Teknik Tenaga Listrik

Minggu 12 (Bab 12): Starting, Pengereman & Regulasi Kecepatan VFD Motor Induksi

Metode Pengasutan (DOL, $Y - \Delta$, Soft-Starter), Konverter VFD (V/f), Hukum Afinitas, & Pengereman Elektrik

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 12 (CPMK 5 – Bobot 6%)

1. Fenomena Arus Pengasutan & Metode Starting Motor Induksi
2. Regulasi Kecepatan Variable Frequency Drive (VFD) & Hukum Afinitas
3. Metode Pengereman Elektrik Motor Induksi
4. Studi Kasus Rekayasa Mesin & Rangkuman



Capaian Pembelajaran Perkuliahan Minggu 12 (CPMK 5)

Setelah menyelesaikan perkuliahan Bab 12 ini, mahasiswa mampu:

1. **C1 (Mengingat):** Mengidentifikasi topologi pengasutan motor induksi (**DOL, Star-Delta** $Y-\Delta$**, Autotransformator, Soft-Starter**), arsitektur internal **VFD**, serta metode pengereman elektrik.
2. **C2 (Memahami):** Menjelaskan penyebab lonjakan arus start ($5\times -8\times I_{nom}$), prinsip reduksi 1/3 pada starter $Y-\Delta$, hukum kendali **Constant** V/f, serta mekanisme **DC Injection Braking**.
3. **C3 (Menerapkan):** Menghitung arus dan torsi pengasutan pada metode DOL, $Y-\Delta$, dan Autotransformator, serta menghitung penghematan daya pompa/fan menggunakan **Hukum Afinitas**.
4. **C4 (Menganalisis):** Menganalisis kelayakan pengasutan terhadap torsi beban statis ($T_{start} > T_L$) dan pergeseran titik kerja pada kurva torsi-kecepatan VFD di bawah dan di atas kecepatan dasar (*base speed*).
5. **C5 (Mengevaluasi):** Mengevaluasi pemilihan sistem pengasutan, VFD vs katup cekik (*throttling valve*), dan metode pengereman untuk konveyor, pompa sentrifugal, dan spindel mesin perkakas.
6. **C6 (Merancang):** Merancang parameter pengasutan/VFD dan mensimulasikan kurva transien starting serta regulasi kecepatan VFD menggunakan **GNU Octave**.



Mengapa Arus Start Motor Induksi Mencapai 5 × s.d. 8 × I_{nom}?

Analogi Transformator Hubung-Singkat ($s = 1$)

- Saat poros masih diam ($n_r = 0 \implies \mathbf{s = 1.0}$), resistansi beban mekanik ekivalen bernilai nol:

$$R'_{mech} = R'_2 \left(\frac{1 - s}{s} \right) = 0 \ \Omega$$

- Impedansi total motor hanya dibatasi oleh resistansi kawat dan reaktansi bocor yang sangat kecil:

$$\mathbf{I_{start}} = \frac{\mathbf{V}_\phi}{\sqrt{(\mathbf{R_1} + \mathbf{R'_2})^2 + (\mathbf{X_1} + \mathbf{X'_2})^2}} \approx \mathbf{5} \text{ s.d. } \mathbf{8} \times \mathbf{I}$$

Dampak Buruk pada Sistem Mekanik & Listrik

1. **Kejut Torsi Mekanis (Mechanical Jerk):** Hentakan torsi awal merusak sabuk (*V-belt*), gigi reduksi (*gearbox*), dan kopling poros.
2. **Kedip Tegangan (Voltage Sag):** Penurunan tegangan busbar pabrik ($> 10\%$) yang mengganggu PLC dan peralatan sensitif lainnya.
3. **Pemanasan Ekstrem Belitan:** Rugi tembaga saat start $I^2_{start} R \approx 36$ s.d. $64\times$ kondisi normal!

