



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum ^[1]

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.

Adapun jenis gangguan dan masalah-masalah yang terdapat pada generator-generator antara lain sebagai berikut : ^[4]

1. Gangguan Internal

- a. Gangguan fasa atau gangguan tanah pada kumparan stator dan komponen jaringan lain terkait.
- b. Gangguan tanah pada kumparan rotor generator dan hilangnya sumber penguatan.

2. Sistem gangguan dan kendala operasi

- a. Kehilangan sumber penggerak primer (*prime-mover*), dimana generator bisa berubah menjadi motor. Frekuensi merupakan parameter yang menyebabkan terjadinya keadaan tersebut karena pada saat torsi yang dihasilkan oleh penggerak awal lebih kecil dari torsi yang dibutuhkan untuk menjaga agar kecepatan rotornya berada pada kecepatan proporsional menyebabkan rendahnya input daya dari penggerak awal sehingga generator yang fungsinya mensuplai daya aktif akan berubah fungsi menjadi motor yaitu menyerap daya aktif. Keadaan inilah yang disebut dengan *motoring*.

^[1]Daryanto. 2006. *Pengetahuan Teknik Listrik*. Cetakan Kelima. Jakarta: Bumi Aksara. Hal. 90

^[4]Pandjaitan, Bonar. 2012. *Praktik-Praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Andi Offset. Hal. 356-357



- b. Penguatan berlebihan atau *over* eksitasi ditanggulangi dengan relai 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 relai yang digunakan untuk 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. Relai frekuensi pada sistem PLTU besar.
- g. Gangguan yang tidak tertanggulangi ditangani dengan relai impedansi dan relai arus lebih yang kerjanya dikendalikan oleh tegangan (*voltage controlled time over current*).
- h. Relai 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 relai 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.

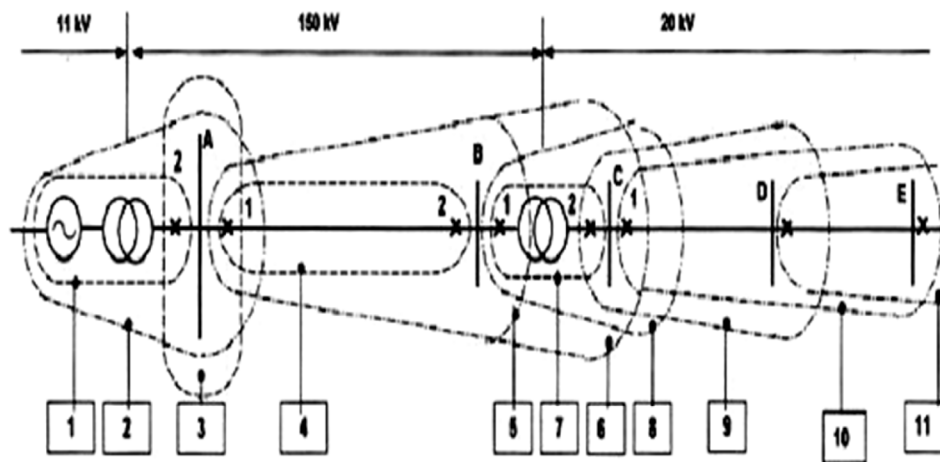


2.2 Sistem Proteksi^[8]

Sistem proteksi adalah suatu sistem pengamanan terhadap peralatan listrik, yang diakibatkan adanya gangguan teknis, gangguan alam, kesalahan operasi, dan penyebab yang lainnya.

2.2.1 Pembagian Daerah Proteksi

Suatu sistem tenaga listrik dibagi ke dalam seksi-seksi yang dibatasi oleh PMT. Tiap seksi memiliki relai pengaman dan memiliki daerah pengamanan (*Zone of Protection*). Bila terjadi gangguan, maka relai akan bekerja mendeteksi gangguan dan PMT akan trip. Gambar 2.1 berikut ini dapat menjelaskan tentang konsep pembagian daerah proteksi.



Gambar 2.1 Pembagian Daerah Proteksi Pada Sistem Tenaga Listrik (Suprianto, 2015)

Keterangan :

1. Overall Differential Relay

Pengaman utama Generator – Trafo

⁸Suprianto. 2015. *Sistem Proteksi*. (<http://blog.unnes.ac.id/antosupri/sistem-proteksi>, diakses 8 Juni 2016).



2. *Over Current Relay*

Pengaman cadangan lokal Generator – Trafo

Pengaman cadangan jauh Bus A

3. Pengaman Bus

Pengaman utama Bus A

4. *Distance Relay Zone I* dan PLC di A1

Pengaman utama saluran A-B

5. *Distance Relay Zone II* di A1

Pengaman utama Bus B

Pengaman cadangan jauh sebagian Trafo di B

6. *Distance Relay Zone III* di A1

Pengaman cadangan jauh Trafo di B sampai ke Bus C

7. *Differential* Trafo

Pengaman utama Trafo

8. *Over Current Relay* di sisi 150 KV

Pengaman cadangan local Trafo

Pengaman cadangan jauh Bus C

9. *Over Current Relay* di sisi 20 KV

Pengaman utama Bus C

Pengaman cadangan jauh saluran C-D

10. *Over Current Relay* di C1

Pengaman utama saluran C-D

Pengaman cadangan jauh saluran D-E

11. *Over Current Relay* di D

Pengaman utama saluran D-E

Pengaman cadangan jauh seksi berikutnya.



Pada gambar 2.1 di atas 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 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.

2.2.2 Pengelompokan Sistem Proteksi

Berdasarkan daerah pengamanannya sistem proteksi dibedakan menjadi :

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

2.2.3 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.

