



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG)

Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas atau *Gas Engine For Power Generation*, merupakan mesin jenis Torak (*reciprocating*) yang memiliki prinsip kerja Siklus Otto Empat langkah. Secara Mekanik Tidak terdapat perbedaan jauh dengan Mesin Diesel yang kita kenal PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel yang mana kita tahu berbahan bakar High Speed Diesel (HSD).

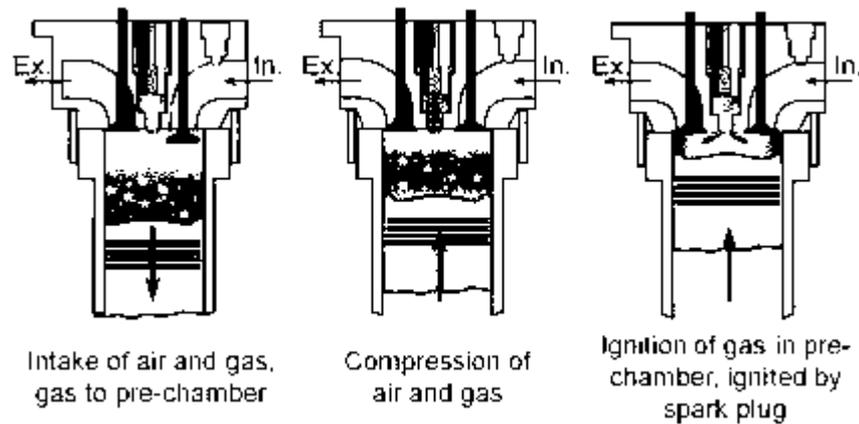
Yang membedakan dengan jenis mesin PLTD yang kita kenal adalah pada bahan bakar dan proses hasupan Bahan bakar antara Gas -PLTMG dan HSD-PLTD. Berikut merupakan Komponen komponen Sistem pembakaran pada Mesin PLTMG antara lain :

- a. *Cyl Liner Head and Valve*
- b. *Combustion Linear*
- c. *Piston And Connecting Rod*
- d. *Air and Gas Feed*
- e. *Gas Actuating Valve (SOGAV)*
- f. *Coil and Spark plug*
- g. Prechamber. sebagai peralatan pembakaran mula.

Pada PLTMG, Bahan bakar gas dan udara masuk secara bersamaan kedalam ruang bakar dimana flow gas diatur oleh Solenoid actuating gas valve dan pada sisi lain sebagian kecil gas masuk ke ruang pre-chamber, busi memberikan pengapian yang diatur oleh coil drive pada prechamber pada saat kompresi TDC piston sehingga terjadi pembakaran pada udara dan gas yang terkompresi.



Berikut Diagram gambar sederhana proses pembakaran pada Mesin PLTMG :



Gambar 2.1. Prinsip Kerja Mesin Gas^[1]

2.2 Generator

Generator ialah mesin pembangkit tenaga listrik. Pembangkitan diperoleh dengan menerima tenaga mekanis dan diubah menjadi tenaga listrik, tenaga mekanis untuk generator kecil misalnya untuk pemakaian di bengkel kecil atau sekolah, umumnya digunakan mesin diesel, diesel dan generator ini biasanya dipasang menjadi satu unit. Unit ini biasa disebut dengan generator set. Generator set pada umumnya menghasilkan listrik arus tukar satu atau tiga fasa.^[2]

Adapun jenis gangguan dan masalah-masalah yang terdapat pada generator-generator antara lain sebagai berikut :

1. Gangguan Internal

- a. Gangguan fasa atau gangguan tanah pada kumparan stator dan komponen jaringan lain terkait.

^[1]Purba, Megiovandi. 2015. *Perbedaan PLTMG dengan PLTD*.

(<http://1tongsampah.blogspot.co.id/2015/06/singkat-perbedaan-pltmg-dengan-pltd.html?m=1>)
(diakses 3 Mei 2017).

^[2]Daryanto. 2006. *Pengetahuan Teknik Listrik*. Cetakan Kelima. Jakarta: Bumi Aksara. Hal. 90



b. Gangguan tanah pada kumparan rotor generator dan hilangnya sumberpenguatan.

2. Sistem gangguan dan kendala operasi

- a. Kehilangan sumber penggerak primer (*prime-mover*), dimana generator bisa berubah menjadi motor.
- b. Penguatan berlebihan atau *over* eksitasi ditanggulangi dengan relay proteksi tegangan (*Volt*) atau *Hertz*.
- c. Kesalahan operasi seperti pemasukan generator ke jaringan secara tidak sinkron.
- d. Arus *unbalance* seperti mengalirnya arus urutan negatif, karena salah satu kutup PMT mengalami *flash-over*. Prinsip kerja relay yang digunakan untuk memantau kerusakan PMT generator sama seperti pada transmisi. Pada prinsipnya yang dilakukan adalah memantau besaran-besaran arus yang memantau kerusakan PMT generator sama seperti pada transmisi. Pada prinsipnya yang dilakukan adalah memantau besaran-besaran arus yang mengalir pada masing-masing fasa dan membandingkannya satu sama lain. Kalau terjadi perbedaan maka bisa dianggap salah satu fasa PMT dalam keadaan rusak.
- e. Generator berbeban lebih sehingga mengalami panas berlebihan.
- f. Relay frekuensi pada sistem PLTU besar.
- g. Gangguan yang tidak tertanggulangi ditangani dengan relay impedansi dan relay arus lebih yang kerjanya dikendalikan oleh tegangan (*voltage controlled time over current*).
- h. Relay tegangan lebih.
- i. Kehilangan sinkronisasi atau *out of step*.
- j. Ayunan (osilasi) sub-sinkronisasi. Gangguan ini pada umumnya bisa timbul akibat pengaruh luar seperti pengaruh impedansi reaktor yang dihubung seri dengan transmisi yang dapat memengaruhi frekuensi dasar sistem pembangkit. Bila terjadi secara signifikan maka torsi mekanis yang timbul karena ayunan sub-sinkronisasi ini dapat merusak poros generator.



