

BAB II

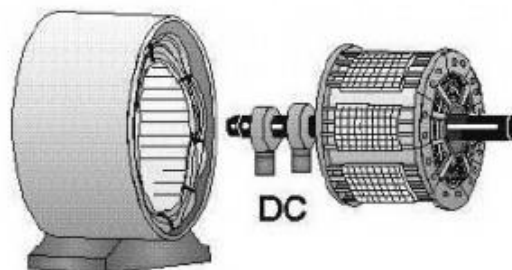
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator Sinkron

Generator sinkron (alternator) adalah mesin listrik arus bolak-balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik (*Alternating Current, AC*) yang bekerja dengan cara mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan adanya induksi magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator. Pergerakan relatif ini adalah terjadinya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator) karena pergerakan medan magnet terhadap kumparan jangkar atau sebaliknya. Alternator ini disebut generator sinkron (sinkron=serempak) karena kecepatan perputaran medan magnet yang terjadi sama dengan kecepatan perputaran rotor generator. Alternator ini menghasilkan energi listrik bolak-balik dan biasa diproduksi untuk menghasilkan listrik AC-1 fasa atau 3-fasa. (Anthony, 2019)¹

2.2 Konstruksi Generator Sinkron

Generator Sinkron mempunyai dua komponen utama yaitu stator (bagian yang diam) dan rotor (bagian yang bergerak). Bentuk gambaran sederhana konstruksi generator sinkron diperlihatkan pada Gambar 2.1, Gambar 2.2, dan Gambar 2.3.



Gambar 2.1 Bentuk sederhana konstruksi generator sinkron²

¹ Zuriman Anthony, *Mesin-Mesin Listrik Arus Bolak-Balik Edisi Revisi*, 2019, hlm. 1.

² Ibid.

2.2.1 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.



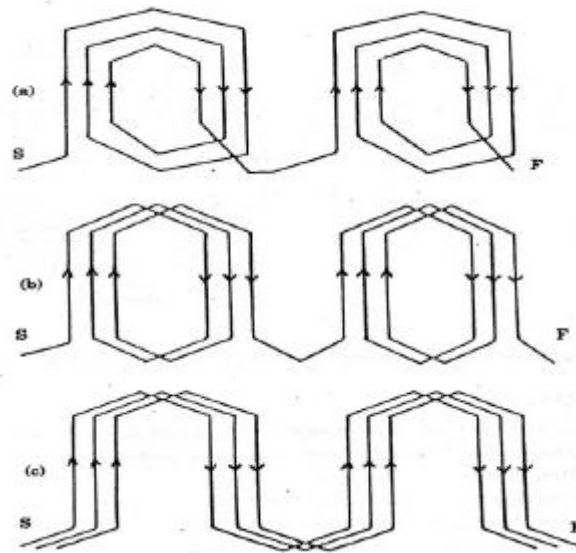
Gambar 2.2 Bentuk Konstruksi stator pada generator³

Bagian yang diam (stator) terdiri dari beberapa bagian, yaitu:

1. Inti stator, bentuk dari inti stator ini berupa cincin laminasi-laminasi yang diikat serapat mungkin untuk menghindari rugi-rugi arus eddy (*eddy current losses*). Pada inti ini terdapat slot-slot untuk menempatkan konduktor dan untuk mengatur arah medan magnetnya. Untuk menghindari arus pusar dan panas yang timbul, maka inti stator dibuat dari lempengan baja tipis dan isolasi satu terhadap yang lain.
2. Belitan stator, bagian stator yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang terdapat di dalam slot-slot dan ujung-ujung kumparan. Masing-masing slot dihubungkan untuk mendapatkan tegangan induksi.
3. Alur stator, merupakan bagian stator yang berperan sebagai tempat belitan stator ditempatkan.
4. Rumah stator, bagian dari stator yang umumnya terbuat dari besi tuang yang berbentuk silinder. Bagian belakang dari rumah stator ini biasanya memiliki sirip-sirip sebagai alat bantu dalam proses pendinginan.

