



## **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 terdiri dari berbagai macam sumber, antara lain adalah uap, air, gas, mesin diesel dan lain-lain. Kegunaan dari generator adalah sebagai sumber tenaga listrik untuk keperluan alat pemakaian atau beban seperti pompa air, pompa minyak, penerangan dan lain–lain.

#### **2.2 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

### **2.3 Generator Sinkron**

Generator sinkron adalah mesin pembangkit listrik yang mengubah energi mekanik sebagai input menjadi energi listrik sebagai energi output. Tegangan output dari generator sinkron adalah tegangan bolak – balik, karena itu generator sinkron disebut juga generator AC.

Menurut *Anderson P.M* (1982), generator sinkron dapat menghasilkan sumber energi, yaitu : tegangan bolak-balik, oleh karena itu generator sinkron disebut juga generator AC. 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.

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. Fluks putar ini akan memotong kumparan stator, sehingga pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik karena berpengaruh induksi dari fluks putar tersebut. Gaya gerak listrik (ggl) yang timbul pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik, atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor.



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

$$E_a = 4,44 \cdot f \cdot \frac{Z}{2} \cdot \Phi \cdot K_d \dots\dots\dots (2.1)^1$$

Keterangan :

$E_a$  = Gaya gerak listrik armature per-phase (Volt)

$f$  = Frekuensi output generator (Hz)

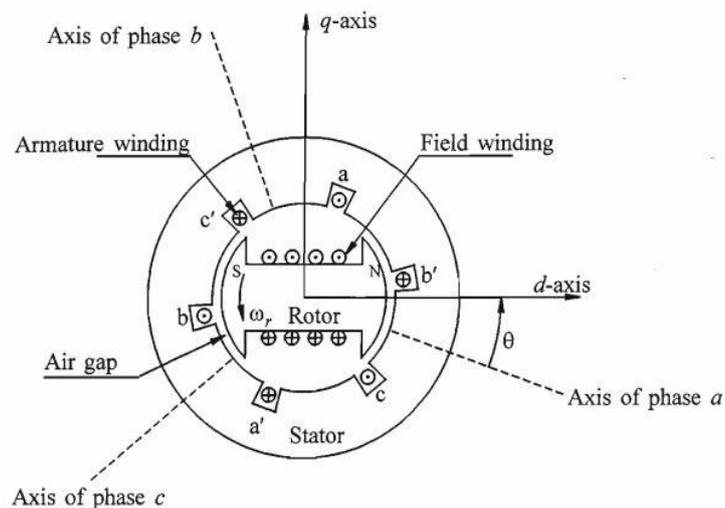
$M$  = Jumlah kumparan per phase

$$= Z/2$$

$Z$  = Jumlah konduktor seluruh slot per-fasa

$K_d$  = Faktor distribusi. \_

$\Phi$  = Fluks magnet perkutub per-fasa



Gambar 2.1 Skema diagram generator sinkron tiga fasa<sup>2</sup>

(Data: Kundur Prabha, 1993)

Gambar 2.1 menunjukkan bahwa pada generator sinkron, kumparan jangkar disebut juga kumparan stator karena berada pada tempat yang tetap, sedangkan kumparan rotor bersama-sama dengan kutub magnet diputar oleh tenaga mekanik.

<sup>1</sup> Hlm 211. Yon Riyono. Dasar Teknik Tenaga Listrik. <sup>1</sup> 2002

<sup>2</sup> Hlm 46. Kundur Prabha . Power System Stability and Control. 1993

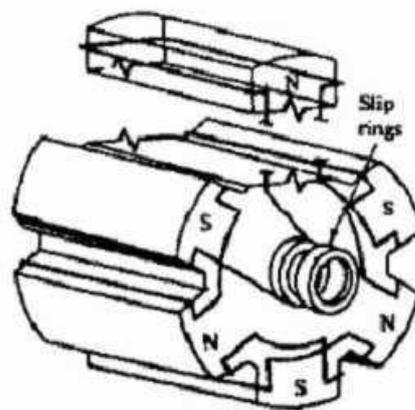


## 2.4 Konstruksi Generator Sinkron

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.

### 2.4.1 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 2.2 menunjukkan bentuk rotor kutub sepatu.



Gambar 2.2 Bentuk rotor kutub sepatu (*salient*)<sup>3</sup>

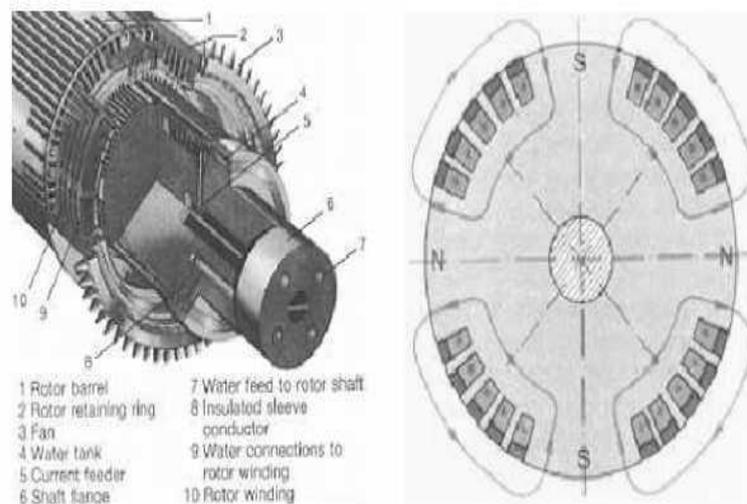
(Data : J.Chapman Stephen,2002)

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

<sup>3</sup> Hlm 194. J.Chapman Stephen. Electric Machinery and Power System Fundamentals. 2002



rpm 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 2.3 menunjukkan bentuk rotor silinder.



