

LEMBAR KERJA MINGGU 12

STABILITAS SISTEM TENAGA

Dasar-Dasar Sistem Tenaga Listrik
Fakultas Teknik - Universitas Bengkulu

Tujuan Pembelajaran

Setelah menyelesaikan lembar kerja ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Memahami konsep stabilitas sistem tenaga dan klasifikasinya
2. Menerapkan persamaan ayunan (swing equation) untuk analisis dinamika rotor
3. Menggunakan Equal-Area Criterion untuk menentukan stabilitas transien
4. Menghitung Critical Clearing Time (CCT) dan Critical Clearing Angle
5. Menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas
6. Mengevaluasi metode peningkatan stabilitas sistem tenaga
7. Melakukan simulasi stabilitas transien menggunakan Octave

1 Teori Singkat

1.1 Persamaan Ayunan

Persamaan yang mendeskripsikan dinamika rotor generator sinkron:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{atau} \quad \frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (1)$$

dimana:

- M = konstanta inersia (MW·s/rad)
- H = konstanta inersia (detik)
- ω_s = kecepatan sinkron = $2\pi f_0 = 314.16$ rad/s (untuk 50 Hz)
- δ = sudut rotor (radian elektrik)
- P_m = daya mekanik input (pu)
- P_e = daya elektrik output (pu)



1.2 Model SMIB (Single Machine Infinite Bus)

Untuk sistem sederhana generator terhubung ke infinite bus:

$$P_e = P_{max} \sin \delta = \frac{E'V}{X} \sin \delta \quad (2)$$

1.3 Equal-Area Criterion

Kondisi stabilitas:

$$A_1 = A_2 \quad (3)$$

dimana A_1 = energi akselerasi selama fault, A_2 = energi deselerasi setelah fault.



2 Level C1: Mengingat (Remember)

Soal 1.1 - Definisi Dasar

Jelaskan dengan kata-kata Anda sendiri:

- a. Apa yang dimaksud dengan stabilitas sistem tenaga?

- b. Sebutkan tiga jenis klasifikasi stabilitas sistem tenaga.

- c. Apa perbedaan antara stabilitas transien dan stabilitas small-signal?

Soal 1.2 - Komponen Persamaan

Tuliskan persamaan ayunan dalam dua bentuk (dengan M dan dengan H), dan jelaskan makna dari setiap variabel.

Soal 1.3 - Istilah Teknis

Definisikan istilah-istilah berikut:

- a. Critical Clearing Time (CCT)



- b. Critical Clearing Angle
- c. Equal-Area Criterion
- d. Power-Angle Curve
- e. Infinite Bus



3 Level C2: Memahami (Understand)

Soal 2.1 - Interpretasi Persamaan Ayunan

Persamaan ayunan menyatakan: $M\ddot{\delta} = P_m - P_e$

- Jelaskan apa yang terjadi pada sudut rotor δ jika $P_m > P_e$. Mengapa?
- Jelaskan apa yang terjadi pada sudut rotor δ jika $P_m < P_e$. Mengapa?
- Dalam kondisi operasi normal (steady-state), berapa nilai $P_m - P_e$? Jelaskan implikasinya.

Soal 2.2 - Kurva Daya-Sudut

Diberikan kurva daya-sudut: $P_e = 2.0 \sin \delta$ (pu)

- Gambarkan kurva ini untuk δ dari 0° hingga 180° .
- Pada sudut berapa daya maksimum terjadi? Berapa nilainya?



- c. Jika $P_m = 1.0$ pu, ada dua nilai δ yang memenuhi kesetimbangan. Mana yang stabil? Jelaskan.



Soal 2.3 - Equal-Area Criterion

Jelaskan dengan kata-kata Anda sendiri:

- a. Apa makna fisik dari "area A_1 " dalam Equal-Area Criterion?

- b. Apa makna fisik dari "area A_2 " dalam Equal-Area Criterion?

- c. Mengapa sistem stabil jika $A_1 = A_2$? Apa yang terjadi jika $A_1 > A_2$?

4 Level C3: Menerapkan (Apply)

Soal 3.1 - Perhitungan Dasar Persamaan Ayunan

Sebuah generator sinkron memiliki data:

- Rating: 100 MVA
- Konstanta inersia: $H = 5$ detik
- Frekuensi: 50 Hz
- Daya mekanik input: $P_m = 0.8$ pu
- Daya elektrik output: $P_e = 0.6$ pu

- a. Hitung konstanta inersia M dalam MW·s/rad.



b. Hitung akselerasi sudut rotor $\ddot{\delta}$ (dalam rad/s^2).

c. Generator sedang berakselerasi atau deselerasi? Jelaskan.



