

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator Sinkron

2.1.1 Pengertian Generator Sinkron

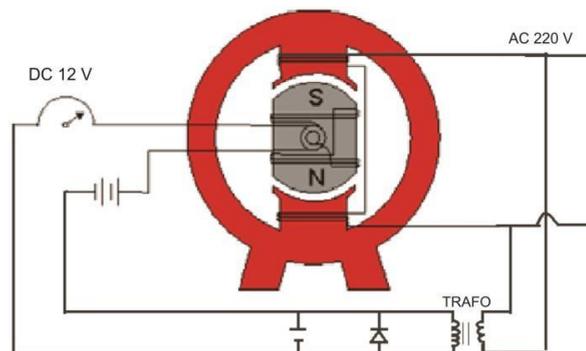
Generator adalah suatu alat yang dapat mengubah tenaga mekanik menjadi energi listrik. Tenaga mekanik bisa berasal dari panas, air, uap, dll.³

Generator sinkron merupakan mesin listrik arus bolak balik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik arus bolak-balik. Energi mekanik diperoleh dari penggerak mula (*prime mover*) yang terkopel dengan rotor generator, sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang melibatkan kumparan rotor dan kumparan stator. Mesin listrik arus bolak-balik ini disebut sinkron karena rotor berputar secara sinkron atau berputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan medan magnet putar.

2.1.2 Konstruksi Generator Sinkron

Secara umum, hampir semua mesin sinkron mempunyai jangkar diam (stator) dan struktur medan berputar (rotor).⁴

Begitu juga dengan generator sinkron yang terdiri dari stator dan rotor. Selain itu generator sinkron juga memiliki celah udara ruang antara stator dan rotor yang berfungsi sebagai tempat terjadinya fluksi atau induksi energi listrik dari rotor ke stator.



Gambar 2. 1 Kontruksi Sederhana Generator Sinkron

³ Sunarlik, W. (2013). *Prinsip Kerja Generator Sinkron*. hal.17

⁴ Sumardjati, P., Yahya, S., & Mashar, A. (2008). *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3*. Jakarta.

2.1.3 Rotor

Rotor adalah bagian yang bergerak pada generator. Fungsinya untuk membangkitkan medan magnet yang kemudian dihasilkannya tegangan dan mengiduksikan tegangan tersebut ke stator. Rotor terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu :

1. *Slip Ring*

Merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor, tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Bagian ini merupakan bagian yang terhubung dengan sumber arus searah yang untuk selanjutnya dialirkan menuju kumparan rotor.

2. Kumparan Rotor

Kumparan rotor adalah bagian yang memiliki peran utama dalam menghasilkan medan magnet. Bagian ini lah yang dialiri arus searah melalui sistem eksitasi tertentu.

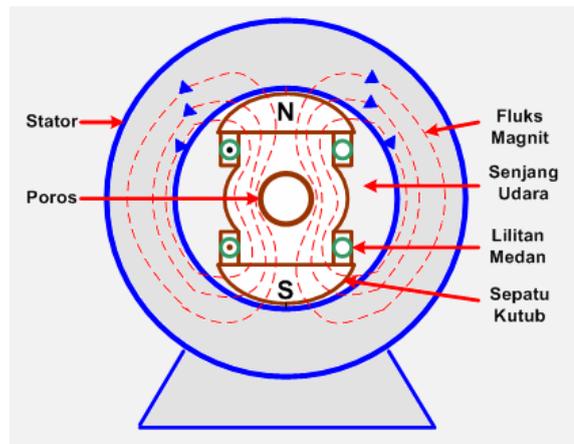
3. Poros Rotor

Poros rotor adalah tempat untuk meletakkan kumpara rotor dan merupakan bagian yang terkopel dengan penggerak mula (*prime mover*).

Generator Sinkron memiliki dua tipe rotor, yaitu :

- 1) Rotor Kutub Menonjol

Rotor tipe ini jumlah kutubnya banyak, kumparan dibelitkan pada tangkai kutub, dimana kutub-kutub diberilaminasi untuk mengurangi panas yang ditimbulkan oleh arus *Eddy*, kumparan-kumparan medannya terdiri dari bilah tembaga persegi. Kutub menonjol ditandai dengan rotor berdiameter besar dan panjang sumbunya pendek. Selain itu jenis kutub *salient pole*, kutub magnetnya menonjol keluar dari permukaan rotor. Belitan-belitan medan dihubung seri. Ketika belitan medan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub yang berlawanan.



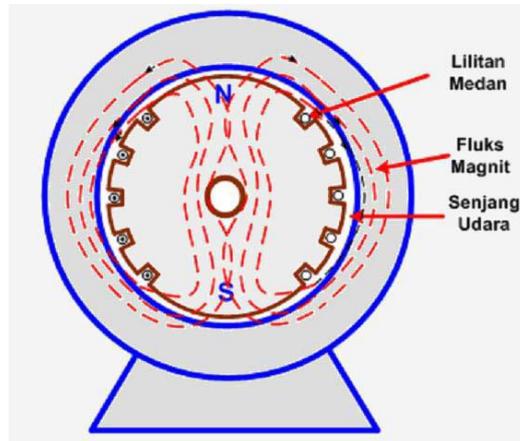
Gambar 2. 2 Rotor Kutub Menonjol Generator Sinkron
(Sumardjati, 2008)

Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putaran rendah dan sedang (120-400 rpm). Generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik. Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putaran rendah dan sedang karena :

- a. Konstruksi kutub menonjol tidak terlalu kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.
- b. Kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.

2) Rotor Silinder

Rotor tipe ini dibuat dari plat baja berbentuk silinder yang mempunyai sejumlah slot sebagai tempat kumparan. Karena adanya slot-slot dan juga kumparan medan yang terletak pada rotor maka jumlah kutub pun sedikit yang dapat dibuat. Belitan-belitan medan dipasang pada alur-alur di sisi luarnya dan terhubung seri yang dienerjais oleh eksiter.



Gambar 2. 3 Rotor Silinder Generator Sinkron

(Sumardjati, 2008)

Rotor ini biasanya berdiameter kecil dan sumbunya sangat panjang. Konstruksi ini memberikan keseimbangan mekanis yang lebih baik karena rugirugi anginnya lebih kecil dibandingkan rotor kutub menonjol (*salient pole rotor*). Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putaran tinggi (1500 atau 3000 rpm) biasanya digunakan untuk pembangkit listrik berkapasitas besar misalnya pembangkit listrik tenaga uap dan gas. Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan tinggi karena :

- a. Distribusi disekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.
- b. Konstruksinya memiliki kekuatan mekanik pada kecepatan putar tinggi.

Ada dua cara pemasukan arus DC (sebagai arus medan) ke rangkaian medan rotor untuk membentuk medan magnet pada kumparan rotor, yaitu:

1. Menyuplai daya DC ke rangkaian rotor dari sumber DC eksternal (biasanya berupa baterai dari luar) dengan sarana *slip ring* dan sikat. Bila generator ini hanya menerima sumber DC dari luar untuk *start* awal saja, maka sumber DC sebagai penguat kumparan medan selanjutnya diambil dari keluaran generator itu sendiri (setelah sumber dari baterai dilepas) dengan cara merubah keluaran AC generator ini menjadi DC (disearahkan sebelum dimasukkan ke kumparan medan pada rotor).



2. Menyuplai daya DC dari sumber DC khusus yang ditempelkan langsung pada batang rotor generator sinkron. Sumber DC ini biasanya dari generator DC yang ditempel pada rotor generator sinkron.

2.1.4 Stator

Stator merupakan bagian yang diam pada generator. Bagian ini merupakan tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Komponen ini juga memiliki fungsi untuk menyalurkan arus AC yang dihasilkan dari induksi magnetik ke beban. Pada stator memiliki tiga bagian, yaitu :

1. Rangka Stator

Rangka stator biasanya dibuat menyerupai tabung silinder yang bagian dalamnya dipekuat dengan rusuk-rusuk berupa lempengan cincin baja yang di las. Bagian luarnya terbuat dari baja dan memiliki fungsi untuk menyokong struktur stator serta memiliki kaki-kaki pada bagian fondasinya.

