini dikarenakan jika terjai gangguan di salah satu penyulang outgoing 20kV tidak menyebabkan bekerjanya pengaman pada incoming penyulang 20kV. Ketelitian dalam penyetelan relai gangguan tanah sangatlah penting, karena jika penyetelan relai kurang tepat akan mengakibatkan pemadaman atau bekerjanya relai incoming atau terkadang menyebabkan menyebabkan bekerjanya pengaman transformator. Penyetelan relai gangguan tanah biasanya dikoordinasikan dengan relai arus lebih (OCR). Koordinasi dilakukan dengan penyetelan arus tiap penyulang dan incoming berdasarkan arus beban nya masing-



masing dan penyetelan waktu kerja relai, dimana relai invirse harus dengan menghitung arus gangguan di penyulang. Adapun jenis penyetelan relai gangguan tanah sendiri ada 2 yaitu sebagai berikut :

1. Penyetelan Arus Relai Gangguan Tanah.

Penyetelan relai gangguan tanah pada sisi primer dan sekunder transformator tenaga terlebih dahulu harus dihitung arus nominalnya. Hal ini juga berlaku pada arus setting untuk relai OCR baik di sisi primer maupun di sisi sekunder transformator.

2. Penyetelan Waktu Relai Gangguan Tanah.

Hasil perhitungan arus hubungan singkat, selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai setelan waktu kerja relai, sama halnya dengan relai arus lebih (OCR), relai gangguan tanah juga menggunakan rumus penyetingan yang sama dengan rumus yang digunakan pada relai arus lebih. tetapi waktu kerja pada masing-masing relai berbeda-beda. Relai gangguan tanah cenderung lebih peka jika dibandingkan dengan relai arus lebih. Untuk menentukan nilai tms yang akan di setelkan pada relai gangguan tanah sisi incoming 20kV dan 70kV transformator tenaga diambil arus hubung singkat satu fasa ketanah.

- d. Penyetelan Relai Gangguan Tanah Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV

Pada dasarnya setelan arus primer sebuah relai arus dapat ditentukan berdasarkan nilai setelan relai arus lebih sekunder dikalikan dengan rasio perbandingan kumparan CT. Hal ini dikarenakan pada transformator arus ideal, nilai arus primer adalah hasil perkalian rasio transformator arus dengan yang diukur pada kumparan sekunder. Dengan demikian sebenarnya nilai setelan arus primer dapat langsung ditentukan dengan mengalikan nilai setelan relai tersebut dengan rasio transformator arus. Namun dalam praktiknya, penyederhanaan ini tidak bisa diambil sebagai dasar perhitungan, khususnya pada waktu perhitungan setelan relai gangguan tanah.



Idealnya perhitungan setelan relai gangguan tanah ahrus dilakukan sesuai berbagai kondisi real jaringan yang perlu diuji satu demi satu secara teliti dan disesuaikan dengan buku manual dan teknologi relai gangguan tanah yang akan diterapkan. Berikut adalah faktor yang perlu di pertimbangkan sesuai dengan jenis relai :

1. Relai Statik, Digital, dan Relai Numerik.

Relai static, digital, ataupun relai numerik umumnya mempunyai *burden* (beban) yang relative kecil dan variasi *burden* tersebut biasanya juga dibatasi diatas kisaran setelan relai. Oleh karena itu penyederhanaan perhitungan yang sudah dibahas diatas dan transformator dianggap ideal dapat digunakan sebagai pegangan dalam melakukan perhitungan. Tetapi variasi input *burden* relai tetap harus diperiksa guna memastikan bahwa variasi tersebut cukup kecil sehingga tidak akan mempengaruhi kinerja relai. Sebab pada variasi *burden* relai yang besar, kesalahan rasio transformator arus bisa signifikan. Oleh karena itu setelan relai tetap perlu dibuat sebagaimana pada prosedur dan cara setelan relai elektromekanis biasa.

