

BAB 13

GENERATOR SINKRON

13.1 Pendahuluan

Sebagian besar energi listrik yang dipergunakan oleh konsumen untuk kebutuhan sehari-hari dihasilkan oleh generator sinkron phasa banyak (*polyphase*) yang ada di pusat pembangkit tenaga listrik. Generator sinkron yang dipergunakan ini mempunyai rating daya dari ratusan sampai ribuan mega Volt Ampere (MVA).

Disebut mesin sinkron, karena bekerja pada kecepatan dan frekuensi konstan di bawah kondisi "Steady state". Mesin sinkron bisa dioperasikan baik sebagai generator maupun motor. Mesin sinkron bila difungsikan sebagai motor berputar dalam kecepatan konstan. Apabila dikehendaki kecepatan yang bersifat variabel, maka motor sinkron dilengkapi dengan dengan pengubah frekuensi seperti *Inverter* atau *Cyclo-converter*.

Sebagai generator, beberapa mesin sinkron sering dioperasikan secara paralel, seperti di pusat-pusat pembangkit. Adapun tujuan dari paralel generator adalah menambah daya pasokan dari pembangkit yang dibebankan ke masing-masing generator yang dikirimkan ke beban.

Ada dua struktur medan magnet pada mesin sinkron yang merupakan dasar kerja dari mesin tersebut, yaitu *kumparan yang mengalirkan penguatan DC* dan *sebuah jangkar tempat dibangkitkannya ggl arus bolak-balik*. Hampir semua Mesin Sinkron mempunyai jangkar diam sebagai stator dan medan magnet berputar sebagai rotor. Kumparan DC pada medan magnet yang berputar dihubungkan pada sumber listrik DC luar melalui slipring dan sikat arang, tetapi ada juga yang tidak mempergunakan sikat arang disebut *brushless excitation*.

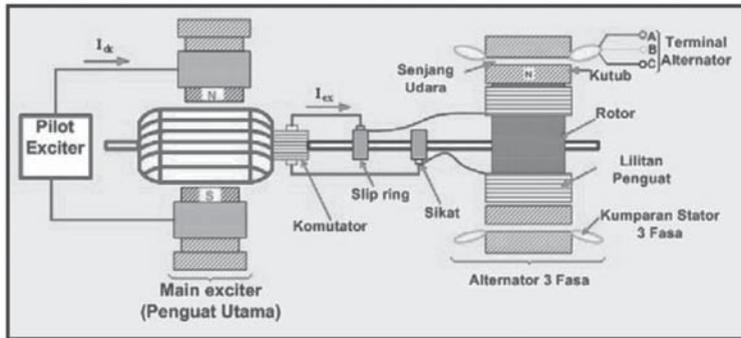
13.2 Konstruksi Mesin Sinkron

Ada dua struktur medan magnet pada mesin sinkron yang merupakan dasar kerja dari mesin tersebut, yaitu *kumparan yang mengalirkan penguatan DC* dan *sebuah jangkar tempat dibangkitkannya ggl arus bolak-balik*. Hampir semua mesin sinkron mempunyai belitan ggl berupa stator yang diam dan struktur medan magnet berputar sebagai rotor. Kumparan DC pada struktur medan yang berputar dihubungkan pada sumber luar melalui slipring dan sikat arang, tetapi ada juga yang tidak mempergunakan sikat arang yaitu sistem *brushless excitation*. Konstruksi dari sebuah Mesin Sinkron secara garis besar sebagai berikut.

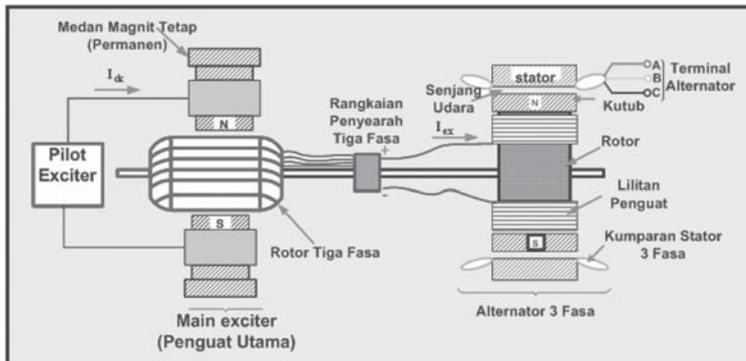
13.2.1 Bentuk Penguatan

Seperti telah diuraikan di atas, bahwa untuk membangkitkan flux magnetik diperlukan penguatan DC. Penguatan DC ini bisa diperoleh dari generator DC penguatan sendiri yang seporos dengan rotor mesin sinkron.

Pada mesin sinkron dengan kecepatan rendah, tetapi rating daya yang besar, seperti generator *hydroelectric*, maka generator DC yang digunakan tidak dengan penguatan sendiri, tetapi dengan *pilot exciter* sebagai penguatan atau menggunakan magnet permanen.



Gambar 13.1 Generator sinkron tiga fase dengan penguatan generator DC *Pilot Exciter*.



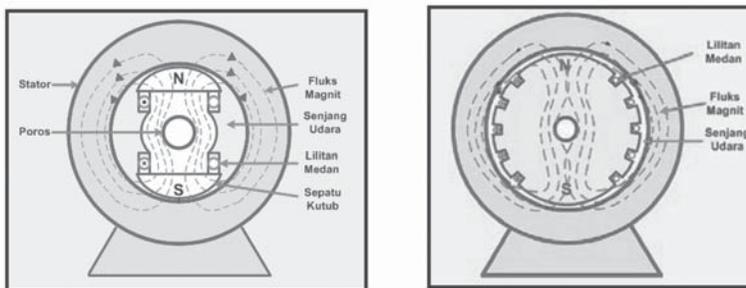
Gambar 13.2 Generator sinkron tiga fase dengan sistem penguatan *brushless exciter system*.

Alternatif lainnya untuk penguatan eksitasi adalah menggunakan Diode silikon dan Thyristor. Dua tipe sistem penguatan "Solid state" sebagai berikut.

- Sistem statis yang menggunakan Diode atau Thyristor statis, dan arus dialirkan ke rotor melalui Slipring.
- *Brushless system*, pada sistem ini penyearah dipasang di poros yang berputar dengan rotor, sehingga tidak dibutuhkan sikat arang dan slipring.

13.2.2 Bentuk Rotor

Untuk medan rotor yang digunakan tergantung pada kecepatan mesin, mesin dengan kecepatan tinggi seperti turbo generator mempunyai bentuk silinder **Gambar 13.3a**, sedangkan mesin dengan kecepatan rendah seperti *hydroelectric* atau generator listrik diesel mempunyai rotor kutub menonjol **Gambar 13.3b**.



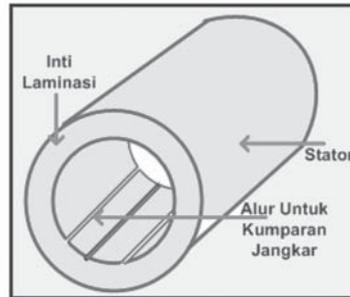
(a) Rotor kutub menonjol

(b) Rotor kutub silinder

Gambar 13.3 Bentuk rotor

13.2.3 Bentuk Stator

Stator dari mesin sinkron terbuat dari bahan ferromagnetik yang berbentuk laminasi untuk mengurangi rugi-rugi arus pusar. Dengan inti ferromagnetik yang bagus berarti permeabilitas dan resistivitas dari bahan tinggi.



