

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Rujukan penelitian yang pernah dilakukan untuk mendukung penulisan skripsi ini antara lain:

Sepannur Bandri (2013), melakukan penelitian mengenai analisa pengaruh perubahan beban terhadap karakteristik generator sinkron 3 fasa PLTG Pauh Limo Padang. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai induksi GGL induksi pada faktor daya *lagging* lebih besar dari nilai GGL induksi pada faktor daya *leading*.

Ahmad Faisal (2011), melakukan penelitian mengenai analisa perbandingan pengaruh pembebanan resistif, induktif, kapasitif dan kombinasi R L C terhadap regulasi tegangan dan efisiensi pada generator sinkron 3 fasa. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin besar beban yang diberikan maka semakin besar pula nilai efisiensinya, untuk beban yang memiliki nilai efisiensi terbesar adalah beban resistif, kemudian diikuti oleh beban induktif, kapasitif, dan kombinasi R L C.

Agus Supardi, Joko Susilo dan Faris (Jurnal Emitor UMS 2014), melakukan penelitian mengenai pengaruh pembebanan terhadap karakteristik keluaran generator induksi 1 fase. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa kenaikan daya beban yang dihubungkan pada generator induksi akan menyebabkan penurunan tegangan, kecepatan putar dan frekuensinya.

Sang Lanang, Sardono Suwito, dan Indra Ranu Kusuma (2013), melakukan penelitian mengenai pengaruh induktif dan resistif pada generator induksi pada pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL). Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa penggunaan beban resistif akan mengakibatkan perubahan rpm dan tegangan *output* dari generator induksi, dimana perubahan beban akan berbanding terbalik dengan perubahan rpm dan tegangan *output*.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Generator

Generator merupakan suatu mesin yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator merupakan alat yang menghasilkan energi listrik hasil dari sumber mekanik dengan menggunakan induksi magnet. *“Apabila dalam suatu medan magnet yang bergerak atau berputar terdapat konduktor yang memotong garis-garis fluks magnet, maka pada konduktor akan timbul gaya gerak listrik”*. Bunyi hukum Faraday yang menjadi prinsip dasar generator listrik.

Generator yang paling sering digunakan adalah generator sinkron atau sering disebut alternator. Generator sinkron dapat berupa generator tiga fasa ataupun generator AC satu fasa yang disesuaikan dengan kebutuhan. Generator yang biasa digunakan pada sistem pembangkitan listrik adalah Generator sinkron karena frekuensi dan tegangan yang dihasilkan sesuai dengan kecepatan putarnya, sehingga lebih mudah dalam mengatur frekuensi keluarannya.

2.2.2 Prinsip Kerja Generator

Sesuai dengan hukum Faraday di atas, prinsip kerja generator atau alternator menerapkan prinsip pembangkitan listrik berdasarkan induksi.

Besarnya tegangan yang diinduksikan pada kumparan tergantung pada :
(Menurut PT PLN : 2013)

- a. Panjang penghantar dalam kumparan
- b. Kecepatan putaran (gerakan)
- c. Kuat medan magnet

Maka dari pembangkitan tegangan secara induksi didapatkan persamaan

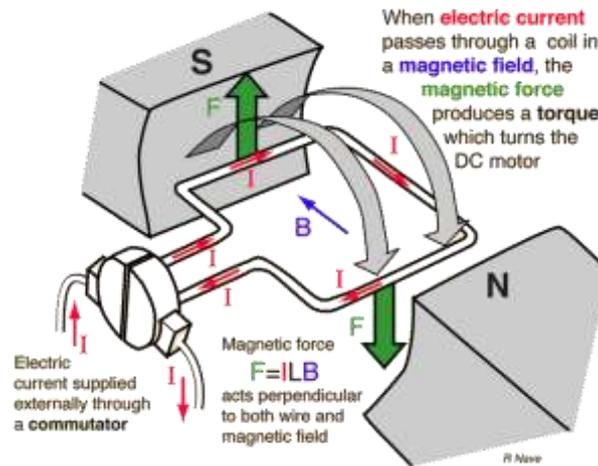
3.1 sebagai berikut :

$$E = - N \frac{d\theta}{dt} \dots \dots \dots \mathbf{2.1}$$

Dimana : E = Gaya gerak listrik induksi

: N = Jumlah lilitan kumparan

: $\frac{d\theta}{dt}$ = Laju perubahan fluks magnet terhadap waktu (Wb/s)



Gambar 2.1 Proses Pembangkitan GGL

(Sumber : <http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/magnetic/motdc.html>)

Dalam pembangkitan energi listrik pada generator yaitu pada saat rotor diputar oleh penggerak mula (motor listrik, diesel, turbin atau penggerak lainnya), maka kutub rotor generator akan berputar. Jika kumparan kutub medan rotor dialiri arus searah maka pada kumparan medan rotor akan timbul medan magnet yang kecepatannya sama dengan kecepatan putar kutub. Rotor yang berputar tersebut akan memotong garis gaya magnet yang ada pada stator sehingga pada kutub medan rotor akan timbul tegangan induksi.

Pada generator, jumlah kutub arus bolak balik tergantung dari kecepatan rotor dan frekuensi dari gaya gerak listrik induksi yang dibangkitkan. Hubungan tersebut dapat ditentukan dengan persamaan 2.2 :

$$f = \frac{p \cdot n}{120} \dots \dots \dots 2.2$$

Dimana : f = Frekuensi tegangan (Hz)

: P = Jumlah kutub pada rotor

: n = kecepatan rotor (rpm)

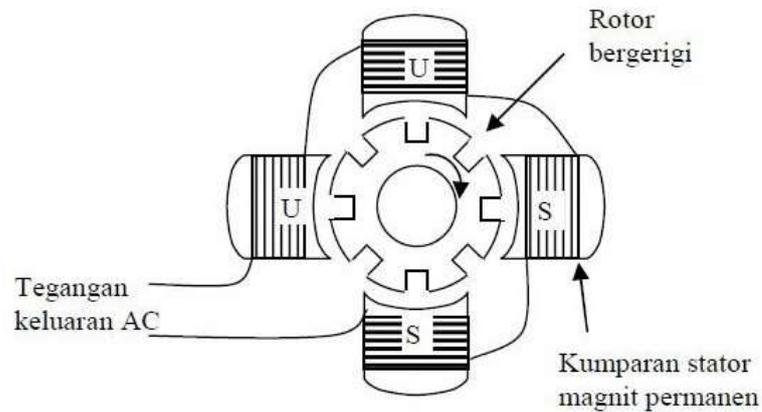
Dari rumus di atas terlihat bahwa frekuensi yang dihasilkan generator sinkron sangat dipengaruhi oleh kecepatan putaran rotor dan jumlah kutub magnet pada generator. Jika beban generator berubah, akan mempengaruhi kecepatan rotor generator. Perubahan kecepatan rotor ini secara langsung akan mempengaruhi frekuensi yang dihasilkan generator.

Jika frekuensi yang dikeluarkan generator diharapkan mempunyai nilai yang konstan, maka kecepatan putaran rotor harus dijaga konstan. Kuat medan elektromagnetik dapat berubah-ubah sesuai besarnya arus penguatan yang mengalir menuju kumparan medan rotor. Dengan demikian besarnya tegangan AC yang dibangkitkan secara langsung tergantung pada besar kecilnya tegangan eksitasinya.

2.2.3 Generator AC Satu Fasa

Generator satu fasa merupakan generator yang didalamnya mempunyai satu lilitan/kumparan stator yang menghasilkan tegangan 1 fasa dimana sistem dalam melilit kumparan motor 1 fasa ini yaitu terdiri dari satu kumpulan kumparan yang digambarkan dengan satu garis. Ujung kumparan statornya ditandai dengan huruf X dan ujung lainnya ditandai dengan huruf U.