2. Relai Elektromekanik.

Elemen gangguan tanah yang digunakan pada relai elektromekanik umumnya sama dengan elemen gangguan fasa dan dalam praktiknya *burden* VA-nya sama pada setelan arus yang diberikan. Tetapi pada setelah arus yang rendah, impedansi elemen relai gangguan tanah akan berubah menjadi *burden* yang tinggi. Hal ini perlu diperhatikan sebab tanpa disadari *burden* impedansi sebesar ini bisa lebih tinggi dari kapasitas transformator arus sehingga akurasi kerja relai akan berkurang seiring meningkatnya kesalahan pengukuran. Namun karena ukuran dan kapasita (VA) yang cukup tinggi maka transformator arus yang terhubung dengan fasa yang sekaligus juga digunakan untuk mengerjakan relai gangguan tanah tidak perlu diperbesar. Disamping pengaruh arus penguat transformator, arus yang naik pada *burden* yang tinggi, tegangan terminal “elemen relai” tanah juga dipengaruhi oleh

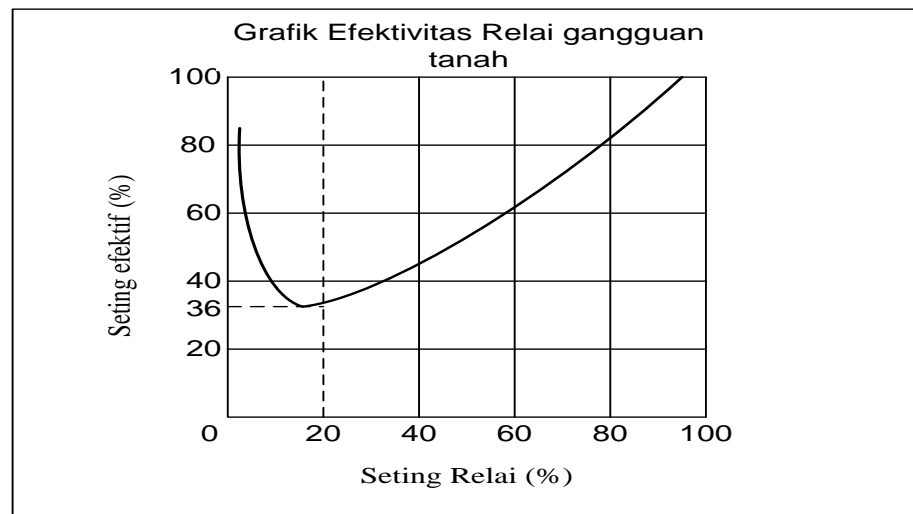


arus lain yang mengalir pada transformator arus yang terhubung paralel. Dengan demikian jumlah arus oenguat total adalah perkalian rugi - rugi magnetis satu transformator arus dengan jumlah transformator arus yang terhubung paralel. Jumlah rugi - rugi magnetis tersebut bisa cukup signifikan dibandingkan dengan arus kerja relai. Bahkan pada kondisi tertentu pada setelan arus yang rendah dan pada transformator arus yang kinerjanya rendah, arus rugi - rugi tersebut bisa melebihi arus keluaran relai. Dengan begitu setelan efektif relai tanah adalah jumlah vector setelan arus relai dengan arus penguat total. Meskipun demikian, dalam praktiknya penjumlahan arus-arus tersebut dapat dilakukan dengan penjumlahan aljabar biasa khususnya bila faktor kerja mereka masing-masing dapat dianggap sama. Tabel 2.1 adalah contoh hasil perhitungan harga-harga setelan efektif yang diambil dari buku *Protective Relais Application Guide* yang diterbitkan Alstom dimana hasil nya di gambarkan pada gambar 2.8 .

Tabel 2.1 Contoh Hasil Perhitungan Setelan Efektif

| Setelan Plus Relais |          | Tegangan<br>coil vs<br>Stetelan | Arus<br>Penguat | Setelan Efektif |      |
|---------------------|----------|---------------------------------|-----------------|-----------------|------|
| (%)                 | Arus (A) |                                 |                 | Arus (A)        | (%)  |
| 5                   | 0.25     | 12                              | 0.583           | 2               | 40   |
| 10                  | 0.5      | 6                               | 0.405           | 1.715           | 34.4 |
| 15                  | 0.75     | 4                               | 0.3             | 1.65            | 33   |
| 20                  | 1        | 3                               | 0.27            | 1.81            | 36   |
| 40                  | 2        | 1.5                             | 0.27            | 2.51            | 50   |
| 60                  | 3        | 1                               | 0.12            | 3.36            | 67   |
| 80                  | 4        | 0.75                            | 0.1             | 4.3             | 86   |
| 100                 | 5        | 0.6                             | 0.08            | 5.23            | 105  |





