

BAB II

TINJAUAN PUSATAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian tentang pengaruh arus eksitasi terhadap keluaran daya reaktif generator sinkron sudah banyak dilakukan. Terdapat beberapa judul penelitian yang berhubungan dengan pengaruh arus eksitasi terhadap keluaran daya reaktif generator sinkron. Penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan perbandingan dan referensi dalam menulis.

Marda, Bindar (2016)¹ membuat "*Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Keluaran Daya Reaktif Generator Sinkron 13,8 kV 67 MVA*". Dari penelitian didapat bahwa sifat arus eksitasi polinomial terhadap keluaran daya reaktif generator. Analisis yang dilakukan meliputi perubahan beban, perubahan tegangan, perubahan eksitasi serta penyebab daya reaktif dan tegangan generator memiliki nilai tertinggi dan terendah. Dengan hasil nilai V_t tidak melebihi +2,2% dan tidak kurang dari 0,29%, dengan demikian membuktikan bahwa sistem terjaga kestabilannya.

Ridzki, Imron (2013)² membuat jurnal "*Analisis Pengaruh Perubahan Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator*". Didapat kesimpulan bahwa fluktuasi tegangan berkisar $\pm 0,66\%$ dari tegangan nominal. Tegangan cenderung konstan agar sinkronisasi terjaga dengan sistem. Dan arus medan generator mengontrol daya reaktif yang disuplai generator ke sistem daya.

Riduan, (2017)³ membuat "*Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator Sinkron di PLTD Merawang Kabupaten Bangka Induk Sungaliat*". Bahwa daya reaktif selalu mengikuti perubahan beban, apabila beban naik maka daya reaktif pada generator naik. Sedangkan untuk arus eksitasi pada generator sinkron, tegangan pada terminal harus selalu tetap. Apabila arus eksitasi tidak diatur maka daya reaktif dan faktor daya pada generator mempengaruhi tegangan terminal sehingga tegangan pada terminal

tidak tetap. Metode yang digunakan adalah pengambilan data, dengan data sebanyak 1x24 jam dengan 3 generator sinkron yang bekerja paralel.

Basofi, (2014) membuat penelitian “*Studi Arus Eksitasi pada Generator Sinkron yang Bekerja Paralel Terhadap Perubahan Faktor Daya*”. Didapatkan kesimpulan bahwa arus eksitasi pada generator diubah, maka tidak ada perubahan yang terjadi pada faktor daya generator akan tetapi tegangan akan berubah. Dilain pihak, pada generator yang bekerja secara paralel saat diaturnya arus eksitasi akan membuat perubahan pada faktor daya dan tegangan akan sama. Dalam penelitian ini dilakukan pengaturan arus eksitasi pada masing-masing generator sehingga didapat bahwa beban R-L bila arus eksitasi pada generator pertama dikurangi dan yang lain diperbesar maka memiliki daya reaktif -0,002 A dengan faktor daya 0,998 *leading*, sedangkan generator kedua memiliki daya reaktif 0,173 A dengan faktor daya 0,64 *lagging*.

Rudi, Syahputra, (2012) menyimpulkan hasil penelitian yang berjudul “*Pengaruh Perubahan Arus Eksitasi Terhadap Tegangan Keluaran Generator Sinkron*” bahwa tegangan keluaran alternator akan selaras dengan jumlah arus eksitasi yang diberikan. Adanya tambahan beban dapat menurunkan tegangan output generator, dimana memiliki hubungan yang berbanding terbalik dengan penambahan arus beban dan tegangan output alternator.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Generator Sinkron

Generator sinkron atau biasa disebut *alternator* adalah mesin sinkron yang digunakan untuk mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik yang keluarannya berupa tegangan bolak-balik. Berubahnya energi tersebut timbul akibat terdapatnya gerakan relatif medan magnet bersama kumparan generator. Pergerakan relatif yakni timbulnya transformasi medan magnet yang ada dikumparan jangkar (area timbulnya tegangan pada alternator) akibat gerakan medan magnet kepada kumparan

jangkar. Kecepatan putaran medan magnet yang timbul sama dengan kecepatan putaran rotor alternator, akibatnya disebut dengan mesin serempak. Mesin ini dapat membuat energi listrik bolak-balik (AC, *Alternating Current*) dan dapat memproduksi listrik AC satu fasa ataupun tiga fasa.

Generator sinkron dikatakan sinkron apabila memenuhi syarat sebagai berikut:

a. Frekuensi harus sama

Frekuensi diatur dengan cara menaikkan kecepatan putar dari generator untuk menghasilkan frekuensi yang telah ditentukan. Misalnya frekuensi di Indonesia 50 Hz, maka frekuensi harus mengikuti standar yang telah ditentukan.

b. Tegangan harus sama

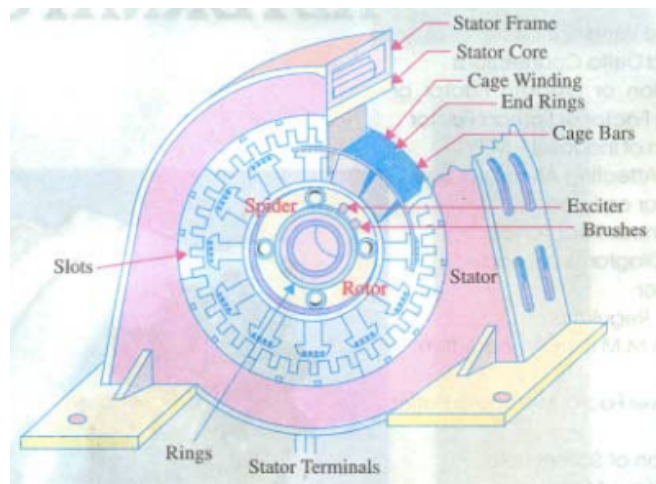
Tegangan pada alternator harus sama karena apabila terjadinya beda tegangan, maka yang terjadi adalah terjadinya loncatan bunga api yang dapat menimbulkan kerusakan pada trafo.

c. Sudut dan urutan fasa harus sama

Maksudnya adalah saat disinkronisasi, urutan sudut fase dari alternator harus sama dengan jaringan jala-jala. Dimana R, S, T pada jaringan jala, harus sama dengan U, V, W dari generator. Terjadinya beda sudut fase pada jaringan jala dan alternator, dapat menyebabkan terjadinya gangguan.

2.2.2 Konstruksi Generator Sinkron

Generator sinkron memiliki dua komponen primer yaitu stator (komponen yang statis) dan rotor (komponen yang bergerak). Konstruksi generator sinkron dapat dilihat pada beberapa gambar di bawah ini.



