



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Distribusi Tenaga Listrik¹

Sistem Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah; 1) pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan 2) merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 150kV, 220kV atau 500kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2.R$). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula. Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder kekonsumen-konsumen. Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

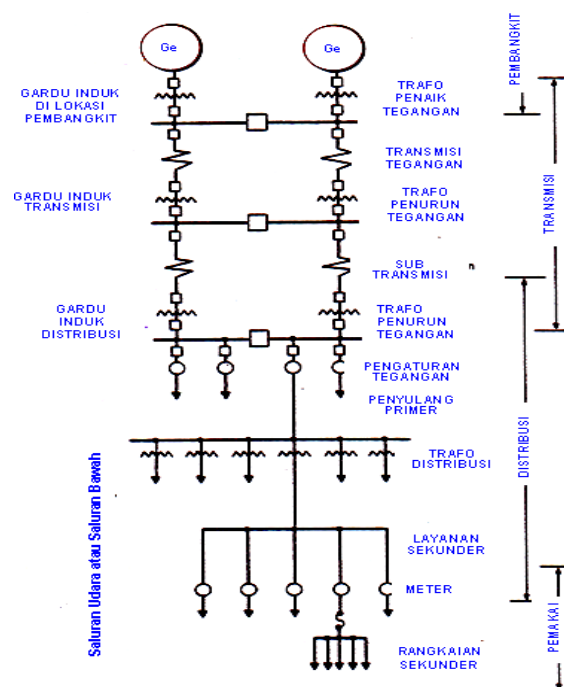
¹ F Rozeta, "*Distribusi Tenaga Listrik*" (Palembang: Politeknik Negeri Sriwijaya, 2015). Hal:6

2.1.1 Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Untuk kemudahan dan penyederhanaan, lalu diadakan pembagian serta pembatasan-pembatasan sebagai berikut:

1. Daerah I : Bagian pembangkitan (*Generation*)
2. Daerah II : Bagian penyaluran (*Transmission*), bertegangan tinggi (HV,UHV,EHV)
3. Daerah III : Bagian Distribusi Primer, bertegangan menengah (6 atau 20kV).
4. Daerah IV : (Di dalam bangunan pada beban/konsumen), Instalasi, bertegangan rendah.

Berdasarkan pembatasan-pembatasan tersebut, maka diketahui bahwa porsi materi Sistem Distribusi adalah Daerah III dan IV, yang pada dasarnya dapat diklasifikasikan menurut beberapa cara, bergantung dari segi apa klasifikasi itu dibuat. Pembagian dari jaringan diatas dapat dijelaskan lebih detil melalui gambar 2.1 berikut ini.



Gambar 2.1 Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

2.1.2 Bagian – bagian jaringan distribusi²

Untuk jaringan didistribusi pada umumnya terdiri dari dua bagian yang paling utama, yaitu sebagai berikut :

a. Jaringan distribusi primer

Jaringan distribusi primer adalah jaringan distribusi daya listrik yang bertegangan menengah (20 kV). Jaringan distribusi primer tersebut merupakan jaringan penyulang. Jaringan distribusi primer berawal dari sisi sekunder trafo daya yang terpasang pada gardu induk hingga ke sisi primer trafo distribusi yang terpasang pada tiang-tiang saluran. Pola konfigurasi jaringan pada distribusi terdiri dari 5 tipe yaitu sistem radial, sistem *loop*, sistem *spindle*, sistem *spot network*, dan sistem interkoneksi.

1. Sistem Radial

Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu dan dicabang-cabangkan ke titik-titik beban yang dilayani. Sistem radial terdiri atas fider (*feeders*) atau penyulang yang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial. Konfigurasi jaringan sistem radial terbagi atas 2 (dua) bagian yaitu sistem radial terbuka dan sistem radial paralel.

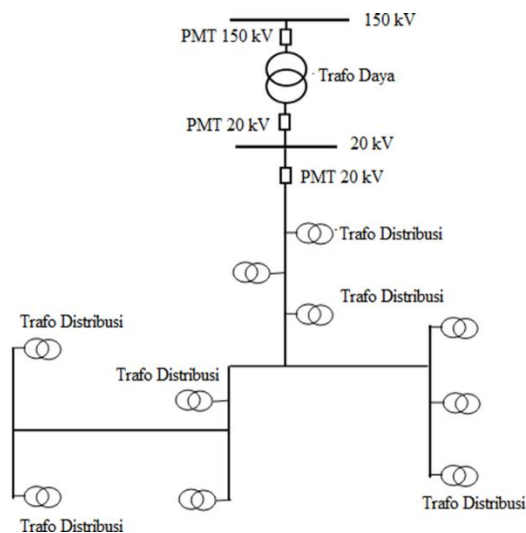
a. Sistem Radial Terbuka

Sistem radial terbuka ini paling tidak dapat diandalkan, karena penyaluran tenaga listrik hanya dilakukan dengan menggunakan satu saluran saja. Jaringan model ini sewaktu mendapat gangguan akan menghentikan penyaluran tenaga listrik cukup lama sebelum gangguan tersebut diperbaiki kembali. Oleh sebab itu kontinuitas pelayanan pada sistem radial terbuka ini kurang bisa diandalkan. Selain itu makin panjang jarak saluran dari gardu induk ke konsumen, kondisi tegangan makin tidak bisa diandalkan, justru bertambah buruk karena rugi-rugi tegangan akan lebih besar. Berarti kapasitas pelayanan untuk sistem radial terbuka ini sangat terbatas.

² Syufrijal Readysal Monantun, “*Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*”(Jakarta,2013). Hal:29.



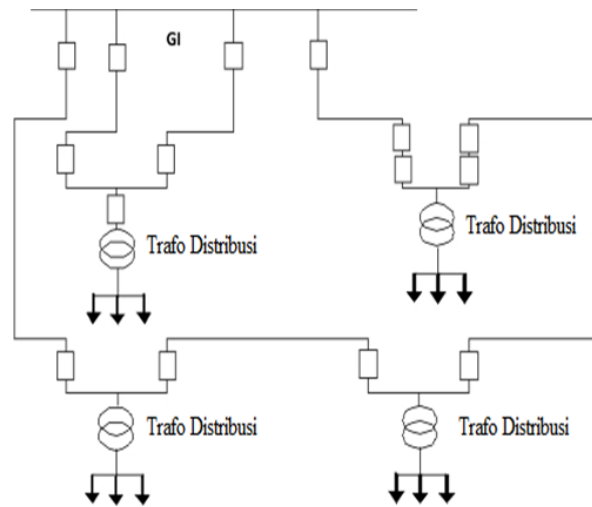
Konfigurasi sistem jaringan radial terbuka terlihat pada gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Konfigurasi Jaringan Sistem Radial Terbuka

b. Sistem Radial Paralel

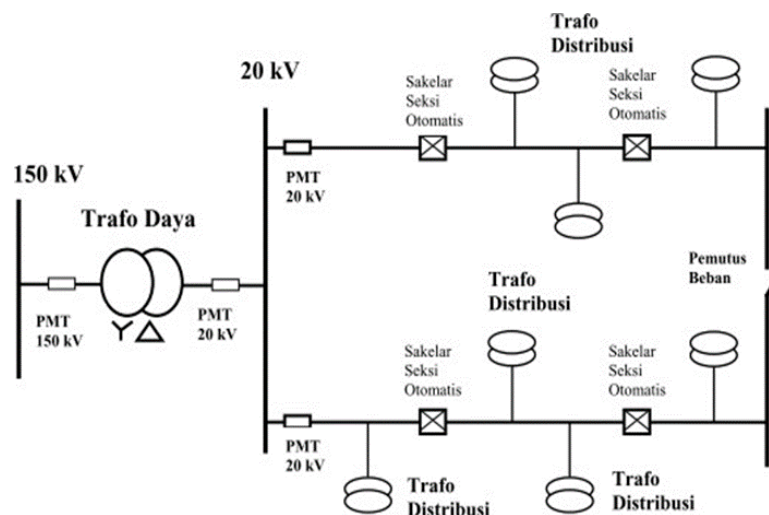
Untuk memperbaiki kekurangan dari sistem radial terbuka diatas maka dipakai konfigurasi sistem radial paralel, yang menyalurkan tenaga listrik melalui dua saluran yang diparalelkan. Pada sistem ini titik beban dilayani oleh dua saluran, sehingga bila salah satu saluran mengalami gangguan, maka saluran yang satu lagi dapat menggantikan, dengan demikian pemadaman tak perlu terjadi. Kontinuitas pelayanan sistem radial paralel ini lebih terjamin dan kapasitas pelayanan bisa lebih besar dan sanggup melayani beban puncak (*peak load*) dalam batas yang diinginkan. Kedua saluran dapat dikerjakan untuk melayani titik beban bersama-sama. Biasanya titik beban hanya dilayani oleh salah satu saluran saja. Hal ini dilakukan untuk menjaga kontinuitas pelayanan pada konsumen. Konfigurasi sistem jaringan radial paralel dapat dilihat pada gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Konfigurasi Jaringan Sistem Radial Paralel

2. Sistem *Loop*

Sistem jaringan *loop* merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan *ring*. Susunan rangkaian saluran membentuk *ring* yang memungkinkan titik beban terlayani dari dua arah saluran, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin serta kualitas dayanya menjadi lebih baik. Bentuk sistem jaringan *loop* diperlihatkan pada gambar 2.4 berikut.

