

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Ada beberapa referensi pustaka yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini. Pertama, penelitian mengenai generator sinkron. Menurut Syahputra Rudi (2012), dengan judul "*Pengaruh Perubahan Arus Eksitasi Terhadap Keluaran Generator Sinkron*". Dari penelitian disimpulkan bahwa tegangan keluaran generator sinkron sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya arus eksitasi yang diberikan. Tegangan keluaran generator sinkron akan berbanding lurus dengan nilai arus eksitasi yang diberikan. Penambahan beban mengakibatkan tegangan output generator mengalami penurunan, hal ini memperlihatkan hubungan yang berbanding terbalik antara penambahan arus beban ( $I_a$ ) dan tegangan output generator sinkron.

Sepannur Bandri (2013) melakukan penelitian yang berjudul "*Analisa Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Genertor Sinkron (Aplikasi PLTG Pauh Limo Padang)*". Dari penelitian itu, disimpulkan bahwa perubahan arus beban terjadi akibat perubahan nilai beban yang terpakai, sehingga akan mempengaruhi nilai tegangan yang dibangkitkan oleh generator itu. Pengoperasian generator sinkron memiliki batas tertentu dari besarnya daya yang dapat dihasilkan dan besarnya daya yang dapat dipikul oleh sebuah generator sinkron agar dapat bekerja dengan normal. Pengoperasian generator dituntut suatu kestabilan agar kinerja generator menjadi efektif dan efisien. Dengan penentuan karakteristik generator maka didapatkan nilai yang tepat dalam pengoperasian generator.

Kedua, penelitian mengenai pengaruh beban terhadap generator sinkron. Menurut Ahmad Faisal (2013), dengan judul "*Analisa Perbandingan Pengaruh Pembebanan Resistif, Induktif, Kapasitif Dan Kombinasi Beban RLC Terhadap Regulasi Tegangan Dan Efisiensi Pada Generator Sinkron Tiga Fasa*". Dari penelitian tersebut, dikatakan bahwa perubahan beban dapat terjadi sewaktu-waktu pada sistem. Akibat perubahan beban yang dilayani oleh generator sinkron

akan mempengaruhi tegangan dan daya keluaran dari generator tersebut, sehingga menyebabkan perubahan regulasi tegangan dan efisiensi.

Menurut Agus Supardi, Joko Susilo, dan Faris (Jurnal Emitor UMS 2014), dengan judul "*Pengaruh Pembebanan Terhadap Karakteristik Keluaran Generator Induksi Satu Fasa*". Dari penelitian tersebut dijelaskan bahwa generator induksi dalam kondisi tidak berbeban, kemudian diputar pada kecepatan 1500 rpm dan kapasitor 8, 16, 24, dan 32 uF dihubungkan pada kedua terminal dan saat kondisi berbeban. Dari hasil itu didapat kenaikan daya beban yang dihubungkan pada generator induksi akan menyebabkan penurunan tegangan, kecepatan putar, dan frekuensinya.

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Generator Sinkron

#### 2.2.1.1 Umum

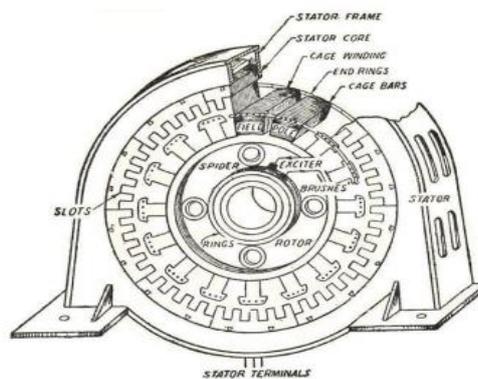
Secara umum, generator sinkron atau alternator merupakan salah satu jenis mesin listrik yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Tegangan keluaran dari generator sinkron berupa tegangan bolak-balik, maka dari itu disebut juga dengan generator ac. Energi mekanik generator diperoleh dari putaran rotor yang digerakan oleh penggerak mula, sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotor.

Pada prinsipnya, generator sinkron merupakan kebalikan dari generator dc. Untuk generator dc, kumparan jangkar terdapat pada bagian rotor dan terletak di antara kutub-kutub magnet yang tetap ditempat yang kemudian diputar oleh tenaga mekanik. Sebaliknya, pada generator sinkron, kumparan jangkar disebut kumparan stator karena berada pada tempat yang tetap, sedangkan kumparan rotor bersama dengan kumparan magnet diputar oleh tenaga mekanik. Pada generator sinkron, frekuensi listrik yang dihasilkan serempak atau sinkron dengan putaran mekanik generator tersebut. Selain itu, pada bagian rotor terdiri dari belitan medan dengan suplai arus dc yang akan menghasilkan medan magnet yang mana kecepatan putarnya sama dengan kecepatan putar medan magnet pada stator.

### 2.2.1.2 Konstruksi Generator Sinkron

Generator sinkron juga merupakan salah satu jenis mesin sinkron yang secara umum mempunyai konstruksi yang sama. Konstruksi dari mesin sinkron sendiri terdiri atas stator sebagai bagian yang diam, rotor sebagai bagian yang bergerak dan celah udara. Celah udara pada generator sinkron berfungsi sebagai tempat berputarnya rotor dan tempat induksi elektromagnetik dari rotor ke stator terjadi atau fluksi. Generator sinkron yang akan dijadikan objek penelitian berupa generator satu fasa dengan penguat sendiri.