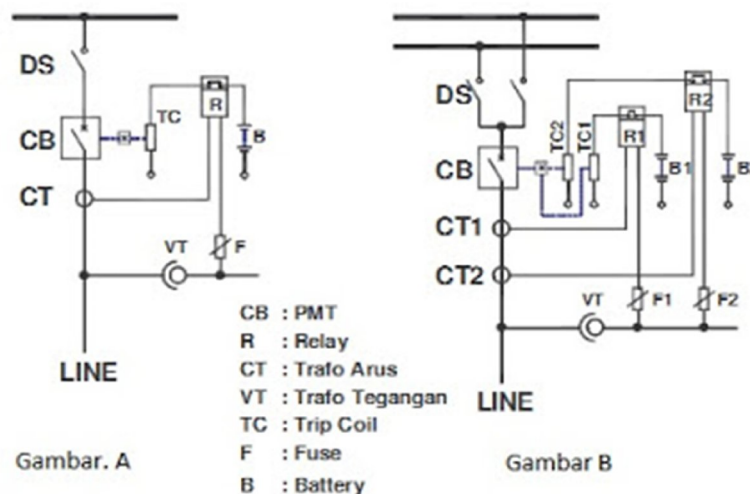


2.2.4 Komponen Peralatan Proteksi

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

- Relay Proteksi : Sebagai elemen perasa yang mendeteksi adanya gangguan atau keadaan abnormal lainnya (*fault detection*).
- Pemutus tenaga (PMT) : Sebagai pemutus arus gangguan di dalam sirkuit tenaga untuk melepaskan bagian sistem yang terganggu.
- Transformator ukur
 - Trafo Arus : Meneruskan arus ke sirkuit relay.
 - Trafo Tegangan : Meneruskan tegangan ke sirkuit relay
- Battery (Aki) : Sebagai sumber tenaga untuk mengetrip PMT dan catu daya untuk relay (relay digital / relay statik) dan relay bantu (*auxiliary relay*).

Hubungan antara komponen-komponen proteksi sebagai suatu sistem proteksi yang sederhana dapat dilihat pada Gambar A untuk sistem tegangan menengah (TM) atau tegangan tinggi (TT), dan Gambar B untuk sistem tegangan ekstra tinggi (TET) yang menggunakan proteksi dobel (*duplicate*).



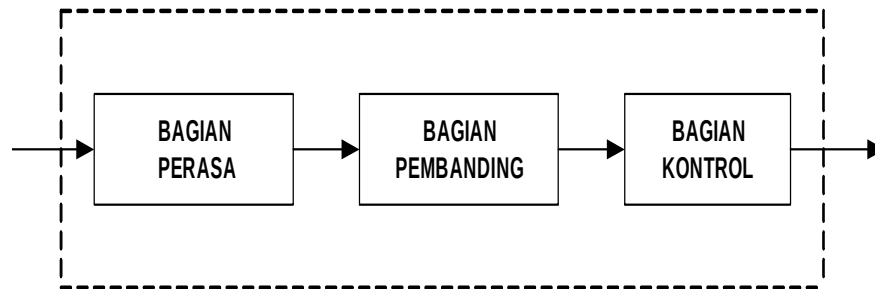
Gambar 2.2 Hubungan Komponen Proteksi Pada Suatu Sistem Proteksi (Suprianto, 2015)



2.2.5 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 dilokalisasi dan dihilangkan sebelum menimbulkan akibat yang lebih luas.

Relay proteksi umumnya mempunyai tiga bagian umum yang bekerja saling terkait untuk memutuskan arus gangguan. Ketiga bagian umum tersebut adalah sebagai berikut : ^[6]



Gambar 2.3 Bagian Umum Suatu Relay Proteksi (Samaulah, 2004 : 70)

a. Bagian perasa (*Sensing Element*)

Pada bagian ini, perubahan dari besaran ukur yang dihasilkan selanjutnya diteruskan ke bagian pembanding.

b. Bagian Pembanding (*Comparison Element*)

Pada bagian ini akan membandingkan dan menentukan apakah besaran ukur itu masih dalam keadaan normal atau tidak.

c. Bagian Kontrol (*Control Element*)

Pada bagian ini pembukaan *circuit breaker* (PMT) atau pemberian tanda diatur dan dilaksanakan.

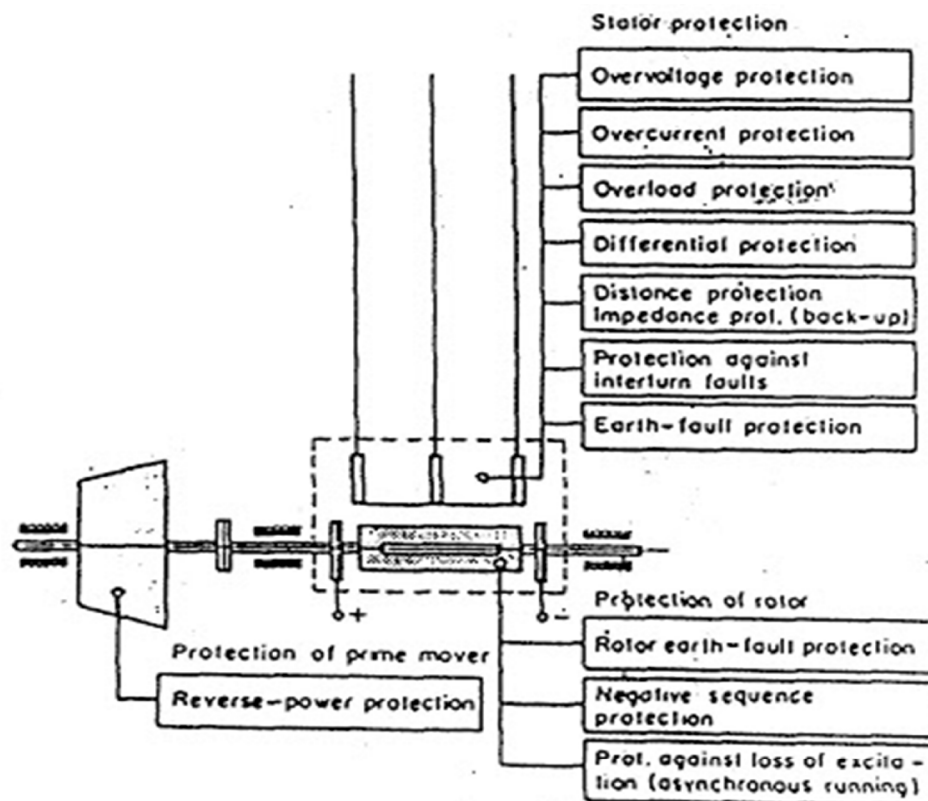
^[6]Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Cetakan Kedua. Palembang: Unsri. Hal. 70