Bentuk gambaran sederhana hubungan kumparan 1 fasa dengan tegangan yang dibangkitkan diperlihatkan pada gambar 2.2 dibawah ini :



Gambar 2.2 Belitan Generator Satu Fasa

(Sumber : <http://elektronika-dasar.web.id/definisi-dan-konstruksi-tacho-generator/>)

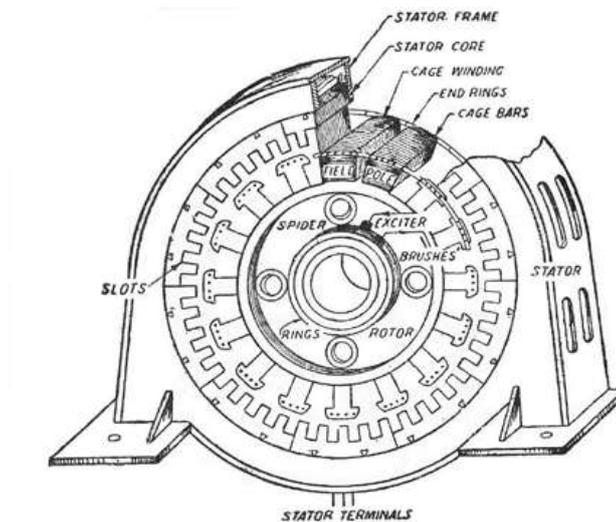
Generator AC satu fasa dengan lilitan kumparan saling terhubung secara seri sesuai dengan gambar di atas. Dengan desain semacam ini, untuk setiap 90° putaran rotor, kutub voltase listrik akan berubah arah dari positif ke negatif ataupun sebaliknya. Sehingga di setiap satu putaran rotor akan tercipta dua gelombang penuh listrik AC. Selain itu karena kumparan dihubungkan secara seri dan output tegangan berupa satu fase, maka besar tegangan listrik total yang dihasilkan oleh generator ini sebanyak empat kali tegangan yang dihasilkan oleh masing-masing kumparan.

2.2.4 Konstruksi Generator Sinkron

Pada prinsipnya, konstruksi Generator sinkron sama dengan motor sinkron. Secara umum, konstruksi generator sinkron terdiri dari stator (bagian

yang diam) dan rotor (bagian yang bergerak). Keduanya merupakan rangkaian magnetik yang berbentuk simetris dan silindris. Selain itu generator sinkron memiliki celah udara ruang antara stator dan rotor yang berfungsi sebagai tempat terjadinya fluksi atau induksi energi listrik dari rotor ke-stator.

Pada Gambar 2.3 dapat dilihat konstruksi sederhana dari sebuah generator sinkron secara umum :



Gambar 2.3 Konstruksi Generator Sinkron Secara Umum

(Sumber : <http://documents.tips/documents/teori-generator-sinkron.html>)

a. Rotor

Rotor terdiri dari beberapa komponen utama yaitu :

1. *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*.

2. Sikat

Sebagaimana dari generator sinkron ada yang memiliki sikat ada juga yang tidak memiliki sikat. Sikat pada generator sinkron berfungsi sebagai saklar putar untuk mengalirkan arus DC ke-kumparan medan pada rotor generator sinkron. Sikat terbuat dari bahan karbon tertentu.

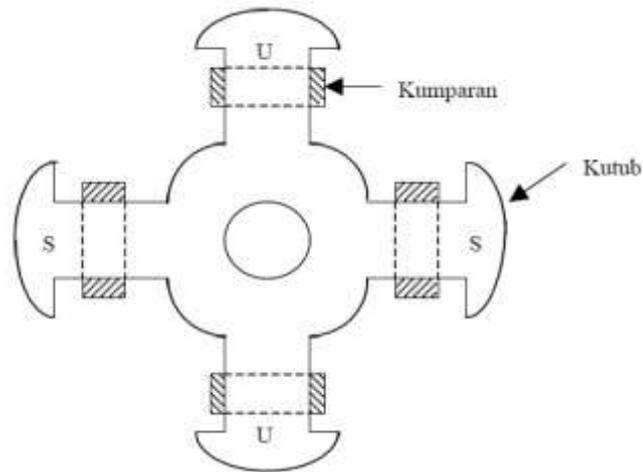
3. Kumparan rotor (kumparan medan)

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

4. Poros Rotor

Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan, dimana pada poros tersebut telah terbentuk slot-slot secara paralel terhadap poros rotor.

Bentuk suatu rotor dari generator sinkron dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut:



Gambar 2.4 Rotor Generator Sinkron

(Sumber : <http://gloopic.net/article/penerbangan/genset-dan-acos-bagian-iii>)

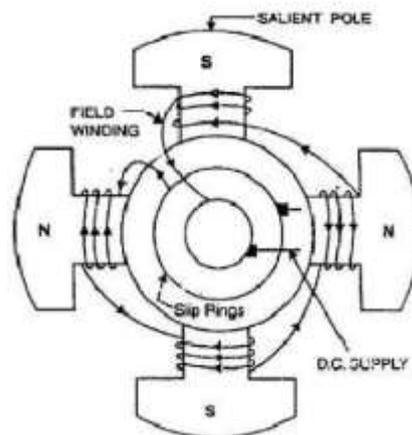
Rotor pada generator sinkron pada dasarnya sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa *salient pole* (kutub menonjol) dan non salient pole (kutub silinder atau tak menonjol).

1. Rotor kutub menonjol (*Salient Pole Rotor*)

Rotor tipe ini mempunyai kutub yang jumlahnya banyak. Kumparan dibelitkan pada tangkai kutub, dimana kutub-kutub diberi laminasi untuk mengurangi panas yang ditimbulkan oleh arus Eddy, kumparan-kumparan medannya terdiri dari bilah tembaga persegi. Kutub menonjol ditandai dengan rotor berdiameter besar dan panjang sumbunya pendek.

Selain itu jenis kutub *salient pole*, kutub magnetnya menonjol keluar dari permukaan rotor. Belitan-belitan medan dihubung seri.

Ketika belitan medan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub yang berlawanan. Bentuk kutub menonjol generator sinkron tampak seperti Gambar 2.5 berikut :



Gambar 2.5 Rotor Kutub Menonjol Generator Sinkron

(Sumber :Ahmad Faisal, 2011)

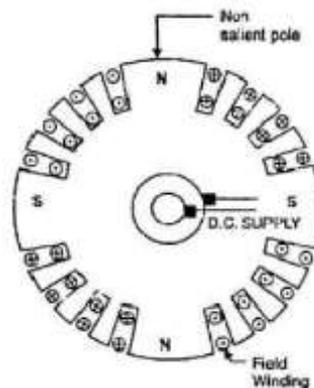
Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putaran rendah dan sedang (120-400 rpm). Generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik. Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putaran rendah dan sedang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

- Konstruksi kutub menonjol tidak terlalu kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.
- Kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.

2. Rotor kutub tak menonjol (Rotor Silinder)

Rotor tipe ini dibuat dari plat baja berbentuk silinder yang mempunyai sejumlah slot sebagai tempat kumparan. Karena adanya slot-slot dan juga kumparan medan yang terletak pada rotor maka jumlah kutub pun sedikit yang dapat dibuat. Belitan-belitan medan dipasang pada alur- alur di sisi luarnya dan terhubung seri yang dimana pasokan listrik dipasok oleh eksiter.

Rotor ini biasanya berdiameter kecil dan sumbunya sangat panjang. Konstruksi ini memberikan keseimbangan mekanis yang lebih baik karena rugi-rugi anginnya lebih kecil dibandingkan rotor kutub menonjol (*salient pole rotor*). Gambar bentuk kutub silinder generator sinkron tampak seperti pada Gambar 2.6 berikut:



Gambar 2.6 Rotor Kutub Silinder Generator Sinkron

(Sumber : <http://documents.tips/documents/teori-generator-sinkron.html>)

Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putaran tinggi (1500 atau 3000 rpm) biasanya

digunakan untuk pembangkit listrik berkapasitas besar misalnya pembangkit listrik tenaga uap dan gas. Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan tinggi karena:

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

b. Stator

Stator atau armatur adalah bagian generator yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus AC yang menuju ke beban disalurkan melalui armatur, komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak. Armatur selalu diam (tidak bergerak). Oleh sebab itu komponen ini juga disebut sebagai stator.

