



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Umum

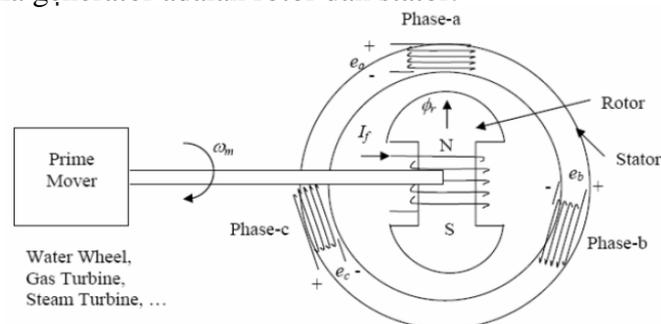
Generator sinkron yang pada prinsipnya merupakan mesin sinkron yang digunakan sebagai generator arus bolak balik (alternating current generators). Generator sinkron biasanya dioperasikan bersama (atau diparalel), membentuk sebuah power sistem yang besar untuk menyuplai energi ke beban atau konsumen, seperti ; industri, komersil, agrikultural dan domestik serta rumah tangga.

Tipe dari mesin sinkron ada dua, yaitu ;

- *Rotating-armatur type* : kumparan/belitan armatur ada di rotor dan medan gaya magnet ada di stator.
- *Rotating-field type* : kumparan/belitan armatur atau terminal ada di stator dan medan gaya magnet di rotor.

Dalam hal ini Generator sinkron merupakan tipe dari *rotating-field type* karena karena belitan armatr ada di stator dan medan gaya di rotor.

Generator sinkron mengkoversikan energi mekanik menjadi energi listrik. Adapun sumber dari energi mekanik tersebut adalah *prime mover* baik mesin diesel, turbin uap, turbin gas, turbin air, atau perangkat sejenis lainnya. Adapun komponen utama generator adalah rotor dan stator.



Gambar 2.1 Prinsip kerja Generator Sinkron¹

¹ Shahl.Suad Ibrahim, 2015, *e-book Synchronous Generators*, Halaman 7

Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh tenaga air atau tenaga lainnya, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau flux yang bersifat bolak-balik atau flux putar. Flux putar ini akan memotong-motong kumparan stator timbul gaya gerak listrik karena pengaruh induksi dari flux putar tersebut. Gaya gerak listrik (GGL) yang timbul pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik, atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor.

Sebagaimana pada generator arus searah, belitan (kumparan) jangkar di tempatkan pada jangkar sedangkan belitan medan di tempatkan pada stator, demikian pula untuk generator serempak dengan kapasitas kecil.

2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Adapun prinsip kerja dari generator sinkron dapat dinyatakan sebagai berikut ;

- Rotor disuplai dengan arus DC I_f yang kemudian menghasilkan flux magnet Φ_f
- Rotor oleh turbin dengan kecepatan konstant sebesar n_s
- Garis gaya magnet yang bergerak menginduksi kumparan pada stator
- Frekuensi dari tegangan generator tergantung dari kecepatan putaran rotor yang dapat dinyatakan dengan persamaan ;

$$f = (p / 120) n = p n / 120 \dots\dots\dots (2.1)^2$$

dimana “n” merupakan jumlah kutub dari magnet rotor

- Dari gambar 3.2 dibawah maka persamaan untuk tegangan induksi ;

$$\text{Dimana ; } E = 4,44.f.M. \Phi.k_d \dots\dots\dots (2.2)^3$$

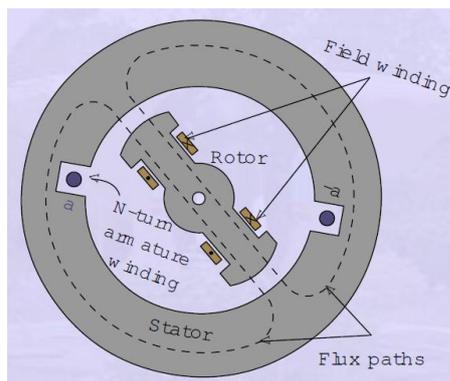
E = Gaya gerak listrik armatur perphasa

f = Frekuensi generator

² Shahl.Suad Ibrahim, 2015, *e-book Synchronous Generators*, Halaman 7

³ Rijono.Jon,1997, *Dasar Teknk Tenaga Listrik*, Andi Offset, Halaman 210

- M = Jumlah kumparan per fasa
= $Z/2$
- Z = Jumlah konduktor slot per fasa
- k_d = Faktor distribusi
- Φ = Flux magnet per kutub per fasa



Gambar 2.2 Konstruksi Generator Sinkron⁴

2.3 Bagian-Bagian Generator Sinkron

Bagian-bagian utama dari generator sinkron adalah :

- Stator : merupakan bagian dari generator yang tidak ikut berputar (diam).
- Rotor : merupakan bagian dari generator yang ikut berputar.

2.3.1 Stator

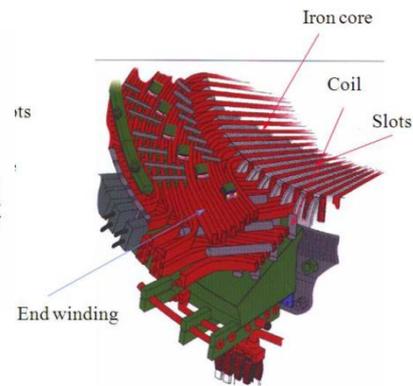
Stator adalah bagian dari generator yang tidak ikut berputar (diam) yang terdiri dari rangka stator, inti stator, dan gabungan kawat pada bagian inti stator. Pada inti stator dibuat alur-alur dalam arah aksial dan pada alur-alur tersebut ditempatkan kumparan stator. Dari kumparan stator dihasilkan arus bolak-balik tiga fasa.

⁴ Vasudevan.Krishna, Shrida Rao.G, Rao. Shasidara, *Electrical Machines II (E-book)*, Indian Institute of Technology Madras, Halaman 7

Kumparan stator dibuat dari tembaga yang diisolasi. Inti stator menyalurkan medan magnet yang polaritasnya selalu berubah sesuai dengan fungsi frekuensi arus bolak-balik (50 Hz). Untuk mengurangi arus pusar dan panas yang timbul, maka inti stator dibuat dari lempengan baja tipis dan isolasi satu terhadap yang lain.

Stator

- Laminated iron core with slots
- Steel Housing



Gambar 2.3. Kontruksi Stator⁵

2.3.2 Rotor

Ada dua bentuk rotor yang sering dipakai :

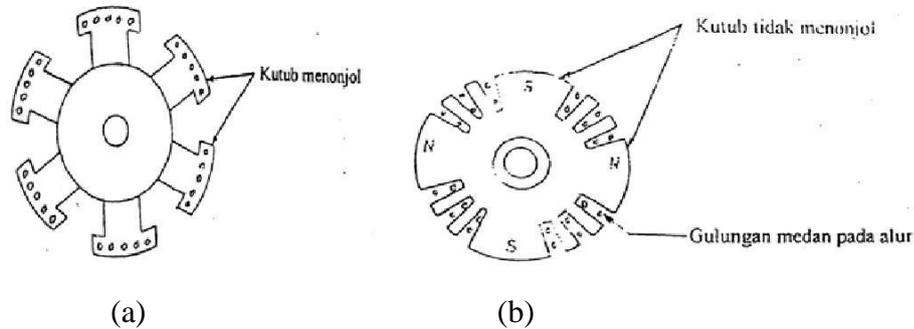
- Bentuk kutub (*salient*)
- Bentuk silinder halus (*non-salient*)

Rotor bentuk kutub menonjol sering dipakai pada generator yang berkecepatan rendah dan sedang, bentuk diameternya besar dan mempunyai poros yang pendek. Kutub dan sepatu kutub terdiri dari lapisan lempengan besi guna memperkecil pemanasan akibat arus *eddy* (arus pusar).

