

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator

Generator adalah mesin pembangkit tenaga listrik, pembangkitan diperoleh dengan menerima tenaga mekanis dan diubahnya menjadi tenaga listrik, tenaga mekanis untuk generator misalnya untuk pemakaian di bengkel atau sekolah, umumnya digunakan mesin disel, disel dan generator ini biasanya dipasang menjadi satu unit. Unit ini biasa disebut dengan generator set. Generator set pada umumnya menghasilkan listrik arus bolak balik satu atau tiga fasa. Dulu umumnya generator dengan mesin penggeraknya dihubungkan tidak langsung tetapi menggunakan sabuk atau ban perantara.

Generator arus bolak balik, yang kadang-kadang disebut generator sinkron atau altenator, memberikan hubungan penting dalam proses yang lama dari perubahan energi dalam bentuk batu bara, minyak, gas, atau uranium kedalam bentuk yang bermanfaat untuk digunakan dalam industri dan rumah tangga. Generator besar yang digunakan untuk mencatu jala-jala daya listrik nasional modern digerakkan oleh turbin uap atau kincir air. Generator yang digunakan untuk mencatu sistem daya terpisah, atau sistem yang lebih kecil atau untuk memperlengkapi daya beban puncak tambahan terhadap jala-jala listrik yang lebih besar kerap kali digerakkan oleh mesin disel atau turbin bakar.



Gambar 2.1 Generator

¹ Daryanto. Pengetahuan Teknik Listrik. 2006 Hlm 90

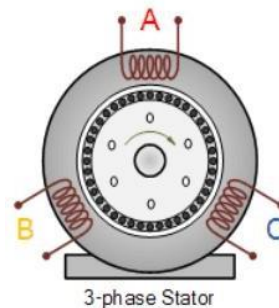
² Eugene C.Lister. Mesin dan Rangkaian Listrik. 1993 Hlm 197

Komponen gambar 2.1, yakni:

1. Stator
2. Rotor
3. Exciter

2.2 Generator Asinkron

Generator asinkron merupakan mesin listrik arus bolak balik (AC) yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa generator ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke statornya, dimana arus rotor generator ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. Generator asinkron sangat banyak digunakan di dalam kehidupan sehari-hari baik di industri maupun di rumah tangga. Generator asinkron / induksi yang umum dipakai adalah generator asinkron 3-fase. Generator Asinkron 3-fase dioperasikan pada sistem tenaga 3-fase dan banyak digunakan di dalam berbagai bidang industri³. Gambar menunjukkan komponen generator asinkron tiga fasa.



Gambar 2.2 Generator Asinkron Tiga Fasa

Keterangan:

1. Merah = Fasa A
2. Kuning = Fasa B
3. Biru = Fasa C

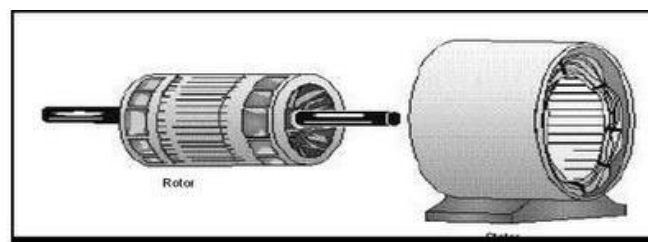
Generator tipe ini banyak dipergunakan untuk pembangkit listrik tenaga angin dan tenaga mikro hidro. Hanya saja ada beberapa kelemahan di dalamnya, yakni:

1. Efisiensi sistem eksitasi internal di dalam generator ini kurang baik.
2. Kita tidak dapat menggunakan generator tipe ini untuk kondisi faktor dayasedang *lagging*.
3. Generator ini membutuhkan daya reaktif yang terlalu besar.

2.2.1 Konstruksi generator asinkron

Secara umum konstruksi generator asinkron / induksi adalah sama dengan konstruksi motor induksi, hanya saja dalam pengoperasiannya generator induksi memerlukan penggerak mula untuk menggerakkan rotor motor induksi tersebut selain agar dapat berfungsi sebagai generator dengan tegangan dan frekuensi sama dengan putaran nominal motor induksi yang dijadikan generator. Tegangan hanya dapat timbul bila ada sisa magnet pada rotor. Untuk memperoleh regangan nominal, dipasang kapasitor paralel pada terminal kumparan stator.