Gambar 13.4 Inti stator dan alur pada stator

Gambar 13.4 memperlihatkan alur stator tempat kumparan jangkar. Belitan jangkar (stator) yang umum digunakan oleh mesin sinkron tiga fasa, ada dua tipe yaitu:

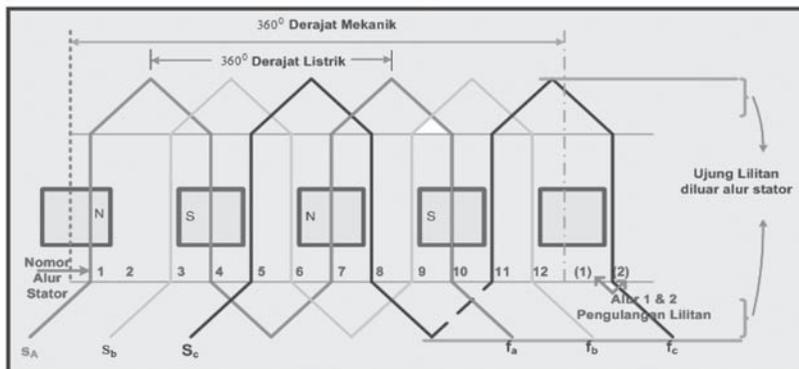
- Belitan satu lapis (*Single Layer Winding*).
- Belitan berlapis ganda (*Double Layer Winding*).

13.2.4 Belitan Stator Satu Lapis

Gambar 13.5 memperlihatkan belitan satu lapis karena hanya ada satu sisi lilitan didalam 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 mekanis, satu siklus ggl penuh akan dihasilkan bila rotor dengan 4 kutub berputar 180 derajat mekanis. Satu siklus ggl penuh menunjukkan 360 derajat listrik, adapun hubungan antara sudut rotor mekanis α_{mek} dan sudut listrik α_{lis} , adalah:

$$\alpha_{lis} = \frac{P}{2} \alpha_{mek}$$



Gambar 13.5 Belitan satu lapis generator sinkron tiga fasa

Contoh:

Sebuah generator sinkron mempunyai 12 kutub. Berapa sudut mekanis ditunjukkan dengan 180 derajat listrik?

Jawaban:

Sudut mekanis antara kutub utara dan kutub selatan adalah:

$$\alpha_{mek} = \frac{360 \text{ sudut mekanis}}{12 \text{ kutub}} = 30^\circ$$

Ini menunjukkan 180 derajat listrik:

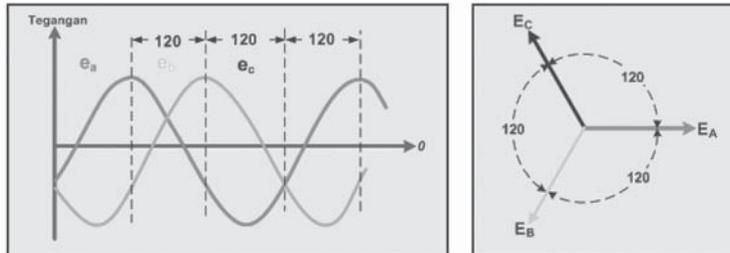
$$\begin{aligned} \alpha_{lis} &= \frac{P}{2} \alpha_{mek} \\ &= \frac{12}{2} \times 30^\circ = 180^\circ \end{aligned}$$

Untuk menunjukkan arah dari putaran rotor **Gambar 13.6** (searah jarum jam), urutan fasa yang dihasilkan oleh suplai tiga fasa adalah ABC, dengan demikian tegangan maksimum pertama terjadi dalam fasa A, diikuti fasa B, dan kemudian fasa C.

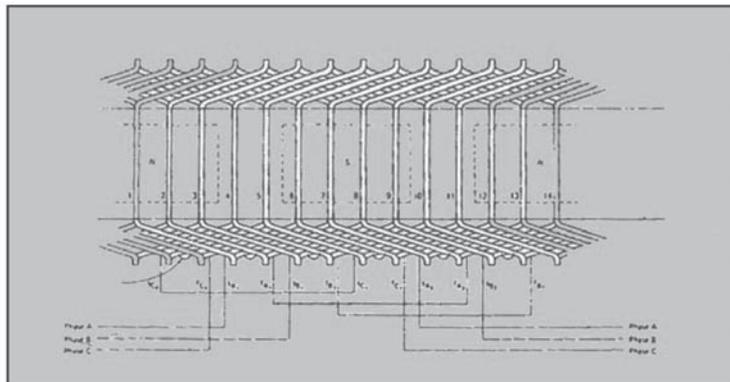
Kebalikan arah putaran dihasilkan dalam urutan ACB, atau urutan fasa negatif, sedangkan urutan fasa ABC disebut urutan fasa positif.

Jadi ggl yang dibangkitkan sistem tiga fasa secara simetris adalah:

$$\begin{aligned} E_A &= E_A \angle 0^\circ \text{ Volt} \\ E_B &= E_B \angle -120^\circ \text{ Volt} \\ E_C &= E_C \angle -240^\circ \text{ Volt} \end{aligned}$$



Gambar 13.6 Urutan fasa ABC



Gambar 13.7 Belitan berlapis ganda generator sinkron tiga fasa

13.2.5 Belitan Berlapis Ganda

Kumpulan jangkar yang diperlihatkan pada **Gambar 13.5** hanya mempunyai satu lilitan per kutub per fasa, akibatnya masing-masing kumpulan 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 flux 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. **Gambar 13.7** 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*.

13.2.6 Faktor Distribusi

Seperti telah dijelaskan diatas bahwa sebuah kumparan terdiri dari sejumlah lilitan yang ditempatkan dalam alur secara terpisah. Sehingga, ggl pada terminal menjadi lebih kecil bila dibandingkan dengan kumparan yang telah dipusatkan. Suatu faktor yang harus dikalikan dengan ggl dari sebuah kumparan distribusi untuk menghasilkan total ggl yang dibangkitkan disebut faktor distribusi K_d untuk kumparan. Faktor ini selalu lebih kecil dari satu.

Diasumsikan ada n alur per fasa per kutub, jarak antara alur dalam derajat listrik, adalah:

$$\psi = \frac{180 \text{ derajat listrik}}{n \times m} \quad \text{di mana } m \text{ menyatakan jumlah fasa.}$$

Perhatikan Gambar 13.8, di sini diperlihatkan ggl yang diinduksikan dalam alur 2 akan tertinggal (*lagging*) dari ggl yang dibangkitkan dalam alur 1 sebesar $\psi = 15$ derajat listrik, demikian pula ggl yang diinduksikan dalam alur 3 akan tertinggal 2ψ derajat, dan seterusnya. Semua ggl ini ditunjukkan masing-masing oleh phasor $E_1, E_2, E_3,$ dan E_4 . Total ggl stator per fasa E adalah jumlah dari seluruh vektor.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$$

Total ggl stator E lebih kecil dibandingkan jumlah aljabar dari ggl lilitan oleh faktor.

$$K_d = \frac{\text{Jumlah Vektor}}{\text{Jumlah Aljabar}} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4}{4 \times E_{\text{lilitan}}}$$

K_d adalah faktor distribusi, dan bisa dinyatakan dengan persamaan:

$$K_d = \frac{\sin(1/2n\psi)}{n\sin(\psi/2)}$$

Keuntungan dari kumparan distribusi, adalah memperbaiki bentuk gelombang tegangan yang dibangkitkan, seperti terlihat pada **Gambar 13.9**.

