

Stabilitas Sistem Tenaga

Dasar Sistem Tenaga Listrik - Minggu 12

Novalio Daratha

Universitas Bengkulu
Fakultas Teknik

August 9, 2026



Outline

- 1 Pendahuluan
- 2 Persamaan Ayunan (Swing Equation)
- 3 Stabilitas Transien
- 4 Metode Peningkatan Stabilitas
- 5 Simulasi dan Komputasi
- 6 Ringkasan

Mengapa Stabilitas Sistem Tenaga Penting?

Definisi Stabilitas Sistem Tenaga

Stabilitas sistem tenaga adalah kemampuan sistem untuk mempertahankan kondisi operasi kesetimbangan di bawah kondisi operasi normal dan untuk mendapatkan kembali kesetimbangan setelah mengalami gangguan.

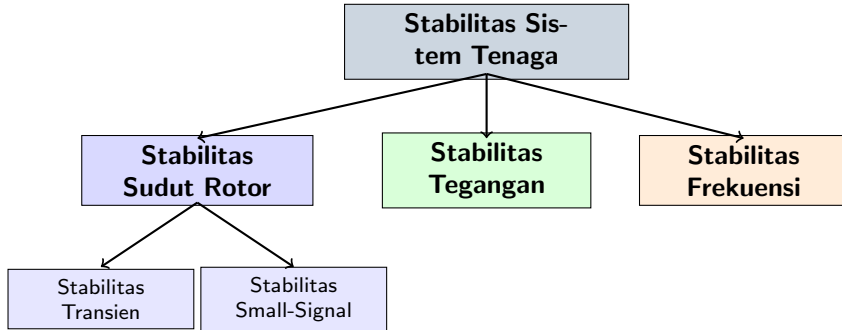
Mengapa kita harus peduli tentang stabilitas?

- Sistem tenaga selalu mengalami gangguan (petir, hubung singkat, peralatan rusak)
- Kehilangan stabilitas dapat menyebabkan *blackout* massal
- Kerugian ekonomi dan sosial yang sangat besar
- Keselamatan peralatan dan manusia

Contoh Kasus

Blackout massal Jawa-Bali 2005: Kehilangan 13,800 MW dalam beberapa detik, mempengaruhi 100 juta penduduk. Penyebab utama: ketidakstabilan sistem.

Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga



Fokus perkuliaan ini: Stabilitas sudut rotor (rotor angle stability), terutama stabilitas transien.

Definisi

Kemampuan generator sinkron dalam sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisme setelah mengalami gangguan.

Dua jenis:

① Stabilitas Transien (Transient Stability)

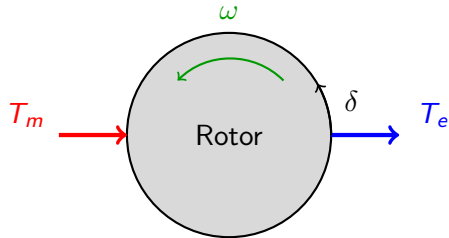
- Gangguan besar (hubung singkat, kehilangan generator/saluran)
- Time frame: 0-10 detik pertama
- Analisis dengan persamaan ayunan non-linear

② Stabilitas Small-Signal (Small-Signal Stability)

- Gangguan kecil (fluktuasi beban normal)
- Time frame: beberapa detik hingga menit
- Analisis dengan linearisasi sistem
- Terkait dengan osilasi daya rendah (low-frequency oscillations)

Mekanisme Generator Sinkron

Konsep dasar:



Prinsip kerja:

- Turbin memberikan torsi mekanik T_m
- Beban listrik menarik torsi elektrik T_e
- Kesetimbangan: $T_m = T_e$
- Jika tidak seimbang: rotor berakselerasi/deselerasi
- δ = sudut rotor (power angle)

Kunci Stabilitas

Generator tetap sinkron jika sudut rotor δ tidak melebihi batas kritis.