Adapun relay-relay yang digunakan dalam sistem proteksi adalah :

2.2.5.1 Relay Proteksi Pada Generator^[5]

Terdapat beberapa macam relay yang umum digunakan sebagai pengaman listrik pada generator. Adapun penempatan peralatan pengaman listrik pada generator secara umum adalah sebagai berikut :



Gambar 2.4 Penempatan Peralatan Pengaman Listrik Pada Generator (Prast, 2011)

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

^[5]Prast, Eko. 2011. *Generator Electrical Protection System*. (<http://projects87.blogspot.co.id/2009/02/generator-electrical-protection-relay.html>, diakses 22 Januari 2016).



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.

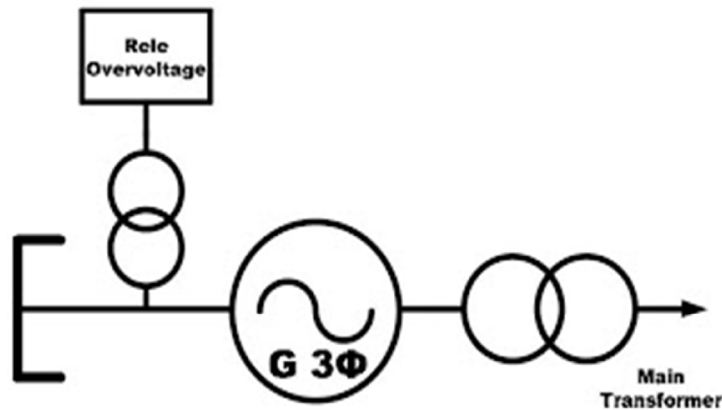
Arus hubung singkat yang terjadi di sekitar titik netral relatif kecil sehingga sulit untuk dideteksi oleh relay differensial. Dengan dipasang transformator tegangan, arus yang kecil tersebut akan mengalir dan menginduksikan tegangan pada sisi sekunder transformator. Untuk mengatasi hal tersebut digunakan 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 2.5 *Single Line Diagram* Relay Tegangan Lebih
Pada Generator (Prast, 2011)

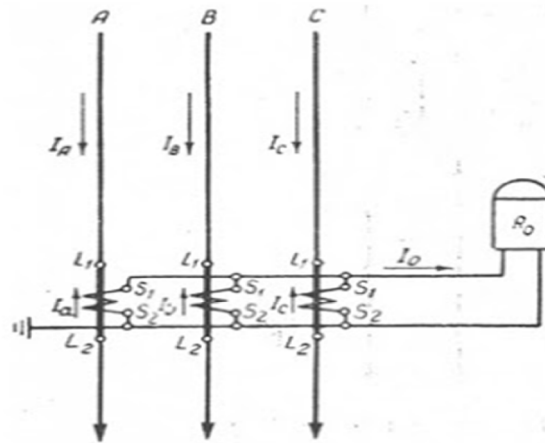
2. Relay Gangguan Stator Hubung Tanah (*Stator Earth Fault Relay*)

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.

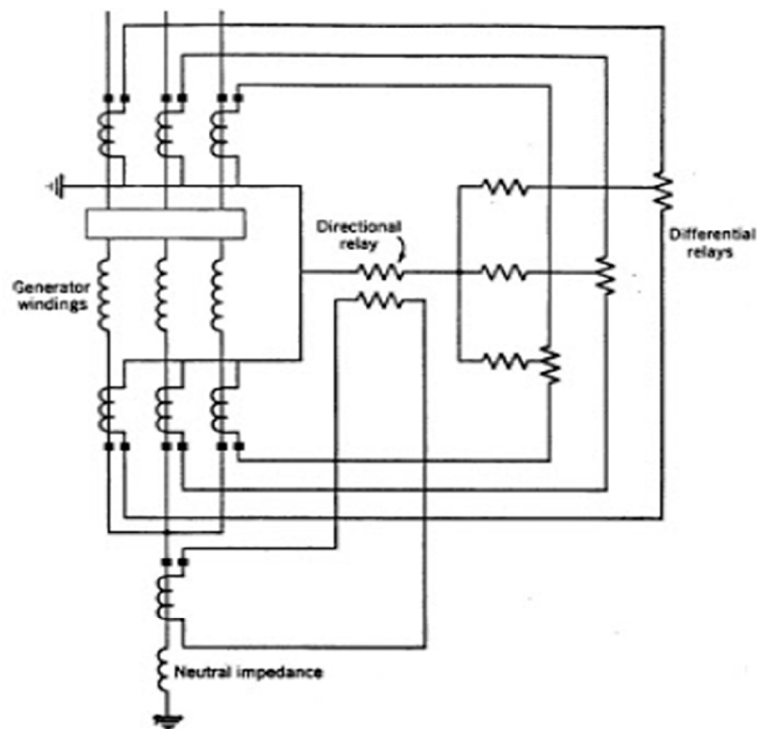
Relay ini akan mendeteksi gangguan hubung tanah yang terjadi pada sirkuit yang terhubung dengan sirkuit stator dari generator. Untuk membatasi pendeteksian gangguan hubung tanah yang terjadi pada stator generator saja dipakai relay hubung tanah terbatas, dimana jumlah arus dari 3 fasa tersebut dijumlah 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 2.6 *Single Line Diagram* Relay Gangguan Stator
Hubung Tanah (Prast, 2011)

