

KAJIAN STABILITAS SISTEM KELISTRIKAN INDUSTRI

Dulhadi¹, Dewi Indriati Hadi Putri²

¹Prodi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

² Prodi Sistem Telekomunikasi, Kampus Daerah Universitas Pendidikan Indonesia

Email : dulhadi@itny.ac.id

Abstrak

Penelitian membahas perilaku dinamis pengoperasian beberapa generator sinkron pada sistem kelistrikan industri dan untuk menyelidiki berbagai faktor yang mempengaruhi kestabilan sistem tenaga listrik. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan suatu metode analisis kestabilan yang praktis, informatif, dan cukup akurat. Analisis dilakukan dengan metode integrasi numerik step by step. Pengamatan dilakukan terhadap osilasi antar rotor, keserempakan generator, kemampuan dan kecepatan sistem mencapai keadaan steady state yang baru.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa gangguan sistem kelistrikan dapat menyebabkan osilasi antar generator yang mengurangi kemampuan dan kecepatan sistem dalam mencapai kondisi steady state. Osilasi ini mengakibatkan fluktuasi tegangan dan frekuensi untuk waktu yang lama. Margin kestabilan dapat ditingkatkan dengan mengatur pembebanan untuk setiap unit pembangkit sesuai dengan karakteristik dan kapabilitas masing – masing pembangkit, konfigurasi jaringan, serta beban beroperasi. Simulasi dari beberapa kasus menunjukkan bahwa respon generator terhadap gangguan kelistrikan sangat dipengaruhi oleh kondisi pengoperasian, waktu clearing, lokasi gangguan, dan perubahan konfigurasi jaringan.

Kata kunci: Kestabilan transien, Sistem multi machine, Integrasi step by step

Abstract

This research discusses the dynamic behavior of the operation of several synchronous generators in industrial electrical systems and to find out various factors that affect the stability of the electric power system. This research aims to develop an analysis method of stability that is practical, informative, and quite accurate. The analysis was performed by step by step numerical integration method. Observations were made on the oscillations between rotors, the simultaneity of the generator, the ability and speed of the system to reach a new steady state.

The results of this research indicate that electrical system disturbance can cause oscillations between generators which reduce the ability and speed of the system in achieving steady-state conditions. This oscillation creates voltage and frequency fluctuations for a long time. Stability margins can be increased by regulating the burden for each generating unit corresponding with the characteristics and capabilities of each generator, network configuration, and operating load. Simulations of several cases indicate that the generator response to electrical noise very influenced by operating conditions, clearing time, location of disturbance, and changes in network configuration.

Keywords: Transient stability, multi-machine system, step by step integration

1. Pendahuluan

Kestabilan sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan sistem untuk mencapai kondisi pengoperasian yang aman, setelah terjadi perubahan. Kestabilan berhubungan langsung dengan kualitas dan kontinuitas layanan tenaga listrik. Untuk itu perlu dilakukan upaya dalam menjamin kestabilan sistem baik dalam kondisi pengoperasian normal maupun saat terjadi perubahan.

Kestabilan sistem tenaga sangat dipengaruhi oleh perilaku dinamis generator sinkron dalam merespon berbagai macam perubahan yang mungkin terjadi. Ketika sistem *multi machine* memasuki kondisi transien, terjadi osilasi - osilasi antar mesin melalui saluran transmisi yang menghubungkan mesin - mesin tersebut [1]. Osilasi ini mempengaruhi frekuensi, tegangan, sudut daya, dan aliran daya pada sistem ketenagalistrikan. Apabila sistem yang sedang beroperasi dalam kondisi *steady state* diganggu (*perturbed*), maka ada penyesuaian kembali dari sudut daya generator sinkron [2]. Ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban menciptakan kondisi *steady state* baru dengan penyesuaian sudut daya [2]. Gangguan seperti; pelepasan generator, hubung singkat, pelepasan saluran, pelepasan beban, ataupun

perubahan kecil pada beban saat kondisi normal akan menyebabkan perubahan kondisi pengoperasian. Perilaku sistem selama masa ini disebut unjuk kerja dinamis.

Beberapa metode untuk analisis kestabilan sudah tersedia dan masih dikembangkan hingga saat ini. Untuk sistem *multi machine*, metode yang memberikan hasil akurat dan memuaskan adalah metode *step by step* [3]. Metode ini mampu menangani sistem *multi machine*, memberikan hasil akurat, serta dapat memberi informasi tentang perubahan berbagai parameter sistem.

2. Metode Penelitian

Kestabilan didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk tetap beroperasi dalam keadaan setimbang. Kestabilan sistem tenaga dibagi menjadi tiga [4]:

- Kestabilan sudut rotor**
Kemampuan untuk menjaga sinkronitas antar pembangkit dalam sistem, ditentukan oleh kesetimbangan torsi mekanis dan torsi elektromagnet pada setiap rotor generator. Terdiri dari kestabilan *small signal* dan kestabilan transien.
- Kestabilan frekuensi**
Kemampuan untuk menjaga frekuensi dalam batas toleransi operasi atau dekat pada nilai nominal, ditentukan oleh kesetimbangan pembangkitan daya aktif dan permintaan daya aktif.
- Kestabilan tegangan**
Kemampuan untuk menjaga tegangan pada semua bus tetap dalam batas toleransi atau dekat pada nilai nominal setiap bus, ditentukan oleh kemampuan sistem pembangkitan dan sistem transmisi untuk mentransfer daya yang diminta beban.