2. Inti Stator

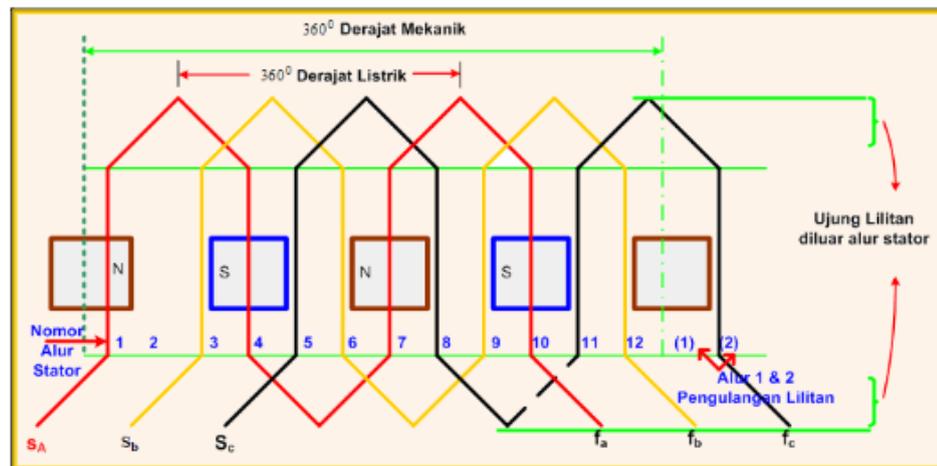
Inti stator terdiri dari laminasi lembaran plat baja silikon yang sifat kemagnetannya sangat baik atau memiliki permeabilitas yang tinggi. Inti stator dibuat berlaminasi untuk mengurangi rugi *eddy current* dan juga rugi histeresis. Bahan-bahan *non-magnetic* atau penggunaan perisai fluks yang terbuat dari tembaga juga digunakan untuk mengurangi *stray loss*.

3. Kumparan Stator

Kumparan stator terbuat dari lempeng-lempeng tembaga berpenampang segi empat (*copper strips*) dan mempunyai konduktifitas yang tinggi yang dililit dengan pita isolasi disebelah permukaannya sehingga membentuk batang solid yang terisolasi. Batang tembaga berisolasi ini kemudian ditempatkan pada alur (*slor*) inti stator dan dikunci dengan pasak yang terbuat dari bahan isolasi.

Ada dua jenis belitan stator yang sering digunakan untuk generator sinkron tiga fasa, yaitu :

1. Belitan Satu Lapis (*Single Layer Winding*)



Gambar 2. 4 Belitan Satu Lapis Generator Sinkron Tiga Fasa (Sumardjati, 2008)

Gambar diatas memperlihatkan disebut belitan satu lapis karena hanya ada satu sisi lilitan didalam masing-masing alur. Bila kumparan tiga fasa dimulai pada S_a , S_b , dan S_c dan berakhir di F_a , F_b , dan F_c bisa disatukan dalam dua cara, yaitu hubungan bintang dan segitiga. Antar kumparan fasa dipisahkan sebesar 120 derajat listrik atau 60 derajat mekanik, satu siklus ggl penuh akan dihasilkan bila rotor dengan 4 kutub berputar 180 derajat mekanis. Satu siklus ggl penuh menunjukkan 360 derajat listrik⁵.

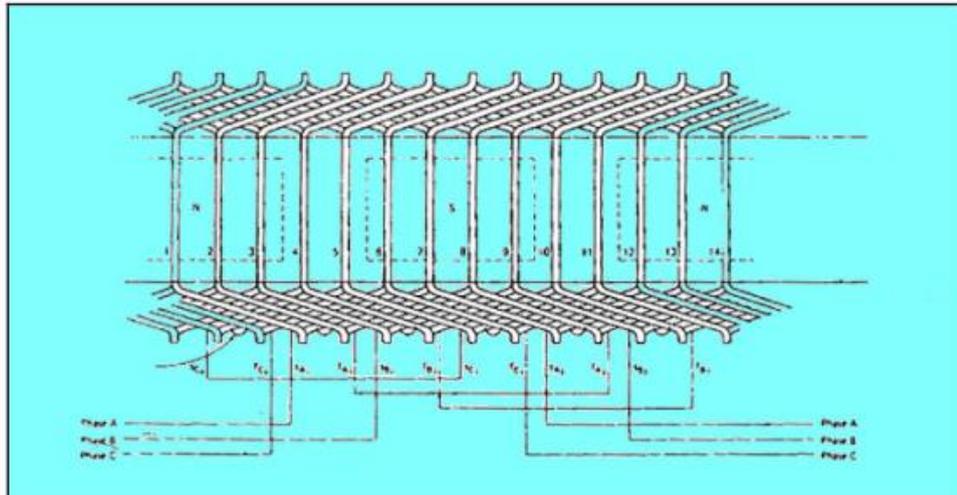
2. Belitan Berlapis Ganda (*Double Layer Winding*)

Kumparan jangkar yang diperlihatkan pada belitan satu lapis hanya mempunyai satu lilitan per kutub per fasa, akibatnya masing – masing kumparan hanya dua lilitan yang dihubungkan secara seri. Bila masing-masing alur tidak terlalu lebar maka masing-masing penghantar yang berada dalam alur akan membangkitkan tegangan yang sama. Masing – masing tegangan fasa akan sama untuk menghasilkan tegangan per penghantar dan jumlah total dari penghantar per fasa.

Dalam kenyataannya cara seperti ini tidak efektif dalam penggunaan inti

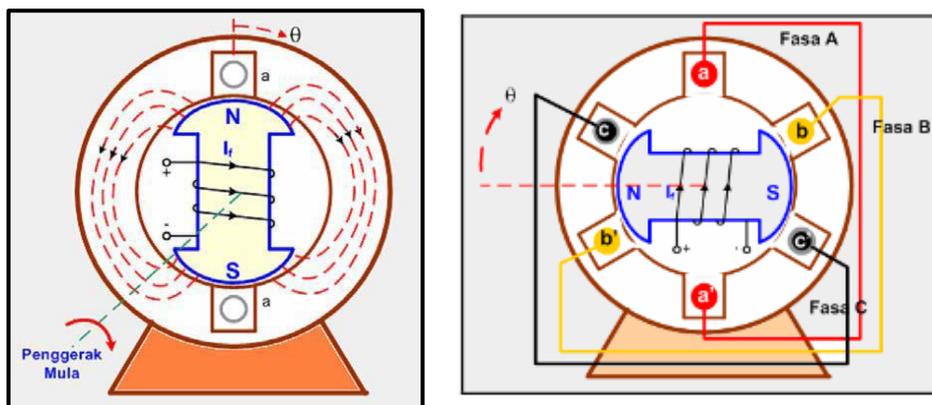
⁵ Sumardjati, P., Yahya, S., & Mashar, A. (2008). Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3. Jakarta.hal.430

stator, karena adanya variasi kerapatan fluks dalam inti dan juga melokalisir pengaruh panas dalam daerah alur serta menimbulkan harmonik. Untuk mengatasi masalah ini, generator praktisnya mempunyai kumparan yang terdistribusi dalam beberapa alur per kutub per fasa. Gambar dibawah memperlihatkan bagian dari sebuah kumparan jangkar yang secara umum banyak digunakan.



Gambar 2. 5 Belitan Berlapis Ganda Generator Sinkron Tiga Fasa (Sumardjati, 2008)

2.1.5 Prinsip Kerja Generator Sinkron



Gambar 2. 6 Prinsip Kerja Generator Sinkron (Sumardjati, 2008)

Secara umum prinsip generator sinkron adalah sebagai berikut :

1. Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang akan mensuplai arus searah terhadap kumparan medan.



Dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumparan medan maka akan menimbulkan fluks.

2. Penggerak mula (*Prime Mover*) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya.
3. Perputaran rotor akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga pada kumparan jangkar yang terletak pada stator akan menghasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan GGL induksi pada ujung kumparan tersebut.

