

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

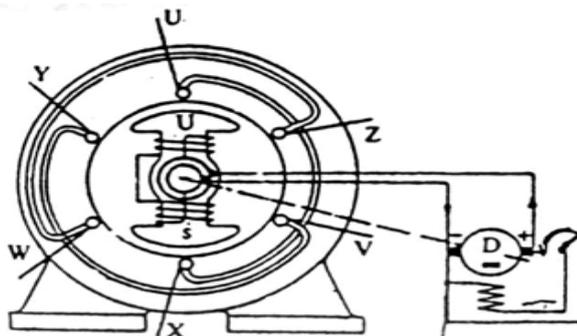
#### 2.1. Umum

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

Pada generator sinkron, konstruksinya 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 flux yang bersifat bolak-balik atau flux putar. Flux putar ini akan memotong-motong kumparan stator timbul gaya gerak listrik karena pengaruh induksi dari flux putar tersebut. Gaya gerak listrik (GGL) yang timbul pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik, atau berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor.

Generator sinkron yang banyak dijumpai di masyarakat adalah generator tiga phase, dalam hal ini ada tiga kelompok atau tiga phase.



Gambar 2.1 Konstruksi Generator Sinkron<sup>1</sup>

<sup>1</sup>, Rijono, Yon. Dasar Teknik Tenaga Listrik. Hal 209

Adapun besar ggl induksi kumparan stator atau ggl induksi armatur per phase adalah:

$$E_{a/ph} = 4,44.f.M. \phi . kd \dots\dots\dots (2.1)^1$$

- Dimana:  $E_a$  = Gaya gerak listrik armatur perphase (volt)  
 $f$  = Frekuensi output generator (Hz)  
 $M$  = Jumlah kumparan per phase  
=  $Z/2$   
 $Z$  = Jumlah konduktor seluruh slot per phase  
 $K_d$  = Faktor distribusi  
 $\phi$  = Flux magnet per kutub per phase.

Sehingga persamaan 2.1 dapat juga ditulis :

$$E_{a/ph} = 4,44.f.\frac{Z}{2} \phi . kd \dots\dots\dots (2.2)^1$$

Medan jangkar merupakan suatu medan putar dengan kecepatan dan arah yang sama (sinkron, serempak) dengan medan utama. Oleh karena itu, generator ini disebut generator sinkron atau generator serempak. Bila putaran jangkar mengalirkan arus jangkar dengan fluksi yang dihasilkan  $\phi_A$  dan kumparan medan  $\phi_F$ , maka dari kedua fluksi tersebut akan berinteraksi membentuk fluksi resultan.

$$\phi_R = \phi_F + \phi_A \dots\dots\dots(2.3)^1$$

Interaksi antara kedua fluksi tersebut disebut reaksi jangkar yang besarnya tergantung jenis beban yang dipikul generator sinkron. Reaksi jangkar bersifat pemagnet ( $X_a$ ) dan juga bersama-sama dengan reaktansi fluksi bocor ( $X_L$ ) sehingga dari kedua reaktansi tersebut adalah merupakan reaktansi sinkron ( $X_S$ ) yaitu :

$$X_S = X_L + X_a \dots\dots\dots (2.4)^2$$

**2.2. Karakteristik Generator Sinkron**

Diantara lengkung-lengkung generator sinkron terpenting dapat disebut

---

<sup>2</sup>, Theraja, B. L. Electrical Technology. Hal 991

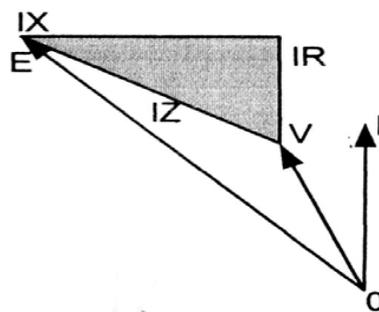
karakteristik tak berbeban, karakteristik hubung singkat, karakteristik luar dan karakteristik pengatur.

**2.2.1. Karakteristik tak berbeban**

Karakteristik tak berbeban dinyatakan dengan rumus :

$$E = E (Im) I = 0 ; n \quad \text{atau} \quad V = V (Im) I = 0 ; n \dots \dots \dots (2.5)^3$$

karakteristik-karakteristik tak berbeban ini dapat dijabarkan dari diagram tegangan yang disederhanakan seperti gambar 2.1



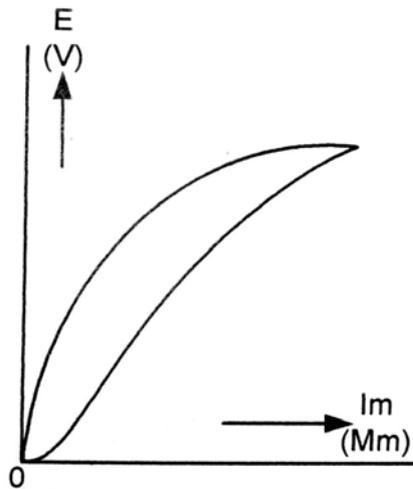
Gambar 2.2 Diagram Tegangan.<sup>3</sup>

Dalam diagram tegangan yang disederhanakan terlihat gaya gerak listrik  $E$ , tegangan apit  $V$ , arus  $I$ , dan besaran-besaran  $IZ$ ,  $IX$ , dan  $IR$ . Selanjutnya diketahui rumus untuk gaya gerak listrik yang berbentuk :

$$E = 4 f_v f_w f \psi \dots \dots \dots (2.6)^4$$

Dari rumus terlihat bahwa nilai  $E$  berbanding lurus dengan Fluks  $\psi$  , yang berarti juga berbanding lurus dengan nilai  $B$  (kerapatan fluks). Jika arus magnet  $Im$  berbanding lurus dengan gaya gerak magnet ( $M$ ), yang berarti berbanding lurus dengan besaran  $H$  (intensitas magnet) melalui jalan tertentu. Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa karakteristik tak berbeban akan merupakan lengkung  $B$ - $H$ , dengan remanensi dan jerat magnetisasi, sebagaimana terlihat pada gambar 2.5. Dimana jerat magnetisasi pada generator sinkron disebabkan oleh remanensi dari rotor.

<sup>3</sup>, Kadir, Abdul. Mesin Sinkron. Hal 100



Gambar 2.3 Kurva Karakteristik tak berbeban.<sup>4</sup>

### 2.2.2. Karakteristik Hubung Singkat

Karakteristik hubung singkat mempunyai rumus berikut :

$$I_{hs} = I_{hs} \text{ (if } V = 0; n \dots \dots \dots \text{ (2.7)}^4$$

Dimana :  $V$  = tegangan terminal

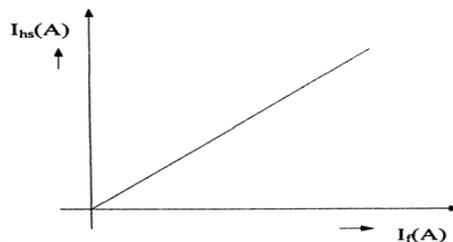
$I_{hs}$  = arus hubung singkat

$I_f$  = arus magnet atau arus medan

$n$  = putaran rotor

kurva hubung singkat dapat diperoleh dengan menghubungkan singkatkan kumparan jangkar melalui sebuah ampere meter dan generator diputar pada putaran sinkron.