³ Ibid. hlm 2

Gambaran bentuk lilitan stator dalam membentuk kutub magnet pada stator untuk menyesuaikan dengan kutub magnet rotor diperlihatkan pada gambar 2.3



Gambar 2.3 Rangkaian belitan jangkar di stator generator sinkron⁴

Kumparan jangkar yang ada di stator biasanya disebut **belitan stator** atau **kumparan stator**. Untuk generator 3-fasa biasanya kumparan dapat dirangkai dalam dua jenis sebagai berikut :

1. Belitan satu lapis (*single layer winding*), dengan 2 macam bentuk, yaitu:
 - a. Mata rantai (*cocertis or chain winding*)
 - b. Gelombang (*wave*)
2. Belitan dua lapis (*double layer winding*), dengan 2 macam bentuk pula, yaitu:
 - a. Jenis Gelombang (*wave*)
 - b. Jenis Gelung (*lap*)

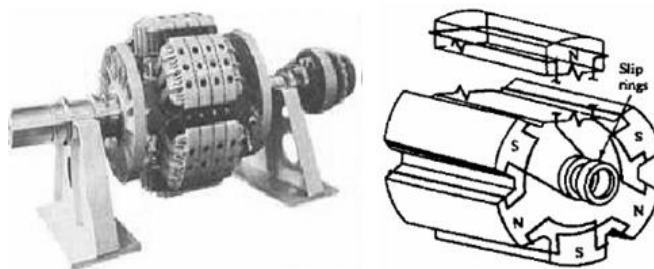
2.2.2 Rotor

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 terdiri dari dua bagian umum, yaitu Inti kutub dan

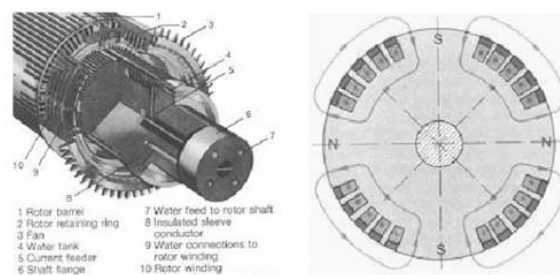
⁴ Ibid. hlm 4

Kumparan medan. Pada bagian inti kutub terdapat poros dan inti rotor yang memiliki fungsi sebagai jalan atau jalur fluks magnet yang dibangkitkan oleh kumparan medan.

Pada generator sinkron yang berkapasitas besar, arus DC diberikan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet rotor, sedangkan kumparan jangkar tempat terbangkitnya tegangan terletak di stator. Rotor ini diputar oleh *prime mover* (penggerak mula) agar terjadi perpotongan medan magnet yang berubah-ubah pada kumparan jangkar di stator. Adanya perpotongan medan magnet yang berubah-ubah maka timbul tegangan induksi pada kumparan jangkar generator. Ada dua jenis kutub magnet generator sinkron pada rotornya yang dapat dijabarkan sebagai berikut :



a. Rotor Salient (kutub menonjol) pada generator sinkron



b. Rotor Silindris (silinder) c. Penampang rotor kutub siindris

Gambar 2.4 a dan b Bentuk konstruksi rotor pada generator sinkron⁵

Pada kumparan medan ini juga terdapat dua bagian, yaitu bagian penghantar sebagai jalur untuk arus pemacuan dan bagian yang diisolasi. Kutub medan magnet rotor dapat berupa *salient pole* (kutub menonjol) dan *non salient pole* (kutub silinder).

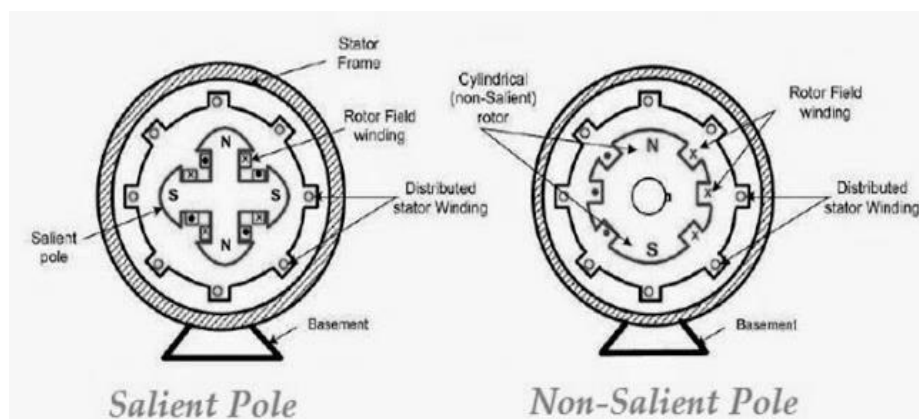
⁵ Ibid. hlm 3.

