

Problem Set Komprehensif

Dasar-Dasar Sistem Tenaga Listrik

Minggu 1-7

Program Studi Teknik Elektro
Universitas Bengkulu

9 Agustus 2026

Petunjuk Pengerjaan:

- Problem set ini mencakup materi minggu 1 hingga minggu 7
- Kerjakan semua soal dengan sistematis dan tunjukkan langkah-langkah perhitungan
- Gunakan GNU Octave untuk perhitungan yang kompleks (cantumkan kode)
- Gunakan sistem per-unit jika diminta
- **Total Poin: 100**

1 Pengantar Sistem Tenaga Listrik (10 poin)

1.1 Soal 1.1 (5 poin)

Jelaskan dengan diagram blok sederhana aliran energi listrik dari pembangkit hingga konsumen akhir dalam sistem tenaga listrik. Sebutkan level tegangan yang umum digunakan di Indonesia untuk setiap tahap (pembangkitan, transmisi, sub-transmisi, distribusi primer, distribusi sekunder).

1.2 Soal 1.2 (5 poin)

Apa keuntungan utama sistem interkoneksi (interconnected grid) dibandingkan dengan sistem terisolasi (isolated grid)? Sebutkan minimal 4 keuntungan dan jelaskan masing-masing secara singkat dalam konteks sistem Sumatera.

2 Analisis Rangkaian AC Tiga Fasa (20 poin)

2.1 Soal 2.1 - Sambungan Bintang (Y) (7 poin)

Sebuah beban tiga fasa seimbang tersambung bintang (Y) dengan impedansi per fasa $Z = 8 + j6 \Omega$. Beban disuplai dari sumber tiga fasa dengan tegangan saluran $V_L = 400 \text{ V}$.

- a) Hitung tegangan fasa (V_f) sumber
- b) Hitung arus saluran (I_L)
- c) Hitung daya aktif total (P), daya reaktif total (Q), dan daya semu total (S)
- d) Hitung faktor daya (PF) sistem

2.2 Soal 2.2 - Sambungan Delta (Δ) (7 poin)

Tiga impedansi identik $Z = 15 + j12 \Omega$ dihubungkan dalam konfigurasi delta dan dihubungkan ke sumber tiga fasa 415 V.

- a) Hitung arus fasa (I_f) yang mengalir dalam setiap impedansi
- b) Hitung arus saluran (I_L)
- c) Hitung total daya tiga fasa yang diserap beban
- d) Berapa kapasitor bank (dalam kVAR) yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya menjadi 0.95 lagging?

2.3 Soal 2.3 - Sistem Per-Unit (6 poin)

Sebuah generator tiga fasa memiliki rating 50 MVA, 13.8 kV. Generator terhubung ke transformator step-up dengan rating 50 MVA, 13.8/138 kV, dengan impedansi 10%.

- a) Pilih base values: $S_{base} = 100$ MVA, $V_{base} = 13.8$ kV di sisi tegangan rendah. Hitung impedansi base (Z_{base}) dan arus base (I_{base}) di sisi tegangan rendah.
- b) Hitung V_{base} , Z_{base} , dan I_{base} di sisi tegangan tinggi transformator.
- c) Konversikan impedansi transformator ke sistem per-unit dengan base yang baru (100 MVA).

3 Transformator (15 poin)

3.1 Soal 3.1 - Efisiensi dan Regulasi Tegangan (8 poin)

Sebuah transformator satu fasa 25 kVA, 2400/240 V, 50 Hz memiliki data pengujian sebagai berikut:

- Uji tanpa beban (open circuit): $V_{oc} = 240$ V, $I_{oc} = 1.2$ A, $P_{oc} = 150$ W
 - Uji hubung singkat (short circuit): $V_{sc} = 60$ V, $I_{sc} = 10.4$ A, $P_{sc} = 300$ W
- a) Hitung rugi-rugi inti (core loss) transformator
 - b) Hitung rugi-rugi tembaga (copper loss) pada beban penuh
 - c) Hitung efisiensi transformator pada beban penuh dengan faktor daya 0.8 lagging
 - d) Hitung regulasi tegangan pada beban penuh dengan faktor daya 0.8 lagging

3.2 Soal 3.2 - Koneksi Transformator Tiga Fasa (7 poin)

Dua transformator tiga fasa dihubungkan secara cascade (berurutan):