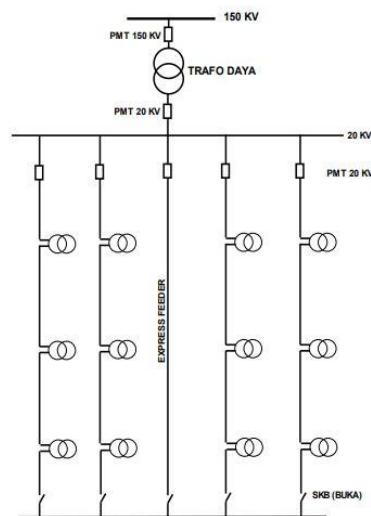


Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan Sistem *Loop*

3. Sistem *Spindel*

Jaringan distribusi *spindel* merupakan saluran kabel bawah tanah tegangan menengah (SKTM) yang penerapannya cocok di kota-kota besar. Sistem jaringan spindel biasanya terdiri atas maksimum 6 penyulang dalam keadaan dibebani, dan satu penyulang dalam keadaan kerja tanpa beban. Saluran penyulang yang beroperasi dalam keadaan berbeban dinamakan "*working feeder*" atau saluran kerja, sedangkan saluran yang dioperasikan tanpa beban dinamakan "*express feeder*".

Fungsi "*express feeder*" dalam hal ini selain sebagai cadangan pada saat terjadi gangguan pada salah satu "*working feeder*", juga berfungsi untuk memperkecil terjadinya drop tegangan pada sistem distribusi bersangkutan pada keadaan operasi normal. Konfigurasi jaringan sistem spindel dapat dilihat pada gambar 2.5 berikut.

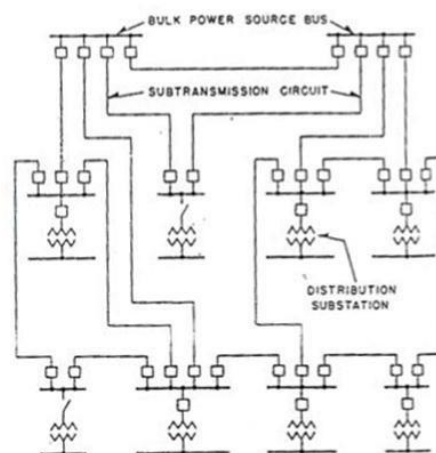


Gambar 2.5 Konfigurasi Jaringan Sistem *Spindel*

4. Sistem *Spot Network*

Untuk pelanggan yang tidak boleh padam (pelanggan VVIP) misalkan: Istana Presiden, Gedung MPR, bandar udara dan rumah sakit maka tenaga listrik disuplai dengan pola jaringan *spot network* dengan minimal 2 penyulang sekaligus plus *Automatic Change Over*. Sistem *Spot network* merupakan sistem penyaluran tenaga listrik yang

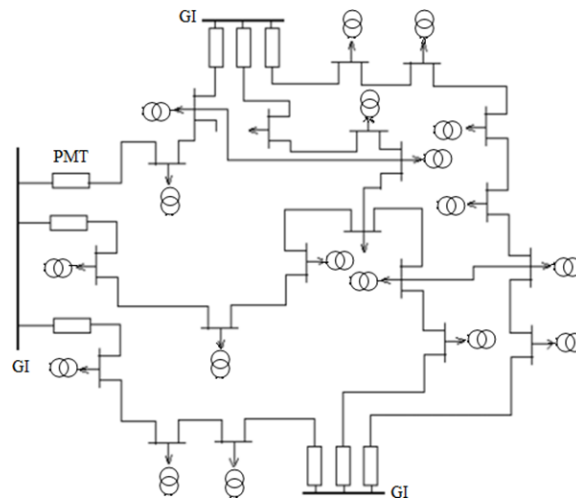
dilakukan secara terus-menerus oleh dua atau lebih *feeder* pada gardu-gardu induk dari beberapa pusat pembangkit tenaga listrik yang bekerja secara paralel. Sistem ini merupakan pengembangan dari sistem-sistem yang terdahulu dan merupakan sistem yang paling baik serta dapat diandalkan, mengingat sistem ini dilayani oleh dua atau lebih sumber tenaga listrik. Selain itu jumlah cabang lebih banyak dari jumlah titik *feeder*. Konfigurasi jaringan sistem spot network dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Konfigurasi Jaringan Sistem *Spot Network*

5. Sistem Interkoneksi

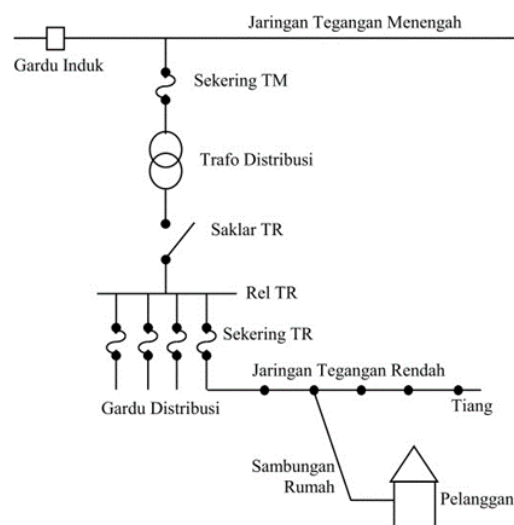
Sistem interkoneksi ini merupakan perkembangan dari sistem *spot network*. Sistem ini menyalurkan tenaga listrik dari beberapa pusat pembangkit tenaga listrik yang dikehendaki bekerja secara paralel. Sehingga penyaluran tenaga listrik dapat berlangsung terus menerus (tak terputus), walaupun daerah kepadatan beban cukup tinggi dan luas. Hanya saja sistem ini memerlukan biaya yang cukup mahal dan perencanaan yang cukup matang. Untuk perkembangan dikemudian hari, sistem interkoneksi ini sangat baik, bisa diandalkan dan merupakan sistem yang mempunyai kualitas yang cukup tinggi. Konfigurasi jaringan sistem interkoneksi dapat dilihat pada gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7 Konfigurasi Jaringan Sistem Interkoneksi

b. Jaringan distribusi sekunder

Jaringan distribusi sekunder adalah jaringan daya listrik yang termasuk dalam kategori tegangan rendah (sistem 380/220 volt), yaitu rating yang sama dengan tegangan peralatan yang dilayani. Jaringan distribusi sekunder bermula dari sisi sekunder trafo distribusi dan berakhir hingga ke alat ukur (meteran) pelanggan. Sistem jaringan distribusi sekunder disalurkan kepada para pelanggan melalui kawat berisolasi. Jaringan distribusi sekunder dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Jaringan Distribusi Sekunder

2.2 Sistem Proteksi Distribusi Tenaga Listrik

2.2.1 Pengertian Sistem Proteksi

Secara umum pengertian sistem proteksi ialah cara untuk mencegah atau membatasi kerusakan peralatan terhadap gangguan, sehingga kelangsungan penyaluran tenaga listrik dapat dipertahankan.

Sistem proteksi penyulang tegangan menengah ialah pengamanan yang terdapat pada sel-sel tegangan menengah di Gardu Induk dan pengamanan yang terdapat pada jaringan tegangan menengah. Penyulang tegangan menengah ialah penyulang tenaga listrik yang berfungsi untuk mendistribusikan tenaga listrik tegangan menengah (6 kV – 20 kV), yang terdiri dari:

- a. Saluran udara tegangan menengah (SUTM)
- b. Saluran kabel tegangan menengah (SKTM)

2.2.2 Tujuan sistem proteksi

Gangguan pada sistem distribusi tenaga listrik hampir seluruhnya merupakan gangguan hubung singkat, yang akan menimbulkan arus yang cukup besar. Semakin besar sistemnya semakin besar gangguannya. Arus yang besar bila tidak segera dihilangkan akan merusak peralatan yang dilalui arus gangguan. Untuk melepaskan daerah yang terganggu itu maka diperlukan suatu sistem proteksi, yang pada dasarnya adalah alat pengamanan yang bertujuan untuk melepaskan atau membuka sistem yang terganggu, sehingga arus gangguan ini akan padam. Adapun tujuan dari sistem proteksi antara lain:

- a. Untuk menghindari atau mengurangi kerusakan akibat gangguan pada peralatan yang terganggu atau peralatan yang dilalui oleh arus gangguan.
- b. Untuk melokalisir (mengisolir) daerah gangguan menjadi sekecil mungkin
- c. Untuk dapat memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi kepada konsumen. Serta memperkecil bahaya bagi manusia.



2.3 Persyaratan Sistem Proteksi

Tujuan utama sistem proteksi adalah :

- Mendeteksi kondisi abnormal (gangguan)
- Mengisolir peralatan yang terganggu dari sistem.

Persyaratan terpenting dari sistem proteksi yaitu :

a. Kepekaan (*sensitivity*)

Sensitivitas adalah istilah yang sering dikaitkan dengan harga besaran penggerak minimum, seperti level arus minimum, tegangan, daya dan besaran lain di mana rele atau skema proteksi masih dapat bekerja dengan baik. Suatu rele disebut sensitif bila parameter operasi utamanya rendah. Artinya, semakin rendah besaran parameter penggerak maka perangkat tersebut dikatakan semakin sensitif.

Sensitivitas pada rele elektromekanikal terdahulu biasanya dikaitkan dengan kepekaan dari perangkat Bergeraknya terhadap daya yang diserap dalam bentuk *Volt-Ampere* di mana rele bekerja. Semakin kecil VA yang dibutuhkan maka rele elektromekanik tersebut semakin sensitif. Pada rele-rele numerik, sensitivitas tidak dikaitkan lagi pada perangkat kerasnya tetapi lebih pada aplikasi dan parameter trafo arus (*CT-current transformer*) atau trafo tegangan (*VT-voltage transformer*) yang digunakan.³

Pada prinsipnya rele harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan di kawasan pengamanannya, termasuk kawasan pengamanan cadangan-jauhnya, meskipun dalam kondisi yang memberikan deviasi yang minimum.

