

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berikut ini adalah beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk menjadikan sebagai bahan penulisan skripsi antara berikut:

Rezky Fajrian (2015) melakukan penelitian mengenai Analisa Koordinasi Proteksi *Overcurrent Relay* Pada Jaringan Distribusi SUTM 20 kV dengan Menggunakan Software ETAP. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa prinsip kerja dari relay arus lebih tersebut akan bekerja jika relay relay arus tersebut mendeteksi adanya besar arus yang melebihi setting arus dari relay tersebut, oleh karena itu relay tersebut akan bekerja dengan memberikan perintah ke pemutus tenaga (PMT) untuk melakukan trip.

Amien Harist Hardiansyah (2016) melakukan penelitian mengenai Analisis Koordinasi Proteksi Pada Jaringan Distribusi Radial. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bawah setelah melakukan simulasi dari hasil perhitungan manual pada *Over Current Relay* maka hasilnya menunjukkan koordinasi yang baik, dimana apabila diberikan suatu gangguan pada jaringan, relay tersebut yang bekerja terlebih dahulu adalah relay jaringan dan langsung memberikan perintah kepada pemutus tenaga (PMT) sehingga pemutus tenaga (PMT) tersebut akan melakukan trip kemudian disusul oleh relay *outgoing* dan relay *incoming* untuk *memback-up*.

Yugi Supanggih (2017) melakukan penelitian mengenai Analisis Koordinasi Proteksi Rele OCR Pada Sistem Kelistrikan Plant 8 PT. Indocement Tunggal Prakarsa, Tbk. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pada plant 8 mempunyai 2 penyulang yang masing – masing penyulang menggunakan pengaman proteksi relay arus lebih atau OCR (*Over Current Relay*) yang berfungsi untuk mengamankan beberapa penyulang yang sebagian besar dari bebannya adalah motor induksi. Dari hasil simulasi yang dilakukan oleh Yugi,

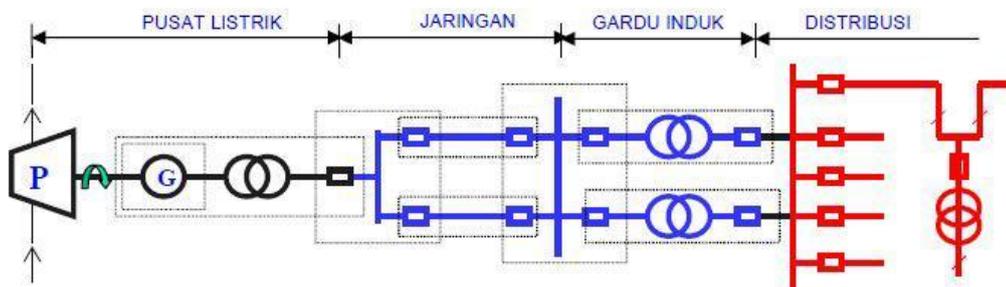
menunjukkan bahwa koordinasi proteksi yang baik adalah relay yang terletak paling dekat dengan gangguan maka relay akan bekerja terlebih dahulu dan relay *incoming*nya menjadi *back-up* atau cadangan.

Aji Setiyawan (2017) melakukan penelitian mengenai Analisis Koordinasi Proteksi Pada PT. PLN (PERSERO) Gardu Induk Wonosobo Menggunakan Software Aplikasi ETAP. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pada arus hubung singkat, panjangnya jarak akan berpengaruh terhadap nilai arus hubung singkat tersebut. Jadi apabila semakin panjang jarak maka akan semakin kecil pula nilai arus hubung singkat yang terjadi pada titik tersebut dan juga sebaliknya.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik meliputi dari pusat pembangkit, jaringan transmisi yang didalamnya terdapat gardu induk kemudian sistem distribusi, kemudian sampai ke konsumen atau beban.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Pada pusat pembangkit listrik dibangkitkan oleh generator. Sehingga dibutuhkan transformator *step up* untuk menaikkan tegangan yang dibangkitkan sebelum disalurkan sampai ke konsumen atau beban. Oleh karena itu, didalam menyalurkannya tegangan akan mengalami rugi – rugi yang terjadi akibat jauhnya jarak antara pusat pembangkit ke konsumen atau beban. Rugi – rugi terjadi karena nilai R yang besar sehingga nilai V akan berkurang selama perjalanannya.

Maka dari itu dibutuhkan sistem jaringan transmisi yang mempunyai tujuan untuk menjaga kestabilan tegangan yang sudah dibangkitkan oleh generator. Sistem jaringan transmisi merupakan sebuah jaringan listrik yang digunakan sebagai penyalur dan sebagai nadi dari sistem tenaga listrik. Di dalam sistem jaringan transmisi terdapat gardu induk yang mempunyai peran penting dalam penyaluran tenaga listrik. Gardu induk merupakan penghubung dengan jaringan distribusi maupun dengan gardu induk yang lain. Dan di jaringan distribusi jaringan listrik disalurkan ke beban atau pelanggan.

2.2.2 Sistem Distribusi

Sistem distribusi tenaga listrik adalah suatu komponen atau bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini mempunyai fungsi yaitu untuk mengirimkan atau menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik pembangkit atau generator sampai ke konsumen. Sistem distribusi berada pada bagian yang langsung berhubungan dengan konsumen atau pelanggan, karena catu daya pada beban atau dengan kata lain dapat disebut dengan pelanggan yang dilayani langsung melalui jaringan distribusi.

Pada pembangkitan tenaga listrik generator dapat menghasilkan sumber tegangan listrik dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV kemudian disalurkan ke gardu induk dengan tujuan menaikkan tegangannya dengan transformator *step up* tegangan menjadi 70 kV, 150 kV, 220 kV, atau 500 kV. Dengan menaikkan tegangannya agar rugi – rugi daya dapat berkurang ketika listrik disalurkan, kemudian setelah tegangan dinaikan menggunakan transformator lalu disalurkan melalui saluran transmisi. Dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2 R$). Dengan daya yang nilainya sama, jika nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula.

