



## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mini Hidro (PLTMH)**

Pembangkit Listrik Tenaga Mini-hidro (PLTMH) adalah pembangkit listrik berskala kecil, yang memanfaatkan tenaga (aliran) air sebagai sumber penghasil energi. PLTMH termasuk sumber energi terbarukan dan layak disebut clean energy karena ramah lingkungan. Tenaga air berasal dari aliran sungai kecil atau danau yang dibendung dan kemudian dari ketinggian tertentu dan memiliki debit yang sesuai akan menggerakkan turbin yang dihubungkan dengan generator listrik. Semakin tinggi jatuhnya air maka semakin besar energi potensial air yang dapat diubah menjadi energi listrik.

Pembangkit tenaga air merupakan suatu bentuk perubahan tenaga dari tenaga air dengan ketinggian dan debit tertentu menjadi tenaga listrik, dengan menggunakan turbin air dan generator. Bentuk pembangkit tenaga mikro hidro bervariasi, tetapi prinsip kerjanya adalah sama, yaitu: “Perubahan tenaga potensial menjadi tenaga elektrik (listrik)”.

Perubahan memang tidak langsung, tetapi berturut-turut melalui perubahan sebagai berikut :

1. Tenaga potensial menjadi tenaga kinetik
2. Tenaga kinetik menjadi tenaga mekanik
3. Tenaga mekanik menjadi tenaga listrik

Tenaga potensial adalah tenaga air karena berada pada ketinggian. Energi kinetik adalah tenaga air karena mempunyai kecepatan. Tenaga mekanik adalah tenaga kecepatan air yang terus memutar kincir/turbin. Tenaga listrik adalah hasil dari generator yang berputar akibat berputarnya kincir/turbin.



Berdasarkan kapasitas keluarannya, Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

1. PLTA Mikro < 100 kW
2. PLTA Mini 100 - 999 kW
3. PLTA Kecil 1000 - 10000 kW.

Klasifikasi pembangkit listrik dapat ditentukan dari beberapa faktor yakni:

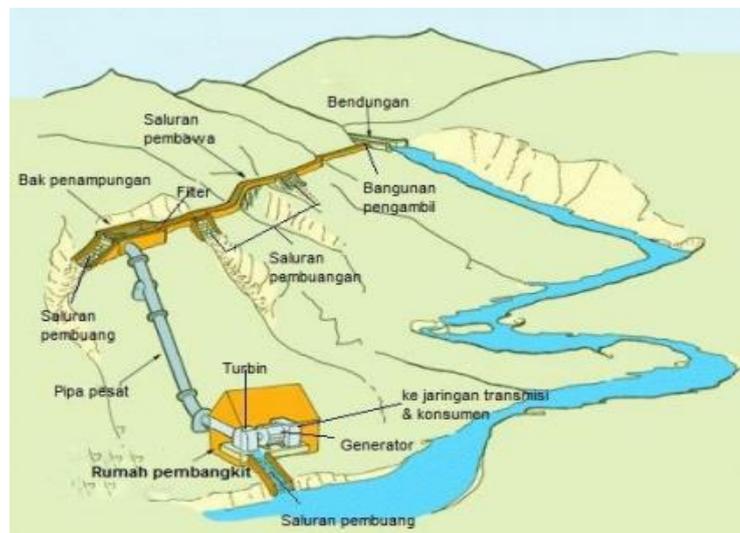
1. Berdasarkan tinggi jatuh (head)
  - a. Rendah (< 50 m)
  - b. Menengah (antara 50 m dan 250 m)
  - c. Tinggi (> 250 m)
2. Berdasarkan tipe eksploitasi
  - a. Dengan regulasi aliran air (tipe waduk)
  - b. Tanpa regulasi aliran air (tipe run off river)
3. Berdasarkan sistem pembawa air
  - a. Sistem bertekanan (pipa tekan)
  - b. Sirkuit campuran (pipa tekan dan saluran)
4. Berdasarkan penempatan rumah pembangkit
  - a. Rumah pembangkit pada bendungan
  - b. Rumah pembangkit pada skema pengalihan
5. Berdasarkan metode konversi energi
  - a. Pemakaian turbin
  - b. Pemompaan dan pemakaian turbin terbalik
6. Berdasarkan tipe turbin
  - a. Impulse
  - b. Reaksi
  - c. Reversible
7. Berdasarkan kapasitas terpasang
  - a. Mikro (< 100 kW)
  - b. Mini (antara 100 kW dan 500 Kw)