Soal 3.2 - Sistem SMIB

Sistem SMIB dengan data:

- $E' = 1.2$ pu, $V = 1.0$ pu
- Reaktansi total: $X = 0.6$ pu
- $P_m = 0.8$ pu

a. Hitung P_{max} untuk kondisi ini.

b. Hitung sudut rotor δ_0 pada kondisi operasi normal (pre-fault).

c. Gambarkan kurva $P_e = P_{max} \sin \delta$ dan tunjukkan titik operasi.

Soal 3.3 - Equal-Area Criterion Sederhana

Untuk sistem SMIB di Soal 3.2, terjadi gangguan solid 3-phase fault di tengah saluran transmisi.

- Pre-fault: $P_{e,pre} = 2.0 \sin \delta$ pu
- During fault: $P_{e,fault} = 0$ pu (solid fault)
- Post-fault: $P_{e,post} = 1.5 \sin \delta$ pu



- $P_m = 0.8$ pu
- $\delta_0 = 23.6$ (dari Soal 3.2)

- a. Hitung δ_{max} (sudut rotor maksimum setelah fault cleared) menggunakan kondisi $A_1 = A_2$.

Hint: $A_1 = P_m(\delta_c - \delta_0)$, $A_2 = \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} P_{e,post} d\delta - P_m(\delta_{max} - \delta_c)$

- b. Jika gangguan dilepas pada $\delta_c = 60$, apakah sistem stabil? (Periksa apakah $\delta_{max} < 180 - \delta_0$)



5 Level C4: Menganalisis (Analyze)

Soal 4.1 - Analisis Faktor Stabilitas

Perhatikan dua generator dengan data:

Parameter	Generator A	Generator B
Rating	100 MVA	500 MVA
Konstanta inersia H	3 detik	6 detik
Loading saat ini	80%	60%
Jarak ke beban	Dekat	Jauh

- a. Analisis generator mana yang lebih stabil terhadap gangguan transien. Pertimbangkan:
- Konstanta inersia
 - Level loading
 - Lokasi
- b. Jika harus memilih satu generator untuk di-trip saat terjadi gangguan besar, mana yang akan Anda pilih? Jelaskan alasannya dengan mempertimbangkan dampak terhadap stabilitas sistem dan kehilangan daya.



Soal 4.2 - Analisis Skenario Gangguan

Sistem Bengkulu memiliki konfigurasi:

- PLTU Bengkulu (200 MW, $H = 4$ detik)
- PLTP Hululais (110 MW, $H = 3$ detik)
- PLTA Musi (210 MW, $H = 5$ detik)
- Beban total: 450 MW
- Terhubung ke grid Sumatera via saluran 150 kV

Skenario: Hubung singkat 3-fasa pada saluran transmisi ke Sumatera.

- a. Analisis bagaimana setiap pembangkit akan merespons gangguan ini. Pembangkit mana yang paling rentan kehilangan sinkronisme? Mengapa?
- b. Jika saluran ke Sumatera terputus permanen (islanding), analisis apakah sistem Bengkulu dapat tetap stabil. Faktor apa yang perlu dipertimbangkan?
- c. Pada musim kemarau, kapasitas PLTA Musi turun menjadi 100 MW. Bagaimana ini mempengaruhi stabilitas sistem secara keseluruhan?



Soal 4.3 - Analisis Kurva Ayunan

Diberikan hasil simulasi stabilitas transien untuk dua kasus:

Kasus 1: CCT = 200 ms

- δ naik dari 30° ke 85° lalu berosilasi dan kembali stabil

Kasus 2: CCT = 250 ms

- δ naik dari 30° ke 95° lalu terus naik hingga 180°

a. Analisis mengapa Kasus 1 stabil sedangkan Kasus 2 tidak stabil.

b. Berapa kira-kira Critical Clearing Angle (δ_{cr}) untuk sistem ini?

c. Jika waktu buka PMT (circuit breaker) adalah 3 cycle (60 ms) + waktu proteksi relay 2 cycle (40 ms) = total 100 ms, berapa margin keamanan (safety margin) untuk sistem ini?



