PROBLEM SET 12 (TUGAS MANDIRI TERSTRUKTUR – EDISI LENGKAP)

Mata Kuliah: Teknik Tenaga Listrik (2/3 SKS – Semester 3)

Topik Minggu 12: Starting (DOL, $Y-\Delta$, Soft-Starter), VFD (V/f), Hukum Afinitas, Pengereman, & Octave

Nama: .....
NPM: .....
Kelas/Klp: .....
Nilai Final: / 100

Capaian Pembelajaran (CPMK 5 / Minggu 12 – Bobot 6%) & Pedoman Pengerjaan Tugas Mandiri

CPMK 5 (Sub-CPMK 12): Mahasiswa mampu menganalisis, mengevaluasi, dan merancang metode pengasutan motor induksi 3-fasa (*DOL*, *Star-Delta* $Y-\Delta$, *Autotransformer*, *Soft Starter*), regulasi kecepatan *Variable Frequency Drive* (VFD) berbasis kendali V/f konstan, penghematan energi Hukum Afinitas ($P \propto n^3$), pengereman elektrik (*Plugging*, *DC Injection*, *Dynamic Braking*), serta simulasi GNU Octave.
Ketentuan Pengerjaan: Kerjakan secara mandiri pada kertas A4 rapi. Sertakan skema rangkaian, penurunan rumus analitis lengkap, serta lampirkan kode program dan grafik keluaran simulasi GNU Octave (Soal C6).

BAGIAN I: METODE PENGASUTAN, ARSITEKTUR VFD, & HUKUM AFINITAS

1. (C1 - Mengingat | Bobot: 10 Poin)

(a) Sebutkan dan jelaskan prinsip kerja lima metode pengasutan motor induksi 3-fasa di industri (**Direct-On-Line, Star-Delta** $Y-\Delta$**, Autotransformator, Solid-State Soft Starter, dan VFD**) beserta rentang rasio arus dan torsi startnya!

(b) Gambarkan skema tiga tahap konversi daya internal **Variable Frequency Drive (VFD)** (*Rectifier Bridge*, *DC Link Bus*, dan *IGBT Inverter SPWM*) serta jelaskan fungsi masing-masing komponen!

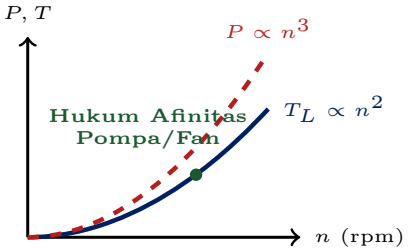
2. (C2 - Memahami | Bobot: 15 Poin)

(a) Mengapa arus pengasutan langsung (DOL) motor induksi sangkar tupai mencapai 5× s.d. 8× arus nominalnya? Jelaskan menggunakan rangkaian ekuivalen pada kondisi slip $s = 1.0$!

(b) Uraikan mengapa kendali VFD di bawah frekuensi dasar ($f \leq 50$ Hz) wajib mempertahankan rasio ***Constant Volts-per-Hertz*** **(V/f = konstan)**, serta mengapa di atas 50 Hz terjadi zona pelemahan medan (*field weakening*) dengan $T_{max} \propto 1/f^2$!

(c) Jelaskan perbedaan mekanisme fisis antara pengereman ***Plugging*** **(Balik Fasa)**, ***DC Injection Braking***, dan ***Dynamic Braking*** **via Resistor VFD**!

3. (C3 - Menerapkan | Bobot: 20 Poin)



Sebuah motor induksi 3-fasa 37 kW, 400 V (hubung Δ saat jalan normal), 50 Hz, 4 kutub memiliki arus nominal $I_{nom} = 68$ A dan torsi nominal $T_{nom} = 242$ Nm. Jika diasut secara DOL, motor menarik arus $I_{start,\text{DOL}} = 6.5 \times I_{nom}$ dan menghasilkan torsi start $T_{start,\text{DOL}} = 1.95 \times T_{nom}$.

Hitung: (a) Arus saluran start (I_{start}) dan torsi start (T_{start}) dalam satuan Ampere dan Nm untuk: (i) DOL, (ii) Starter **Star-Delta** $(Y-\Delta)$, dan (iii) **Autotransformator** pada tap sadapan $x = 65\%$; (b) Jika motor menggerakkan pompa sentrifugal yang menyerap daya listrik $P_1 = 35$ kW pada 50 Hz (debit $Q_1 = 100$ L/s, head $H_1 = 40$ m), hitung debit baru (Q_2), head baru (H_2), tegangan keluaran VFD (V_2), dan daya listrik baru (P_2) saat frekuensi VFD diatur pada $f_2 = 35$ Hz! (c) Jika pompa bekerja 6500 jam/tahun dengan tarif listrik Rp 1.500/kWh, hitung penghematan biaya listrik tahunan pada 35 Hz!