Gambar 2. 1 Konstruksi Generator Sinkron

(B.L. Theraja; A.K Theraja, 1959)

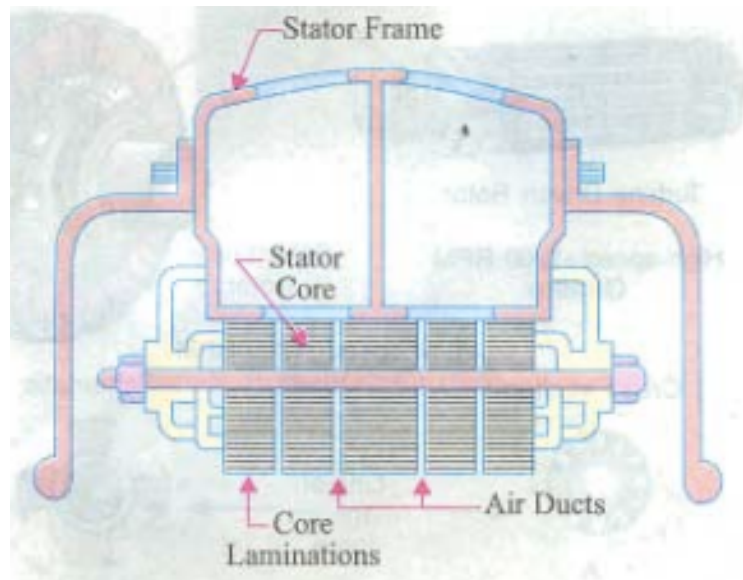
2.2.2.1 Stator

Stator atau biasa disebut *Armature* merupakan komponen yang memiliki fungsi menjadi tempat untuk memperoleh induksi magnet dari rotor. Arus bolak-balik yang mengarah ke beban diarahkan melewati stator. Bagian ini memiliki bentuk seperti sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak.

Stator mempunyai beberapa bagian primer, yaitu:

a. Rangka sator

Bagian ini ialah kerangka yang menopang inti jangkar generator.

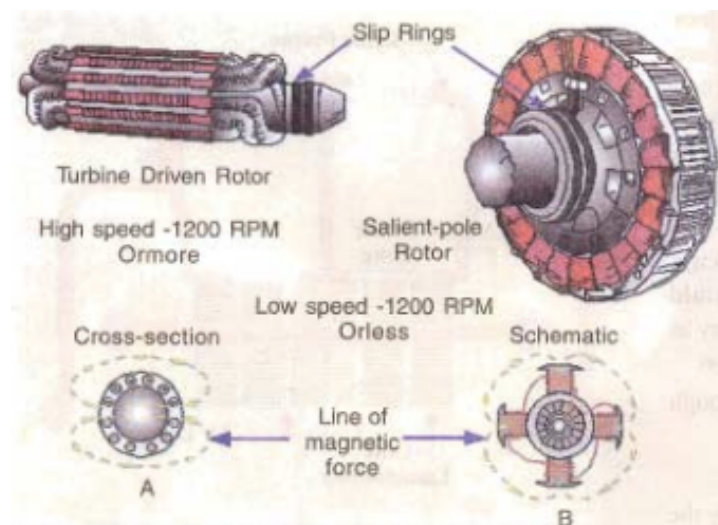


Gambar 2. 2 Rangka Stator

(B.L. Theraja; A.K Theraja, 1959)

b. Inti Stator

Komponen ini terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetik khusus yang dipasang ke rangka stator.

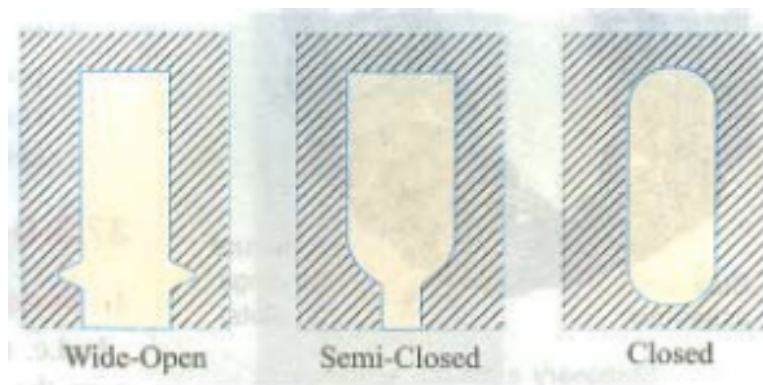


Gambar 2. 3 Inti Stator

(B.L. Theraja; A.K Theraja, 1959)

c. Alur (slot) dan Gigi

Komponen ini ialah tempat diletakkannya kumparan stator. Ada beberapa bentuk komponen ini, yaitu terbuka, setengah terbuka, dan tertutup.



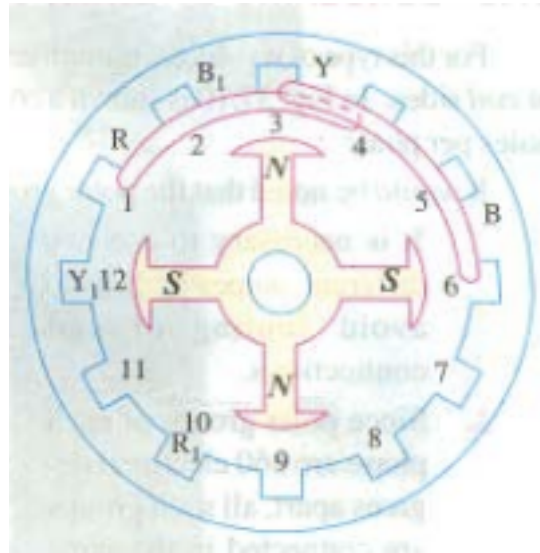
Gambar 2. 4 Bentuk-bentuk Alur Stator

(B.L. Theraja; A.K Theraja, 1959)

d. Kumbaran Stator (Kumbaran Jangkar)

Komponen ini dibentuk dari tembaga, dan juga komponen ini ialah tempat terjadinya Gaya Gerak Listrik Induksi. Kumbaran jangkar yang terdapat di stator disebut belitan stator atau kumbaran stator. Kumbaran jangkar yang dipakai oleh mesin serempak tiga fasa memiliki dua macam, yakni:

- 1). Kumbaran Satu Lapis (*Single Layer Winding*)



Gambar 2. 5 Belitan Satu Lapis

(B.L. Theraja; A.K Theraja, 1959)

Belitan satu lapis memiliki dua macam bentuk, yaitu:

- a. Mata Rantai (*Concertis or Chain Winding*)
 - b. Gelombang (*Wave*)
- 2). Belitan Dua Lapis (*Double Layer Winding*)



Gambar 2. 6 Belitan Dua Kutub

(B.L. Theraja; A.K Theraja, 1959)

2.2.2.2 Rotor

Rotor memiliki 3 bagian primer, yakni:

a. Slip Ring

Bagian ini adalah cincin logam yang melingkari poros rotor namun terpisah oleh isolasi tertentu. Terminal kumparan rotor terpasang di slip ring ini, lalu dihubungkan menuju sumber arus DC dengan sikat (*brush*) yang terletak di slip ring.

b. Kumparan Rotor (Kumparan Medan)

Bagian ini adalah bagian yang memegang peran utama untuk mendapatkan suatu medan magnet. Bagian ini mendapatkan arus DC dari sumber eksitasi.