Untuk rele arus-lebih hubung-singkat yang bertugas pula sebagai pengamanan cadangan jauh bagi seksi berikutnya, rele itu harus dapat mendeteksi arus gangguan hubung singkat dua fasa yang terjadi diujung akhir seksi berikutnya dalam kondisi pembangkitan minimum.

³ Bonar Pandjaitan, “Praktik-praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik” (Yogyakarta:Penerbit Andi,2012). Hal: 14.



Sebagai pengaman peralatan seperti motor, generator atau trafo, rele yang peka dapat mendeteksi gangguan pada tingkatan yang masih dini sehingga dapat membatasi kerusakan. Bagi peralatan seperti di atas hal ini sangat penting karena jika gangguan itu sampai merusak besi laminasi stator atau inti trafo, maka perbaikannya akan sangat sukar dan mahal.

Sebagai pengaman gangguan tanah pada SUTM, rele yang kurang peka menyebabkan banyak gangguan tanah, dalam bentuk sentuhan dengan pohon yang tertiuap angin, yang tidak bisa terdeteksi. Akibatnya, busur apinya berlangsung lama dan dapat menyambar ke fasa lain, maka rele hubung-singkat yang akan bekerja. Gangguan sedemikian bisa terjadi berulang kali di tempat yang sama yang dapat mengakibatkan kawat cepat putus. Sebaliknya, jika terlalu peka, rele akan terlalu sering trip untuk gangguan yang sangat kecil yang mungkin bisa hilang sendiri atau risikonya dapat diabaikan atau dapat diterima.

b. Keandalan (*Reliability*)

Ada 3 aspek :

1. *Dependability*

Yaitu tingkat kepastian bekerjanya (Keandalan kemampuan bekerjanya). Pada prinsipnya pengaman harus dapat diandalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), tidak boleh gagal bekerja. Dengan kata lain perkataan *dependability*-nya harus tinggi.

2. *Security*

Yaitu tingkat kepastian untuk tidak salah kerja (keandalan untuk tidak salah kerja). Salah kerja adalah kerja yang semestinya tidak harus kerja, misalnya karena lokasi gangguan di luar kawasan pengamanannya atau sama sekali tidak ada gangguan atau kerja yang terlalu cepat atau terlalu lambat. Salah kerja mengakibatkan

pemadaman yang sebenarnya tidak perlu terjadi. Jadi pada prinsipnya pengaman tidak boleh salah kerja, dengan lain perkataan *security*-nya harus tinggi.

3. *Availability*

Yaitu perbandingan antara waktu di mana pengaman dalam keadaan berfungsi/siap kerja dan waktu total dalam operasinya.

Dengan rele elektromekanis, jika rusak/tak berfungsi, tak diketahui segera. Baru diketahui dan diperbaiki atau diganti. Disamping itu, sistem proteksi yang baik juga juga dilengkapi dengan kemampuan mendeteksi terputusnya sirkit trip, sirkit sekunder arus, dan sirkit sekunder tegangan serta hilangnya tegangan serta hilangnya tegangan searah (*DC voltage*), dan memberikan alarm sehingga bisa diperbaiki, sebelum kegagalan proteksi dalam gangguan yang sesungguhnya, benar-benar terjadi. Jadi *availability* dan keandalannya tinggi.

c. *Selectifitas (Selectivity)*

Selektivitas suatu sistem proteksi jaringan tenaga adalah kemampuan rele 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 kerja secara selektif sesuai klasifikasi dan jenis gangguan yang harus diamankan.⁴

Pengaman harus dapat memisahkan bagian sistem yang terganggu sekecil mungkin yaitu hanya seksi atau peralatan yang terganggu saja yang termasuk dalam kawasan pengamanan utamanya. Pengamanan sedemikian disebut pengaman yang selektif

⁴ Bonar Pandjaitan, "*Praktik-praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik*" (Yogyakarta:Penerbit Andi,2012). Hal: 11.



Jadi rele harus dapat membedakan apakah:

- Gangguan terletak di kawasan pengamanan utamanya dimana ia harus bekerja cepat.
- Gangguan terletak di seksi berikutnya dimana ia harus bekerja dengan waktu tunda (sebagai pengaman cadangan) atau menahan diri untuk tidak trip.
- Gangguannya diluar daerah pengamanannya, atau sama sekali tidak ada gangguan, dimana ia tidak harus bekerja sama sekali.

Untuk itu rele-rele, yang didalam sistem terletak secara seri, di koordinir dengan mengatur peningkatan waktu (*time grading*) atau peningkatan *setting* arus (*current grading*), atau gabungan dari keduanya.

Untuk itulah rele dibuat dengan bermacam-macam jenis dan karakteristiknya. Dengan pemilihan jenis dan karakteristik rele yang tepat, spesifikasi trafo arus yang benar, serta penentuan *setting* rele yang terkoordinir dengan baik, selektifitas yang baik dapat diperoleh.

Pengaman utama yang memerlukan kepekaan dan kecepatan yang tinggi, seperti pengaman transformator tenaga, generator, dan busbar pada sistem tegangan ekstra tinggi (TET) dibuat berdasarkan prinsip kerja yang mempunyai kawasan pengamanan yang batasnya sangat jelas dan pasti, dan tidak sensitif terhadap gangguan diluar kawasannya, sehingga sangat selektif, tapi tidak bisa memberikan pengaman cadangan bagi seksi berikutnya. Contohnya pengaman differensial.

d. Kecepatan (*speed*)

Untuk memperkecil kerugian/kerusakan akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Waktu total pembebasan sistem dari gangguan adalah waktu sejak munculnya gangguan, sampai bagian yang terganggu benar-benar terpisah dari bagian sistem lainnya.



Kecepatan itu penting untuk:

- Menghindari kerusakan secara thermis pada peralatan yang dilalui arus gangguan serta membatasi kerusakan pada alat yang terganggu.
- Mempertahankan kestabilan sistem.
- Membatasi ionisasi (busur api) pada gangguan disaluran udara yang akan berarti memperbesar kemungkinan berhasilnya penutupan balik PMT (*reclosing*) dan mempersingkat *dead timenya* (interval waktu antara buka dan tutup).

Untuk menciptakan selektifitas yang baik, mungkin saja suatu pengaman terpaksa diberi waktu tunda (td) namun waktu tunda tersebut harus sesingkat mungkin (seperlunya saja) dengan memperhitungkan resikonya.

2.4 Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik

Gangguan adalah suatu ketidaknormalan (*interferes*) dalam sistem tenaga listrik yang mengakibatkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam sistem tiga fasa. Gangguan dapat juga didefinisikan sebagai setiap kesalahan dalam suatu rangkaian yang menyebabkan terganggunya aliran arus yang normal (Suhadi, 2008).

Gangguan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelompok, yaitu :

A. Berdasarkan kesimetrisannya

1. Gangguan asimetris, merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir pada setiap fasanya menjadi tidak seimbang, gangguan ini terdiri dari:
 - Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah, yakni gangguan yang disebabkan karena salah satu fasa terhubung singkat ke tanah atau *ground*.
 - Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa, yakni gangguan yang disebabkan karena fasa dan fasa antar kedua fasa terhubung singkat dan tidak terhubung ke tanah.



- Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah, yakni gangguan yang terjadi ketika kedua fasa terhubung singkat ke tanah
- 2. Gangguan simetris, merupakan gangguan yang terjadi pada semua fasanya sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Gangguan ini terdiri dari:
 - Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa, yakni gangguan yang terjadi ketika ketiga fasa saling terhubung singkat
 - Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah, yakni gangguan yang terjadi ketika ketiga fasa terhubung singkat ke tanah.

Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan dasar isolasi antara sesama kawat fasa dengan tanah yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan. Analisis gangguan hubung singkat diperlukan untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik waktu perencanaan maupun setelah beroperasi.

2.5 Arus Gangguan Hubung Singkat⁵

Gangguan yang biasa disensor oleh rele arus lebih yaitu gangguan arus hubung singkat 3 fasa dan gangguan arus hubung singkat 2 fasa. Sedangkan, gangguan yang biasa disensor oleh rele gangguan tanah yaitu gangguan arus hubung singkat 1 fasa ke tanah.

Rumus dasar yang digunakan dalam perhitungan arus gangguan hubung singkat yaitu dengan menggunakan hukum ohm pada persamaan (2.1) :

$$I = \frac{V}{Z} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

I = Arus Gangguan (A)

V = Tegangan Sumber (V)

Z = Impedansi dari sumber ke titik gangguan (Ω)

⁵ Robby Bimantara, LA: "Evaluasi Relay Over Current Relay (OCR) dan Ground Fault Relay (GFR) pada GI Gandus Menggunakan Software ETAP 12.6.0" (Palembang: Polsri, 2017), Hal: 10.



Yang membedakan antara gangguan hubungan singkat tiga fasa, dua fasa dan satu fasa ke tanah adalah impedansi yang terbentuk sesuai dengan macam gangguan itu sendiri, dan tegangan yang memasok arus ke titik gangguan.⁶

Impedansi yang terbentuk dapat ditunjukkan seperti berikut ini :

$$Z \text{ untuk gangguan tiga fasa, } Z = Z1$$

$$Z \text{ untuk gangguan dua fasa, } Z = Z1 + Z2$$

$$Z \text{ untuk gangguan satu fasa, } Z = Z1 + Z2 + Z0$$

Dimana, dalam menghitung impedansi dikenal tiga macam impedansi urutan yaitu :

- Impedansi urutan positif ($Z1$), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan positif.
- Impedansi urutan negatif ($Z2$), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh arus urutan negatif.
- Impedansi urutan nol ($Z0$), yaitu impedansi yang hanya dirasakan oleh urutan nol.

