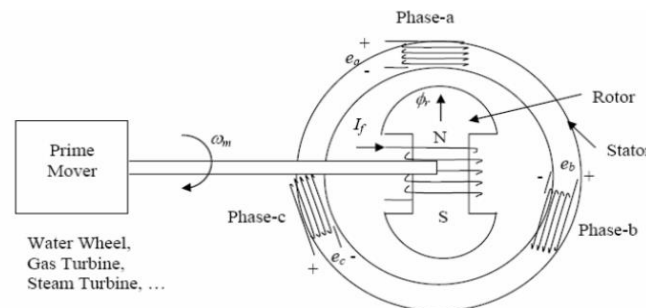


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Generator sinkron (altenator) adalah mesin listrik yang digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan perantara induksi medan magnet. Dikatakan generator sinkron karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Mesin ini tidak dapat dijalankan sendiri karena kutub-kutub rotor tidak dapat tiba-tiba mengikuti kecepatan medan putar pada waktu sakelar terhubung dengan jala-jala.



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron¹

2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Prinsip kerja dari generator sesuai dengan hukum Lens, yaitu arus listrik yang diberikan pada stator akan menimbulkan momen elektromagnetik yang bersifat melawan putaran rotor sehingga menimbulkan EMF pada kumparan rotor. Tegangan EMF ini akan menghasilkan suatu arus jangkar. Jadi diesel sebagai prime

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



mover akan memutar rotor generator, kemudian rotor diberi eksitasi agar menimbulkan medan magnet yang berpotongan dengan konduktor pada stator dan menghasilkan tegangan pada stator. Karena terdapat dua kutub yang berbeda yaitu utara dan selatan, maka pada 90° pertama akan dihasilkan tegangan maksimum positif dan pada sudut 270° kedua akan dihasilkan tegangan maksimum negatif. Ini terjadi secara terus menerus/continue. Bentuk tegangan seperti ini lebih dikenal sebagai fungsi tegangan bolak-balik.

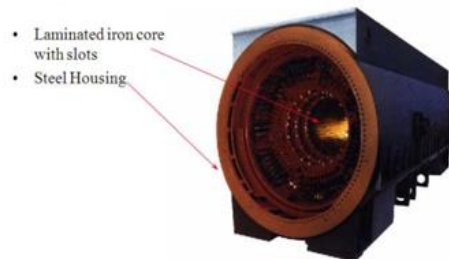
Prinsip kerja dari generator sinkron dapat dinyatakan sebagai berikut :

- Rotor disuplai dengan arus DC I_f yang kemudian menghasilkan fluks magnet ϕ_f .
- Rotor digerakkan oleh turbin dengan kecepatan konstan sebesar n_s .
- Garis gaya magnet bergerak menginduksi kumparan pada stator.
- Frekuensi dari tegangan generator tergantung dari kecepatan putaran rotor

2.3 Bagian-bagian Generator Sinkron

2.3.1 Stator

Stator atau armatur adalah bagian generator yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus AC yang menuju ke beban disalurkan melalui armatur, komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak. Armatur selalu diam (tidak bergerak). Stator dari mesin sinkron terbuat dari bahan ferromagnetik yang berbentuk laminasi untuk mengurangi rugi-rugi arus pusar. Dengan inti ferromagnetik yang bagus berarti permeabilitas dan resistivitas dari bahan tinggi.



Gambar 2.2 Konstruksi Stator²

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 stator.

Merupakan bagian stator yang berperan sebagai tempat belitan stator ditempatkan.

2.3.2 Rotor

Rotor adalah bagian generator yang bergerak atau berputar. Antara rotor dan stator dipisahkan oleh celah udara (*air gap*). Rotor berfungsi untuk membangkitkan medan magnet yang kemudian tegangan dihasilkan dan akan diinduksikan ke stator.

Rotor mempunyai bagian yang terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

² Suad Ibrahim Shahl ,*e-book Synchronous Generators*, 2015, hlm. 3.



1. Slip Ring
2. Kumparan rotor (Kumparan medan)
3. Poros rotor

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 (Salient 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.

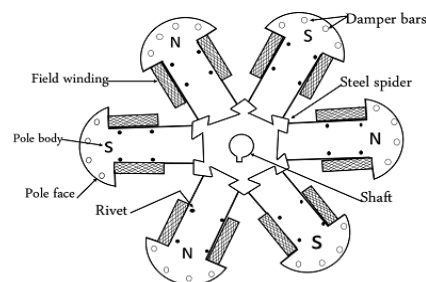
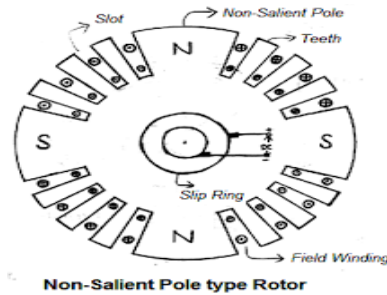


Figure: Six-pole salient-pole rotor

Gambar 2.3 Rotor Kutub Menonjol

b. Rotor Bentuk Silinder (Non Salient Pole)

Rotor silinder biasanya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putaran tinggi (1500 atau 3000 rpm). Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi dan distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.



