



---

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas**

Pembangkit listrik tenaga gas merupakan sebuah pembangkit energi listrik yang menggunakan peralatan/mesin turbin gas sebagai penggerak generatornya. Turbin gas dirancang dan dibuat dengan prinsip kerja yang sederhana dimana energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar diubah menjadi energi mekanis dan selanjutnya diubah menjadi energi listrik atau energi lainnya sesuai dengan kebutuhannya.

##### **2.1.2 Prinsip Kerja PLTG**

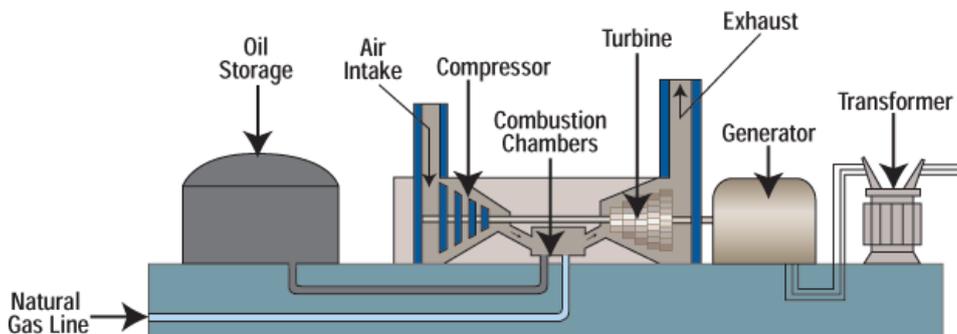
Prinsip kerja PLTG adalah sebagai berikut. Mula-mula udara dimasukkan ke dalam kompresor dengan melalui air filter/penyaring udara agar partikel debu tidak ikut masuk ke dalam kompresor tersebut. Pada kompresor, tekanan udara dinaikkan lalu dialirkan ke ruang bakar untuk dibakar bersama bahan bakar. Disini, penggunaan bahan bakar menentukan apakah bisa langsung dibakar dengan udara atau tidak. Jika menggunakan BBG, gas bisa langsung dicampur dengan udara untuk dibakar. Tapi jika menggunakan BBM harus dilakukan proses pengabutan dahulu pada burner baru dicampur udara dan dibakar. Pembakaran bahan bakar dan udara ini akan menghasilkan gas bersuhu dan bertekanan tinggi yang berenergi (enthalpy). Gas ini lalu disemprotkan ke turbin, hingga enthalpy gas diubah oleh turbin menjadi energi gerak yang memutar generator untuk menghasilkan listrik. Setelah melalui turbin, sisa gas panas tersebut dibuang melalui cerobong/stack. Karena gas yang disemprotkan ke turbin bersuhu tinggi, maka pada saat yang sama dilakukan pendinginan turbin dengan udara pendingin dari lubang udara pada turbin. Untuk mencegah korosi akibat gas bersuhu tinggi ini, maka bahan bakar yang digunakan tidak boleh mengandung logam Potasium, Vanadium, dan Sodium yang melampaui 1 part per mill (ppm).

Turbin gas suatu PLTG berfungsi untuk mengubah energi yang terkandung di dalam bahan bakar menjadi mekanis. Fluida kerja untuk memutar Turbin Gas

adalah gas panas yang diperoleh dari proses pembakaran. Proses pembakaran memerlukan tiga unsur utama yaitu :

1. Bahan Bakar
2. Udara
3. Panas

Dalam proses pembakaran ini bahan bakar disuplai oleh pompa bahan bakar (fuel oil pump) apabila digunakan bahan bakar minyak, atau oleh kompresor gas apabila menggunakan bahan bakar gas alam. Pada umumnya kompresor gas disediakan oleh pemasok gas tersebut. Udara untuk pembakaran diperoleh dari kompresor utama, sedangkan panas untuk awal pembakaran dihasilkan oleh ignitor (busi). Proses pembakaran dilaksanakan didalam *Combustion Chamber* (ruang bakar). Energi mekanis yang dihasilkan oleh turbin gas digunakan untuk memutar generator listrik, sehingga diperoleh energi listrik. Tentu saja untuk dapat berjalannya operasi PLTG dengan baik perlu dilengkapi dengan alat-alat bantu, kontrol, instrumentasi, proteksi, dan sebagainya.



**Gambar 2.1** Proses Pembangkitan Generator Turbin Gas<sup>1</sup>

## 2.2 Generator Sinkron

Generator sinkron (altenator) 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

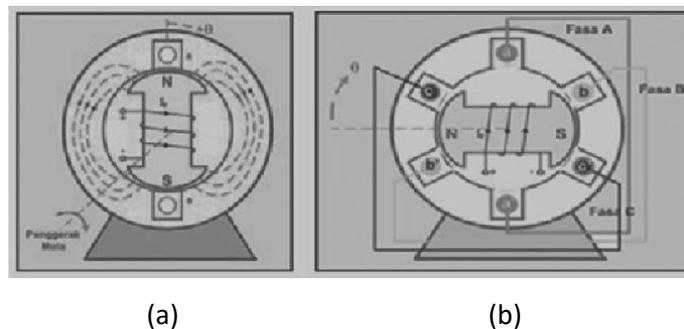
<sup>1</sup> Wasiatewonglistrik.blogspot.com

diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya. Rotor generator sinkron yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet yang diputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan putar rotor, terdapat dua jenis generator arus bolak balik yang terbagi menjadi beberapa fase.

