

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Rujukan penelitian yang pernah dilakukan untuk mendukung penulisan tugas akhir ini antara lain sebagai berikut :

- a. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan tentang Studi Pengaturan Arus Eksitasi Untuk Mengatur Tegangan Keluaran Generator di PT Indonesia Power UBP Kamojang Unit 2, dapat disimpulkan bahwa pada pengaturan arus eksitasi menggunakan *Permanent Magnet Generator* hal yang harus diperhatikan salah satunya yaitu sudut penyalaan *thyristor* (Terimananda dkk, 2016). Di mana nilai sudut penyalaan *thyristor* berbanding terbalik dengan tegangan keluaran generator. Semakin tinggi nilai sudut penyalaan *thyristor* pada rangkaian semi konverter akan menghasilkan nilai tegangan eksitasi pada eksiter dan tegangan keluaran generator akan semakin kecil, sedangkan semakin mengecil nilai sudut penyalaan *thyristor* pada rangkaian semi konverter akan menghasilkan nilai tegangan eksitasi pada eksiter dan tegangan keluaran generator akan semakin besar.
- b. Menurut penelitian yang telah dilakukan tentang Analisa Pengaruh Arus Eksitasi Generator Terhadap Pembebanan Pada PLTA Cirata Unit 2, dapat disimpulkan bahwa semakin besar pembebanan maka tegangan terminal pada generator akan turun sehingga pengaturan tegangan terminal generator dilakukan dengan mengatur arus eksitasi yang di mana semakin besar pembebanan pada generator, maka arus eksitasi yang diinjeksikan ke rotor generator akan semakin besar (Kurniawan, 2015).
- c. Menurut penelitian yang telah dilakukan tentang Studi Pengaruh Arus Eksitasi Pada Generator Sinkron Yang Bekerja Paralel Terhadap

Perubahan Faktor Daya (Basofi, 2014). Dari penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa jika arus eksitasi pada generator sendiri dirubah maka faktor daya generator tidak akan berubah namun tegangan akan berubah sedangkan pada generator yang bekerja paralel jika diatur arus eksitasinya akan merubah faktor daya generator dan tegangan akan tetap.

- d. Berdasarkan penelitian mengenai Analisis Pengaruh Perubahan Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa perubahan arus eksitasi berpengaruh terhadap fluktuasi tegangan nominal generator (Imron, 2013). Fluktuasi tegangan berkisar $\pm 0,66\%$ dari tegangan nominal dan mengakibatkan perubahan daya reaktif sebesar $\pm 5,26$ MVAR.
- e. Menurut penelitian yang telah dilakukan mengenai Studi Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Permanent Magnet Generator (Aplikasi Pada Generator Sinkron di PLTD PT. Manunggal Wiratama), disimpulkan bahwa besarnya penguatan dari penguat utama tergantung dari besarnya arus penguat dari AVR dan kecepatan putar motor (Ennopati, 2010). Selain itu kenaikan arus beban (I_L) akan menyebabkan perubahan tegangan terminal (V_L), dan agar tegangan terminal dapat dijaga konstan maka harus mengatur ggl induksi yang dibangkitkan dengan cara mengatur arus medan (I_f).
- f. Berdasarkan penelitian yang dilakukan tentang Sistem Penguatan Dengan Sikat (*Brush Excitation System*) Pada Generator Unit 1 PLTU Cilacap, dapat disimpulkan bahwa apabila arus eksitasi naik maka daya reaktif yang disalurkan generator ke sistem akan naik dan sebaliknya bila turun maka daya reaktif yang disalurkan akan berkurang. Dan apabila arus eksitasi yang diberikan terlalu kecil, maka aliran daya reaktif akan berbalik dari sistem menuju generator sehingga generator akan menyerap daya reaktif dari sistem (Irawan,2010).

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Generator Sinkron

Konversi energi elektromagnetik yaitu perubahan energi dari bentuk mekanik ke bentuk listrik dan bentuk listrik ke bentuk mekanik. Generator sinkron (sering disebut alternator) adalah mesin listrik arus bolak-balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik yang bekerja dengan cara mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet (Anthony, 2013). 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.

Generator sinkron dengan definisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Kumparan medan magnet pada generator sinkron terletak pada rotornya sedangkan kumparan jangkarnya terletak pada stator. 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. Hubungan antara medan magnet pada mesin dengan frekuensi listrik pada stator ditunjukkan oleh persamaan di bawah ini:

$$f = \frac{n \cdot p}{120}$$

Di mana : f = Frekuensi Listrik (Hz)

n = Kecepatan putar rotor (rpm)

p = Jumlah kutub

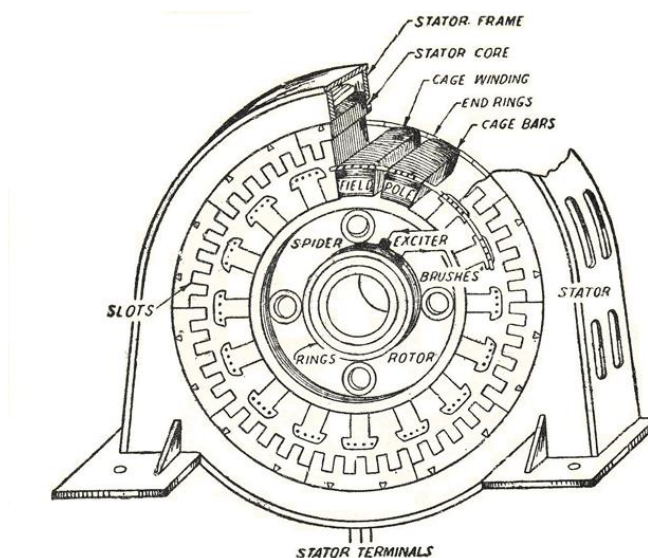
Generator sinkron sering kita jumpai pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik dengan kapasitas yang relative besar. Misalnya pada PLTA, PLTU, PLTD dan pembangkit listrik lainnya. Selain generator dengan kapasitas besar, kita juga mengenal generator dengan kapasitas yang relative kecil misalnya generator yang digunakan untuk penerangan darurat yang sering disebut generator set.

2.2.2 Komponen Generator Sinkron

Konstruksi pada generator sinkron secara umum terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

1. Stator adalah bagian dari generator yang diam.
2. Rotor adalah bagian dari generator yang berputar.
3. Celah udara adalah ruang antara stator dan rotor.

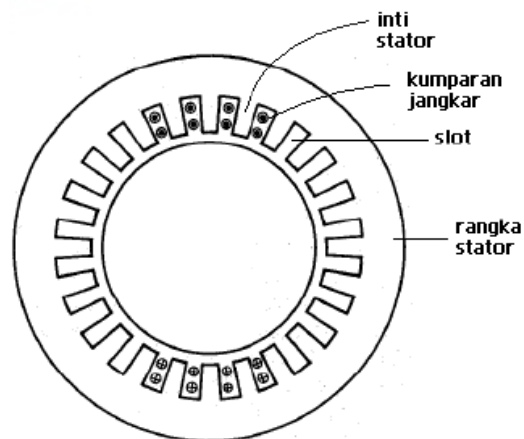
Pada gambar 2.1 berikut, dapat dilihat konstruksi dari sebuah generator sinkron.



Gambar 2.1 Konstruksi Generator Sinkron
(Ennopati, 2009)

1. Stator

Stator merupakan bagian dari generator yang diam dan mempunyai alur atau *slot* memanjang yang di dalamnya terdapat belitan yang disebut dengan belitan jangkar (*Armature Winding*).