- Transformator 1: Y- Δ , 138 kV/13.8 kV, 50 MVA, $Z_1 = 8\%$
 - Transformator 2: Δ -Y, 13.8 kV/400 V, 10 MVA, $Z_2 = 6\%$
- a) Gambarkan diagram satu garis sistem ini
 - b) Hitung total pergeseran fasa antara tegangan primer (138 kV) dan tegangan sekunder (400 V)
 - c) Menggunakan base 100 MVA, hitung impedansi total sistem dalam per-unit
 - d) Jika tegangan primer adalah 138 kV, perkirakan tegangan sekunder tanpa beban (abaikan jatuh tegangan)

4 Saluran Transmisi (20 poin)

4.1 Soal 4.1 - Parameter Saluran (6 poin)

Sebuah saluran transmisi tiga fasa 150 kV, 50 Hz, panjang 80 km memiliki konduktor dengan konfigurasi horizontal. Jarak antar fasa adalah $D_{12} = D_{23} = 4$ m, $D_{13} = 8$ m. Jari-jari konduktor $r = 1.5$ cm. Resistansi per km adalah $0.15 \Omega/\text{km}$.

- Hitung GMD (Geometric Mean Distance) konfigurasi konduktor
- Hitung induktansi per fasa per km (L dalam mH/km)
- Hitung kapasitansi per fasa per km (C dalam $\mu\text{F}/\text{km}$)
- Hitung total impedansi seri saluran ($R + jX_L$) dan admitansi shunt (jB_C)

Gunakan: $X_L = \omega L$, $B_C = \omega C$, di mana $\omega = 2\pi f = 314.16$ rad/s

Formula induktansi: $L = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{GMD}{r} \right)$ H/m

Formula kapasitansi: $C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(GMD/r)}$ F/m, dengan $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m

4.2 Soal 4.2 - Model Saluran Menengah (Nominal- π) (8 poin)

Saluran transmisi tiga fasa 230 kV, 120 km memiliki parameter per fasa:

- $R = 0.12 \Omega/\text{km}$
- $X_L = 0.45 \Omega/\text{km}$
- $B_C = 3.2 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$

Saluran menyalurkan daya 150 MW dengan faktor daya 0.85 lagging pada tegangan penerima 230 kV.

- Hitung total impedansi seri (Z) dan total admitansi shunt (Y) saluran
- Gambarkan rangkaian ekuivalen Nominal- π
- Hitung parameter ABCD saluran
- Hitung arus beban (I_R)
- Hitung tegangan pengirim (V_S) menggunakan parameter ABCD

f) Hitung daya pengirim dan efisiensi transmisi

Rumus ABCD untuk Nominal- π : $A = D = 1 + \frac{YZ}{2}$, $B = Z$, $C = Y(1 + \frac{YZ}{4})$

4.3 Soal 4.3 - Efek Ferranti (6 poin)

Saluran transmisi 400 kV, 200 km beroperasi tanpa beban (no-load). Kapasitansi saluran per fasa adalah $C = 0.01 \mu\text{F}/\text{km}$, induktansi per fasa $L = 1.2 \text{ mH}/\text{km}$, resistansi diabaikan.

- Jelaskan apa yang dimaksud dengan efek Ferranti
- Hitung reaktansi kapasitif total saluran (X_C)
- Hitung reaktansi induktif total saluran (X_L)
- Perkirakan tegangan penerima jika tegangan pengirim adalah 400 kV (gunakan pendekatan sederhana)
- Apakah efek Ferranti terjadi? Jelaskan.

5 Impedansi Urutan dan Komponen Simetris (15 poin)

5.1 Soal 5.1 - Transformasi Komponen Simetris (6 poin)

Sistem tiga fasa mengalami gangguan sehingga arus fasa adalah:

$$I_a = 100 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_b = 80 \angle -100^\circ \text{ A}$$

$$I_c = 60 \angle 140^\circ \text{ A}$$

- a) Hitung komponen urutan positif (I_1), negatif (I_2), dan nol (I_0) menggunakan transformasi komponen simetris
- b) Verifikasi hasil dengan menghitung kembali I_a , I_b , I_c dari komponen urutan

Gunakan operator: $a = 1 \angle 120^\circ = e^{j120^\circ}$, $a^2 = 1 \angle 240^\circ$

Rumus:

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c)$$

5.2 Soal 5.2 - Impedansi Urutan Nol Transformator (9 poin)

Tiga konfigurasi transformator diberikan:

