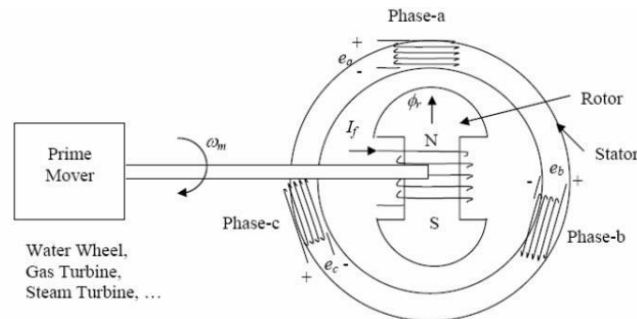


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Generator sinkron (altenator) merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (prime mover), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya (Gambar 2.1). Generator sinkron dengan defenisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Rotor generator sinkron yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet yang diputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan putar rotor.



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron¹

Tipe dari generator sinkron ada dua, yaitu :

- Rotating armature type : Kumparan atau belitan armature ada di rotor dan medan gaya magnet ada di stator.
- Rotating field type : Kumparan atau belitan terminal ada di stator dan medan gaya magnet di rotor.

¹ Suad Ibrahim Shahl, *Synchronous Generator (e-book)*, hlm. 7.

2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Kumparan rotor 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 timbul medan magnet atau fluks yang bersifat bolak-balik atau fluks putar. Fluks putar ini akan memotong-motong kumparan stator, sehingga pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik karena pengaruh induksi dari fluks putar tersebut. Gaya gerak listrik (GGL) yang timbul pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik, atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor.

Prinsip kerja dari generator sinkron dapat dinyatakan sebagai berikut :

1. Rotor disuplai dengan arus DC I_f yang kemudian menghasilkan fluks magnet ϕ_f .
2. Rotor digerakkan oleh turbin dengan kecepatan konstan sebesar n_s .
3. Garis gaya magnet bergerak menginduksi kumparan pada stator.
4. Frekuensi dari tegangan generator tergantung dari kecepatan putaran rotor yang dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$f = \frac{p}{2} \times \frac{n}{60} = \frac{p n}{120} = f = (p / 120) n = p n / 120 \dots\dots\dots (2.1)^2$$

dimana n merupakan jumlah kutub dari magnet rotor.

Adapun besar GGL induksi kumparan stator atau GGL induksi armature per fasa adalah :

$$E_a / \text{ph} = 4,44. f. M. \phi. K_d \dots\dots\dots (2.2)^3$$

Dimana :

- E_a : Gaya Gerak Listrik Armature Per Fasa
 f : Frekuensi (Hz)
 M : Jumlah Kumparan Per Fasa
: $Z/2$

² *Ibid.*

³ Jon Rijono, *Dasar Teknik Tenaga Listrik*, (Yogyakarta : Andi Offset, 1997), hlm. 210.

- Z : Jumlah Konduktor Seluruh Slot Per Fasa
- K_d : Faktor Distribusi. Hal ini diperlukan karena kumparan armatur atau alternator tidak terletak dalam satu slot melainkan terdistribusi dalam beberapa slot per fasa.
- Φ : Fluks Magnet Per Kutub Per Fasa

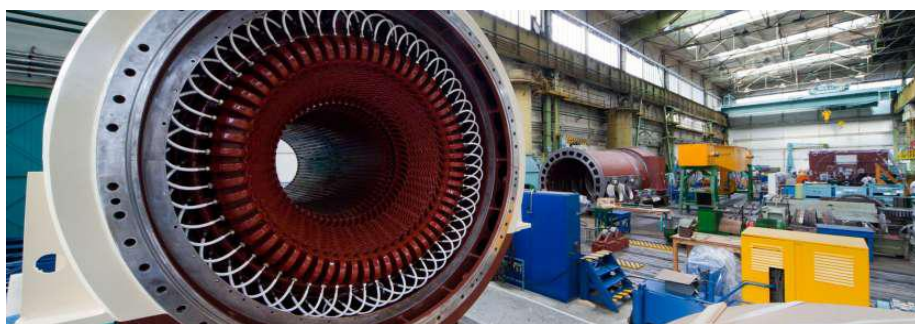
2.3 Konstruksi Pada Generator Sinkron

Bagian-bagian utama dari generator sinkron adalah :

- a. Stator : Bagian generator yang diam.
- b. Rotor : Bagian generator yang bergerak.

2.3.1. Stator

Stator adalah bagian yang tak berputar (diam) yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus AC menuju beban disalurkan melalui stator. Komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak. Stator mempunyai bagian terdiri dari rangka stator yang merupakan salah satu bagian utama dari generator. Stator biasanya terdiri dari susunan rangka baja yang dipipihkan sebagai inti magnet, yang merupakan kunci dari gulungan luar batang. Gulungan ini dapat saling menutupi antara satu sama yang lainnya sesuai dengan perencanaan.



Gambar 2.2 Stator⁴

⁴ <https://www.brush.eu/index.php/generators-and-motors/combined-cooled-generators>. Diakses : 20 Juni 2019 pukul 06:12).

Stator memiliki beberapa bagian utama, yaitu :

1. Rangka Stator

Rangka stator merupakan kerangka yang menyangga inti jangkar generator.

2. Inti Stator

Inti stator terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetic khusus terpasang ke rangka stator.

3. Alur (slot) dan Gigi

Alur dan gigi merupakan tempat meletakkan kumparan stator. Ada 3 (tiga) bentuk alur stator yaitu terbuka, setengah terbuka, dan tertutup seperti pada gambar 2.3 berikut :



Gambar 2.3 Konstruksi Stator⁵

2.3.2. Rotor

Rotor adalah merupakan elemen yang berputar, pada rotor terdapat kutub-kutub magnet dengan lilitan-lilitan kawatnya dialiri oleh arus searah. Rotor terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

Rotor mempunyai bagian yang terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

1. Slip Ring

Slip Ring merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Terminal kumparan rotor dipasang ke

⁵ https://www.academia.edu/29533269/TEORI_GENERATOR_SINKRON, hlm. 8. (Diakses : 20 Juni 2019 pukul 06:46).

