

BAB II

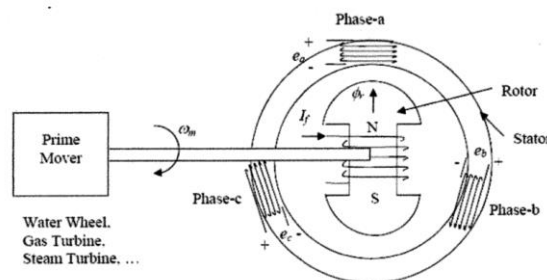
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori Dasar Generator Sinkron¹

Generator sinkron (sering disebut alternator) merupakan sebuah mesin sinkron yang berfungsi mengubah energi mekanik berupa putaran menjadi energi listrik bolak-balik (AC). Generator AC (*alternating current*), atau generator sinkron. Dikatakan generator 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 putar pada stator.

Generator sinkron mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik. Adapun sumber dari energi mekanik tersebut adalah *prime mover*, baik mesin diesel, turbin uap, turbin gas, turbin air atau perangkat sejenis lainnya. Tegangan output dari generator sinkron adalah tegangan bolak-balik, karena itu generator sinkron disebut juga generator AC.

Di bawah ini akan dijelaskan secara sederhana cara pembangkitan listrik dari sebuah generator.



Gambar 2.1 Sistem Pembangkitan Generator

Apabila rotor generator diputar pada kecepatan nominalnya, dimana putaran tersebut diperoleh dari putaran penggerak mulanya (*prime mover*), kemudian pada

¹ Zuriman Anthony, Mesin Listrik Dasar, 2018, hlm. 15.

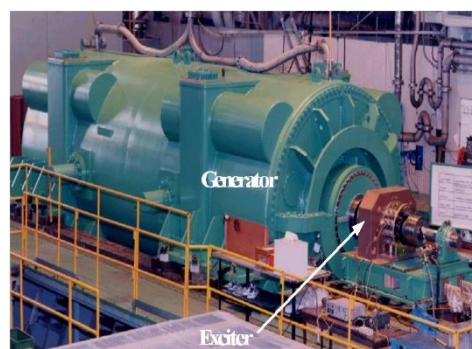
kumparan medan rotor diberikan arus medan sebesar I_f , maka garis-garis fluksi yang dihasilkan melalui kutub-kutub inti akan menghasilkan tegangan.

2.2 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 diantara 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.

Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak diantara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh tenaga air atau tenaga lainnya, maka pada kumparan motor akan timbul medan magnet atau fluks yang bersifat bolak-balik atau fluks putar. Fluks putar ini akan memotong-motong kumparan stator, sehingga pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik karena pengaruh dari fluks putar tersebut.

Generator sinkron yang banyak dijumpai di masyarakat adalah generator tiga fasa, dalam hal ini jumlah kumparan stator ada tiga kelompok atau tiga fasa. Gambar generator sinkron dapat dilihat pada gambar 2.2 :

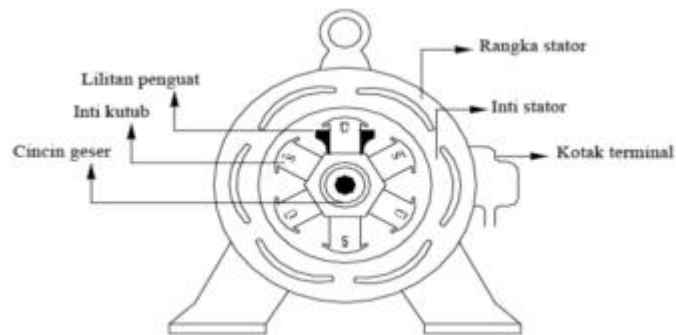


Gambar 2.2 Generator Sinkron

2.2.1 Konstruksi Generator Sinkron²

² Zuriman Anthony, Mesin Listrik Dasar, 2018, hlm. 2.