13.2.7 Faktor Kisar

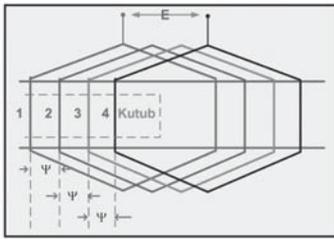
Gambar 13.10, memperlihatkan bentuk kisar dari sebuah kumparan, bila sisi lilitan diletakkan dalam alur 1 dan 7 disebut kisar penuh, sedangkan bila diletakkan dalam alur 1 dan 6 disebut kisar pendek, karena ini sama dengan 5/6 kisar kutub.

Kisar: $5/6 = 5/6 \times 180 \text{ derajat} = 150 \text{ derajat}$

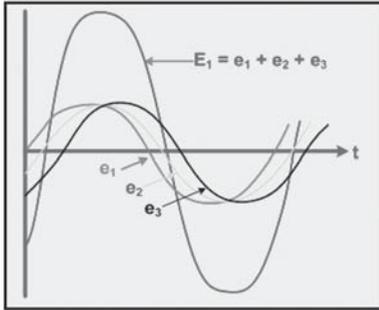
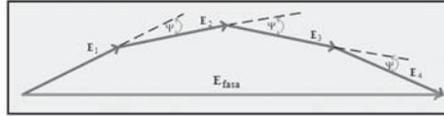
$1/6 = 1/6 \times 180 \text{ derajat} = 30 \text{ derajat}$.

Kisar pendek sering digunakan, karena mempunyai beberapa keuntungan, di antaranya:

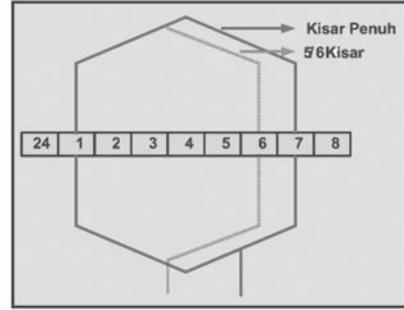
- Menghemat tembaga yang digunakan.
- Memperbaiki bentuk gelombang dari tegangan yang dibangkitkan.
- Kerugian arus pusar dan Hysterisis dikurangi.



Gambar 13.8 Diagram phasor dari tegangan induksi lilitan



Gambar 13.9 Total ggl E_t dari tiga ggl sinusoidal



Gambar 13.10 Kisar kumparan

$$\text{Faktor Kisar} = \frac{\text{Jumlah Vektor ggl induksi lili tan}}{\text{Jumlah Aljabar ggl induksi lili tan}} = K_p$$

EL ggl yang diinduksikan pada masing-masing lilitan, bila lilitan merupakan kisar penuh, maka total induksi = 2 EL (**Gambar 13.11**).

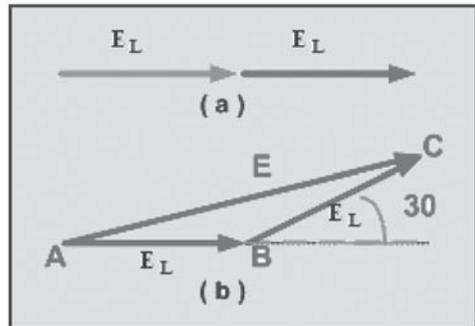
Kisar pendek dengan sudut 30 derajat listrik, seperti diperlihatkan pada **Gambar 13.8b**, maka tegangan resultannya adalah:

$$E = 2 EL \cdot \cos 30/2$$

$$K_p = \frac{E}{2 \cdot EL} = \frac{2 \cdot EL \cdot \cos 30/2}{2 \cdot EL} = \cos 15^\circ$$

$$\begin{aligned} \text{Atau } K_p &= \cos \frac{30}{2} = \cos \frac{\alpha}{2} \\ &= \sin \frac{p^\circ}{2} \end{aligned}$$

di mana p° adalah kisar kumparan dalam derajat listrik.



Gambar 13.11 Vektor tegangan lilitan

13.2.8 Gaya Gerak Listrik Kumparan

Pada Subbab sebelumnya telah dibahas mengenai frekuensi dan besarnya tegangan masing-masing fasa secara umum. Untuk lebih mendekati nilai ggl sebenarnya yang terjadi maka harus diperhatikan faktor distribusi dan faktor kisar.

Apabila Z = Jumlah penghantar atau sisi lilitan dalam seri/fasa = 2T, dan T = Jumlah lilitan per Fasa maka:

$$d\phi = \phi P \text{ dan } dt = \frac{60}{N} \text{ detik}$$

Ggl induksi rata-rata per penghantar:

$$\begin{aligned} E &= \frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi \cdot P}{60/N} \\ &= \frac{\phi \cdot N \cdot P}{60} \text{ Volt} \end{aligned}$$

$$\text{Sedangkan } f = \frac{P \cdot N}{120} \text{ atau } N = \frac{120 \cdot f}{P}$$

Sehingga Ggl induksi rata-rata per penghantar menjadi:

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{\phi \cdot P}{60} \times \frac{120 \cdot f}{P} \\ &= 2 \cdot f \cdot \phi \text{ Volt} \end{aligned}$$

bila ada Z penghantar dalam seri/fasa maka: ggl rata-rata/fasa

$$= 2 \cdot f \cdot \phi \cdot Z \text{ Volt}$$

$$= 2 \cdot f \cdot \phi \cdot (2T)$$

$$= 4 \cdot f \cdot \phi \cdot T \text{ Volt}$$

$$\begin{aligned} \text{Ggl efektif/Fasa} &= 1,11 \times 4 \cdot f \cdot \phi \cdot T \\ &= 4,44 \times f \cdot \phi \cdot T \text{ Volt} \end{aligned}$$

bila faktor distribusi dan faktor kisar dimasukkan maka ggl efektif/fasa

$$E = 4,44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot f \cdot \phi \cdot T \text{ Volt}$$

13.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Kecepatan rotor dan frekuensi dari tegangan yang dibangkitkan berbanding secara langsung. **Gambar 13.22** memperlihatkan prinsip kerja dari sebuah generator AC dengan dua kutub, dan dimisalkan hanya memiliki satu lilitan yang terbuat dari dua penghantar secara seri, yaitu penghantar a dan a'.

Lilitan seperti ini disebut *Lilitan terpusat*, dalam generator sebenarnya terdiri dari banyak lilitan dalam masing-masing Fasa yang terdistribusi pada masing-masing alur stator dan disebut *Lilitan terdistribusi*.

Diasumsikan rotor berputar searah jarum jam, maka flux medan rotor bergerak sesuai lilitan jangkar. Satu putaran rotor dalam satu detik menghasilkan satu siklus per detik atau 1 Hertz (Hz). Bila kecepatannya 60 revolution per menit (Rpm), frekuensi 1 Hz. Untuk frekuensi $f = 60$ Hz, maka rotor harus berputar 3600 Rpm.

Untuk kecepatan rotor n rpm, rotor harus berputar pada kecepatan $n/60$ revolution per detik (rps). Bila rotor mempunyai lebih dari 1 pasang kutub, misalnya P kutub maka masing-masing revolution dari rotor menginduksikan $P/2$ siklus tegangan dalam lilitan stator.

