



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Generator adalah mesin yang mengelola energi mekanik menjadi energi listrik. Prinsip kerja generator adalah rotor generator yang digerakan oleh turbin sehingga menimbulkan tenaga listrik. Sumber energi untuk penggerak turbin tersebut terdiri dari berbagai macam sumber, antara lain adalah uap, air, gas, mesin diesel dan lain-lain.

2.1.1 Jenis-jenis Generator

Berikut ini adalah beberapa jenis klasifikasi dari generator :

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

Namun yang akan dibahas dalam laporan akhir ini adalah jenis generator sinkron.

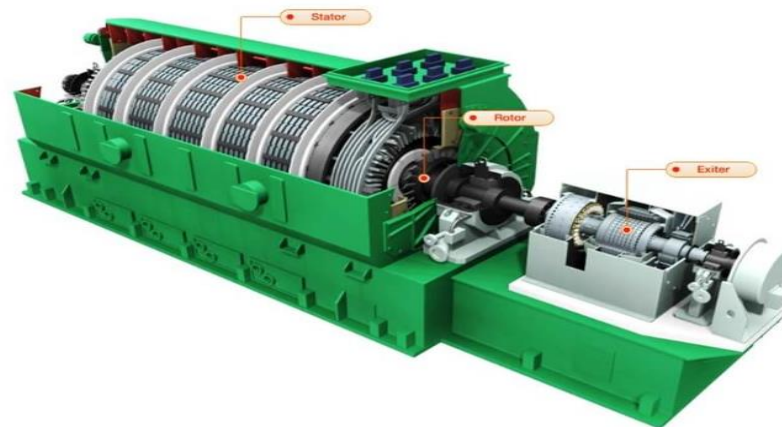
2.2 Generator Sinkron

Generator sinkron (sering disebut alternator) adalah mesin listrik arus bolak balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak balik (*alternating current*, AC) yang bekerja dengan cara merubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator. Pergerakan relatif adalah terjadinya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator) karena pergerakan medan magnet terhadap kumparan jangkar atau sebaliknya. Alternator ini disebut generator sinkron (sinkron = serempak) karena kecepatan perputaran medan magnet yang terjadi sama dengan kecepatan perputaran rotor generator. Alternator ini menghasilkan energi listrik bolak balik (*alternating current*, AC) dan biasa diproduksi untuk menghasilkan listrik AC 1-fasa atau 3-fasa.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.²

¹ Zuriman Anthony, *e-book Mesin Listrik Dasar*, 2018, hal 1

² D. F. Warne, *e-book Newnest Electrical Power Engineer's Handbook*, 2005, hal 105

Gambar 2. 1 Generator Sinkron³

2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

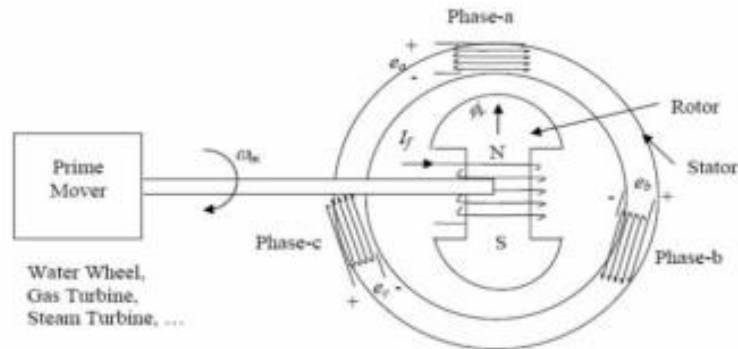
Tegangan output dari generator sinkron adalah tegangan bolak-balik, karena itu generator sinkron disebut juga generator AC. Perbedaan prinsip antara generator DC dengan generator AC adalah untuk generator DC, kumparan jangkar ada pada bagian rotor dan terletak di antara kutub-kutub magnet yang tetap di tempat, diputar oleh tenaga mekanik. Pada generator sinkron, konstruksinya sebaliknya, yaitu kumparan jangkar disebut juga kumparan stator karena berada pada tempat yang tetap, sedangkan kumparan rotor bersama-sama dengan kutub magnet diputar oleh tenaga mekanik.⁴

Prinsip dasar generator arus bolak-balik menggunakan hukum Faraday yang menyatakan jika sebatang penghantar berada pada medan magnet yang berubah-ubah, maka pada penghantar tersebut akan terbentuk gaya gerak listrik. Hukum tangan kanan berlaku pada generator dimana menyebutkan bahwa terdapat hubungan antara penghantar bergerak, arah medan magnet, dan arah resultan dari aliran arus yang terinduksi. Apabila ibu jari menunjukkan arah aliran electron yang terinduksi. Hukum ini juga berlaku apabila magnet sebagai pengganti penghantar yang digerakkan. Prinsip generator ini secara sederhana dapat