- k. Kehilangan output trafo tegangan atau regulator yang dapat menyebabkan gangguan terhadap sistem kontrol dan yang bisa diinterpretasikan salah oleh relay proteksi.

Gangguan pada sistem tenaga listrik tidak dapat dihindari secara sempurna, akan tetapi yang dapat dilakukan adalah dengan cara mengurangi gangguan tersebut yaitu dengan jalan membatasi daerah gangguan sekecil mungkin, oleh karena itu diperlukan suatu sistem proteksi.^[3]

2.3 Dasar – Dasar Sistem Proteksi

Secara umum rele proteksi harus bekerja sesuai dengan yang diharapkan dengan waktu yang cepat sehingga tidak akan mengakibatkan kerusakan, ataupun kalau suatu peralatan yang terjadi kerusakan secara dini telah diketahui, atau walaupun terjadi gangguan tidak menimbulkan pemadaman bagi konsumen. Hal ini dapat dijabarkan sebagai fungsi dan persyaratan rele pengaman seperti penjelasan berikut.

Rele proteksi merupakan 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 segera secara otomatis memberi perintah untuk membuka pemutus tenaga untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu atau bel.

2.3.1 Fungsi Relay Proteksi

Fungsi relay proteksi pada suatu sistem tenaga listrik antara lain :

- a. Mendeteksi adanya gangguan atau keadaan abnormal lainnya pada bagian sistem yang diamankan.
- b. Melepaskan bagian sistem yang terganggu sehingga bagian sistem lainnya dapat terus beroperasi.

^[3]Pandjaitan, Bonar. 2012. *Praktik-Praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Andi Offset. Hal. 356-357



c. Memberitahu operator tentang adanya gangguan dan lokasinya.

2.3.2 Syarat Relay Proteksi

Relay proteksi dalam fungsinya sebagai pengaman memiliki beberapa syarat yang harus dipenuhi, yaitu :

1. Kepekaan (*sensitivity*)

Pada prinsipnya relay harus cukup peka sehingga dapat mendeteksi gangguan di kawasan pengamanannya meskipun gangguan yang ada relatif kecil.

2. Keandalan (*reliability*)

Maksud dari keandalan adalah bahwa sebuah relay proteksi harus selalu berada pada kondisi yang mampu melakukan pengamanan pada daerah yang diamankan.

Keandalan memiliki 3 aspek, antara lain :

- *Dependability*, adalah kemampuan suatu sistem relay untuk beroperasi dengan baik dan benar. Pada prinsipnya pengaman harus dapat diandalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), tidak boleh gagal bekerja. Dengan kata lain *dependability*-nya harus tinggi.
- *Security*, adalah tingkat kepastian suatu sistem relay untuk tidak salah dalam bekerja. Salah kerja, misalnya lokasi gangguan berada di luar pengamanannya, tetapi salah kerja mengakibatkan pemadaman yang seharusnya tidak perlu terjadi.
- *Availability*, adalah perbandingan antara waktu di mana pengaman dalam keadaan siap kerja (*actually in service*) dan waktu total operasinya.

3. Selektifitas (*selectivity*)

Maksudnya pengaman harus dapat membedakan apakah gangguan terletak di daerah proteksi utama dimana pengaman harus bekerja cepat atau terletak di luar zona proteksinya dimana pengaman harus bekerja dengan waktu tunda atau tidak bekerja sama sekali.



4. Kecepatan kerja (*Speed Of Operation*)

Untuk memperkecil kerugian atau kerusakan akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Selang waktu sejak dideteksinya gangguan sampai dilakukan pemisahan gangguan merupakan penjumlahan dari waktu kerja relay dan waktu kerja pemutus daya ($t_{kerja} = t_{relai} + t_{pemutusdaya}$). Namun pengaman yang baik adalah pengaman yang mampu beroperasi dalam waktu kurang dari 50 ms.

5. Sederhana (*Simplicity*)

Relay pengaman harus disusun sesederhana mungkin namun tetap mampu bekerja sesuai dengan tujuannya.

6. Ekonomis (*Economic*)

Faktor ekonomi sangat mempengaruhi pengaman yang akan digunakan. Namun sebaiknya pilihlah suatu sistem proteksi yang memiliki perlindungan maksimum dengan biaya yang minimum.^[4]

2.3.3 Pembagian Daerah Proteksi

Suatu sistem tenaga listrik dibagi ke dalam seksi-seksi yang dibatasi oleh PMT. Tiap seksi memiliki relay pengaman dan memiliki daerah pengamanan (*Zone of Protection*). Bila terjadi gangguan, maka relay akan bekerja mendeteksi gangguan dan PMT akan trip.

dapat dilihat bahwa daerah proteksi pada sistem tenaga listrik dibuat bertingkat dimulai dari pembangkitan, gardu induk, saluran distribusi primer sampai ke beban. Garis putus-putus menunjukkan pembagian sistem tenaga listrik ke dalam beberapa daerah proteksi. Masing- masing daerah memiliki satu atau beberapa komponen sistem daya disamping dua buah pemutus rangkaian. Setiap pemutus dimasukkan ke dalam dua daerah proteksi berdekatan. Batas setiap

^[4]Sarimun, Wahyudi. 2012. Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik. Depok : Garamond. Hal.



daerah menunjukkan bagian sistem yang bertanggung jawab untuk memisahkan gangguan yang terjadi di daerah tersebut dengan sistem lainnya. Aspek penting lain yang harus diperhatikan dalam pembagian daerah proteksi adalah bahwa daerah yang saling berdekatan harus saling tumpang tindih (*overlap*), hal ini dimaksudkan agar tidak ada sistem yang dibiarkan tanpa perlindungan. Pembagian daerah proteksi ini bertujuan agar daerah yang tidak mengalami gangguan tetap dapat beroperasi dengan baik sehingga dapat mengurangi daerah terjadinya pemadaman.