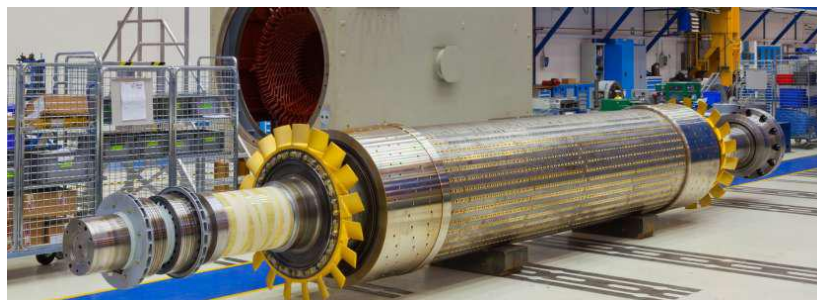
slip ring ini kemudian dihubungkan ke sumber arus searah melalui sikat (brush) yang letaknya menempel pada slip ring.

2. Kumparan Rotor (Kumparan Medan)

Kumparan medan merupakan unsur yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapatkan arus searah dari sumber eksitasi tertentu.

3. Poros Rotor

Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan, dimana pada poros rotor tersebut telah dibentuk slot-slot secara paralel terhadap poros rotor.



Gambar 2.4 Rotor⁶

Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah electromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa silent pole (kutub menonjol) dan non silent pole (kutub silinder).

a. Rotor Bentuk Menonjol (Silent Pole)

Pada jenis silent pole, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Belitan-belitan medannya dihubung seri. Ketika belitan medan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan. Gambar bentuk kutub menonjol generator sinkron seperti pada gambar 2.5 berikut :

⁶ <https://www.brush.eu/index.php/generators-and-motors/2-pole-air-cooled-generators>. (Diakses : 20 Juni 2019 pukul 06:55).

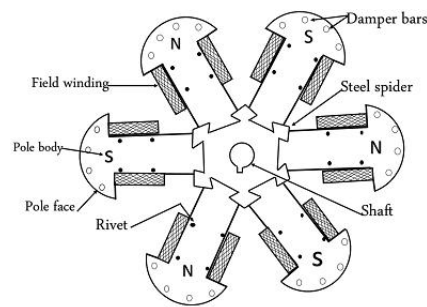


Figure: Six-pole salient-pole rotor

Gambar 2.5 Rotor Kutub Menonjol⁷

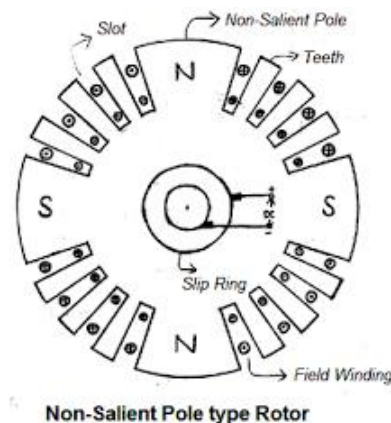
Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (120-400rpm). Generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik. Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putaran rendah dan sedang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

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

b. Rotor Bentuk Silinder (Non Salient Pole)

Pada jenis non salient pole, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa halus yang berbentuk silinder yang mempunyai alur-alur terbuat di sisi luarnya. Belitan-belitan medan dipasang pada alur-alur di sisi luarnya dan terhubung seri yang dienerjais oleh Eksiter. Gambaran bentuk kutub silinder generator sinkron tampak seperti pada Gambar 2.6 berikut :

⁷ https://www.academia.edu/29533269/TEORI_GENERATOR_SINKRON, hlm. 11. (Diakses : 20 Juni 2019 pukul 06:59).

Gambar 2.6 Rotor Kutub Silinder⁸

Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar tinggi (1500 atau 3000rpm) seperti yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga uap. Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena :

- Konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi.
- Distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.

2.4 Reaksi Jangkar Generator Sinkron

Saat generator sinkron bekerja pada beban nol tidak ada arus yang mengalir melalui kumparan jangkar (stator), sehingga yang ada pada celah udara hanya fluksi arus medan rotor. Namun jika generator sinkron diberi beban, arus jangkar I_a akan mengalir dan membentuk fluksi jangkar. Fluksi jangkar ini kemudian mempengaruhi fluksi arus medan dan akhirnya menyebabkan berubahnya harga tegangan terminal generator sinkron. Reaksi ini kemudian dikenal sebagai reaksi jangkar.

Pengaruh yang ditimbulkan oleh fluksi jangkar dapat berupa distorsi, penguatan (magnetising), maupun pelemahan (demagnetising) fluksi arus medan

⁸ *Ibid*, hlm.12.

pada celah udara. Perbedaan pengaruh yang ditimbulkan fluksi jangkar tergantung kepada beban dan faktor daya beban, yaitu :

a. Beban Resistif ($\text{Cos } \varphi = 1$)⁹

Pengaruh fluksi jangkar terhadap fluksi medan hanyalah sebatas mendistorsinya saja tanpa mempengaruhi kekuatannya (cross magnetising).

b. Beban Induktif Murni ($\text{Cos } \varphi = 0 \text{ Lag}$)¹⁰

Arus akan tertinggal sebesar 90° dari tegangan. Fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar akan melawan fluksi arus medan. Dengan kata lain reaksi jangkar akan demagnetising artinya pengaruh reaksi jangkar akan melemahkan fluksi arus medan.

c. Beban Kapasitif Murni ($\text{Cos } \varphi = 0 \text{ Lead}$)¹¹

Arus akan mendahului tegangan sebesar 90°. Fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar akan searah dengan fluksi arus medan sehingga reaksi jangkar yang terjadi akan magnetising artinya pengaruh reaksi jangkar akan menguatkan fluksi arus medan.