³ Alief Rakhman, Generator, [Generator \(rakhman.net\)](http://Generator(rakhman.net)), 8 Juli 2022

⁴ Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, 2004, hal 209

dijelaskan bahwa tegangan akan diinduksikan pada konduktor apabila konduktor tersebut bergerak pada medan magnet sehingga memotong garis-garis gaya.⁵



Gambar 2. 2 Prinsip Kerja Generator⁶

Prinsip kerja dari generator sinkron dapat dinyatakan sebagai berikut:

- Rotor disuplai dengan arus DC I_f yang kemudian menghasilkan fluks magnet ϕ .
- Rotor digerakkan oleh turbin dengan kecepatan konstan sebesar n_s .
- Garis gaya magnet bergerak menginduksi kumparan pada stator.
- Frekuensi dari tegangan generator tergantung dari kecepatan putaran rotor

2.4 Frekuensi pada Generator Sinkron

Kecepatan Perputaran generator sinkron akan mempengaruhi frekuensi listrik yang dihasilkan generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian electromagnet 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:

$$f = \frac{PN}{120} \text{ Hz} \dots\dots\dots(2.1)^7$$

⁵ Juhari, *e-book* Generator Semester 3, 2014, hal 13

⁶ Suad Ibrahim Shahl, *e-book Synchronous Generator*, 2015, hal 7

⁷ Hamzah Berahim, *Teknik Tenaga Listrik*, 1994, hal168



Dimana:

f = frekuensi (Hz)

P = jumlah kutub

N = kecepatan putaran rotor (rpm)

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 (sesuai standard suatu Negara, di Indonesia adalah 50 Hz), maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub magnet yang telah ditentukan yang dapat dihitung melalui persamaan (2.1). 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.

2.5 GGL Induksi pada Generator

GGL induksi (E_a) pada generator akan terinduksi pada kumparan jangkar alternator (misalnya kumparan jangkar ditempatkan di stator) bila rotor di putar di sekitar stator (misalnya kumparan medan di rotor). Besarnya kuat medan pada rotor dapat dengan cara mengatur arus medan (I_f) yang diberikan pada rotor.

Adapun besar GGL induksi kumparan stator atau GGL induksi armature per fasa adalah:

$$E_a / ph = 4,44. f. M. \phi. K_d \dots \dots \dots (2.2)^8$$

Dimana :

E_a = Gaya gerak listrik armature per fasa (volt)

f = Frekuensi output generator (Hz)

M = Jumlah kumparan per fasa

Z = Jumlah konduktor seluruh slot per fasa

⁸ Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, 2004, hal 210

K_d = Faktor distribusi. Hal ini diperlukan karena kumparan armature atau alternator tidak terletak di dalam satu slot melainkan terdistribusi dalam beberapa slot per fasa

ϕ = Flux magnet per kutub per fasa

2.6 Konstruksi Generator Sinkron

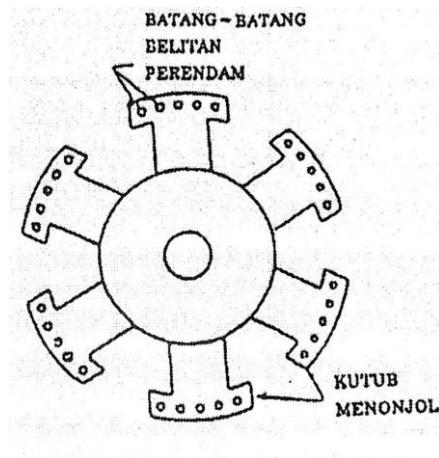
Menurut *Kundur Prabha* (1993), konstruksi generator sinkron terdiri dari dua bagian utama, yaitu: stator dan rotor. Stator adalah bagian diam yang mengeluarkan tegangan bolak-balik dan rotor adalah bagian bergerak yang menghasilkan medan magnet yang menginduksikan ke stator.