Jika dinamika sistem diberikan oleh:

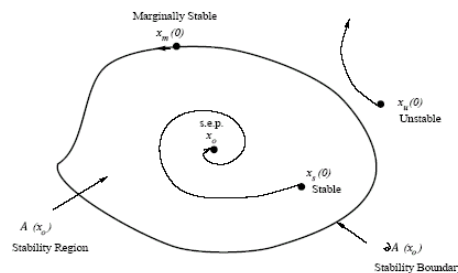
$$\dot{x} = f(x) \quad (1)$$

dengan x : N variabel keadaan, maka titik kesetimbangan x_0 adalah x yang memenuhi persamaan kondisi *steady state*:

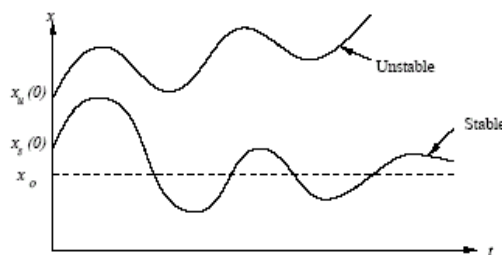
$$0 = f(x_0) \quad (2)$$

Persamaan ini ekuivalen dengan persamaan aliran daya dengan kondisi pengoperasian x_0 .

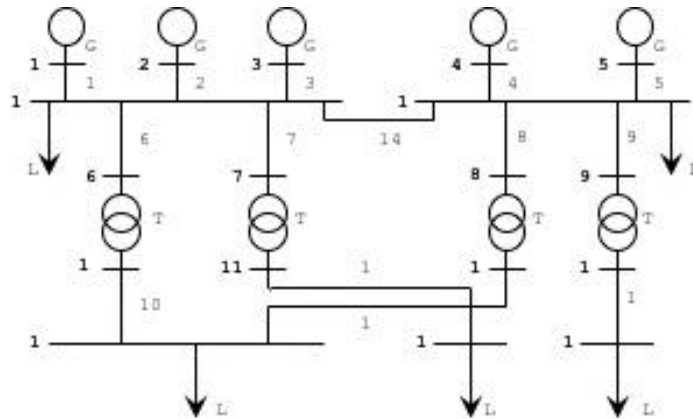
Kestabilan dapat didefinisikan dalam terminologi kestabilan titik kesetimbangan dan ukuran dari daerah (*region*) kestabilan yang bersesuaian terhadap titik itu. Setelah x_0 diidentifikasi sebagai titik kesetimbangan yang stabil, langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi apakah titik x di sekitar x_0 konvergen dalam waktu ke x_0 atau bergerak menjauh (*divergen*) dari titik ini. Daerah yang dibentuk oleh semua x yang konvergen dalam waktu disebut daerah kestabilan. Batas (*boundary*) dari daerah kestabilan dibentuk oleh semua titik x yang tidak konvergen maupun divergen dari x_0 . Daerah ini dapat ditentukan melalui beberapa cara. Salah satunya adalah melalui *trial - error* domain waktu [5][6].



Gambar 1 Daerah kestabilan



Gambar 2 Nilai x terhadap waktu



Gambar 3. Single Line Diagram Kelistrikan PT. Conoco Indonesia, Belanak

Tabel 1. Data Generator

Gen.	X_d'	H	D
G ₁	0.1183	2.1	0.0229
G ₂	0.1183	2.1	0.0229
G ₃	0.1183	2.1	0.0229
G ₄	0.1183	2.1	0.0229
G ₅	0.1183	2.1	0.0229

Tabel 2. Data Saluran

Cab.	R	X
1	0.00014	0.00024
2	0.00013	0.00023
3	0.00013	0.00023
4	0.00013	0.00023
5	0.00014	0.00024
6	0.00019	0.00042
7	0.00012	0.00028
8	0.00019	0.00042
9	0.00012	0.00028
10	0.00037	0.00063
11	0.00043	0.00072
12	0.00032	0.00054
13	0.00043	0.00072
14	0.00005	0.00012

Tabel 3. Data Trafo

Trafo	R	X
T ₁	0.0050	0.0896
T ₂	0.0050	0.0896
T ₃	0.0050	0.0896
T ₄	0.0050	0.0896

Tabel 4. Data Beban

Beban	P _L	Q _L
L ₁	1.6786	1.0403
L ₂	1.9255	1.1934
L ₃	1.6419	0.7952
L ₄	0.7352	0.3561
L ₅	0.6739	0.3264

Dinamika sistem direpresentasikan oleh:

a. Persamaan diferensial

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s \quad \frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\omega_s}{H_i} (P_{m,i} - P_{e,i} - D_i(\omega_i - \omega_s)) \tag{3}$$