Rotor bentuk silinder halus banyak dipakai pada generator yang berkecepatan tinggi, yang digerakkan oleh turbin uap atau turbin turbo. Terbuat dari besi yang keras dan halus berbentuk silinder. Kutub tidak menonjol melebihi rotor. Rotor jenis silinder ini mempunyai karakteristik berdiameter kecil dan poros yang panjang. Bentuk silinder dari rotor memberikan kestabilan yang baik dan

⁵ Shahl.Suad Ibrahim, 2015, *e-book Synchronous Generators*, Halaman 7

tidak mengurangi rugi-rugi gulungan.



Gambar 2.4 Konstruksi motor (a).Rotor bentuk menonjol, (b). Rotor bentuk silinder halus⁶

2.4 Karakteristik Generator Sinkron

2.4.1 Generator Sinkron Keadaan Jalan Tanpa Beban⁷

Pada generator sinkron keadaan jalan tanpabeban mengandung arti bahwa arus armatur $I_a = 0$. Dengan demikian besar tegangan terminal adalah ;

$$V_t = E_a = E_o \dots \dots \dots (2.3)$$

Oleh karena besar ggl armatur adalah merupakan fungsi dari flux magnet

(lihat persamaan 2.2), maka ggl armatur juga ditulis :

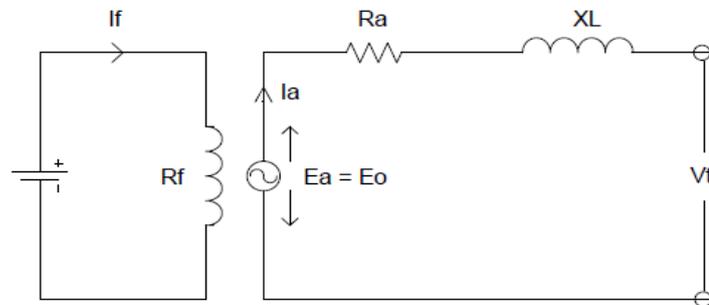
$$E_a = f(\Phi) \dots \dots \dots (2.4)$$

Dari persamaan 2.6, jika arus penguat medan diatur besarnya maka akan diikuti kenaikan flux dan akhirnya juga pada ggl armatur. Pengaturan arus penguat medan pada keadaan tertentu besarnya, akan didapatkan besar ggl

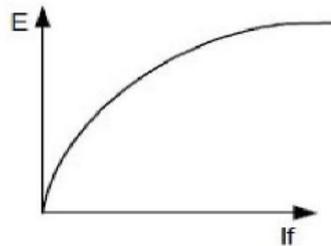
⁶Berahim.Hamzah, 1994, *Pengantar Teknik Tenaga Listrik*, Yogyakarta, Andi Offset, halaman 164-165

⁷ Rijono.Jon,1997, *Dasar Teknk Tenaga Listrik*, Yogyakarta;Andi Offset, Halaman 210

armatur tanpa beban dalam keadaan saturasi. Secara grafik hubungan antara arus penguat medan (I_f) dan E_a terlukis pada gambar 2.6 :



(a)



(b)

Gambar 2.5 (a) Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tanpa Beban

(b) Kurva Karakteristik Generator Sinkron Tanpa Beban

Keterangan ;

I_f = Arus kumparan medan atau arus penguat

R_f = Hambatan kumparan medan

R_a = Hambatan armatur

X_L = Reaktansi bocor (reaktansi armatur)

V_t = Tegangan output

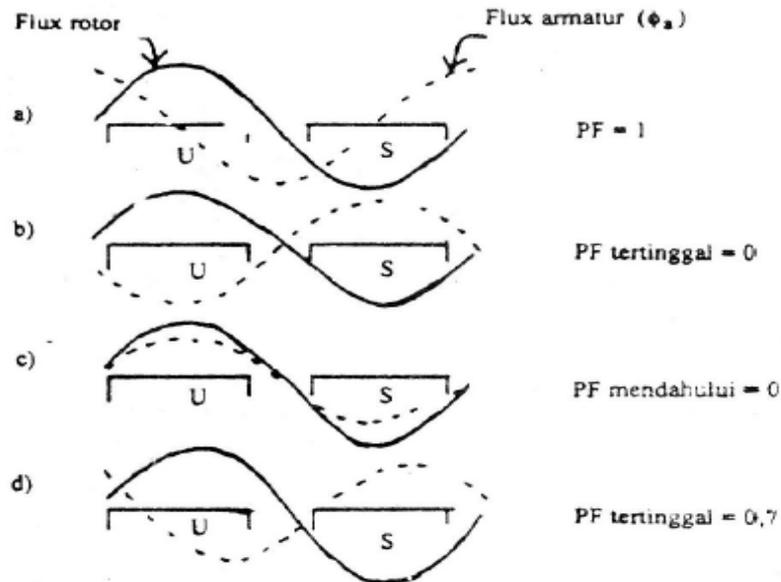
E_a = Gaya gerak listrik armatur

2.4.2 Generator Sinkron Berbeban⁸

Dengan adanya beban yang terpasang pada output generator sinkron, maka segera mengalir arus armatur (I_a). Dengan adanya arus armatur ini, pada

⁸ Rijono.Jon,1997, *Dasar Teknk Tenaga Listrik*, Yogyakarta ; Andi Offset, Halaman 212

kumparan armatur atau kumparan jangkar timbul flux putar jangkar (Φ_a). Flux putar jangkar ini bersifat mengurangi atau menambah flux putar yang dihasilkan oleh kumparan rotor (Φ_f). Hal ini bergantung pada faktor daya beban. Seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Pengaruh Faktor Daya Beban terhadap Flux Rotor

Keterangan gambar 2.6 ;

- Gambar 2.6 a

Pada faktor daya beban (P_F) = 1, berarti arus armatur sefase dengan tegangan beban. Pada keadaan ini flux putar jangkar (flux armatur) adalah mendahului 90° terhadap flux putar utama (rotor). Interaksi dari kedua flux putar tersebut menghasilkan flux putar baru yang cacat (tidak sinus murni). Akibatnya Akibatnya tegangan keluaran generator juga tidak sinus murni. Kejadian ini harus dihindarkan.

- Gambar 2.6 b

Pada faktor daya beban tertinggal ($P_F=0$), berarti arus armatur tertinggal 90° terhadap tegangan beban Pada keadaan ini flux putar jangkar (flux armatur) berada sephase 180° (Posisi Φ_a pada $P_F=1$ digeser ke kiri/tertinggal 90° lagi, jadi $(90^\circ+90^\circ)$ terhadap flux putar utama (rotor).

Interaksi dari kedua flux putar tersebut menyebabkan terjadinya pengurangan besar flux rotor, dan kejadian ini disebut “*demagnetisasi*”. Jika proses demagnetisasi terjadi, maka ggl armatur yang dihasilkan oleh generator akan berkurang. Untuk menjaga agar ggl armatur besarnya tetap, maka arus penguat medan (I_f) harus diperbesar.

- Gambar 2.6 c

Pada faktor daya beban mendahului ($P_F=0$), berarti arus armatur mendahului 90° terhadap tegangan beban. Pada keadaan ini flux putar jangkar (flux armatur) akan sefase dengan flux putar rotor. (Posisi Φ_a pada $P_F=1$ digeser ke kanan 90°). Akibat interaksi dari flux ini dihasilkan flux baru yang bertambah besar terhadap flux rotor. Proses ini disebut magnetisasi. Jika proses magnetisasi terjadi, maka ggl armatur yang ditimbulkan akan bertambah besar. Untuk menjaga agar ggl armatur besarnya tetap, maka arus penguat medan (I_f) dikurangi.