Frekuensi dari tegangan induksi sebagai sebuah fungsi dari kecepatan rotor,

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} \text{ Hertz}$$

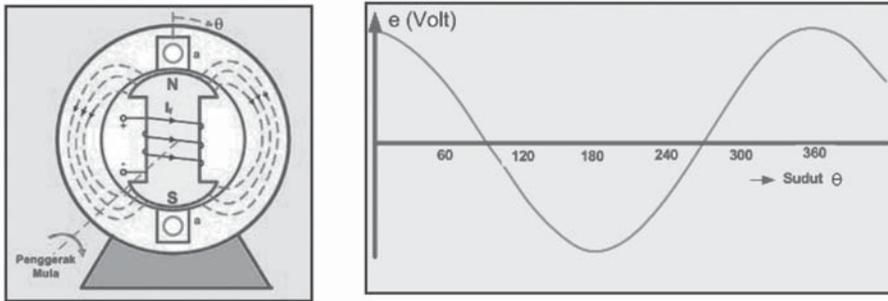
Untuk generator sinkron tiga fasa, harus ada tiga belitan yang masing-masing terpisah sebesar 120 derajat listrik dalam ruang sekitar keliling celah udara seperti diperlihatkan pada komparan a – a', b – b' dan c – c' pada **Gambar 13.13**.

Masing-masing lilitan akan menghasilkan gelombang Fluksi sinus satu dengan lainnya berbeda 120 derajat listrik. Dalam keadaan seimbang besarnya fluksi sesaat:

$$\Phi_A = \Phi_m \cdot \sin \omega t$$

$$\Phi_B = \Phi_m \cdot \sin (\omega t - 120^\circ)$$

$$\Phi_C = \Phi_m \cdot \sin (\omega t - 240^\circ)$$



Gambar 13.12 Diagram generator AC satu fasa dua kutub

Besarnya fluks resultan adalah jumlah vektor ketiga fluks tersebut $\Phi_T = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C$, yang merupakan fungsi tempat (Φ) dan waktu (t), maka besar-besarnya fluks total adalah, $\Phi_T = \Phi_m \cdot \sin \omega_t + \Phi_m \cdot \sin(\omega_t - 120^\circ) + \Phi_m \cdot \sin(\omega_t - 240^\circ)$. $\cos(\varphi - 240^\circ)$.

Dengan memakai transformasi trigonometri dari:

$\sin \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cdot \sin(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \sin(\alpha - \beta)$ maka dari persamaan 8-5 diperoleh:

$$\Phi_T = \frac{1}{2} \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega_t + \varphi) + \frac{1}{2} \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega_t - \varphi) + \frac{1}{2} \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega_t + \varphi - 240^\circ) + \frac{1}{2} \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega_t - \varphi) + \frac{1}{2} \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega_t + \varphi - 480^\circ)$$

Dari persamaan diatas, bila diuraikan maka suku kesatu, ketiga, dan kelima akan silang menghilangkan. Dengan demikian dari persamaan akan didapat fluksi total sebesar, $\Phi_T = \frac{3}{4} \Phi_m \cdot \sin(\omega_t - \varphi)$ Weber.

Jadi medan resultan merupakan medan putar dengan modulus $\frac{3}{2} \sim$ dengan sudut putar sebesar ω .

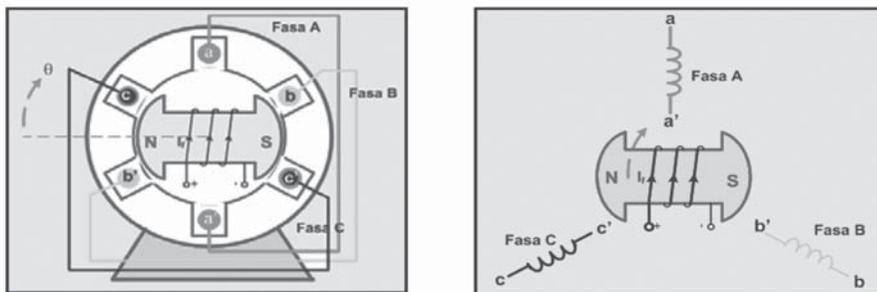
Besarnya tegangan masing-masing fasa adalah: $E_{maks} = B_m \cdot l \cdot \omega \cdot r$ Volt
dimana:

B_m = Kerapatan Flux maximum kumparan medan rotor (Tesla)

l = Panjang masing-masing lilitan dalam medan magnetik (Weber)

ω = Kecepat sudut dari rotor (rad/s)

r = Radius dari jangkar (meter)



Gambar 13.13 Diagram generator AC tiga fasa dua kutub

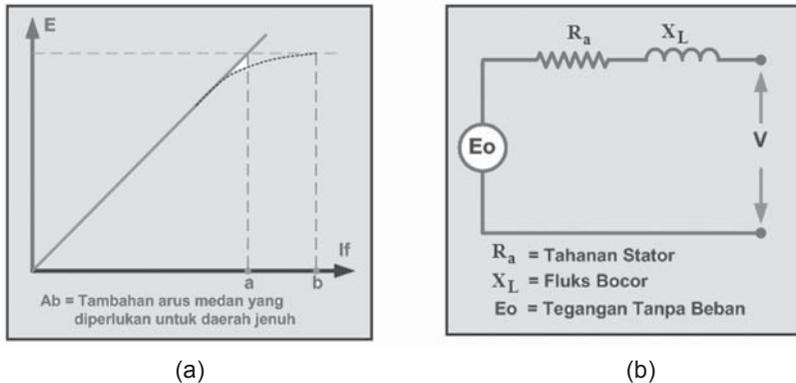
13.4 Generator Tanpa Beban

Apabila sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai generator 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:

$$E_o = 4,44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot f \cdot \phi_m \cdot T \text{ Volt}$$

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

medan dinaikkan, maka tegangan output juga akan naik sampai titik saturasi (jenuh) seperti diperlihatkan pada **Gambar 13.14**. Kondisi Generator tanpa beban bisa digambarkan rangkaian ekuivalennya seperti diperlihatkan pada **Gambar 13.14b**.



Gambar 13.14 Kurva dan rangkaian ekuivalen generator tanpa beban

13.5 Generator Berbeban

Bila Generator diberi beban yang berubah-ubah maka besarnya tegangan terminal V akan berubah-ubah pula. Hal ini disebabkan adanya kerugian tegangan pada:

- Resistansi jangkar R_a
- Reaktansi bocor jangkar X_L
- Reaksi Jangkar X_a

a. Resistansi Jangkar

Resistansi jangkar/phase R_a menyebabkan terjadinya tegangan jatuh (Kerugian tegangan)/phase $I \cdot R_a$ yang sephase dengan arus jangkar.

b. Reaktansi Bocor Jangkar

Saat arus mengalir melalui penghantar jangkar, sebagian fluks yang terjadi tidak mengimbas pada jalur yang telah ditentukan, hal seperti ini disebut *fluks bocor*.

c. Reaksi Jangkar

Adanya arus yang mengalir pada kumparan jangkar saat generator dibebani akan menimbulkan fluksi jangkar (ϕ_A) yang berintegrasi dengan fluksi yang dihasilkan pada kumparan medan rotor (ϕ_F), sehingga akan dihasilkan suatu fluksi resultan sebesar:

$$\phi_R = \phi_F + \phi_A$$

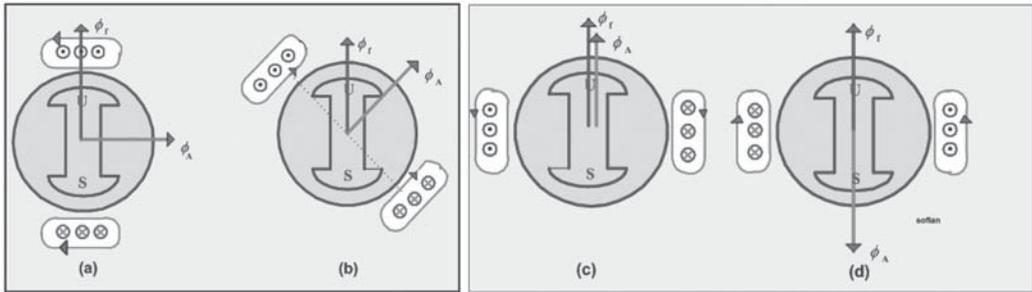
Interaksi antara kedua fluksi ini disebut sebagai reaksi jangkar, seperti diperlihatkan pada **Gambar 13.15**, yang mengilustrasikan kondisi reaksi jangkar untuk jenis beban yang berbeda-beda.

