

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Rujukan penelitian yang pernah dilakukan untuk mendukung penulisan tugas akhir ini antara lain yaitu:

1. Andri Hendrianto (2016) dalam penelitian berjudul Rele Hilang Medan (*Loss of Field Relay*) Sebagai Proteksi Hilang Penguatan Generator Unit I pada PLTA Sutami. Disimpulkan bahwa dari hasil perhitungan karakteristik *setting* rele didapat perbedaan besarnya *setting*, pada perhitungan menggunakan *setting offset* 1.3217 Ω (33.04%) dan pada tap menggunakan tap 1 Ω (25%) sehingga perbedaan *setting offset* sebesar 0.3217 Ω (8.04%). Kemudian pada perhitungan *setting reach* 17.1636 Ω (29.14%) dan *setting* pada tap 17.24 Ω (29%) sehingga perbedaan *setting reach* sebesar 0.0764 Ω (0.14%) jika dibandingkan dengan *setting offset* rele 0 – 4 Ω pada PLTA Sutami menggunakan *setting 1 offset* atau 25% dan jangkauan impedansi rele 5 – 50 Ω pada rele di PLTA Sutami menggunakan *reach* 17.24 Ω atau 29%. Maka dari itu berdasarkan analisis pengujian rele berdasarkan sampel pengujian tahun 1982, 1983, 2006, dan 2013 nilai impedansi pada pengujian tersebut berada di dalam lingkaran impedansi sehingga rele dapat dinyatakan baik dan masih layak untuk bekerja.
2. Edi Subeno (2002) dalam penelitian berjudul Analisa Setting Mho Rele Sebagai Proteksi Hilang Penguat Generator. Disimpulkan penggunaan rele CEH51A sebagai proteksi terhadap hilang penguat generator dengan *setting offset tap* = 2 Ω dan *restraint tap* = 15% telah memenuhi untuk mendeteksi adanya gangguan hilang penguat pada generator baik gangguan berupa penurunan GGL tanpa disertai slip maupun untuk penurunan GGL disertai dengan slip, sedangkan *setting* rele proteksi hilang penguat generator pada PLTGU Blok 2 UBP Tambaklorok adalah *offset tap* = 2.5 Ω dan *restrain tap* 14% .

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Generator

Generator adalah mesin pengubah daya mekanik perputaran rotor yang dihasilkan turbin menjadi daya listrik arus bolak balik. Kemampuan daya generator sering dikaitkan dengan suhu air pendingin radiator yang ditentukan (t_n). Dalam hal ini diberikan pula kemampuan daya untuk berbagai nilai suhu air pendingin radiator tertera (t_k). Apabila nilai suhu air pendingin radiator tertera lebih rendah dari yang ditentukan maka kemampuan daya lebih besar dari kemampuan nominal. Apabila sebaliknya, maka kemampuan daya lebih kecil dari kemampuan nominal.

Kemampuan daya generator terbagi menjadi tiga, yaitu:

- 1) Daya Semu (KVA), adalah hasil penjumlahan vektor dari daya aktif (KW) dan daya reaktif (KVAR).
- 2) Daya Aktif (KW), merupakan hasil konversi dari daya mekanik atau penggerak mula generator yaitu kemampuan turbin yang digerakkan oleh air dan merupakan daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya.
- 3) Daya Reaktif (KVAR), ditentukan oleh kemampuan arus belitan rotor yang berasal dari besarnya arus eksitasi yang jumlah dayanya diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks magnet.

Power Faktor/ Faktor Daya (f.d) adalah nilai yang diperoleh dari perbandingan daya aktif (KW) dengan daya semu (KVA), yaitu:

$$f \cdot d = \frac{KW}{KVA} = \cos \emptyset \dots \dots \dots (2.1)$$

sehingga,

$$KW = KVA \cos \emptyset$$

$$KVAR = KVA \sin \emptyset$$

Dengan \emptyset adalah sudut antara vektor daya aktif (KW) dan vektor daya semu (KVA). Faktor daya memberikan gambaran tentang:

- a. Kemampuan daya semu (KVA) generator untuk keperluan produksi atau pembangkitan daya aktif (KW).
- b. Kontruksi generator.
- c. Kemampuan pengatur tegangan generator.

Hubungan ketiga daya listrik tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P = V \times I \times \cos \emptyset \dots\dots\dots (2.2)$$

$$Q = V \times I \times \sin \emptyset \dots\dots\dots (2.3)$$

$$S = V \times I \dots\dots\dots (2.4)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

P = Daya Aktif (MW)

Q = Daya Reaktif (MVAR)

S = Daya Semu (MVA)

V = Tegangan Terminal (kV)

I = Arus Terminal (kA)

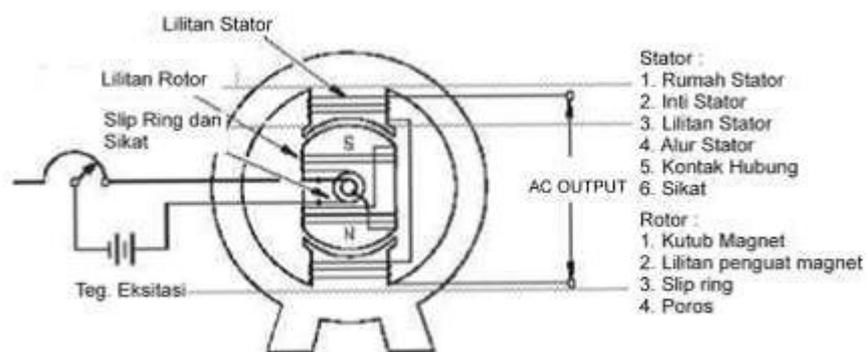
$\cos \emptyset$ = Faktor Daya

2.2.2 Generator Sinkron

Generator yang umum digunakan oleh pembangkit tenaga listrik adalah generator sinkron. Generator sinkron berupa generator sinkron satu fasa (AC) atau generator sinkron tiga fasa yang digunakan oleh pembangkit tenaga listrik dengan dioperasikan secara paralel guna pembagian beban antara generator yang satu dengan lainnya menjadi lebih rata. Generator sinkron ini merupakan jenis mesin listrik yang menggunakan prinsip elektromagnetik untuk menghasilkan tegangan bolak-balik (AC) dengan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik yang terjadi pada kumparan stator dan rotor. Energi mekanik diperoleh dari perputaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (*prime over*) yang berupa turbin ataupun daya penggerak lainnya. Dari definisi sinkron, generator sinkron ini memiliki makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkan sinkron dengan putaran

mekanis generator tersebut, dan disebut mesin sinkron karena mesin ini bekerja pada kecepatan dan frekuensi konstan dibawah kondisi stabil (*steady state*). Generator sinkron tidak memiliki torsi awal.

Rotor generator sinkron diputar dengan penggerak mula (*prime over*) yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah sehingga akan menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan dan arah putar yang sama dengan putaran rotor tersebut. Dasar kerja mesin ini terdiri dari dua struktur medan magnet yaitu kumparan yang mengalirkan penguatan DC dan sebuah jangkar sebagai tempat dibangkitkannya gaya gerak listrik AC. Kumparan DC pada struktur medan yang berputar dihubungkan pada sumber luar melalui *slip ring* atau sikat dan ada yang tidak menggunakan sikat namun menggunakan diode silikon dan *thyristor* sebagai penyearah yang dipasang di poros berputar dengan rotor. Hampir semua mesin sinkron memiliki struktur medan berputar dan jangkar diam (*stationer*). Mesin ini memiliki dua kumparan yaitu *stator* (bagian diam) dan *rotor* adalah bagian yang (berputar) dan keduanya dipisahkan oleh celah udara.



Gambar 2.1 Kontruksi Generator sinkron

1) STATOR

Bagian ini terdiri dari rangka *stator*, inti magnetis *stator*, dan belitan *stator*.

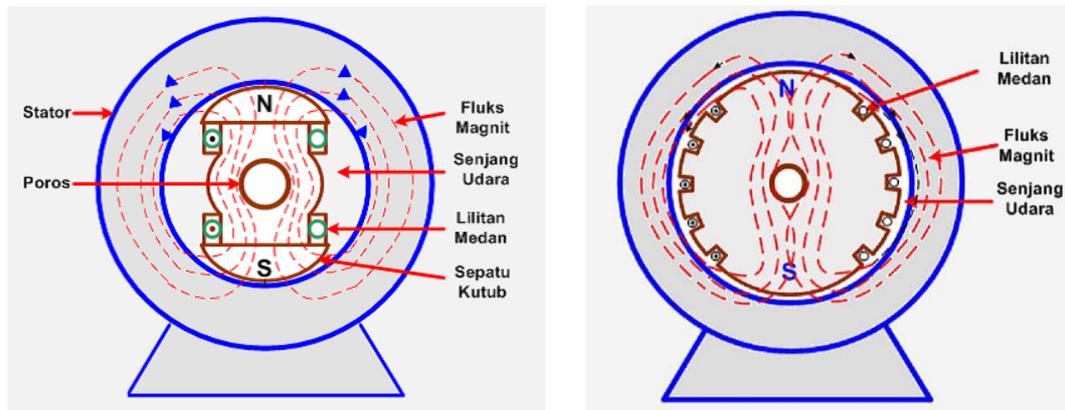
- a. Rangka *stator* atau rumah stator merupakan tempat pemasangan inti magnetis *stator* dan berfungsi sebagai penyangga untuk konstruksi bantalan generator. Umumnya terbuat dari besi tiang yang berbentuk silinder dan pada bagian belakang dari rumah stator ini biasanya memiliki sirip-sirip sebagai alat bantu dalam proses pendinginan.

- b. Inti stator memiliki bentuk berupa cincin laminasi-laminasi yang diikat serapat mungkin untuk menghindari rugi-rugi arus pusar (*eddy current losses*) dan pada inti stator ini terdapat slot-slot untuk menempatkan konduktor serta untuk mengatur arah medan magnetnya.
- c. Belitan *stator* adalah bagian yang membangkitkan gaya gerak listrik (GGL) yang terdiri dari tiga kelompok belitan yaitu: belitan fasa R, belitan fasa S, dan belitan fasa T. Belitan- belitan ini tersusun dari beberapa kumparan yang dihubungkan seri, kumparan disusun dari beberapa lilitan yang dihubungkan seri, dan lilitan disusun dari dua konduktor yang dihubungkan seri. Konduktor dari sisi kumparan ditempatkan atau dijajarkan didalam alur inti magnetis. Oleh sebab itu belitan yang membangkitkan tegangan listrik disebut sebagai belitan jangkar.
- d. Inti magnetis merupakan jalan bagi fluks magnet yang dihasilkan oleh kutub-kutub elektromagnet dari rotor. Lempeng-lempeng inti magnetis disusun secara berlapis disekeliling rangka bagian dalam. Penyusunan dari lapis satu kelapis berikutnya dilakukan secara *overlap* (tumpang tindih). Inti magnetis disusun dalam beberapa kelompok lapis. Antara kelompok lapis tersebut dipasang sekat logam berbentuk I yang membentuk celah ventilasi pendingin. Pinggir luar lempengan inti mempunyai lubang berbentuk ekor burung untuk pengikatan pada rusuk-rusuk aksial (sejajar) rangka. Pinggir dalam lempengan inti magnetis mempunyai lubang-lubang yang membentuk alur untuk tempat konduktor dari belitan stator.
- e. Alur stator merupakan bagian stator yang berfungsi sebagai tempat belitan stator ditempatkan.

