Teknik Tenaga Listrik

Minggu 10: Prinsip Kerja & Aplikasi Motor Sinkron

Karakteristik Kecepatan Konstan, Sudut Torsi (δ), Starting Amortisseur, Kurva-V, & Kondensor Sinkron

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 10 (CPMK 5 – Bobot 6%)

1. 1. Prinsip Penguncian Magnetik & Kecepatan Konstan
2. 2. Rangkaian Ekuivalen, Sudut Beban, & Pull-Out Torque
3. 3. Masalah Starting & Belitan Peredam (Amortisseur)
4. 4. Pengaruh Eksitasi Medan & Analisis Kurva-V
5. 5. Aplikasi Kondensor Sinkron (Perbaikan Faktor Daya Pabrik)



Capaian Pembelajaran Perkuliahan Minggu 10 (CPMK 5)

Setelah menyelesaikan perkuliahan Minggu 10 ini, mahasiswa mampu:

1. **C1 (Mengingat):** Mengidentifikasi konstruksi motor sinkron, fungsi belitan peredam (*damper/amortisseur winding*), serta persamaan kecepatan sinkron.
2. **C2 (Memahami):** Menjelaskan prinsip penguncian magnetik (*magnetic locking*), sudut beban (δ), dan alasan motor sinkron tidak memiliki torsi awal mandiri.
3. **C3 (Menerapkan):** Menghitung arus jangkar (I_a), GGL eksitasi (E_a), sudut beban (δ), serta torsi tarik keluar (*pull-out torque* $T_{\max}$).
4. **C4 (Menganalisis):** Menganalisis pengaruh perubahan arus eksitasi medan (I_f) terhadap faktor daya melalui diagram fasor dan **Kurva-V**.
5. **C5 (Mengevaluasi):** Mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomis penggunaan motor sinkron *over-excited* untuk perbaikan faktor daya pabrik (*synchronous condenser*).
6. **C6 (Merancang):** Merancang kapasitas daya reaktif kompensasi motor sinkron dan menyimulasikan Kurva-V menggunakan **GNU Octave**.

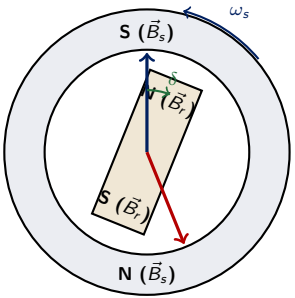
Prinsip Penguncian Magnetik (*Magnetic Locking*)

Bagaimana Motor Sinkron Berputar?

- Belitan stator 3-fasa menghasilkan **medan magnet putar** ($\vec{B}_s$) yang berputar pada kecepatan sinkron:

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad [\text{RPM}], \qquad \omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \quad [\text{rad/s}]$$

- Rotor diberi eksitasi arus searah (I_f) sehingga membentuk kutub magnet permanen ($\vec{B}_r$).
- Kutub rotor $\vec{B}_r$ **mengunci secara magnetik** (*lock-in*) terhadap kutub lawan $\vec{B}_s$ dan berputar tepat pada $n_m = n_s$.



Sudut keterlambatan sumbu magnet rotor $\vec{B}_r$ terhadap medan stator $\vec{B}_s$ disebut **Sudut Torsi / Sudut Beban (δ)**.

Keunggulan Utama di Industri Mekanik

Regulasi kecepatan SR = 0%! Kecepatan poros **konstan mutlak** dari tanpa beban hingga beban penuh (ideal

Rangkaian Ekuivalen Per-Fasa & Persamaan Daya-Torsi

Persamaan Tegangan Motor Sinkron

Kebalikan dari generator sinkron, arus jangkar $\vec{I}_a$ mengalir **masuk** dari jala-jala menuju terminal motor:

$$\vec{V}_\phi = \vec{E}_a + \vec{I}_a(R_a + jX_s) \implies \vec{E}_a = \vec{V}_\phi - \vec{I}_a R_a - j\vec{I}_a X_s$$

Untuk mesin daya besar ($R_a \ll X_s$, diabaikan):

$$P_{3\phi} = \frac{3V_\phi E_a}{X_s}\sin\delta, \qquad T_{\text{ind}} = \frac{P_{3\phi}}{\omega_s} = \frac{3V_\phi E_a}{\omega_s X_s}\sin\delta$$

Torsi Tarik Keluar (*Pull-Out Torque*)

- Torsi maksimum terjadi saat $\delta = 90°$:

$$T_{\max} = \text{Torsi Pull-Out} = \frac{3V_\phi E_a}{\omega_s X_s}$$

- Jika torsi beban mekanik $T_L > T_{\max}$, motor **kehilangan sinkronisasi** (*slipping poles*), bergetar hebat, dan menarik arus hubung-singkat!
- Umumnya dirancang $T_{\max} \approx (1.5 - 2.5)\, T_{\text{rated}}$.