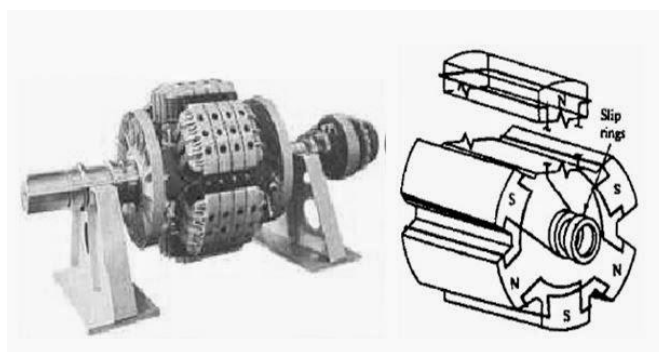
Menurut *Kundur Prabha (1993)*, konstruksi generator sinkron terdiri dari dua bagian utama, yaitu : stator dan rotor. Stator adalah bagian diam yang mengeluarkan tegangan bolak-balik dan rotor adalah bagian bergerak yang menghasilkan medan magnet yang menginduksikan ke stator.



Gambar 2.3 Penampang Rotor dan Stator

a. 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. Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa salient (kutub sepatu) dan non salient (rotor silinder). Gambar 2.5 menunjukkan bentuk rotor kutub sepatu.

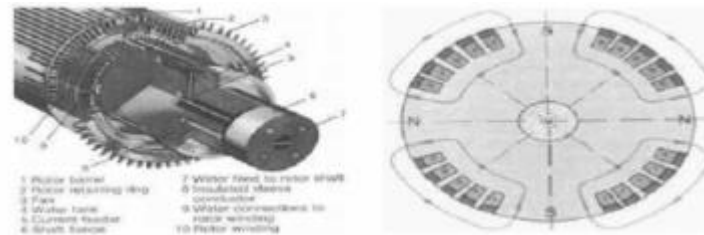


Gambar 2.4 Rotor Kutub Sepatu³

Rotor silinder umumnya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub, sedangkan rotor kutub sepatu digunakan untuk rotor dengan empat atau lebih kutub.

³ J.Chapman Stephen, *Electric Machinery and Power System Fundamentals*, 2002, hlm. 194.

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. Gambar 2.5 menunjukkan bentuk rotor silinder.



Gambar 2.5 Rotor Silinder

b. Stator

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



Gambar 2.6 Konstruksi Stator

Lilitan armatur generator dalam wye dan titik netral dihubungkan ke tanah. Lilitan dalam wye dipilih karena:

1. Meningkatkan daya output.
2. Menghindari tegangan harmonik, sehingga tegangan line tetap sinusoidal dalam kondisi beban apapun.



Dalam lilitan wye tegangan harmonik ketiga masing-masing fasa saling meniadakan, sedangkan dalam lilitan delta tegangan harmonik ditambahkan. Karena hubungan delta tertutup, sehingga membuat sirkulasi arus harmonik ketiga yang meningkatkan rugi-rugi. 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.

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

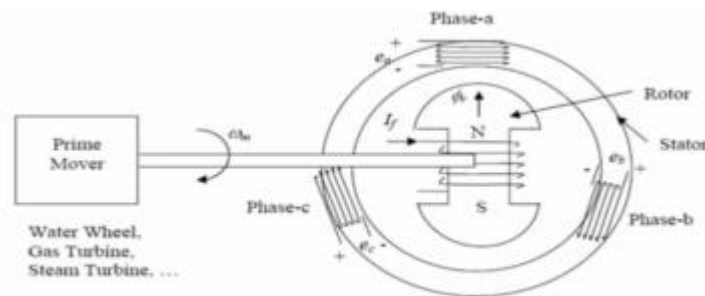
Bagian dari stator yang umumnya terbuat dari besi tuang yang berbentuk silinder. Bagian belakang dari rumah stator ini biasanya memiliki sirip-sirip sebagai alat bantu dalam proses pendinginan.