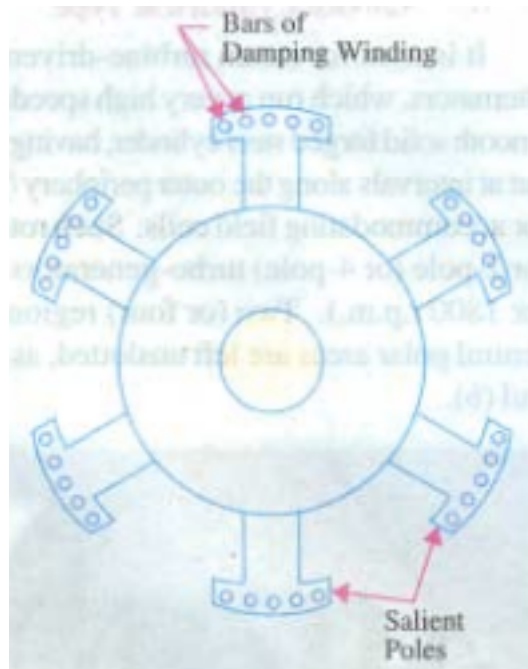
c. Poros Rotor

Bagian ini ialah tempat diletakkannya kumparan rotor, dimana pada poros rotor tersebut telah terbentuk slot-slot secara paralel terhadap poros rotor.

Ada 2 jenis kutub medan magnet yang digunakan pada rotor generator sinkron, yaitu:

a. Kutub Menonjol (*Salient Pole*)

Kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Beitan-belitan medan terhubung secara seri. Saat belitan medan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan.



Gambar 2. 7 Rotor Kutub Menonjol (Salient Pole)

(B.L. Theraja; A.K Theraja, 1959)

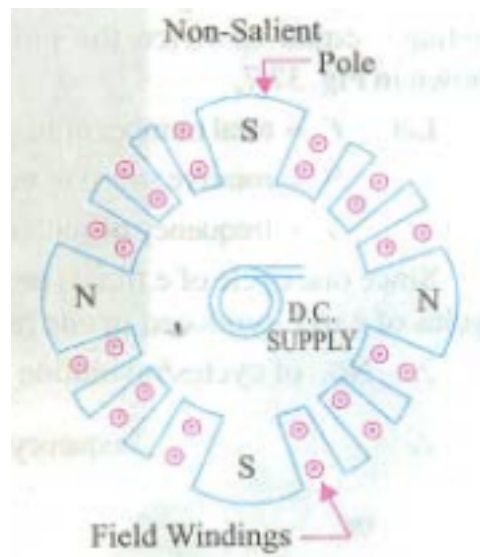
Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (120-400 rpm). Generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik tenaga air. Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putaran rendah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

- Rotor akan mengalami rugi-rugi angin yang besar dan mengeluarkan suara berisik jika diputar dengan kecepatan tinggi.
- Konstruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.

b. Kutub Silindris (*non Salient*)

Pada jenis rotor ini, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa

alus 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 dienergikan oleh eksiter.



Gambar 2. 8 Rotor Kutub Silindris (Salient Pole)

(B.L. Theraja; A.K Theraja, 1959)

Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar tinggi (1500 rpm ataupun 3000 rpm) seperti yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga uap. Rotor jenis ini digunakan dengan alasan:

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

Terdapat beberapa cara pemasukan arus searah (sebagai arus medan) ke rangkaian medan rotor untuk membentuk medan magnet pada kumparan rotor, yakni:

- Menyuplai daya searah ke rangkaian rotor dari sumber searah eksternal (biasanya berupa baterai dari luar) dengan saran *slip ring* dan sikat. Bila generator ini hanya menerima sumber DC dari luar untuk *start* awal saja, maka sumber DC sebagai penguat kumparan medan selanjutnya diambil dari keluaran generator itu sendiri (setelah sumber dari baterai dilepas) dengan cara mengubah keluaran AC generator ini menjadi DC (di searahkan sebelum dimasukkan ke kumparan medan pada rotor)
- Memasok daya searah dari sumber searah khusus yang ditempelkan langsung pada batang rotor alternator. Sumber searah ini biasanya dari generator searah yang ditempel pada rotor alternator.

2.2.3 Prinsip Kerja Generator

Asas yang digunakan oleh generator yaitu menerapkan prinsip pembangkitan listrik secara induksi. Berdasarkan hukum Faraday, saat sebuah medan magnet berputar secara terus menerus memotong kumparan (coil), maka akan membangkitkan beda potensial (voltage) pada kumparan tersebut atau biasa disebut Gaya Gerak Listrik. Besar tegangan yang diinduksikan pada kumparan medan sangat bergantung pada panjang penghantar penghantar dalam kumparan medan, kecepatan putaran dan juga kuat medan magnet.

Mesin listrik dapat bekerja apabila memiliki kumparan medan yang memiliki fungsi sebagai penghasil medan magnet dan juga kumparan jangkar yang memiliki fungsi sebagai tempat penghasilnya tegangan induksi, lalu celah udara udara yang berfungsi untuk memungkinkan berputarnya jangkar dalam medan magnet.

Umumnya, prinsip kerja dari generator sinkron adalah saat kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang memberikan arus searah (DC) terhadap kumparan medan, maka saat terdapat arus searah pada kumparan medan akan mengakibatkan fluks. Penggerak mula yang sudah terkopel dengan rotor generator akan beroperasi, yang membuat rotor akan berputar dengan kecepatan tertentu yang telah diatur. Putaran rotor tersebutlah yang memutar medan magnet, lalu akan timbul fluks magnetik pada kumparan stator.

2.2.4 Frekuensi pada Generator Sinkron

Kecepatan putaran generator sinkron mempengaruhi frekuensi listrik yang dihasilkan. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada rotor dengan frekuensi elektrik pada stator adalah:

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

yakni :

f = Frekuensi listrik (Hz)

N_r = Kecepatan putar rotor (rpm)

P = Jumlah kutub magnet pada rotor

Persamaan diatas dapat diamati bahwasanya kecepatan putaran rotor dan jumlah kutub magnet pada generator dapat mempengaruhi nilai frekuensi yang dihasilkan. Apabila terjadi perubahan beban generator, dapat mempengaruhi kecepatan rotor generator.

