

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Generator^[3]

Generator ialah suatu alat yang dapat mengubah tenaga mekanik menjadi energi listrik. Tenaga mekanik bisa berasal dari panas, air, uap, dll. Energi listrik yang dihasilkan oleh generator bisa berupa Listrik AC (listrik bolak-balik) maupun DC (listrik searah). Hal tersebut tergantung dari konstruksi generator yang dipakai oleh pembangkit tenaga listrik. Generator berhubungan erat dengan hukum faraday. Berikut hasil dari hukum faraday “ bahwa apabila sepotong kawat penghantar listrik berada dalam medan magnet berubah-ubah, maka dalam kawat tersebut akan terbentuk Gaya Gerak Listrik ”.Bila sebatang logam panjang berada di dalam medan listrik, (E_0), maka akan menyebabkan elektron bebas akan bergerak ke kiri yang akhirnya akan menimbulkan medan listrik induksi yang sama kuat dengan medan listrik (Gambar 1) sehingga kuat medan total menjadi nol. Dalam hal ini potensial kedua ujung logam menjadi sama besar dan aliran elektron akan berhenti, maka kedua ujung logam terdapat muatan induksi. Agar aliran elektron bebas berjalan terus maka harus muatan induksi ini terus diambil, sehingga pada logam tidak timbul medan listrik induksi. Dan sumber ggl (misal baterai) yang dapat membuat beda potensial kedua ujung logam harganya tetap, sehingga aliran electron tetap berjalan. Adapun jenis gangguan dan masalah yang terdapat pada generator antara lain sebagai berikut:

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.

^[3]Wiratsongko Tito. 2013. *Pengertian Generator, Generator, Listrik*. (<https://catatansebelumwisuda.blogspot.com/2013/05/pengertian-generator.html>, diakses 18 April 2021).

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

2. Sistem gangguan dan kendala operasi

- a. Kesalahan operasi seperti pemasukkan generator ke jaringan secara tidak sinkron.
- b. Generator berbeban lebih sehingga mengalami panas berlebihan
- c. Kehilangan sinkronisasi atau *out of step*.
- d. Kehilangan output trafo tegangan atau regulator yang dapat menyebabkan gangguan terhadap sistem kontrol.
- e. Relay tegangan lebih
- f. 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 mengubah fungsi menjadi motor yaitu menyerap daya aktif kan berubah fungsi menjadi motor yaitu menyerap daya aktif. Keadaan inilah yang disebut dengan motoring.
- g. Penguatan berlebihan atau over eksitasi ditanggulangi dengan relay proteksi tegangan (*Volt*) atau *Hertz*.
- h. Arus *unbalance* seperti mengalirnya arus urutan negatif, karena salah satu kutub 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.
- i. Ayunan (osilasi) sub-sinkronisasi. Gangguan ini pada umumnya bisa timbul akibat pengaruh luar seperti pengaruh impedansi

reaktor yang dihubung seri dengan transmisi yang dapat mempengaruhi frekuensi dasar sistem pembangkit. Bila terjadi secara signifikan maka torsi mekanis yang timbul karena ayunan sub-sinkronisasi ini dapat merusak poros generator

- j. Kehilangan output trafo tegangan atau regulator yang dapat menyebabkan gangguan terhadap sistem kontrol dan yang diinterprestasikan 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^[5]

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. Fungsi Proteksi^[5]

Fungsi Proteksi adalah memisahkan bagian sistem yang terganggu sehingga bagian sistem lainnya dapat terus beroperasi dengan cara sbb :

1. Mendeteksi adanya gangguan atau keadaan abnormal lainnya pada bagian sistem yang diamankannya (fault detection).
2. Melepaskan bagian sistem yang terganggu (fault clearing).
3. Memberitahu operator adanya gangguan dan lokasinya (annunciation)

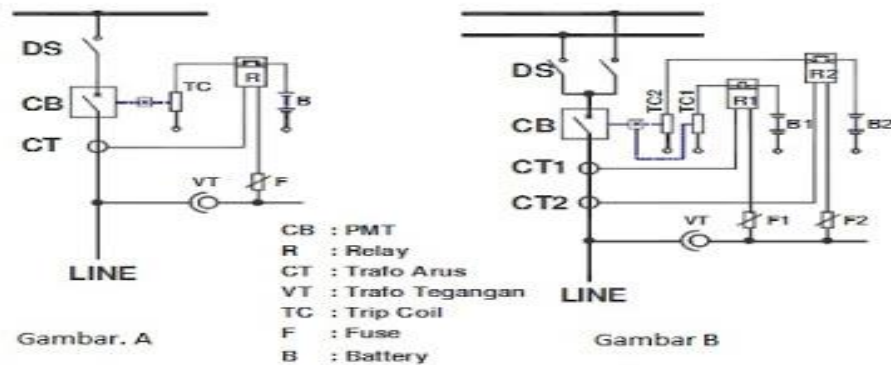
^[5]Suprianto.2015. *Sistem Proteksi*. (<http://blog.unnes.ac.id/antosupri/sistem-proteksi/>, diakses 18 April 2021).