2.6.1 Rotor

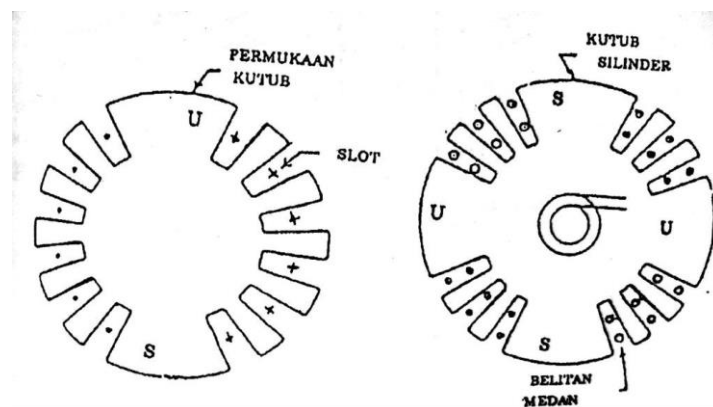
Pada generator sinkron, arus DC diterapkan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet rotor. Rotor generator diputar oleh prime mover menghasilkan medan magnet berputar pada mesin. Medan magnet putar ini menginduksi tegangan tiga fasa pada kumparan stator generator. Kontruksi rotor terdiri dari dua jenis:

1. Jenis kutub menonjol (*salient pole*) untuk generator dengan kecepatan rendah dan medium. Kutub menonjol terdiri dari inti kutub, badan kutub dan pada sepatu kutub juga dipasang belitan peredam (*damp winding*). Belitan kutub dari tembaga, badan kutub dan sepatu kutub dari besi lunak.
2. Jenis kutub silinder untuk generator dengan kecepatan tinggi, terdiri dari alu-alur yang dipasang kumparan medan juga ada gigi-gigi. Alur dan gigi tersebut terbagi atas pasangan-pasangan kutub.

Kumparan kutub kedua macam kutub tersebut dihubungkan dengan cincin geser untuk memberikan tegangan arus searah sebagai penguat medan. Tegangan arus searah tersebut dari sumbernya dilalukan melalui sikat, baru diberikan ke cincin gesar.



Gambar 2. 3 Penampang rotor untuk jenis kutub menonjol (*salient*) dengan belitan peredam⁹



Gambar 2. 4 Penampang rotor untuk jenis kutub silinder¹⁰

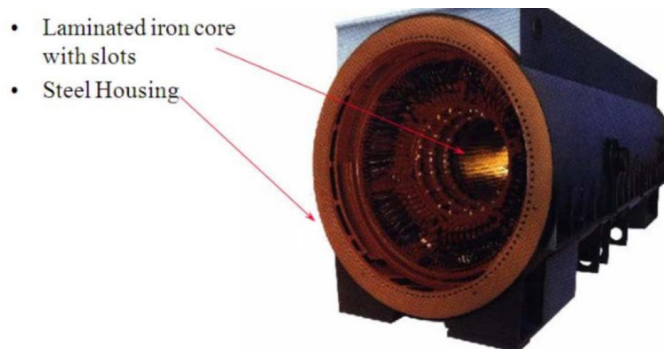
Rotor silinder umumnya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub, sedangkan rotor kutub sepatu digunakan untuk rotor dengan empat atau lebih kutub. Pemilihan konstruksi rotor tergantung dari kecepatan putar *primer mover*, frekuensi dan rating daya generator. Generator dengan kecepatan 1500 rpm ke atas pada frekuensi 50 Hz dan rating daya sekitar 10 MVA menggunakan rotor silinder. Sementara untuk daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka digunakan rotor kutub sepatu.

⁹ Hamzah Berahim, Teknik Tenaga Listrik, 1994, hal 164

¹⁰ Ibid., hal 165

2.6.2 Stator¹¹

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). Stator dari mesin sinkron terbuat dari bahan ferromagnetik yang berbentuk laminasi untuk mengurangi rugi-rugi arus pusar. Dengan inti ferromagnetik yang bagus berarti permeabilitas dan resistivitas dari bahan tinggi.



Gambar 2. 5 Konstruksi Stator

Bagian yang diam (stator) terdiri dari beberapa bagian, yaitu:

1. Inti Stator

Bentuk dari inti stator ini berupa cincin laminasi-laminasi yang diikat serapat mungkin untuk menghindari rugi-rugi arus eddy (eddy current losses). Pada inti ini terdapat slot-slot untuk menempatkan konduktor dan untuk mengatur arah medan magnetnya. Untuk menghindari arus pusar dan panas yang timbul, maka inti stator dibuat dari lempengan baja tipis dan isolasi satu terhadap yang lain.

¹¹Ahmad Faisal, Dasar Konversi Energi Listrik, <https://elektro.uma.ac.id/wp-content/uploads/2020/07/09-Generator-Sinkron.pptx>

2. Belitan Stator

Bagian stator yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang terdapat di dalam slot-slot dan ujung-ujung kumparan. Masing-masing slot dihubungkan untuk mendapatkan tegangan induksi.