Frekuensi elektrik yang dihasilkan generator sinkron adalah sinkron dengan kecepatan putar generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnet dengan suplai arus DC. Medan magnet rotor bergerak pada arah putaran rotor. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin dengan frekuensi elektrik pada stator adalah frekuensi (Hz) sama dengan kecepatan putar rotor (rpm) dibagi dengan jumlah kutub magnet (P) dikali dengan jumlah pasang kutub.

Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet, persamaan diatas juga menunjukkan hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50Hz atau 60 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub mesin yang telah ditentukan. Sebagai contoh untuk membangkitkan 60 Hz pada mesin dua kutub, rotor arus berputar dengan kecepatan 3600 rpm. Untuk membangkitkan daya 50 Hz pada mesin empat kutub, rotor harus berputar pada 1500 rpm.



2.1.6 Bentuk Penguatan Pada Generator Sinkron

Untuk membangkitkan fluks magnetik diperlukan penguatan DC. Penguatan DC ini bisa diperoleh dari generator DC penguatan sendiri yang seporos dengan rotor mesin sinkron. Pada mesin dengan kecepatan rendah, tetapi rating daya yang besar, seperti generator *Hydroelectric*, maka generator DC yang digunakan tidak dengan penguatan sendiri tetapi dengan “*pilot exciter*” sebagai penguatan atau menggunakan magnet permanen (penguatan aktif).⁶

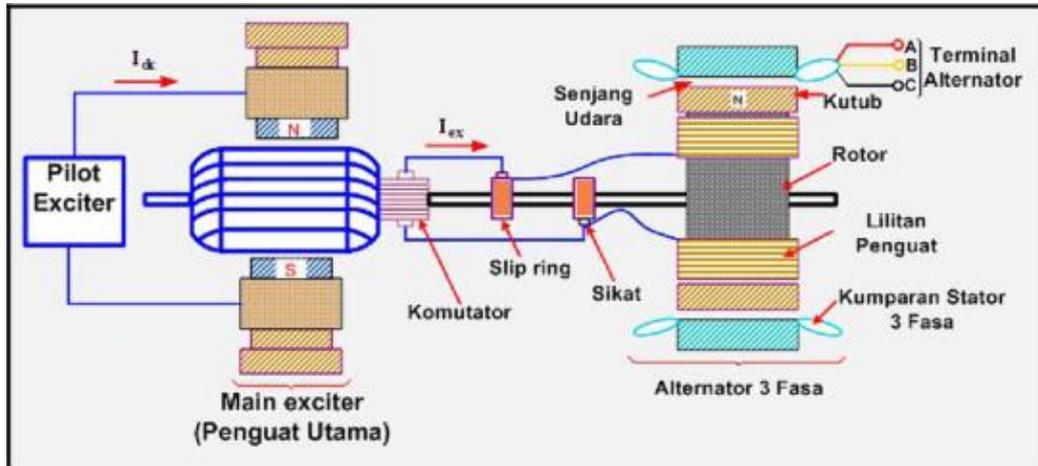
Sistem penguatan pada generator ini disebut juga dengan sistem eksitasi. Sistem eksitasi merupakan proses penguatan medan magnet dengan cara memberikan arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor, sehingga generator dapat menghasilkan energi listrik. Dimana penyuplaian arus eksitasi ini memengaruhi besar tegangan keluaran generator.

Berdasarkan cara penyaluran arus searah pada rotor generator sinkron, sistem eksitasi terdiri dari dua jenis yaitu :

1. Sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*)

Sistem eksitasi dengan sikat merupakan sistem eksitasi yang sumber tenaga penguatannya berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu menggunakan penyearah (*rectifier*). Jika menggunakan sumber listrik yang berasal dari generator AC atau menggunakan *permanent magnet generator* (PMG), medan magnetnya adalah magnet permanen. Untuk mengalirkan arus eksitasi dari eksiter utama ke rotor generator, menggunakan slip ring dan sikat arang.

⁶ Sumardjati, P., Yahya, S., & Mashar, A. (2008). Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3. Jakarta.hal.427



Gambar 2. 7 Sistem Eksitasi Dengan Sikat (Sumardjati, 2008)

Sistem eksitasi dengan sikat ini terbagi menjadi dua tipe, yaitu :

a. Sistem Eksitasi Dinamik

Sistem eksitasi dinamik merupakan sistem eksitasi yang arus eksitasinya disuplai oleh mesin eksiter (mesin penggerak). Pada sistem eksitasi ini dapat menggunakan generator DC ataupun generator AC tetapi terlebih dahulu disearahkan oleh karena arus yang digunakan pada sistem eksitasi merupakan arus searah. Arus tersebut akan disalurkan ke *slipring* kemudian disalurkan ke medan penguat generator kedua.

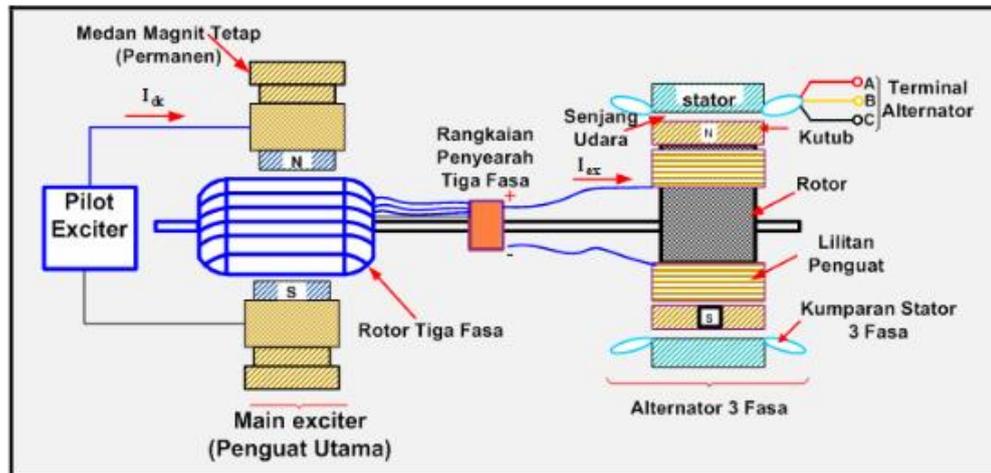
b. Sistem Eksitasi Statis

Sistem eksitasi statis ini juga disebut sebagai *self excitation* karena sistem eksitasi ini disuplai dari generator sinkron itu sendiri tetapi perlu disearahkan oleh *rectifier* terlebih dahulu. Pada rotor terdapat sedikit medan magnet yang tersisa dan akan menimbulkan tegangan pada stator. Tegangan tersebut selanjutnya akan dimasukkan kembali ke rotor dimana sebelumnya telah disearahkan oleh *rectifier*, akibatnya medan magnet yang dihasilkan semakin besar dan membuat tegangan terminal yang ada ikut naik.

2. Sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*)

Sistem eksitasi ini mengutamakan kinerja dari *pilot exciter* serta sistem yang akan menyalurkan arus eksitasi pada generator utama. *Pilot exciter* terdiri dari

generator arus bolak-balik yang memiliki kumparan tiga fasa pada stator serta medan magnet yang terpasang pada poros rotor.



Gambar 2. 8 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (Sumardjati, 2008)

2.2 Gangguan Pada Generator

Pada suatu sistem tenaga listrik dalam pengoperasiannya, disamping kondisi operasi normal, terdapat kondisi lain yang tidak bisa ditiadakan sama sekali, yaitu kondisi operasional abnormal atau terjadinya gangguan.