Kecepatan rotor pada alternator selalu tidak berbeda dengan kecepatan medan magnet generator. Dikarenakan rotor berputar pada kecepatan tidak berbeda dengan medan magnetnya, maka generator ini sering disebut alternator.

2.2.5 GGL Induksi pada Alternator

a. Tanpa Beban

GGL induksi (E_a) pada alternator akan terinduksi pada kumparan jangkar alternator bila rotor diputar di sekitar stator. Besarnya kuat medan pada rotor dapat diatur dengan cara mengatur arus medan (I_f) yang diberikan pada rotor. Besarnya GGL induksi internal (E_a) yang dihasilkan kumparan jangkar alternator ini dapat dibuatkan dalam bentuk rumus sebagai berikut.

$$E_a = -N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots 2.2$$

$$\begin{aligned} E &= -N \frac{d\phi_{maks} \sin \omega t}{dt} \\ &= -N \omega \phi_{maks} \cos \omega T \quad (\omega = 2\pi f) \\ &= -N(2\pi f) \phi_{maks} \cos \omega T \quad (f = \frac{n \cdot p}{120}) \\ &= -N(2\pi \frac{n \cdot p}{120}) \phi_{maks} \cos \omega T \\ &= -N(2 \cdot 3,14 \frac{n \cdot p}{120}) \phi_{maks} \cos \omega T \dots\dots\dots 2.3 \end{aligned}$$

$$E_{maks} = N(2\pi \frac{n \cdot p}{120}) \phi_{maks} \dots\dots\dots 2.4$$

$$\begin{aligned} E_{eff} &= \frac{e_{maks}}{\sqrt{2}} = \frac{N(2 \cdot 3,14 \frac{n \cdot p}{120}) \phi_{maks}}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{4,44 N p n \phi}{120} \quad (\frac{4,44 N p}{120} = C) \\ &= C n \phi \dots\dots\dots 2.5 \end{aligned}$$

Dimana :

E = GGL induksi (Volt)

N = Jumlah lilitan

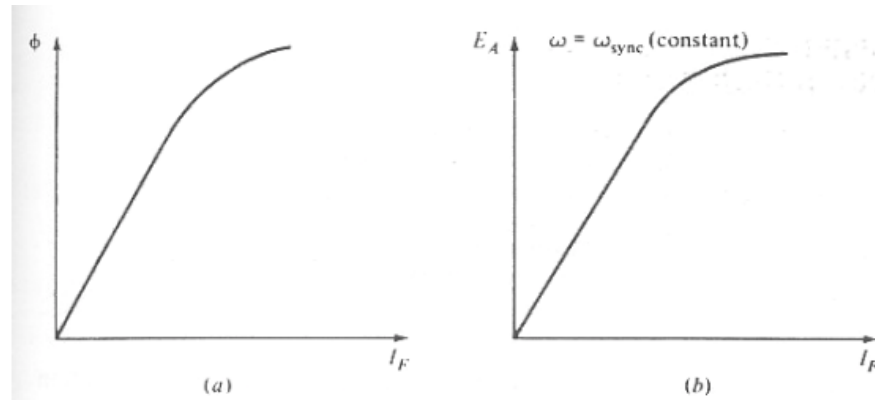
C = Konstanta

n = Putaran sinkron (rpm)

ϕ = Fluks magnetik (weber)

Tegangan Internal yang dihasilkan E_a akan berbanding lurus dengan fluks dan terhadap kecepatan, akan tetapi fluks itu sendiri tergantung pada arus yang mengalir dalam rangkaian medan rotor. Semakin besar arus searah yang

diberikan kedalam rangkaian medan rotor, maka semakin besar pula fluks yang dihasilkan. Hubungan tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 2. 9 Karakteristik hubungan pengaruh arus medan terhadap fluks dan GGL pada generator sinkron

(Chapman, 2005)

b. Berbeban

Saat keadaan berbeban, reaksi jangkar akan terjadi karena arus jangkar. Reaksi jangkar yang terjadi mempunyai sifat reaktif, dan dikatakan menjadi reaktansi, serta dikatakan reaktansi magnetansi yang disebabkan oleh pengaruh reaktansi jangkar (X_a). Di generator sinkron kutub silindris, besar medan yang terjadi akan sama di sekitar permukaan kutub hingga mempengaruhi kepada kumparan jangkar. Akibat kuat medan yang sama, akibatnya reaktansi jangkar (X_a) dapat dijumlah dengan reaktansi fluks bocor (X_L) pada belitan jangkar dimana disebut reaktansi sinkron (X_s). Hubungan besar tegangan eksitasi yang dihasilkan oleh generator sinkron (E_a) kepada reaktansi sinkron ini dan tegangan terminal generator sinkron dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:

$$E_a = I_a \cdot (R_a + jX_s) + V_0 \dots\dots\dots 2.6$$

$$X_s = X_L + X_a \dots\dots\dots 2.7$$

Keterangan:

E_a = Tegangan induksi (Volt)

V_\emptyset = Tegangan terminal output generator sinkron (V)

R_a = Resistansi jangkar (Ω)

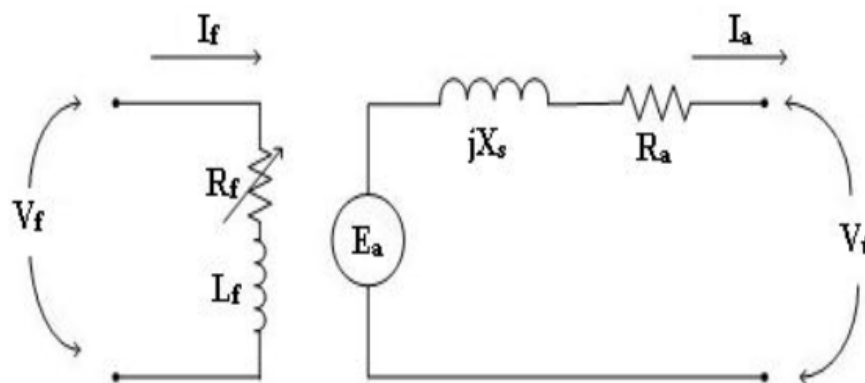
X_s = reaktansi sinkron (Ω)

I_a = arus yang melewati jangkar generator (Ampere)

2.2.6 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

Tegangan induksi (E_a) muncul di kumparan jangkar generator sinkron. Tegangan induksi tidak sama dengan tegangan yang muncul pada terminal generator sinkron. Tegangan ini sama dengan tegangan output terminal generator sinkron hanya saat tidak adanya arus jangkar yang mengalir pada generator sinkron yang tidak berbeban. Faktor-faktor yang membuat adanya ketidaksamaan antara tegangan induksi dengan tegangan terminal ini adalah:

1. Reaksi jangkar di mana distorsi medan magnet pada celah udara akibat mengalirnya arus pada stator.
2. Induktansi sendiri kumparan jangkar.
3. Resistansi kumparan jangkar.
4. Efek permukaan rotor kutub sepatu.



