

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Berikut ini merupakan referensi penelitian yang pernah dilakukan untuk mendukung penulisan tugas akhir di antaranya yaitu:

Heri Irawan (2010) melakukan penelitian yang berjudul Sistem Penguatan Dengan Sikat (*Brush Excitation System*) Pada Generator Unit I PLTU Cilacap. Dari penelitiannya disimpulkan, pada sistem eksitasi yang baik mempunyai respon yang cepat apabila terjadi gangguan pada internal maupun eksternal yang dapat mempengaruhi kinerja pada generator sehingga nilai arus eksitasi harus dijaga selalu sesuai dengan arus dasar pada sistem eksitasi sehingga kestabilan sistem secara keseluruhan tetap stabil.

Syahputra Rudi (2012) melakukan penelitian yang berjudul Pengaruh Perubahan Arus Eksitasi Terhadap Tegangan Keluaran Generator Sinkron. Dari penelitian disimpulkan bahwasanya keluaran tegangan pada generator sinkron sangatlah dipengaruhi oleh besar kecilnya arus eksitasi yang diberikan. Tegangan keluaran pada generator sinkron akan berbanding lurus dengan nilai arus eksitasi yang diberikan. Penambahan beban menimbulkan tegangan keluaran pada generator mengalami penurunan. Hal tersebut memperlihatkan hubungan yang berbanding terbalik antara penamabahan arus beban (I_a) dengan tegangan keluaran generator sinkron.

1.2 Landasan Teori

2.2.1 Generator Sinkron

Perubahan energi dari bentuk mekanik ke bentuk listrik dan bentuk listrik ke bentuk mekanik yang disebut dengan konversi energi elektromagnetik. Generator sinkron atau yang lebih sering disebut alternator yaitu merupakan mesin listrik arus bolak-balik yang menghasilkan tegangan dan mesin arus bolak balik yang bekerja dengan cara mengubah energi yang sebelumnya adalah energi mekanik sehingga menjadi energi listrik dengan adanya induksi pada medan magnet. Membahas tentang dua energi tersebut dimana energi mekanis dapat diperoleh dari adanya putaran rotor yang digerakkan dari *prime mover* atau yang disebut penggerak pemula, berbeda dengan energi listrik yang diperoleh dari proses terjadinya induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya.

Definisi sinkron dari generator sinkron yang memiliki makna bahwasanya frekuensi listrik yang dihasilkan dari generator sinkron sesuai dengan putaran mekanis generator tersebut. Kecepatan sinkron tersebut dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar yang ada pada stator. Letak kumparan medan magnet pada generator sinkron terletak pada bagian rotornya, dan kumparan jangkarnya terletak pada stator. Rotor pada generator sinkron terdiri dari belitan medan yang memiliki suplai arus searah akan menghasilkan

medan magnet yang diputar dengan kecepatan putar rotor. Berikut persamaan hubungan antara medan magnet pada mesin dengan frekuensi listrik pada stator, dapat dilihat pada persamaan sebagai berikut:

$$f = \frac{n \cdot p}{120} \dots\dots\dots(2.1)$$

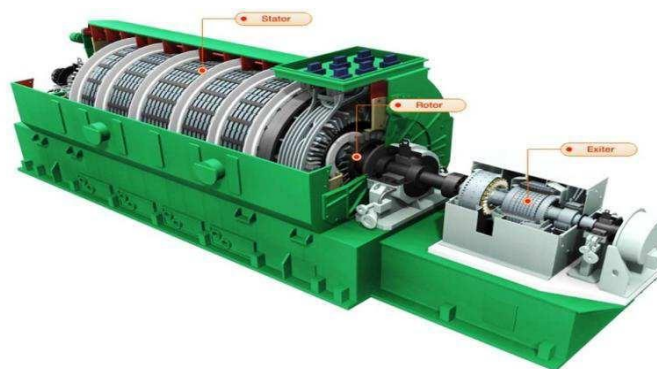
Keterangan:

f = frekuensi listrik (Hz)

n = kecepatan putaran rotor (rpm)

p = jumlah kutub

Generator sinkron dapat dijumpai pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik yang memiliki kapasitas yang relatif besar. Beberapa contohnya seperti pada PLTA, PLTU, PLTD dan pembangkit listrik lainnya.



Gambar 2.1 Generator Sinkron

2.2.2 Prinsip Kerja Generator

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

1. Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi tertentu yang akan mensuplai arus searah terhadap kumparan medan. Dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumparan medan maka 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 pada kecepatan nominalnya.
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 pada kumparan jangkar yang terletak di stator akan dihasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut, hal tersebut sesuai dengan persamaan 2.2 berikut:

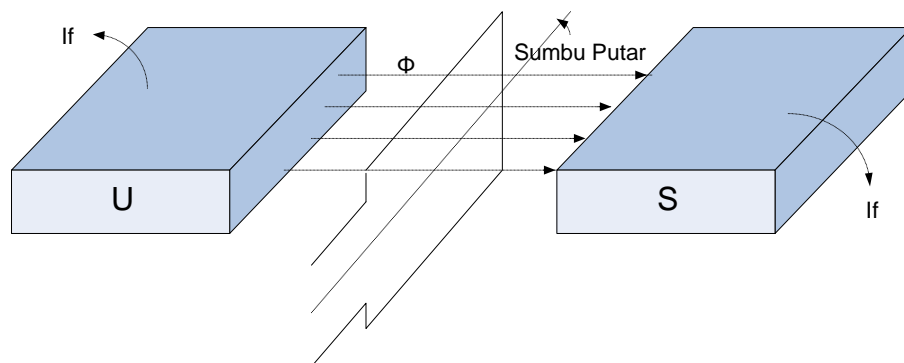
$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \dots \dots \dots (2.2)$$

Pada dasarnya prinsip kerja generator yaitu berdasarkan hukum *faraday*, apabila suatu konduktor berputar atau bergerak pada suatu medan sehingga konduktor tersebut akan memotong garis-garis gaya magnet sehingga

menimbulkan gaya gerak listrik pada konduktor tersebut. hal tersebut terjadi dikarenakan konduktor bergerak tidak lagi tegak lurus, oleh sebab itu akan membentuk beberapa sudut terhadap garis-garis gaya atau fluks. Agar dapat terjadinya gaya gerak listrik (GGL) yaitu diperlukan dua kategori masukan, sebagai berikut:

1. Masukan tenaga mekanis yang dihasilkan dari (*prime mover*) atau sering disebut juga dengan penggerak mula
2. Arus masukan (I_f) merupakan arus searah yang keluarannya berupa medan magnet yang dapat diatur dengan mudah.

Berikut ini penjelasan secara sederhana cara pembangkitan listrik dari sebuah generator.



Gambar 2.2 Sistem pembangkitan Generator Sinkron

Keterangan:

- I_f : Arus medan
- U – S : Kutub generator
- Sumbu Putar : Poros Generator
- Φ : Fluks medan

Apabila rotor generator berputar pada kecepatan nominalnya, dimana putaran tersebut diperoleh dari *prime mover* (penggerak mula), lalu pada

kumparan medan rotor diberikan arus medan (I_f), maka garis-garis fluksi yang dihasilkan melalui kutub-kutub inti akan menghasilkan tegangan induksi pada kumparan jangkar stator sebesar:

$$E_a = C \cdot n \cdot \Phi \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan:

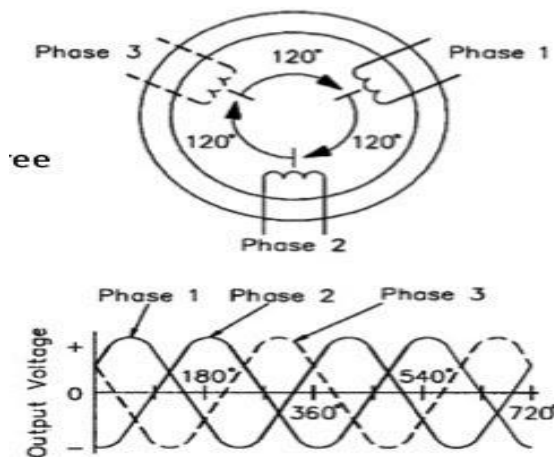
E_a :Tegangan induksi yang dibangkitkan pada jangkar generator

