

**Catatan Kuliah**  
**Dasar Sistem Tenaga Listrik**  
**Minggu 12: Stabilitas Sistem Tenaga**  
***Menjaga Keandalan Dinamis***

Universitas Bengkulu  
Fakultas Teknik - Teknik Elektro

---

## 1 Pendahuluan

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan aspek fundamental dalam menjaga keandalan dan kontinuitas penyediaan energi listrik. Dalam era modern dengan sistem tenaga yang semakin kompleks, pemahaman mendalam tentang stabilitas menjadi krusial bagi para insinyur sistem tenaga [kundur1994power].

**Definisi Stabilitas Sistem Tenaga:**

Stabilitas sistem tenaga adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi operasi normal dan kembali ke kondisi keseimbangan yang baru setelah mengalami gangguan.

## 2 Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga

Berdasarkan IEEE/CIGRE Joint Task Force [ieee\_definition\_2004], stabilitas sistem tenaga diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama:

### 2.1 Stabilitas Sudut Rotor (Rotor Angle Stability)

**Definisi:** Kemampuan generator-generator sinkron yang terhubung untuk mempertahankan sinkronisme setelah mengalami gangguan.

#### 2.1.1 Stabilitas Transien

- **Waktu analisis:** 3-10 detik pertama setelah gangguan
- **Karakteristik:** Melibatkan perubahan besar sudut rotor
- **Fenomena dominan:** Hubungan daya-sudut generator dan inersia rotor
- **Contoh gangguan:** Hubung singkat, lepasnya saluran transmisi, lepasnya beban besar

### 2.1.2 Stabilitas Dinamis (Small Signal)

- **Waktu analisis:** 10-20 detik
- **Karakteristik:** Melibatkan perubahan kecil sudut rotor
- **Fenomena dominan:** Osilasi elektromagnetik dan elektromekanikal
- **Contoh gangguan:** Perubahan kecil beban, fluktuasi daya

## 2.2 Stabilitas Tegangan (Voltage Stability)

**Definisi:** Kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan yang dapat diterima pada semua bus dalam kondisi operasi normal dan setelah mengalami gangguan.

**Karakteristik Utama:**

- Berkaitan dengan kemampuan sistem untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif
- Dapat menyebabkan voltage collapse jika tidak terkendali
- Dipengaruhi oleh karakteristik beban, khususnya beban motor
- Waktu analisis: dari beberapa detik hingga puluhan menit

## 2.3 Stabilitas Frekuensi (Frequency Stability)

**Definisi:** Kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan frekuensi dalam batas yang dapat diterima setelah gangguan yang mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban.

**Karakteristik Utama:**

- Berkaitan dengan keseimbangan daya aktif
- Melibatkan respon sistem kontrol primer dan sekunder
- Dapat menyebabkan under-frequency load shedding
- Waktu analisis: dari detik hingga menit

## 3 Persamaan Ayunan (Swing Equation)

Persamaan ayunan merupakan dasar matematis untuk analisis stabilitas transien sistem tenaga [sauer1998power]. Persamaan ini menggambarkan dinamika rotor generator sinkron.

### 3.1 Derivasi Persamaan Ayunan

Untuk generator sinkron, persamaan gerak rotor adalah:

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

dimana:

- $J = \text{momen inersia rotor (kg}\cdot\text{m}^2)$
- $\theta_m = \text{posisi sudut mekanik rotor (rad)}$
- $T_m = \text{torsi mekanik input (N}\cdot\text{m)}$
- $T_e = \text{torsi elektrik output (N}\cdot\text{m)}$

#### Konversi ke per unit:

Dengan menggunakan sistem per unit dan hubungan  $\theta_e = \frac{P}{2}\theta_m$  dimana  $P$  adalah jumlah kutub, persamaan menjadi:

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

dimana:

- $H = \text{konstanta inersia (detik)}$
- $\omega_s = \text{kecepatan sudut sinkron (rad/s)}$
- $\delta = \text{sudut rotor listrik relatif terhadap referensi (rad)}$
- $P_m = \text{daya mekanik input (pu)}$
- $P_e = \text{daya elektrik output (pu)}$

### 3.2 Bentuk Normalized Swing Equation

Untuk analisis yang lebih mudah, persamaan ayunan sering ditulis sebagai:

$$\boxed{M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e} \quad (3)$$

dimana  $M = \frac{2H}{\omega_s}$  adalah konstanta inersia yang dinormalisasi.