2.6 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat⁷

Perhitungan hubung singkat adalah analisis suatu sistem tenaga listrik pada keadaan gangguan hubung singkat, dimana dengan cara ini diperoleh nilai besaran-besaran listrik yang dihasilkan sebagai akibat gangguan hubung singkat tersebut. Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan dasar isolasi antara sesama kawat fasa dengan tanah yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan atau biasa disebut gangguan arus lebih. Analisis gangguan hubung

⁶ Irfan Afandi, Skripsi: “Analisa Setting Relai Arus Lebih Dan Relai Gangguan Tanah Pada Penyulang Sadewa Di Gi Cawang” (Depok: Universitas Indonesia, 2009). Hal:20.

⁷ Hendriyadi, “Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Jaringan Distribusi di Kota Pontianak”. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.



singkat diperlukan untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik waktu perencanaan maupun setelah beroperasi.

Perhitungan arus gangguan hubung singkat sangat penting untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik pada waktu perencanaan maupun setelah beroperasi nantinya. Perhitungan arus hubung singkat dibutuhkan untuk⁸ :

- *Setting* dan koordinasi peralatan proteksi.
- Menentukan kapasitas alat pemutus daya.
- Menentukan rating hubung singkat peralatan–peralatan yang digunakan.
- Menganalisa sistem jika ada hal–hal yang tidak baik yang terjadi pada waktu sistem sedang beroperasi.

Untuk menghitung arus gangguan hubung singkat pada sistem seperti diatas dilakukan dengan beberapa tahap perhitungan, yaitu sebagai berikut:

2.6.1 Daya Hubung Singkat Trafo⁹

Perhitungan daya hubung singkat trafo menggunakan persamaan (2.2) sebagai berikut:

$$MVA_{sc} = \sqrt{3} \times I_{sc} \times V_{ph} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:

MVA_{sc} = Daya Hubung Singkat Trafo (Mva)

I_{sc} = Arus Hubung Singkat Trafo di Sisi Sekunder (kA)

V_{ph} = Tegangan (*Phase-Phase*) Trafo di Sisi Primer (kV)

⁸ Irfan Afandi, Skripsi: “Analisa Setting Relai Arus Lebih Dan Relai Gangguan Tanah Pada Penyulang Sadewa Di Gi Cawang” (Depok: Universitas Indonesia,2009). Hal:21.

⁹ I Gusti Agung Putra Sanjaya,dkk. “Analisis Setting Pengaman Transformator Daya Di Gardu Induk Nusa Dua Jika Terjadi Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Tanah”. E-Journal SPEKTRUM Vol. 4, No. 1 Juni 2017. Hal:29.



2.6.2 Impedansi Dasar Trafo

Perhitungan Arus Dasar Trafo dapat dicari menggunakan Persamaan (2.3) sebagai berikut:

$$I_{base} = \frac{MVA_{base}}{\sqrt{3} \times kV_{base}} \dots\dots\dots(2.3)$$

Sedangkan untuk mencari nilai dari Impedansi Dasar Trafo menggunakan Persamaan (2.4) sebagai berikut:

$$Z_{base} = \frac{kV_{base}^2}{MVA_{base}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

I_{base} = Arus dasar trafo (A)

Z_{base} = Impedansi dasar trafo (Ω)

kV_{base} = Tegangan Trafo di Sisi Sekunder (kV)

MVA_{base} = Kapasitas daya Trafo (Mva)

2.6.3 Impedansi Sumber¹⁰

Impedansi sumber adalah nilai tahanan pada sisi primer, yang mewakili semua unit pembangkit. Beberapa perusahaan listrik memberikan data pada langganan untuk menetapkan pemutus rangkaian bagi instalasi industri atau sistem distribusi yang dihubungkan pada sistem pemakaian di seberang titik. Besarnya nilai impedansi sumber sisi primer dapat dihitung dengan persamaan (2.5) berikut;

$$Z_1 = \frac{kV_1^2}{MVA_{sc}} \Omega \dots\dots\dots(2.5)$$

Untuk mengkonversikan impedansi yang terletak pada sisi primer ke sisi sekunder dari trafo, maka dilakukan dengan menyamakan rating daya

¹⁰ Yogi Sanzarian, LA: "Koordinasi Rele Arus lebih dan Rele Gangguan Tanah Menggunakan Program Berbasis Electric Transient And Analysis Program (ETAP) Pada Gardu Induk Bungaran di PT.PLN (Persero) UPT Palembang" (Palembang: Polstri,2015), Hal:25-28.



transformator tenaga antara sisi primer dan sisi sekunder, sehingga didapatkan persamaan (2.6) berikut:

$$Z_2 = \frac{kV_2^{2(sek)}}{kV_1^{2(pri)}} \times Z_1 \dots \dots \dots (2.6)$$

Untuk menghitung nilai impedansi sumber urutan positif dan negatif dalam satuan pu dapat dicari menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Z_{1s} = Z_{2s} = \frac{Z_2}{Z_{base}} \dots \dots \dots (2.7)$$

Untuk menghitung nilai impedansi sumber urutan nol dalam satuan pu dapat dicari menggunakan rumus arus gangguan hubung singkat 1 Fasa ke tanah seperti pada persamaan (2.18)

Dimana:

$$kV_1 = \text{Tegangan transformator tenaga sisi primer} \quad (\text{kV})$$

$$kV_2 = \text{Tegangan transformator tenaga sisi sekunder} \quad (\text{kV})$$

$$Z_1 = \text{Impedansi transformator tenaga sisi primer} \quad (\Omega)$$

$$Z_2 = \text{Impedansi transformator tenaga sisi sekunder} \quad (\Omega)$$

$$Z_{1s} = Z_{2s} = \text{Impedansi sumber urutan positif dan negative} \quad (\Omega)$$

2.6.4 Impedansi Dan Reaktansi Transformator

Impedansi pada transformator dapat dicari menggunakan persamaan (2.8) sebagai berikut:

$$Z_{1T} = Z_{2T} = j \frac{MVA \text{ base}}{MVA \text{ trafo}} \times \frac{(KVA \text{ trafo})^2}{(KVA \text{ base})^2} \times Z_{pu} \% \dots \dots (2.8)$$

Dimana:

$$Z_{1T} = \text{Impedansi urutan positif transformator} \quad (\Omega)$$

$$Z_{2T} = \text{Impedansi urutan negatif transformator} \quad (\Omega)$$

$$Z_{pu} = \text{Impedansi trafo} \quad (\text{pu})$$



Reaktansi transformator tenaga tercantum pada *nameplate* transformator. Untuk perhitungan reaktansi trafo digunakan rumus seperti persamaan (2.9) berikut:

$$X_{1T} = X_{2T}$$

$$X_t = \frac{(kV)^2}{(MVA)} \dots\dots\dots(2.9)$$

Nilai reaktansi transformator tenaga ini adalah reaktansi urutan positif negatif, maka digunakan rumus pada persamaan (2.10) untuk menghitung reaktansi transformator urutan positif negatif, yaitu :

$$X_{1T} = Z (\%) \times X_t \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

- X_{1T} = Reaktansi Trafo untuk urutan positif dan negatif (Ω)
- X_{0T} = Reaktansi Trafo untuk urutan nol (Ω)
- Z_T = Impedansi dasar Trafo sebenarnya (100)% (Ω)
- $Z\%$ = Impedansi dalam %

Pada perhitungan X_{1T} persentase perhitungan sesuai dengan persentase impedansi pada trafo. Untuk impedansi dan reaktansi urutan nol pada transformator perlu diperhatikan ada tidaknya belitan delta dengan syarat sebagai berikut:

- a. Jika kapasitas Δ sama dengan kapasitas Y, maka berlaku nilai $Z_{0T} = Z_{1T}$ dan $X_{0T} = X_{1T}$.
- b. Jika pada transformator mempunyai hubungan Y- Δ maka terdapat belitan Δ dengan kapasitas $3 \times$ kapasitas (sekunder), sehingga $Z_{0T} = 3 \times Z_{1T}$ dan $X_{0T} = 3 \times X_{1T}$.
- c. Jika pada transformator mempunyai hubungan Y-Y tanpa belitan Δ didalamnya sehingga $Z_{0T} = 10 \times Z_{1T}$ dan $X_{0T} = 10 \times X_{1T}$.



2.6.5 Impedansi Penyulang

Impedansi penyulang yang akan dihitung disini tergantung dari besarnya impedansi per km (km/ohm) dari penyulang yang dihitung, dimana nilainya ditentukan oleh jenis penghantar, luas penampang dan panjang jaringan SUTM. Maka rumus untuk menghitung impedansi penyulang menggunakan persamaan (2.11) yaitu:

$$Z_L/Z_0 = L (\text{Km}) \times Z (\Omega/\text{Km}) \dots\dots\dots(2.11)$$

Perhitungan impedansi penyulang urutan positif dan negatif dapat dihitung menggunakan rumus pada persamaan (2.12) berikut:

$$Z_{1L} = Z_{2L} = \text{Lokasi} (\%) \times L \times Z_L (\Omega/\text{Km}) \dots\dots(2.12)$$

Perhitungan impedansi penyulang urutan nol dapat dihitung menggunakan rumus pada persamaan (2.13) berikut:

$$Z_{0L} = \text{Lokasi} (\%) \times L \times Z_0 (\Omega/\text{Km}) \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana:

- Z_{1L} = Impedansi penyulang urutan positif (Ω)
- Z_{2L} = Impedansi penyulang urutan negatif (Ω)
- Z_{0L} = Impedansi penyulang urutan nol (Ω)
- Lokasi = Titik penentuan berdasarkan panjang jaringan (%)
- L = Panjang Jaringan (Km)
- Z_1 = Impedansi jaringan urutan positif (Ω)
- Z_0 = Impedansi jaringan urutan positif (Ω)

2.6.6 Impedansi Ekuivalen Jaringan

Perhitungan impedansi ekuivalen jaringan adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekuivalen urutan positif dan impedansi ekuivalen urutan negatif dari titik gangguan sampai kesumber. Z_{1eq} dan Z_{2eq} dapat langsung dihitung sesuai lokasi gangguan, dengan menjumlahkan impedansi sumber, impedansi trafo, dan impedansi penyulang.