Generator merupakan komponen penting pada pembangkit listrik. Kondisi abnormal yang sering terjadi pada generator menyebabkan kerusakan yang memerlukan waktu lama dan biaya yang lebih mahal untuk perbaikannya. Gangguan-gangguan yang sering terjadi pada generator antara lain :

- a) Hilangnya penguatan medan
- b) Pengaliran daya balik
- c) Temperatur lebih
- d) Arus lebih
- e) Beban lebih
- f) Beroperasi dalam keadaan beban tidak seimbang
- g) Arus lebih
- h) Gangguan hubung singkat



Selain gangguan-gangguan yang telah disebutkan di atas, generator juga dipengaruhi oleh kondisi hubungan singkat diluar generator. Beberapa kondisi di atas dapat diperbaiki dalam keadaan sistem beroperasi, oleh karena itu diperlukan tanda berupa alarm atau signal. Tetapi hubungan singkat pada umumnya harus dapat dibebaskan dari sistem.

a) Hilangnya Penguatan Medan

Hilangnya penguatan medan dapat di sebabkan oleh pemutus rangkaian medan terbuka atau belitan rotor putus. Hal ini akan menyebabkan kopling magnetik antara stator dan rotor akan melemah, sehingga putaran rotor akan bertambah cepat yang dapat menyebabkan kehilangan keserempakan atau kehilangan sinkronisasi antara medan putar stator dengan rotor, Ini menyebabkan generator akan bekerja sebagai generator induksi sehingga dapat terjadi :

1. Pengaliran daya reaktif dari sistem ke generator untuk keperluan penguatan yang dapat menimbulkan ketidak stabilan sistem.
2. Naiknya temperature rotor yang disebabkan karena pengaliran atau induksi yang besar, sehingga menyebabkan perubahan mekanis peralatan–peralatan pada rotor.
3. Penurunan tegangan terminal generator dengan cepat.
4. Kenaikan temperature pada stator yang disebabkan kenaikan arus stator.

b) Pengaliran Daya Balik

Pengaliran daya balik pada generator dapat disebut sebagai kondisi “*motoring of generator*” (generator bekerja sebagai motor). Hal ini disebabkan oleh input penggerak mula berkurang sehingga rugi-rugi generator tidak tersuplai lagi, maka kekurangan tersebut diberikan oleh daya nyata yang diserap dari sistem (sistem juga mendapat suplai dari sistem lain), sehingga terjadilah pengaliran daya dari sistem ke generator, akibat adanya pengaliran daya balik pada generator, menimbulkan efek pada kecepatan putar dari penggerak mula (menjadi lambat).



c) Temperatur Lebih

Timbulnya panas yang lebih dalam stator pada umumnya disebabkan oleh beban lebih atau terjadinya hubungan singkat diluar atau di dalam generator, dapat pula di sebabkan oleh gangguan pada sistem pendingin.

d) Arus Lebih

Arus lebih dari belitan stator dapat menyebabkan kenaikan temperatur, dan kenaikan ini dapat menyebabkan berkurangnya kekuatan isolasi belitan stator. Arus lebih dalam belitan generator dapat di sebabkan oleh hubungan singkat yang berlangsung lama dalam sistem.

e) Beban Lebih

Bila generator dibebani lebih dari kapasitasnya maka akan menyebabkan arus bebannya bertambah.

f) Beroperasi Dalam Keadaan Beban Tidak Seimbang

Kondisi beban tidak seimbang dapat disebabkan karena adanya hubungan singkat dua fase ke tanah atau hilangnya salah satu fasa ke tanah atau hilangnya salah satu fase. Kondisi-kondisi ini akan menimbulkan arus urutan negatif yang akan menginduksikan arus frekuensi ganda (*double frekuensi current*) pada rotor. Arus induksi ini bila berada cukup lama pada rotor akan menimbulkan kenaikan temperatur pada bagian-bagian yang dilewatinya dan mengubah sifat mekanis dan sifat listrik.

g) Putaran Lebih

Bila suatu generator bekerja sendiri menanggung beban penuh tiba-tiba melepas bebannya karena suatu gangguan atau bila generator yang sedang bekerja paralel terlepas dari sistem, maka akan terjadi putaran lebih yang dapat menyebabkan kenaikan frekuensi. Bila generator tidak dilengkapi dengan pengatur tegangan otomatis maka putaran lebih dapat menaikkan tegangan generator. Kenaikan tegangan mendadak ini dapat menyebabkan isolasi belitan generator.



2.3 Gangguan Hubung Singkat Pada Generator

Hubung singkat adalah terjadinya hubungan penghantar bertegangan atau penghantar tidak bertegangan secara langsung tidak melalui media (resistor/beban) yang semestinya sehingga terjadi aliran arus yang tidak normal. Hubung singkat merupakan jenis gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik. Hal ini juga dapat terjadi pada generator. Arus hubungan singkat yang mengalir dalam belitan generator dapat menyebabkan perubahan tegangan. Menimbulkan pengaruh panas yang berlebihan dalam belitan generator, yang akan menyebabkan pemburukan dan penurunan kekuatan isolasi dan akhirnya sampai pada suatu keadaan yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi antar lilitan sehingga dapat menyebabkan kerusakan yang lebih besar.

Untuk menentukan nilai arus hubung singkat, kita harus menentukan nilai impedansi dasar pada generator terlebih dahulu yaitu menggunakan rumus berikut:

$$Z_g = \frac{V.V}{I.V} = \frac{V^2}{V.I} = \frac{V^2}{VA} \dots\dots\dots(2.1)$$

Untuk menentukan arus hubung singkat menggunakan rumus berikut :

$$I_{hs} = \frac{V}{Z_g} \dots\dots\dots(2.2)$$

2.4 Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah suatu sistem pengamanan terhadap peralatan listrik yang diakibatkan adanya gangguan teknis, gangguan alam, kesalahan operasi dan penyebab lainnya. Selain mengamankan peralatan listrik terhadap gangguan, sistem proteksi juga berfungsi melokalisir gangguan sehingga gangguan tersebut tidak merambat ke peralatan lain dan mengakibatkan kerusakan yang lebih besar.⁸

Suatu sistem proteksi harus memiliki kriteria operasi yang handal, selektif dan sederhana agar dapat mencegah gangguan dengan cepat, tepat dan benar. Komponen- komponen utama pada sistem proteksi yaitu pemutus tenaga atau *circuit breaker* (CB), peralatan ukur yang terdiri dari transformator arus (CT) dan atau transformator tegangan (PT) dan relay untuk memonitor besaran gangguan.⁹

⁷ Hajar, I., Mercury, M, R. 2019. Analisa Setting Rele Differensial Pada Generator PT. PJB UBJ O & M PLTU Rembang. Jurnal Ilmiah SUTET. 9(1). 1-15. <https://doi.org/10.33322/sutet.v9i1.325>

⁸ Muslim, Sapari, Joko, Puput Winanti R. 2008. *Teknik Pembangkit Tenaga Listrik Jilid 1*. Hal 336.

⁹ RS, Carlos, Rumiasih. 2010. *Praktikum Sistem Proteksi*. Palembang : Polsri.



2.4.1 Pemutus Tenaga atau *Circuit Breaker* (CB)

Komponen yang berfungsi untuk memutuskan atau menghubungkan rangkaian sistem tenaga listrik sesuai dengan kapasitas pemutusannya.

Syarat- syarat yang harus dipenuhi oleh pemutus tenaga dalam sistem tenaga listrik adalah :

- a. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem tenaga listrik secara kontinyu.
- b. Mampu memutuskan dan menghubungkan jaringan dalam keadaan berbeban maupun dalam keadaan gangguan hubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.
- c. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan sangat cepat agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan dan merusak pemutus tenaga itu sendiri.