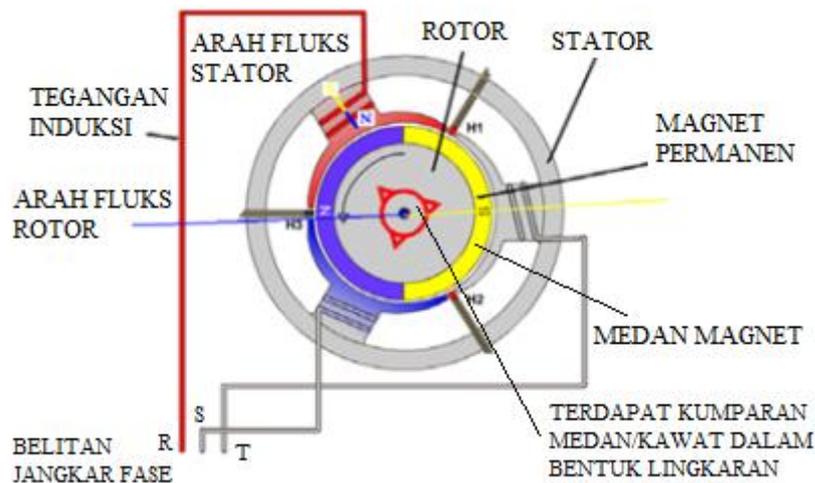
2) ROTOR

Rotor adalah bagian generator yang bergerak/berputar, terdiri dari poros, struktur berbentuk jaringan laba-laba, inti magnetis rotor, kutub-kutub elektromagnet, dan belitan kutub rotor. Pada *rotor* dipasang kutub-kutub elektromagnet utara (positif) dan selatan (negatif). Kutub terdiri dari inti kutub, kumparan kutub, *slip ring*, dan poros.

- a. Inti kutub dibentuk dari lempeng-lempeng inti magnetis. Pada setiap kutub dilengkapi dengan belitan peredam yang terdiri dari batang-batang konduktor yang dipasang pada inti kutub. Bagian ujung dari batang konduktor ini dihubungkan menjadi satu sehingga belitan peredam tersebut berbentuk sangkar. Terdapat poros pada bagian inti kutub dan inti rotor berfungsi sebagai jalur fluks magnet yang dibangkitkan oleh kumparan medan.
- b. Kumparan medan/kumparan kutub merupakan komponen yang memegang peranan penting dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah dari sumber eksitasi tertentu. Terdapat dua bagian pada kumparan medan, yaitu bagian penghantar sebagai jalur untuk arus penguatan medan dan bagian yang diisolasi.
- c. *Slip ring* merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Terminal kumparan rotor dipasangkan ke *slip ring* dan kemudian dihubungkan ke sumber arus searah (DC) melalui sikat yang letaknya menempel pada *slip ring* tetapi ada juga yang tidak menggunakan sikat dimana penyearah diletakkan langsung pada poros yang berputar dengan rotor sehingga tidak dibutuhkan sikat dan *slip ring*.
- d. Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan dimana pada poros rotor tersebut telah terbentuk slot-slot secara paralel terhadap poros rotor. Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah electromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa salient pole (kutub menonjol) dan non salient pole (kutub silinder).



Gambar 2.2 (a) Kutup Tonjol, (b)Kutup silinder.



Gambar 2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

2.2.2.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Generator sinkron bekerja berdasarkan hukum induksi, apabila belitan kutub rotor yang terdiri dari kumparan medan di rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang akan memberi arus searah maka didalam inti kutub medan dibangkitkan fluks medan magnet. Besarnya fluks tergantung pada besarnya arus penguat (I_f), fluks ini beredar melalui celah udara dan inti stator, sehingga belitan stator/jangkar melingkupi fluks ini. Penggerak mula (*prime over*) yang sudah terkopel dengan rotor dapat dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya. *Prime Over* dapat berupa turbin ataupun daya penggerak

lainnya mengingat generator sinkron tidak memiliki torsi awal. Apabila rotor diputar maka fluks yang dilingkupi oleh belitan stator akan berubah-ubah sehingga pada belitan stator/jangkar akan diinduksi gaya gerak listrik. Tegangan induksi ini adalah tegangan bolak-balik (AC). Belitan jangkar yang terdiri dari tiga kelompok belitan fasa pada stator disusun dalam bentuk tertentu sehingga susunan belitan jangkar akan membangkitkan tegangan induksi pada ketiga kelompok belitan fasa yang besarnya sama tetapi berbeda fasa 120° satu dengan yang lain yaitu kelompok belitan fasa R, kelompok belitan fasa S, dan kelompok belitan fasa T. Nilai tegangan induksi adalah fungsi dari perputaran *rotor* (N) dan fluksi (Φ).

Apabila perputaran *rotor* (N) konstan, maka nilai tegangan merupakan fungsi dari fluks (Φ) atau arus penguat (I_f).

$$E = k I_f \text{ Volt} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

E = Tegangan induksi (V/Volt)

k = konstanta

I_f = Arus penguat (A/Ampere)

Jadi tegangan generator dapat diatur dengan mengatur arus penguat, frekuensi (f) dari tegangan bolak-balik ditentukan oleh jumlah kutub (P) dan perputaran (N) dari *rotor* yaitu :

$$f = \frac{N(\text{rpm}) \cdot P}{120} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

f = Frekuensi (Hz/Hertz)

N = Kecepatan putar rotor (rpm)

P = Banyaknya kutub magnet

Perhitungan di PLTA Ir. H. Djuanda Jatiluhur, apabila $N = 272.77$ rpm dan $P = 22$ maka $f = 50$ Hz.

Apabila generator dibebani, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang akan melawan medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan rotor. Kondisi inilah yang akan menyebabkan timbulnya reaksi jangkar. Dengan

demikian parameter yang terdapat pada generator berbeban adalah terdiri dari resistansi jangkar (R_a) akibat adanya lilitan kawat kumparan stator serta reaktansi permagnetan (X_m) dan reaktansi jangkar (X_a).

Reaktansi generator berganti secara *transient* (sementara) seiring dengan waktu setelah terjadinya gangguan. Adapun jenis nilai reaktansi generator adalah sebagai berikut:

a. Reaktansi *Sub transient* / *Sub transient Reactance* (X''_d)

Nilai reaktansi yang akan menentukan besar arus maksimal hubung singkat sesaat, setelah terjadi gangguan. Dapat berlangsung hingga 6 siklus dan sekitar 0,1 detik meningkat ke nilai berikutnya.

b. Reaktansi *Transient* / *Transient Reactance* (X'_d)

Nilai reaktansi yang akan menentukan arus saat pemutus terbuka hingga 5 detik. Reaktansi transient ini merupakan salah satu jenis reaktansi yang digunakan untuk membandingkan kemampuan generator dengan kebutuhan beban atau ketika membandingkan generator satu dengan yang lainnya. Perkiraan waktu efektif kerjanya adalah 6 siklus sampai 5 detik.

c. Reaktansi Sinkron / *Synchronous Reactance* (X_d)

Nilai reaktansi yang menentukan besar arus mengalir setelah kondisi *steady state* (stabil) tercapai. Keadaan ini tercapai setelah beberapa detik hubung singkat terjadi. Perkiraan waktu efektif kerjanya adalah secara terus menerus (*continuous*) setelah 5 detik. Namun bila tiba-tiba terjadi perubahan pada kondisi stabil (*steady state*) seperti korsleting atau reaktansi lain ikut beroperasi maka hal ini disebabkan oleh fluks di mesin tidak segera berubah. Reaktansi ini juga merupakan keseluruhan reaktansi dari belitan jangkar yaitu hasil dari penjumlahan reaktansi bocor (X_L) dan reaktansi fiktif (X_a).

2.2.2.2 Generator Berbeban

Ketika kondisi generator diberi beban dengan nilai yang berubah-ubah maka besarnya nilai tegangan terminal (V) akan berubah-ubah pula yang disebabkan adanya kerugian tegangan ditiga titik yaitu:

A. Resistansi Jangkar (R_a)

Resistansi jangkar/fasa merupakan tahanan lilitan jangkar yang menyebabkan tegangan jatuh (voltage drop) yang mengakibatkan kerugian tegangan/fasa yang sefasa dengan arus jangkar.

B. Reaktansi Fluks Bocor (X_L)

Reaktansi fluks jangkar adalah ketika arus mengalir melalui penghantar jangkar namun terdapat sebagian fluks yang tidak mengimbas pada jalur yang ditentukan.

C. Reaksi Jangkar (X_a)

Reaksi jangkar adalah pengaruh adanya interaksi antara fluks medan utama (Φ_F) dan fluks medan jangkar (Φ_A) sehingga menghasilkan fluks resultan (Φ_R) dan akan menghasilkan tegangan gaya gerak listrik induksi.

$$\Phi_R = \Phi_F \pm \Phi_A \dots\dots\dots 2.8$$

Dimana:

Φ_R = Fluks resultan

Φ_F = Fluks medan utama

Φ_A = Fluks medan jangkar

Dimana fluks medan utama adalah timbulnya fluks magnet oleh kutub-kutub utama generator pada saat tanpa beban sedangkan fluks medan jangkar yaitu ketika generator dibebani pada penghantar jangkar akan timbul arus jangkar. Fluks ini memotong belitan jangkar sehingga timbul medan induksi.

Dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar yang bersifat reaktif dan disebut reaktansi pemagnetan (X_m), disebut sebagai reaktansi pemagnetan karena saat arus mengalir ke dalam jangkar maka akan timbul medan magnet

sehingga jangkar akan berputar diantara kutub magnet yang berada di stator serta terdapat lilitan jangkar yang berfungsi sebagai tempat terbentuknya gaya gerak listrik imbas. Reaktansi pemagnetan ini juga disebut sebagai reaktansi fiktif (X_a) yang merupakan reaktansi dari resistansi jangkar (tahanan lilitan jangkar). Reaktansi pemagnetan (X_m) ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor (Leakage Reactance X_L) dan dikenal sebagai reaktansi sinkron (X_s).

$$X_s = X_m + X_L \dots\dots\dots (2.9)$$

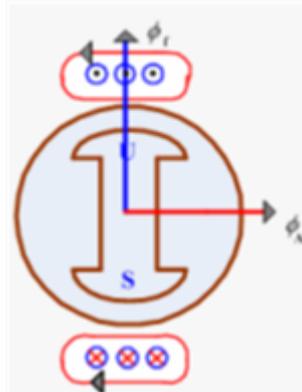
Dimana:

X_s = Reaktansi sinkron (Ω/Ohm)

X_m = Reaktansi pemagnetan (Ω/Ohm)

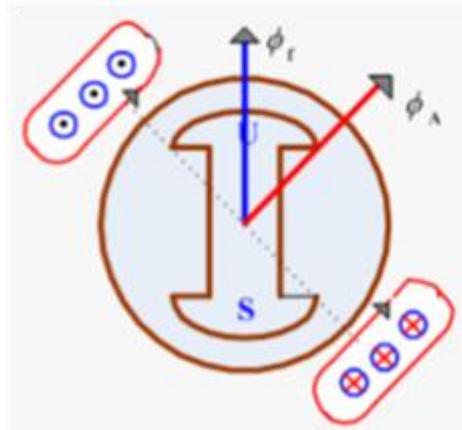
X_L = Reaktansi fluks bocor (Ω/Ohm)

Kondisi reaksi jangkar untuk jenis yang berbeda-beda yaitu:



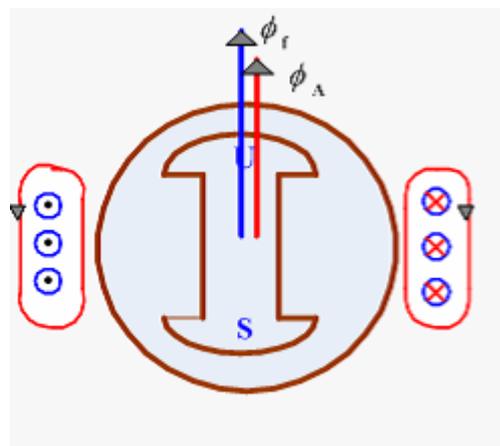
Gambar 2.4 Kondisi Reaksi Jangkar Jenis Beban Resistif

1. Gambar ini memperlihatkan dimana reaksi jangkar saat generator utama dibebani tahanan bersifat resistif mengakibatkan arus jangkar (I_a) sefase dengan $Ggl E_a$ (tegangan induksi pada jangkar) dan fluks medan jangkar (Φ_A) tegak lurus terhadap fluks medan utama (Φ_F).