Apabila tegangan listrik sudah menyalurkan ke saluran transmisi, maka tegangan listrik diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan menggunakan

transformator *step down* 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 transformator distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 Volt. Selanjutnya tegangan tersebut disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke para pelanggan atau konsumen – konsumen. Dengan ini dapat dijelaskan bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Di sistem saluran jaringan jarak jauh, digunakan tegangan setinggi mungkin, dengan menggunakan transformator *step up*, tetapi dengan nilai tegangan yang sangat tinggi akan menimbulkan beberapa konsekuensi atau kelemahan yang terjadi antara lain: harga dari perlengkapan yang digunakan mahal serta bahaya bagi lingkungan sekitar, selain menjadi tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban. Maka, pada daerah – daerah pusat beban tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan transformator *step down*. Akibatnya, jika ditinjau dari nilai tegangannya, maka mulai dari titik sumber hingga di titik beban, terdapat bagian – bagian saluran yang memiliki nilai tegangan yang berbeda – beda.

2.2.3 Gardu Induk

Gardu induk merupakan sub sistem dari sistem penyaluran (transmisi) tenaga listrik, atau merupakan satu kesatuan dari sistem penyaluran (transmisi). Berarti gardu induk merupakan sub – sub sistem dari sistem tenaga listrik. Sebagai sub sistem dari sistem penyulang (transmisi) gardu induk mempunyai peran penting dalam pengoperasian, tidak dapat dipisahkan dari sistem penyaluran (transmisi) secara keseluruhan.

Gardu induk merupakan suatu instalasi yang terdiri dari sekumpulan peralatan listrik yang disusun menurut pola tertentu dengan pertimbangan

teknis, ekonomis serta keindahan. Fungsi dari gardu induk adalah sebagai berikut :

- a. Mentransformasikan dari tenaga listrik tegangan yang tinggi ke tegangan listrik yang lainnya atau tegangan menengah serta tegangan rendah.
- b. Untuk pengukuran, tempat pengawasan operasi serta pengamanan dari sistem tenaga listrik.
- c. Pengaturan daya ke gardu induk yang lainnya melalui tegangan tinggi dan gardu distribusi melalui *feeder* tegangan menengah.
- d. Untuk sarana telekomunikasi (pada umumnya untuk internal PLN), yang kita kenal dengan istilah SCADA

Pada dasarnya gardu induk terdiri dari saluran masuk dan didalam gardu induk dilengkapi dengan peralatan listrik yang meliputi transformator daya, peralatan pengukuran, peralatan penghubung dan lainnya supaya saling menunjang satu sama lain.

2.2.3.1 Klasifikasi Gardu Induk

Gardu induk dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam, sebagai berikut:

2.2.3.1.1 Gardu Induk Berdasarkan Tegangan

- a. Gardu induk transmisi

Merupakan gardu induk yang mendapat daya dari saluran transmisi kemudian menyalurkannya ke daerah beban (industri, kota, dan sebagainya). Gardu induk transmisi yang ada di PLN adalah tegangan tinggi 500 kV, 150 kV, dan 70 kV.

- b. Gardu distribusi

Merupakan gardu induk yang menerima tenaga dari gardu induk transmisi dengan menurunkan tegangan listriknya melalui transformator tenaga menjadi tegangan menengah (20 kV, 12 kV, atau 6 kV) kemudian tegangan tersebut diturunkan kembali menjadi

tegangan rendah (127/220 V) atau (220/380 V) sesuai dengan kebutuhan untuk disalurkan ke beban atau konsumen.

2.2.3.1.2 Gardu Induk Berdasarkan Letak Pemasangan

Berdasarkan letak pemasangan gardu induk, maka gardu induk dapat dikelompokkan menjadi beberapa macam, sebagai berikut:

a. Gardu Induk Pasangan Luar

Merupakan gardu induk yang sebagian peralatan atau komponennya ditempatkan di luar gedung atau tempat yang terbuka, tetapi kecuali komponen kontrol, sistem proteksi atau pengaman, dan sistem kendali serta komponen – komponen yang lainnya yang ada di dalam gedung. Gardu induk semacam ini biasa disebut dengan gardu induk konvensional. Sebagian besar gardu induk di Indonesia menggunakan gardu induk konvensional.

b. Gardu Induk Pasangan Dalam

Merupakan gardu induk yang hampir semua peralatan – peralatan listriknya (*switchgear*, busbar, isolator, komponen kontrol, komponen kendali, kubikel, dan lain – lain) dipasang di dalam gedung, kecuali transformator daya, karena transformator daya pada umumnya dipasang di luar gedung. Gardu induk semacam ini dapat disebut *gas insulated substation* (GIS). GIS merupakan bentuk dari pengembangan gardu induk, yang pada umumnya dibangun di daerah perkotaan atau padat pemukiman yang sulit untuk mendapatkan lahan.

c. Gardu Induk Kombinasi Pasangan Dalam dan Pasangan Luar

Merupakan sebagian dari peralatan tegangan tingginya terpasang di dalam gedung dan sebagian peralatan yang lainnya dipasang diluar gedung dengan mempertimbangkan situasi dan kondisi lingkungan. Karena konstruksi yang berimbang antara pasangan dalam dengan pasangan luar maka jenis dari gardu induk ini juga dapat disebut gardu induk semi pasangan dalam.

d. Gardu Induk Pasangan Bawah Tanah

Merupakan hampir semua peralatan listriknya terpasang dalam bangunan bawah tanah. Hanya alat pendinginan saja yang biasanya berada diatas tanah dan peralatan – peralatan yang tidak memungkinkan untuk ditempatkan di bangunan bawah tanah. Biasanya gardu induk ini di bangun di bagian kota yang sangat padat atau ramai, di jalan – jalan pertokoan, dan di jalan – jalan dengan gedung yang bertingkat tinggi. Kebanyakan gardu induk ini dibangun dibawah jalan raya.