3. Alur Stator

Merupakan bagian stator yang berperan sebagai tempat belitan stator ditempatkan. Ada tiga bentuk alur stator yaitu: terbuka, setengah terbuka dan tertutup.

4. Rumah Stator

Bagian dari stator yang umumnya terbuat dari besi tuang yang berbentuk silinder. Bagian belakang dari rumah stator ini biasanya memiliki sirip-sirip sebagai alat bantu dalam proses pendinginan.

2.7 Karakteristik Generator Sinkron

2.7.1 Generator Sinkron Tanpa Beban

Pada generator sinkron keadaan jalan tanpa beban mengandung arti bahwa arus armature (I_a) = 0. Dengan demikian besar tegangan terminal adalah:

$$V_t = E_a = E_0 \dots \dots \dots (2.3)^{12}$$

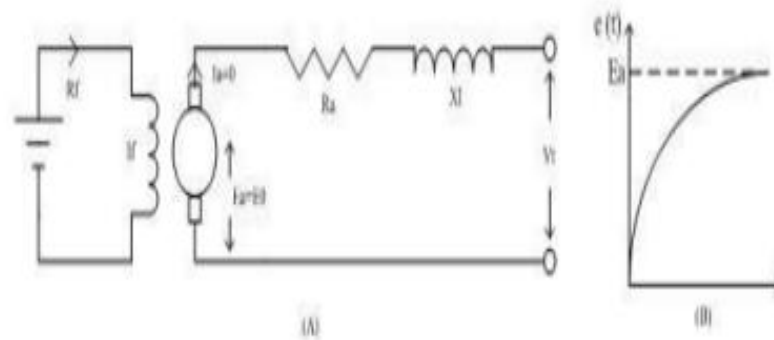
Oleh karena besar ggl armature adalah merupakan fungsi dari fluks magnet (persamaan 2.4) maka ggl armature dapat juga ditulis :

$$E_a = f(\phi) \dots \dots \dots (2.4)^{13}$$

Dari persamaan (2.3.), jika arus penguat medan diatur besarnya maka diikuti kenaikan fluks dan akhirnya juga pada ggl armature. Pengaturan arus penguat medan pada keadaan tertentu besarnya akan didapatkan besar ggl armature tanpa beban dalam keadaan saturasi. Secara grafik hubungan antara arus penguat medan (I_f) dan E_a terlukis pada gambar.

¹² Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, 2004, hal 211

¹³ Ibid., hal 212

Gambar 2. 6 Generator Tanpa Beban¹⁴

Dimana :

I_f = GGL armatur tanpa beban

R_f = Hambatan kumparan medan

R_a = Hambatan armature

X_L = Reaktansi bocor (reaktansi armature)

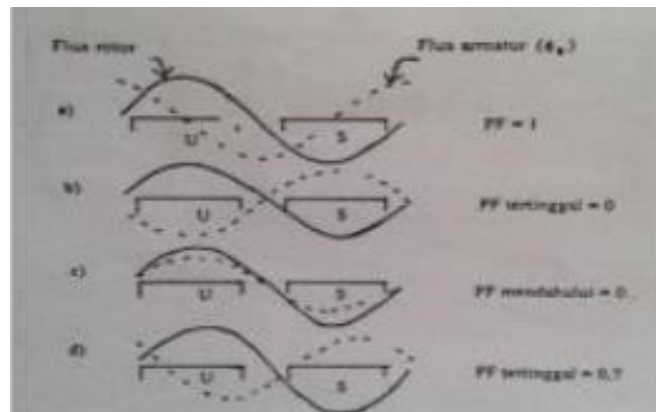
V_t = Tegangan output

E_a = Gaya gerak listrik armature

2.7.2 Generator Sinkron 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:

¹⁴ Ibid.



Gambar 2. 7 Pengaruh factor daya beban terhadap fluks rotor¹⁵

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 dan secara matematis ditulis :

$$X_s = X_L + X_m \dots \dots \dots (2.5)^{16}$$

Pada generator sinkron berbeban, maka pada kumparan armature timbul I_a dan X_m akibatnya timbul penurunan GGL armature tanpa beban. E_0 menjadi $E_a = E_0 - j I_a X_m$ dan tegangan terminalnya menjadi (V_t). GGL armature tanpa beban (E_0) besarnya adalah :

¹⁵ Ibid., hal 213

¹⁶ Ibid., hal 214



$$E_0/p_h = V_t + I_a (R_a + j X_s) \dots \dots \dots (2.6)^{17}$$

Atau

$$E_0/p_h = V_t + I_a + Z_s \dots \dots \dots (2.7)^{18}$$

2.8 Pengatur Tegangan

Jika beban ditambahkan pada generator ac yang sedang bekerja pada kepesatan konstan dan dengan eksitasi medan konstan, tegangan terminal akan berubah. Besarnya perubahan akan bergantung pada rancangan mesin dan pada faktor daya beban.