Dengan menaikkan  $I_f$ , maka akan didapatkan arus jangkar naik secara linier.



Gambar 2.4 Karakteristik hubung singkat generator sinkron.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Ibid., Hal 101

**2.2.3. Karakteristik Luar**

Karakteristik luar digambarkan oleh rumus :

$$V = V(I) \cos \phi \dots\dots\dots (2.8)^5$$

Kurva karakteristik luar diperoleh dengan membebani generator sinkron secara bertahap pada harga  $I_m$  konstan. Putaran konstan dan  $\cos \phi$  sebagai parameter.

Secara matematis kurva dapat diperoleh dari diagram tegangan yang disederhanakan, yang terlihat pada gambar 2.3

$$E^2 = V^2 + (IZ)^2 + 2 VIZ \cos (\psi_k - \phi) \dots\dots\dots (2.9)^5$$

Atau

$$I = \left(\frac{V}{E}\right)^2 + \left(\frac{I}{E/Z}\right)^2 + 2\left(\frac{V}{E}\right)\left(\frac{I}{E/Z}\right) \cos (\psi_k - \phi) \dots\dots\dots (2.10)^5$$

Persamaan (2.10) adalah tegangan terminal  $V$  sebagai fungsi dari arus beban berupa persamaan kuadrat. Dengan demikian fungsi ini dapat berbentuk lingkaran, garis lurus ataupun elips tergantung nilai parameter.

Untuk :

$E/Z = I_k$ , maka persamaan (2.20) dapat ditulis sebagai berikut:

$$I = \left(\frac{V}{E}\right)^2 + \left(\frac{I}{I_k}\right)^2 + 2\left(\frac{V}{E}\right)\left(\frac{I}{I_k}\right) \cos (\psi_k - \phi) \dots\dots\dots (2.11)^5$$

Dengan mengabaikan tahanan jangkar, sudut antara tegangan dan arus adalah sebesar  $90^0$ , atau  $\pi / 2 = \psi_k$  Bilamana berlaku  $\phi = \psi_k \pi / 2$ , maka:  $\cos (\psi_k - \phi) = \cos 0 = 1$  Dengan demikian persamaan (2.21) menjadi :

$$I = \left(\frac{V}{E}\right)^2 + \left(\frac{I}{I_k}\right)^2 + 2\left(\frac{V}{E}\right)\left(\frac{I}{I_k}\right) \cos (\psi_k - \phi) \dots\dots\dots (2.12)^6$$

Atau

$$\left[\left(\frac{V}{E}\right) + \left(\frac{I}{I_k}\right)\right]^2 = 1 \text{ atau } \left(\frac{V}{E}\right) + \left(\frac{I}{I_k}\right) = \pm 1 \dots\dots\dots (2.13)$$

Sehingga

<sup>5</sup> ^3 Ibid., Hal 105

<sup>6</sup> ^3 Ibid., Hal 106

$$\frac{V}{E} = - \frac{I}{Ik} \pm 1 \dots\dots\dots (2.14)$$

Persamaan (2.24) merupakan dua buah garis lurus salah satunya adalah:

Garis (A) :

$$\frac{V}{E} + \frac{I}{Ik} = 1 \dots\dots\dots (2.15)^7$$

Untuk keadaan tegangan terminal sefasa dengan beban atau  $\phi = 0$ , maka :  $\cos (\psi_k - \phi) = \cos \psi_k$

$$\cos \frac{\pi}{2} = 0$$

$$\left(\frac{V}{E}\right)^2 + \left(\frac{I}{Ik}\right)^2 = 1 \dots\dots\dots (2.16)^7$$

Persamaan (2.26) merupakan sebuah lingkaran, garis B pada gambar 2.7. karena tegangan terminal V dan arus beban I sefasa, maka beban bersifat resistif. Bila beban mempunyai sudut  $\phi = - \pi / 2$  Maka :  $\cos (\psi_k - \phi) = \cos \pi = 1$   
 Persamaan menjadi :

$$\left(\frac{V}{E}\right)^2 + \left(\frac{I}{Ik}\right)^2 - 2\left(\frac{V}{E}\right) + \left(\frac{I}{Ik}\right) \dots\dots\dots (2.17)^8$$

Atau

$$\left(\frac{V}{E}\right) - \left(\frac{I}{Ik}\right) = \pm 1 \dots\dots\dots (2.18)^8$$

Persamaan (2.29) merupakan duah buah garis lurus yang ada pada gambar 2.7 terlihat sebagai :

Garis (C) :  $\left(\frac{V}{E}\right) - \left(\frac{I}{Ik}\right) = 1 \dots\dots\dots (2.19)^8$

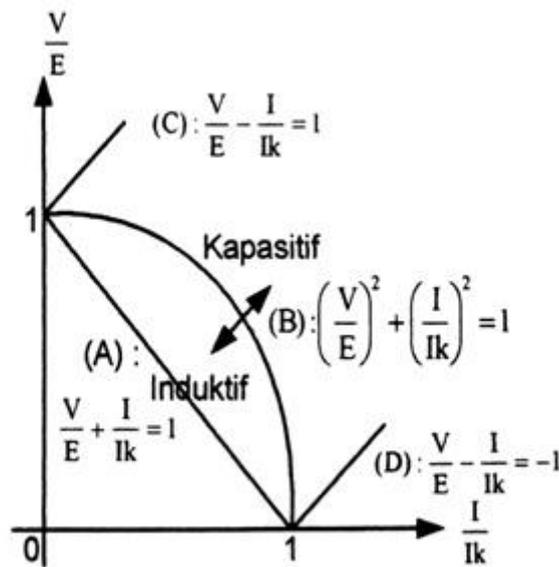
---

<sup>7</sup> ^3 Ibid, Hal 107

Garis (D) :  $\left(\frac{V}{E}\right) - \left(\frac{I}{I_k}\right) = -1$  ..... (2.20)<sup>8</sup>

Untuk situasi lainnya, yaitu untuk nilai dari sudut  $\phi$  antara  $-\pi/2$  dan  $+\pi/2$  yaitu  $-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$

Persamaan (2.31) merupakan suatu ellipsis, sebagaimana terlihat pada gambar 2.7 Untuk satu kuadran.



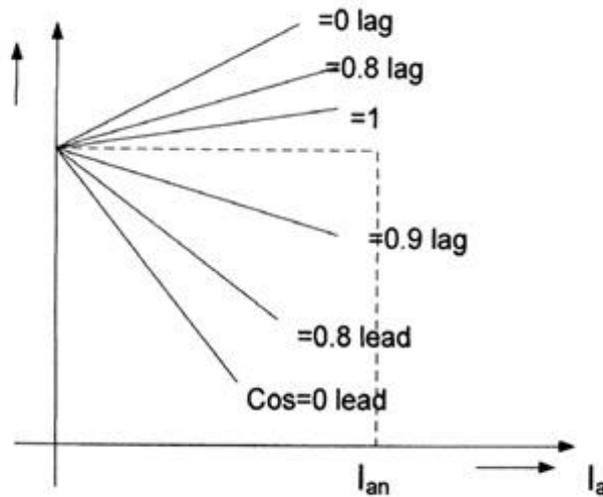
Gambar 2.5 Karakteristik Luar.<sup>8</sup>

**2.2.4. Karakteristik Pengaturan**

$I_f = I_f(I_a) v, \phi$  ..... (2.21)<sup>9</sup>

Kurva karakteristik ini diperoleh dengan membebani generator secara bertahap, pada harga  $I_f$  yang berubah agar tegangan jangkar tetap konstan dan  $\cos \phi$  sebagai parameter. Dari karakteristik pengaturan ini jelaslah bahwa kita menginginkan tegangan yang konstan, kita harus dapat memberikan tambahan ataupun pengurangan arus medan yang sesuai terhadap perubahan arus ataupun perubahan faktor daya dari beban.

