PROBLEM SET 9 (TUGAS MANDIRI TERSTRUKTUR – GENERATOR SINKRON)

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

Topik Minggu 9: Alternator 3-Fasa, Eksitasi Brushless & AVR, Fasor, Regulasi Tegangan, & Operasi Paralel

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

Capaian Pembelajaran (CPMK 5 / Minggu 9 – Bobot 6%) & Pedoman Pengerjaan Tugas Mandiri

CPMK 5 (Sub-CPMK 9): Mahasiswa mampu menganalisis prinsip kerja dan karakteristik Generator Sinkron 3-Fasa (Alternator), konstruksi rotor (*salient-pole* vs *cylindrical*), kendali tegangan *Brushless Exciter*-AVR, rangkaian ekivalen per fasa, regulasi tegangan ($VR\%$), operasi paralel (*Governor & AVR droop*), serta simulasi GNU Octave.
Ketentuan Pengerjaan: Kerjakan secara mandiri pada kertas A4 rapi. Sertakan diagram fasor berskala, penurunan rumus analitis lengkap, serta lampirkan kode program dan grafik keluaran simulasi GNU Octave (Soal C6).

BAGIAN I: KONSTRUKSI MEKANIKAL ROTOR, PERSAMAAN GGL, & ANALISIS RANGKAIAN

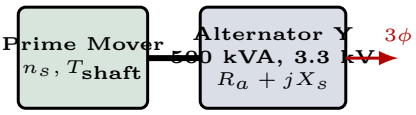
1. (C1 - Mengingat | Bobot: 10 Poin)

(a) Jelaskan perbedaan konstruksi fisik, jumlah kutub (p), rasio diameter-terhadap-panjang aksial (D/L), dan aplikasi penggerak mula antara **Rotor Kutub Menonjol (*Salient-Pole*)** dan **Rotor Silindris (*Non-Salient / Cylindrical Rotor*)**!
(b) Identifikasi komponen utama pada **Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation System*)** satu poros (*AC Exciter*, *Rotating Diode Bridge*, dan *AVR*) serta jelaskan mengapa belitan jangkar bertegangan tinggi selalu ditempatkan pada stator yang diam!

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

(a) Turunkan hubungan antara frekuensi listrik (f), jumlah kutub magnetik (p), dan putaran mekanis poros (n_s dalam rpm), serta jelaskan fungsi fisik **faktor kisaran (*pitch factor* k_p)** dan **faktor distribusi (k_d)** dalam persamaan $E_\phi = 4.44 f N_\phi \Phi k_w$!
(b) Uraikan mekanisme fisis **Reaksi Jangkar (*Armature Reaction*)** pada generator sinkron ketika melayani beban induktif murni (*lagging*), resistif murni (*unity*), dan kapasitif murni (*leading*), serta dampaknya terhadap fluks celah udara dan tegangan terminal V_t!
(c) Jelaskan bagaimana koordinasi antara **Speed Governor** pada mesin diesel/turbin dan **AVR** pada sistem eksitasi dalam menjaga kestabilan frekuensi (50 Hz) dan tegangan (400 V) secara independen!

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



Sebuah generator sinkron 3-fasa hubungan Bintang (Y) berkapasitas 500 kVA, 3.3 kV (L-L), 50 Hz, 6 kutub memiliki $N_\phi = 180$ lilitan seri per fasa dengan faktor belitan $k_w = 0.955$. Resistansi jangkar per fasa $R_a = 0.25\ \Omega$ dan reaktansi sinkron per fasa $X_s = 3.20\ \Omega$. Rugi rotasional mekanis (gesek + angin) dan rugi inti total adalah 14 kW.
Hitung pada kondisi beban penuh dengan $\cos\phi = 0.8$ **lagging:** (a) Kecepatan putar sinkron poros n_s (rpm), tegangan fasa nominal V_ϕ (V), dan arus jangkar beban penuh I_a (A); (b) GGL induksi per fasa E_a (V), sudut daya/torsi δ (derajat), dan fluks magnetik per kutub Φ (mWb) saat tanpa beban; (c) Persentase regulasi tegangan ($VR\%$); (d) Daya mekanik poros penggerak mula P_{in} (kW), torsi poros penggerak mula T_{shaft} (Nm), dan efisiensi generator (η)!