a. Rotor Bentuk Menonjol (*Salient Pole*)

Pada jenis *salient pole*, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Belitan-belitan medannya dihubungkan seri. Ketika belitan medan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan. Rotor kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi angin yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi dan konstruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi. Kutub menonjol terdiri dari inti kutub, badan kutub, dan sepatu kutub. Kumputan medan dililitkan pada badan kutub. Pada sepatu kutub juga dipasang kumputan peredam (*damper winding*). Kumputan kutub dari tembaga, badan kutub, dan sepatu kutub dari besi lunak.

b. Rotor bentuk silinder (*Non-Salient Pole*)

Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar 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. Kutub ini terdiri dari alur-alur dan gigi yang dipasang untuk menempatkan kumputan medan.

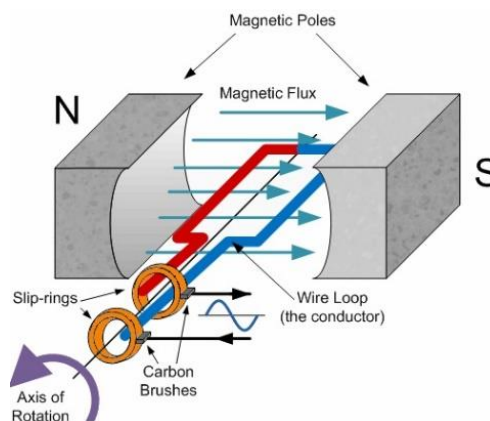


Gambar 2.5 Rotor Bentuk Menonjol dan bentuk Silinder⁶

⁶ "Difference Between Salient Pole and Cylindrical Pole (Non-Salient Pole) Rotors Used in Synchronous Generator (Alternator)" (Electrical Engineering Course, n.d.), www.electricalengineeringinfo.com, diakses 23 April 2021

2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Generator Sinkron sering juga disebut sebagai alternator. Generator ini dapat menghasilkan energi listrik karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet homogen terhadap kumparan jangkar pada generator (magnet yang bergerak dan kumparan jangkar diam atau sebaliknya magnet diam dan kumparan jangkar bergerak). Jadi, jika sebuah kumparan diputar dalam kecepatan konstan pada medan magnet homogen maka akan terinduksi tegangan sinusoidal pada kumparan tersebut. Medan magnet homogen ini bisa dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus DC atau magnet tetap. Tegangan yang dihasilkan generator ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan pergerakan relatif antara kumparan jangkar dengan medan magnet, kuat medan magnet, dan banyak lilitan pada kumparan jangkar generator. Contoh bentuk gambaran sederhana proses pembangkitan energi listrik pada generator sinkron dapat diperlihatkan seperti pada Gambar 2.6.

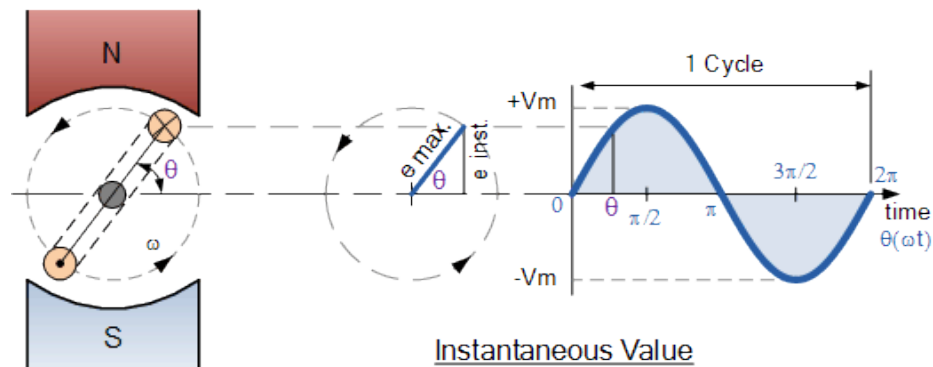


Gambar 2.6 Kumparan jangkar pada rotor berputar disekitar medan yang dihasilkan rotor⁷