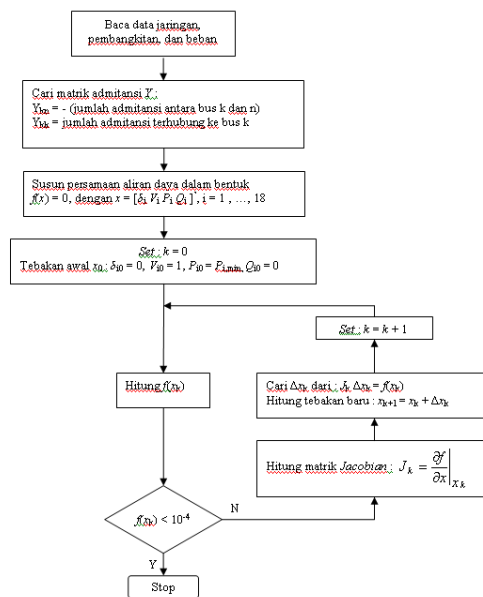
b. Persamaan aljabar

$$\frac{1}{X'_{d,i}} (E'_i \sin \delta_n - V_k \sin \delta_k) - \sum_{n=1}^5 Y_{in} V_n \cos(\delta_{in} + \delta_n) = 0 \tag{4}$$

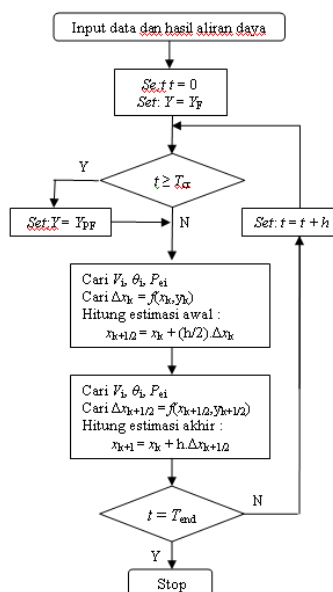
$$\frac{1}{X'_{d,i}} (-E'_i \cos \delta_i + V_i \cos \delta_i) - \sum_{n=1}^5 Y_{in} V_n \sin(\delta_{in} + \delta_n) = 0 \tag{5}$$

dengan $i = 1, \dots, 5$ $n = 1, \dots, 5$

Karena solusi analitik dari persamaan diferensial – aljabar diatas tidak ada, maka penyelesaian dilakukan menggunakan metode numerik yakni integrasi *step by step domain* waktu yang diimplementasikan dengan *Matlab*.



Gambar 4. Diagram alir solusi aliran daya



Gambar 5. Diagram alir simulasi kestabilan

Langkah pertama adalah mencari aliran daya kondisi *steady state*. Nilai mula dan parameter konstan untuk analisis kestabilan dicari berdasarkan hasil perhitungan aliran daya *steady state*. Langkah selanjutnya adalah menjalankan program simulasi yang telah dibuat dengan interval integrasi (*step size*) 0.005 detik. Diagram alir simulasi tersebut seperti terlihat pada gambar 4 dan 5

3. Hasil dan Analisis

3.1. Kondisi *Steady State*

Variabel keadaan kondisi *steady state* dapat dicari dengan menyelesaikan persamaan aliran daya. Langkah perhitungan kondisi *steady state* adalah sebagai berikut

1. Mencari matrik admitansi jaringan Y [3,7]:

$Y_{kn} = -$ (jumlah admitansi antara bus k dan n)

$Y_{kk} =$ jumlah admitansi terhubung ke bus k

perhitungan:

$$Y_{1,14} = \frac{-1}{Z_{1,14}} = \frac{-1}{R_{1,14} + jX_{1,14}} = \frac{-1}{0.00014 + j0.00024} = -1813 + j3109$$

$$Y_{14,14} = \frac{1}{Z_{1,14}} + \frac{1}{Z_{2,14}} + \frac{1}{Z_{3,14}} + \frac{1}{Z_{6,14}} + \frac{1}{Z_{8,14}} + \frac{1}{Z_{14,15}} = 10684 - j2179$$

Hasil akhir didapatkan matrik $Y_{18 \times 18}$

Data *input* untuk aliran daya adalah data pengoperasian sebagai berikut ini:

Tabel 5. Data pengoperasian dengan *base* 10 MVA

Bus	V (pu)	$P_{G,\min} \leq P_G \leq P_{G,\max}$ (pu)	S_{\max} (pu)	P_L (pu)	Q_L (pu)
1	1.020 $\angle 0^\circ$	$1.1189 \leq P_{G1} \leq 1.4875$	1.7500	-	-
2	1.0200	$1.1189 \leq P_{G2} \leq 1.4875$	1.7500	-	-
3	1.0200	$1.1189 \leq P_{G3} \leq 1.4875$	1.7500	-	-
4	1.0200	$1.1189 \leq P_{G4} \leq 1.4875$	1.7500	-	-
5	1.0200	$1.1189 \leq P_{G5} \leq 1.4875$	1.7500	-	-
14	-	-	-	1.6786	1.0403
15	-	-	-	1.9255	1.1934
16	-	-	-	1.6419	0.7952
17	-	-	-	0.7352	0.3561
18	-	-	-	0.6739	0.3264