Gambar 2. 10 Rangkaian ekuivalen generator

(Chapman, 2005)

Dari gambar 6.1 dapat ditulis persamaan

$$E_a = V\emptyset + jX_a \cdot I_a + jX_L \cdot I_a + R_a \cdot I_a \dots\dots\dots 2.8$$

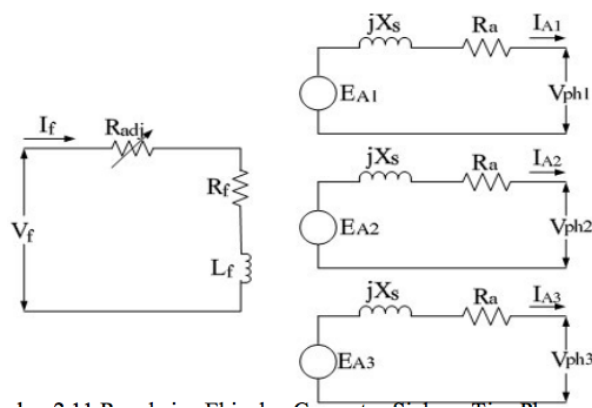
Persamaan terminal generator sinkron:

$$V\emptyset = E_a - jX_a \cdot I_a - jX_L \cdot I_a - R_a \cdot I_a \dots\dots\dots 2.9$$

Dengan menyatakan reaktansi reaksi jangkar dan reaktansi fluks bocor sebagai reaktansi sinkron atau $X_s = X_a + X_L$, maka menjadi

$$V\emptyset = E_a - jX_s \cdot I_a - R_a \cdot I_a \dots\dots\dots 2.10$$

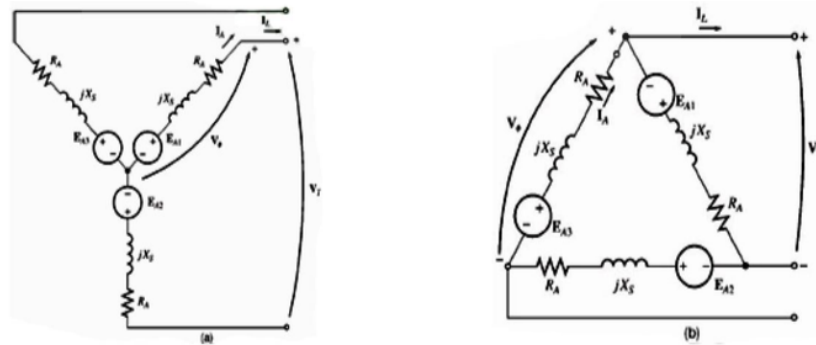
Dari persamaan di atas, rangkaian ekuivalen alternator 3 fasa dapat dilukiskan layaknya gambar dibawah ini. (Chapman, 2005)



Gambar 2. 11 Rangkaian Ekuivalen Alternator 3 Fasa

(Chapman, 2005)

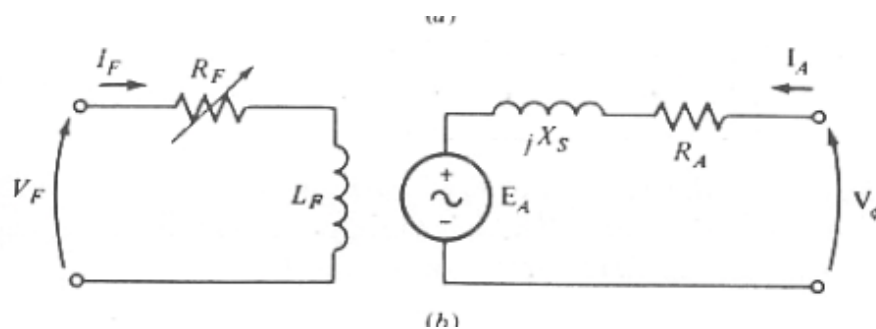
Selain itu, rangkaian ekuivalen alternator tiga fasa untuk tiap jenis hubungan ditunjukan oleh gambar berikut.



Gambar 2. 12 Rangkaian Ekuivalen Belitan Stator 3 Fasa Generator Sinkron
(a) Hubungan – Y (b) Hubungan Δ

(Chapman, 2005)

Karena generator sinkron 3 fasa identik dalam semua hal, kecuali sudut fasanya. Dalam keadaan seimbang, maka akan lebih mudah menganalisa rangkaian ekuivalen generator sinkron dengan menggunakan rangkaian ekuivalen tiap fasa yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. 13 Rangkaian Ekuivalen per-fasa Generator Sinkron

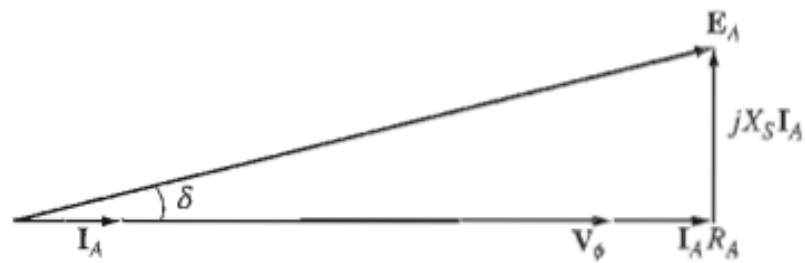
(Chapman, 2005)

2.2.7 Diagram Fasor Generator Sinkron

1. Kutub Silindris

Fasor digunakan untuk melukiskan hubungan antara tegangan arus AC. Gambar 7.1 menunjukkan hubungan di antara tegangan arus

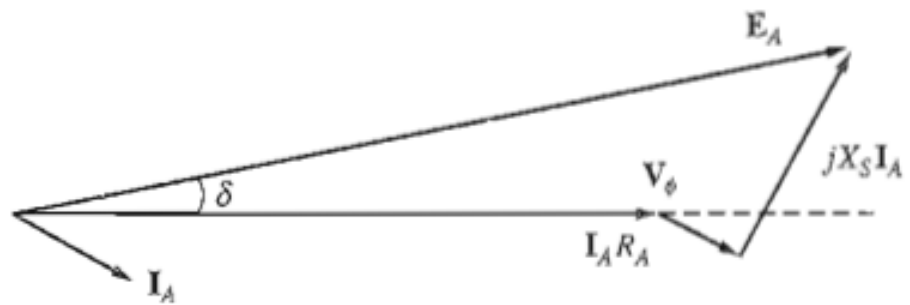
AC tersebut ketika generator menyuplai beban resistif murni (faktor daya 1). Total tegangan induksi berbeda dari tegangan terminal alternator, karena adanya tegangan jatuh resistif dan induktif. Semua tegangan direferensikan terhadap tegangan alternator yang diasumsikan bersudut 0° .