Pengasutan *Direct-On-Line* (DOL) vs Bintang-Segitiga ($Y - \Delta$)

1. Direct-On-Line (DOL) – Motor Kecil (< 5.5 kW)

Belitan stator dihubungkan langsung ke tegangan penuh jala-jala. Menghasilkan 100% $I_{start,\mathrm{DOL}}$ dan 100% $T_{start,\mathrm{DOL}}$.

2. Starter Bintang-Segitiga ($Y - \Delta$) – Motor ≥ 7.5 kW

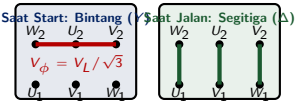
Motor yang dirancang bekerja normal pada hubungan **Delta (Δ)** di-start awal dalam hubungan **Bintang (Y)** hingga mencapai $\sim 85\%$ n_s:

- Saat hubung Y, tegangan tiap belitan fasa turun menjadi $\mathbf{V}_{\phi,\mathbf{Y}} = \frac{\mathbf{V_L}}{\sqrt{3}}$:

$$\mathbf{I}_{\mathbf{start},\mathbf{Y}} = \frac{1}{3}\mathbf{I}_{\mathbf{start},\Delta}, \quad \mathbf{T}_{\mathbf{start},\mathbf{Y}} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 \mathbf{T}_{\mathbf{start},\Delta} = \frac{1}{3}\mathbf{T}_{\mathbf{start},\Delta}$$

- **Kelemahan:** Torsi start ikut terpangkas menjadi **sepertiga (33.3%)**, dan terjadi lonjakan arus transien saat kontaktor berpindah dari $Y \rightarrow \Delta$.

Konfigurasi Terminal 6-Pin Stator



Rangkaian 3 Kontaktor: KM1 (Main) + KM2 (Y) $\rightarrow$ KM3 (Δ)

Pengasutan Autotransformator & *Solid-State Soft Starter*

3. Starter Autotransformator (*Korndorfer*)

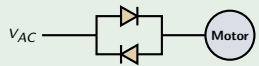
Menurunkan tegangan stator menggunakan tap trafo dengan rasio sadapan $x = \frac{V_{tap}}{V_L}$ (umumnya $x = 50\%, 65\%, 80\%$):

$$\mathbf{I_{start,line}} = \mathbf{x^2} \cdot \mathbf{I_{start,DOL}}, \quad \mathbf{T_{start}} = \mathbf{x^2} \cdot \mathbf{T_{start,DOL}}$$

- **Contoh Tap** $x = 0.65$**:** Arus saluran dan torsi start turun menjadi $(0.65)^2 = \mathbf{42.25\%}$ nilai DOL.
- Fleksibel disesuaikan dengan kebutuhan torsi beban, tetapi ukuran fisik trafo besar dan mahal.

4. *Solid-State Soft Starter* (Elektronika Daya)

Menggunakan **3 pasang Thyristor (SCR) anti-paralel** untuk mengatur sudut penyalaan (α):



- **Keunggulan:** Tegangan dinaikkan secara *ramp* linier ($V_{start} \rightarrow V_{nom}$), **bebas lonjakan transien**, menghilangkan *water hammer* pada pipa pompa!