Gambar 2.4 Rotor Kutub Silinder

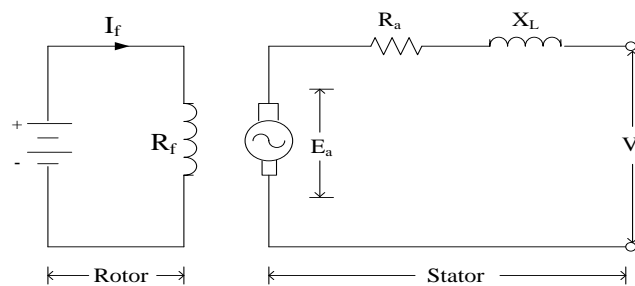
2.4 Karakteristik Generator Sinkron

2.4.1 Generator sinkron keadaan jalan tanpa beban

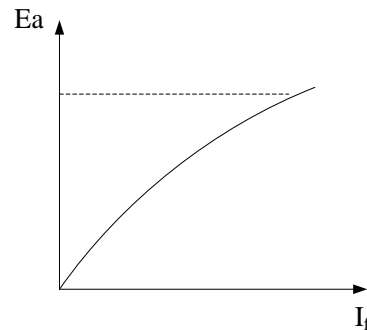
Pada generator sinkron keadaan jalan tanpa beban mengandung arti bahwa arus armatur $I_a = 0$. Dengan demikian, besarnya tegangan terminal adalah:

$$V_t = E_a = E_0 \dots\dots\dots (2.1)$$

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

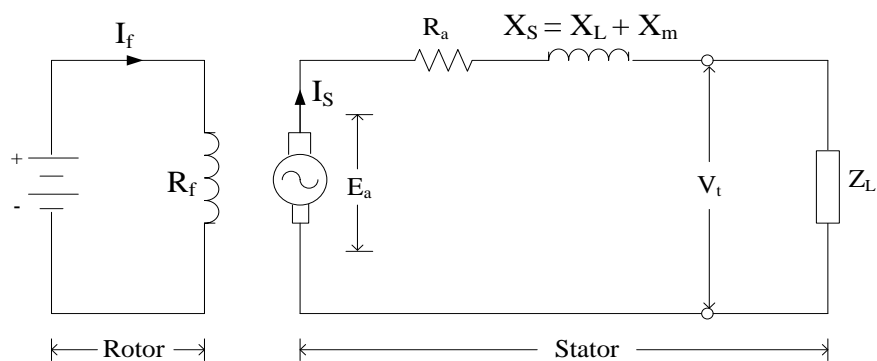


Gambar 2.5 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tanpa Beban



Gambar 2.6 Grafik Hubungan Arus Penguat Medan (I_f) dan E_a

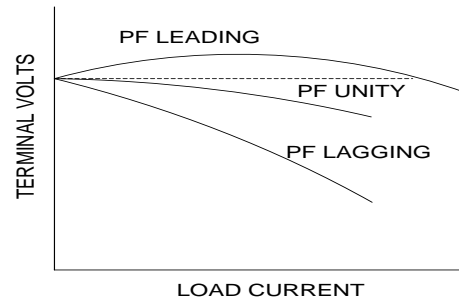
2.4.2 Generator sinkron berbeban



Gambar 2.7 Rangkaian Ekuivalen 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.



Gambar 2.8 Karakteristik Generator AC Pada Berbagai Faktor Daya

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

- $pf = 1$

$$E_a = \sqrt{(V_t + I_a R_a)^2 + (I_a X_L)^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

- $pf = \text{tertinggal}$

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta + I_a X_L)^2} \dots\dots\dots (2.3)$$

- $pf = \text{mendahului}$

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta - I_a X_L)^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

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)



2.5 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.

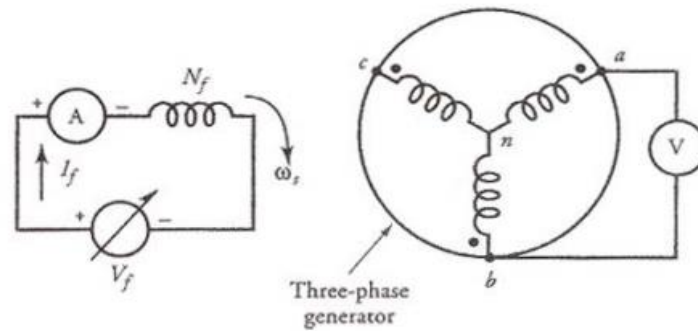
Pengaruh yang ditimbulkan oleh fluksi jangkar dapat berupa distorsi, penguatan (magnetising), maupun pelemahan (demagnetising) fluksi arus medan pada celah udara. Perbedaan pengaruh yang ditimbulkan fluksi jangkar tergantung kepada beban dan faktor daya beban, yaitu :