2.3.4 Pengelompokan Sistem Proteksi

Berdasarkan daerah pengamanannya sistem proteksi dibedakan menjadi :

- Proteksi pada Generator
- Proteksi pada Transformator
- Proteksi pada Transmisi
- Proteksi pada Distribusi

2.3.5 Pembagian Tugas Dalam Sistem Proteksi

Dalam sistem proteksi pembagian tugas dapat diuraikan menjadi :

- a. Proteksi utama, berfungsi untuk mempertinggi keandalan, kecepatan kerja, dan fleksibilitas sistem proteksi dalam melakukan proteksi terhadap sistem tenaga.
- b. Proteksi pengganti, Berfungsi jika proteksi utama menghadapi kerusakan untuk mengatasi gangguan yang terjadi.
- c. Proteksi tambahan, berfungsi untuk pemakaian pada waktu tertentu sebagai pembantu proteksi utama pada daerah tertentu yang dibutuhkan.

2.3.6 Komponen Peralatan Proteksi

Seperangkat peralatan/komponen proteksi utama berdasarkan fungsinya dapat dibedakan menjadi :

- a. Relay Proteksi



- b. Pemutus tenaga (PMT) : Sebagai pemutus arus untuk mengisolir sirkuit yang terganggu.
- c. Transformator ukur :
 - Trafo Arus : Meneruskan arus ke sirkuit relay.
 - Trafo Tegangan : Meneruskan tegangan ke sirkuit relay

2.3.7 Relay Proteksi

Relay proteksi adalah sebuah peralatan listrik yang dirancang untuk mendeteksi bila terjadi gangguan atau sistem tenaga listrik tidak normal. Relay pengaman merupakan kunci kelangsungan kerja dari suatu sistem tenaga listrik, dimana gangguan segera dapat dilokalisir dan dihilangkan sebelum menimbulkan akibat yang lebih luas. Gambar 2.2 berikut menggambarkan diagram blok urutan kerja relay proteksi.

Relay proteksi mempunyai tiga elemen dasar yang bekerja saling terkait untuk memutuskan arus gangguan. Ketiga elemen dasar tersebut dapat dijelaskan dijelaskan sebagai berikut :

- a. Elemen perasa (*Sensing Element*)
Berfungsi untuk merasakan atau mengukur besaran arus, tegangan, frekuensi atau besaran lainnya yang akan diproteksi.
- b. Elemen Pemanding (*Comparison Element*) Berfungsi untuk membandingkan arus yang masuk ke relay pada saat ada gangguan dengan arus setting tersebut.
- c. Elemen kontrol (*Control Element*)
Berfungsi mengadakan perubahan dengan tiba-tiba pada besaran kontrol dengan menutup arus operatif.

2.3.8 Relay Proteksi Pada Generator

Jenis relay yang umum digunakan pada sistem pengaman listrik generator yang memiliki rating daya output yang cukup besar adalah :

1. Relay Tegangan Lebih (*Over Voltage Relay*)

Pada generator yang besar umumnya menggunakan sistem pentanahan netral melalui transformator dengan tahanan di sisi sekunder. Sistem pentanahan



ini dimaksudkan untuk mendapatkan nilai impedansi yang tinggi sehingga dapat membatasi arus hubung singkat agar tidak menimbulkan bahaya kerusakan pada belitan dan saat terjadi gangguan hubung singkat stator ke tanah

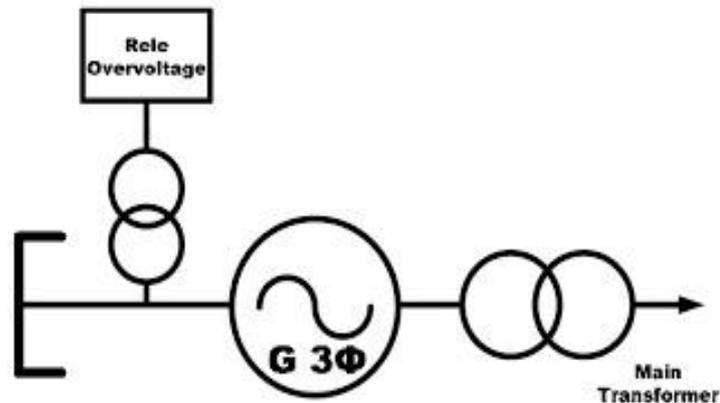
Arus hubung singkat yang terjadi di sekitar titik netral relatif kecil sehingga sulit untuk dideteksi oleh relay differensial. Dengan dipasang transformator tegangan, arus yang kecil tersebut akan mengalir dan menginduksikan tegangan pada sisi sekunder transformator. Untuk mengatasi hal tersebut digunakan relay pendeteksi tegangan lebih yang dipasang pada sisi sekunder transformator tegangan.

Tegangan yang muncul pada sisi sekunder transformator tegangan akan membuat relay tegangan berada pada kondisi mendeteksi apabila perubahan tegangan melebihi nilai settingnya dan generator akan *trip*. Rangkaian ini sangat baik karena dapat membatasi aliran arus nol yang mengalir ke dalam generator ketika terjadi hubung singkat fasa ke tanah di sisi tegangan tinggi transformator tegangan.

Akan tetapi karena efek kapasitansi pada kedua belitan transformator dapat menyebabkan adanya arus bocor urutan nol yang dapat mengaktifkan relay tegangan lebih di sisi netral generator. Dengan demikian relay tegangan lebih yang dipasang harus mempunyai waktu tunda yang dapat dikoordinasikan dengan relay di luar generator. Adapun penyebab *over voltage* adalah sebagai berikut :

- Kegagalan AVR.
- Kesalahan operasi sistem eksitasi.
- Pelepasan beban saat eksitasi dikontrol secara manual.
- Pemisahan generator dari sistem saat *islanding*.

Adapun *single line diagram* relay gangguan tegangan lebih adalah sebagai berikut :



Gambar 2.2 *Single Line Diagram* Relay Tegangan Lebih pada Generator^[5]

2. Relay Gangguan Stator Hubung Tanah (*Stator Earth Fault Relay*)

Gangguan hubungan tanah adalah gangguan yang paling banyak terjadi. Arus gangguan hubung tanah yang terjadi belum tentu cukup besar untuk dapat mengoperasikan relay arus lebih. Oleh sebab itu, harus ada relay arus hubung tanah yang harus dapat mendeteksi arus urutan nol, karena setiap gangguan hubungan tanah menghasilkan arus urutan nol.