<sup>8</sup> ^3 Ibid, Hal 108

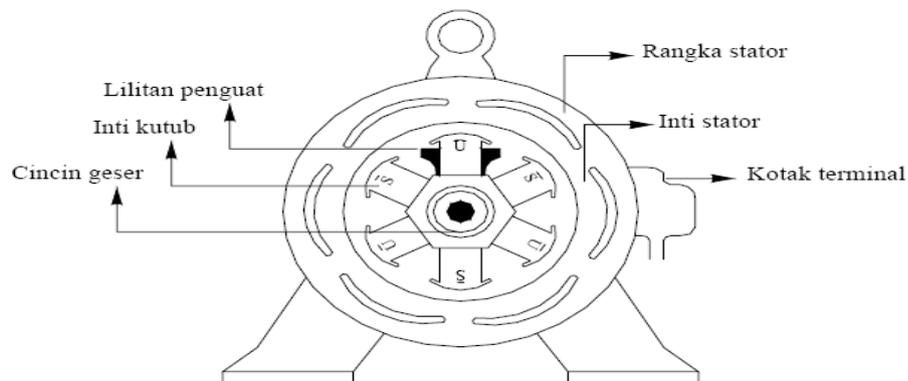


Gambar 2.6. karakteristik pengaturan generator kerja sendiri.<sup>9</sup>

### 2.3. Konstruksi Generator Sinkron.

Generator terdiri dari dua bagian yang paling utama yaitu :

- Bagian yang diam (stator).
- Bagian yang bergerak (rotor).



Gambar 2.7 Konstruksi generator sinkron.<sup>10</sup>

#### 2.3.1. Bagian yang diam (Stator)

Bagian yang diam (stator) terdiri dari beberapa bagian, yaitu:

##### 1. Inti stator.

Bentuk dari inti stator ini berupa cincin laminasi-laminasi yang diikat serapat mungkin untuk menghindari rugi-rugi arus eddy (*eddy current losses*).

<sup>9</sup>, Zuhal. Dasar Teknik Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya. Hal 134

Pada inti ini terdapat slot-slot untuk menempatkan konduktor dan untuk mengatur arah medan magnetnya.

2. Belitan stator.

Bagian stator yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang terdapat di dalam slot-slot dan ujung-ujung kumparan. Masing-masing slot dihubungkan untuk mendapatkan tegangan induksi.

3. Alur stator.

Merupakan bagian stator yang berperan sebagai tempat belitan stator ditempatkan.

4. Rumah stator.

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

### **2.3.2. Bagian yang bergerak (Rotor)**

Rotor adalah bagian generator yang bergerak atau berputar. Antara rotor dan stator dipisahkan oleh celah udara (air gap). Rotor terdiri dari dua bagian umum, yaitu:

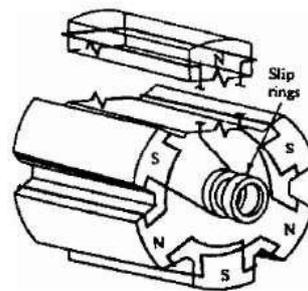
- Inti kutub
- Kumparan medan

Pada bagian inti kutub terdapat poros dan inti rotor yang memiliki fungsi sebagai jalan atau jalur fluks magnet yang dibangkitkan oleh kumparan medan. Pada kumparan medan ini juga terdapat dua bagian, yaitu bagian penghantar sebagai jalur untuk arus pemacuan dan bagian yang diisolasi. Isolasi pada bagian ini harus benar-benar baik dalam hal kekuatan mekanisnya, ketahanannya akan suhu yang tinggi dan ketahanannya terhadap gaya sentrifugal yang besar.

Konstruksi rotor untuk generator yang memiliki nilai putaran relatif tinggi biasanya menggunakan konstruksi rotor dengan kutub silindris atau "cylindrica poles" dan jumlah kutubnya relatif sedikit (2, 4, 6). Konstruksi ini dirancang tahan terhadap gaya-gaya yang lebih besar akibat putaran yang tinggi.

Gambar 2.8 Konstruksi rotor kutub silindris.<sup>10</sup>

Untuk putaran generator yang relatif rendah atau sedang (kurang dari 1000 rpm), dipakai konstruksi rotor dengan kutub menonjol atau "salient pole" dengan jumlah kutub- kutub yang relatif banyak.

Gambar 2.9 Konstruksi generator kutub menonjol.<sup>10</sup>

Pada prinsipnya, salah satu dari penghantar atau kutub-kutub ini dibuat sebagai bagian yang tetap sedangkan bagian-bagian yang lainnya dibuat sebagai bagian yang berputar.

#### 2.4. Prinsip Kerja Generator Sinkron.

Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang akan disuplai oleh arus searah sehingga menimbulkan fluks yang besarnya tetap terhadap waktu. Kemudian penggerak mula (*Prime Mover*) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya sesuai dengan persamaan:

---

<sup>10</sup>, Chapman, Stephen J, "Electric Machinery Fundamentals", hal 194

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \dots\dots\dots (2.22)^{11}$$

dimana:  $n$  = Kecepatan putar rotor (rpm)

$p$  = Jumlah kutub rotor

$f$  = frekuensi (Hz)

Perputaran rotor tersebut sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor akan menginduksikan tegangan tiga fasa pada kumparan jangkar sehingga akan menimbulkan medan putar pada stator. Perputaran tersebut menghasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut.

GGL induksi ( $E_a$ ) pada alternator akan terinduksi pada kumparan jangkar alternator bila rotor diputar di sekitar stator. Besarnya kuat medan pada rotor dapat diatur dengan cara mengatur arus medan ( $I_f$ ) yang diberikan pada rotor. Besarnya GGL induksi ( $E_a$ ) rata-rata yang dihasilkan kumparan jangkar alternator ini dapat dilihat dalam persamaan sebagai berikut:

$$E = 4,44 \times f \cdot \phi \cdot T \dots\dots\dots (2.23)^{11}$$

Jika,  $= \frac{n \cdot p}{120}$ , maka

$$E = 4,44 \times \frac{n \cdot p}{120} \phi \cdot T$$

$$E = \frac{4,44 \cdot n \cdot p \cdot \phi \cdot T}{120}$$

Bila  $C = \frac{4,44 \cdot p \cdot T}{120}$

$$E = Cn\phi \dots\dots\dots (2.24)^{11}$$

dimana :  $E$  = ggl induksi (Volt

$p$  = Jumlah kutub

$n$  = Putaran (rpm)

---

<sup>11</sup>, Basofi. *Studi Pengaruh arus Eksitasi Pada generator sinkron yang bekerja parallel terhadap pengaruh perubahan faktor daya*. Hal 8-9

$\phi$  = Fluks magnetik (weber)

T = banyaknya lilitan /fase =1/2

Z = banyak sisi kumparan

## 2.5. AVR (Automatic Voltage Regulator)

Generator arus bolak-balik dijalankan dengan cara membangkitkan medan magnitnya dengan arus searah. Sistem penguatan digolongkan menurut cara penyediaan tenaganya. Dalam sistem penguatan mesin searah, dipergunakan sebuah generator searah untuk membangkitkan sumber tenaganya. Untuk ini dipakai sebuah penguat (exciter) shunt tunggal atau kombinasi dari penguat utama (main exciter dan pandu (pilot exciter).