Bentuk suatu stator dari generator sinkron dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut:



Gambar 2.7 Gambar Stator Generator Sinkron

(Sumber : <https://rekayasalistrik.wordpress.com/2013/08/13/bagian-dan-cara-kerja-motor-induksi/>)

Stator terdiri dari beberapa komponen utama yaitu:

1. Rangka Stator

Rangka stator merupakan rumah (kerangka) yang merupakan inti jangkar generator sinkron.

2. Inti Stator

Inti stator terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetik khusus yang terpasang kerangka stator.

3. Alur (*slot*) dan Gigi

Alur dan gigi merupakan tempat meletakkan kumparan stator yaitu kumparan jangkar. Ada 3 (tiga) bentuk alur stator yaitu, terbuka, setengah terbuka, dan tertutup. Ketiga bentuk alur (*slot*) tersebut tampak seperti Gambar 2.8 berikut



Gambar 2.8 Bentuk-bentuk Alur

(Sumber :Ahmad Faisal, 2011)

4. Kumparan Stator (Kumparan Jangkar)

Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan timbulnya GGL induksi.

2.2.5 Rangkaian Belitan Stator dan Rotor

1. Belitan stator

Ada dua jenis belitan stator yang banyak digunakan untuk generator sinkron, yaitu:

a. Belitan Satu Lapis (*Single Layer Winding*)

Dari Gambar 2.9 di bawah ini memperlihatkan belitan satu lapis karena hanya ada satu sisi lapisan didalam masing-masing alur. Untuk

melukiskan kumparan *single layer* pada generator 1 fasa dengan 2 pasang kutub yang terdiri dari 24 slot. Contoh untuk membuat kumparan yaitu :

Generator satu fase dua (2) pasang kutub, Slot atau Alurnya 24

$$Y_s = G/2.p = 24/4 = 6$$

Langkah belitan (Y_s) adalah 1 -7

$$Q = G/2p.m = 24/4.2 = 3$$

Berarti jumlah kumparan tiap kelompok (Q) adalah 3.

$$K = G / 2p = 24/4 = 6$$

Tiap kutub terdiri dari 6 kumparan

$$KAR = 360/G = 360/24 = 15 \text{ radian}$$

Jarak antar alur (KAR) 15 radian

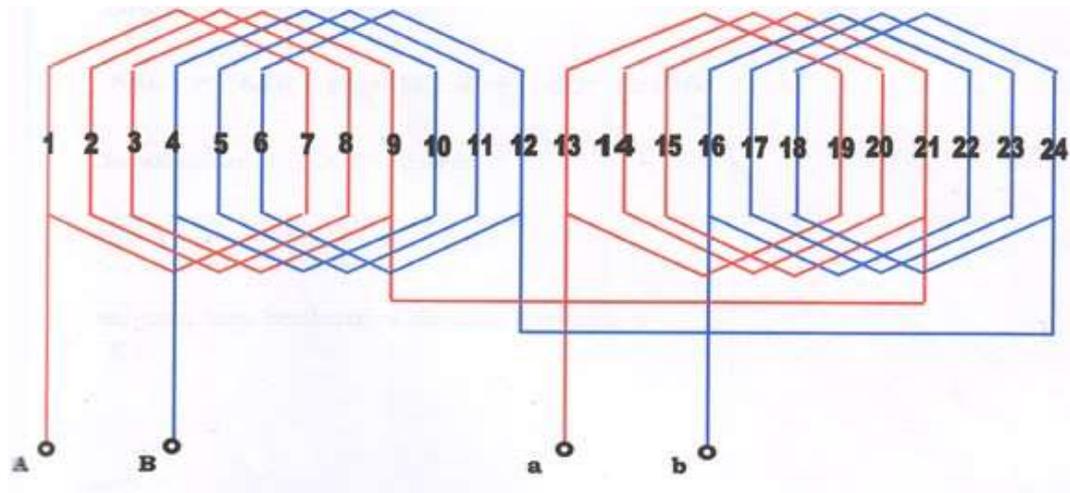
$$KAL = KAR .p = 15. 2 = 30 \text{ listrik}$$

$$K_p = 90/KAL = 90/30 = 3$$

Apabila fasa pertama di mulai dari alur 1 maka fasa kedua dimulai dari alur ke 4

Daftar belitannya sebagai berikut.

	I 1-7 II 21-15 I -----		I 4-10 II 24-18 I
A	I 2-8 II 20-14 I a -----	B	I 5-11 II 23-17 I b
	I 3-9 II 19-13 I -----		I 6-12 II 22-16 I

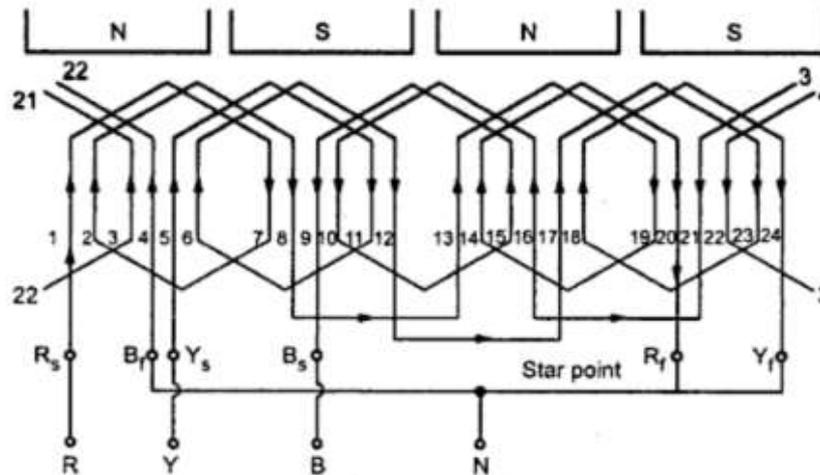


Gambar 2.9 Belitan Satu Lapis Generator Sinkron

(Sumber : <http://technoku.blogspot.co.id/2010/04/menggulung-motor.html>)

b. Belitan Berlapis Ganda (*Double Layer Winding*)

Kumparan jangkar hanya mempunyai satu lilitan per kutub per phasa, akibatnya masing-masing kumparan hanya dua lilitan secara seri. Bila alur-alur tidak terlalu lebar, masing-masing penghantar yang berada dalam alur akan membangkitkan tegangan yang sama, masing-masing tegangan phasa akan sama untuk menghasilkan tegangan per penghantar dan jumlah total dari penghantar per phasa. Dalam kenyataannya cara seperti ini tidak menghasilkan cara yang efektif dalam penggunaan inti stator, karena variasi kerapatan fluks dalam inti dan juga melokalisir pengaruh panas dalam daerah alur dan menimbulkan harmonik. Untuk mengatasi masalah ini, generator praktisnya mempunyai kumparan terdistribusi dalam beberapa alur per kutub per phasa.



Gambar 2.10 Belitan Berlapis Ganda Generator Sinkron

(Sumber : <http://technoku.blogspot.co.id/2010/04/menggulung-motor.html>)

Gambar 2.10 memperlihatkan bagian dari sebuah kumparan jagkar yang secara umum banyak digunakan. Pada masing-masing alur ada dua sisi lilitan memiliki lebih dari satu putaran. Bagian dari lilitan yang tidak terletak ke dalam alur biasanya disebut *winding overhang*, sehingga tidak ada tegangan dalam *winding overhang*.

2. Belitan rotor

Belitan rotor pada generator sinkron biasanya terbuat dari kawat yang halus dan diisolasi untuk tegangan yang rendah pada rotor silinder, belitan rotor ditempatkan pada alur rotor dan kedua ujungnya dihubungkan dengan sumber tegangan atau arus searah untuk memberikan eksitasi pada rotor.

