

Teknik Tenaga Listrik(FTG2J2)

Generator Sinkron

Ahmad Qurthobi, MT.

Teknik Fisika
Telkom University

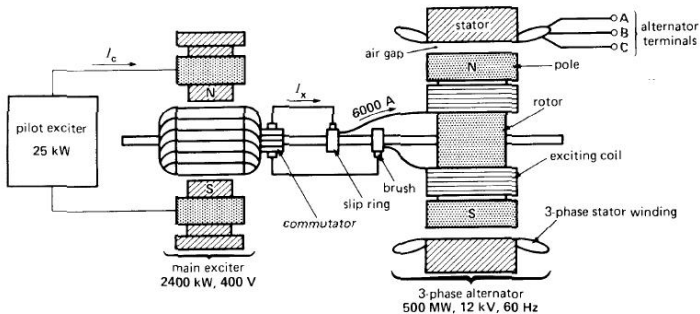
Outline

- 1 Pendahuluan
- 2 Jenis-Jenis Generator Sinkron
- 3 Pole dan Fitur Generator Sikron
 - Jumlah Pole Generator Sikron
 - Fitur Generator Sinkron
 - Fitur pada Stator
 - Fitur pada Rotor
- 4 Eksitasi
 - Eksitasi Medan
 - Eksitasi Brushless
- 5 Reaktansi Sinkron dan Rangkaian Pengganti
 - Reaktansi Sikron
 - Impedansi Basis
- 6 Generator Sinkron Berbeban
 - Faktor Daya dan Diagram Fasor
 - Pengaturan Tegangan
- 7 Sinkronisasi Generator
 - Kondisi Sinkron

Pendahuluan

- Mengubah energi mekanik menjadi energi listrik AC
- Sumber catuan utama konsumsi energi listrik pada masa kini
- Umumnya dioperasikan secara paralel untuk menghasilkan sistem berdaya besar untuk mencatu konsumen atau pelanggan
- Daya keluaran sampai dengan ratusan MW

Pendahuluan



Gambar 1 : Contoh diagram skematik generator sinkron

Jenis-Jenis Generator Sikron

① *Stationary Field*

- ▶ Penampakan luar serupa dengan mesin DC
- ▶ Kumpanan *armature* terletak pada rotor dan sistem medan terletak pada stator
- ▶ Digunakan untuk daya keluaran kurang dari 5 kVA

② *Rotating Field*

- ▶ Kumpanan *armature* terletak pada stator dan sistem medan terletak pada rotor
- ▶ Kumpanan stator langsung terhubung pada beban (lihat Gambar 1)
- ▶ Digunakan untuk keluaran daya yang besar

Jumlah *Pole* Generator Sinkron

Jumlah pole (p) pada generator sinkron bergantung kepada kecepatan putar (n) dari masukan dan frekuensi (f) keluaran yang diinginkan

$$f = \frac{pn}{120} \quad (1)$$

dimana,

f Frekuensi sinyal keluaran (dalam Hz)

p Jumlah *pole* generator

n Kecepatan putar (dalam rpm)

Fitur pada Stator

- Kumparan terkoneksi secara Y dan bagian netral langsung terhubung dengan *ground*
 - 1 Tegangan masing-masing saluran hanya $\frac{1}{\sqrt{3}}$ dari tegangan antar saluran
 - 2 Distorsi harmonisa saluran-netral akan saling menghilangkan \rightarrow tegangan saluran selalu berbentuk sinusoidal pada semua jenis beban

Fitur pada Rotor

1 *Salient-pole*

- ▶ Digunakan pada rotor berkecepatan rendah
- ▶ Jumlah *pole* lebih banyak dan diameter rotor lebih besar dari tipe *cylindrical*
- ▶ Sering diberikan tambahan kumparan *squirrel-cage* untuk mengkompensasi arus

2 *Cylindrical*

- ▶ Digunakan pada motor berkecepatan tinggi
- ▶ Berkuran lebih kecil dan jumlah pole lebih sedikit dari tipe *salient-pole*