2.2.3.1.3 Gardu Induk Berdasarkan Fungsinya

a. Gardu Induk Penaik Tegangan

Adalah gardu induk yang berfungsi untuk menaikkan tegangan tenaga listrik, yaitu tegangan dari pembangkit (generator) dinaikkan menjadi tegangan sistem. Gardu induk ini berada di lokasi pembangkit tenaga listrik. Karena nilai dari *output voltage* yang dihasilkan oleh pembangkit listrik ini terbilang kecil dan harus disalurkan pada jaringan jarak jauh, maka tegangannya dinaikkan menjadi tegangan ekstra tinggi atau tegangan tinggi.

b. Gardu Induk Penurun Tegangan

Adalah gardu induk yang berfungsi untuk menurunkan tegangan tenaga listrik dengan kata lain dari tegangan tinggi menjadi tegangan yang lebih rendah dan menengah atau tegangan distribusi. Gardu induk terletak di daerah pusat – pusat beban, karena di gardu induk ini menyalurkan ke pelanggan.

c. Gardu Induk Pengatur Tegangan

Adalah gardu induk yang terletak jauh dari pembangkit tenaga listrik. Karena listrik yang disalurkan sangat jauh, maka dari itu terjadi tegangan jatuh (*voltage drop*) di jaringan transmisi yang cukup besar. Kemudian diperlukan peralatan untuk menaikkan

tegangan, seperti *bank capacitor*, sehingga tegangan kembali dalam keadaan normal.

d. Gardu Induk Pengatur Beban

Adalah gardu induk yang berfungsi untuk mengatur beban. Pada gardu induk ini terpasang beban motor, pada waktu tertentu menjadi pembangkit tenaga listrik, karena motor berubah menjadi generator dan suatu saat generator menjadi motor atau menjadi beban, dengan generator berubah menjadi motor yang memompakan air kembali ke kolam utama.

e. Gardu Induk Distribusi

Adalah gardu induk yang menyalurkan tenaga listrik dari tegangan sistem ke tegangan distribusi. Gardu induk ini terletak di dekat pusat – pusat beban. Karena listrik disalurkan ke para pelanggan.

2.2.3.2 Peralatan Listrik pada Gardu Induk

Agar gardu induk dapat menjalankan fungsi dan tujuannya dengan baik, maka gardu dilengkapi dengan peralatan listrik. Peralatan – peralatan listrik yang ada pada gardu induk tersebut adalah sebagai berikut :

a. Transformator Daya

Adalah peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih belitan, secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076 -1 tahun 2011). Transformator menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum ampere dan induksi Faraday, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet atau fluks. Medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi pengubah tegangan listrik bolak – balik agar diperoleh tegangan yang diinginkan (lebih besar atau lebih kecil). Transformator untuk menaikkan tegangan disebut transformator *step up*, sedangkan transformator penurun tegangan disebut transformator *step down*.

Transformator adalah komponen utama dalam kelistrikan yang berfungsi untuk mentransformasikan daya listrik dengan merubah besaran tegangannya tetapi frekuensinya tidak ada perubahan (tetap). Transformator juga mempunyai fungsi lainnya yaitu untuk menaikkan atau menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan tinggi yang lainnya atau ke tegangan menengah atau ke tegangan rendah dan sebaliknya.

Pada transformator daya terdapat transformator pentanahan yang berfungsi untuk mendapatkan titik netral dari transformator daya, peralatan ini disebut juga sebagai *Neutral Current Transformer (NCT)*, dan peralatan lainnya terdapat NGR yaitu *Neutral Grounding Resistance* yang merupakan komponen yang dipasang antara titik netral transformator dengan pentanahan. NGR juga berfungsi untuk memperkecil arus gangguan yang terjadi.

b. Transformator Tegangan

Transformator tegangan merupakan peralatan pada sistem tenaga listrik yang berupa transformator satu fasa *step down* yang mentransformasi tegangan pada jaringan tegangan tinggi ke suatu sistem tegangan rendah yang layak untuk kebutuhan perlengkapan indikator, alat ukur, relay, dan alat sinkronisasi. Transformator tegangan dibagi menjadi dua jenis yaitu transformator tegangan magnetik (*Magnetic Voltage Transformer / VT*) dan transformator tegangan kapasitif (*Capacitive Voltage Transformer / CVT*). Transformator tegangan magnetik disebut juga transformator tegangan induktif yang terdiri dari belitan primer dan sekunder pada inti besi yang prinsip kerjanya belitan primer menginduksikan tegangan kebelitan sekundernya. Sedangkan jenis yang lainnya yaitu transformator tegangan kapasitif adalah peralatan pengukuran yang dirangkai dengan pembagi tegangan kapasitif yang mentransformasi tegangan pada jaringan tegangan tinggi ke suatu sistem tegangan rendah yang prinsip kerja dari transformator kapasitif adalah menurunkan besaran tegangan primer menjadi besaran

tegangan sekunder melalui kapasitor yang berfungsi sebagai tegangan pembagi tegangan dan transformator tegangan sebagai penurun tegangan. Sekarang CVT banyak digunakan karena lebih ekonomis membuat pembagi tegangan kapasitif daripada membuat transformator dengan belitan tegangan tinggi.

c. Transformator Arus

Transformator arus adalah peralatan pengukuran pada sistem tenaga listrik yang berupa transformator yang digunakan untuk pengukuran arus yang besarnya hingga ratusan ampere dan arus yang mengalir pada jaringan tegangan tinggi atau tegangan menengah. Di samping untuk pengukuran arus, transformator arus juga digunakan untuk pengukuran daya dan energi, pengukuran jarak jauh, dan relay pengaman

d. Pemutus Tenaga

Berdasarkan IEV (*International Electrotechnical Vocabulary*) disebutkan bahwa *circuit breaker* (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan sakelar atau *switching* mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) , dan memutuskan arus beban dalam spesifik kondisi abnormal atau terjadi gangguan seperti kondisi *short circuit* atau hubung singkat. Fungsi utama dari pemutus tenaga adalah sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatan lain. Pemutus tenaga dapat dibagi atas beberapa jenis, antara lain berdasarkan tegangan rating atau nominal, jumlah mekanik penggerak, media isolasi, dan proses pemadam busur api jenis gas SF₆.

e. *Disconnecting Switch*

Disconnecting Switch dapat juga disebut sebagai pemisah, pada dasarnya pemisah memiliki fungsi yang hampir sama dengan pemutus tenaga (PMT), namun perbedaannya adalah pemisah tidak dapat memutus jaringan apabila terjadi arus gangguan sedangkan pemutus tenaga dapat memutus suatu jaringan apabila terjadi arus gangguan.