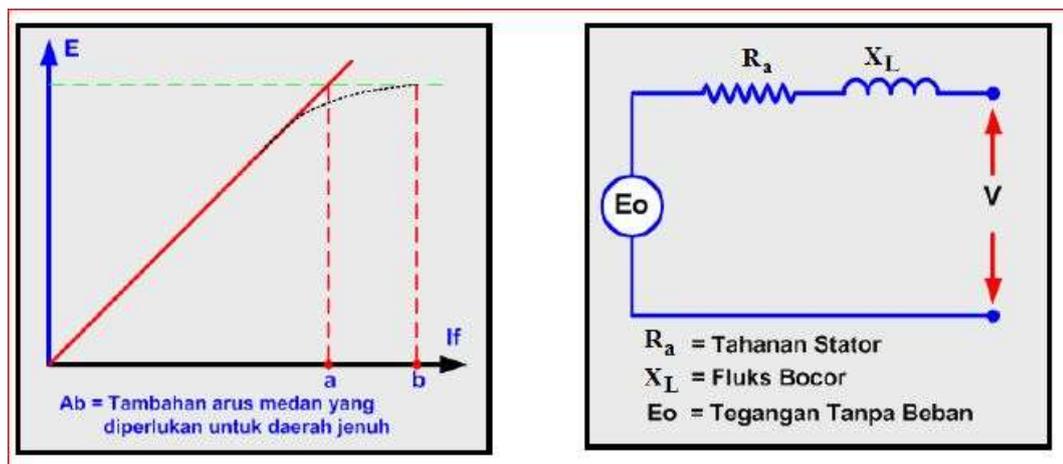
2.2.6 Generator Tanpa Beban

Dengan memutar generator pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_F), maka tegangan (E_0) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator. Bentuk hubungannya diperlihatkan pada persamaan berikut :

$$E_a = c.n.\phi \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana: **c** = Konstanta mesin
 n = Putaran sinkron
 ϕ = Fluks yang dihasilkan oleh I_F

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_F). Apabila arus medan (I_F) diubah-ubah harganya, akan diperoleh harga E_0 seperti yang terlihat pada kurva sebagai berikut.



Gambar 2.11 Karakteristik Generator Sinkron Tanpa Beban

(Sumber : <http://dunia-listrik.blogspot.co.id/2009/04/prinsip-kerja-generator-sinkron.html>)

2.2.7 Generator Berbeban

Dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi, dan disebut reaktansi pemagnet (X_m). Reaktansi pemagnet (X_m) ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor (X_a) dikenal sebagai reaktansi sinkron (X_s). Persamaan tegangan pada generator adalah:

$$\mathbf{E_a} = \mathbf{V} + \mathbf{I.R_a} + \mathbf{j I.X_s} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\mathbf{X_s} = \mathbf{X_L} + \mathbf{X_m} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

E_a = Tegangan induksi pada jangkar

V = Tegangan terminal output

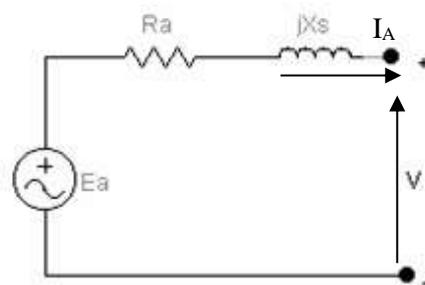
R_a = Resistansi jangkar

X_s = Reaktansi sinkron

2.2.8 Diagram Fasor Generator Sinkron Satu Fasa Berbeban Pada Berbagai

Faktor Daya

Untuk menggambar diagram fasor ini, tegangan terminal generator dapat dijadikan sebagai tegangan referensi untuk penggambaran tegangan induksi, resistif, *voltage drop*, *reactance voltage drop* juga arusnya.



$$E = V_t + I_A (R_A + jX_S)$$

Dimana :

E = Tegangan induksi Generator

V_t = Tegangan terminal generator

R_A = Resistansi jangkar

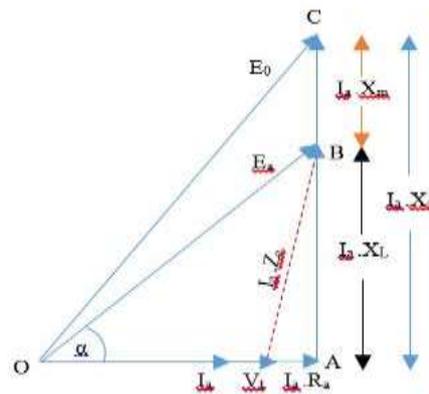
X_S = Reaktansi Sinkron

Diagram fasor memperlihatkan bahwa terjadinya perbedaan antara tegangan terminal V_t dalam keadaan berbeban dengan tegangan induksi (E_a) atau tegangan pada saat tidak berbeban. Diagram dipengaruhi oleh faktor kerja juga oleh besarnya arus jangkar (I_A) yang mengalir. Dengan memperlihatkan perubahan tegangan (V) untuk faktor kerja yang berbeda-beda . secara umum

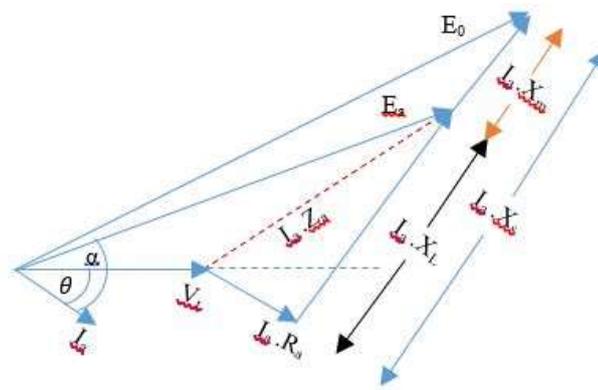
sifat beban yang dipikul oleh generator dapat bersifat resistif, induktif, dan kapasitif. Bentuk hubungan beban ini akan mempengaruhi arus yang mengalir pada alternator. Arus ini bisa menjadi sefasa (*unity*), tertinggal (*lagging*) atau mendahului (*leading*) dari tegangan, tergantung dari jenis beban yang diberikan pada terminal alternator. Karakteristik generator sinkron pada saat generator berbeban akan timbul reaktansi pemagnet (X_m) yang menyebabkan jatuh tegangan GGL pada armatur tanpa beban sebesar $I_a \cdot X_m$. Sehingga besar GGL armatur atau tegangan armatur (E_a) pada generator berbeban adalah :

$$E_a = E_0 - I_a \cdot X_m \dots\dots\dots (2.6)$$

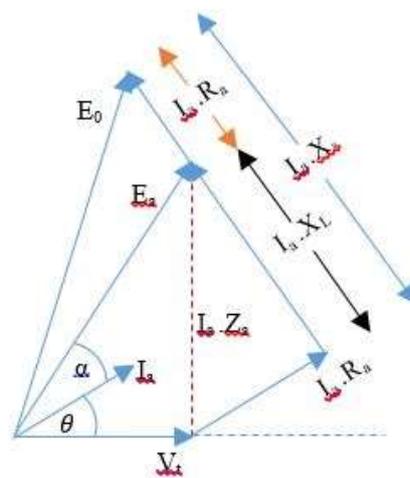
Secara vektoris besar GGL armatur (E_a) saat berbeban pada Faktor daya ($\cos \varphi$) *unity* (sefasa), *lagging* (tertinggal) dan *leading* (mendahului) dapat dilihat pada gambar 4.11 berikut :



a)



b)



c)

Gambar 2.12 Hubungan Berbagai Kondisi Beban Terhadap Arus Dan Tegangan

Pada Generator Berbeban : a) Beban Resistif (sefasa), b) Beban induktif

(terbelakang), c) Beban kapasitif (mendahului)