### 3.3 Konstanta Inersia H

Konstanta inersia H didefinisikan sebagai:

$$H = \frac{\text{Energi kinetik tersimpan pada kecepatan rated}}{\text{Rating daya mesin}} \quad (\text{detik}) \quad (4)$$

#### Nilai tipikal H:

- Generator turbin uap: 2-9 detik
- Generator turbin gas: 1-3 detik
- Generator hidro: 2-4 detik
- Motor sinkron: 0.5-3 detik

## 4 Hubungan Daya-Sudut

Hubungan antara daya elektrik output generator dengan sudut rotor merupakan kunci dalam analisis stabilitas.

### 4.1 Model Generator Sederhana

Untuk generator sinkron yang terhubung ke infinite bus melalui reaktansi eksternal:

$$P_e = \frac{E'V}{X'} \sin \delta \quad (5)$$

dimana:

- $E'$  = tegangan transien internal generator (pu)
- $V$  = tegangan bus infinite (pu)
- $X'$  = reaktansi transien total (pu)
- $\delta$  = sudut daya (rad)

### 4.2 Analisis Titik Operasi

Kondisi steady-state:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = 0 \Rightarrow P_m = P_e \quad (6)$$

Linearisasi di sekitar titik operasi:

$$\Delta P_e = \left. \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \right|_{\delta_0} \Delta \delta = P_s \Delta \delta \quad (7)$$

dimana  $P_s = \frac{E'V}{X'} \cos \delta_0$  adalah synchronizing power coefficient.

## 5 Equal-Area Criterion

Equal-Area Criterion (EAC) adalah metode grafis yang powerful untuk analisis stabilitas transien sistem single machine infinite bus (SMIB) [anderson2003power].

### 5.1 Prinsip Dasar

EAC didasarkan pada konsep energi:

- **Area percepatan (A1):** Energi kinetik yang diperoleh rotor selama gangguan
- **Area perlambatan (A2):** Energi kinetik yang hilang saat rotor melambat

Kondisi stabilitas:  $A_1 = A_2$

## 5.2 Derivasi Matematis

Dari persamaan ayunan:

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

Kalikan kedua sisi dengan  $\frac{d\delta}{dt}$ :

$$M \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = (P_m - P_e(\delta)) \frac{d\delta}{dt} \quad (9)$$

Integrasikan:

$$\frac{1}{2} M \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e(\alpha)) d\alpha + C \quad (10)$$

Dengan kondisi awal  $\frac{d\delta}{dt} = 0$  saat  $\delta = \delta_0$ :

$$\boxed{\frac{1}{2} M \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e(\alpha)) d\alpha} \quad (11)$$

## 5.3 Aplikasi EAC

Untuk gangguan yang cleared:

1. Selama gangguan ( $\delta_0 \leq \delta \leq \delta_{cl}$ ):

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cl}} (P_m - P_{e,fault}) d\delta \quad (12)$$

2. Setelah clearing ( $\delta_{cl} \leq \delta \leq \delta_{max}$ ):

$$A_2 = \int_{\delta_{cl}}^{\delta_{max}} (P_{e,post} - P_m) d\delta \quad (13)$$

3. Kondisi stabilitas:  $A_1 = A_2$

## 6 Critical Clearing Time (CCT)

Critical Clearing Time adalah waktu maksimum dimana gangguan harus dihilangkan agar sistem tetap stabil.

### 6.1 Perhitungan CCT

Untuk gangguan 3-fasa di tengah saluran:

**Sudut critical clearing:**

$$\delta_{cr} = \pi - \arccos \left( \frac{P_m(2\delta_0 - \pi) + P_{max,post} \cos \delta_0}{P_{max,post}} \right) \quad (14)$$

**Critical Clearing Time:**

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{2M(\delta_{cr} - \delta_0)}{P_m}} \quad (15)$$

## 6.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi CCT

- **Lokasi gangguan:** Semakin dekat ke generator, CCT semakin kecil
- **Impedansi sistem:** Impedansi tinggi mengurangi CCT
- **Level pembangkitan:** Loading tinggi mengurangi CCT
- **Inersia generator:** H besar meningkatkan CCT
- **Konfigurasi sistem:** Redundansi meningkatkan CCT

## 7 Metode Peningkatan Stabilitas

### 7.1 Power System Stabilizer (PSS)

PSS adalah kontroler tambahan pada sistem excitation yang berfungsi meredam osilasi daya [demello1969concepts].