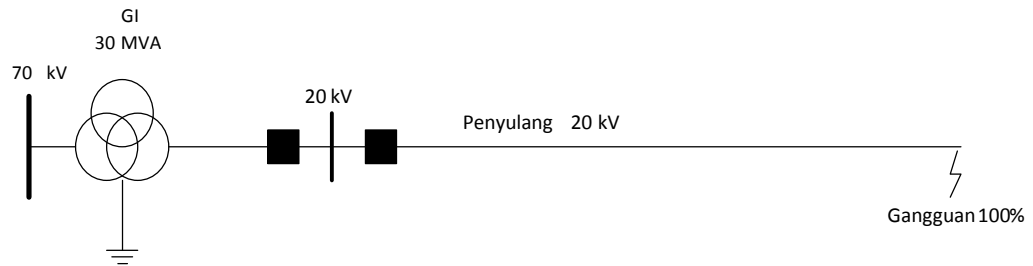
Gambar 2.7 Setelan Efektif Relai Gangguan Tanah

Dalam penyetelan relai gangguan tanah perlu dilakukan beberapa perhitungan untuk mendapatkan nilai setelan. Untuk mendapat nilai setelan relai gangguan tanah sesuai dengan yang diinginkan dan sesuai persyaratan peralatan pengaman dalam sistem proteksi. Adapun hitungan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Perhitungan Impedansi Sumber.
2. Perhitungan Reaktansi Trafo Tenaga.
3. Perhitungan Impedansi Penyulang 20 kV.
4. Perhitungan Impedansi ekivalen.
5. Perhitungan arus gangguan fasa ke tanah.
6. Perhitungan setting relai gangguan tanah outgoing 20 kV.

### 2.5.1 Perhitungan Impedansi Sumber

Beberapa perusahaan listrik memberikan data pada pelanggan untuk menetapkan pemutus rangkaian bagi instalasi industry atau sistem distribusi yang dihubungkan pada sistem pemakaian. Biasanya data berupa daftar *mega volt ampere* hubung singkat.



Gambar 2.8 Pasokan Daya dari Gardu Induk

dimana :

$$S_{sc} = \sqrt{3} \times (kV^2) \times I_{sc} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dengan menyelesaikan persamaan diatas, maka dihasilkan :

$$Z_s = kV^2 / S_{sc} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

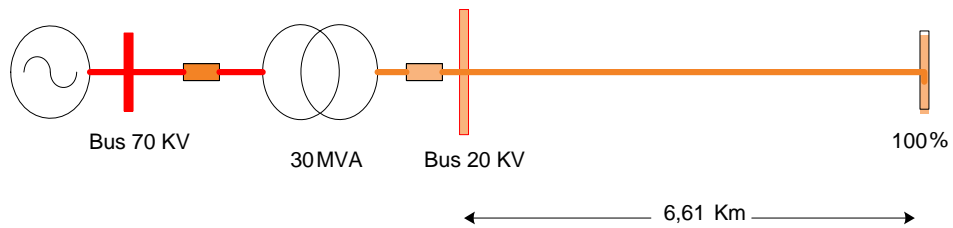
$Z_s$  = Impedansi sumber (Ohm)

kV = Tegangan sisi primer trafo tenaga (kV)

$S_{sc}$  = Data hubung singkat di bus 70kV

### 2.5.2 Impedansi Transformator

Yang perlu di ambil pada perhitungan impedansi pada transformator adalah harga reaktansinya, sedangkan tahanannya diabaikan karena memiliki nilai yang kecil. Untuk mencari nilai reaktansi transformator dalam ohm dihitung dengan cara sebagai berikut.



Gambar 2.9 Penyulang BEO

Langkah awal adalah dengan mencari nilai ohm pada 100% untuk transformator pada 20kV. Maka dari gambar didapat persamaan berikut :

$$Z_t \text{ pada } 100\% = kV^2/St \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

$Z_t$  = Impedansi transformator tenaga.

$K_v$  = Tegangan sisi sekunder transformator tenaga.

$S_t$  = Kapasitas daya transformator.