Gambar 2.3 Bentuk Rotor Silinder

#### 2.4.2 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, 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 :

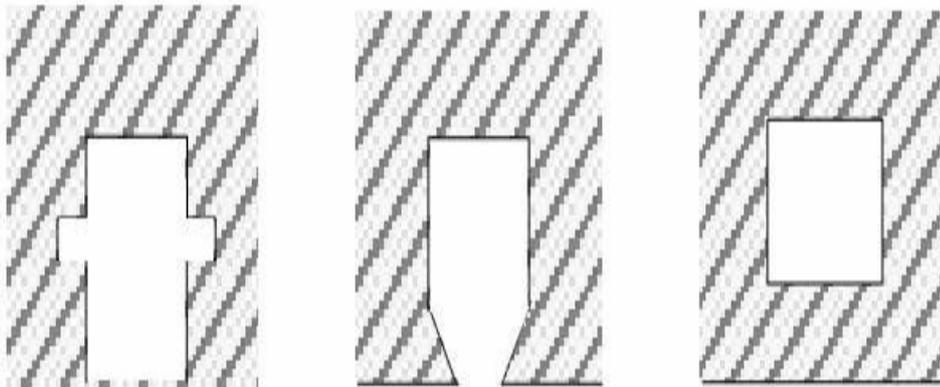
1. Meningkatkan daya output.
2. Menghindari tegangan harmonik, sehingga tegangan line tetap sinusoidal dalam kondisi beban apapun.



Dalam lilitan wye tegangan harmonik ketiga fasa saling meniadakan, sedangkan dalam lilitan delta tegangan harmonik ditambahkan.

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 2.4. Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi.



Gambar 2.4 Bentuk-bentuk alur<sup>4</sup>

## 2.5 Prinsip Kerja Generator

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

<sup>4</sup> [http://www.4shared.com/photo/qETzGi69/bentuk\\_alur\\_stator\\_generator\\_s.html](http://www.4shared.com/photo/qETzGi69/bentuk_alur_stator_generator_s.html)

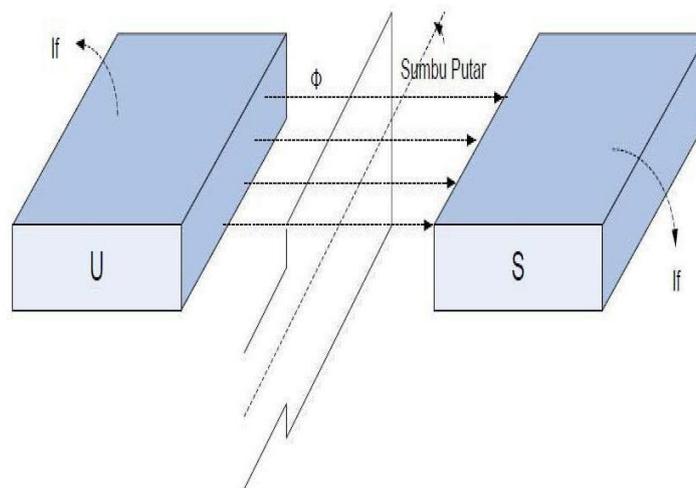


memiliki tiga lilitan yang sama dan tiga tegangan outputnya berbeda fasa  $120^0$  pada masing-masing fasa. (Kundur Prabha, 1993).

Jika pada sekeliling penghantar terjadi perubahan medan magnet, maka pada penghantar tersebut akan dibangkitkan suatu gaya gerak listrik (GGL) yang sifatnya menentang perubahan medan tersebut. Untuk dapat terjadinya gaya gerak listrik (GGL) tersebut diperlukan dua kategori masukan, yaitu:

1. Masukan tenaga mekanis yang akan dihasilkan oleh penggerak mula (*prime mover*).
2. Arus masukan ( $I_f$ ) yang berupa arus searah yang akan menghasilkan medan magnet yang dapat diatur dengan mudah.