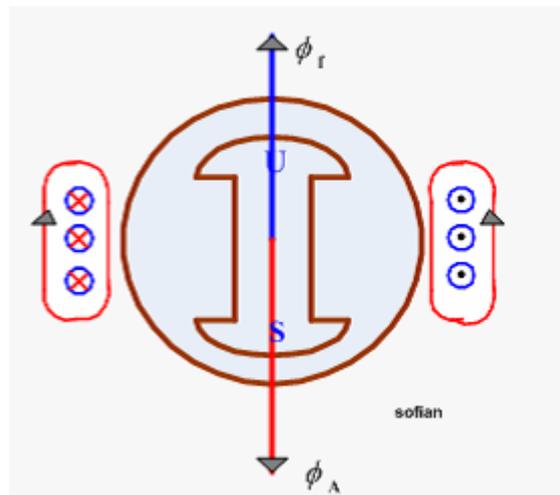
Gambar 2.5 Kondisi Reaksi Jangkar Jenis Beban Kapasitif

2. Gambar ini memperlihatkan dimana reaksi jangkar saat generator utama dibebani tahanan bersifat kapasitif mengakibatkan arus jangkar (I_a) mendahului Ggl E_a (tegangan induksi pada jangkar) dan fluks medan jangkar (ϕ_A) tertinggal dari fluks medan utama (ϕ_F) dengan sudut ($90^\circ - \theta$).



Gambar 2.6 Kondisi Reaksi Jangkar Jenis Beban Kapasitif Murni

3. Gambar tersebut memperlihatkan dimana reaksi jangkar saat generator utama dibebani tahanan bersifat kapasitif murni mengakibatkan arus jangkar (I_a) mendahului Ggl E_a sebesar 90° dan fluks medan jangkar (ϕ_A) akan memperkuat fluks medan utama (ϕ_F) yang berpengaruh terhadap pemagnetan.

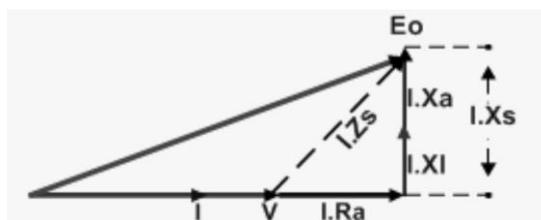


Gambar 2.7 Kondisi Reaksi Jangkar Jenis Beban Induktif Murni

4. Gambar 2.7 memperlihatkan dimana kondisi reaksi jangkar ketika arus diberi beban induktif murni mengakibatkan arus jangkar (I_a) terbelakang dari G_{gl} E_a sebesar 90° dan fluks medan jangkar (ϕ_A) akan memperlemah fluks medan utama (ϕ_r) yang berpengaruh terhadap pemagnetan.

Vektor diagram generator utama berbeban terbagi menjadi tiga yaitu:

- a. Diagram vektor berbeban resistif



Gambar 2.8 Diagram Vektor Generator Utama Sinkron Berbeban Resistif

Keadaan ini menggambarkan dimana vektor tegangan terminal dan vektor arus sefasa atau faktor daya (pf) sama dengan satu. Dari diagram vektor tersebut dapat dituliskan persamaan tegangan yaitu:

$$E_o = \sqrt{(V + I R_a)^2 + (I j X_s)^2} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana:

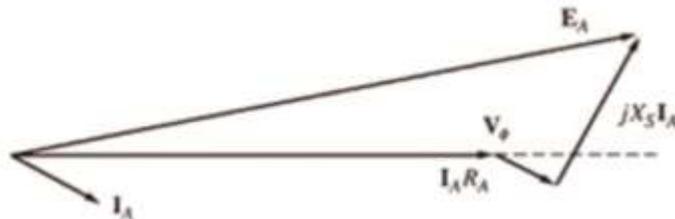
E_o = Tegangan tanpa beban

V = Tegangan terminal

$I R_a$ = Tegangan jatuh resistansi jangkar

$I X_s$ = Tegangan jatuh reaktansi sinkron

b. Diagram vektor berbeban induktif



Gambar 2.9 Diagram Vektor Generator Utama Sinkron Berbeban Induktif

Keadaan ini menggambarkan ketika alternator berbeban serempak dengan beban induktif maka vektor tegangan mendahului vektor arus, disebut *lagging*. Dari diagram vektor tersebut dapat dituliskan persamaan tegangan yaitu:

$$E_o = \sqrt{(V \cos \emptyset + I R_a)^2 + (V \sin \emptyset + I j X_s)^2} \dots\dots\dots (2.11)$$

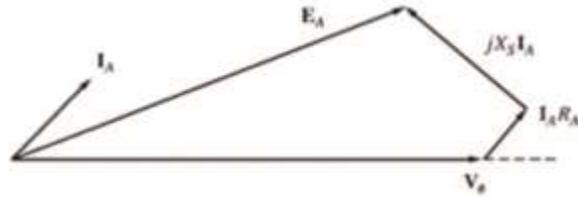
Dimana:

$V \cos / \sin \emptyset$ = Tegangan terminal dengan faktor daya dari $\cos / \sin \emptyset$

$I R_a$ = Tegangan jatuh resistansi jangkar

$I X_s$ = Tegangan jatuh reaktansi sinkron

c. Diagram vektor berbeban kapasitif



Gambar 2.10 Diagram Vektor Generator Utama Sinkron Berbeban Kapasitif

Keadaan ini menggambarkan ketika generator utama berbeban bekerja serempak dengan berbeban kapasitif maka vektor arus mendahului vektor tegangan, disebut *leading*. Dari diagram vektor tersebut dapat dituliskan persamaan tegangan yaitu:

$$E_0 = \sqrt{(V \cos \emptyset + I R_a)^2 + (V \sin \emptyset + I j X_s)^2} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana:

$V \cos / \sin \emptyset$ = Tegangan terminal dengan faktor daya dari $\cos / \sin \emptyset$

$I R_a$ = Tegangan jatuh resistansi jangkar

$I X_s$ = Tegangan jatuh reaktansi sinkron

2.2.2.3 Gaya Gerak Listrik

Gaya gerak listrik dapat didefinisikan sebagai beda potensial antara ujung-ujung penghantar sebelum dialiri arus listrik dengan satuan volt (V). Gaya gerak listrik ini merupakan energi yang diberikan pada setiap muatan listrik untuk bergerak antara dua kutub baterai atau generator. Pada dasarnya gaya gerak listrik ini bersumber dari segala jenis alat yang muatan positif dan muatan negatif dalam keadaan terpisah yang kemudian kedua ujung tersebut disebut terminal, terminal positif bernama anoda dan terminal negatif bernama katoda. Karena kedua jenis muatan tersebut dalam keadaan terpisah maka berakibat adanya medan listrik. Medan ini akan mengalir dari arah anoda ke katoda yang kemudian akan memaksakan sebuah gaya pada muatan positif dengan mendorong muatan positif

dalam alat menuju katoda dan memaksa muatan negatif ke anoda. Agar muatan positif tetap di terminal positif dan muatan negatif tetap di terminal negatif maka alat akan menghasilkan gaya non listrik yang akan melawan gaya listrik dan terus mendorong muatan positif ke anoda dan muatan negatif ke katoda. Gaya non listrik ini menyebabkan muatan mengalir ke anoda dan meningkatkan energi potensial listrik yang mengakibatkan terjadi beda potensial antara anoda dan katoda.

2.2.2.4 Gaya Gerak Listrik Induksi

Induksi elektromagnetik merupakan gejala timbulnya gaya gerak listrik di dalam suatu kumparan apabila terdapat perubahan fluks magnetik pada kumparan. Sedangkan fluks magnetik merupakan jumlah garis gaya medan magnet yang melewati luas penampang tertentu secara tegak lurus. Fluks magnetik yang melalui bidang tertentu sebanding dengan jumlah medan magnet yang melalui bidang tersebut. Pengukuran fluks magnetik biasanya menggunakan alat fluksmeter yang berisi kumparan dan rangkaian yang dapat menghitung berdasarkan pada perubahan medan magnet yang melalui kumparan di dalam alat ini.

Gaya gerak listrik induksi ialah timbulnya gaya gerak listrik didalam kumparan yang terdiri dari sejumlah fluks garis gaya medan magnetik, pada saat banyaknya fluks garis gaya itu divariasi, maka akan timbul gaya gerak listrik di dalam kumparan apabila kumparan itu berada di dalam medan magnetik yang kuat medannya berubah-ubah terhadap waktu.

Prinsip dasar operasi generator listrik adalah hukum induksi Faraday yang menyatakan bahwa setiap perubahan medan magnet pada kumparan akan menyebabkan gaya gerak listrik (GGL) induksi yang sebanding dengan laju perubahan fluks dan dapat dinyatakan dengan rumus di bawah ini:

$$\varepsilon = -N \left(\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right) \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana:

ε = Gaya gerak listrik induksi (Volt)

N = Jumlah lilitan kumparan

Δt = Selang waktu (s)

$\Delta \Phi$ = Perubahan fluks magnetic (weber)

Tanda negatif pada simbol N menandakan arah gaya gerak listrik induksi.

2.2.3 Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi adalah suatu perangkat yang memberikan arus penguat (I_f) kepada kumparan medan pada rotor generator utama sinkron arus bolak – balik (AC) yang dijalankan dengan cara membangkitkan medan magnet dengan bantuan arus searah (DC).

Arus eksitasi adalah pemberian arus listrik pada kutub magnetik generator. Dengan mengatur besar kecilnya arus listrik tersebut akan mengatur besar tegangan output generator atau dapat juga mengatur besar daya reaktif yang diinginkan pada generator yang sedang terhubung paralel dengan sistem jaringan luar.

Komponen utama dari rotor sebuah generator adalah magnet. Magnet ini dapat berupa magnet permanen maupun magnet yang dibangkitkan dengan menggunakan kumparan. Pada generator yang menggunakan kumparan sebagai magnet buatan, maka dibutuhkan arus listrik yang mengalir ke kumparan tersebut. Proses dari pembangkitan medan magnet secara buatan pada generator inilah yang disebut dengan proses eksitasi. Sistem eksitasi dapat di bagi menjadi dua jenis yaitu, sistem eksitasi dengan menggunakan sikat dan sistem eksitasi tanpa sikat.

2.2.3.1 Sistem Eksitasi Dengan Sikat (*Brush Excitation*)

Sistem eksitasi dengan sikat adalah sistem eksitasi generator disuplai dari eksiter dengan melewati sikat arang (*brush*). Sebagai eksiternya menggunakan generator DC atau sumber AC yang kemudian disearahkan menggunakan penyearah.

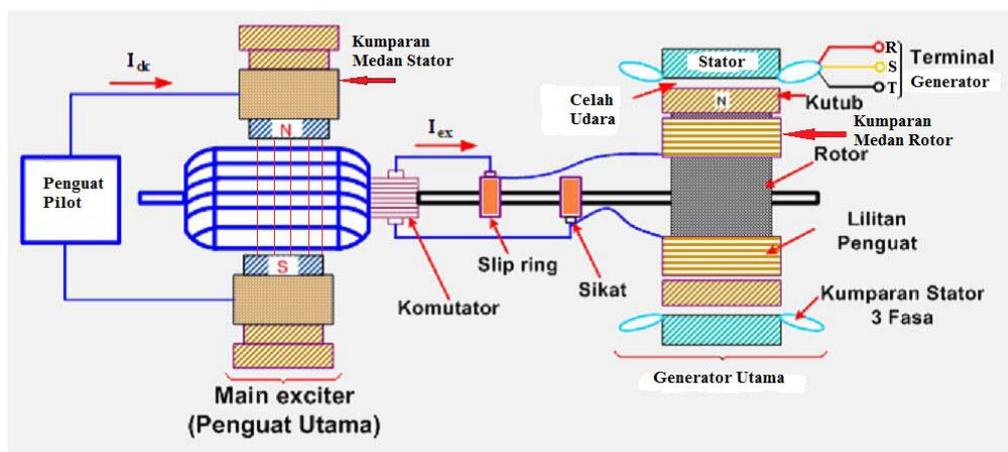
Keuntungan sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*) adalah desainnya tidak rumit karena hanya menggunakan satu generator, tidak seperti sistem eksitasi tanpa sikat yang menggunakan pilot eksiter dan eksiter utama. Untuk mengalirkan arus eksitasi dari penguat utama ke rotor generator

digunakan cincin geser (*slip ring*) dan sikat arang (*carbon brush*), demikian juga penyaluran arus yang berasal dari penguat pilot ke penguat utama.

A. Kerugian sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*), antara lain adalah:

- 1) Perlu perawatan, pemeliharaan rutin dan penggantian arang.
- 2) Dapat menimbulkan percikan api.
- 3) Arus yang dialirkan oleh sikat relatif kecil. Generator dengan kapasitas besar tidak bisa mengalirkan arus eksitasi dengan sikat dan slip ring.
- 4) Terdapat hilangnya listrik yang disebabkan oleh arang.