#### 7.1.1 Prinsip Kerja PSS

Fungsi transfer tipikal PSS:

$$G_{PSS}(s) = K_{PSS} \cdot \frac{sT_w}{1 + sT_w} \cdot \frac{(1 + sT_1)(1 + sT_3)}{(1 + sT_2)(1 + sT_4)} \quad (16)$$

dimana:

- $K_{PSS}$  = gain PSS
- $T_w$  = washout time constant
- $T_1, T_2, T_3, T_4$  = lead-lag time constants

#### 7.1.2 Input Signals untuk PSS

1. Deviation kecepatan rotor ( $\Delta\omega$ ):

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0 \quad (17)$$

2. Deviation daya elektrik ( $\Delta P_e$ ):

$$\Delta P_e = P_e - P_{e0} \quad (18)$$

3. Deviation frekuensi ( $\Delta f$ ):

$$\Delta f = f - f_0 \quad (19)$$

#### 7.1.3 Tuning PSS

Parameter design:

- **Washout time constant:**  $T_w = 1.0 - 20.0$  detik
- **Gain:**  $K_{PSS} = 0.1 - 50.0$  pu/pu
- **Lead-lag constants:** Disesuaikan untuk memberikan phase advance

## 7.2 Flexible AC Transmission Systems (FACTS)

FACTS devices adalah peralatan berbasis elektronika daya untuk mengontrol parameter sistem AC [hingorani2000understanding].

### 7.2.1 Static Var Compensator (SVC)

**Prinsip kerja:**

$$Q_{SVC} = B_{SVC} \cdot V^2 \quad (20)$$

dimana  $B_{SVC}$  adalah susceptance yang dapat dikontrol.

**Aplikasi:**

- Kontrol tegangan dinamis
- Peningkatan stabilitas tegangan
- Redaman osilasi daya

### 7.2.2 Static Synchronous Compensator (STATCOM)

**Karakteristik V-I:**

$$I_{STATCOM} = \frac{V_{dc} - V_{ac}}{X_L} \angle 90 \quad (21)$$

**Keunggulan dibanding SVC:**

- Respon lebih cepat
- Range operasi lebih luas
- Tidak terpengaruh harmonisa

### 7.2.3 Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)

**Impedansi efektif:**

$$X_{TCSC} = X_C + X_{TCR}(\alpha) \quad (22)$$

dimana  $\alpha$  adalah firing angle thyristor.

**Aplikasi:**

- Kontrol aliran daya
- Peningkatan CCT
- Redaman osilasi subsynchronous

## 8 Simulasi dan Analisis Menggunakan Octave

### 8.1 Implementasi Swing Equation

Kode Octave untuk simulasi time-domain [milano2005open]:

```
function [t, delta, omega] = swing_simulation(P_m, P_max, H, delta_0, t_span)
    % Parameter sistem
    omega_s = 2*pi*50; % 50 Hz
    M = 2*H/omega_s;

    % Initial conditions
    y0 = [delta_0; 0]; % [delta; omega]

    % ODE function
    swing_ode = @(t, y) [y(2); (P_m - P_max*sin(y(1)))/M];

    % Solve ODE
    [t, y] = ode45(swing_ode, t_span, y0);

    delta = y(:,1);
    omega = y(:,2);
end
```

### 8.2 Analisis Equal-Area Criterion

Kode untuk menghitung area percepatan dan perlambatan:

```
function [A1, A2, stable] = equal_area_analysis(P_m, P_max_pre, P_max_post, ...
                                              delta_0, delta_cl)

    % Area percepatan (selama gangguan)
    delta_range1 = linspace(delta_0, delta_cl, 1000);
    P_acc = P_m * ones(size(delta_range1)); % Assuming P_e = 0 during fault
    A1 = trapz(delta_range1, P_acc);

    % Cari delta_max dari kondisi A1 = A2
    options = optimset('Display','off');
    delta_max = fzero(@(d) area_balance(d, P_m, P_max_post, delta_cl, A1), ...
                      [delta_cl, pi], options);

    % Area perlambatan
    delta_range2 = linspace(delta_cl, delta_max, 1000);
    P_dec = P_max_post * sin(delta_range2) - P_m;
    A2 = trapz(delta_range2, P_dec);

    stable = (delta_max < pi);
end

function balance = area_balance(delta_max, P_m, P_max, delta_cl, A1)
```



```

    delta_range = linspace(delta_cl, delta_max, 1000);
    P_dec = P_max * sin(delta_range) - P_m;
    A2 = trapz(delta_range, P_dec);
    balance = A2 - A1;
end