Secara umum generator asinkron terdiri dari rotor dan stator. Rotor merupakan bagian yang bergerak, sedangkan stator bagian yang diam. Diantara stator dengan rotor ada celah udara yang jaraknya sangat kecil. Gambar 2.3 menunjukkan penampang rotor dan stator.

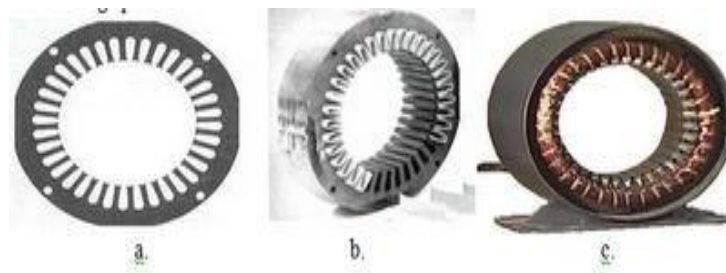


Gambar 2.3 Penampang Rotor dan Stator

1. Stator

Komponen stator adalah bagian terluar dari generator yang merupakan bagian yang diam dan mengalirkan arus. Stator terdiri dari atas tumpukan laminasi inti yang memiliki alur yang menjadi tempat kumparan dililitkan yang berbentuk

silindris. Alur pada tumpukan laminasi inti dibentuk dari lembaran kertas (Gambar 2.4 (a) dan 2.4 (b)). Tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lembaran besi (Gambar 2.4 (a) dan 2.4 (b)). Tiap lembaran besi tersebut memiliki beberapa alur dan beberapa lubang pengikat untuk menyatukan inti. Tiap kumparan tersebar dalam alur yang disebut belitan fasa dimana untuk generator tiga fasa, belitan tersebut terpisah secara listrik sebesar 120° . Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapisi dengan isolasi tipis. Kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris (Gambar 2.4). Berikut ini contoh lempengan laminasi inti, lempengan inti yang telah disatukan, belitan stator yang telah dilekatkan pada cangkang luar untuk generator asinkron tiga fasa. Gambar 2.4 menunjukkan konstruksi stator tiga fasa.



Gambar 2.4 Konstruksi Stator Tiga Fasa

Keterangan:

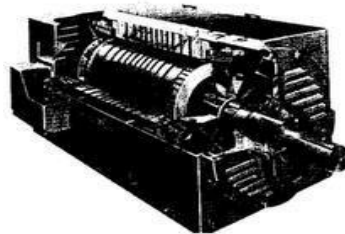
- a). Lempengan inti.
- b). Tumpukan inti dengan kertas isolasi pada beberapa alurnya.
- c). Tumpukan inti dan kummparan dalam cangkang stator

2. Rotor

Rotor generator asinkron tiga fasa dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu rotor sangkar (squirrel cage rotor) dan rotor belitan (wound rotor). Rotor sangkar terdiri dari susunan batang konduktor yang dibentangkan ke dalam slot – slot yang

³ <https://artikel-teknologi.com/macam-macam-generator-ac/4/>

terdapat pada permukaan rotor dan tiap – tiap ujungnya dihubungkan singkat dengan menggunakan shorting rings.



Gambar 2.5 Rotor Generator Asinkron

Sementara itu pada rotor belitan, rotornya dibentuk dari satu set belitan tiga fasa yang merupakan bayangan dari belitan statornya. Biasanya belitan tiga fasa dari rotor ini terhubung Y (bintang) dan kemudian tiap – tiap ujung dari tiga kawat rotor tersebut diikatkan pada slip ring yang berada pada poros rotor. Pada generator asinkron rotor belitan, rangkaian rotornya dirancang untuk dapat sisipkan dengan tahanan eksternal, yang mana hal ini akan memberikan keuntungan dalam modifikasi karakteristik torsi – kecepatan dari generator.⁵