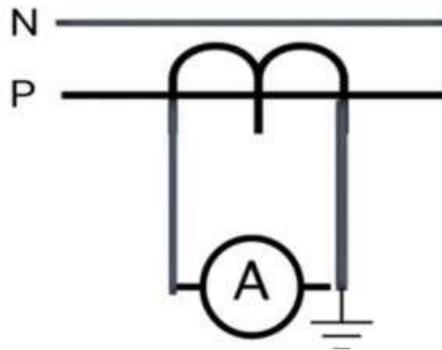
2.4.2 Transformator Ukur

Tranformator ukur merupakan suatu peralatan yang dapat merubah suatu besaran listrik ke besaran yang sama dengan harga yang berbeda. Memiliki belitan primer yang dihubungkan ke jaringan sistem tenaga listrik dan belitan sekunder yang dihubungkan ke peralatan ukur dan peralatan pengamanan. Oleh karena pada sistem tenaga listrik memiliki besaran dengan nilai yang cukup besar maka transformator ukur berfungsi menurunkan nilai besaran.

a. Transformator Arus (*Current Transformer/CT*)

Transformator arus memiliki fungsi mengkonversi arus pada sistem tenaga listrik dari arus besaran primer menjadi besaran sekunder yang dihubungkan ke peralatan ukur atau rele pengaman. CT juga memiliki fungsi untuk mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran. Standarisasi besaran arus sekunder dengan nominal 1A dan 5A.¹⁰

¹⁰ RS, Carlos, Rumiasih. 2010. *Praktikum Sistem Proteksi*. Palembang: Polsri



Gambar 2. 9 Pengawatan *Current Transformer*

Prinsip kerja CT adalah pada saat arus mengalir pada lilitan primer, maka akan muncul medan magnet disekeliling lilitan primer tersebut. Kemudian medan magnet tersebut akan terkumpul lebih banyak pada inti atau *core*. Medan magnet yang berputar di dalam inti atau *core* menghasilkan perubahan *fluks primer* dan memotong lilitan sekunder sehingga menginduksikan tegangan pada lilitan sekunder sesuai hukum Faraday.

Karena lilitan sekunder membentuk *loop* tertutup, maka akan mengalir arus sekunder I_s yang akan membangkitkan medan magnet untuk melawan fluks magnet yang dihasilkan oleh belitan primer sesuai hukum Lenz.

Berdasarkan fungsinya, trafo arus diklasifikasikan menjadi :

1. Trafo arus pengukuran

Trafo arus untuk pengukuran memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalannya) 5%-120% arus nominalnya tergantung dari tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi. Penggunaan trafo arus untuk pengukuran pada *amperemeter*, *watt-meter*, *VAR-meter*, dan *cosphi meter*.

2. Trafo arus proteksi

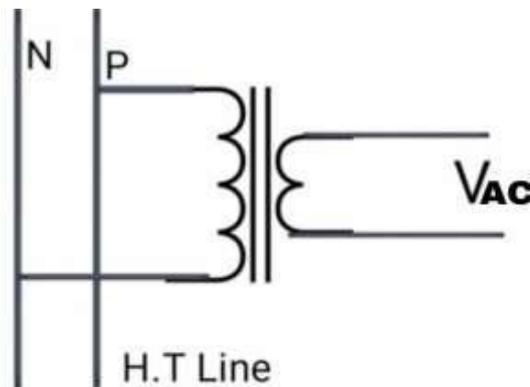
Trafo arus untuk proteksi, memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalannya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi. Penggunaan trafo arus proteksi untuk relai arus lebih (OCR dan GFR), relay beban lebih, relay differensial, relay daya dan relay jarak.

b. Transformator Tegangan (*Potensial Transformer/PT*)

Transformator tegangan berfungsi mentransformasikan besaran tegangan yang tinggi atau tegangan primer menjadi tegangan yang rendah atau tegangan sekunder yang dihubungkan ke peralatan ukur atau relay pengaman. Penerapan tegangan sekunder pada trafo tegangan dengan nilai nominal $100/\sqrt{3}$ V dan $110/\sqrt{3}$ V.¹¹

Selain itu PT juga berfungsi untuk mengisolasi bagian primer yang tegangannya sangat tinggi dengan bagian sekunder yang tegangannya rendah untuk digunakan sebagai sistem proteksi dan pengukuran peralatan dibagian primer.

Prinsip kerja PT adalah kumparan primernya dihubungkan paralel dengan jaringan yang akan diukur tegangannya. *Voltmeter* atau kumparan tegangan *wattmeter* langsung dihubungkan pada sekundernya. Jadi rangkaian sekunder hampir pada kondisi open circuit. Besar arus primernya tergantung pada beban disisi sekunder. Rancangan trafo tegangan ini sama dengan trafo daya step-down tetapi dengan beban yang sangat ringan.



Gambar 2. 10 Pengawatan Potensial Transformer

2.4.3 Relay Proteksi

Relay proteksi adalah susunan peralatan pengaman yang dapat merasakan,

¹¹ RS, Carlos, Rumiasih. 2010. *Praktikum Sistem Proteksi*. Palembang: Polsri.



mendeteksi atau melihat adanya gangguan, yang kemudian secara otomatis memberikan respon berupa sinyal untuk menggerakkan sistem mekanis pemutus tenaga agar dapat memisahkan bagian yang terganggu.

Relay proteksi mempunyai peranan sebagai berikut :

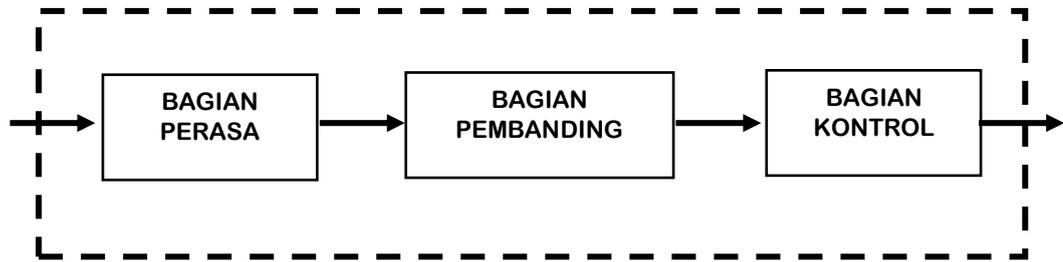
- a. Memberi tanda atau melepas pemutus tenaga (*circuit breaker*) dengan tujuan mengisolir gangguan atau kondisi yang tidak normal.
- b. Melepas/*mentrip* peralatan yang berfungsi tidak normal secara cepat untuk mencegah timbulnya kerusakan atau mengurangi kerusakan yang lebih berat.
- c. Melokalisir kemungkinan dampak akibat gangguan dengan memisahkan peralatan yang terganggu dari sistem.
- d. Melepas peralatan/bagian yang terganggu secara cepat dengan maksud menjaga stabilitas sistem, kontinuitas pelayanan dan untuk kerja sistem.

Tujuan Relay proteksi :

- 1) Mencegah kerusakan peralatan-peralatan pada sistem tenaga listrik akibat terjadinya gangguan atau kondisi operasi sistem yang tidak normal.
- 2) Mengurangi kerusakan peralatan pada sistem tenaga listrik akibat terjadinya gangguan.
- 3) Mempersempit daerah yang terganggu sehingga gangguan tidak melebar pada sistem yang lebih luas.
- 4) Memberikan pelayanan tenaga listrik dengan kehandalan dan mutu tinggi pada konsumen.
- 5) Mengamankan manusia dari bahaya yang ditimbulkan oleh tenaga listrik.

Relay proteksi umumnya mempunyai tiga bagian umum yang bekerja saling terkait untuk memutuskan arus gangguan. Ketiga bagian umum tersebut adalah sebagai berikut :¹²

¹² Samaulah, Hazirin. 2004. *Dasar-Dasar Sistem Proteksi Tenaga Listrik*. Cetakan Kedua. Palembang: Unsri. Hal. 70



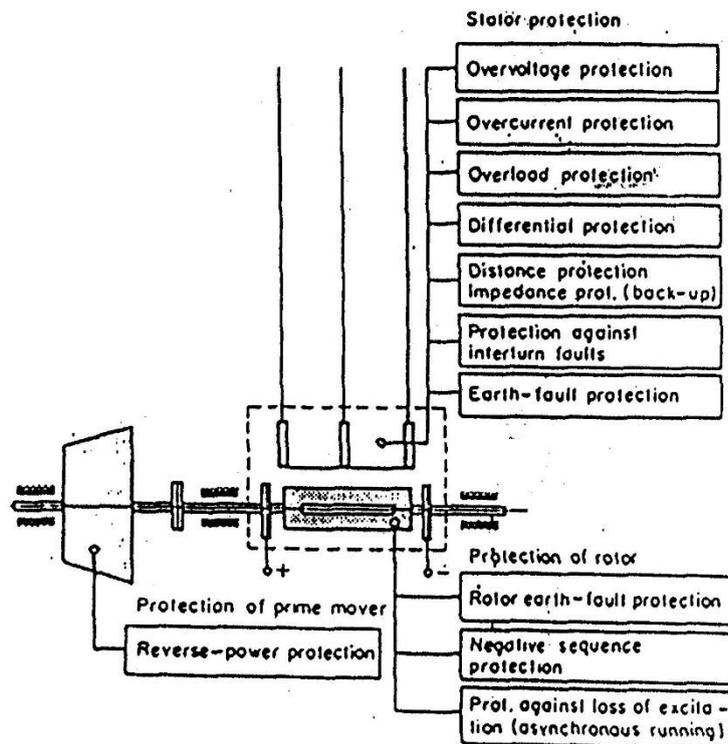
Gambar 2. 11 Bagian Umum Relay Proteksi

- 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.