Relay gangguan tanah ini dipasang pada sirkuit stator seperti umumnya relay hubung tanah pada sirkuit 3 fasa yaitu dengan menjumlah melalui transformator arus ke 3 fasa yang ada. Jika tidak terdapat gangguan hubung tanah jumlah ini sama dengan 0, tapi jika terdapat gangguan hubung tanah maka jumlah ini tidak sama dengan 0 lalu relay akan bekerja.

Relay ini akan mendeteksi gangguan hubung tanah yang terjadi pada sirkuit yang terhubung dengan sirkuit stator dari generator. Untuk membatasi pendeteksian gangguan hubung tanah yang terjadi pada stator generator saja dipakai relay hubung tanah terbatas, dimana jumlah arus dari 3 fasa tersebut

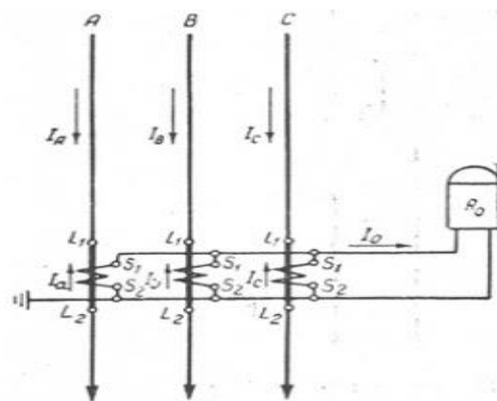
^[5]Prast, Eko. 2011. *Generator Electrical Protection System*.

(<http://projects87.blogspot.co.id/2009/02/generator-electrical-protection-relay.html>, diakses 3 Mei 2017).



dijumlah lagi dengan arus yang dideteksi transformator arus pada konduktor pentanahan titik netral generator.

Relay hubung tanah terbatas sesungguhnya merupakan relay diferensial khusus yang dirangkai untuk mendeteksi gangguan stator hubung tanah. Adapun *single line diagram* relay gangguan stator hubung tanah adalah sebagai berikut :



Gambar 2.3 *Single Line Diagram* Relay Gangguan Stator^[6]

3. Relay Daya Balik (*Reverse Power Relay*)

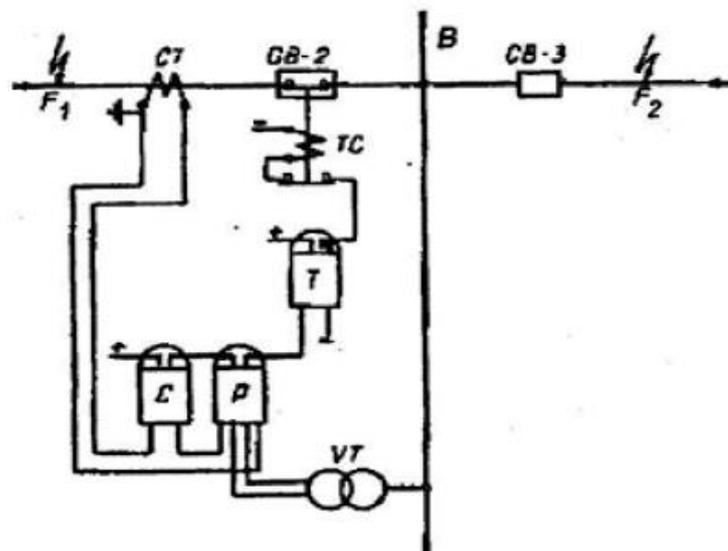
Relay daya balik berfungsi untuk mendeteksi aliran daya balik aktif yang masuk pada generator. Berubahnya aliran daya aktif pada arah generator akan membuat generator menjadi motor, dikenal sebagai peristiwa motoring. Pengaruh ini disebabkan oleh pengaruh rendahnya input daya dari *prime mover*. Bila daya input ini tidak dapat mengatasi rugi-rugi daya yang ada maka kekurangan daya dapat diperoleh dengan menyerap daya aktif dari jaringan. Selama penguatan masih ada maka aliran daya aktif generator sama halnya dengan saat generator bekerja sebagai motor, sehingga daya aktif masuk ke generator dan daya reaktif dapat masuk atau keluar dari generator.

^[6]Prast, Eko. 2011. *Generator Electrical Protection System*.

(<http://projects87.blogspot.co.id/2009/02/generator-electrical-protection-relay.html>, diakses 3 Mei 2017).



Peristiwa *motoring* ini dapat juga menimbulkan kerusakan lebih parah pada turbin ketika aliran uap berhenti. Temperatur sudu-sudu akan naik akibat rugi gesekan turbin dengan udara. Untuk itu di dalam turbin gas dan uap dilengkapi sensor aliran dan temperatur yang dapat memberikan pesan pada relay untuk *trip*. Akan tetapi pada generator juga dipasang relay daya balik yang berfungsi sebagai cadangan bila pengamanan di turbin gagal bekerja. Adapun *single line diagram* relay daya balik adalah sebagai berikut :



Gambar 2.4 *Single Line Diagram* Relay Daya Balik^[7]

Pada gambar tersebut, apabila terjadi gangguan pada F1, maka relay akan men-*trip* CB2, apabila gangguan terjadi pada F2, maka relay tidak akan men-*trip* CB2 karena arah aliran arus yang terbalik dari kanan ke kiri.