d. Untuk Beban Tidak Murni (Induktif/Kapasitif)¹²

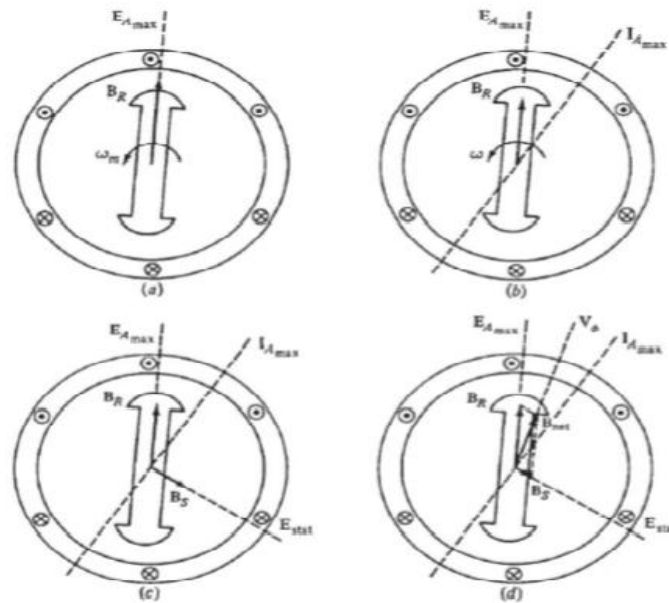
Pengaruh reaksi jangkar akan menjadi sebagian magnetising dan sebagian demagnetising. Saat beban adalah kapasitif, maka reaksi jangkar akan sebagian distortif dan sebagian magnetising. Sementara itu saat beban adalah induktif, maka reaksi jangkar akan sebagian distortif dan sebagian demagnetising. Namun pada prakteknya beban umumnya adalah induktif.

⁹ *Ibid*, hlm.16.

¹⁰ *Ibid*.

¹¹ *Ibid*.

¹² *Ibid*.



Gambar 2.7 Reaksi Jangkar¹³

2.5 Karakteristik Generator Sinkron

2.5.1. Generator Sinkron Dalam Keadaan Jalan Tanpa Beban

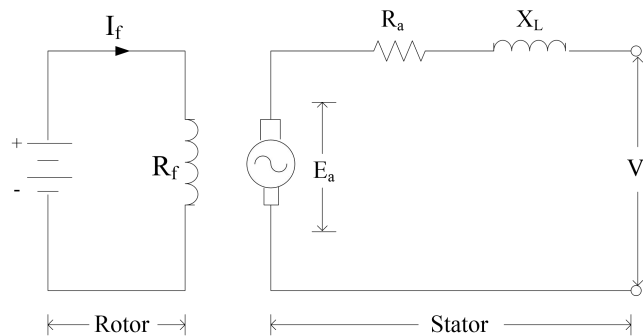
Pada generator sinkron keadaan jalan tanpa beban mengandung arti bahwa arus armatur $I_a = 0$. Dengan demikian, besarnya tegangan terminal adalah :

$$V_t = E_a = E_0 \dots\dots\dots (2.3)^{14}$$

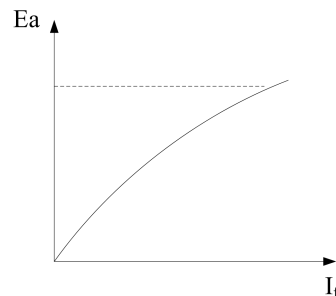
Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f).

¹³ Sumber : <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/20111/3/Chapter%20II.pdf>, (Diakses : 20 Juni 2019 pukul 08:39).

¹⁴ Jon Rijono, *Op. Cit.*, hlm. 211.



Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tanpa Beban¹⁵



Gambar 2.9 Grafik Hubungan Arus Penguat Medan (I_f) dan E_a

2.5.2. Generator Sinkron Berbeban

Bila generator diberi beban yang berubah-ubah maka besarnya tegangan terminal V_t akan berubah-ubah pula. Hal ini disebabkan adanya :

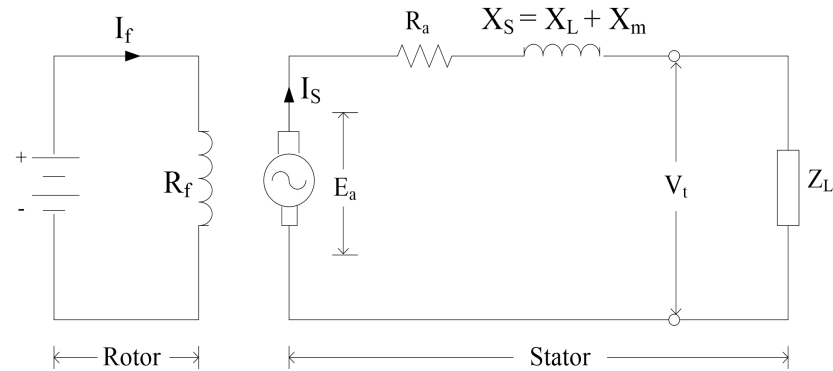
- Jatuh tegangan karena resistansi jangkar (R_a).
- Jatuh tegangan karena reaktansi bocor jangkar (X_L).
- Jatuh tegangan karena reaksi jangkar.

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

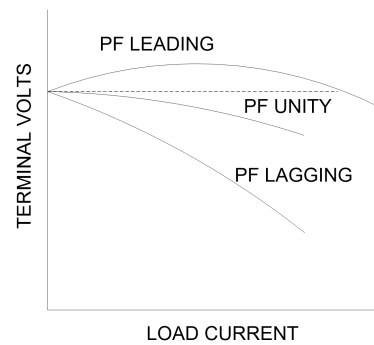
$$X_s = X_L + X_m \dots\dots\dots (2.4)^{16}$$

¹⁵ *Ibid.*

¹⁶ *Ibid.*, hlm. 214.