- Gambar 2.6 d

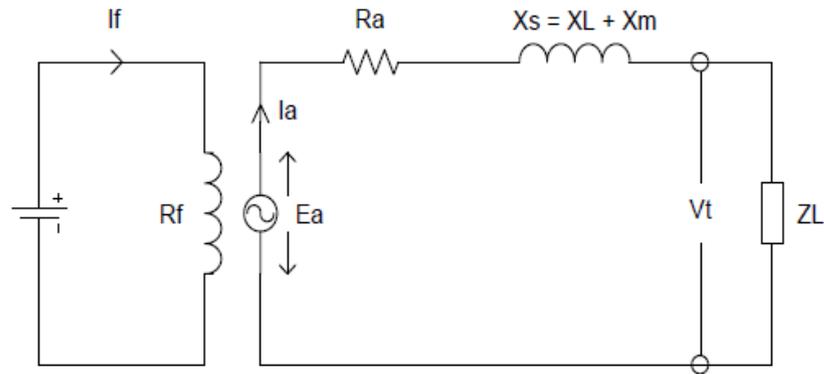
Pada faktor daya beban menengah adalah beda fase antara arus armatur (I_a) dan tegangan beban 0 sampai 90° mendahului atau tertinggal. Untuk beda fase 0 sampai 90° , arus armatur mendahului terhadap tegangan beban disebut mendahului (*leading*). Sedangkan untuk beda fase 0 sampai 90° , arus armatur tertinggal terhadap tegangan beban disebut faktor daya tertinggal (*lagging*) Pada faktor daya (PF) beban menengah mendahului, flux armatur yang timbul fasenya agak bergeser ke kanan terhadap flux putar rotor. Sehingga pada kejadian ini terjadi proses demagnetisasi sebagian dan bentuk sinyal ggl armatur yang dihasilkan agak sedikit cacat.

Proses kejadian tersebut diatas dinamakan dinamakan reaksi jangkar atau reaksi armatur.

Dengan adanya flux putar armatur akibat timbulnya arus armatur, maka pada kumparan timbul reaktansi pemagnet X_m . Reaktansi pemagnet bersama-sama dengan reaktansi bocor dikenal dengan nama reaktansi sinkron (X_s) dan secara matematis ditulis :

$$X_s = X_L + X_m \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan demikian rangkaian listrik untuk generator sinkron berbeban adalah ;

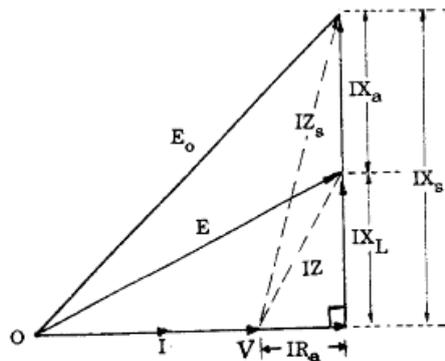


Gambar 2.7 Rangkaian Listrik Generator Sinkron Berbeban

Secara vektoris besar GGL armatur tanpa beban (E_o) pada faktor daya beban = 1, PF tertinggal dan PF Mendahului adalah sebagai berikut :

PF = 1

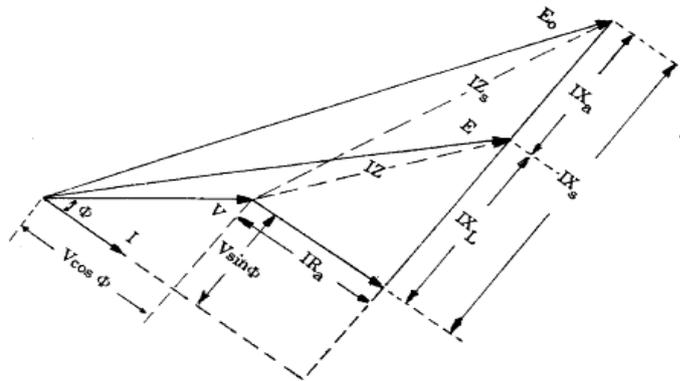
$$E_o = \sqrt{(V_t + I_a \cdot R_a)^2 + (I_a \cdot X_s)^2} \dots\dots\dots(2.6)$$



Gambar 2.8 Diagram vektor dari generator serempak beban unity

PF = Tertinggal

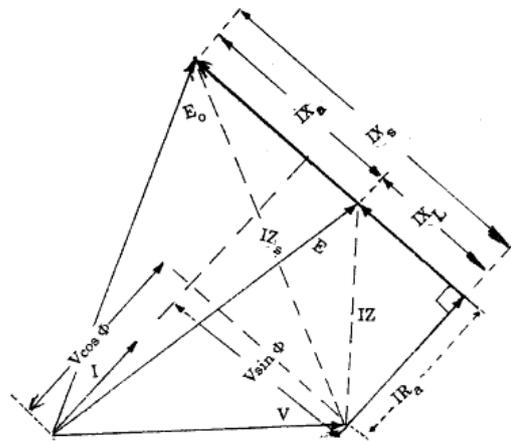
$$E_o = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \sin \theta + I_a \cdot X_s)^2} \dots\dots\dots(2.7)$$



Gambar 2.9 Diagram vektor dari generator serempak beban induktif

$P_f =$ Mendahului

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta - I_a X_s)^2} \dots\dots\dots(2.8)$$



Gambar 2.10 Diagram vektor dari generator serempak beban kapasitif

Oleh karena pada generator sinkron berbeban timbul reaktansi pemagnet (X_m), maka timbul jatuh tegangan GGL pada armatur tanpa beban sebesar $I_a X_m$. sehingga besar ggl armatur pada generator berbeban adalah :

$$E_a = E_0 - I_a X_m \dots\dots\dots(2.9)$$

Secara vektoris besar GGL armatur berbeban (E_a) pada faktor daya beban = 1, PF tertinggal dan PF Mendahului adalah sebagai berikut :

PF = 1

$$E_a^2 = (V_t + I_a \cdot R_a)^2 + (I_a \cdot X_L)^2 \dots\dots\dots (2.10)$$

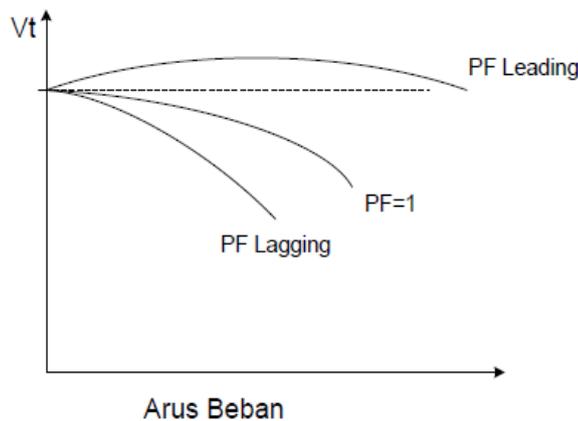
PF = Tertinggal

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \Theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \sin \Theta + I_a \cdot X_L)^2} \dots\dots\dots (2.11)$$

PF = Mendahului

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \Theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \sin \Theta - I_a \cdot X_L)^2} \dots\dots\dots (2.12)$$

Adapun karakteristik generator sinkron pada berbagai faktor daya, ditunjukkan pada gambar 2.9 :



Gambar 2.11 Karakteristik Generator AC Pada Berbagai Faktor Daya

2.5 Pengaturan Tegangan Generator

Jika beban ditambahkan pada generator AC yang sedang bekerja pada kecepatan konstan dengan eksitasi medan konstan, tegangan terminal akan berubah. Besarnya perubahan akan bergantung pada rancangan mesin dan pada factor daya beban.