Lalu tahap selanjutnya adalah mencari nilai reaktansi tegangannya :

- Untuk menghitung impedansi urutan positif dan negatif ( $X_{t1} = X_{t2}$ ) dihitung dengan persamaan :

$$X_t = \% \text{ yang diketahui } \times X_t \text{ pada } 100\% \dots \dots \dots (2.4)$$

- Sebelum menghitung reaktansi pada urutan nol ( $X_{t0}$ ) terlebih dahulu harus diketahui data transformator tenaga itu sendiri yaitu data dari kapasitas belitan delta yang ada pada transformator :

1. Untuk transformator dengan hubungan belitan Y dimana kapasitas belitan delta (d) sama dengan kapasitas belitan T, maka  $X_{t0} = X_{t1}$ .
2. Untuk transformator dengan hubungan YD dimana kapasitas belitan delta (d) biasanya adalah sepertiga dari kapasitas belitan Y (belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada di dalam tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan), maka nilai :

$$X_{t0} = 3 \times X_{t1} \dots \dots \dots (2.5)$$



3. Untuk transformator dengan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta didalamnya, maka untuk menghitung besar  $X_{t0}$  berkisar antara 9 sampai dengan  $14 \times X_{t1}$ .

### 2.5.3 Perhitungan Impedansi Penyulang 20 kV

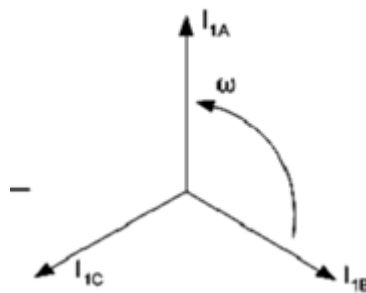
Impedansi pada penyulang dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$Z_F = L \times Z / \text{KM} \dots \dots \dots (2.6)$$

Ada 2 jenis perhitungan impedansi penyulang 20 kV yaitu sebagai berikut :

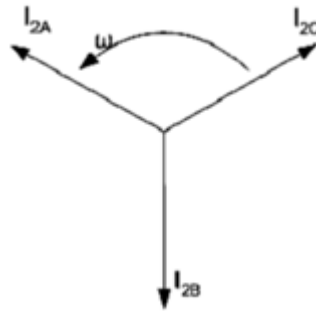
1. Perhitungan impedansi penyulang urutan positif dan urutan negatif.
2. Perhitungan impedansi penyulang urutan nol.

sedangkan untuk impedansi per kilometer dihitung dengan menggunakan 2 metode yaitu dengan menghitung impedansi urutan positif negatif dan impedansi urutan nol dari jaringan tersebut. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.10. Impedansi urutan positif ( $Z_1$ ), adalah impedansi tiga fasa simetris yang terukur bila dialiri oleh arus urutan positif.



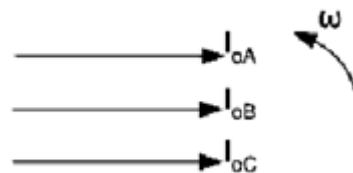
Gambar 2.10 Impedansi Urutan Positif

Untuk impedansi urutan negative dapat dilihat pada gambar 2.11. Untuk impedansi urutan negative ini ( $Z_2$ ), adalah impedansi tiga fasa simetris yang terukur bila dialiri oleh arus urutan negatif.



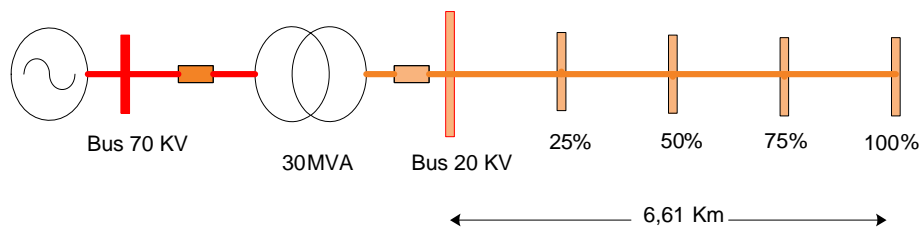
Gambar 2.11 Impedansi Urutan Negatif

Sedangkan untuk impedansi urutan nol adalah impedansi tiga fasa simetris yang terukur bila dialiri arus urutan nol seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Impedansi Urutan Nol

Untuk Impedansi penyulang diperoleh dari data jaringan yang dipergunakan dilapangan (ohm/km) kalau diketahui panjang jaringannya maka impedansi ini dikalikan dengan panjang jaringan dan akan diperoleh ohm. Karena pada pemilihan lokasi(%) berkisar antara 25% sampai dengan 100% dari panjang jaringannya.