C : Konstanta

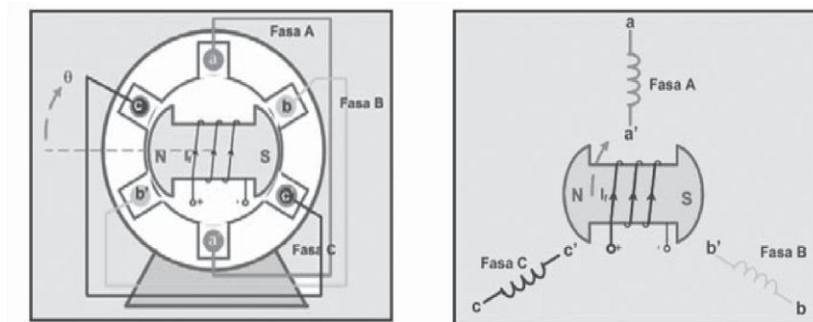
n : Kecepatan Putar

Φ : Fluksi yang dihasilkan oleh arus penguat (arus medan)

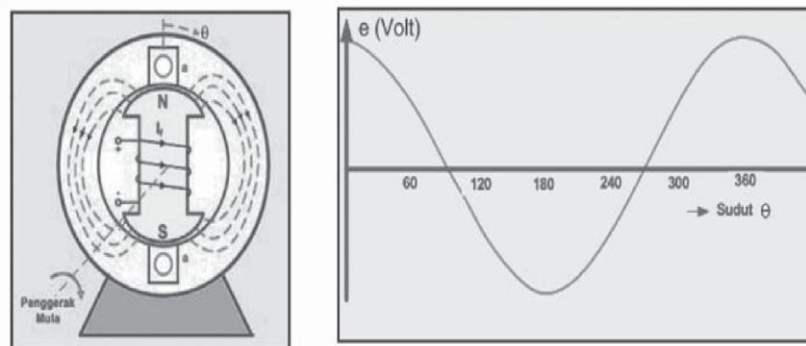
Ketika generator digunakan untuk melayani beban, pada kumparan jangkar generator akan mengalir arus. Pada generator tiga fasa, setiap belitan jangkar akan mempunyai beda fasa yaitu sebesar 120° .



Gambar 2.3 Kumparan Tiga Fasa



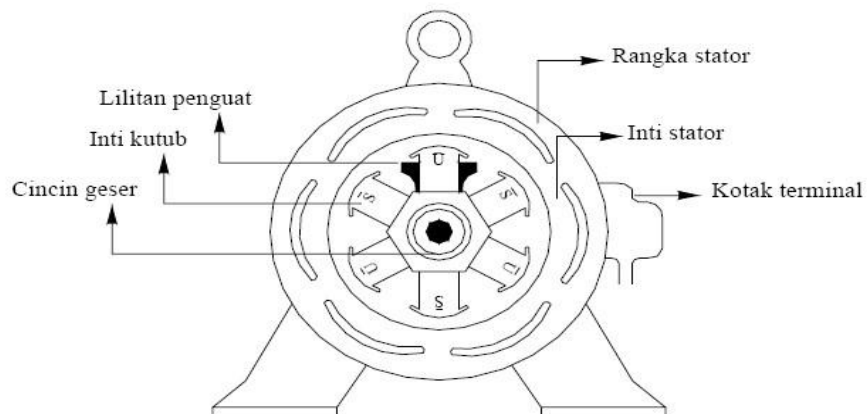
Gambar 2.4 Diagram Generator AC Tiga Fasa Dua Kutub



Gambar 2.5 Diagram Generator AC Satu Fasa Dua Kutub

2.2.3 Konstruksi Generator Sinkron

Secara umum konstruksi pada generator sinkron terbagi menjadi dua bagian utama yaitu stator merupakan bagian dari generator yang diam dan rotor merupakan bagian dari generator yang berputar.



Gambar 2.6 Konstruksi Generator Sinkron

2.2.3.1 Stator

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

a) Rangka stator (*Stator Frame*)

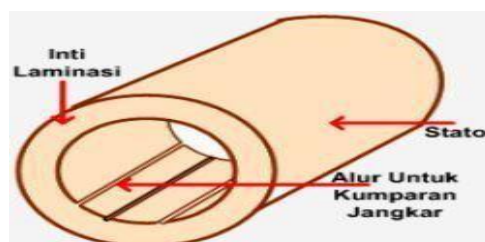
Rangka stator yaitu memiliki fungsi sebagai pemegang inti jangkar maupun stator. Rangkaian stator yaitu merupakan perangkat keras yang biasanya terbuat dari elemen dengan plat baja. Rangkaian tersebut ditopang dengan pelat beton di dalam rangkaian pembangkit atau yang disebut dengan *power house*. Pemasangan rangkaian stator tersebut dilakukan dengan cermat, agar diperoleh hasil kedudukan yang sesuai dengan apa yang diinginkan agar dapat menahan kondisi maupun hal-hal yang tidak menguntungkan baik pada saat gangguan yang diakibatkan oleh hubung singkat maupun bencana alam.

b) Inti Stator (*Stator Core*)

Inti stator terbuat dari laminasi-laminasi besi khusus yang tercampur dengan baja, hal tersebut bertujuan yaitu untuk memperkecil rugi arus eddy. Di setiap laminasi diberi isolasi dan di antaranya dibuat celah yaitu sebagai tempat aliran udara.

c) Kumbaran Stator (*stator winding*)

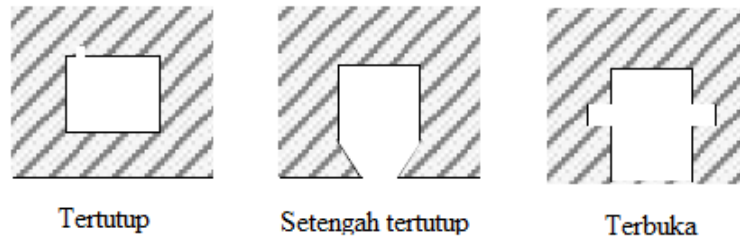
Kumbaran stator terletak pada *slot* atau alur yang terdapat di inti stator, kumbaran stator yaitu terbuat dari tembaga yang memiliki konduktivitas tinggi. Kumbaran tersebut dirancang sedemikian rupa agar rugi-rugi yang ditimbulkan oleh arus sirkulasi dapat seminimal mungkin, sehingga kebocoran arus yang terjadi pada lilitan kumbaran dapat dihindari. Sehingga generator mampu menahan tanpa menimbulkan kerusakan yang terjadi pada kumbaran stator dan isolasinya.



Gambar 2.7 Alur Stator dan Inti Stator

d) *Slot* (Alur) dan Gigi

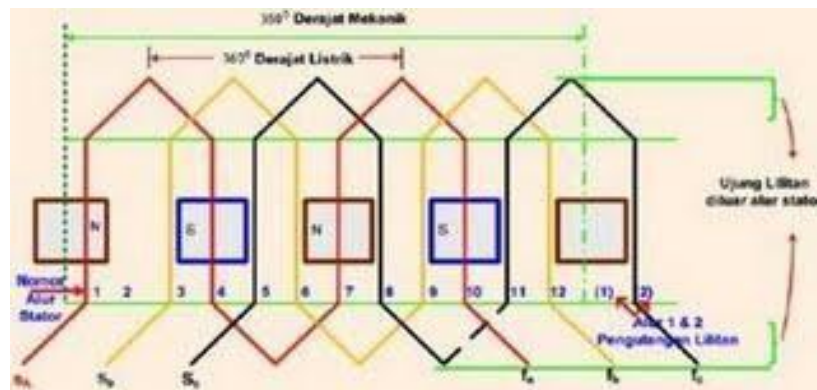
Slot yaitu merupakan tempat konduktor berada yang terletak pada bagian dalam lilitan stator. Terdapat 3 jenis dari bentuk *slot* yaitu *slot* tertutup, *slot* setengah tertutup dan *slot* terbuka.



Gambar 2.8 Bentuk slot (alur)

Berdasarkan kumparan atau belitan jangkar pada stator, secara umum terbagi menjadi dua jenis yang banyak digunakan pada mesin sinkron tiga fasa yaitu:

- 1) *Single Layer Winding* (Belitan Satu Lapis)
 - 2) *Double Layer Winding* (Belitan Berlapis Ganda)
- 1) *Single Layer Winding* (Belitan Satu Lapis)



Gambar 2.9 *Single Layer Winding* (Belitan Satu Lapis)

Generator Sinkron Tiga Fasa

Pada gambar di atas merupakan belitan satu lapis generator tiga fasa dikarenakan adanya satu sisi lilitan di dalam masing-masing alur. Adapun bila kumparan tiga fasa dimulai pada Sa, Sb, dan Sc dan berakhir pada

Fa, Fb dan Fc dapat disatukan dengan menggunakan dua cara, yaitu hubung bintang dan segitiga.