Pada Gambar 2.6 diperlihatkan contoh sederhana sebuah kumparan rotor berputar di sekitar medan magnet homogen yang dihasilkan stator. Kemudian, tegangan keluaran pada rotor diambil/dilewatkan melalui sepasang *slip ring* (cincin sikat) yang bisa dihubungkan ke beban. Proses terbentuknya gelombang arus bolak-balik (*Alternating Current*) yang dihasilkan pada keluaran rotor ini lebih jelasnya diperlihatkan pada Gambar 2.7.

⁷Sinusoidal waveforms <https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/sinusoidal-waveform.html>

Berikut adalah Gambar proses terbentuknya gelombang AC pada generator sinkron



Gambar 2.7 Proses terbentuknya gelombang AC pada generator sinkron⁸

Dengan memperhatikan Gambar 2.6 dan Gambar 2.7, proses timbulnya GGL induksi pada generator dapat dijelaskan sebagai berikut :

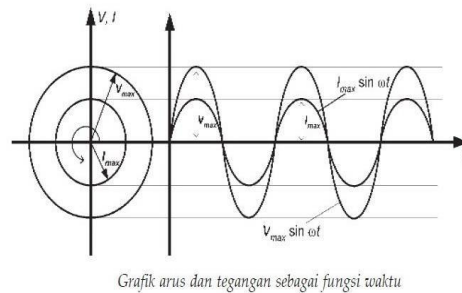
1. Kumparan tembaga BADC berputar diantara medan magnet permanen N-S.
2. Kedua ujung kumparan dihubungkan dengan *slip ring* (cincin sikat).
3. GGL induksi akan menghasilkan arus (karena adanya beban pada generator) yang mengalir melalui sikat-sikat arang ke beban yang tersambung dengan generator.

Untuk generator berkapasitas kecil, medan magnet dapat diletakan pada stator (disebut generator kutub eksternal) yang mana energi listrik dibangkitkan pada kumparan rotor. Pada generator berkapasitas besar digunakan tipe generator dengan kutub internal (*internal pole generator*), yang mana medan magnet dibangkitkan oleh kutub rotor dan tegangan AC dibangkitkan pada rangkaian stator. Tegangan yang dihasilkan akan sinusoidal jika rapat fluks magnet pada celah udara terdistribusi sinusoidal dan rotor diputar pada kecepatan konstan. Bagian dari kumparan generator yang membangkitkan tegangan disebut kumparan jangkar, sedangkan bagian dari kumparan generator yang membangkitkan medan magnet disebut kumparan medan.⁹

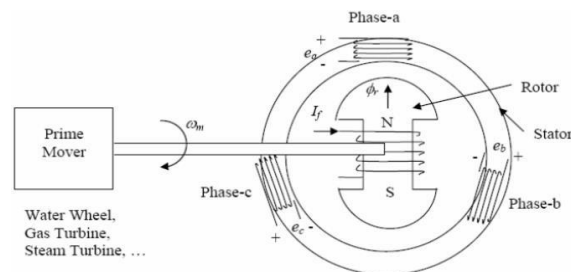
⁸ (Sinusoidal waveforms, n.d.)<https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/sinusoidal-waveform.html>

⁹ Zuriman Anthony, Mesin-Mesin Listrik Arus Bolak-Balik Edisi Revisi, 2019, hlm. 21-26

Berikut adalah Gambar Gelombang tegangan bolak-balik dan prinsip kerja generator sinkron



Gambar 2.8 Gelombang tegangan bolak-balik¹⁰



Gambar 2.9 Prinsip Kerja Generator Sinkron¹¹

Prinsip kerja dari generator sinkron dapat dinyatakan sebagai berikut (Shahl) :

- 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 yang dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$f = \frac{N_r \cdot P}{120} \dots\dots\dots 2.1$$

Dimana : f = frekuensi listrik (Hz)
 N_r = kecepatan putar rotor (rpm)
 p = Jumlah Kutub

¹⁰ (Arus dan Tegangan Listrik Bolak-Balik, n.d.), diakses 23 April 2021

¹¹ Suad Ibrahim Shahl , e-book Synchronous Generators, 2015, hlm. 7.