Sedangkan *single line diagram* relay gangguan stator hubung tanah terbatas adalah sebagai berikut :



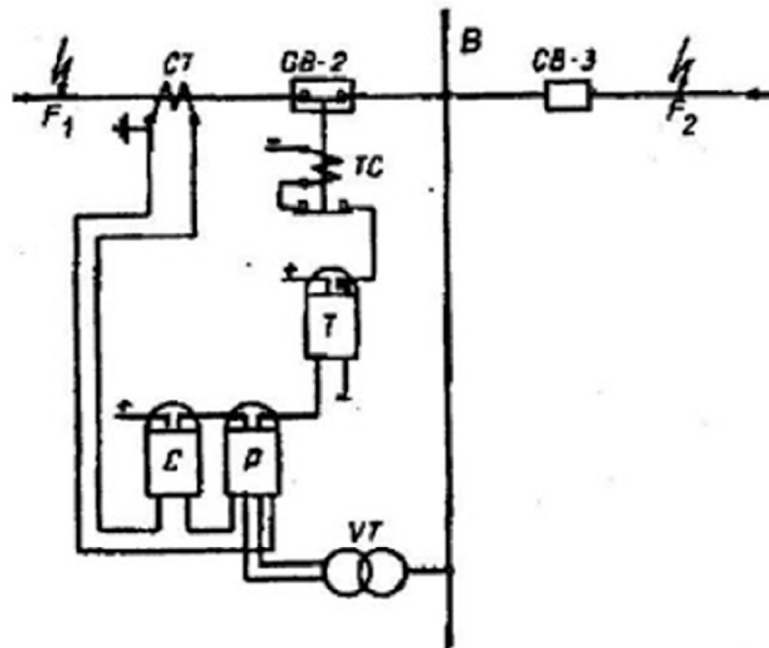
Gambar 2.7 *Single Line Diagram* Relay Gangguan Stator
Hubung Tanah Terbatas (Prast, 2011)



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.

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 pengaman di turbin gagal bekerja. Adapun *single line diagram* relay daya balik adalah sebagai berikut :



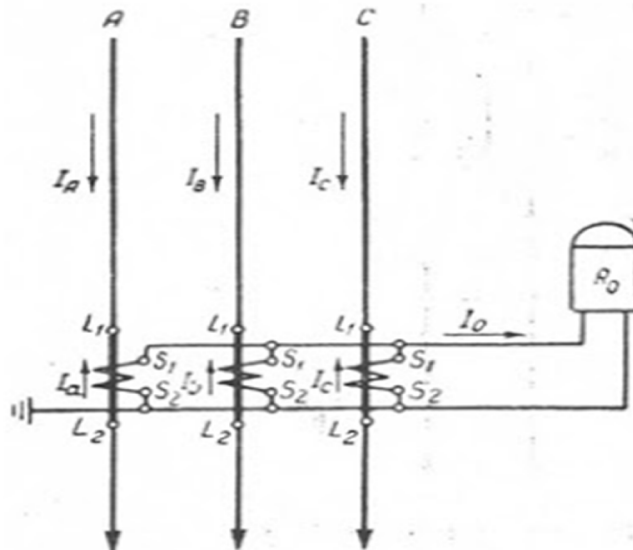
Gambar 2.8 *Single Line Diagram* Relay Daya Balik (Prast, 2011)



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 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 2.9 *Single Line Diagram* Relay Gangguan Rotor
Hubung Tanah (Prast, 2011)

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 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

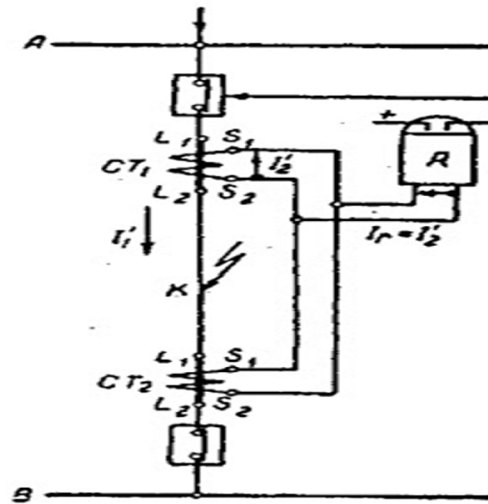
T = waktu

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. Adapun *single line diagram* relay diferensial adalah sebagai berikut :



Gambar 2.10 Single Line Diagram Relay Differensial (Prast, 2011)

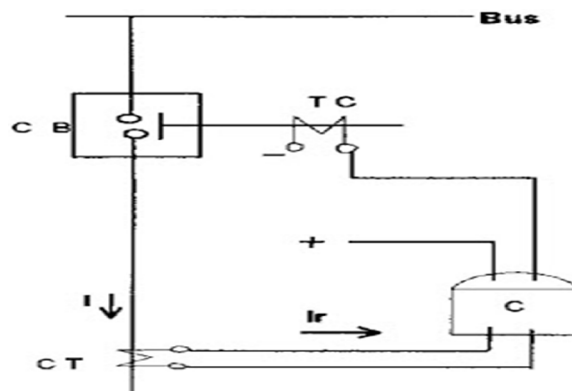
Dalam keadaan normal : $I_r = I_2' - I_2'' = 0$ relay tidak kerja

Gangguan di K : $I_r = I_2'$ relay kerja

Gangguan di bus B : $I_r = I_2' - I_2'' = 0$ relay tidak kerja

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 2.11 Single Line Diagram Relay Arus Lebih (Prast, 2011)