4. Relay Gangguan Rotor Hubung Tanah (*Rotor Earth Fault Relay*)

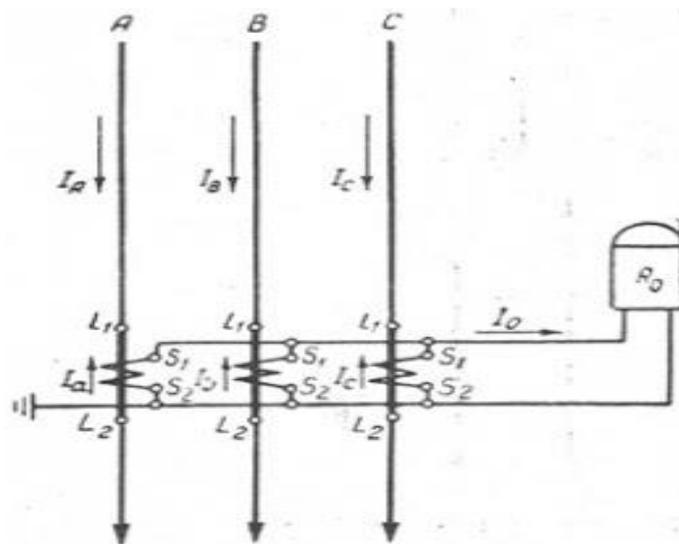
Hubung tanah dalam sirkuit rotor, yaitu hubung singkat antara konduktor rotor dengan badan rotor dimana dapat menimbulkan distorsi medan magnet yang

^[7]Prast, Eko. 2011. *Generator Electrical Protection System*.

(<http://projects87.blogspot.co.id/2009/02/generator-electrical-protection-relay.html>, diakses 3 Mei 2017).



dihasilkan rotor dan selanjutnya dapat menimbulkan getaran (vibrasi) berlebihan dalam generator. Oleh karena itu, hal ini harus dihentikan oleh relay rotor hubung tanah. Karena sirkuit rotor adalah sirkuit arus searah, maka relay rotor hubung tanah pada prinsipnya merupakan relay arus lebih untuk arus searah. Adapun *single line diagram* relay gangguan rotor hubung tanah adalah sebagai berikut :



Gambar 2.5 *Single Line Diagram* Relay Gangguan Rotor Hubung Tanah^[8]

Pada gambar di atas, ketika tidak ada gangguan maka arus simetri, $\{I_r = I_a + I_b + I_c = 0\}$, namun ketika terjadi gangguan hubung singkat ke tanah, maka arus menjadi tak simetri $\{I_r = I_a + I_b + I_c = 3I_{a0}\}$, sehingga terdapat arus yang mengalir pada relay dan membuat relay mendeteksi gangguan.

5. Relay Fasa Urutan Negatif (*Negative Phase Sequence Relay*)

Arus yang tidak seimbang pada stator akan menimbulkan arus urutan negatif dalam stator. Arus urutan negatif ini akan menimbulkan medan magnet

^[8]Prast, Eko. 2011. *Generator Electrical Protection System*.

(<http://projects87.blogspot.co.id/2009/02/generator-electrical-protection-relay.html>, diakses 3 Mei 2017).



yang berlawanan arah terhadap rotor dan menghasilkan arus putar eddy. Pada permukaan rotor, arus pusar ini akan menimbulkan panas yang pada akhirnya dapat menyebabkan *over-heat*. Efek pemanasan yang ditimbulkan dapat mengakibatkan kerusakan pada struktur bagian-bagian rotor yang juga dapat menimbulkan getaran pada rotor. Karena material rotor memiliki batas temperatur yang dinyatakan dalam :

$$I_2 \cdot T = K$$

Dimana, I_2 = Arus urutan fasa

T = waktu

K = karakteristik kerja

Rumus tersebut menunjukkan hubungan antara arus negatif dan batas waktu yang diijinkan mengalir pada generator. Relay arus urutan negatif berfungsi untuk mendeteksi dengan karakteristik invers. Hal ini dikarenakan setiap jenis mesin sinkron memiliki harga yang berbeda.

6. Relay Diferensial (*Differential Relay*)

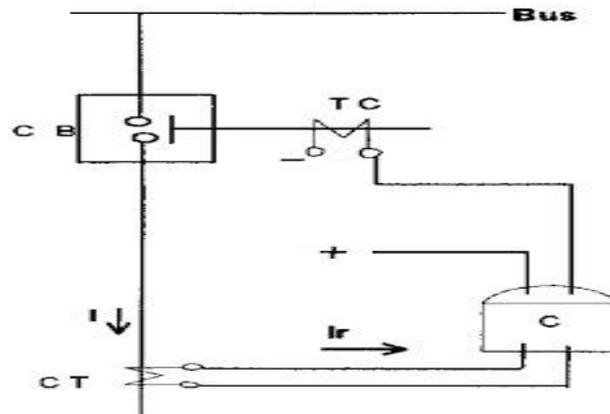
Relay ini berfungsi untuk mendeteksi gangguan dalam kumparan stator generator dan harus bekerja lebih cepat daripada relay arus lebih agar terdapat selektifitas. Prinsip kerja relay ini adalah membandingkan arus yang masuk dan keluar dari kumparan stator generator. Apabila terdapat selisih, berarti terdapat gangguan dalam kumparan stator generator. CT pertama dipasang pada bagian dekat pentanahan stator, sedangkan CT kedua dipasang pada bagian output stator. Selisih arus yang terdeteksi di antara kedua zona inilah yang mengoperasikan relay diferensial.

7. Relay Arus Lebih (*Over Current Relay*)

Relay ini berfungsi mendeteksi arus lebih yang mengalir dalam kumparan stator generator. Arus yang berlebihan dapat terjadi pada kumparan stator generator atau di dalam kumparan rotor. Arus yang berlebihan pada kumparan



stator dapat terjadi karena pembebanan berlebihan terhadap generator. Adapun *single line diagram* relay arus lebih adalah sebagai berikut :



Gambar 2.6 *Single Line Diagram* Relay Arus Lebih^[9]

Keterangan : CB = Circuit Breaker

TC = Trip Coil CB

I = Arus yang mengalir pada saluran yang diamankan

CT = Transformator Arus

Ir = Arus yang mengalir pada relay

C = Relay arus lebih

I_p = Arus pick-up dari relay

8. Relay Gangguan Frekuensi (*Frequency Fault Relay*)

Relay ini berfungsi untuk mendeteksi adanya perubahan frekuensi dalam nilai yang besar secara tiba – tiba. Kisaran frekuensi yang diijinkan adalah $\pm 3\%$ sampai $\pm 7\%$ dari nilai frekuensi nominal. Penurunan frekuensi disebabkan oleh adanya kelebihan permintaan daya aktif di jaringan atau kerusakan regulator frekuensi. Frekuensi yang turun menyebabkan naiknya arus magnetisasi pada

^[9]Prast, Eko. 2011. *Generator Electrical Protection System*.