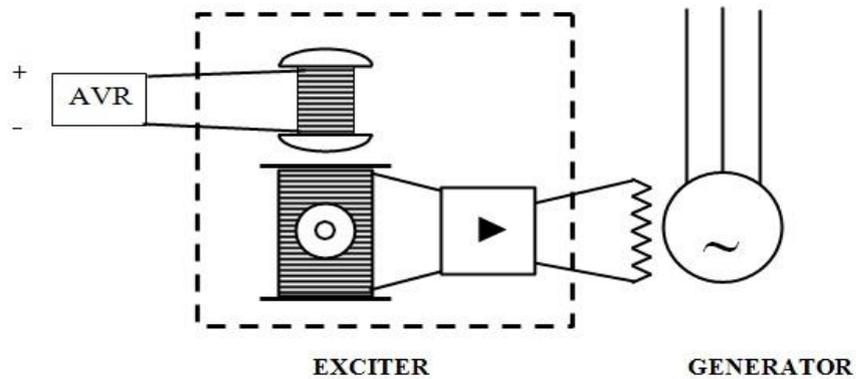
Main exciter adalah generator kecil pembangkit arus searah yang digunakan untuk mensupply arus searah ke kumparan rotor generator sinkron. Pilot exciter adalah generator kecil pembangkit arus searah yang disalurkan ke main exciter sebagai penguat medan main exciter untuk sistem penguatnya. Pilot exciter mempunyai penguat medan sendiri seperti magnet permanent atau baterai.

Generator arus searah tadi dihubungkan langsung pada poros generator utama atau diputar oleh mesin lain yang terpisah, bergantung pada besarnya putaran generator utama, kemampuan penguatan dan bekerjanya sistem kontrol.

Pada sistem eksitasi dengan arus bolak-balik, arusnya disearahkan untuk penguatan. Ada tiga jenis penguatan dengan arus bolak-balik, antara lain :

1. generator arus bolak-balik dengan eksitasi sendiri, dimana sebagian dari daya arus bolak-balik yang dibangkitkan dipergunakan untuk eksitasi.
2. generator arus bolak-balik tanpa sikat, dimana arus bolak-balik dari generator yang dipergunakan sebagai eksitasi disearahkan dengan penyearahan (atau rectifier) pada rotor generator utama, langsung dialirkan pada lilitan penguat magnet tanpa menggunakan slipring.
3. generator arus bolak-balik majemuk (compound) dengan eksitasi sendiri.

### 2.5.1. Prinsip Dasar Exciter



Gambar 2.10 Prinsip Dasar Eksiter.<sup>12</sup>

Pada Generator dengan kapasitas besar, diperlukan arus yang besar untuk kumparan Statornya, sehingga diperlukan AVR dengan kapasitas suplai Arus yang besar pula. Padahal AVR terdiri dari komponen elektronik yang kemampuan arusnya kecil.

Karenanya dibuat sebuah generator kecil agar suplai arus AVR yang kecil menghasilkan arus yang besar pada generator kecil tersebut. Generator kecil tersebut beserta Diode Putar untuk menyearahkan arusnya agar menjadi DC disebut dengan Exciter.

Exciter mempunyai prinsip kerja seperti generator, tetapi konstruksinya berbeda. Pada AVR Rotornya adalah kumparan yang menghasilkan GGL, sedangkan Statornya adalah berupa batangan besi yang diberi lilitan, agar menjadi magnet bila diberi arus DC.

Penguatan medan atau disebut eksitasi adalah pemberian arus listrik untuk membuat kutub magnet pada generator. Dengan mengatur besar kecil arus listrik tersebut, kita dapat mengatur besar tegangan out put generator atau dapat juga mengatur besar daya reaktif yang diinginkan pada generator yang sedang paralel dengan sistem jaringan besar (infinite bus).

<sup>12</sup>, Arismunandar, Hartono.1987.Teknik Tenaga Listrik Jilid I. Hal 82

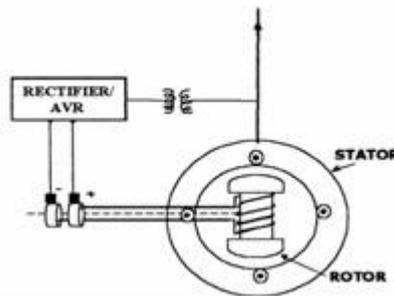
Ada beberapa jenis sistem yaitu :

- Sistem *Excitasi Statik*.
- Sistem *Excitasi Dinamik*

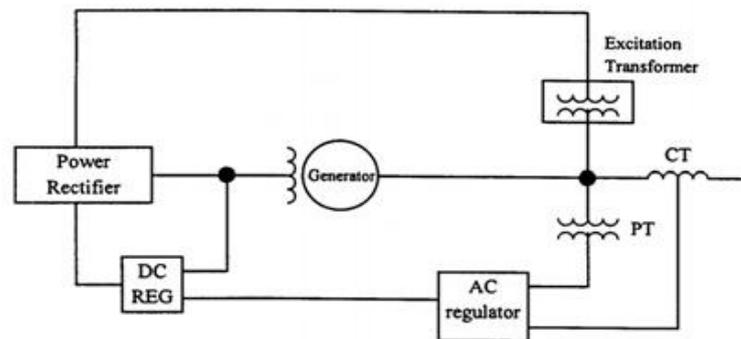
#### a. Excitasi Statik

Sistem Eksitasi Statik adalah sistem eksitasi generator tersebut disuplai dari eksiter yang bukan mesin bergerak, yaitu dari sistem penyearah yang sumbernya disuplai dari output generator itu sendiri atau sumber lain dengan melalui transformator.

Secara prinsip dapat digambarkan sebagai berikut :



(a)



(b)

Gambar 2.11 (a),(b)Prinsip Sistem Excitasi Statik.<sup>13</sup>

Seperti pada gambar diatas dapat kita lihat bahwa suplai daya listrik

<sup>13</sup> , Nurmawati. 2009. *Pengaturan Eksitasi Generator sinkron 3 Phasa 14 MVA/ 11 KV di PLTG Unit 3 Sektor Pembangkit Keramasan*. Hal 21-25

untuk excitasi mengambil dari output generator melalui excitation transformer, kemudian disearahkan melalui power rectifier dan disalurkan ke rotor generator untuk excitasi atau penguat medan dengan melalui sikat arang.