Keterangan : CB = Circuit Breaker

TC = Trip Coil CB

I = Arus yang mengalir pada saluran yang diamankan

CT = Transformator Arus

I_r = Arus yang mengalir pada relay

C = Relay arus lebih

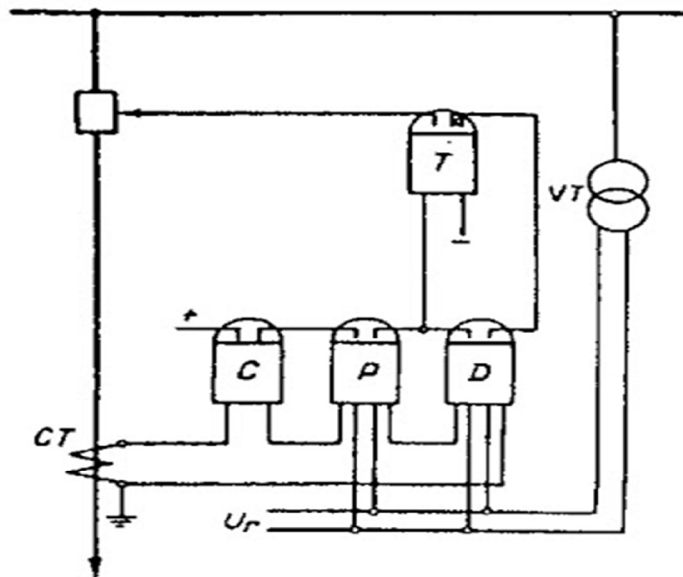
I_p = Arus pick-up dari relay

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 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.



Gambar 2.12 Single Line Diagram Relay Impedansi (Prast, 2011)

Keterangan : C = elemen starting

P = power directional

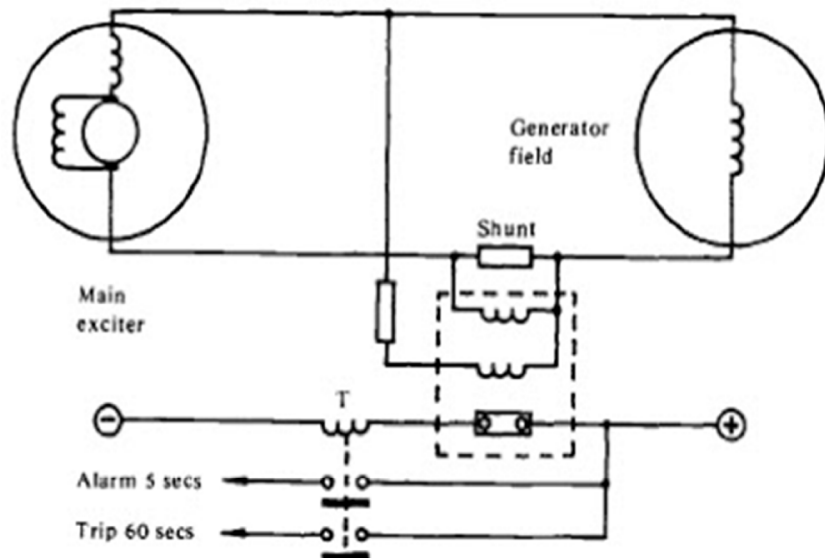
D = elemen/relay jarak

ratio $U_r/I_r = Z_{\text{fault}}$

Sinyal pada relay tidak tergantung pada arus gangguan, tetapi tergantung jarak dimana gangguan terjadi, berhubungan dengan parameter saluran dimana $Z = f(I)$.

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.

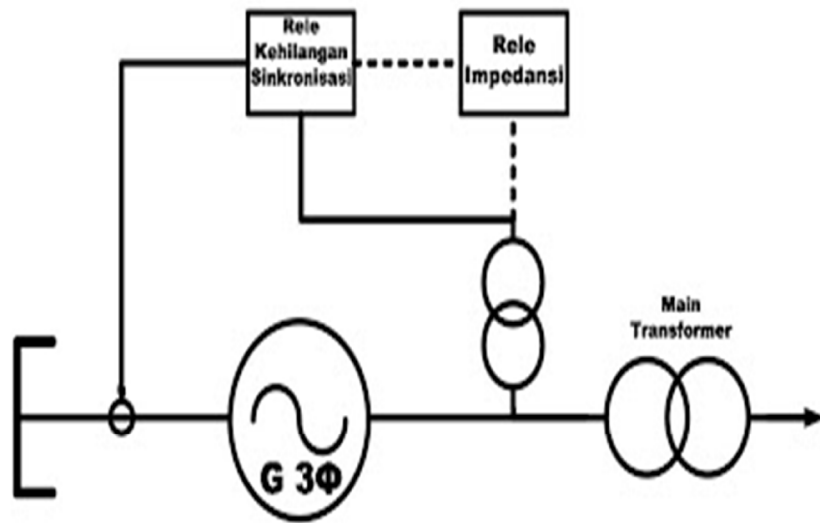


Gambar 2.13 Diagram Relay Kehilangan Medan Penguat Rotor (Prast, 2011)

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). Apabila kondisi sistem akan memasuki impedansi generator maka relay tersebut akan mengaktifkan relay untuk *trip* PMT generator. Relay impedansi merupakan *backup* bagi relay ini.



Gambar 2.14 *Single Line Diagram* Relay Kehilangan Sinkronisasi (Prast, 2011)

2.2.5.2 Relay Proteksi Pada Transformator^[3]

Proteksi transformator penaik tegangan generator sudah tercakup dalam proteksi generator. Apabila dalam suatu pusat listrik terdapat transformator antar rel, maka transformator semacam ini umumnya mempunyai proteksi yang meliputi :

1. Relay Arus Lebih di sisi primer dan sisi sekunder

Relay ini berfungsi melindungi transformator terhadap arus lebih yang dapat terjadi karena :

- Pembebanan yang berlebihan.
- Ada gangguan hubung singkat antar fasa diluar maupun didalam transformator.

