PROBLEM SET 10 (TUGAS MANDIRI TERSTRUKTUR – C1 s.d. C6)

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

Topik Minggu 10: Karakteristik Motor Sinkron, Sudut Beban (δ), Kurva-V, & Koreksi Faktor Daya

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

Capaian Pembelajaran (CPMK 5 / Minggu 10) & Pedoman Pengerjaan Problem Set

Sub-CPMK 10: Mahasiswa mampu memahami karakteristik torsi dan kecepatan konstan motor sinkron, menganalisis sudut beban (δ), metode starting, Kurva-V, serta merancang perbaikan faktor daya pabrik menggunakan motor/kondensor sinkron.
Ketentuan: Kerjakan seluruh soal (Level C1 s.d. C6) secara sistematis beserta diagram fasor dan lampirkan hasil eksekusi GNU Octave.

BAGIAN I: KONSEP FUNDAMENTAL, SUDUT BEBAN, & ANALISIS KURVA-V (C1–C4)

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

(a) Tuliskan persamaan kecepatan sinkron (n_s), daya aktif 3-fasa ($P_{3\phi}$), dan torsi induksi (T_{ind}) sebagai fungsi sudut beban δ pada motor sinkron rotor silinder (abaikan R_a)!

(b) Sebutkan dua fungsi utama **belitan peredam (*damper / amortisseur winding*)** pada rotor motor sinkron, baik pada saat kondisi transien starting maupun saat terjadi fluktuasi torsi beban mendadak (*hunting*)!

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

(a) Jelaskan secara fisis mengapa motor sinkron memiliki regulasi kecepatan SR = 0% dari kondisi tanpa beban hingga beban penuh, berbeda dengan motor induksi atau motor DC shunt!

(b) Dengan menggunakan sketsa diagram fasor ($\vec{V}_\phi$, $\vec{E}_a$, $j\vec{I}_a X_s$), jelaskan mengapa peningkatan arus eksitasi medan (I_f) pada beban mekanik konstan mengubah sifat motor sinkron dari menyerap daya reaktif (*under-excited lagging*) menjadi menyuplai daya reaktif (*over-excited leading*)!

3. (C3 - Menerapkan | Bobot: 15 Poin)

Sebuah motor sinkron 3-fasa hubungan Bintang (Y), 400 V (*line-to-line*), 50 Hz, 4 kutub memiliki reaktansi sinkron $X_s = 1{,}6\ \Omega$/fasa dan resistansi jangkar diabaikan ($R_a \approx 0$). Motor memutar blower pabrik dan menyerap daya masukan $P_{\text{in}} = 60$ kW pada faktor daya $\cos\phi = 0{,}80$ *leading*. Hitunglah:

(a) Kecepatan putar poros (n_s dalam RPM dan ω_s dalam rad/s) serta torsi elektromagnetik T_{ind};
(b) Arus jangkar I_a, tegangan eksitasi internal per fasa (E_a), dan sudut beban (δ);
(c) Daya maksimum ($P_{\max}$) dan torsi tarik keluar (*pull-out torque* $T_{\max}$) pada kondisi eksitasi tersebut!

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

Mengacu pada motor sinkron di **Soal 3**, misalkan daya beban mekanik poros blower dijaga tetap konstan ($P_{\text{in}} = 60$ kW), tetapi operator ruang kontrol menurunkan arus eksitasi medan I_f sehingga besar GGL internal E_a turun menjadi 200 V/fasa.

(a) Analisis apakah motor masih mampu mempertahankan sinkronisasi ($P_{\max,\text{baru}} > 60$ kW), dan hitung sudut beban baru (δ_2)!
(b) Hitung arus jangkar baru (I_{a2}), faktor daya baru ($\cos\phi_2$), serta tentukan apakah motor kini beroperasi *leading* atau *lagging*!
(c) Hitung arus jangkar minimum ($I_{a,\min}$) yang mungkin dicapai pada beban 60 kW tersebut beserta nilai E_a yang diperlukan agar $\cos\phi = 1{,}0$!