- c. Kecil (antara 500 kW dan 10 MW)
- 8. Berdasarkan debit desain tiap turbin
  - a. Mikro ( $Q < 0,4 \text{ m}^3 / \text{dt}$ )
  - b. Mini ( $0,4 \text{ m}^3 / \text{dt} < Q < 12,8 \text{ m}^3 / \text{dt}$ )
  - c. Kecil ( $Q > 12,8 \text{ m}^3 / \text{dt}$ )

### 2.1.1 Prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Mini-hidro (PLTMH)

Secara teknis PLTMH memiliki tiga komponen utama yaitu air (Hidro), turbin, dan generator. Prinsip kerja dari PLTMH sendiri pada dasarnya sama dengan PLTA hanya saja PLTMH kapasitasnya tidak begitu besar. PLTMH pada prinsipnya memanfaatkan beda ketinggian atau sudut kemiringan dan jumlah debit air per detik yang ada pada saluran irigasi, sungai, serta air terjun. Aliran air akan memutar turbin sehingga akan menghasilkan energi mekanik. Energi mekanik turbin akan memutar generator dan generator menghasilkan listrik.



Gambar 2.1 Skema Prinsip Kerja PLTMH



Untuk lebih detailnya, prinsip kerja dari Pembangkit Listrik Tenaga Mini Hidro (PLTMH) adalah sebagai berikut:

1. Aliran sungai dibendung agar mendapatkan debit air ( $Q$ ) dan tinggi jatuh air ( $H$ ), kemudian air yang dihasilkan disalurkan melalui saluran penghantar air menuju kolam penenang.
2. Kolam penenang dihubungkan dengan pipa pesat, dan pada bagian paling bawah di pasang turbin air.
3. Turbin air akan berputar setelah mendapat tekanan air ( $P$ ), dan perputaran turbin dimanfaatkan untuk memutar generator.
4. Setelah mendapat putaran yang konstan maka generator akan menghasilkan tegangan listrik, yang dikirim ke konsumen melalui saluran kabel distribusi. (Ezkhelenergy, 2013)

## 2.2 Generator Sinkron tiga fasa

Konversi energi elektromagnetik yaitu perubahan energi dari bentuk mekanik ke bentuk listrik dan bentuk listrik ke bentuk mekanik. Generator sinkron (alternator) merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (prime mover), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya.

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 gaya gerak listrik induksi kumparan stator atau gaya gerak listrik induksi armature per fasa adalah :

$$E_a = 4,44 \cdot f \cdot M \cdot \Phi \cdot K_d \dots\dots\dots (2.1)^1$$

$$\text{Diketahui : } ( M = \frac{Z}{2} )$$

Sehingga persamaan 2.1 dapat juga ditulis

$$E_a = 4,44 \cdot f \cdot \frac{Z}{2} \cdot \Phi \cdot K_d \dots\dots\dots (2.2)^2$$

Keterangan :

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

$f$  = Frekuensi output generator (Hz)

$M$  = Jumlah kumparan per phase

$\Phi$  = Fluks magnet per kutub per-fasa

$Z$  = Jumlah konduktor seluruh slot per-fasa

$K_d$  = Faktor distribusi.

Tegangan output dari generator sinkron adalah tegangan bolak-balik, karena itu generator sinkron disebut juga generator AC.

---

<sup>1</sup>Yon Riyono, Dasar Teknik Tenaga Listrik.1, 2002, Hlm 210.