Komparasi Teknis Metode Starting & Pencocokan Beban Mekanik

Metode Pengasutan	Arus Start (I_{start})	Torsi Start (T_{start})	Karakteristik Mekanis	Aplikasi Beban Mekanik Tepat
1. Direct-On-Line (DOL)	100% I_{DOL} ($5-8\times I_n$)	100% T_{DOL}	Kejut mekanik tinggi (*jerk*), akselerasi sangat cepat.	Motor daya kecil ($<$ 5.5 kW), pompa kecil, kompresor bengkel.
2. Star-Delta ($Y-\Delta$)	**33.3% $\mathbf{I_{DOL}}$** (1/3)	**33.3% $\mathbf{T_{DOL}}$** (1/3)	Torsi awal lemah; ada hentakan transien saat pindah $Y \rightarrow \Delta$.	**Wajib start tanpa beban / ringan:** Kipas sentrifugal, pompa katup tertutup.
3. Autotransformator	x^2 I_{DOL} (42% – 64%)	x^2 T_{DOL} (42% – 64%)	Torsi lebih kuat dari $Y-\Delta$, ukuran panel besar.	Kompresor sedang, blower besar dengan saluran panjang.
4. Soft Starter (SCR)	Diatur ($2.5-4.5\times I_n$)	$\propto V_{ramp}^2$ (Mulus)	Akselerasi & deselerasi halus (*soft-stop*), bebas *water hammer*.	Pompa pipa distribusi air, konveyor sabuk sedang, chiller.
5. VFD / Inverter	$\leq \mathbf{1.0-1.5\times I_n}$	100% – 150% T_n **penuh!**	Torsi maksimal sejak 0 rpm dengan arus start sangat rendah!	Konveyor tambang bermuatan penuh, hoist/crane, ekstruder, pompa variabel.

Aturan Emas Insinyur Mesin: Mengapa $Y-\Delta$ Gagal pada Konveyor Bermuatan?

Jika motor memiliki $T_{start,\text{DOL}} = 180\%\ T_{nom}$ dan menggerakkan konveyor bermuatan dengan torsi statis $T_L = 85\%\ T_{nom}$, maka saat di-start dengan $Y-\Delta$, torsi start anjlok menjadi $\frac{1}{3}(180\%) = \mathbf{60\%\ T_{nom}} < \mathbf{85\%\ T_{nom}} \implies$ **Motor macet (stall) dan terbakar!**

Arsitektur Internal *Variable Frequency Drive* (VFD / Inverter)

Dari rumus $n_r = (1 - s)\frac{120f}{p}$, cara paling efisien dan presisi untuk mengatur putaran motor induksi tanpa membuang energi panas slip adalah mengubah frekuensi catu f menggunakan **VFD**:



Fungsi 3 Tahap Konversi Daya VFD

1. **Penyearah (Rectifier):** 6 dioda jembatan mengubah AC 400 V, 50 Hz menjadi tegangan searah berdenyut.
2. **DC Link / Bus:** Kapasitor elektrolit besar meratakan tegangan DC ($V_{dc} = \sqrt{2} \times 400 \approx 565$ VDC).

Modulasi Lebar Pulsa Sinusoidal (SPWM)

6 saklar semikonduktor **IGBT** (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) dicacah pada frekuensi tinggi ($4 - 16$ kHz) untuk mensintesis gelombang arus sinusoidal dengan **amplitudo V dan frekuensi f yang dapat diatur bebas ($0 - 400$ Hz)**.

Prinsip Kendali *Constant Volts-per-Hertz* (V/f) pada VFD

Mengapa VFD tidak boleh hanya menurunkan frekuensi f sementara tegangan V dibiarkan tetap 400 V? Berdasarkan Hukum Faraday pada belitan stator ($V_\phi \approx E_1 = 4.44\, f\, N_1\, \Phi_m$):

$$\mathbf{\Phi_m \propto \frac{V}{f}} \quad \text{(Fluks Magnetik Celah Udara sebanding dengan rasio } V/f\text{)}$$

1. Zona Torsi Konstan ($f \leq f_{base} = 50$ Hz)

- Jika f diturunkan tanpa menurunkan V, rasio V/f melonjak $\rightarrow$ **inti besi mengalami saturasi berat** dan arus magnetisasi membakar motor!
- Maka VFD menjaga **rasio** V/f **= Konstan** (misal pada 400 V/50 Hz = **8.0** V/Hz: saat $f = 25$ Hz $\implies$ $V = 200$ V).
- Hasilnya: Fluks Φ_m konstan dan kemampuan **Torsi Maksimum (T_{max}) tetap** 100% di seluruh kecepatan rendah!