Dapat dijelaskan bahwa *disconnecting switch* (DS) adalah peralatan pemisah, yang berfungsi untuk memisahkan rangkaian listrik dalam keadaan tidak berbeban. Karena pemisah hanya bisa dioperasikan ketika kondisi tidak berbeban, maka yang harus dioperasikan terlebih dahulu yaitu pemutus tenaga. Setelah rangkaian diputus oleh pemutus tenaga kemudian pemisah baru dapat dioperasikan.

f. *Lightning Arrester*

Lightning Arrester (LA) berfungsi untuk melindungi (pengaman) peralatan listrik yang terdapat di gardu dari tegangan lebih akibat terjadinya sambaran petir (*lightning surge*) pada kawat transmisi, maupun disebabkan oleh surya hubung (*switching surge*). Dalam keadaan normal (tidak terjadi gangguan) *Lightning Arrester* bersifat isolatif atau tidak bisa menyalurkan arus listrik. Dan sebaliknya apabila terjadi gangguan, *Lightning Arrester* akan bersifat konduktif atau menyalurkan arus listrik yang lebih ke bumi atau tanah (*ground*).

g. Rel Busbar

Rel busbar berfungsi sebagai titik pertemuan atau hubungan antara transformator daya, SUTT, SKTT serta komponen – komponen listrik lainnya yang terdapat di *switch yard*. Komponen Rel Busbar antara lain : Konduktor (AAAC, HAL, THAL, BC, HDCC) dan yang lainnya *Insulator string* dan *fitting* (*insulator, tension clamp, suspension clamp, socket eye, anchor sagkle, spacer*)

h. *Control Panel*

Control Panel berfungsi untuk mengetahui atau mengontrol kondisi yang terjadi di gardu induk dan merupakan pusat pengendali lokal gardu induk. Di dalam *control panel* berisi sakelar, indikator – indikator, meter – meter, tombol – tombol komando operasional pemutus tenaga (PMT), pemisah (PMS), dan alat ukur besaran listrik, serta *anunciator* yang berada dalam satu ruangan.

2.2.3.3 Sistem Proteksi

Sistem proteksi merupakan suatu sistem kelistrikan yang memiliki fungsi sebagai pengisolasi, pemisah dan pemutus tenaga apabila terdapat suatu gangguan dari suatu keadaan abnormal. Sistem Proteksi juga biasa disebut sebagai sistem pengaman. Pengaman dapat dibagi menjadi 2 bagian yaitu:

a. Pengaman utama

Merupakan pengaman yang sangat berperan penting dalam menjaga instrumen yang akan dilindungi, dan pengaman utama ini merupakan sistem proteksi utama, maka prinsip kerja dari sistem pengaman utama harus cepat sehingga jika terjadi suatu gangguan dalam sistem, komponen yang mendapat gangguan cepat diputus dan tidak mengalami kerusakan secara luas.

b. Pengaman cadangan

Adalah pengaman yang disiapkan setelah pengaman utama, pengaman ini bekerja apabila terjadi kegagalan dalam sistem pengaman utama. Pengaman cadangan ini dapat dibagi menjadi 2 bagian yaitu : *Local back up* (pengaman cadangan terletak di satu lokasi yang sama dengan pengaman utama) dan *Remote back up* (pengaman cadangan terletak di tempat yang berbeda dari pengaman utama).

Sistem Proteksi pada suatu jaringan kelistrikan berperan sangat penting, karena apabila terjadinya keadaan abnormal atau kondisi terjadi gangguan yang mendadak pada sistem jaringan, gangguan pada jaringan sistem kelistrikan dapat terjadi di pembangkit, baik itu pada jaringan transmisi maupun jaringan distribusi dapat diamankan. Saat gangguan itu terjadi, maka peran sistem proteksi harus dapat mengidentifikasi gangguan yang terjadi tersebut dan menjadi pemutus bagian yang mendapat gangguan dengan secepat mungkin. Sistem proteksi bertujuan untuk mengidentifikasi gangguan dan memisahkan bagian yang terganggu dari bagian lain yang kondisi masih baik dalam beroperasi

sekaligus mengamankan bagian yang masih baik tersebut dari kerusakan atau kerugian yang lebih besar. Sistem proteksi terdiri dari relai proteksi, transformator arus (CT), transformator tegangan (PT/CVT), pemutus tenaga (PMT), catu daya AC/DC yang terintegrasi dalam suatu rangkaian. Untuk efektifitas dan efisiensi, maka setiap peralatan proteksi yang dipasang harus disesuaikan dengan kebutuhan dan ancaman. Ketahanan peralatan yang dilindungi sehingga peralatan proteksi digunakan sebagai jaminan pengaman.

