# Teknik Tenaga Listrik

## Minggu 9 (Bab 9): Generator Sinkron 3-Fasa (Alternator)

Konstruksi Rotor, Eksitasi Brushless & AVR, Rangkaian Ekivalen, Fasor, Regulasi Tegangan, & Operasi Paralel

**Novalio Daratha, S.T., M.Sc., Ph.D.**

Program Studi S-1 Teknik Mesin (Semester 3 – Ganjil)
Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu

Tahun Akademik 2026

# Peta Bahasan Perkuliahan Minggu 9 (CPMK 5 – Bobot 6%)

1. Prinsip Kerja, Kecepatan Sinkron, & Konstruksi Rotor
2. Rangkaian Ekivalen, Diagram Fasor, & Regulasi Tegangan
3. Operasi Paralel Generator Sinkron & Pembagian Beban (Droop)
4. Studi Kasus Komprehensif Teknik Mesin & Penutup



# Capaian Pembelajaran Perkuliahan Minggu 9 (CPMK 5)

Setelah menyelesaikan perkuliahan Bab 9 ini, mahasiswa mampu:

1. **C1 (Mengingat):** Mengidentifikasi konstruksi stator dan rotor generator sinkron (*salient-pole* vs *cylindrical rotor*) serta sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless exciter*).
2. **C2 (Memahami):** Menjelaskan hubungan kecepatan sinkron ($f = p \cdot n_s/120$), faktor belitan ($k_w = k_p k_d$), reaksi jangkar, serta fungsi lup kendali *Governor* dan *AVR*.
3. **C3 (Menerapkan):** Menghitung GGL induksi per fasa ($E_\phi$), persamaan fasor rangkaian ekivalen ($\vec{E}_a = \vec{V}_\phi + \vec{I}_a(R_a + jX_s)$), dan regulasi tegangan ($VR\%$).
4. **C4 (Menganalisis):** Menganalisis diagram fasor generator pada faktor daya *lagging*, *unity*, dan *leading* serta pembagian beban aktif-reaktif dua generator paralel.
5. **C5 (Mengevaluasi):** Mengevaluasi syarat sinkronisasi paralel dan bahaya kegagalan sinkronisasi atau masuknya daya balik (*reverse power* / *motoring*) pada penggerak mula.
6. **C6 (Merancang):** Merancang setelan *speed droop governor* pada PLTU/Genset pabrik dan menyusun simulasi karakteristik terminal alternator dalam **GNU Octave**.



# Mengapa Insinyur Mesin Wajib Menguasai Generator Sinkron?

## Jantung Konversi Energi Mekanik → Listrik

Lebih dari **95% energi listrik dunia** dibangkitkan oleh Generator Sinkron 3-Fasa yang dikopel langsung dengan mesin-mesin konversi energi termal/fluida:

- **Turbin Uap & Gas (PLTU/PLTG/PKS):** Putaran tinggi (3000 rpm) dengan uap proses industri.
- **Diesel/Gas Engine Genset:** Pembangkit darurat & *captive power* pabrik (1500 rpm).
- **Turbin Air (PLTA/PLTMH):** Putaran rendah (150–750 rpm).

## Sinergi Mekanikal & Elektrikal

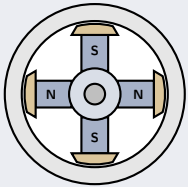
- **Frekuensi Listrik ($f$):** Dikendalikan murni oleh katup bahan bakar/uap **Governor Mekanis-Hidrolis/Elektronis** pada *prime mover*.
- **Tegangan Terminal ($V_t$):** Dikendalikan oleh arus eksitasi rotor melalui **AVR** (*Automatic Voltage Regulator*).
- **Batas Termal & Getaran:** Kecepatan kritis poros (*critical speed*) menentukan geometri rotor!