Persen pengaturan (pada faktor daya tertentu)

$$= \frac{\text{tegangan tanpa beban} - \text{tegangan beban penuh}}{\text{tegangan beban penuh}} \times 100 \dots \dots \dots (2.8)$$

Faktor-faktor yang mempengaruhi pengaturan generator adalah sebagai berikut:

1. Penurunan tegangan $I R$ pada lilitan jangkar.
2. Penurunan tegangan $I X_L$ pada lilitan jangkar.
3. Reaksi jangkar (pengaruh magnetisasi dari arus jangkar).

Karena tegangan terminal generator ac banyak berubah dengan berubahnya beban, maka untuk operasi hampir semua peralatan listrik diperlukan usaha untuk menjaga agar tegangannya konstan. Cara yang biasa dilakukan untuk ini adalah menggunakan alat pembantu yang disebut pengatur tegangan (voltage regulator) untuk mengendalikan besarnya eksitasi medan dc yang dicatukan pada generator. Bila tegangan terminal generator turun karena perubahan beban, pengatur tegangan secara otomatis menaikkan pembangkitan medan sehingga tegangan kembali normal. Sama halnya bila tegangan terminal naik karena perubahan beban, maka pengatur akan mengembalikan nilai tegangan normalnya dengan mengurangi eksitasi medan.

¹⁷ Ibid.

¹⁸ Ibid.

2.9 Sistem Eksitasi pada Generator Sinkron

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. 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.

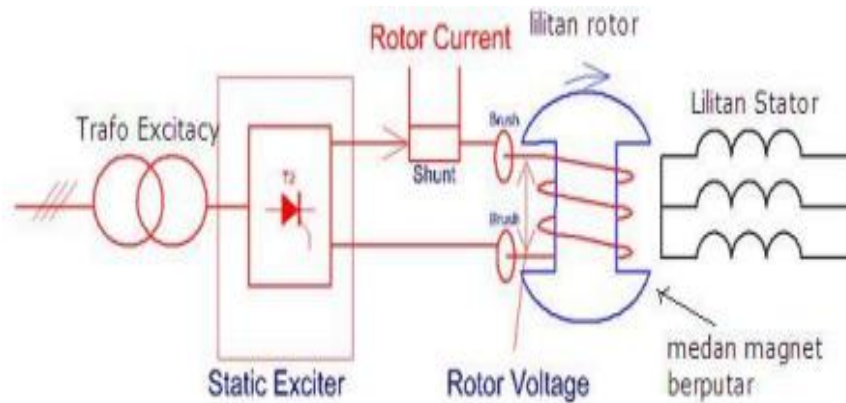
Setelah generator ac mencapai kepesatan yang sebenarnya oleh penggerak mulanya, medannya dieksitasi dari catu dc. Ketika kutub lewat di bawah konduktor jangkar yang berada pada stator, fluksi medan yang memotong konduktor menginduksikan ggl kepadanya. Ini adalah ggl bolak-balik, karena kutub dengan polaritas 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 kepesatan 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.

2.9.1 Sistem Eksitasi dengan Sikat¹⁹

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

¹⁹ Mokh. Sidqi Fahmi dan Irwant, Supplay Eksitasi Output Generator 300 MW Menggunakan Metode Pola Titik Daya Reaktif, *Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, Vol.5 No. 1, 2020, hal 13.

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. 8 Sistem Eksitasi dengan Sikat (*Brush Excitation*)

- **Prinsip Kerja pada system 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 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.

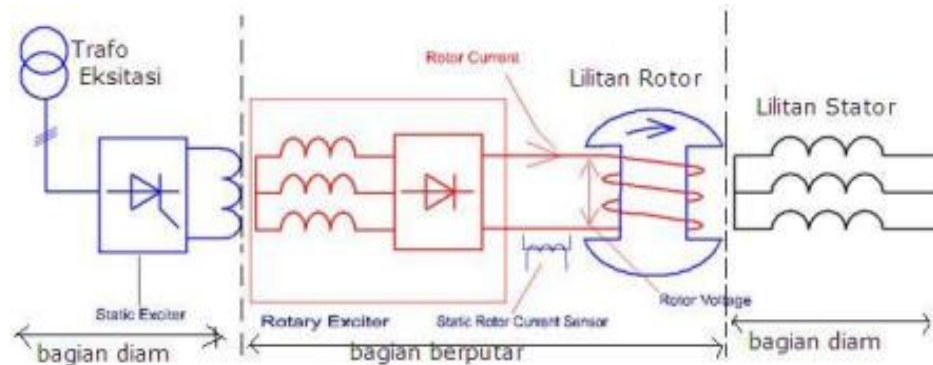
2.9.2 Sistem Eksitasi tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)²⁰

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 keandalannya 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.