B. Prinsip kerja sistem eksitasi dengan sikat (*Brush Excitation*)



Gambar 2.11 Sistem Eksitasi dengan Sikat (*Brush Excitation*) Tampak Samping

Pengaturan besarnya arus eksitasi generator utama dilakukan dengan pengatur tegangan otomatis supaya nilai tegangan ke generator konstan. Pengaturan tegangan otomatis ini pada awalnya berdasarkan prinsip mekanis, tetapi sekarang sudah menjadi elektronik menggunakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR). PMT arus eksitasi generator utama dilengkapi tahanan yang menampung energi medan magnet generator utama karena jika dilakukan pemutusan arus eksitasi generator utama harus dibuang ke dalam tahanan.

Sistem eksitasi menggunakan sikat memiliki perbedaan dengan system eksitasi tanpa sikat yaitu pada penggunaan komutator, slip ring, dan sikat. Slip ring digunakan untuk menyalurkan arus dari generator penguat utama ke medan

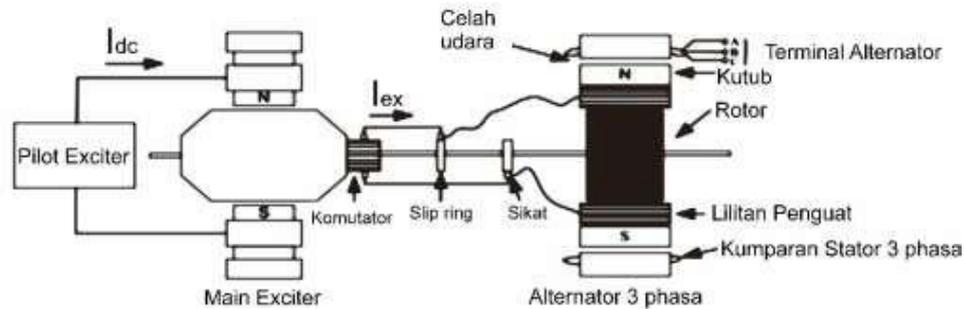
penguat generator utama sedangkan komutator sebagai alat penyearah dengan proses komutasi bersama sikat. Nilai arus eksitasi kecil sehingga penggunaan slip ring tidak menimbulkan masalah. Perbedaan dengan system eksitasi tanpa sikat yaitu pada system ini tidak perlu adanya penyearah karena arus yang dihasilkan oleh penguat utama berupa arus searah yang sebelumnya sudah melalui proses komutasi oleh komutator dan hasil arus searah dapat langsung disalurkan menuju generator sinkron tiga fasa utama untuk digunakan sebagai arus penguat.

Kinerja dari sistem ini berawal dari baterai sebagai sumber tegangan untuk penguat pilot berupa arus searah (DC) kemudian diatur besaran arusnya oleh AVR. Setelah itu tegangan searah (DC) disalurkan ke kumparan stator yang akan menghasilkan fluks medan magnet dan ketika rotor berputar maka akan dihasilkan tegangan arus bolak-balik (AC) yang kemudian akan melewati komutator dimana bersama dengan sikat membentuk suatu kerjasama bernama komutasi yaitu peristiwa gesekan/perpindahan sikat dari satu komutator ke komutator berikutnya. Lebih jelasnya komutator 1 dihubungkan dengan kumparan 1 dan komutator 2 dihubungkan dengan kumparan 2, apabila kumparan berputar maka sikat komutator akan bergesekan dengan komutator lainnya secara bergantian dan peristiwa inilah yang menyebabkan terjadinya penyearahan. Jadi tegangan arus bolak-balik setelah melalui proses komutasi akan dihasilkan tegangan arus searah (DC) berupa arus penguat untuk generator sinkron tiga fasa utama yang dialiri melalui slip ring.

Sistem Eksitasi dengan sikat arang dibagi menjadi dua yaitu Sistem Eksitasi Dinamis dan Sistem Eksitasi Statis.

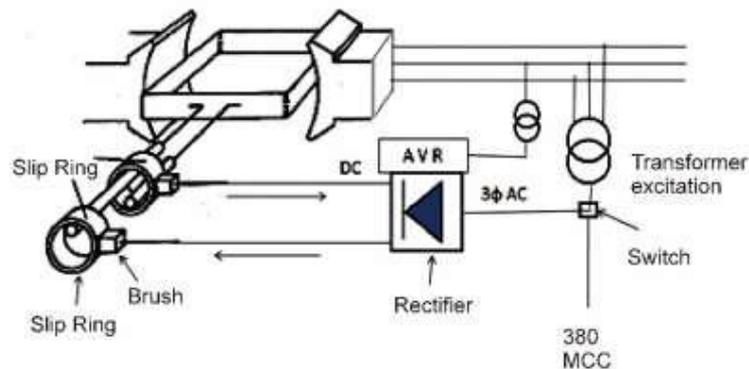
1) Sistem Eksitasi Dinamis dengan Sikat

Sistem eksitasi dinamis adalah sistem eksitasi generator tersebut disuplai dari eksiter yang merupakan mesin bergerak. Sebagai eksiternya menggunakan generator DC atau dapat juga menggunakan generator AC yang kemudian disearahkan menggunakan penyearah. Slip ring digunakan untuk menyalurkan arus dari generator penguat pertama ke medan penguat generator penguat kedua.



Gambar 2.12 Skema Eksitasi Dinamis dengan Sikat

2) Sistem Eksitasi Statis dengan Sikat



Gambar 2.13 Skema Eksitasi Statis dengan Sikat

Sistem eksitasi statik adalah sistem eksitasi generator dengan menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak, yang berarti bahwa peralatan eksitasi tidak ikut berputar bersama rotor generator sinkron. Sistem eksitasi ini disebut juga sistem eksitasi sendiri merupakan sistem eksitasi yang tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi generator sinkron dan sebagai gantinya sumber eksitasi berasal dari keluaran generator sinkron itu sendiri yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan penyearah.

Awalnya pada rotor ada sedikit magnet yang tersisa, magnet yang sisa ini akan menimbulkan tegangan pada stator, tegangan ini kemudian masuk ke dalam penyearah dan dimasukkan kembali ke rotor, akibatnya medan magnet yang dihasilkan semakin besar dan tegangan AC naik demikian seterusnya sampai dicapai tegangan nominal dari generator AC tersebut. Biasanya penyearah itu mempunyai pengatur sehingga tegangan generator dapat diatur konstan

menggunakan pengatur tegangan otomatis atau *Automatic Voltage Regulator* (AVR).

2.2.3.2 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

Sistem eksitasi pada generator sinkron menggunakan sistem eksitasi tanpa sikat dikarenakan kelemahan sikat dapat menimbulkan percikan api pada putaran tinggi, maka dari itu untuk menghindari hal tersebut perlu dihilangkan penggunaan sikat dengan menggunakan dioda putar yang dipasang pada jangkar. Penggunaan sikat arang untuk menyalurkan arus eksitasi ke rotor juga mempunyai kelemahan yaitu besar arus yang mampu dialirkan pada sikat arang relatif kecil.

- A. Kelebihan sistem eksitasi tanpa sikat, antara lain adalah sebagai berikut:
1. Energi yang diperlukan untuk eksitasi diperoleh dari poros utama sehingga keandalan cukup tinggi.
 2. Biaya perawatan lebih hemat karena pada sistem eksitasi tanpa sikat ini tidak terdapat sikat arang, *slip ring*, dan komutator.
 3. Pada sistem eksitasi tanpa sikat tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada pernis akibat sikat arang.
 4. Mengurangi kerusakan akibat udara buruk karena semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup.
 5. Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat arang, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung terus pada waktu yang lama.
 6. Tidak membutuhkan pemutus medan generator, *field generator* dan *bus exciter* atau kabel karena tidak diperlukan lagi.
 7. Biaya pondasi berkurang karena aliran udara dan *bus exciter* atau kabel tidak memerlukan pondasi.

mula) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya. Perputaran rotor tersebut sekaligus akan memutar fluks medan yang dihasilkan oleh kumparan medan rotor.

Fluks medan magnet putar yang dihasilkan rotor akan diinduksikan pada kumparan jangkar yang terletak distator sehingga menghasilkan fluks medan magnet yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu. Adanya perubahan fluks medan magnet yang melingkupi kumparan jangkar akan menimbulkan gaya gerak listrik induksi pada ujung-ujung kumparan jangkar tersebut. Untuk generator sinkron tiga fasa digunakan tiga kumparan jangkar (terminal generator utama yaitu kumparan fasa R, fasa S, dan fasa T) yang ditempatkan pada stator dan disusun dalam bentuk tertentu sehingga susunan belitan jangkar yang sedemikian rupa akan membangkitkan tegangan induksi pada ketiga kumparan jangkar yang besarnya sama tetapi berbeda fasa 120° satu sama lain. Setelah itu ketiga terminal kumparan jangkar siap dioperasikan untuk menghasilkan energi listrik. Besarnya arus penguat utama mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator utama.

Permasalahan yang timbul pada sistem ini jika terjadi hubung singkat atau gangguan hubung tanah di rotor dan ada sekering lebur dari dioda berputar yang putus, maka hal ini harus segera dapat dideteksi. Gangguan pada rotor yang berputar dapat menimbulkan distorsi medan magnet pada generator utama dan dapat menimbulkan getaran berlebihan pada unit pembangkit.

2.2.4 AVR (*Automatic Voltage Regulator*)

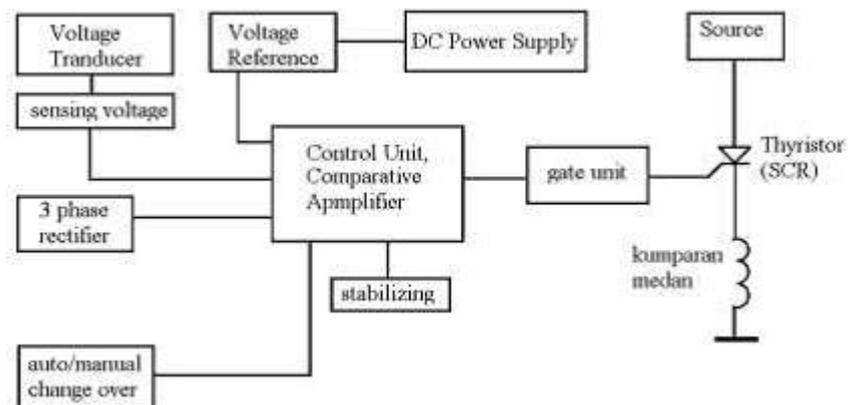
Automatic Voltage Regulator (AVR) ini berfungsi untuk menjaga tegangan generator agar tetap stabil dan tidak terpengaruh oleh perubahan beban yang bersifat berubah-ubah, dikarenakan keluaran tegangan generator sangat dipengaruhi oleh beban.

Automatic Voltage Regulator (AVR) ini dilengkapi alat yang berfungsi untuk pembatasan antara penguat minimum dan penguat maksimum yang bekerja secara otomatis sehingga prinsip kerja dari *AVR* ini adalah mengatur arus penguatan (eksitasi) pada eksiter. Apabila nilai keluaran tegangan generator

dibawah nilai nominal tegangan generator, maka *AVR* akan menambah nilai arus penguatan pada eksiter, sebaliknya apabila nilai keluaran tegangan generator diatas nilai nominal tegangan generator, maka *AVR* akan mengurangi nilai arus penguatan pada eksiter. Dengan demikian *AVR* akan secara otomatis menstabilkan nilai arus penguatan apabila terjadi perubahan nilai keluaran tegangan generator.

AVR yang digunakan adalah *AVR* jenis thyristor yang sumber daya masukannya berasal dari sumber tiga fasa dari transformator eksitasi yang kemudian disearahkan oleh penyearah yang terdiri dari penyearah thyristor yang terkontrol oleh *AVR* dan dapat mendeteksi perubahan tegangan output pada belitan stator generator utama melalui instrument pengukuran berupa *Potential Transformer (PT)* untuk dibandingkan dengan tegangan nominal generator, pembandingan tegangan tersebut dilakukan oleh rangkaian komparator. Dengan cara tersebut *AVR* dapat menjaga tegangan keluaran pada batas yang ditetapkan, maka dari itu tugas utama *AVR* yaitu:

1. Mengatur keluaran tegangan generator agar generator tetap sinkron dengan jaringan interkoneksi.
2. Untuk mengatur daya reaktif pada operasi paralel.