<sup>2</sup>Ibid,Hlm 211.



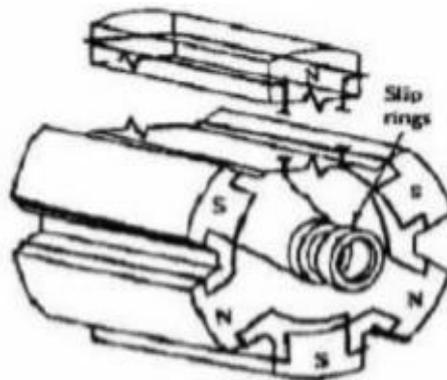
Perbedaan prinsip antara generator DC dan generator AC adalah untuk generator DC, kumparan jangkar ada pada bagian rotor dan terletak antara kutub-kutub magnet yang tetap ditempatkan, diputar oleh tenaga mekanik. Pada generator sinkron, konstruksinya sebaliknya, yaitu kumparan jangkar disebut juga kumparan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

### 2.3 Konstruksi Generator sinkron 3 fasa

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.

#### 2.3.1 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 Rotor kutub sepatu



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.

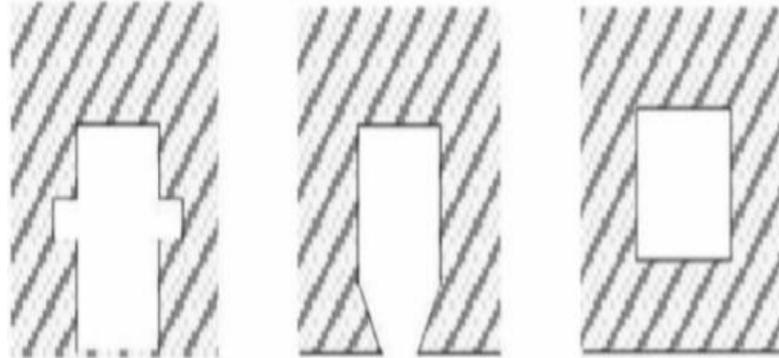
### **2.3.2 Stator**

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.

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.

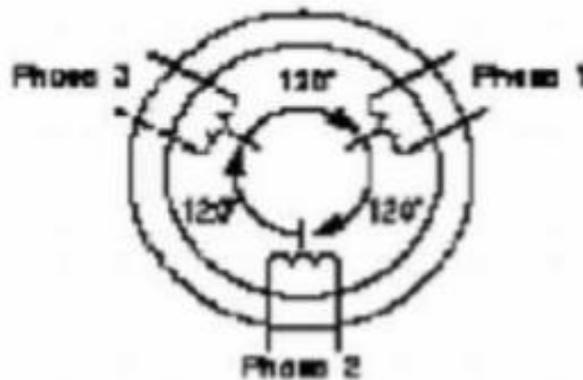
Ada tiga bentuk alur stator yaitu : terbuka, setengah terbuka dan tertutup. Ketiga bentuk alur tersebut tampak seperti pada gambar 2.3 Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi.

Gambar 2.3 Bentuk-bentuk alur stator<sup>3</sup>

## 2.4 Prinsip Kerja Generator

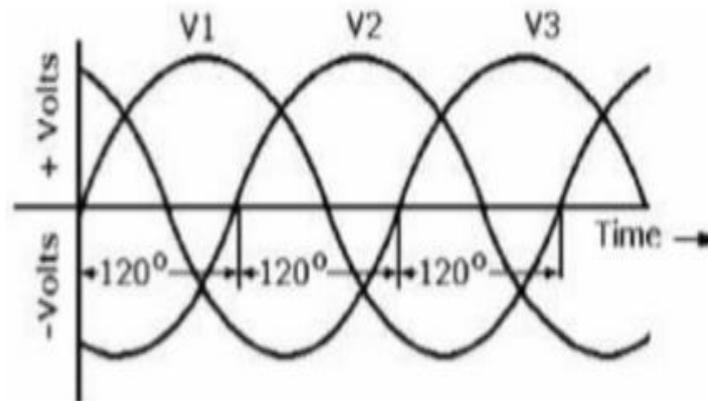
Prinsip dasar generator arus bolak-balik menggunakan hukum Faraday yang menyatakan jika sebatang penghantar berada pada medan magnet yang berubah-ubah, maka pada penghantar tersebut akan terbentuk gaya gerak listrik.