(<http://projects87.blogspot.co.id/2009/02/generator-electrical-protection -relay.html>, diakses 3 Mei 2017).



generator yang akan menaikkan temperatur. Pada turbin uap, hal tersebut akan mereduksi umur *blade* pada rotor. Kenaikan frekuensi disebabkan oleh adanya penurunan permintaan daya aktif pada jaringan atau kerusakan regulator frekuensi. Frekuensi yang naik akan menyebabkan turunnya nilai arus magnetisasi pada generator yang akan menyebabkan generator kekurangan medan penguat. Sensor relay frekuensi dipasang pada tiap fasa yang keluar dari generator.

9. Relay Impedansi (*Impedance Relay*)

Relay ini berfungsi untuk mendeteksi gangguan antar fasa pada posisi output generator (di saluran penghantar atau *feeder*). Dengan adanya setting keterlambatan waktu, relay ini memberi kesempatan terlebih dahulu pada relay penghantar untuk mengatasi gangguan tersebut. Sensor relay ini berupa transformator tegangan, transformator arus, serta elemen *directional* yang hanya melihat gangguan yang ada pada posisi output generator saja, sehingga apabila terjadi gangguan dalam generator itu sendiri atau pada input generator (turbin atau *exciter*), relay tidak akan bekerja karena zona tersebut tidak berada dalam zona pengamanan yang dapat diamankan oleh relay impedansi.

10. Relay Kehilangan Medan Penguat Rotor (*Lost of Rotor Excitation Relay*)

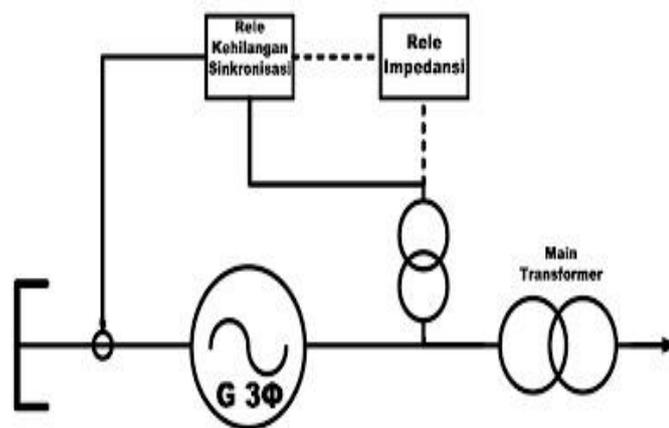
Hilangnya medan penguat pada rotor akan mengakibatkan generator kehilangan sinkronisasi dan berputar di luar kecepatan sinkronnya sehingga generator beroperasi sebagai generator asinkron. Daya reaktif yang diambil dari sistem ini akan dapat melebihi *rating* generator sehingga menimbulkan *overload* pada belitan stator dan menimbulkan *overheat* yang menimbulkan penurunan tegangan generator.

Hilangnya medan penguat rotor dapat dideteksi dengan kumparan yang dipasang paralel dengan *main exciter* dan kumparan rotor generator. Pada kumparan ini akan mengalir arus yang apabila nilainya kurang dari arus *setting* yang diinginkan, maka akan membuat relay mengeluarkan sinyal alarm atau *trip*.



11. Relay Kehilangan Sinkronisasi (*Out of Synchronism Relay*)

Peristiwa lepasnya sinkronisasi pada generator yang sedang beroperasi disebabkan oleh generator yang beroperasi melampaui batas stabilnya. Yang dimaksud dengan stabilitas adalah kemampuan sistem untuk kembali bekerja normal setelah mengalami sesuatu seperti perubahan beban, *switching*, dan gangguan lain. Gangguan tersebut akan berdampak pada tidak sinkron-nya tegangan generator dan sistem. Untuk mengamankan generator yang berkapasitas beban besar terhadap peristiwa ayunan beban dari kondisi tak sinkron digunakan relay lepas sinkron. Relay ini mendeteksi besar impedansi (arus dan tegangan sistem).



Gambar 2.7 *Single Line Diagram* Relay Kehilangan Sinkronisasi^[10]

2.4 Relé Arus Lebih

Relé arus lebih adalah suatu relé yang bekerja berdasarkan kenaikan besaran arus yang melebihi suatu nilai pengamanan tertentu dan dalam jangka waktu tertentu, sehingga dapat digunakan sebagai pola pengamanan arus lebih atau hubung singkat. Relé arus lebih tidak hanya bekerja karena adanya kenaikan

^[10]Prast, Eko. 2011. *Generator Electrical Protection System*.

(<http://projects87.blogspot.co.id/2009/02/generator-electrical-protection-relay.html>,

diakses 3 Mei 2017).



arus tetapi yang terpenting adalah kemampuan rele untuk mendeteksi atau memonitor kenaikan arus bila telah melampaui batas arus dan waktu yang telah ditentukan. Ujuk kerja (*performance*) rele dipengaruhi oleh konstruksinya yaitu prinsip elektromekanik atau elektronik dengan saklar statis.

Pengukuran arus gangguan pada jaringan oleh rele arus lebih ditransformasikan dengan nilai arus yang lebih kecil melalui perbandingan lilitan menggunakan transformator arus (*Current Transformer/CT*).