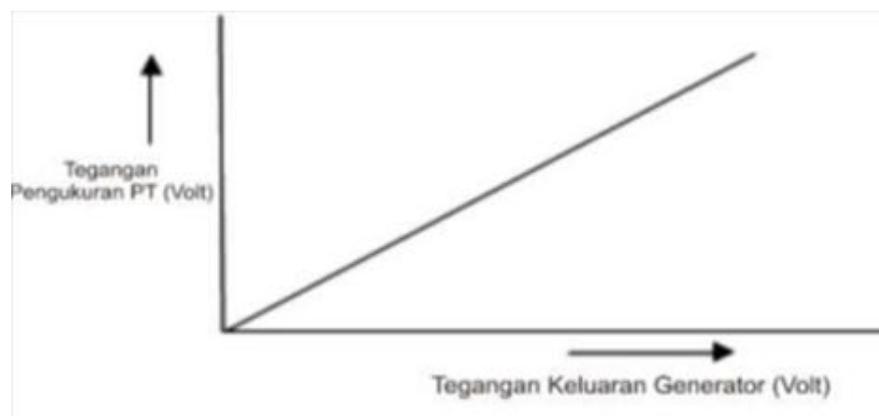


Gambar 2.15 Diagram AVR

Bagian-bagian pada unit AVR:

1) *Voltage Tranducer and Sensing Circuit*

Sensing circuit berfungsi untuk mendeteksi keluaran tegangan generator. Tegangan 3 fasa keluaran generator diturunkan melalui *voltage tranducer* yaitu PT (*Potential Transformer*) terlebih dahulu, dan tegangan 3 fasa kemudian disearahkan dengan rangkaian dioda, dan diratakan oleh kapasitor dan resistor. Tegangan tersebut dapat diatur dengan VR (*Variable Resistant*). *Sensing Circuit* mempunyai respon yang cepat terhadap keluaran tegangan generator. Keluaran tegangan respon berbanding lurus dengan keluaran tegangan generator yang ditunjukkan pada gambar sebagai berikut:



Gambar 2.16 Grafik Hubungan Tegangan Pengukuran PT Terhadap Tegangan Keluaran Generator

2) *Three Phase Rectifier*

Bagian ini terdiri dari penyearah gelombang penyearah penuh tiga fasa dan kapasitor perata. Bagian ini menyearahkan tegangan tiga fasa yang kana diumpan-balikkan ke rangkaian *comparative amplifier*.

3) *Comparative Amplifier*

Rangkaian *comparative amplifier* digunakan sebagai pembanding antara *sensing circuit* dengan *reference voltage*. *Sensing circuit* mewakili nilai tegangan keluaran generator, sedangkan *reference voltage* mewakili tegangan nominal generator.

Nilai *sensing circuit* dan *reference voltage* tidak memiliki nilai yang sama sehingga ada selisih atau rentang besar tegangan tersebut. Selisih

tegangan disebut *error voltage*. Kondisi ini terjadi pada saat keluaran tegangan generator menyimpang dari nilai nominalnya. Saat kondisi keluaran tegangan generator bernilai sesuai dengan tegangan nominalnya, maka tidak ada selisih nilai antara *sensing circuit* dan *reference voltage*.

4) *Stabilizing Circuit*

Untuk menjaga kestabilan pada sistem pengaturan tegangan terhadap adanya perubahan-perubahan sesaat seperti penambahan atau pengurangan pembebanan generator pada kerja paralel.

5) *Automatic Manual Change Over and Mixer Circuit*

Rangkaian ini disusun secara *Auto-Manual* pemindah hubungan dan sebuah rangkaian untuk mengontrol tegangan penguatan medan generator. *Auto-manual change over* dan *mixer circuit* pada operasi manual pengaturan tegangan penguatan medan generator dilakukan oleh operator melalui *master sequence control* dan pada saat beroperasi manual maka AVR belum dapat beroperasi. Dan apabila rangkaian ini pada kondisi *auto* maka AVR sudah dapat bekerja untuk mengukur besar arus medan generator.

6) *MEL (Minimum Excitation Limiter)*

MEL yaitu untuk mencegah terjadinya kekurangan suplai arus eksitasi pada sistem eksitasi. Generator bekerja dalam keadaan induktif atau lagging. Apabila MEL tidak bekerja maka generator akan bekerja dalam keadaan kapasitif atau leading dan menyerap daya reaktif dari sistem dan ketika generator kekurangan arus eksitasi maka boost converter akan bekerja untuk menaikkan nilai tegangan suplai eksitasi untuk menambah suplai arus eksitasi ke rotor generator.

7) *OEL (Over Excitation Limiter)*

OEL yaitu untuk mencegah terjadinya kelebihan suplai arus eksitasi pada sistem eksitasi. Apabila OEL tidak bekerja maka generator dapat kelebihan arus eksitasi yang dapat menyebabkan arus pada stator meningkat. Arus pada rotor berbanding lurus dengan suhu stator, sehingga kenaikan arus diatas batas maksimal arus stator dapat menyebabkan panas

yang berlebih. Apabila generator kelebihan arus eksitasi maka bock converter akan bekerja untuk menurunkan tegangan suplai eksitasi untuk mengurangi suplai arus eksitasi ke rotor generator.

8) Transformator Eksitasi

Transformator eksitasi digunakan sebagai sumber eksitasi utama pada saat generator beroperasi. Transformator eksitasi bertugas menurunkan tegangan tiga fasa. Tegangan keluaran arus bolak-balik akan disearahkan terlebih dahulu sebelum dialirkan ke kumparan medan.

9) Thyristor Penyearah

Generator membutuhkan arus searah untuk eksitasinya. Keluaran transformator eksitasi merupakan tegangan bolak balik tiga fasa. Untuk dapat digunakan sebagai sumber eksitasi tegangan tersebut harus disearahkan terlebih dahulu. Penyearah tegangan yang digunakan pada sistem eksitasi adalah thyristor. Thyristor adalah komponen semikonduktor yang bekerja seperti saklar. Mempunyai dua keadaan yaitu On (menghantarkan) dan Off (tidak menghantarkan). Tidak ada daerah linier antara dua keadaan seperti pada transistor. Thyristor berbeda dengan dioda penyearah karena thyristor merupakan penyearah silicon terkontrol. Thyristor memiliki tiga sambungan yang terdiri dari terminal anoda (positif), katoda (negatif) dan gate.

Thyristor penyearah dirangkai paralel pada konfigurasi *bridge*. Thyristor dirangkai paralel bertujuan untuk meningkatkan kemampuan arus yang dapat dilewatkan. Selain itu agar pada saat salah satu thyristor rusak, penyearahan masih dapat berjalan normal. Sedangkan konfigurasi *bridge* bertujuan agar thyristor menjadi penyearah gelombang penuh. Dalam operasi menyearahkan tegangan, thyristor dikendalikan oleh AVR. Pengaturan tegangan pada AVR menghasilkan sinyal pesaklaran yang diumpankan ke driver thyristor dengan tujuan menguatkan arus pesaklaran atau dapat disebut sebagai *buffer*. Keluaran dari driver tersebut diumpankan pada terminal gate thyristor penyearah.

2.2.5 Gangguan Pada Generator

Macam-macam gangguan pada generator terbagi menjadi tiga jenis, yaitu :

2.2.5.1 Gangguan Listrik

Jenis gangguan ini adalah gangguan yang timbul dan terjadi pada bagian-bagian listrik generator. Gangguan-gangguan tersebut antara lain:

1. Hubung singkat tiga fasa.

Terjadinya arus lebih pada stator adalah arus lebih yang timbul akibat terjadinya hubungan singkat tiga fasa. Gangguan ini akan menimbulkan percikan api dengan suhu tinggi yang akan melelehkan belitan dengan resiko terjadinya kebakaran jika isolasi tidak terbuat dari bahan yang anti api.

2. Hubung singkat dua fasa.

Gangguan hubung singkat dua fasa (*unbalance fault*) lebih berbahaya dibanding gangguan hubung singkat tiga fasa (*balance fault*) karena disamping akan terjadi kerusakan pada belitan, akan timbul pula getaran pada kumparan stator. Kerusakan lain yang timbul adalah pada poros (*shaft*) dan kopling turbin akibat adanya momen puntir yang besar.

3. Stator hubung singkat satu fasa ketanah (*stator ground fault*).

Kerusakan akibat gangguan dua fasa atau antara konduktor terkadang masih dapat diperbaiki dengan menyambung atau mengganti sebagian konduktor. Namun kerusakan laminasi besi akibat gangguan satu fasa ketanah yang menimbulkan percikan api serta merusak inti besi dan isolasi adalah kerusakan serius yang perbaikannya dilakukan secara total. Meskipun gangguan jenis ini kecil namun harus segera diproteksi.

4. Rotor hubung tanah (*field ground*).

Pada rotor generator yang belitannya tidak dihubungkan ketanah, jika salah satu sisi terhubung ketanah belum menjadikan masalah. Tetapi apabila sisi lainnya kemudian terhubung ketanah, sementara sisi sebelumnya tidak terselesaikan maka akan terjadi kehilangan arus pada sebagian belitan yang terhubung singkat melalui tanah. Akibatnya terjadi

ketidakseimbangan fluksi yang menimbulkan getaran yang berlebihan dan kerusakan fatal pada rotor.

5. Kehilangan penguat medan atau eksitasi (*loss of excitation*).

Hilangnya penguat medan atau eksitasi akan membuat putaran mesin meningkat dan berfungsi sebagai generator induksi. Kondisi ini akan berakibat pemanasan lebih pada rotor dan pasak (*slot wedges*), akibat arus induksi yang bersirkulasi pada rotor.

Penyebab hilangnya penguat medan atau eksitasi yaitu :

- a. Gagal kontrol pada sistem AVR.
- b. Jatuhnya (*trip*) pada saklar penguat.
- c. Hubung singkat pada belitan penguat.
- d. Kerusakan kontak-kontak sikat arang pada sisi penguat bagi sistem eksitasi yang menggunakan sikat.

6. Tegangan lebih (*over voltage*).

Tegangan yang berlebihan melewati batas maksimum yang diijinkan dapat berakibat tembusnya (*breakdown*) desain isolasi yang akhirnya akan menimbulkan hubung singkat antara belitan. Tegangan lebih dapat terjadi akibat mesin putaran lebih atau kerusakan pada pengatur tegangan otomatis (AVR).

2.2.5.2 Gangguan Mekanis atau Panas

Jenis - jenis gangguan mekanik atau panas yaitu:

1. Generator berfungsi sebagai motor. Berubah fungsinya generator menjadi motor akibat daya balik. Daya balik terjadi disebabkan oleh daya masukan yang menurun dari penggerak utama (*prime mover*). Dampak kerusakan akibat peristiwa ini adalah lebih kepada penggerak utama itu sendiri.
2. Pemanasan lebih setempat pada sebagian stator dapat terjadi oleh :
 - a) Kendornya bagian-bagian tertentu didalam generator seperti, pasak-pasak stator, terminal ujung-ujung belitan, dsb.
 - b) Kerusakan laminasi.

3. Kesalahan paralel.

Kesalahan dalam memparalel generator karena syarat-syarat sinkron tidak terpenuhi dapat mengakibatkan kerusakan pada bagian poros, kopling generator, dan penggerak utamanya karena terjadinya momen puntir. Kemungkinan kerusakan lain yang timbul ialah kerusakan PMT dan kerusakan pada kumparan stator akibat adanya kenaikan tegangan sesaat.

2.2.5.3 Gangguan Sistem (*Sistem Fault*)

Gangguan generator dapat terjadi akibat adanya gangguan pada sistem.

Gangguan - gangguan sistem yang umumnya terjadi yaitu :

1. Pengoperasian frekuensi yang tidak normal (*abnormal frequency operation*).

Perubahan frekuensi yang keluar dari batas-batas normal di sistem mengakibatkan ketidakstabilan pada turbin generator. Perubahan sistem frekuensi terjadi akibat tripnya unit-unit pembangkit atau penghantar (transmisi).