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



Gambar 2.5 Sistem Pembangkitan Generator Sinkron

Dimana :

- |             |                   |
|-------------|-------------------|
| $I_f$       | : Arus medan      |
| U – S       | : Kutub generator |
| Sumbu Putar | : Poros Generator |
| $\Phi$      | : Fluks medan     |



Apabila rotor generator diputar pada kecepatan nominalnya, dimana putaran tersebut diperoleh dari putaran penggerak mulanya (*prime mover*), kemudian pada kumparan medan rotor diberikan arus medan sebesar  $I_f$ , maka garis-garis fluksi yang dihasilkan melalui kutub-kutub inti akan menghasilkan tegangan induksi pada kumparan jangkar stator sebesar:

$$E_a = C \cdot n \cdot \Phi \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

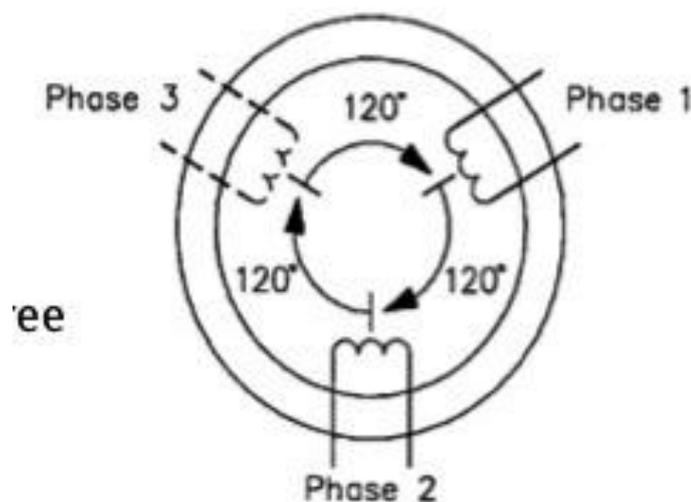
$E_a$  : Tegangan induksi yang dibangkitkan pada jangkar generator

$C$  : Konstanta

$n$ : Kecepatan putar

$\Phi$ : Fluksi yang dihasilkan oleh arus penguat (arus medan)

Gambar 2.6 apabila generator digunakan untuk melayani beban, pada kumparan jangkar generator akan mengalir arus. Untuk generator 3 fasa, setiap belitan jangkar akan memiliki beda fasa sebesar  $120^\circ$ .



Gambar 2.6 Skema kumparan tiga fasa<sup>5</sup>

<sup>5</sup> [http://dc166.4shared.com/img/oFZWDSwf/preview\\_html\\_m1a8cc013.jpg](http://dc166.4shared.com/img/oFZWDSwf/preview_html_m1a8cc013.jpg)



## 2.6 Jumlah Kutub

Dalam suatu generator hubungan tertentu antara kecepatan dan putaran (**N**) dari rotor, frekuensi (**f**) dari *EMF* / *GGL* yang dibangkitkan dan jumlah kutub-kutub (**P**). Hubungan tersebut adalah :

$$f = \frac{P \cdot n}{120} \dots\dots\dots (2.3)^6$$

Dimana :

- $f$  = Frekuensi (Hz)
- $P$  = jumlah kutub pada generator
- $N$  = putaran rotor generator (rpm)

## 2.7 Karakteristik Generator Sinkron

Karakteristik generator sinkron ada dua, yaitu generator tanpa beban dan generator berbeban.

### 2.7.1 Generator Sinkron Tanpa Beban

Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai alternator dengan diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan ( $I_f$ ), maka pada kumparan jangkar stator akan diinduksikan tegangan tanpa beban ( $E_o$ ), pada generator sinkron tanpa beban mengandung arti bahwa arus armature ( $I_a$ ) = 0 .

Dengan demikian besar tegangan adalah :

$$V_t = E_a = E_o \dots\dots\dots (2.4)^7$$

Oleh karena besar ggl armature adalah merupakan fungsi dari flux magnet (lihat persamaan 2.1), maka ggl armatur juga ditulis :

$$E_a = f(\Phi) \dots\dots\dots (2.5)^8$$

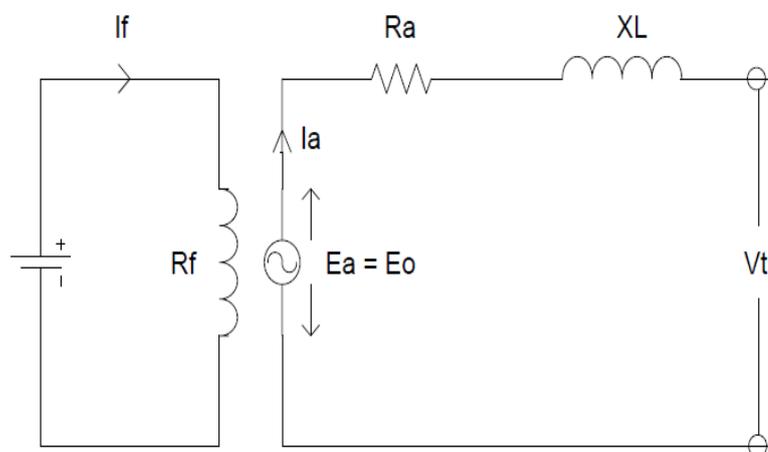
<sup>6</sup> Prabha kundur, op.cit, Hlm 47

<sup>7</sup> Yon Rijono, op.cit, Hlm 211

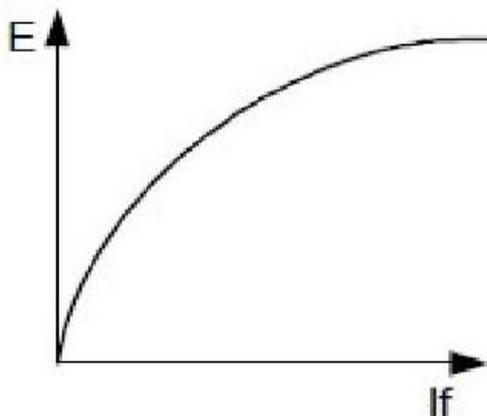
<sup>8</sup> Yon Rijono, op.cit, Hlm 212