²⁰ Heri Irawan, Sistem penguat dengan Sikat (*Brush Excitation System*) pada Generator Unit 1 PLTU Cilacap, 2010, hal 3.



Gambar 2. 9 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

- Prinsip kerja system 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.

- Bagian utama system eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*)

Bagian-bagian utama dari sistem eksitasi tanpa sikat antara lain :

- a. *Permanent Magnet Generator (PMG)*

Permanent Magnet Generator (PMG) adalah generator sinkron yang sistem eksitasinya menggunakan magnet permanen pada rotornya. Pada sistem eksitasi tanpa sikat digunakan PMG sebagai penyedia daya untuk eksitasi AC exciter/main exciter dan komponen regulator. PMG terdiri dari magnet permanen berputar dan jangkar yang diam dililit untuk output 3 phasa.

PMG berputar seiring dengan berputarnya rotor. PMG sebagai pembangkit tegangan/ arus AC yang disearahkan kemudian dimasukkan pada AVR (Automatic Voltage Regulator) untuk dikontrol. Karena tegangan/ arus AC pada PMG sangat kecil, arus AC yang sudah disearahkan dimasukkan pada eksiter untuk membangkitkan tegangan AC yang lebih besar. Arus AC keluaran eksiter disearahkan oleh rotating diode untuk memberikan arus eksitasi pada rotor, sehingga pada rotor terdapat medan magnet.

Medan magnet tersebut menabrak kumparan – kumparan pada stator yang menghasilkan fluks listrik. Sehingga dari situ didapatkan tengangan keluaran yang dihasilkan oleh generator terebut. Hal tersebut terjadi berulang – ulang setiap generator beroperasi. Sehingga tidak diperlukan sumber tegangan DC untuk eksitasi pada generator ini. Keluaran generator tersebut diambil melalui stator karena lebih mudah mengambil tegangan pada bagian yang diam dari pada mengambil tegangan pada bagian yang berputar (rotor).



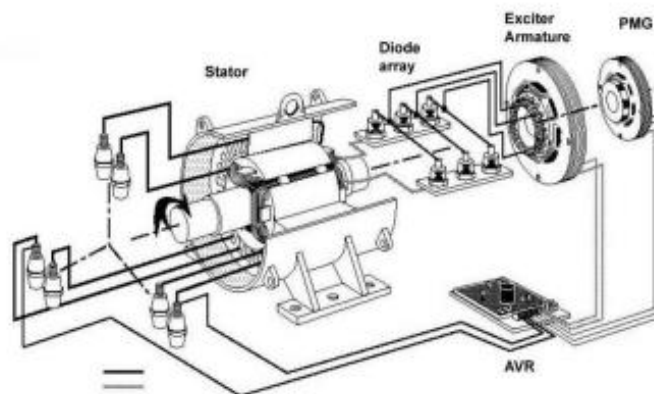
Gambar 2. 10 Permanent Magnet Generator

b. AC Exciter

AC exciter adalah jenis yang sama dengan generator sinkron konvensional. Rotor AC exciter ditempatkan pada poros yang sama dengan rotating rectifier. AC exciter sendiri mendapatkan eksitasi pada statornya dari PMG setelah disearahkan dalam AVR. Penggunaan AC exciter ini bertujuan untuk memperbesar arus eksitasi agar bisa digunakan untuk mengeksitasi generator utama, setelah disearahkan dulu oleh rotating rectifier.

c. Rotating Rectifier

Rotating rectifier terdiri dari dioda silikon, fuse dan resistor. Bagian ini merupakan bagian yang digunakan untuk menyearahkan arus yang akan menuju ke rotor generator utama sebagai arus eksitasi. Berdasarkan fungsi kerjanya, ada 2 rangkaian penyearah yang digunakan pada brushless exciter, yaitu penyearah statis dan penyearah berputar. Karena kumparan medan generator utama terletak pada rotor, maka dioda ikut berputar dengan poros generator sehingga disebut rotating rectifier.