# Konstruksi Rotor: Kutub Sepatu (*Salient*) vs Silindris (*Non-Salient*)

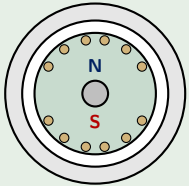
Mengapa belitan jangkar 3-fasa bertegangan tinggi dipasang di **Stator (diam)**, sedangkan medan DC dipasang di **Rotor (berputar)**? *Isolasi tegangan tinggi (6.6–24 kV) lebih mudah pada bagian diam, dan daya eksitasi DC ke rotor jauh lebih kecil!*

## 1. Rotor Kutub Menonjol (*Salient-Pole*)




- Banyak kutub ($p = 4$ s.d. 60), putaran rendah–menengah (100–1500 rpm).
- Diameter besar, panjang aksial pendek.
- **Aplikasi:** Turbin air (PLTA) & Genset Diesel.

## 2. Rotor Silindris (*Cylindrical / Turbo*)




- Kutub $p = 2$ atau 4, putaran tinggi (1500–3000 rpm).
- Baja tempa pejal (*forged alloy steel*) berdiameter kecil untuk menahan **gaya sentrifugal** ($\propto \omega^2 r$) & menekan rugi angin (*windage*).
- **Aplikasi:** Turbogenerator Uap & Gas.

# Kecepatan Sinkron ($n_s$) & Persamaan GGL Induksi Alternator

## 1. Hubungan Frekuensi & Putaran Poros

Satu siklus listrik (360° listrik) dihasilkan setiap kali sepasang kutub (U–S) melewati konduktor stator:

$$\theta_e = \frac{p}{2}\theta_m \implies \boxed{f = \frac{p \cdot n_s}{120} \iff n_s = \frac{120f}{p}}$$

**Contoh Standar PLN ($f = 50$ Hz):**

- Turbin Uap/Gas ($p = 2$ kutub) $\implies$ $n_s = \mathbf{3000}$ rpm
- Genset Diesel ($p = 4$ kutub) $\implies$ $n_s = \mathbf{1500}$ rpm
- Turbin Air PLTA ($p = 20$ kutub) $\implies$ $n_s = \mathbf{300}$ rpm

## 2. Persamaan GGL Induksi RMS per Fasa ($E_\phi$)

Berdasarkan Hukum Faraday untuk belitan stator terdistribusi dengan $N_\phi$ lilitan seri per fasa:

$$\boxed{E_\phi = 4.44 \cdot f \cdot N_\phi \cdot \Phi \cdot k_w \quad \text{(Volt)}}$$

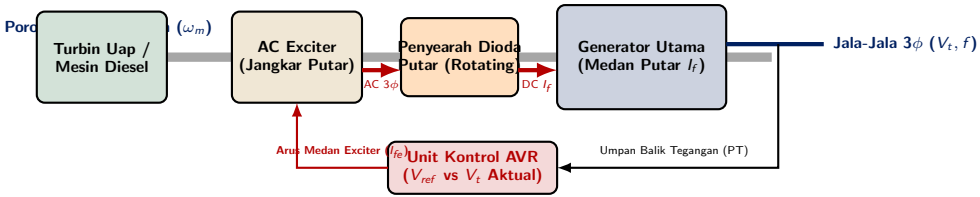
dengan **Faktor Belitan** $k_w = k_p \cdot k_d$ ($0.85 \leq k_w \leq 0.96$):

- **Faktor Kisaran (Pitch Factor):** $k_p = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$, meredam harmonisa ke-$n$.
- **Faktor Distribusi:** $k_d = \frac{\sin(q\gamma/2)}{q\sin(\gamma/2)}$, membuat gelombang GGL lebih sinusoidal murni.

Untuk hubungan Bintang (Y): $E_{LL} = \sqrt{3}\, E_\phi$.

# Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Exciter*) & Kendali AVR

Generator industri modern meniadakan cincin seret (*slip-ring*) dan sikat karbon agar bebas percikan api dan perawatan melalui konfigurasi **Brushless Excitation System**:




**Cara Kerja Lup Tertutup AVR (*Automatic Voltage Regulator*)**

Saat beban pabrik naik $\rightarrow$ $V_t$ turun $\rightarrow$ AVR mendeteksi selisih $(V_{ref} - V_t) > 0$ $\rightarrow$ AVR menaikkan arus medan stator *exciter* ($I_{fe}$) $\rightarrow$ dioda putar menyuplai $I_f$ lebih besar ke rotor utama $\rightarrow$ GGL induksi $E_a$ naik mengembalikan $V_t$ ke nilai nominal!