Gambar 2. 14 Diagram Fasor untuk Faktor Daya 1 (Bersifat Resistif)

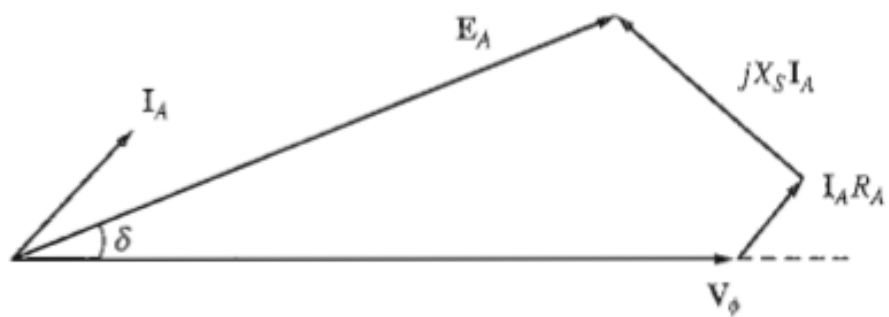
(Champan, 2005)

Gambar 7.2 dan gambar 7.3 di bawah, menggambarkan diagram fasor untuk generator yang bekerja pada faktor daya *leading* dan *lagging*. Pada arus jangkar dan tegangan fasa yang sama, beban *lagging* butuh tegangan induksi E_a yang lebih besar daripada beban *leading*. Oleh karena itu, beban *lagging* membutuhkan arus jangkar yang lebih besar untuk mendapatkan tegangan terminal alternator yang sama dengan beban *leading*. Untuk arus medan dan besar arus beban yang sama, tegangan terminal untuk beban *lagging* lebih kecil daripada beban *leading*.



Gambar 2. 15 Diagram Fasor untuk Faktor Daya Lagging (Bersifat Induktif)

(Chapman, 2005)



Gambar 2. 16 Diagram Fasor untuk Faktor Daya Leading (Bersifat Kapasitif)

(Chapman, 2005)

Dari diagram-diagram diatas, dapat diperoleh:

a. Untuk faktor daya Unity

$$E_a = \sqrt{(V_\phi + I_a \cdot R_a)^2 + (V_\phi + I_a \cdot X_s)^2} \dots\dots\dots 2.11$$

$$E_a = \sqrt{(V_\phi + I_a \cdot R_a)^2 + (V_\phi + (I_a \cdot (X_L + X_a)))^2} \dots\dots\dots 2.12$$

b. Faktor Daya *Lagging*

$$E_a = \sqrt{(V_\phi \cdot \cos\phi + I_a \cdot R_a)^2 + (V_\phi \cdot \sin\phi + I_a \cdot X_s)^2} \dots\dots\dots 2.13$$

$$E_a = \sqrt{(V_\phi \cdot \cos\phi + I_a \cdot R_a)^2 + (V_\phi \cdot \sin\phi + (I_a \cdot (X_L + X_a)))^2} \dots\dots\dots 2.14$$

c. Faktor Daya *Leading*

$$E_a = \sqrt{(V\emptyset \cdot \cos\emptyset + I_a \cdot R_a)^2 + (V\emptyset \cdot \sin\emptyset \cdot I_a \cdot X_s)^2} \dots\dots\dots 2.15$$

$$E_a = \sqrt{(V\emptyset \cdot \cos\emptyset + I_a \cdot R_a)^2 + (V\emptyset \cdot \sin\emptyset \cdot (I_a \cdot (X_L + X_a)))^2} \dots\dots 2.16$$

Dimana:

E_a = Tegangan beban terinduksi yang merupakan tegangan terinduk setelah terdapat reaksi jangkar. (Volt)

$V\emptyset$ = Tegangan terminal (Volt)

X_a = Reaktansi Armatur (Ohm)

X_s = Reaktansi Sinkron (Ohm)

I_a = Arus Jangkar (Ampere)

2. Kutub Menonjol

Alternator kutub menonjol memiliki permukaan kutub yang tidak sama dengan kutub silindris. Dari kasus ini, maka terjadilah medan magnet yang kurang merata pada rotor, dikarenakan terdapat celah di antara dua kutub rotor yang mengakibatkan kuat medan yang tidak sama di antara ujung kutub rotor dan celah udara antara dua kutub rotor. Rotor yang menginduksikan fluks magnet akan memberikan pengaruh yang tidak merata terhadap tegangan induksi yang dihasilkan jangkar.

Dikarenakan pengaruh medan yang berbeda di generator kutub menonjol, maka reaktansi sinkron yang dibangkitkan pada rangkaian ekuivalen generator sinkron akan berubah, seperti:

$$X_s = X_d + jX_q \dots\dots\dots 2.17$$

dimana:

X_d = Reaktansi sinkron di arah sumbu d

X_q = Reaktansi sinkron di arah sumbu q

Nilai E_a yang dihasilkan alternator selanjutnya berubah menjadi persamaan dibawah.

$$E_a = V + I_a R_a + jI_d X_d + jI_q X_q \dots\dots\dots 2.18$$

dimana :

$$I_a = I_d + jI_q$$

$$I_d = I_a \sin\theta$$

$$I_q = I_a \cos\theta$$

untuk factor daya tertinggal :

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(V_T \sin \varphi + I_a X_q)}{(V_T \cos \varphi + I_a R_a)} \dots\dots\dots 2.19$$

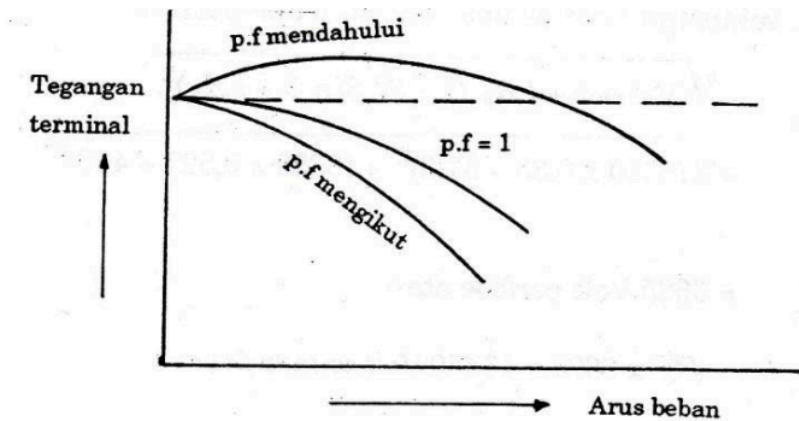
untuk factor daya mendahului :