2. Relay Hubung Tanah

Relay ini berfungsi melindungi transformator terhadap gangguan hubung tanah yang terjadi di dalam maupun di luar transformator. Gangguan hubung tanah adalah gangguan yang paling banyak terjadi. Relay hubung tanah pada prinsipnya

^[3]Marsudi, Djiteng. 2011. *Pembangkitan Energi Listrik*. Edisi Kedua. Jakarta: Erlangga. Hal. 40



adalah relay yang mendeteksi adanya arus urutan nol karena gangguan hubungan tanah menghasilkan arus urutan nol.

3. Relay Differensial

Relay ini berfungsi melindungi transformator terhadap gangguan dari dalam (internal) transformator tersebut. Apabila terjadi gangguan dalam transformator, maka timbul selisih antara arus yang masuk dan keluar dari transformator bersangkutan dan selisih arus inilah yang mengoperasikan relay differensial ini. Relay differensial transformator pada prinsipnya sama dengan relay differensial generator.

4. Relay Hubung Tanah Terbatas

Relay ini berfungsi melindungi transformator terhadap gangguan hubungan tanah yang terjadi dalam transformator. Prinsip kerjanya hampir sama dengan relay differensial tetapi yang dideteksi adalah selisih antara arus urutan nol yang masuk dan yang keluar dari transformator, mengingat bahwa gangguan hubungan tanah menghasilkan arus urutan nol.

5. Relay Buchholz

Relay ini mendeteksi terjadinya gelembung-gelembung gas dalam transformator. Apabila terjadi gelembung gas yang banyak dalam transformator (yang menandakan terjadinya loncatan busur listrik yang cukup banyak), maka relay ini bekerja dan men-*trip* pemutus tenaga (PMT) baik di sisi primer maupun sekunder.

6. Relay Suhu

Relay suhu ini mengukur suhu kumparan transformator. Cara kerja dan fungsinya serupa dengan relay suhu pada generator. Pada suhu tertentu relay ini akan membunyikan alarm. Jika suhu kumparan transformator terus naik, maka relay ini kemudian men-*trip* PMT transformator di sisi primer dan sekunder.

7. Relay Tekanan Mendadak

Relay ini fungsinya sama dengan relay Buchholz, hanya saja yang dideteksi adalah tekanan gas dalam transformator yang naik secara mendadak.



8. Relay Tangki Tanah

Karena bagian-bagian logam (misalnya inti kumparan) dan transformator ditanahkan melalui tangki transformator, maka relay tangki tanah yang mendeteksi arus yang mengalir antara tangki dan tanah sesungguhnya juga merupakan relay gangguan hubung tanah.

9. Relay Arus Urutan Negatif

Apabila salah satu kawat fasa putus atau lepas kontak, maka timbul arus urutan negatif yang dapat dideteksi oleh relay arus urutan negatif ini.

2.2.5.3 Relay Proteksi Pada Transmisi ^[6]

Sistem proteksi saluran transmisi ada dua jenis, yaitu : Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT). Adapun relay proteksi yang terdapat pada jaringan transmisi (SUTT/SKTT) adalah sebagai berikut :

1. Relay Jarak

Relay ini berfungsi untuk memproteksi SUTT terhadap gangguan antar fasa maupun gangguan hubung tanah.

2. Relay Differensial Pilot Kabel

Relay ini berfungsi untuk memproteksi SKTT dan juga SUTT yang pendek terhadap gangguan antar fasa, maupun gangguan hubung singkat.

3. Relay Arus Lebih Berarah

Relay ini berfungsi untuk memproteksi SUTT terhadap gangguan antar fasa dan hanya bekerja pada satu arah saja. Karena relay ini dapat membedakan arah arus gangguan.

4. Relay Arus Lebih

Relay ini berfungsi untuk memproteksi SUTT/SKTT terhadap gangguan

^[6]Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Cetakan Kedua. Palembang: Unsri. Hal. 102-103



antar fasa, maupun gangguan hubung tanah dan relay ini berfungsi sebagai pengaman cadangan bagi SUTT dan SKTT.

5. Relay Gangguan Tanah Berarah

Relay ini berfungsi untuk memproteksi SUTT terhadap gangguan hubung tanah.

6. Relay Gangguan Tanah Selektif

Relay ini berfungsi untuk memproteksi SUTT (saluran ganda) terhadap gangguan hubung tanah.

7. Relay Tegangan Lebih

Relay ini berfungsi untuk memproteksi SUTT/SKTT terhadap tegangan lebih.

8. Relay Penutup Balik (*Recloser*)

Relay ini berfungsi untuk menormalkan kembali SUTT akibat gangguan hubung singkat yang temporer.

9. Relay Frekuensi Kurang

Relay ini berfungsi untuk melepas SUTT/SKTT bila terjadi penurunan frekuensi sistem.

2.2.5.4 Relay Proteksi Pada Distribusi ^[6]

Adapun proteksi distribusi memiliki alat pengaman sebagai berikut :

1. Fuse (Sekring)

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

^[6]Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Cetakan Kedua. Palembang: Unsri. Hal. 114-116



2. CB dengan Relay arus lebih

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

3. CB dengan Relay arus tanah dengan arah

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

4. CB dengan Relay arus tanah

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

5. CB dengan Relay *Recloser* atau *Automatic Circuit Recloser* (disingkat ACR atau *Recloser*)

Pengaman pelengkap untuk membebaskan gangguan yang bersifat temporer. Dengan ACR jumlah pemutusan tetap dapat diperkecil 95 % dari gangguan yang bersifat temporer dapat dibebaskan.