Perhitungan Z_{1eq} dan Z_{2eq} dapat dihasilkan dengan menggunakan persamaan (2.14) berikut:

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_{1S} + Z_{1T} + Z_{1L} \dots \dots \dots (2.14)$$

Sedangkan untuk impedansi ekivalen urutan nol perlu dipertimbangkan besarnya tahanan pentanahan (R_n), sehingga didapat persamaan (2.15), yaitu:

$$Z_{0eq} = Z_{0S} + Z_{0T} + 3 R_n + Z_{0L} \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana:

Z_{1eq} = Impedansi ekivalen urutan positif (Ω)

Z_{0eq} = Impedansi ekivalen urutan nol (Ω)

Z_{1S} = Impedansi sumber urutan positif (Ω)

Z_{1T} = Impedansi trafo urutan positif (Ω)

R_n = Tahanan Netral (Ω)

2.6.7 Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat 3 fasa adalah seperti pada persamaan (2.1) Sehingga arus gangguan hubung singkat 3 fasa dapat dihitung sebagai berikut dengan persamaan (2.16):

$$I_{sc\ 3\phi} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}} = \frac{\frac{V}{\sqrt{3}}}{Z_{1eq}} \dots \dots \dots (2.16)$$

2.6.8 Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung besarnya arus gangguan hubung singkat 2 fasa adalah seperti pada persamaan (2.1) Sehingga arus gangguan hubung singkat 2 fasa dapat dihitung sebagai berikut dengan persamaan (2.17):

$$I_{sc\ 2\phi} = \frac{V_{ph-ph}}{2 \times Z_{1eq}} \dots \dots \dots (2.17)$$



2.6.9 Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah

Pada gangguan satu fasa ke tanah misal fasa A mengalami gangguan akan menyebabkan kenaikan arus pada fasa A dan *drop* tegangan di fasa A (menjadi nol) sedangkan arus pada fasa yang lain menjadi nol yang diikuti dengan kenaikan tegangan fasa yang lain. Sehingga arus gangguan hubung singkat 1 Fasa ke tanah dapat dihitung dengan persamaan (2.18) sebagai berikut:

$$I_{sc\ 1\phi} = \frac{3 \times V_{ph}}{2 \times Z_{1eq} + Z_{0eq}} \dots\dots\dots(2.18)$$

2.6.10 Sistem Satuan Per Unit

Sistem satuan per unit merupakan metode atau cara menskalakan suatu nilai parameter listrik terhadap nilai referensi (base) guna mempermudah kalkulasi atau proses perhitungan dalam menganalisa sebuah sistem jaringan listrik. Besaran-besaran sistem dalam satuan masing-masing, tegangan dalam volt – arus dalam ampere – impedansi dalam ohm, ditransformasikan ke dalam besaran tak berdimensi yaitu per-unit (disingkat pu). Satuan per unit untuk setiap harga didefinisikan sebagai nilai sebenarnya yang ada dari besaran tersebut dibagi dengan nilai dasar (nilai *base*) yang dipilih. Secara matematis dapat dituliskan pada persamaan (2.19) sebagai berikut:

$$\text{Sistem per unit (pu)} = \frac{\text{Nilai sebenarnya terhadap besaran yang ditinjau}}{\text{nilai dasar (base) besaran yang dipilih}} \dots\dots(2.19)$$

2.7 Rele Arus Lebih (OCR)

Rele arus lebih atau yang lebih dikenal dengan *OCR (Over Current Relay)* merupakan peralatan yang mensinyalir adanya arus lebih, baik yang disebabkan oleh adanya gangguan hubung singkat atau *overload* yang dapat merusak peralatan sistem tenaga yang berada dalam wilayah proteksinya.



Rele arus lebih ini digunakan hampir pada seluruh pola pengamanan sistem tenaga listrik, lebih lanjut rele ini dapat digunakan sebagai pengamanan utama ataupun pengamanan cadangan.

Pada transformator tenaga, *OCR* hanya berfungsi sebagai pengamanan cadangan (*back up protection*) untuk gangguan eksternal atau sebagai *back up* bagi *outgoing feeder*. *OCR* dapat dipasang pada sisi tegangan tinggi saja, atau pada sisi tegangan menengah saja, atau pada sisi tegangan tinggi dan tegangan menengah sekaligus. Selanjutnya *OCR* dapat menjatuhkan PMT pada sisi dimana rele terpasang atau dapat menjatuhkan PMT di kedua sisi transformator tenaga. *OCR* jenis *definite time* ataupun *inverse time* dapat dipakai untuk proteksi transformator terhadap arus lebih.

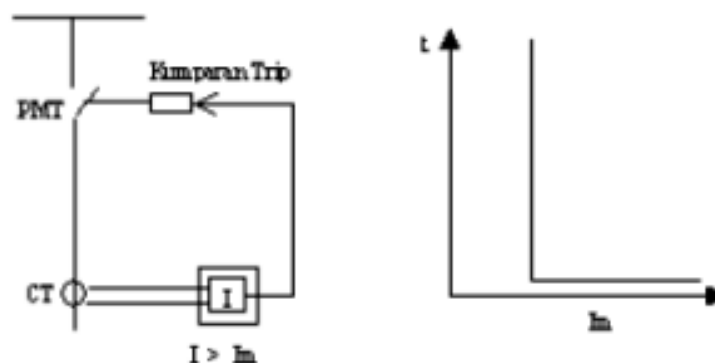
Sebagai pengamanan Transformator tenaga dan SUTT bertujuan untuk:

- Mencegah kerusakan Transformator tenaga atau SUTT dari gangguan hubung singkat.
- Membatasi luas daerah terganggu (pemadaman) sekecil mungkin.
- Hanya bekerja bila pengamanan utama Transformator tenaga atau SUTT tidak bekerja.

2.8 Karakteristik Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)

2.8.1 Rele Waktu Seketika (*Instantaneous Relay*)

Rele yang bekerja seketika (tanpa waktu tunda) ketika arus yang mengalir melebihi nilai *settingnya*, rele akan bekerja dalam waktu beberapa mili detik (10 – 20 ms). Dapat kita lihat pada gambar 2.9 dibawah ini.

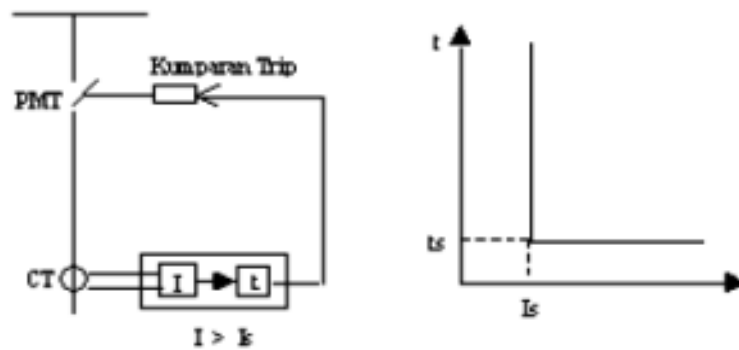


Gambar 2.9 Karakteristik Rele Waktu Seketika (*Instantaneous Relay*)

Rele ini jarang berdiri sendiri tetapi umumnya dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik yang lain.

2.8.2 Rele arus lebih waktu tertentu (*Definite Time Relay*)

Rele ini akan memberikan perintah pada PMT pada saat terjadi gangguan hubung singkat dan besarnya arus gangguan melampaui *settingnya* (I_s), dan jangka waktu kerja rele mulai *pick up* sampai kerja rele diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus yang mengerjakan rele, lihat gambar 2.10 dibawah ini.

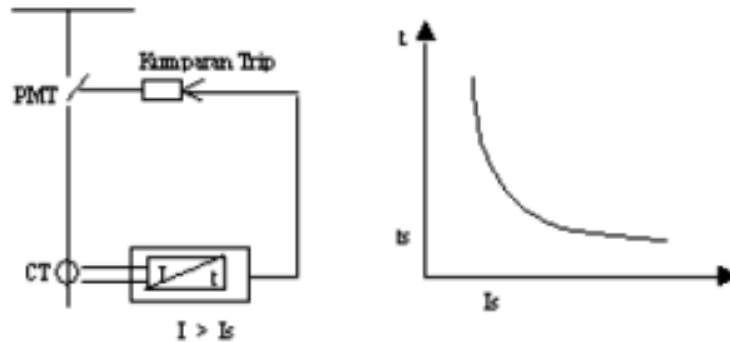


Gambar 2.10 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite Time Relay*)

2.8.3 Rele arus lebih waktu terbalik (*Inverse Time*)

Rele ini akan bekerja dengan waktu tunda yang tergantung dari besarnya arus secara terbalik (*inverse time*) seperti pada gambar 2.11, makin besar arus makin kecil waktu tundanya. Karakteristik ini bermacam-macam dan setiap pabrik dapat membuat karakteristik yang berbeda-beda, karakteristik waktunya dibedakan dalam empat kelompok :

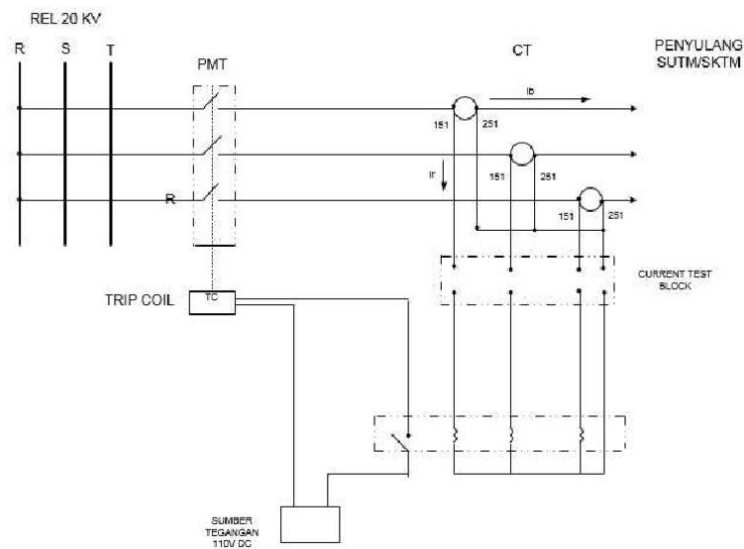
- a. *Standard inverse*
- b. *Very inverse*
- c. *Extreemely inverse*
- d. *Long Time Inverse*



Gambar 2.11 Karakteristik Relay Arus Lebih Waktu Terbalik
(*Inverse Relay*)

2.9 Prinsip Kerja OCR

Prinsip kerja *OCR* adalah berdasarkan adanya arus lebih yang dirasakan rele, baik disebabkan adanya gangguan hubung singkat atau *overload* (beban lebih) untuk kemudian memberikan perintah trip ke PMT sesuai dengan karakteristik waktunya.