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

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

Dimana :

- E_a = Gaya gerak listrik armature per fasa (volt)
- f = Frekuensi output generator (Hz)
- M = Jumlah kumparan per fasa = $Z/2$
- Z = Jumlah konduktor seluruh slot per fasa
- K_d = Faktor distribusi. Hal ini diperlukan karena kumparan armatur atau alternator tidak terletak di dalam satu slot melainkan terdistribusi dalam beberapa slot per fasa
- ϕ = Flux magnet per kutub per fasa (Rinjono, 1997)

2.4 Karakteristik Generator Sinkron

2.4.1 Generator Sinkron Keadanan Jalan Tanpa Beban

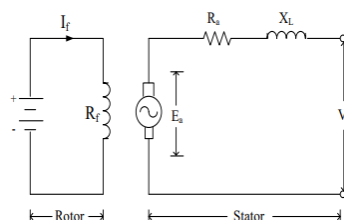
Dengan memutar generator sinkron diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka tegangan (E_o) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator. Bentuk hubungannya diperlihatkan pada persamaan berikut : (Zuhal, 1988)

$$E_o = c.n. \phi \dots\dots\dots 2.3$$

Dimana :

- c = konstanta mesin
- n = kecepatan putaran (rpm)
- ϕ = fluks yang dihasilkan oleh I_f

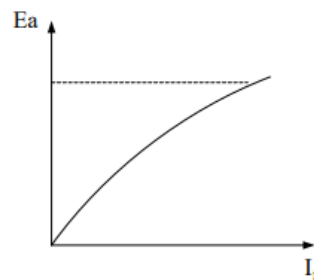
Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f).



Gambar 2.10 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tanpa Beban¹²

¹² Yon Rijono, op.cit. hlm. 212

Berikut adalah Grafik Hubungan arus penguat medan I_f dan E_a



Gambar 2.11 Grafik Hubungan Arus Penguat Medan (I_f) dan E_a ¹³

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

- $pf = 1$

$$E_o = \sqrt{(V_t + I_a R_a)^2 + (I_a X_s)^2} \dots\dots\dots 2.4$$
- $pf = \text{tertinggal}$

$$E_o = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta + I_a X_s)^2} \dots\dots\dots 2.5$$
- $pf = \text{mendahului}$

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

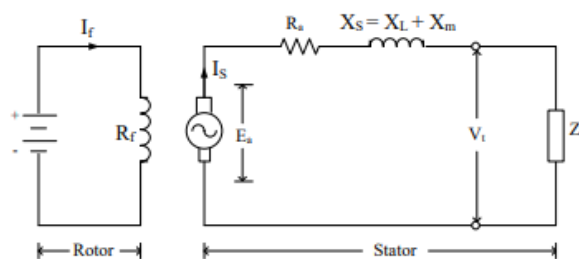
Dimana : E_o = GGL armatur tanpa beban

V_t = tegangan terminal output per fasa (Volt)

R_a = resistansi jangkar per fasa (ohm)

X_s = reaktansi sinkron per fasa (ohm)

2.4.2 Generator Sinkron Berbeban

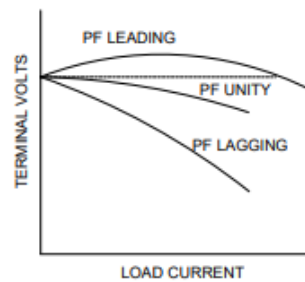


Gambar 2.12 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Berbeban

¹³ Ibid.