Konstruksi generator sinkron berbeda-beda tergantung dari klasifikasinya. Jika diklasifikasi berdasarkan susunan kumparan, generator sinkron dibedakan jadi *rotary armature type* dan *rotary field type*. Sedangkan jika berdasarkan bentuk medan, generator sinkron dibedakan jadi *cylindrical rotor (non-salient pole)* dan *salient pole machine*. Gambar di bawah terlihat konstruksi dari generator sinkron secara umum.



Gambar 2.1 Konstruksi sederhana generator sinkron (Sumber: Ennopati, 2009)

#### a. Stator

Stator atau armatur merupakan bagian dari generator sinkron yang berfungsi sebagai penerima induksi magnet dari rotor. Stator juga merupakan bagian yang diam yang berbentuk rangka silinder dengan gulungan kawat konduktor yang disusun tertentu dan ditempatkan pada bagian alur-alur inti

besi, disebut belitan jangkar. Pada gambar berikut memperlihatkan konstruksi dari stator tempat kumparan jangkar.



Gambar 2.2 Konstruksi stator (Sumber: Nisfi N.L.M, 2018)

Stator terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu:

1. Rangka stator

Komponen ini berfungsi sebagai kerangka penyangga inti jangkar generator. Rangka stator berupa kerangka (rumah pembangkit) yang terbuat dari elemen plat baja yang dibentuk sedemikian rupa hingga diperoleh rangka stator yang sesuai dengan kebutuhan.

2. Inti stator

Inti merupakan bagian yang dibuat dari campuran laminasi baja atau besi magnetik yang berguna untuk mengurangi arus *eddy*. Fungsi inti stator sebagai tempat mengalirnya fluks magnet.

3. Alur (slot) dan Gigi

Komponen ini berfungsi sebagai tempat untuk meletakkan kumparan stator. Pada *slot* (alur) dan gigi terdapat tiga bentuk yaitu, slot terbuka, slot setengah terbuka dan slot tertutup.

4. Kumparan stator/jangkar

Kumparan jangkar adalah tempat terbentuknya ggl induksi yang diakibatkan adanya perpotongan medan magnet putar dari rotor yang memotong kumparan jangkar atau penghantar stator. Kumparan jangkar

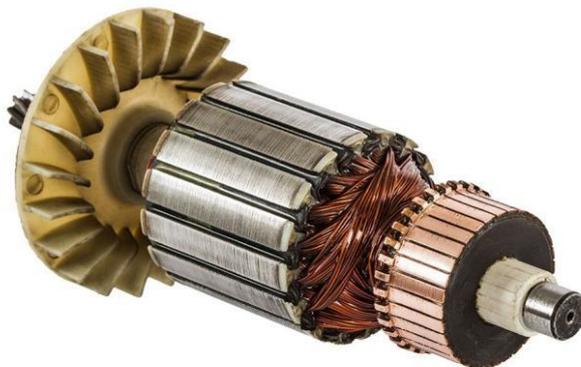
ini berupa gulungan kawat penghantar yang berisolasi yang disusun sedemikian rupa dan ditempatkan pada alur-alur inti besi.

#### 5. Sikat

Pada umumnya generator sinkron memiliki dua jenis yaitu generator sinkron yang menggunakan sikat (*brush*) dan tanpa menggunakan sikat (*brushless*). Sikat pada generator sinkron berguna sebagai saklar putar untuk mengalirkan arus searah ke kumparan medan. Namun, daya yang dihasilkan dengan menggunakan sikat pada generator ini sangat terbatas tidak sebesar seperti daya yang dihasilkan oleh generator yang menggunakan sistem *brushless*.

#### b. Rotor

Rotor merupakan bagian yang bergerak/berputar dan berfungsi untuk membangkitkan medan magnet sebagai pembangkit tegangan yang akan diinduksikan ke stator. Rotor juga berfungsi sebagai tempat belitan medan eksitasi. Kumparan medan magnet tersusun pada alur-alur besi rotor dan kutub-kutub magnet dengan lilitannya digunakan untuk mengaliri arus searah. Dengan kata lain, bahwa ketika pada kumparan medan dialiri arus searah atau dc maka akan terbentuk kutub magnet utara dan selatan pada inti rotor.



Gambar 2.3 Konstruksi rotor (Sumber: Nisfi N.L.M, 2018)

Pada rotor generator, terdapat empat komponen utama antara lain:

1. *Slip ring*

*Slip ring* ini berbentuk cincin logam yang melingkar pada poros rotor dan dipisahkan oleh isolasi tertentu. Pada *slip ring* dipasang terminal kumparan rotor untuk dihubungkan ke sumber arus dc melalui sikat yang menempel pada *slip ring*.

2. Kumparan rotor atau kumparan medan.

Kumparan rotor merupakan bagian utama dalam rotor yang mana dapat menghasilkan magnet dan mendapatkan arus dc dari sumber eksitasi.

3. Poros Rotor

Poros rotor digunakan sebagai tempat penempatan kumparan medan yang berbentuk slot-slot secara paralel terhadap poros rotor.

2.2.1.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Suatu mesin listrik akan bekerja apabila memiliki kumparan medan yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet dan kumparan jangkar untuk menghasilkan ggl induksi pada konduktor yang terdapat pada medan jangkar, serta celah udara yang berfungsi untuk memungkinkan berputarnya jangkar dalam medan magnet.