2.2.2 Prinsip kerja generator asinkron

Prinsip kerja generator asinkron adalah kebalikan dari pada saat mesin induksi bekerja sebagai motor. Ketika mesin berfungsi sebagai motor, kumparan stator diberi tegangan tiga fasa sehingga akan timbul medan putar dengan kecepatan sinkron (n_s). Namun jika motor berfungsi sebagai generator, pada rotor motor diputar oleh sumber penggerak dengan kecepatan lebih besar dari pada kecepatan sinkronya. Bila suatu konduktor yang berputar didalam medan magnet (kumparan stator) akan membangkitkan tegangan, yaitu :

⁴ Andriani P. Pengaturan Tegangan dan Frekuensi. 2014 Hlm 16-29c



$$\varepsilon = B.L.v.....(2.1)$$

Dimana :

ε = tegangan induksi yang dihasilkan (v)

B = fluks magnetik (T)

L = panjang konduktor yang dilewati medan magnet (m)

v = kecepatan medan magnet melewati konduktor (m/s)

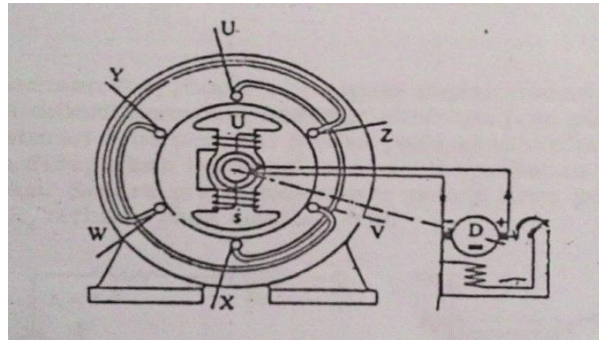
Dan bila dihubungkan ke beban akan mengalirkan arus. Arus pada rotor ini akan berinteraksi dengan medan magnet pada kumparan stator sehingga timbul arus pada kumparan stator sebagai reaksi atas gaya mekanik yang diberikan. Pada proses perubahan motor induksi menjadi generator induksi / asinkron dibutuhkan daya reaktif atau daya magnetisasi untuk membangkitkan tegangan pada terminal keluarannya. Dalam hal ini yang berfungsi sebagai penyearah daya reaktif adalah kapasitor yang besarnya disesuaikan dengan daya reaktif yang diperlukan.

2.3 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 konstruksi generator dapat dilihat pada gambar 2.6 :



Gambar 2.6 Konstruksi Generator Sinkron

Keterangan:

U – X = Fasa R

V – Y = Fasa S

W – Z = Fasa T

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

$$E_a = 4,44.f.M.\phi.kd.....(2.2)$$

Sehingga persamaan 2.2 dapat juga ditulis:

$$E_a = 4,44.f.\frac{Z}{2}.\phi.Kd.....(2.3)$$

Dimana :

E_a = Gaya gerak listrik armature per phase (volt)

f = Frekuensi output generator (Hz)

Φ = Fluks magnet per kutub per phase (Wb)

M = Jumlah kumparan per phase

Z = Jumlah konduktor seluruh slot per phase

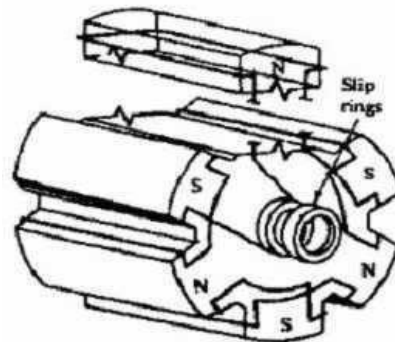
K_d = Faktor distribusi.

2.3.1 Konstruksi generator sinkron

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.

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. 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 2.7 menunjukkan bentuk rotor kutub sepatu.