FORMULA RUJUKAN TEKNIS STARTING, VFD, & HUKUM AFINITAS (IEC 60034 / IEEE)

- Reduksi Pengasutan: Star-Delta ($I_{start,Y} = \frac{1}{3} I_{DOL}, T_{start,Y} = \frac{1}{3} T_{DOL}$); Autotrafo Tap x ($I_{line} = x^2 I_{DOL}, T_{start} = x^2 T_{DOL}$); Soft-Starter ($I_{start} = x I_{DOL}, T_{start} = x^2 T_{DOL}$)
- Kendali VFD Constant V/f: $\frac{V_2}{V_1} = \frac{f_2}{f_1}$ untuk $f_2 \leq f_{base}$ (Φ_m konstan, T_{max} tetap); Di atas f_{base}: $V_2 = V_{nom}$, $T_{max} \propto (f_{base}/f_2)^2$
- Hukum Afinitas Pompa Sentrifugal & Blower: $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}$, $\frac{H_2}{H_1} = \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$, $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$; Slip Plugging: $s_{plug} = 1 + \frac{n_r}{n_s} \approx 2$

BAGIAN II: ANALISIS KELAYAKAN STARTING, EVALUASI VFD, & SIMULASI OCTAVE

4. (C4 - Menganalisis | Bobot: 20 Poin)

Berdasarkan motor induksi 37 kW pada Soal 3 ($I_{nom} = 68$ A, $T_{nom} = 242$ Nm, $I_{start,\text{DOL}} = 442$ A, $T_{start,\text{DOL}} = 471.9$ Nm):

(a) Motor tersebut akan digunakan untuk menggerakkan **konveyor pengangkut bijih tambang** yang membutuhkan torsi gesek statis awal sebesar $T_{L,\text{statis}} = 210$ Nm, sementara regulasi gardu listrik pabrik membatasi arus pengasutan maksimum sebesar $I_{start,\text{maks}} \leq 260$ A. Analisislah secara kuantitatif mengapa starter **DOL** dan starter **Star-Delta ($Y - \Delta$)** sama-sama tidak memenuhi syarat!

(b) Tentukan rentang rasio tegangan awal minimum dan maksimum ($x_{\min} \leq V_{start}/V_{nom} \leq x_{\max}$) pada **Solid-State Soft Starter** atau **Autotransformator** agar motor sanggup menghasilkan torsi percepatan minimal $T_{start} \geq 1.10\,T_{L,\text{statis}}$ (231 Nm) sekaligus mematuhi batas arus $I_{start} \leq 260$ A!

5. (C5 - Mengevaluasi | Bobot: 20 Poin)

Sebagai *Chief Plant Engineer*, evaluasilah solusi pengasutan, kendali kecepatan, dan pengereman elektrik terbaik untuk tiga permasalahan operasional pabrik berikut:

(a) **Pecahnya Pipa Distribusi Air (*Water Hammer*) saat Start & Stop Pompa Utama (75 kW):** Sebelumnya pompa menggunakan starter *Star-Delta* dan langsung dimatikan dengan memutus kontaktor, memicu gelombang kejut tekanan hidrolik yang merusak katup dan sambungan pipa.

(b) **Penghentian Cepat Spindel Mesin Gergaji Kayu Multi-Rip & Mesin Bubut Besar:** Operator menuntut gergaji berhenti dalam waktu < 4 detik saat tombol *Stop* ditekan, tanpa kampas rem mekanis yang cepat aus dan tanpa risiko gergaji berputar balik arah yang membahayakan keselamatan kerja.

(c) **Penggerak Hoist Crane & Ekstruder Plastik Presisi Tinggi:** Membutuhkan torsi start $150\%\,T_{nom}$ sejak putaran 0 rpm dengan arus jala-jala $\leq 1.5\,I_{nom}$, serta kemampuan menahan beban turun (*regenerative/dynamic braking*).

Berikan rekomendasi teknis lengkap (antara *Soft-Starter* dengan fitur *Soft-Stop*, *DC Injection Braking*, atau *VFD + Dynamic Braking Resistor*) beserta justifikasi rekayasanya!

6. (C6 - Merancang & Komputasi Saintifik GNU Octave | Bobot: 15 Poin)

(a) Perancangan Profil Tegangan-Frekuensi VFD (Zona Torsi Konstan vs Field Weakening):

Sebuah motor induksi 15 kW, 400 V, 50 Hz, 4 kutub memiliki torsi maksimum (*breakdown torque*) $T_{max} = 257$ Nm pada 50 Hz. Rancang tabel parameter operasi VFD (V_{out}, rasio V/f, kecepatan sinkron n_s, dan kapasitas torsi maksimum T_{max}) untuk lima titik frekuensi: $f = 15,\ 25,\ 35,\ 50$, dan 60 Hz!

(b) Pemodelan & Simulasi GNU Octave:

Jalankan dan kembangkan skrip **GNU Octave** (`simulasi_motor_induksi.m`) yang menghasilkan grafik beresolusi 300 DPI `starting_vfd_induksi.png`: (i) Subplot (a): Membandingkan kurva rasio arus pengasutan (I_{start}/I_{nom}) dan kurva torsi (T_e) antara metode **DOL**, **Star-Delta ($Y - \Delta$)** dengan transisi pada 1280 rpm, dan **Soft-Starter**; (ii) Subplot (b): Memplot keluarga kurva torsi-kecepatan VFD (15, 25, 35, 50, 60 Hz) yang berpotongan dengan kurva beban kuadratik pompa sentrifugal ($T_L \propto n^2$), serta menandai penghematan daya pada titik kerja 35 Hz vs 50 Hz. Lampirkan cetakan kode dan grafik hasil simulasi!

Verifikasi Dosen / Asisten:

C1	C2	C3	C4	C5	C6	Total
10 Pts	15 Pts	20 Pts	20 Pts	20 Pts	15 Pts	100 Pts

(.....)

Tanggal Pemeriksaan: .....

Catatan Evaluasi & Umpan Balik Dosen Pengampu

Rubrik Pemeriksaan Pengerjaan Tugas Mandiri:

☐ Pemahaman metode starting, arsitektur VFD, & pengereman akurat (C1–C2)
☐ Perhitungan $Y - \Delta$, Hukum Afinitas, & batas kelayakan start tepat (C3–C4)
☐ Evaluasi solusi *water hammer*, *DC braking*, & VFD tajam (C5)
☐ Desain profil V/f & simulasi starting/VFD GNU Octave valid (C6)