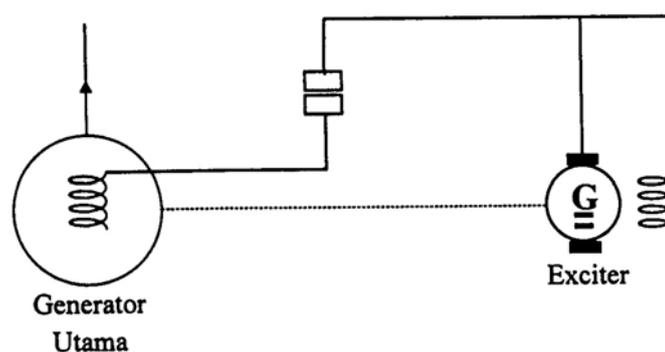
Untuk pengaturan besaran tegangan output generator diatur melalui DC regulator dan AC regulator, sehingga besarnya arus excitasi dapat diatur sesuai kebutuhan. Kemudian apabila generator tersebut pada waktu start awal belum mengeluarkan tegangan, maka untuk suplai arus excitasi biasanya diambil dari baterai.

### b. Excitasi dinamik

Adapun yang dimaksud dengan Sistem Excitasi Dinamik adalah sistem excitasi yang sumber suplai arus excitasi diambil dari mesin yang bergerak, dan mesin yang bergerak tersebut disebut Exciter. Biasanya exciter tersebut sebagai tenaga penggerak dipasang satu poros dengan generator.

Seperti kita ketahui bahwa untuk arus excitasi adalah arus searah, maka sebagai exciternya adalah mesin arus searah (generator DC) atau dapat juga dengan mesin arus bolak-balik (generator AC) kemudian disearahkan dengan rectifier.

Prinsip sistem excitasi dengan menggunakan exciter generator arus searah adalah digambarkan sebagai berikut :

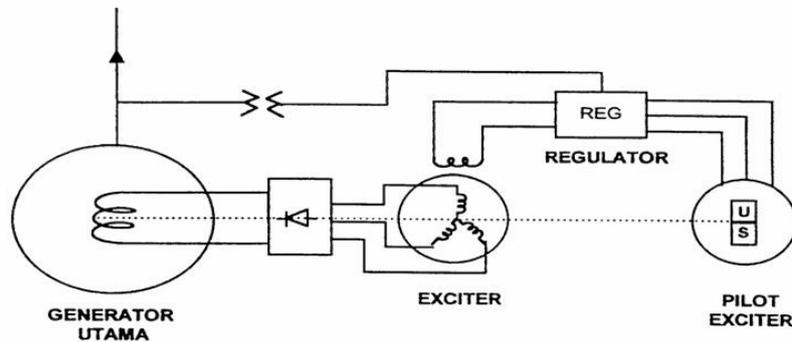


Gambar 2.12 Prinsip Sistem Excitasi Dinamik dengan Exciter Generator DC.<sup>14</sup>

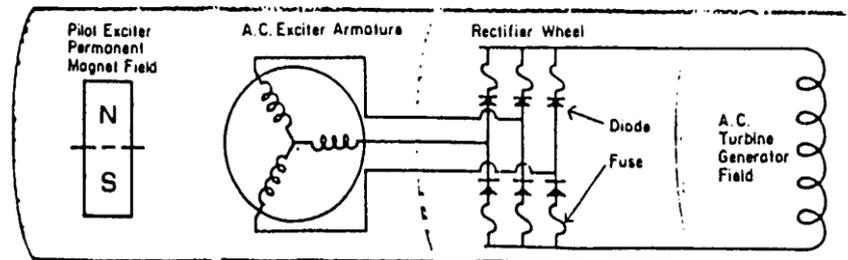
Seperti pada gambar diatas, bahwa sistem excitasi dengan menggunakan exciter generator DC untuk menyalurkan arus excitasi generator utama dengan media sikat arang dan slip ring.serta output arus searah dari generator exciter

melalui sikat arang. Ditinjau dari segi pemeliharaan sistem ini kurang efektif, sehingga mulai dikembangkan dengan sistem excitasi tanpa sikat atau disebut “Brushless Excitation”

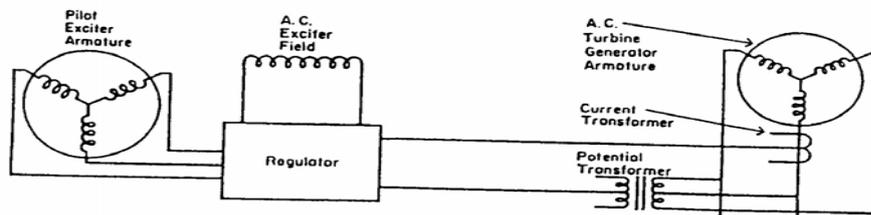
Brushless Excitation adalah sistem excitasi tanpa sikat, yang maksudnya adalah pada sistem tersebut untuk menyalurkan arus eksitasi ke rotor generator utama, maupun untuk eksitasi eksiter tanpa melalui media sikat arang. Adapun diagram prinsip kerjanya adalah sebagai berikut:



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.13. a, b, c Diagram Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (Brushless Excitation)

Pada gambar 2.13 a,b, dan c diatas dapat kita lihat bahwa untuk excitasi generator disuplai dari generator AC exciter dengan melalui penyearah (rectifier wheel) yang terpasang pada poros, sehingga arus excitasi langsung terhubung dengan rotor generator. Kemudian untuk excitasi exciter disuplai dari Pilot Exciter dengan kemagnitan tetap atau biasa disebut PMG (Permanent Magnet Generator).

Output dari pilot exciter tersebut adalah arus bolak balik 3 fasa, kemudian dengan melalui penyearah pada regulator arus eksitasi eksiter diatur besar kecilnya, sehingga dengan mengatur excitasi exciter, maka tegangan output generator utama akan mengalami perubahan secara langsung.

## **2.6. Paralel Generator Sinkron<sup>14</sup>**

Bila suatu generator bekerja dan mendapatkan pembebanan yang melebihi dari kapasitasnya, maka dapat mengakibatkan generator tersebut tidak dapat bekerja atau bahkan akan mengalami kerusakan. Sehingga dalam hal ini dapat diatasi dengan menjalankan generator lain yang kemudian dioperasikan secara paralel dengan generator utama yang telah bekerja sebelumnya pada satu jaringan listrik yang sama. Keuntungan dari dilakukannya paralel alternator ialah:

1. Mendapatkan daya yang lebih besar.
2. Untuk memudahkan penentuan kapasitas generator.
3. Untuk menjamin kontinuitas ketersediaan daya listrik.
4. Untuk melayani beban yang berkembang.

