

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator Set (Genset)

Genset (*generator set*) adalah sebuah perangkat yang berfungsi menghasilkan daya listrik. Disebut sebagai generator set dengan pengertian adalah satu set peralatan gabungan dari dua perangkat berbeda yaitu *engine* dan generator atau alternator. *Engine* sebagai perangkat pemutar sedangkan generator atau alternator sebagai perangkat pembangkit. Pada sebuah sistem generator set, penggerak atau engine sangat berpengaruh terhadap sistem kerja generator tersebut. Karena pada perputaran generator yang stabil dapat menjadikan output generator tersebut menjadi maksimal.

2.1.1. Prinsip kerja Generator set

Generator Set terdiri atas Mesin *Engine* (Motor Penggerak) dan juga *Generator / Alternator*, seperti yang telah di jelaskan sebelumnya. Mesin *Engine* yang satu ini menggunakan bahan bakar berupa Solar (Mesin Diesel) atau dapat juga menggunakan Bensin, sedangkan untuk Generatornya sendiri merupakan sebuah gulungan kawat yang di buat dari tembaga yang terdiri atas kumparan statis atau stator dan di lengkapi pula dengan kumparan berputar atau rotor. Dalam proses kerjanya, menurut ilmu fisika, *Engine* memutar Rotor dalam sebuah Generator yang selanjutnya hal ini menimbulkan adanya Medan Magnet pada bagian kumparan Generator. Selanjutnya Medan Magnet ini kemudian akan melakukan interaksi dengan Rotor yang kemudian akan berputar dan akan menghasilkan sebuah arus listrik dimana hal ini sesuai dengan hukum *Lorentz*.³

³ Budi Saputro. 2017. “Analisis Keandalan Generator Set Sebagai *Power Supply* Darurat Apabila *Power Supply* Dari PLN Mendadak Padam di Morodadi *Poultry Shop* Blitar”. *Jurnal Qua Teknika*, (2017), 7(2):17-25.

2.1.2. Jenis-jenis generator

Berikut ini beberapa klasifikasi dari generator:

1. Jenis generator berdasarkan letak kutubnya dibagi menjadi:
 - a. Generator kutub dalam
Generator kutub dalam mempunyai medan magnet yang terletak pada bagian yang berputar (rotor).
 - b. Generator kutub luar
Generator kutub dalam mempunyai medan magnet yang terletak pada bagian yang diam (stator).
2. Jenis generator berdasarkan putaran medan dibagi menjadi:
 - a. Generator sinkron
 - b. Generator asinkron
3. Jenis generator berdasarkan jenis arus yang dibangkitkan dibagi menjadi:
 - a. Generator arus searah (DC)
 - b. Generator arus bolak balik (AC)
4. Jenis generator dilihat dari fasanya dibagi menjadi:
 - a. Generator satu fasa
 - b. Generator tiga fas
5. Jenis generator berdasarkan bentuk rotornya dibagi menjadi:
 - a. Generator rotor kutub menonjol biasa digunakan pada generator dengan rpm rendah seperti PLTA dan PLTD.
 - b. Generator rotor kutub rata (silindris) biasa digunakan pada pembangkit listrik generator dengan putaran rpm tinggi seperti PLTG dan PLTU.⁷

⁷ Mataram, Yuzahar. "Analisa Efisiensi Generator Set 50kVA dengan Beban Persinyalan dan Telekomunikasi Di Stasiun Rsud PT. Kai LRT Sumsel". *Program Studi Teknik Listrik Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Sriwijaya* (2020).

2.2 Generator sinkron

Menurut *Andersin P.M (1982)*, generator sinkron atau alternator merupakan mesin listrik arus bolak balik / AC (*Alternating Current*) yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik arus bolak-balik (AC). Energi mekanik diperoleh dari penggerak mula (*prime mover*) yang terkopel dengan rotor generator, sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang melibatkan kumparan rotor dan kumparan stator. Tegangan output dari generator sinkron adalah tegangan bolak-balik (AC), oleh karena itu generator sinkron disebut juga generator AC. Mesin listrik arus bolak-balik (AC) ini disebut sinkron, karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan magnet putar pada stator. Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh tenaga air atau tenaga lainnya, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau fluks putar.¹

Generator sinkron secara umum dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk rotornya, yaitu generator turbo / generator rotor silinder (*cylindrical-rotor generator*) dan generator kutub menonjol (*salient pole generator*). Generator yang digunakan pada pembangkit listrik yang besar biasanya merupakan jenis generator turbo yang beroperasi pada kecepatan tinggi dan dikopel dengan turbin gas atau uap. Sedangkan generator kutub menonjol (*salient pole generator*) biasanya digunakan untuk pembangkit listrik kecil dan menengah.⁶

Generator sinkron bekerja berdasarkan prinsip sebagai berikut:

1. Kumparan medan pada rotor akan mensuplai arus searah ke kumparan medan yang akan menimbulkan fluks.

⁶ Kurniati, Meilinda. "Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator Di GTG Pusri IV PT. Pusri Palembang dengan Menggunakan Software Matlab". *Program Studi Teknik Listrik Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Sriwijaya* (2017).