Generator arus bolak – balik dibagi menjadi dua jenis, yaitu:

- Generator arus bolak – balik 1 fasa
- Generator arus bolak – balik 3 fasa

Gambar diagram kedua bentuk generator arus bolak – balik tersebut dapat dilihat dari gambar berikut:



**Gambar 2.2** ( a ) Generator AC satu fasa dua kutub ( b ) Generator AC tiga fasa dua kutub<sup>2</sup>

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 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 terpengaruh induksi dari fluks putar tersebut. Gaya gerak listrik (ggl) yang timbul pada kumparan

<sup>2</sup> 5 Teori Generator Sinkron.pdf



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 :

$$E_a = 4,44. f. M. \Phi. K_d \dots\dots\dots (2.1)^3$$

Dimana :

$E_a$  = Gaya gerak listrik armature per fasa (Volt)

$f$  = Frekuensi output generator (Hz)

$M$  = Jumlah kumparan per fasa  $Z/2$

$Z$  = Jumlah konduktor seluruh slot per fasa

$\Phi$  = Fluks magnet per kutub per fasa

$K_d$  = Faktor distribusi

Sehingga persamaan 2.1 dapat juga ditulis :

$$E_a = 4,44. f. Z/2. \Phi. K_d \dots\dots\dots (2.2)^4$$

Tegangan output dari generator sinkron adalah tegangan bolak-balik, karena itu generator sinkron disebut juga generator AC. 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 di tempat, diputar oleh tenaga mekanik. Sedangkan 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.

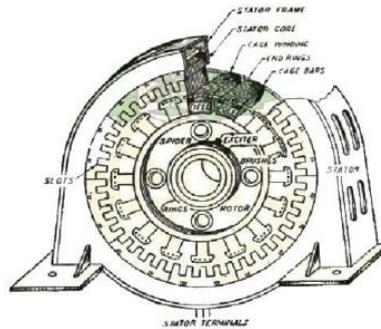
Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh tenaga air atau tenaga lainnya, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau fluks yang bersifat bolak-balik atau fluks putar. Fluks putar ini akan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

<sup>3</sup> Yon Rijono, *Dasar Teknik Tenaga Listrik*, hlm 210

<sup>4</sup> Ibid, Hlm 211

## 2.3 Konstruksi Generator Sinkron

Generator sinkron mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik bolak-balik secara elektromagnetik. Energi mekanik berasal dari penggerak mula yang memutar rotor, sedangkan energi listrik dihasilkan dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan-kumparan stator.



**Gambar 2.3** Konstruksi Generator Sinkron<sup>5</sup>

Secara umum generator sinkron terdiri atas stator, rotor, dan celah udara. Stator merupakan bagian dari generator sinkron yang diam sedangkan rotor adalah bagian yang berputar. Celah udara adalah ruang antara stator dan rotor.

Pada bagian ini akan dibahas mengenai konstruksi generator sinkron secara garis besar. Bagian – bagian generator yang dibahas pada bagian ini antara lain :

- a. Stator
- b. Rotor

### 2.3.1 Stator

Stator (armature) adalah bagian yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus AC yang menuju ke beban disalurkan melalui stator. Komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak.

Stator terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu:

- a. Rangka stator

Rangka stator merupakan rumah (kerangka) yang menyangga inti jangkar generator.

<sup>5</sup> 5 Teori generator Sinkron.pdf, hlm. 6

**b. Inti Stator**

Inti stator terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetic khusus terpasang ke rangka stator.

**c. Alur (slot) dan Gigi**

Alur dan gigi merupakan tempat meletakkan kumparan stator. Ada 3 (tiga) bentuk alur stator yaitu terbuka, setengah terbuka, dan tertutup seperti pada gambar 2.3 berikut :



**Gambar 2.4** Bentuk-Bentuk Alur<sup>6</sup>

**d. Kumparan Stator (Kumparan Jangkar)**

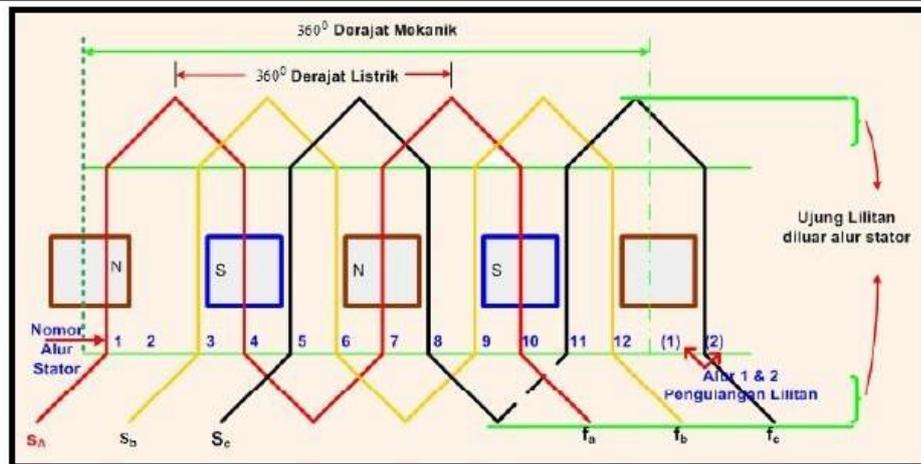
Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi.

Belitan jangkar (stator) yang umum digunakan oleh mesin sinkron tiga fasa, ada dua tipe yaitu:

**a. Belitan satu lapis (*Single Layer Winding*).**

Gambar 2.5 memperlihatkan belitan satu lapis karena hanya ada satu sisi lilitan di dalam masing - masing alur. Bila kumparan tiga fasa dimulai pada  $S_a$ ,  $S_b$ , dan  $S_c$  dan berakhir di  $F_a$ ,  $F_b$ , dan  $F_c$  bisa disatukan dalam dua cara, yaitu hubungan bintang dan segitiga. Antar kumparan fasa dipisahkan sebesar 120 derajat listrik atau 60 derajat mekanik, satu siklus ggl (gaya gerak listrik) penuh akan dihasilkan bila rotor dengan 4 kutub berputar 180 derajat mekanis. Satu siklus ggl (gaya gerak listrik) penuh menunjukkan 360 derajat listrik.