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

Gambar 2.4 Skema kumparan tiga fasa<sup>4</sup>

<sup>3</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), diakses 22 juni 2020

<sup>4</sup><http://dc166.4shared.com/img/oFZWDSwf/skemakumparan-tiga-fasa.jpg>, diakses 22 juni 2020

Gambar 2.5 Grafik Tegangan generator sinkron 3 fasa<sup>5</sup>

## 2.5 Jumlah Kutub Generator

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

$$f = P.N.120 \dots \dots \dots (2.3)^6$$

Dimana:

f = Frekuensi (Hz)

P = jumlah kutub pada generator

N = putaran rotor generator (rpm)

<sup>5</sup>Neil Sclater, Electrical Design Details, 2003, Hlm 44.

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



## 2.6 Karakteristik Generator Sinkron

### 2.6.1 Generator sinkron keadaan jalan tanpa beban

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. Bentuk hubungannya diperlihatkan pada persamaan berikut :

$$E_o = c.n.\phi \dots\dots\dots (2.4)$$

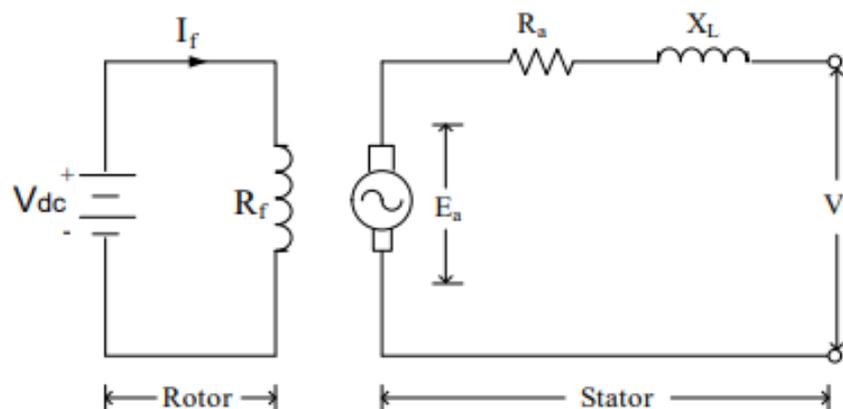
Keterangan :

C = konstanta mesin

N = kecepatan putaran (rpm)

$\phi$  = fluks yang dihasilkan oleh  $I_f$  (Wb)

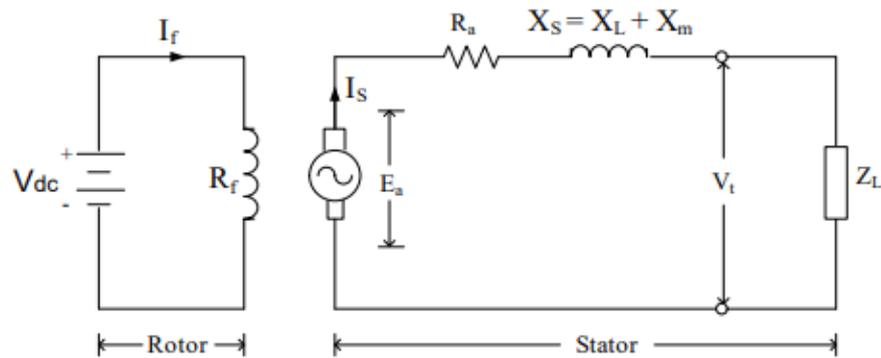
Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan ( $I_f$ ).