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 2.13 Karakteristik Generator AC pada Berbagai Faktor Daya¹⁴

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

- $pf = 1$

$$E_o = \sqrt{(V_t + I_a R_a)^2 + (I_a X_s)^2} \dots\dots\dots 2.7$$
- $pf =$ tertinggal

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

$$E_o = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \theta - I_a X_s)^2} \dots\dots\dots 2.9$$

Dimana : E_o = GGL armatur tanpa beban

V_t = tegangan terminal output per fasa (Volt)

R_a = resistansi jangkar per fasa (ohm)

X_s = reaktansi sinkron per fasa (ohm)

2.5 Tes Generator Sinkron

2.5.1 Tes *Open Circuit*

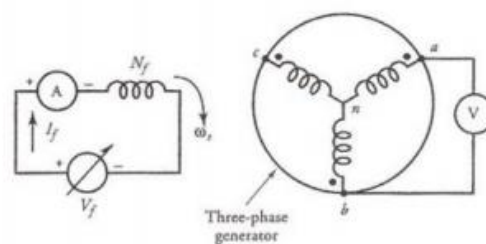
Tes rangkaian terbuka atau tes tanpa beban dilakukan berdasarkan dengan:

- Generator diputar dengan kecepatan nominal.

¹⁴ Ibid. hlm 215-218

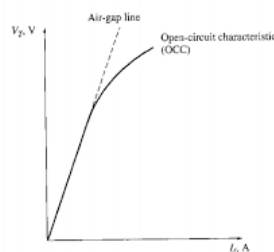
- Tidak ada beban terhubung pada terminal.
- Arus medan dinaikkan dari 0 sampai maksimum.
- Catat nilai tegangan terminal dan arus medan.

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.



Gambar 2.14 Diagram Rangkaian Test *Open Circuit*¹⁵

Open Circuit Characteristic (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*.



Gambar 2.15 Karakteristik *Open Circuit* pada Generator¹⁶

2.5.2 Tes *Short Circuit*

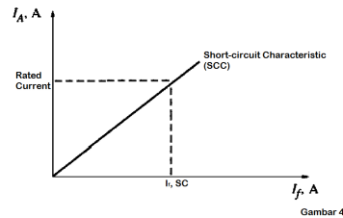
Tes hubung singkat memberikan informasi tentang kemampuan arus dari generator sinkron. Hal ini dilakukan dengan :

- Generator diputar pada kecepatan nominal.

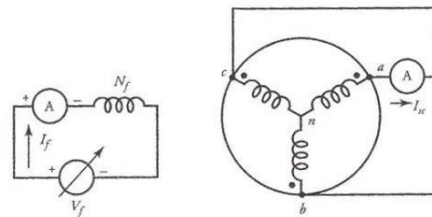
¹⁵ Suad Ibrahim Shahl, op.cit. hlm. 15.

¹⁶ Ibid. hlm. 16.

- Atur arus medan ke 0.
- Hubung singkatkan terminal-terminal.
- Ukur arus jangkar atau arus line seiring arus medan dinaikkan.



Gambar 2.16 Karakteristik *Short Circuit* pada Generator¹⁷



Gambar 2.17 Rangkaian untuk Test Hubung Singkat¹⁸

Pada saat terminal-terminal dihubung singkatkan, didapat :

$$I_A = E_A / \sqrt{R_A^2 + X_S^2} \dots\dots\dots 2.10$$

- Dimana :
- I_A = arus jangkar (Ampere)
 - E_A = GGL pada jangkar (Volt)
 - R_A = resistansi jangkar per fasa (ohm)
 - X_S = reaktansi sinkron (ohm)

Dari kedua tes diatas, maka didapat nilai impedansi (E_A dari OCC dan I_A dari SCC) :

$$Z_S = \sqrt{R_A^2 + X_S^2} = E_A / I_A \dots\dots\dots 2.11$$

- Dimana :
- Z_S = impedansi sinkron (ohm)
 - R_A = resistansi jangkar per fasa (ohm)
 - X_S = reaktansi sinkron (ohm)
 - I_A = arus jangkar (Ampere)
 - E_A = GGL pada jangkar (Volt)

¹⁷ Ibid.

¹⁸ Ibid. hlm. 17.