Dari persamaan 2.5, jika arus penguat medan diatur besarnya maka akan diikuti kenaikan flux dan akhirnya juga pada ggl armatur. Pengaturan arus penguat medan pada keadaan tertentu besarnya, akan didapatkan besar ggl armatur tanpa beban dalam keadaan saturasi. Secara grafik hubungan antara arus penguat medan ( $I_f$ ) dan  $E_a$  terlukis pada gambar 2.7 :



Gambar 2.7. a. Rangkaian Listrik Generator Sinkron Tanpa Beban<sup>9</sup>



Gambar 2.7.b. Kurva Karakteristik Generator Sinkron Tanpa Beban<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Yon Rijono, op.cit,Hlm 212

<sup>10</sup> Yon Rijono, op.cit,Hlm. 212



Keterangan :

$I_f$  = Arus kumparan medan atau arus penguat

$R_f$  = Hambatan kumparan medan

$R_a$  = Hambatan armatur

$X_L$  = Reaktansi bocor ( reaktansi armatur)

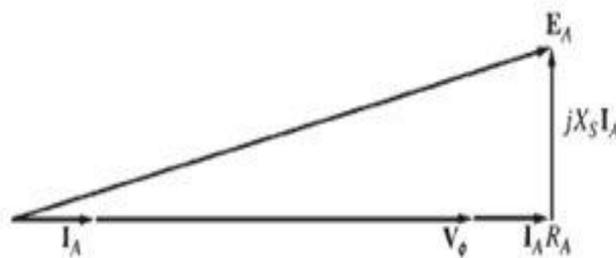
$V_t$  = Tegangan output

$E_a$  = Gaya gerak listrik armatur

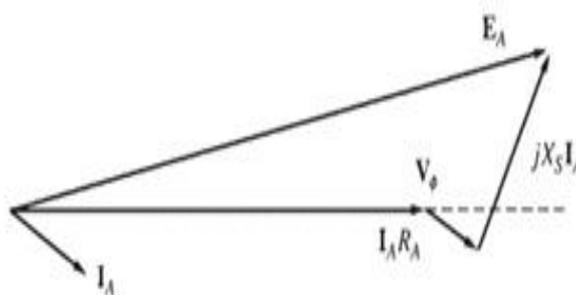
### 2.7.2 Generator Sinkron Berbeban

Tiga macam sifat beban generator, yaitu : beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Akibat pembeban ini akan berpengaruh terhadap tegangan beban dan faktor dayanya. Jika beban generator bersifat resistif mengakibatkan penurunan tegangan relatif kecil dengan faktor daya sama dengan satu. Jika beban generator bersifat induktif terjadi penurunan tegangan yang cukup besar dengan faktor daya terbelakang (*lagging*). Sebaliknya, Jika beban generator bersifat kapasitif akan terjadi kenaikan tegangan yang cukup besar dengan faktor daya mendahului (*leading*).

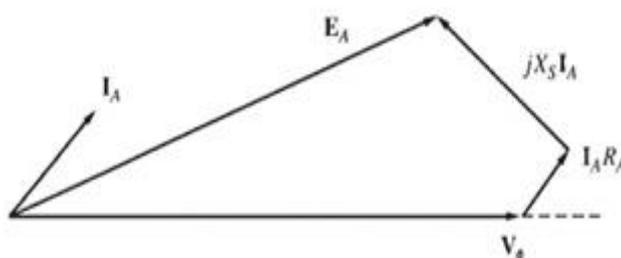
Gambar 2.8 Diagram fasor pembebanan generator sinkton adalah sebagai berikut :



Gambar 2.8.a. Faktor daya



Gambar 2.8.b. Faktor daya *lagging*



Gambar 2.8.c. Faktor daya *leading*

Gambar 2.7 diagram fasor : (a). Faktor daya satu, (b) faktor daya *lagging*,  
(c) faktor daya *leading*

Pada gambar 2.7 .a. dengan faktor daya = 1, maka di dapatkan persamaan :

$$E_A^2 = (V_\phi + I_A \cdot R_A)^2 + (I_A \cdot X_S)^2 \dots\dots\dots (2.6)$$

Faktor daya *lagging* didapatkan persamaan :

$$E_A^2 = (V_\phi \cdot \cos\theta + I_A \cdot R_A)^2 + (V_\phi \cdot \sin\theta + I_A \cdot X_S)^2 \dots\dots\dots (2.7)$$

Faktor daya *leading* didapatkan persamaan :