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(-V_T \sin \varphi + I_a X_q)}{(V_T \cos \varphi + I_a R_a)} \dots\dots\dots 2.20$$

2.2.8 Regulasi Tegangan

Prosentase besar kecilnya drop tegangan, yang terjadi diantara tegangan keluaran generator (V_t) dengan tegangan yang dibangkitkan (E_a) disebut Regulasi Tegangan seperti yang diperlihatkan dibawah ini.

$$VR = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \times 100\% \dots\dots\dots 2.21$$



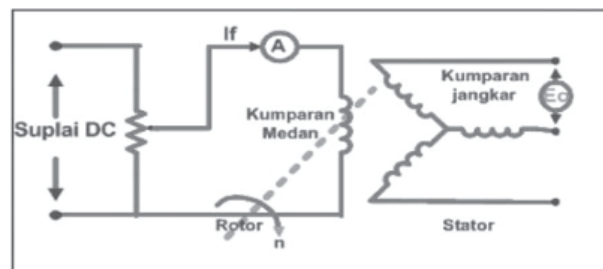
Gambar 2. 17 Karakteristik Tegangan Terminal (V_t) terhadap Beban (I_a) dengan Berbagai Faktor Beban

2.2.9 Penentuan Parameter Generator Sinkron

Terdapat beberapa parameter yang ada pada generator sinkron yakni reaktansi sinkron, tahanan jangkar, dan tegangan internal. Beberapa parameter tersebut dapat dicari dengan cara pengujian yang dilakukan ke generator. Yakni pengujian hubung singkat, pengujian beban nol, dan pengujian sumber searah.

a. Pengujian tanpa beban.

Generator sinkron dioperasikan dengan kecepatan ratingnya dan terminal generator sinkron tidak perlu dihubungkan dengan beban. Sumber eksitasi awal adalah nol, lalu kemudian dinaikkan secara bertahap. Maka akan didapatkan arus jangkar yang bernilai nol, hingga tegangan terminal sama dengan tegangan yang dibangkitkan oleh generator.

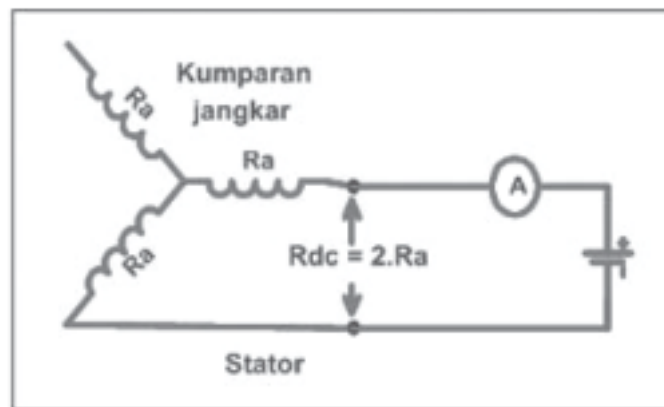


Gambar 2. 18 Pengujian tanpa beban

(Harj S, 2017)

b. Pengujian sumber searah.

Penentuan nilai tahanan jangkar R_a dapat didapatkan dari pengujian jenis ini. Yang mana tegangan DC dialirkan menuju kumparan jangkar saat kondisi alternator tidak bergerak dengan hubungan Y, lalu arus yang mengalir dirangkaian tersebut diukur. Rangkaian pengujian dapat dilihat seperti gambar dibawah.



Gambar 2. 19 Pengujian sumber searah

(Harj S, 2017)

Dari rangkaian tersebut dapat didapatkan dengan persamaan dibawah

$$R_a = \frac{V_{DC}}{2.I_{DC}} \dots\dots\dots 2.22$$

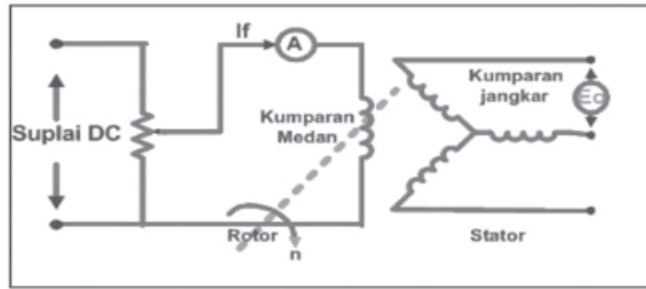
dimana :

V_{DC} = Nilai tegangan sumber searah yang dialirkan di dua kumparan generator sinkron yang memiliki hubungan Y. (V)

I_{DC} = Nilai arus searah yang dicatat oleh alat ukur (A)

c. Pengujian hubung singkat.

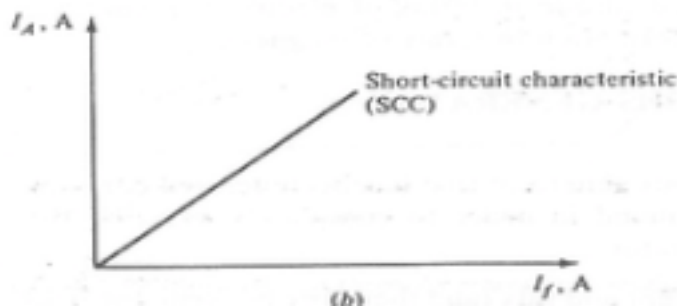
Pengujian ini menggunakan hubungan Y untuk menentukan nilai reaktansi sinkron X_s .



Gambar 2. 20 Pengujian hubung singkat

(Harj S, 2017)

Saat pengujian ini, arus medan mulanya diberi nilai nol, lalu terminal alternator dihubung singkat menggunakan ampere meter untuk mengukur arus hubung singkat, dimana yang dihubung singkat adalah arus jangkar Ia. Saat arus jangkar dihubung singkat, arus eksitasi kemudian dinaikkan bertahap hingga batas nominalnya. Pengujian ini dapat menghasilkan hubungan arus jangkar sebagai arus eksitasi, di mana polinomial.