2.2.2. Komponen Peralatan Proteksi^[6]

Pengaman-lebur (fuse) adalah contoh alat pengaman yang paling sederhana yang jika dipilih dengan tepat dapat memenuhi fungsi tersebut. Untuk pengamanan bagian sistem yang lebih penting, digunakan sistem proteksi yang terdiri dari seperangkat peralatan proteksi yang komponen-komponen terpentingnya adalah :

1. *Relay Proteksi* : sebagai elemen perasa yang mendeteksi adanya gangguan atau keadaan abnormal lainnya (fault detection).
2. *Pemutus Tenaga (PMT)* : sebagai pemutus arus gangguan di dalam sirkuit tenaga untuk melepaskan bagian sistem yang terganggu. Dengan perkataan lain “membebaskan sistem dari gangguan” (fault clearing). PMT menerima perintah (sinyal trip) dari relay proteksi untuk membuka.
3. *Transformator ukur* :
Trafo Arus dan Trafo Tegangan : untuk meneruskan arus dan/atau tegangan dengan perbandingan tertentu dari sirkuit primer (sirkuit tenaga) ke sirkuit sekunder (sirkuit relay) dan memisahkan sirkuit sekunder dari sirkuit primernya.
4. *Battery (aki)* : sebagai sumber tenaga untuk mengetrip PMT dan catu daya untuk relay (relay digital/ relay statik) dan relay bantu (auxiliary relay).

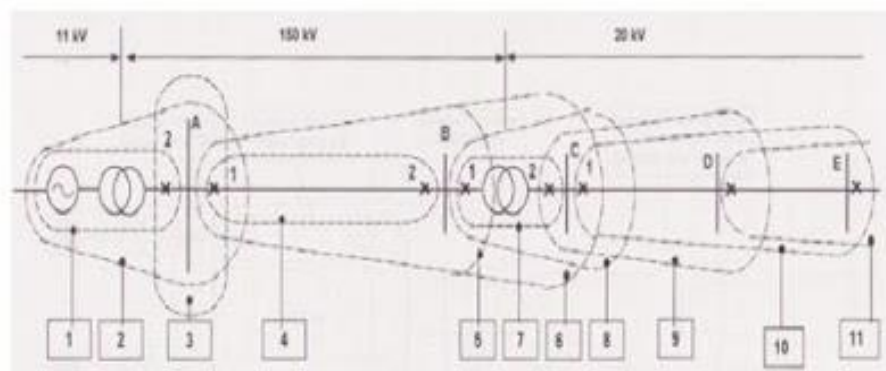
Hubungan antara komponen-komponen proteksi sebagai suatu sistem proteksi yang sederhana dapat dilihat pada Gbr. A untuk sistem tegangan menengah (TM) atau tegangan tinggi (TT), dan Gbr. B , untuk sistem tegangan ekstra tinggi (TET) yang menggunakan proteksi dobel (duplicate).



Gambar 2.1. Hubungan Komponen Proteksi sebagai Suatu Sistem Proteksi yang Sederhana (Suprianto 2015)

2.2.3. Pembagian Daerah Proteksi^[6]

Suatu sistem tenaga listrik dibagi kedalam seksi-seksi yang dibatasi oleh PMT (Pemutus Tenaga). 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. Gambar dibawah ini akan menjelaskan tentang konsep pembagian daerah proteksi.



Gambar 2.2. Pembagian Daerah Proteksi Pada Sistem Tenaga Listrik (Suprianto, 2015)

Keterangan:

1. Overall Diifferential Relay
Pengaman utama Generator – Trafo

2. Over Current Relay
Pengaman cadangan local 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. Diifferential 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 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 system daya disamping dua buah pemutus rangkaian. Setiap pemutus dimasukkan ke dalam dua daerah proteksi berdekatan. Batas setiap daerah menunjukkan bagian system 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 pemadaman.

2.2.4. Pengelompokan Sistem Proteksi^[6]

Berdasarkan daerah pengamanannya sistem proteksi dibedakan menjadi :

- a. Proteksi pada Generator
- b. Proteksi pada Transformator
- c. Proteksi pada Transmisi
- d. Proteksi pada Distribusi

2.2.5. Pembagian Tugas Dalam Sistem Proteksi^[6]

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 atau kegagalan untuk mengatasi gangguan yang terjadi.

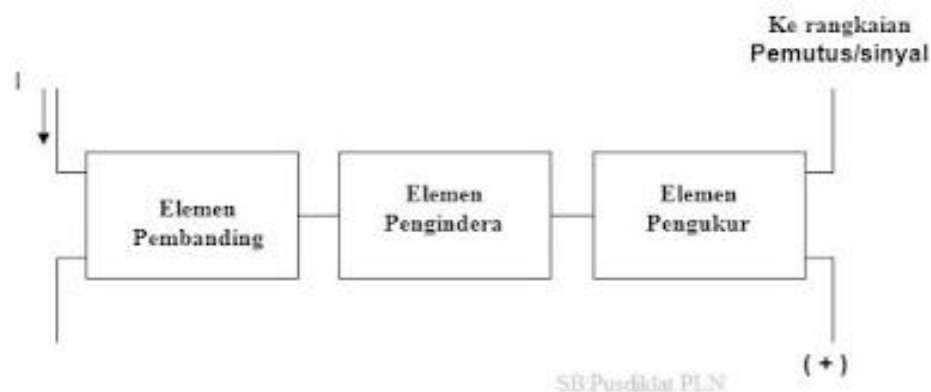
- c. Proteksi tambahan, berfungsi untuk pemakaian pada waktu tertentu, sebagai pembantu proteksi utama pada daerah tertentu yang dibutuhkan

2.2.6. Relay Proteksi^[6]

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.

Didalam Relay Proteksi sendiri terdapat berbagai macam rangkaian yang cukup kompleks (tergantung dari jenis relay proteksi) yang biasanya hanya menggunakan daya yang kecil untuk beroperasi, sehingga tidak mungkin jika relay proteksi ini langsung dihubungkan dengan jaringan yang diamankannya (biasanya bertegangan tinggi). sehingga sebagai sinyal inputannya relay proteksi mengambil dari keluaran trafo instrumen (VT, CT).