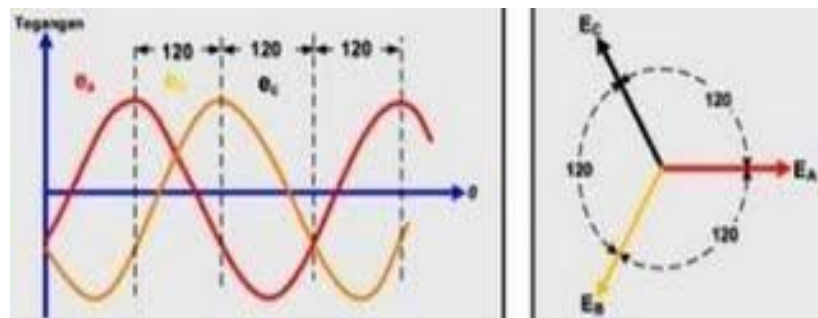
Untuk dapat melihat arah dari putaran rotor dapat dilihat seperti pada gambar di bawah, di mana searah dengan jarum jam. Pada urutan fasanya dihasilkan oleh suplai tiga fasa adalah ABC hal ini disebut juga dengan urutan fasa positif, oleh karena itu tegangan maksimum pertama terjadi yaitu pada fasa A, lalu fasa B dan fasa C.

Sedangkan untuk kebalikannya arah putaran rotor sendiri yaitu berlawanan dengan arah jarum jam, dimana dihasilkan dalam urutan ACB yang disebut juga dengan urutan fasa negatif. Jadi gaya gerak listrik (GGL) di bangkitkan sistem tiga fasa yaitu secara simetris.

$$E_A = E_A \angle 0^\circ \text{ Volt}$$

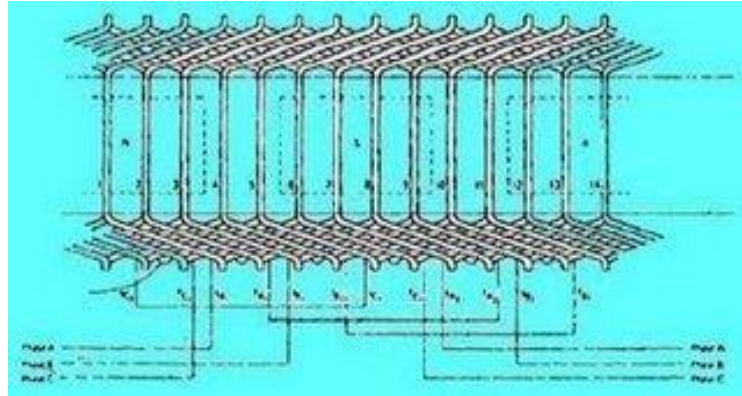
$$E_B = E_B \angle -120^\circ \text{ Volt}$$

$$E_C = E_C \angle -240^\circ \text{ Volt}$$



Gambar 2.10 Urutan fasa ABC

2) *Double Layer Winding* (Belitan Berlapis Ganda)



Gambar 2.11 *Double Layer Winding* (Belitan Berlapis Ganda) Generator Sinkron Tiga Fasa

Pada gambar di atas memperlihatkan bagian dari sebuah kumparan jangkar yang pada umumnya telah banyak digunakan. Dikatakannya belitan berlapis ganda dikarenakan masing-masing alur terdapat dua sisi lilitan dan masing-masing lilitan mempunyai lebih dari satu putaran. Adapun bagian lilitan yang tidak terletak ke dalam alur dan tidak ada tegangan sering disebut juga dengan *winding overhang*,

2.2.3.2 Rotor

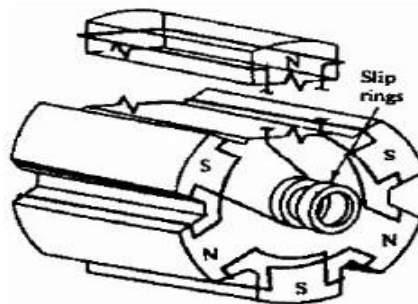
Rotor yaitu merupakan bagaian dari generator yang berputar, dengan fungsi sebagai tempat belitan medan (eksitasi) yang berbentuk kemagnetan listrik kutub utara-selatan pada inti rotor. Pada bagaian konstruksi rotor terdapat dua tipe yaitu:

- a) *Salient Pole* (Kutub Menonjol)
- b) *Non Salient Pole* (Kutub Silindris)

a) *Salient Pole* (Kutub Menonjol)

Jenis *salient pole*, pada konstruksi kutub magnet yaitu menonjol keluar dari permukaan rotor. Adapun rotor tipe ini mempunyai kutub yang jumlahnya banyak dan putarannya rendah. kutub menonjol biasanya ditandai dengan rotor berdiameter besar, dan mempunyai sumbu yang pendek. Kontruksi ini dapat menimbulkan rugi angin yang cukup besar apabila putarannya sangat tinggi dan menimbulkan suara kebisingan.

Jenis *salient pole* umumnya digunakan pada generator dengan kecepatan putaran rendah. Rotor jenis ini mempunyai kutub yang terdiri dari lapisan-lapisan besi, yang bertujuan agar mengurangi panasnya yang diakibatkan arus eddy. Dimana jenis ini seringkali digunakan pada generator yang mempunyai tipe penggerak utama seperti turbin uap.

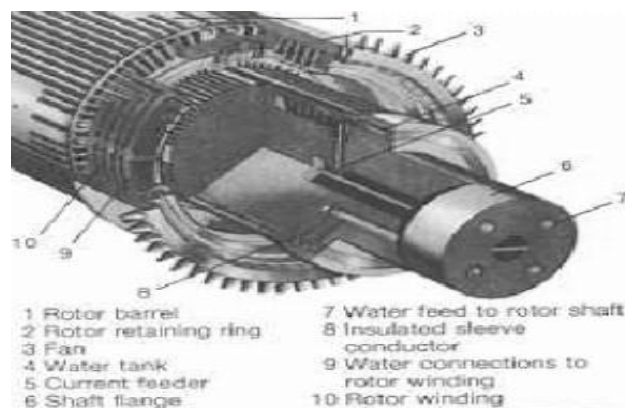


Gambar 2.12 Konstruksi *Salient Pole* (Kutub Menonjol)

b) *Non Salient Pole* (Kutub Silindris)

Jenis *non salient pole*, pada konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. pada belitan-belitan medan dipasang alur-alur di sisi luarnya dan terhubung seri dengan slip yang terhubung pada eksitasi.

Pada rotor kutub silinder umumnya digunakan pada kecepatan yang tinggi. Rotor jenis ini baik digunakan pada kecepatan putaran yang tinggi dikarenakan konstruksinya mempunyai kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putaran tinggi. Di sisi lain distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus, sehingga lebih baik dari pada *salient pole* atau kutub menonjol.



Gambar 2.13 Konstruksi *Non Salient Pole* (Kutub Silindris)

2.2.3.3 Poros

Poros generator merupakan suatu bagian stasioner yang berputar, poros tersebut terbuat dari besi pejal biasanya diperlebar bulat dan terpasang elemen-elemen seperti roda gigi (gear), cincin geser, *pulley*, dan *flywheel*. Dalam operasinya pembangkitan tenaga listrik, poros generator dikopel dengan poros turbin. Poros tersebut berfungsi untuk mengubah tenaga kinetik pada aliran air yang keluar pada sudut-sudut menjadi tenaga mekanik yang putarannya berupa poros turbin. Pada bagian yang terdapat di dalam poros rumah generator dilengkapi juga dengan rangkaian

laker penyetel (*sealing arrangement*), untuk bertujuan mencegah adanya kotoran karena uap ke dalam generator.



Gambar 2.14 Poros Generator dan Turbin pada PLTA Panglima
Besar Soedirman

2.2.3.4 *Slip Ring* (Cincin Geser)

Slip ring atau sering disebut dengan cincin geser terbuat dari bahan yang tahan terhadap panas dan tidak mudah aus karena cincin geser digunakan sebagai pengaliran arus searah (DC) menuju kumparan medan.

2.2.3.5 *Air Gap* (Celah Udara)

Air gap atau celah udara yaitu merupakan ruang kosong antara rotor dan stator yang berputarnya jangkar dalam medan magnet. Celah udara tersebut dapat mempengaruhi *output* tegangan induksi pada stator. Celah udara juga dapat berfungsi mengalirkan udara antara stator dan kutub sedemikian rupa, oleh karena itu distribusi fluks cukup merata dan pada kecepatan rotor mencapai nilai nominalnya. Selain itu juga celah udara berfungsi sebagai pendingin.