Gambar 2.13 Persentase Penyulang BEO

Maka untuk memperoleh impedansi urutan positif dan urutan nol dihitung dengan cara berikut :



- a. Perhitungan impedansi penyulang urutan positif dan urutan negatif.

$$Z_{F1} = \text{Lokasi (\%)} \times L \times Z_1/\text{KM} \dots \dots \dots (2.7)$$

- b. Perhitungan impedansi penyulang urutan nol.

$$Z_{F0} = \text{Lokasi (\%)} \times L \times Z_0/\text{KM} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana :

$Z_{F1}$  = Impedan urutan positif (ohm).

$Z_{F0}$  = Impedansi jaringan urutan nol (ohm).

Lokasi = Titik penentuan berdasarkan panjang jaringan (%).

L = Panjang Jaringan (km).

$Z_1/\text{KM}$  = Impedansi jaringan urutan Positif (Ohm/km).

$Z_0/\text{KM}$  = Impedansi jaringan urutan negatif (ohm/km).

#### 2.5.4 Perhitungan Impedansi Ekuivalen

Impedansi penyulang dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini :

$$Z_{eki} = Z_s + Z_t + Z_f \dots \dots \dots (2.9)$$

Perhitungan impedansi ekuivalen dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu :

1. Perhitungan impedansi ekuivalen urutan positif dan negatif.

Impedansi ekuivalen urutan positif dan negatif diperoleh dari penjumlahan impedansi sumber urutan positif/negatif, impedan trafo urutan positif/negatif dan impedansi penyulang urutan positif/negatif. Maka untuk memperoleh impedansi ekuivalen urutan positi/negatif, dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$Z_1 \text{ eki} = Z_2 \text{ eki}$$

$$Z_{T1} = j X_{T1}$$

$$Z_1 \text{ Eki} = Z_{S1} + Z_{T1} + Z_{F1} \text{ penyulang} \dots \dots \dots (2.10)$$



## 2. Perhitungan impedansi ekivalen urutan nol.

Impedansi ekivalen urutan nol diperoleh dari penjumlahan antara impedansi transformator urutan nol, nilai  $3 R_N$  (tahanan netral) dan impedansi penyulang urutan nol. Berdasarkan sistem pentanahan netral pasokan gardu induk seduduk putih memiliki tahanan pentanahan senilai 40 ohm.  $Z_0$  eko dapat dihitung :

- Mulai dari transformator yang ditanahkan.
- Tahanan netral nilai  $3 R_N$ .
- Impedansi penyulang.

Tranformator di gardu induk seduduk putih memiliki belitan YY, maka :

$$X_{T0} = 10 \times X_{T1}$$

$$Z_{T0} = j X_{T0}$$

$$3 R_N = 3 \times 40$$

$$Z_0 \text{ penyulang} = \text{Lokasi} \times \text{Panjang } Z_0 \text{ total}$$

Jadi Perhitungan  $Z_0$  Ekivalennya didapat dengan persamaan :

$$Z_0 \text{ eki} = Z_{0T} + 3 R_N + Z_0 \text{ penyulang} \dots \dots \dots (2.11)$$

Dimana :

$$Z_1 \text{ eki} = \text{Impedansi ekivalen urutan positif (ohm).}$$

$$Z_2 \text{ eki} = \text{Impedansi ekivalen urutan nol (ohm).}$$

$$Z_{S1} = \text{Impedansi sumber urutan positif (ohm).}$$

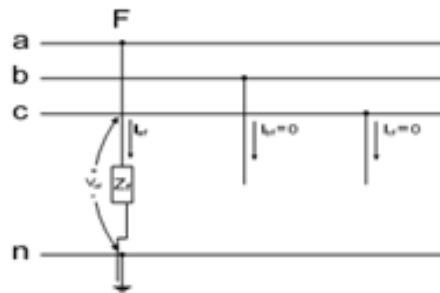
$$Z_{T1} = \text{Impedansi Transformator positif (ohm).}$$