Gambar 2.7 Bentuk Rotor Kutub Sepatu

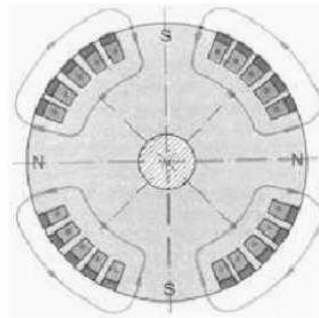
Keterangan:

1. N = Kutub medan magnet utara
2. S = Kutub medan magnet selatan

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

⁵ J.Champman Stephen. *Electrical machinery and power system fundamentals*. 2002 Hlm 194

atau lebih kutub. Pemilihan konstruksi rotor tergantung dari kecepatan putar primer mover, frekuensi dan rating daya generator. Generator dengan kecepatan 1500rpm ke atas pada frekuensi 50 Hz dan rating daya sekitar 10MVA menggunakan rotor silinder. Sementara untuk daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka digunakan rotor kutub sepatu. Gambar 2.8 menunjukkan bentuk rotor silinder.



Gambar 2.8 Bentuk Rotor Silinder

2. Stator

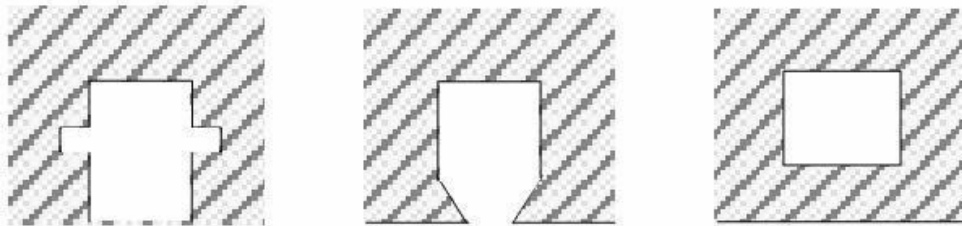
Stator atau armatur adalah bagian generator yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus AC yang menuju ke beban disalurkan melalui armatur, komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak. Armatur selalu diam (tidak bergerak).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

⁶ Zhanggischan. Prinsip Dasar Elektroteknik. 2004 Hlm 680

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 (I^2R)⁸ Stator adalah bagian diam yang mengeluarkan tegangan bolak-balik pada generator sinkron yang terdiri dari : rangka stator, inti stator dan alur dan gigi stator, serta kumparan stator.

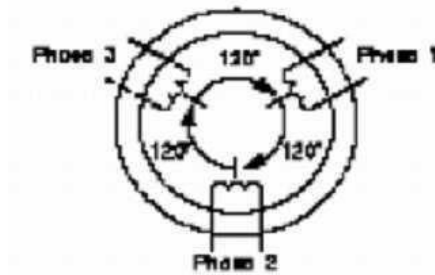
Rangka stator merupakan rumah (kerangka) yang menyangga inti jangkar generator. Inti stator terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetik khusus yang terpasang ke rangka stator. Alur (slot) dan gigi stator merupakan tempat meletakkan kumparan stator. Ada tiga bentuk alur stator yaitu : terbuka, setengah terbuka dan tertutup. Ketiga bentuk alur tersebut tampak seperti pada gambar 2.9 Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi.



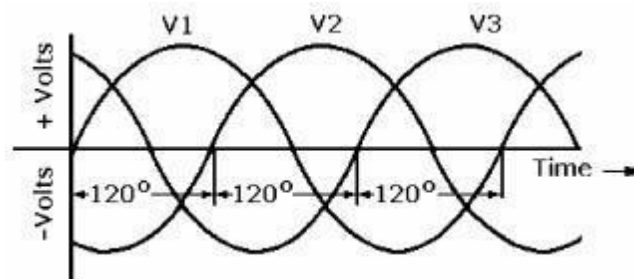
Gambar 2.9 Bentuk-Bentuk Alur

2.3.2 Prinsip kerja generator sinkron

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. 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 tiga lilitan yang sama dan tiga tegangan outputnya berbeda fasa 120^0 pada masing-masing fasa.



Gambar 2.10 Skema Kumparan Tiga Fasa



Gambar 2.11 Grafik Tegangan Generator Tiga Fasa

2.4 Jumlah Kutub

Generator sinkron memiliki jumlah rotor yang berbeda kutub di atasnya yang belitan sedang digulung. Jumlah tiang tergantung pada kecepatan rotasi dan frekuensi tegangan induksi yang kita ingin menghasilkan.