Gambar 2.10 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Berbeban¹⁷



Gambar 2.11 Karakteristik Generator AC Pada Berbagai Faktor Daya¹⁸

Besar GGL armatur tanpa beban pada faktor daya beban = 1, PF tertinggal dan PF mendahului adalah sebagai berikut :

- PF = 1

$$E_0 = \sqrt{(V_t + I_a \cdot R_a)^2 + (I_a \cdot X_s)^2} \dots\dots\dots (2.5)^{19}$$

- PF = Tertinggal

$$E_0 = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta + I_a X_s)^2} \dots\dots\dots (2.6)^{20}$$

¹⁷ *Ibid*, hlm. 215.

¹⁸ *Ibid*, hlm. 218.

¹⁹ *Ibid*, hlm. 216.

²⁰ *Ibid*.

- PF = Mendahului

$$E_0 = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta - I_a X_s)^2} \dots\dots\dots (2.7)^{21}$$

Dimana :

- E_0 : GGL Armatur Tanpa Beban (Volt)
- V_t : Tegangan Terminal Output Per Fasa (Volt)
- R_a : Resistansi Jangkar Per Fasa (Ohm)
- X_s : Reaktansi Sinkron Per Fasa (Ohm)

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

$$E_a = E_0 - I_a X_m \dots\dots\dots (2.8)^{22}$$

Besar GGL armatur berbeban (E_a) pada faktor daya beban = 1, PF tertinggal dan PF mendahului adalah sebagai berikut :

- PF = 1

$$E_a = \sqrt{(V_t + I_a R_a)^2 + (I_a X_L)^2} \dots\dots\dots (2.9)^{23}$$

- PF = Tertinggal

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta + I_a X_L)^2} \dots\dots\dots (2.10)^{24}$$

- PF = Mendahului

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta - I_a X_L)^2} \dots\dots\dots (2.11)^{25}$$

²¹ *Ibid.*

²² *Ibid*, hlm 217.

²³ *Ibid.*

²⁴ *Ibid.*

²⁵ *Ibid.*

Dimana :

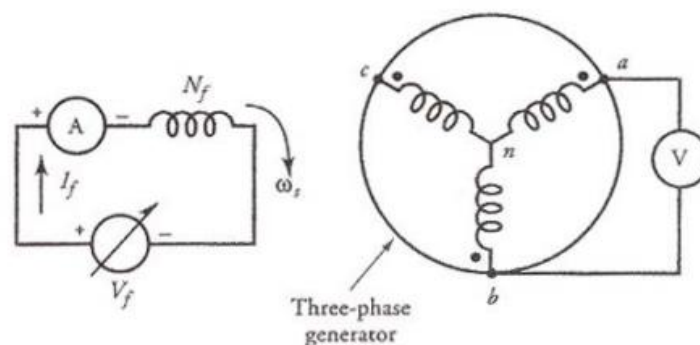
- E_a : Tegangan Induksi Pada Jangkar Per Fasa (Volt)
- V_t : Tegangan Terminal Output Per Fasa (Volt)
- R_a : Resistansi Jangkar Per Fasa (Ohm)
- X_L : Reaktansi Bocor Per Fasa (Ohm)

2.6 Tes Generator Sinkron

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 dengan terminal.
- Arus medan dinaikan dari 0 sampai maksimum.
- Catat nilai tegangan terminal dan arus medan saat ini.

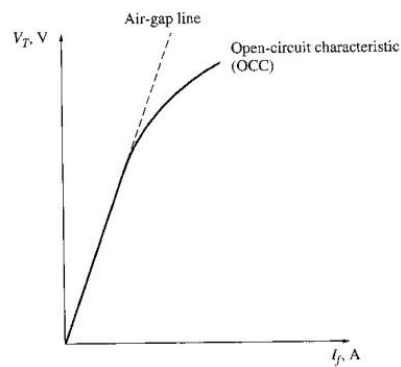


Gambar 2.12 Circuit Diagram Tes Rangkaian Terbuka²⁶

Dengan terminal terbuka, $I_A = 0$, sehingga $E_a = V_\phi$. Plot ini disebut open circuit characteristic (OCC) atau karakteristik rangkaian terbuka dari generator. Dengan karakteristik ini, adalah mungkin untuk menemukan tegangan internal yang dibangkitkan pada generator untuk berapapun arus medan yang diberikan. Open Circuit Characteristic (OCC) mengikuti sebuah garis lurus yang berhubungan dengan magnetic circuit dari generator sinkron yang tidak

²⁶ Suad Ibrahim Shahl, *Op.Cit.*, hlm. 15.

dibebani. Berhubung dalam daerah yang linear, banyak dari mmf (magnetic moving force) hilang oleh air-gap (celah udara), garis lurus itu disebut airgap line.

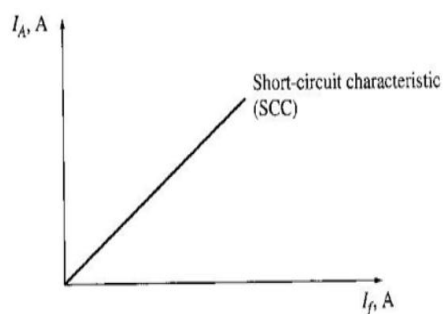


Gambar 2.13 Karakteristik Tak Berbeban²⁷

2.6.2. Tes Short Circuit

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

- Generator diputar di rated speed.
- Sesuaikan lapangan saat ini ke 0.
- Sirkuit pendek terminal.
- Mengukur arus dinamo atau baris saat ini sebagai arus medan meningkat.

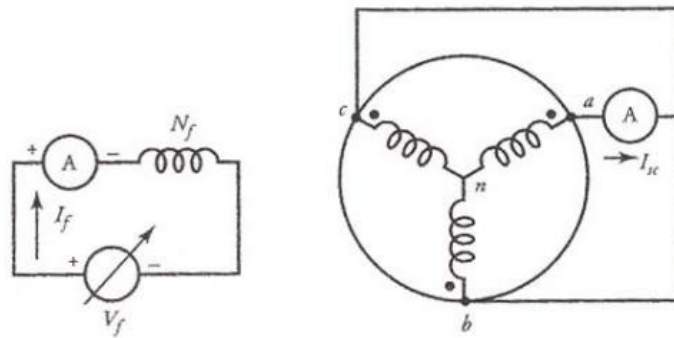


Gambar 2.14 Karakteristik Hubung Singkat Generator Sinkron²⁸

²⁷ *Ibid*, hlm. 16.