2.2.3.6 Rumah Generator

Rumah generator yaitu terdiri dari dinding konstruksi beton bertulang. Bagian-bagian konstruksi secara umumnya berfungsi sebagai *power house* atau ruang pembangkit. Pada ruangan ini dirancang dengan sistem rancangan tertutup dimana bebas dari udara luar. Sehingga udara pendingin bersih. Rumah generator yaitu berbentuk *oktagonal* dimana dilengkapi dengan peralatan sistem pendingin atau *cooler* generator.

2.2.3.7 Shaft Alignment (penjajar poros)

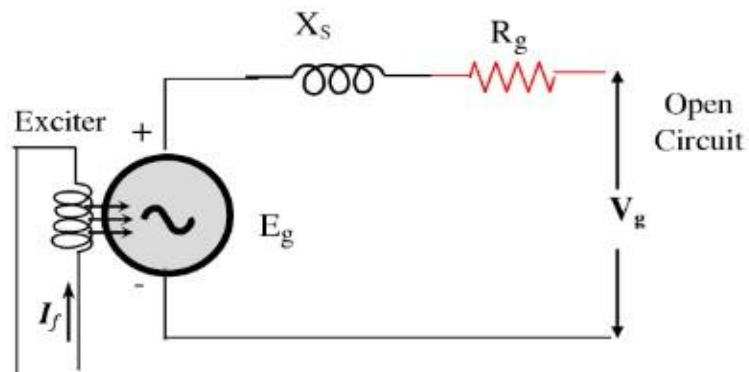
Sebagai penompang kelurusan poros, maka ketika beroperasi dilengkapi dengan *guide bearing* dan sebagai penompang beban dari generator yaitu menggunakan *trush bearing*.

2.2.4 Karakteristik Generator Sinkron

Mesin listrik mempunyai dua kurva karakteristik yang digunakan agar dapat menentukan parameter mesin. Dimana karakteristik tersebut antara lain *open circuit* dan karakteristik *short circuit* atau disebut juga dengan hubung singkat.

1. Karakteristik *Open Circuit*

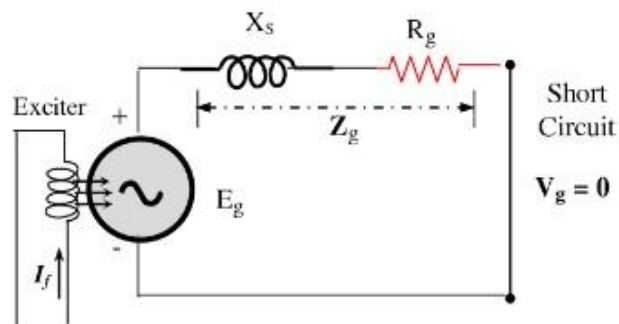
Seperti pada mesin searah karakteristik kurva magnetisasinya berasal dari mesin sinkron adalah kurva pada perubahan tegangan terminalnya atau GGL sebagai perubahan fluks atau arus medan eksitasi.



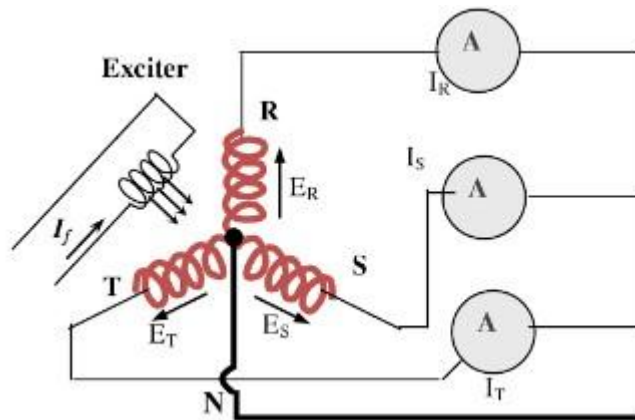
Gambar 2.15 Rangkaian Generator Sinkron Pada Kondisi *Open Circuit*

Dengan nilai arus medan *excite* dinaikkan hingga I_f tertentu maka pada tegangan terminal akan naik dari 0, dan akan bertambah secara linear, sampai pada suatu titik arus eksitasi terjadi perubahan arah tegangan yang tidak lagi linear dan menuju pada suatu kondisi stasioner atau pada kondisi yang jenuh, dan kemudian ketika I_f terus dinaikkan hingga pada titik tertentu maka tegangan tersebut tidak lagi mengalami perubahan nilai atau konstan.

2. Karakteristik *short circuit* (Hubung Singkat)



Gambar 2.16 Rangkaian Generator Pada Kondisi Hubung Singkat Satu fasa



Gambar 2.17 Rangkaian Generator Pada Kondisi Hubung Singkat Tiga Fasa

Karakteristik hubung singkat ini merupakan istilah dari hubung singkat antar arus fasa sebagai arus medan, dimana pada ketiga fasa generator dihubung singkat pada kecepatan yang konstan.

Dari persamaan umum generator didapat sebagai berikut:

$$E_a = V_g + I_g(R_g + jX_s) \dots \dots \dots (2.4)$$

Ketika generator mengalami hubung singkat, nilai pada tegangan terminalnya 0, sehingga :

$$E_a = I_g(R_g + jX_s) \dots \dots \dots (2.5)$$

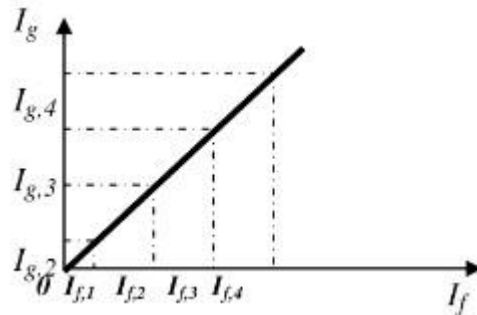
Kondisi ini $(R_g + jX_s)$, adalah konstan = K_2 , dan $I_g = I_{hs}$, sehingga :

$$K_1 I_f = I_{hs} \cdot K_2 \dots \dots \dots (2.6)$$

$$I_{hs} = \frac{K_1}{K_2} I_f \dots \dots \dots (2.7)$$

Pada persamaan di atas, berdasarkan pengukuran hubung singkat yaitu dengan penambahan arus medan dari kondisi 0, hingga batas yang dibutuhkan.

Untuk karakteristik hubung singkat dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 2.18 Karakteristik Ketika Kondisi Hubung Singkat

2.2.5 Sinkronisasi Pada Generator

Untuk melakukan sinkronisasi pada generator mempunyai persyaratan yang harus dipenuhi agar bekerja seperti halnya generator. Berikut ini persyaratan yang harus di penuhi sebelum terhubung ke sistem di antaranya yaitu sebagai berikut:

1. Frekuensi Pada Kedua Alternator Harus Sama

Sebelum melakukan proses sinkronisasi, pada frekuensi tegangan keluarannya generator harus sama dengan frekuensi sistem. Hal tersebut harus sama dikarenakan bila semakin besar perbedaan frekuensi maka semakin besar pula sentakan mekanis yang akan diterima oleh generator. Agar dapat mencegah terjadinya kerusakan pada sistem maka perbedaan frekuensi sistem dengan frekuensi generator diubah sekecil mungkin. Untuk menyamakan frekuensi tersebut, maka pada putaran generator harus diatur dengan mengatur katup *governor* (aliran uap masuk turbin).

Untuk standar frekuensi yang digunakan di Indonesia yaitu 50 Hz. Sesuai standar dari PLN, frekuensi sebaiknya tidak melampaui ± 0.5 dari 50 Hz, yaitu: 49,5 - 50,5 Hz atau 2970 - 3030 Rpm. (Anonim, 2016).

2. Urutan Sudut *Phase* Harus Sama

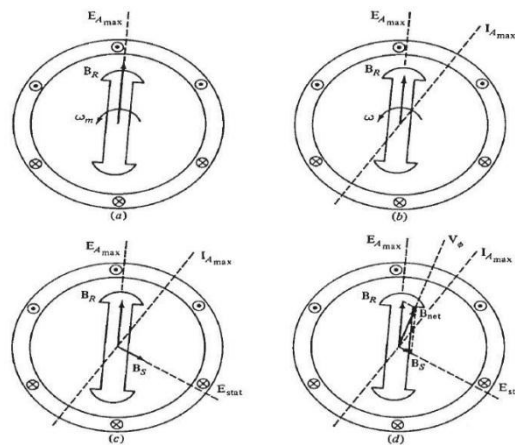
Untuk urutan sudut *phase* pada generator terhadap jaringan jala-jala harus sama, yaitu dimana urutannya U,V dan W dari generator urutannya yaitu harus sama dengan *phase* R,S dan T jala-jala. Apabila urutan *phase* berbeda anatara generator terhadap jaringan, maka akan menimbulkan sentakan perpindahan daya antara mesin dengan jaringan. Hal tersebut dapat mengakibatkan terjadinya gangguan dan kondisi sirkulasi arus antara mesin dengan jaringan dimana besarnya ditentukan pada perbedaan antara mesin dan jaringan tersebut.