FORMULA RUJUKAN TEKNIS GENERATOR SINKRON (IEEE Std 115 / IEC 60034)

- Frekuensi & GGL: $f = \frac{p n_s}{120}$, $E_\phi = 4.44 f N_\phi \Phi k_w$ ($k_w = k_p k_d$); Hubungan Y: $V_\phi = V_{LL}/\sqrt{3}$, $I_a = I_L = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{LL}}$
- Persamaan Fasor: $\vec{E}_a = \vec{V}_\phi + \vec{I}_a(R_a + jX_s) \implies E_a = \sqrt{(V_\phi \cos\phi + I_a R_a)^2 + (V_\phi \sin\phi \pm I_a X_s)^2}$; $VR(\%) = \frac{E_{a0} - V_\phi}{V_\phi} \times 100\%$
- Daya & Pembagian Beban Paralel: $P_{3\phi} \approx \frac{3 V_\phi E_a}{X_s} \sin\delta$; Governor Droop: $P_i = s_{Pi}(f_{nl,i} - f_{\text{sys}})$; AVR Droop: $Q_i = s_{Qi}(V_{nl,i} - V_{\text{sys}})$

BAGIAN II: ANALISIS FASOR, EVALUASI PARALELISASI, & SIMULASI GNU OCTAVE

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

Gunakan data generator sinkron 500 kVA, 3.3 kV pada Soal 3 ($V_\phi = 1905.26$ V, $I_a = 87.48$ A, $R_a = 0.25\ \Omega$, $X_s = 3.20\ \Omega$): (a) Analisislah perubahan besar GGL induksi E_a, sudut torsi δ, dan regulasi tegangan $VR(\%)$ apabila arus beban tetap 87.48 A, namun karakteristik beban pabrik berubah menjadi: **(i) Faktor daya satu (*Unity PF*,** $\cos\phi = 1.0$**)**; dan **(ii) Faktor daya mendahului (*Leading PF*,** $\cos\phi = 0.8$ **leading)**!

(b) Gambarkan ketiga diagram fasor (*Lagging*, *Unity*, *Leading*) secara berdampingan dan jelaskan bagaimana AVR harus menyesuaikan arus eksitasi medan rotor (I_f) pada masing-masing kondisi agar tegangan terminal tetap terkunci pada 3.3 kV!

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

Dua unit generator sinkron 3-fasa identik (G_1 dan G_2, masing-masing 1000 kVA, 400 V, 50 Hz) bekerja paralel di ruang pembangkit pabrik semen:

(a) Saat sinkronisasi manual G_2 ke busbar G_1, operator melihat lampu sinkronisasi berkedip cepat dan jarum *Synchroscope* berputar cepat searah jarum jam (*FAST*). Evaluasilah tindakan apa yang harus dilakukan operator pada **Governor** dan **AVR** G_2, serta jelaskan kerusakan mekanis-elektrikal yang akan terjadi jika CB dipaksa masuk saat beda fasa $\Delta\delta = 180°$!

(b) Setelah beroperasi paralel memikul beban total 1200 kW ($\cos\phi = 0.8$ lagging), tercatat G_1 memikul 750 kW (200 kVAR) sedangkan G_2 hanya memikul 450 kW (700 kVAR). Evaluasilah ketidakseimbangan ini dan tentukan langkah koreksi pada **Governor** dan **AVR** kedua mesin agar beban aktif (P) dan reaktif (Q) terbagi rata 50% : 50% tanpa mengubah frekuensi maupun tegangan sistem!

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

(a) Perancangan Kurva *Speed Droop Governor* Sistem Pembangkit Hibrida Pabrik:

Sebuah Turbogenerator Uap (G_1: kapasitas 1000 kW, $f_{nl,1} = 51.6$ Hz, droop 3.2% terhadap 50 Hz sehingga $f_{fl,1} = 50.0$ Hz) beroperasi paralel dengan Genset Gas (G_2: kapasitas 500 kW, droop $f_{fl,2} = 50.0$ Hz pada beban penuh 500 kW). Rancanglah nilai setelan frekuensi tanpa beban $f_{nl,2}$ pada Governor G_2 agar ketika kedua generator menyuplai beban total pabrik $P_{\text{total}} = 1050$ kW, kedua generator beroperasi tepat pada persentase pembebanan yang sama (70% dari kapasitas masing-masing unit), serta tentukan frekuensi sistem f_{sys} yang dihasilkan!

(b) Pemodelan & Simulasi Karakteristik Alternator di GNU Octave:

Jalankan dan modifikasi skrip **GNU Octave** (`simulasi_mesin_sinkron.m` Bagian 1) untuk memplot kurva karakteristik terminal $V_{t,LL}$ terhadap arus beban I_a (0–180 A) pada $\cos\phi = 0.8$ lagging, 1.0 unity, dan 0.8 leading, beserta grafik kurva regulasi tegangan $VR(\%)$ terhadap sudut faktor daya $\phi \in [-60°, +60°]$ (`karakteristik_genset_sinkron.png`). Lampirkan kode program dan grafik hasil eksekusi!

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

Verifikasi Dosen / Asisten:

(.....)

Tanggal Pemeriksaan: .....

Catatan Evaluasi & Umpan Balik Dosen Pengampu

Rubrik Pemeriksaan Pengerjaan Tugas Mandiri Minggu 9:

☐ Konstruksi rotor, *brushless exciter*, & reaksi jangkar tepat (C1–C2)
☐ Komputasi GGL E_a, δ, $VR\%$, & fasor 3 kondisi beban akurat (C3–C4)
☐ Evaluasi sinkronisasi paralel & pembagian beban $P - Q$ tajam (C5)
☐ Desain *governor droop* & simulasi GNU Octave terverifikasi (C6)