Pengaturan generator AC didefinisikan sebagai presentase kenaikan



tegangan terminal ketika beban dikurangi dari arus beban penuh ternilai sampai nol, dimana kepesatan dan eksitasi medan dijaga konstan.

Untuk mengatasi generator terhindar dari beban lebih, maka diperlukan Untuk mengatasi generator terhindar dari beban lebih, maka diperlukan pengaturan tegangan beban atau presentase regulasi tegangan. Ada dua macam persentase regulasi tegangan, yaitu :

- Regulasi Naik : $((V_t)_{tb}-(V_t)_{bp})/V_{t_{bp}} \times 100\%$ (2.13)

- Regulasi Turun : $((V_t)_{tb}-(V_t)_{bp}/(V_t)_{tb}) \times 100\%$ (2.14)

Keterangan :

$(V_t)_{tb}/E_o$ = Tegangan terminal atau tegangan output generator tanpa beban

$(V_t)_{bp}$ = Tegangan terminal beban penuh

Dimana, $V_t = V_L/\sqrt{3}$ (2.15)

Keterangan ;

V_t = Tegangan Per Phasa

V_L = Tegangan Line

Pada keadaan ini daya output generator juga beban penuh dan disebut daya KVA generator beban penuh dan ditulis :

$KVA = 3 (V_t)_{bp} \cdot (I_a)_{bp}$ (2.16)

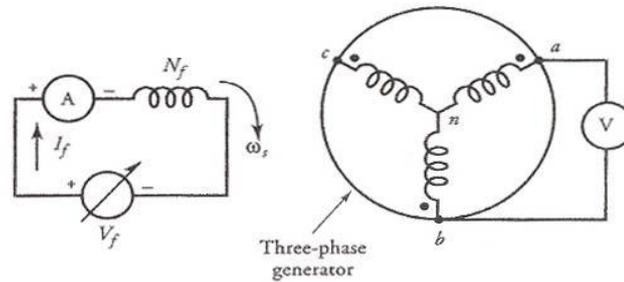
2.6 Tes Generator Sinkron⁹

2.6.1 Tes Open Circuit

Tes sirkuit terbuka , atau tes tanpa beban , dilakukan berdasarkan dengan ;

- Generator diputar dengan kecepatan nominal .
- Tidak ada beban terhubung pada terminal .
- Arus medan dinaikan dari 0 sampai maksimum .
- Catat nilai tegangan terminal dan arus medan saat ini .

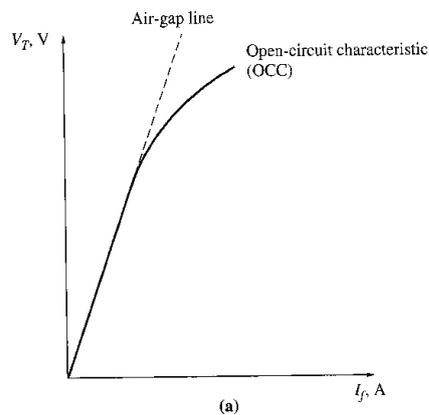
⁹ Shahl.Suad Ibrahim, 2015, *e-book Synchronous Generators*, halaman 17



Gambar 2.12 Circuit Diagram Tes Rangkaian Terbuka

Dengan terminal terbuka, $I_A = 0$, sehingga $E_A = V_\phi$. Dengan demikian memungkinkan untuk membuat grafik E_A atau V_T vs I_F . Plot ini disebut *open-circuit characteristic* (OCC) atau karakteristik sirkuit terbuka dari generator.

Dengan karakteristik ini, adalah mungkin untuk menemukan dihasilkan tegangan internal generator untuk setiap lapangan saat tertentu.



Gambar 2.13 Karakteristik tak berbeban

Open Circuit Characteristics (OCC) mengikuti sebuah garis lurus yang berhubungan dengan magnetic circuit dari generator sinkron yang tidak dibebani. Berhubung dalam daerah yang linear, banyak dari mmf (*magnetic moving force*) hilang oleh *air-gap* (celah udara), garis lurus itu disebut *air-gap line*.

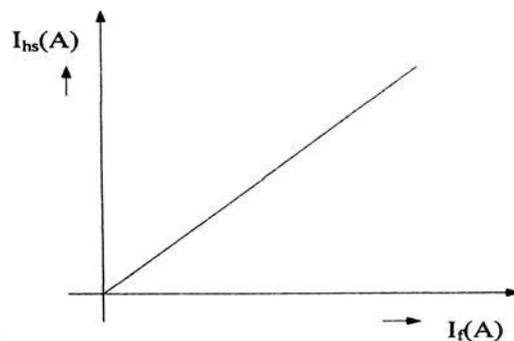
2.6.2 Tes Short Circuit

Tes arus pendek memberikan informasi tentang kemampuan saat generator sinkron. Hal ini dilakukan dengan ;

- 1) Generator diputar di rated speed.
- 2) Sesuaikan lapangan saat ini ke 0.
- 3) sirkuit pendek terminal.
- 4) Mengukur arus dinamo atau baris saat ini sebagai arus medan meningkat

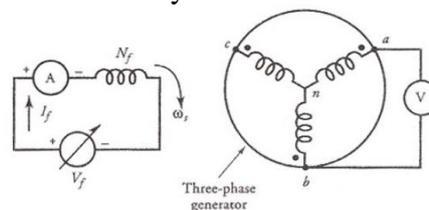
Kurva hubung singkat dapat diperoleh dengan menghubungkan singkatkan kumparan jangkar melalui sebuah ampere meter dan generator diputar pada putaran sinkron.

Dengan menaikkan I_f , maka akan didapatkan arus jangkar naik secara linier.



Gambar 2.14 Karakteristik hubung singkat generator sinkron

SCC (*Short Circuit Characteristic*) pada dasarnya sebuah garis lurus. Untuk mengerti mengapa karakteristiknya sebuah garis lurus, lihatlah rangkaian equivalent dibawah saat terminalnya di short circuit.



Gambar 2.15 Rangkaian Untuk Tes Short Circuit

Saat terminal short circuit, tegangan armatur I_A adalah ;



$$I_A = V_t + JX_S \dots\dots\dots(2.17)$$

Dari kedua tes tersebut, kita dapat menentukan impedansi sinkron mesin (E_A dari OCC, I_A dari SCC):

$$Z_S = \sqrt{R_a^2 + X_S^2} = V_t / I_a \dots\dots\dots(2.18)$$

Karena $X_S \gg R_a$ maka dapat ditulis ;

$$X_S = \frac{V_t}{I_a} \dots\dots\dots(2.19)$$

Dari dua percobaan OOC dan SCC diatas maka dapat dicari impedansi sinkron pada generator dengan rumus ;

$$Z_S = \frac{V_t}{I_{SC}} \dots\dots\dots (2.20)$$

2.7 Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron

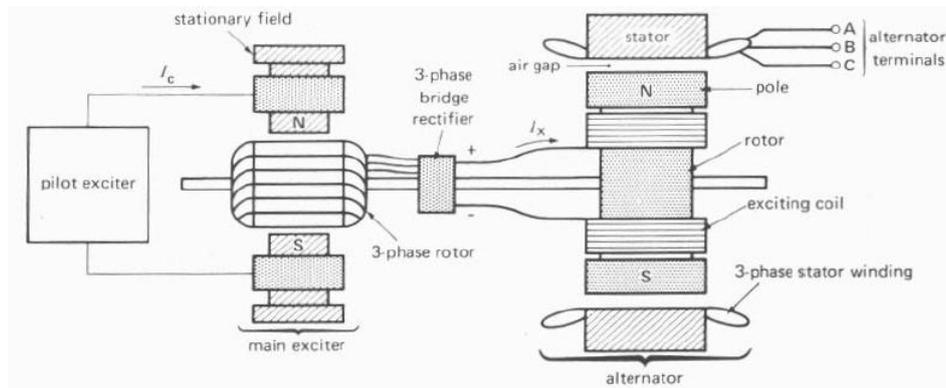
Eksitasi atau penguatan medan merupakan bagian yang penting dari sebuah generator sinkron. Tidak hanya untuk menjaga tegangan terminal tetap konstan tetapi juga harus merespon terhadap perubahan beban yang tiba-tiba.