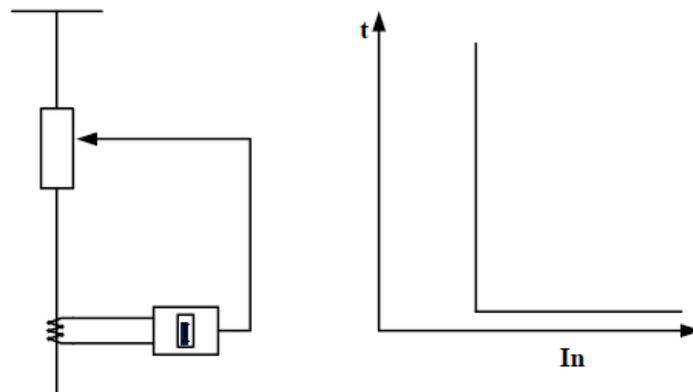
2.4.1 Keuntungan dan Fungsi Rele Arus Lebih

- Sederhana dan murah.
- Mudah penyetelannya.
- Merupakan rele pengaman utama dan cadangan
- Mengamankan gangguan hubung singkat antar fasa maupun hubung singkat satu fasa ke tanah dan dalam beberapa hal dapat digunakan sebagai pengaman beban lebih (*overload*).
- Pengaman utama pada jaringan distribusi dan sub transmisi radial.
- Pengaman cadangan untuk generator, trafo tenaga dan saluran transmisi.

2.4.2 Karakteristik Waktu Kerja Rele Arus Lebih

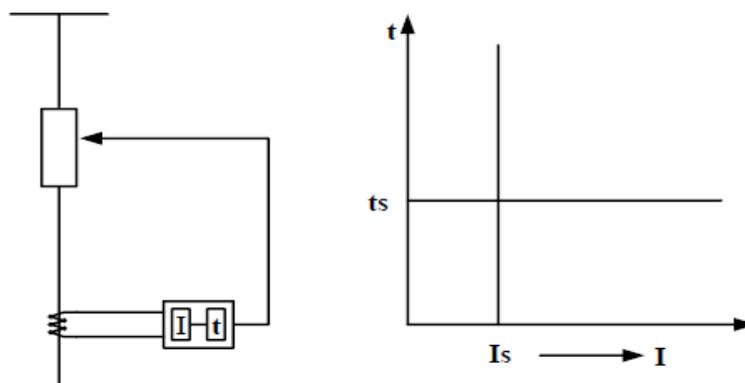
a. Rele Arus Lebih Waktu Seketika (*Moment*)

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu kerja seketika (*moment*) ialah jika jangka waktu rele mulai saati rele arusnya pick up sampai selesainya kerja rele sangat singkat (20-100 ms), yaitu tanpa penundaan waktu. Rele ini umumnya dikombinasikan dengan rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu (*definite time*) atau waktu terbalik (*inverse time*).

Gambar 2.8 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika^[11]

b. Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite Time*)

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu tertentu ialah jika jangka waktu mulai rele arus pick up sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan nilai tertentu dan tidak tergantung dari besarnya arus yang menggerakkan.

Gambar 2.9 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu^[12]

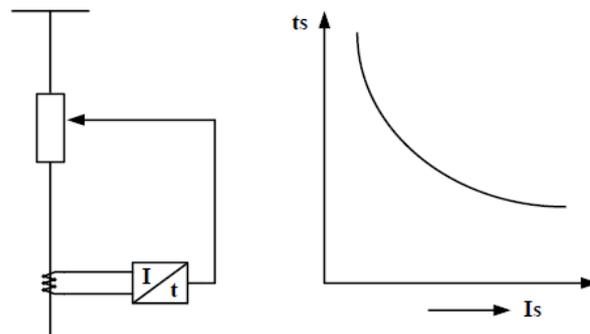
^[11]Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Cetakan Kedua. Palembang: Unsri. Hal 53

^[12]Ibid. Hal 54



c. Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (*Inverse Time*)

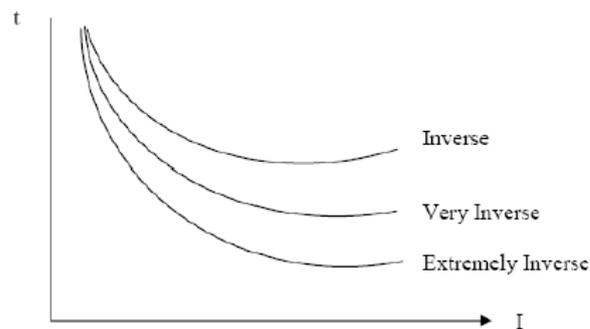
Rele dengan karakteristik waktu terbalik adalah jika jangka waktu mulai rele arus pick up sampai selesainya kerja rele diperpanjang dengan besarnya nilai yang berbanding terbalik dengan arus yang menggerakkan.



Gambar 2.10 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Terbalik^[13]

Karakteristik waktu rele arus lebih waktu terbalik dibedakan dalam tiga kelompok :

- Berbanding terbalik (*inverse*)
- Sangat berbanding terbalik (*very inverse*)
- Sangat berbanding terbalik sekali (*extremcly inverse*)



Gambar 2.11 Perbandingan Terbalik dari Waktu dan Arus^[14]

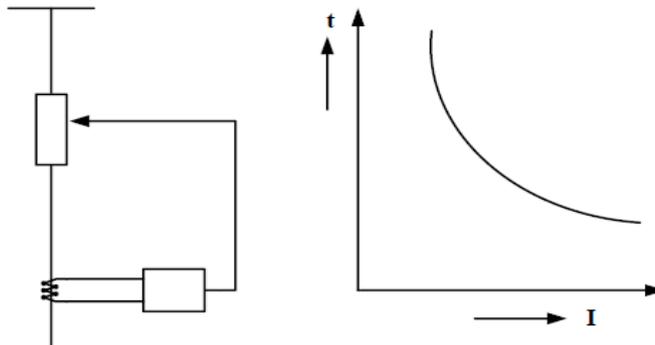
^[13]Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Cetakan Kedua. Palembang: Unsri. Hal 55

^[14]Ibid. Hal 55



d. Rele Arus Lebih *Inverse Definite Minimum Time*

Rele arus lebih dengan karakteristik *inverse definite minimum time* (IDMT) ialah jika jangka waktu rele arus mulai pick up sampai selesainya kerja rele mempunyai sifat waktu terbalik untuk nilai arus yang kecil setelah rele pick up.