### **2.6.1. Persyaratan Paralel Generator.**

Adapun syarat yang harus dipenuhi dalam melakukan penyinkronan alternator ini ialah :

- Tegangan kedua alternator harus sama

Dimana tegangan generator (yang akan diparalel) dengan tegangan sistem jaringan harus sama besarnya (nilainya). Pengaturan tegangan generator

---

<sup>14</sup>, Basofi. *Studi Pengaruh arus Eksitasi Pada generator sinkron yang bekerja parallel terhadap pengaruh perubahan faktor daya*. Hal 14-18

tersebut harus diatur dengan mengatur arus eksitasinya. Pada saat generator bekerja paralel, perubahan arus eksitasi akan merubah faktor daya,

- Frekuensi kedua alternator harus sama

Frekuensi generator dan frekuensi sistem harus sama. Untuk menyamakannya, maka putaran generator harus diatur, yaitu dengan cara mengatur katup governor (aliran uap masuk turbin).

- Mempunyai urutan dan sudut fasa yang sama

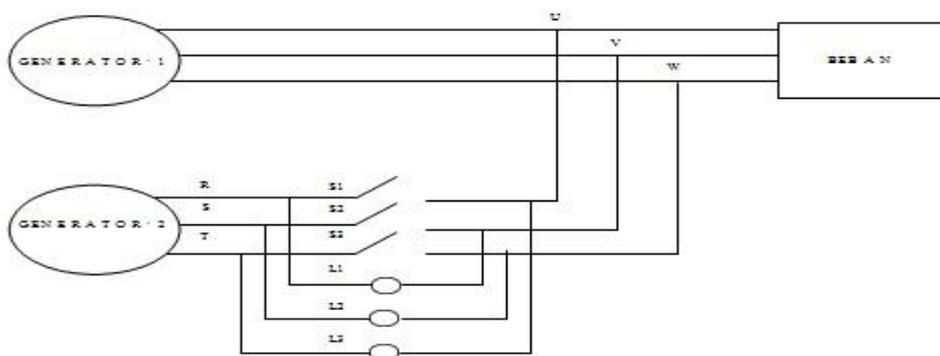
Urutan fasa dan sudut fasa generator sinkron yang akan di paralelkan harus sama, sebab jika adanya perbedaan fasa maka akan tidak dapat dilakukan penyinkronan. Mempunyai sudut fasa yang sama bisa diartikan, kedua fasa dari 2 Generator mempunyai sudut fasa yang berhimpit sama atau 0 derajat. Dengan kata lain urutan fasa dari generator yang diparalelkan harus sama dengan fasa pada sistem (busbar).

### 2.6.2. Metode parallel dua generator sinkron

Dalam memparalelkan generator, metode yang sering digunakan untuk melihat apakah telah terjadi sinkronisasi ialah dengan metode lampu sinkronisasi, dimana fungsi lampu ini sebagai indikator bahwa kedua generator dapat diparalelkan dengan sistem *infinite bus*.

Ada beberapa metode lampu sinkronisasi yang dapat digunakan untuk mengetahui keadaan telah sinkron pada pengoperasian paralel antar generator sinkron yaitu

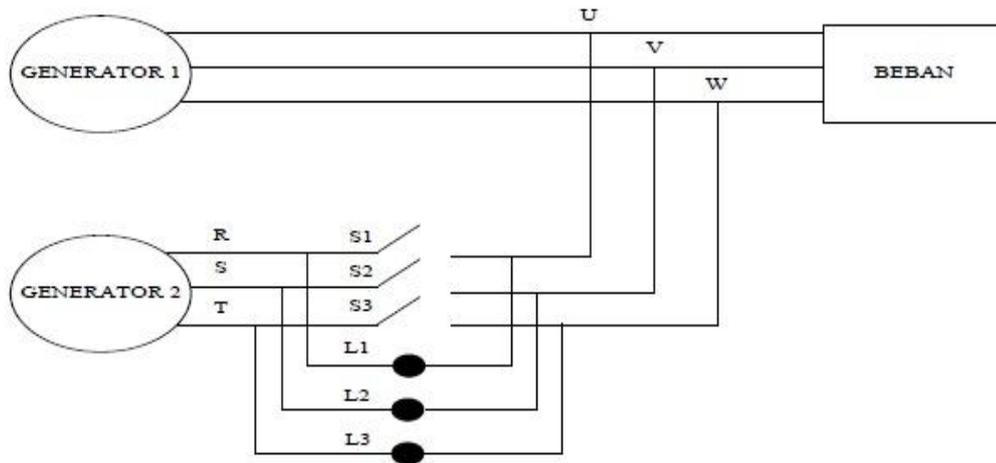
- **Metode Lampu Sinkronisasi Hubungan Terang**



Gambar 2.14 Metode lampu sinkronisasi hubungan terang.

Dalam metode ini, prinsipnya ialah menghubungkan antara ketiga fasa, yaitu R dengan V, S dengan W, T dengan U seperti yang terlihat pada gambar diatas. Jika antara fasa terdapat beda tegangan maka ketiga lampu akan menyala sama terang dan generator siap untuk diparalel.

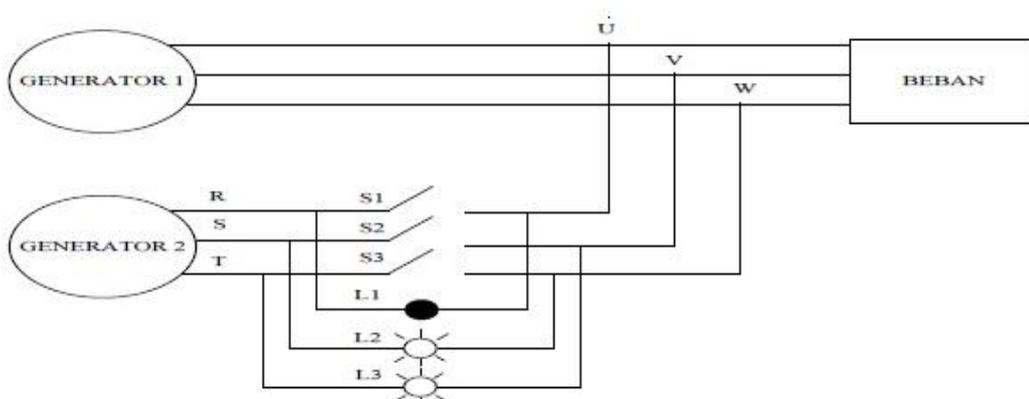
- **Metode Lampu Sinkronisasi Hubungan Gelap**



Gambar 2.15 Metode lampu sinkronisasi hubungan gelap.

Dalam metode ini, prinsipnya ialah menghubungkan antara ketiga fasa, yaitu R dengan U, S dengan V, T dengan W seperti yang terlihat pada gambar diatas. Jika rangkaian paralel benar (urutan fasa nya sama) maka lampu L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> dan L<sub>3</sub> akan gelap secara bersamaan. Pada saat lampu nyala terang maka beda phasanya besar, dan jika lampunya redup maka beda phasanya kecil.

