

PROBLEM SET MINGGU 12

STABILITAS SISTEM TENAGA

Dasar-Dasar Sistem Tenaga Listrik
Fakultas Teknik - Universitas Bengkulu

Petunjuk Pengerjaan

- Problem set ini terdiri dari soal-soal dengan tingkat kesulitan bertingkat (C1-C6 Bloom's Taxonomy)
- Kerjakan soal secara sistematis dengan menunjukkan langkah-langkah penyelesaian
- Untuk soal komputasi, gunakan Octave/MATLAB jika diperlukan
- Sertakan analisis dan interpretasi untuk soal-soal tingkat tinggi (C4-C6)
- Total skor: 100 poin

1 Level C1: Mengingat (Remember) - 15 poin

Soal 1.1 (5 poin)

Sebutkan dan jelaskan secara singkat tiga klasifikasi utama stabilitas sistem tenaga berdasarkan fenomena fisik yang terlibat.

Soal 1.2 (5 poin)

Tuliskan persamaan ayunan (swing equation) dalam bentuk standar dan jelaskan makna dari konstanta inersia H . Berapa typical range nilai H untuk generator hidro dan generator termal?



Soal 1.3 (5 poin)

Definisikan istilah berikut dan berikan contoh:

- a. Transient stability
- b. Small-signal stability
- c. Critical Clearing Time (CCT)



2 Level C2: Memahami (Understand) - 15 poin

Soal 2.1 (6 poin)

Jelaskan mengapa generator dengan konstanta inersia H yang lebih besar cenderung lebih stabil terhadap gangguan transien. Gunakan persamaan ayunan dalam penjelasan Anda.

Soal 2.2 (4 poin)

Perhatikan kurva power-angle berikut: $P_e = P_{max} \sin \delta$
Jelaskan mengapa:

- Titik operasi pada $\delta < 90$ disebut "stabil"
- Titik operasi pada $\delta > 90$ disebut "tidak stabil"

Soal 2.3 (5 poin)

Dalam Equal-Area Criterion, dua area (A_1 dan A_2) merepresentasikan energi. Jelaskan:

- Dari mana energi untuk area A_1 berasal?
- Ke mana energi untuk area A_2 diserap?
- Apa yang terjadi pada sistem jika $A_1 > A_2$?



3 Level C3: Menerapkan (Apply) - 25 poin

Soal 3.1 (10 poin)

Sebuah generator sinkron 200 MVA, $H = 4.5$ detik, beroperasi pada sistem 50 Hz. Generator memberikan daya 150 MW ke sistem. Terjadi gangguan yang menyebabkan daya elektrik output turun menjadi 80 MW.

- Hitung konstanta inersia M dalam MW·s/rad elektrik.
- Hitung akselerasi awal rotor $\ddot{\delta}_0$ (rad/s² elektrik).
- Jika gangguan berlangsung 0.1 detik, estimasi perubahan sudut rotor $\Delta\delta$ (gunakan aproksimasi $\Delta\delta \approx \frac{1}{2}\ddot{\delta}_0 t^2$).
- Apakah perubahan sudut ini signifikan? Jelaskan.

Soal 3.2 (15 poin)

Sistem SMIB dengan data berikut:

- Generator: $E' = 1.25$ pu, $H = 5$ detik, $P_m = 1.0$ pu
- Infinite bus: $V = 1.0$ pu
- Reaktansi: $X_d' = 0.3$ pu, $X_T = 0.15$ pu, $X_L = 0.25$ pu



a. Hitung reaktansi total dan P_{max} untuk kondisi normal (pre-fault).

b. Hitung sudut rotor operasi normal δ_0 .



- c. Terjadi fault solid 3-phase di bus generator. Setelah fault dilepas, salah satu saluran transmisi terputus sehingga $X_{post} = X'_d + X_T + 2X_L = 0.95$ pu. Hitung $P_{max,post}$.

- d. Menggunakan Equal-Area Criterion, tentukan critical clearing angle δ_{cr} .