2.7.1 Tiga Metode Eksitasi¹⁰

Ada tiga buah metode eksitasi pada generator sinkron, yaitu ;

- *Slip Ring* ; menghubungkan kumparan medan rotor dengan sumber DC eksternal
- DC Generator Eksiter ; sebuah generator DC di buat satu shaft dengan rotor generator AC.
- *Brushless exciter* ; Sebuah generator AC dengan kumparan medan / magnet yang tetap/diam dan sebuah rotor 3 phasa.

¹⁰ Shahl.Suad Ibrahim, 2015, *e-book Synchronus Generators*, Halaman 5-6

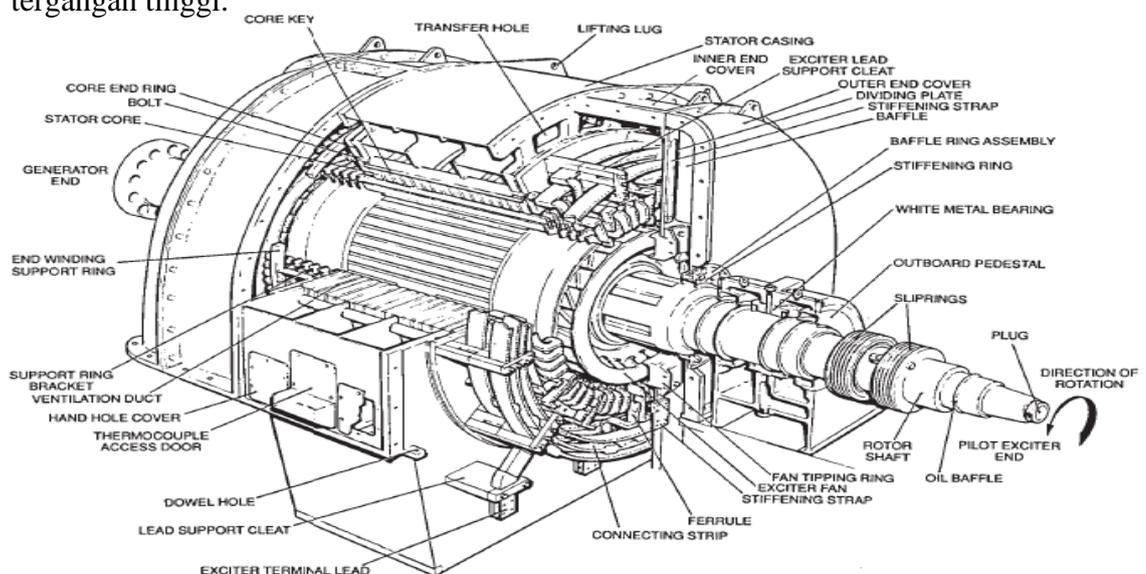


Gambar 2.16 Type Brushless Exciter System dengan Pilot Exciter

2.7.2 Bagian – Bagian Brushless Exciter¹¹

2.7.2.1 AC Exciter

AC Exciter adalah jenis yang sama dengan generator sinkron konvensional tapi mempunyai tipe jangkar berputar dan frekuensi tinggi. Rotor AC exciter ditempatkan pada poros yang sama dengan rotating rectifier. Kumputan jangkar adalah 3 fasa terhubung Y dan diisolasi yang diperkuat dengan penguatan tergantung tinggi.



Gambar 2.17 Konstruksi AC Exciter

¹¹ Pusat Pendidikan Dan Pelatihan PT.PLN Persero

2.7.2.2 Rotating Rectifier

Rotating rectifier terdiri dari *rectifier wheel* (didalamnya ditempatkan *silicon diode*) dan fuse (serta resistor). Rangkaian *rotating rectifier* diindikasikan :

1S-8P-6A

dimana :

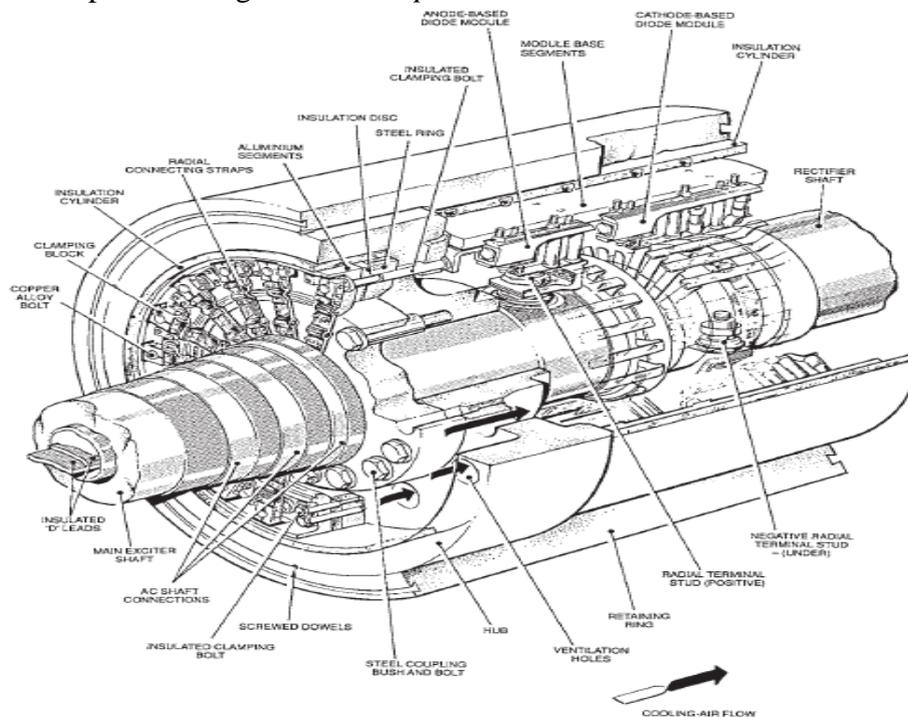
1S menyatakan jumlah seri *silicon diode*,

8P menyatakan jumlah paralel *silicon diode* yaitu 8, dan

6A menyatakan jumlah cabang yaitu 6, yang juga adalah rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa.

Jadi dalam sistem *rotating rectifier* ini digunakan 48 buah silicon diode atau 24 pasang (*forward polarity* dan *reverse polarity*). *Forward polarity* ke posisi plus dan *reverse polarity* ke posisi minus.

Gambar 2.13. memperlihatkan rangkaian *rotating rectifier*. Fuse dihubungkan seri dengan *silicon diode* agar dapat menonaktifkan bagian yang berhubungan sekiranya terjadi kegagalan pada diode. Jika fuse putus, fuse indikator akan terbuka karena gaya sentrifugal dan kondisi ini dapat dengan mudah diperiksa dengan *stroboscope*.