2. Menyusun persamaan aliran daya

$$P_k - V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(d_k - d_n - q_{kn}) = 0$$

$$Q_k - V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(d_k - d_n - q_{kn}) = 0$$

$$k = 1, 2, \dots, 18 \quad n = 1, 2, \dots, 18$$

dengan, P_k dan Q_k adalah daya injeksi ke bus k

Substitusi data dan matrik admitans Y ke persamaan aliran daya memberikan:

- a. untuk bus 1 :

$$P_1 - V_1 \sum_{n=1}^{18} Y_{1n} V_n \cos(d_1 - d_n - q_{1n}) = 1,189 - 1,02 \sum_{n=1}^{18} Y_{1n} V_n \cos(d_n - q_{1n}) = 0 \quad (6)$$

$$Q_1 - V_1 \sum_{n=1}^{18} Y_{1n} V_n \sin(d_1 - d_n - q_{1n}) = Q_1 - 1,02 \sum_{n=1}^{18} Y_{1n} V_n \sin(d_n - q_{1n}) = 0 \quad (7)$$

- b. untuk bus 2 sampai bus 5 :

$$P_2 - V_2 \sum_{n=1}^{18} Y_{2n} V_n \cos(d_2 - d_n - q_{2n}) = 1,189 - 1,02 \sum_{n=1}^{18} Y_{2n} V_n \cos(d_2 - d_n - q_{2n}) = 0 \quad (8)$$

$$Q_2 - V_2 \sum_{n=1}^{18} Y_{2n} V_n \sin(d_2 - d_n - q_{2n}) = Q_2 - 1,02 \sum_{n=1}^{18} Y_{2n} V_n \sin(d_2 - d_n - q_{2n}) = 0 \quad (9)$$

$$P_5 - V_5 \sum_{n=1}^{18} Y_{5n} V_n \cos(d_5 - d_n - q_{5n}) = 1,189 - 1,02 \sum_{n=1}^{18} Y_{5n} V_n \cos(d_5 - d_n - q_{5n}) = 0 \quad (10)$$

$$Q_5 - V_5 \sum_{n=1}^{18} Y_{5n} V_n \sin(d_5 - d_n - q_{5n}) = Q_5 - 1,02 \sum_{n=1}^{18} Y_{5n} V_n \sin(d_5 - d_n - q_{5n}) = 0 \quad (11)$$

- c. untuk bus 6 sampai bus 13 :

$$P_6 - V_6 \sum_{n=1}^{18} Y_{6n} V_n \cos(d_6 - d_n - q_{6n}) = 0 - V_6 \sum_{n=1}^{18} Y_{6n} V_n \cos(d_6 - d_n - q_{6n}) = 0 \quad (12)$$

$$Q_6 - V_6 \sum_{n=1}^{18} Y_{6n} V_n \sin(d_6 - d_n - q_{6n}) = 0 - V_6 \sum_{n=1}^{18} Y_{6n} V_n \sin(d_6 - d_n - q_{6n}) = 0 \tag{13}$$

$$P_{13} - V_{13} \sum_{n=1}^{18} Y_{13n} V_n \cos(d_{13} - d_n - q_{13n}) = 0 - V_{13} \sum_{n=1}^{18} Y_{13n} V_n \cos(d_{13} - d_n - q_{13n}) = 0 \tag{14}$$

$$Q_{13} - V_{13} \sum_{n=1}^{18} Y_{13n} V_n \sin(d_{13} - d_n - q_{13n}) = 0 - V_{13} \sum_{n=1}^{18} Y_{13n} V_n \sin(d_{13} - d_n - q_{13n}) = 0 \tag{15}$$

d. untuk bus 14 sampai bus 18 :

$$P_{14} - V_{14} \sum_{n=1}^{18} Y_{14n} V_n \cos(d_{14} - d_n - q_{14n}) = -1,6786 - V_{14} \sum_{n=1}^{18} Y_{14n} V_n \cos(d_{14} - d_n - q_{14n}) = 0 \tag{16}$$

$$Q_{14} - V_{14} \sum_{n=1}^{18} Y_{14n} V_n \sin(d_{14} - d_n - q_{14n}) = -1,0403 - V_{14} \sum_{n=1}^{18} Y_{14n} V_n \sin(d_{14} - d_n - q_{14n}) = 0 \tag{17}$$

$$P_{18} - V_{18} \sum_{n=1}^{18} Y_{18n} V_n \cos(d_{18} - d_n - q_{18n}) = -0,6739 - V_{18} \sum_{n=1}^{18} Y_{18n} V_n \cos(d_{18} - d_n - q_{18n}) = 0 \tag{18}$$

$$Q_{18} - V_{18} \sum_{n=1}^{18} Y_{18n} V_n \sin(d_{18} - d_n - q_{18n}) = -0,3264 - V_{18} \sum_{n=1}^{18} Y_{18n} V_n \sin(d_{18} - d_n - q_{18n}) = 0 \tag{19}$$