2. Penggerak mula (Prime Mover) yang terkopel ke rotor beroperasi sehingga rotor berputar pada kecepatan nominalnya.

$$N = \frac{1 \cdot f}{P} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana: n = Kecepatan putar rotor (rpm)

P = Jumlah kutub rotor

f = frekuensi (Hz)

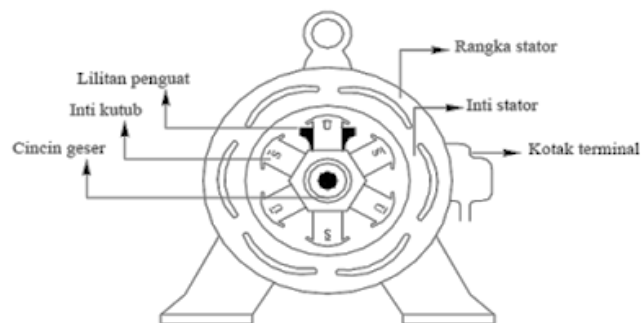
3. Perputaran rotor akan memutar medan magnet yang dihasilkan kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan rotor akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga pada kumparan jangkar terjadi fluks magnetik yang berubah-ubah. Perubahan fluks magnetik yang melingkupi kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan.⁸

2.2.1. Konstruksi generator sinkron

Konstruksi mesin sinkron baik untuk generator maupun untuk motor terdiri dari:

1. Stator adalah bagian yang diam dan berbentuk silinder.
2. Rotor adalah bagian yang berputar juga berbentuk silinder.
3. Celah udara adalah ruangan antara stator dan rotor.

Konstruksi mesin sinkron ini seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.1 di bawah:



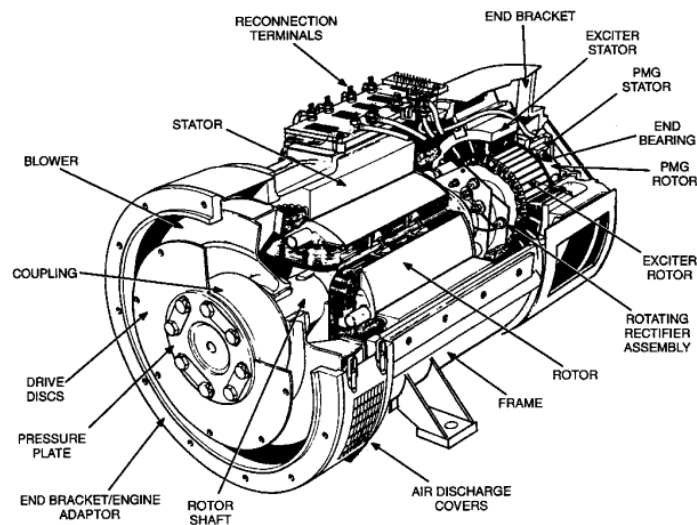
Gambar 2.1. Konstruksi Mesin Sinkron

⁸ Perawati. 2017. “Karakteristik Generator Sinkron Yang Berbeban Berat Dan Tidak Konstan”. *Jurnal Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas PGRI Palembang* (2017). 2(2) : 116.

2.2.2. Konstruksi Stator

Konstruksi stator seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.1 terdiri dari :

1. Kerangka terbuat dari besi tuang untuk menyangga inti jangkar.
2. Inti jangkar terbuat dari besi lunak (baja silikon).
3. Alur (slot) untuk meletakkan belitan (kumparan).
4. Belitan jangkar terbuat dari tembaga yang diletakkan pada alur (slot).



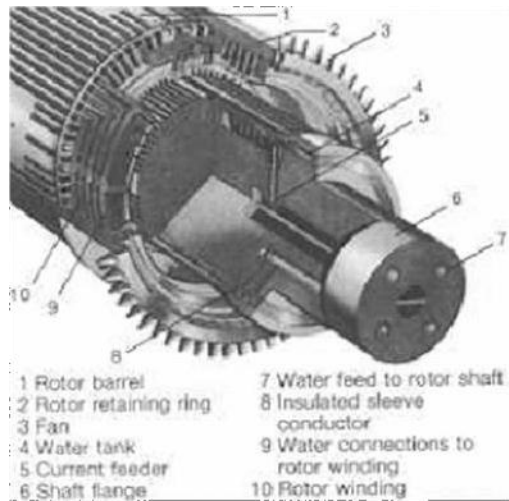
Gambar 2.2. Kerangka dan Inti Stator Mesin Sinkron.