2.5 Relay Proteksi Generator¹³

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

¹³ Prast, Eko. 2011. *Generator Electrical Protection System*.
(<http://projects87.blogspot.com/2009/02/generator-electrical-protection-relay.html>, diakses pada 20 Juli 2022.



Gambar 2. 12 Penempatan Peralatan Pengaman Elektris pada Generator (Prast, 2011)

Jenis relay yang umum digunakan pada sistem pengaman elektrik 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.

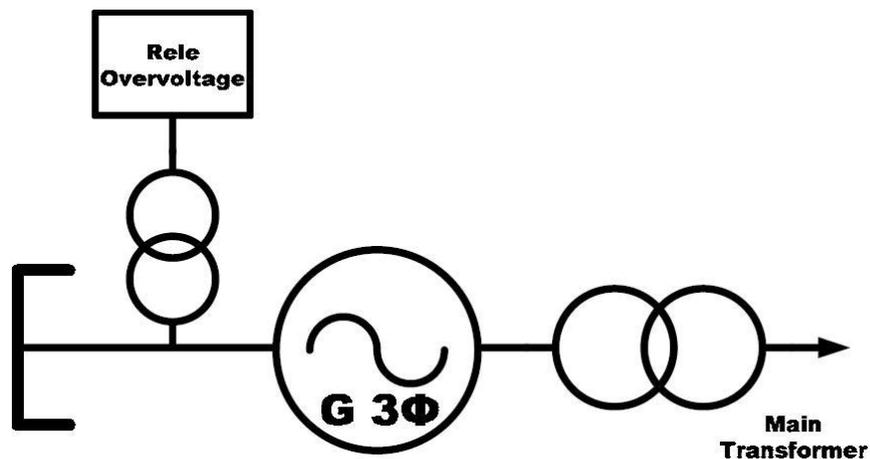
Arus hubung singkat yang terjadi di sekitar titik netral relatif kecil sehingga sulit untuk dideteksi oleh rele differensial. Dengan dipasang transformator tegangan, arus yang kecil tersebut akan mengalir dan menginduksikan tegangan pada sisi sekunder transformator. Untuk mengatasi hal tersebut digunakan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

Tegangan yang muncul pada sisi sekunder transformator tegangan akan membuat rele 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 rele tegangan lebih di sisi netral generator. Dengan demikian rele tegangan lebih yang dipasang harus mempunyai waktu tunda yang dapat dikoordinasikan dengan rele di luar generator. Adapun penyebab overvoltage 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 rele gangguan tegangan lebih adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 13 Single Line Diagram Relay Tegangan Lebih pada Generator (Prast, 2011)

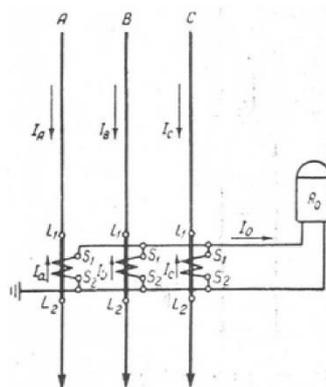
2) Relay Gangguan Stator Hubung Tanah (*Stator Earth Fault Relay*)

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 rele arus hubung tanah yang harus dapat mendeteksi arus urutan nol, karena setiap gangguan hubung tanah menghasilkan arus urutan nol.

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

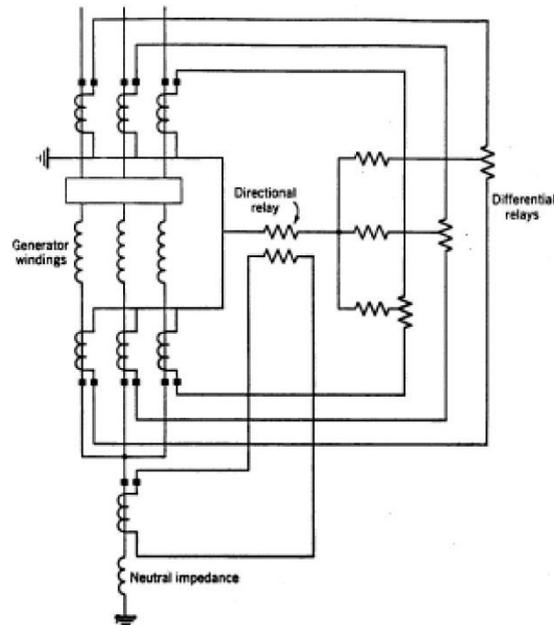
Rele ini akan mendeteksi gangguan hubung tanah yang terjadi pada sirkuit yang terhubung dengan sirkuit stator dari generator. Untuk membatasi pendeteksian gangguan hubung tanah yang terjadi pada stator generator saja dipakai rele hubung tanah terbatas, dimana jumlah arus dari tiga fasa tersebut dijumlah lagi dengan arus yang dideteksi transformator arus pada konduktor pentanahan titik netral generator.

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



Gambar 2. 14 *Single Line Diagram* Rele Gangguan Stator Hubung Tanah (Prast, 2011)

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



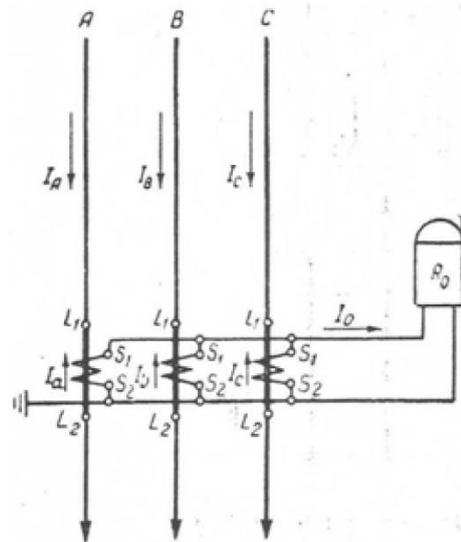
Gambar 2. 15 *Single Line Diagram Rele Gangguan Stator Hubung Tanah Terbatas (Prast, 2011)*

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

Rele 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



Gambar 2. 17 *Single Line Diagram* Rele 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 rele dan membuat rele mendeteksi gangguan.

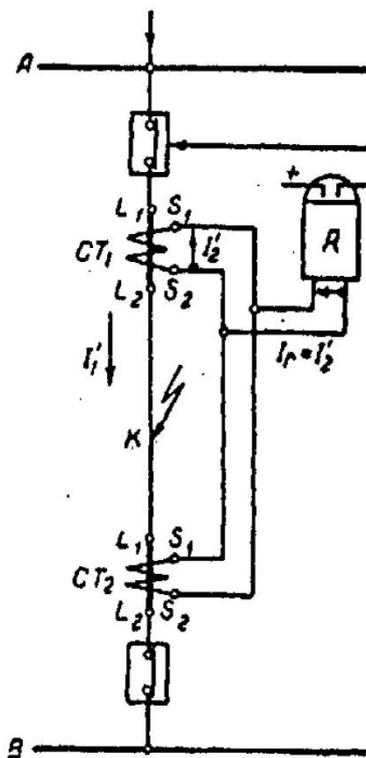
5) **Rele Fasa Urutan Negatif** (*Negative Phase Sequence Relay*)

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.