Besarnya nilai E_a yang diambil dari persamaan (2.11) diperoleh dari hasil kurva karakteristik beban nol alternator yang telah diperoleh sebelumnya. Bila reaktansi sinkron $X_s \gg R_a$ (generator yang berkapasitas sangat besar) maka persamaan (2.11) dapat disederhanakan menjadi :

$$X_s = E_a/I_A = V_{oc}/I_{a_{hs}} \dots\dots\dots 2.12$$

Dimana : V_{oc} = Tegangan Terminal alternator saat pengujian beban nol

$I_{a_{hs}}$ = arus hubung singkat

2.6 Pengaturan Tegangan Generator

Jika 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. (Lister, 1998) Persen pengaturan (pada faktor daya tertentu). (Rinjono, 1997)

$$= \frac{\text{tegangan tanpa beban} - \text{tegangan beban penuh}}{\text{tegangan beban penuh}} \times 100 \dots\dots\dots 2.13$$

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 (pengaruh magnetisasi dari arus jangkar).¹⁹

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*). 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.

¹⁹ Lister, Mesin dan Rangkaian Listrik, Erlangga, Jakarta, 1998, hlm. 202.

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.

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 ;

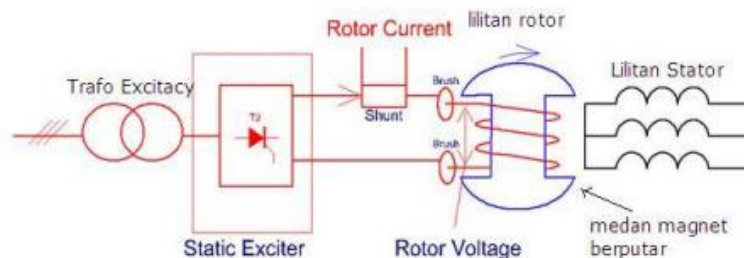
- a. Mudah dikendalikan.
- b. Dapat mengendalikan dengan stabil/ sifat pengendalian stabil.
- c. Mempunyai respon/tanggapan yang cepat.
- d. Tegangan yang dikeluarkan harus sama dengan tegangan yang diinginkan.

Sistem yang banyak digunakan saat ini baik dengan generator sinkron tipe kutub sepatu (*salient pole*) maupun tipe rotor silinder (*non-salient pole*) adalah sistem tanpa sikat. Pengeksitasi ac mempunyai jangkar yang berputar, keluarannya kemudian disearahkan oleh penyearah dioda silikon yang juga dipasang pada poros utama. Keluaran yang telah disearahkan dari pengeksitasi ac, diberikan langsung dengan hubungan yang diisolasi sepanjang poros ke medan generator sinkron yang berputar. Keluaran dari pengeksitasi ac, dan berarti tegangan yang dibangkitkan oleh generator sinkron, dapat dikendalikan dengan mengubah kekuatan medan pengeksitasi ac. Jadi sistem eksitasi tanpa sikat tidak mempunyai komutator, cincin-slip atau sikat-sikat yang sangat menyederhanakan pemeliharaan mesin. Setelah generator ac mencapai kepesatan yang sebenarnya oleh penggerak mula, medannya dieksitasi dari catu dc. Ketika kutub lewat di bawah 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 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 dikenakan pada medan generator. (Fauzy, n.d.)

2.7.1 Sistem Eksitasi Dengan 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*.

Berikut adalah Gambar prinsip kerja sistem eksitasi dengan sikat,



Gambar 2.18 Sistem Eksitasi dengan Sikat (*Brush Excitation*)²⁰

2.7.1.1 Prinsip Kerja Sistem Eksitasi Dengan Sikat (*Brush Excitation*)

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.

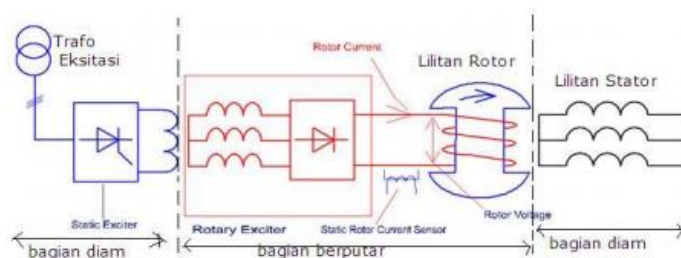
²⁰ "Eksitasi Generator", diakses 23 April 2021

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.