Prinsip kerja dari generator sinkron dimulai ketika kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang disuplai oleh arus searah (dc). Arus searah yang mengalir pada kumparan medan akan menghasilkan medan magnet atau fluk pada kumparan rotor. Kemudian rotor akan diputar oleh penggerak mula (*prime mover*) yang telah terhubung dengan rotor sehingga berputar pada kecepatan tertentu. Medan magnet bergerak pada arah putaran rotor. Dengan perkataan lain, bahwa pada rotor mempunyai kecepatan putar yang sama dengan medan magnet. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet dengan frekuensi pada stator dapat dilihat pada persamaan frekuensi dibawah ini. Pada persamaan tersebut juga menunjukkan adanya hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi yang dihasilkan.

$$N_s = 120f/P \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

$N_s$  = Kecepatan sinkron (rpm)

$f$  = Frekuensi listrik (Hz)

$P$  = Jumlah kutub

Ketika rotor berputar maka pada saat itu pula medan magnet berputar dan bersifat bolak-balik atau fluk putar. Fluk putar ini selanjutnya akan memotong-motong kumparan stator, sehingga mengakibatkan ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik (ggl) karena adanya pengaruh induksi dari fluk putar tersebut. Selain itu, Gaya gerak listrik yang terdapat pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik, atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putaran rotor. Sedangkan, besarnya kuat medan pada rotor dapat diatur dengan cara mengatur arus medan ( $I_f$ ) yang diberikan pada rotor. Adapun besarnya ggl induksi kumparan stator atau armatur per fasa sebagai berikut:

$$\frac{E_a}{f_{asa}} = 4,44 \cdot f \cdot M \cdot \phi \cdot k_d \dots \dots \dots (2.2)$$

Jika  $M = Z/2$ , maka persamaan akan menjadi seperti:

$$\frac{E_a}{f_{asa}} = 4,44 \cdot f \cdot \frac{Z}{2} \cdot \phi \cdot k_d \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana:

$E_a$  = Gaya gerak listrik armatur per fasa (V)

$F$  = Frekuensi keluaran generator (Hz)

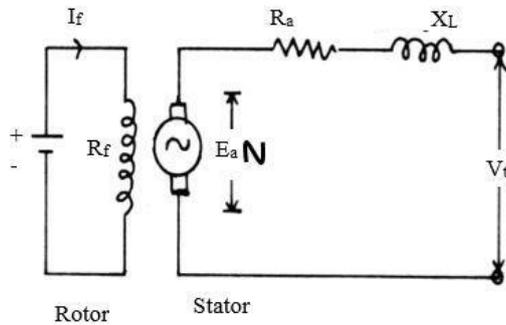
$M$  = Jumlah kumparan per fasa

$Z$  = Jumlah konduktor seluruh slot per fasa

$k_d$  = Faktor distribusi. Ini diperlukan karena kumparan armatur atau alternator tidak terletak dalam satu slot

$\phi$  = Fluks magnet per kutub

Fluk magnet yang dihasilkan oleh kumparan rotor tidak seluruhnya tercangkup oleh kumparan stator. Dengan kata lain, bahwa terdapat fluk bocor pada stator yang dinyatakan dengan hambatan armatur ( $R_a$ ) dan reaktansi bocor ( $X_L$ ). Bagan rangkaian dari generator sinkron dalam keadaan tanpa beban, sebagai berikut:



Gambar 2.4 Rangkaian generator sinkron non beban (Sumber: Nisfi N.L.M, 2018)

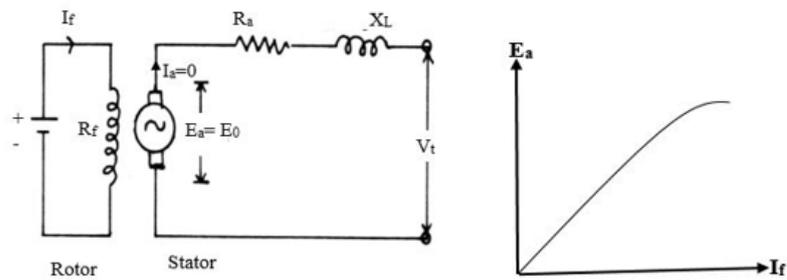
Saat generator sinkron dalam keadaan non beban, arus armatur ( $I_a$ ) = 0. Dengan demikian besarnya tegangan terminal sebagai berikut:

$$V_t = E_a = E_0 \dots \dots \dots (2.4)$$

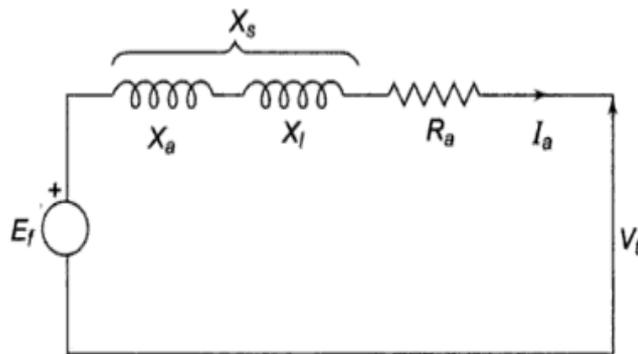
Oleh karena besarnya ggl pada armatur merupakan fungsi dari fluks magnet, maka dapat ditulis sebagai berikut:

$$E_a = f(\Phi) \dots \dots \dots (2.5)$$

Berdasarkan persamaan  $E_a$  diatas, menjelaskan bahwa besarnya arus penguat medan berbanding lurus dengan fluk dan ggl armatur. Pengaturan arus penguat medan pada nilai tertentu, akan didapat nilai ggl armatur tanpa beban dalam keadaan saturasi. Secara grafik hubungan antara arus penguat medan  $I_f$  dan  $E_a$  dijelaskan pada gambar dibawah ini.