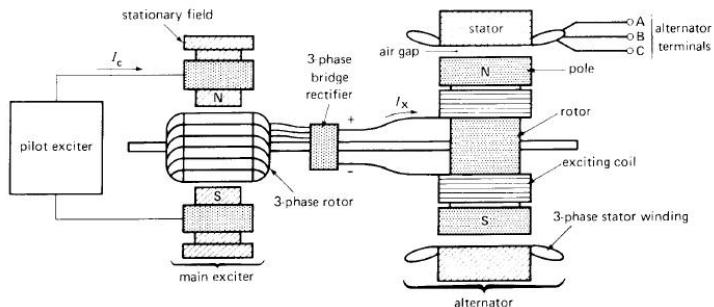
Eksitasi Medan

- Eksitasi DC pada generator sinkron berukuran besar sangat penting untuk menjaga stabilitas tegangan pada saat tanpa beban atau saat beban berubah-ubah
- Terdapat 2 jenis eksitasi (lihat Gambar 1)
 - 1 *Main exciter*
 - 2 *Pilot exciter*

Eksitasi *Brushless*

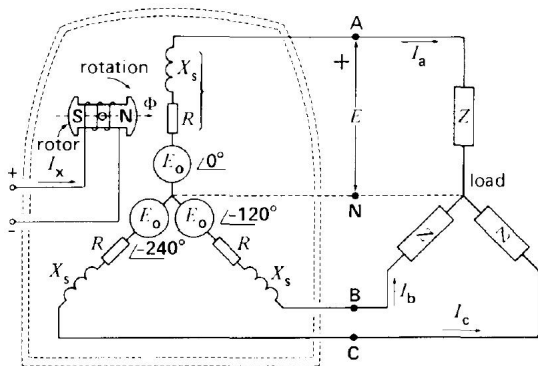
- Keluaran DC dari penyearah langsung diumpankan pada medan dari generator sinkron (lihat Gambar 2)
- *Armature* dari eksitasi AC dan penyearah dipasang pada shaft utama
- Arus kontrol DC I_C dari *pilot exciter* mengatur keluaran *main exciter* I_S
- Frekuensi dari *main exciter* umumnya dua atau tiga kali dari frekuensi generator sinkron

Eksitasi *Brushless*



Gambar 2 : Sistem eksitasi *brushless*

Reaktansi Sinkron



Gambar 3 : Rangkaian pengganti generator sinkron

Reaktansi Sinkron

- Setiap fasa dari stator memiliki nilai tahanan R dan induktansi L (lihat Gambar 3)
- Reaktansi sinkron X_S merupakan salah satu bagian dari impedansi dalam dari generator sinkron

$$X_S = 2\pi fL \quad (2)$$

- Nilai X_S umumnya 10 sampai 100 kali lebih besar dari R

Menentukan nilai X_S

- Nilai tak saturasi dari X_S dapat dicari dengan menggunakan tes *open-circuit* dan *short-circuit*
 - 1 Tes *open-circuit*
 - 1 Generator digerakkan pada kecepatan rata-rata
 - 2 Arus eksitasi dinaikkan sampai tegangan antar saluran rata-rata diperoleh
 - 3 Catat nilai arus I_{xn} dan tegangan E_n pada kondisi tersebut
 - 2 Tes *short-circuit*
 - 1 Turunkan eksitasi sampai nol
 - 2 ketiga terminal stator di *short-circuit*
 - 3 Ukur arus short-circuit I_{SC} pada kumpulan stator dan kalkulasi nilai X_S dengan persamaan

$$X_S = \frac{E_n}{I_{SC}} \quad (3)$$

Contoh Soal

Sebuah generator sinkron 3 fasa menghasilkan tegangan saluran *open-circuit* 6928 Volt ketika diberikan arus eksitasi DC sebesar 50 A. Terminal AC kemudian di *short-circuit* dan diperoleh arus ketiga jalur sebesar 800 A. Hitung

- 1 Reaktansi sinkron per fasa
- 2 Tegangan terminal jika tiga buah resistor 12Ω dihubungkan secara Y di sekitar terminal.