2. Lepas sinkron (*loss of synchron*).

Adanya gangguan di sistem akibat perubahan beban mendadak, *switching*, hubung singkat dan peristiwa yang cukup besar akan menimbulkan ketidakstabilan sistem. Apabila peristiwa ini cukup lama dan melampaui batas-batas ketidakstabilan generator, generator akan kehilangan kondisi paralel.

3. Pengaman cadangan (*back up protection*).

Kegagalan fungsi proteksi didepan generator pada saat terjadi gangguan di sistem.

4. Arus beban kumparan yang tidak seimbang (*unbalance armature current*).

Pembebanan yang tidak seimbang pada sistem atau adanya gangguan satu fasa dan dua fasa pada sistem menyebabkan beban generator tidak seimbang dan menimbulkan arus urutan negatif. Arus urutan negatif yang melebihi akan menginduksikan arus medan yang berfrekuensi rangkap dengan arah berlawanan dengan putaran rotor dan akan menginduksikan

arus pada rotor yang akan menyebabkan adanya pemanasan lebih dan kerusakan pada bagian-bagian konstruksi rotor.

2.2.6 Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Sistem Proteksi Tenaga Listrik adalah sistem pengamanan pada peralatan-peralatan yang terpasang pada sistem tenaga listrik, seperti generator, bus bar, transformator, saluran udara tegangan tinggi, saluran kabel bawah tanah, dan lain sebagainya terhadap kondisi abnormal operasi sistem tenaga listrik tersebut. (Syahputra, 2016)

2.2.6.1 Fungsi Proteksi Tenaga Listrik

Fungsi-fungsi dari sistem proteksi tenaga listrik yaitu:

- a. Mencegah dan mengurangi kerusakan peralatan-peralatan akibat gangguan atau operasi sistem bersifat abnormal. Semakin cepat reaksi perangkat proteksi yang digunakan maka semakin kecil pengaruh gangguan yang menyebabkan kerusakan alat.
- b. Mempersempit zona yang terganggu agar tidak meluas.
- c. Memberikan pelayanan listrik dengan keandalan tinggi dan mutu listrik yang baik kepada konsumen.
- d. Mengamankan manusia terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.
- e. Menjaga peralatan-peralatan agar dapat bekerja sesuai dengan batas kemampuan kerjanya.

2.2.6.2 Persyaratan Sistem Proteksi

Persyaratan yang sangat perlu diperhatikan dalam suatu perencanaan sistem proteksi yaitu :

- a. Selektivitas dan Diskriminatif

Efektivitas suatu sistem proteksi dapat dilihat dari kesanggupan sistem dalam mengisolir bagian yang mengalami gangguan saja. Diskriminatif ialah suatu sistem proteksi harus mampu membedakan

antara kondisi tidak normal dan normal serta kondisi tidak normal itu terjadi di dalam atau di luar daerah kerja proteksinya.

b. Stabilitas

Sifat yang tetap tidak beroperasi apabila gangguan-gangguan terjadi diluar zona yang melindungi (gangguan luar).

c. Kecepatan Operasi

Semakin lama arus gangguan mengalir, semakin besar kerusakan peralatan. Maka sistem proteksi harus memiliki tingkat kecepatan yang ditentukan sehingga dapat meningkatkan keamanan manusia, peralatan, dan stabilitas operasi. Kemudian hal yang paling penting adalah perlunya membuka bagian-bagian yang terganggu sebelum generator-generator yang dihubungkan kehilangan sinkronisasi dengan sistem. Umumnya waktu pembebasan gangguan dalam sistem-sistem tegangan tinggi adalah 140 ms. Dalam masa mendatang waktu ini hendak dipersingkat menjadi 80 ms sehingga memerlukan rele dengan kecepatan yang sangat tinggi.

d. Sensitivitas (kepekaan)

Sensitivitas ialah kepekaan rele proteksi terhadap segala macam gangguan yakni gangguan yang terjadi di daerah kerja perlindungan tersebut yang ditentukan oleh besarnya arus gangguan agar alat bekerja. Nilai ini dapat dinyatakan dari besarnya arus dalam jaringan aktual (arus primer) atau sebagai prosentase dari arus sekunder (trafo arus).

e. Realiabilitas (keandalan)

Penyebab utama dari kekurangan rangkaian ialah tidak bekerjanya proteksi sebagaimana mestinya (*mal operation*) dan untuk tetap menjaga keandalan suatu rele yaitu dilakukan pengujian secara berkala.

f. Pertimbangan ekonomis

Aspek ekonomis hampir selalu berkaitan dengan aspek teknis karena jumlah peralatan sistem tenaga listrik yang begitu banyak, dan yang

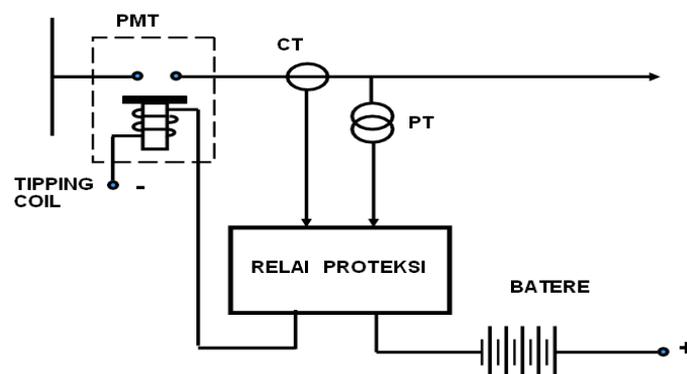
terpenting adalah persyaratan keamanan yang pokok terpenuhi. Dalam sistem-sistem transmisi justru aspek teknis yang terpenting. Proteksi relatif mahal tetapi sistem atau peralatan yang dilindungi serta jaminan terhadap kelangsungan peralatan sistem adalah sangat penting. Biasanya digunakan dua sistem proteksi yang terpisah, yaitu proteksi utama dan proteksi pendukung (*back up*).

g. Proteksi Pendukung

Proteksi pendukung ialah susunan yang terpisah dan bekerja untuk mengeluarkan bagian yang terganggu apabila proteksi utama tidak bekerja. Sistem pendukung ini sebisa mungkin seperti proteksi utama yang memiliki trafo dan rele tersendiri. Seringkali hanya PMT dan trafo-trafo tegangan yang dimiliki bersama oleh keduanya.

2.2.6.3 Perlengkapan Sistem Proteksi

Sistem proteksi terdiri dari beberapa peralatan pendukung. Berikut adalah skema secara umum dari sistem proteksi beserta peralatan pendukung yang digunakan:



Gambar 2.17 Skema Perlengkapan Sistem Proteksi

a. Rele

Sebagai alat pendeteksi atau pengukur untuk mendeteksi adanya gangguan dengan membaca input dari trafo instrumen berupa besaran nilai arus atau tegangan dan kemudian membandingkan dengan nilai *setting* yang ditentukan, apabila nilai besaran arus atau tegangan yang

terbaca melebihi atau kurang dari nilai *setting* tersebut maka rele ini akan memberikan perintah PMT untuk memutus atau melepas bagian sistem yang terganggu.

b. PMT (Pemutus Tenaga)/ CB (*Circuit Breaker*)

Alat ini berfungsi untuk memisahkan bagian sistem yang mengalami gangguan dan bagian sistem yang aman dan juga sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam keadaan berbeban dan pemutus arus dalam sirkuit tenaga untuk melepas bagian sistem yang terganggu.

c. Trafo Instrumen

- Trafo Arus (*Current Transformer/CT*)

Trafo arus digunakan sebagai elemen pengukuran arus pada rangkaian beban dengan perbandingan nilai antara arus yang dilewati sirkuit primer dengan arus yang dilewati sirkuit sekunder, sebagai contoh memiliki perbandingan rasio 3500:5 A maka ketika arus primer dilewati sebesar 700 A, pada sisi sekunder akan terbaca 1 A. Sebagai pengukuran dikarenakan kondisi tidak memungkinkan bila harus mengukur secara langsung pada alat sebab diketahui bahwa arus sangat besar dan bertegangan tinggi yang membahayakan keselamatan diri. Selain itu trafo arus ini merupakan suatu perangkat listrik yang berfungsi untuk menurunkan arus yang besar pada sirkuit primer menjadi ukuran arus yang kecil pada sirkuit sekunder. Trafo arus harus dapat menahan arus hubung singkat pada batas waktu tertentu saat terjadi hubung singkat.

- Trafo Tegangan (*Potential Transformer/PT*)

Trafo tegangan digunakan sebagai elemen pengukuran tegangan dengan perbandingan nilai antara lilitan dan tegangan, sebagai contoh memiliki perbandingan rasio 6300:100 V maka tegangan keluaran pada alat 63 V dan pada trafo tegangan terbaca 1 V. Trafo tegangan ini juga merupakan suatu peralatan listrik yang berfungsi menurunkan tegangan yang tinggi menjadi tegangan yang

lebih rendah sesuai dengan pengaturan yang digunakan sebagai alat pengukuran dan proteksi. Saat terjadi gangguan, trafo tegangan akan mengukur dan memberikan isyarat ke rele proteksi berupa tegangan gangguan seperti tegangan lebih (*over voltage*) atau tegangan kurang (*under voltage*) yang kemudian rele akan memberikan respon selanjutnya bergantung pada jenis rele proteksinya.

d. Baterai

Sebagai sumber tenaga arus searah (*DC*) untuk rele proteksi utama dan bantu sehingga dapat memberi sinyal atau respon ke PMT (Pemutus Tenaga) / CB (*Circuit Breaker*) untuk memutuskan sistem yang terkena gangguan.

e. Pengawatan / Wiring / Rel.

Untuk menghubungkan komponen-komponen proteksi sehingga menjadi satu sistem proteksi tenaga listrik. Umumnya menggunakan kabel ataupun plat tembaga (*busbar*).

Merujuk pada Gambar 2.17 skema perlengkapan sistem proteksi, prinsip kerja rele adalah berawal dari baterai yang berfungsi memberikan sumber tegangan arus searah (*DC*) untuk rele proteksi bekerja dengan membaca *output* dari trafo arus (*CT*) dan trafo tegangan (*PT*) yang mengukur nilai besarnya tegangan dan arus pada alat sistem melalui *busbar*. Berikutnya rele proteksi membandingkan dengan nilai *setting* sesuai karakteristik rele yang digunakan, apabila terjadi perbedaan antara nilai *setting* rele dengan output trafo arus (*CT*) dan trafo tegangan (*PT*) maka rele segera memberi perintah pada PMT yang terdapat *tripping coil* yaitu kumparan yang bekerja secara magnetis untuk dapat menarik tuas pemutus beban guna memutuskan sistem yang terkena gangguan.

2.2.6.4 Macam – Macam Proteksi Generator

1. Rele tegangan kurang (*under voltage relay*)

Rele ini bekerja dengan mendeteksi berkurangnya nilai tegangan sampai melebihi batas minimal tegangan yang ditentukan sesuai kemampuan kerja generator.

2. Rele tegangan lebih (*over voltage relay*)

Rele ini terdapat dua macam jenis tempat terpasang dengan memiliki fungsi yang berbeda yaitu, apabila terpasang dititik netral generator atau trafo tegangan yang dihubungkan segitiga akan berfungsi sebagai pendeteksi gangguan stator hubung tanah, tetapi bila terpasang pada terminal generator akan berfungsi sebagai pendeteksi tegangan lebih dengan ciri meningkatnya tegangan diatas batas nilai *setting*.

3. Rele hilang penguat medan (*loss of field relay*)

Untuk mendeteksi kehilangan arus penguat pada rotor berakibat generator menjadi sangat panas karena daya reaktif yang sangat tinggi pada sisi stator maupun sisi rotor.

4. Rele stator gangguan tanah (*stator ground fault relay*)

Untuk mendeteksi gangguan hubung tanah pada stator.

5. Rele frekuensi (*frequency relay*)

Untuk mendeteksi besaran frekuensi saat nilai bersifat rendah atau lebih yang tidak sesuai dengan nilai yang ditentukan.

6. Rele differensial (*differential relay*)

Rele ini bekerja berdasarkan Hukum Kirchoff, dimana arus yang masuk pada suatu titik sama dengan arus yang keluar dari titik tersebut. Yang dimaksud titik pada proteksi diferensial ialah daerah pengamanan, dalam hal ini dibatasi oleh dua buah trafo arus untuk mendeteksi gangguan hubung singkat pada daerah yang diamankan.