Gambar 2.2 Penampang Stator

(Rajagukguk, 2009)

Secara umum stator terdiri dari kerangka stator, inti stator, belitan stator dan *slot*.

a. Rangka Stator

Rangka stator berfungsi sebagai tempat melekatnya kumparan jangkar. Pada rangka stator terdapat lubang pendingin di mana udara dan gas pendingin disirkulasikan. Rangka stator biasanya dibuat dari besi campuran baja atau plat baja giling yang dibentuk sedemikian rupa sehingga diperoleh rangka yang sesuai dengan kebutuhan.

b. Inti Stator

Inti stator melekat pada rangka stator di mana inti ini terbuat dari laminasi-laminasi besi khusus atau campuran baja. Hal ini dilakukan untuk memperkecil rugi arus *eddy*. Tiap laminasi diberi isolasi dan di antaranya dibentuk celah sebagai tempat aliran udara.

c. Alur (*Slot*) dan Gigi

Slot adalah tempat konduktor berada yang letaknya pada bagian dalam sepanjang keliling stator. Bentuk slot ada 3 jenis yaitu *slot* terbuka, *slot* setengah terbuka, dan *slot* tertutup.



Gambar 2.3 Bentuk-bentuk Alur/ *Slot*

(Ennopati, 2009)

d. Kumparan Stator (Kumparan Jangkar)

Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi.

2. Rotor

Rotor berfungsi sebagai tempat belitan medan (eksitasi) yang membentuk kemagnetan listrik kutub utara-selatan pada inti rotor. Rotor terdiri dari tiga komponen utama yaitu:

a. *Slip Ring*

Slip ring merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Terminal kumparan rotor dipasangkan ke slip ring ini kemudian dihubungkan ke sumber arus searah melalui sikat (*brush*) yang letaknya menempel pada *slip ring*.

b. Kumparan Rotor (Kumparan Medan)

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

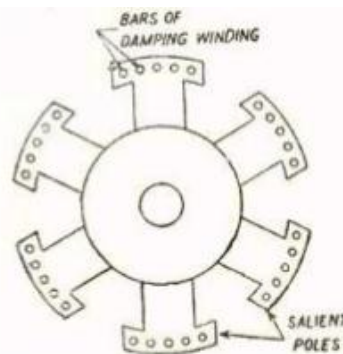
c. Poros Rotor

Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan, di mana pada poros rotor tersebut telah terbentuk *slot-slot* secara parallel terhadap poros rotor.

Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa kutub menonjol (*salient pole*) dan kutub silindris (*non salient pole*).

a. Kutub 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 tipe ini mempunyai kutub yang jumlahnya banyak dan utarannya rendah. Kutub menonjol ditandai dengan rotor berdiameter besar dan panjang sumbunya pendek. Kumparan dibelitkan pada tangkai kutub, di mana kutub-kutub diberi laminasi untuk mengurangi panas yang ditimbulkan oleh arus Eddy.

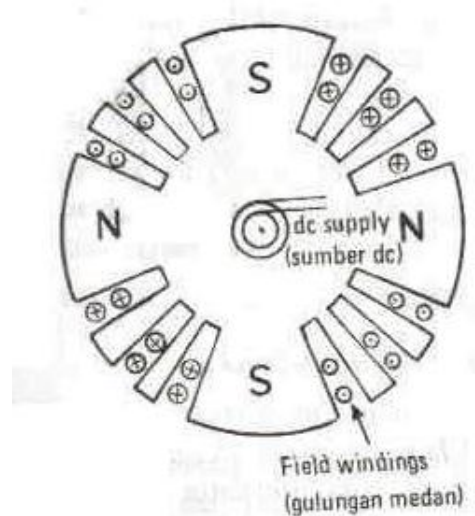


Gambar 2.4 Rotor Kutub Menonjol
(Anthony, 2013)

Gambaran bentuk kutub menonjol generator sinkron adalah seperti yang terlihat pada gambar 2.4 di atas. Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (120-400 rpm). Oleh sebab itu generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik. Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putara rendah dan sedang karena kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi angin yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi. Selain itu, kontruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.

b. Kutub Silindris (*Non Salient Pole*)

Pada jenis *non salient pole*, kontstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa halus yang berbentuk silinder yang mempunyai alur-alur terbuat dari sisi luarnya. Belitan-belitan medan dipasang pada alur-alur di sisi luarnya. Belitan-belitan medan dipasang pada alur-alur tersebut dan terhubung seri dengan slip yang terhubung dengan eksiter. Gambaran bentuk kutub silindris generator sinkron adalah seperti pada gambar 2.5 berikut:



Gambar 2.5 Rotor Kutub Silinder (*Non Salient Pole*)

(Anthony, 2013)

Rotor kutub silinder umumnya digunakan untuk kecepatan putar tinggi (1500 atau 300 rpm). Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi. Selain itu distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.

2.2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Suatu mesin listrik akan berfungsi apabila memiliki :

1. Kumparan medan untuk menghasilkan medan magnet.
2. Kumparan jangkar, untuk mengimbaskan ggl pada konduktor-konduktor yang terletak pada alur-alur jangkar.
3. Celah udara yang memungkinkan berputarnya jangkar dalam medan magnet.

Adapun prinsip kerja dari generator sinkron secara umum adalah sebagai berikut :

1. Kumparan medan yang diletakkan di rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi tertentu yang akan mensuplai arus searah terhadap kumparan medan. Dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumparan medan akan menimbulkan fluks yang besarnya terhadap waktu adalah tetap.
2. Penggerak mula (*prime mover*) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar dengan kecepatan tertentu sesuai dengan yang diharapkan.
3. Perputaran rotor tersebut sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor, akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga kumparan jangkar yang terletak di stator akan dihasilkan fluks

magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut sesuai dengan persamaan berikut :

$$E_{\text{ind}} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

$$E = -N \frac{d\phi_{\text{maks}} \sin \omega t}{dt} d\phi$$

$$= -N\omega\phi_{\text{maks}} \cos \omega t \quad (\omega = 2\pi f)$$

$$= -N(2\pi f)\phi_{\text{maks}} \cos \omega t \quad (f = \frac{np}{120})$$

$$= -N(2\pi \frac{np}{120})\phi_{\text{maks}} \cos \omega t$$

$$= -N(2.3,14. \frac{np}{120})\phi_{\text{maks}} \cos \omega t$$

$$E_{\text{maks}} = N(2.3,14. \frac{np}{120})\phi_{\text{maks}}$$

$$E_{\text{eff}} = \frac{e_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} = \frac{N(2.3,14. \frac{np}{120})\phi_{\text{maks}}}{\sqrt{2}}$$

$$= \frac{4,44Npn\phi}{120} \quad (\frac{4,44Np}{120} = C)$$

$$E_{\text{eff}} = Cn\phi$$

Di mana : E = Gaya gerak listrik (Volt)

N = Jumlah lilitan

C = Konstanta

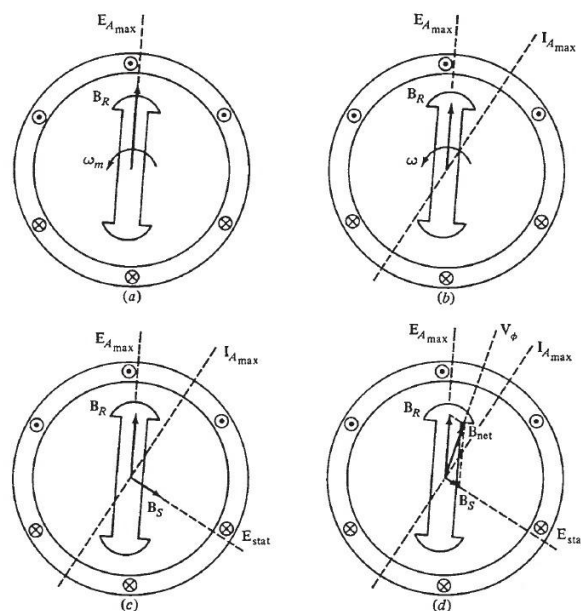
n = Putaran sinkron (RPM)

ϕ = Fluks magnetik (Weber)

Untuk generator sinkron tiga fase, digunakan tiga kumparan jangkar yang ditempatkan di stator yang disusun dalam bentuk tertentu, sehingga susunan kumparan jangkar yang sedemikian akan membangkitkan tegangan induksi pada ketiga kumparan jangkar yang besarnya sama tapi berbeda fase 120° satu sama lain. Setelah itu, ketiga terminal kumparan jangkar siap dioperasikan untuk menghasilkan energi listrik.