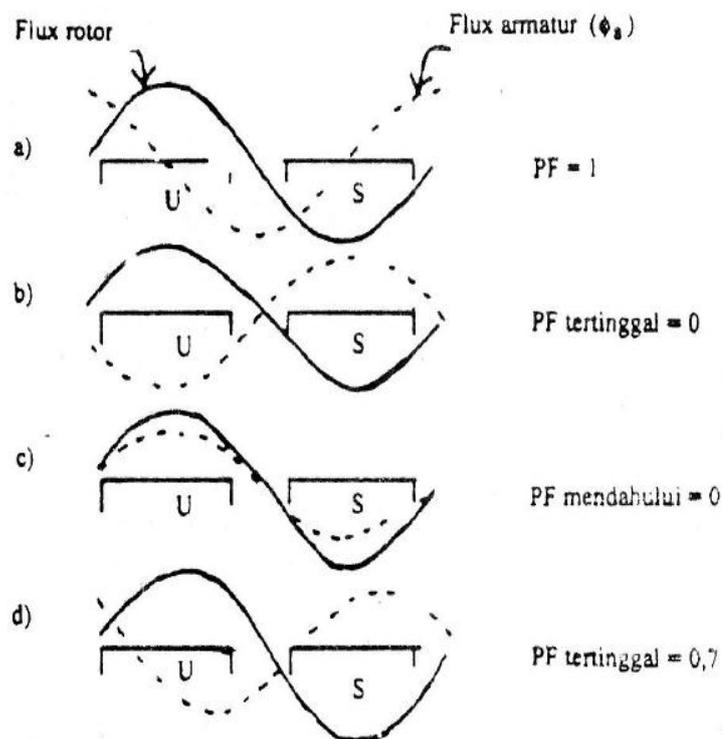
$$E_A^2 = (V_\phi \cdot \cos\theta + I_A \cdot R_A)^2 + (V_\phi \cdot \sin\theta - I_A \cdot X_S)^2 \dots\dots\dots (2.8)$$



Adapun besar impedansi sinkron  $Z_s$  adalah :

$$Z_s = \sqrt{Ra^2 + Xs^2} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan adanya beban yang terpasang pada output generator sinkron, maka segera mengalir arus armatur ( $I_a$ ). Dengan adanya arus armatur ini, pada kumparan jangkar timbul flux putaran jangkar ( $\Phi_a$ ). Flux putaran jangkar ini bersifat mengurangi atau menambah flux putaran yang dihasilkan oleh kumparan rotor ( $\Phi_f$ ). Hal ini bergantung pada faktor daya beban dapat dilihat pada gambar 2.9



Gambar 2.9 Pengaruh Faktor Daya Beban Terhadap Flux Rotor<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Hlm 44. Neil Sclater. Electrical Design Details. 2003



Keterangan :

1. Dari gambar 2.9 a

- Pada faktor daya beban (PF) = 1, berarti arus armatur sefase dengan tegangan beban.
- Pada keadaan ini flux putar jangkar (flux armatur) adalah mendahului  $90^0$  terhadap flux putaran utama (rotor)
- Interaksi dari kedua flux putar tersebut menghasilkan flux putar baru yang cacat (tidak sinus murni)
- Akibatnya tegangan keluaran generator juga tidak sinus murni. Kejadian ini harus dihindarkan.

2. Dari gambar 2.9 b

- Pada faktor daya beban tertinggi (PF=0), berarti arus armatur tertinggal  $90^0$  terhadap tegangan beban.
- Pada keadaan ini flux putar jangkar (flux armatur) berada sephase  $180^0$  (Posisi  $\Phi_a$  pada PF=1 digeser ke kiri/tertinggal  $90^0$  lagi, jadi  $(90^0 + 90^0)$  terhadap flux putar utama (rotor).
- Interaksi dari kedua flux putar tersebut menyebabkan terjadinya pengurangan besar flux rotor dan kejadian ini disebut demagnetisasi.
- Jika proses demagnetisasi terjadi, maka ggl armatur yang dihasilkan oleh generator akan berkurang.
- Untuk menjaga agar ggl armatur besarnya tetap, maka arus penguat medan ( $I_f$ ) harus dioerbesar.

3. Dari gambar 2.9.c

- Pada faktor daya beban mendahului (PF=0), berarti arus armatur mendahului  $90^0$  terhadap tegangan beban.
- Pada keadaan ini flux putar jangkar (flux armatur) akan sefase dengan flux putar rotor, (posisi  $\Phi_a$  pada PF=1 digeser ke kanan  $90^0$ ).
- Akibat interaksi dari flux ii dihasilkan flux baru yang bertambah besar



terhadap flux rotor. Proses ini disebut magnetisasi.

- Jika proses magnetisasi terjadi, maka ggl armatur yang ditimbulkan akan bertambah besar.
- Untuk menjaga agar ggl armatur besarnya tetap, maka arus penguat medan ( $I_f$ ) dikurangi.

4. Dari gambar 2.9.d

- Pada faktor daya beban menengah adalah beban fase antara arus armatur ( $I_a$ ) dan tegangan beban  $0$  sampai  $90^\circ$  mendahului atau tertinggal.
- Untuk beda fase  $0$  sampai  $90^\circ$ , arus armatur mendahului terhadap tegangan beban disebut mendahului (*leading*). Sedangkan untuk beda fase  $0$  sampai  $90^\circ$ , arus armatur tertinggal terhadap tegangan beban disebut faktor daya tertinggal (*lagging*).
- Pada faktor daya (PF) beban menengah mendahului, flux armatur yang timbul fasenya agak bergeser kekanan terhadap flux putar rotor. Sehingga dan bentuk sinyaln ggl armatur yang dihasilkan agak sedikit cacat.
- Proses kejadian tersebut dinamakan reaksi jangkar atau reaksis armatur.