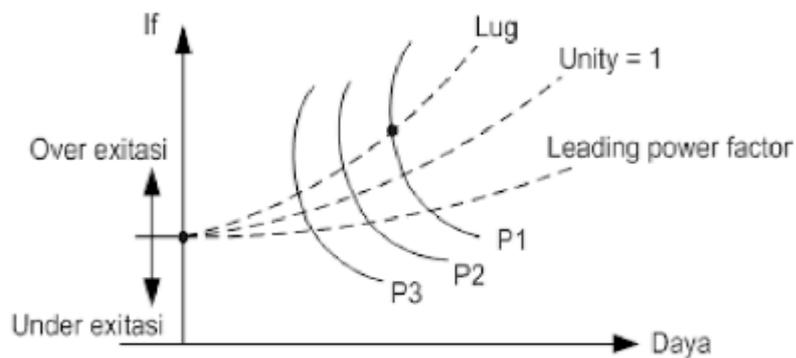


Gambar 2.5 Rangkaian ekivalen dan grafik saat generator sinkron tidak berbeban  
(Sumber: Nisfi N.L.M, 2018)



Gambar 2.6 Model rangkaian generator sinkron (Sumber: Kothari & Nagrath, 2008)

Adapun kurva hubungan antara arus eksitasi generator dengan daya generator pada berbagai kondisi faktor daya beban dapat dilihat di bawah ini.



Gambar 2.7 Kurva pengaturan aliran daya (Sumber: Yakob Liklikwatil, 2014)

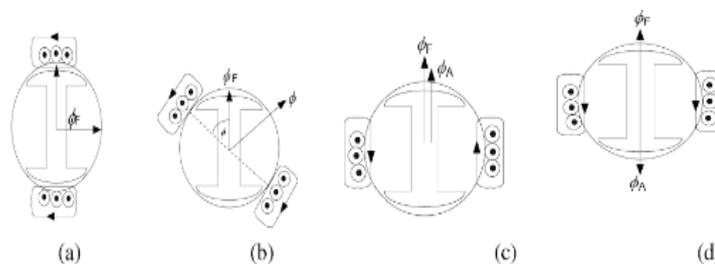
### 2.2.1.4 Reaksi Jangkar

Seperti yang sudah dijelaskan di atas, reaksi jangkar timbul akibat adanya arus jangkar yang dihasilkan oleh fluks putar dari kumparan yang rangkaian keluarannya dipasang beban. Adanya fluks yang dihasilkan oleh arus kumparan jangkar ( $\phi_A$ ) yang melawan fluks utama ( $\phi_F$ ) jika digabungkan akan menjadi fluks resultan. Fluks ini yang akan menghasilkan tegangan ggl induksi. Lihat persamaan di bawah:

$$\phi_R = \phi_F + \phi_A \dots \dots \dots (2.6)$$

Reaksi jangkar akan memperkecil tegangan ggl jika  $\phi_A$  melawan fluks utama  $\phi_F$ , dan reaksi jangkar akan memperbesar tegangan ggl jika  $\phi_A$  searah dengan fluks utama  $\phi_F$ . Semakin besar beban generator, maka pengaruh reaksi jangkar akan membesar.

Di bawah ini merupakan kondisi reaksi jangkar dengan jenis beban yang bervariasi.



Gambar 2.8 Vektor ruang mesin/generator sinkron (Sumber: Yakob Liklikwatil, 2014)

Pada gambar (a) merupakan arus jangkar (I) sefasa dengan ggl (E) dengan jenis beban berupa tahanan (resistif).  $\phi_A$  tegak lurus terhadap  $\phi_F$ . Gambar (b) merupakan arus jangkar (I) terdahulu, dengan sudut  $\theta$  dari ggl (E) dengan jenis beban kapasitif.  $\phi_A$  terbelakangi dengan sudut  $(90^\circ - \theta)$ . Untuk gambar (c) merupakan arus jangkar (I) terdahulu  $90^\circ$  dari ggl (E) dengan jenis beban kapasitif murni.  $\phi_A$  memperkuat  $\phi_F$  terjadi pengaruh pemagnitan. Sedangkan gambar (d)

merupakan arus jangkar ( $I$ ) terbelakang  $90^\circ$  dari ggl ( $E$ ) dengan jenis beban induktif murni.  $\Phi_A$  memperlemah  $\Phi_F$  terjadi pengaruh pemagnitan.