Hubungan antara jumlah kutub dan frekuensi di medan induksi di rumuskan dengan :

$$f = \frac{Pn}{120} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana :

f = frekuensi tegangan (Hz)

p = jumlah kutub pada rotor

n = kecepatan rotor (rpm)

2.5 Pembebanan Generator

Pembebanan generator ada dua, yaitu generator tanpa beban dan generator berbeban.

2.5.1 Generator tanpa beban

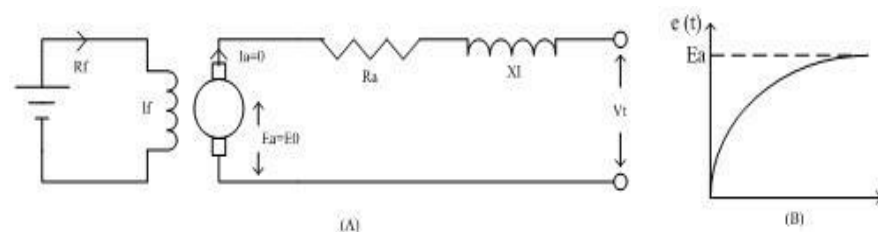
Pada generator sinkron keadaan jalan tanpa beban mengandung arti bahwa arus armature (I_a) = 0. Dengan demikian besar tegangan terminal adalah:

$$V_t = E_a = E_0 \dots \dots \dots (2.5)$$

Oleh karena besar ggl armature adalah merupakan fungsi dari fluks magnet (persamaan 2.1) maka ggl armature dapat juga ditulis :

$$E_a = f(\phi) \dots \dots \dots (2.6)$$

Dari persamaan (2.5), 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 2.12.



Gambar 2.12 Generator Sinkron Tanpa Beban

Dimana :

- I_f = Arus kumparan medan/ arus penguat (Ampere)
- R_f = Hambatan kumparan medan (ohm)
- R_a = Hambatan armature (ohm)
- X_L = Reaktansi bocor (reaktansi armature)
- V_t = Tegangan output (Volt)
- E_a = Gaya gerak listrik armature (Volt)



2.5.2 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 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 :

$$X_s = X_l + X_m \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana :

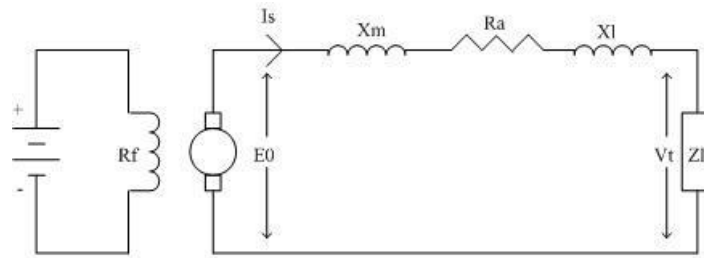
X_s = Reaktansi Sinkron (Ohm)

X_l = Reaktansi Bocor (Ohm)

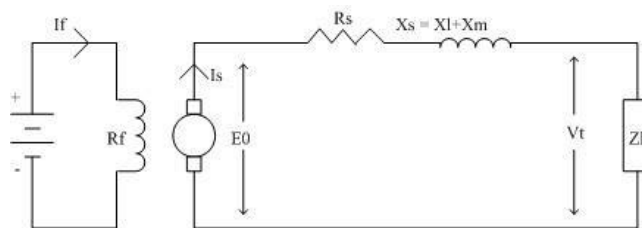
X_m = Reaktansi Pemagnet (Ohm)

Dengan demikian, bagan rangkaia listrik dari generator sinkron bebean adalah:

⁷ Prabha kundur. *Power System Stability and Control*. 1993 Hlm 47



Gambar 2.13 Rangkaian Listrik Generator Terbebani



Gambar 2.14 Rangkaian Generator Berbeban

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 $(V_t)_{bp}$. GGL *armature* tanpa beban (E_0) besarnya adalah :

$$E_0 = V_t + I_a (R_a + jX_s) \dots \dots \dots (2.8)$$

atau

$$E_0 = V_t + I_a + Z_s \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana :

- V_t = Tegangan terminal (Volt)
- I_a = Arus Jangkar (Ampere)
- R_a = Hambatan *armature* (Ohm)
- E_0 = GGL *armature* tanpa beban (Volt)
- X_s = Reaktansi sinkron (Ohm)

2.6 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 :

$$P_{in} = P_{out} + P_{rugi-rugi} \dots \dots \dots (2.10)$$

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 (Watt)

Tabel 2.1 Jenis Rugi - Rugi Generator

| No | Jenis Rugi-rugi | Persentase rugi-rugi total (%) |
|----|--|--------------------------------|
| 1 | Rugi-rugi tetap atau rugi-rugi inti | 25 |
| 2 | Rugi-rugi variabel: rugi-rugi pada stator | 34 |
| 3 | Rugi-rugi variabel: rugi-rugi pada rotor | 21 |
| 4 | Rugi-rugi gesekan | 15 |
| 5 | Rugi-rugi beban menyimpang (<i>stray load</i>) | 5 |

⁸ Trevor Linsley. *Instalasi Listrik Tingkat Lanjut*. 2004 Hlm 280



2.6.1 Rugi-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. Rugi- rugi arus *eddy* tergantung pada kuadrat dari kerapatan *fluks* dan frekuensi. Pada keadaan mesin normal besarnya dapat didekati dengan :

$$P_c = K_c(B_{maks}fT)^2 \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

P_c = Rugi –rugi arus *eddy* (Watt)

B_{maks} = Kerapatan *fluks* maksimum (Weber)

f = Frekuensi (Hz)

K_c = Ketetapan pembanding

T = Tebal lapisan

Harga K_c tergantung pada satuan yang digunakan, volume besi dan resistensivitas besi. Ragam dari rugi – rugi histerisis dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan secara empiris saja. Persamaan yang banyak dipergunakan adalah :

$$P_h = K_h.f.B_{maks} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :

P_h =Rugi histeris (Watt)

K_h = Konstanta histeris

B_{max} = Kerapatan fluks maksimum (Weber)

f = Frekuensi (Hz)



Pada mesin induksi, rugi-rugi intinya terdapat di stator dan rotor hampir boleh diabaikan karena frekuensi di rotor relatif kecil. Jadi total rugi rugi inti adalah sebagai berikut :

$$P_i = P_h + P_i \dots \dots \dots (2.13)$$

Atau

$$P_i = P_{rugi-rugi} \times 0,25 \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana :

P_i = Rugi-rugi inti (Watt)

P_h = Rugi-rugi histeris (Watt)

2.6.2 Rugi-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.

$$P_b = P_{rugi-rugi} \times 0,55 \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana :

P_b = Rugi-rugi belitan (Watt)

$P_{rugi-rugi}$ = Rugi-rugi daya (Watt)

2.6.3 Rugi-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 adalah 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.

$$P_m = P_{\text{rugi-rugi}} \times 0,15 \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana :

$$P_m = \text{Rugi-rugi mekanik (Watt)}$$

$$P_{\text{rugi-rugi}} = \text{Rugi-rugi daya (Watt)}$$

2.6.4 Rugi-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 pertambahan 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%.



$$P_s = P_{\text{rugi-rugi}} \times 0,05 \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana :

P_s = Rugi-rugi stray load (Watt)

$P_{\text{rugi-rugi}}$ = Rugi-rugi daya (Watt)

Tabel 2.2 Persentase Rugi – Rugi *Stray Load*

| No | <i>Machine Rating KW</i> | <i>Stray Load Loss Percent of Rated Load</i> |
|----|--------------------------|--|
| 1 | 1 - 90 | 1.8% |
| 2 | 91 – 375 | 1.5% |
| 3 | 376 – 1850 | 1.2% |
| 4 | 1851 <i>and greater</i> | 0.9% |