2.2.3. Konstruksi Rotor

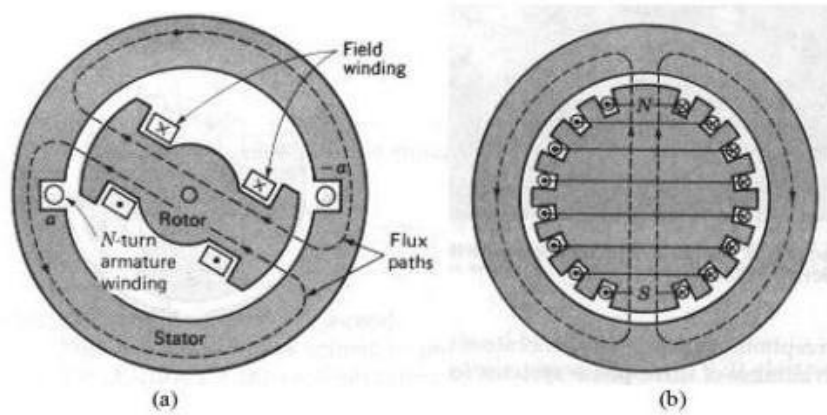
Konstruksi rotor terdiri dari dua jenis :

1. Jenis kutub menonjol (salient pole) untuk generator kecepatan rendah dan menengah. Kutub menonjol terdiri dari inti kutub dan sepatu kutub. Belitan medan dililitkan pada badan kutub, pada sepatu kutub juga dipasang belitan peredam (damper winding). Belitan kutub terbuat dari tembaga, sedangkan badan kutub dan sepatu kutub terbuat dari besi lunak.
2. Jenis kutub silinder untuk generator dengan kecepatan tinggi terdiri dari alur-alur sebagai tempat kumparan medan. Alur-alur tersebut terbagi atas pasangan-pasangan kutub.

Kedua macam kutub tersebut seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.3 dan gambar 2.4 berikut :



Gambar 2.3. Rotor jenis kutub menonjol (salient).

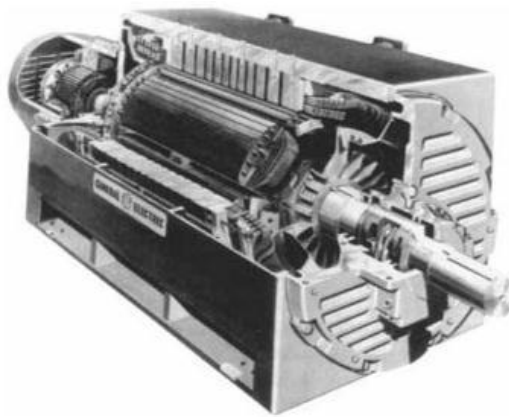


Gambar 2.4. Jenis rotor kutub

2.2.4. Belitan Jangkar

Belitan jangkar yang di tempatkan pada stator disebut sebagai belitan stator untuk sistem tiga fasa hubungannya terdiri dari :

1. Belitan satu lapis (single layer winding) bentuknya dua macam :
 - a. Mata rantai (consentris/chain winding).
 - b. Gelombang (wave).
2. Belitan dua lapis (double layer winding) bentuknya dua macam :
 - a. Gelombang (Wave).
 - b. Gelung (Lap).



Gambar 2.5. Rangkaian belitan jangkar

Generator besar menggunakan brushless exciters untuk mensuplai tegangana DC pada rotor. Terdiri dari generator AC kecil yang mempunyai kumparan medan magnit dipasang pada stator dan kumparan jangkar dipasang pada poros rotor.

Output generator penguat (arus bolak-balik tiga fasa) yang dirubah menjadi tegangan searah dengan penyearah tiga fasa yang juga dipasang pada rotor. Tegangan searah DC dihubungkan ke rangkaian medan magnit utama. Arus medan magnet generator utama dapat dikontrol oleh arus medan magnit generator penguat, yang berada pada stator.⁵

⁵ Juhari. 2013. *Generator Semester 3*. Jakarta. Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia.

2.2.5. Frekuensi pada Generator Sinkron

Kecepatan perputaran generator sinkron akan mempengaruhi frekuensi listrik yang dihasilkan generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnet dengan suplai arus DC untuk membentuk medan magnet pada rotor. Medan magnet rotor ini bergerak pada searah putaran rotor. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada rotor dengan frekuensi listrik pada stator adalah:

$$f_e = \frac{N_r \cdot p}{120} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

f_e = frekuensi listrik (Hz)

N_r = kecepatan putar rotor (rpm)

p = jumlah kutub magnet pada rotor

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.

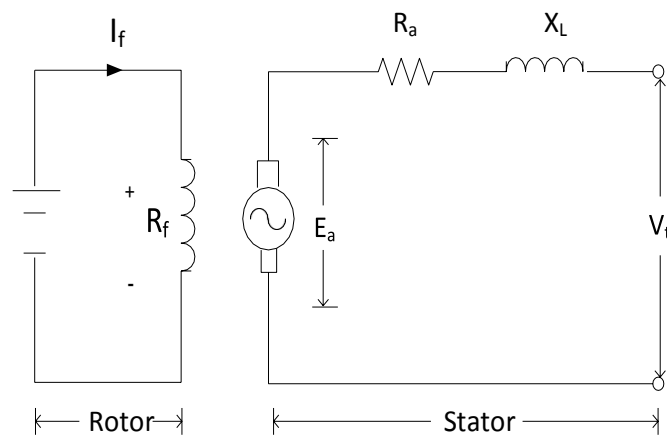
Kecepatan perputaran rotor pada generator sinkron akan sama dengan kecepatan medan magnet generator. Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnetnya, maka generator ini disebut generator sinkron atau lebih dikenal dengan nama Alternator. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub magnet yang telah ditentukan. Sebagai contoh untuk membangkitkan frekuensi 50 Hz pada generator 2 kutub, maka rotor harus berputar dengan kecepatan 3000 rpm, atau untuk membangkitkan frekuensi 50 Hz pada generator 4 kutub, maka rotor harus berputar pada kecepatan 1500 rpm.¹

¹ Anthony, Zuriman. 2018. *Mesin Listrik Dasar*. Padang : ITP Press.