Meskipun memiliki berbagai macam sistem didalamnya, namun secara umum relay proteksi memiliki beberapa bagian atau elemen utama, Bagian atau Elemen Utama Relay Proteksi yaitu:^[6]



Gambar 2.3. diagram bagian utama relay proteksi (Sekedar Update 2019)

- a. Elemen Penpengindera, Elemen pengindera berfungsi untuk mengindera atau merasakan bearan-besaran listrik sesuai dengan jesnis relay nya.

Adapun besaran-besaran listrik yang sering ditemui yaitu tegangan, arus, frekuensi, dsb. Elemen ini akan merasakan bagaimana keadaan besaran yang diproteksi, apakah dalam keadaan normal, atau terjadi ketidak normalan. Hasil pembacaan atau penginderaan selanjutnya akan dikirim ke elemen pembanding.

- b.** Elemen Pembanding, Elemen pembanding berfungsi membandingkan besaran-besaran yang dibaca oleh elemen pengindera dengan keadaan yang dianggap normal (standar) sesuai dengan setting yang diberikan. Besaran yang diterima dari elemen pengindera biasanya telah dikonverdivkan menjadi sebuah sinyal berupa besaran arus, yang nantinya besarnya arus akan dibandingkan dengan arus pada keadaan normal berdasarkan arus kerja relay.
- c.** Elemen Pengukur/Penentu, Elemen pengukur berfungsi untuk merespon perubahan secara cepat pada besaran ukurnya ketika terjadi ketidak normalan. Elemen ini juga akan menentukan tindakan apa yang akan segera dilakukan (disebut juga elemen penentu) ketika menerima indikasi ketidak normalan atau gangguan pada jaringan.

Misalnya dengan segera memberikan sinyal kepada PMT untuk bekerja memisahkan rangkaian yang terganggu. Selain PMT sinyal yang dikeluarkan oleh bagain ini juga dapat dimanfaatkan untuk melakuakn tindakan-tindakan lain seperti menyalakan sirine atau lampu rotator tanda bahaya.

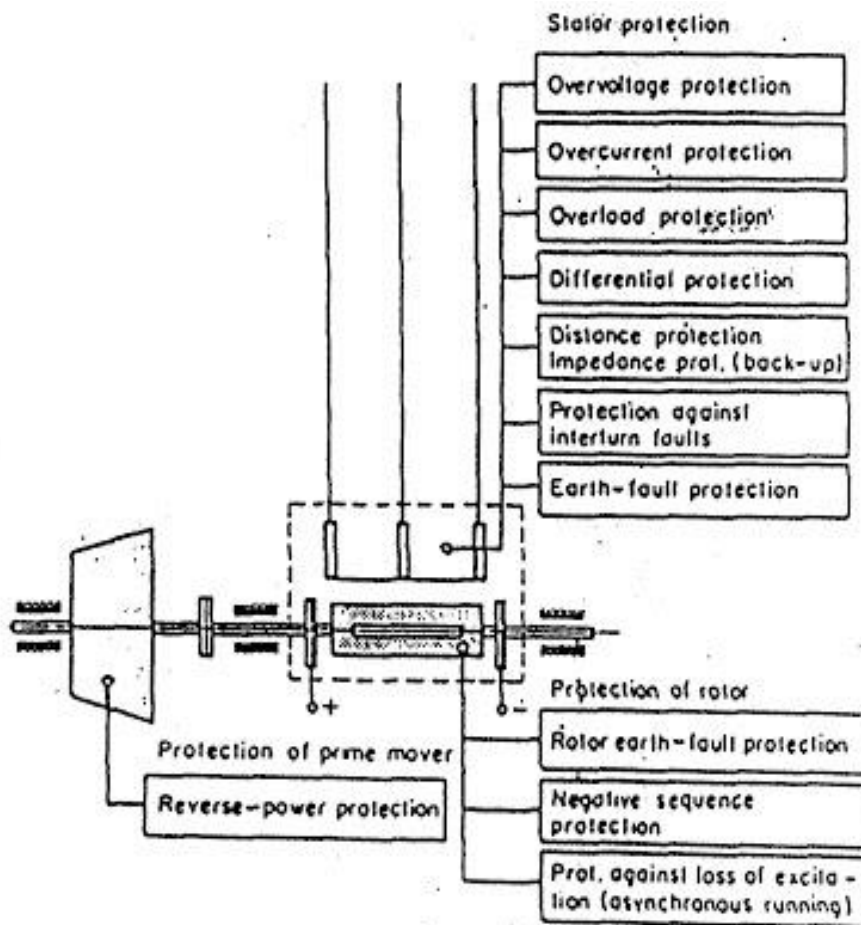
Ketiga bagian atau elemen utama tersebut akan saling berkaitan sehingga membentuk sebuah sistem yang bekerja dengan optimal. adapun dalam bekerja relay proteksi akan dikatakan berfungsi dengan baik apabila memenuhi syarat-syarat sebagai relay proteksi.

^[6] Sekedar Update. 2019. Electrical / Engineering / Sistem Proteksi / Pengertian Relay Proteksi dan Komponen (Elemen) Utamanya | Sekedar Update. (<https://www.sekedarupdate.com/2019/07/pengertian-relay-proteksi-elemen-komponen-utama.html>, diakses 25 April 2021).