7. Rele arus lebih dengan waktu tunda (*time over current relay*)

Rele ini bekerja dengan mendeteksi besaran arus yang melebihi batas dalam waktu yang ditentukan.

2.2.7 Gangguan Hilang Penguat Generator

2.2.7.1 Penyebab Terjadinya Hilang Penguat pada Generator Sinkron

Gangguan hilang penguat generator merupakan kondisi tidak normal dimana operasi sistem tenaga generator tidak mendapatkan suplai arus searah

(DC) sebagai arus penguatan (eksitasi) agar dihasilkan tegangan keluaran pada terminal stator. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor yaitu:

- a. Arus penguatan medan rendah atau sama dengan nol.
- b. Arus penguatan medan terlalu tinggi.
- c. Kehilangan suplai tegangan dan arus ke main eksiter.
- d. Kehilangan suplai daya ke sistem eksitasi.
- e. Kontak sikat / arang yang usang.
- f. Jatuhnya (*Tripping*) sakelar penguat medan.
- g. Hubung singkat belitan medan (timbul percikan api pada *slip ring* generator).
- h. Hubung buka belitan medan.

2.2.7.2 Pengaruh Hilang Penguat pada Generator Sinkron

Generator menghasilkan daya aktif dan daya reaktif yang akan disalurkan ke sistem saluran. Daya aktif adalah hasil konversi dari daya mekanik turbin yang digerakkan oleh air, sedangkan daya reaktif berasal dari besarnya arus penguatan yang disalurkan ke rotor. Daya reaktif ini digunakan untuk pembentukan medan magnet di kumparan medan rotor sehingga terbentuk fluks medan magnet. Ketika gangguan hilang penguat terjadi maka hal ini akan mengakibatkan kopling magnetik antara stator dan rotor melemah sehingga putaran rotor bertambah cepat dan mengakibatkan generator bekerja sebagai generator induksi (asinkron) yang akan menyebabkan generator menyerap daya reaktif karena digunakan sebagai sumber penguatan generator tersebut dan arus pada stator akan meningkat sehingga menyebabkan naiknya temperatur pada rotor dan stator.

Apabila arus penguat tidak mengalir ke kumparan medan rotor maka generator menyerap daya reaktif sebagai sumber penguatan generator sehingga medan magnet di kumparan medan rotor akan menghilang. Pada kumparan jangkar (stator) akan timbul medan magnet yang disebabkan oleh adanya arus yang mengalir dipenghantar jangkar yang disebut arus jangkar. Medan magnet pada kumparan jangkar ini dalam reaksi jangkar disebut fluks

medan jangkar (\emptyset_A) yang akan melawan fluks medan utama (\emptyset_F) di kumparan medan rotor.

Semakin besar daya reaktif yang diserap generator maka medan magnet pada stator akan meningkat sehingga kecepatan putar generator akan meningkat diatas kecepatan sinkron. Kecepatan putar generator meningkat menyebabkan gaya gesek mesin-mesin generator juga meningkat. Hal ini menyebabkan arus pada stator meningkat dan temperatur pada stator dan rotor juga meningkat. Sesuai dengan karakteristiknya yaitu arus pada rotor berbanding lurus dengan suhu stator.

2.2.7.3 Rele Hilang Medan (*Loss Of Field*)

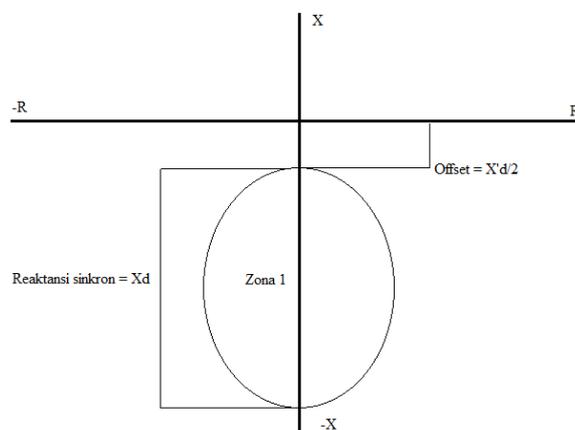
Penguatan yang hilang dapat menimbulkan pemanasan yang berlebihan pada kepala kumparan stator. Selain itu penguatan generator sinkron yang lemah dapat menyebabkan generator menjadi lepas dari hubungan sinkron dari generator lainnya. Dalam keadaan lepas sinkron, generator yang mengalami penguatan lemah masih diberi kopel pemutar oleh mesin penggerak sehingga generator berubah menjadi generator asinkron. Keadaan ini menimbulkan pemanasan yang berlebihan pada rotor generator sinkron karena memang tidak di desain untuk beroperasi asinkron. Oleh sebab itu, keadaan ini harus dicegah dengan rele hilang medan (*loss of field*).

Rele hilang medan (*loss of field*) bekerja dengan mendeteksi adanya penurunan nilai impedansi pada terminal stator akibat dari arus penguat hilang yaitu tegangan terminal menurun dan arus stator mulai meningkat. Rele hilang medan dibagi menjadi dua macam jenis penentuan perhitungan *setting* daerah kerja yaitu:

- 1) Perhitungan pendeteksi nilai impedansi dengan 1 (satu) zona.

Perhitungan pendeteksi nilai impedansi dengan satu zona hanya menggunakan 1 diameter lingkaran yang ditentukan dengan nilai sama dengan reaktansi sinkron (X_d) sebagai tanda bahwa nilai impedansi telah memasuki daerah kerja rele dan daerah offset dengan nilai sama

dengan setengah dari reaktansi transien ($X'd/2$) sebagai batas titik awal mula diameter lingkaran impedansi digambarkan.



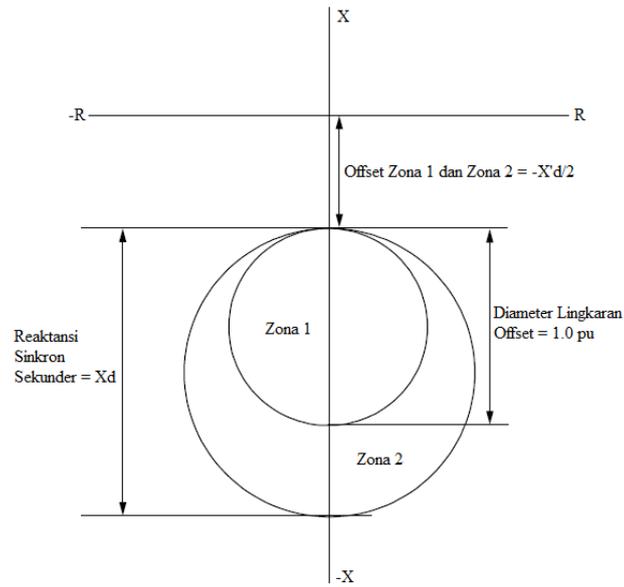
Gambar 2.18 Karakteristik Rele Hilang Medan (*Loss Of Field*) Dengan Satu Zona Lingkaran Impedansi

2) Perhitungan pendeteksi nilai impedansi dengan 2 (dua) zona.

Perhitungan pendeteksi nilai impedansi dengan dua zona menerapkan dua lingkaran impedansi mho offset dengan menggunakan tegangan sisi terminal generator dan arus stator sebagai sinyal *input*. Perhitungan pendeteksi nilai impedansi dengan dua zona terbagi menjadi dua jenis berdasarkan *Instruction Manual of Generator and Intertie Protection Relay* tahun 2012 yaitu:

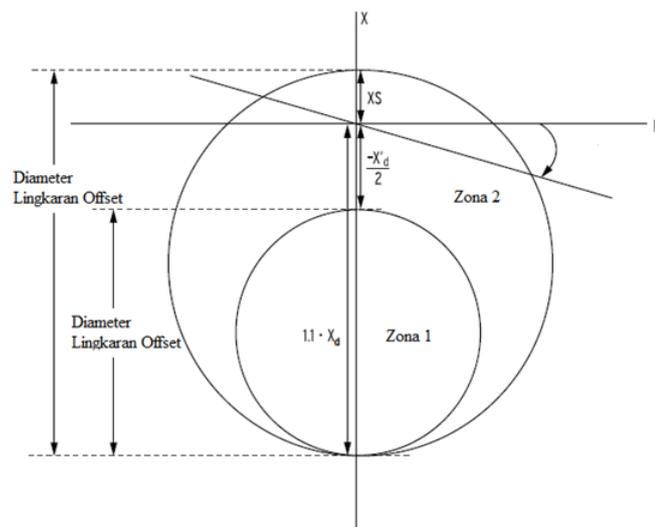
a. Offset zona dua negatif

Offset zona dua negatif yaitu untuk menentukan lingkaran zona dua berada dalam zona negatif antara kuadran III dan IV. Menentukan diameter lingkaran zona dua yaitu sama dengan nilai reaktansi sinkron sekunder (X_d) dengan offset sama dengan setengah dari nilai negatif reaktansi transien (sementara) sekunder ($X'd$) sebagai batasan awal mula lingkaran luar. Sedangkan untuk penentuan diameter lingkaran zona satu yaitu sama dengan nilai 1.0 pu dengan offset sama dengan setengah dari nilai negatif reaktansi transien (sementara) sekunder ($X'd$) sebagai batasan awal mula lingkaran dalam.



Gambar 2.19 Karakteristik Rele Hilang Medan (Loss Of Field) Dengan Offset Zona Dua Negatif

b. Offset zona dua positif

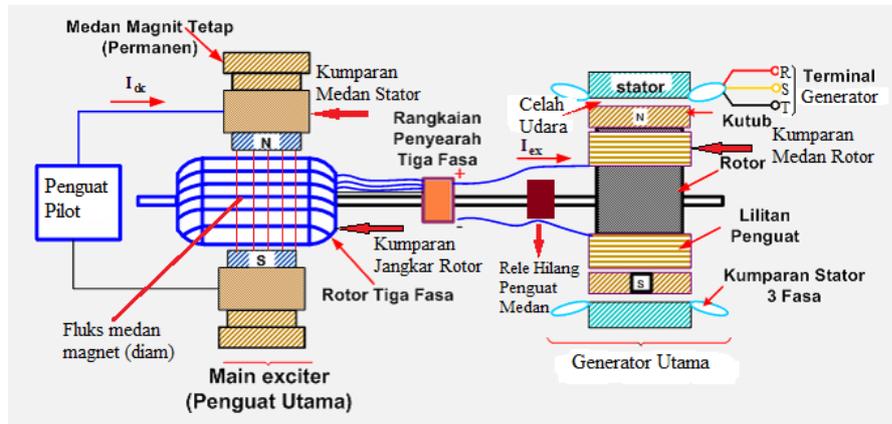


Gambar 2.20 Karakteristik Rele Hilang Medan (Loss Of Field) Dengan Offset Zona Dua Positif

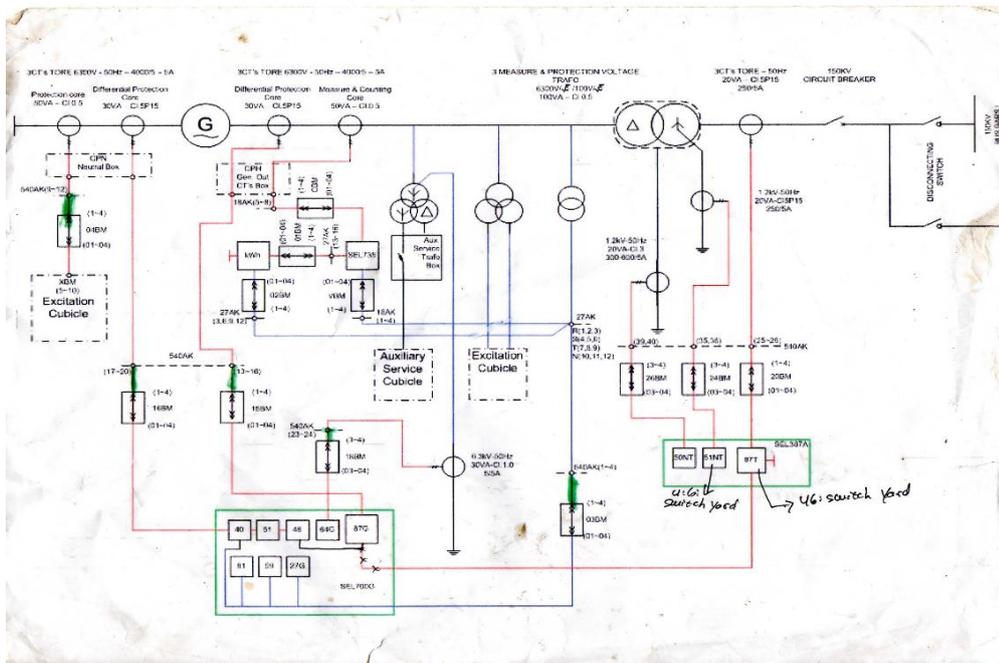
Offset zona dua positif yaitu menentukan diameter lingkaran zona dua berada dalam zona positif antara kuadran I dan II. Menentukan diameter lingkaran zona satu yaitu sama dengan nilai reaktansi sinkron sekunder dikalikan 1.1 dengan nilai offset sama dengan setengah dari nilai negatif reaktansi transien (sementara) sekunder ($X'd$) sebagai batasan awal mula lingkaran dalam. Sedangkan untuk penentuan diameter lingkaran zona dua yaitu sama dengan penjumlahan dari diameter lingkaran zona satu dan X_S . Nilai X_S berasal dari penjumlahan antar reaktansi transformator *step up* (X_T) dan reaktansi sistem (X_{sys}). Offset zona dua sama dengan nilai X_S sebagai batasan awal mula lingkaran luar.