# Reaksi Jangkar & Model Rangkaian Ekivalen Per Fasa

Saat stator menyuplai arus beban 3-fasa $\vec{I}_a$, timbul medan putar stator ($B_S$) yang berinteraksi dengan fluks rotor ($B_R$):

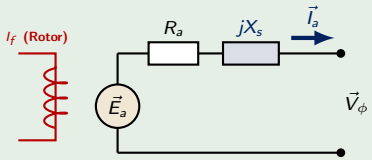
## Komponen Impedansi Sinkron ($\vec{Z}_s$)

- **Reaktansi Reaksi Jangkar ($X_{ar}$):** Mewakili efek fluks stator terhadap GGL utama.
- **Reaktansi Bocor Stator ($X_l$):** Fluks bocor slot/ujung belitan yang tidak memotong celah udara.
- **Reaktansi Sinkron Total:** $X_s = X_{ar} + X_l$ (umumnya $X_s \gg R_a$).

$$\vec{E}_a = \vec{V}_\phi + \vec{I}_a(R_a + jX_s) = E_a \angle \delta$$

di mana $\delta$ adalah **sudut daya/torsi** ($\delta > 0$: Generator, $\vec{E}_a$ mendahului $\vec{V}_\phi$).

## Rangkaian Ekivalen Per Fasa (Y)



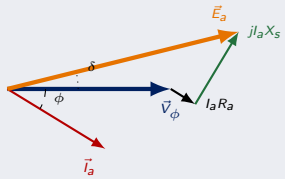

**Rumus Skalar Cepat ($\vec{V}_\phi = V_\phi \angle 0^\circ$):**

$$E_a = \sqrt{(V_\phi \cos\phi + I_a R_a)^2 + (V_\phi \sin\phi \pm I_a X_s)^2}$$

Tanda (+) untuk beban **Lagging**, (−) untuk beban **Leading**.

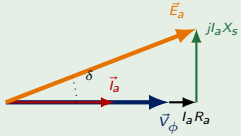
# Diagram Fasor Generator Sinkron: *Lagging*, *Unity*, & *Leading*

## 1. Beban Induktif (*Lagging*)



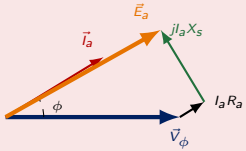

- **Efek Demagnetisasi:** Melemahkan fluks utama.
- $E_a \gg V_\phi \implies$ **Regulasi Tegangan positif besar** ($VR > 0$).

## 2. Beban Resistif (*Unity*)




- **Efek Magnetisasi Lintang (Cross-magnetizing)**: Mendistorsi fluks.
- $E_a > V_\phi \implies$ **Regulasi Tegangan positif kecil** ($VR > 0$).

## 3. Beban Kapasitif (*Leading*)

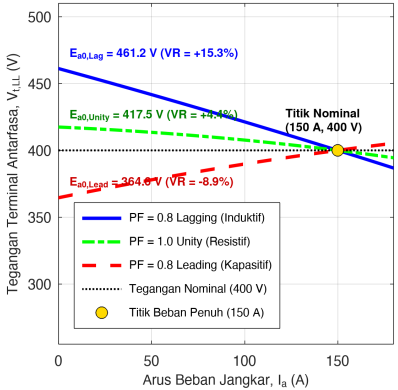



- **Efek Magnetisasi:** Memperkuat fluks utama rotor!
- $E_a < V_\phi \implies$ **Regulasi Tegangan negatif** ($VR < 0$, $V_t$ **naik!**).