Gambar 13.15a, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat generator dibebani tahanan (resistif) sehingga arus jangkar I_a sephase dengan ggl E_b dan ϕ_A akan tegak lurus terhadap ϕ_F .

Gambar 13.15b, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat generator dibebani kapasitif, sehingga arus jangkar I_a mendahului ggl E_b sebesar θ dan ϕ_A terbelakang terhadap ϕ_F dengan sudut $(90 - \theta)$.

Gambar 13.15c, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat dibebani kapasitif murni yang mengakibatkan arus jangkar I_a mendahului ggl E_b sebesar 90° dan ϕ_A akan memperkuat ϕ_F yang berpengaruh terhadap pemagnetan.

Gambar 13.15d, memperlihatkan kondisi reaksi jangkar saat arus diberi beban induktif murni sehingga mengakibatkan arus jangkar Ia terbelakang dari ggl Eb sebesar 90° dan ϕ_A akan memperlemah ϕ_F yang berpengaruh terhadap pemagnetan.



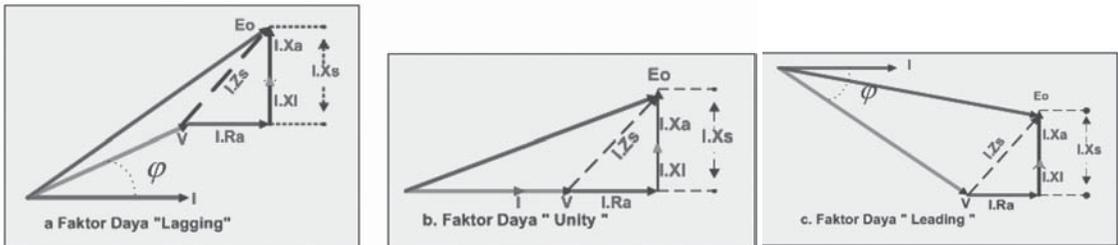
Gambar 13.15 Kondisi reaksi jangkar

Jumlah dari reaktansi bocor X_L dan reaktansi jangkar X_a biasa disebut reaktansi sinkron X_s .

Vektor diagram untuk beban yang bersifat Induktif, resistif murni, dan kapasitif diperlihatkan pada **Gambar 12.16**. Berdasarkan Gambar di atas, maka bisa ditentukan besarnya tegangan jatuh yang terjadi, yaitu:

Total Tegangan Jatuh pada Beban:

$$\begin{aligned}
 &= I \cdot R_a + j(I \cdot X_a + I \cdot X_L) \\
 &= I\{R_a + j(X_a + X_L)\} \\
 &= I\{R_a + j(X_a)\} - I \cdot Z_a
 \end{aligned}$$



Gambar 13.16 Vektor diagram dari beban generator

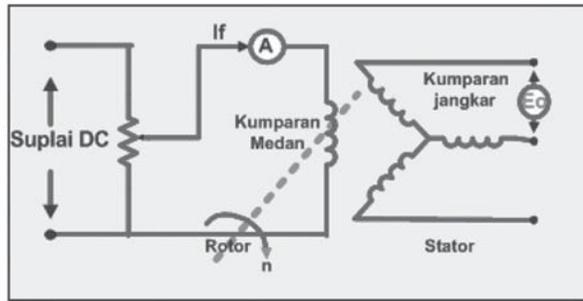
13.6 Menentukan Resistansi dan Reaktansi

Untuk bisa menentukan nilai reaktansi dan impedansi dari sebuah generator, harus dilakukan percobaan (test). Ada tiga jenis test yang biasa dilakukan, yaitu:

- Test Tanpa beban (Beban Nol).
- Test Hubung Singkat.
- Test Resistansi Jangkar.

13.6.1 Test Tanpa Beban

Test tanpa beban dilakukan pada kecepatan sinkron dengan rangkaian jangkar terbuka (tanpa beban) seperti diperlihatkan pada **Gambar 13.17**, percobaan dilakukan dengan cara mengatur arus medan (I_f) dari nol sampai rating tegangan output terminal tercapai.

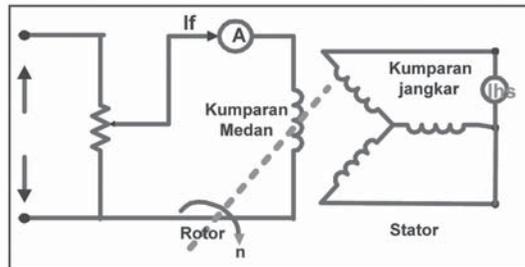


Gambar 13.17 Rangkaian test generator tanpa beban

13.6.2 Test Hubung Singkat

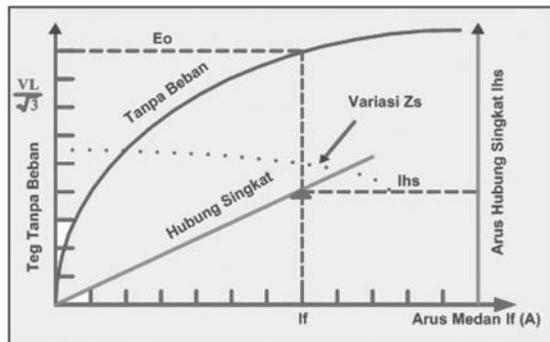
Untuk melakukan test ini terminal alternator dihubungkan singkat dengan Amperemeter diletakkan di antara dua penghantar yang dihubungkan singkat tersebut (**Gambar 13.18**). Arus medan dinaikkan secara bertahap sampai diperoleh arus jangkar maksimum. Selama proses test arus I_f dan arus hubung singkat I_{hs} dicatat.

Dari hasil kedua test di atas, maka dapat digambar bentuk karakteristik seperti diperlihatkan pada **Gambar 13.18**.