Hint: Untuk fault solid, $A_1 = P_m(\delta_{cr} - \delta_0)$

Untuk A_2 : $\int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} P_{max,post} \sin \delta d\delta - P_m(\delta_{max} - \delta_{cr}) = A_1$

dengan δ_{max} adalah sudut dimana $P_{max,post} \sin \delta_{max} = P_m$ (titik kesetimbangan post-fault).

- e. Jika kecepatan clearing adalah 5 cycles (100 ms) dan rotor berakselerasi dengan $\ddot{\delta} \approx \frac{\omega_s}{2H} P_m$ selama fault, estimasi δ saat fault cleared. Apakah sistem stabil?



4 Level C4: Menganalisis (Analyze) - 20 poin

Soal 4.1 (10 poin)

Diberikan data hasil studi stabilitas transien untuk sistem interkoneksi Bengkulu-Sumatera:

Skenario Gangguan	CCT (ms)	δ_{max} (deg)
Fault di bus PLTU Bengkulu	180	125
Fault di saluran 150 kV (dekat Bengkulu)	220	105
Fault di saluran 150 kV (tengah)	280	85
Fault di saluran 150 kV (dekat Sumatera)	320	72

- Analisis hubungan antara lokasi fault dengan CCT. Mengapa fault dekat generator memiliki CCT yang lebih kecil?
- Jika waktu operasi proteksi adalah: relay (2 cycles) + PMT (3 cycles) = 100 ms total, skenario mana yang paling kritis? Berapa margin keamanannya?
- Berdasarkan data δ_{max} , urutkan skenario dari yang paling stabil hingga paling tidak stabil. Jelaskan reasoning Anda.

**Soal 4.2 (10 poin)**

Sistem Bengkulu memiliki tiga pembangkit dengan karakteristik berbeda:

Pembangkit	Kapasitas (MW)	H (detik)	Loading (%)
PLTU Bengkulu (steam)	200	4.0	80%
PLTP Hululais (geothermal)	110	3.5	90%
PLTA Musi (hydro)	210	6.0	70%

- a. Hitung total konstanta inersia ekivalen sistem H_{eq} jika semua pembangkit beroperasi.

Hint: $H_{eq} = \frac{\sum H_i S_i}{\sum S_i}$ dimana S_i adalah MVA rating (asumsikan rating = kapasitas/0.9)

- b. Pada musim kemarau, PLTA Musi hanya beroperasi pada 50% kapasitas (105 MW). Hitung H_{eq} yang baru. Bagaimana ini mempengaruhi stabilitas sistem?

- c. Jika akan menambah PLTS 100 MW (tidak berkontribusi pada inersia), berapa penurunan H_{eq} relatif terhadap total kapasitas terpasang? Analisis implikasinya.



5 Level C5: Mengevaluasi (Evaluate) - 15 poin

Soal 5.1 (15 poin)

PLN Bengkulu harus memutuskan investasi untuk meningkatkan stabilitas transien sistem. Dua opsi yang dipertimbangkan:

Opsi A: Fast Acting Excitation System + PSS

- Instalasi AVR digital dengan respon sangat cepat pada semua generator
- PSS untuk meredam osilasi
- Meningkatkan CCT sekitar 25-30%
- Biaya: Rp 12 miliar
- Waktu implementasi: 6 bulan
- Maintenance cost: Rp 500 juta/tahun

Opsi B: TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

- Instalasi TCSC pada saluran transmisi utama ke Sumatera
- Mengurangi impedansi saluran 40% (variable)
- Meningkatkan P_{max} dan CCT sekitar 35-40%
- Biaya: Rp 25 miliar
- Waktu implementasi: 12 bulan
- Maintenance cost: Rp 1.2 miliar/tahun
- Benefit tambahan: meningkatkan kapasitas transfer daya

Data tambahan:

- Proteksi existing: total clearing time 120 ms
- CCT saat ini untuk gangguan kritis: 200 ms (margin: 80 ms)
- Target margin keamanan: minimal 120 ms
- PLTS 150 MW akan ditambahkan dalam 3 tahun (mengurangi inersia sistem)

a. Evaluasi kedua opsi dari berbagai aspek:

- Efektivitas teknis (peningkatan CCT, margin)
- Economic viability (NPV 10 tahun, discount rate 8%)
- Implementasi dan operasional
- Fleksibilitas untuk masa depan
- Risiko dan ketergantungan pada teknologi



b. Pertimbangkan skenario masa depan (3 tahun):

- Penambahan PLTS 150 MW mengurangi H_{eq} sistem 30%
- Ini akan mengurangi CCT sekitar 15-20%

Dengan skenario ini, opsi mana yang lebih robust? Apakah perlu kombinasi kedua opsi?

c. Berikan rekomendasi final Anda dengan justifikasi lengkap. Pertimbangkan:

- Technical performance
- Economic feasibility
- Future-proofing
- Risk management

Jika budget terbatas (hanya Rp 15 miliar), apa alternatif solusi Anda?



6 Level C6: Mencipta (Create) - 10 poin + Bonus

Soal 6.1 (10 poin + Bonus)

Mini Project: Adaptive Stability Assessment System

Anda ditugaskan merancang sistem monitoring dan assessment stabilitas transien secara real-time untuk grid Bengkulu. Sistem ini harus dapat:

1. Memonitor parameter kunci yang mempengaruhi stabilitas
2. Menghitung CCT secara online berdasarkan kondisi operasi saat ini
3. Memberikan early warning jika margin stabilitas terlalu kecil
4. Merekomendasikan tindakan preventif

Tugas Anda:

a. Desain Arsitektur Sistem (3 poin)

Buat diagram blok sistem yang menunjukkan:

- Input data (dari SCADA, PMU, dll)
- Modul komputasi
- Output (dashboard, alarm, rekomendasi)
- Interface dengan sistem lain (EMS, proteksi)

b. Parameter Monitoring (2 poin)

Tentukan parameter apa saja yang harus dimonitor dan mengapa:

- Generator (P, Q, V, frequency, dll)
- Network (line flows, bus voltages, dll)
- System-wide (total inertia, dispatch, reserve, dll)



c. **Algoritma CCT Calculation (3 poin)**

Rancang algoritma untuk menghitung CCT secara online. Buat flowchart yang mencakup:

- Pembacaan data real-time
- Estimasi parameter sistem (H_{eq} , P_{max} , dll)
- Perhitungan CCT untuk skenario gangguan tipikal
- Update periodik

Catatan: Algoritma harus cepat (eksekusi ≤ 1 detik) untuk real-time application

(Lampirkan flowchart)

d. **Decision Logic untuk Early Warning (2 poin)**

Rancang decision tree untuk menentukan level warning:

- **GREEN**: Margin ≥ 150 ms (aman)
- **YELLOW**: Margin 100-150 ms (perhatian)
- **ORANGE**: Margin 50-100 ms (waspada)
- **RED**: Margin ≤ 50 ms (kritis)

Untuk setiap level, tentukan tindakan yang harus dilakukan operator.



e. **BONUS (hingga 10 poin tambahan)**

Implementasikan prototype sistem Anda dalam Octave/MATLAB/Python. Sistem harus dapat:

- Membaca data dari file (simulasi real-time data)
- Menghitung CCT
- Menampilkan dashboard sederhana (grafik, indikator)
- Generate alarm jika perlu

Deliverables untuk bonus:

- Source code lengkap dengan dokumentasi
- Sample input data
- Screenshot/video demo sistem berjalan
- Report singkat (2-3 halaman) menjelaskan implementasi

(Lampirkan sebagai file terpisah)



Soal Tambahan (Opsional - Extra Credit)

Soal EC.1 (5 poin extra)

Blackout Analysis

Cari dan analisis satu kasus blackout besar dalam 10 tahun terakhir (contoh: blackout Jawa-Bali, blackout India, blackout Amerika Utara, dll). Tuliskan laporan analisis (2-3 halaman) yang mencakup:

1. Kronologi kejadian
2. Root cause analysis (penyebab utama dan kontribusi)
3. Apakah masalah stabilitas transien terlibat? Jika ya, bagaimana?
4. Lessons learned
5. Rekomendasi untuk mencegah kejadian serupa di sistem Bengkulu