Gambar 2.11 Rotor, kumparan AC exciter, rotating diode dan PMG yang terletak satu poros

d. Automatic Voltage Regulator

AVR merupakan bagian yang sangat penting dalam pengaturan arus eksitasi generator. Arus keluaran dari PMG disearahkan dan diatur besarnya di AVR. Unit AVR (Automatic Voltage Regulator) berfungsi untuk menjaga agar

tegangan generator tetap konstan dengan kata lain generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu stabil tidak terpengaruh pada perubahan beban yang selalu berubah-ubah dikarenakan beban sangat mempengaruhi tegangan output generator. Prinsip kerja dari AVR adalah mengatur arus penguatan pada eksiter. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator maka AVR akan memperbesar arus penguatan (excitation) pada eksiter. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan (excitation) pada eksiter.

2.10 Rugi-rugi Generator Sinkron²¹

2.10.1 Rugi Listrik

Rugi listrik dikenal juga dengan rugi tembaga yang terdiri dari kumparan armatur, kumparan medan. Rugi – rugi tembaga ditemukan pada semua belitan pada mesin, dihitung berdasarkan pada tahanan dc dari lilitan pada suhu 75⁰ C dan tergantung pada tahanan efektif dari lilitan pada fluks dan frekuensi kerjanya. Rugi kumparan armatur ($P_{ar} = I_a^2 \cdot R_a$) sebesar sekitar 30 sampai 40% dari rugi total pada beban penuh. Sedangkan rugi kumparan medan shunt ($P_{sh} = I_{sh}^2 \cdot R_{sh}$) bersama – sama dengan kumparan medan seri ($P_{sr} = I_{sr}$) sebesar sekitar 20 sampai 30% dari rugi beban penuh.

Sangat berkaitan dengan rugi $I^2 R$ adalah rugi – rugi kontak sikat pada cincin slip dan komutator, rugi ini biasanya diabaikan pada mesin induksi dan mesin serempak, dan pada mesin dc jenis industri tegangan jatuh pada sikat dianggap tetap sebesar 2V keseluruhannya jika dipergunakan sikat arang dan grafit dengan shunt.

2.10.2 Rugi Besi

Rugi besi disebut juga rugi magnetik yang terdiri dari histerisis dan rugi arus pusar atau arus eddy yang timbul dari perubahan kerapatan fluks pada besi mesin dengan hanya lilitan peneral utama yang diberi tenaga pada generator sinkron rugi

²¹ Muhammad Noer, Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator di PLTG Borang dengan Menggunakan *Software* Matlab, Vol. 2 No. 2 2017, hal 105

ini dialami oleh besi armatur, meskipun pembentukan pulsa fluks yang berasal dari mulut celah akan menyebabkan rugi pada besi medan juga, terutama pada sepatu kutub atau permukaan besi medan. Rugi ini biasanya data diambil untuk suatu kurva rugi – rugi besi sebagai fungsi dari tegangan armatur disekitar tegangan ukuran. Maka rugi besi dalam keadaan terbebani ditentukan sebagai harga pada suatu tegangan yang besarnya sama dengan tegangan ukuran yang merupakan perbedaan dari jatuhnya tahanan ohm armatur pada saat terbebani. Rugi histerisis (P_h) dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan empiris yang besarnya adalah :

$$P_h = \eta_h \cdot B_{max} \cdot f \cdot v \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

η_h = koefisien steinmetz histerisis. Perhatikan tabel 2.1 tentang nilai η_h dari bermacam – macam bahan baja .

B = kerapatan flux (Wb/m^2)

v = volume inti (m^3)

f = frekuensi (Hz)

Tabel 2.1 Nilai Koefisien Steinmentz Histerisis

Bahan	Hh (joule / m ³)
Sheet steel	502
Silicon steel	191
Har Card steel	7040
Cast steel	750-3000
Cast iron	2700-4000

Dari persamaan, besar koefisien steinmentz histerisis, kerapatan flux dan volume inti adalah konstan sehingga nilai rugi histerisis adalah merupakan fungsi dari frekuensi atau ditulis ;

$$P_h = F(f) \dots\dots\dots(2.10)$$

Jadi makin besar frekuensi sinyal tegangan output makin besar rugi histerisis yang diperoleh.

Adapun rugi arus pusar atau rugi arus eddy tergantung kuadrat dari kerapatan fluks, frekuensi dan ketebalan dari lapisan pada keadaan mesin normal besarnya adalah:

$$P_e = k \cdot B_{max} \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot V \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana : k = konstanta arus pusar yang tergantung pada ketebalan laminasi masing-masing lempengan dan volume inti armatur. Oleh karena nilai k dan b adalah konstan, maka besar kecilnya rugi arus pusar adalah tergantung pada nilai frekuensi kuadrat atau ditulis :

$$P_e = F(f)^2 \dots\dots\dots(2.12)$$

Besar rugi besi adalah sekitar 20 sampai 30% dari rugi total pada beban penuh.