6) **Rele Diferensial** (*Differential Relay*)

Rele ini berfungsi untuk mendeteksi gangguan dalam kumparan stator generator dan harus bekerja lebih cepat daripada rele arus lebih agar terdapat selektifitas. Prinsip kerja rele 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 rele diferensial. Adapun single line diagram rele diferensial adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 18 Single Line Diagram Rele Diferensial (Prast, 2011)

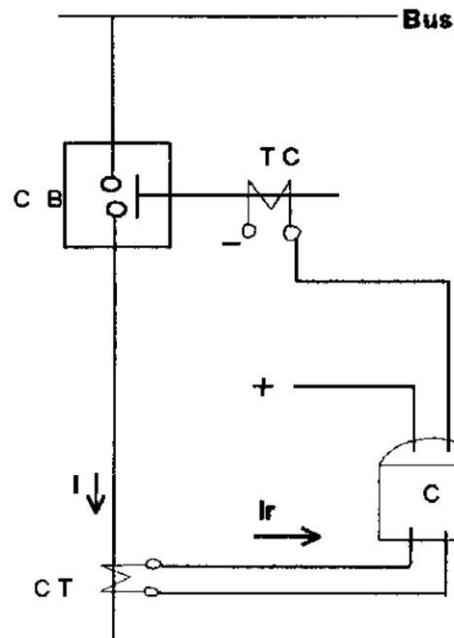
Dalam keadaan normal $I_r = I_1' - I_2' = 0$ rele tidak kerja

Gangguan di K $I_r = I_1' - I_2' > 0$ rele kerja

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

7) Rele Arus Lebih (*Overcurrent Relay*)

Rele 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 rele arus lebih adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 19 Single Line Diagram Rele 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 rele

C = Rele arus lebih

Ip = Arus pick-up dari rele

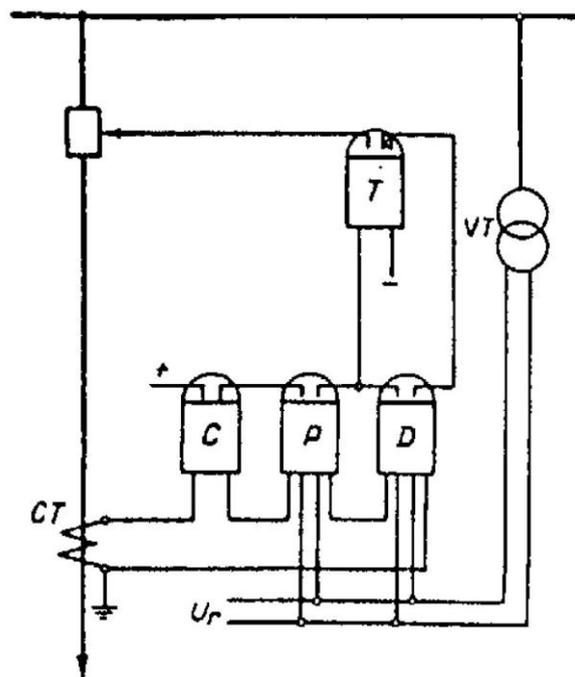
8) Rele Gangguan Frekuensi (*Frequency Fault Relay*)

Rele 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) Rele Impedansi (*Impedance Relay*)

Rele ini berfungsi untuk mendeteksi gangguan antar fasa pada posisi output generator (di saluran penghantar atau feeder). Dengan adanya setting keterlambatan waktu, rele ini memberi kesempatan terlebih dahulu pada rele penghantar untuk mengatasi gangguan tersebut. Sensor rele 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 (turbine atau exciter), rele tidak akan bekerja karena zona tersebut tidak berada dalam zona pengamanan yang dapat diamankan oleh rele impedansi.



Gambar 2. 20 Single Line Diagram Rele Impedansi (Prast, 2011)

Keterangan :

C = elemen starting

P = power directional

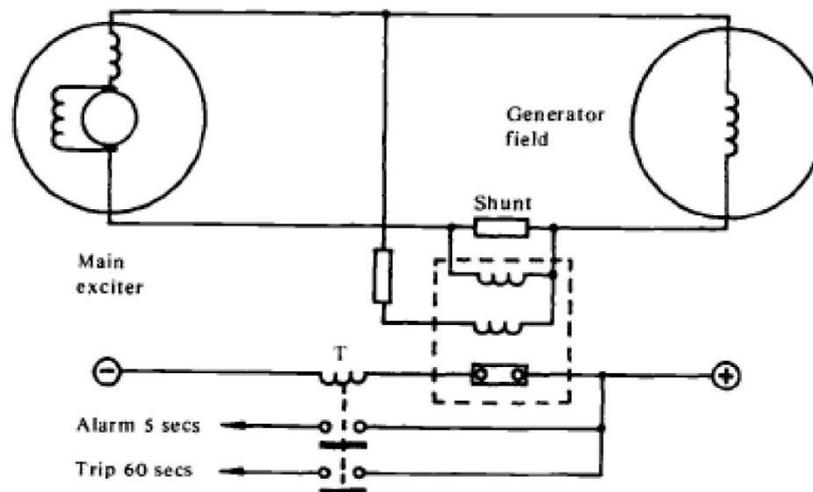
D = elemen/rele jarak

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

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

10) Rele 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.

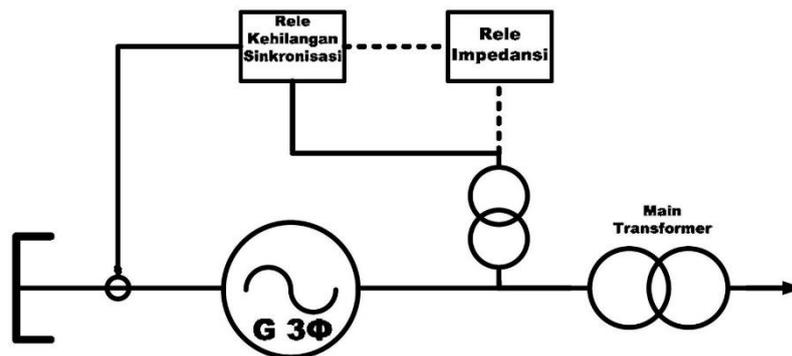


Gambar 2. 21 Diagram Rele Kehilangan Medan Penguat Rotor (Prast, 2011)

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 rele mengeluarkan sinyal alarm atau trip.

11) Rele 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. Rele impedansi merupakan backup bagi rele ini.



Gambar 2. 22 Single Line Diagram Rele Kehilangan Sinkronisasi

2.6 Relay Differensial

Relay Differensial adalah relay yang berfungsi mendeteksi gangguan dalam kumparan stator generator. Adapun gangguan-gangguan yang menyebabkan relay differensial generator bekerja adalah :

- Kerusakan belitan stator generator karena sambaran petir.
- Kerusakan belitan stator karena adanya bagian yang lepas dari rotor dan menghantam belitan stator.
- Minyak pelumas atau pendingin dari mesin penggerak bocor dan mengenai belitan stator sehingga menyebabkan adanya hubungan singkat belitan stator generator.

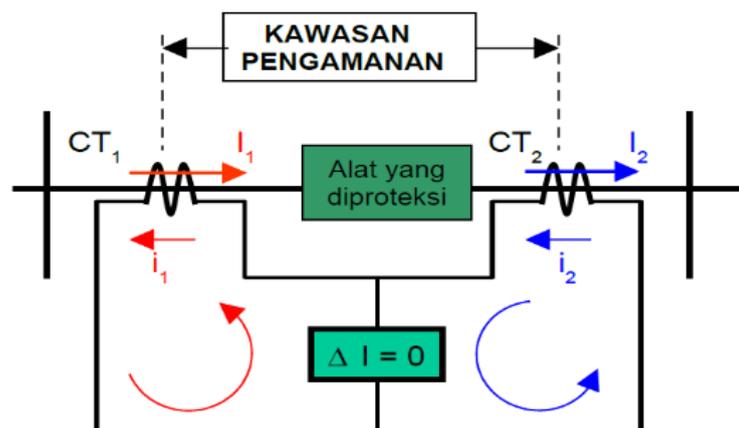
- d. Hubung singkat antar belitan stator akibat rusaknya isolasi karena ujung-ujung kumparan stator terkena tekanan mekanis.