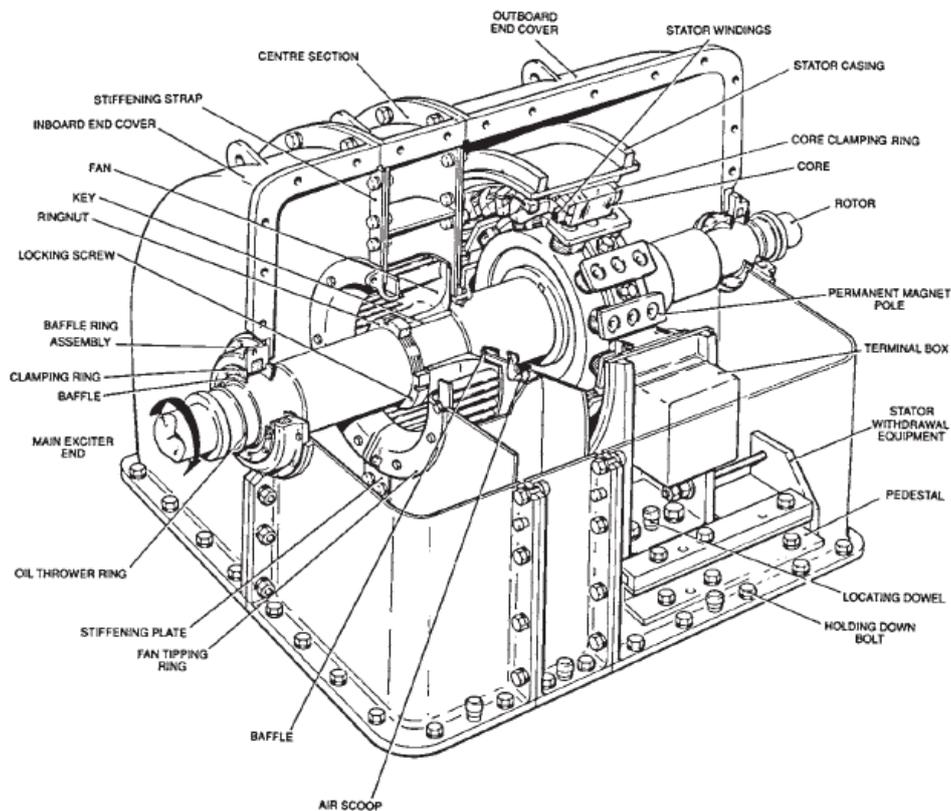


Gambar 2.18. Konstruksi *Rotating Rectifier*

2.7.2.3 Permanent Magnet Generator.

Permanent Magnet Generator (PMG) adalah generator sinkron yang sistem eksitasinya menggunakan magnet permanen, umumnya PMG berkapasitas kecil.

Pada sistem eksitasi tanpa sikat ini digunakan PMG sebagai penyedia daya untuk eksitasi AC Exciter dan komponen regulator. PMG terdiri dari magnet permanen berputar dan jangkar yang diam digulung untuk output 3 fasa. Magnet telah distabilkan selama pembuatan PMG untuk mencegah perubahan tegangan output akibat hubung singkat pada sistem.

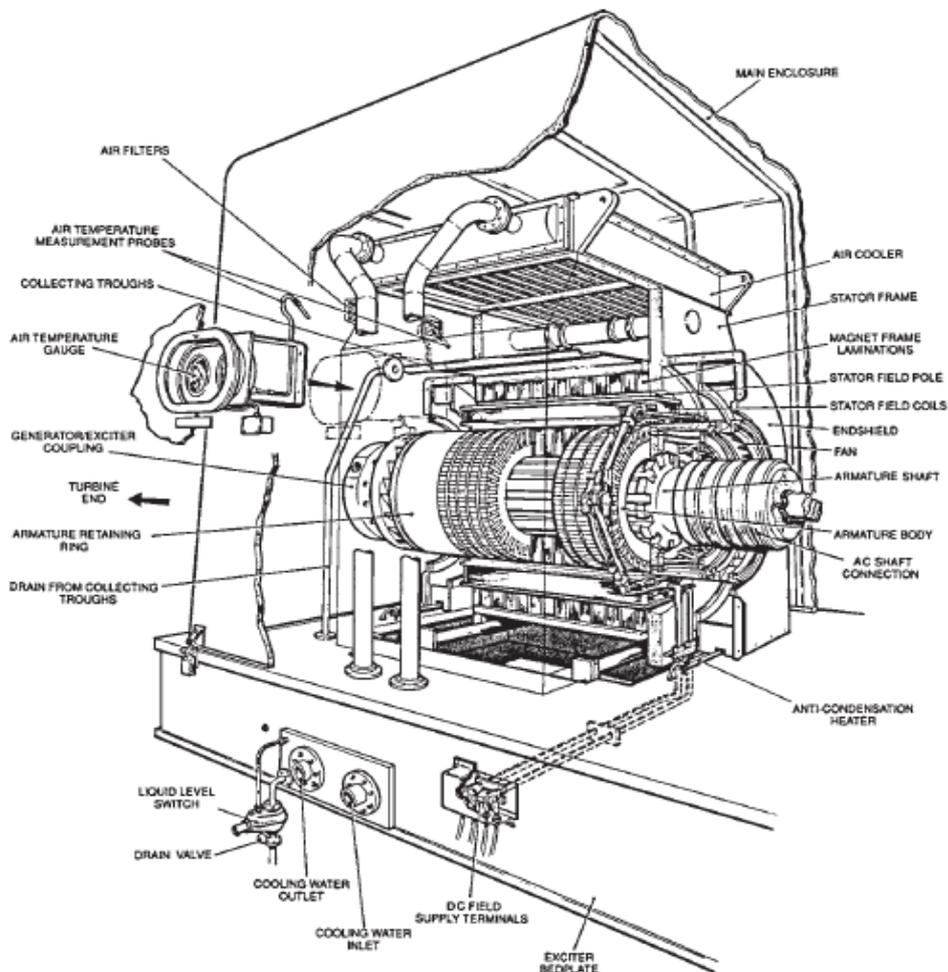


Gambar 2.19. Konstruksi Permanent Magnet Generator (PMG)

2.7.2.4 Automatic Voltage Regulator (AVR)

Dalam pembahasan bagian-bagian utama dan konstruksi AVR disini akan dibatasi pada konstruksi AVR tanpa sikat, karena dalam perkembangannya sistem eksitasi tanpa sikat yang paling banyak digunakan pada unit-unit pembangkit dewasa ini..

Sistem eksitasi tanpa sikat ini dilengkapi dengan air cooler sebagai pendingin dan udara disirkulasikan oleh fan yang ditempatkan pada ujung poros AC eksiter dan PMG.



Gambar 2.20 Konstruksi AVR

Regulator berfungsi untuk mengatur arus penguatan dari generator secara otomatis, yang bekerja dengan cara mendeteksi tegangan dan arus dari output generator utama dan membangkitkan sinyal kontrol sesuai dengan perubahan output generator tersebut.

Sinyal kontrol ini diberikan ke pulsa generator dari laci penyalan (*firing drawer*). Untuk mengontrol sudut penyalan (*firing angle*) dari *thyristor*.

Regulator terdiri dari card-card rangkaian elektronika seperti ditunjukkan gambar 2.20 yang mudah dibongkar pasang untuk pengantiannya jika diantaranya kegagalan operasi. Catu daya untuk semikonduktornya disupply oleh suatu unit penyedia daya searah dengan tegangan ± 15 volt dan untuk pengecekan card regulator dilengkapi dengan *check meter*.

Pada dasarnya card-card diatas merupakan rangkaian pencampur, rangkaian deteksi, rangkaian pembatas, rangkaian kompensasi dan rangkaian penstabil. Rangkaian tersebut terdiri dari :

- *Signal Mixer* (SMX).
- *Voltage Error Detector* (VED).
- *Minimum Excitation Limiter* (MEL).
- *Dumping* (DMP).
- *Comparator* (CMP).
- *Field Follower* (FFR).
- *Drive Amplifier* (DRA).
- *Auxiliary Relay* (AUX-RY).