Derivasi Persamaan Ayunan (1/2)

Hukum Newton untuk gerak rotasi:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (1)$$

dimana:

- J = momen inersia rotor ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
- θ_m = sudut mekanik rotor
- T_m = torsi mekanik dari turbin ($\text{N} \cdot \text{m}$)
- T_e = torsi elektrik ke jaringan ($\text{N} \cdot \text{m}$)

Konversi ke besaran elektrik:

$$\theta_m = \frac{2}{P} \delta \quad (\text{sudut elektrik}) \quad (2)$$

$$\omega_m = \frac{2}{P} \omega \quad (\text{kecepatan elektrik}) \quad (3)$$

dimana P = jumlah kutub generator.

Derivasi Persamaan Ayunan (2/2)

Dalam bentuk daya dan per-unit:

Persamaan Ayunan (Swing Equation)

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (4)$$

atau dalam bentuk standar:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (5)$$

dimana:

- M = konstanta inersia (MW·s/rad elektrik)
- H = konstanta inersia (detik) = energi kinetik tersimpan / rating daya
- ω_s = kecepatan sinkron (rad/s elektrik) = $2\pi f_0 = 2\pi \times 50 = 314.16$ rad/s
- δ = sudut rotor (radian elektrik)
- P_m = daya mekanik input (per-unit)

Interpretasi Persamaan Ayunan

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{atau} \quad M \ddot{\delta} = P_a \quad (6)$$

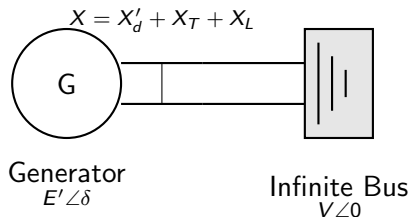
dimana $P_a = P_m - P_e$ adalah **daya akselerasi**.

Tiga kondisi operasi:

- ① **Kesetimbangan:** $P_m = P_e \Rightarrow P_a = 0$
 - $\ddot{\delta} = 0$: sudut rotor konstan
 - Generator beroperasi pada kecepatan sinkron
- ② **Akselerasi:** $P_m > P_e \Rightarrow P_a > 0$
 - $\ddot{\delta} > 0$: sudut rotor bertambah
 - Rotor berakselerasi, kecepatan $> \omega_s$
- ③ **Deselerasi:** $P_m < P_e \Rightarrow P_a < 0$
 - $\ddot{\delta} < 0$: sudut rotor berkurang
 - Rotor melambat, kecepatan $< \omega_s$

Model SMIB (Single Machine Infinite Bus)

Sistem paling sederhana untuk analisis stabilitas:



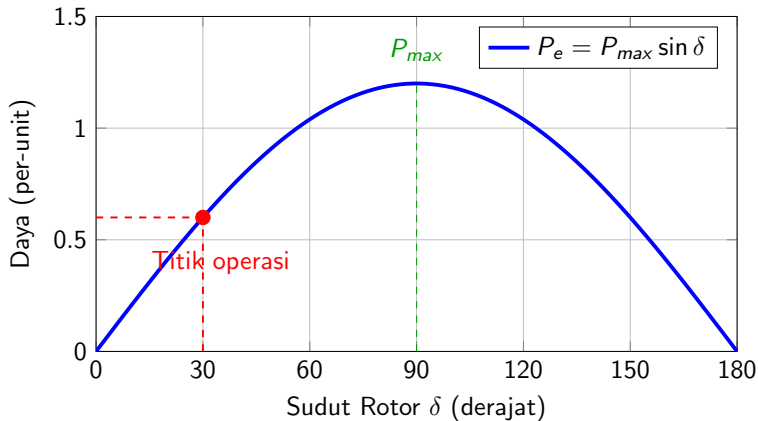
Asumsi:

- Infinite bus: tegangan dan frekuensi konstan, tidak terpengaruh gangguan
- Model generator: behind transient reactance (E')
- Reactance total: $X = X'_d + X_T + X_L$

Persamaan daya:

$$P_e = \frac{E' V}{X} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (7)$$

Kurva Daya-Sudut (Power-Angle Curve)

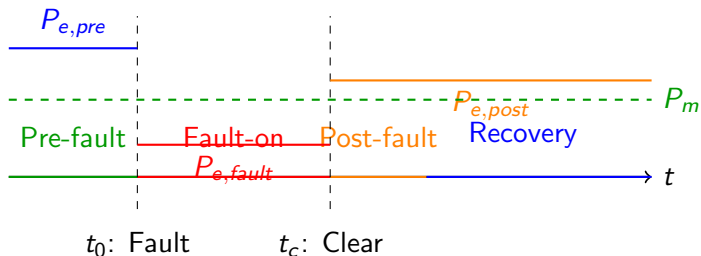


Karakteristik:

- Daya maksimum pada $\delta = 90$
- Titik operasi normal: $\delta_0 = 20 - 40$ (stabil)

Skenario Gangguan Tipikal

Contoh: Hubung singkat tiga fasa di saluran transmisi



Tiga tahap analisis:

- 1 **Pre-fault:** Kondisi normal, $P_m = P_e$
- 2 **During fault:** P_e turun drastis, rotor berakselerasi ($P_m > P_e$)
- 3 **Post-fault:** Setelah PMT membuka, P_e naik tetapi berbeda dari kondisi awal

Kriteria Luas Sama (Equal-Area Criterion) - Konsep

Metode grafis untuk menentukan stabilitas transien pada sistem SMIB.

Prinsip dasar:

- Energi kinetik yang diperoleh selama akselerasi (fault) harus dapat diserap kembali saat deselerasi (post-fault)
- Jika energi kinetik berlebih: rotor terus berakselerasi → tidak stabil
- Jika energi dapat diserap: rotor kembali ke posisi sinkron → stabil

Persamaan Energi

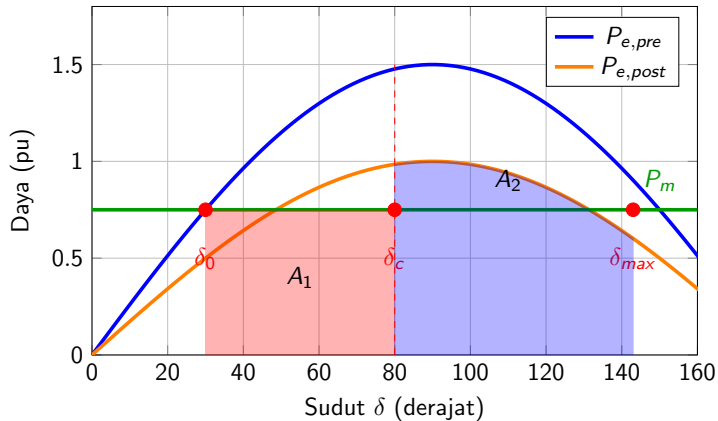
Mengalikan persamaan ayunan dengan $\frac{d\delta}{dt}$:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} \cdot \frac{d\delta}{dt} = (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (8)$$

Integrasi:

$$\Delta KE = \int^{\delta} (P_m - P_e) d\delta \quad (9)$$

Kriteria Luas Sama - Ilustrasi Grafis



Kriteria Stabilitas

Sistem stabil jika: $A_1 = A_2$ (luas area sama)

Perhitungan Critical Clearing Angle

Untuk sistem stabil:

$$A_1 = P_m(\delta_c - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_c} P_{e,fault} d\delta \quad (10)$$

$$A_2 = \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} P_{e,post} d\delta - P_m(\delta_{max} - \delta_c) \quad (11)$$

Dengan $A_1 = A_2$ dan untuk kasus fault solid (3-phase):

Jika $P_{e,fault} = 0$, maka:

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} \left[\frac{P_m}{P_{max,post}} + \frac{\pi - 2\delta_0 + \sin(2\delta_0)}{2} \right] \quad (12)$$

Critical Clearing Time (CCT)

Waktu maksimum gangguan boleh bertahan agar sistem masih stabil.
Semakin kecil CCT, semakin rentan sistem terhadap gangguan.

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Stabilitas Transien

① Durasi gangguan (clearing time)

- Semakin cepat PMT membuka, semakin baik stabilitas
- Typical: 3-5 cycles (60-100 ms)

② Lokasi gangguan

- Gangguan dekat generator: lebih berbahaya
- Gangguan di tengah saluran: lebih ringan

③ Konstanta inersia (H)

- Generator besar: H tinggi $\rightarrow$ lebih stabil (akselerasi lambat)
- Generator kecil: H rendah $\rightarrow$ kurang stabil

④ Level pembebanan

- Beban tinggi: δ_0 besar $\rightarrow$ margin stabilitas kecil
- Beban rendah: δ_0 kecil $\rightarrow$ margin stabilitas besar