Didalam transformator tenaga terpasang proteksi. Proteksi yang digunakan pada transformator daya pada umumnya menggunakan relay *Diferensial* dan relay *Restricted Earth Fault* (REF) sebagai proteksi utama. Sedangkan proteksi cadangan di transformator tenaga menggunakan relay arus lebih atau *Over Current Relay* (OCR) dan relay gangguan ke tanah *Ground Fault Relay* (GFR). Sedangkan *Stand by Earth Fault* (SBEF) pada umumnya hanya dipergunakan pada transformator dengan belitan Y yang ditanahkan dengan resistor, dan fungsinya lebih mengamankan *Neutral Grounding Resistance* (NGR). Proteksi internal terdapat di dalam transformator yang terdiri dari : Relay Bucholtz yang berfungsi sebagai proteksi utama, Relay Tekanan Lebih atau *Suden Pressure*, Relay Jansen, dan Relay Thermal yang berfungsi sebagai proteksi *back up*. Sedangkan pada proteksi eksternal terdapat di ruang panel yaitu terdiri dari : Relay Diferensial yang berfungsi sebagai proteksi utama, Relay *Restricted Earth Fault* (REF), dan Relay Arus Lebih atau *Over Current Relay* (OCR) serta Relay Gangguan ke Tanah atau *Ground Fault Relay* (GFR) yang berfungsi sebagai proteksi *back up*.

Terdapat beberapa cara yang dapat dan yang sering digunakan dalam mendefinisikan perangkat proteksi sistem tenaga listrik yang secara umum adalah sebagai berikut :

- a. Sistem proteksi adalah susunan perangkat proteksi secara lengkap yang terdiri dari perangkat utama dan perangkat – perangkat lain yang dibutuhkan untuk melakukan fungsi tertentu berdasarkan prinsip –

prinsip proteksi sesuai dengan definisi yang terdapat pada standar IEC 6255-20.

- b. Perangkat proteksi adalah kumpulan atau koleksi perangkat proteksi seperti sekering, relay, dan lain – lainnya di luar perangkat transformator tegangan, transformator arus, pemutus tenaga (PMT), kontraktor, dan lain sebagainya.
- c. Skema dari proteksi adalah kumpulan dari perangkat proteksi yang berfungsi untuk melakukan proteksi di semua perangkat yang termasuk didalam sistem proteksi yang terlibat didalamnya seperti relay, transformator tegangan, transformator arus, pemutus tenaga (PMT), baterai, dan lain sebagainya. Pada dasarnya cara kerja sebuah relay proteksi dapat dibuat berdasarkan satu besaran tunggal, misalnya seperti relay arus lebih yang prinsip kerjanya hanya berdasarkan arus gangguan semata. Tetapi dalam rangka memenuhi keperluan proteksi efektif yang memenuhi kriteria cepat, selektif, dan stabil yang dapat *disetting* sesuai konfigurasi jaringan, kondisi operasi yang berbeda – beda, dan faktor lainnya seperti konstruksi dan ukuran sistem tenaga yang juga berbeda – beda, maka suatu relay proteksi dapat dibuat untuk berespon terhadap berbagai perubahan besaran listrik. Sebagai contoh, meskipun suatu relay arus lebih atau *Over Current Relay* dapat digunakan untuk memproteksi jaringan distribusi radial hanya berdasarkan level arus gangguan, tetapi pada jaringan tenaga listrik yang kompleks sistem proteksi tidak lagi hanya dapat mengandalkan besaran pengukuran tunggal saja. Untuk bisa melakukan proteksi secara efektif maka perangkat proteksi perlu dapat merespon besaran – besaran listrik yang lainnya seperti besar daya, sudut fasa, frekuensi, tegangan ataupun impedansi jaringan yang berfungsi untuk menentukan arah dan jarak suatu gangguan yang terjadi. Seperti yang diketahui, pada dasarnya besaran listrik terdiri dari bilangan – bilangan kompleks yang perlu diukur oleh elemen – elemen pengukuran suatu relay proteksi.

2.2.3.4 Relay Proteksi

Relay proteksi merupakan susunan dari peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya suatu gangguan. Relay proteksi mulai merasakan adanya ketidaknormalan pada peralatan atau bagian dari sistem tenaga listrik dan secara otomatis sehingga memberi perintah untuk membuka pemutus tenaga untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terjadi gangguan dengan memberikan suatu sinyal seperti memberikan sebuah alarm. Relay proteksi dapat merasakan atau melihat adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran – besaran yang diterimanya. Dengan besaran yang telah ditentukan, relay proteksi kemudian mengambil keputusan untuk seketika ataupun dengan perlambatan waktu membuka pemutus tenaga. Pemutus tenaga umumnya dipasang pada generator, transformator daya, saluran transmisi, saluran distribusi. Supaya masing – masing bagian sistem dapat dipisahkan dari bagiannya sehingga sistem yang lainya tetap bisa beroperasi secara normal.

Relay proteksi yang terdapat pada sistem proteksi merupakan komponen utama yang harus mengidentifikasi gangguan yang terjadi pada suatu sistem. Relay proteksi akan bekerja secara otomatis dengan memerintah atau memberikan sinyal kepada pemutus tenaga (PMT) untuk memisahkan peralatan dari gangguan sebelum terjadi. Relay juga harus mempunyai beberapa standar keandalan sehingga dapat menjadi pemutus yang baik. Beberapa syarat standar keandalan relay proteksi antara lain sebagai berikut:

a. Sensitivitas

Adalah kemampuan dari sistem proteksi untuk mengidentifikasi apabila terjadi suatu gangguan atau keadaan abnormal yang terjadi pada suatu jaringan dimana relay tersebut bekerja.

b. Selektivitas

Adalah mengkoordinasi pada sistem proteksi, apabila terjadi gangguan maka relay tidak memutus semua jaringan tetapi relay hanya memutus bagian yang diperlukan saja,

c. Keamanan

Adalah kemampuan dari sistem proteksi ketika bekerja, sistem ini akan bekerja apabila terjadi suatu gangguan dan tidak akan berkerja apabila tidak terjadi gangguan.

d. Kecepatan

Adalah apabila terjadi suatu gangguan pada jaringan maka sistem proteksi harus dapat bekerja dengan baik dengan waktu secepat mungkin supaya tidak akan menyebabkan kerusakan pada komponen yang terdapat pada jaringan tersebut. Dengan keandalan pada relay, maka relay harus bekerja secara baik sebagai pemutus, apabila terjadi ganggaun maka relay akan bekerja ketika terjadi gangguan dan tidak akan bekerja ketika tidak terjadi gangguan atau keadaan normal.