(Sumber :Yon Rijono, 1997)

Secara vektoris besar GGL armatur berbeban atau tegangan armatur (E_a) untuk faktor daya ($\cos \phi$) *unity* (sefasa), *lagging* (tertinggal) dan *leading* (mendahului) digambarkan pada gambar 4.11. Pada segitiga vektor berbeban resistif dengan faktor daya *unity* (sefasa) terlihat pada gambar 4.11 (a) segitiga OAB dan OAC bahwa $X_s = X_L + X_m$, sedangkan $AC = X_s$ dan $BC = X_m$, sehingga $AB = X_L$. Dari penjelasan tersebut pada generator berbeban resistif dengan faktor daya *unity* (sefasa) yang bernilai sama dengan 1, tegangan armatur dan putaran generator akan turun karena adanya $I_a \cdot X_m$. Pada beban resistif dengan faktor daya *unity* (sefasa) dibutuhkan pengaturan arus eksitasi (I_f) dengan menaikkan arus eksitasi (I_f) dan menaikkan kecepatan putar generator hingga tegangan terminal (V_t) dan kecepatan putar (n) mencapai harga nominal generator. Dengan demikian besar GGL atau tegangan armatur berbeban (E_a) adalah :

Pada beban resistif dengan faktor daya *unity* (sefasa)

$$E_a = E_0 - I_a \cdot X_m$$

atau :

$$E_a = \sqrt{(V_t + I_a \cdot R_a)^2 + (I_a \cdot X_L)^2} \dots\dots\dots (2.7)$$

Pada gambar 4.12 (b) faktor daya *lagging* (tertinggal) dapat dicermati bahwa pada arus armatur (I_a) yang sama, beban dengan faktor daya *lagging* (tertinggal) membutuhkan tegangan induksi atau tegangan armatur (E_a) yang lebih besar sehingga terjadi turun tegangan (*drop voltage*)

lebih tajam daripada beban dengan faktor daya *unity* (sefasa) maupun faktor daya *leading* (mendahului) sehingga pada beban dengan faktor daya *lagging* membutuhkan arus eksitasi (I_f) yang lebih besar untuk menghasilkan tegangan terminal (V_t) yang sama dengan faktor daya *unity* maupun faktor daya *leading*. Dengan demikian besar tegangan armatur berbeban (E_a) untuk faktor daya beban *lagging* (tertinggal) pada gambar 4.12 (b) adalah :

$$E_a = \sqrt{(V_t \cdot \cos \theta + I_a \cdot R_a)^2 + (I_a \cdot \sin \theta + I_a \cdot X_L)^2} \dots\dots (2.8)$$

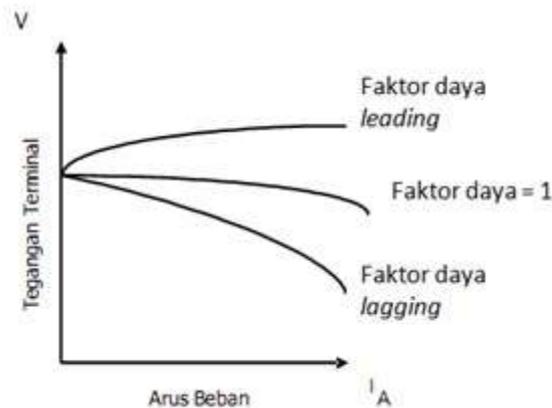
Pada gambar 4.12 (c) faktor daya *leading* (mendahului) dapat dicermati pula bahwa dengan arus armatur (I_a) yang sama, beban dengan faktor daya *leading* (mendahului) terjadi peningkatan tegangan armatur (E_a) sehingga pada beban dengan faktor daya *leading* (mendahului) membutuhkan pengaturan arus eksitasi (I_f) yaitu menurunkan arus eksitasi (I_f) pada saat terjadi kenaikan tegangan yang signifikan agar menghasilkan tegangan terminal (V_t) pada harga nominal generator. Dengan demikian besar tegangan armatur berbeban (E_a) untuk faktor daya beban *leading* (mendahului) pada gambar 4.12 (c) adalah :

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

Dari gambar 4.12, besar impedansi armatur (Z_a) adalah :

$$Z_a = \sqrt{(R_a)^2 + (X_L)^2} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (2.10)$$

Adapun kurva karakteristik generator sinkron AC satu fasa pada berbagai faktor daya yang dapat dilihat pada gambar kurva 2.12 berikut :



Gambar 2.13 Kurva Karakteristik Generator Sinkron AC Satu Fasa Pada Berbagai Faktor Daya

(Sumber : <https://kurniawanpramana.wordpress.com/2011/10/09/generator-sinkron-2/>)

2.2.9 Daya Generator

1. Pengertian daya

Daya listrik didefinisikan sebagai kecepatan aliran energi listrik pada satu titik jaringan listrik tiap satu satuan waktu. Dengan satuan Watt atau Joule per detik dalam SI, daya listrik menjadi besaran terukur adanya produksi energi listrik oleh pembangkit, maupun adanya penyerapan energi listrik oleh beban listrik.

Daya listrik menjadi pembeda antara beban dengan pembangkit listrik, dimana beban listrik bersifat menyerap daya sedangkan pembangkit listrik bersifat mengeluarkan daya. Berdasarkan kesepakatan universal,

daya listrik yang mengalir dari rangkaian masuk ke komponen listrik bernilai positif. Sedangkan daya listrik yang masuk ke rangkaian listrik dan berasal dari komponen listrik, maka daya tersebut bernilai negatif. Untuk penggunaan sistem arus AC satu fasa dan tiga fasa dikenal 3 daya yaitu :

a. Daya Semu (*apparent power*)

Daya semu dikatakan daya total dari kapasitas daya maksimal generator atau diartikan sebagai penjumlahan daya aktif dan daya reaktif.

$$S = V \times I \text{ (VA)} \text{ atau } S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

b. Daya Aktif (*active power*)

Daya aktif sering disebut daya nyata yang memiliki satuan Watt dan merupakan daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Daya ini sering digunakan secara umum oleh konsumen dan sebagai satuan yang digunakan untuk daya listrik dan dikonversikan dalam bentuk kerja. Dimana dalam perhitungan fasa yaitu :

$$P = V \times I \times \cos\phi \text{ (Satu Fasa)}$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V \times I \times \cos\phi \text{ (Tiga Fasa)}$$

c. Daya reaktif (*reactive power*)

Daya reaktif dengan satuan Volt Ampere Reactive (VAR), merupakan daya yang disupply oleh komponen reaktif, atau disebut juga jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan

medan magnet tersebut akan terbentuk fluks-fluks magnet. Dimana dalam perhitungan phasa yaitu :

$$Q = Vx Ix \text{Sin}\phi \text{ (Satu Fasa)}$$

$$Q = \sqrt{3}.Vx I x \text{Sin}\phi \text{ (Tiga Fasa)}$$

2. Faktor Daya

Faktor daya yang sering disebut sebagai $\cos \phi$ didefinisikan sebagai perbandingan daya aktif (kW) dan daya reaktif (kVAR) atau sebagai perbandingan antara arus yang dapat menghasilkan kerja didalam suatu rangkaian terhadap arus total yang masuk kedalam rangkaian. Adanya nilai faktor daya pada sistem tegangan AC disebabkan adanya beban yang mengalir dan nilainya bergantung pada karakteristik beban tersebut.

Persamaan faktor daya :

$$\text{Cos}\theta = \frac{P (W)}{S (VA)}$$

Dimana :

P = Daya aktif (Watt)

S = Daya semu (Volt Ampere)

“Faktor daya ($\cos \phi$) merupakan rasio besarnya daya aktif yang bisa kita manfaatkan terhadap daya tampak (semu) yang dihasilkan sumber”. Faktor daya rendah juga merugikan karena mengakibatkan arus beban menjadi lebih

tinggi. Daya reaktif yang tinggi menyebabkan meningkatnya sudut segitiga daya sehingga menghasilkan faktor daya yang rendah, begitu pula sebaliknya.