2.2.4 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 seperti pada gambar 2.6 berikut:



Gambar 2.6 Model Reaksi Jangkar

(Ennopati, 2009)

Keterangan gambar di atas adalah sebagai berikut :

- a. Medan magnet yang berputar akan menghasilkan tegangan induksi E_{Amax} .
- b. Tegangan resultan menghasilkan arus *lagging* saat generator berbeban induktif.
- c. Arus stator menghasilkan medan magnet sendiri B_S dan tegangan E_{stator} pada belitan stator.
- d. Vector penjumlahan B_S dan B_R yang menghasilkan B_{net} dan penjumlahan E_{stator} dengan E_{Amax} menghasilkan V_F pada outputnya.

Reaksi jangkar pada alternator bergantung pada jenis beban yang dilayani atau dengan kata lain tergantung dari sudut fase antara arus jangkar dan tegangan induksi. Dalam keadaan berbeban, arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar yang bersifat reaktif. Oleh karena itu dinyatakan sebagai reaktansi dan disebut reaktansi pemagnetan. Reaktansi pemagnetan ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor dikenal sebagai reaktansi sinkron.

Reaksi jangkar dapat menimbulkan pengaruh berupa distorsi penguatan (*magnetising*) maupun pelemahan (*demagnetising*) fluksi arus medan pada celah udara. Pengaruh yang ditimbulkan reaksi jangkar adalah sebagai berikut.

- a. Beban Resisitif ($\cos\varphi=1$)

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

b. Beban Induktif Murni ($\cos\varphi = 0$ lagging)

Arus akan tertinggal sebesar 90° dari tegangan. Fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar (ϕ_a) akan melawan fluksi arus medan (ϕ_m) sehingga fluks resultan pada celah udara akan berkurang dari fluks medan. Dengan kata lain reaksi jangkar akan *demagnetizing* artinya pengaruh reaksi jangkar akan melemahkan fluksi arus medan (*demagnetizing effect*).

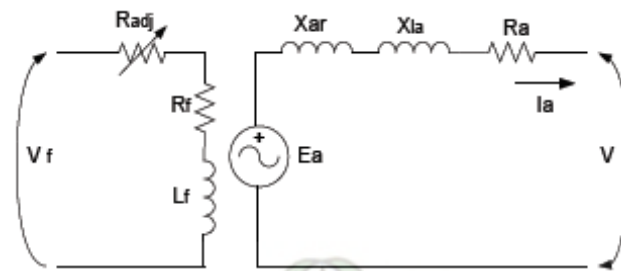
c. Beban Kapasitif Murni ($\cos\varphi = 0$ leading)

Pada saat leading, arus akan mendahului tegangan sebesar 90° . Fluksi yang dihasilkan arus jangkar akan searah dengan fluksi arus medan sehingga fluks resultan pada celah udara akan bertambah dari fluks medan. Reaksi jangkar yang terjadi akan mengakibatkan *magnetizing* artinya pengaruh reaksi jangkar akan menguatkan fluksi arus medan (*magnetizing effect*).

2.2.5 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

Stator terdiri dari belitan-belitan di mana suatu belitan konduktor akan terdiri dari tahanan (R_A) dan induktansi (L). Ketika motor bekerja maka arus akan mengalir pada konduktor membentuk fluksi jangkar (ϕ_a) yang akan membangkitkan medan putar. Fluksi jangkar (ϕ_a) akan berinteraksi dengan fluks medan (ϕ_m) sehingga akan terjadi konversi energi dari energi listrik menjadi energi mekanik. Pada kondisi ini, ada fluks sisa yang tidak dapat berinteraksi dengan fluks medan yang disebut dengan reaktansi bocor (X_A).

Akibat adanya pengaruh reaksi jangkar dan reaktansi bocor, maka rangkaian ekuivalen suatu motor sinkron akan menjadi seperti gambar 2.7 berikut:



Gambar 2.7 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

(Ramdhani, 2008)

- Di mana :
- E = Tegangan induksi
 - V = Tegangan terminal generator
 - V_f = Tegangan eksitasi
 - R_f = Tahanan belitan medan
 - L_f = Induksi belitan medan
 - R_{adj} = Tahanan variable
 - X_{ar} = Reaktansi reaksi jangkar
 - X_{la} = Reaktansi bocor belitan jangkar
 - I_a = Arus Jangkar

Dari gambar 2.7 dapat ditulis persamaan tegangan generator sinkron sebagai berikut:

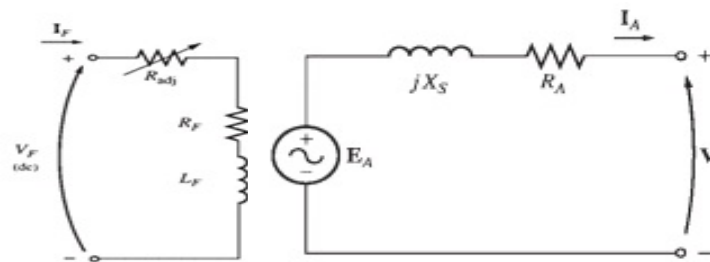
$$E_a = V + jX_{ar} I_a + jX_{la} I_a + R_a I_a$$

Dari persamaan tegangan terminal generator sinkron dapat di tulis:

$$V = E_a - jX_{ar} I_a - jX_{la} I_a - R_a I_a$$

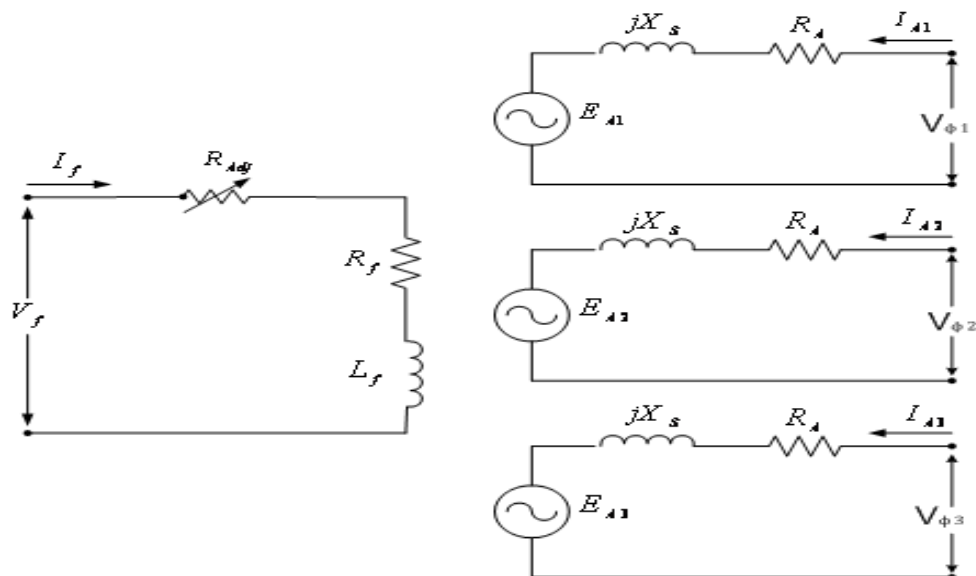
Dengan menyatakan reaktansi reaksi jangkar dan reaktansi fluks bocor sebagai reaktansi sinkron, atau $X_s = X_{ar} + X_{la}$ dapat dilihat pada gambar 2.8 maka persamaan menjadi :