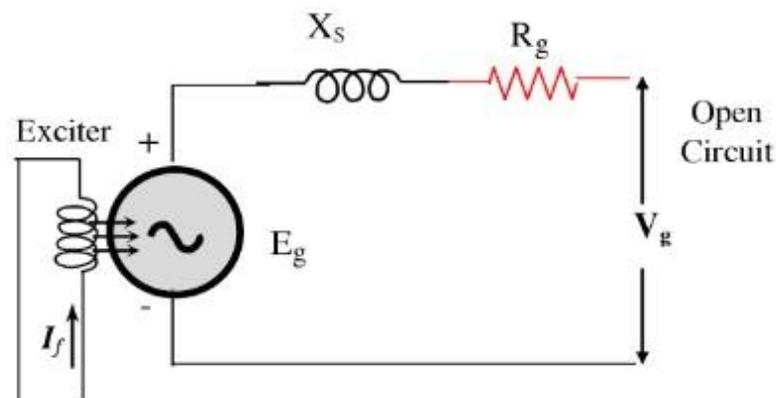
Terlihat reaksi jangkar alternator bergantung pada jenis beban. Dengan kata lain, tergantung pada sudut fasa antara arus jangkar ( $I$ ) dan tegangan induksi (ggl)

#### 2.2.1.5 Karakteristik Generator Sinkron

Ada beberapa karakteristik yang digunakan untuk menentukan parameter mesin listrik yaitu:

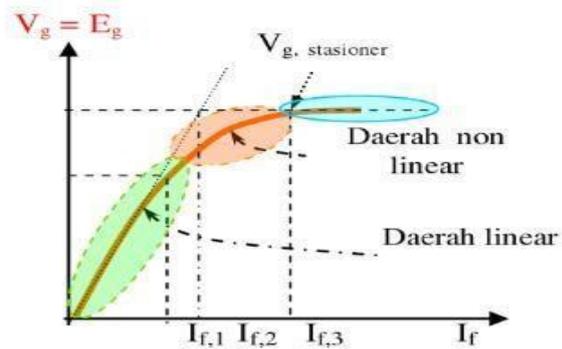
##### 1. Karakteristik *Open Circuit*

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 2.9 Rangkaian generator sinkron saat *open circuit* (Sumber: Muslim, 2008)

Ketika nilai arus medan eksiter diperbesar 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 sampai pada titik tertentu maka tegangan tidak lagi mengalami perubahan harga atau konstan.

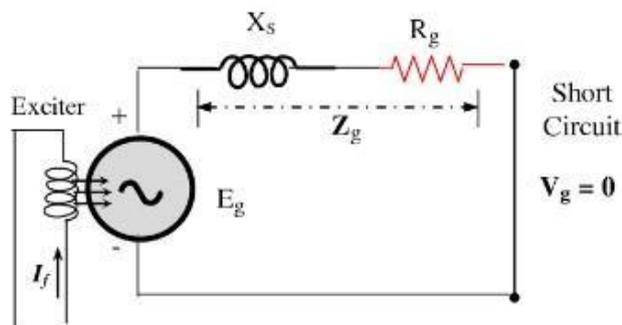


Gambar 2.10 Kurva  $V_g$  terhadap  $I_f$  pada kondisi *open circuit* (Sumber: Muslim, 2008)

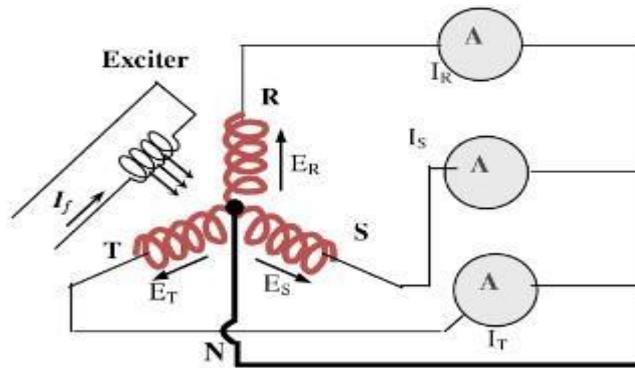
Harga dari  $I_{f2}$  sampai dengan  $I_{f3}$  adalah tambahan arus medan yang diperlukan untuk daerah jenuh. Dan besar tegangan terminal jangkar generator dalam keadaan rangkaian terbuka (*open circuit*) adalah sama dengan besar ggl ( $V_g = E_g$ ).

## 2. Karakteristik Hubung Singkat (*Short Circuit*)

Karakteristik *short circuit* adalah suatu bentuk penggambaran dari hubungan arus fasa hubung singkat sebagai fungsi arus medan, di mana ketiga fasa generator dihubung singkat dengan kecepatan putaran yang konstan.



Gambar 2.11 Rangkaian generator saat terhubung singkat satu fasa (Sumber: Muslim, 2008)



Gambar 2.12 Rangkaian generator saat terhubung singkat tiga fasa (Sumber: Muslim, 2008)

Dari persamaan umum generator, diperoleh:

$$E_a = V_g + I_g(R_g + jX_s) \dots \dots \dots (2.7)$$

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

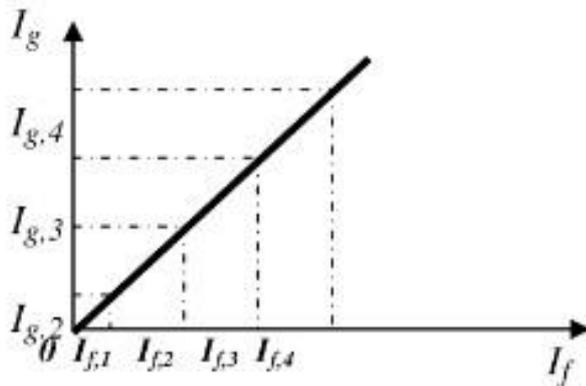
$$E_a = I_g(R_g + jX_s) \dots \dots \dots (2.8)$$