Gambar 2. 21 Hubungan arus jangkar terhadap arus eksitasi

(Harj S, 2017)

Maka akan didapatkan persamaan:

$$Z_s = \sqrt{Ra^2 + X^2} = \frac{E_a}{I_a} \dots\dots\dots 2.22$$

$$X_s = \frac{E_a}{I_a} = \frac{V_{OC}}{I_{a_{hs}}} \dots\dots\dots 2.23$$

Yakni :

V_{OC} = tegangan terminal generator sinkron pengujian tanpa beban

2.2.10 Faktor Daya

Faktor daya listrik adalah perbandingan antara daya aktif dengan daya semu, dengan rumus :

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \dots\dots\dots 2.24$$

Dimana :

$\cos \phi$ = Faktor Daya

P = Daya Aktif (KW)

S = Daya Semua (KVA)

Daya nyata keluaran generator sinkron dapat dinyatakan dalam persamaan dengan kuantitas saluran:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L \cdot \cos \phi \dots\dots\dots 2.25$$

Dan kuantitas fasa :

$$P = 3 \cdot V \phi \cdot I_a \cdot \cos \phi \dots\dots\dots 2.26$$

Daya reaktif dinyatakan dalam kuantitas saluran :

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L \cdot \sin \phi \dots\dots\dots 2.27$$

Dan pada kuantitas fasa:

$$Q = 3 \cdot V \phi \cdot I_a \cdot \sin \phi \dots\dots\dots 2.28$$

2.2.11 Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron

Eksitasi ialah proses penguatan medan magnet dengan cara memberikan arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor alternator. Umumnya apabila suatu konduktor berupa kumparan dialiri listrik arus searah maka kumparan tersebut akan menjadi magnet yang akan menghasilkan fluks magnet. Saat kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi dan berputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan

jangkar stator akan terinduksi oleh fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan, sehingga akan menghasilkan tegangan listrik AC. 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 akan dihasilkan oleh sebuah generator.

Terdapat 2 jenis sistem eksitasi, yaitu:

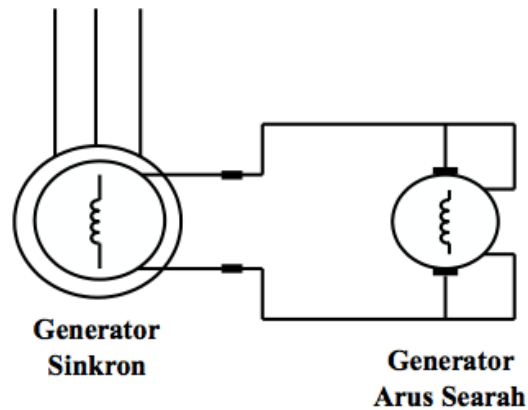
1. Sistem eksitasi dengan sikat (brush excitation)

Sistem eksitasi ini, sumber listriknya berasal dari generator DC yang disearahkan lebih dahulu menggunakan *rectifier*. Untuk mengalirkan arus eksitasi dari main exciter ke rotor generator menggunakan slip ring dan sikat arang.

Pada sistem eksitasi dengan sikat (*brush excitation*) terdapat 2 jenis, yaitu sistem eksitasi konvensional (menggunakan generator arus searah) dan sistem eksitasi statis.

- a. Sistem Eksitasi Konvensional (memakai generator arus searah)

Sistem eksitasi ini mendapatkan arus DC dari generator arus DC yang memiliki kapasitas yang kecil atau eksiter. Generator DC tersebut terkopel dengan alternator dalam satu poros, yang menyebabkan putaran generator DC sama dengan putaran alternator. Tegangan yang dihasilkan oleh eksiter diberikan ke belitan rotor alternator dengan sikat karbon dan *slip ring*. Yang menyebabkan arus DC mengalir menuju rotor dan akan menimbulkan medan magnet yang diperlukan agar menghasilkan tegangan AC pada kumparan yang berada di stator alternator.



Gambar 2. 22 Sistem Eksitasi dengan Generator DC

(Faisal, Ahmad, 2011)

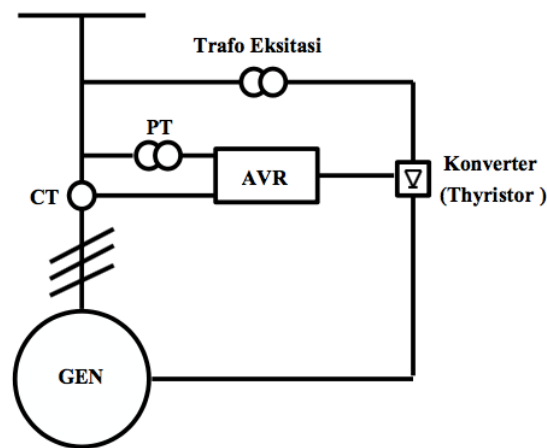
b. Sistem Eksitasi Statis

Sistem ini adalah sistem eksitasi yang memakai peralatan eksitasi yang statik atau tidak bergerak, dimana peralatan eksitasi tidak ikut berputar bersama dengan rotor alternator. Sistem ini biasanya disebut *self excitation*, dimana sistem eksitasi ini tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi alternator. Sumber eksitasi di sistem ini asalnya dari tegangan output generator itu sendiri, di searahkan lebih dulu dengan menggunakan *thyristor*.

Awalnya di rotor memiliki sedikit magnet, magnet sisa ini akan menimbulkan tegangan di stator, kemudian tegangan tersebut akan masuk di dalam penyearah dan dimasukkan lagi ke dalam rotor. Yang mengakibatkan medan magnet akan semakin besar serta tegangan bolak-balik akan ikut naik. Akan terjadi seperti itu hingga tegangan nominal yang dibutuhkan oleh generator untuk proses pembangkitan. Pengaturan penyearah memiliki peralatan

yang disebut AVR (*Automatic Voltage Regulator*) dimana dapat mengatur tegangan generator agar tetap konstan.

Sistem eksitasi ini, dalam keperluan eksitasi awal di alternator saat belum dapat menghasilkan tegangan keluaran, energi yang digunakan untuk eksitasi diambil dari baterai. Proses tersebut disebut dengan proses *field flashin*. Dimana pada proses ini, arus eksitasi diinjeksikan oleh baterai ke rotor generator. Hal tersebut dibutuhkan dikarenakan alternator tidak memiliki sumber arus dan tegangan sendiri untuk menyuplai kumparan medan.



Gambar 2. 23 Sistem Eksitasi Secara Statis
(Faisal, Ahmad, 2011)

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 lebih kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang, digunakanlah sistem eksitasi tanpa sikat.

Beberapa keuntungan yang didapat dari penggunaan sistem eksitasi tanpa sikat adalah:

- a. Energi yang dibutuhkan untuk eksitasi didapat dari poros utama (*main shaft*) yang menyebabkan keandalannya tinggi.

- b. Biaya perawatan berkurang, karena tidak terdapat sikat, komutator dan juga slip ring.

Sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) juga memiliki dua jenis yaitu sistem eksitasi dengan menggunakan baterai dan sistem eksitasi dengan menggunakan *Permanent Magnet Generator* (PMG)