Adapun relay-relay yang digunakan dalam sistem proteksi adalah

2.2.7. Relay Proteksi Pada Generator^[7]

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)

^[7]Prast, Eko. 2011. *Generator Electrical Protection System*. (<http://projects87.blogspot.com/2009/02/generator-electrical-protection-relay.html>, diakses 25 April 2021).

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

1. Relay Tegangan Lebih (Overvoltage 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.

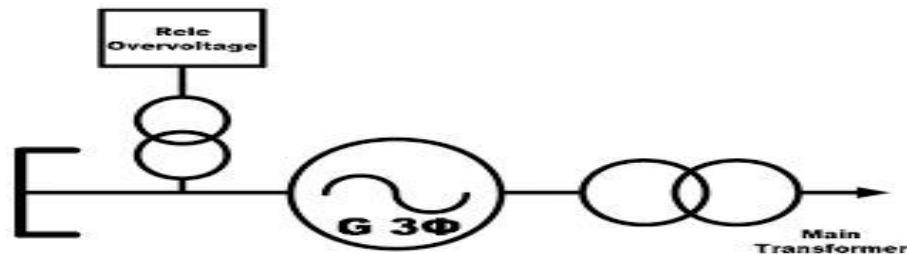
Tegangan yang muncul pada sisi sekunder transformator tegangan akan membuat relay tegangan berada pada kondisi mendeteksi apabila perubahan tegangan melebihi nilai settingnya dan generator akan trip. Rangkaian ini sangat baik karena dapat membatasi aliran arus nol yang mengalir ke dalam generator ketika 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 overvoltage adalah sebagai berikut:

1. Kegagalan AVR.
2. Kesalahan operasi sistem eksitasi.
3. Pelepasan beban saat eksitasi dikontrol secara manual.

4. Pemisahan generator dari sistem saat islanding.

Adapun single line diagram rele gangguan tegangan lebih adalah sebagai berikut :



Gambar 2.5. Single Line Diagram Relay Tegangan Lebih pada Generator (Prast, 2011)

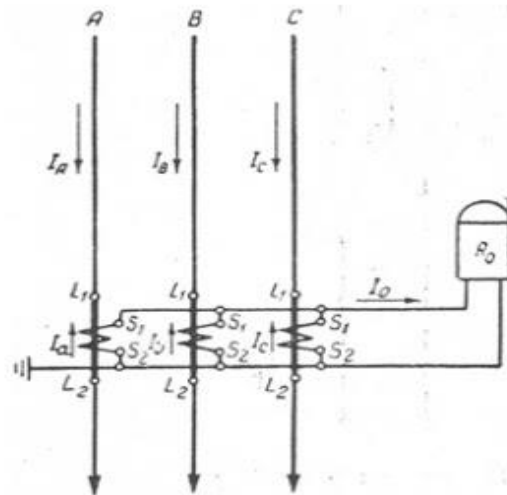
2. Relay Gangguan Stator Hubung Tanah (Stator Earth Fault Relay)

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

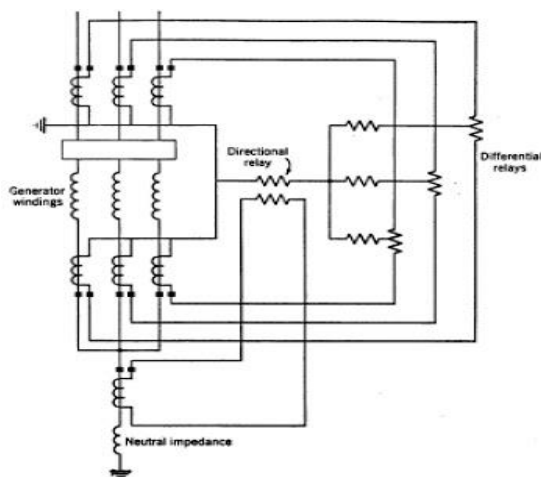
Relay ini akan mendeteksi gangguan hubung tanah yang terjadi pada sirkuit yang terhubung dengan sirkuit stator dari generator. Untuk membatasi pendeteksian gangguan hubung tanah yang terjadi pada stator generator saja dipakai rele hubung tanah terbatas, dimana jumlah arus dari 3 fasa tersebut dijumlah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

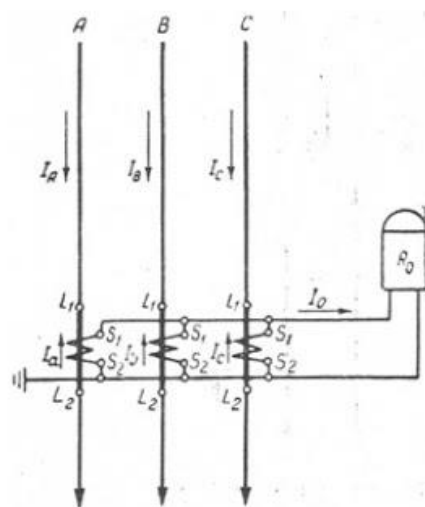


Gambar 2.7. Single Line Diagram Relay Gangguan Stator Hubung Tanah Terbatas (Prast,2011)

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_{ao}}, 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 overheat. 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

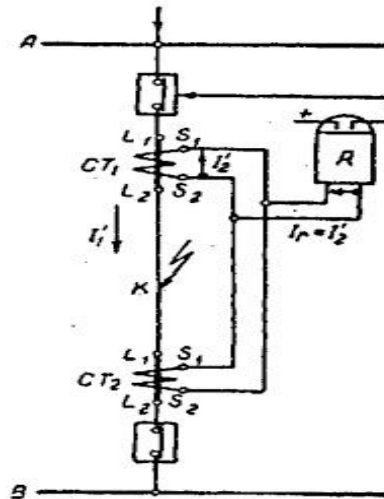
K = karakteristik kerja

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 dikareakan 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 rele 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 Diferensial (Prast, 2011)