2.2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron⁴

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

⁴ Drs. Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, 1997, hlm. 209.

hubungan antara penghantar bergerak, arah medan magnet, dan arah resultan dari aliran arus yang terinduksi. Apabila ibu jari menunjukkan arah gerakan penghantar, telunjuk menunjukkan arah fluks, jari tengah menunjukkan arah aliran elektron yang terinduksi. Hukum ini juga berlaku apabila magnet sebagai pengganti penghantar yang digerakkan. Prinsip generator ini secara sederhana dapat dijelaskan bahwa tegangan akan diinduksikan pada konduktor apabila konduktor tersebut bergerak pada medan magnet sehingga memotong garis-garis gaya.

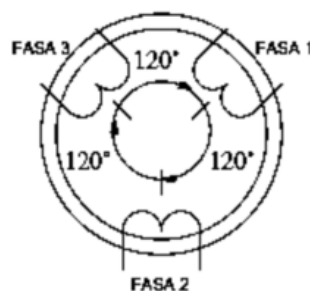


Gambar 2.7 Prinsip Kerja Generator Sinkron

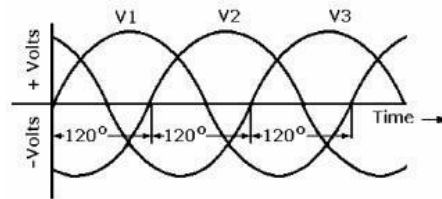
Prinsip kerja dari generator sinkron dapat dinyatakan sebagai berikut :

- c. Rotor disuplai dengan arus DC I_f yang kemudian menghasilkan fluks magnet ϕ_f
- d. Rotor digerakkan oleh turbin dengan kecepatan konstan sebesar n_s .
- e. Garis gaya magnet bergerak menginduksi kumparan pada stator.
- f. Frekuensi dari tegangan generator tergantung dari kecepatan putaran rotor yang dapat dinyatakan dengan persamaan

Prinsip kerja generator arus bolak-balik tiga fasa (alternator) pada dasarnya sama dengan generator arus bolak-balik satu fasa, akan tetapi pada generator tiga fasa memiliki



Gambar 2.8 Kumparan 3 Fasa



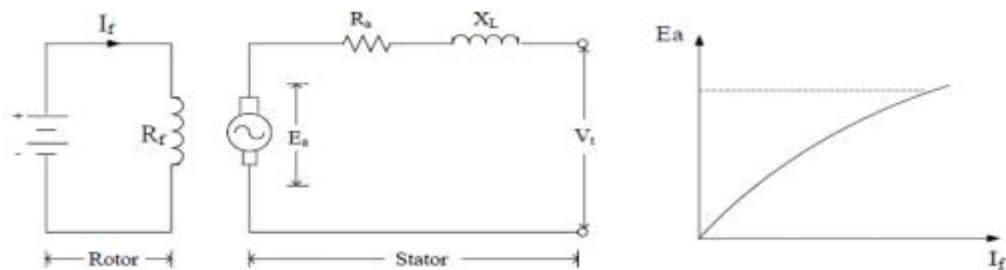
Gambar 2.9 Grafik Tegangan Generator Tiga Fasa

2.3 Karakteristik Generator Sinkron

2.3.1 Generator Sinkron Tanpa Beban⁵

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 2.10 Generator Sinkron Tanpa Beban

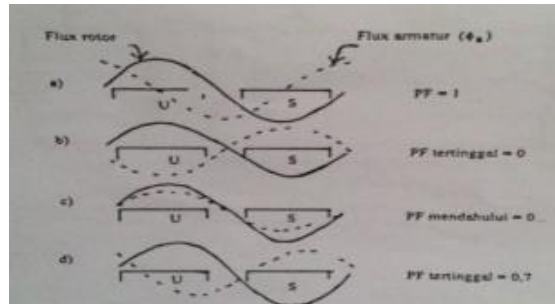
2.3.2 Generator Sinkron Berbeban⁶

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

⁵ B. L Theraja, and A. K. Theraja, A Text Book of Electrical Technology in S.I. Units Volume I Basic Electrical Engineering, 1984, hlm. 968.