Gambar 2.12 Rele Arus Lebih *Inverse Definite Minimum Time*^[15]

Rele arus lebih dengan karakteristik waktu arus tertentu, berbanding terbalik dan IDMT dapat dikombinasi dengan rele arus lebih dengan karakteristik seketika.

2.4.3 Pengamanan Pada Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)

Pada Rele arus lebih memiliki 2 jenis pengamanan yang berbeda antara lain:

1. Pengamanan hubung singkat fasa.

Rele mendeteksi arus fasa. Oleh karena itu, disebut pula “Rele fasa”. Karena pada Rele tersebut dialiri oleh arus fasa, maka settingnya (I_s) harus lebih besar dari arus beban maksimum. Ditetapkan $I_s = 1,2 \times I_n$ (I_n = arus nominal peralatan terlemah).

^[15] Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Cetakan Kedua. Palembang: Unsri. Hal 56



2. Pengamanan hubung tanah

Arus gangguan satu fasa tanah ada kemungkinan lebih kecil dari arus beban, ini disebabkan karena salah satu atau dari kedua hal berikut: Gangguan tanah ini melalui tahanan gangguan yang masih cukup tinggi. Pentanahan netral sistemnya melalui impedansi/tahanan yang tinggi, atau bahkan tidak ditanahkan Dalam hal demikian, rele pengaman hubung singkat (Rele fasa) tidak dapat mendeteksi gangguan tanah tersebut. Supaya rele sensitive terhadap gangguan tersebut dan tidak salah kerja oleh arus beban, maka rele dipasang tidak pada kawat fasa melainkan kawat netral pada sekunder trafo arusnya. Dengan demikian rele ini dialiri oleh arus netralnya, berdasarkan komponen simetrisnya arus netral adalah jumlah dari arus ketiga fasanya. Arus urutan nol dirangkaian primernya baru dapat mengalir jika terdapat jalan kembali melalui tanah (melalui kawat netral).

2.4.4 Penyetelan Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)

1. Perhitungan Koordinasi Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)

Hasil perhitungan menentukan arus nominal, pada tahap selanjutnya dipergunakan untuk menentukan nilai setelan arus lebih, terutama nilai setelan Tms (*Time Multiple Setting*) dari relay arus lebih (*Over Current Relay*) dari jenis inverse.

Di samping itu setelah nilai setelan relai didapatkan, nilai-nilai arus yang diasumsikan dipakai untuk memeriksa kerja rele arus lebih (*Over Current Relay*) apakah masih dapat dinilai selektif atau nilai setelan harus diubah ke nilai lain yang memberikan kerja relai yang lebih selektif atau didapatkan kerja selektifitas yang optimum (relai bekerja tidak terlalu lama tetapi menghasilkan selektifitas yang baik)

Penentuan setting rele arus lebih pada generator dengan urutan :

a. Menghitung arus nominal pada generator :

$$I_n = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3} \cdot V_{nom}} \dots\dots\dots(2.1)$$



Keterangan :

Snom = Daya nominal Generator

Vnom = Tegangan nominal Generator

- Kemudian menentukan arus maksimal pada generator

$$I_{maks} = F_k \times I_n \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

- Rasio CT ditentukan dari perbandingan sisi primer dan sekunder CT

$$\text{Rasio CT} = \frac{\text{Primer}}{\text{sekunder}} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

- Kemudian menentukan setting arus

$$I_{set} = I_{maks} \times \frac{1}{\text{Rasio CT}} \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

b. Mencari reaktansi trafo dalam satuan per unit (pu):

$$X_{tr} = \text{impedansi} \left(\frac{\text{Daya dasar}}{\text{Daya Rating}} \right) \left(\frac{\text{Tegangan dasar}}{\text{Tegangan Rating}} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

c. Menentukan arus gangguan

$$I_f = \frac{E_{a1}}{Z_1} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

d. Menentukan setting waktu sesuai dengan karakteristik rele arus lebih *normally inverse* yaitu terlihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Konstanta Karakteristik rele arus lebih

No	Deskripsi	K	C	α
1	Definit time	-	0 - 100	-
2	Standart inverse	0,14	0	0,02
3	Very inverse	13,5	0	1
4	Extremely inverse	80	0	2
5	Long time inverse	120	0	1



Maka setting waktunya :

$$t = \frac{K \times Tms}{\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}}\right)^\alpha - 1} \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan :

- t = waktu setelan *Over Current Relay* (OCR)
 Tms = Setelan Waktu/*Time Multiple Setting*
 I_{fault} = Arus gangguan (Ampere)
 I_{set} = Arus Setting OCR (Ampere)
 K = Konstanta standar invers (0,14)

2.5 Software Etap

ETAP (Electric Transient and Analysis Program) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, online untuk pengelolaan data real-time atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara real-time. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. Analisa tenaga listrik yang dapat dilakukan ETAP antara lain :

- a. Analisa aliran daya
- b. Analisa hubung singkat
- c. Arc Flash Analysis
- d. Analisa kestabilan transien, dll.

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.

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.



Gambar 2.13 Elemen standar ANSI

Beberapa elemen yang digunakan dalam suatu diagram saluran tunggal adalah :

a. Generator

Merupakan mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tenaga listrik.



Gambar 2.14 Simbol generator pada ETAP

b. Transformator

Berfungsi untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan dengan rasio tertentu sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga listrik.



Gambar 2.15 Simbol transformator pada ETAP

c. Pemutus Rangkaian

Merupakan sebuah saklar otomatis yang dirancang untuk melindungi sebuah rangkaian listrik dari kerusakan yang disebabkan oleh kelebihan beban atau hubungan pendek.



Gambar 2.16 Simbol pemutus rangkaian pada ETAP

d. Beban

Di ETAP terdapat dua macam beban, yaitu beban statis dan beban dinamis.



Gambar 2.17 Simbol beban statis pada ETAP



Politeknik Negeri sriwijaya