3. Penyelesaian

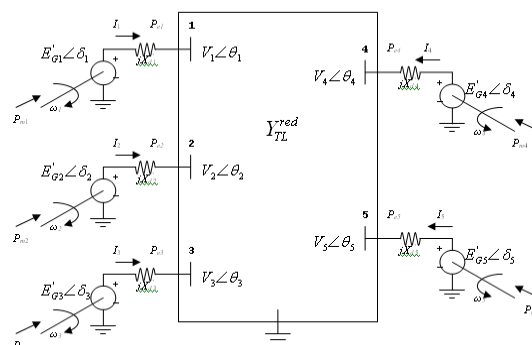
Persamaan aliran daya diselesaikan dengan metode *Newton – Raphson*. Prosedur penyelesaian mengacu diagram alir Gambar 4. Diperoleh hasil (Tabel 6):

Tabel 6 Aliran daya kondisi *steady state*

bus	V (pu)	δ_v (deg.)	P _G (pu)	Q _G (pu)	P _L (pu)	Q _L (pu)
1	1.0200	0	1.4055	0.6216	0	0
2	1.0200	-0.0004	1.4450	0.6873	0	0
3	1.0200	-0.0004	1.4450	0.6873	0	0
4	1.0200	-0.0125	1.1890	0.9960	0	0
5	1.0200	-0.0125	1.1890	0.9960	0	0
6	1.0193	-0.0279	0	0	0	0
7	1.0195	-0.0224	0	0	0	0
8	1.0193	-0.0347	0	0	0	0
9	1.0194	-0.0285	0	0	0	0
10	0.9759	-4.1571	0	0	0	0
11	0.9810	-3.6981	0	0	0	0
12	0.9758	-4.1604	0	0	0	0
13	0.9845	-3.3855	0	0	0	0
14	1.0197	-0.0138	0	0	1.6786	1.0403
15	1.0196	-0.0206	0	0	1.9255	1.1934
16	0.9753	-4.1794	0	0	1.6419	0.7952
17	0.9805	-3.7205	0	0	0.7352	0.3561
18	0.9840	-3.4059	0	0	0.6739	0.3264

3.2. Representasi Sistem Dan Nilai Mula

Representasi sistem kelistrikan di PT. Conoco Indonesia, Belanak dapat diilustrasikan sebagai sistem paralel 5 pembangkit pembangkit generator sebagai berikut (Gambar 6)[1].



Gambar 6. Sistem lima generator

Untuk memudahkan penelitian terhadap perilaku dan kopling antar generator, maka sistem dengan 18 bus pada Gambar 3 direduksi menjadi sistem dengan lima bus pada Gambar 6 sehingga hanya merepresentasi

bus (terminal) generator. Dengan demikian hubungan antar generator, hubungan dengan sistem, dan hubungan dengan sistem internal generator menjadi jelas.

Nilai mula untuk kondisi pra gangguan dicari dengan mempergunakan hasil perhitungan aliran daya. Langkah perhitungannya adalah sebagai berikut :

1. Menentukan arus stator atau arus injeksi ke terminal generator.
2. Arus injeksi dihitung dengan persamaan [7]:

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (3)$$

$$I_1 = \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} = \frac{1,4055 - j0,6216}{1,0200 \angle 0^\circ} = 1,5066 \angle -23,86^\circ \text{ pu}; \quad I_2 = 1,5688 \angle -25,44^\circ \text{ pu}; \quad I_3 = 1,5688 \angle -25,44^\circ \text{ pu}; \\ I_4 = 1,5206 \angle -39,96^\circ \text{ pu}; \quad I_5 = 1,5206 \angle -39,96^\circ \text{ pu}$$

3. Menentukan tegangan internal transien generator [8][3].

$$E_1' = V_1 + jX_{d1}' I_1 = 1,0200 \angle 0^\circ + (j0,1183 \cdot 1,5066 \angle -23,86^\circ) = 1,1042 \angle 8,49^\circ; \quad E_2' = 1,1124 \angle 8,66^\circ \text{ pu} \\ E_3' = 1,1124 \angle 8,66^\circ \text{ pu}; \quad E_4' = 1,1439 \angle 6,91^\circ \text{ pu}; \quad E_5' = 1,1439 \angle 6,91^\circ \text{ pu}$$

4. Mencari sudut daya

Sudut daya adalah beda fasa antara tegangan internal (*no-load voltage*) E' masing - masing generator terhadap tegangan terminal V_G .

$$\delta_{P1} = \delta_1 - \theta_{V1} = 8,4893^\circ - 0 = 8,4893^\circ$$

$$\delta_{P2} = 8,6651^\circ$$

$$\delta_{P3} = 8,6651^\circ$$

$$\delta_{P4} = 6,9243^\circ$$

$$\delta_{P5} = 6,9243^\circ$$

5. Mencari kecepatan angular rotor

Untuk kondisi *state state* semua generator dalam keadaan sinkron, maka:

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_5 = \omega_S = 2 \pi f_S = 2.180.60 = 21.600 \text{ elect.deg/s}$$

6. Mencari *input* daya mekanik

Input daya mekanik P_m sama dengan *output* daya elektrik kondisi *state state*. Dengan kata lain percepatan rotor P_a kondisi *steady state* sama dengan nol (kesetimbangan elektromekanik).

$$P_{m,1} = P_{G0,1} = 1,4055 \text{ pu}$$

$$P_{m,2} = 1,4450 \text{ pu}$$

$$P_{m,3} = 1,4450 \text{ pu}$$

$$P_{m,4} = 1,1890 \text{ pu}$$

$$P_{m,5} = 1,1890 \text{ pu}$$

7. Mencari admitans ekivalen beban.

Selama periode transien, beban direpresentasikan sebagai admitans *shunt* menghasilkan persamaan sebagai berikut :

$$Y_{L1} = \frac{P_{L1} - jQ_{L1}}{|V_{L1}|^2} = \frac{1,6786 - j1,0403}{1,0197^2} = 1,6145 - j1,0006 \text{ pu}$$

$$Y_{L2} = 1,8522 - j1,1480 \text{ pu}$$

$$Y_{L3} = 1,7259 - j0,8359 \text{ pu}$$

$$Y_{L4} = 0,7648 - j0,3704 \text{ pu}$$

$$Y_{L5} = 0,6960 - j0,3371 \text{ pu}$$

8. Modifikasi matrik admitansi jaringan Y

Matrik admitansi dimodifikasi untuk mengikutsertakan admitans ekivalen beban. Hal ini dilakukan dengan menjumlah *self admittance* matrik Y di bus beban dengan admitans *shunt* beban Y_L . Diperoleh matrik admitans baru Y_{TL} .

$$Y_{TL,14-14} = Y_{14-14} + Y_{L1} = (10684 - j21793) + (1,6146 - j1,0006) = 10686 - j21794$$

$$Y_{TL,15-15} = 8775 - j18313$$

$$Y_{TL,16-16} = 1507 - j2552$$

$$Y_{TL,17-17} = 612 - j1024$$

$$Y_{TL,16-16} = 612 - j1024$$

Tabulasi hasil perhitungan nilai mula dan parameter konstan diberikan pada tabel 7 sebagai berikut.

Tabel 7. Nilai mula dan parameter konstan

Gen.	δ_0 (deg)	ω_0 (deg/s)	V_{G0} (pu)	θV_{G0} (deg)	P_{e0} (pu)	$\delta_0 - \theta_0$ (deg)	E'_d (pu)	P_m (pu)
1	8.4893	21600	1.0200	0	1.4055	8.4893	1.1042	1.4055
2	8.6647	21600	1.0200	-0.0004	1.4450	8.6651	1.1124	1.4450
3	8.6647	21600	1.0200	-0.0004	1.4450	8.6651	1.1124	1.4450
4	6.9118	21600	1.0200	-0.0125	1.1890	6.9243	1.1439	1.1890
5	6.9118	21600	1.0200	-0.0125	1.1890	6.9243	1.1439	1.1890

3.3. Simulasi Gangguan Simetris

Langkah selanjutnya adalah menjalankan program yang telah dibuat untuk beberapa kasus gangguan simetris. Dilihat dari keadaan jaringan, analisis dan simulasi dibagi menjadi tiga periode, yakni:

- Periode pra gangguan
yaitu periode *steady state*. Informasi tentang keadaan jaringan diberikan oleh matrik admitansi pra gangguan Y_{TL} .
- Periode gangguan
yaitu interval waktu antara inisiasi hubung singkat sampai dengan *clearing* gangguan. Hubung singkat tiga fasa direpresentasikan dengan *short circuit* bus tempat hubung singkat. Hal ini dilakukan dengan menggabungkan bus tersebut ke *reference node*. Dengan demikian diperoleh matrik admitansi baru Y_F yang merepresentasi keadaan jaringan selama gangguan berlangsung. Matrik ini kemudian direduksi menggunakan eliminasi *Kron* supaya hanya mengandung bus – bus generator sebagai elemennya.
- Periode pasca gangguan.
yaitu interval waktu mulai dari *clearing* yaitu dengan melepas satu atau beberapa saluran yang terhubung singkat. Karena trip saluran mengubah jaringan, maka matrik admitansi jaringan Y_{TL} harus dimodifikasi menjadi Y_{PF} untuk merepresentasi adanya saluran yang trip. Keadaan jaringan periode ini diberikan matrik admitansi pasca gangguan Y_{PF} . Y_{PF} kemudian direduksi menjadi $Y_{PF,red}$.