⁶ B. L Theraja, and A. K. Theraja, A Text Book of Electrical Technology in S.I. Units Volume I Basic Electrical Engineering, 1984, hlm. 969.

kumparan rotor. Hal ini tergantung pada faktor daya beban. Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar 2.11.

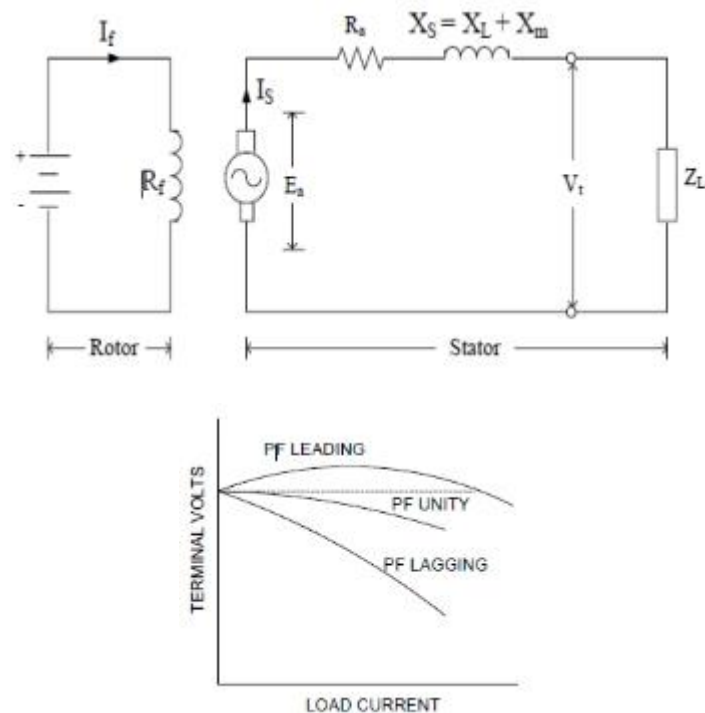


Gambar 2.11 Pengaruh Faktor Daya Beban Terhadap Fluks Rotor

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 dan secara matematis.



Gambar 2.12 Generator Sinkron Berbeban

Pada generator sinkron berbeban, maka pada kumparan *armature* timbul I_a dan X_m akibatnya timbul penurunan GGL *armature* tanpa beban.

- Jatuh tegangan karena resistansi jangkar (R_a).
- Jatuh tegangan karena reaktansi bocor jangkar (X_L).
- Jatuh tegangan karena reaksi jangkar

2.4 Rugi – Rugi Generator Sinkron⁷

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

⁷ Drs. Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, 1997, hlm. 142.



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 :

$$P_{in} = P_{out} + P_{rugi-rugi\ total} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

P_{in} = Total daya yang diterima Generator

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

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

Untuk mencari daya rata-rata dapat menggunakan rumus berikut :

$$P_{av} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{\Sigma t}} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

P = Daya yang diukur

t = lama waktu beban

Tabel 2.1 Jenis Rugi – Rugi Pada Generator

Jenis Rugi-rugi	Presentase 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

2.4.1 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.

2.4.2 Rugi Belitan

Rugi-rugi belitan sering disebut rugi – rugi tembaga tetapi pada saat sekarang sudah tidak begitu. Mempunyai belitan stator dari kawat alumunium yang lebih tepat disebut rugi – rugi $I^2 R$ yang menunjukkan besarnya daya yang berubah menjadi panas oleh tahanan dari konduktor tembaga atau aluminium. Total kerugian $I^2 R$ adalah jumlah dari rugi – rugi $I^2 R$ primer (stator) dan rugi – rugi $I^2 R$ sekunder (rotor). Rugi – rugi $I^2 R$ 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.