Gambar 2.12 Rangkaian Pengawatan *OCR*



Dari gambar 2.12 rangkaian pengawatan OCR cara kerjanya dapat diuraikan sebagai berikut:

- Pada kondisi normal arus beban (I_b) mengalir pada SUTM / SKTM dan oleh trafo arus besaran arus ini di transformasikan ke besaran sekunder (I_r). Arus (I_r) mengalir pada kumparan rele tetapi karena arus ini masih lebih kecil dari pada suatu harga yang ditetapkan (*setting*), maka rele tidak bekerja.
- Bila terjadi gangguan hubung singkat, arus (I_b) akan naik dan menyebabkan arus (I_r) naik pula, apabila arus (I_r) naik melebihi suatu harga yang telah ditetapkan (diatas *setting*), maka rele akan bekerja dan memberikan perintah trip pada *tripping coil* untuk bekerja dan membuka PMT, sehingga SUTM / SKTM yang terganggu dipisahkan dari jaringan.

2.10 *Setting OCR*

2.10.1 Arus *setting OCR*

Penyetelan *OCR* pada sisi primer dan sisi sekunder transformator tenaga terlebih dahulu harus dihitung arus nominal transformator tenaga. Sedangkan penyetelan *OCR* pada sisi penyulang harus diketahui terlebih dahulu arus beban nya. Arus *setting* untuk *OCR* baik pada sisi primer maupun pada sisi sekunder transformator tenaga serta pada sisi penyulang dapat dihitung menggunakan persamaan (2.20) sebagai berikut:

$$I_{set}(\text{prim}) = 1,05 \times I_{\text{nominal trafo/beban}} \dots \dots \dots (2.20)$$

Nilai tersebut adalah nilai primer, Untuk mendapatkan nilai setelan sekunder yang dapat disetkan pada *OCR*, maka harus dihitung dengan menggunakan ratio trafo arus (*CT*) yang terpasang pada sisi primer maupun sisi sekunder transformator tenaga serta sisi penyulang, dengan menggunakan persamaan (2.21) berikut.

$$I_{set}(\text{sek}) = I_{set}(\text{pri}) \times \frac{1}{\text{Ratio CT}} \dots \dots \dots (2.21)$$

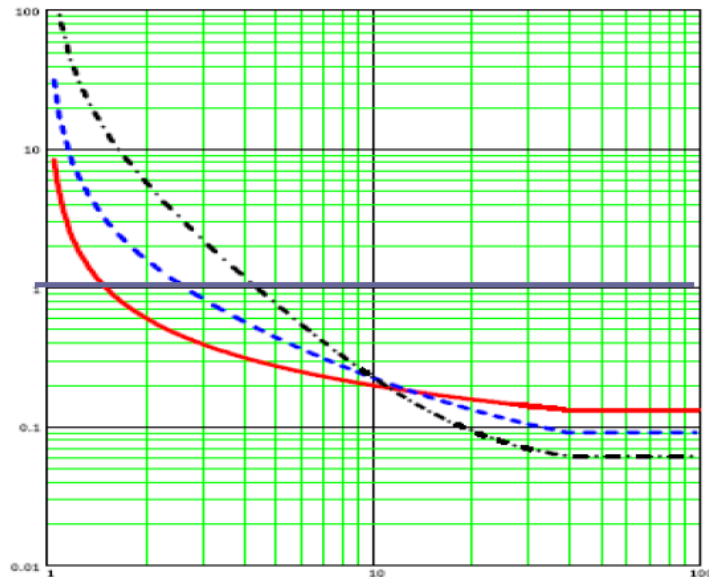


2.10.2 Setting waktu (*TMS*)

Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai setelan waktu (*TMS*). Rumus untuk menentukan nilai setelan waktu bermacam-macam sesuai dengan desain pabrik pembuat rele. Dibawah ini merupakan tabel 2.1 karakteristik operasi waktu jenis *relay inverse time*.¹¹

Tipe Relay	Setelan Waktu (<i>TMS</i>)
<i>Standard Inverse</i>	$t = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right)^{0,02} - 1}$
<i>Very Inverse</i>	$t = \frac{13,5 \times TMS}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right) - 1}$
<i>Extremely Inverse</i>	$t = \frac{80 \times TMS}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right)^2 - 1}$
<i>Long time earth fault</i>	$t = \frac{120 \times TMS}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right) - 1}$

Tabel 2.1 Karakteristik Operasi Waktu Jenis Relay Inverse Time







Gambar 2.13 Karakteristik Rele Arus Lebih

¹¹ Bonar Pandjaitan, "Praktik-praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik" (Yogyakarta:Penerbit Andi,2012). Hal: 72.



Pada gambar 2.13 diatas dijelaskan bahwa jenis *relay inverse time* memiliki karakteristik waktu kerja atau karakteristik kecuraman waktu dengan arus yang terdiri dari:

- *Definite* 
- *Normal / Standard Inverse* 
- *Very Inverse* 
- *Long time Inverse* 

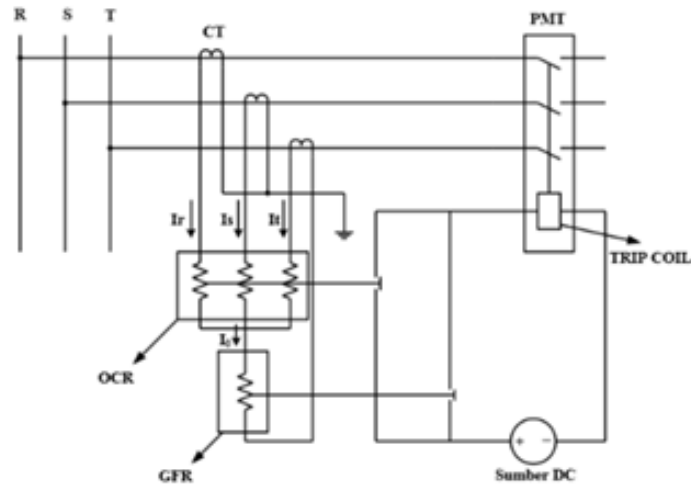
Untuk menentukan nilai *TMS* yang akan disetkan pada *OCR* sisi *incoming* transformator tenaga yaitu arus hubung singkat (I_f) 2 fasa di Bus 20 kV, sedangkan untuk sisi 150 kV transformator tenaga diambil arus hubung singkat (I_f) 2 fasa di sisi 150 kV.

2.11 Rele Hubung Tanah (*GFR*)

Rele hubung tanah yang lebih dikenal dengan *GFR* (*Ground Fault Relay*) pada dasarnya mempunyai prinsip kerja sama dengan rele arus lebih (*OCR*) namun memiliki perbedaan dalam kegunaannya. Bila rele *OCR* mendeteksi adanya hubungan singkat antara fasa, maka *GFR* mendeteksi adanya hubung singkat ke tanah.

2.12 Prinsip Kerja *GFR*

Pada prinsipnya kerja arus gangguan fasa maka digunakan *Ground Fault Relay (GFR)*. Dibawah ini merupakan gambar 2.14 rangkaian pengawatan *GFR* dimana prinsip kerja *Ground Fault Relay (GFR)* yaitu pada kondisi normal dengan beban seimbang arus–arus fasa I_r , I_s , dan I_t (I_b) sama besar sehingga kawat netral tidak timbul arus dan rele gangguan tanah tidak dialiri arus. Namun bila terjadi ketidak seimbangan arus atau terjadi gangguan hubung singkat fasa ke tanah maka akan timbul arus urutan nol pada kawat netral. Arus urutan nol ini akan mengakibatkan *Ground Fault Relay (GFR)* bekerja.



Gambar 2.14 Rangkaian pengawatan GFR

2.13 Setting GFR

2.13.1 Arus setting GFR

Penyetelan *GFR* pada sisi primer dan sisi sekunder transformator tenaga serta penyetelan *GFR* pada sisi penyulang harus diketahui terlebih dahulu arus hubung singkat 1 fasa ke tanah terkecil. Sehingga Arus *setting* untuk *relay GFR* baik pada sisi primer maupun pada sisi sekunder transformator tenaga serta pada sisi penyulang dapat dicari menggunakan persamaan (2.22) sebagai berikut:

$$I_{set} (\text{prim}) = 10\% \times I_{sc \ 1\phi \ \text{tanah terkecil}} \dots\dots\dots(2.22)$$

Nilai tersebut adalah nilai primer, Untuk mendapatkan nilai setelan sekunder yang dapat disetkan pada *GFR*, maka harus dihitung dengan menggunakan rasio trafo arus (*CT*) yang terpasang pada sisi primer maupun sisi sekunder transformator tenaga serta sisi penyulang, dengan menggunakan persamaan (2.23) berikut.

$$I_{set} (\text{sek}) = I_{set} (\text{pri}) \times \frac{1}{\text{Ratio } CT} \dots\dots\dots(2.23)$$



2.13.2 *Setting waktu (TMS)*

Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat, selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai setelan waktu kerja relay (*TMS*). Sama halnya dengan *OCR*, *GFR* menggunakan rumus penyetingan *TMS* yang sama dengan *OCR*. Tetapi waktu kerja rele yang diinginkannya berbeda. *GFR* cenderung lebih sensitif dari pada *OCR*.