Gambar 13.18 Rangkaian test generator di hubung singkat

Impedansi sinkron dicari berdasarkan hasil test, adalah: $Z = \frac{E_0}{I_{hs}} I_f = \text{konstan} \dots\dots\dots \text{ Ohm}$



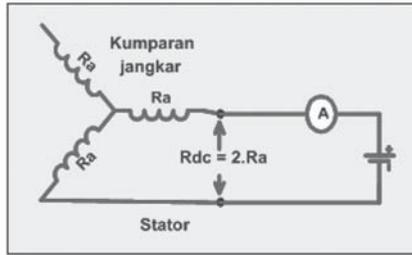
Gambar 13.19 Karakteristik tanpa beban dan hubung singkat sebuah generator

13.6.3 Test Resistansi Jangkar

Dengan rangkaian medan terbuka, resistansi DC diukur antara dua terminal output sehingga dua fasa terhubung secara seri (**Gambar 13.20**). Resistansi per fasa adalah setengahnya dari yang diukur. Dalam kenyataannya nilai resistansi dikalikan dengan suatu faktor untuk

menentukan nilai resistansi AC efektif, R_{eff} . Faktor ini tergantung pada bentuk dan ukuran alur, ukuran penghantar jangkar, dan konstruksi kumparan. Nilainya berkisar antara **1,2 s/d 1,6**. Bila nilai R_a telah diketahui, nilai X_s bisa ditentukan berdasarkan persamaan:

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2}$$



Gambar 13.20 Pengukuran Resistansi DC

13.7 Pengaturan Tegangan

Pengaturan tegangan adalah perubahan tegangan terminal antara keadaan beban nol dengan beban penuh, dan ini dinyatakan dengan persamaan:

$$\% \text{ Pengaturan Tegangan} = \frac{E_0 - V}{V} \times 100$$

Terjadinya perbedaan tegangan terminal V dalam keadaan berbeban dengan tegangan E_0 pada saat tidak berbeban dipengaruhi oleh faktor daya dan besarnya arus jangkar (I_a) yang mengalir.

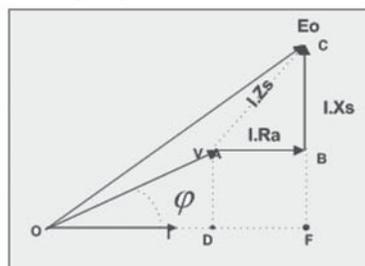
Untuk menentukan pengaturan tegangan dari generator adalah dengan memanfaatkan karakteristik tanpa beban dan hubung singkat yang diperoleh dari hasil percobaan dan pengukuran tahanan jangkar. Ada tiga metoda atau cara yang sering digunakan untuk menentukan pengaturan tegangan tersebut, yaitu:

- Metoda Impedansi Sinkron atau Metoda GGL.
- Metoda Amper Lilit atau Metoda GGM.
- Metoda Faktor Daya Nol atau Metoda Potier.

13.7.1 Metoda Impedansi Sinkron

Untuk menentukan pengaturan tegangan dengan menggunakan metoda impedansi sinkron, langkah-langkahnya sebagai berikut.

- Tentukan nilai impedansi sinkron dari karakteristik tanpa beban dan karakteristik hubung singkat.
- Tentukan nilai R_a berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan.
- Berdasarkan persamaan hitung nilai X_s .
- Hitung harga tegangan tanpa beban E_0 .
- Hitung prosentase pengaturan tegangan.



Gambar 13.21 Vektor diagram P_f "Lagging"

Gambar 13.21 memperlihatkan contoh vektor diagram untuk beban dengan faktor daya lagging.

$E_0 = OC =$ Tegangan tanpa beban

$V = OA =$ Tegangan terminal

$I \cdot R_a = AB =$ Tegangan jatuh Resistansi Jangkar

$I \cdot X_s = BC =$ Tegangan jatuh Reaktansi Sinkron

$$OC = \sqrt{OF^2 + FC^2}$$

$$= \sqrt{(OD + DF)^2 + (FB + BC)^2}$$

atau

$$E_0 = \sqrt{(V \cos \phi + I \cdot R_a)^2 + (V \sin \phi + I \cdot X_s)^2}$$

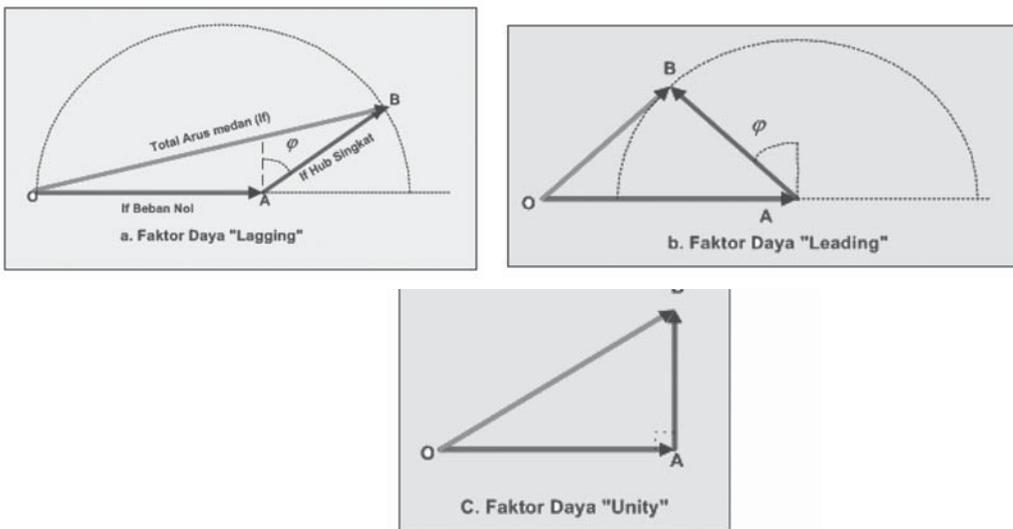
$$\% \text{Pengaturan} = \frac{E_0 - V}{V} \times 100$$

Pengaturan yang diperoleh dengan metoda ini biasanya lebih besar dari nilai sebenarnya.

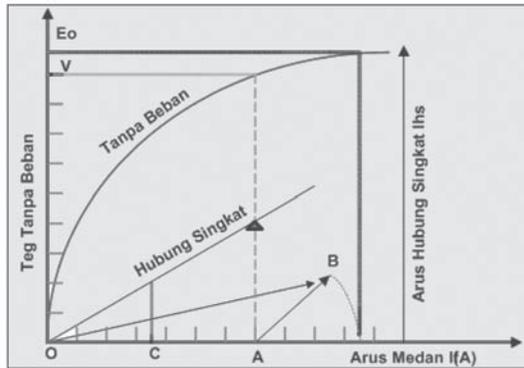
13.7.2 Metoda Ampere Lilit

Perhitungan dengan metoda ampere lilit berdasarkan data yang diperoleh dari percobaan tanpa beban dan hubung singkat. Dengan metoda ini reaktansi bocor XI diabaikan dan reaksi jangkar diperhitungkan. Adapun langkah-langkah menentukan nilai arus medan yang diperlukan untuk memperoleh tegangan terminal generator saat diberi beban penuh, adalah sebagai berikut.

- Tentukan nilai arus medan (Vektor OA) dari percobaan beban nol yang diperlukan untuk mendapatkan tegangan nominal generator.
- Tentukan nilai arus medan (Vektor AB) dari percobaan hubung singkat yang diperlukan untuk mendapatkan arus beban penuh generator.
- Gambarkan diagram vektornya dengan memperhatikan faktor dayanya:
 - untuk faktor daya “Lagging” dengan sudut $(90^\circ + \phi)$
 - untuk faktor daya “Leading” dengan sudut $(90^\circ - \phi)$
 - untuk faktor daya “Unity” dengan sudut (90°) perhatikan **Gambar 13.22** a, b, dan c)
- Hitung nilai arus medan total yang ditunjukkan oleh vektor OB.



Gambar 13.22 Vektor arus medan



Gambar 13.23 Karakteristik beban nol, hubung singkat, dan vektor arus medan.

Gambar 5.23 memperlihatkan diagram secara lengkap dengan karakteristik beban nol dan hubung singkat.

OA = Arus medan yang diperlukan untuk mendapatkan tegangan nominal.

OC = Arus medan yang diperlukan untuk mendapatkan arus beban penuh pada hubung singkat.