BAGIAN II: EVALUASI KOMPARATIF & PERANCANGAN KOMPENSASI DAYA REAKTIF (C5–C6)

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

Sebuah pabrik semen membutuhkan penggerak untuk kompresor udara sentrifugal berdaya poros 250 kW yang beroperasi kontinu 7.200 jam/tahun. Pabrik saat ini memiliki beban eksisting 1.000 kW pada $\cos\phi_1 = 0{,}76$ *lagging* (terkena denda kVARh karena di bawah batas PLN 0,85). Tim rekayasa mengevaluasi dua opsi penggerak kompresor:

- **Opsi A (Motor Induksi 3-Fasa):** Efisiensi $\eta_A = 93\%$, bekerja pada faktor daya $\cos\phi_A = 0{,}84$ *lagging*.
- **Opsi B (Motor Sinkron Over-Excited):** Efisiensi $\eta_B = 95\%$, bekerja pada faktor daya $\cos\phi_B = 0{,}80$ ***leading***.

Evaluasilah: (a) Faktor daya total pabrik ($\cos\phi_{\text{tot}}$) dan daya semu total (S_{tot} dalam kVA) untuk masing-masing opsi! (b) Manakah opsi yang membebaskan pabrik dari denda kVARh PLN sekaligus menurunkan arus feeder utama? Hitung selisih penghematan energi listrik aktif tahunan (kWh/tahun) antara Opsi B dan Opsi A!

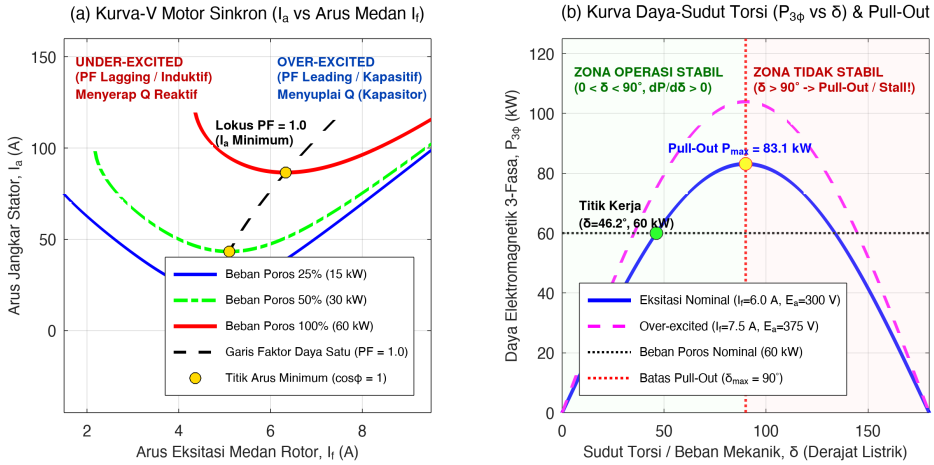
6. (C6 - Mencipta / Merancang & Simulasi GNU Octave | Bobot: 20 Poin)

Sebuah fasilitas industri baja memiliki beban total $P_L = 1.500$ kW pada faktor daya $\cos\phi_1 = 0{,}70$ *lagging* ($V_L = 400$ V, 50 Hz).

(a) **Perancangan Kondensor Sinkron Murni:** Jika dipasang sebuah kondensor sinkron (motor sinkron tanpa beban mekanik dengan rugi rotasi internal $P_{\text{rugi}} = 40$ kW) untuk menaikkan faktor daya total pabrik menjadi $\cos\phi_2 = 0{,}95$ *lagging*, rancanglah kebutuhan daya reaktif (Q_c), rating kVA kondensor sinkron, dan persentase penurunan arus jala-jala utama!

(b) **Pemodelan Komputasi GNU Octave:** Jalankan dan modifikasi skrip `simulasi_mesin_sinkron.m` untuk memvisualisasikan **Kurva-V** motor sinkron pada tiga tingkat pembebanan mekanik (25%, 50%, dan 100%) serta kurva karakteristik $P_{3\phi}(\delta)$. Lampirkan grafik `kurva_v_motor_sinkron.png` dan jelaskan batas stabilitas statisnya!

Visualisasi Referensi Simulasi GNU Octave (`simulasi_mesin_sinkron.m`)



Ringkasan Bobot Nilai Problem Set 10: C1 (10 Poin) + C2 (15 Poin) + C3 (15 Poin) + C4 (20 Poin) + C5 (20 Poin) + C6 (20 Poin) = **100 Poin**.