Untuk menentukan nilai *TMS* yang akan disetkan pada *GFR* sisi incoming 20 kV dan sisi 150 kV transformator tenaga diambil arus hubung singkat 1 fasa ke tanah.

2.14 *Software Electrical Transient Analyzer Program (ETAP)*

ETAP (*Electric Transient Analysis Program*) adalah *software* yang digunakan untuk melakukan permodelan atau perencanaan dan gambaran tentang sistem kelistrikan yang ada di suatu industri atau wilayah. ETAP ini awalnya dibuat dan dikembangkan untuk meningkatkan kualitas keamanan fasilitas nuklir di Arnerika Serikat yang selanjutnya dikembangkan menjadi sistem monitor manajemen energi secara *real time*, simulasi, kontrol, dan optimasi sistem tenaga listrik, (Awaluddin, 2007).

ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (*one line diagram*) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain: *Load Flow* (aliran daya), *Short Circuit* (hubung singkat), *starting motor*, *trancient stability*, sistem harmonisasi, *protective device coordination*, dan *cable derating*.¹²

Software ETAP mempunyai banyak versi salah satunya seperti pada gambar 2.15 merupakan tampilan *software* ETAP versi 19.0.1 yang akan tampil dilayar desktop komputer/laptop ketika ingin menjalankan program tersebut.

¹² Anton Firmansyah, “Modul Pelatihan ETAP 2019” (Palembang: Polsri, 2019). Hal: 1.



Gambar 2.15 Software ETAP Versi 19.0.1

Proyek sistem tenaga listrik memiliki masing-masing elemen rangkaian yang dapat diedit langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan. Untuk kemudahan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis. ETAP *Power Station* memungkinkan anda untuk bekerja secara langsung dengan tampilan gambar *single line* diagram/diagram satu garis.

Software ini sangat bermanfaat untuk melakukan berbagai analisa. Analisa yang dapat dilakukan pada ETAP yaitu:

1. *Load Flow Analysis* (Analisa Aliran Daya)

Analisa aliran daya merupakan suatu analisa aliran daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dari suatu sistem pembangkit (sisi pengirim) melalui suatu saluran transmisi hingga ke beban (sisi penerima). Idealnya daya yang dikirim akan sama dengan daya yang diterima di sisi beban. Hal ini dikarenakan:

- a. Impedansi saluran transmisi
- b. Tipe bebanyang terhubung

2. *Short Circuit Analysis* (Analisa Hubung Singkat)

Hubung singkat (*short circuit*) adalah suatu peristiwa terjadi hubungan bertegangan atau penghantar tidak bertegangan secara langsung tidak



melalui media (resistor/beban) yang semestinya sehingga terjadi aliran arus yang tidak normal (sangat besar) yang biasa disebut arus hubung singkat. Adanya hubung singkat menghasilkan arus lebih yang umumnya jauh lebih besar dari pada arus pengenalan peralatan dan terjadi penurunan tegangan pada sistem tenaga listrik. Sehingga bila gangguan tidak segera dihilangkan dapat merusak peralatan pada sistem tersebut. Besarnya arus hubung singkat yang terjadi sangatlah dipengaruhi oleh jumlah pembangkit yang masuk pada sistem, letak gangguan dan jenis gangguan.

3. *Motor Acceleration Analysis*

Masalah pada saat *starting* motor induksi yang umum menjadi perhatian adalah motor-motor induksi 3 fasa yang memiliki kapasitas yang besar. Selama periode waktu *starting*, motor pada sistem akan dianggap sebagai sebuah impedansi kecil yang terhubung dengan sebuah bus. Motor akan mengambil arus yang besar dari sistem, sekitar 6 kali arus ratingnya, dan bisa mengakibatkan *drop voltage* pada sistem serta menyebabkan gangguan pada operasi beban yang lain. Hal ini dikarenakan pada motor induksi akan terjadi lonjakan arus pada saat *starting*. Lonjakan arus ini dikarenakan kondisi motor yang masih diam pada saat di *start*. Karena motor belum bergerak, kecepatan relatif motor terhadap medan magnet putar saat *start* akan maksimal sehingga tegangan yang diinduksikannya akan maksimal pula dan mengakibatkan nilai arus yang mengalir akan sangat besar.

4. *Protective Device Coordination*

Suatu sistem tenaga listrik dituntut keandalannya setinggi mungkin dengan meminimalisis kemungkinan terjadinya gangguan. Dari segi sirkuit listrik, gangguan tersebut umumnya berupa hubung singkat (*short circuit*) akibat dari kegagalan isolasi. Hubung singkat menyebabkan arus yang mengalir besarnya berlipat kali arus normal dan mungkin pula disertai timbulnya busur api listrik (*arcing*). Keduanya akan merusak peralatan listrik yang bersangkutan apabila terlambat dihentikan. Arus



hubung singkat yang besar juga membahayakan setiap peralatan yang dilaluinya.

Adalah menjadi tugas rele untuk mengetahui (mendeteksi) adanya gangguan tersebut lalu memerintahkan peralatan pemutus (*circuit breaker*) untuk mengisolasi peralatan yang mengalami gangguan secara cepat. Pada percobaan ini akan disimulasikan koordinasi proteksi dengan menggunakan rele arus lebih dan rele gangguan tanah dari sistem distribusi yang sederhana.¹³

5. Dan masih banyak kegunaan/manfaat dan analisa yang dapat dilakukan menggunakan program ETAP 19.0.1 ini.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan ETAP *PowerStation* adalah :

- **One Line Diagram**, menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.
- **Library**, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang detail/lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.
- **Standar yang dipakai**, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi sistem dan metode – metode yang dipakai.
- **Study Case**, berisikan parameter–parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.¹⁴

2.14.1 Elemen-elemen Sistem Tenaga Listrik Pada ETAP¹⁵

Dalam menganalisa tenaga listrik, suatu diagram saluran tunggal (*single line diagram*) merupakan notasi yang disederhanakan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa. Sebagai ganti dari representasi saluran tiga fasa

¹³ Anton Firmansyah, “*Electrical Transient Analysis Program ETAP POWER STATION*”(Palembang:Polstri,2019).Hal:14.

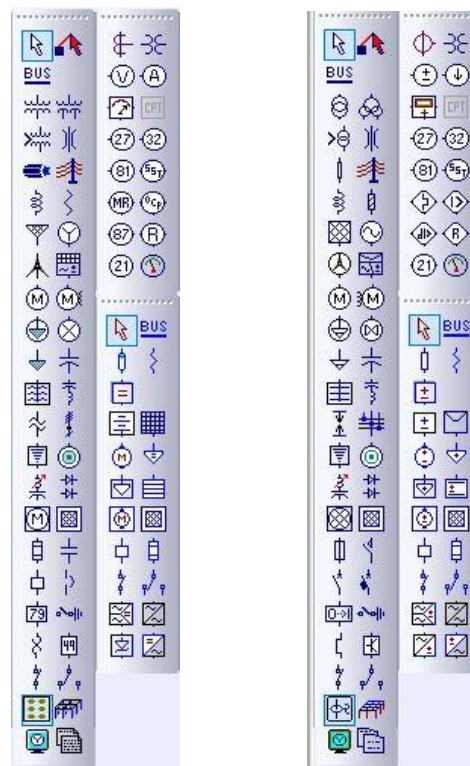
¹⁴ Anton Firmansyah, “*Modul Pelatihan ETAP 2019*”(Palembang:Polstri,2019).Hal:1-2.

¹⁵ Anton Firmansyah, “*Modul Pelatihan ETAP 2019*”(Palembang:Polstri,2019).Hal:99-100.



yang terpisah, digunakanlah sebuah konduktor. Hal ini memudahkan dalam pembacaan diagram maupun dalam analisa rangkaian. Elemen elektrik seperti misalnya pemutus rangkaian, transformator, kapasitor, bus bar maupun konduktor lain dapat ditunjukkan dengan menggunakan simbol yang telah distandardisasi untuk diagram saluran tunggal. Elemen pada diagram tidak mewakili ukuran fisik atau lokasi dari peralatan listrik, tetapi merupakan konvensi umum untuk mengatur diagram dengan urutan kiri-ke-kanan yang sama, atas-ke-bawah, sebagai saklar atau peralatan lainnya diwakili.

ETAP memiliki 2 macam standar yang digunakan untuk melakukan analisa kelistrikan, ANSI dan IEC. Pada dasarnya perbedaan yang terjadi di antara kedua standar tersebut adalah frekuensi yang digunakan, yang berakibat pada perbedaan spesifikasi peralatan yang sesuai dengan frekuensi tersebut. Simbol elemen listrik yang digunakan dalam analisa dengan menggunakan ETAP pun berbeda tampak dilihat pada gambar 2.16 secara urut yang merupakan standar ANSI dan standar IEC



Gambar 2.16 Elemen-elemen yang ada di ETAP 19.0.1



Beberapa elemen yang digunakan dalam suatu diagram saluran tunggal adalah :

a. *Power Grid*

Power Grid Adalah suplai yang diambil oleh sistem sebagai sumber tegangan dalam hal ini adalah PLN. Simbolnya pada program ETAP seperti pada gambar 2.17 dibawah ini.