Gambar 2.6 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tanpa Beban



## 2.6.2 Generator sinkron berbeban



Gambar 2.7 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Berbeban

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

1. Jatuh tegangan karena resistansi jangkar ( $R_a$ ).
2. Jatuh tegangan karena reaktansi bocor jangkar ( $X_L$ ).
3. Jatuh tegangan karena reaksi jangkar.

## 2.7 Pembebanan Generator

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

### 2.7.1 Generator 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 ( $E_o$ ), yaitu :

$$E_o = 4,44 \cdot K_d \cdot f \cdot \phi M \cdot t \dots\dots\dots (2.5)^7$$

Keterangan:

$E_o$  = Tegangan tanpa beban (Volt)

$K_d$  = Faktor distribusi.

$f$  = Frekuensi output generator (Hz)



$\Phi$  = Fluks magnet per kutub per-fasa

M = Jumlah kumparan per phase

t = waktu (s)

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, sehingga tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan ( $I_f$ ).

### 2.7.2 Generator 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).

Pada generator sinkron berbeban, maka pada kumparan armatur timbul  $I_a$  dan  $X_m$ , akibatnya timbul penurunan Gaya gerak listrik armatur tanpa beban ( $E_o$ ) besarnya adalah :

$$E_o = V_t + I_a \cdot Z_s \dots\dots\dots (2.6)^8$$

Keterangan :

$E_o$  = Tegangan tanpa beban (Volt)

$V_t$  = Tegangan terminal output per phase (Volt)

$I_a$  = Arus jangkar (Ampere)

$Z_s$  = Impedansi sinkron (ohm)

---

<sup>8</sup>Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga listrik, Hlm 210



## 2.8 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 seri ataupun 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 ( $X_L$ ) :

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times l \dots\dots\dots (2.7)^9$$

2. Rumus reaktansi kapasitif ( $X_C$ ) :

$$X_C = 1 / 2 \times \pi \times f \times c \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

$X_L$  = Reaktansi induktif ( $\Omega$ )

$X_C$  = Reaktansi Kapasitif ( $\Omega$ )

$\pi$  = 3.14 atau  $\frac{22}{7}$

$f$  = Frekuensi (Hz)

$l$  = Nilai induktansi pada inductor (H)

$c$  = Nilai kapasitas pada kapasitor (F)

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

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{X_L}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan :

$Z$  = Impedansi ( $\Omega$ )

$X_L$  = Reaktansi induktif ( $\Omega$ )

$X_C$  = Reaktansi kapasitif ( $\Omega$ )



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

$$Z = \frac{V_f}{I_f} \dots\dots\dots (2.10)^{10}$$

$$Z_s = \sqrt{(R_a)^2 + (X_s)^2} \dots\dots\dots (2.11)^{11}$$

Keterangan :

$V_F$  = Tegangan Medan (V)

$I_F$  = Arus Medan (A)

$R_a$  = Resistansi jangkar ( $\Omega$ )

$Z_s$  = Impedansi Sinkron ( $\Omega$ )

$X_s$  = Reaktansi sinkron ( $\Omega$ )

Dan faktor daya  $\cos \phi$  dapat diketahui dengan rumus :

$$R_a = Z \cdot \cos \Omega \dots\dots\dots (2.12)^{12}$$

Keterangan :

$R_a$  = Resistansi jangkar ( $\Omega$ )

$Z$  = Nilai impedansi pada rangkaian ( $\Omega$ )

$\cos \Omega$  = Faktor daya

<sup>9</sup>Kundur Prabha, Power system stability and control, 1993, Hal 87

<sup>10</sup>Sudirham sudharyanto, Analisa Rangkaian Listrik (Jilid-1), Hlm 231.