Semua sinyal input ke card-card regulator sebelumnya dikonversikan ke level tegangan dan arus lebih layak untuk input operasional amplifier. Cara kerjanya komponen-komponen dari card hampir seluruhnya menggunakan elemen-elemen semikonduktor seperti *Operation Amplifier* (Op-Amp) dan *thyristor* yang digunakan sebagai rangkaian input dan rangkaian umpan balik.

Oleh karena itu, seluruh sinyal input ke tingkat tegangan dan arus yang cocok untuk input dari op-amp. Tegangan output maksimum dari op-amp pada kondisi jenuh adalah 10V, karena itu setiap card direncanakan dipakai dalam

daerah linier, yaitu kira-kira 10V. Sumber tenaga arus searah dengan tegangan konstan 15V dipergunakan untuk men-supply bermacam-macam card.

Maksud penggunaan AVR (*Automatic Voltage Regulator*) pada generator sinkron yang tersambung pada sistem tenaga ialah ;

- Mengatur agar tegangan pada keadaan kerja konstan
- Mengatur besarnya daya reaktif
- Mempertinggi kapasitas penguat (*caring capacity*) saluran transmisi tanpa beban dengan mengontrol eksitasi sendiri
- Menekan kenaikan tegangan pada pembuangan beban (*load rejection*)
- Menaikan batas daya stabilitas peralihan.

2.7.2.4.1 Signal Mixer (SMX)

Semua signal input regulator selalu melalui rangkaian tertentu akan dicampur dalam signal mixer. Dalam *card signal mixer* terdapat 3 macam rangkaian input, yaitu :

- Rangkaian penjumlah (*adding circuit*) : menjumlahkan dua atau lebih sinyal.
- Rangkaian pemilih (*auctioneering circuit*) : hanya mengeluarkan sebagai output sinyal terbesar dan dua atau lebih, sinyal yang diberikan sebagai input.
- Rangkaian pembatas (*limiting circuit*) : mengubah output dalam polaritas positif jika sinyal input negatif.

Suatu sinyal kontrol dibangkitkan untuk membatasi besar sinyal input yang masuk ke mixer. Output SMX diberikan ke pulsa generator untuk mengubah sudut fasa penyalan thyristor. Karena itu mengontrol output laci daya *thyristor*. Bila eksitasi ditambah output SMX akan negatif; bila eksitasi dikurangi output positif..

2.7.2.4.2 Voltage Error Detector (VED)

Voltage Error Detector menerima input tegangan 3 fasa yang diambil dari terminal generator. Sebelum masuk ke VED tegangan terminal generator direduksi dengan rasio sekunder PT 110V dan tegangan tersebut diturunkan lagi oleh *auxilliary transformer* (90 TR, 90 TR2, 90 TR3). Dan selanjutnya diatur oleh *voltage setter* (90 R) menjadi kira-kira 20V.

Tegangan 3 fasa ini dikonversikan dengan jembatan penyearah gelombang penuh menjadi tegangan dc, tegangan dc ini dihasil oleh *Voltage Detector* (VD). Tegangan ini dibandingkan dengan tegangan referensi yang telah diset didalam card, resultannya akan membangkitkan sinyal error.

Jika tegangan terminal lebih rendah dari referensi, sinyal output mempunyai polaritas positif; jika tegangan terminal lebih besar, sinyal output berpolaritas negatif. Keluaran card VED ini pada skala penuh 10V dan perbandingannya (fungsinya) dengan sinyal error dapat diatur, yaitu sebanding dengan 1% sinyal error sampai sebanding dengan 10% sinyal kesalahan.

2.7.2.4.3 Minimum Excitation Limiter (MEL)

Minimum excitation limiter ini berfungsi untuk mencegah regulator memberikan eksitasi terlalu rendah (*under exciting*) pada generator secara otomatis. Kurva karakteristik *limiting excitation* ini menyerupai kurva karakteristik kestabilan. Input yang diberikan card ini terdiri dari sinyal tegangan 3 fasa yang merupakan tegangan generator, yang disupply oleh Potential Transformer (PT) dan sinyal arus dari fasa Y (dirubah kedalam sinyal tegangan oleh konverter arus / tegangan) disupply oleh *current transformer* (CT) .

Bila sinyal tegangan dan sinyal arus (yang telah dirubah ke sinyal tegangan) dijumlahkan, maka kita mendapatkan suatu sinyal output sebagai hasil dari perbedaan kedua sinyal tersebut.

Limiting Characteristic Circle dari minimum excitation limiter ini disetel dengan *capability curve* dan *static stability limit curve* dari generator. Apabila generator beroperasi didalam setelan kurva (*Non Limited Area*) maka output ini

adalah negatif. Apabila eksitasi tepat pada setelan kurva maka ouputnya menjadi nol. Jika eksitasi diluar setelan kurva (*limited area*), maka ouputnya menjadi positif. Outputnya diberikan ke SMX melalui rangkaian pemilih. Bila sinyal ouput lebih besar dari sinyal output lainnya, kontrol dilakukan oleh sinyal ini, eksitasi generator ditambah hingga ke titik limit.

2.7.2.4.4 Over Excitation Limiter (OEL)

Over Excitation Limiter melindungi belitan medan generator dari temperature berlebih (*overheating*) ketika terjadi arus eksitasi berlebih (*over excitation*). Input dari *Over Excitation Limiter* adalah tegangan yang proporsional terhadap besar arus eksitasi generator.

2.7.2.4.5 Damping (DMP)

Card damping digunakan untuk memperbaiki stabilitas sistim eksitasi. Sinyal input ini didapat dari shunt dan insulation amplifier sebanding dengan arus medan AC exciter. Output dari card ini akan nol, bila arus medan dari eksiter dalam kondisi tetap (*Steady*). Apabila kondisi berubah, card ini akan memberikan output yang besarnya sebanding dengan gradient dari arus medan. Output card ini diberikan pada *minimum excitation limiter* dan *voltage error detector*.

2.7.2.4.6 Comparator (CMP)

Comparator menerima sinyal input dari MEL melalui *auxiliary relay unit*. Apabila sinyal input melebihi penyetelan dari komparator, maka *auxiliary relay unit* akan memberikan sinyal alarm.

2.7.2.4.7 Field Follower

Field Follower ini menghasilkan output kepada 70 E drive amplifier, dimana output ini sebanding dengan polaritas penyimpangan sinyal input apabila sinyal tersebut lebih besar dari pada nilai yang disetel dan terus menerus untuk jangka waktu yang pendek. *Field Follower* ini terdiri dari suatu rangkaian



pembandingan (*comparator circuit*) dan suatu rangkaian timing (*timing circuit*), menerima dua macam input yaitu penyimpangan sinyal *buck dan boost* dari sinyal mixer.

2.7.2.4.8 V/Hz Limiter (Over Flux)

V/Hz limiter digunakan sebagai pencegah kejenuhan inti pada saat generator beroperasi tanpa beban dan pada saat *start up*. Kejenuhan inti dapat menyebabkan *overheating* pada trafo yang terhubung pada generator yang dapat mengakibatkan kerusakan permanen pada inti trafo.

2.7.2.4.9 Voltage Detector (VD)

Voltage Detector menerima input 3 fasa dari *potential transformer* (PT), dimana tegangan nominal 3 fasa PT dirubah menjadi besaran tegangan +10 volt DC. Tegangan input PT diperoleh dari tegangan output generator.

2.7.2.4.10 Drive Amplifier

Drive amplifier terdiri dari rangkain penyalaan (*firing circuit*) dan penguat thyristor (*thyristor amplifier*). Dua sinyal input didapat dari FFR (sisi diatas dan sisi dibawah) dari 70E. Sinyal diatas dan sinyal dibawah 70E diperkuat oleh thyristor dan menghasilkan output kira-kira 100 Vdc. Output dari drive amplifier ini dipergunakan untuk menjalankan motor (70 EM) dari base setter.