3. Tegangan Alternator Harus Sama

Apabila terjadi perbedaan pada tegangan, generator sangatlah sensitif terhadap pembebanan. Oleh karena itu untuk pengaturan generator sinkron dapat dilakukan yaitu dengan penurunan arus eksitasi yang masuk pada *field winding* (kumparan medan) generator. Hal tersebut bertujuan agar tidak menimbulkan kerusakan pada mekanis generator. Akibat perbedaan tegangan maka akan memicu loncatan bunga api sehingga dapat merusak generator. pada saat proses paralel generator, tegangan generator lebih besar dengan tegangan pada jaringan, maka generator akan menerima lonjakan beban *logging* (induktif) bila dalam jumlah yang sangat besar dapat menyebabkan panas pada belitan stator.

2.2.6 Reaksi Jangkar Generator Sinkron

Pada saat generator bekerja pada beban nol, maka tidak ada arus yang mengalir melalui kumparan jangkar, sehingga pada celah udara hanya fluksi arus medan rotor, namun ketika generator diberikan beban, arus jangkar I_a akan mengalir sehingga membentuk fluksi jangkar. Pada fluksi jangkar ini lalu mempengaruhi fluksi arus medan dan kemudian menimbulkan perubahan tegangan terminal generator sinkron. Reaksi tersebut dikenal sebagai reaksi jangkar, berikut ini gambar reaksi jangkar dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 2.19 Model Reaksi Jangkar

Dari gambar tersebut menjelaskan bahwa:

1. Pada saat medan magnet yang berputar maka akan memperoleh tegangan induksi berupa $E_{A_{max}}$
2. Arus *lagging* yang dihasilkan oleh tegangan resultan pada saat generator berbeban induktif

3. Arus stator akan memperoleh medan magnet sendiri BS dan lilitan stator pada tegangan *Estator*
4. Pada vector penjumlahan BS dengan BR maka memperoleh B_{net} sedangkan pada penjumlahan *Estator* dengan E_{Amax} yaitu memperoleh V_F pada keluarannya.

Reaksi jangkar dapat memperoleh pengaruh berupa distorsi penguatan atau dengan kata lain *magnetising* dan pelemahan atau *demagnetising* fluksi arus medan pada celah udara. Adapun pengaruh yang disebabkan oleh reaksi jangkar sebagai berikut:

1. Beban resistif ($\cos\varphi = 1$)

Adapun fluksi medan terhadap pengaruh fluksi jangkar yaitu hanyalah sebatas mendistorsinya saja tidak mempengaruhi kekuatannya (*cross magnetising*)

2. Beban induktif murni ($\cos\varphi = 0$ lagging)

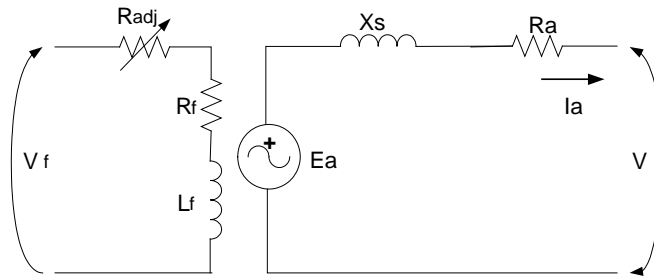
Pada beban induktif murni ini, arusnya akan tertinggal kisaran 90° yaitu dari tegangan fluksi yang diperoleh dari arus jangkar (ϕ_a) akan melawan fluksi arus medan (ϕ_m) sehingga pada fluks resultan akan berkurang pada celah udara dari fluks medan. Dengan istilah lain reaksi jangkar akan *demagnetizing* yaitu pada pengaruh reaksi jangkar akan membelahkan fluksi arus medan atau dengan kata lain *demagnetising effect*.

3. Beban Kapasitif Murni ($\cos\phi = 0$ lagging)

Ketika pada saat leading, arus mendahului tegangan mencapai 90° . Fluks yang didapat oleh arus jangkar akan searah dengan fluks arus medan, sehingga fluks resultan pada celah udara bertambah dari fluks medan. Adapun yang terjadi pada reaksi jangkar akan menimbulkan *magnetizing* yaitu pengaruh reaksi jangkar meningkatkan fluks arus medan atau dengan kata lain *magnetizing effect*).

2.2.7 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

Stator merupakan belitan jangkar yang terbuat dari tembaga. Belitan-belitan tersebut diletakkan pada alur-alur (slot), dimana belitan konduktor tersebut mengandung tahanan (R_a) dan induktansi sendiri (L). Arus akan mengalir menuju konduktor ketika saat bekerja, sehingga membentuk sebuah fluks jangkar yang membangkitkan medan putar. Pada fluks jangkar tersebut akan berinteraksi dengan fluks medan sehingga menimbulkan terjadinya konversi dari energi listrik menjadi energi mekanik. Reaktansi bocor (X_A) merupakan suatu kondisi dimana masih terdapat fluks sisa yang tidak dapat berinteraksi dengan fluks medan yang timbul dikarenakan akibat adanya pengaruh reaktansi reaksi jangkar X_{ar} dan reaktansi bocor jangkar X_{la} maka rangkaian ekuivalen suatu generator sinkron dapat dibuat seperti gambar berikut ini:



Gambar 2.20 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

Keterangan:

V = Tegangan Terminal Generator

E = Tegangan Induksi

V_f = Tegangan Eksitasi

R_f = Tahanan Belitan Medan

L_f = Induksi Belitan Medan

X_{ar} = Reaktansi reaksi jangkar

X_{la} = Reaktansi Bocor Belitan Jangkar

I_a = Arus Jangkar

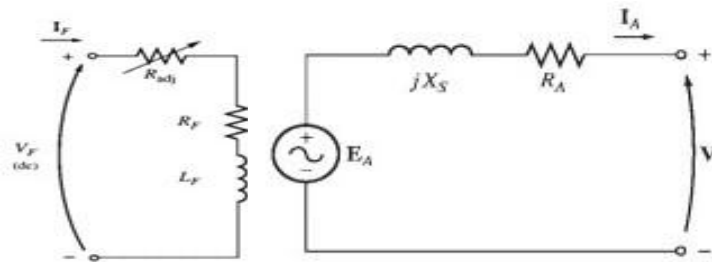
R_{adj} = Tahanan Variable

Dari gambar di atas dapat ditulis persamaan tegangan generator sinkron yaitu:

$$E_a = V + jX_{ar}I_a + jX_{la}I_a + R_a I_a \dots\dots\dots(2.8)$$

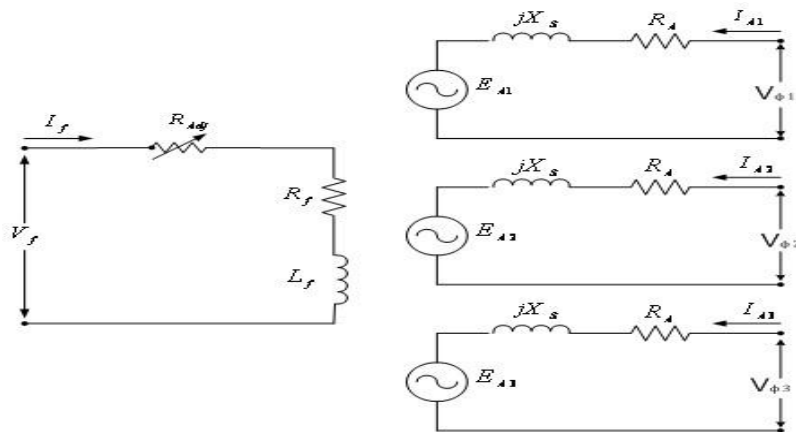
Menyatakan reaktansi reaksi jangkar dan reaktansi fluks bocor sebagai reaktansi sinkron, atau $X_s = X_{ar} + X_{la}$ maka persamaannya dapat dilihat pada gambar berikut ini:

$$V = E_a - j X_s I_a - R_a I_a \text{ [Volt]} \dots\dots\dots(2.9)$$



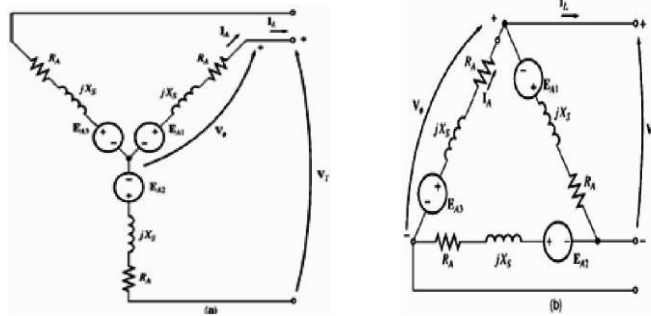
Gambar 2.21 Penyederhanaan Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron