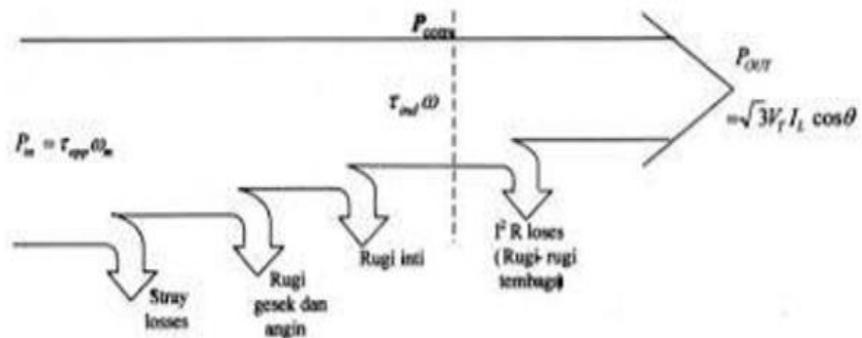
<sup>11</sup>Yon Rijono, Dasar teknik listrik , hlm 216.

<sup>12</sup>([https://www.academia.edu/10658674/Rangkaian\\_Seri\\_RL\\_dan\\_RC\\_pada\\_Rangkaian\\_Listrik](https://www.academia.edu/10658674/Rangkaian_Seri_RL_dan_RC_pada_Rangkaian_Listrik))di akses 23 juni 2020



## 2.9 Rugi – rugi pada generator Sinkron

Rugi – rugi total yang terjadi pada generator sinkron terdiri dari rugi – rugi tembaga, rugi besi dan rugi mekanik yang dapat diperhatikan pada gambar diagram dibawah ini :



Gambar 2.8 Diagram rugi-rugi pada generator sinkron<sup>13</sup>

Dimana tidak semua tenaga mekanik akan menjadi tenaga elektrik keluaran pada generator. Perbedaan antara daya keluaran dan daya masukan diwakilkan oleh rugi-rugi pada generator. Gambar 2.7 diatas menjelaskan tentang rugi-rugi tersebut. Dimana daya converter dari mekanik ke listrik akan diberikan dengan rumus :

$$P_{conv} = P_a = 3 \cdot E_0 \cdot I_a \dots\dots\dots (2.13)^{14}$$

Keterangan :

$P_{conv}$  = Daya converter

$P_a$  = Rugi- Rugi Konstan (Watt)

$E_0$  = Tegangan tanpa beban (Volt)

$I_a$  = Arus jangkar (Ampere)

Dimana perbedaan antara daya masukan generator dan daya converter pada generator adalah dimana daya converter mewakili rugi-rugi mekanik, rugi inti, dan rugi Stray pada generator sinkron yang konstan dan tidak terpengaruh terhadap beban yang ada.

<sup>13</sup>Stephen J Chapman, Electric Machinery and fundamentals, Hlm 216

<sup>14</sup>Ibid, Hlm 206.



### 2.9.1 Rugi Listrik

Rugi listrik dikenal juga dengan rugi tembaga yang terdiri dari kumparan armature, kumparan medan. Rugi – rugi tembaga ditemukan pada semua belitan pada mesin, dihitung berdasarkan pada tahanan dc dari lilitan pada suhu 7500 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  $I^2 \cdot R$  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 2 V keseluruhannya jika dipergunakan sikat arang dan grafit dengan shunt.

### 2.9.2 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 :

$$P_h = \eta_h \cdot B_{max}^{1.6} \cdot f \cdot v \text{ (watt)} \dots\dots\dots (2.14)^{15}$$

Keterangan :

$P_h$  = Rugi histerisis (watt)

$\eta_h$  = koefisien steinmetz histerisis.

$B_{max}^{1.6}$  = kerapatan flux (Wb/m<sup>2</sup>)

$f$  = frekuensi

$v$  = volume inti (m<sup>3</sup>)

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

<sup>15</sup>Yon rijono, Dasar teknik Listrik, Hlm. 143



Jadi makin besar frekuensi sinyal tegangan output makin besar rugi histerisis yang diperoleh. Adapun rugi arus pusar besarnya adalah:

$$P_e = K \cdot B_{max}^2 \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot v \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.15)^{16}$$

Keterangan :

$P_e$  = Rugi arus pusar(watt)

$K$  = konstanta arus pusar yang tergantung pada ketebalan laminasi masing-masing lempengan dan volume inti armature.