$$V = E_a - jX_s I_a - R_a I_a \text{ (Volt)}$$



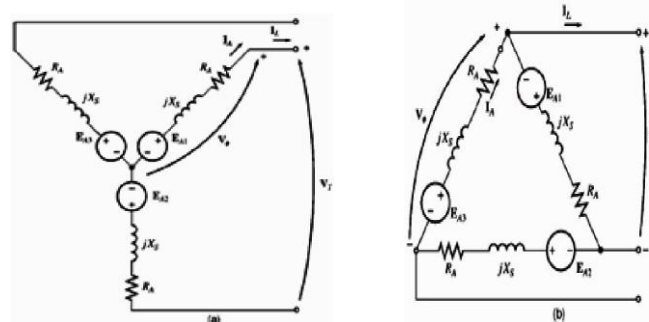
Gambar 2.8 Penyederhanaan Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron
(Ramdhani, 2008)

Karena tegangan yang dibangkitkan generator sinkron adalah tegangan bolak-balik tiga fasa, maka gambar yang menunjukkan hubungan tegangan induksi perfasa dengan terminal generator akan ditunjukkan pada gambar 2.9 berikut:



Gambar 2.9 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tiga Fasa
(Ramdhani, 2008)

Sedangkan untuk generator tiga fasa, rangkaian ekivalen generator sinkron ditunjukkan oleh gambar 2.10 berikut ini:



Gambar 2.10 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron

(a) Hubung-Y (b) Hubung-D

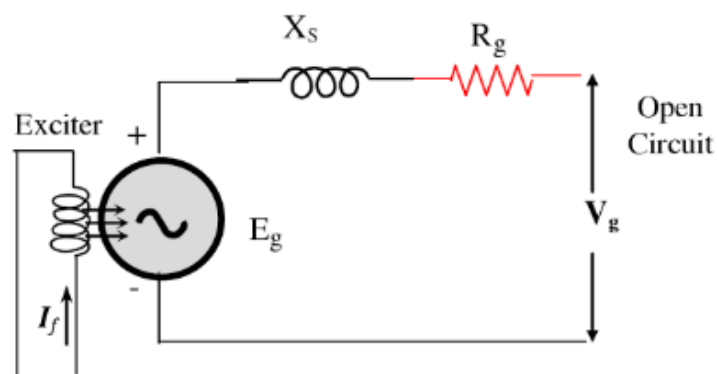
(Ramdhani, 2008)

2.2.6 Karakteristik Generator Sinkron

Dalam mesin listrik ada dua kurva karakteristik yang digunakan untuk menentukan parameter mesin. Yaitu karakteristik *open circuit* dan karakteristik hubung singkat (*short circuit*).

2.2.6.1. Karakteristik *Open Circuit*

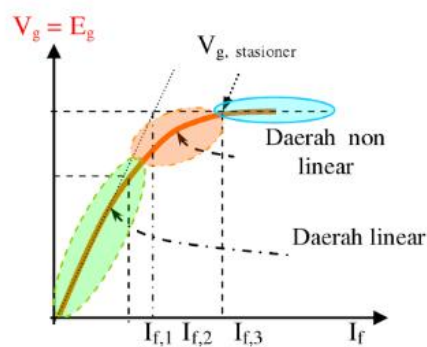
Seperti pada mesin arus searah karakteristik kurva magnetisasi dari mesin sinkron adalah kurva perubahan tegangan terminal atau ggl sebagai fungsi dari perubahan fluks atau arus medan eksitasi.



Gambar 2.11 Rangkaian Generator Sinkron Pada Kondisi *Open Circuit*

(Muslim, 2008)

Dengan memperbesar arus medan exciter hingga I_f tertentu maka tegangan terminal akan naik dari nol dan bertambah secara linear, sampai pada suatu titik arus eksitasi terjadi perubahan arah tegangan yang tidak lagi linear dan menuju suatu kondisi yang stasioner atau kondisi jenuh dan kemudian ketika I_f terus dinaikkan hingga pada titik tertentu maka tegangan tidak lagi mengalami perubahan harga atau konstan.



Gambar 2.12 Kurva V_g Terhadap I_f Pada Kondisi *Open Circuit*
(Muslim, 2008)

Harga dari I_{f2} sampai dengan I_{f3} adalah tambahan arus medan yang diperlukan untuk daerah jenuh. Dan besar tegangan terminal jangkar generator dalam keadaan rangkaian terbuka (*open circuit*) adalah sama dengan besar ggl ($V_g = E_g$).

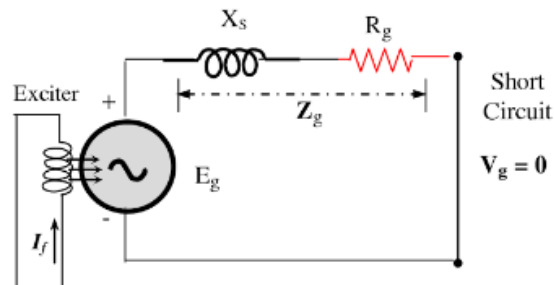
Sesuai dengan $E_g = C \cdot n \cdot \emptyset$ dimana \emptyset adalah variable dan putaran n dijaga konstan, maka :

$$E_g = K \cdot \emptyset \quad \text{di mana} \quad K = C \cdot n$$

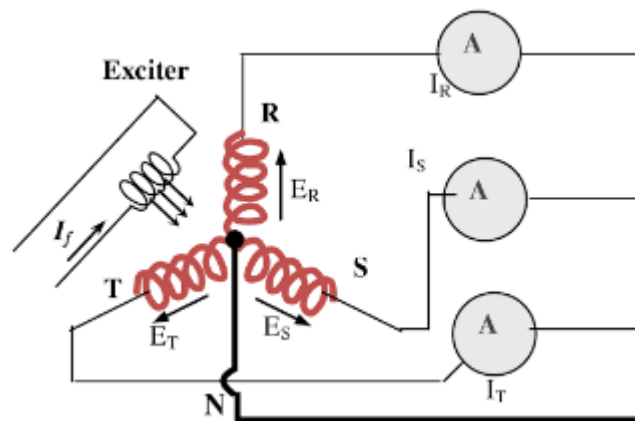
$$E_g = K \cdot K_1 \cdot I_f \quad \text{di mana} \quad K_{1,f} = \emptyset$$

$$E_g = K^2 \cdot I_f$$

2.2.6.2. Karakteristik Hubung Singkat (*Short Circuit*)



Gambar 2.13 Rangkaian Generator Pada Kondisi Hubung Singkat Satu Fasa



Gambar 2.14 Rangkaian Generator Pada Kondisi Hubung Singkat Tiga Fasa (Muslim, 2008)

Karakteristik hubung singkat merupakan penggambaran dari hubungan antara arus fasa hubung singkat sebagai fungsi arus medan, di mana ketiga fasa generator dihubungkan singkat dengan kecepatan putar yang konstan.