²⁸ *Ibid*, hlm. 16.

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



Gambar 2.15 Rangkaian Tes Short Circuit²⁹

Saat terminal short circuit, tegangan armatur I_A adalah :

$$I_A = \frac{E_A}{\sqrt{R_A^2 + X_S^2}} \dots\dots\dots (2.12)^{30}$$

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

$$X_S = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2} = \dots\dots\dots (2.13)^{31}$$

Karena $Z_s \gg R_a$ maka dapat ditulis :

$$X_s = \frac{V_t}{I_a} \dots\dots\dots (2.14)$$

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

$$Z_s = \frac{V_t}{I_{sc}} \dots\dots\dots (2.15)$$

²⁹ Ibid, hlm 17.

³⁰ Ibid, hlm 16.

³¹ Ibid.

2.7 Pengaturan Tegangan Generator

Ketika beban ditambahkan pada generator ac yang sedang bekerja pada kepesatan konstan dan dengan eksitasi medan konstan, tegangan terminal akan berubah. Besarnya perubahan akan bergantung pada rancangan mesin dan pada faktor 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.

Persen pengaturan (Pada Faktor Daya Tertentu)

$$= \frac{\text{tegangan tanpa beban} - \text{tegangan beban penuh}}{\text{tegangan beban penuh}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.16)^{32}$$

Dimana :

$$V_t = V_L / \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.17)$$

Sedangkan untuk mencari selisih nilai antara tegangan terminal (ΔV_t) :

$$\Delta V_t = V_{t0} - V_{t1} \dots\dots\dots (2.18)$$

Keterangan :

V_t : Tegangan Per Phasa

V_L : Tegangan Line

Faktor-faktor yang mempengaruhi pengaturan generator adalah sebagai berikut :

1. Penurunan tegangan I R pada lilitan jangkar.
2. Penurunan tegangan I X_L pada lilitan jangkar.
3. Reaksi Jangkar.

³² Lister, 1993, *Mesin dan Rangkain Listrik*, Hlm. 202.

Karena tegangan terminal generator ac banyak berubah dengan berubahnya beban, maka untuk operasi hampir semua peralatan listrik diperlukan usaha untuk menjaga agar tegangannya konstan. Cara yang biasa dilakukan untuk ini adalah menggunakan alat pembantu yang disebut pengatur tegangan (voltage regulator) untuk mengendalikan besarnya eksitasi medan dc yang dicatukan pada generator. Bila tegangan terminal generator turun karena perubahan beban, pengatur tegangan secara otomatis menaikkan pembangkitan medan sehingga tegangan kembali normal. Sama halnya bila tegangan terminal naik karena perubahan beban, maka pengatur akan mengembalikan nilai tegangan normalnya dengan mengurangi eksitasi medan. Penggunaan beban pada konsumen selalu dinamis di sebabkan oleh pemakain daya sesuai kebutuhan sehingga mengakibatkan perubahan beban, baik beban dengan daya aktif maupun dengan daya reaktif. Perubahan daya reaktif yang terjadi sangat mempengaruhi kestabilan dari tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator, untuk mengatasi hal tersebut digunakanlah peralatan yang dapat mengatur tegangan keluaran dari generator yang disebut AVR.

2.8 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. Eksitasi pada generator sinkron adalah pemberian arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor. Sesuai dengan prinsip elektromagnet, apabila suatu konduktor yang berupa kumparan yang dialiri listrik arus searah maka kumparan tersebut akan menjadi magnet sehingga akan menghasilkan fluks-fluks magnet. Apabila kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi diputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan jangkar yang terdapat pada stator akan terinduksi oleh fluks-fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan sehingga akan menghasilkan tegangan bolak-balik. Besarnya tegangan yang dihasilkan tergantung kepada besarnya arus eksitasi dan putaran yang

diberikan pada rotor. Semakin besar arus eksitasi dan putaran, maka akan semakin besar tegangan yang dihasilkan oleh sebuah generator.

Sistem ini merupakan sistem yang vital pada proses pembangkitan listrik. Pada perkembangannya, sistem eksitasi pada generator listrik ini dapat dibedakan menjadi 2 macam, yaitu :

1. Sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (Brush Excitation).
2. Sistem eksitasi tanpa sikat (Brushless Excitation).

Sistem eksitasi mempunyai berbagai fungsi. Fungsi tersebut antara lain :

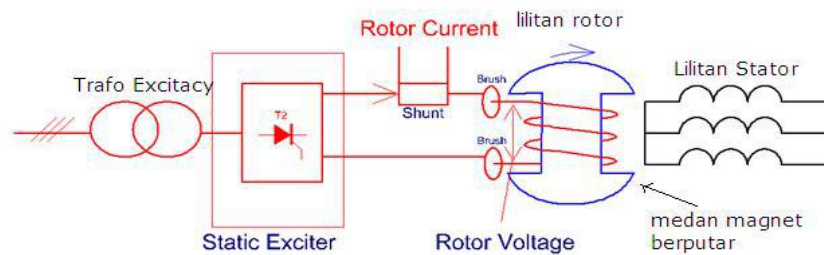
- a. Mengatur tegangan keluaran generator agar tetap konstan (stabil).
- b. Mengatur besarnya daya reaktif.
- c. Menekan kenaikan tegangan pada pelepasan beban (load rejection).

Karena mempunyai fungsi seperti di atas maka sistem eksitasi harus mempunyai sifat antara lain:

- a. Mudah dikendalikan.
- b. Dapat mengendalikan dengan stabil/ sifat pengendalian stabil.
- c. Mempunyai respon/tanggapan yang cepat.
- d. Tegangan yang dikeluarkan harus sama dengan tegangan yang diinginkan.