Mengapa Motor Sinkron Tidak Dapat Start Sendiri?

Masalah Inersia Saat Start ($n_m = 0$ RPM)

- Pada $t = 0$, rotor yang berat masih diam ($n_m = 0$), sedangkan medan stator $\vec{B}_s$ langsung berputar pada $n_s = 1.500$ RPM (50 Hz).
- Dalam setengah siklus (10 ms), kutub stator menolak rotor; setengah siklus berikutnya menarik rotor $\Longrightarrow$ **torsi rata-rata per siklus = 0 N·m**!

Solusi Utama Industri: Belitan Amortisseur (*Damper Winding*)

- Batang tembaga dipasang pada permukaan sepatu kutub rotor dan dihubung-singkat di kedua ujungnya (identik sangkar tupai motor induksi).
- **Tahap 1:** Saat start, sumber DC medan dimatikan; motor berakselerasi sebagai **motor**

3 Metode Starting Motor Sinkron

1. **Belitan Peredam (Damper / Amortisseur):** Paling populer & ekonomis di pabrik; sekaligus meredam osilasi (*hunting*) saat beban berubah mendadak.
2. **Variable Frequency Drive (VFD):** Menurunkan frekuensi stator mendekati 0 Hz saat start dan menaikkannya perlahan (*ramp-up*) bersama rotor.
3. **Motor Bantu (Pony Motor):** Memutar poros tanpa beban hingga mendekati n_s, lalu disinkronkan.

Pengaruh Arus Medan (I_f) pada Beban Mekanik Konstan

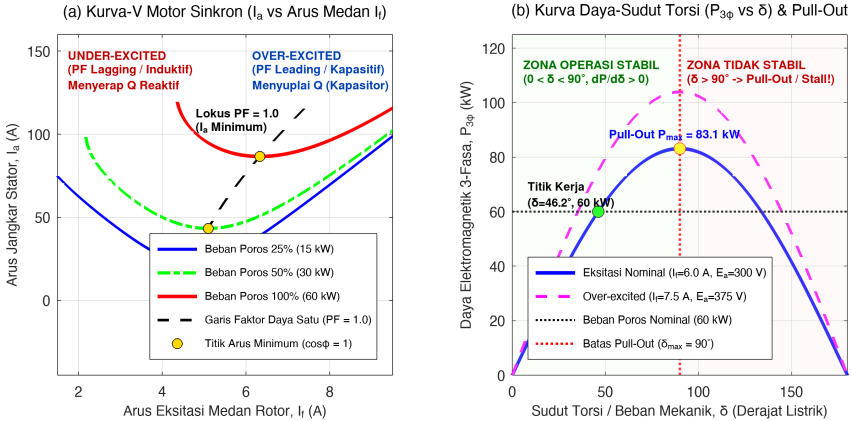
Jika daya mekanik poros P konstan ($I_a \cos\phi = \text{konstan}$), maka mengubah arus eksitasi medan I_f akan mengubah besarnya E_a dan sifat faktor daya motor:

Mode Eksitasi	Kondisi Proyeksi	Sifat Reaktif Motor
Under-Excited ($I_f < I_{f,\text{normal}}$)	$E_a \cos\delta < V_\phi$	Faktor daya **Lagging** (Menyerap Q, seperti induktor)
Normal-Excited ($I_f = I_{f,\text{normal}}$)	$E_a \cos\delta = V_\phi$	Faktor daya **Unity** ($\cos\phi = 1.0$) (I_a bernilai minimum!)
Over-Excited ($I_f > I_{f,\text{normal}}$)	$E_a \cos\delta > V_\phi$	Faktor daya **Leading** (Menyuplai Q, seperti kapasitor!)

Aturan Emas Eksitasi Mesin Sinkron

- **Motor Sinkron Over-Excited (I_f besar):** Arus $\vec{I}_a$ **mendahului** (*leading*) $\vec{V}_\phi \implies$ motor bertindak sebagai **pembangkit daya reaktif (kapasitor)** bagi jaringan pabrik!
- **Motor Sinkron Under-Excited (I_f kecil):** Arus $\vec{I}_a$ **tertinggal** (*lagging*) terhadap $\vec{V}_\phi \implies$ motor menyerap daya reaktif magnetisasi dari jaringan.

Hasil Simulasi GNU Octave: Kurva-V & Karakteristik Sudut Torsi



Gambar 1:
(Kiri) Kurva-V Motor Sinkron (I_a vs I_f) pada variasi beban mekanik 25%, 50%, dan 100%; (Kanan) Kurva Daya-Sudut Beban ($P_{3\phi}$ vs δ).