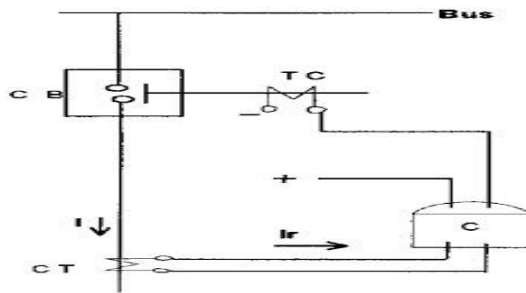
Dalam keadaan normal $I_r = I_1' - I_2'' = 0$ relay tidak kerja

Gangguan di K $I_r = I_1' > 0$ relay kerja

Gangguan di bus B $I_r = I_1' - I_2'' = 0$ relay tidak kerja

7. Relay Arus Lebih (Overcurrent 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

Ir = Arus yang mengalir pada relay

C = Relay arus lebih

Ip = Arus pick-up dari relay

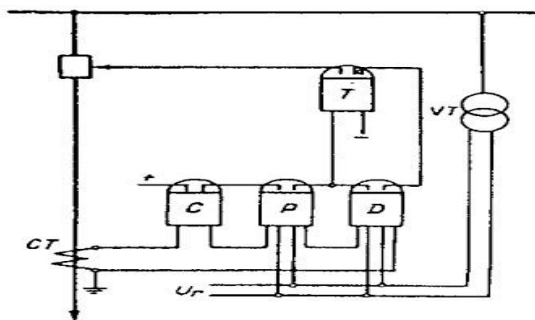
8. Relay Gangguan Frekuensi (Frequency Fault Relay)

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 rele 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

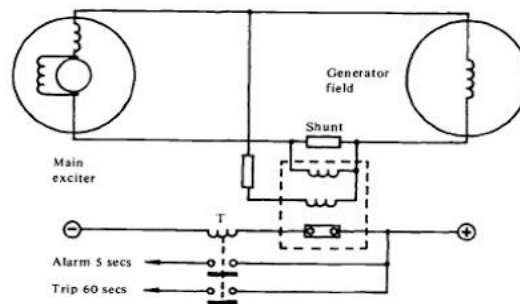
D = elemen/rele jarak

ratio $U_r/I_r = Z_{fault}$

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.



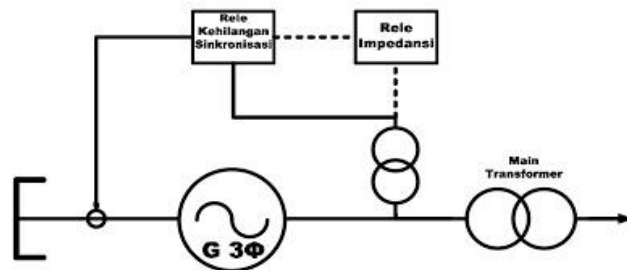
Gambar 2.13. Diagram Relay Kehilangan Medan Penguat Rotor (Prast, 2011)

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 rele lepas sinkron. Rele ini mendeteksi besar impedansi (arus dan tegangan sistem). Apabila kondisi sistem akan memasuki impedansi generator maka rele tersebut akan mengaktifkan rele untuk trip PMT generator. Relay impedansi merupakan backup bagi relay ini.



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

2.2.8. Relay Proteksi Pada Transformator^[8]

Fungsi transformator ialah memindahkan energi dari satu tegangan ke tegangan yang lain secara magnetic. Pada operasinya trafo tenaga diproteksi dari gangguan yang mungkin terjadi pada trafo. Peralatan relay proteksi pada trafo antara lain adalah sebagai berikut :

1. Relay Buchollz

berfungsi untuk mengamankan trafo dari gangguan internal trafo yang menimbulkan gas dimana gas tersebut timbul akibat adanya hubung singkat di dalam trafo atau akibat busur di dalam trafo.

^[8]Rakhman Alief. 2020. Relai-proteksi-pada-transformator. (<https://rakhman.net/electrical-id/relay-proteksi-pada-transformator/>, diakses 25 April 2021).

Cara kerja adalah gas yang timbul di dalam trafo akan mengalir melalui pipa dan tekanan gas ini akan mengerjakan relay dalam 2 tahap, yaitu :

1. Mengerjakan alarm (bucholz 1st) pada kontak bagian atas.
2. Mengerjakan perintah trip ke PMT pada kontak bagian bawah.

Analisa gas yang timbul pada relay bucholz adalah sebagai berikut :

1. H₂ dan C₂H₂ menunjukkan adanya busur api pada minyak antara bagian-bagian konstruksi
2. H₂, C₂H₂ dan CH₄ menunjukkan adanya busur api sehingga isolasi phenol terurai, misalnya terjadi gangguan pada sadapan
3. H₂, C₂H₄ dan C₂H₂ menunjukkan adanya pemanasan pada sambungan inti.
4. H₂, C₂H₂, CO₂ dan C₃H₄ menunjukkan adanya pemanasan setempat pada lilitan inti.

2. Relay Jansen

adalah relay yang digunakan untuk mengamankan trafo dari gangguan di dalam tap changer yang menimbulkan gas. Relay ini dipasang pada pipa yang menuju konservator.

Cara kerja pada prinsipnya sama dengan relay bucholz akan tetapi hanya punya satu kontak tripping.