$B_{max}^{1.6}$  = kerapatan flux (Wb/m<sup>2</sup>)

$f$  = frekuensi

$t$  = waktu

$v$  = volume inti (m<sup>3</sup>)

Oleh karena nilai  $k$  dan  $B$  adalah konstan, maka besar kecilnya rugi arus pusar adalah tergantung pada nilai frekuensi kuadrat. Besar rugi besi adalah sekitar 20 sampai 30 % dari rugi total pada beban Nol.

### 2.9.3 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 pada 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 keadaan tanpa beban.

<sup>16</sup>Yon Riyono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, hlm. 144

<sup>17,18</sup>Ibid.



### 2.10 Arus Rotor ( Field current )

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

$$P_{cu,s} = I_S^2 \times R_S \dots\dots\dots (2.16)^{19}$$

Keterangan :

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

$I_S$  = Arus medan maksimum ( ampere )

$R_S$  = Resistansi belitan medan ( ohm )

### 2.11 Arus Stator ( Armature current )

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

$$\Sigma \text{Rugi variable} = 3 \cdot I_a^2 \times R_a \dots\dots\dots (2.17)^{20}$$

Dan tegangan tembaga per phase untuk generator adalah :

$$V_T = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.18)^{21}$$

Dimana :

$I_a$  = Arus armatur maksimum ( ampere )

$R_a$  = Resistansi belitan armatur ( ohm )

$V_T$  = Tegangan terminal output per phasa ( Volt )

$R_a$  = Resistansi jangkar (  $\Omega$  )

<sup>19</sup>J.Chapman Stephen, Electric Machinery and Power System Fundamentals, 2002, Hlm 206.

<sup>20</sup>Ibid. hlm 216.

<sup>21</sup>Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, hlm 249

<sup>22</sup>Prih sumardjati, Teknik pemanfaatan tenaga listrik jilid 3, Hlm 404.

<sup>23</sup>Juhari, Generator kelas XI Kemendikbud, Hlm 31.



## 2.12 Efisiensi Generator

efisiensi generator adalah perbandingan antara daya output dengan daya input. efisiensi generator sinkron dapat dituliskan seperti Persamaan berikut:

$$\eta (\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.19)^{22}$$

Atau,

$$\eta (\%) = \frac{P_{out \text{ pada beban}}}{P_{out \text{ pada nameplate}}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.20)^{23}$$

Dimana,

$$\Sigma \text{Rugi-rugi total daya} = (\text{rugi konstan} + \text{Rugi variabel}) \dots\dots\dots (2.21)$$

Keterangan :

$P_{Out}$  = Daya keluaran generator (KW).

$P_{In}$  = Daya masukan generator (KW).

$\Sigma_{Rugi}$  = Total Rugi-rugi daya (KW).

Rugi variabel = Rugi Tembaga = Rugi listrik (  $3 \cdot I_a^2 \cdot R_a$  ).

Rugi konstan = Rugi konversi = Rugi besi = Rugi Mekanik

Rugi konstan =  $P_{conv} / P_a = 3 \cdot E_0 \cdot I_a$ .

Pada waktu generator sinkron berbeban, rugi-rugi yang terjadi terdiri dari :

1. Rugi-rugi rotasi yang terdiri dari :
  - a. Rugi angin dan gesekan.
  - b. Rugi gesekan sikat pada cicin seret.
  - c. Rugi ventilasi pada waktu pendinginan mesin.
  - d. Rugi histerisis dan arus pusar di stator.
2. Rugi-rugi listrik yang terdiri dari :
  - a. Rugi pada kumparan medan.
  - b. Rugi pada kumparan jangkar.
  - c. Rugi pada kontak sikat.
3. Rugi eksitasi yang dipakai untuk penguatan.
4. Rugi beban sasar (stray load loss).