AB = OC = dengan sudut $(90 + \phi)$ terhadap OA.

OB = Total arus medan yang dibutuhkan untuk mendapatkan tegangan E_o dari karakteristik beban nol.

$$OB = \sqrt{OA^2 + AB^2 + 2(OA)(AB) \cos \{180^\circ - (90^\circ + \phi)\}}$$

13.7.3 Metoda Potier

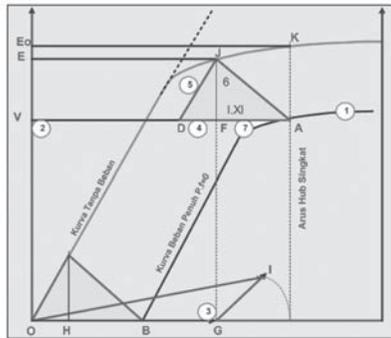
Metoda ini berdasarkan pada pemisahan kerugian akibat reaktansi bocor X_l dan pengaruh reaksi jangkar X_a . Data yang diperlukan adalah:

- Karakteristik Tanpa beban.
- Karakteristik Beban penuh dengan faktor daya nol.

Khusus untuk karakteristik beban penuh dengan faktor daya nol dapat diperoleh dengan cara melakukan percobaan terhadap generator seperti halnya pada saat percobaan tanpa beban, yaitu menaikkan arus medan secara bertahap, yang membedakannya supaya menghasilkan faktor daya nol, maka generator harus diberi beban reaktor murni. Arus jangkar dan faktor daya nol saat dibebani harus dijaga konstan.

Langkah-langkah untuk menggambar Diagram Potier sebagai berikut.

1. Pada kecepatan Sinkron dengan beban reaktor, atur arus medan sampai tegangan nominal dan beban reaktor (arus beban) sampai arus nominal.
2. Gambarkan garis sejajar melalui kurva beban nol. Buat titik **A** yang menunjukkan nilai arus medan pada percobaan faktor daya nol pada saat tegangan nominal.
3. Buat titik **B**, berdasarkan percobaan hubung singkat dengan arus jangkar penuh. **OB** menunjukkan nilai arus medan saat percobaan tersebut.
4. Tarik garis **AD** yang sama dan sejajar garis **OB**.
5. Melalui titik **D** tarik garis sejajar kurva senjang udara sampai memotong kurva beban nol dititik **J**. **Segitiga ADJ disebut segitiga Potier**.
6. Gambar garis **JF** tegak lurus **AD**. Panjang **JF** menunjukkan kerugian tegangan akibat reaktansi bocor.
7. **AF** menunjukkan besarnya arus medan yang dibutuhkan untuk mengatasi efek magnetisasi akibat reaksi jangkar saat beban penuh.
8. **DF** untuk penyeimbang reaktansi bocor jangkar (**JF**).



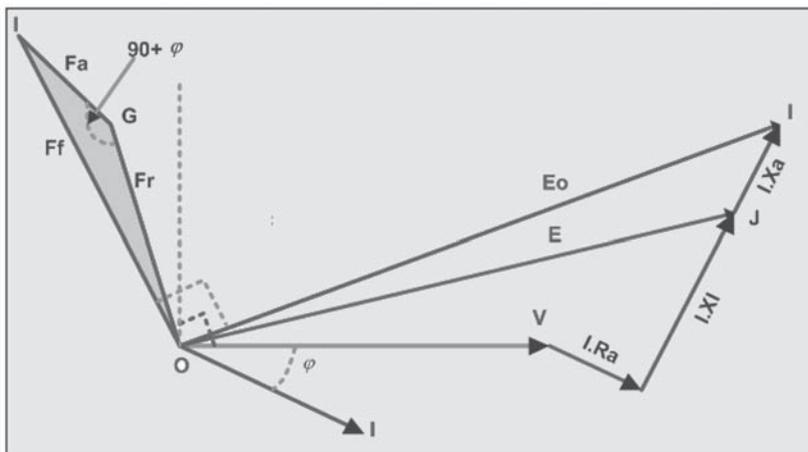
Gambar 13.24 Diagram Potier

Dari gambar diagram potier di atas, bisa dilihat bahwa:

- **V** nilai tegangan terminal saat beban penuh.
- **V** ditambah **JF** ($I \cdot Xl$) menghasilkan **tegangan E**.
- **BH = AF** = arus medan yang dibutuhkan untuk mengatasi reaksi jangkar.
- Bila vektor **BH** ditambah ke **OG**, maka besarnya arus medan yang dibutuhkan untuk **tegangan tanpa beban Eo** bisa diketahui.

Vektor diagram yang terlihat pada diagram Potier bisa digambarkan secara terpisah seperti terlihat pada **Gambar 13.25**.

$$\% \text{ Pengaturan Tegangan} = \frac{E_0 - V}{V} \times 100$$



Gambar 13.25 Vektor diagram potier

13.8 Kerja Paralel Generator

Bila suatu generator mendapat pembebanan lebih dari kapasitasnya bisa mengakibatkan generator tidak bekerja atau rusak. Untuk mengatasi beban yang terus meningkat tersebut bisa diatasi dengan menjalankan generator lain yang kemudian dioperasikan secara paralel dengan generator yang telah bekerja sebelumnya.

Keuntungan lain, bila salah satu generator tiba-tiba mengalami gangguan, generator tersebut dapat dihentikan serta beban dialihkan pada generator lain, sehingga pemutusan listrik secara total bisa dihindari.

13.8.1 Cara Memparalel Generator

Syarat-syarat yang harus dipenuhi untuk memparalel dua buah generator atau lebih ialah:

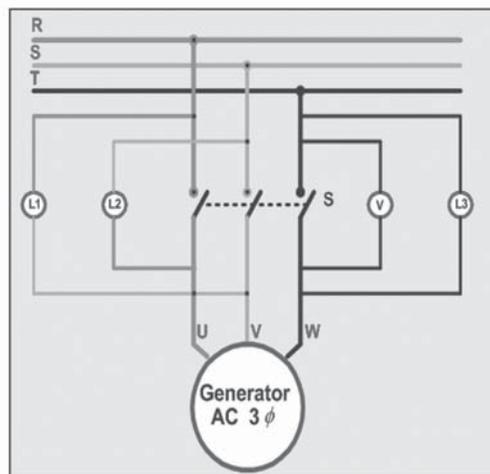
- Polaritas dari generator harus sama dan bertentangan setiap saat terhadap satu sama lainnya.
- Nilai efektif arus bolak-balik dari tegangan harus sama.
- Tegangan generator yang diparalelkan mempunyai bentuk gelombang yang sama.
- Frekuensi kedua generator atau frekuensi generator dengan jala-jala harus sama.
- Urutan fasa dari kedua generator harus sama.

Ada beberapa cara untuk memparalelkan generator dengan mengacu pada syarat-syarat di atas, yaitu:

- a. Lampu Cahaya berputar dan Volt-meter.
- b. Voltmeter, Frekuensi Meter, dan Synchroscope.
- c. Cara Otomatis.

13.8.2 Lampu Cahaya Berputar dan Volt-meter

Dengan rangkaian pada **Gambar 13.26**, pilih lampu dengan tegangan kerja dua kali tegangan fasa netral generator atau gunakan dua lampu yang dihubungkan secara seri. Dalam keadaan sakelar S terbuka operasikan generator, kemudian lihat urutan nyala lampu. Urutan lampu akan berubah menurut urutan L1 - L2 - L3 - L1 - L2 - L3.