2.3 Karakteristik Generator

2.3.1. Generator Tanpa Beban

Pada generator sinkron keadaan jalan tanpa beban mengandung arti bahwa arus armature (I_a) = 0. Dengan memutar generator sinkron diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka tegangan (E_o) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator. Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f).

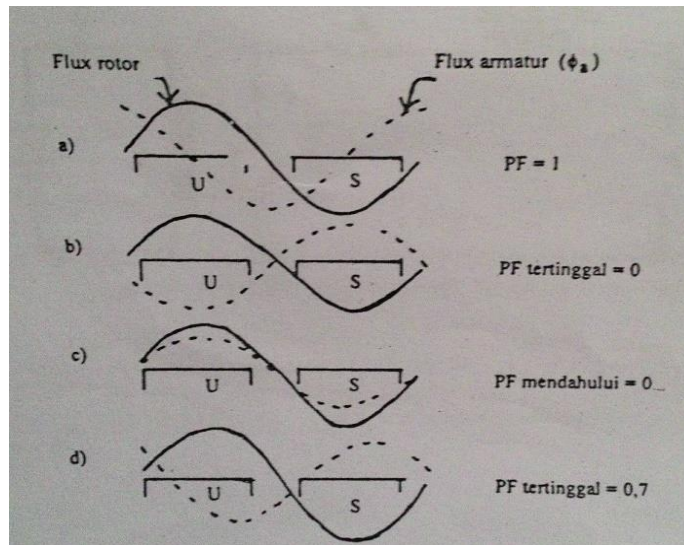


Gambar 2.6 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tanpa Beban⁹

2.3.2. Generator Berbeban

Dengan adanya beban yang terpasang pada output generator sinkron, maka segera mengalir arus armature (I_a); dengan adanya arus armature ini, pada kumparan *armature* atau kumparan jangkar timbul fluks putar jangkar. Fluks putar jangkar ini bersifat mengurangi atau menambah fluks putar yang dihasilkan oleh kumparan rotor. Hal ini tergantung pada faktor daya beban. Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar 2.7

⁹ Ibid. hal 24



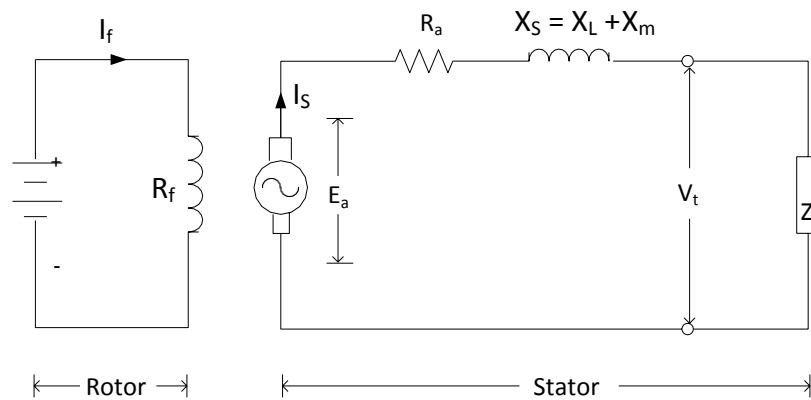
Gambar 2.7 Pengaruh faktor daya beban terhadap fluks rotor

Untuk beda fase 0 sampai 90° , arus *armature* mendahului terhadap tegangan beban dan disebut faktor daya beban menengah mendahului, sedangkan untuk beda fasa 0 sampai 90° , arus armature tertinggal terhadap tegangan beban dan disebut faktor daya beban menengah tertinggal.

Pada faktor daya beban menengah mendahului, *fluks armature* yang timbul fasenya agak bergeser ke kanan terhadap *fluks* putar rotor. Sehingga pada kejadian ini terjadi proses dimagnetisasi sebagai dan bentuk sinyal GGL armature yang dihasilkan ada cacat *armature*.

Dengan adanya fluks putar *armature* akibat timbulnya arus *armature*, maka pada kumparan timbul reaktansi pemagnet X_m , reaktansi pemagnet bersama-sama dengan reaktansi bocor dikenal dengan nama reaktansi sinkron X_s .⁴

⁴ Ibid. hal 23



Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Berbeban

Bila generator diberi beban yang berubah – ubah maka besarnya tegangan terminal V_t akan berubah – ubah pula. Hal ini disebabkan adanya :

- a. Jatuh tegangan karena resistansi jangkar (R_a).
- b. Jatuh tegangan karena reaktansi bocor jangkar (X_L).
- c. Jatuh tegangan karena reaksi jangkar.⁹

2.4 Sistem Eksitasi pada Generator

Eksitasi atau penguatan medan merupakan bagian yang penting dari sebuah generator sinkron. Tidak hanya untuk menjaga tegangan terminal tetap konstan tetapi juga harus merespon terhadap perubahan beban yang tiba-tiba.