6. ACR ke-2 dst

Disamping sebagai pengaman gangguan temporer, juga sebagai pembatas daerah yang padam karena gangguan.

7. Pemisah manual

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

8. AS (*Automatic Sectionalizer*)

Alat pemutus otomatis untuk mengurangi/membatasi daerah yang padam karena gangguan.

9. Indikator gangguan

Untuk mempercepat lokalisasi gangguan.



2.2.6 Fungsi Relay Proteksi

Fungsi relay proteksi pada suatu sistem tenaga listrik antara lain : ^[2]

- 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.
- c. Memberitahu operator tentang adanya gangguan dan lokasinya.

Atau dengan kata lain fungsi dari suatu sistem proteksi adalah :

- a. Meminimalisasikan lamanya gangguan.
- b. Mengurangi kerusakan yang mungkin timbul pada alat atau sistem.
- c. Melokalisasi meluasnya gangguan pada sistem.
- d. Pengamanan terhadap manusia.

2.2.7 Syarat Relay Proteksi

Relay proteksi dalam fungsinya sebagai pengaman memiliki beberapa syarat yang harus dipenuhi, yaitu : ^[7]

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 :

²Hidayatullah, Nur. 2011. *Fungsi Relay / Rele Proteksi*. (<http://blog.umy.ac.id/hidayat/2011/11/08/fungsi-relay-rele-proteksi>, diakses 12 Maret 2016).

⁷Saputra, Bayu. 2012. *Syarat Relay Pengaman*. (<http://bayu93saputra.blogspot.co.id/2012/10/syarat-relay-pengaman.html>, diakses 13 Maret 2016).

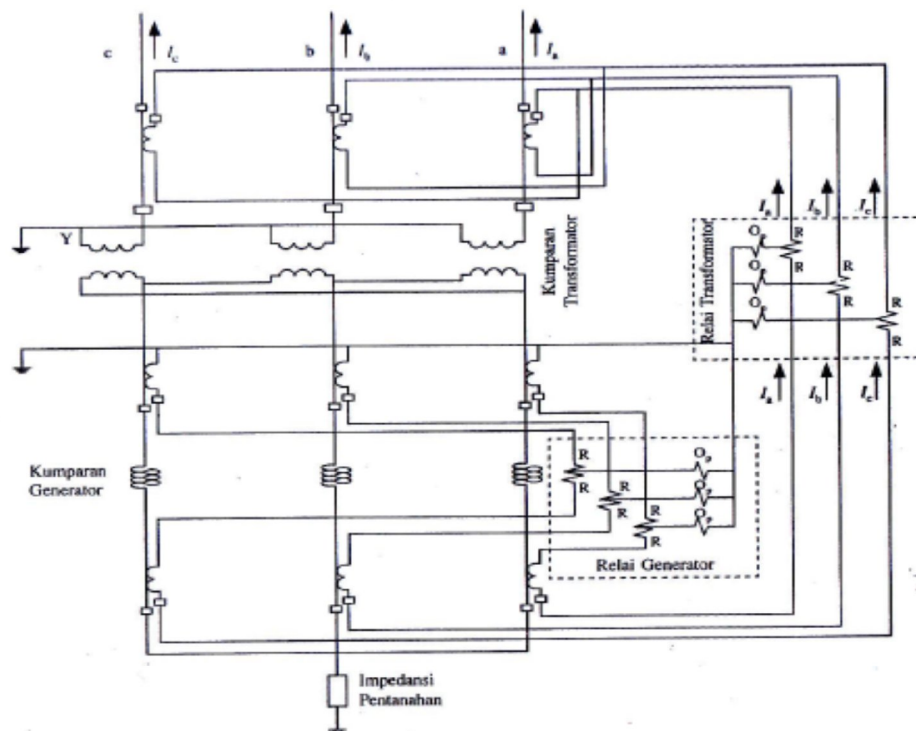


- *Dependability*, adalah kemampuan suatu sistem relay untuk beroperasi dengan baik dan benar. Pada prinsipnya pengaman harus dapat diandalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), tidak boleh gagal bekerja. Dengan kata lain *dependability*-nya harus tinggi.
 - *Security*, 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 ($t_{\text{kerja}} = t_{\text{relay}} + t_{\text{pemutus daya}}$). 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.



2.3 Relay Differensial ^[3]

Fungsi dari relay differensial adalah melindungi lilitan stator generator terhadap gangguan antar fasa kumparan stator. Walaupun relay differensial bekerja dan men-*trip* PMT utama generator serta PMT sirkuit penguat, sesungguhnya terjadi kerusakan pada kumparan stator generator. Namun dengan bekerjanya relay differensial diharapkan dapat mencegah terjadinya kerusakan yang lebih berat pada kumparan stator generator. Kumparan *restraint* pada relay differensial dimaksudkan untuk menyetel kepekaan relay, karena pasti ada selisih antara arus yang diukur oleh trafo arus di sisi masuk dan di sisi keluar kumparan stator generator sebagai akibat kesalahan trafo arus.