Soal EC.2 (5 poin extra)

Literature Review: Virtual Inertia

Dengan meningkatnya penetrasi renewable energy (tanpa inersia), konsep "virtual inertia" atau "synthetic inertia" menjadi penting. Lakukan literature review (minimal 3 jurnal/conference paper) tentang:

1. Apa itu virtual inertia dan bagaimana cara kerjanya?
2. Teknologi apa yang dapat menyediakan virtual inertia? (battery, flywheel, grid-forming inverter, dll)
3. Studi kasus implementasi di sistem tenaga nyata
4. Apakah teknologi ini applicable untuk Bengkulu? Analisis kelayakan.

Tuliskan report (3-4 halaman) dengan proper citation.



Rubrik Penilaian

Soal C1-C2 (30 poin)

- Ketepatan definisi dan konsep (15 poin)
- Kelengkapan penjelasan (10 poin)
- Clarity dan struktur jawaban (5 poin)

Soal C3 (25 poin)

- Kebenaran perhitungan matematis (15 poin)
- Kelengkapan langkah penyelesaian (5 poin)
- Interpretasi hasil (5 poin)

Soal C4 (20 poin)

- Kedalaman analisis (10 poin)
- Kemampuan mengidentifikasi pola dan hubungan (5 poin)
- Kualitas interpretasi dan reasoning (5 poin)

Soal C5 (15 poin)

- Kemampuan evaluasi multi-kriteria (6 poin)
- Kualitas justifikasi dan argumen (5 poin)
- Pertimbangan konteks dan trade-offs (4 poin)

Soal C6 (10 poin + Bonus)

- Kreativitas dan inovasi solusi (3 poin)
- Kelengkapan dan koherensi desain (4 poin)
- Feasibility dan practicality (3 poin)
- Bonus implementation (0-10 poin)

Extra Credit (0-10 poin)

- Kualitas research dan analisis
- Depth dan breadth coverage
- Relevance untuk konteks Bengkulu



Referensi

1. Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill. (Buku referensi utama untuk stabilitas)
2. Saadat, H. (2011). *Power System Analysis*. McGraw-Hill. (Chapter tentang transient stability)
3. Anderson, P. M., & Fouad, A. A. (2003). *Power System Control and Stability*. IEEE Press/Wiley.
4. Machowski, J., Bialek, J., & Bumby, J. (2008). *Power System Dynamics: Stability and Control*. John Wiley & Sons.
5. Pai, M. A. (1989). *Energy Function Analysis for Power System Stability*. Springer.
6. IEEE/CIGRE Joint Task Force. (2004). "Definition and Classification of Power System Stability." *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(3), 1387-1401.
7. Vittal, V., McCalley, J. D., Anderson, P. M., & Fouad, A. A. (2000). "Power System Stability." *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*.
8. NERC (North American Electric Reliability Corporation). (2012). "Special Report: System Disturbance Performance."
9. Octave Documentation: <https://www.gnu.org/software/octave/doc/>
10. MATPOWER Manual: <https://matpower.org/docs/MATPOWER-manual.pdf>

Catatan Penting

- **Deadline:** 1 minggu dari tanggal pemberian
- **Format Pengumpulan:**
 - Tulisan tangan: Scan dan upload sebagai PDF
 - Ketikan: Submit sebagai PDF
 - Code (untuk soal C6): Submit sebagai .m atau .py file terpisah dengan README
- **Academic Integrity:**
 - Diskusi dengan teman diperbolehkan, tapi tuliskan jawaban dengan kata-kata sendiri
 - Untuk soal C6: kerjakan berkelompok (max 3 orang), cantumkan nama semua anggota
 - Plagiarisme akan mengakibatkan nilai 0
- **Office Hours:**
 - Jika ada kesulitan, datang ke office hours atau kirim email



- Jangan menunggu hingga mendekati deadline!

— SELAMAT MENGERJAKAN —

*“Understanding stability is not just about solving equations,
it’s about developing intuition for how power systems behave under stress.”*

Good luck!