2.7 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, disebut faktor daya sirkuit, Untuk voltage sinusoidal dan gelombang saat ini, dengan diperlihatkan persamaan. Maka, di sirkuit yang bentuk gelombang mengikuti hukum sinus, faktor daya adalah cosines dan sudut antara tegangan dan arus yang dihasilkan mengalir dalam sirkuit. Faktor daya di sebut tertinggal ketika arus terlambat terhadap tegangan yang diberikan dan memimpin saat arus mengarah tegangan. Dengan demikian, untuk pertimbangan faktor daya, tegangan yang diberikan selalu dianggap sebagai kualitas referensi. Faktor daya untuk rangkaian induktif selalu tertinggal padahal selalu memimpin untuk sirkuit kapasitif.



$$PF = \cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{\text{Resistansi}}{\text{Impedansi}} \dots\dots\dots(2.18)$$

Dimana :

- Cos φ = Faktor daya
- R = Resistansi (Ohm)
- Z = Impedansi (Ohm)

2.8 Arus Stator

Rugi-rugi belitan akhir dan belitan terselubung maksimum per satuan volume didapatkan besaran rugi-rugi maksimum tembaga :

$$I_s = \frac{\sqrt{P_{cu,s}}}{3 \cdot R_s} \dots\dots\dots(2.19)$$

Dimana :

- $P_{cu,s}$ = Rugi-rugi tembaga stator (Watt)
- I_s = Arus stator maksimum (Ampere)
- R_s = Resistansi belitan stator (Ohm)

2.9 Arus Rotor

Oleh karena pemanasan rotor sama dengan pemanasan stator maka persamaan pembatasnya pun mempunyai bentuk yang sama yaitu :

$$I_r = \frac{\sqrt{P_{cu,r}}}{R_s} \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana :

- $P_{cu,r}$ = Rugi-rugi belitan maksimum belitan rotor (Watt)
- I_r = Arus rotor maksimum (Ampere)
- R_r = Resistansi belitan rotor (Ohm)

2.10 Efisiensi Generator

Pada umumnya yang disebut dengan 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

$$\tilde{\eta} (\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana :

$\tilde{\eta}$ = Efisiensi generator (%)

P_{out} = Daya keluaran genrator (Watt)

P_{in} = Daya yang dibangkitkan generator (Watt)

Dari persamaan diatas, perlu dipelajari faktor – faktor yang menyebabkan efesiensi 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 :
 - a. Rugi mekanis akibat putaran.
 - b. Rugi inti besi akibat kecepatan putaran dan *Fluks* medan.

2.11 Beban Listrik

Dalam suatu rangkaian listrik selalu dijumpai suatu sumber dan beban. Bila sumber listrik DC, maka sifat beban hanya bersifat resistif murni, karena Frukunsi 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 akan open circuit. Jadi sumber DC akan mengakibatkan beban – beban induktif dan beban kapasitif tidak akan berpengaruh pada rangkaian.

⁹ A.E. Fitzgerald. Mesin – Mesin Listrik. 1990 (pers. 2.28 s/d 2.29) Hlm 56

Bila sumber listrik maka beban dibedakan menjadi 3 sebagai berikut :

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

2.11.1 Beban resistif

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 :

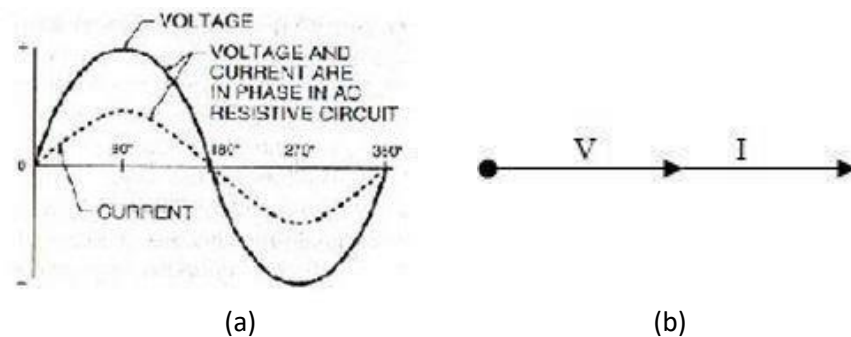
$$P=V.I.....(2.22)$$

Dimana :