<sup>6</sup> Ibid, hlm. 8



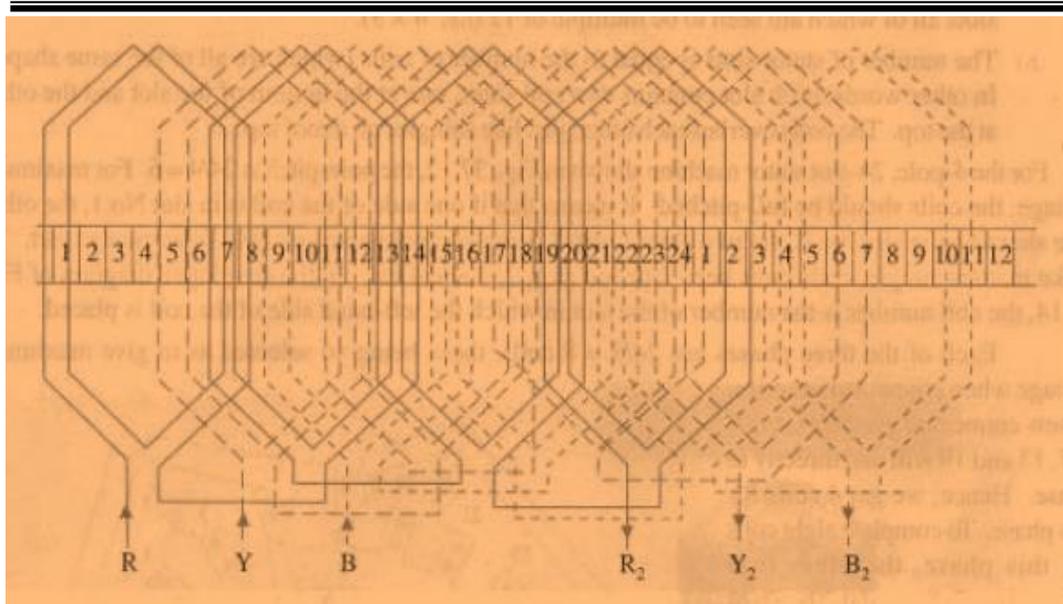
**Gambar 2.5** Belitan Satu Lapis Generator Sinkron Tiga Fasa<sup>7</sup>

b. Belitan Berlapis Ganda (*Double Layer Winding*)

Kumparan jangkar yang diperlihatkan pada hanya mempunyai satu lilitan per kutub per fasa, akibatnya masing – masing kumparan hanya dua lilitan secara seri. Bila alur-alur tidak terlalu lebar, masing-masing penghantar yang berada dalam alur akan membangkitkan tegangan yang sama. Masing – masing tegangan fasa akan sama untuk menghasilkan tegangan per penghantar dan jumlah total dari penghantar per fasa.

Dalam kenyataannya cara seperti ini tidak menghasilkan cara yang efektif dalam penggunaan inti stator, karena variasi kerapatan fluks dalam inti dan juga melokalisir pengaruh panas dalam daerah alur dan menimbulkan harmonik. Untuk mengatasi masalah ini, generator praktisnya mempunyai kumparan terdistribusi dalam beberapa alur per kutub per fasa.

<sup>7</sup> Ibid, hlm. 8



**Gambar 2.6** Belitan Berlapis Ganda Generator Sinkron Tiga Fasa<sup>8</sup>

Gambar 2.6 memperlihatkan bagian dari sebuah kumparan jangkar yang secara umum banyak digunakan. Pada masing masing alur ada dua sisi lilitan dan masing – masing lilitan memiliki lebih dari satu putaran. Bagian dari lilitan yang tidak terletak ke dalam alur biasanya disebut *winding overhang*, sehingga tidak ada tegangan dalam *winding overhang*.

### 2.3.2 Rotor

Rotor terdiri dari tiga komponen utama yaitu:

a. Slip Ring

Slip ring merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Terminal kumparan rotor dipasang ke slip ring ini kemudian dihubungkan ke sumber arus searah melalui sikat (brush) yang letaknya menempel pada slip ring.

b. Kumparan Rotor (Kumparan Medan)

Kumparan medan merupakan unsur yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah dari sumber eksitasi tertentu.

<sup>8</sup> Ibid, hlm. 9

c. Poros Rotor

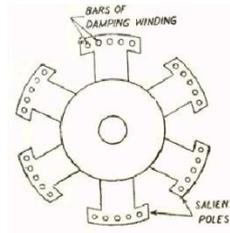
Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan, dimana pada poros rotor tersebut telah dibentuk slot-slot secara parallel terhadap poros rotor.

Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar kutub medan magnet rotor dapat berupa silent pole (kutub menonjol) dan non silent pole (kutub silinder). Adapun jenis-jenis kutub magnet sebagai berikut :

a. Jenis Kutub Menonjol (Silent Pole)

Pada jenis silent pole, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Belitan-belitan medannya dihubung seri. Ketika belitan medan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan.

Gambaran bentuk kutub menonjol generator sinkron seperti pada gambar berikut :



**Gambar 2.7** Rotor kutub menonjol<sup>9</sup>

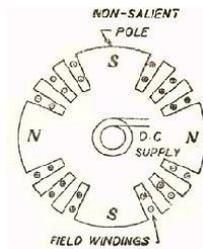
Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (120 - 400 rpm). Generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik. Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putaran rendah dan sedang karena:

- Kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi angin yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.
- Konstruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.

<sup>9</sup> Ibid, hlm. 11

### b. Jenis Kutub Silindris (Non Silent Pole)

Pada jenis non silent pole, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa halus yang berbentuk silinder yang mempunyai alur-alur terbuat di sisi luarnya. Belitan-belitan medan dipasang pada alur-alur di sisi luarnya dan terhubung seri yang dienerjais oleh Eksiter. Gambaran bentuk kutub silinder generator sinkron tampak seperti pada gambar berikut :



**Gambar 2.8** Rotor Kutub Silindris<sup>10</sup>

Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar tinggi (1500 atau 3000 rpm) seperti yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga uap. Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena:

- Konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi.
- Distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.

## 2.4 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh prime mover, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau fluks yang bersifat bolak-balik atau fluks putar. Fluks putar ini akan memotong kumparan stator sehingga pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik karena pengaruh 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 putaran rotor.

<sup>10</sup> Ibid, hlm. 12



Frekuensi listrik yang dihasilkan generator sinkron adalah sinkron dengan kecepatan putar generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnet dengan suplai arus DC. Medan magnet rotor bergerak pada arah putar rotor.

Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet, persamaan 2.3 menunjukkan hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub mesin yang telah ditentukan. Sebagai contoh untuk membangkitkan 50 Hz pada mesin 2 kutub, rotor harus berputar dengan kecepatan 3000 rpm.