- I. Y (grounded) - Y (grounded), $Z_T = 0.1 \text{ pu}$, $Z_{N1} = Z_{N2} = 0.05 \text{ pu}$
- II. Y (grounded) - Δ , $Z_T = 0.1 \text{ pu}$, $Z_N = 0.05 \text{ pu}$
- III. Δ - Δ , $Z_T = 0.1 \text{ pu}$

- a) Untuk setiap konfigurasi, gambarkan jaringan impedansi urutan nol (Z_0)
- b) Jelaskan jalur aliran arus urutan nol untuk masing-masing konfigurasi
- c) Hitung impedansi urutan nol yang terlihat dari sisi primer untuk konfigurasi I dan II
- d) Konfigurasi mana yang memblokir arus urutan nol dari sistem eksternal? Jelaskan implikasinya terhadap proteksi gangguan tanah.

6 Pembangkitan Tenaga Listrik (10 poin)

6.1 Soal 6.1 - Sinkronisasi Generator (4 poin)

Sebutkan dan jelaskan 4 syarat yang harus dipenuhi sebelum mengsinkronkan sebuah generator ke grid. Mengapa kondisi ini sangat penting? Apa yang terjadi jika salah satu syarat tidak terpenuhi?

6.2 Soal 6.2 - Pembangkit Listrik Tenaga Air (6 poin)

Sebuah PLTA memiliki data sebagai berikut:

- Head efektif: $H = 80$ m
- Debit air: $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$
- Efisiensi turbin: $\eta_t = 90\%$
- Efisiensi generator: $\eta_g = 95\%$

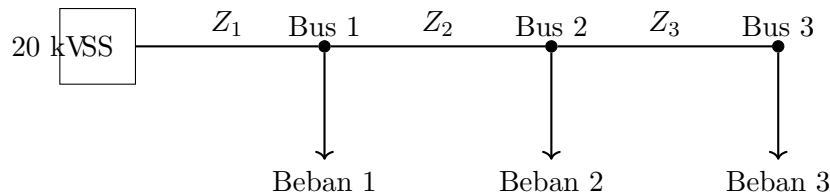
- a) Hitung daya hidrolis teoritis (daya air)
- b) Hitung daya mekanik yang dihasilkan turbin
- c) Hitung daya listrik yang dihasilkan generator (dalam MW)
- d) Jika PLTA beroperasi 8000 jam/tahun, berapa energi yang dihasilkan dalam setahun (dalam GWh)?
- e) Jenis turbin apa yang cocok untuk head ini? Jelaskan alasannya.

Gunakan: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $P_{hidro} = \rho g Q H$

7 Sistem Distribusi (10 poin)

7.1 Soal 7.1 - Analisis Jatuh Tegangan (10 poin)

Sebuah feeder distribusi radial tiga fasa 20 kV menyuplai tiga beban seperti ditunjukkan pada diagram berikut:



Data impedansi saluran per fasa:

- $Z_1 = 0.3 + j0.4 \, \Omega$ (SS ke Bus 1, 5 km)
- $Z_2 = 0.4 + j0.5 \, \Omega$ (Bus 1 ke Bus 2, 7 km)
- $Z_3 = 0.2 + j0.3 \, \Omega$ (Bus 2 ke Bus 3, 4 km)

Data beban tiga fasa:

- Beban 1: $P_1 = 2 \text{ MW}$, $Q_1 = 1 \text{ MVAR}$
- Beban 2: $P_2 = 1.5 \text{ MW}$, $Q_2 = 0.8 \text{ MVAR}$
- Beban 3: $P_3 = 1 \text{ MW}$, $Q_3 = 0.5 \text{ MVAR}$

Tegangan di substation adalah 20 kV (line-to-line).

- Hitung arus yang mengalir di setiap segmen saluran (gunakan pendekatan backward sweep)
- Hitung jatuh tegangan di setiap bus (dalam kV dan persen)
- Hitung total rugi-rugi daya aktif sistem distribusi (dalam kW)
- Apakah tegangan di Bus 3 masih dalam batas yang diizinkan ($\pm 5\%$ dari nominal)? Jika tidak, apa solusinya?

Catatan: Gunakan tegangan nominal sebagai referensi awal untuk perhitungan arus, lalu iterasi jika diperlukan.