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

$$K_1 I_f = I_{hs} K_2 \dots \dots \dots (2.9)$$

$$I_{hs} = \frac{K_1}{K_2} I_f \dots \dots \dots (2.10)$$

Dari persamaan di atas, pengukuran hubung singkat ini berdasarkan pada penambahan arus medan ketika kondisi nol hingga batas yang diperlukan. Karakteristik hubung singkat ini dapat dilihat pada gambar 2.20 sebagai berikut:



Gambar 2.13 Karakteristik saat kondisi hubung singkat (Sumber: Muslim, 2008)

#### 2.2.1.6 Daya Generator

Dalam suatu sistem pembangkit energi listrik, daya listrik dibagi menjadi tiga, yaitu:

##### 1. Daya Aktif (P)

Daya nyata yang memiliki satuan Watt (W). Daya aktif merupakan daya yang dibutuhkan oleh beban resistif, dimana daya ini akan menunjukkan adanya aliran energi listrik dari pembangkit ke beban. Secara umum daya ini sering digunakan oleh konsumen dan sebagai satuan yang digunakan untuk daya listrik. Dalam kehidupan sehari-hari energi listrik yang disalurkan dari PLN ke rumah-rumah, maka daya yang tertulis pada kWh meter merupakan daya aktif dan itu merupakan daya yang akan dibayarkan oleh pelanggan.

$$P = V \cdot I \cdot \cos \theta \text{ (Satu fasa) } \dots\dots\dots(2.11)$$

$$P = \sqrt{3} V \cdot I \cdot \cos \theta \text{ (Tiga fasa) } \dots\dots\dots(2.12)$$

##### 2. Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif memiliki satuan VAR. Daya reaktif merupakan daya yang tidak dimanfaatkan oleh konsumen, namun hanya dapat dimanfaatkan pada pembangkitan. Pada pembangkit daya reaktif ini digunakan untuk

membangkitkan medan magnet, sehingga dari pembangkitan medan magnet tersebut akan terbentuk fluks-fluks magnet.

$$Q = V.I. \sin \theta \text{ (Satu fasa) } \dots\dots\dots(2.13)$$

$$Q = \sqrt{3}V.I. \sin \theta \text{ (Tiga fasa) } \dots\dots\dots(2.14)$$

### 3. Daya Semu (S)

Daya semu memiliki satuan VA. Daya semu merupakan daya sebenarnya yang disuplai oleh PLN, yang merupakan resultan antara daya aktif (P) dengan daya reaktif (Q).

$$S = V.I \text{ atau } S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots(2.15)$$

Untuk faktor daya beban dapat didefinisikan sebagai perbandingan daya aktif (Watt) dengan daya reaktif (VAR). Untuk faktor daya dapat dibuat persamaan sebagai berikut:

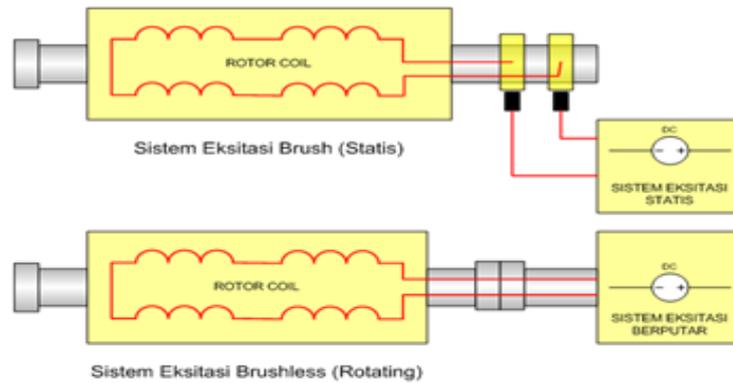
$$\cos \theta = \frac{P}{S} \dots\dots\dots(2.16)$$

Faktor daya yang rendah dapat merugikan, karena mengakibatkan arus beban menjadi lebih tinggi. Dengan daya reaktif yang rendah dapat menambah faktor daya, sehingga dapat meningkatkan kualitas daya pada beban dan efisiensi generator.

#### 2.2.2 Sistem Eksitasi

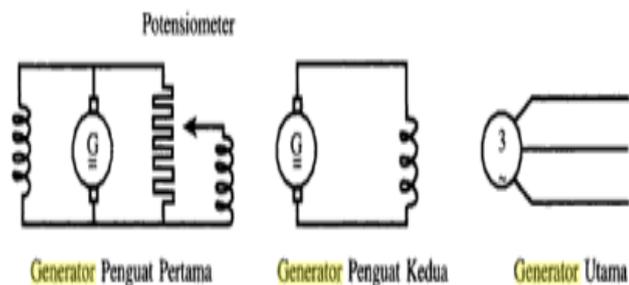
Sistem eksitasi merupakan suatu proses penguatan medan magnet dengan cara memberikan arus searah (dc) pada belitan medan pada rotor generator sinkron. Secara umum ketika suatu konduktor berupa kumparan dialiri arus searah (dc), maka kumparan tersebut akan menjadi magnet yang nantinya akan menghasilkan fluks magnet. Ketika kumparan medan sudah diberi arus searah

yang di dapat dari arus eksitasi dan berputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan jangkar stator generator akan terinduksi dari fluks-fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan, sehingga akan menghasilkan tegangan listrik bolak-balik (ac).