2.2.3.5 Fungsi Relay Proteksi

Relay proteksi bertugas menunjukkan lokasi dan jenis gangguannya. Dengan data tersebut akan memudahkan analisa dari gangguannya. Relay hanya memberi sinyal atau isyarat jika terjadi suatu gangguan atau kerusakan sehingga gangguan atau kerusakan tersebut tidak sampai membahayakan atau melebihi nilai setting. Berdasarkan tugas relay proteksi maka fungsi relay proteksi yang dapat disimpulkan sebagai berikut :

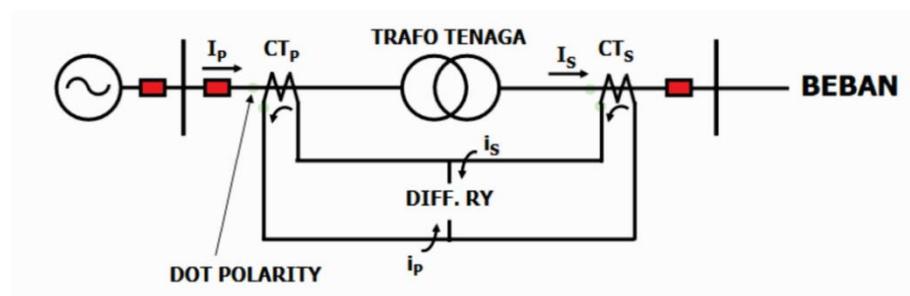
- a. Merasakan, mengukur, menentukan dan meberikan sinyal pada bagian ari sistem jaringan yang terdapat gangguan dan memisahkan bagian yang terjadi gangguan sehingga sistem yang tidak terdapat gangguan bisa beroperasi secara normal.
- b. Mengurangi kerusakan pada sistem jaringan yang terjadi suatu ganggu.
- c. Mengurangi dampak dari suatu gangguan terhadap sistem yang lain atau mencegah meluasnya gangguan.

2.2.3.6 Komponen – Komponen Relay Proteksi Transformator

2.2.3.6.1 Relay Deferensial

Relay Deferensial merupakan relay yang dirancang untuk mendeteksi perbedaan antara arus yang masuk dengan daerah atau zona yang diproteksinya dengan arus yang keluar. Relay ini akan bekerja apabila arus yang masuk tidak sama dengan arus yang keluar. Relay ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan hubung singkat yang terjadi didalam daerah pengaman transformator. Relay ini memiliki cara kerja dengan membandingkan arus yang masuk ke peralatan dengan arus yang keluar dari peralatan tersebut.

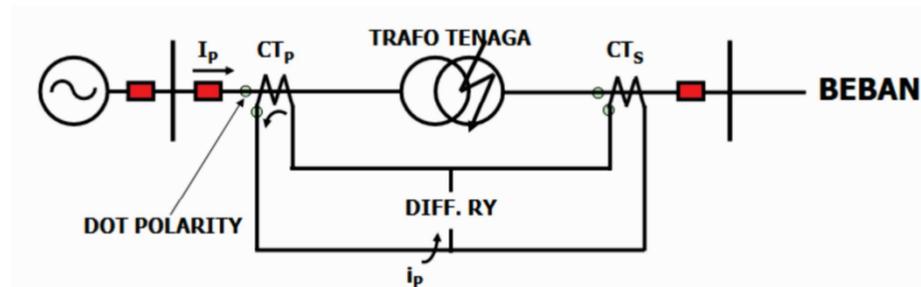
Relay dalam keadaan normal



Gambar 2.2 Gambar Relay yang Bekerja dalam Keadaan Normal

Jika keadaan normal maka jumlah arus yang mengalir melalui peralatan listrik yang diproteksi bersirkulasi melalui loop pada kedua sisi di daerah kerja relay diferensial tersebut, maka nilainya adalah ($I_d = I_p - I_s = 0$)

Relay dalam Keadaan Gangguan



Gambar 2.3 Gambar Relay Saat Terjadi Gangguan

Jika terjadi gangguan didalam daerah kerja relay diferensial maka arus dari kedua sisi akan saling menjumlah dan relay akan memberi perintah ke pemutus tenaga untuk memutuskan arus yang mengalir tersebut.

2.2.3.6.2 Relay Arus Lebih / *Over Current Relay (OCR)*

Relay ini bekerja apabila ada arus yang terdeteksi oleh relay melebihi setelan nilai arusnya yang telah disetting. Relay ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap arus hubung singkat antar fasa didalam maupun diluar daerah pengaman transformator. Relay ini harus mempunyai sifat komplementer dengan relay beban lebih, dan relay ini berfungsi sebagai pengaman cadangan atau *back up* bagi sebagian instalasi lainnya.

2.2.3.6.3 Relay Gangguan Tanah / *Ground Fault Relay (GFR)*

Relay ini bekerja untuk mendeteksi gangguan ke tanah atau lebih tepatnya dengan mengukur besarnya arus residu yang mengalir ke tanah. Relay ini bekerja berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai setting pengaman tertentu dalam jangka waktu tertentu, apabila terjadi gangguan arus hubung singkat fasa ke tanah.

2.2.3.6.4 Relay Gangguan Tanah Terbatas (REF)

Relay ini berfungsi sebagai pengaman transformator bila ada gangguan satu fasa ke tanah didekat titik netral transformator yang tidak dirasakan oleh relay differensial.

2.2.3.7 Over Current Relay (OCR)

Relay arus lebih atau yang lebih dikenal dengan OCR (*Over Current Relay*) merupakan peralatan yang mendeteksi adanya arus lebih yang disebabkan oleh adanya gangguan hubung singkat atau *overload* yang dapat merusak peralatan sistem tenaga yang berada dalam wilayah proteksinya. Relay arus lebih ini digunakan hampir pada seluruh pola pengamanan sistem tenaga listrik, relay arus lebih dapat digunakan sebagai pengaman utama ataupun pengaman cadangan.