Gambar 2.17 Simbol *Power Grid* pada ETAP 19.0.1

b. Transformator

Transformator berfungsi untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan dengan rasio tertentu sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga listrik. Simbolnya pada program ETAP seperti pada gambar 2.18 dibawah ini.



Gambar 2.18 Simbol Transformator pada ETAP 19.0.1

c. Pemutus Rangkaian

Pemutus Rangkaian merupakan sebuah saklar otomatis yang dirancang untuk melindungi sebuah rangkaian listrik dari kerusakan yang disebabkan oleh kelebihan beban atau hubungan pendek. Simbolnya pada program ETAP seperti pada gambar 2.19 dibawah ini.



Gambar 2.19 Simbol pemutus rangkaian pada ETAP 19.0.1

d. Beban

Pada *Software* ETAP terdapat dua macam beban, yaitu beban statis dan bebandinamis. Simbolnya pada program ETAP seperti pada gambar 2.20 dibawah ini.



Gambar 2.20 Simbol beban statis pada ETAP 19.0.1

e. Rele Proteksi OCR dan GFR

Rele proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidak normalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik dan secara otomatis memberi perintah untuk membuka pemutus tenaga (PMT) untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu dan bel. Simbolnya pada program ETAP seperti pada gambar 2.21 dibawah ini.



Gambar 2.21 Simbol OCR dan GFR pada ETAP 19.0.1

Gambar 2.22 dari kiri ke kanan menunjukkan *toolbar Star-Protection & Coordination*, yaitu:



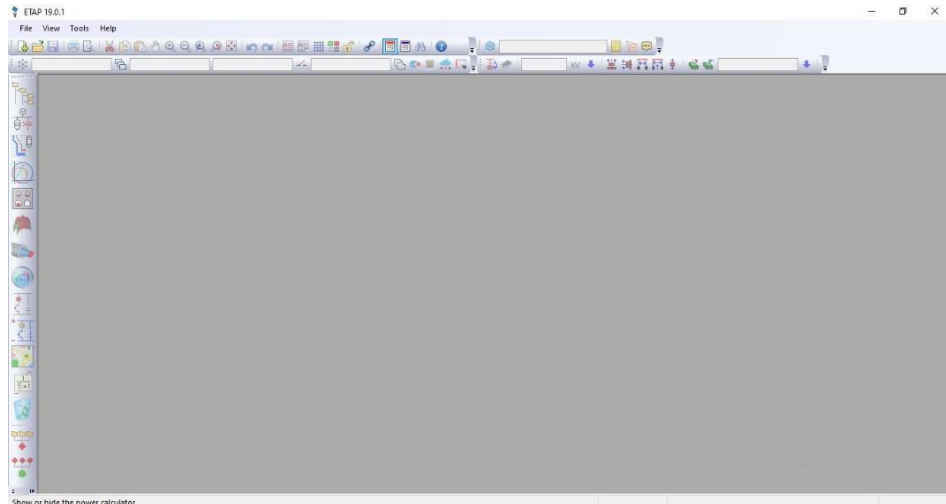
Gambar 2.22 Toolbar *Star-Protection & Coordination* pada ETAP 19.0.1

1. *Star-Protection & Coordination* adalah *icon toolbar* proteksi dan koordinasi yang digunakan untuk simulasi koordinasi *relay* pada sistem proteksi.
2. *Fault Insertion (PD Sequence-of-operation)* adalah *icon* untuk membuat gangguan atau simulasi dalam keadaan abnormal.
3. *Plot Options* adalah *icon* untuk menampilkan hasil koordinasi proteksi.
4. *Create Star View* adalah *icon* untuk menampilkan grafik koordinasi sistem proteksi.
5. *Report Manager* adalah *icon* untuk menampilkan hasil koordinasi dalam bentuk report yang dapat dicetak.

2.14.2 Memulai *Software* ETAP 19.0.1

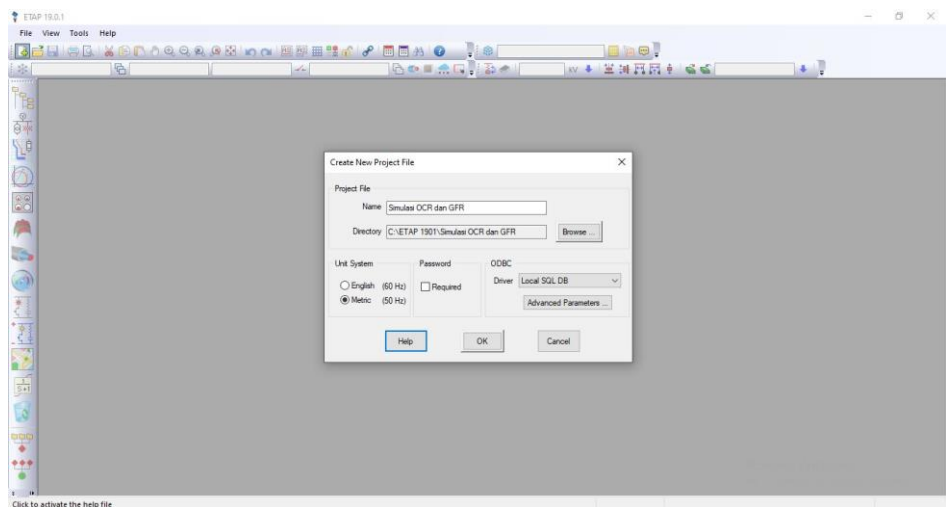
Untuk memulai simulasi dengan menggunakan *software* ETAP 19.0.1 dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut:

1. Pilih program ETAP 19.0.1 yang terdapat pada tampilan desktop klik “Run” maka akan tampil layar tampilan seperti gambar 2.23 dibawah ini.



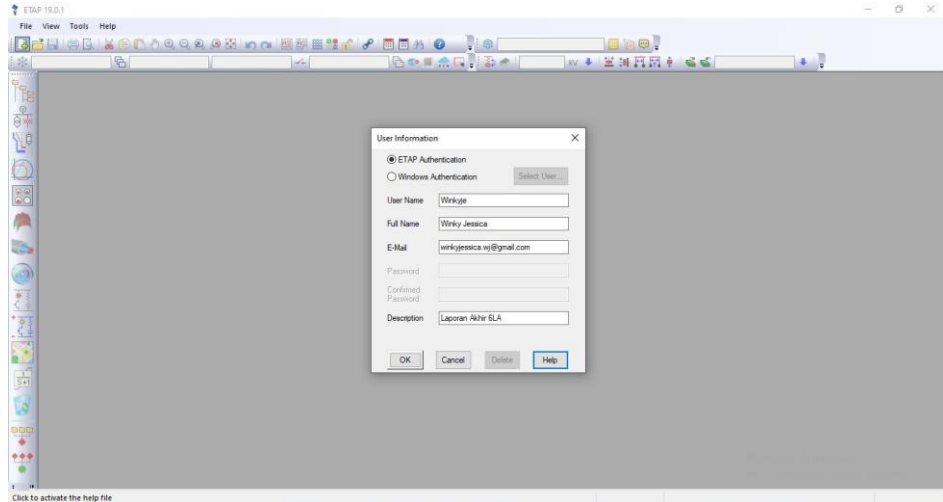
Gambar 2.23 Tampilan awal pada program ETAP 19.0.1

2. Kemudian klik *File – New Project*, maka akan tampil layar tampilan seperti gambar 2.24 berilah nama *project* sesuai dengan *project* yang akan disimulasikan. Pilih *Unit system Metric* untuk *standard IEC* atau *English* untuk *standard ANSI*.



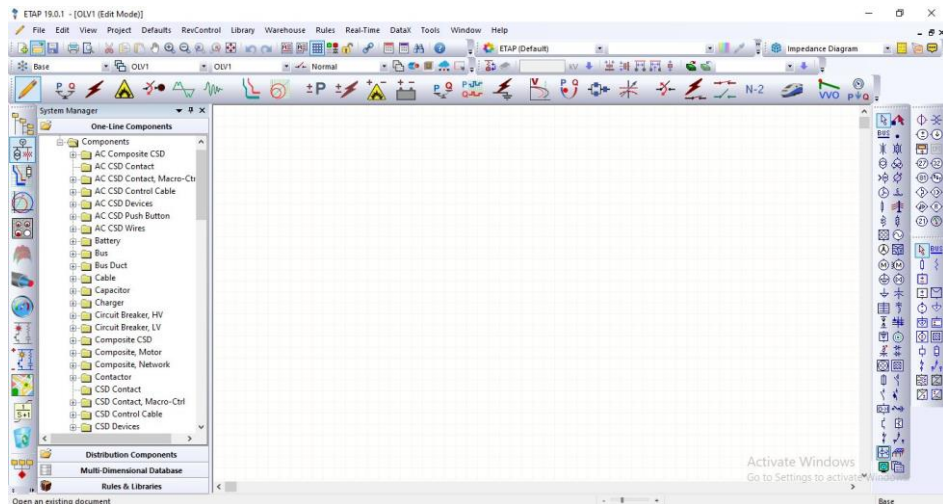
Gambar 2.24 Tampilan perintah untuk memulai program ETAP 19.0.1

- Setelah Klik “OK” maka akan muncul tampilan *User Information* seperti pada gambar 2.25 untuk memberikan keterangan pribadi pengguna.



Gambar 2.25 Tampilan *User Information* pada program ETAP 19.0.1

- Selanjutnya akan muncul tampilan seperti pada gambar 2.26 dibawah ini dan *project* siap untuk didesain dan disimulasikan.



Gambar 2.26 Tampilan Menu Utama pada program ETAP 19.0.1