3. Relay Sudden Pressure

digunakan untuk melindungi trafo dari gangguan tekanan berlebih yang disebabkan oleh gangguan di dalam trafo.

Terdapat 2 jenis yaitu :

Type Membran, Berupa plat tipis yang di desain sedemikian rupa yang akan pecah apabila menerima tekanan melebihi desainnya. Membrane ini hanya sekali pakai sehingga jika pecah harus diganti yang baru.

Type Valve, Berupa suatu katup yang ditekan oleh sebuah pegas yang di desain sedemikian rupa sehingga apabila terjadi tekanan di dalam trafo melebihi tekanan pegas maka akan membuka dan membuang tekanan keluar bersama sama sebagian minyak.

Apabila tekanan di dalam trafo sudah turun atau lebih kecil dari tekanan pegas maka valve akan menutup kembali.

4. Relay Suhu

berfungsi untuk melindungi trafo dari temperature yang berlebih. Apabila temperature trafo melebihi batas yang ditentukan maka relay suhu akan bekerja. Besar kenaikan suhu adalah sebanding dengan factor pembebanan dan suhu udara luar trafo.

Relay suhu dibedakan menjadi dua jenis, yaitu relay suhu winding (belitan) dan relay suhu Oil (Minyak trafo) yang bekerja pada dua tahap:

Tahap 1 : mengerjakan alarm

Tahap 2 : memerintahkan trip ke PMT

5. Relay Arus lebih

berfungsi untuk melindungi trafo dari gangguan hubung singkat antar fasa di dalam maupun di luar daerah pengamanan trafo

bekerja dengan prinsip instant, yaitu relay tersebut akan bekerja seketika ketika terdeteksi adanya arus gangguan. Sehingga dengan cepat dapat mengamankan trafo dan peralatan lain dari kerusakan. Relay arus lebih biasanya di beri kode relay 51 dan dipasang pada sisi primer dan sisi sekunder trafo.

6. Relay Tangki Tanah

Berfungsi untuk mengamankan trafo terhadap hubung singkat antara fasa dengan tangki trafo dan titik netral trafo yang di tanahkan.

Relay tangki tanah biasa diberi kode relay 51G dan dipasang dengan skema seperti gambar 6 diatas. Relay ini bekerja jika terjadi kebocoran arus dari belitan ke tangki trafo, arus dari tangki akan mengalir ke tanah dan akan terdeteksi oleh relay arus lebih melalui

CT. Kemudian relay akan mentripan PMT di kedua sisi (primer dan sekunder).

7. Relay Differensial

Fungsi dari relay differensial adalah untuk mengamankan trafo dari gangguan hubung singkat yang terjadi didalam daerah pengamanan trafo relay ini bekerja dengan cara membandingkan arus yang masuk dan arus yang keluar dalam kondisi arah arus I_p dan I_s adalah berlawanan dan mempunyai besar yang sama maka relay differensial tidak dialiri arus. Relay ini bekerja apabila terjadi perbedaan arus antara sisi primer dan sisi sekunder. Perbedaan arus tersebut disebabkan oleh gangguan yang terdapat didaerah pengamanan trafo.

2.2.9. Fungsi Relay Proteksi^[9]

Fungsi relay proteksi pada suatu sistem tenaga listrik antara lain:

- a. Mendeteksi adanya gangguan atau keadaan abnormal lainnya pada bagian sistem yang dinamakannya.
- 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 duatu sistem proteksi adalah:

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

2.2.10. Syarat Relay Proteksi^[9]

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

1. Kepekaan (sensitivity)

Pada prinsipnya rele 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 rele 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 rele untuk beroperasi dengan baik dan benar. Pada prinsipnya pengamanan 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 relai 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 pengamanan dalam keadaan siap kerja (actually in service) dan waktu total operasinya.

3. Selektifitas (selectivity)

Maksudnya pengamanan harus dapat membedakan apakah gangguan terletak di daerah proteksi utama dimana pengamanan harus bekerja cepat atau terletak di luar zona proteksinya dimana pengamanan 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 relai dan waktu kerja pemutus daya. Namun pengamanan

yang baik adalah pengaman yang mampu beroperasi dalam waktu kurang dari 50 ms.

5. Sederhana (Simplicity)

Relai 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.

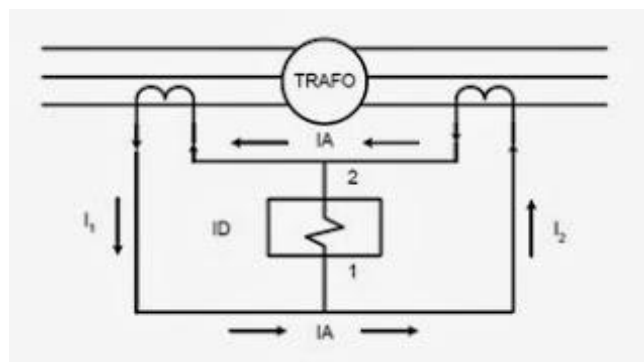
2.3. Relay Differensial^[11]

Relay differensial merupakan suatu relay yang prinsip kerjanya berdasarkan keseimbangan (*balance*), yang membandingkan arus-arus sekunder transformator arus (CT) terpasang pada terminal-terminal peralatan atau instalasi listrik yang diamankan. Penggunaan relay differensial sebagai relay pengaman, antara lain pada generator, transformator daya, bus bar, dan saluran transmisi. Relay differensial digunakan sebagai pengaman utama (*main protection*) pada transformator daya yang berguna untuk mengamankan belitan transformator bila terjadi suatu gangguan. Relay ini sangat selektif dan sistem kerjanya sangat cepat.