8 Soal Integrasi dan Studi Kasus (Bonus 10 poin)

8.1 Soal 8.1 - Studi Kasus Sistem Bengkulu (10 poin)

Sistem kelistrikan Provinsi Bengkulu memiliki komposisi pembangkit sebagai berikut:

- PLTU Teluk Sepang: 2×100 MW (batubara)
- PLTP Hululais: 2×55 MW (panas bumi)
- PLTA Musi: 18.2 MW (air)
- PLTA Ketahun: 28 MW (air)
- PLTD dan lainnya: ~ 20 MW (diesel dan cadangan)

Beban puncak sistem: 250 MW dengan faktor daya rata-rata 0.88 lagging.

- a) Hitung total kapasitas terpasang sistem Bengkulu
- b) Hitung reserve margin sistem (dalam % dari beban puncak)
- c) Hitung total daya reaktif yang diperlukan saat beban puncak
- d) Jika 30% dari beban puncak berasal dari sektor industri dengan PF 0.75 lagging, 50% dari sektor komersial dengan PF 0.90 lagging, dan 20% dari sektor residensial dengan PF 0.95 lagging, hitung:
 - i. Daya aktif dan reaktif masing-masing sektor
 - ii. Total kapasitor bank yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya sistem menjadi 0.95 lagging
- e) Diskusikan keuntungan dan tantangan bauran energi Bengkulu (PLTU batubara, PLTP, PLTA) dari perspektif:
 - i. Ketahanan energi
 - ii. Dampak lingkungan
 - iii. Fleksibilitas operasi
- f) Jika pemerintah ingin meningkatkan penetrasi energi terbarukan menjadi 60% dari total kapasitas, pembangkit jenis apa yang paling cocok untuk Bengkulu? Jelaskan dengan mempertimbangkan potensi lokal dan karakteristik teknis.

9 Soal Komputasi dengan GNU Octave (Bonus 10 poin)

9.1 Soal 9.1 - Analisis Aliran Daya Sederhana (10 poin)

Gunakan GNU Octave untuk menganalisis sistem tenaga sederhana berikut:

Data Sistem:

- 3 bus: Bus 1 (Slack), Bus 2 (PV), Bus 3 (PQ)
- Bus 1: $V_1 = 1.05 \angle 0$ pu (slack bus)
- Bus 2: $P_2 = 0.5$ pu, $V_2 = 1.03$ pu (generator bus)
- Bus 3: $P_3 = -0.8$ pu, $Q_3 = -0.4$ pu (load bus)
- Base: 100 MVA, 138 kV

Impedansi Saluran (pu):

- $Z_{12} = 0.02 + j0.06$ pu
- $Z_{13} = 0.01 + j0.04$ pu
- $Z_{23} = 0.015 + j0.05$ pu

Tugas:

- a) Buat matriks admitansi bus (Y_{bus}) dalam Octave
- b) Implementasikan metode Gauss-Seidel untuk menghitung aliran daya (minimal 3 iterasi atau hingga konvergen dengan toleransi 0.001)
- c) Tampilkan hasil:
 - Tegangan di setiap bus (magnitude dan sudut)
 - Daya aktif dan reaktif yang disuplai oleh bus slack
 - Aliran daya di setiap saluran
 - Total rugi-rugi sistem
- d) Buat plot konvergensi iterasi (error vs iterasi)
- e) **Lampirkan kode Octave yang lengkap dan terkomentari dengan baik**

Petunjuk:

- Mulai dengan asumsi tegangan awal: $V_2 = 1.03 \angle 0$ pu, $V_3 = 1.0 \angle 0$ pu
- Gunakan persamaan Gauss-Seidel:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(k)*}} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right]$$

- Untuk bus PV, update hanya sudut dan pertahankan magnitude tegangan

Rubrik Penilaian

Bagian	Poin	Kriteria
1. Pengantar Sistem Tenaga	10	Pemahaman struktur sistem, interkoneksi
2. Rangkaian Tiga Fasa	20	Perhitungan daya, sambungan Y- Δ , per-unit
3. Transformator	15	Efisiensi, regulasi, koneksi tiga fasa
4. Saluran Transmisi	20	Parameter saluran, model, ABCD, efek Ferranti
5. Komponen Simetris	15	Transformasi urutan, impedansi urutan nol
6. Pembangkitan	10	Sinkronisasi, perhitungan daya PLTA
7. Distribusi	10	Jatuh tegangan, rugi-rugi
Total Soal Wajib	100	
8. Studi Kasus (Bonus)	10	Analisis sistem terintegrasi
9. Komputasi Octave (Bonus)	10	Pemrograman, aliran daya
Total Maksimum	120	

— SELAMAT MENGERJAKAN —

*"Power system engineering is not just about equations,
it's about understanding how the grid keeps society running."*