Pada tegangan yang dibangkitkan generator sinkron adalah tegangan bolak-balik (AC) tiga fasa, maka gambar yang memperlihatkan hubungan tegangan induktif perfasa dengan terminal generator dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 2.22 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron Tiga Fasa

Sedangkan pada rangkaian ekivalen generator sinkron tiga fasa dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 2.23 Rangkaian Ekvivalen Generator Sinkron

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

2.2.8 Penguatan Tegangan

Nilai pada tegangan generator sinkron dalam keadaan tanpa beban akan lebih tinggi dari pada tegangan generator sinkron dalam keadaan berbeban. Nilai relatif, yaitu merupakan nilai selisih antara tegangan dalam keadaan tanpa beban dengan keadaan beban penuh, hal ini sering disebut juga dengan *voltage regulation* (VR) atau regulasi tegangan.

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan:

VR = *voltage regulation* (regulasi tegangan)

V_{NL} = *no load voltage* (tegangan tanpa beban)

V_{FL} = *full load voltage* (tegangan beban penuh)

Apabila pada generator diberi beban yang berubah-ubah maka besarnya tegangan terminal V akan berubah-ubah pula, hal tersebut dikarenakan adanya kerugian tegangan pada:

1) Resistansi Jangkar

Resistansi jangkar/fasa R_a mengakibatkan kerugian pada tegangan jatuh/fasa dan I .

2) Reaktansi Bocor Jangkar

Ketika arus mengalir melewati penghantar jangkar, sebagian fluks tidak mengimbas pada jalur yang telah ditentukan, hal ini lah yang disebut juga dengan “fluks bocor”.

Saat ini generator dirancang dan dibuat untuk tegangan yang bervariasi dikarenakan adanya variasi beban dan arus jangkar yang menimbulkan *voltage drop* (turunnya tegangan) pada kumparan jangkar yang bervariasi pula. Jatuhnya tegangan impedansi tersebut tergantung pada faktor daya beban dan besar arus. Dengan pengaturan arus eksitasi, tegangannya dapat diatur dengan sesuai kebutuhan.

Pada sistem penguatan dapat digolongkan berdasarkan cara penyediaan tenaganya, yaitu:

1. Sistem penguatan sendiri.
2. Sistem penguatan terpisah.

Generator yang mempunyai kapasitas besar umumnya digunakan untuk sistem penguatan sendiri. Sistem penguatan tersebut digunakan pada generator *brushless alternator* (tanpa sikat). Pada generator jenis ini mempunyai exiter yang kumparan jangkarnya pada rotor dan kumparan medannya pada stator. Arus penguatan diperoleh dari induksi magnet sisa (remanensi) pada stator generator

utama yang diberikan oleh stator generator penguat. Arus tersebut diatur terlebih dahulu oleh AVR (*automatic voltage regulator*) merupakan alat pengatur tegangan yang bekerja secara otomatis. Dalam hal ini AVR melakukan pengaturan tegangan. Arus yang dihasilkan oleh rotor generator penguat akan disearahkan yaitu dengan menggunakan dioda putar (*rotating diode*) yang ikut berputar dengan kedua rotor generator yang berputar. Sistem penguatan sendiri dipasang berada pada ujung poros generator utamanya.

2.2.9 Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron

Sistem eksitasi berfungsi untuk menjaga tegangan maupun daya reaktif pada generator agar nilai hasilnya keluarannya sesuai dengan apa yang diinginkan. Kenaikan suatu daya reaktif pada sisi beban akan menimbulkan penurunan magnitude pada tegangan terminal. Pada penurunan tegangan terminal tersebut kemudian akan disensor dengan potensial transformator dan selanjutnya tegangan terminal tersebut akan disearahkan serta dibandingkan dengan suatu nilai acuan (laksono, 2014). Eksitasi ataupun penguatan medan magnet merupakan bagian yang penting dalam sebuah generator sinkron. Tidak hanya menjaga tegangan terminal selalu konstan namun juga harus merespon terhadap adanya perubahan beban yang secara tiba-tiba.

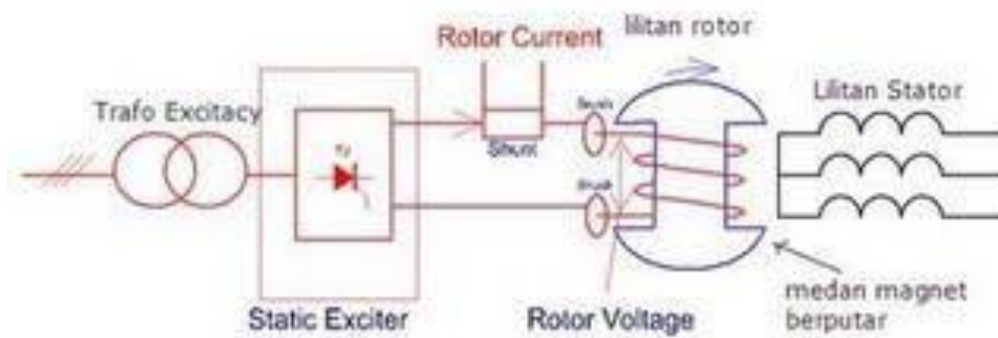
Sistem eksitasi pada generator besar tegangan listrik yang diperoleh pada generator sebanding dengan besarnya medan di dalamnya. Adapun pada besarnya medan magnet ini sebanding dengan besarnya arus yang dibangkitkan. Oleh karena itu, sistem eksitasi dapat dikatakan sebagai sebuah sistem *amplifier*, dikarenakan jumlah kecil yang mampu mengontrol sejumlah daya yang besar.

Dimana prinsip ini menjadi acuan untuk mengontrol tegangan generator, ketika tegangan sistem mengalami penurunan maka arus eksitasi harus ditambah, sedangkan ketika tegangan sistem terlalu tinggi maka arus eksitasi dapat diturunkan.

Selain itu juga sistem eksitasi generator yang sering digunakan memiliki berbagai tipe, setiap tipe eksitasi generator memiliki karakteristik yang berbeda-beda pula. Oleh karena itu dengan adanya berbagai tipe dari sistem eksitasi tersebut, maka dibutuhkan studi terlebih dahulu untuk memahami pengoperasian agar berjalan efektif dan efisien pada karakteristik dari setiap tipe eksitasi tersebut. selain itu juga eksitasi terdiri dari dua jenis sistem eksitasi menggunakan sikat (*brush excitation*) yaitu yang terdiri sistem eksitasi statis dan eksitasi konvensional dan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*) yang menggunakan sistem parameter magnet generator. berikut ini penjelasan mengenai jenis-jenis dari sistem eksitasi tersebut:

1. Sistem Eksitasi *Brush Excitation* (Menggunakan Sikat)

Sistem eksitasi menggunakan sikat, yang sumber tenaga listriknya berasal dari generator DC atau generator arus bolak-balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan *rectifier*. *Output* tegangan generator ini digunakan sebagai pengontrol kumparan pada medan *main exciter*. Dalam hal ini *slip ring* dan sikat arang digunakan untuk mengalirkan arus eksitasi dari *main exciter* ke rotor generator, demikian pula pada arus yang sumbernya berasal dari *pilot exciter* ke *main exciter*.