2. Zona Daya Konstan / *Field Weakening* ($f > 50$ Hz)

- Di atas frekuensi dasar ($f > 50$ Hz), tegangan keluaran VFD tidak bisa melebihi tegangan jala-jala ($V_{\text{maks}} = 400$ V).
- Saat f dinaikkan (misal ke 60 Hz), fluks $\Phi_m \propto 1/f$ melemah, sehingga torsi maksimum turun kuadratik ($\mathbf{T_{max} \propto 1/f^2}$) namun daya maksimum konstan.

Hukum Afinitas (*Affinity Laws*): Penghematan Energi Masif VFD

Pada mesin fluida rotodinamik (**pompa sentrifugal, kipas/blower, kompresor sentrifugal**), hubungan antara kecepatan putar poros (n), debit aliran (Q), tinggi tekan (*head* H), torsi (T), dan daya poros (P) mengikuti **Hukum Afinitas**:

Tiga Persamaan Hukum Afinitas

1. Debit Aliran: $$\frac{\mathbf{Q_2}}{\mathbf{Q_1}} = \frac{\mathbf{n_2}}{\mathbf{n_1}} \approx \frac{\mathbf{f_2}}{\mathbf{f_1}}$$

2. Head / Tekanan (& Torsi): $$\frac{\mathbf{H_2}}{\mathbf{H_1}} = \frac{\mathbf{T_2}}{\mathbf{T_1}} = \left(\frac{\mathbf{n_2}}{\mathbf{n_1}}\right)^{\mathbf{2}}$$

3. Daya Mekanik Poros: $$\frac{\mathbf{P_2}}{\mathbf{P_1}} = \left(\frac{\mathbf{n_2}}{\mathbf{n_1}}\right)^{\mathbf{3}} \approx \left(\frac{\mathbf{f_2}}{\mathbf{f_1}}\right)^{\mathbf{3}}$$

Keajaiban Hukum Pangkat Tiga ($P \propto n^3$)

Jika pabrik hanya membutuhkan 80% **debit air/udara** ($n_2 = 0.80\, n_1$ atau $f_2 = 40$ Hz):

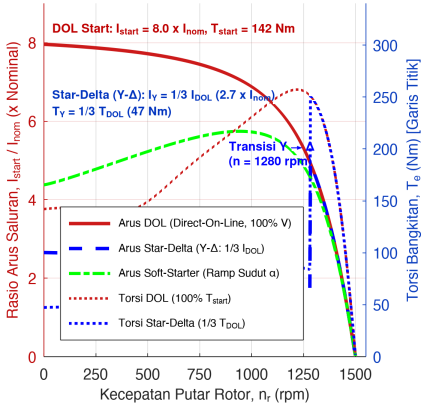
- **Metode Kuno (Katup Cekik / Damper):** Motor tetap berputar 100% RPM sambil mencekik pipa $\rightarrow$ daya listrik tetap $\sim$ 90%.
- **Metode Modern (VFD pada 40 Hz):**

$$P_2 = (0.80)^3 P_1 = \mathbf{0.512\, P_1}\ (\mathbf{51.2}\%)$$

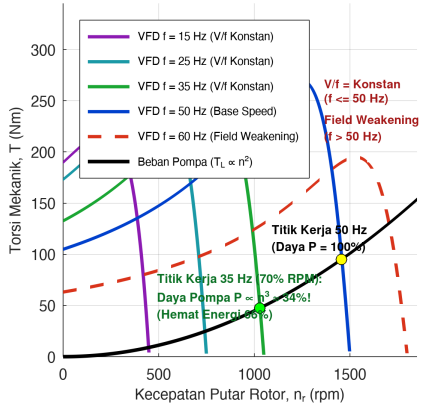
Penghematan energi listrik mencapai 48.8%!