Relay arus lebih adalah suatu relay dimana bekerjanya berdasarkan adanya kenaikan arus yang melewatinya. Agar peralatan tidak rusak bila dilewati arus yang melebihi kemampuannya, selain peralatan tersebut diamankan terhadap kenaikan arusnya, maka peralatan pengamannya harus dapat bekerja pada jangka waktu yang telah ditentukan.

Pada pengaturan waktu relay ini selain untuk keamanan peralatan juga sering dikaitkan dengan masalah koordinasi pengamanan. Berdasarkan pada prinsip kerja dan konstruksinya, maka relay jenis ini termasuk relay yang paling sederhana, murah, dan mudah dalam penyetelannya. Relay jenis ini digunakan untuk mengamankan peralatan atau cadangan terhadap gangguan hubung singkat yang terjadi di sistem, terutama hubung singkat antar fasa, hubung singkat satu fasa ke tanah dan beberapa hal dapat digunakan sebagai pengaman beban lebih

2.2.3.7.1 Prinsip Kerja Over Current Relay (OCR)

Relay arus lebih adalah relay yang bekerja terhadap arus lebih, ia akan bekerja bila arus yang mengalir melebihi nilai settingnya (*Iset*) atau relay arus lebih merupakan pengaman yang bekerja karena adanya

besaran arus dan terpasang pada jaringan tegangan tinggi, tegangan menengah juga pada pengamanan transformator tenaga.

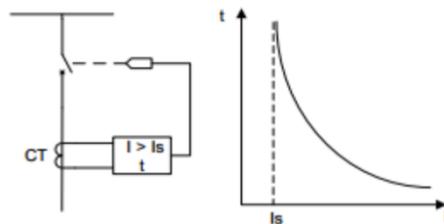
Pada dasarnya relay arus lebih adalah suatu alat yang mendeteksi besaran arus yang melalui suatu jaringan dengan bantuan transformator arus. Harga atau besaran yang boleh melewatinya disebut dengan setting.

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

2.2.3.7.2 Karakteristik Relay *Over Current Relay* (OCR)

2.2.3.7.2.1 *Over Current Relay* (OCR) *Invers Time*

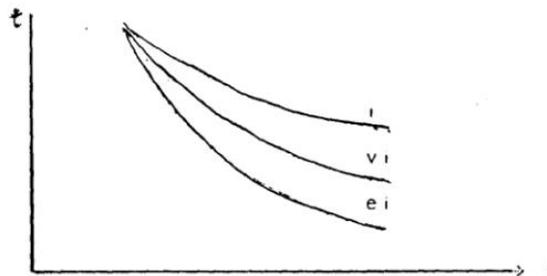
Over Current Relay (OCR) *invers time* adalah relay dimana waktu tundanya memiliki karakteristik tergantung pada besarnya arus gangguan. Semakin besar arus gangguannya maka waktu kerja relay akan semakin singkat atau cepat. Nilai arus gangguan berbanding terbalik dengan waktu kerja relay.



Gambar 2.4 Karakteristik OCR *Invers Time*

Bentuk sifat keterbalikan antara arus dan waktu kerja ini bermacam-macam, akan tetapi kesemuanya itu dapat digolongkan menjadi 3 golongan yakni berbanding terbalik biasa (*inverse*), sangat berbanding

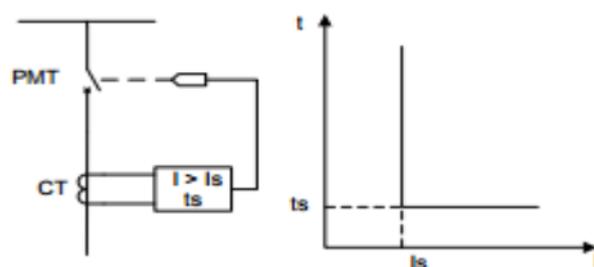
terbalik (*very inverse*), sangat berbanding terbalik sekali (*extremely inverse*).



Gambar 2.5 Golongan OCR *Invers*

2.2.3.7.2.2 Over Current Relay *Definite Time*

Over Current Relay Definite Time adalah jenis relay arus lebih dimana jangka waktu relay mulai *pick-up* sampai selesainya kerja relay dapat diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang mengerjakannya (tergantung dari besarnya arus setting, melebihi arus setting maka waktu kerja relay ditentukan oleh waktu settingnya).



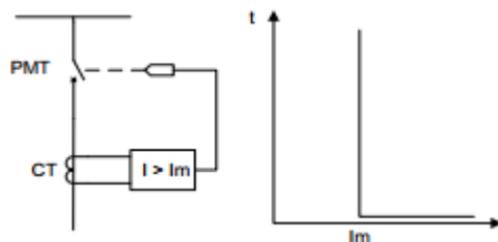
Gambar 2.6 Karakteristik OCR *Definite Time*

Sifat atau karakteristik dari *relay definite* adalah relay baru akan bekerja bila arus yang mengalir pada relay tersebut melebihi besarnya arus setting (I_s) yang telah ditentukan. Dan lamanya selang waktu relay bekerja untuk memberikan perintah *tripping* ke pemutus tenaga (PMT)

sesuai dengan waktu setting (T_s) yang diinginkan. Pada relay OCR ini waktu bekerjanya ($T_{tripping} = T_s$) tetap konstan, tidak dipengaruhi oleh besarnya arus yang mengerjakan relay tersebut.

2.2.3.7.2.3 Over Current Relay Instantaneous Time

Instantaneous Time ini bekerja tanpa tunda waktu. Relay ini akan memberikan perintah pada pemutus tenaga (PMT) untuk memutuskan jaringan yang mengalami gangguan bila besarnya arus gangguan melebihi arus pengaturannya, dan jangka waktu kerja tanpa penundaan. Jenis relay arus lebih yang paling sederhana dimana jangka waktu kerja relay yaitu mulai saat relay mengalami *pick-up* sampai selesainya kerja relay sangat singkat yakni sekitar 20-100 mili detik tanpa adanya penundaan waktu. Dibawah ini adalah grafik karakteristiknya.