Gambar 2.24 Sistem Eksitasi Brush Excitation (Menggunakan Sikat)

(menggunakan sikat) yaitu:

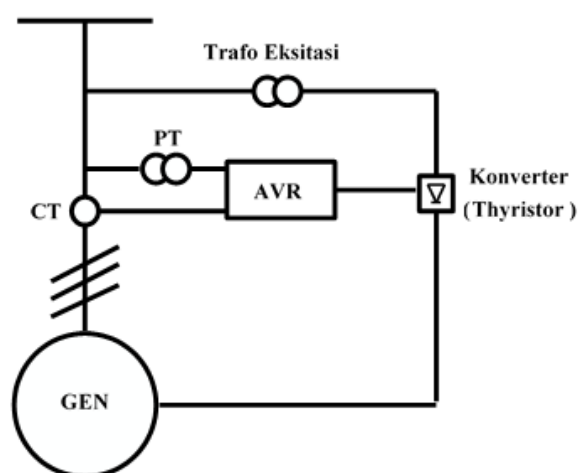
1) Sistem Eksitasi Statis

Sistem eksitasi statis yaitu merupakan sistem eksitasi yang menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak (*static*), peralatan tersebut berarti diam dan tidak ikut berputar bersamaan dengan rotor generator sinkron. Sistem eksitasi ini biasanya disebut juga dengan *self excitation* yaitu merupakan sistem eksitasi yang tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi tersebut. Sumber dari sistem eksitasi statis ini berasal dari tegangan keluaran pada generator itu sendiri yang telah disearahkan terlebih dahulu yaitu dengan menggunakan penyearah *thyristor*.

Ketika saat kondisi mulanya pada rotor terdapat sedikit sisa magnet, magnet sisi ini lah yang akan menimbulkan tegangan pada stator. Sehingga hasil tegangan tersebut akan masuk ke dalam penyearah dan dimasukan kembali ke rotor. Oleh sebab itu medan magnet yang dihasilkan semakin besar dan teganga AC akan naik. Sehingga siklus ini lah yang akan terjadi

berulang-ulang dan terus menerus hingga mencapai pada tegangan nominal yang dibutuhkan oleh generator dalam proses pembangkitan. Adapun dalam proses penyearahan mempunyai pengaturan sehingga pada tegangan generator dapat diatur konstan. Dalam pengaturan tersebut biasanya sering dilakukan dengan peralatan yang disebut juga dengan AVR.

Pada sistem eksitasi statis jauh lebih baik dibandingkan dengan sistem eksitasi konvensional yang menggunakan arus searah untuk eksiter. Karena sistem eksitasi statis memiliki keandalan yang tinggi. Sistem eksitasi ini pada kondisi awal dimana generator belum mampu menghasilkan tegangan keluaran sehingga digunakanlah *battery* sebagai energi awalan pada sistem eksitasi. Proses ini lah yang sering disebut juga dengan *field flashing*, dimana proses ini *battery* menginjeksikan arus inisial eksitasi pada rotor generator. Adanya arus inisial eksitasi maka generator akan menghasilkan tegangan keluaran.

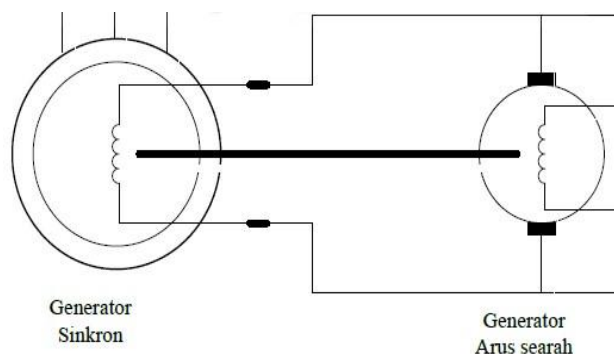


Gambar 2.25 Sistem Eksitasi Statis

2) Sistem Eksitasi Konvensional

Sistem eksitasi konvensional untuk arus searah yang diinjeksikan pada kumparan yang diperoleh dari generator arus searah yang mempunyai kapasitas kecil yang disebut juga dengan eksiter. Adapun pada sistem eksitasi konvensional mempunyai beberapa kekurangan yaitu salah satunya pada jenis ini memiliki keandalan yang kurang.

Dengan kekurangan tersebut pada penguatan medan magnet banyak menggunakan sistem eksitasi statis dibandingkan dengan sistem eksitasi konvensional. Berikut ini gambar sistem eksitasi konvensional menggunakan generator arus searah:



Gambar 2.26 Sistem Eksitasi Menggunakan Generator Arus Searah

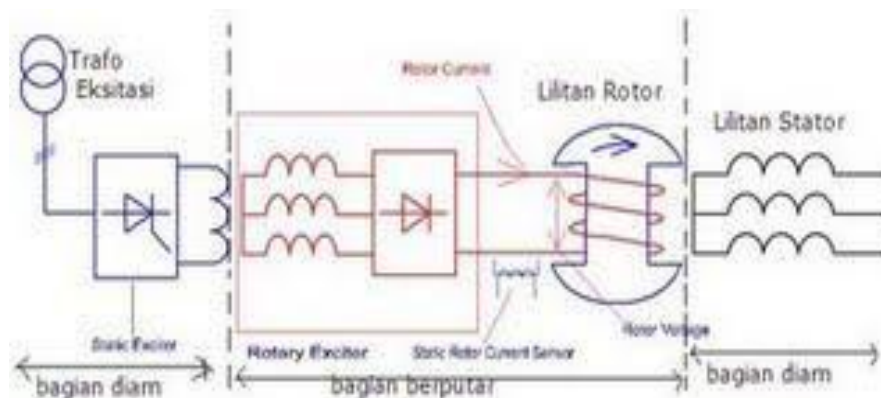
Pada penggunaan sistem eksitasi yang menggunakan *brush excitation* mempunyai keuntungan dan kerugian, dimana keuntungannya adalah dari segi perbaikan yang lebih mudah dan dengan *range* harga yang lebih murah. Sedangkan dari segi kerugiannya yaitu adanya ketidakstabilan tegangan dalam setiap perubahan beban, dan terjadinya pergantian sikat secara berkala yang

diakibatkan oleh adanya gesekan yang terjadi secara terus menerus sehingga mengakibatkan sikat-sikat tersebut menipis. Akibatnya pemeliharaan dan perbaikan akan lebih sering dilakukan.

2. Sistem Eksitasi *Brushless Excitation* (Tanpa Sikat)

Sistem eksitasi *Brushless Excitation* (Tanpa Sikat) merupakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat sama sekali, karena dengan menggunakan sikat dapat menimbulkan bunga api pada putaran tinggi. Sistem eksitasi ini tidak bergantung pada sumber listrik eksternal, melainkan menggunakan *pilot exciter*.

Pada penggunaan sikat atau *slip ring* sebagai penyaluran arus eksitasi pada rotor generator memiliki kelemahan, hal ini dikarenakan besarnya arus yang mampu dialirkan sikat arang relatif kecil. Oleh karena itu untuk mengatasi keterbatasan pada sikat arang dapat digunakan sistem eksitasi yang tidak menggunakan sikat arang atau *brushless excitation*.



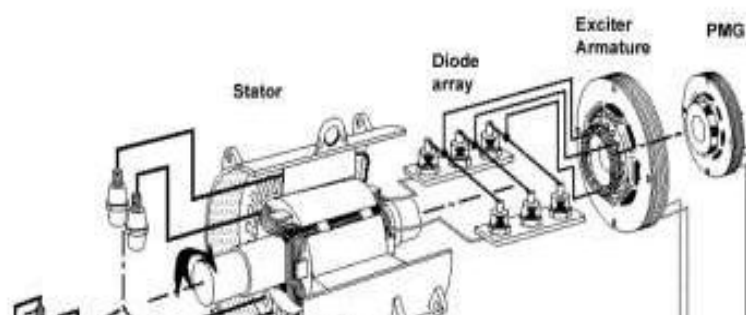
Gambar 2.27 Sistem Eksitasi *Brushless Excitation* (Tanpa Sikat) tator menghasilkan tegangan pada sistem eksitasi yang telah dijelaskan pada sebelumnya, medan magnet tersebut diperoleh dari kumparan rotor yang

diinjeksikan pada sumber listrik arus searah. Adapun cara lain yang digunakan untuk dapat memperoleh medan magnet pada rotor generator yaitu dengan cara menggunakan magnet permanen diposisikan pada poros generator tersebut, sehingga berputar ketika poros tersebut berputar. Adapun jenis sistem eksitasi *brushless excitation* (tanpa sikat) yaitu:

1) Sistem Eksitasi Menggunakan *Permanent Magnet Generator* (PMG).

Generator sinkron harus mempunyai sebuah medan magnet yang berputar hal tersebut dimaksudkan agar generator dapat menimbulkan tegangan pada statornya. Dari belitan rotor dapat menghasilkan medan magnet yang disuplai dengan sumber listrik arus searah (AC). Adapun cara lain untuk menghasilkan medan magnet pada rotor yaitu dengan menggunakan magnet permanen sebagai sumber eksitasinya, hal ini lah yang disebut juga dengan *permanent magnet generator* atau sering disebut juga dengan PMG.