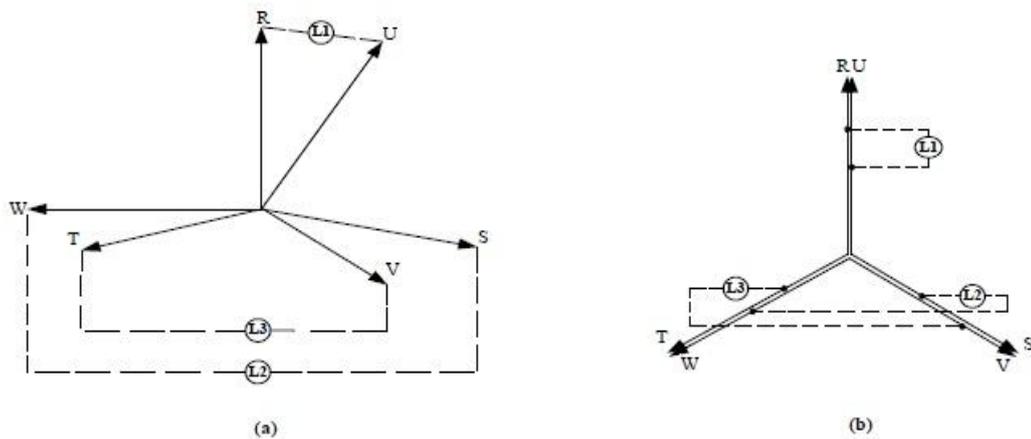
- **Metode Lampu Sinkronisasi Hubungan Gelap Terang**



Gambar 2.16 Metode lampu sinkronisasi hubungan gelap terang.

Dalam metode ini, Prinsipnya ialah dengan menghubungkan satu fasa sama dan dua fasa yang berlainan, yaitu fasa R dengan U, fasa S dengan W dan fasa T dengan V seperti satu lampu gelap dan dua lampu lainnya terang. Dengan kata lain, jika rangkaian paralel benar (urutan fasa nya sama), maka lampu  $L_1$ ,  $L_2$  dan  $L_3$  akan terang gelap dengan frekuensi  $F_{G1}-F_{G2}$ . Apabila ketiga lampu sudah tidak berkedip lagi ( $L_2$  dan  $L_3$  terang) dan lampu  $L_1$  padam berarti  $F_{G1}=F_{G2}$  dan  $E_1=E_2$ .

Dalam metode penyinkronan pada kedua generator ini menggunakan lampu sinkronisasi, bila keadaan tegangan dan putaran tiap generator dengan urutan fasa jaringan busbar dengan generator belum sama, maka kondisi lampu  $L_1$ ,  $L_2$  dan  $L_3$  akan berputar cepat yang menandakan fasa tiap generator belum sama seperti pada gambar 2.14.a. Namun jika frekuensi dan tegangan masing-masing generator telah sama maka kondisi lampu akan semakin lambat berputar dan kondisi  $L_1$  padam dan kondisi  $L_2$  dan  $L_3$  terang karena semua urutan fasa jaringan dengan urutan fasa generator telah saling berhimpit sehingga dikatakan telah sinkron seperti pada gambar 2.14.b. Hal ini dapat dilihat pada gambar berikut:



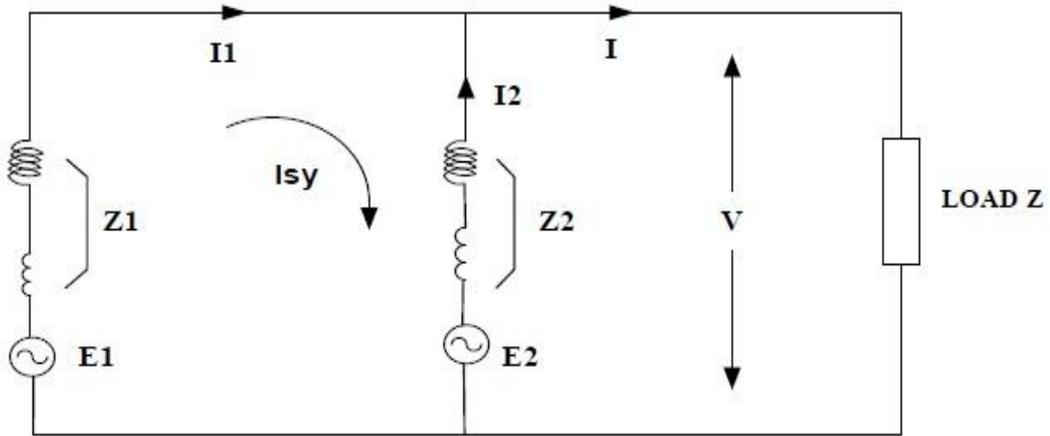
Gambar 2.17 Kondisi lampu sinkronisasi pada urutan fasa.

### 2.7. Pembagian Beban Pada Generator Sinkron Yang Bekerja Paralel.

Seperti kita ketahui bahwa generator sinkron bila dibebani akan memberikan sifat yang berbeda, tergantung jenis beban yang diberikan, misalkan beban resistif, induktif dan kapasitif atau kombinasi dari jenis-jenis beban

tersebut.

Dua alternator identik terhubung secara paralel seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 2.18 Rangkaian generator paralel yang berbeban.<sup>15</sup>

Bila kedua generator yang bekerja paralel, maka tegangan terminal V adalah

$$\bar{V} = \bar{E}_1 - \bar{I}_1 \bar{Z}_1 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 \bar{Z}_2 \dots\dots\dots(2.25)$$

$$\bar{V} = \bar{I} \bar{Z} \dots\dots\dots(2.26)$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \dots\dots\dots(2.27)$$

Sehingga,

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}_1 - \bar{V}}{\bar{Z}_1} \dots\dots\dots(2.28)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_2 - \bar{V}}{\bar{Z}_2} \dots\dots\dots(2.29)$$

$$\bar{V} = \frac{\bar{E}_1 + \bar{E}_2}{2} \dots\dots\dots(2.30)$$

<sup>15</sup>, Basofi. 2014. *Studi Pengaruh arus Eksitasi Pada generator sinkron yang bekerja parallel terhadap pengaruh perubahan faktor daya*. Hal 18

Dimana:  $V$  = tegangan

$I$  = Arus beban

$Z$  = Impedansi

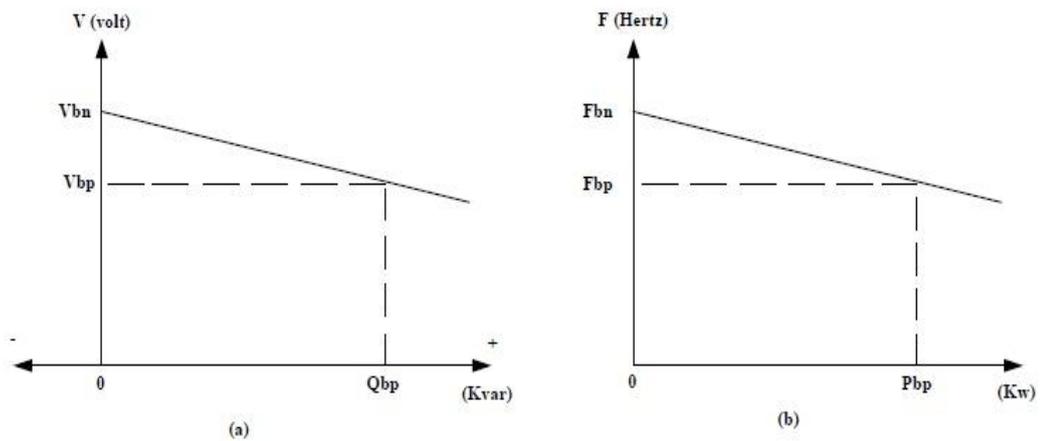
$I_{12}$  = Arus generator

**2.8. Sistem Kerja Paralel Generator Sinkron.**

Apabila generator dihubungkan dengan sistem jaringan yang kapasitasnya besar (*infinite bus*), maka dengan mengatur putaran ( $n$ ) dan arus eksitasi ( $I_f$ ) maka tidak akan mempengaruhi frekuensi sistem jaringan tersebut

Pada kondisi tersebut pengaturan putaran adalah hanya mengatur pembebanan daya aktif sedangkan pengaturan arus eksitasi hanya mengatur aliran daya reaktif atau faktor daya generator tersebut.