Dengan memutar generator sinkron pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan ( $I_f$ ) maka tegangan ( $E_a$ ) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator. Besarnya kuat medan pada rotor dapat diatur dengan cara mengatur arus medan ( $I_f$ ) yang diberikan pada rotor.

## 2.5 Jumlah Kutub Generator

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

$$f = \frac{P \cdot N}{120} \dots\dots\dots(2.3)^{11}$$

dimana :

$f$  = Frekuensi (Hz)

$P$  = Jumlah kutub pada generator

$N$  = Putaran rotor generator (Rpm)

## 2.6 Pembebanan Generator

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

---

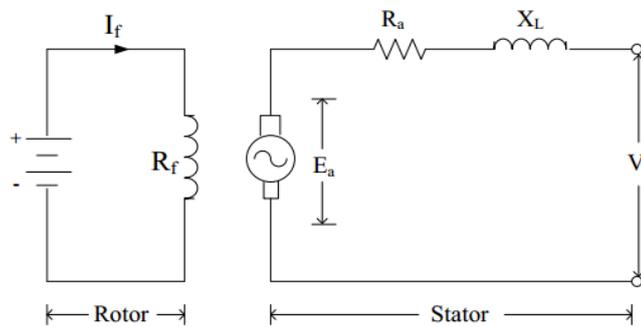
<sup>11</sup> Prabha Kundur,op.cit. Hlm 47

### 2.6.1 Generator Tanpa Beban

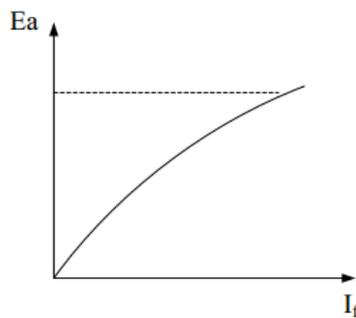
Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai alternator dengan diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan ( $I_f$ ), maka pada kumparan jangkar stator akan diinduksikan tegangan tanpa beban ( $E_0$ ), yaitu :

$$E_0 = 4,44 \cdot K_d \cdot f \cdot \Phi \cdot M \cdot T \dots\dots\dots(2.4)^{12}$$

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



**Gambar 2.9** Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tanpa Beban<sup>13</sup>



**Gambar 2.10** Grafik Hubungan Arus Penguat Medan ( $I_f$ ) dan  $E_a$ <sup>14</sup>

### 2.6.2 Generator Berbeban

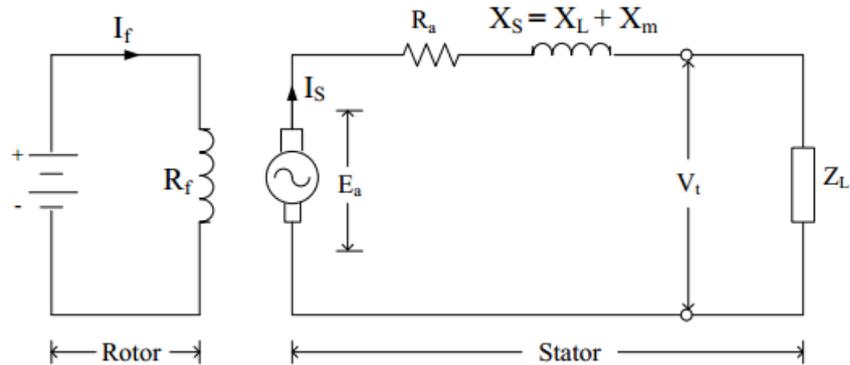
Tiga macam sifat beban generator, yaitu : beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Akibat pembebanan ini akan berpengaruh terhadap tegangan beban dan faktor dayanya. Jika beban generator bersifat resistif mengakibatkan

<sup>12</sup> Yon Rijono. *Dasar Teknik Listrik*. Hlm 210

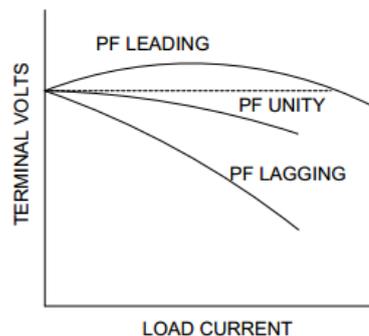
<sup>13</sup> Ibid, hlm 231

<sup>14</sup> Ibid

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 2.11** Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Berbeban<sup>15</sup>



**Gambar 2.12** Karakteristik Generator AC Pada Berbagai Faktor Daya<sup>16</sup>

## 2.7 Beban-Beban Listrik

Dalam sistem listrik arus bolak-balik, jenis beban dapat diklasifikasikan menjadi 3 macam, yaitu :

### 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

<sup>15</sup> Yon Riyono. *Dasar Teknik Tenaga Listrik*. Hlm 235

<sup>16</sup> Ibid



dengan satu. Tegangan dan arus satu fasa, dengan persamaan daya sebagai berikut :

$$P = V \cdot I \dots\dots\dots(2.5)^{17}$$

Dimana :

P = Daya aktif yang diserap beban (watt)

V = Tegangan yang mencatu beban (volt)

I = Arus yang mengalir pada beban (A)

Untuk mencari besarnya beban resistif suatu benda dapat dicari dari rumus berikut :

$$R = \frac{V}{I} \dots\dots\dots(2.6)^{18}$$

Dimana :

R = Resistansi ( $\Omega$ )

V = Tegangan (V)

I = Arus yang mengalir pada beban resistif (A)

### 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 arus bergeser menjadi tertinggal terhadap tegangan. Beban jenis ini menyerap daya aktif dan daya reaktif. Persamaan daya reaktif untuk beban induktif adalah sebagai berikut :

$$X_L = 2 \pi f L \dots\dots\dots(2.7)^{19}$$

Dimana :

$X_L$  = Reaktansi Induktif

$\pi$  = Konstanta 3,14

<sup>17</sup>Alto Belly, dkk. "*Daya Aktif, Reaktif, dan Nyata*" (Paper presented at Jurusan Teknik Elektro Universitas Indonesia, Jakarta, 2010), Hal. 4.