2.7.2 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:

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

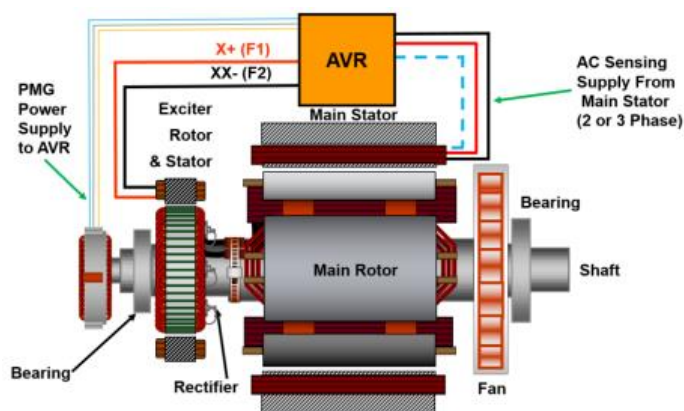


Gambar 2.19 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)²¹

²¹ "Eksitasi Generator", <https://scintricalengineering.wordpress.com/kuliah/mesin-elektir/mesin-ac/eksitasi-generator/>, diakses 23 April 2021

2.7.2.1 Prinsip Kerja Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

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.



Gambar 2.20 Diagram *PMG excited alternator*²²

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.

²² Charlie. Support.wellandpower.net diakses pada tanggal 3 Juli 2021

2.7.2.2 Bagian Utama Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

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

1) *Permanent Magnet Generator (PMG)*

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).



Gambar 2.21 *Permanent Magnet Generator*²³

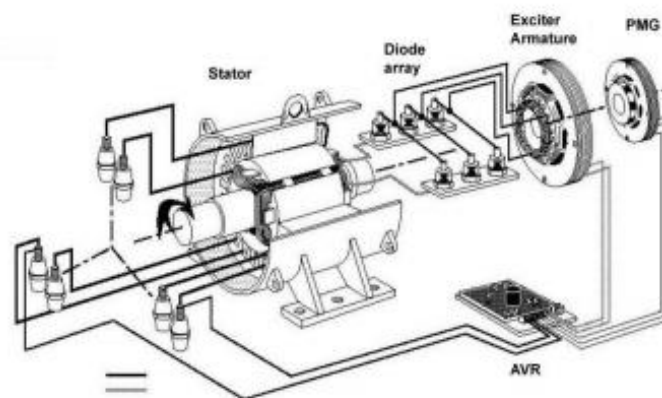
²³ Yaskawa, "Permanent Magnet Generators", <http://www.theswitch.co/windpower?permanent-magnet-generators/>, diakses pada 23 April 2021

2) *AC Exciter*

AC exciter adalah jenis yang sama dengan generator sinkron konvensional. Rotor *AC exciter* ditempatkan pada poros yang sama dengan *rotating rectifier*. *AC exciter* sendiri mendapatkan eksitasi pada statornya dari PMG setelah disearahkan dalam AVR. Penggunaan *AC exciter* ini bertujuan untuk memperbesar arus eksitasi agar bisa digunakan untuk mengeksitasi generator utama, setelah disearahkan dulu oleh *rotating rectifier*. Penguatan medan atau disebut eksitasi adalah pemberian arus listrik untuk membuat kutub magnet pada generator. Dengan mengatur besar kecil arus listrik kita dapat mengatur besar tegangan output generator.

3) *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 fungsinya, 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*.



Gambar 2.22 Rotor, Kumparan *AC Exciter*, *Rotating Diode* dan PMG yang terletak satu poros²⁴

²⁴R. Ananta Wikrama, "Cara Kerja Generator Listrik Brushless dengan Menggunakan PMG (Permanent Magnet Generator)", www.academia.edu, diakses pada 23 April 2021

4) Automatic Voltage Regulator

Prinsip kerja AVR adalah mengatur arus penguatan (eksitasi) pada eksiter. Apabila tegangan output generator dibawah tegangan nominal tegangan generator, maka AVR akan memperbesar arus penguatan pada eksiter. 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 adalah mengatur arus penguatan pada eksiter. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator maka AVR akan memperbesar arus penguatan melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan (*excitation*) pada eksiter. Dan (*excitation*) pada eksiter. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan (*excitation*) pada eksiter.