Dari persamaan umum generator diperoleh :

$$E_a = V_g + I_g(R_g + jX_s)$$

Karena generator dalam keadaan hubung singkat, nilai tegangan terminalnya menjadi nol, sehingga:

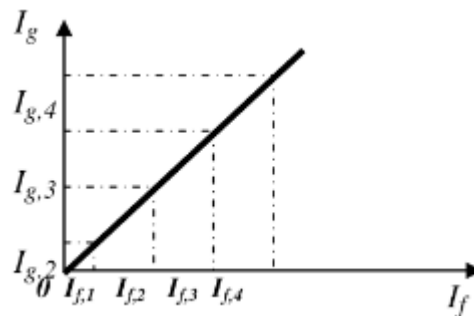
$$E_a = I_g(R_g + jX_s)$$

Pada kondisi ini $(R_g + jX_s)$, adalah konstan = K_2 , dan $I_g = I_{hs}$, sehingga :

$$K_1 I_f = I_{hs} K_2$$

$$I_{hs} = \frac{K_1}{K_2} I_f$$

Dari persamaan di atas, pengukuran hubung singkat berdasarkan penambahan arus medan dari kondisi nol hingga batas yang diperlukan. Karakteristik hubung singkat dapat dilihat pada gambar 2.15 berikut ini :



Gambar 2.15 Karakteristik Pada Kondisi Hubung Singkat

(Muslim, 2008)

2.2.7 Daya

Daya merupakan perkalian antara tegangan yang diberikan dengan hasil arus yang mengalir. Secara matematis adalah sebagai berikut :

$$P = V \cdot I$$

Daya dikatakan positif ketika arus yang mengalir bernilai positif, yang artinya arus mengalir dari sumber tegangan menuju rangkaian. Sedangkan daya dikatakan negatif ketika arus yang mengalir bernilai negatif, yang artinya arus mengalir dari rangkaian menuju sumber tegangan.

2.2.7.1. Daya Kompleks

1. Daya Aktif/Nyata (P)

Daya ini sebenarnya adalah daya yang dipakai oleh komponen pasif resistor yang merupakan daya terpakai atau terserap. Kalau kita perhatikan dari PLN ke rumah-rumah, maka daya yang tercatat pada alat kWh meter adalah daya nyata dan itu merupakan daya yang akan dibayarkan oleh pelanggan. Satuan daya aktif adalah Watt (W).

Secara matematis, daya nyata merupakan perkalian antara tegangan efektif, arus efektif, dan koefisien faktor dayanya.

$$P = V_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \theta$$

2. Daya Reaktif (Q)

Daya ini adalah daya yang muncul diakibatkan oleh komponen pasif di luar resistor yang merupakan daya rugi-rugi atau daya yang tidak diinginkan. Daya ini seminimal mungkin dihindari, atau paling tidak diperkecil yaitu dengan cara memperkecil faktor dayanya. Satuan daya reaktif adalah VAR.

Secara matematis, daya reaktif merupakan perkalian antara tegangan efektif, arus efektif, dan nilai $\sin \theta$.

$$Q = V_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin \theta$$

3. Daya Semu/Tampak (S)

Daya ini merupakan daya yang sebenarnya yang disuplai oleh PLN, yang merupakan resultan daya antara daya nyata dan daya reaktif. Satuan daya semu adalah VA.

Secara matematis, daya semu merupakan perkalian antara tegangan dan arus efektif.

$$S = V_{\text{eff}} I_{\text{eff}}$$

4. Daya Kompleks

Daya kompleks merupakan gabungan dari daya aktif dan daya reaktifnya.

$$S = P + jQ = V_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \theta + jV_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin \theta$$

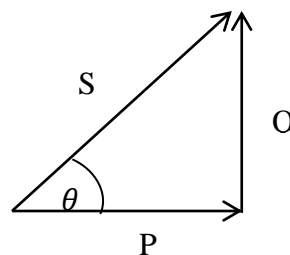
2.2.7.2. Faktor Daya

Faktor daya atau *power factor* (*pf*) merupakan perbandingan daya rata-rata terhadap daya tampak.

$$pf = \frac{P}{S} = \frac{V_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \theta}{V_{\text{eff}} I_{\text{eff}}} = \cos \theta$$

2.2.7.3. Segitiga Daya

Hubungan antara daya aktif, daya reaktif, dan daya semu dapat dinyatakan dengan mempresentasikan daya-daya tersebut sebagai vektor. Representasi ini sering disebut sebagai segitiga daya.



Rumus umum untuk daya adalah sebagai berikut :

$$P = V_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \theta = I_{\text{eff}}^2 R = \frac{V_{\text{eff}}^2}{R}$$

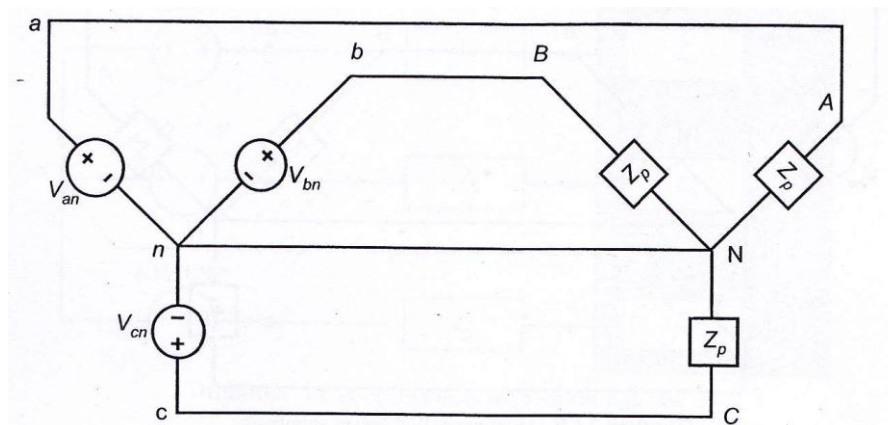
$$Q = V_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \sin \theta = I_{\text{eff}}^2 X = \frac{V_{\text{eff}}^2}{X}$$

$$S = V_{\text{eff}} I_{\text{eff}} = I_{\text{eff}}^2 Z = \frac{V_{\text{eff}}^2}{Z}$$

$$pf = \cos \theta = \frac{R}{Z} = \frac{P}{S}$$

2.2.7.4. Daya Sistem Tiga Fasa

Cara menghubungkan beban tiga fasa seimbang ada dua cara yaitu secara hubung delta dan hubung Y. Pada penerapannya cara menghubungkan beban tiga fasa lebih banyak menggunakan cara hubung Y. Jika sumber tegangan tiga fasa hubungan Y dihubungkan dengan beban seimbang (sumber mempunyai tegangan fasa yang sama dan beban tiap fasa sama besarnya), maka didapat:



Gambar 2.16 Hubungan Y Beban Seimbang

(Ramdhani, 2008)

Untuk perhitungan daya pada sistem tiga fasa berdasarkan skema pada gambar 2.16 di atas adalah :

Daya nyata pada masing- masing fasa :

$$P_p = V_p I_p \cos \theta = I_p^2 R_p$$

Sedangkan untuk total daya yang dikirim ke beban adalah :

$$P_{total} = P_p + P_p + P_p = 3P_p$$

2.2.8 Sistem Eksitasi

Eksitasi pada generator sinkron adalah proses penguatan medan magnet dengan cara memberikan arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor. Sesuai dengan prinsip elektromagnet yaitu apabila suatu konduktor berupa kumparan 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 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 dihasilkan tegangan listrik 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 akan dihasilkan oleh sebuah generator.