Impedansi Basis, per-unit X_S

Jika tegangan saluran-netral rata-rata dinyatakan sebagai tegangan basis E_B dan daya per fasa rata-rata sebagai daya basis S_B , maka

$$Z_B = \frac{E_B^2}{S_B} \quad (4)$$

Contoh Soal

Sebuah generator sinkron 30 MVA, 15 kV, 60 Hz memiliki reaktansi sinkron 1.2 pu dan resistansi 0.02 pu. Hitung

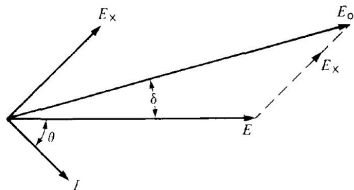
- 1 Tegangan basis, daya basis, dan impedansi basis dari generator
- 2 Nilai aktual dari reaktansi sinkron
- 3 Resistansi aktual kumparan, per fasa
- 4 Total rugi-rugi tembaga pada beban penuh

Faktor Daya dan Diagram Fasor

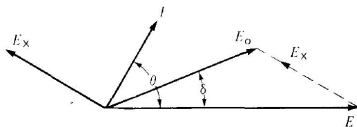
Sebuah motor sinkron 3 fasa mencatu daya pada beban yang memiliki faktor daya *lagging*. Untuk mengkonstruksi diagram fasor dari rangkaian, terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan

- ➊ Arus I terlambat terhadap tegangan E dengan sudut θ
- ➋ Faktor daya $\cos \theta$
- ➌ Tegangan E_x disekitar reaktansi sinkron mendahului arus I sebesar 90° dimana $E_x = jIX_S$
- ➍ Tegangan E_o yang dihasilkan oleh fluksi Φ sama dengan jumlah phasor dari E dan E_x
- ➎ E_o dan E_x adalah tegangan yang ada di dalam kumparan generator sinkron dan tidak dapat diukur secara langsung
- ➏ Fluksi Φ dihasilkan oleh arus eksitasi DC

Generator Sinkron Berbeban



(4.1) Beban *Lagging*



(4.2) Beban *Leading*

Gambar 4 : Diagram phasor

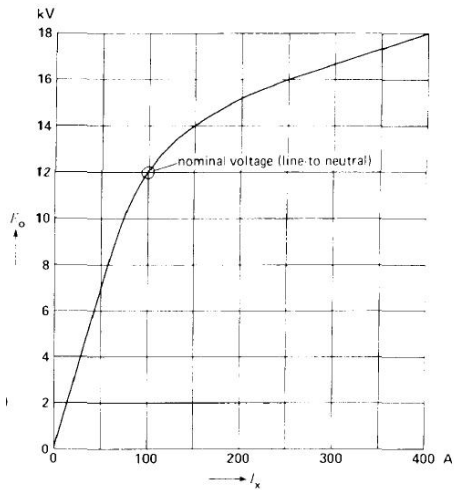
- Gambar 44.1 merupakan diagram fasor dari beban dengan faktor daya *lagging* dimana E_o mendahului E sebesar δ derajat
- Pada beberapa kasus, beban bersifat kapasitif. Sehingga arus I mendahului tegangan terminal sebesar θ derajat (lihat Gambar 44.2)

Contoh Soal

Sebuah alternator 36 MVA, 20.8 kV, 3 fasa, memiliki reaktansi sinkron 9Ω dan arus nominal 1 kA. Jika hubungan arus I_x dan tegangan E_o seperti pada Gambar 5, dan eksitasi diatur sehingga tegangan terminal tetap pada 21 kV, Hitung arus eksitasi dan gambar diagram fasor dari kondisi

- 1 Tanpa beban
- 2 Beban resistif 36 MW
- 3 Beban kapasitif 12 MVAR

Contoh Soal

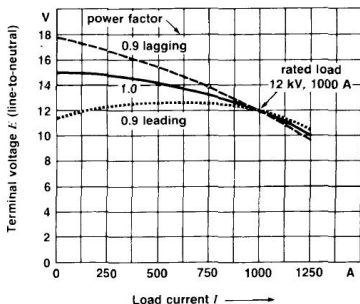


Gambar 5 : Kurva hubungan arus I_x dan E_o

Pengaturan Tegangan

- Perubahan tegangan antara tanpa beban dan keadaan berbeban
- Dinyatakan sebagai prosentase nilai tegangan terminal
- Persen regulasi diberikan oleh persamaan

$$\% \text{ regulasi} = \frac{E_{NL} - E_B}{E_B} \times 100 \quad (5)$$



Gambar 6 : Kurva regulasi dari generator sinkron dengan variasi faktor daya

Sinkronisasi Generator

Sebuah generator dikatakan sinkron jika memenuhi kriteria berikut:

- 1 $f_{generator} = f_{system}$
- 2 $E_{generator} = E_{system}$
- 3 $\phi_{generator} = \phi_{system}$

atau

$$E_g \cos(2\pi f_g t + \phi_g) = E_{sys} \cos(2\pi f_{sys} t + \phi_{sys}) \quad (6)$$

Langkah-Langkah Sinkronisasi

- 1 Atur regulator kecepatan dari turbin sehingga frekuensi generator mendekati frekuensi sistem
- 2 Atur eksitasi sehingga tegangan generator E_o sama dengan tegangan sistem E
- 3 Observasi sudut antara E_o dan E dengan nilai rata-rata yang ditunjukkan oleh sebuah *synchroscope*
- 4 Tutup *line circuit breaker* dan hubungkan generator ke sistem

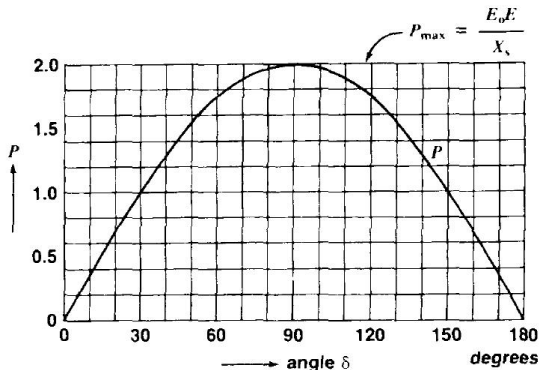
Daya Aktif

$$P = \frac{E_o E}{X_s} \sin \delta \quad (7)$$

dimana

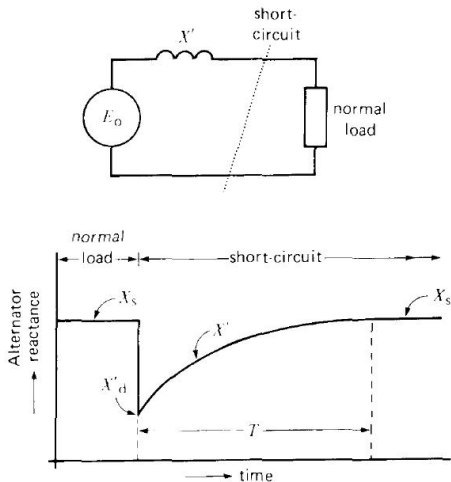
- P daya aktif, per fasa [W]
- E_o tegangan induksi, per fasa [V]
- E tegangan terminal, per fasa [V]
- X_s reaktansi sinkron, per fasa [Ω]
- δ sudut torsi antara E_o dan E [deg]

Daya Aktif



Gambar 7 : Hubungan antara daya aktif yang dikirim generator sinkron dan sudut torsi

Reaktansi Transien



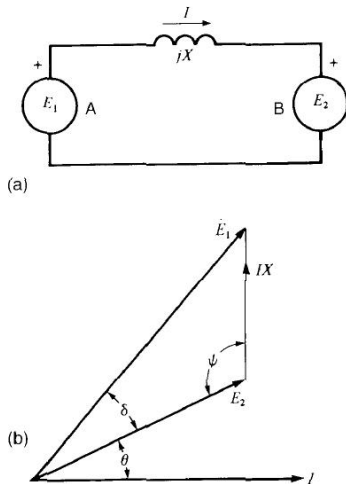
Gambar 8 : Variasi dari reaktansi generator pada saat *short-circuit*

Contoh Soal

Sebuah generator turbin uap 3-fasa, 250 MVA, 25 kV memiliki reaktansi sinkron 1.6 pu dan reaktansi transien X'_d 0.23 pu. Generator tersebut mengirim nilai keluaran pada faktor daya 100%. Saluran tiba-tiba mengalami *short-circuit* di dekat stasiun generator. Hitung

- 1 Tegangan induksi E_o pada saat terjadi hubung singkat
- 2 Nilai awal dari arus *short-circuit*
- 3 Nilai akhir dari arus *short-circuit* jika *circuit-breaker* gagal terbuka