Dalam hal ini dapat lebih diperjelas melalui diagram rumah (*house diagram*) berikut :



Gambar 2.19 Karakteristik alternator pada saat bekerja paralel.<sup>17</sup>

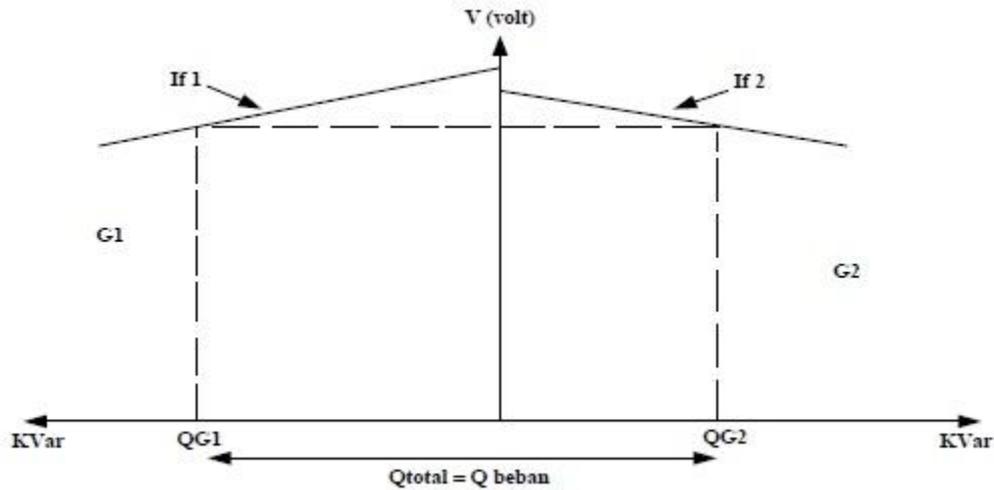
Untuk menyuplai beban yang ada pada kedua generator yang bekerja paralel, maka jumlah daya aktif dan reaktif yang disuplai generator tersebut harus sama dengan daya aktif dan reaktif yang ada pada beban.

Adapun rumus daya aktif dan reaktif yang harus disuplai oleh kedua generator adalah:

$$P_{Load} = P_{G1} + P_{G2} \dots \dots \dots (2.31)$$

$$Q_{Load} = Q_{G1} + Q_{G2} \dots \dots \dots (2.32)$$

Dibawah ini merupakan gambar diagram daya reaktif dan tegangan yang menunjukkan dua alternator yang bekerja adalah sebagai berikut :



Gambar 2.20 Diagram daya reaktif dan tegangan.<sup>16</sup>

### 2.9. Faktor Daya.<sup>17</sup>

Faktor daya yang sering disebut sebagai  $\cos \phi$  didefinisikan sebagai perbandingan daya aktif (kW) dan daya semu (kVA). Atau sebagai perbandingan antara arus yang dapat menghasilkan kerja didalam suatu rangkaian terhadap arus total yang masuk kedalam rangkaian. Adanya nilai faktor daya pada sistem tegangan AC disebabkan adanya beban yang mengalir dan nilainya bergantung oleh karakteristik beban tersebut.

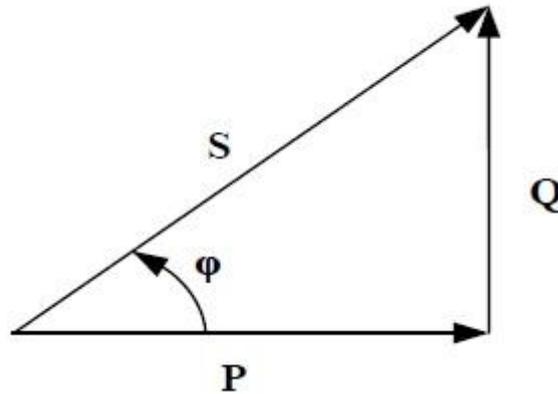
$$\text{Faktor daya} = \cos \theta = \frac{P (w)}{S (VA)} \dots\dots\dots(2.33)$$

Dimana : P = Daya aktif ( Watt )

S = Daya semu (Volt Ampere)

<sup>16</sup> , Basofi. *Studi Pengaruh arus Eksitasi Pada generator sinkron yang bekerja parallel terhadap pengaruh perubahan faktor daya.* Hal 19

<sup>17</sup> , Mohamad Ramadhani. *Rangkaian Listrik.* 2008 Hal 273.



Gambar 2.20 Segitiga daya.

Faktor daya mempunyai pengertian sebagai besaran yang menunjukkan seberapa efisien jaringan yang dimiliki dalam menyalurkan daya yang bisa dimanfaatkan. Faktor daya rendah juga merugikan karena mengakibatkan arus beban akan menjadi lebih tinggi.

Daya reaktif yang tinggi mengakibatkan meningkatnya sudut segitiga daya sehingga menghasilkan faktor daya rendah, begitu juga sebaliknya.

Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energy listrik yang digunakan untuk melakukan usaha. Untuk penggunaan sistem arus AC tiga fasa, dikenal 3 daya yaitu:

**2.9.1. Daya semu (*apparent power*)**

Daya semu dikatakan daya total dari kapasitas daya maksimal generator atau dapat diartikan sebagai penjumlahan daya aktif dan daya reaktif

$$S = V \times I \text{ (VA)} \dots\dots\dots(2.34)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots(2.35)$$

**2.9.2. Daya aktif (*Active Power*)**

Daya aktif disebut juga daya nyata memiliki satuan Watt yang mempunyai pengertian merupakan daya yang terpakai untuk melakukan energy sebenarnya. Daya ini sering digunakan secara umum oleh konsumen dan sebagai satuan yang digunakan untuk daya listrik dan dikonversikan dalam bentuk kerja.



Dimana dalam perhitungan phasa :

$$P = V \times I \times \cos \phi (1 \text{ Fasa}) \dots \dots \dots (2.36)$$

$$P = \sqrt{3} V \times I \times \cos \phi (3 \text{ Fasa}) \dots \dots \dots (2.37)$$

### **2.9.3. Daya Reaktif (*reactive power*)**

Daya reaktif dengan satuan VAR, memiliki pengertian daya yang disuplai oleh komponen reaktif, atau disebut juga jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet.

Dimana dalam perhitungan phasa :

$$Q = V \times I \times \sin \phi (1 \text{ Fasa}) \dots \dots \dots (2.38)$$

$$Q = \sqrt{3} V \times I \times \sin \phi (3 \text{ Fasa}) \dots \dots \dots (2.39)$$