Gambar 2.14 Sistem eksitasi generator (Sumber: Anonim, Pemeliharaan Listrik Pembangkit, 2016)

Pengaturan tegangan dari generator utama dilakukan dengan mengatur besarnya arus eksitasi dengan cara mengatur potensiometer seperti gambar 2.15. Potensiometer ini mengatur arus penguat untuk generator penguat kedua yang menghasilkan arus penguat untuk generator utama. Dengan cara ini, arus penguat yang diatur tidak terlalu besar nilainya, sehingga kerugian daya dalam potensiometer tidak terlalu besar nilainya.



Gambar 2.15 Pengaturan tegangan generator utama dengan mengatur potensiometer (Sumber: Djiteng Marsudi, 2005)

Pengaturan besarnya arus penguat generator utama dilakukan oleh pengatur tegangan otomatis untuk menjaga agar nilai tegangan jepit generator konstan. Pengatur tegangan otomatis ini mula-mula berdasarkan prinsip mekanis, tetapi sekarang sudah menjadi elektronik.

Secara umum dalam penyaluran sistem arus searah pada rotor, sistem eksitasi terbagi atas dua jenis yaitu sistem eksitasi menggunakan sikat (*brush excitation*) dan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*).  
yaitu:

Sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*) ada dua jenis, yaitu:

1. Sistem eksitasi konvensional (menggunakan generator arus searah).
2. Sistem eksitasi statis.
3. *Field-Controlled Alternator-Rectifier System*

Sedangkan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*) terdiri dari:

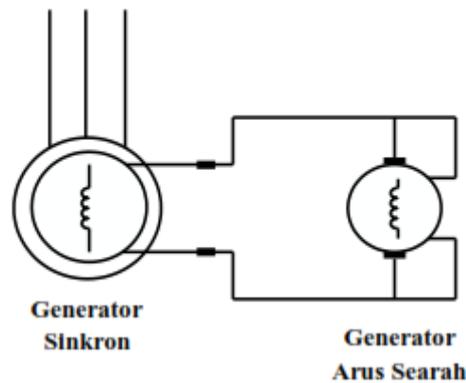
1. Sistem eksitasi dengan menggunakan *Permanent Magnet Generator* (PMG).

#### 2.2.2.1 Sistem Eksitasi Menggunakan Sikat (*Brush Excitation*)

1. Sistem Eksitasi Konvensional

Untuk sistem eksitasi yang konvensional, arus searah diperoleh dari sebuah generator arus searah berkapasitas kecil yang disebut dengan eksiter. Generator arus searah tersebut terkopel dengan generator sinkron dalam satu poros, sehingga putaran generator arus searah sama dengan putaran generator sinkron. Tegangan yang dihasilkan oleh eksiter disalurkan ke belitan rotor generator sinkron melalui sikat karbon dan *slip ring*.

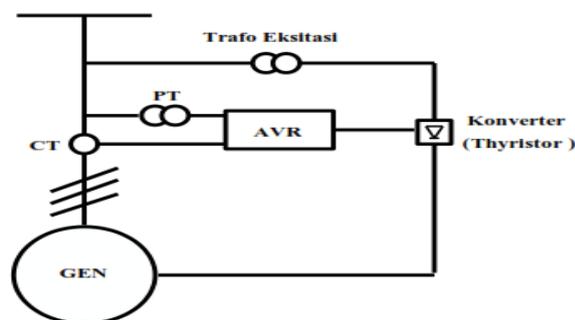
Setelah mempertimbangkan segala kerugian tersebut, maka saat ini pada penguatan medan magnet kebanyakan menggunakan sistem eksitasi statis. Gambar 2.16 adalah sistem eksitasi yang menggunakan generator arus searah.



Gambar 2.16 Sistem eksitasi menggunakan generator dc (Sumber: Ahmad Faisal, 2011)

## 2. Sistem Eksitasi Statis

Sistem eksitasi statis merupakan sistem eksitasi yang menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak (*static*), yang berarti peralatan eksitasi tersebut tidak ikut berputar bersama dengan rotor generator sinkron. Sistem eksitasi statis (*static excitation system*) ini biasa disebut juga dengan *self excitation* yang merupakan sistem eksitasi yang tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi.

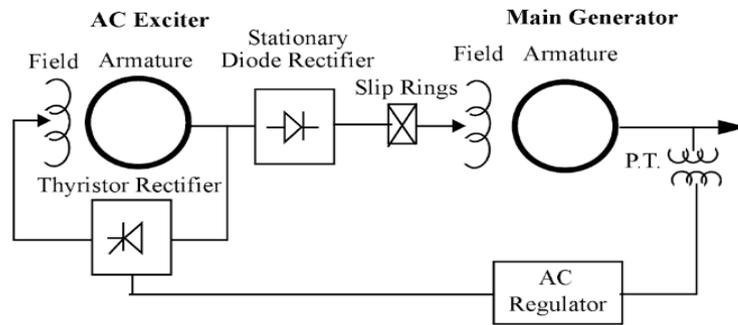


Gambar 2.17 Sistem eksitasi statis (Sumber: Ahmad Faisal, 2011)