Eksitasi pada generator sinkron adalah pemberian arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor. Sesuai dengan prinsip elektromagnet, apabila suatu konduktor yang berupa kumparan yang dialiri listrik arus searah maka kumparan tersebut akan menjadi magnet sehingga akan menghasilkan fluks-fluks magnet.

⁹ Ibid. hal 24

Apabila kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi diputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan jangkar yang terdapat pada stator akan terinduksi oleh fluks-fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan sehingga akan menghasilkan tegangan bolak-balik. Besarnya tegangan yang dihasilkan tergantung kepada besarnya arus eksitasi dan putaran yang diberikan pada rotor. Semakin besar arus eksitasi dan putaran, maka akan semakin besar tegangan yang dihasilkan oleh sebuah generator.

Sistem ini merupakan sistem yang vital pada proses pembangkitan listrik. Pada perkembangannya, sistem eksitasi pada generator listrik ini dapat dibedakan menjadi 2 macam, yaitu :

1. Sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*)
2. Sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*).

Sistem eksitasi mempunyai berbagai fungsi. Fungsi tersebut antara lain :

- a. Mengatur tegangan keluaran generator agar tetap konstan (stabil).
- b. Mengatur besarnya daya reaktif.
- c. Menekan kenaikan tegangan pada pelepasan beban (load rejection).

Karena mempunyai fungsi seperti di atas maka sistem eksitasi harus mempunyai sifat antara lain ;

- a. Mudah dikendalikan.
- b. Dapat mengendalikan dengan stabil/ sifat pengendalian stabil.
- c. Mempunyai respon/tanggapan yang cepat.
- d. Tegangan yang dikeluarkan harus sama dengan tegangan yang diinginkan.

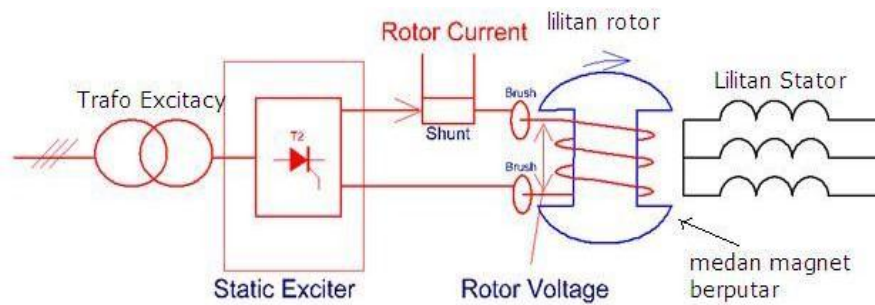
Sistem yang banyak digunakan saat ini baik dengan generator sinkron tipe kutub sepatu (*salient pole*) maupun tipe rotor silinder (*non-salient pole*) adalah sistem tanpa sikat. Pengeksitasi ac mempunyai jangkar yang berputar, keluarannya kemudian disearahkan oleh penyearah dioda silikon yang juga dipasang pada poros utama.

Keluaran yang telah disearahkan dari pengeksitasi ac, diberikan langsung dengan hubungan yang diisolasi sepanjang poros ke medan generator sinkron yang berputar. Keluaran dari pengeksitasi ac, dan berarti tegangan yang dibangkitkan oleh generator sinkron, dapat dikendalikan dengan mengubah kekuatan medan pengeksitasi ac. Jadi sistem eksitasi tanpa sikat tidak mempunyai komutator, cincin-slip atau sikat-sikat yang sangat menyederhanakan pemeliharaan mesin.

Setelah generator ac mencapai kecepatan yang sebenarnya oleh penggerak mulanya, medannya dieksitasi dari catu dc. Ketika kutub lewat di bawah konduktor jangkar yang berada pada stator, fluksi medan yang memotong konduktor menginduksikan ggl kepadanya. Ini adalah ggl bolak-balik, karena kutub dengan polaritas yang berubah-ubah terus-menerus melewati konduktor tersebut. Karena tidak menggunakan komutator, ggl bolak-balik yang dibangkitkan keluar pada terminal lilitan stator. Besarnya ggl yang dibangkitkan bergantung pada laju pemotongan garis gaya; atau dalam hal generator, besarnya ggl bergantung pada kuat medan dan kecepatan konstan, maka besarnya ggl yang dibangkitkan menjadi bergantung pada eksitasi medan. Ini berarti bahwa besarnya ggl yang dibangkitkan dapat dikendalikan dengan mengatur besarnya eksitasi medan yang dikenakan pada medan generator.