<sup>18</sup> Ibid, hal. 12.

<sup>19</sup> Ibid, hal. 13.



$f$  = Frekuensi (Hz)

$L$  = Induktansi (Henry)

### 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.

Reaktansi kapasitif mengakibatkan arus rangkaian yang mendahului tegangannya. Untuk menghitung besarnya reaktansi kapasitif ( $X_C$ ), dapat digunakan rumus sebagai berikut :

$$X_C = \frac{1}{2 \pi f C} \dots\dots\dots(2.8)^{20}$$

Dimana :

$X_C$  = Reaktansi Kapasitif

$f$  = Frekuensi (Hz)

$C$  = Kapasitansi (Farad)

### 2.7.4 Impedansi

Di dalam suatu rangkaian linier yang terdiri atas tahanan (R), induktor (L), dan kapasitor (C), apabila suatu arus/tegangan listrik adalah sinusoid, maka semua arus dan tegangan yang lain juga berbentuk sinusoid dengan frekuensi yang sama. Melalui penerapan hukum kirchoff terdapat tiga cara untuk melakukan penjumlahan dan pengurangan bentuk-bentuk sinusoid :

- (1) Cara grafis, yaitu dengan menggambarkan gelombang demi gelombang dan dijumlahkan setiap saat. Cara ini memakan waktu dan tidak teliti.
- (2) Cara trigonometri, yaitu dengan menggunakan dalil-dalil trigonometri untuk menjumlahkan dan mengurangi dua sinusoid. Cara ini sukar dan memakan waktu.
- (3) Cara aljabar kompleks dan analisis fasor.

<sup>20</sup> Ibid, hal. 13.



Secara umum bentuk persamaan impedansi dapat dituliskan sebagai berikut :

$$V = I \cdot Z \dots\dots\dots(2.9)^{21}$$

Dimana :

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

Z = Impedansi ( $\Omega$ )

Sedangkan untuk mencari nilai dari resistansi dan reaktansi sinkron generator dengan impedansi sinkron dapat menggunakan rumus berikut :

$$Z_s = Z \cos \theta + j Z \sin \theta \dots\dots\dots(2.10)^{22}$$

Dari persamaan di atas dapat diketahui nilai dari resistansi dan reaktansi sinkron sebagai berikut :

$$R_a = Z \cos \theta \text{ dan } X_s = j Z \sin \theta$$

Dimana :

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

Z = Impedansi ( $\Omega$ )

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

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

## 2.8 Pengaturan Tegangan Generator

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

Pengaturan generator AC didefinisikan sebagai presentase kenaikan tegangan terminal ketika beban dikurangi dari arus beban penuh ternilai sampai nol, dimana kecepatan kepesatan dan eksitasi medan dijaga konstan.

<sup>21</sup> Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, hlm.29

<sup>22</sup> Rohani Sianturi. *Rangkaian Listrik*. Hlm 5



Faktor-faktor yang mempengaruhi pengaturan generator adalah sebagai berikut :

1. Penurunan tegangan  $I_R$  pada lilitan jangkar
2. Penurunan tegangan  $I_{XL}$  pada lilitan jangkar
3. Reaksi jangkar (pengaruh magnetisasi dari arus jangkar)

Untuk menghitung tegangan yang dibangkitkan generator maka dapat dilihat dari persamaan berikut :

$$E_o = \sqrt{(V_t \cdot \cos \theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \cdot \sin \theta + I_a \cdot X_s)^2} \dots\dots\dots(2.11)^{23}$$

Dimana :

$E_o$  = Tegangan yang dibangkitkan (Volt)

$V_t$  = Tegangan per phasa (Volt)

$I_a$  = Arus nominal (A)

$R_a$  = Resistansi

$X_s$  = Reaktansi

Untuk mengatasi generator terhindar dari beban lebih, maka diperlukan pengaturan tegangan beban atau presentase regulasi tegangan. Ada dua macam presentase regulasi tegangan, yaitu :

$$1. \text{Regulasi Naik} = \frac{E_o - V_t}{V_t} \times 100\% \dots\dots\dots(2.12)^{24}$$

$$2. \text{Regulasi Turun} = \frac{E_o - V_t}{E_o} \times 100\% \dots\dots\dots(2.13)^{25}$$

Keterangan :

$E_o$  = Tegangan terminal / tegangan output generator tanpa beban

$V_t$  = Tegangan terminal beban penuh

$$\text{Dimana, } V_t = \frac{VL}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.14)^{26}$$

Karena tegangan terminal generator ac banyak berubah dengan berubahnya beban, maka untuk operasi hampir semua peralatan listrik diperlukan usaha untuk

<sup>23</sup> <http://blog.unnes.ac.id/antosupri/pengaturan-tegangan-generator-sinkron/>

<sup>24</sup> Yon Rijono. *Dasar Teknik Listrik*. Hlm 231

<sup>25</sup> Ibid, hlm 231

<sup>26</sup> Ibid, hlm 249



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

Penggunaan beban pada konsumen selalu dinamis di sebabkan oleh pemakain daya sesuai kebutuhan sehingga mengakibatkan perubahan beban, baik beban dengan daya aktif maupun dengan daya reaktif. Perubahan daya reaktif yang terjadi sangat mempengaruhi kestabilan dari tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator, untuk mengatasi hal tersebut digunakanlah peralatan yang dapat mengatur tegangan keluaran dari generator yang disebut AVR.