## 3. Field-Controlled Alternator-Rectifier System

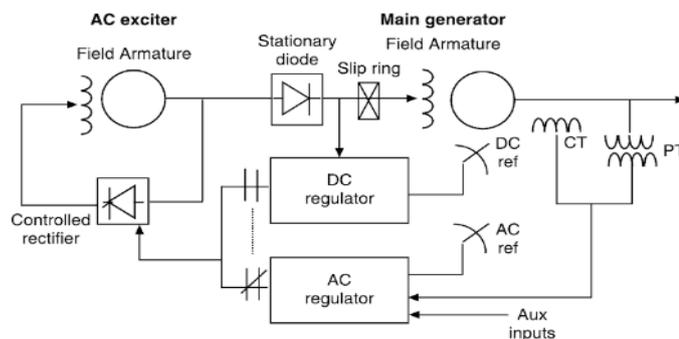
Sistem eksitasi ac pada dasarnya menggantikan sistem eksitasi dc untuk instalasi turbin generator pembangkit modern. Sistem eksitasi ac menggunakan mesin arus bolak-balik sebagai sumber utama penguat.

Biasanya, mesin ini dikopel dengan turbin generator. Keluaran tegangan ac disearahkan dahulu menjadi tegangan dc kemudian disalurkan ke kumparan medan dc melalui *slip ring*, seperti pada gambar 2.18. Penguat ac merupakan penguat sendiri yang memperoleh penguat medan dari penyearah *thyristor*.



Gambar 2.18 *One-line* diagram dari sistem eksitasi yang diperkuat penyearah *diode bridge* (Sumber: T.A.Lipo, 2012)

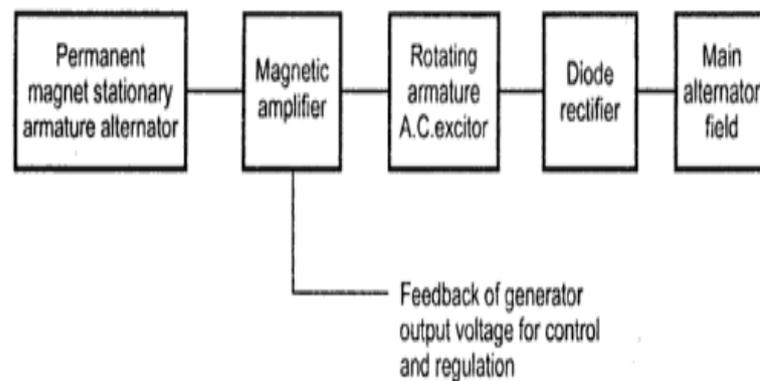
Ketika *thyristor* digunakan di *diode bridge*, regulator tegangan secara langsung mengontrol tegangan keluaran dc dari eksiter. Lihat gambar 2.19. Pada kasus ini, regulator secara langsung mengontrol keluaran dari *thyristor*. Eksiter alternator dipasang pada poros utama dan menggunakan jembatan *thyristor* lagi untuk mempertahankan rating tegangan ac di terminal keluaran. Pengaturan keluaran eksitasi oleh *thyristor* dapat dilakukan dengan respon waktu yang cepat.



Gambar 2.19 Sistem eksitasi dengan kontrol penyearah *thyristor* (Sumber: R.Ramanujam, 2009)

### 2.2.2.2 Sistem Eksitasi Non Sikat (*Brushless Excitation*)

Dengan meningkatkan rating alternator, suplai medan magnet yang diperlukan menjadi sulit, karena nilai arus dapat mencapai 4000 A. Jika kita menggunakan sistem eksitasi konvensional seperti generator dc yang keluaran tegangannya disalurkan ke kumparan rotor alternator melalui sikat dan *slip ring*, masalah selalu muncul terkait pendinginan dan perawatan. Kini, sistem eksitasi modern dikembangkan dengan meminimalisir masalah dengan melarang penggunaan sikat. Sistem eksitasi non sikat dapat dilihat pada gambar 2.20.

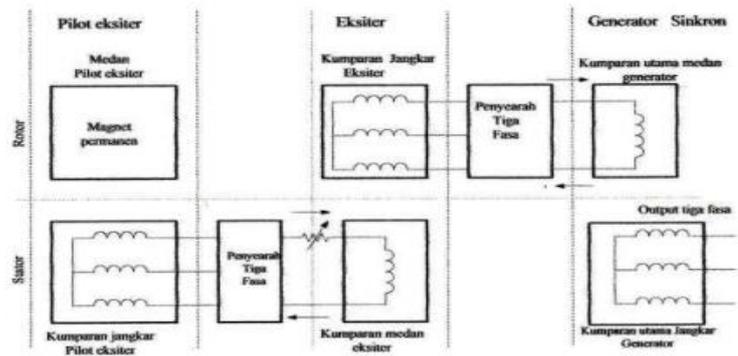


Gambar 2.20 Sistem eksitasi non sikat (Sumber: U.A.Bakshi&M.V.Bakshi, 2009)

#### 1. Sistem Eksitasi Menggunakan *Permanent 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)*.

Pada Gambar 2.21 merupakan bentuk skematik dari sistem eksitasi dengan menggunakan *Permanent Magnet Generator (PMG)*.



Gambar 2.21 Sistem eksitasi menggunakan PMG (Ari Sentosa, 2018)