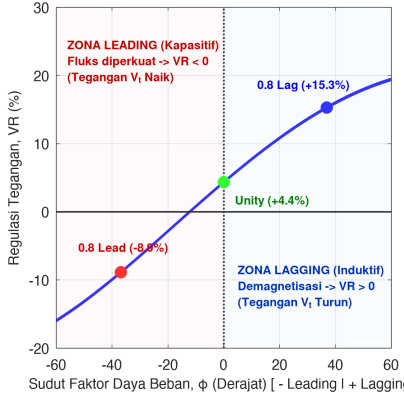
# Regulasi Tegangan ($VR\%$) & Visualisasi Simulasi GNU Octave

**Definisi Regulasi Tegangan:** $VR(\%) = \dfrac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% = \dfrac{E_{a0} - V_{\phi,\text{nom}}}{V_{\phi,\text{nom}}} \times 100\%$

(a) Karakteristik Terminal Genset 3-Fasa ($V_{t,LL}$ vs $I_a$)




(b) Regulasi Tegangan (VR%) vs Sudut Faktor Daya (ϕ)




**Interpretasi Simulasi Genset 125 kVA (400 V, 50 Hz):** Tanpa koreksi AVR ($I_f$ konstan), pembebanan motor induksi (*PF 0.8 lagging*) menjatuhkan tegangan secara tajam ($VR = +15.3\%$), sedangkan beban kapasitif justru menaikkan tegangan terminal ($VR = -8.9\%$).

# Neraca Aliran Daya, Persamaan Daya-Sudut ($\delta$), & Efisiensi

## Aliran Daya Mekanik ke Listrik

1. **Daya Poros Masuk (Prime Mover):**

$$P_{in} = T_{\text{poros}} \cdot \omega_s = T_{\text{poros}} \left( \frac{2\pi n_s}{60} \right)$$

2. **Daya Konversi Elektromagnetik ($P_{conv}$):**

$$P_{conv} = P_{in} - (P_{\text{gesek+angin}} + P_{\text{inti}} + P_{\text{eksitasi}})$$

3. **Daya Listrik Keluar 3-Fasa ($P_{out}$):**

$$P_{out} = \sqrt{3}\, V_{LL} I_L \cos\phi = P_{conv} - 3I_a^2 R_a$$

## Persamaan Daya Aktif & Reaktif ($R_a \approx 0$)

Dengan mengabaikan $R_a \ll X_s$, daya aktif dan reaktif 3-fasa yang dikirim generator adalah:

$$\boxed{P_{3\phi} = \frac{3V_\phi E_a}{X_s} \sin\delta}$$

$$\boxed{Q_{3\phi} = \frac{3V_\phi}{X_s}(E_a \cos\delta - V_\phi)}$$

- **Torsi Lawan Elektromagnetik:** $T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_s}$.
- Semakin besar daya listrik $P_{3\phi}$ yang ditarik beban, semakin besar torsi pengereman yang harus dilawan oleh mesin diesel/turbin!

# Operasi Paralel Alternator & Syarat Mutlak Sinkronisasi

Di pabrik industri dan jaringan PLN, beberapa generator dioperasikan secara **paralel** pada satu *busbar* untuk menjamin **keandalan kontinuitas suplai** ($N-1$), kemudahan perawatan terjadwal, dan efisiensi bahan bakar pada beban parsial.

## 4 Syarat Mutlak Sinkronisasi Paralel

Sebelum saklar pemutus tenaga (*Circuit Breaker* / CB) ditutup, generator yang akan masuk (*incoming*, $G_2$) terhadap jaringan (*running*, $G_1$) **wajib memenuhi**:

1. **Tegangan RMS Sama:** $V_{LL,2} = V_{LL,1}$.
2. **Urutan Fasa Sama:** R–S–T harus sefasa dengan R–S–T busbar.
3. **Frekuensi Hampir Sama:** $f_2 \approx f_1 + (0.05\text{–}0.1\ \text{Hz})$ (sedikit lebih cepat agar langsung menyuplai daya positif).
4. **Sudut Fasa Sesaat Nol ($\Delta\delta = 0^\circ$):** Ditutup tepat saat jarum **Synchroscope** di posisi pukul 12:00!

## Metode Lampu Gelap & Synchroscope




**Bahaya Penutupan CB di Luar Fasa ($\Delta\delta = 180^\circ$):** Timbul arus hubung singkat dua kali tegangan ($\frac{2V_\phi}{X''_d}$) dan torsi kejut mekanis raksasa yang dapat **memuntir patah poros kopling turbin/diesel!**

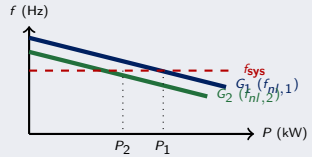
# Pembagian Beban (*Load Sharing*): *Governor Droop* vs *AVR Droop*

Bagaimana cara memindahkan daya aktif ($P$, kW) dan daya reaktif ($Q$, kVAR) antar generator yang sudah paralel tanpa mengubah-ubah tegangan atau frekuensi busbar?