## 2.9 Kerja Paralel Generator

Sebuah generator dapat terhubung ke dalam sistem maka ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi untuk menjaga generator agar bekerja seperti halnya generator, bukan menjadi motor. Syarat-syarat yang harus dipenuhi sebelum terhubung ke sistem atau sinkronisasi generator menurut Michael J. Thompson dalam bukunya yang berjudul “Fundamentals and Advancements in Generator Synchronizing Systems (March 2012)” diantaranya yaitu:

### 1. Tegangan alternator harus sama dengan tegangan sistem

Pada saat tegangan sinusoidal memiliki nilai sama baik tegangan yang ada pada jaringan maupun yang dibangkitkan dari generator sinkron. Saat proses sinkronisasi perbedaan tegangan generator sangat sensitif terhadap pembebanan. Pengaturan generator sinkron dapat dilakukan dengan cara penurunan arus eksitasi yang masuk pada kumparan medan (field winding) generator. Hal ini dimaksudkan agar tidak terjadi kerusakan pada aspek mekanis generator. Perbedaan tegangan akan menimbulkan loncatan bunga api sehingga dapat merusak transformator. Pada saat proses paralel generator, tegangan pada generator lebih besar dibandingkan tegangan pada jaringan. Oleh karena itu maka



---

generator akan menerima lonjakan beban lagging (induktif) yang apabila dalam jumlah yang besar dapat menimbulkan panas pada belitan stator.

### 2. Frekuensi harus sama dengan frekuensi sistem

Sebelum proses sinkronisasi dilakukan, generator harus diputar, sehingga frekuensi tegangan output sama dengan frekuensi sistem. Namun untuk memastikan fungsi kerja mesin tersebut adalah sebagai generator, maka sebelum proses sinkronisasi, frekuensi dinaikkan sedikit diatas frekuensi sistem. Namun yang perlu diketahui, bahwa semakin besar perbedaan frekuensi maka semakin besar hentakan mekanis yang akan diterima generator. Untuk mencegah terjadinya kerusakan pada sistem maka perbedaan frekuensi sistem dan frekuensi generator di ubah sekecil mungkin. Frekuensi generator dengan frekuensi sistem harus sama. Untuk menyamakan frekuensi tersebut, maka putaran generator harus diatur terlebih dahulu dengan mengatur katup governor (aliran uap masuk turbin). Ketika frekuensi generator lebih besar dari frekuensi sistem, maka sistem akan mengalami sentakan beban (MW) dari mesin yang menyebabkan mesin membangkitkan MW. Namun sebaliknya ketika frekuensi generator lebih rendah dari frekuensi sistem, maka mesin akan mengalami sentakan (MW) dari sistem yang menyebabkan mesin menjadi motor (motoring). Standar frekuensi yang digunakan di Indonesia yaitu 50 Hz. Sesuai standar dari PLN, frekuensi sebaiknya tidak melebihi  $\pm 0.5$  dari 50 Hz, yaitu: 49,5 - 50,5 Hz atau 2970 - 3030 Rpm.

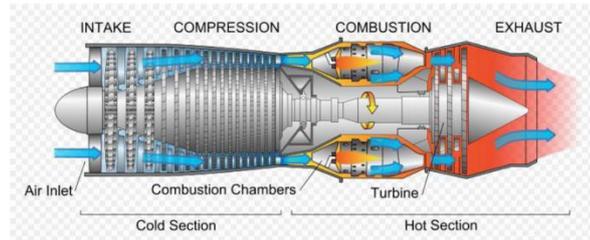
### 3. Urutan fasa dan sudut fasa harus sama dengan sistem

Urutan fasa pada generator sinkron terhadap jaringan jala-jala harus sama, dimana urutan U,V dan W dari generator sinkron urutannya harus sama dengan fasa R,S dan T jaringan jala-jala. Begitu juga sudut fasa dari generator dan jaringan harus sama, perbedaan sudut fasa akan menimbulkan beda tegangan dari fasa yang sama antara generator dan jaringan.

## 2.10 Turbin Gas

Turbin gas adalah suatu alat yang memanfaatkan gas sebagai fluida untuk memutar turbin dengan memanfaatkan kompressor dan mesin pembakar internal. Didalam turbin gas, mesin kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik melalui

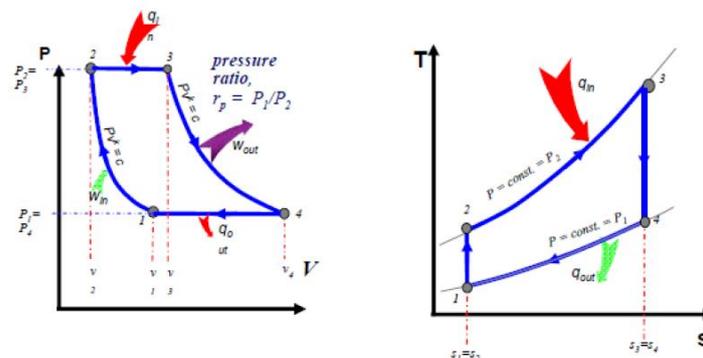
udara bertekanan yang memutar sudu turbin sehingga menghasilkan daya. Sistem turbin gas terdiri dari 3 komponen utama, yaitu : kompresor, ruang bakar, dan turbin.



Gambar 2.13 Sistem Turbin Gas<sup>27</sup>

### 2.10.1 Prinsip Kerja Turbin Gas

Turbin gas pada kondisi ideal memanfaatkan gas bertekanan yang didapat dari udara atmosfer yang dimampatkan dengan menggunakan kompresor pada kondisi *isentropik* (reservibel adiabatik/entropi konstan). Udara yang bertekanan tinggi ini kemudian dibakar di ruang bakar pada keadaan tetap. Dari ruang bakar, gas yang sudah dibakar bersama dengan bahan bakar di ekspansikan ke turbin sebagai penggerak beban generator. Siklus turbin dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.14 Diagram P-V dan T-S Turbin Gas Ideal<sup>28</sup>

Proses 1-2 merupakan proses pemampatan udara secara isentropik dengan menggunakan kompresor, proses 2-3 merupakan pemasukan bahan bakar pada tekanan konstan. Pemasukan bahan bakar ini dilakukan pada *combuster*. Proses 3-4 merupakan proses ekspansi gas hasil pembakaran. Ekspansi gas panas hasil

<sup>27</sup> <http://puballattack.blogspot.com/2014/06/turbin-gas.html>

<sup>28</sup> *Ibid*



pembakaran dilakukan pada turbin. Ekspansi dilakukan dalam kondisi isentropik. Proses 4-1 merupakan proses pemnuangan panas pada tekanan konstan.