2.4.1. Sistem Eksitasi dengan Sikat

Pada sistem eksitasi menggunakan sikat, sumber tenaga listriknya berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan *rectifier*. Jika menggunakan sumber listrik listrik yang berasal dari generator AC atau menggunakan *permanent magnet generator* (PMG), medan magnetnya adalah magnet permanen. Untuk mengalirkan arus eksitasi dari eksiter utama ke rotor generator, menggunakan slip ring dan sikat arang, demikian juga penyaluran arus yang berasal dari *pilot exciter* ke *main exciter*.



Gambar 2.9 Sistem Eksitasi dengan Sikat (*Brush Excitation*)

Generator penguat yang pertama, adalah generator arus searah hubungan paralel yang menghasilkan arus penguat bagi generator penguat kedua. Generator penguat (*exciter*) untuk generator sinkron merupakan generator utama yang diambil dayanya.

Pengaturan tegangan pada generator utama dilakukan dengan mengatur besarnya arus eksitasi (arus penguatan) dengan cara mengatur potensiometer atau tahanan asut. Potensiometer atau tahanan asut mengatur arus penguat generator pertama dan generator penguat kedua menghasilkan arus penguat generator utama. Dengan cara ini arus penguat yang diatur tidak terlalu besar nilainya (dibandingkan dengan arus generator penguat kedua) sehingga kerugian daya pada potensiometer tidak terlalu besar. PMT arus penguat generator utama dilengkapi tahanan yang menampung energi medan magnet generator utama karena jika dilakukan pemutusan arus penguat generator utama harus dibuang ke dalam tahanan.

Sekarang banyak generator arus bolak-balik yang dilengkapi penyearah untuk menghasilkan arus searah yang dapat digunakan bagi penguatan generator utama sehingga penyaluran arus searah bagi penguatan generator utama, oleh generator penguat kedua tidak memerlukan cincin geser karena penyearah ikut berputar bersama poros generator.

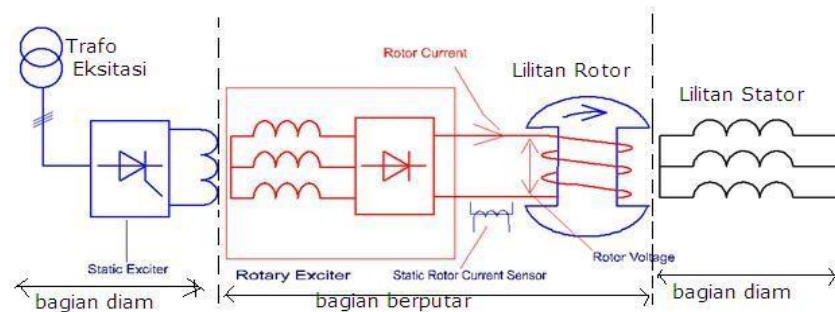
Cincin geser digunakan untuk menyalurkan arus dari generator penguat pertama ke medan penguat generator penguat kedua. Nilai arus penguatan kecil sehingga penggunaan cincin geser tidak menimbulkan masalah. Pengaturan besarnya arus penguatan generator utama dilakukan dengan pengatur tegangan

otomatis supaya nilai tegangan klem generator konstan. Perkembangan sistem eksitasi pada generator sinkron dengan sistem eksitasi tanpa sikat, karena sikat dapat menimbulkan loncatan api pada putaran tinggi. Untuk menghilangkan sikat digunakan dioda berputar yang dipasang pada jangkar.

2.4.2. Sistem Eksitasi tanpa Sikat

Penggunaan sikat atau slip ring untuk menyalurkan arus eksitasi ke rotor generator mempunyai kelemahan karena besarnya arus yang mampu dialirkan pada sikat arang relatif kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang, digunakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*). Keuntungan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*), antara lain adalah:

- Energi yang diperlukan untuk eksitasi diperoleh dari poros utama (*main shaft*), sehingga kehandalannya tinggi.
- Biaya perawatan berkurang karena pada sistem eksitasi tanpa sikat tidak terdapat sikat, komutator dan *slip ring*.
- Pada sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada *farnish* akibat sikat arang.
- Mengurangi kerusakan akibat udara buruk sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup.
- Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung terus pada waktu yang lama.



Gambar 2.10 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

Generator penguat pertama disebut *pilot exciter* dan generator penguat kedua disebut *main exciter* (penguat utama). *Main exciter* adalah generator arus bolak-balik dengan kutub pada statornya. Rotor menghasilkan arus bolak-balik disearahkan dengan dioda yang berputar pada poros *main exciter* (satu poros dengan generator utama). Arus searah yang dihasilkan oleh dioda berputar menjadi arus penguat generator utama. *Pilot exciter* pada generator arus bolak-balik dengan rotor berupa kutub magnet permanen yang berputar menginduksi pada lilitan stator. Tegangan bolak-balik disearahkan oleh penyearah dioda dan menghasilkan arus searah yang dialirkan ke kutub-kutub magnet yang ada pada stator *main exciter*. Besar arus searah yang mengalir ke kutub *main exciter* diatur oleh pengatur tegangan otomatis (*Automatic Voltage Regulator/AVR*). Besarnya arus berpengaruh pada besarnya arus yang dihasilkan oleh *main exciter*, maka besarnya arus *main exciter* juga mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator utama.