Transfer Daya antara Dua Sumber



Gambar 9 : Aliran daya diantara dua sumber tegangan

Transfer Daya antara Dua Sumber

Dengan mengaplikasikan hukum tegangan Kirchhoff pada Gambar 9(a) diperoleh persamaan

$$E_1 = E_2 + jIX \quad (8)$$

Jika diasumsikan I lag dibelakang E_2 dengan sudut θ dan E_1 mendahului E_2 dengan sudut δ , maka diperoleh diagram fasor seperti pada Gambar 9(b). Fasor IX mendahului I sebesar 90° . Daya aktif yang diserap B adalah

$$P = E_2 I \cos \theta \quad (9)$$

Transfer Daya antara Dua Sumber

Dari hukum sinus pada segitiga

$$\frac{IX}{\sin \delta} = \frac{E_1}{\sin \psi} = \frac{E_1}{\sin(90 + \theta)} = \frac{E_1}{\cos \theta}$$

Sehingga,

$$I \cos \theta = E_1 \frac{\sin \delta}{X} \quad (10)$$

$$P = \frac{E_2 E_1}{X} \sin \delta \quad (11)$$

Dimana

P daya aktif yang terkirim [W]

E_1 tegangan dari sumber 1 [V]

E_2 tegangan dari sumber 2 [V]

δ sudut fasa antara E_1 dan E_2 [deg]

X Reaktansi penghubung sumber [Ω]

Tabel 1 : Contoh spesifikasi generator

power output	1	kW
rated voltage	120	V
	3	phase
rated current	4.8	A
rated speed	1800	rpm
efficiency	73	%
input torque	7.27	N.m
moment of inertia	0.0075	kg.m ²
external diameter	0.180	m
external length	0.15	m
mass	20	kg

Efisiensi Mesin

Tabel 1 merupakan contoh spesifikasi dari sebuah generator AC kecil. Berdasarkan informasi yang terdapat pada tabel tersebut, diperoleh

$$\eta(\%) = \frac{P_o}{P_i} \times 100 \quad (12)$$

$$73 = \frac{1000}{P_i} \times 100$$

$$P_i \approx 1.37 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} \text{rugi-rugi} &= P_o - P_i \\ &= 1.37 \text{ kW} - 1.0 \text{ kW} \\ &= 0.37 \text{ kW} \end{aligned}$$

Rugi-rugi diatas merupakan akumulasi dari rugi-rugi kumparan I^2R , histeresis dan arus eddy pada inti dan *windage*, dan friksi.

Efisiensi Mesin

Misal dirancang sebuah mesin yang memiliki dimensi linear yang tiga kali lebih besar dengan mempertahankan proporsi pada mesin dan jenis material yang digunakan. Pada generator yang lebih besar ini, nilai densitas arus (A/m^2) dan densitas fluksi dipertahankan. maka:

- Volume akan meningkat dengan faktor $3^3 = 27$
 - ▶ Massa mesin menjadi $27 \times 20 \text{ kg} = 540 \text{ kg}$
 - ▶ Rugi-rugi meningkat menjadi $27 \times 0.37 \text{ kW} = 10 \text{ kW}$
- Luas penampang konduktor meningkat 9 kali
 - ▶ Arus yang dapat dikirim menjadi $9 \times 4.8 \text{ A} = 43.2 \text{ A}$
- Densitas fluksi dan kecepatan sudut ω dijaga agar tidak berubah
 - ▶ Kecepatan v meningkat $3 \times$ akibat diameter rotor juga meningkat
 - ▶ Tegangan yang dihasilkan meningkat $9 \times$ menjadi $9 \times 120 \text{ V} = 1080 \text{ V}$

Efisiensi Mesin

- Daya yang dihasilkan meningkat $9 \times 9 = 81$ kali
 - ▶ Daya keluaran menjadi $81 \times 1 \text{ kW} = 81 \text{ kW}$
- Efisiensi mesin menjadi

$$\begin{aligned}\eta(\%) &= \frac{P_o}{P_i} \times 100 \\ &= \frac{81 \text{ kW}}{(81 + 10) \text{ kW}} \times 100 \\ &= 89\end{aligned}$$