

KUMPULAN SOAL TERJAWAB (SOLVED PROBLEMS)

MINGGU 12: STABILITAS SISTEM TENAGA & SWING EQUATION

Dasar-Dasar Sistem Tenaga Listrik (TTL-305) • Taksonomi Bloom C1 s.d C6

Panduan Bloom (C1 - C6)

Latihan soal beserta solusi lengkap (*solved problems*) Minggu 12 mencakup Persamaan Ayunan (*Swing Equation*), Kriteria Luas Sama (*Equal-Area Criterion* / EAC), sudut pemutusan kritis δ_{cr} , serta simulasi Runge-Kutta Octave.

Level C1: Pengetahuan / Mengingat (Remembering)

Soal 12.1 (C1): Bentuk Persamaan Ayunan (Swing Equation)

Tuliskan bentuk umum Persamaan Ayunan (*Swing Equation*) generator sinkron yang menghubungkan inersia H , frekuensi f_0 , daya mekanis P_m , daya listrik P_e , dan sudut rotor δ !

Solusi 12.1:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \quad [\text{per-unit}]$$

atau dalam frekuensi nominal $f_0 = 50$ Hz:

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{m,pu} - P_{e,pu}$$

Level C2: Pemahaman / Memahami (Understanding)

Soal 12.2 (C2): Prinsip Kriteria Luas Sama (Equal-Area Criterion)

Jelaskan prinsip fisik Kriteria Luas Sama (*Equal-Area Criterion* / EAC) dalam menentukan stabilitas transien generator setelah terjadi gangguan singkat!

Solusi 12.2: EAC menyatakan bahwa sistem tetap stabil jika energi akselerasi rotor yang terkumpul selama masa gangguan ($A_1 = \int (P_m - P_e) d\delta$) dapat sepenuhnya diserap oleh energi deselerasi rotor setelah gangguan diisolasi ($A_2 = \int (P_e - P_m) d\delta$), sehingga $A_1 = A_2$.

Level C3: Penerapan / Mengaplikasikan (Applying)

Soal 12.3 (C3): Kalkulasi Sudut Rotor Operasi Normal

Generator menyalurkan daya $P_m = 0.8$ pu ke *infinite bus* via saluran dengan daya maksimum $P_{max} = 1.25$ pu ($P_e = P_{max} \sin \delta$). Hitung sudut rotor operasi stabil δ_0 !

Solusi 12.3: Pada kondisi konstan: $P_e = P_m \implies P_{max} \sin \delta_0 = P_m$

$$\sin \delta_0 = \frac{P_m}{P_{max}} = \frac{0.8}{1.25} = 0.64$$

$$\delta_0 = \arcsin(0.64) = 0.6944 \text{ rad} = 39.79^\circ$$

Level C4: Analisis (Analyzing)

Soal 12.4 (C4): Sudut Pemutusan Kritis (δ_{cr})

Bila terjadi gangguan 3-fasa di terminal generator Soal 12.3 sehingga $P_e = 0$ selama gangguan, hitung sudut pemutusan kritis δ_{cr} agar sistem tetap stabil ($P_{max} = 1.25$ pu, $\delta_0 = 39.79^\circ = 0.6944$ rad)!

Solusi 12.4:

$$\delta_{max} = \pi - \delta_0 = 3.1416 - 0.6944 = 2.4472 \text{ rad} \quad (140.21^\circ)$$

$$\cos \delta_{cr} = \frac{P_m}{P_{max}}(\delta_{max} - \delta_0) + \cos \delta_{max}$$

$$\cos \delta_{cr} = 0.64 \times (2.4472 - 0.6944) + \cos(140.21^\circ) = 0.64 \times 1.7528 + (-0.7684) = 1.1218 - 0.7684 = 0.3534$$

$$\delta_{cr} = \arccos(0.3534) = 1.2096 \text{ rad} = 69.30^\circ$$

Level C5: Evaluasi (Evaluating)

Soal 12.5 (C5): Evaluasi Waktu Pemutusan Kritis (t_{cr})

Hitung waktu pemutusan kritis t_{cr} dalam detik untuk Soal 12.4 jika generator memiliki konstanta inersia $H = 5.0$ s pada $f_0 = 50$ Hz!

Solusi 12.5: Selama $P_e = 0$, akselerasi konstan: $\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0 P_m}{H} = \frac{\pi \times 50 \times 0.8}{5.0} = 8\pi = 25.133 \text{ rad/s}^2$

$$\delta(t) = \delta_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2 \delta}{dt^2} \right) t^2 \implies \delta_{cr} - \delta_0 = \frac{1}{2} (8\pi) t_{cr}^2$$

$$1.2096 - 0.6944 = 4\pi \cdot t_{cr}^2 \implies 0.5152 = 12.5664 \cdot t_{cr}^2 \implies t_{cr}^2 = 0.0410 \implies t_{cr} = 0.2025 \text{ s} \quad (202.5 \text{ ms})$$

Gangguan harus diputus oleh sakelar CB dalam waktu kurang dari **202.5 ms** untuk mencegah *out-of-step*.

Level C6: Kreasi / Sintesis (Creating)

Soal 12.6 (C6): Skrip Octave Simulasi Integrasi Numerik Swing Equation

Buat skrip Octave menggunakan metode Euler/Runge-Kutta untuk memplot dinamika sudut rotor $\delta(t)$ terhadap waktu!

Solusi 12.6:

```
1 clear; clc;
2 H = 5.0; f0 = 50; Pm = 0.8; Pmax = 1.25;
3 dt = 0.005; t_end = 1.0; t_clear = 0.18; % t_clear < t_cr
4
5 t = 0:dt:t_end; delta = zeros(size(t)); omega = zeros(size(t));
6 delta(1) = asin(Pm/Pmax);
7
8 for i = 1:length(t)-1
9     if t(i) < t_clear; Pe = 0; else; Pe = Pmax * sin(delta(i));
10        end
11    pa = Pm - Pe;
12    omega(i+1) = omega(i) + (pi*f0/H * pa) * dt;
13    delta(i+1) = delta(i) + omega(i+1) * dt;
14 end
15 plot(t, delta*180/pi, '-r', 'LineWidth', 2);
16 xlabel('Time (s)'); ylabel('Rotor Angle (deg)'); title('Dinamika Transien Generator');
```