Pada sistem eksitasi tanpa sikat, permasalahan timbul jika terjadi hubung singkat atau gangguan hubung tanah di rotor dan jika ada sekering lebur dari dioda berputar yang putus, hal ini harus dapat dideteksi. Gangguan pada rotor yang berputar dapat menimbulkan distorsi medan magnet pada generator utama dan dapat menimbulkan vibrasi (getaran) berlebihan pada unit pembangkit.⁹

⁹ Ibid. hal 24

2.5 Rugi-Rugi Generator Sinkron

Rugi-rugi generator listrik sebagian dapat ditemukan dengan cara konvensional yaitu dengan percobaan beban nol dan percobaan block rotor. Percobaan beban nol dapat menentukan rugi-rugi rotasi generator. Pada keadaan beban nol, seluruh daya listrik input generator digunakan untuk mengatasi rugi-rugi inti dan rugi-rugi mekanik.

Rugi-rugi stray load adalah rugi-rugi yang paling sulit diukur dan berubah terhadap beban generator. Rugi-rugi ini ditentukan sebagai rugi-rugi sisa (rugi-rugi pengujian dikurangi rugi-rugi konvensional). Rugi-rugi pengujian adalah daya input dikurangi daya output. Rugi-rugi konvensional adalah jumlah dari rugi-rugi inti, rugi-rugi mekanik, rugi-rugi belitan.

Dalam sistem konversi energi elektro mekanik yakni dalam operasi generator, total daya yang diterima sama dengan daya yang diberikan, ditambah dengan kerugian daya yang diberikan, ditambah dengan kerugian daya yang terjadi, atau :

$$P_{in} = P_{out} + P_{rugi-rugi} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana:

P_{in} = Total daya yang diterima motor (Watt)

P_{out} = Daya yang diterima generator untuk melakukan kerja (Watt)

$P_{rugi-rugi}$ = Total kerugian daya yang dihasilkan oleh generator

Tabel 2.1 Jenis Rugi-Rugi Pada Generator

Jenis Rugi-rugi	Persentase rugi-rugi total (%)
Rugi-rugi tetap atau rugi-rugi inti	25
Rugi-rugi variabel : rugi-rugi pada stator	34
Rugi-rugi variabel : rugi-rugi pada rotor	21
Rugi-rugi gesekan	15
Rugi-rugi beban menyimpang (<i>stray load</i>)	5

2.5.1. Rugi Inti

Rugi-rugi inti diperoleh pada besi magnetis didalam stator dan rotor akibat timbulnya efek histeris dan arus pusar (eddy current). Timbulnya rugi-rugi inti, ketika besi jangkar atau struktur rotor mengalami perubahan fluks terhadap waktu. Rugi-Rugi ini tidak tergantung pada beban, tetapi merupakan fungsi dari pada fluks dan kecepatan generator. Pada umumnya rugi-rugi inti berkisar antara 20-25% dari total kerugian daya generator pada keadaan nominal.

2.5.2. Rugi Belitan

Rugi-rugi belitan sering disebut rugi-rugi tembaga tetapi pada saat sekarang sudah tidak begitu. Mempunyai belitan stator dari kawat aluminium yang lebih tepat disebut rugi-rugi $I^2 \cdot R$ yang menunjukkan besarnya daya yang berubah menjadi panas oleh tahanan dari konduktor tembaga atau aluminium. Total kerugian $I^2 \cdot R$ adalah jumlah dari rugi-rugi $I^2 \cdot R$ primer (stator) dan rugi-rugi $I^2 \cdot R$ sekunder (rotor). Rugi-rugi $I^2 \cdot R$ dalam belitan sebenarnya tidak hanya tergantung pada arus, tetapi juga pada tahanan belitan di bawah kondisi operasi. Sedang tahanan efektif dari belitan selalu berubah dengan perubahan temperatur, skin effect dan sebagainya.

Sangat sulit untuk menentukan nilai yang sebenarnya dari tahanan belitan dibawah kondisi operasi. Kesalahan pengukuran kerugian belitan dapat dimasukkan ke dalam kerugian stray load. Pada umumnya rugi-rugi belitan ini berkisar antara 55-60% dari total kerugian generator pada keadaan beban nominal.

2.5.3. Rugi Mekanik

Rugi-rugi gesekan dan angin adalah energi mekanik yang dipakai dalam motor listrik untuk menanggulangi gesekan bantalan poros, gesekan sikat melawan komutator atau slip ring, gesekan dari bagian yang berputar terhadap angin, terutama pada daun kipas pendingin. Kerugian energi ini selalu berubah menjadi panas seperti pada semua rugi-rugi lainnya. Rugi-rugi mekanik dianggap konstan dari beban nol hingga beban penuh dan ini adalah masuk akal tetapi tidak

sepenuhnya tepat seperti halnya pada rugi-rugi inti. Macam-macam ketidaktepatan ini dapat dihitung dalam rugi-rugi stray load. Rugi-rugi mekanik biasanya berkisar antara 10-15% dari total rugi-rugi daya motor pada keadaan beban nominal.