Variabel yang diamati adalah:

- Sudut rotor δ terhadap pusat inersia
Oleh karena masing – masing generator yang mempunyai referensi berbeda, diperlukan satu referensi untuk semua generator. Referensi ini adalah pusat inersia, sehingga diperoleh perumusan baru untuk δ :

$$d_i^{new} = d_i - d_{COI} \quad (20)$$

dengan

$$d_{COI} = \frac{\sum_{i=1}^5 H_i d_i}{\sum_{i=1}^5 H_i}$$

- Kecepatan angular rotor ω terhadap pusat inersia
Untuk mengetahui keserempakan kinerja generator terparalel diperlukan referensi baru sebagai ukuran keserempakan rotor. Referensi ini adalah kecepatan angular pusat inersia ω_{COI} , sehingga perumusan kecepatan angular ω baru, untuk setiap rotor menjadi:

$$W_i^{new} = W_i - W_{COI} \quad (21)$$

dengan

$$W_{COI} = \frac{\sum_{i=1}^5 H_i W_i}{\sum_{i=1}^5 H_i}$$

- Daya elektrik *output* generator P_e
Yaitu daya elektrik di *node* internal generator. Nilai P_e negatif menunjukkan bahwa generator berada pada mode *motoring* sedangkan nilai positif menunjukkan mode *generating*.

- d. Daya akselerasi P_a
Yaitu daya akselerasi pada rotor. Nilai positif menunjukkan bahwa rotor mendapat torsi positif (kecepatan meningkat) sedangkan nilai negatif menunjukkan pengereman. Nilai nol menunjukkan kesetimbangan total daya input dan total daya output atau generator dalam keadaan sinkron.
- e. Sudut daya δ_P
Yaitu beda fasa antara tegangan internal E' generator terhadap tegangan terminal V_G .
Keadaan jaringan selama gangguan berlangsung dan keadaan jaringan setelah pelepasan (trip) saluran 14 dijelaskan sebagai berikut:

1. Periode gangguan

Hubung singkat berarti elemen diagonal $Y_{14,14}$ dari Y_{TL} nilainya menjadi sangat besar (*short circuit*). Sedangkan elemen *off - diagonal* nilainya sangat kecil (*open*). Keadaan jaringan periode ini diwakili oleh matrik admitansi Y_F . Menerapkan eliminasi *Kron*:

$$Y_{F,red_{5 \times 5}} = Y_A - Y_B Y_D^{-1} Y_C \tag{22}$$

dengan,

$$\begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix}_{18 \times 18} = Y_{F,18 \times 18}$$

Setelah dilakukan perhitungan, diperoleh:

$$Y_{F,red} = \begin{bmatrix} 3599.08 & -60^\circ & 0 & 0^\circ & 0 & 0^\circ & 0 & 0^\circ & 0 & 0^\circ \\ 0 & 0^\circ & 3785.06 & -61^\circ & 0 & 0^\circ & 0 & 0^\circ & 0 & 0^\circ \\ 0 & 0^\circ & 0 & 0^\circ & 3785.06 & -61^\circ & 0 & 0^\circ & 0 & 0^\circ \\ 0 & 0^\circ & 0 & 0^\circ & 0 & 0^\circ & 2730.43 & -61^\circ & 871.38 & 124^\circ \\ 0 & 0^\circ & 0 & 0^\circ & 0 & 0^\circ & 871.38 & 124^\circ & 2730.43 & -61^\circ \end{bmatrix}$$

Dari matrik admitansi terlihat bahwa gangguan di bus 14 menyebabkan bus 1, 2, dan 3 terpisah (*decouple*) dari bus - bus lain selama gangguan berlangsung. Hal ini ditunjukkan oleh *mutual admittance* (elemen *off - diagonal*) yang sama dengan nol. Pertambahan nilai *self admittance* (elemen diagonal) dari nilai admitansi awal menunjukkan kedekatan ketiga bus ini ke *reference* yang disebabkan oleh *short* bus 14. Selama periode ini G_1 , G_2 , dan G_3 tidak mentransfer daya ke jaringan.

2. Periode pasca gangguan

Trip saluran 14 menyebabkan elemen Y_{14-14} , Y_{14-15} , Y_{15-14} , dan Y_{15-15} berubah. Maka perlu dilakukan perhitungan ulang untuk elemen - elemen ini yang terdapat pada Y_{PF} yang diperoleh kemudian direduksi.

$$Y_{PF,red_{5 \times 5}} = Y_A - Y_B Y_D^{-1} Y_C \tag{23}$$

dengan,

$$\begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix}_{18 \times 18} = Y_{PF,18 \times 18}$$

$$Y_{PF,red} = \begin{bmatrix} 2440.19 & -60^\circ & 1218.85 & 120^\circ & 1218.85 & 120^\circ & 0.85 & 90^\circ & 0.85 & 90^\circ \\ 1218.85 & 120^\circ & 2503.24 & -60^\circ & 1281.84 & 119^\circ & 0.89 & 89^\circ & 0.89 & 89^\circ \\ 1218.85 & 120^\circ & 1281.84 & 119^\circ & 2503.24 & -60^\circ & 0.89 & 89^\circ & 0.89 & 89^\circ \\ 0.85 & 90^\circ & 0.89 & 89^\circ & 0.89 & 89^\circ & 1801.51 & -60^\circ & 1797.57 & 120^\circ \\ 0.85 & 90^\circ & 0.89 & 89^\circ & 0.89 & 89^\circ & 1797.57 & 120^\circ & 1801.51 & -60^\circ \end{bmatrix}$$