6 Level C5: Mengevaluasi (Evaluate)

Soal 5.1 - Evaluasi Metode Peningkatan Stabilitas

PLN Bengkulu menghadapi masalah stabilitas transien akibat gangguan pada saluran transmisi. Tiga solusi diusulkan:

Opsi A: Upgrade Proteksi

- Instalasi relay digital high-speed
- PMT dengan operating time 2 cycle (40 ms)
- Biaya: Rp 5 miliar

Opsi B: Instalasi PSS (Power System Stabilizer)

- PSS pada semua generator besar (PLTU, PLTP, PLTA)
- Meningkatkan damping ratio
- Biaya: Rp 8 miliar

Opsi C: Series Capacitor Compensation

- Mengurangi impedansi saluran 30%
- Meningkatkan P_{max}
- Biaya: Rp 15 miliar

a. Evaluasi kelebihan dan kekurangan masing-masing opsi dari segi:

- Efektivitas teknis
- Biaya
- Kompleksitas implementasi
- Manfaat jangka panjang



- b. Berikan rekomendasi solusi terbaik untuk Bengkulu. Jelaskan alasan Anda dengan mempertimbangkan karakteristik sistem Bengkulu (banyak PLTA, beban relatif kecil, terisolasi).
- c. Apakah kombinasi dua solusi lebih baik daripada satu solusi saja? Jika ya, kombinasi mana? Justifikasi jawaban Anda.

Soal 5.2 - Evaluasi Dampak Energi Terbarukan

Bengkulu merencanakan peningkatan penetrasi energi terbarukan:

- PLTS 150 MW (intermiten, tidak ada inersia)
- PLTMH 50 MW (run-of-river, inersia rendah)
- Target: 50% energi dari terbarukan pada 2030

- a. Evaluasi dampak penetrasi energi terbarukan tinggi terhadap stabilitas transien sistem Bengkulu. Pertimbangkan:
- Penurunan total inersia sistem
 - Variabilitas pembangkitan
 - Displacement generator sinkron konvensional



b. Evaluasi solusi untuk menjaga stabilitas dengan penetrasi tinggi energi terbarukan:

- Battery Energy Storage System (BESS)
- Synchronous Condenser
- Virtual Inertia dari inverter
- Load shedding schemes

Mana yang paling cocok untuk Bengkulu? Mengapa?

c. Apakah target 50% energi terbarukan realistis dari sudut pandang stabilitas sistem? Berikan opini Anda dengan justifikasi teknis dan ekonomis.



7 Level C6: Mencipta (Create)

Soal 6.1 - Proyek: Simulasi Stabilitas Transien

Tugas: Buat program Octave untuk mensimulasikan stabilitas transien sistem SMIB dengan berbagai skenario gangguan.

Spesifikasi Program:

- a. Program harus dapat menerima input:
 - Parameter generator (H, P_m, E')
 - Parameter jaringan ($X_{pre}, X_{fault}, X_{post}, V$)
 - Parameter gangguan (waktu mulai fault, clearing time)
- b. Program harus menghitung dan memplot:
 - Kurva $\delta(t)$ vs waktu
 - Kurva $\omega(t)$ vs waktu
 - Power-angle curve dengan trajectory
- c. Program harus dapat menentukan:
 - Apakah sistem stabil atau tidak
 - Critical Clearing Time (dengan iterasi)

Langkah Pengerjaan:

1. Tuliskan persamaan diferensial yang akan diselesaikan.

2. Buat flowchart algoritma program Anda.



3. Implementasikan dalam Octave. Tuliskan kode Anda di bawah atau lampirkan sebagai file terpisah.

4. Lakukan studi kasus dengan data:

- $H = 5$ detik, $P_m = 1.0$ pu
- $E' = 1.3$ pu, $V = 1.0$ pu
- $X_{pre} = 0.5$ pu, $X_{fault} = 2.0$ pu, $X_{post} = 0.7$ pu
- Clearing time: 150 ms, 200 ms, 250 ms

Tunjukkan hasil plot dan analisis.

(Lampirkan plot dan analisis)



5. Lakukan analisis sensitivitas:

- Bagaimana CCT berubah jika H diubah dari 3 hingga 7 detik?
- Bagaimana CCT berubah jika P_m diubah dari 0.6 hingga 1.2 pu?

Buat grafik dan interpretasi.

(Lampirkan grafik dan interpretasi)

Soal 6.2 - Proyek: Desain Sistem Proteksi untuk Stabilitas

Tugas: Rancang skema proteksi komprehensif untuk menjaga stabilitas transien sistem Bengkulu.