Aplikasi Industri: Perbaikan Faktor Daya Pabrik (*Power Factor Correction*)

Permasalahan Faktor Daya Rendah di Pabrik

Pabrik manufaktur dengan ratusan motor induksi, mesin las, dan tungku induksi memiliki faktor daya *lagging* rendah ($\cos\phi_1 < 0.85$), sehingga terkena denda kVARh PLN dan rugi kabel tinggi ($I_L^2 R$).

Peran Ganda Motor Sinkron Over-Excited

Motor sinkron digunakan untuk memutar beban mekanik besar (misal kompresor udara/gas P_{sync}) **sekaligus** dioperasikan pada mode *over-excited* untuk menyuplai daya reaktif kapasitif Q_{sync}:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{pabrik}} + P_{\text{sync}}, \qquad Q_{\text{tot}} = Q_{\text{pabrik}} - |Q_{\text{sync}}|$$

$$\tan\phi_{\text{baru}} = \frac{Q_{\text{tot}}}{P_{\text{tot}}} \implies \cos\phi_{\text{baru}} = \cos(\arctan(\tan\phi_{\text{baru}}))$$

Kondensor Sinkron (*Synchronous Condenser*)

Jika motor sinkron dioperasikan **tanpa beban mekanik poros** ($P_{\text{sync}} \approx 0$) dengan eksitasi sangat tinggi (*over-excited*), seluruh kapasitas kVA-nya murni menghasilkan kVAR kapasitif yang dapat diatur secara kontinu melalui arus medan I_f!



Studi Kasus Perhitungan: Motor Sinkron Penggerak Kompresor & Korektor cos ϕ

Soal Kasus Industri Pabrik Petrokimia

Sebuah pabrik menyerap daya $P_1 = 1.200$ kW pada faktor daya $\cos\phi_1 = 0.75$ *lagging* dari busbar 400 V (atau MV). Manajemen memasang Motor Sinkron untuk menggerakkan kompresor sentrifugal yang membutuhkan daya masukan $P_{\text{sync}} = 300$ kW ($\eta = 92\%$). Berapa kVAR dan faktor daya motor sinkron agar faktor daya total pabrik naik menjadi $\cos\phi_{\text{tot}} = 0.95$ *lagging*?

1. Daya Reaktif Awal Pabrik (Q_1):

$$\phi_1 = \arccos(0.75) = 41.41^\circ$$

$$Q_1 = P_1 \tan(41.41^\circ) = 1200 \times 0.8819 = 1.058{,}3 \text{ kVAR (lag)}$$

2. Target Daya Aktif & Reaktif Total (P_{tot}, Q_{tot}):

$$P_{\text{tot}} = 1200 + 300 = 1.500 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{tot}} = 1500 \tan(\arccos 0.95) = 1500 \times 0.3287 = 493{,}0 \text{ kVAR}$$

3. Kapasitas Reaktif & Faktor Daya Motor Sinkron:

$$Q_{\text{sync}} = Q_{\text{tot}} - Q_1 = 493{,}0 - 1.058{,}3 = -565{,}3 \text{ kVAR (leading)}$$

$$S_{\text{sync}} = \sqrt{P_{\text{sync}}^2 + Q_{\text{sync}}^2} = \sqrt{300^2 + (-565{,}3)^2} = 640{,}0 \text{ kVA}$$

$$\cos\phi_{\text{sync}} = \frac{300}{640{,}0} = \mathbf{0.469} \text{ leading (Over-Excited)}$$



Ringkasan & Persiapan Minggu 11

Intisari Materi Minggu 10

1. Motor sinkron berputar tepat pada kecepatan sinkron ($n_m = n_s = 120f/p$) berkat penguncian magnetik dengan SR $= 0\%$.
2. Torsi berbanding lurus dengan $\sin\delta$ hingga batas stabilitas statis *pull-out torque* pada $\delta = 90^\circ$.
3. Belitan peredam (*amortisseur*) memungkinkan starting mandiri sebagai motor induksi sekaligus meredam osilasi *hunting*.
4. Pengaturan arus eksitasi I_f pada mode *over-excited* menjadikan motor sinkron sebagai kompensator daya reaktif (*leading*) paling andal untuk beban mekanik daya besar.

Tugas Mandiri Terstruktur & Minggu Depan

Kerjakan **LKM 10 (**`worksheet10.pdf`**)** dan **Problem Set 10 C1–C6 (**$\texttt{problem}_s et10.pdf$**)**.$Mingguke - 11kitaakanmembahaskudabebanutamaindustri$:
`Motor Induksi 3-Fasa`.