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

$$E_0/\text{ph} = V_t + I_a (R_a + j X_a) \dots \dots \dots (2.10)^{12}$$

Atau :

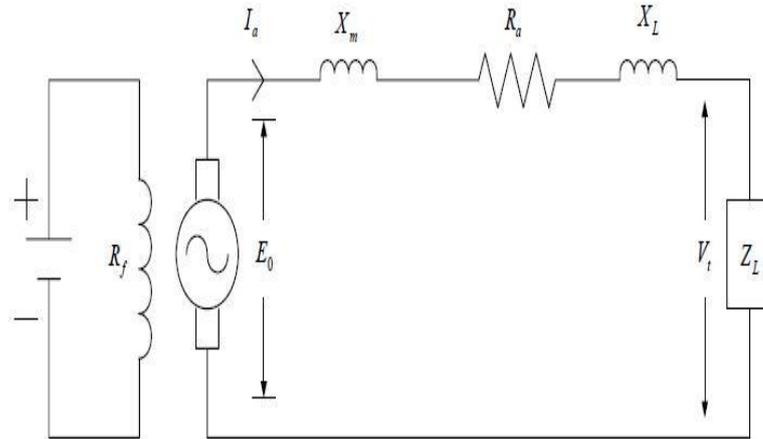
$$E_0/\text{ph} = V_t + I_a + Z_a \dots \dots \dots (2.11)^{13}$$

<sup>12</sup> Yon Rijono, op.cit,Hlm. 215

<sup>13</sup> Yon Rijono, op.cit,Hlm. 215



Rangkaian ekuivalen generator sinkron per fasa dapat dilihat pada gambar 2.10 berikut :



Gambar 2.10 Rangkaian Ekuivalen Generator Berbeban.<sup>14</sup>

### 2.7.3 Daya dan Torsi Generator sinkron

Generator sinkron adalah mesin sinkron yang bekerja dengan mengkonversikan daya mekanik ke daya listrik tiga fasa. Sumber daya mekanis ini disebut dengan penggerak mula yang mempunyai putaran konstan. Bila hal ini tidak dipenuhi dapat menyebabkan frekwensi yang dihasilkan generator tidak sesuai dengan yang diinginkan.

Secara teori, bahwa semua daya mekanis yang dihasilkan oleh penggerak mula oleh generator sinkron diubah menjadi daya elektrik. Perbedaan antara daya output dengan daya input mesin sinkron dinyatakan sebagai rugi – rugi mesin.

Rugi – rugi ini diperlihatkan pada gambar 2.9. daya input pada poros generator ( $P_{in}$ ) :

$$P_{in} = \tau_{app} \cdot \omega_m \dots\dots\dots (2.12)$$

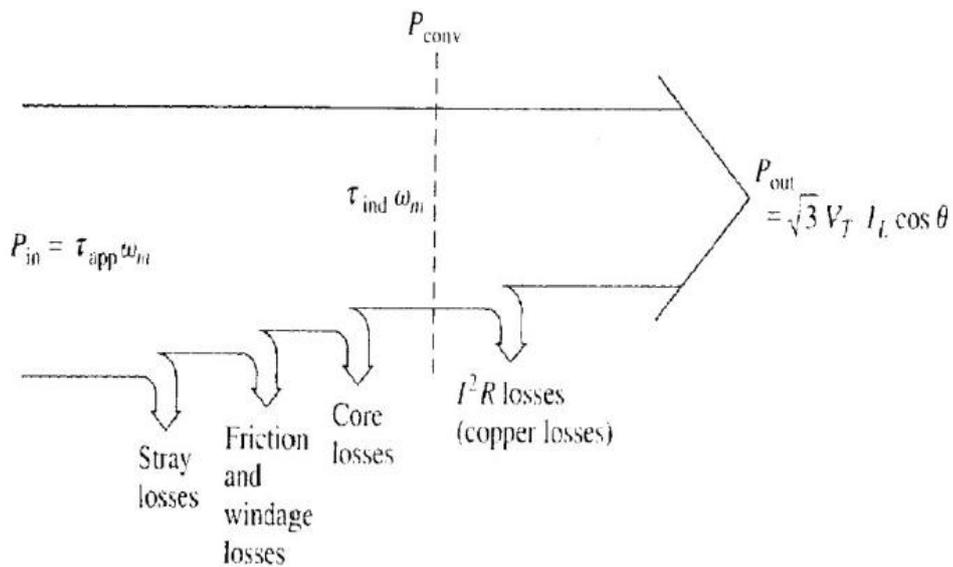
Dan daya yang dikonversikan dari mekanikal menjadi elektrik yang prosesnya terjadi dalam mesin :

$$P_{conv} = \tau_{ind} \cdot \omega_m \dots\dots\dots (2.13)$$

<sup>14</sup> Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3, Prih Sumardjati/2008

$$P_{conv} = 3 \cdot E_A \cdot I_A \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana  $\gamma$  adalah sudut antara  $E_A$  dengan  $I_A$ . perbedaan antara daya input ke generator dan daya yang dalam generator dinyatakan sebagai rugi – rugi inti dan rugi – rugi mekanis dan rugi – rugi inti dan rugi sasar (stray) pada generator. Gambar 2.11 menunjukkan diagram aliran daya sebuah generator sinkron. Daya input mekanis pada poros generator ( $P_{in}$ ) :



Gambar 2.11 diagram aliran daya generator sinkron<sup>15</sup>

Perbedaan antara daya input ke generator dan daya yang di ubah dalam generator merupakan inti, mekanik dan rugi – rugi daya dari mesin.