Konteks:

- Sistem Bengkulu: 4 pembangkit utama, beban puncak 500 MW
- Rentan terhadap gangguan pada saluran transmisi
- Target: CCT minimal 200 ms untuk semua skenario gangguan

Deliverables:

a. **Analisis Kebutuhan**

- Identifikasi titik-titik kritis dalam sistem
- Tentukan skenario gangguan terburuk (worst-case)
- Hitung CCT yang dibutuhkan



b. Desain Skema Proteksi

- Jenis relay yang digunakan (distance, overcurrent, differential)
- Setting waktu operasi
- Koordinasi antar relay
- Backup protection

c. Skema Special Protection System (SPS)

- Generator tripping scheme
- Load shedding scheme (jika perlu)
- Automatic reclosing



d. Diagram Single-Line

Gambarkan diagram single-line sistem Bengkulu dengan lokasi semua peralatan proteksi.

e. Testing dan Validation Plan

Bagaimana Anda akan menguji dan memvalidasi skema proteksi ini tanpa mengganggu operasi sistem?

f. Estimasi Biaya dan Timeline Implementasi



Soal 6.3 - Proyek: Strategi Operasi untuk Grid Bengkulu 2030

Tugas: Kembangkan strategi operasi komprehensif untuk menjaga stabilitas sistem Bengkulu pada tahun 2030 dengan penetrasi energi terbarukan 50%.

Asumsi Sistem 2030:

- PLTS: 150 MW (variabel 0-100%)
- PLTA/PLTP: 400 MW (baseload)
- PLTMH: 50 MW (run-of-river)
- PLTU: 200 MW (backup)
- BESS: 100 MW / 400 MWh
- Beban puncak: 650 MW

Deliverables:

a. **Operating Philosophy**

Tuliskan prinsip-prinsip operasi untuk menjaga stabilitas:

- Minimum online inersia yang harus dijaga
- Aturan dispatching renewable vs conventional
- Penggunaan BESS untuk stabilitas

b. **Day-Ahead Scheduling Algorithm**

Rancang algoritma untuk penjadwalan pembangkit 24 jam ke depan dengan mempertimbangkan:

- Forecast PLTS dan PLTMH
- Kebutuhan reserve untuk stabilitas
- Ekonomi operasi



Buat flowchart algoritma.

(Lampirkan flowchart)



c. Real-Time Control Strategy

Rancang strategi kontrol real-time untuk mengatasi:

- Sudden PLTS drop (awan menghalangi matahari)
- Trip pembangkit besar
- Lonjakan beban mendadak

Buat logic diagram untuk setiap skenario.

d. BESS Control Logic

Rancang logic kontrol untuk BESS dengan dual function:

- Energy arbitrage (ekonomi)
- Stability support (teknis)

Prioritas mana yang lebih penting? Bagaimana trade-off-nya?



e. **Simulasi Operasi Harian**

Lakukan simulasi operasi untuk:

- Hari cerah (PLTS maksimal)
- Hari mendung (PLTS 30%)

Tunjukkan:

- Dispatch schedule tiap pembangkit
- State of Charge (SoC) BESS
- Total inersia sistem sepanjang hari
- Margin stabilitas (jarak ke batas tidak stabil)

(Lampirkan hasil simulasi dengan grafik)

f. **Monitoring dan Reporting**

Rancang dashboard monitoring real-time untuk operator. Indikator apa saja yang harus ditampilkan terkait stabilitas?

g. **Policy Recommendation**

Buat rekomendasi kebijakan untuk pemerintah Bengkulu terkait:

- Regulasi interconnection untuk renewable energy
- Insentif untuk ancillary services dari BESS
- Standar teknis untuk grid-connected inverter



Catatan Pengerjaan

Untuk Soal Komputasi (C3):

- Tunjukkan semua langkah perhitungan
- Sertakan unit untuk setiap besaran
- Gunakan kalkulator/software untuk perhitungan numerik kompleks

Untuk Soal Analisis dan Evaluasi (C4-C5):

- Berikan argumen yang jelas dan logis
- Gunakan data dan teori yang telah dipelajari
- Pertimbangkan multiple perspectives
- Tidak ada jawaban "benar" atau "salah" - yang dinilai adalah kualitas analisis

Untuk Soal Proyek (C6):

- Kerjakan secara berkelompok (max 3 orang)
- Deadline: 2 minggu dari sekarang
- Presentasikan hasil proyek di kelas
- Sertakan dokumentasi lengkap (code, data, grafik, analisis)

Referensi

1. Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.
2. Saadat, H. (2011). *Power System Analysis*. McGraw-Hill.
3. Stevenson, W. D., & Grainger, J. J. (1994). *Power System Analysis*. McGraw-Hill.
4. Anderson, P. M., & Fouad, A. A. (2003). *Power System Control and Stability*. IEEE Press.
5. Octave Documentation: <https://www.gnu.org/software/octave/doc/>

— SELAMAT MENGERJAKAN —

*"Stability is not just about surviving disturbances,
it's about thriving through them."*