2.10.3 Rugi Mekanik

Rugi mekanik terdiri dari :

- a. Rugi gesek yang terjadi pada pergesekan sikat dan sumbu. Rugi ini dapat diukur dengan menentukan masukan pada mesin yang bekerja kecepatan yang semestinya tetapi tidak diberi beban dan tidak diteral.
- b. Rugi angin (windage loss) atau disebut juga rugi buta (stray loss) akibat adanya celah udara antara bagian rotor dan bagian stator. Besar rugi mekanik sekitar 10 sampai 20% dari rugi total pada beban penuh.

2.11 Impedansi dan Resistansi

Impedansi (Z) adalah nilai hambatan yang dihasilkan dari beban berupa resistor dengan induktor / resistor dengan kapasitor / resistor dengan induktor dan kapasitor yang dirangkai secara seri atau pun paralel. Untuk mengetahui nilai impedansi (Z) pada rangkaian paralel resistor, induktor, kapasitor pada arus bolak-balik dapat dilakukan dengan cara menghitung nilai reaktansi induktif (X_L), dan reaktansi kapasitif (X_C) dengan menggunakan rumus berikut :



1. Rumus Reaktansi Induktif (X_L) :

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times l \dots\dots\dots (2.13)$$

Keterangan :

X_L = Reaktansi induktif (Ω)

f = Frekuensi (Hz)

π = 3,14 atau $22/7$

l = Nilai induktansi pada induktor (H)

2. Rumus Reaktansi Kapasitif (X_C)

$$X_C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \dots\dots\dots (2.14)$$

Keterangan :

X_C = Reaktansi kapasitif (Ω)

f = Frekuensi (Hz)

π = 3,14 atau $22/7$

C = Nilai kapasitas pada kapasitor (F)

Jika kedua nilai reaktansi telah diketahui, maka selanjutnya dapat menghitung nilai impedansi (Z) pada rangkaian paralel resistor, induktor, dan kapasitor menggunakan rumus berikut :

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}} \dots\dots\dots (2.15)$$

Keterangan :

Z = Impedansi (Ω)

R = nilai hambatan atau resistansi pada resistor (Ω)

X_L = Reaktansi induktif (Ω)

Arus listrik (I) total pada rangkaian paralel resistor, induktor, dan kapasitor dengan arus bolak-balik dapat diketahui, jika arus listrik masing-masing pada beban telah diketahui kemudian menghitung dengan menggunakan rumus :

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} \dots\dots\dots (2.16)$$

Keterangan :

I = Arus listrik total pada rangkaian (A)

I_R = Arus listrik yang mengalir pada beban resistor (A)

I_L = Arus listrik yang mengalir pada beban induktor (A)

I_C = Arus listrik yang mengalir pada beban kapasitor (A)

Nilai tegangan (V) pada rangkaian tersebut dapat dihitung dengan menggunakan rumus yang berasal dari hasil substitusi rumus hukum ohm :

$$Z = \frac{V}{I\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.17)^{22}$$

Keterangan:

V = Tegangan listrik pada rangkaian (V)

I = Arus listrik pada rangkaian (A)

Z = Impedansi (Ω)

Faktor daya (Cosphi;) dapat diketahui dengan menggunakan rumus berikut:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} \dots\dots\dots (2.18)^{23}$$

Keterangan :

R = Nilai hambatan atau resistansi (Ω)

Z = Nilai impedansi pada rangkaian (Ω)

2.12 Efisiensi Generator

Efisiensi generator adalah perbandingan antara daya output dengan daya input. Seperti halnya dengan mesin- mesin listrik lainnya, maupun transformator, maka efisiensi generator sinkron dapat dituliskan seperti Persamaan :

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.19)^{24}$$

Dimana :

$$P_{in} = P_{out} + \sum P_{Rugi} \dots\dots\dots (2.20)$$

P_{out} = daya keluaran

P_{in} = daya masukan

$$\sum P_{Rugi} = I^2 \cdot R \dots\dots\dots (2.21)$$

²² Sudaryatno Sudirham, *e-book Analisa Rangkaian Listrik Jilid 1*, 2012, hal 235

²³ Ramesh. A, Kasinathan, *e-book Electrical Engineering*, 2010, hal 118

²⁴ Hamzah Berahim, *Teknik Tenaga Listrik*, 1994, hal 178



Faktor apa saja yang menyebabkan efisiensi selalu dibawah 100%, untuk itu perlu diketahui kerugian daya apa saja yang timbul selama generator beroperasi.

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