2.4.3 Rugi Mekanik

Rugi-rugi gesekan dan angin adalah energi mekanik yang dipakai dalam motor listrik untuk menanggulangi gesekan batalan poros, gesekan sikat melawan komutator atau *slip ring*, gesekan dari bagain yang berputar terhadap angin, terutama pada daun kipas pendingin. Kerugian energi ini selalu berubah menjadi panas berubah menjadi panas seperti pada semua rugi – rugi lainnya.

Rugi – rugi mekanik dianggap konstan dari beban nol hingga beban penuh dan ini Jadalah masuk akal tetapi tidak sepenuhnya tepat seperti halnya pada rugi – rugi inti. Macam –macam ketidak tepatan 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.



2.4.4 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%.

2.5 Faktor Daya

Daya adalah hasil dari nilai nilai-nilai rms dari tegangan dan arus, sedangkan daya aktif kurang dari daya nyata dengan faktor tertentu. Faktor ini sama dengan rasio dari daya aktif untuk daya nyata, di sebut faktor daya sirkuit, untuk voltage sinusoidal dan gelombang

Maka, di sirkuit yang bentuk gelombang mengikuti hukum sinus, faktor daya adalah cosinus dan sudut antara tegangan dan arus yang dihasilkan mengalir dalam sirkuit. Faktor daya disebut tertinggal ketika arus terlambat terhadap tegangan yang diberikan dan memimpin saat arus mengarah tegangan. Dengan demikian, untuk pertimbangan faktor daya, tegangan yang diberikan selalu di anggap sebagai kualitas referensi

2.6 Efisiensi Generator⁸

Pada umumnya yang disebut dengan efisiensi generator adalah perbandingan antara daya output dengan daya input. Seperti halnya dengan mesin-mesin listrik

⁸ Drs. Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, 1997, hlm. 145.



lainnya, maupun transformator, maka efisiensi generator sinkron dapat dituliskan seperti persamaan:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

$$P_{in} = P_{out} + P_{Rugi-rugi\ total} \dots\dots\dots(2.4)$$

P_{out} = daya keluaran

P_{in} = daya masukan

$$P_{Rugi-rugi\ total} = P_{Rugi-rugi\ tetap} + P_{Rugi-rugi\ variabel} \dots\dots\dots(2.5)$$

Efisiensi maksimum generator terjadi saat rugi tetap = rugi variabel, sehingga

$$P_{Rugi-rugi\ total} = 2 \times P_{Rugi-rugi\ tetap}, \text{ atau} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$P_{Rugi-rugi\ total} = 2 \times P_{Rugi-rugi\ variabel} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$P_{Rugi-rugi\ variabel} = \left(\frac{Beban\ real}{Kapasitas\ Generator}\right)^2 \times P_{Rugi\ tembaga\ beban\ penuh} \dots\dots\dots(2.8)$$

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 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 :
 - Rugi mekanis akibat putaran.
 - Rugi inti besi akibat kecepatan putaran dan *Fluks* medan.

2.7 Jenis – Jenis Beban⁹

Dalam suatu rangkaian listrik selalu dijumpai suatu sumber dan beban. Bila sumber listrik DC, maka sifat beban hanya bersifat resistif murni, karena frekuensi sumber DC adalah nol. Reaktansi induktif (XL) akan menjadi nol yang berarti bahwa induktor tersebut akan short circuit. Reaktansi kapasitif (XC) akan menjadi tak berhingga yang berarti bahwa kapasitif tersebut open circuit. Jadi sumber DC akan mengakibatkan beban – beban induktif dan beban kapasitif tidak akan berpengaruh pada rangkaian.

⁹ Abdul.Kadir, Pengantar Teknik Tenaga Listrik, 1980, hal. 97.