2.6.1 Prinsip Kerja Relay Differensial

Prinsip kerja relay differensial berdasarkan keseimbangan, yang membandingkan arus masuk dan keluar dari kumparan stator generator. Jika ada selisih, berarti ada gangguan dalam kumparan stator generator dan selisih arus akan menggerakkan relai differensial.

Adapun prinsip kerja relay differensial adalah sebagai berikut :

- Membandingkan sektor arus I_1 dan I_2 dengan cara membandingkan vektor arus I_1 dan I_2 .
- Pada waktu tidak terjadi gangguan keadaan normal atau gangguan di luar daerah pengamanan I_1 dan I_2 sama atau mempunyai perbandingan serta sudut fasa tertentu dalam hal ini relay tidak bekerja.
- Pada waktu terjadi gangguan di daerah pengamannya I_1 dan I_2 tidak sama atau perbandingannya secara sudut fasanya berubah dari keadaan normal, relay akan bekerja dan memberikan sinyal ke pengaman generator untuk segera trip.¹⁴



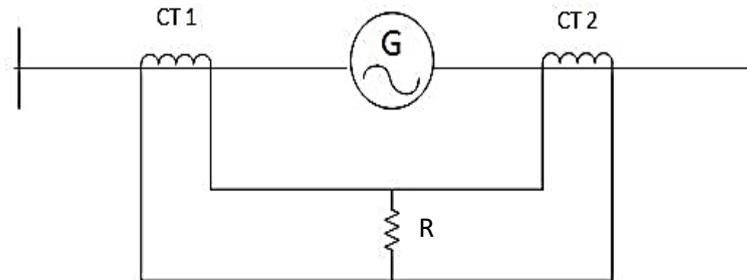
Gambar 2. 23 Prinsip Kerja Relay Differensial

(Ardiyanto, 2020)

¹⁴ Rahmadhani, A., & Nasution, R. (2019). *Analisa Rele Differensial Type SA-1 Sebagai Pengaman Generator*.

2.6.2 Cara Kerja Relay Differensial

Relay differensial merupakan alat proteksi yang sangat selektif dan cepat bekerjanya berdasarkan perbandingan arus yang mengalir pada kedua sisi generator melalui tarfo arus (CT).

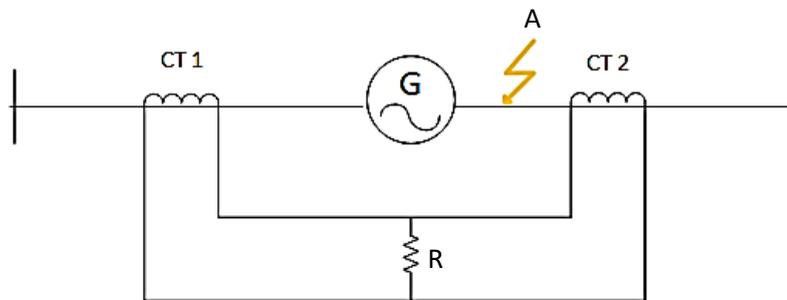


Gambar 2. 24 Relay Differensial Kondisi Normal

Dalam kondisi normal nilai arus yang mengalir pada kedua CT bernilai sama ($I_1=I_2$) atau dengan kata lain tidak ada selisih arus yang mengalir pada relay sehingga relay tidak bekerja, seperti persamaan berikut.

$$I_d = I_2 - I_1 = 0 \dots \dots \dots (2.3)$$

$$I_1 = I_2$$



Gambar 2. 25 Kondisi Gangguan Pada Titik A

Sedangkan saat terjadi gangguan relay differensial harus bekerja hal ini dikarenakan saat arus I_1 mengalir melewati CT₁ maka pada CT₂ tidak ada arus yang mengalir disebabkan karena arus mengalir pada titik gangguan ($I_2=0$) sehingga mengakibatkan :

$$I_1 \neq I_2$$

$$I_d = I_1 - I_2 \neq 0 \dots \dots \dots (2.4)$$



Arus I_1 akan mengalir ke titik gangguan tanah dan kembali ke stator melalui titik bintang, karenanya kumparan R yang dalam keadaan normal tidak akan dialiri arus, pada keadaan hubung singkat dengan tanah akan dilewati arus I_1 dan mengaktifkan relay differensial, yang kemudian akan bekerja dan menggerakkan pemutus daya.

2.6.3 Perhitungan Penyetelan Relay Differensial

1) Arus Rating

Untuk menghitung rasio CT, terlebih dahulu menghitung arus rating. Arus rating berfungsi sebagai batas pemilihan rasio CT. Perhitungan arus rating menggunakan rumus :

$$I_{rating} = I_{nominal} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

$$I_{nominal} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots \dots \dots (2.6)$$

I_n = Arus Nominal (A)

S = Daya tersalur (VA)

V = Tegangan generator (KV).

2) Arus Sekunder CT

Arus sekunder CT merupakan arus yang di keluarkan CT.

$$I_{SCT} = \frac{1}{rasio\ CT} \times I_n \dots \dots \dots (2.7)$$

3) Perhitungan Error Mismatch

Pengaturan pengambilan arus differensial harus menghindari arus ketidakseimbangan maksimum dalam kondisis beban normal terutama disebabkan oleh kesalahan CT. Kesalahan CT harus kurang dari 5%.

Perhitungan dengan rumus sebagai berikut :

$$Error\ Mismatch = \frac{CT\ Ideal}{CT\ Terpasang} \% \dots \dots \dots (2.8)$$



4) Arus *Differensial*

Arus *differensial* merupakan arus selisih antara arus sekunder CT2 dan CT1.

Rumus untuk menentukan arus differensial yaitu :

$$I_{dif} = I_1 - I_2 \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana:

I_{dif} = Arus Diferensial (A)

I_1 = Arus Sekunder CT1 (A)

I_2 = Arus Sekunder CT2 (A)

5) Arus *Restrained* (Penahan)

Arus *restrained* diperoleh dengan cara menjumlahkan arus sekunder CT1 dan CT2 kemudian dibagi 2. Rumus yang digunakan untuk menghitung arus restrain yaitu :

$$I_r = \frac{I_1 + I_2}{2} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana:

I_r = Arus penahan (A)

I_1 = Arus sekunder CT1 (A)

I_2 = Arus sekunder CT2 (A)

6) Perhitungan *Slope*

Slope didapat dengan cara membagi antara arus *differensial* dengan arus *restrained*. *Slope* akan menentukan arus *differensial* dan arus *restrained* pada saat kondisi normal dan memastikan sensitifitas relay pada saat gangguan internal dengan arus gangguan yang kecil.

Rumus yang digunakan untuk mencari % slope yaitu :

$$Slope = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

Slope : setting kecuraman

I_d : Arus *Differensial* (A)

I_r : Arus *Restrained* (A)



7) Perhitungan Penyetelan Relay

Penyetelan relay differensial diambil dari nilai arus nominal generator yang terbaca oleh trafo arus dikalikan dengan nilai *setting* relay. Untuk menentukan nilai setting relay sebagai berikut :

$$\text{Setting Relay} = \text{Kesalahan Generator (\%)} + \text{Error Mismatch CT1 (\%)} + \text{Error Mismatch CT2 (\%)} + \text{Toleransi (\%)} + \text{Slope (\%)} \dots \dots \dots (2.12)$$

Sehingga untuk menghitung besar nilai arus penyetelan relay differensial sebagai berikut :

$$I_{rd} = \text{Setting relay (\%)} \times I_{SCT} \dots \dots \dots (2.13)$$