## 1. Kendali Daya Aktif ($P$) ← *Speed Governor*

Governor penggerak mula memiliki karakteristik turun linier (*speed droop* $R_D = \frac{f_{nl} - f_{fl}}{f_{nom}} \approx 2\%–5\%$):

$$P = s_P(f_{nl} - f_{\text{sys}}), \quad s_P = \frac{\Delta P}{\Delta f} \left(\frac{\text{kW}}{\text{Hz}}\right)$$




## 2. Kendali Daya Reaktif ($Q$) ← *AVR Exciter*

AVR dilengkapi *reactive droop compensation* agar membagi beban reaktif secara proporsional:

$$Q = s_Q(V_{nl} - V_{\text{sys}}), \quad s_Q = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \left(\frac{\text{kVAR}}{\text{V}}\right)$$

**Aturan Operasi Ruang Kontrol Pembangkit:**

- Menaikkan *set-point* **Governor** (suplai uap/solar) $\Longrightarrow$ menggeser kurva $f - P$ ke atas $\Longrightarrow$ menambah **Daya Aktif** $P$ **(kW)**.
- Menaikkan *set-point* **AVR** (arus medan $I_f$) $\Longrightarrow$ menggeser kurva $V - Q$ ke atas $\Longrightarrow$ menambah **Daya Reaktif** $Q$ **(kVAR)**.

# Studi Kasus 1: Turbogenerator Uap Pabrik Kelapa Sawit (PKS)

**Soal Rekayasa Pembangkit Uap Industri**

Sebuah generator sinkron 3-fasa hubungan Bintang (Y) berkapasitas 1000 kVA, 400 V (L-L), 50 Hz, 4 kutub digerakkan oleh turbin uap tekanan balik (*back-pressure steam turbine*) di PKS. Parameter per fasa: $R_a = 0.005\ \Omega$ dan $X_s = 0.045\ \Omega$. Generator menyuplai beban penuh pada faktor daya $\cos\phi = 0.8$ lagging. Hitung: (a) Putaran sinkron $n_s$ dan arus beban penuh $I_a$; (b) GGL induksi per fasa $E_a$ dan sudut torsi $\delta$; (c) Regulasi tegangan $VR\%$; (d) Torsi poros turbin jika rugi mekanis + inti + eksitasi total sebesar 22 kW!

**Solusi Bagian (a) & (b):**

- $n_s = \frac{120(50)}{4} = \mathbf{1500}$ rpm ($\omega_s = 157.08$ rad/s)
- $V_\phi = \frac{400}{\sqrt{3}} = \mathbf{230.94}$ V; $\quad I_a = \frac{1000\ \text{kVA}}{\sqrt{3}(400\ \text{V})} = \mathbf{1443.4}$ A
- Untuk $\cos\phi = 0.8$ lag ($\sin\phi = 0.6$):
  $E_{a,\text{re}} = 230.94(0.8) + 1443.4(0.005) = 191.97$ V,
  $E_{a,\text{im}} = 230.94(0.6) + 1443.4(0.045) = 203.52$ V
- $E_a = \sqrt{191.97^2 + 203.52^2} = \mathbf{279.77}$ V/fasa (484.6 $V_{LL}$)
- Sudut torsi: $\delta = \arctan(203.52/191.97) - 36.87^\circ = \mathbf{9.80}^\circ$