Visualisasi Simulasi Octave: Komparasi Starting & Regulasi VFD

(a) Pengasutan: DOL vs Star-Delta (Y-Δ) vs Soft Starter



(b) Regulasi VFD (V/f Konstan) & Beban Pompa Sentrifugal



Analisis Grafik Simulasi GNU Octave: (a) Reduksi arus & torsi start menjadi 1/3 pada metode $Y - \Delta$ vs kurva mulus Soft-Starter; (b) Keluarga kurva VFD (15 Hz s.d. 60 Hz) memotong beban pompa sentrifugal ($T_L \propto n^2$), membuktikan penghematan daya 66% pada 35 Hz (70% RPM)!

Metode Pengereman Elektrik (*Electrical Braking*) Motor Induksi

Bagaimana menghentikan putaran spindel mesin perkakas, gergaji industri, atau konveyor secara cepat tanpa keausan kampas rem mekanis?

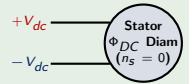
1. **Pengereman Balik Fasa (Plugging – $s > 1$):**
   - Menukar 2 dari 3 kabel fasa stator saat motor sedang berputar maju ($n_r \approx n_s$), sehingga medan putar berbalik arah ($-n_s$):

$$s_{\text{plug}} = \frac{-n_s - n_r}{-n_s} = 1 + \frac{n_r}{n_s} \approx \mathbf{2.0}$$

   - **Bahaya:** Panas yang dibuang di rotor mencapai 3× **energi kinetik inersia**, dan sumber wajib diputus via *Zero-Speed Switch* tepat saat $n_r = 0$ agar motor tidak berputar balik!
2. **Pengereman Regeneratif & Dinamis VFD ($s < 0$):**
   - VFD menurunkan frekuensi f lebih cepat dari putaran rotor ($n_r > n_s$). Energi kinetik mengalir balik ke DC Bus dan didisipasikan pada **Braking Resistor (R_{DB})** melalui chopper IGBT.

3. DC Injection Braking (Injeksi DC)

Catu AC 3-fasa diputus, lalu **tegangan DC rendah** ($I_{dc} \approx 1.5 - 2\, I_{nom}$) diinjeksikan ke 2 terminal stator:



- Timbul **medan magnet stasioner ($n_s = 0$)** di celah udara.
- Batang rotor yang masih berputar memotong medan diam tersebut → timbul torsi pengereman halus yang otomatis bernilai nol saat $n_r = 0$ (**mustahil berputar balik!**).

Matriks Evaluasi Metode Pengereman Elektrik Motor Induksi

Metode Pengereman	Kondisi Medan & Slip	Karakteristik Torsi Pengereman	Bahaya Putar Balik?	Aplikasi Industri Utama
1. Plugging (Tukar 2 Fasa)	Medan berbalik ($-n_s$), $s \approx 2.0 \rightarrow 1.0$	Sangat agresif & kasar; disipasi panas rotor ekstrem ($3 \times \frac{1}{2} J\omega^2$).	**Ya!** Wajib pakai sensor *Zero-Speed Switch*.	Penghentian darurat (*emergency stop*) mesin penggiling karet/baja.
2. DC Injection Braking	Medan magnet diam ($n_s = 0$), energi $\rightarrow I_2^2 R_2$	Halus, terkendali via arus I_{dc}, torsi otomatis 0 saat berhenti.	**Tidak!** Berhenti mutlak pada $n_r = 0$.	Spindel mesin bubut/CNC, gergaji kayu bundar, sentrifus.
3. VFD Dynamic Braking (R_{DB})	Frekuensi diturunkan ($n_r > n_s, s < 0$)	Sangat presisi mengikuti *deceleration ramp* VFD; rotor tetap dingin!	**Tidak** (dikendalikan mikroprosesor VFD).	Lift penumpang, derek (*crane hoist*), konveyor kecepatan tinggi.