$$Z_1 \text{ penyulang} = \text{Impedansi penyulang urutan nol (ohm).}$$

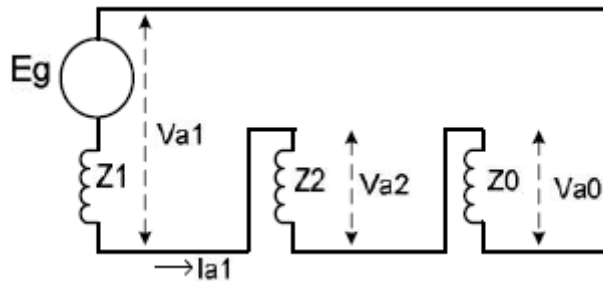


### 2.5.5 Perhitungan Arus Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Perhitungan arus hubungan singkat satu fasa ke tanah digunakan untuk keperluan menaggulangi penyetelan relai gangguan fasa ke tanah. Persamaan yang dipakai dalam perhitungan arus gangguan hubung singkat gangguan fasa ke tanah pada jaringan tegangan menengah.



Gambar 2.14 Gangguan 1 Fasa ke Tanah



Gambar 2.15 Rangkaian Urutan Gangguan 1 Fasa ke Tanah

Maka dari gambar di atas :

$$I_F \text{ 1 fasa} = \frac{3 \times V_{ph}}{Z_1 \times Z_2 \times Z_0} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :

$I_F$  1 fasa = Besar arus gangguan 1 fasa (dalam ampere).

$V_{ph}$  = Besar gangguan fasa terhadap netral.

$Z_0$  = Impedansi ekivalen urutan nol.

$Z_1$  = Impedansi ekivalen positif.





$Z_2$  = Impedansi ekivalen urutan negatif.

Impedansi  $Z_1$ ,  $Z_2$ , dan  $Z_0$  yang dihitung adalah nilai ekivalen mulai dari transformator di gardu induk sampai ke titik gangguan terjadi.

## 2.6 Perhitungan Penyetelan Relai

Perhitungan penyetelan relai merupakan inti dari penyetelan relai gangguan tanah, hal ini dikarenakan hasil dari perhitungan akan diperoleh besar setelan arus relai baik pada sisi prime maupun pada sisi sekunder dan juga akan diperoleh setelan untuk waktu relai. Perhitungan untuk incoming 20 kV dilakukan mulai dari relai paling hilir pada penyulang 20 kV. Untuk setelan relai gangguan tanah diambil dari arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah yang terkecil pada 100% panjang jaringan. Untuk mengantisipasi tahanan yang tinggi dikarenakan penghantar fasa bersentuhan dengan benda lain yang menimbulkan tahanan tinggi, yang akan menyebabkan arus penyetelan primer dikalikan dengan konstanta 0.06 sampai dengan 0.1 jadi persamaan setelan arus pada sisi primer diperoleh berdasarkan hasil perhitungan 10%(0.1) dari arus gangguan satu fasa ke tanah (terkecil) dan setelan arus pada sisi sekundernya diperoleh dari hasil perhitungan penyetelan arus pada sisi primer bebanding terbalik dengan terhadap rasio C.T nya. Akan tetapi untuk penyetelan waktu (tms) dihitung dengan menggunakan perhitungan besar arus setelan pada sisi primernya dan waktu kerja berdasarkan setelan dari relai pada penyulang yang sudah ditentukan waktunya. Penyetelan relai incoming 20 kV dihitung berdasarkan arus gangguan satu fasa ke tanah terkecil.

$$\text{- Arus gangguan (Primer)} = 10\% \times I_{FC} \text{ 1 fasa (100\% panjang penyulang)} \dots \dots \dots (2.13)$$

$$\text{- Penyetelan arus (Primer)} = 0,1 \times \text{Arus Nominal NGR} \dots \dots \dots (2.14)$$

$$\text{- Penyetelan arus (Sekunder)} = \text{Setelan Arus Primer} \times \frac{1}{\text{Rasio CT}} \dots \dots \dots (2.15)$$

$$\text{- Penyetelan waktu relai gangguan tanah pada incoming 20kV}$$

$$tms = \frac{tsx \left[ \left\{ \frac{i_{fault}}{i_{set}} \right\}^{0,02} - 1 \right]}{0,14} \dots \dots \dots (2.16)$$



Dimana :

$t_s$  = Penyetelan waktu kerja (s)

$t_{ms}$  = Setelan waktu (s)

$I_{\text{fault}}$  = Arus gangguan (A)

$I_{\text{set}}$  = Arus penyetelan (A)