2.8.1. Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Sikat (Brush Excitation)

Sistem eksitasi menggunakan sikat, sumber tenaga listriknya berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan rectifier. Jika menggunakan sumber listrik listrik yang berasal dari generator AC atau menggunakan permanent magnet generator (PMG), medan magnetnya adalah magnet permanen. Untuk mengalirkan arus eksitasi dari eksiter utama ke rotor generator, menggunakan slip ring dan sikat arang, demikian juga penyaluran arus yang berasal dari pilot exciter ke main exciter.



Gambar 2.16 Sistem Eksitasi Menggunakan Sikat (Brushless Excitation)³³

2.8.1.1. Prinsip Kerja Sistem Eksitasi Menggunakan Sikat

Generator penguat yang pertama, adalah generator arus searah hubungan paralel yang menghasilkan arus penguat bagi generator penguat kedua. Generator penguat (exciter) untuk generator sinkron merupakan generator utama yang diambil dayanya.

Pengaturan tegangan pada generator utama dilakukan dengan mengatur besarnya arus eksitasi (arus penguatan) dengan cara mengatur potensiometer atau tahanan asut. Potensiometer atau tahanan asut mengatur arus penguat generator pertama dan generator penguat kedua menghasilkan arus penguat generator utama. Dengan cara ini arus penguat yang diatur tidak terlalu besar nilainya (dibandingkan dengan arus generator penguat kedua) sehingga kerugian daya pada potensiometer tidak terlalu besar. PMT arus penguat generator utama dilengkapi tahanan yang menampung energi medan magnet generator utama karena jika dilakukan pemutusan arus penguat generator utama harus dibuang ke dalam tahanan. Sekarang banyak generator arus bolak-balik yang dilengkapi penyearah untuk menghasilkan arus searah yang dapat digunakan bagi penguatan generator utama sehingga penyaluran arus searah bagi penguatan generator utama, oleh generator penguat kedua tidak memerlukan cincin geser karena penyearah ikut berputar bersama poros generator. Cincin geser digunakan untuk menyalurkan arus dari generator penguat pertama ke medan penguat generator penguat kedua. Nilai arus penguatan kecil sehingga penggunaan cincin geser tidak menimbulkan masalah.

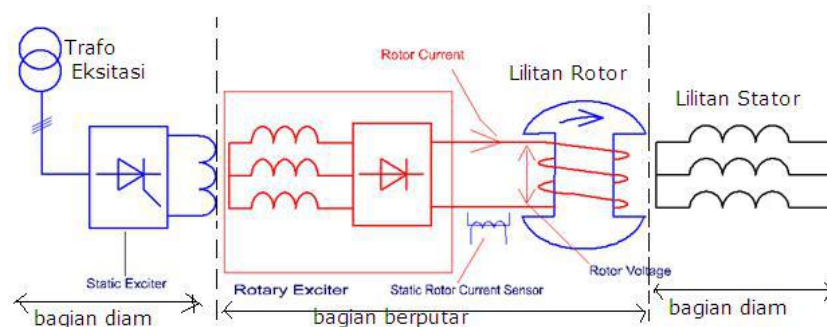
³³ <https://scinticalengineering.wordpress.com/kuliah/mesin-elektir/mesinac/eksitasi-generator/>. (Diakses : 20 Juni 2019 pukul 09:39).

Pengaturan besarnya arus penguatan generator utama dilakukan dengan pengatur tegangan otomatis supaya nilai tegangan klem generator konstan. Perkembangan sistem eksitasi pada generator sinkron dengan sistem eksitasi tanpa sikat, karena sikat dapat menimbulkan loncatan api pada putaran tinggi. Untuk menghilangkan sikat digunakan dioda berputar yang dipasang pada jangkar.

2.8.2. Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (Brushless Excitation)

Penggunaan sikat atau slip ring untuk menyalurkan arus eksitasi ke rotor generator mempunyai kelemahan karena besarnya arus yang mampu dialirkan pada sikat arang relatif kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang, digunakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (brushless excitation). Keuntungan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (brushless excitation), antara lain adalah :

- Energi yang diperlukan untuk eksitasi diperoleh dari poros utama (main shaft), sehingga keandalannya tinggi.
- Biaya perawatan berkurang karena pada sistem eksitasi tanpa sikat tidak terdapat sikat, komutator dan slip ring.
- Pada sistem eksitasi tanpa sikat (brushless excitation) tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada farnish akibat sikat arang.
- Mengurangi kerusakan akibat udara buruk sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup.
- Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung terus pada waktu yang lama.

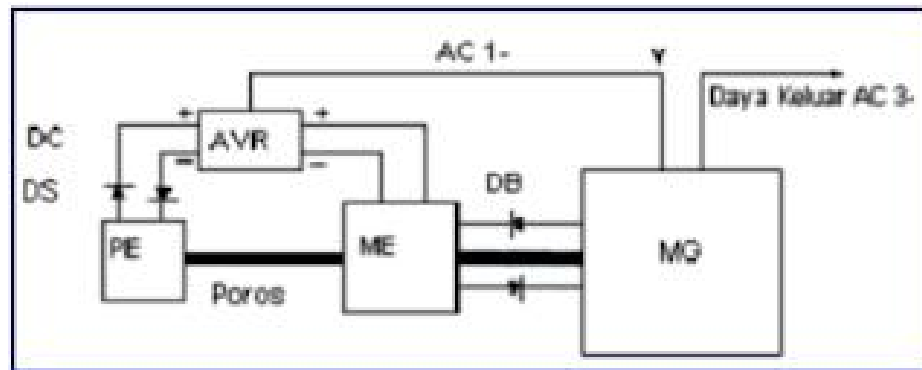
Gambar 2.17 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (Brusless Excitation)³⁴

2.8.2.1. Prinsip Kerja Sistem Eksitasi Tanpa Sikat

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, 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 dipasangkan magnet permanen dengan dua buah Polaritas U dan S, dan aux winding. 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

³⁴ <https://scinticalengineering.wordpress.com/kuliah/mesin-elektir/mesinac/eksitasi-generator/>. (Diakses : 20 Juni 2019 pukul 09:39).