## 2.11 Sistem Eksitasi pada Generator Sinkron

Eksitasi atau penguatan medan magnet merupakan bagian yang penting dari sebuah generator sinkron. Tidak hanya untuk menjaga tegangan terminal tetap konstan tetapi juga harus merespon terhadap perubahan beban yang tiba-tiba.

Eksitasi pada generator sinkron adalah pemberian arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor. Sesuai dengan prinsip elektromagnet, apabila suatu konduktor yang berupa kumparan yang dialiri listrik arus searah maka kumparan tersebut akan menjadi magnet sehingga akan menghasilkan fluks-fluks magnet. Apabila kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi diputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan jangkar yang terdapat pada stator akan terinduksi oleh fluks-fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan sehingga akan menghasilkan tegangan bolak-balik. Besarnya tegangan yang dihasilkan tergantung kepada besarnya arus eksitasi dan putaran yang diberikan pada rotor. Semakin besar arus eksitasi dan putaran, maka akan semakin besar tegangan yang dihasilkan oleh sebuah generator.

Sistem ini merupakan sistem yang vital pada proses pembangkitan listrik. Pada perkembangannya, sistem eksitasi pada generator listrik ini dapat dibedakan menjadi 2 macam, yaitu :

1. Sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*)
2. Sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*)

Sistem eksitasi mempunyai berbagai fungsi, antara lain sebagai berikut :

- a. mengatur tegangan keluaran generator agar tetap konstan
- b. mengatur besarnya daya reaktif
- c. menekan kenaikan tegangan pada pelajaran beban

Karena fungsi di atas, maka sistem eksitasi harus mempunyai sifat antara lain :

1. Mudah dikendalikan
2. Sifat pengendalian stabil



3. Memiliki respon yang cepat
4. Tegangan yang dikeluarkan harus sama dengan tegangan yang diinginkan

### 2.11.1 Sistem Eksitasi Dengan Sikat

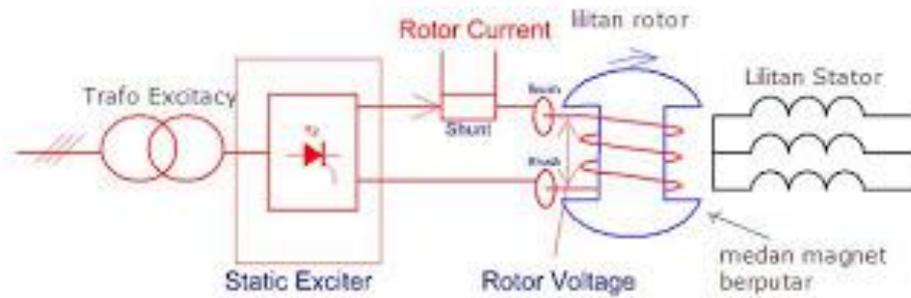
Pada Sistem Eksitasi menggunakan sikat, sumber tenaga listriknya berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan rectifier. Jika menggunakan sumber listrik listrik yang berasal dari generator AC atau menggunakan Permanent Magnet Generator (PMG) medan magnetnya adalah magnet permanent. Dalam lemari penyearah, tegangan listrik arus bolak balik diubah atau disearahkan menjadi tegangan arus searah untuk mengontrol kumparan medan eksiter utama (main exciter). Untuk mengalirkan arus Eksitasi dari main exciter ke rotor generator menggunakan slip ring dan sikat arang, demikian juga penyaluran arus yang berasal dari pilot exciter ke main exciter .

Keuntungan dengan menggunakan sistem Brush Excitation :

- Desain nya tidak rumit karena menggunakan external power.

Kerugian dengan menggunakan sistem Brush Excitation :

- Perlu perawatan dan pemeliharaan pada sikat arang (routine cleaning dan penggantian arang).
- Dapat menimbulkan sparking (percikan api).
- Arus yang dapat dialirkan oleh sikat relatif kecil. Generator kapasitas besar tidak bisa mengalirkan arus eksitasi dengan sikat dan slip ring.
- Terdapat electrical loss yang disebabkan oleh arang.



**Gambar 2.15** Sistem Eksitasi dengan Menggunakan Sikat<sup>29</sup>

### 2.11.2 Prinsip Kerja Sistem Eksitasi Dengan Sikat

Generator penguat yang pertama, adalah generator arus searah hubungan shunt yang menghasilkan arus penguat bagi generator penguat kedua. Generator penguat (exciter) untuk generator sinkron merupakan generator utama yang diambil dayanya.

Pengaturan tegangan pada generator utama dilakukan dengan mengatur besarnya arus Eksitasi (arus penguatan) dengan cara mengatur potensiometer atau tahanan asut. Potensiometer atau tahanan asut mengatur arus penguat generator pertama dan generator penguat kedua menghasilkan arus penguat generator utama. Dengan cara ini arus penguat yang diatur tidak terlalu besar nilainya (dibandingkan dengan arus generator penguat kedua) sehingga kerugian daya pada potensiometer tidak terlalu besar. PMT arus penguat generator utama dilengkapi tahanan yang menampung energi medan magnet generator utama karena jika dilakukan pemutusan arus penguat generator utama harus dibuang ke dalam tahanan.

Sekarang banyak generator arus bolak-balik yang dilengkapi penyearah untuk menghasilkan arus searah yang dapat digunakan bagi penguatan generator utama sehingga penyaluran arus searah bagi penguatan generator utama, oleh generator penguat kedua tidak memerlukan cincin geser karena penyearah ikut berputar bersama poros generator. Cincin geser digunakan untuk menyalurkan arus dari generator penguat pertama ke medan penguat generator penguat kedua.

<sup>29</sup> <http://dunia-listrik.blogspot.com/2009/06/sistem-eksitasi.html>



---

Nilai arus penguatan kecil sehingga penggunaan cincin geser tidak menimbulkan masalah.