^[11]Ahmad. 2014. Dasar-Dasar-Proteksi-STL-(Relay-Differensial).(<http://www.sekedarposting.com/2014/01/dasar-dasar-proteksi-stl-relai-13.html>, diakses 25 April 2021).

2.3.1. Prinsip Kerja Relai Differensial^[11]

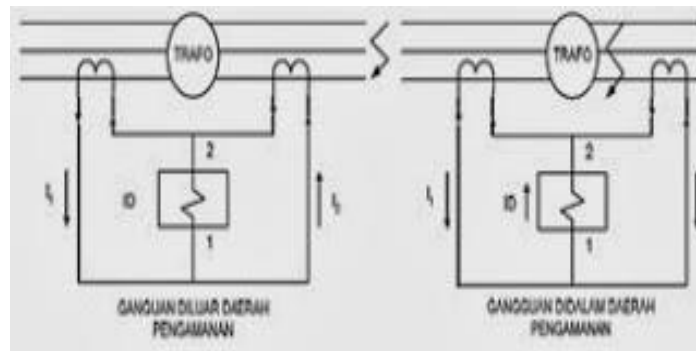
Sebagaimana disebutkan diatas, Relay differensial adalah suatu alat proteksi yang sangat cepat bekerjanya dan sangat selektif berdasarkan keseimbangan (*balance*) yaitu perbandingan arus yang mengalir pada kedua sisi trafo daya melalui suatu perantara yaitu trafo arus (CT). Dalam kondisi normal, arus mengalir melalui peralatan listrik yang diamankan (generator, transformator dan lain-lainnya). Arus-arus sekunder transformator arus, yaitu I_1 dan I_2 bersikulasi melalui jalur IA. Jika relay pengaman dipasang antara terminal 1 dan 2, maka dalam kondisi normal tidak akan ada arus yang mengalir melaluinya. Dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.15. Pengawatan Dasar Relay Differensial (Ahmad, 2014).

Jika terjadi gangguan diluar peralatan listrik peralatan listrik yang diamankan (*external fault*), maka arus yang mengalir akan bertambah besar, akan tetapi sirkulasinya akan tetap sama dengan pada kondisi normal, sehingga relay pengaman tidak akan bekerja untuk gangguan luar tersebut. Jika gangguan terjadi didalam (*internal fault*), maka arah sirkulasi arus disalah satu sisi akan terbalik, menyebabkan keseimbangan pada kondisi normal terganggu, akibatnya arus ID akan mengalir melalui relay pengaman dari terminal 1 menuju ke terminal 2. Selama arus-arus sekunder transformator arus sama besar, maka tidak akan ada arus yang mengalir melalui kumparan kerja (*operating coil*) relay pengaman, tetapi setiap gangguan (antar fasa atau ke tanah) yang mengakibatkan sistem

keseimbangan terganggu, akan menyebabkan arus mengalir melalui *Operating Coil* relay pengaman, maka relai pengaman akan bekerja dan memberikan perintah putus (*tripping*) kepada *circuit breaker* (CB) sehingga peralatan atau instalasi listrik yang terganggu dapat diisolir dari sistem tenaga listrik. Seperti gambar dibawah ini :



Gambar 2.16. Sistem Pengaman Relay Differensial (Ahmad, 2014).

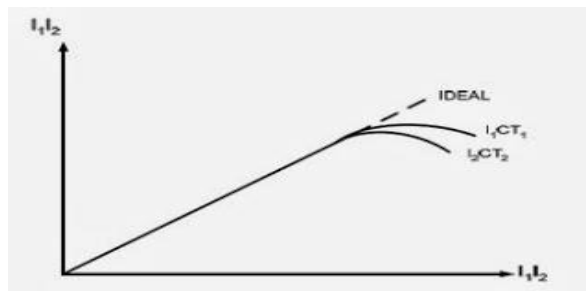
2.3.2. Tinjauan Beberapa Masalah Terhadap Relay Differensial^[11]

1. Karakteristik CT

Relay differensial dalam operasinya bahwa dalam keadaan normal atau terjadi gangguan diluar daerah pengamanannya arus pada relay sama dengan nol. Karena itu kemungkinan salah kerja dari relay differensial dapat terjadi, arus yang dapat menyebabkan relay salah kerja tersebut dinamakan arus ketidakseimbangan. Bila suatu arus yang besar mengalir melalui suatu trafo arus maka arus pada terminal sekunder tidak lagi linear terhadap arus primer. Hal ini disebabkan kejenuhan pada intinya. Pada relay differensial trafo arusnya harus identik, namun kejenuhan intinya tidak dapat sama betul. Hal ini disebabkan perbedaan beban dari masing-masing trafo arus tersebut.