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 2.18 Cara Kerja Eksitasi Tanpa Sikat³⁵

Keterangan :

- ME : Main Exciter
- MG : Main Generator
- AVR : Automatic Voltage Regulator
- V : Tegangan
- AC : Alternating Current
- DC : Direct Current

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).

³⁵ Supari Muslin, *Teknik Pembangkit Tenaga Listrik (e-book)*, (Jakarta : Departemen Pendidikan Nasional, 2008), Hlm. 106.

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 eksitasi 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.

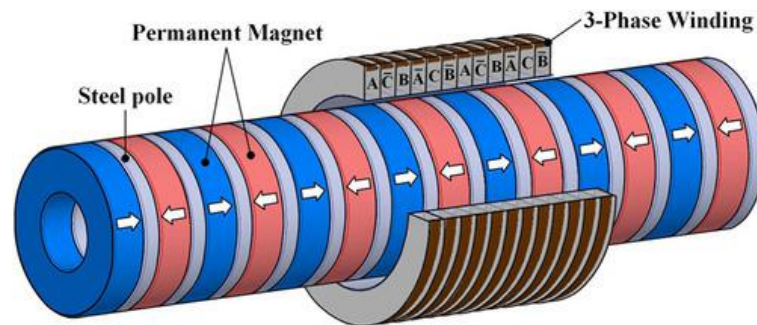
Gangguan pada rotor yang berputar dapat menimbulkan distorsi medan magnet pada generator utama dan dapat menimbulkan vibrasi (getaran) berlebihan pada unit pembangkit. Pendeteksian kejadian pada rotor yang berputar perlu cara khusus, antara lain menggunakan cara mentransmisikan dari sesuatu yang berputar. 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 eksitasi 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.

2.8.2.2. Bagian Utama Dari Sistem Eksitasi Tanpa Sikat

Bagian-bagian utama dari sistem eksitasi tanpa sikat antara lain :

- a. Permanen Magnet Generator (PMG)

Gambar 2.19 Permanen Magnet Generator³⁶

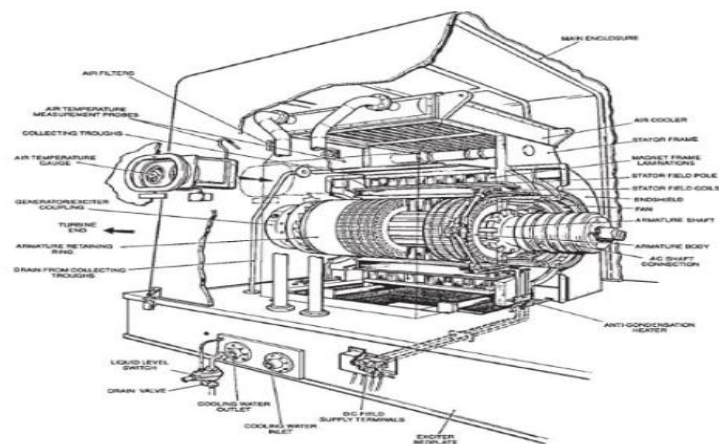
Permanent Magnet Generator (PMG) adalah generator sinkron yang sistem eksitasinya menggunakan magnet permanen pada rotornya. Pada sistem eksitasi tanpa sikat digunakan PMG sebagai penyedia daya untuk eksitasi AC exciter/main exciter dan komponen regulator. PMG terdiri dari magnet permanen berputar dan jangkar yang diam dililit untuk output 3 fasa. PMG berputar seiring dengan berputarnya rotor. PMG sebagai pembangkit tegangan/ arus AC yang disearahkan kemudian dimasukkan pada AVR (Automatic Voltage Regulator) untuk dikontrol. Karena tegangan/ arus AC pada PMG sangat kecil, arus AC yang sudah disearahkan dimasukkan pada eksiter untuk membangkitkan tegangan AC yang lebih besar. Arus AC keluaran eksiter disearahkan oleh rotating diode untuk memberikan arus eksitasi pada rotor, sehingga pada rotor terdapat medan magnet. Medan magnet tersebut menabrak kumparan – kumparan pada stator yang menghasilkan fluks listrik. Sehingga dari situ didapatkan tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator tersebut. Hal tersebut terjadi berulang – ulang setiap generator beroperasi. Sehingga tidak diperlukan sumber tegangan DC untuk eksitasi pada generator ini. Keluaran generator tersebut diambil melalui stator karena lebih mudah mengambil tegangan pada bagian yang diam dari pada mengambil tegangan pada bagian yang berputar (rotor).

³⁶ Fanny Littmarck, "Simulating Permanent Magnet Generator", www.comsol.com, <https://www.comsol.com/blogs/simulating-permanent-magnet-generators/>, (Diakses : 20 Juni 2019 pukul 10:15).

b. Automatic Voltage Regulator (AVR)

AVR merupakan bagian yang sangat penting dalam pengaturan arus eksitasi generator. Arus keluaran dari PMG disearahkan dan diatur besarnya di AVR. Unit AVR (Automatic Voltage Regulator) berfungsi untuk menjaga agar tegangan generator tetap konstan dengan kata lain generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu stabil tidak terpengaruh pada perubahan beban yang selalu berubah-ubah dikarenakan beban sangat mempengaruhi tegangan output generator. Prinsip kerja dari AVR ini adalah mengatur arus penguat (Eksitasi). Apabila tegangan output dari generator dibawah dari nominal tegangan generator maka AVR akan memperbesar arus penguatan (Eksitasi) pada eksiter. Dan juga sebaliknya apabila tegangan outpun dari generator melebihi dari nominal tegangan generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan (Eksitasi) pada eksiternya.