Bila sumber listrik AC maka beban dibedakan menjadi 3 sebagai berikut :

1. Beban Resistif (R)
2. Beban Induktif (L)
3. Beban Kapasitif (C)

2.7.1 Beban Resistif (R)

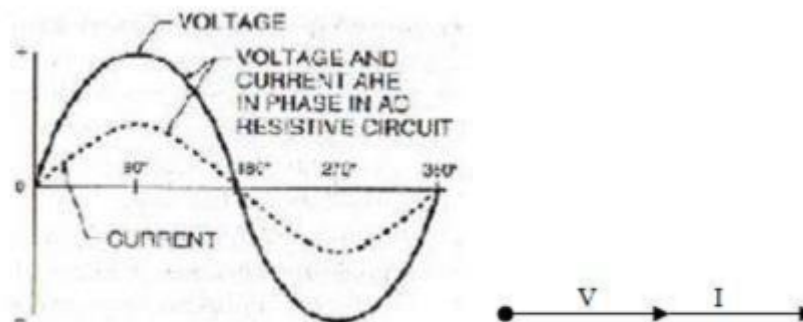
Beban resistif (R) yaitu beban yang terdiri dari komponen tahanan Ohm saja (*resistance*), seperti elemen pemanas (*heating element*) dan lampu pijar. Beban jenis ini hanya mengkonsumsi beban aktif saja dan mempunyai faktor daya sama dengan satu. Tegangan dan arus sefasa. Persamaan daya sebagai berikut :

Dimana :

P = daya aktif yang diserap beban (watt)

V = tegangan yang mencatu beban (volt)

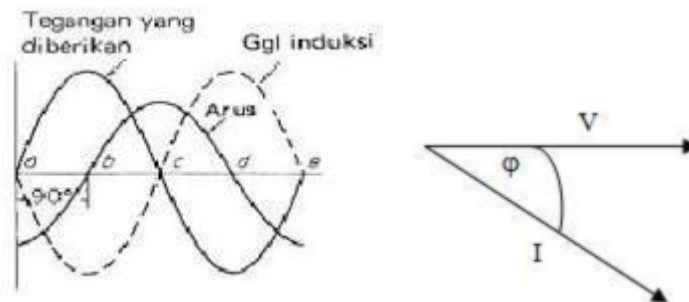
I = arus yang mengalir pada beban (A)



Gambar 2.13 Bentuk Gelombang dan Vektor Arus Beban Resistif

2.7.2 Beban Induktif (L)

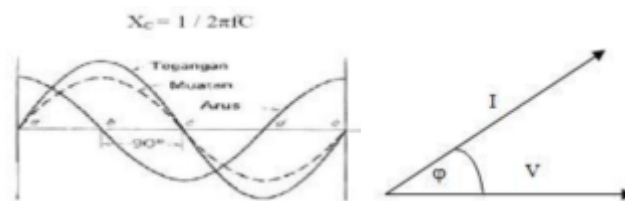
Beban induktif (L) yaitu beban yang terdiri dari kumparan kawat yang dililitkan pada suatu inti, seperti *coil*, transformator, dan solenoida. Beban ini dapat mengakibatkan pergeseran fasa (*phase shift*) pada arus sehingga bersifat lagging. Hal ini disebabkan oleh energi yang tersimpan berupa medan magnetis akan mengakibatkan fasa arus bergeser menjadi tertinggal terhadap tegangan. Beban jenis ini menyerap daya aktif dan daya reaktif. Gambar 2.17 menunjukkan grafik arus dan tegangan pada beban induktif.



Gambar 2.14 Bentuk Gelombang dan Vektor Arus Beban Induktif

2.7.3 Beban Kapasitif (C)

Beban kapasitif (C) yaitu beban yang memiliki kemampuan kapasitansi atau kemampuan untuk menyimpan energi yang berasal dari pengisian elektrik (*electrical discharge*) pada suatu sirkuit. Komponen ini dapat menyebabkan arus *leading* terhadap tegangan. Beban jenis ini menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif. Gambar 2.15 menunjukkan grafik arus dan tegangan pada beban kapasitif.



Gambar 2.15 Menunjukkan Grafik Arus dan Tegangan Pada Beban Kapasitif.