2. Karakteristik Trafo Arus pada relay differensial

Seperti gambar berikut ini :



Gambar 2.17. Karakteristik Trafo Arus (CT) Pada Relay Differensial (Ahmad, 2014)

3. Perubahan Sadapan Berbeban

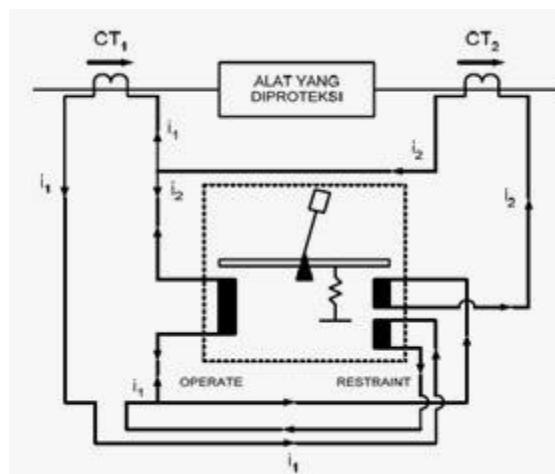
Pada saat ini umumnya transformator sudah dilengkapi dengan pengubah sadapan berbeban dimana tap input dapat dirubah untuk mendapatkan output yang dikehendaki. Penyetelan dari trafo-trafo arus pada transformator daya telah diset pada tegangan nominal dari transformator daya tersebut. Dengan demikian bila terjadi gangguan pada waktu operasi transformator tersebut, maka tegangan pada sisi primernya harus dirubah agar tegangan pada sisi sekundernya tetap. Oleh karena itu harga-harga tap trafo yang telah diset pada tegangan nominalnya tadi tidak akan tepat lagi. Hal tersebutlah yang menyebabkan terjadinya arus ketidak seimbangan yang dapat membuat relay salah kerja.

4. Adanya Arus Serbu Magnetisasi (Magnetising Inrush Current) Pada Trafo

Jika trafo daya dihubungkan kesuatu sumber tenaga (jaringan) maka pada sisi primernya akan terjadi proses transient yaitu menaiknya arus yang dinamakan arus serbu magnetisasi (Magnetising Inrush Current) yang besarnya dapat mencapai 8 sampai 30 kali dari arus beban penuh yang terjadi dalam waktu relative cepat. Peristiwa ini dapat membawa pengaruh terhadap kerja suatu relay kendatipun pada daerah pengamanan tidak terjadi kesalahan.

2.3.3. Relay Differensial Persentase^[11]

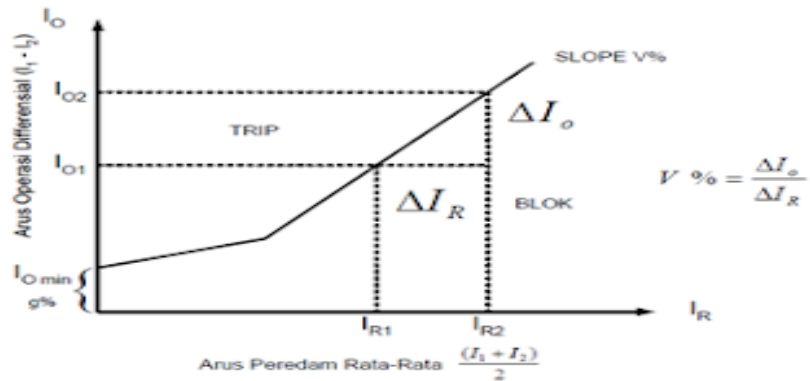
Untuk mengatasi masalah (a) dan (b) diatas, maka relay differensial dilengkapi dengan kumparan kerja dan restraining coil (kumparan penahan) atau lebih dikenal dengan Relay Differensial Persentase (Relay Differensial Bias). Dengan melakukan pembaharuan relay defferensial yang berdasarkan Prinsip Sirkulasi arusnya adalah untuk mengatasi gangguan yang timbul diluar dari pada perbedaan dalam hal ratio terhadap nilai arus hubung singkat External yang tinggi. Relay differensial dengan persentase memiliki Coil (belitan) peredam tambahan yang dihubungkan dengan pilot wire seperti gambar berikut ini :



Gambar 2.18. *Relay Differensial Persentase (Relay Differensial Bias)* (Ahmad, 2014)

Didalam relay ini kumparan kerjanya dihubungkan dengan titik tengah kumparan penahan (peredam), total jumlah impedansi belitan didalam kumparan peredam sama dengan jumlah ampere belitan yang ada pada kedua $\frac{1}{2}$ bagian kumparan yaitu $I_1N/2 + I_2/N$ yang memberikan rata-rata arus peredam sebesar $(I_1 + I_2)/2$ di dalm belitan N. Untuk gangguan luar I_1 dan I_2 semakin besar dan karenanya kopel peredam bertambah besar yang bisa mencegah kesalahan operasi.

Karakteristik operasi dari relay yang demikian diberikan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.19. Karakteristik Operasi Dari Sebuah Relay Differensial (Ahmad, 2014).

Ratio arus peredaman rata-rata dari arus operasi differensial persentasenya bisa ditetapkan, maka relay tersebut dinamakan relay differensial dengan persentase. Relay tersebut juga disebut relay differensial bias, sebab relay ini dilengkapi dengan flux tambahan. Persentase relay differensial bias memiliki karakteristik pick-up yang semakin tinggi. Karena besarnya arus yang lewat semakin bertambah, maka arus peredamannya semakin bertambah.

Untuk mendapatkan nilai arus *setting* Iset pada relay differensial, kita harus mengetahui terlebih dahulu nilai arus nominal dari generator tersebut. Berikut ini adalah rumus untuk nilai arus nominal pada generator :

$$I_{nom} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3}V_{nom}} \dots \dots \dots (3.1)$$

Keterangan:

- I_{nom} : Arus nominal generator
- S_{nom} : Daya nominal generator
- V_{nom} : Tegangan nominal generator

Sedangkan untuk mengetahui nilai arus aktual pada CT adalah sebagai berikut:

$$I_{CT} = I_A / R_{CT} \dots \dots \dots (3.2)$$

Keterangan:

I_{CT} : Arus pada transformator arus

I_A : Arus aktual generator

R_{CT} : Rasio CT