Gambar 13.26 Rangkaian Paralel Generator

Perhatikan **Gambar 13.27a**, pada keadaan ini L1 paling terang, L2 terang, dan L3 redup.

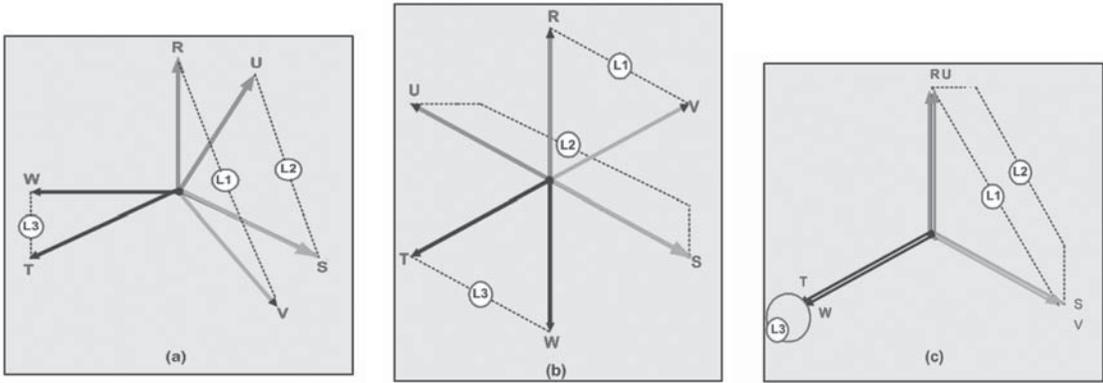
Perhatikan **Gambar 13.27b**, pada keadaan ini

- L2 paling terang
- L1 terang
- L3 terang

Perhatikan **Gambar 13.27c**, pada keadaan ini

- L1 dan L2 sama terang
- L3 Gelap dan voltmeter = 0 V

Pada saat kondisi ini maka generator dapat diparalelkan dengan jala-jala (generator lain).



Gambar 13.27 Rangkaian lampu berputar

13.8.3 Voltmeter, Frekuensi Meter, dan Synchroscope

Pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik, untuk indikator paralel generator banyak yang menggunakan alat *synchroscope* (Gambar 13.28). Penggunaan alat ini dilengkapi dengan Voltmeter untuk memonitor kesamaan tegangan dan Frekuensi meter untuk kesamaan frekuensi.

Ketepatan sudut fasa dapat dilihat dari synchroscope. Bila jarum penunjuk berputar berlawanan arah jarum jam berarti frekuensi generator lebih rendah dan bila searah jarum jam berarti frekuensi generator lebih tinggi. Pada saat jarum telah diam dan menunjuk pada kedudukan vertikal, berarti beda fasa generator dan jala-jala telah 0 (Nol) dan selisih frekuensi telah 0 (Nol), maka pada kondisi ini sakelar dimasukkan (ON). Alat synchroscope tidak bisa menunjukkan urutan fasa jala-jala, sehingga untuk memparalelkan perlu dipakai indikator urutan fasa jala-jala.



Gambar 13. 28 Sychroscope

13.9 Paralel Otomatis

Paralel generator secara otomatis biasanya menggunakan alat yang secara otomatis memonitor perbedaan fasa, tegangan, frekuensi, dan urutan fasa. Apabila semua kondisi telah tercapai alat memberi suatu sinyal bahwa sakelar untuk paralel dapat dimasukkan.

13.10 Rangkuman

- Mesin sinkron bisa dioperasikan baik sebagai generator maupun motor.
- Generator sinkron tiga fasa memiliki dua jenis eksitasi
 - a) dengan penguatan generator DC *pilot exciter*.
 - b) penguatan brushless.

- Bentuk rotor mesin sinkron berkecepatan tinggi seperti turbo generator mempunyai bentuk silinder, sedangkan mesin dengan kecepatan rendah seperti *hydroelectric* mempunyai rotor kutub menonjol.
- Stator dari mesin sinkron terbuat dari bahan *ferromagnetik*, belitan stator berupa belitan satu lapis atau belitan lapis anda.
- Belitan stator satu lapis karena hanya ada satu sisi lilitan di dalam masing-masing alur.
- Pada masing-masing alur ada dua sisi lilitan dan masing-masing lilitan memiliki lebih dari satu putaran.
- Pada belitan stator mengandung faktor distribusi dan faktor kisar belitan yang besarnya lebih kecil dari satu.
- Tegangan efektif per fasa bila faktor distribusi dan faktor kisar dimasukkan, berlaku rumus. $E = 4,44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot f \cdot \phi \cdot T$ Volt
- Frekuensi dari tegangan induksi sebagai sebuah fungsi dari kecepatan rotor,

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} \text{ Hertz.}$$

- Mesin sinkron difungsikan sebagai generator, rotor diputar pada kecepatan sinkron dan belitan medan rotor diberi arus medan (I_f), maka pada kumparan stator akan diinduksikan tegangan.
- Ada perbedaan karakteristik saat generator tanpa beban dan generator berbeban.
- Saat generator berbeban mengalir arus pada jangkar, maka besarnya tegangan terminal V akan berubah-ubah, hal ini disebabkan adanya kerugian tegangan pada: resistansi jangkar R_a ; reaktansi bocor jangkar; reaksi jangkar.
- Pengukuran resistansi dan impedansi generator dilakukan tiga jenis test yang bisa dilakukan, yaitu: test tanpa beban; test hubung singkat. test resistansi jangkar.
- Pengaturan tegangan adalah perubahan tegangan terminal antara keadaan beban nol dengan beban penuh.
- Ada tiga metoda yang digunakan untuk menentukan pengaturan tegangan yaitu: metoda impedansi sinkron atau metoda GGL, metoda amper lilit atau metoda GGM, metoda faktor daya nol (Potier).
- Syarat untuk paralel dua generator sinkron meliputi:
 - a) polaritas dari generator harus sama,
 - b) nilai efektif arus bolak-balik dari tegangan harus sama,
 - c) tegangan generator sama,
 - d) frekuensi sama, serta
 - e) urutan fasa dari kedua generator harus sama.
- Teknik paralel generator menggunakan:
 - a) Lampu Cahaya berputar dan Volt-meter;
 - b) Voltmeter, Frekuensi Meter, dan Synchroscope;
 - c) Cara Otomatis.

13.11 Soal-Soal

1. Sebuah generator sinkron mempunyai 8 kutub. Berapa sudut mekanis ditunjukkan dengan 180 derajat listrik.
2. Generator sinkron memiliki data *name plate* 3 fasa, 2 HP, 50 Hz, 400 V. 4 kutub. Hitungkan putaran sinkron per menit.
3. Generator Sinkron memiliki 24 alur, 4 kutub, 3 fasa, akan di *rewinding*. Buatlah Gambar wiring yang lengkap dan jelas, bedakan warna dari masing-masing fasa.

4. Generator 2KW, 220V/50Hz digerakkan dengan mesin diesel, listrik yang dihasilkan dipakai untuk sejumlah rumah. Bagaimana cara agar generator tersebut menghasilkan tegangan 220 V dan frekuensinya 50 Hz?
5. Generator sinkron akan dilakukan paralel dengan jala-jala PLN $3 \times 380V$, 50 Hz. Buatlah gambar skematik paralel generator dengan jala-jala PLN lengkap dengan peralatan ukur yang diperlukan. Jelaskan langkah paralel generator dan parameter yang harus dipenuhi.