```

### 8.3 Simulasi CCT

Kode untuk mencari Critical Clearing Time:

```

function t_cr = calculate_CCT(P_m, P_max_pre, P_max_post, H, delta_0)
    % Parameter
    omega_s = 2*pi*50;
    M = 2*H/omega_s;

    % Sudut critical clearing
    cos_delta_cr = (P_m*(2*delta_0 - pi) + P_max_post*cos(delta_0))/P_max_post;
    delta_cr = pi - acos(cos_delta_cr);

    % Critical clearing time
    if P_m > 0
        t_cr = sqrt(2*M*(delta_cr - delta_0)/P_m);
    else
        t_cr = Inf; % Sistem tidak stabil
    end
end

```

## 9 Studi Kasus

### 9.1 Kasus 1: Analisis Stabilitas Transien

Data sistem:

- Generator: 100 MVA,  $H = 4$  detik
- Reaktansi transien:  $X'd = 0.2$  pu
- Reaktansi saluran:  $X_L = 0.1$  pu
- Daya output: 80 MW
- Gangguan: 3-fasa di ujung saluran

Perhitungan:

1. Sudut operasi awal:

$$\sin \delta_0 = \frac{P_m \cdot X'_{total}}{E'V} = \frac{0.8 \times 0.3}{1.0 \times 1.0} = 0.24 \quad (23)$$

$$\delta_0 = \arcsin(0.24) = 13.87$$

**2. Daya maksimum pre-fault:**

$$P_{max,pre} = \frac{E'V}{X'_{total}} = \frac{1.0 \times 1.0}{0.3} = 3.33 \text{ pu} \quad (24)$$

**3. CCT menggunakan Equal-Area:**

Dengan gangguan cleared dan sistem kembali ke konfigurasi semula:

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{2M(\delta_{cr} - \delta_0)}{P_m}} = \sqrt{\frac{2 \times 0.128 \times (2.356 - 0.242)}{0.8}} = 0.735 \text{ detik} \quad (25)$$

**9.2 Kasus 2: Efektivitas PSS**

**Tanpa PSS:**

- Damping ratio:  $\zeta = 0.02$  (poorly damped)
- Frekuensi osilasi:  $f = 1.2 \text{ Hz}$

**Dengan PSS:**

- Damping ratio:  $\zeta = 0.12$  (well damped)
- Frekuensi osilasi:  $f = 1.15 \text{ Hz}$

**Peningkatan stabilitas:** 6× lebih baik dalam redaman osilasi.

**10 Tren Modern dalam Stabilitas****10.1 Penetrasi Energi Terbarukan**

**Tantangan:**

- Reduced inertia karena inverter-based generation
- Variabilitas output yang tinggi
- Kompleksitas sistem kontrol

**Solusi:**

- Virtual inertia melalui energy storage
- Advanced grid-forming inverters
- Coordinated control systems

**10.2 Smart Grid dan Digitalisasi**

**Teknologi pendukung:**

- Wide Area Monitoring Systems (WAMS)
- Phasor Measurement Units (PMUs)
- Machine learning untuk prediksi stabilitas
- Real-time adaptive control

## 11 Kesimpulan

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan bidang yang terus berkembang dengan tantangan-tantangan baru seiring dengan evolusi teknologi dan struktur sistem tenaga. Pemahaman yang kuat tentang konsep dasar seperti persamaan ayunan, Equal-Area Criterion, dan metode peningkatan stabilitas tetap menjadi fondasi yang penting.

**Poin-poin kunci:**

1. **Klasifikasi stabilitas** membantu dalam pendekatan analisis yang tepat 2. **Persamaan ayunan** memberikan dasar matematis untuk analisis dinamika 3. **Equal-Area Criterion** menyediakan insight fisik yang powerful 4. **CCT** adalah parameter desain yang kritis 5. **PSS dan FACTS** devices adalah tools modern untuk peningkatan stabilitas 6. **Simulasi numerik** essential untuk analisis sistem kompleks

Kedepannya, integrasi energi terbarukan dan digitalisasi sistem akan memerlukan pendekatan baru dalam menjaga stabilitas, namun prinsip-prinsip fundamental akan tetap relevan.