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. 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 Automatic Voltage Regulator

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 penyalaan (firing drawer). Untuk mengontrol sudut penyalaan (firing angle) dari thyristor. Regulator terdiri dari card-card rangkaian elektronika 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 Limited (MEL).
- Dumping (DMP).
- Comparator (CMP).
- Field Follower (FFR).
- Drive Amplifier (DRA).
- Auxilliary 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 (cangging capacity) saluran transmisi tanpa beban dengan mengontrol eksitasi sendiri.
- Menekan kenaikan tegangan pada pembuangan beban (load rejection) .
- Menaikan batas daya stabilitas peralihan.

c. Exciter

Exciter terdiri dari dua jenis, yaitu :

1. Pilot Exciter

Pilot exciter merupakan exciter mula yang digunakan untuk membangkitkan listrik AC untuk disalurkan menuju main exciter. Pilot exciter memiliki rotor berupa magnet batang dan stator yang berupa kumparan. Ketika poros turbin bergerak akibat pergerakan turbin, maka akan poros eksiter akan bergerak sehingga menyebabkan poros pilot exciter berputar. Perubahan fluks magnet yang memotong kumparan inilah yang menyebabkan timbulnya arus listrik AC.

2. Main Exciter

Main exciter merupakan exciter yang berfungsi untuk membangkitkan arus listrik AC untuk disalurkan menuju rotor generator. Rotor pada main exciter bukan merupakan magnet batang, melainkan kumparan. Konstruksi dari main exciter hampir dikatakan sama dengan konstruksi generator dimana rotornya merupakan kumparan.

d. Rotating Rectifier

Rotating rectifier terdiri dari dioda silikon, fuse dan resistor. Bagian ini merupakan bagian yang digunakan untuk menyearahkan arus yang akan menuju ke rotor generator utama sebagai arus eksitasi. Berdasarkan fungsi kerjanya, ada 2 rangkaian penyearah yang digunakan pada brushless exciter, yaitu penyearah statis dan penyearah berputar. Karena kumparan medan generator utama terletak pada rotor, maka dioda ikut berputar dengan poros generator sehingga disebut rotating rectifier.

2.8.3. Hubungan Tegangan dengan Daya Reaktif

Dalam saluran transmisi, aliran daya reaktif pada saluran tersebut sangat mempengaruhi kondisi tingkat tegangan pada ujung akhir disisi penerima. Pemantauan dan pengaturan tingkat tegangan pada ujung penerima sangat penting dilakukan karena apabila pada sisi penerima tingkat tegangannya lebih tinggi dari batasan yang diperbolehkan akan menimbulkan kerusakan pada peralatan konsumen dan akan timbul kerugian kerugian lain yang nilainya cukup besar. Untuk membahasnya, kita perlu menggunakan persamaan baku (teori), yang nantinya berguna untuk penjabaran apa pengaruh daya reaktif terhadap tingkat tegangan disisi penerima pada sebuah saluran transmisi tersebut.

Berdasarkan teori, rumus untuk menghitung besarnya daya reaktif disisi ujung penerima adalah sebagai berikut :

$$Q_r = (V_1 \cdot V_2 \cdot \frac{\cos \theta}{x_1}) - (\frac{V_2^2}{X_1}) \dots\dots\dots (2.19)^{37}$$

Keterangan :

- θ : Sudut yang dijaga nilainya
- V_1 : Tegangan sisi pengiriman
- V_2 : Tegangan sisi penerima
- X_1 : Reaktansi Saluran

³⁷ <https://direktoratlistrik.blogspot.co.id/2013/12/daya-reaktif-pada-saluran-transmisi-html>, (Diakses 15 Juli 2019 pukul 13:05 wib).

Karena sudut θ dijaga serendah mungkin, maka nilai $\cos \theta$ mendekati 1, sehingga Q_r menjadi :

$$Q_r = (V_1 \cdot V_2 \frac{1}{X_1}) - (\frac{V_2^2}{X_1}) \dots\dots\dots (2.20)^{38}$$

Dari persamaan 2.16 dan 2.17, akan dijabarkan pengaruh pengaruh daya reaktif Q_r terhadap tingkat tegangan pada sisi penerima :

Apabila Q_r merupakan besarnya kebutuhan daya reaktif yang disediakan oleh pembangkit :

1. Ketika pasokan Q_r sama dengan permintaan Q_s maka $V_1 = V_2$, sehingga tingkat tegangan pada ujung penerimaan akhir akan sama dengan tingkat tegangan pada ujung pengirim.
2. Ketika permintaan Q_r lebih besar dan pasokan Q_s kurang, maka Q_r menjadi negatif, sehingga tegangan penerima akhir menjadi lebih rendah dari pada tegangan pengirim.
3. Ketika Q_r kurang, pasokan Q_s nya tinggi, Q_r menjadi positif dengan demikian, tegangan pada sisi penerima menjadi lebih besar dari pada tegangan pengirim, kondisi ini dapat membahayakan konsumen.

2.8.4. Eksitasi Tegangan

Setelah generator ac mencapai kepesatan yang sebenarnya oleh penggerak mulanya, medannya dieksitasi dari catu dc. Ketika kutub lewat dibawah konduktor jangkar yang berada pada stator, fluksi medan yang memotong konduktor menginduksikan ggl kepadanya. Ini adalah ggl bolak balik, karena kutub dengan polaritas yang berubah-ubah terus-menerus melewati konduktor tersebut. Karena tidak menggunakan komutator, ggl bolak-balik yang dibangkitkan keluar pada terminal lilitan stator. Besarnya ggl yang dibangkitkan bergantung pada laju pemotongan garis gaya atau dalam hal generator, besarnya ggl bergantung pada kuat medan dan kepesatan rotor. Karena generator kebanyakan bekerja pada kepesatan konstan, maka besarnya

³⁸ *Ibid.*



ggl yang dibangkitkan menjadi bergantung pada eksitasi medan. Ini berarti bahwa besarnya ggl yang dibangkitkan dapat dikendalikan dengan mengatur besarnya eksitasi medan yang diberikan pada generator. Eksitasi medan dapat langsung dikendalikan dengan mengubah besarnya tegangan eksitasi yang dikenakan pada medan generator.