Studi Kasus Komprehensif: Pengasutan $Y - \Delta$ & Audit Energi VFD

Kasus Audit Sistem Pompa Sentrifugal Pabrik Kelapa Sawit

Motor induksi 3-fasa 30 kW, 400 V, 50 Hz, 4 kutub memiliki $I_{nom} = 55$ A dan $T_{nom} = 198$ Nm. Saat start DOL (Δ), $I_{start,\Delta} = 6.0 \times I_{nom}$ dan $T_{start,\Delta} = 1.8 \times T_{nom}$.

1. Hitung arus saluran dan torsi start dengan starter **Star-Delta ($Y - \Delta$)**! Apakah sanggup mengasut pompa dengan torsi beban awal $T_{L,\text{start}} = 45$ Nm?
2. Pompa beroperasi 6000 jam/tahun ($P_1 = 32$ kW pada debit 100%). Hitung penghematan biaya listrik tahunan (Rp 1.500/kWh) jika debit diturunkan menjadi 75% menggunakan VFD!

Solusi Bagian 1 (Evaluasi Starter $Y - \Delta$):

- Pada DOL (Δ): $I_{start,\Delta} = 6 \times 55 = 330$ A; $T_{start,\Delta} = 1.8 \times 198 = 356.4$ Nm.
- Pada Starter $Y - \Delta$:

$$I_{start,Y} = \frac{330}{3} = \mathbf{110}\ \text{A}, \quad T_{start,Y} = \frac{356.4}{3} = \mathbf{118.8}\ \text{Nm}$$

- Karena $T_{start,Y}$ (118.8 Nm) $> T_{L,\text{start}}$ (45 Nm), motor **berhasil mengasut pompa dengan aman**!

Solusi Bagian 2 (Audit Penghematan Energi VFD):

- Untuk debit $Q_2 = 0.75\,Q_1 \implies f_2 = 0.75 \times 50 = \mathbf{37.5}$ Hz dan tegangan VFD $V_2 = 0.75 \times 400 = \mathbf{300}$ V.
- Berdasarkan Hukum Afinitas ($P \propto (Q_2/Q_1)^3$):

$$P_2 = (0.75)^3 \times 32\ \text{kW} = 0.4219 \times 32 = \mathbf{13.50}\ \text{kW}$$

- Daya dihemat: $\Delta P = 32 - 13.50 = \mathbf{18.50}$ kW (57.8%).
- Penghematan Tahunan: 18.5 kW $\times$ 6000 jam $\times$ Rp 1.500 = Rp **166, 5** Juta/tahun!

Rangkuman Eksekutif & Tugas Terstruktur Minggu 12

Intisari Rekayasa Starting, VFD, & Pengereman

1. **Mitigasi Arus Start:** Starter $Y-\Delta$ memangkas arus dan torsi start menjadi $\mathbf{1/3}$ nilai DOL; Autotrafo memangkas sebesar $\mathbf{x^2}$; Soft-Starter menghilangkan hentakan mekanik.
2. **Kendali VFD (V/f Konstan):** Menjaga fluks $\Phi_m \propto V/f$ tetap konstan pada $f \leq 50$ Hz agar T_{max} penuh sejak 0 rpm.
3. **Hukum Afinitas Fluida:** $Q \propto n$, $H \propto n^2$, dan $\mathbf{P \propto n^3}$ menghasilkan penghematan energi masif pada pompa & blower.
4. **Pengereman Elektrik:** Injeksi DC memberikan pengereman halus hingga berhenti mutlak tanpa risiko putar balik.

Penugasan Minggu 12

- **LKM 12:** Evaluasi kelayakan starter $Y-\Delta$ konveyor vs pompa, audit energi VFD, dan pengereman injeksi DC.
- **Problem Set 12 (C1–C6):** Analisis komprehensif pengasutan, VFD, & simulasi **GNU Octave**.
- **Referensi:** S.J. Chapman (*Electric Machinery Fundamentals*); Mohan (*Power Electronics*).



Program Studi S-1 Teknik Mesin FT UNIB