2.2.10 Metode Eksitasi Pada Generator Sinkron

Berdasarkan cara penyaluran arus searah pada rotor generator sinkron, sistem eksitasi terdiri dari dua jenis yaitu sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*) dan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*). Ada dua jenis sistem eksitasi dengan menggunakan sikat yaitu :

- a. Sistem eksitasi konvensional (menggunakan generator arus searah).
- b. Sistem eksitasi statis.

Sedangkan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat terdiri dari :

- a. Sistem eksitasi dengan menggunakan baterai.
- b. Sistem eksitasi dengan menggunakan Permanen Magnet Generator (PMG).

1. Eksitasi menggunakan Sikat (*Brush Excitation*)

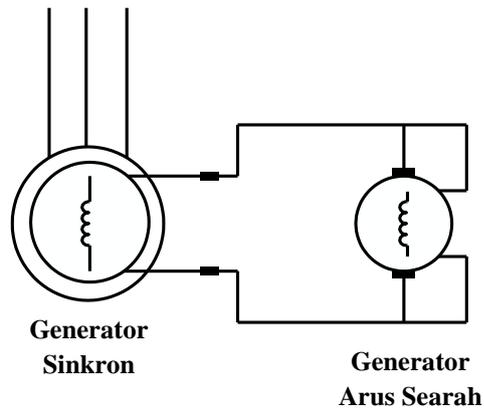
- a. Sistem Eksitasi Konvensional (Menggunakan Generator Arus Searah)**

Untuk sistem eksitasi yang konvensional, arus searah diperoleh dari sebuah generator arus searah berkapasitas kecil yang disebut eksiter.

Generator sinkron dan generator arus searah tersebut terkopel dalam satu poros, sehingga putaran generator arus searah sama dengan putaran generator sinkron.

Tegangan yang dihasilkan oleh generator arus searah ini diberikan ke belitan rotor generator sinkron melalui sikat karbon dan *slip ring*. Akibatnya arus searah mengalir ke dalam rotor atau kumparan medan dan menimbulkan medan magnet yang diperlukan untuk dapat menghasilkan tegangan arus bolak-balik pada kumparan utama yang terletak di stator generator sinkron.

Pada generator konvensional ini ada beberapa kerugian yaitu generator arus searah merupakan beban tambahan untuk penggerak mula. Penggunaan *slip ring* dan sikat menimbulkan masalah ketika digunakan untuk mensuplai sumber arus searah pada belitan medan generator sinkron. Terdapat sikat arang yang menekan slip ring sehingga timbul rugi gesekan pada generator utamanya. Selain itu pada generator arus searah juga terdapat sikat karbon yang menekan komutator. Selama pemakaian *slip ring* dan sikat harus diperiksa secara teratur, generator arus searah juga memiliki keandalan yang rendah. Karena hal-hal seperti di atas dipikirkan hubungan lain dan dikenal apa yang dikenal sebagai generator sinkron *static exciter* (penguat medan statis). Gambar 2.14 adalah sistem eksitasi yang menggunakan generator arus searah.



Gambar 2.14 Sistem Eksitasi Menggunakan Generator Arus Searah

(Sumber :Ahmad Faisal, 2011)

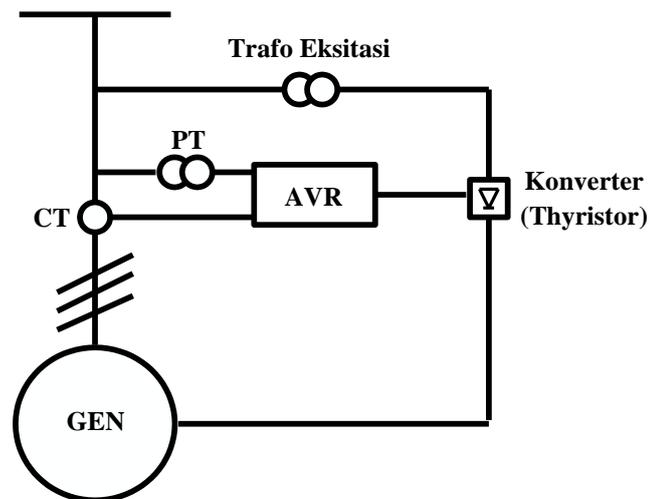
b. Sistem Eksitasi Statis

Sistem eksitasi statis menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak (*static*), artinya peralatan eksitasi tidak ikut berputar bersama dengan rotor generator sinkron. Sistem eksitasi statis (*static excitation sistem*) atau disebut juga dengan *self excitation* merupakan sistem eksitasi yang tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi generator sinkron. Sumber eksitasi pada sistem eksitasi statis berasal dari tegangan output generator itu sendiri yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan penyearah thyristor.

Pada mulanya pada rotor ada sedikit magnet sisa, magnet sisa ini akan menimbulkan tegangan pada stator tegangan ini kemudian masuk dalam penyearah dan dimasukkan kembali pada rotor, akibatnya medan magnet yang dihasilkan makin besar dan tegangan AC naik demikian seterusnya sampai dicapai tegangan nominal dari generator AC tersebut.

Biasanya penyearah itu mempunyai pengatur sehingga tegangan generator dapat diatur konstan. Bersama dengan penyearah, blok pengatur kestabilan tersebut sering disebut AVR.

Dibandingkan dengan generator yang konvensional generator dengan sistem eksitasi statis memang sudah jauh lebih baik yaitu tidak ada generator arus searah (yang keandalannya rendah) dan beban generator arus searah pada penggerak mula hilang. Eksiter diganti dengan eksiter yang tidak berputar yaitu penyearah karena itu disebut eksiter statis. Gambar 2.15 berikut adalah sistem eksitasi statis.



Gambar 2.15 Sistem Eksitasi Statis

(Sumber :Ahmad Faisal, 2011)

Untuk keperluan eksitasi awal pada generator sinkron, maka sistem eksitasi statis dilengkapi dengan *field flashing*. Hal ini dibutuhkan karena generator sinkron tidak memiliki sumber arus dan

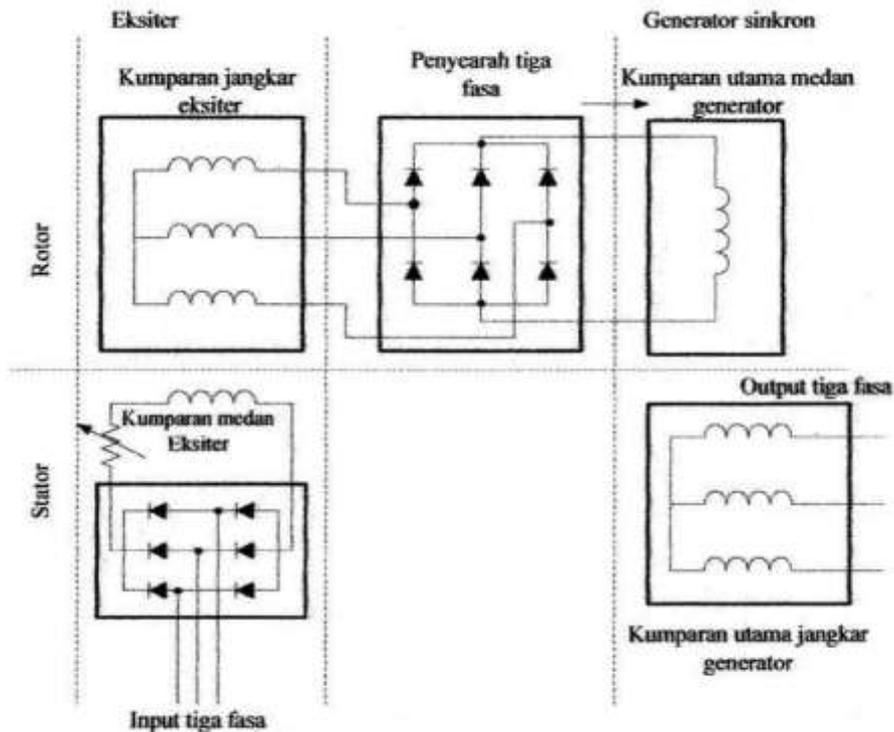
tegangan sendiri untuk mensuplai kumparan medan. Penggunaan *slip ring* dan sikat pada eksitasi ini menyebabkan sistem eksitasi ini tidak efisien dan efektif.

2. Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

a. Sistem Eksitasi Menggunakan Baterai

Sistem eksitasi tanpa sikat diaplikasikan pada generator sinkron, dimana suplai arus searah kebelitan medan dilakukan tanpa melalui sikat. Arus searah untuk suplai eksitasi untuk awal start generator digunakan suplai dari baterai, yang sering dinamakan penguat mula, dimana arus ini selanjutnya disalurkan ke belitan medan AC eksiter. Tegangan keluaran dari generator sinkron ini disearahkan oleh penyearah yang menggunakan dioda, yang disebut *rotating rectifier*, yang diletakkan pada bagian poros ataupun pada bagian dalam dari rotor generator sinkron, sehingga *rotating rectifier* tersebut ikut berputar sesuai dengan putaran rotor, seperti pada Gambar 2.16 berikut:

Setelah tegangan generator mencapai tegangan nominalnya maka catu daya DC (baterai) biasanya dilepas dan digantikan oleh penyearah. Penguatan yang dipakai adalah sistem *self excitation system* yaitu sistem dimana sumber daya untuk penguatannya diperoleh dari keluaran tiga fasa generator itu sendiri. Gambar 2.17 menggambarkan sistem eksitasi tanpa sikat dengan suplai tiga fasa.



Gambar 2.17 Sistem Eksitasi Dengan Suplai Tiga Fasa

(Sumber :Ahmad Faisal, 2011)

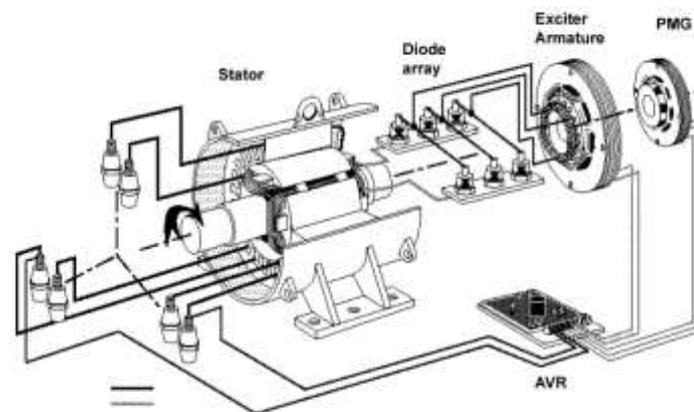
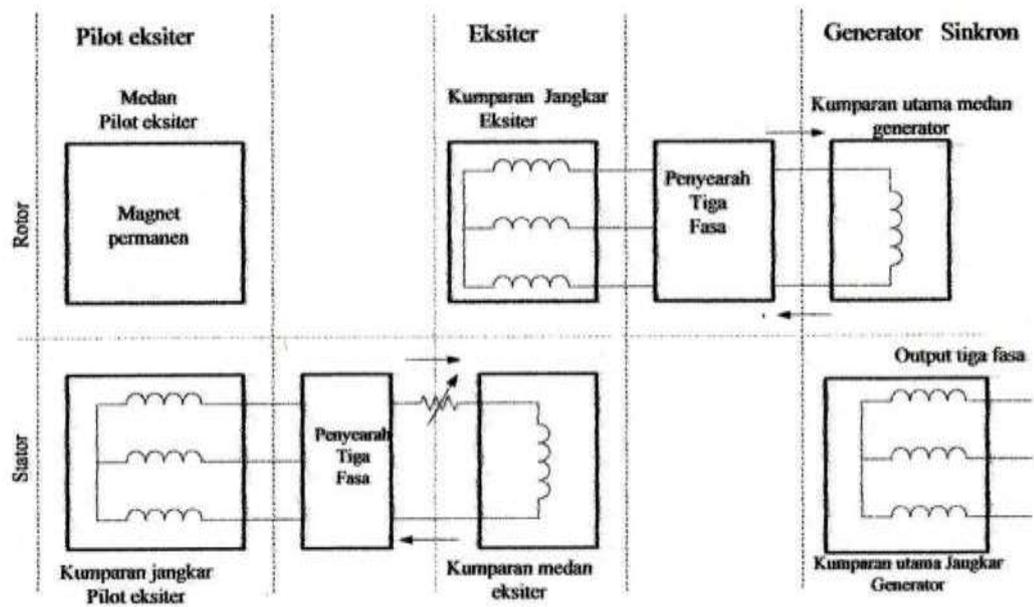
Pada Gambar 2.17, untuk membangkitkan arus medan digunakan penyearah, dimana arus yang disearahkan diperoleh dari keluaran tiga fasa generator itu sendiri melalui transformator atau sering disebut

Eksitasi Transformator, berfungsi menurunkan tegangan keluaran generator untuk disuplai pada penyearah.

b. Sistem Eksitasi Menggunakan Pemanen Magnet Generator (PMG)

Suatu generator sinkron harus memiliki sebuah medan magnet yang berputar agar generator tersebut menghasilkan tegangan pada statornya. Medan magnet ini dapat dihasilkan dari belitan rotor yang disuplai dengan sumber listrik arus searah. Cara lain untuk menghasilkan medan magnet pada rotor adalah dengan menggunakan magnet permanen sebagai sumber eksitasinya ini disebut dengan permanen magnet generator (PMG).

Generator sinkron yang berkapasitas besar biasanya menggunakan sistem *brushless excitation* yang dilengkapi dengan permanen magnet generator. Hal ini dimaksudkan agar sistem eksitasi dari generator sama sekali tidak tergantung pada sumber daya listrik dari luar mesin itu. Pada Gambar 2.18 dapat dilihat bentuk skematik dari sistem eksitasi dengan menggunakan Permanen Magnet Generator (PMG).



Gambar 2.18 Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Permanen Magnet

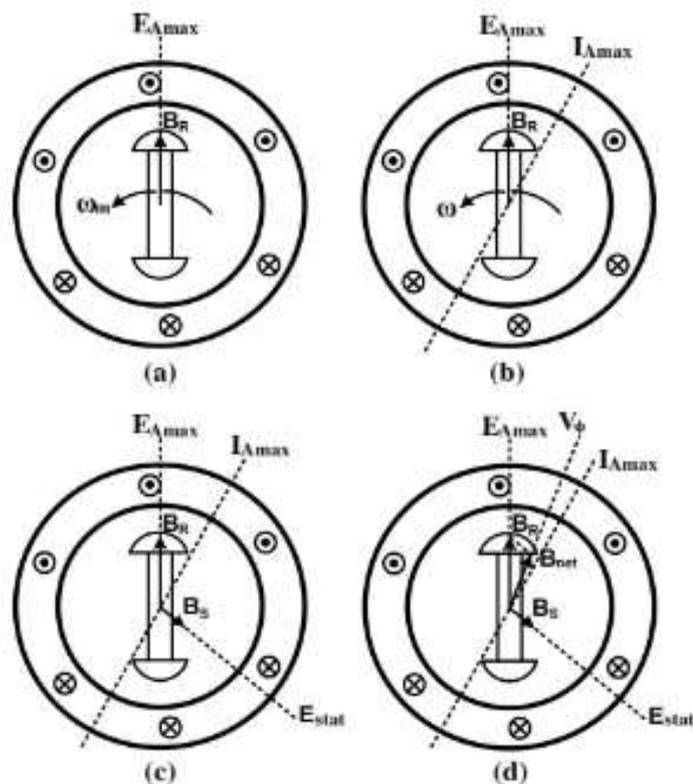
Generator

(Sumber :Ahmad Faisal, 2011)