Gambar 2.7 Karakteristik OCR *Instantaneous Time*

2.2.3.7.3 Setting Over Current Relay

Untuk menyetting *over current relay* dengan menghitung hasil dari perhitungan arus gangguan hubung singkat, dipergunakan untuk nilai setelan arus lebih, terutama nilai setelan TMS (*Time Multiple Setting*) dari relay arus lebih dengan karakteristik jenis *inverse*. Disamping itu setelah nilai setelan relay diperoleh, nilai arus gangguan hubung singkat pada setiap lokasi gangguan yang diasumsikan, dipakai untuk memeriksa relay arus lebih itu, apakah masih dapat dinilai selektif atau nilai setelan harus dirubah ke nilai lain yang memberikan kerja relay

yang lebih selektif, atau didapatkan kerja selektifitas yang optimum (Relay bekerja tidak bekerja terlalu lama tetapi menghasilkan selektifitas yang baik). Sedangkan setelan arus dari relay arus lebih dihitung berdasarkan arus beban yang mengalir di penyulang atau *incoming feeder*, artinya :

- a. Untuk relay arus lebih yang terpasang di penyulang keluar (*outgoing feeder*) dihitung berdasarkan arus beban maksimum (Beban Puncak) yang mengalir dipenyulang tersebut.
- b. Untuk relay arus lebih yang terpasang di penyulang masuk (*incoming feeder*) dihitung berdasarkan arus nominal transformator tenaga.

Sesuai dengan british standard untuk :

Relay inverse biasa disetting sebesar 1,05 s/d $1,3 \times I_{\text{Beban}}$,

Sedangkan relay definite disetting sebesar 1,2 s/d $1,3 \times I_{\text{Beban}}$.

Persyaratan lain yang harus dipenuhi yaitu penyettingan waktu minimum dari relay arus lebih (terutama di bagian penyulang) tidak lebih kecil dari 0,3 detik. Pertimbangan ini diambil agar relay tersebut tidak sampai trip lagi akibat arus *inrush* dari transformator distribusi yang memang sudah tersambung di jaringan distribusi, sewaktu pemutus tenaga (PMT) yang di penyulang tersebut dioperasikan.

Sebelum melakukan penyetingan pada *setting* waktu relay terlebih dahulu menghitung perhitungan seperti impedansi pada transformator yang terdapat di gardu induk dan terdapat juga beberapa perhitungan sebagai berikut

1. Impedansi Transformator

Untuk menghitung impedansi transformator dibutuhkan data yang ada di spesifikasi transformator tersebut kemudian memasukan data tersebut kedalam rumus sebagai berikut :

$$Z_{\text{transformator}} = Z\% \times \frac{V_p^2}{P} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

- $Z_{\text{transformator}}$: Impedansi transformator (Ω)
 $Z\%$: Persentase impedansi transformator (%)
 V_p : Tegangan pada sisi primer (V)
 P : Daya maksimal (VA)

2. Impedansi Sumber

Disumber terdapat juga nilai dari impedansi, sehingga rumus untuk menghitungnya sebagai berikut :

$$Z_s = \frac{V^2}{P_{sc}} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan :

- Z_s : Impedansi sumber (Ω)
 V : Tegangan (V)
 P_{sc} : Daya hubung singkat (VA_{sc})

Jika nilai dari daya hubung singkat belum diketahui maka dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$P_{sc} = \sqrt{3} \times I_{sc} \times V \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

- P_{sc} : Daya hubung singkat (VA_{sc})
 I_{sc} : Arus hubung singkat (A)
 V : Tegangan (V)

2.2.3.7.4 *Setting TMS (Time Multiple Setting)*

Setting TMS dan *setting* waktu relay pada jaringan distribusi menggunakan standard inverse yang dihitung dengan menggunakan rumus kurva waktu vs arus, dalam hal ini juga dapat diambil persamaan kurva arus waktu dari standard british, sebagai berikut :

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{\text{fault}}}{I_{\text{set}}} \right)^{\alpha} - 1 \right)}{\beta} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dan

$$t = \frac{\beta \times TMS}{\left(\frac{I_{\text{fault}}}{I_{\text{set}}} \right)^{\alpha} - 1} \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan :

t : Waktu Trip (s)

TMS : *Time Multiple Setting*

I_{fault} : Besarnya Arus Gangguan Hubung Singkat (A)
Setelan OCR (Inverse) diambil arus gangguan hubung singkat terbesar.

I_{set} : Besarnya Arus Setting Sisi Primer (A)
Setelan OCR (inverse) diambil (BS) 1,05 s/d 1,3 x I_{Beban}

α , β : Konstanta

Tabel 2.1 Konstanta Karakteristik Arus Lebih

Nama Kurva	α	β
Standard Inverse	0,02	0,14
Very Inverse	1	13,2

Lanjutan Tabel 2.1 Konstanta Karakteristik Arus Lebih

Extremely Inverse	2	80
Long Inverse	1	120

2.2.4 Software ETAP

ETAP atau *Electric Transient and Analysis Program* merupakan suatu *software* (perangkat lunak) yang digunakan untuk sistem tenaga listrik. *Software* ETAP ini dapat bekerja dalam menyimulasikan tenaga listrik dengan keadaan *offline*, dan dalam keadaan *online* untuk pengelolaan data *real – time* atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara *real – time*. Fitur yang terdapat di dalam *software* ETAP ada bermacam – macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi, maupun sistem distribusi tenaga listrik.

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 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. Beberapa elemen yang digunakan dalam suatu diagram saluran tunggal adalah Generator, Transformator, Pemutus Tenaga, dan lain – lain.

Untuk menganalisa tenaga listrik yang dapat dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP antara lain : Analisa Aliran Daya (*Load Flow Analysis*), Analisa Hubung Singkat (*Short Circuit Analysis*), Motor Starting,

Arc Flash Analysis, Harmonics Power System, Analisa Kestabilan Transien (Transient Stability Analysis), serta Protective Device Coordination.