2.5.4. Rugi Stray Load

Kita telah melihat bahwa beberapa macam kerugian selalu dianggap konstan dari keadaan beban nol hingga beban penuh walaupun kita tahu bahwa rugi-rugi tersebut sebenarnya berubah, secara kecil terhadap beban. Sebagai tambahan, kita tidak dapat menghitung berapa besar kerugian ini seperti yang diakibatkan oleh perubahan fluks terhadap beban, geometri konduktor sehingga arus terbagi sedikit tidak merata dalam konduktor bertambah, mengakibatkan penambahan tahanan konduktor, dan karena itu rugi-rugi konduktor harus bertambah.

Dari semua kerugian yang relatif kecil ini, baik dari sumber yang di ketahui maupun yang tidak diketahui, disatukan menjadi rugi-rugi stray load yang cenderung bertambah besar apabila beban meningkat (berbanding kuadrat dengan arus beban). Pada umumnya kerugian ini berkisar 5 sampai 10% dari total kerugian daya generator pada keadaan beban penuh dan saat keadaan beban nominal 1 sampai 5%.⁴

⁴ Jepsen, Sefto. "Analisa Pengaruh Beban Terhadap Efisiensi Generator Sinkron Unit 1 Di PLTU PT. Bukit Asam (Persero) Tbk Tanjung Enim - Sumatera Selatan". *Program Studi Teknik Listrik Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Sriwijaya* (2016).

2.6 Impedansi

Impedansi (disebut juga hambatan dalam, Z) adalah nilai resistansi yang terukur pada kutub kutub sinyal jack alat elektronik. Semakin besar hambatan/impedansi, makin besar tegangan yang dibutuhkan. Impedansi tidak dapat dikatakan sebagai hambatan secara spontan. Karena terdapat perbedaan yang mendasar dari keduanya. Beberapa sumber mengatakan bahwa impedansi merupakan hasil reaksi hambatan (R , resistensi) dan kapasitas elektron (C , capacitance) secara bersamaan.⁹

$$Z = \frac{V}{I \cdot \sqrt{3}} \dots \dots \dots (2.4)^{10}$$

Dimana:

- Z = Impedansi (Ω)
- V = Tegangan sumber (volt)
- I = Arus (ampere)
- $\sqrt{3}$ = menunjukkan 3 fhasa

$$R = Z \times \cos \Phi \dots \dots \dots (2.5)^{10}$$

Dimana:

- R = Resistansi
- Z = Impedansi
- $\cos \Phi$ = Faktor daya

2.7 Efisiensi Generator

Efisiensi merupakan perbandingan daya output dengan daya input. Daya keluaran suatu mesin tidak akan sama dengan daya inputnya karena terdapat rugi - rugi saat mesin dioperasikan.

⁹ Pradinata, Ryan. "Analisa Pengaruh Beban Terhadap Efisiensi Generator Di PLTG CNG Jakabaring". *Program Studi Teknik Listrik Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Sriwijaya* (2017).

¹⁰ Solusifisika.com. (2018, 11 Desember). Pembahasan Soal Rangkaian RLC. Diakses pada 8 Juli 2021, dari <https://www.solusifisika.com/2018/12/pembahasan-soal-rangkaian-rlc.html>

Mutu sebuah generator sangat ditentukan oleh besarnya efisiensi generator tersebut. Makin besar efisiensi sebuah generator, maka dikatakan generator tersebut makin bagus. Efisiensi generator ini dihitung berdasarkan perbandingan antara daya keluaran generator terhadap daya masukan awal generator, yang dapat dijabarkan sebagai berikut.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

$$P_{in} = P_{out} + \Sigma P_{rugi-rugi} \dots\dots\dots (2.7)$$

P_{out} = daya keluaran

P_{in} = daya masukan

$$\Sigma P_{rugi-rugi} = I^2 \times R \dots\dots\dots (2.8)$$

Atau

$$\eta = \frac{(P_{in}) - (Rugi\ Total)}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.9)$$

Atau, dapat juga menggunakan persamaan:

$$\eta = \frac{(P_{in}) - (Rugi\ Total)}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\eta = \left[1 - \frac{Rugi\ Total}{P_{in}} \right] \times 100\% \dots\dots\dots (2.10)$$

$$\eta = \left[1 - \frac{Rugi\ Total}{(P_{out}) + (Rugi\ Total)} \right] \times 100\% \dots\dots\dots (2.11)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{(P_{out}) + (Rugi\ Total)} \times 100\% \dots\dots\dots (2.12)^2$$

² Berahim, Hamzah. 1991. *Pengantar Teknik Tenaga Listrik*. Yogyakarta : Andi Offset

Faktor yang dapat menyebabkan efisiensi selalu dibawah 100% yaitu,

1. Kerugian belitan dalam generator yang dinamakan rugi-rugi listrik.
2. Kerugian daya yang timbul langsung karena putaran generator, yang dinamakan rugi-rugi rotasi. Rugi-rugi rotasi ini terbagi menjadi dua jenis yaitu :
 - a. Rugi mekanis akibat putaran.
 - b. Rugi inti besi akibat kecepatan putaran dan Fluks medan.⁴

⁴ Ibid. hal 23