Dari Gambar 2.18, bahwa pada bagian mesin yang berputar (rotor) terdapat magnet permanen (PMG), kumparan jangkar generator eksitasi, penyearah tiga fasa (*rotating diode*), kumparan medan generator utama yang saling terhubung. Hal ini memungkinkan generator tersebut tidak menggunakan *slip ring* dan sikat dalam pengoperasiannya sehingga lebih efektif dan efisien. Pada bagian yang tidak berputar (stator) terdapat AVR (*Auto Voltage Regulator*) yang berfungsi untuk mengontrol dan menyesuaikan tegangan/arus AC keluaran dari PMG yang sudah disearahkan untuk selanjutnya disalurkan ke eksiter utama dimana tegangan yang dikeluarkan oleh PMG masih sangat kecil sehingga diperlukan eksiter utama dengan keluaran tegangan yang besar untuk membangkitkan medan magnet pada kumparan medan generator utama. Selanjutnya, arus AC eksiter utama akan disearahkan oleh penyearah tiga fasa yang berputar (*rotating diode*), sehingga arus keluaran dari eksiter utama inilah yang akan membangkitkan medan magnet pada kumparan medan rotor generator utama. Maka akan terjadi reaksi antara medan magnet rotor yang akan memotong fluks magnet pada kumparan stator, sehingga akan timbul gaya gerak listrik pada medan stator, hal tersebut terjadi berulang-ulang apabila generator beroperasi. Tegangan keluaran generator dengan sistem penguatan magnet permanen biasanya diambil dari kumparan stator atau pada bagian yang diam, karena tidak memerlukan lebih banyak peralatan tambahan dan lebih mudah.

2.2.11 Reaksi Jangkar

Bila beban terhubung ke terminal generator maka pada belitan stator akan mengalir arus, sehingga timbul medan magnet pada belitan stator. Medan magnet belitan stator ini akan mendistorsi medan magnet yang dihasilkan belitan rotor. Seperti yang dijelaskan pada Gambar 2.19 berikut:



Gambar 2.19 Model Reaksi Jangkar Generator

(Sumber : <https://kurniawanpramana.wordpress.com/2011/10/09/generator-sinkron-2/>)

Gambar 2.19.a Medan magnet yang berputar akan menghasilkan tegangan induksi E_A . Bila generator melayani beban dengan induktif, maka arus pada stator akan tertinggal seperti pada Gambar 2.19.b Arus stator tadi akan menghasilkan medan magnet sendiri B_s dan tegangan stator E_{Stat} ,

seperti pada Gambar 2.19.c Vektor penjumlahan antara B_s dan B_R menghasilkan B_{net} , dan penjumlahan E_{stat} dan E_A akan menghasilkan V_t pada terminal jangkar. Saat beban terhubung ke beban induktif, arus jangkar akan tertinggal terhadap tegangan jangkar. Arus pada belitan stator akan menghasilkan medan magnet B_s , yang kemudian akan menghasilkan tegangan stator E_{stat} . Dua tegangan yaitu tegangan jangkar E_A dan tegangan reaksi jangkar E_{stat} akan menghasilkan V_t , dimana:

$$V_t = E_A + E_{stat} \dots\dots\dots(2.11)$$

Tegangan Reaksi Jangkar $E_{stat} = -jXI_a$

Sehingga Persaman (2.11) dapat ditulis kembali sebagai :

$$V_t = E_A - jXI_a \dots\dots\dots(2.12)$$

Selain pengaruh reaksi jangkar ini, pengurangan tegangan induksi generator sinkron juga karena adanya tahanan R_a dan Induktansi belitan stator X_a dan penjumlahan X dan X_a sering disebut Reaktansi Sinkron X_s , sehingga Persamaan (2.12) dapat ditulis kembali sebagai:

$$V_t = E_A - jXI_a - jX_a I_a - I_a R_a \dots\dots\dots(2.13)$$

$$V_t = E_A - jX_s I_a - I_a R_a \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

V_t = Tegangan terminal generator (Volt)

E_{stat} = Tegangan pada stator (Volt)

E_A = GGL pada jangkar (Volt)

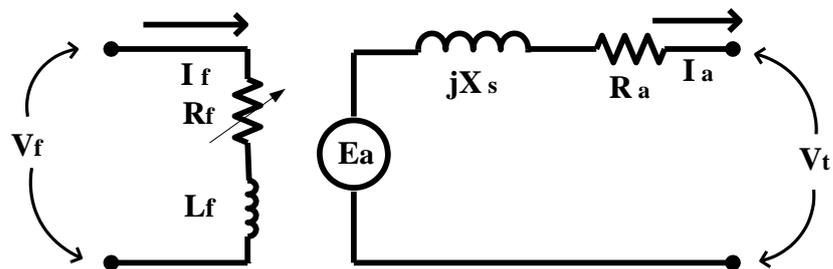
X_s = Impedansi Sinkron (Ohm)

I_a = Arus Jangkar (Ampere)

R_a = Tahanan Jangkar (Ohm)

X_{ar} = Impedansi armature (Ohm)

Dari Persamaan (2.14) dapat dibuat model rangkaian ekivalen generator sinkron per fasa seperti pada Gambar 2.20 berikut :



Gambar 2.20 Rangkain Ekivalen Generator Sinkron

Perfasa Tanpa Beban

(Sumber : <https://kurniawanpramana.wordpress.com/2011/10/09/generator-sinkron-2/>)

2.2.12 Generator Sinkron Satu Fasa Dalam Praktik

Spesifikasi Generator Sinkron Satu Fasa

Pabrik Pembuat	: General
Negara Pembuat	: China
Fasa	: 1
Tipe	: ST - 3
Kapasitas	: 3 kVA
Tegangan	: 230 Volt
Arus Jangkar	: 13 Ampere
Frekuensi	: 50 Hz
Faktor Daya ($\cos \varphi$)	: 1.0
Putaran	: 1500 rpm
Arus Eksitasi	: 2 Ampere
Tegangan Eksitasi	: 42 Volt
Kelas Isolasi	: B

Spesifikasi Motor listrik sebagai penggerak mula

Merk	: Dong Feng
Fasa	: 3
Negara pembuat	: China
Tipe	: Y100L ₁ -4
Hubungan belitan jangkar	: Bintang (Y)
Jumlah kutub	: 4
Daya	: 2.2 kW / 3 HP
Tegangan	: 220/380 Volt
Arus	: 5.16 Ampere
Frekuensi	: 50 Hz
Putaran	: 1430 rpm
Kelas Isolasi	: B

Seperti yang sudah dijelaskan diatas bahwa generator satu fasa mempunyai lilitan/kumparan yang menghasilkan arus listrik satu fasa dimana sistem dalam melilit kumparan generator 1 fasa ini digambarkan dengan 1 garis dengan ujung-ujung kumparan ditandai dengan huruf U dan X.

Generator sinkron satu fasa yang diteliti mempunyai memiliki rotor kutub menonjol (*salient pole*) yang dikopel atau dihubungkan dengan motor listrik tiga fasa dengan daya 2.2 kW sebagai penggerak mula (*prime mover*). Kapasitas Generator sinkron yang diteliti adalah 3 kVA dengan tegangan keluaran 220-230 VAC, sistem eksitasi generator ini menggunakan sikat arang (*brush excitation*) dengan tegangan 42 VDC. Sebagai pengatur kecepatan putar rotor adalah VSD (*Variable Speed Drive*) dengan mengatur besar frekuensinya, akan tetapi pada penelitian ini arus eksitasi (I_f) dan kecepatan putar (n) yang dijaga konstan 2 Ampere dan 1500 rpm untuk mendapatkan tegangan terminal dan frekuensi yang konstan yaitu 50 Hz.