P = daya aktif yang diserap beban (Watt)

V = tegangan yang mencatu beban (Volt)

I = arus yang mengalir pada beban (Ampere)



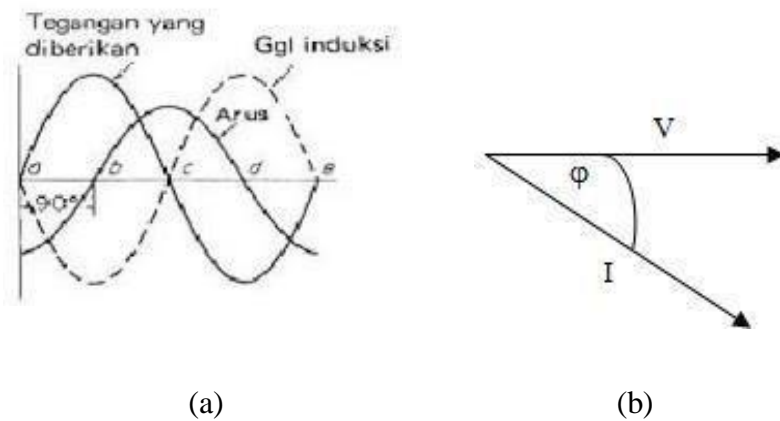
Gambar 2.15 (a) Gelombang Beban Resistif AC

(b) Vektor Arus dan Tegangan Beban Resistif

2.11.2 Beban induktif

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 2.16 menunjukkan

grafik arus dan tegangan pada beban induktif.



Gambar 2.16 (a) Gelombang arus, tegangan dan GGL induksi pada beban induktif

(b) Vektor arus dan tegangan pada beban induktif

Untuk menghitung besarnya reaktansi induktif (X_L), dapat digunakan rumus :

$$X_L = 2\pi fL \dots\dots\dots(2.23)$$

Dimana :

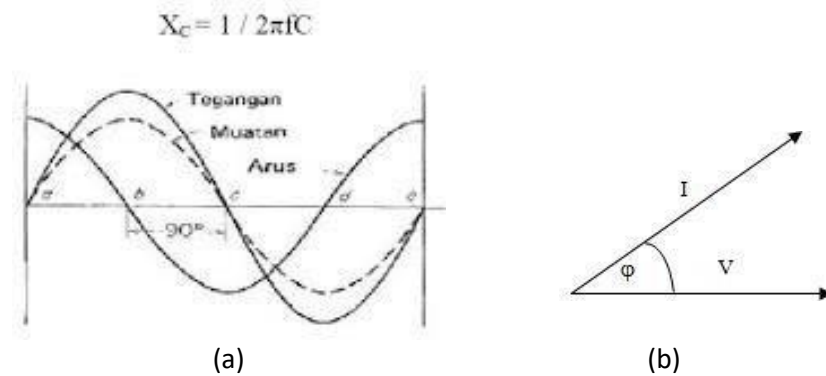
X_L = reaktansi induktif (Ohm)

f = frekuensi (Hz)

L = induktansi (Henry)

2.11.3 Beban kapasitif

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 2.17 menunjukkan grafik arus dan tegangan pada beban kapasitif.



Gambar 2.17 (a) Gelombang Arus, tegangan dan GGL induksi pada beban kapasitif

(b) Vektor arus dan tegangan pada beban Kapasitif

Untuk menghitung besarnya reaktansi kapasitif (X_C), dapat digunakan rumus :

Dimana :

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \dots\dots\dots(2.24)$$

Dimana :

X_C = reaktansi kapasitif (Ohm)

f = frekuensi (Hz)

C = kapasitansi (Farad)

¹⁰ Yon Rijono. Dasar Teknik Tenaga Listrik. 2002 Hlm 211-244

¹¹ <http://artikel-teknologi.com/pengertian-beban-resistif-induktif-dan-kapasitif-pada-jaringan-listrik-ac/>