Berdasarkan cara penyaluran arus searah pada rotor generator sinkron, sistem eksitasi terdiri dari dua jenis yaitu sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*) yang terdiri dari sistem eksitasi konvensional dan eksitasi statis dan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*) yaitu menggunakan sistem permanen magnet generator. Berikut adalah penjelasan jenis-jenis dari sistem eksitasi tersebut:

2.2.8.1. Sistem Eksitasi Konvensional

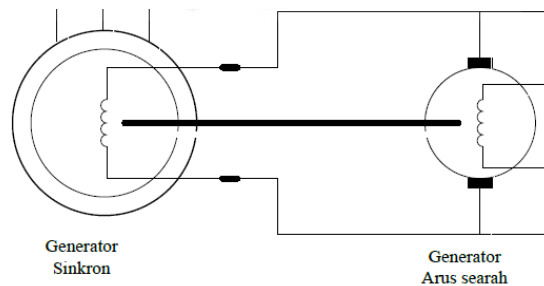
Untuk sistem eksitasi konvensional, arus searah yang diinjeksikan ke kumparan diperoleh dari generator arus searah yang memiliki kapasitas yang kecil yang disebut dengan eksiter. Generator arus searah tersebut terkopel dengan generator sinkron dalam satu poros, yang menyebabkan putaran antara kedua generator tersebut sama.

Tegangan yang dihasilkan oleh eksiter ini diberikan ke kumparan rotor generator sinkron melalui sikat karbon dan *slip ring*. Akibatnya arus mengalir ke rotor dan menghasilkan medan magnet yang dibutuhkan untuk menghasilkan tegangan arus bolak-balik.

Pada sistem eksitasi konvensional ini memiliki beberapa kekurangan yaitu:

1. Generator arus searah akan menjadi beban tambahan bagi penggerak mula.
2. Penggunaan *slip ring* dan sikat dapat menimbulkan masalah saat digunakan untuk mensuplai arus searah pada kumparan medan generator sinkron.
3. Akan timbul rugi gesekan pada generator utama akibat dari sikat arang yang menekan *slip ring*.
4. Generator arus searah memiliki keandalan yang rendah.

Dengan mempertimbangkan kekurangan di atas maka saat ini pada penguatan medan magnet kebanyakan menggunakan sistem eksitasi statis. Berikut adalah gambar dari sistem eksitasi konvensional menggunakan generator arus searah.



Gambar 2.17 Sistem Eksitasi Menggunakan Generator Arus Searah
(Ennopati, 2009)

2.2.8.2. Sistem Eksitasi Statis

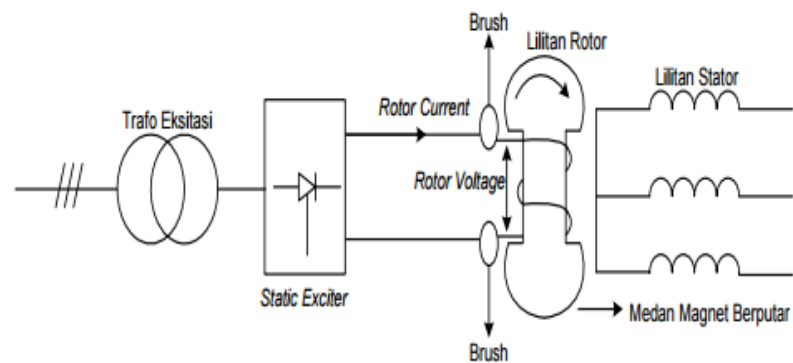
Sistem eksitasi statis yaitu sistem eksitasi yang menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak (*static*), yang berarti peralatan eksitasi tersebut diam dan tidak berputar bersamaan dengan rotor generator sinkron.

Sistem eksitasi statis ini biasa disebut dengan *self excitation* yang merupakan sistem eksitasi yang tidak membutuhkan generator tambahan sebagai sumber eksitasi generator tersebut. Sumber eksitasi pada sistem ini yaitu berasal dari tegangan output generator itu sendiri yang telah disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan penyearah *thyristor*.

Pada saat kondisi awal, pada rotor terdapat sedikit sisa magnet, dan magnet sisa inilah yang akan menimbulkan tegangan pada stator. Tegangan yang dihasilkan tersebut akan masuk ke dalam penyearah dan dimasukkan kembali ke rotor. Akibatnya, medan magnet yang dihasilkan semakin besar dan tegangan AC akan naik. Dan siklus ini akan terjadi berulang secara terus menerus hingga dicapai tegangan nominal yang dibutuhkan oleh generator untuk proses pembangkitan. Dalam proses penyearahan memiliki pengaturan sehingga tegangan generator dapat diatur konstan. Pengaturan tersebut biasanya dilakukan oleh peralatan yang disebut dengan AVR (*Automatic Voltage Regulator*).

Sistem eksitasi statis, apabila dibandingkan dengan sistem eksitasi konvensional yang menggunakan generator arus searah sebagai eksiter sudah jauh lebih baik. Yaitu pada eksitasi statis tidak ada generator arus searah yang memiliki keandalan rendah dan beban pada penggerak utama berupa generator arus searah tersebut tidak ada. Sehingga hal tersebut menyebabkan sistem eksitasi statis ini memiliki keandalan yang lebih baik. Pada sistem eksitasi statis ini untuk kondisi awal di mana generator belum mampu menghasilkan tegangan keluaran, maka energi yang digunakan untuk sistem eksitasi diambil dari baterai. Dan proses ini dinamakan dengan proses *field flashing*. Di mana pada proses *field flashing* ini baterai menginjeksikan arus inisial eksitasi ke rotor generator. Dengan adanya arus inisial eksitasi ini maka generator akan menghasilkan tegangan keluaran.

Berikut ini adalah skema dari sistem eksitasi statis dengan menggunakan sikat :



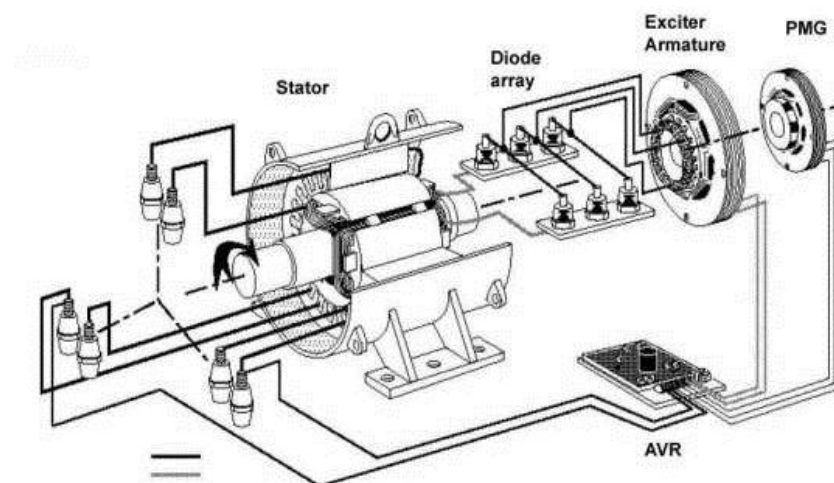
Gambar 2.18 Skema Sistem Eksitasi Dengan Sikat
(Rajagukguk, 2009)