Zona 1 dan zona 2 untuk mendeteksi hilangnya penguatan dengan beban penuh dan beban ringan. Zona 2 adalah zona ketika nilai impedansi masuk maka generator akan memberikan sinyal alarm pada ruang kontrol dan ketika memasuki zona 1 maka rele langsung memutuskan breaker. Umumnya waktu tunda yang digunakan untuk zona 1 dan zona 2 adalah sekitar 0.1 detik dan 0.5 - 0.6 detik. Untuk setting rele hilang medan (*loss of field*) yang digunakan di PLTA. Ir. H. Djuanda adalah perhitungan pendeteksi nilai impedansi dengan satu zona.

2.2.7.4 Cara Kerja Rele Hilang Medan (*Loss Of Field*)



Gambar 2.21 Posisi Rele Hilang Medan



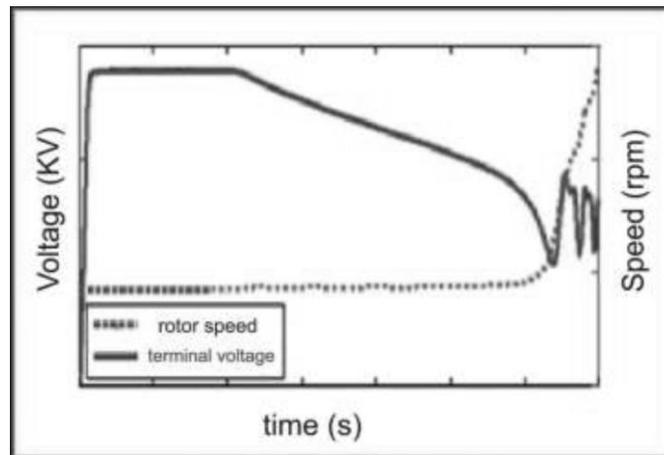
Gambar 20.22 Single Line Diagram Proteksi PLTA Ir. H. Djuanda Jatiluhur

Berdasarkan Gambar 2.21 dan Gambar 2.22 menggambarkan posisi rele hilang medan diletakkan. Rele diletakkan pada bagian sistem sebelum arus penguat memasuki generator utama. Dalam Gambar 2.22 terlihat rele hilang penguat medan (*loss of field*) kode ANSI 40 menjadi satu dengan rele yang lainnya karena jenis rele SEL 700G adalah *multifunction relay*. Rele ini mendeteksi adanya nilai impedansi yang turun dengan mendapatkan nilai

keluaran arus dari trafo arus (CT) dan nilai keluaran tegangan dari trafo tegangan (PT) melalui busbar yang saling berkoordinasi dengan rele tersebut.

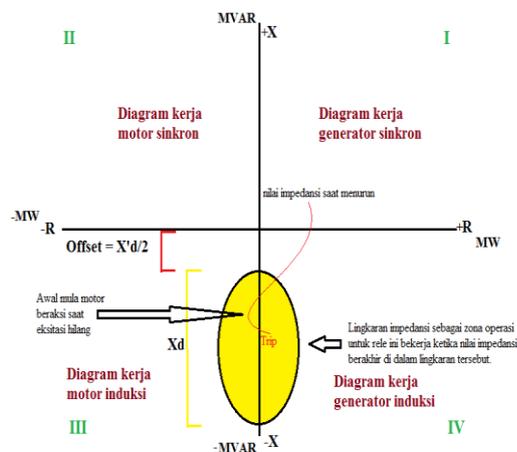
Rele ini bekerja berdasarkan besarnya daya reaktif yang diserap sistem dengan mengukur impedansi kapasitif pada kumparan stator generator yang terjadi di kuadran III dan IV karena generator bekerja berubah fungsi menjadi generator induksi yang bekerja pada beban *leading* terletak pada diagram R-(-X), dalam keadaan hilang penguatan impedansi kumparan stator akan terdeteksi lebih kecil dari impedansi awal dan rele ini akan bekerja. Semakin besar daya reaktif yang diserap, maka akan semakin kecil pula impedansi yang timbul dan menyebabkan rele ini bekerja memerintahkan membuka *field breaker* untuk lepas sinkron dari sistem guna meminimalkan kerusakan dalam medan rotor.

Pada saat generator dalam keadaan normal atau bekerja sebagai generator sinkron generator akan menghasilkan daya aktif dan daya reaktif yang kemudian disalurkan ke sistem. Dalam keadaan tersebut kecepatan putar generator sama dengan kecepatan sinkron ($N_r = N_s$). Besarnya debit air yang masuk ke generator berpengaruh terhadap daya aktif yang dibangkitkan, sedangkan besarnya arus eksitasi ke rotor berpengaruh terhadap daya reaktif yang dibangkitkan. Kondisi generator setelah terjadi kehilangan penguatan, dalam keadaan beban kapasitif (*leading*) maka daya semu (VA) yang dibangkitkan generator semakin kecil, sehingga dalam keadaan kekurangan penguatan, tegangan generator akan lebih kecil dari tegangan terminal. Semakin besar daya reaktif yang diserap generator maka medan magnet pada stator semakin besar, karena medan magnet pada rotor saat hilang atau berkurang dapat menyebabkan timbulnya medan magnet pada stator sehingga kecepatan putar rotor generator akan naik di atas kecepatan putar sinkron. Arus pada stator meningkat karena kecepatan putar rotor bertambah menyebabkan gaya gesek pada mesin-mesin generator juga semakin bertambah mengakibatkan temperatur pada kumparan stator dan kumparan rotor meningkat, dan hal ini akan membahayakan generator.



Gambar 2.23 Hubungan Antara Tegangan Turun Dan Kecepatan Generator Saat Gangguan

Ketika terjadi hilang penguatan maka generator akan bekerja *leading* yang mengakibatkan tegangan generator menurun sehingga ratio antara tegangan dan arus akan semakin mengecil. Hal ini mengakibatkan vektor impedansi generator akan berubah. Impedansi generator saat bekerja sebagai generator sinkron berada pada diagram R-X pada kuadran I sedangkan ketika terjadi hilang penguatan maka generator berubah fungsi menjadi generator induksi yang bekerja pada beban *leading* yang mengakibatkan nilai impedansi generator menurun yang terletak pada diagram R-(-X) kuadran III dan kuadran IV.



Gambar 2.24 Diagram Kerja Motor, Generator, dan Rele Hilang Medan (Loss of Field)

Rele ini berfungsi untuk memproteksi saat keadaan sistem penguatan berada di bawah *setting Minimum Excitation Limiter* (MEL). Rele ini memiliki lingkaran impedansi berupa nilai dari reaktansi sinkron yang merupakan daerah kerja rele. Lingkaran impedansi berfungsi untuk memproteksi gangguan generator sinkron terhadap perubahan sifat kinerja generator sinkron menjadi motor induksi/generator induksi ketika nilai impedansi menurun. Proteksi rele ini bekerja pada kuadran III dan IV sesuai fungsinya. Dimana kuadran III adalah kuadran diagram kerja motor induksi dan kuadran IV merupakan kuadran diagram kerja generator induksi.

Dalam keadaan beroperasi dengan normal, generator menghasilkan daya aktif dan daya reaktif ke sistem yang berarti di bidang R dan X dan terminal impedansi terletak di kuadran pertama yaitu R-X. Ketika gangguan terjadi, generator menarik daya reaktif dari sistem digunakan sebagai sumber penguatan/eksitasi akibatnya nilai impedansi di bidang R-X menurun dan bergerak menuju lingkaran impedansi pada kuadran IV (-X) dan titik akhir berada di kisaran antara reaktansi transien dan reaktansi sinkron sekunder, apabila nilai impedansi ini memasuki di dalam lingkaran impedansi tersebut maka dapat dikatakan rele bekerja dan akan memerintahkan untuk *trip* guna memproteksi generator dari bahaya gangguan lainnya berupa *over speed*, *over current*, dan *under voltage*.

2.2.7.5 Setting Rele Hilang Medan (Loss Of Field)

Untuk menentukan *setting* rele ini yaitu dengan cara menentukan lingkaran impedansi yang berfungsi sebagai daerah kerja rele dengan nilai sama dengan reaktansi sinkron sekunder (X_d) dan daerah *offset* dengan nilai sama dengan setengah dari reaktansi sinkron transien ($X'_d/2$). Lingkaran impedansi ini adalah zona operasi untuk rele hilang medan bekerja ketika nilai impedansi menurun. Perhitungan *setting* rele hilang medan (*loss of field*) sebagai berikut dengan data yang dibutuhkan:

- Daya semu generator (S)
- Tegangan generator (V)
- Current Transformer Ratio
- Potential Transformer Ratio
- Reaktansi sinkron primer (persentase, per unit atau $X_d \Omega$ generator)
- Reaktansi sementara primer (persentase, per unit atau $X'd \Omega$ generator)

Rumus Perhitungan:

- a. Menentukan Z_{base} primer dan sekunder:

$$Z_{base \text{ primer}} = \frac{V^2}{S} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$Z_{base \text{ sekunder}} = \frac{Z_{base \text{ primer}} \times CT \text{ Ratio}}{PT \text{ Ratio}} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana:

$Z_{base \text{ primer}}$ = Impedansi dasar mesin primer (Ω/Ohm)

V = Tegangan generator (V/Voltage)

S = Daya semu (Mvar)

$Z_{base \text{ sekunder}}$ = Impedansi dasar mesin sekunder (Ω/Ohm)

- b. Menentukan reaktansi sementara sekunder:

$$X'_{d \text{ sekunder}} = X'_{d \text{ primer}} \times Z_{base \text{ sekunder}} \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana:

$X'_{d \text{ sekunder}}$ = Reaktansi sementara sekunder (Ω/Ohm)

$X'_{d \text{ primer}}$ = Reaktansi sementara primer (per unit)

$Z_{base \text{ sekunder}}$ = Impedansi dasar mesin sekunder (Ω/Ohm)

- c. Menentukan besaran *offset* dari *setting* rele:

$$offset_{\text{sekunder}} = \frac{X'_{d \text{ sekunder}}}{2} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana:

$Offset_{\text{sekunder}}$ = *Offset* sekunder (Ω/Ohm)

$X'_{d \text{ sekunder}}$ = Reaktansi sementara sekunder (Ω/Ohm)

d. Menentukan reaktansi sinkron sekunder:

$$X_{d \text{ sekunder}} = X_{d \text{ primer}} \times Z_{\text{base sekunder}} \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana:

$X_{d \text{ sekunder}}$ = Reaktansi sinkron sekunder (Ω/Ohm)

$X_{d \text{ primer}}$ = Reaktansi sinkron primer (Ω/Ohm)

$Z_{\text{base sekunder}}$ = Impedansi dasar mesin sekunder (Ω/Ohm)