⑤ Impedansi jaringan

- X besar: P_{max} kecil $\rightarrow$ kurang stabil
- X kecil: P_{max} besar $\rightarrow$ lebih stabil

Tiga pendekatan utama:

① Mengurangi durasi gangguan

- Proteksi cepat (high-speed protection)
- PMT kecepatan tinggi
- Auto-reclosing schemes

② Meningkatkan P_{max} (daya transfer maksimum)

- Mengurangi impedansi transmisi (parallel lines, series compensation)
- Meningkatkan tegangan sistem
- Fast excitation systems

③ Mengurangi energi akselerasi selama fault

- Fast valving (turbin steam)
- Generator tripping (shedding)
- Braking resistors

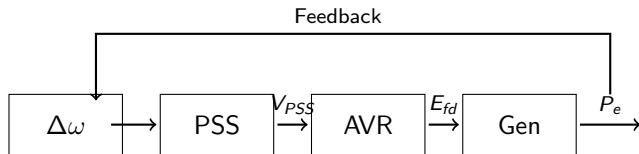
Power System Stabilizer (PSS)

Definisi

PSS adalah kontroler tambahan pada sistem eksitasi generator untuk meredam osilasi daya rendah (low-frequency power oscillations).

Fungsi:

- Mendeteksi deviasi kecepatan atau daya
- Memberikan sinyal tambahan ke AVR (Automatic Voltage Regulator)
- Menghasilkan torsi peredam (damping torque)



Dampak: Meningkatkan damping ratio, mengurangi osilasi, meningkatkan stabilitas

FACTS Devices untuk Stabilitas

FACTS (Flexible AC Transmission Systems): Perangkat elektronika daya untuk kontrol dinamis parameter jaringan.

Device	Fungsi	Dampak Stabilitas
SVC (Static Var Compensator)	Kompensasi reaktif dinamis (kapasitor/reaktor switching)	Kontrol tegangan, tingkatkan P_{max}
STATCOM	Kompensasi reaktif cepat (inverter-based)	Kontrol tegangan lebih baik dari SVC
TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)	Kompensasi seri variabel (mengubah impedansi saluran)	Kurangi X , tingkatkan P_{max} , redam osilasi
UPFC (Unified Power Flow Controller)	Kontrol komprehensif (tegangan, impedansi, sudut)	Kontrol daya aktif, reaktif, dan tegangan secara simultan

Studi Kasus: Stabilitas Sistem Bengkulu

Karakteristik sistem Bengkulu:

- Beban puncak: ~ 500 MW
- Pembangkit utama: PLTU (200 MW), PLTP (110 MW), PLTA (296 MW)
- Terhubung ke sistem Sumatera melalui saluran transmisi 150 kV

Tantangan stabilitas:

① Interkoneksi terbatas

- Jika saluran ke Sumatera trip: Bengkulu menjadi islanded
- Generator lokal harus mampu menjaga stabilitas

② Dominasi hidro (PLTA)

- Konstanta inersia tinggi: respon lambat tetapi stabil
- Variasi musiman: stabilitas berbeda saat hujan vs kemarau

③ Penetrasi energi terbarukan

- PLTS (intermiten): tidak berkontribusi pada inersia
- Perlu energy storage atau generator sinkron backup

Simulasi Stabilitas Transien dengan Octave (1/2)

Solusi numerik persamaan ayunan:

Persamaan Diferensial

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (13)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2H}(P_m - P_e) \quad (14)$$

dimana $P_e = P_{max} \sin \delta$ (untuk SMIB)

Metode numerik:

- Runge-Kutta order 4 (RK4)
- Modified Euler
- ODE solver di Octave: ode45 atau lsode

Simulasi Stabilitas Transien dengan Octave (2/2)

Contoh kode Octave untuk SMIB:

Script Octave

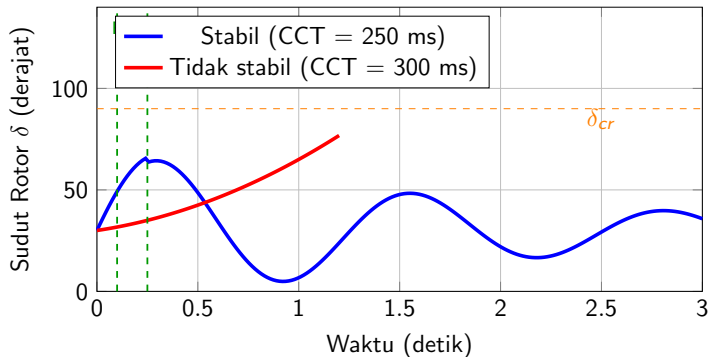
```
function dxdt = swing_eq(t, x, Pm, Pmax, H, ws)
    delta = x(1);
    omega = x(2);

    % Power based on time (fault scenario)
    if t < 0.1 % Pre-fault
        Pe = Pmax * sin(delta);
    elseif t < 0.25 % During fault
        Pe = 0; % Solid 3-phase fault
    else % Post-fault
        Pe = 0.8 * Pmax * sin(delta);
    end

    dxdt = [omega - ws;
            (ws/(2*H)) * (Pm - Pe)];
```

Visualisasi Hasil Simulasi

Output simulasi stabilitas transien:



Interpretasi:

- **Kurva biru:** Rotor berosilasi dan kembali stabil
- **Kurva merah:** Rotor terus berakselerasi, kehilangan sinkronisme

Analisis Multi-Machine dengan MATPOWER

MATPOWER tidak langsung support time-domain transient stability, tetapi bisa digunakan untuk:

① Analisis kondisi awal (pre-fault)

- Power flow untuk menentukan δ_0 , P_0
- Identifikasi generator yang heavily loaded

② Analisis post-fault

- Simulasi dengan saluran terputus
- Cek apakah ada overload atau voltage violation

③ Eksternal tools

- PSAT (Power System Analysis Toolbox) - kompatibel dengan Octave
- PST (Power System Toolbox)
- MATDYN (untuk MATPOWER)

Catatan

Untuk analisis stabilitas transien lengkap sistem besar, gunakan software komersial (PSS/E, PowerWorld, DigSILENT).

Kesimpulan Utama

- ➊ **Stabilitas sistem tenaga** adalah kemampuan untuk mempertahankan sinkronisme setelah gangguan
- ➋ **Persamaan ayunan** mendeskripsikan dinamika rotor:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

- ➌ **Equal-Area Criterion** adalah metode grafis untuk analisis stabilitas SMIB:

Stabil jika $A_1 = A_2$

- ➍ **Critical Clearing Time (CCT)** adalah parameter kunci untuk desain proteksi
- ➎ **Metode peningkatan stabilitas:**
 - Proteksi cepat
 - PSS (Power System Stabilizer)
 - FACTS devices (SVC, STATCOM, TCSC)
- ➏ **Simulasi numerik** dengan Octave untuk analisis stabilitas transien

Pertimbangan khusus:

- **Mode islanded:** Sistem harus mampu stabil saat terpisah dari grid Sumatera
- **Koordinasi proteksi:** PMT harus cukup cepat untuk menjaga CCT
- **Inersia sistem:** Dengan penetrasi PLTS tinggi, inersia berkurang → perlu solusi (battery storage, synchronous condensers)
- **PSS pada generator besar:** PLTU Bengkulu dan PLTP Hululais perlu dilengkapi PSS
- **Monitoring real-time:** PMU (Phasor Measurement Units) untuk deteksi dini instabilitas

Rekomendasi

Studi stabilitas detail perlu dilakukan untuk ekspansi sistem dan peningkatan penetrasi energi terbarukan di Bengkulu.

Aktivitas minggu ini:

- **Lembar Kerja:** Menghitung equal-area criterion untuk sistem SMIB, analisis CCT dengan soal C1-C6
- **Lab Komputer:** Simulasi stabilitas transien menggunakan Octave, visualisasi respons rotor
- **Problem Set:** Soal-soal dari level C1 (pengetahuan) hingga C6 (evaluasi) tentang stabilitas sistem tenaga
- **Bacaan:** Bab tentang power system stability di buku teks (Kundur, Saadat, atau Stevenson)

Minggu depan: Tren dan Inovasi Masa Depan Sistem Tenaga (Smart Grid, ESS, BEMS)

Terima Kasih!



Universitas Bengkulu
Fakultas Teknik