2.6 Tes Generator Sinkron

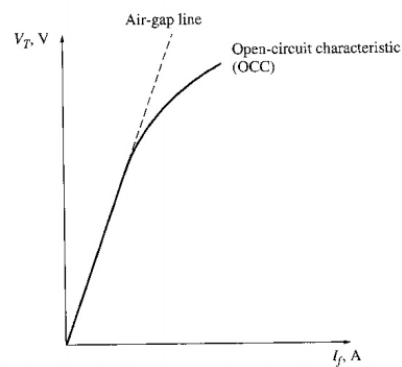
2.6.1. Tes Open Circuit

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 2.9 Diagram Rangkaian Tes *Open Circuit*³



Gambar 2.10 Karakteristik *Open Circuit* pada Generator⁴

2.6.2. Tes Short Circuit

Tes hubung singkat memberikan informasi tentang kemampuan arus dari generator sinkron. Hal ini dilakukan dengan :

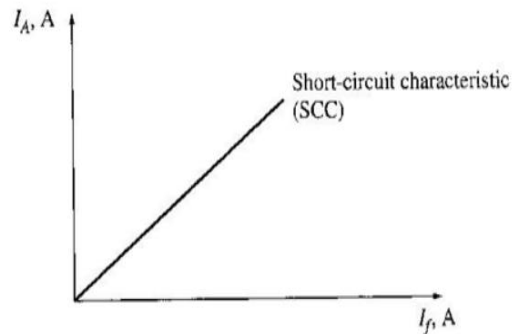
- Generator diputar pada kecepatan nominal.
- Atur arus medan ke 0.
- Hubung singkatkan terminl-terminal.

³ Suad Ibrahim Shahl, op.cit. hlm. 15.

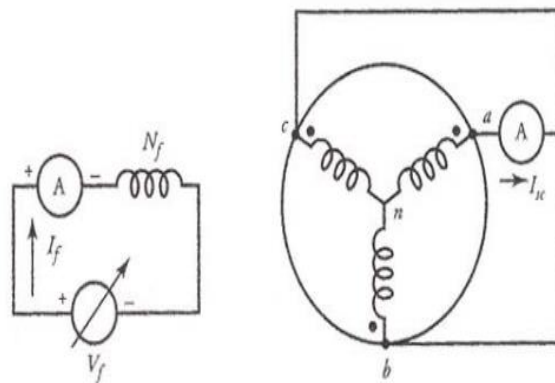
⁴ Ibid., hlm.16.



- Ukur arus jangkar atau arus line seiring arus medan dinaikkan.



Gambar 2.11 Karakteristik *Short Circuit* pada Generator⁵



Gambar 2.12 Rangkaian untuk Tes Hubung Singkat⁶

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

⁵ Ibid.

⁶ Ibid., hlm.17.



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)

$$= \frac{\text{tegangan tanpa beban} - \text{tegangan beban penuh}}{\text{tegangan beban penuh}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

$$V_t = V_L / \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.6)$$

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

$$\Delta V_t = V_{t0} - V_{t1} \dots\dots\dots (2.7)$$

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.

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).

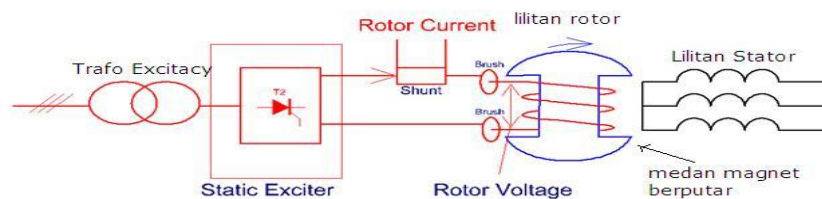
Karena mempunyai fungsi seperti di atas maka sistem eksitasi harus mempunyai sifat antara lain

- 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)

Pada 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 2.13 Sistem Eksitasi dengan Sikat (*Brush Excitation*)

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.



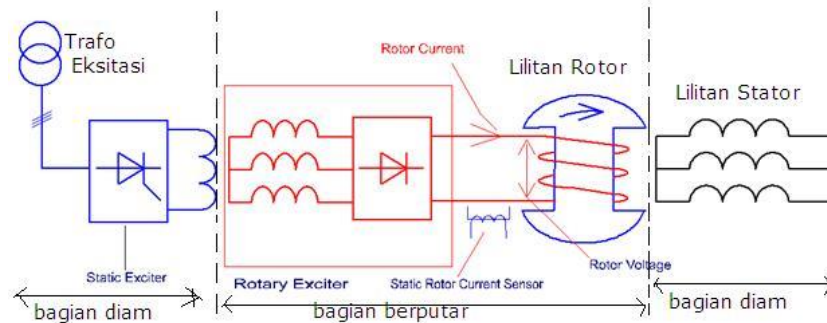
Sekarang banyak generator arus bolak-balik yang dilengkapi penyearah untuk menghasilkan arus searah yang dapat digunakan bagi penguatan generator utama sehingga penyaluran arus searah bagi penguatan generator utama.

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 2.14 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

1. Prinsip Kerja Sistem Eksitasi Tanpa Sikat

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. *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 oleh *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.



2.8.3. 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 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.