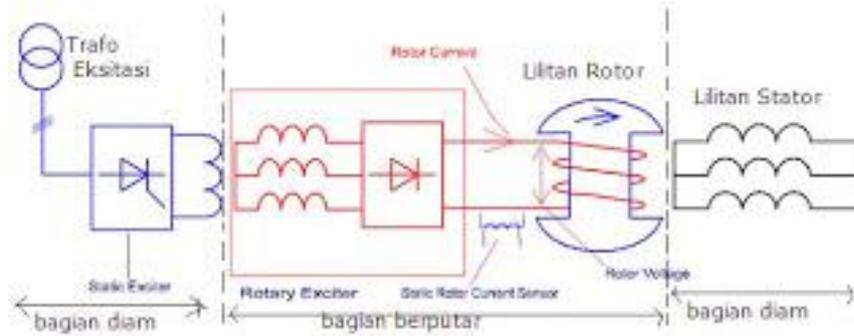
Pengaturan besarnya arus penguatan generator utama dilakukan dengan pengatur tegangan otomatis supaya nilai tegangan klem generator konstan. Perkembangan sistem eksitasi pada generator sinkron dengan sistem eksitasi tanpa sikat, karena sikat dapat menimbulkan loncatan api pada putaran tinggi. Untuk menghilangkan sikat digunakan diode berputar yang dipasang pada jangkar.

### **2.11.3 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat**

Penggunaan sikat atau slip ring untuk menyalurkan arus excitasi ke rotor generator mempunyai kelemahan karena besarnya arus yang mampu dialirkan pada sikat arang relatif kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang, digunakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (brushless excitation).

Keuntungan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (brushless excitation), antara lain adalah:

1. Energi yang diperlukan untuk Eksitasi diperoleh dari poros utama (main shaft), sehingga keandalannya tinggi.
2. Biaya perawatan berkurang karena pada sistem Eksitasi tanpa sikat (brushless excitation) tidak terdapat sikat, komutator dan slip ring.
3. Pada sistem Eksitasi tanpa sikat (brushless excitation) tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada farnish akibat sikat arang.
4. Mengurangi kerusakan ( trouble) akibat udara buruk (bad atmosfere) sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup.
5. Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung terus pada waktu yang lama.
6. Pemutus medan generator (Generator field breaker), field generator dan bus exciter atau kabel tidak diperlukan lagi.
7. Biaya pondasi berkurang, sebab aluran udara dan bus exciter atau kabel tidak memerlukan pondasi.



**Gambar 2.16** Sistem Eksitasi Tanpa Sikat<sup>30</sup>

#### 2.11.4 Prinsip Kerja Sistem Eksitasi Tanpa Sikat

Generator penguat pertama disebut pilot exciter dan generator penguat kedua disebut main exciter (penguat utama). Main exciter adalah generator arus bolak-balik dengan kutub pada statornya. Rotor menghasilkan arus bolak-balik disearahkan dengan dioda yang berputar pada poros main exciter (satu poros dengan generator utama). Arus searah yang dihasilkan oleh dioda berputar menjadi arus penguat generator utama. Pilot exciter pada generator arus bolak-balik dengan rotor berupa kutub magnet permanen yang berputar menginduksi pada lilitan stator. Tegangan bolak-balik disearahkan oleh penyearah dioda dan menghasilkan arus searah yang dialirkan ke kutub-kutub magnet yang ada pada stator main exciter. Besar arus searah yang mengalir ke kutub main exciter diatur oleh pengatur tegangan otomatis (automatic voltage regulator/AVR). Besarnya arus berpengaruh pada besarnya arus yang dihasilkan main exciter, maka besarnya arus main exciter juga mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator utama.

Pada sistem Eksitasi tanpa sikat, permasalahan timbul jika terjadi hubungan singkat atau gangguan hubung tanah di rotor dan jika ada sekering lebur dari dioda berputar yang putus, hal ini harus dapat dideteksi. Gangguan pada rotor yang berputar dapat menimbulkan distorsi medan magnet pada generator utama dan dapat menimbulkan vibrasi (getaran) berlebihan pada unit pembangkit.

<sup>30</sup> <http://dunia-listrik.blogspot.com/2009/06/sistem-eksitasi.html>



---

## 2.12 Automatic Voltage Regulator (AVR)

AVR (automatic voltage regulator) adalah sebuah sistem kelistrikan yang berfungsi untuk menjaga agar tegangan generator tetap konstan dengan kata lain generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu stabil tidak terpengaruh pada perubahan beban yang selalu berubah-ubah, dikarenakan beban sangat mempengaruhi tegangan output generator. Sistem AVR pada pembangkit sangat penting perannya, dikarenakan sebuah generator tidak akan menghasilkan listrik jika didalamnya sistem tidak terdapat AVR.

Prinsip kerja dari AVR adalah mengatur arus penguatan (excitacy) pada exciter. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator, maka AVR akan memperbesar arus penguatan (excitacy) pada exciter. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan (excitacy) pada exciter. Dengan demikian apabila terjadi perubahan tegangan output generator akan dapat distabilkan oleh AVR secara otomatis dikarenakan dilengkapi dengan peralatan seperti alat yang digunakan untuk pembatasan penguat minimum ataupun maximum yang bekerja secara otomatis.

Tegangan yang dihasilkan oleh generator tidak selalu dihasilkan sesuai dengan ratingnya. Tegangan ini dapat turun atau lebih besar tergantung dengan jenis beban dan besarnya beban. Untuk beban induktif, tegangan pada generator dapat turun sehingga perlu menaikkan arus eksitasi yang diberikan, sedangkan untuk beban kapasitif, tegangan yang dihasilkan oleh generator dapat naik sehingga arus eksitasi diturunkan. Untuk menjaga tegangan keluaran generator tetap maka perlu dilakukan penambahan atau pengurangan arus eksitasi. Pengaturan tegangan pada generator agar tegangan keluarannya tetap adalah dengan menggunakan satu rangkaian pengatur tegangan yang terdiri dari beberapa rangkaian yang saling mendukung yang sering disebut dengan Automatic Voltage Regulator (AVR). Jadi tugas utama dari AVR adalah :

- a. Untuk mengatur keluaran tegangan generator
- b. Untuk mengatur arus eksitasi
- c. Untuk mengatur volt/hertz



**Gambar 2.17** *Auto Voltage Regulator*<sup>31</sup>

<sup>31</sup> <https://apiknorfazri.wordpress.com/2015/07/13/avr-automatic-voltage-regulator/>