2.2.8.3. Sistem Eksitasi Permanen Magnet Generator (PMG)

Pada sistem eksitasi tanpa sikat sama sekali tidak bergantung pada sumber listrik eksternal, melainkan dengan menggunakan *pilot exciter*. Dan untuk sistem penyaluran arus eksitasi ke rotor generator utama tanpa melalui media sikat arang (*carbon brush*). *Pilot exciter* terdiri dari sebuah generator

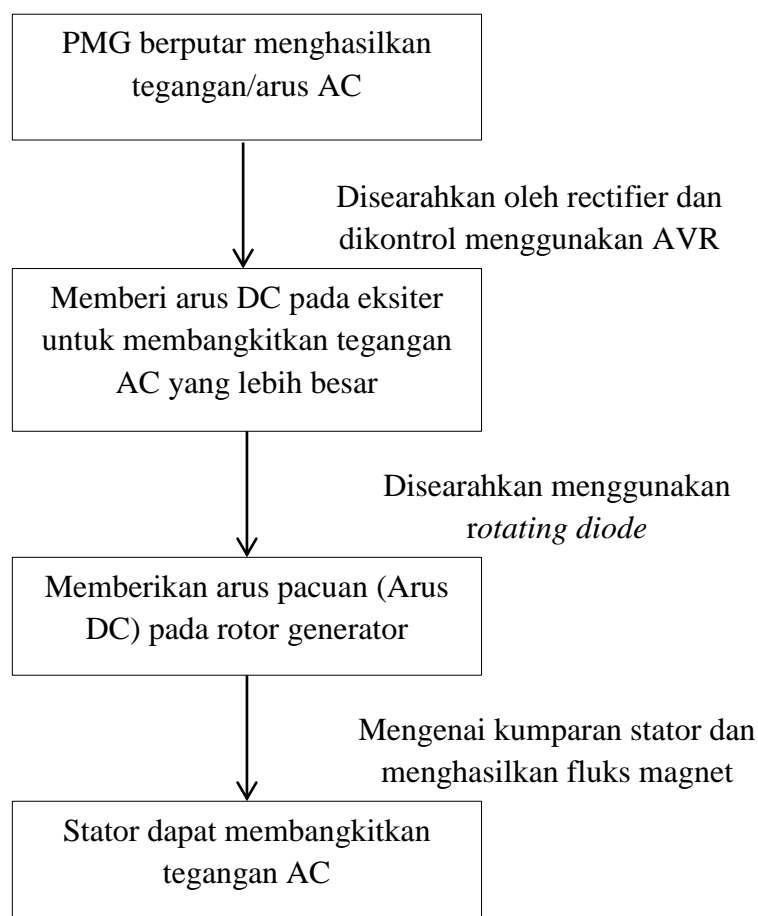
arus bolak balik dengan magnet permanen yang terpasang pada poros rotor dan kumparan tiga fasa pada stator. Suatu generator sinkron harus mempunyai medan magnet yang berputar supaya pada stator generator tersebut dihasilkan tegangan. Pada sistem eksitasi yang dijelaskan sebelumnya, medan magnet ini dihasilkan dari kumparan rotor yang diinjeksikan dengan sumber listrik arus searah. Dan selain cara tersebut, terdapat cara lain yang digunakan untuk menghasilkan medan magnet pada rotor generator. Cara tersebut yaitu sistem eksitasi permanen magnet generator (PMG). Cara ini yaitu dengan menggunakan magnet permanen yang diposisikan pada poros generator tersebut, sehingga berputar saat poros tersebut diputar.

Sistem eksitasi dengan menggunakan sistem eksitasi tanpa sikat yang dilengkapi dengan permanen magnet generator biasanya digunakan pada generator sinkron yang memiliki kapasitas yang besar. Hal ini bertujuan agar sistem eksitasi dari generator tersebut tidak bergantung pada sumber daya listrik dari luar mesin tersebut. Berikut ini merupakan skema dari sistem eksitasi menggunakan magnet permanen:



Gambar 2.19 Sistem Eksitasi Menggunakan Permanen Magnet Generator
(Rajagukguk, 2009)

Dapat dilihat pada gambar 2.19 merupakan skema dari sistem eksitasi menggunakan magnet permanen. PMG akan berputar saat rotor berputar, karena telah terhubung pada satu sumbu atau poros. PMG di sini bertugas untuk membangkitkan tegangan atau arus AC yang kemudian disearahkan dan dimasukkan pada AVR untuk diatur dan dikontrol. Dikarenakan tegangan atau arus AC pada PMG sangat kecil, maka arus AC yang telah disearahkan dimasukkan ke eksiter yang bertujuan untuk membangkitkan tegangan AC yang lebih besar. arus keluaran dari eksiter ini kemudian akan disearahkan menggunakan *rotating diode*. Dan selanjutnya arus eksitasi diinjeksikan ke rotor sehingga terdapat medan magnet pada generator yang akhirnya menimbulkan fluks listrik yang menghasilkan tegangan keluaran pada generator. Secara singkat dapat dijelaskan dalam blok diagram berikut ini :



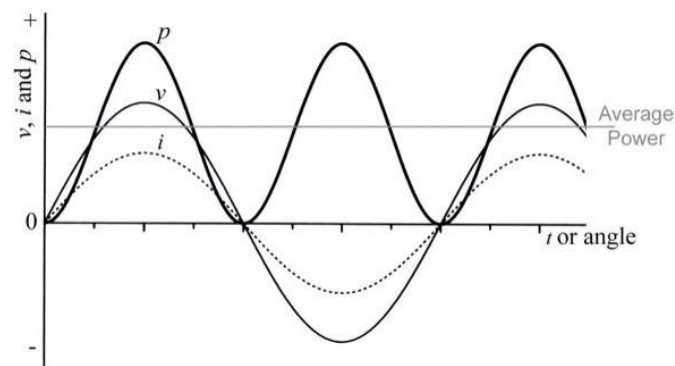
Gambar 2.20 Blok Diagram Prinsip Kerja Sistem Eksitasi Menggunakan Permanen Magnet Generator (PMG)

2.2.9 Jenis Beban Pada Generator Sinkron

Jenis-jenis beban yang berpengaruh pada generator sinkron antara lain sebagai berikut:

2.2.9.1. Beban Resistif

Beban resistif merupakan beban yang dihasilkan oleh peralatan listrik yang memiliki sifat tahanan murni. Seperti contoh pada elemen pemanas dan lampu pijar. Beban jenis ini bersifat pasif yang artinya tidak mampu menghasilkan energi listrik dan akan bersifat konsumtif yang mengkonsumsi energi listrik. Beban jenis ini mengakibatkan energi listrik berubah menjadi panas, dikarenakan resistor bersifat menghambat aliran elektron yang melewatinya dengan cara tegangan listrik yang mengalir diturunkan. Oleh karena itu, resistor tidak akan merubah sifat listrik arus bolak balik yang mengalirinya.