2.7.2.4.11 Auxilliary Relay (AUX-RY)

Auxiliary relay digunakan untuk mengkonversikan sinyal logik ke sinyal kontak ini terdiri dari relay kontak *mercury* dan rangkain pendorong relay transistor (*transistorized relay drive circuit*).



2.7.3 Prinsip Kerja Brushless Exciter¹²

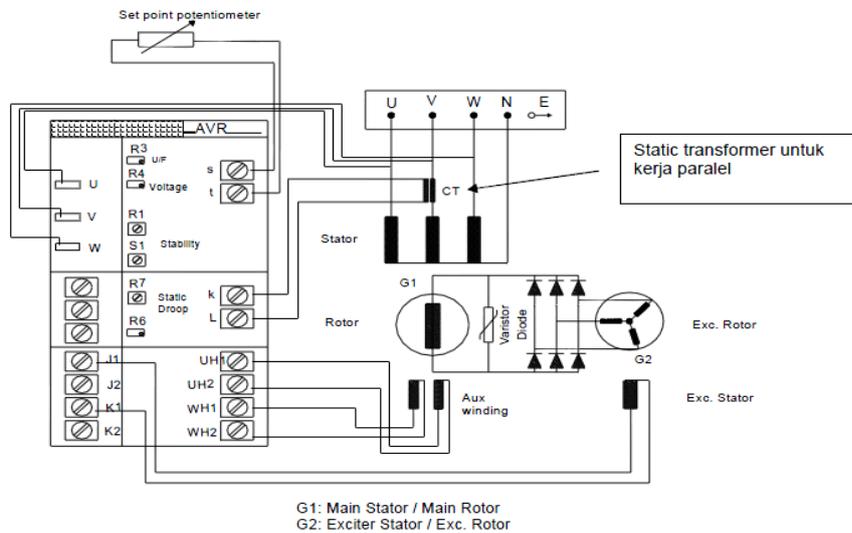
Pada saat generator diputar mencapai kecepatan 80-90% dari nominalnya stator eksiter akan menginduksikan tegangan rotor eksiter, keluaran tegangan rotor eksiter (tegangan AC 3 phase) disalurkan oleh *rectifier* 3 phase yang terpasang dalam satu poros dengan rotor utama.

Setelah kumparan pada rotor mendapat *power supply* DC dari eksiter, maka rotor akan menginduksikan tegangan pada kumparan stator utama. Jika rangkaian kontrol tegangan (AVR) tidak dihubungkan dengan generator (AVR fully disconnected), maka saat itu akan terukur tegangan terminal generator sebesar 12% s/d 30% x tegangan generator. Tegangan ini disebut dengan “*Residual Voltage*”.

Jika kontrol pada AVR dihubungkan dengan rangkaian generator, dan setelah generator diputar pada putaran nominalnya, residual voltage akan dibangkitkan dan pada terminal generator akan timbul tegangan karena induksi. Waktu yang digunakan untuk membangkitkan tegangan generator dari 0 s/d tegangan kerja disebut dengan “*Build-Up Time*” pada kondisi normal biasanya berkisar antara 2 s/d 6 detik, tergantung dari besaran residual voltage yang dibangkitkan.

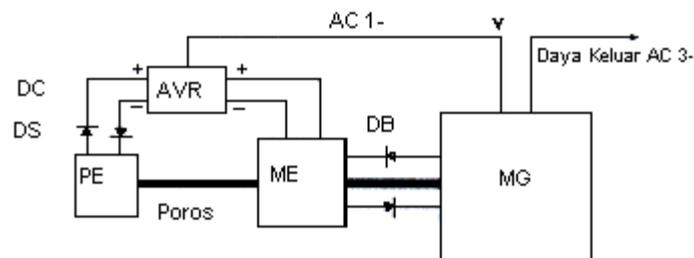
Pada generator yang tidak menggunakan *pilot exciter*, pada *stator exciter* selalu dipasang magnet permanen dengan dua buah Polaritas U dan S, dan *aux.winding*.

¹² Siswanto, *Total Maintenance Program*, Bekasi, Industrial maintenance Program (IMC) halaman 27



Gambar 2.21 AVR Pada Rangkaian Generator

Sistem pemberian arus penguatan yang digunakan pada pembangkit besar (di atas 100 MVA). Generator penguat pertama disebut *pilot exciter* dan generator penguat kedua disebut *main exciter* (penguat utama). *Main exciter* adalah generator arus bolak-balik dengan kutub pada statornya. Rotor menghasilkan arus bolak-balik disearahkan dengan dioda yang berputar pada poros *main exciter* (satu poros dengan generator utama). Arus searah yang dihasilkan oleh dioda berputar menjadi arus penguat generator utama.



Gambar 2.22 Cara kerja eksitasi tanpa sikat¹³

¹³ Muslis. Supari, 2008, *Teknik Pembangkit Tenaga Listrik(e-book)*, Jakarta :departemen Pendidikan Nasional, Halaman 105

Keterangan ;

ME : Main Exciter

MG : Main Generator

AVR : Automatic Voltage Regulator

V : Tegangan Generator

AC : Alternating Current (arus bolak balik)

DC : Direct Current (arus searah)

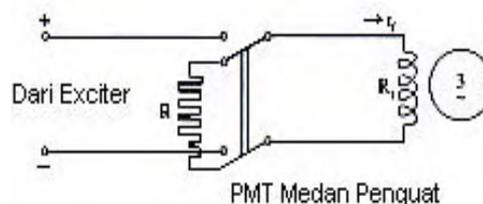
Pilot exciter pada generator arus bolak-balik dengan rotor berupa kutub magnet permanen yang berputar menginduksi pada lilitan stator. Tegangan bolak-balik disearahkan oleh penyearah dioda dan menghasilkan arus searah yang dialirkan ke kutub-kutub magnet yang ada pada stator *main exciter*.

Besar arus searah yang mengalir ke kutub main exciter diatur oleh pengatur tegangan otomatis (*automatic voltage regulator/AVR*).

Besarnya arus berpengaruh pada besarnya arus yang dihasilkan *main exciter* maka besarnya arus main exciter juga mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator utama.

Pada sistem *excitacy* tanpa sikat, permasalahan timbul jika terjadi hubung singkat atau gangguan hubung tanah di rotor dan jika ada sekering lebur dari dioda berputar yang putus, hal ini harus dapat dideteksi.

Gangguan pada rotor yang berputar dapat menimbulkan distorsi medan magnet pada generator utama dan dapat menimbulkan vibrasi (getaran) berlebihan pada unit pembangkit.



Gambar 2.23 PMT Medan Penguat Dengan Tahanan R



Pendeteksian kejadian pada rotor yang berputar perlu cara khusus, antara lain menggunakan cara mentransmisikan dari sesuatu yang berputar. Pada cara ini, rotor dilengkapi pengirim sinyal elektronik yang mewakili besaran tertentu, misalnya mewakili tahanan isolasi rotor.

Sinyal elektronik ditangkap oleh alat pengukur di tempat yang diinginkan dan sinyal-sinyal elektronik oleh alat pengukur "diterjemahkan" menjadi sinyal yang mudah dimengerti. Sistem *excitacy* generator utama (*main generator*) harus bisa dibuka oleh pemutus tenaga (PMT).

Hal ini berkaitan dengan sistem proteksi generator, misalnya apabila relai diferensial dari generator bekerja maka relai membuka PMT generator dan juga membuka PMT sistem *excitacy* generator. PMT yang membuka sistem penguat generator melakukan pemutusan arus yang mengalir ke medan magnet generator. Tahanan R untuk menampung energi sehingga busur listrik pada kontak - kontak PMT medan penguat dapat padam tanpa merusak kontak-kontak.