Daya nyata keluaran generator dalam line dinyatakan sebagai berikut :

$$P_{out} = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots (2.15)$$

Dan untuk daya nyata generator dalam fasa dinyatakan sebagai berikut :

$$P_{out} = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot V_\phi \cdot I_A \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots (2.16)$$

Daya reaktif keluaran generator dalam line dinyatakan sebagai berikut :

<sup>15</sup> Eduward allansyah, op.cit, Hlm. 39



$$Q_{out} = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L \cdot \sin\phi \dots\dots\dots (2.17)$$

Dan untuk daya reaktif generator dalam fasa dinyatakan sebagai berikut :

$$Q_{out} = 3 \cdot V_\phi \cdot I_A \cdot \sin\phi \dots\dots\dots (2.18)$$

## 2.8 Rugi – Rugi Generator Sinkron

Rugi – rugi total yang terjadi pada generator sinkron terdiri dari rugi – rugi tembaga, rugi besi dan rugi mekanik.

Rugi total = rugi variabel + rugi konstan

$$P_t = \text{rugi tembaga armatur} + P_c \dots\dots\dots (2.19)^{16}$$

### 2.8.1 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 75o 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 (  $P_{sr} = I_{sr}^2 \cdot R_{sr}$  ) 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.

<sup>16</sup> Yon Rijono, op.cit,Hlm. 143



### 2.8.2 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 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 :

$$P_h = \eta_h \cdot B_{\max}^{1.6} \cdot f \cdot v \text{ (watt)} \dots\dots\dots (2.20)^{17}$$

Dimana :

- $\eta_h$  = koefisien steinmetz histerisis. Perhatikan tabel 2.1 tentang nilai  $\eta_h$  dari bermacam – macam bahan baja .
- B = kerapatan flux ( $\text{Wb/m}^2$ )
- v = volume inti ( $\text{m}^3$ )
- f = frekuensi

---

<sup>17</sup> Yon Rijono, op.cit,Hlm. 143



Tabel 2.1 Nilai Koefisien Steinmentz Histerisis

Bahan	$\eta_h$ (joule / m <sup>3</sup> )
Sheet steel	502
Silicon steel	191
Hard Cast steel	7040
Cast steel	750 – 3000
Cast iron	2700 – 4000

### 2.8.3 Rugi Mekanik

Rugi mekanik terdiri dari :

- Rugi gesek yang terjadi pada pergesekan sikat dan sumbu. Rugi ini dapat diukur dengan menentukan masukan pada mesin yang bekerja pada kecepatan yang semestinya tetapi tidak diberi beban dan tidak diteral.
- 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.

## 2.9 Arus Stator

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

$$P_{cu,s} = 3I_s^2 \times R_s \dots\dots\dots(2.21)$$

$$I_s^2 = \frac{P_{cu,s}}{3.R_s} \dots\dots\dots(2.22)$$

$$I_s = \frac{\sqrt{P_{cu,s}}}{\sqrt{3.R_s}} \dots\dots\dots(2.23)$$



Dimana :

$P_{cu,s}$  = Rugi-rugi tembaga stator (watt)

$I_s$  = Arus stator maksimum (ampere)

$R_s$  = Resistansi belitan stator ( ohm )

### 2.10 Arus Rotor

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

$$P_{cu,r} = I^2_r \times R_r \dots\dots\dots(2.24)$$

$$I^2_r = \frac{P_{cu,r}}{R_r} \dots\dots\dots(2.25)$$

$$I_r = \frac{\sqrt{P_{cu,r}}}{R_s} \dots\dots\dots(2.26)$$

Dimana :

$P_{cu,r}$  = Rugi-rugi belitan maksimum belitan rotor (watt)

$I_r$  = Arus rotor maksimum (ampere)

$R_r$  = Resistansi belitan rotor ( ohm )

### 2.11 Pengertian Daya

Daya dalam tegangan AC pada setiap saat sama dengan perkalian dari harga arus tegangan pada saat itu. Jika arus dan tegangan bolak – balik satu fasa, maka daya dalam satu periode sama dengan perkalian dari arus dan tegangan efektif. Tetapi jika ada reaktansi dalam rangkaian arus dan tegangan tidak satu fasa sehingga selama siklusnya biasa terjadi arus negatif dan positif.

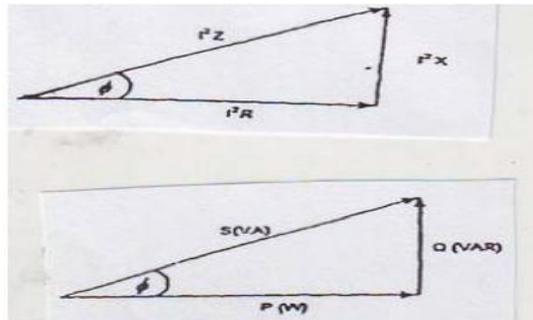
Secara teoritis daya terdiri dari tiga yaitu daya efektif, daya reaktif dan daya semu yang pengertiannya adalah sebagai berikut :

- Daya reaktif (P) adalah daya yang diubah menjadi energi, persatuan waktu atau dengan kata lain daya aktif adalah daya yang benar – benar terpakai yang dihasilkan oleh kompone resistif, satuannya adalah watt (W).