Gambar 2.21 Bentuk Gelombang Dari Beban Resistif

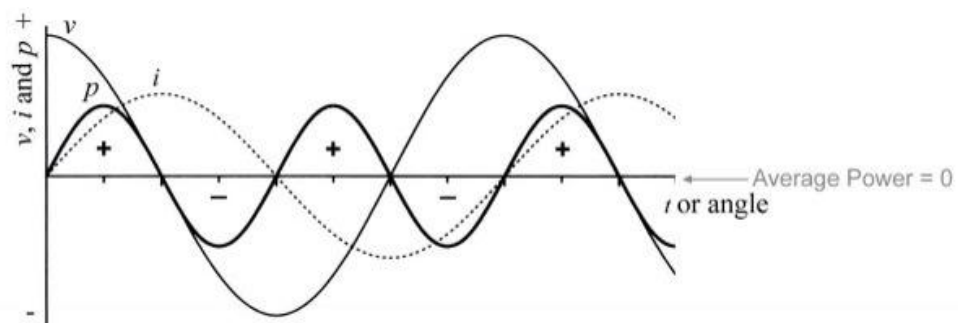
(Kurniawan, 2015)

Pada gambar 2.21 di atas dapat dilihat bahwa gelombang antara tegangan dan arus berada dalam kondisi sefasa sehingga daya listrik akan bernilai positif dan beban ini akan ditopang 100% oleh daya nyata.

2.2.9.2. Beban Induktif

Beban jenis ini ditimbulkan oleh berbagai alat-alat listrik yang memiliki belitan seperti motor induksi, *transformator*, dan peralatan lainnya. Sifat yang

dimiliki oleh belitan adalah menghalangi terjadinya perubahan nilai pada arus listrik. Dalam listrik arus bolak-balik, nilai arus memiliki nilai yang naik dan turun sehingga membentuk gelombang *sinusoidal*. Dan belitan pada peralatan listrik itulah yang menyebabkan nilai arus listrik terhalang, sehingga mengakibatkan arus listrik tertinggal 90° dari tegangan listrik pada tegangan listrik AC.



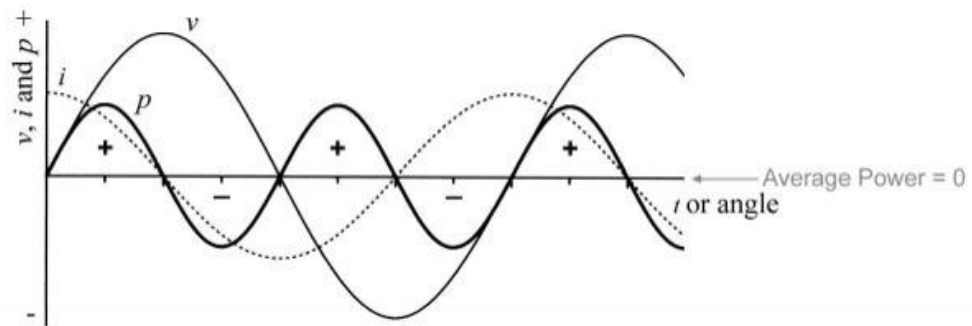
Gambar 2.22 Bentuk Gelombang Dari Beban Induktif

(Kurniawan, 2015)

2.2.9.3. Beban Kapasitif

Prinsip dari beban kapasitif adalah kebalikan dari beban induktif. Di mana jika beban induktif menghambat terjadinya perubahan dari nilai arus yang mengalir, maka pada beban kapasitif memiliki sifat untuk menghambat terjadinya perubahan pada nilai tegangan. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitor memiliki sifat seperti menyimpan tegangan listrik untuk sesaat.

Saat mendapatkan suplai tegangan AC, maka akan menyimpan dan melepaskan kembali tegangan tersebut sesuai dengan perubahan tegangan masukannya. Karena hal ini, arus akan akan mendahului tegangan atau *leading* sejauh 90° . Beban kapasitif ini biasanya terdapa pada peralatan elektronik di rumah-rumah seperti televisi, dan lain-lain.



Gambar 2.23 Bentuk Gelombang Beban Kapasitif Murni
(Kurniawan, 2015)

2.2.10 Pengaruh Beban Terhadap Sistem Eksitasi

Pada saat generator sinkron bekerja pada keadaan tanpa beban atau beban nol maka tidak ada arus yang mengalir melalui kumparan jangkar stator, akibatnya yang ada pada celah udara hanya fluksi arus medan rotor. Namun apabila generator sinkron diberi beban, maka arus jangkar akan mengalir dan membentuk fluksi jangkar. Fluksi jangkar ini kemudian akan mempengaruhi fluksi medan dan akhirnya akan menyebabkan berubahnya harga tegangan terminal generator sinkron. Reaksi ini yang kemudian dikenal dengan reaksi jangkar. Pengaruh yang timbul akibat dari fluksi jangkar dapat berupa distorsi penguatan (*magnetising*) maupun pelemahan (*demagnetising*) fluksi arus medan pada celah udara. Perbedaan pengaruh yang ditimbulkan fluksi jangkar tergantung pada beban dan faktor daya beban. Berikut pengaruh beban terhadap pengaturan sistem eksitasi:

2.2.10.1. Beban Resistif

Untuk beban resistif dengan $\cos \phi = 1$, maka pengaruh fluksi jangkar terhadap fluksi medan hanya sebatas mendistorsi tanpa mempengaruhi kekuatannya (*cross magnetising*). pada beban resistif, fluksi medan dari arus

eksitasi hanya mempengaruhi terhadap besarnya tegangan terminal dari generator.

Untuk beban resistif ini hanya mengkonsumsi daya nyata atau daya aktif saja. Sehingga ketika suatu generator dibebani oleh beban resistif, maka tegangan terminal dan putaran *prime mover* akan menurun. Dan untuk menjaga agar tegangan terminal generator tetap pada tegangan jaringan interkoneksi maka dapat diatasi dengan memperbesar fluksi medan dengan cara menambahkan besarnya arus eksitasi yang diinjeksikan ke dalam kumparan medan. Selain itu untuk mengatasi itu dapat dengan memperbesar bukaan dari *inlet valve* air.

2.2.10.2. Beban Induktif

Untuk beban induktif murni dengan $\cos \phi = 0$ dan bersifat *lagging*, maka arus akan tertinggal sebesar 90° dari tegangan. Hal ini menyebabkan fluksi yang dihasilkan oleh arus jangkar akan melawan fluksi arus medan. Hal itu akan menyebabkan reaksi jangkar bersifat *demagnetising* yang artinya pengaruh reaksi jangkar akan melemahkan fluksi arus medan.

Seperti yang sudah dijelaskan, bahwa beban yang bersifat induktif hanya mengkonsumsi daya reaktif saja. Oleh karenanya pada pembangkit, untuk meningkatkan besarnya daya reaktif (MVAR) yang dibangkitkan, maka dapat dilakukan dengan cara memperkuat fluksi medan yakni dengan menambahkan besarnya arus eksitasi yang diinjeksikan ke dalam kumparan medan pada generator.

2.2.10.3. Beban Kapasitif

Pada beban yang bersifat kapasitif murni dengan $\cos \phi = 0$ dan bersifat *leading*, maka arus akan mendahului tegangan sebesar 90° . Dan fluksi yang

dihasilkan oleh arus jangkar akan searah dengan fluksi arus medan, sehingga akan menyebabkan reaksi jangkar bersifat megnetising yang artinya pengaruh reaksi jangkar akan menguatkan fluksi arus medan.

Dengan terjadinya penguatan fluksi medan di kumparan generator, maka akan mengakibatkan terjadinya kenaikan tegangan terminal pada generator. Untuk menjaga agar tegangan terminal generator ini sama dengan tegangan jaringan interkoneksi, maka arus eksitasi yang disuplai ke kumparan medan rotor generator akan dikurangi. Sehingga apabila pemakaian beban kapasitif meningkat, maka arus eksitasi yang disuplai ke rotor pada generator sinkron akan dikurangi.