Sistem *brushless excitation* biasanya digunakan pada generator sinkron yang mempunyai kapasitas yang besar dan dilengkapi dengan PMG. Hal ini bertujuan agar sistem eksitasi dari generator tidak bergantung pada sumber daya listrik dari luar mesin itu. Berikut ini dapat dilihat skema sistem eksitasi menggunakan *permanent magnet generator* (PMG):



Gambar 2.28 Sistem Eksitasi Menggunakan *Permanent*

Magnet Generator (PMG)

Pada gambar di atas, bahwa bagian mesin yang berputar (rotor) mempunyai *magnet parameter*, kumparan medan generator utama dan kumparan jangkar generator eksitasi. Hal tersebut memungkinkan pada generator tidak menggunakan *slip ring* dan sikat saat pengoperasiannya sehingga dapat dikatakan lebih efisien dan efektif. Ketika rotor berputar maka *permanent magnet generator* akan ikut berputar pula, hal tersebut dikarenakan telah terhubung pada satu sumbu atau poros. *Permanent magnet generator* tersebut berfungsi untuk membangkitkan tegangan atau arus AC yang akan diserahkan dan dimasukkan pada AVR untuk dilakukannya pengaturan dan pengontrolan.

Dikarenakan tegangan atau arus AC pada *permanent magnet generator* sangat kecil, sehingga pada arus AC tersebut yang telah diserahkan dimasukkan ke eksiter bertujuan untuk membangkitkan tegangan AC yang lebih besar. Keluaran arus pada eksiter kemudian akan diserahkan dengan

menggunakan *rotating dioda*. Kemudian selanjutnya arus eksitasi tersebut diinjeksikan pada rotor sehingga terdapat medan magnet pada generator dan akan menimbulkan fluks listrik yang menghasilkan keluaran tegangan pada generator.

Keuntungan sistem eksitasi *brushless excitation* atau tanpa menggunakan sikat, antara lain adalah:

1. Energi yang dibutuhkan untuk eksitasi didapat dari poros utama (*main shaft*), sehingga keandalannya tinggi.
2. Untuk biaya perawatan berkurang karena pada sistem eksitasi ini tidak terdapat sikat arang, komutator dan *slip ring*.
3. Pada sistem eksitasi ini tidak akan terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada *farnish* akibat sikat arang.
4. Mengurangi kerusakan (*trouble*) akibat udara buruk (*bad atmosphere*) dikarenakan semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup.
5. Selama operasi tidak memerlukan pengganti sikat arang, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung terus pada waktu yang lama.
6. Pemutus medan generator (*generator field breaker*), *field generator* dan *bus exciter* atau kabel tidak diperlukan lagi.
7. Biaya pondasi berkurang, karena aliran udara dan *bus exciter* atau kabel tidak memerlukan pondasi.

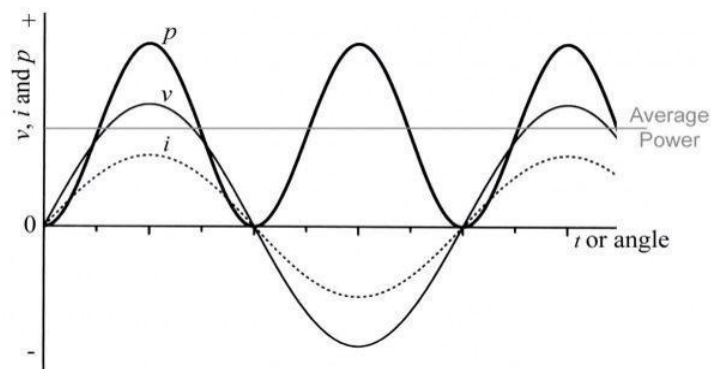
2.2.10 Beban Generator Sinkron

Rangkaian listrik arus bolak-balik merupakan beban generator yang pada dasarnya terdiri dari tiga komponen yaitu:

1. Resistif (Tahanan) = R
2. Induktif (Kumparan) = L
3. Kapasitif (Kapasitor) = C

1. Beban Resistif (R)

Beban resistif yaitu beban yang dihasilkan pada rangkaian listrik yang mempunyai tahanan (resistor) atau sering disebut juga dengan rangkaian tahanan murni. Adapun contoh peralatan listrik yang menggunakan tahanan murni yaitu lampu pijar dan elemen pemanas. Pengaruh beban resistif pada generator menimbulkan reaksi jangkar pada stator sehingga menimbulkan medan magnet yang arahnya berlawanan dengan medan magnet rotor, sehingga mengakibatkan putaran menurun. Dikarenakan pada putaran turun, maka tegangan dan frekuensi akan turun juga. Oleh karena itu untuk memulihkan ke kondisi normal, maka putaran harus ditambah.

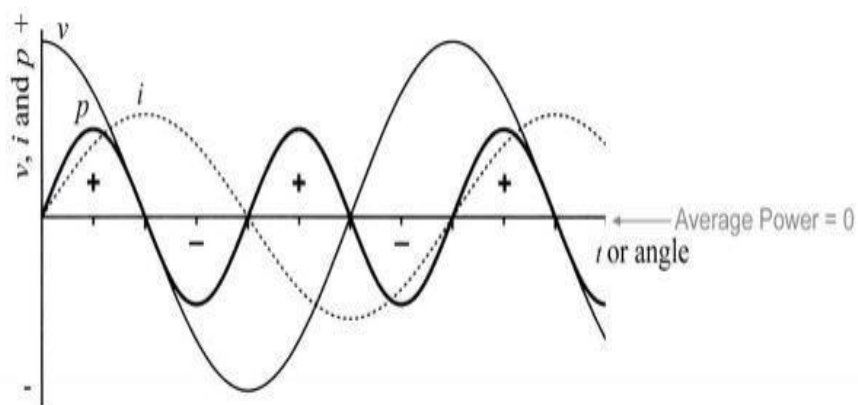


Gambar 2.29 Bentuk Gelombang Beban Resistif

2. Beban Induktif (L)

Di dalam penghantar arus listrik yang mengalir akan menimbulkan medan magnet dengan arah garis gaya magnetnya yang mengelilingi penghantar. Untuk kuat medan magnet tergantung berdasarkan besar arus yang mengalir. Apabila arus naik maka rangkaian menyimpan energi di dalam medan magnet, namun apabila arus berkurang maka rangkaian akan mengeluarkan energi dari medan magnet.

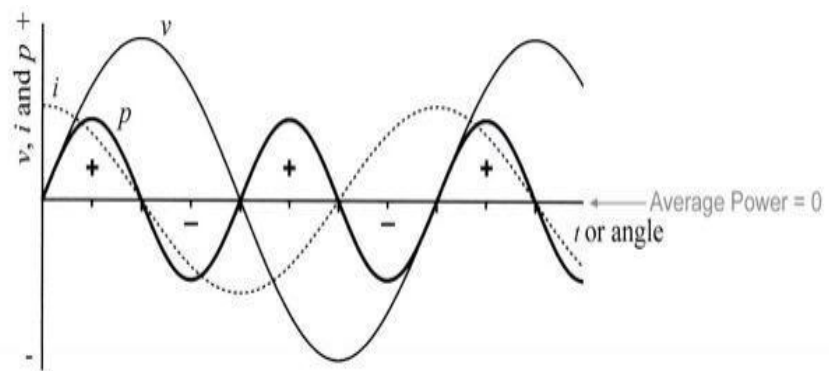
Beban induktif ditimbulkan dari berbagai alat-alat listrik yang mempunyai belitan meliputi motor induksi, transformator, dan peralatan lainnya. Adapun sifat yang dimiliki pada belitan adalah menghalangi terjadinya perubahan nilai pada arus listrik. Dalam listrik arus bolak-balik (AC) mempunyai nilai yang naik dan turun sehingga membentuk sebuah gelombang sinusoidal.



Gambar 2.30 Bentuk Gelombang Beban Induktif (L)

3. Beban Kapasitif (C)

Beban kapasitif yaitu kebalikan dari beban induktif. Apabila pada beban induktif bersifat menghambat terjadinya perubahan nilai arus yang mengalir, maka pada beban kapasitif bersifat menahan perubahan tegangan. Timbulnya beban kapasitif dalam rangkaian listrik dikarenakan terdapat bagian yang mampu menyimpan muatan listrik. Beban kapasitif biasanya sering dijumpai pada peralatan elektronik di rumah-rumah yaitu seperti televisi dan lain-lain. Berikut ini dapat dilihat gambar pengaruh beban kapasitif terhadap tegangan yaitu:



Gambar 2.31 Bentuk Gelombang Beban Kapasitif