- b. Daya reaktif (Q) adalah daya yang ditimbulkan oleh kompone reaktansi, daya reaktif ditentukan dari reaktansi yang menimbulkannya, dapat berupa reaktansi induktif (XL) atau reaktansi kapasitif (XC), satuannya adalah volt ampere reaktif (VAR).
- c. Daya semu (S) salah jumlah secara vektoris daya aktif dan daya reaktif yang memiliki satuan volt ampere (VA)

Untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar 2.12 sistem segitiga daya berikut ini :



Gambar 2.12 Sistem Segi Tiga Daya

$$P = V.I. \cos \theta \dots\dots\dots (2.27)$$

$$S = V.I \dots\dots\dots (2.28)$$

$$Q = V.I \sin \theta \dots\dots\dots (2.29)$$

Daya memiliki hubungan usaha yaitu daya merupakan usaha yang dilakukan dalam satuan waktu atau dengan kata lain daya berbanding terbalik dengan waktu sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P = \frac{W}{T} \dots\dots\dots (2.30)$$

Dimana :

P = Daya (W)

W = Usaha (joule)

T = Waktu (s)



## 2.12 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.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.31)^{18}$$

Atau ;

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in} + P_{loss}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.32)$$

$$P_{loss} = I^2 \cdot R \dots\dots\dots (2.33)$$

Dimana :

$P_{out}$  = daya keluaran (watt)

$P_{in}$  = daya masukan

$\Sigma P_{loss}$  = untuk generator adalah

(  $I_f^2 \cdot R_f + I_a^2 \cdot R_a + I_L \cdot R_{sr} + \text{rugi gesek} + \text{rugi inti}$  )

$I_f^2 \cdot R_f$  = rugi kumparan medan

$I_a^2 \cdot R_a$  = rugi kumparan jangkar

$I_L^2 \cdot R_{sr}$  = rugi kumparan medan

Rugi gesek = rugi sikat + rugi angin + rugi sumbu

Rugi sikat =  $I_a \cdot V_{si}$

Rugi angin yaitu rugi-rugi karena adanya celah antara bagian rotor dan stator (  $\pm 1\%$  )

Rugi Sumbu = rugi-rugi yang timbul pada benda berputar

Rugi Inti = rugi histerisis + rugi arus pusar

<sup>18</sup> Hal 234 Wijaya Muchtar. Dasar – Dasar Mesin listrik, 2002



Pin (daya masukan) adalah jumlah dari masukan ac pada jangkar dan masukan dc pada medan. Sedangkan daya keluaran adalah daya masukan total dikurangi jumlah rugi-rugi total.

### 2.13 Faktor Daya

Daya adalah hasil dari 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 saat ini, dengan diperlihatkan persamaan:

$$PF = \frac{V \cdot I \cos \phi}{V \cdot I} \dots\dots\dots (2.34)^{19}$$

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 di anggap sebagai kualitas referensi.

$$Z = \frac{V}{I \cdot 3} \dots\dots\dots (2.35)$$

$$PF = \cos \phi = \frac{V_R}{V} = \frac{I_R}{I} \dots\dots\dots (2.36)$$

Atau,

$$R = Z \times 10 \% \dots\dots\dots (2.37)$$

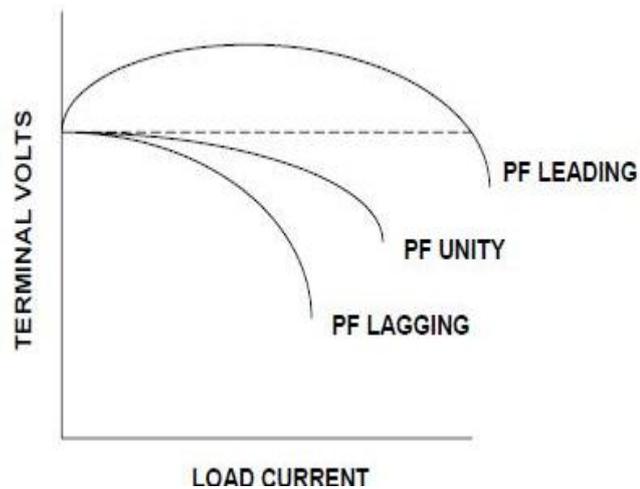
$$PF = \cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{\text{Resistansi}}{\text{Impedansi}} \dots\dots\dots (2.38)$$

<sup>19</sup> VN Mittle, Arvind, op.cit, Hlm 97



Faktor daya untuk rangkaian induktif selalu tertinggal padaha selalu memimpin untuk sicuit kapasitif.

Adapun karakteristik generator sinkron pada berbagai faktor daya, ditunjukkan pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Karakteristik Generator Pada Berbagai Faktor Daya<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3, Prih Sumardjati/2008