**Solusi Bagian (c) & (d):**

- **Regulasi Tegangan:**
  $VR = \frac{279.77 - 230.94}{230.94} \times 100\% = +\mathbf{21.14}\%$
- **Neraca Daya & Torsi Poros Turbin Uap:**
  - $P_{out} = 1000\ \text{kVA} \times 0.8 = 800$ kW
  - $P_{cu} = 3I_a^2 R_a = 3(1443.4)^2(0.005) = 31.25$ kW
  - $P_{in,\text{poros}} = 800 + 31.25 + 22 = \mathbf{853.25}$ kW ($\eta = 93.76\%$)
  - $T_{\text{turbin}} = \frac{853{,}250\ \text{W}}{157.08\ \text{rad/s}} = \mathbf{5431.9}$ Nm

# Studi Kasus 2: Pembagian Beban Aktif Dua Genset Diesel Paralel

## Soal Operasi Paralel & Governor Speed Droop

Dua unit Genset Diesel bekerja paralel menyuplai beban pabrik sebesar $P_{\text{total}} = 900$ kW:

- **Genset 1 ($G_1$):** Kapasitas 600 kW, disetel pada frekuensi tanpa beban $f_{nl,1} = 51.5$ Hz dengan *droop* menuju 50.0 Hz saat berbeban penuh 600 kW.
- **Genset 2 ($G_2$):** Kapasitas 600 kW, disetel pada frekuensi tanpa beban $f_{nl,2} = 51.0$ Hz dengan *droop* menuju 50.0 Hz saat berbeban penuh 600 kW.

Tentukan: (a) Frekuensi operasi bersama busbar ($f_{\text{sys}}$); dan (b) Daya aktif $P_1$ serta $P_2$ yang dipikul masing-masing genset!

**1. Menghitung Konstanta Kemiringan Governor ($s_P$):**

$$s_{P1} = \frac{600 \text{ kW}}{51.5 - 50.0 \text{ Hz}} = \mathbf{400} \text{ kW/Hz}$$

$$s_{P2} = \frac{600 \text{ kW}}{51.0 - 50.0 \text{ Hz}} = \mathbf{600} \text{ kW/Hz}$$

**2. Persamaan Keseimbangan Daya Busbar:**

$$P_1 + P_2 = P_{\text{total}} \implies 400(51.5 - f_{\text{sys}}) + 600(51.0 - f_{\text{sys}}) = 900$$

**3. Frekuensi Sistem & Pembagian Beban:**

$$20{,}600 + 30{,}600 - 1000\, f_{\text{sys}} = 900$$

$$1000\, f_{\text{sys}} = 50{,}300 \implies f_{\text{sys}} = \mathbf{50.30} \text{ Hz}$$

Daya masing-masing unit:

- $P_1 = 400(51.5 - 50.30) = \mathbf{480}$ kW (80% kapasitas)
- $P_2 = 600(51.0 - 50.30) = \mathbf{420}$ kW (70% kapasitas)
- Cek: $480 + 420 = \mathbf{900}$ kW (Terbukti akurat!).



# Rangkuman Eksekutif & Tugas Terstruktur Minggu 9

## Poin Kunci Rekayasa Generator Sinkron

1. **Geometri Rotor:** Kutub sepatu (*salient-pole*) untuk putaran rendah (PLTA/Diesel); Silindris pejal untuk putaran tinggi 3000 rpm (Turbin Uap/Gas).
2. **Persamaan Inti:** $f = \frac{pn_s}{120}$, $E_\phi = 4.44 f N_\phi \Phi k_w$, dan $\vec{E}_a = \vec{V}_\phi + \vec{I}_a(R_a + jX_s)$.
3. **Karakteristik Beban:** Beban induktif (*lagging*) menjatuhkan $V_t$ ($VR > 0$), dikompensasi otomatis oleh **AVR & Brushless Exciter**.
4. **Operasi Paralel:** Governor mengatur pembagian beban aktif $P$ (kW), sedangkan AVR mengatur beban reaktif $Q$ (kVAR).

## Penugasan Minggu 9 (CPMK 5)

- **LKM 9 (`worksheet9.pdf`):** Studi kasus desain & paralelisasi Turbogenerator Uap PKS.
- **Problem Set 9 (`problem_set9.pdf`):** Soal C1–C6 lengkap & simulasi **GNU Octave**.
- **Persiapan Minggu 10:** Motor Sinkron, Kurva-V, & Kompensasi Faktor Daya.



**Program Studi S-1 Teknik Mesin FT UNIB**