Gambar 2.15 Proteksi Differensial Gangguan Antar Fasa Generator
Beserta Trafo Block (Marsudi, 2011 : 339)

^[3]Marsudi, Djiteng. 2011. *Pembangkitan Energi Listrik*. Edisi Kedua. Jakarta: Erlangga.
Hal. 338-339



Pada generator yang besar, di atas 5 MVA, umumnya generator dihubungkan langsung dengan transformator penaik tegangan (*block transformer*) dan dari segi proteksi dengan relay differensial dijadikan satu kesatuan seperti diperlihatkan pada Gambar 2.15. Pada Gambar 2.15 terlihat relay differensial yang memproteksi kumparan stator generator dan yang memproteksi kumparan transformator. Perlu diperhatikan bahwa kumparan stator generator dihubungkan dalam hubungan Y yang ditanahkan melalui sebuah impedansi sedangkan hubungan kumparan transformator adalah $\Delta - Y$. Tetapi hubungan kumparan trafo arus di sisi generator adalah Δ sedangkan hubungan trafo arus di sisi kumparan Δ dari transformator adalah Y. Hal ini diperlukan untuk menetralkan pergeseran fasa yang terjadi di sisi primer agar tidak terjadi kesalahan dalam pengukuran di sisi sekunder. Gangguan-gangguan yang tidak dapat dideteksi oleh relay differensial adalah :

- a. Gangguan hubung singkat antar lilitan satu fasa.
- b. Gangguan hubung tanah apabila titik netral generator tidak ditanahkan.
- c. Gangguan berupa konduktor kumparan putus atau sambungannya longgar atau lepas.
- d. Gangguan antar fasa yang terjadi ditengah-tengah masing-masing kumparan fasa, gangguan yang demikian dapat tidak menimbulkan selisih $I_1 - I_2$ pada Gambar 2.15.

2.3.1 Fungsi Relay Differensial Pada Generator

Untuk menjaga kehandalan dari kerja generator, maka dilengkapi dengan peralatan-peralatan proteksi. Peralatan proteksi generator harus betul-betul mencegah kerusakan generator, karena kerusakan tersebut selain akan menelan biaya perbaikan yang mahal juga sangat mengganggu operasi sistem pembangkit tenaga listrik. Proteksi generator juga harus mempertimbangkan pula proteksi bagi mesin penggerak, karena generator digerakkan oleh mesin penggerak.

Gangguan pada generator tidak dapat dihindari, namun gangguan dapat dilokalisasi dan dihilangkan sebelum menimbulkan akibat yang lebih luas.

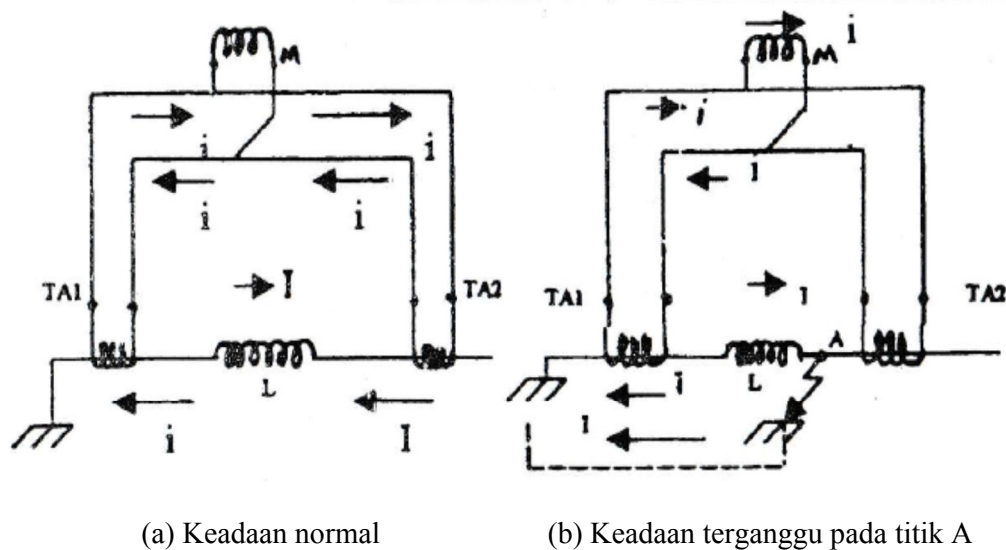
Fungsi relay differensial pada generator adalah sebagai berikut :



1. Merasakan dan melokalisir bagian yang terganggu pada generator
2. Mengurangi kerusakan pada generator
3. Meminimalisasikan lamanya gangguan pada generator
4. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian yang tidak terganggu
5. Memperkecil bahaya pada jaringan distribusi dari generator tersebut
6. Mengurangi kerusakan isolasi kawat kumparan
7. Mengurangi gangguan terhadap hubung singkat antar arus.
8. Mengurangi gangguan terhadap hubung singkat satu fasa ketanah
9. Pengamanan terhadap manusia.

2.3.2 Cara Kerja Relay Differensial

Relay differensial adalah suatu alat proteksi yang sangat cepat bekerjanya dan sangat selektif berdasarkan keseimbangan (balance) yaitu perbandingan arus yang mengalir pada kedua sisi generator melalui suatu perantara yaitu trafo arus (CT).



Gambar 2.16 Cara Kerja Relay Differensial (Samaulah, 2004 : 99)

Adapun cara kerja relay differensial adalah arus stator dimuka kumparan adalah sama dengan arus setelah kumparan. Pada Gambar 2.16 (a) terlihat satu kumparan stator yang dilengkapi dengan dua transformator arus, yaitu TA1 dan



TA2. Bilamana kumparan tidak terganggu maka mengalir arus I baik melalui TA1 maupun TA2, sedangkan kumparan M yang terletak ditengah-tengah rangkaian antara kedua transformator arus tidak dilalui arus listrik.

Misalkan bahwa pada titik A pada Gambar 2.16 (b) terjadi gangguan berupa hubungan tanah, aliran listrik I yang melalui kumparan stator akan melewati TA1, akan tetapi tidak melewati TA2 karena pada titik A arus I akan melalui tempat gangguan ke tanah dan kembali ke stator melalui titik bintang. Karenanya kumparan M yang dalam keadaan normal tidak akan dilalui listrik, pada keadaan hubungan singkat dengan tanah akan dilewati arus listrik I dan mengaktifkan relay differensial, yang kemudian akan bekerja dan menggerakkan pemutus daya. ^[6]

^[6]Samaulah, Hazairin. 2004. *Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Cetakan Kedua. Palembang: Unsri. Hal. 99-100