Matrik admitansi Y_{PF} menunjukkan bahwa trip saluran 14 mengakibatkan kopling antara generator kelompok 1 (G_1, G_2, G_3) dengan kelompok 2 (G_4, G_5) berkurang. Hal ini dicerminkan oleh *mutual admittance* kelompok 1 dan kelompok 2 yang berkurang nilainya dari nilai admitansi pra gangguan. Sistem stabil, ditunjukkan oleh nilai δ dan ω semua generator yang 'tertarik' kembali ke *attractor* daerah kestabilan. Grafik P_e menunjukkan bahwa generator berganti - ganti antara mode *motoring* dan *generating*. Terlihat bahwa G_4 dan G_5 berperilaku sebagai satu generator karena rating dan titik operasi ($G_4 - G_5$) identik saat kondisi periode *steady state*.

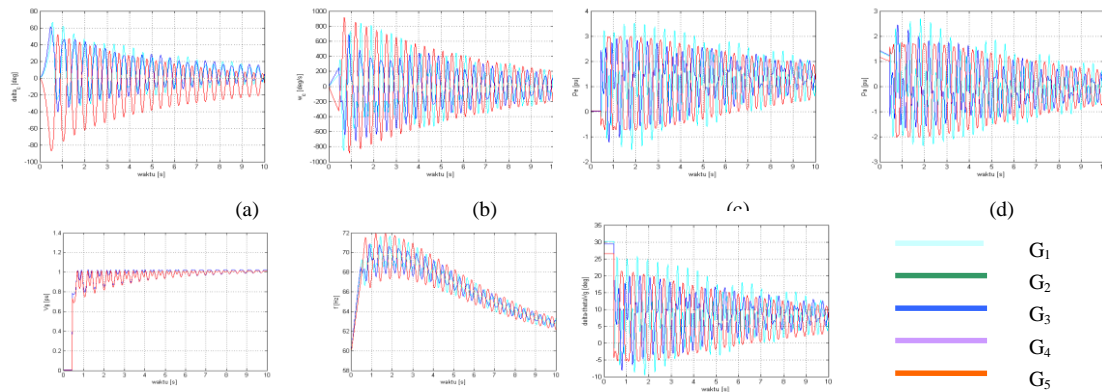
Respon ($G_4 - G_5$) lebih baik daripada ($G_1 - G_2 - G_3$) mengingat lokasi hubung singkat lebih dekat ke ($G_1 - G_2 - G_3$). Terlihat bahwa tegangan terminal akan mendekati nol selama gangguan dan kembali menuju nilai semula. Terlihat bahwa frekuensi sistem akan naik selama gangguan

berlangsung (kecepatan generator meningkat karena kehilangan beban) dan kembali turun mendekati nilai nominal setelah saluran 14 lepas.

Sistem akan mencapai kesetimbangan baru dengan penyesuaian kembali sudut daya menjadi 10° . Keadaan *steady state* yang baru akan lebih cepat tercapai untuk T_{cr} yang lebih kecil dari 0,45 detik.

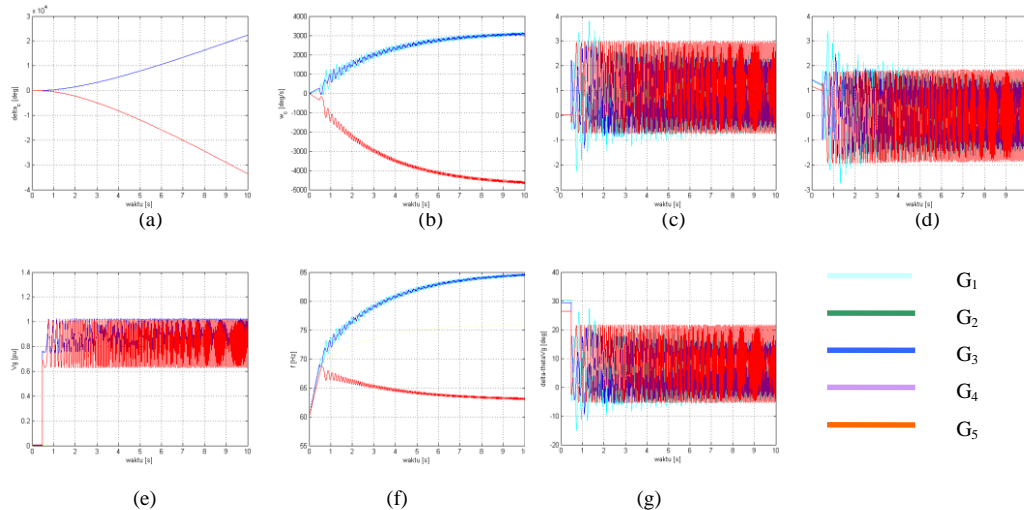
Hasil simulasi untuk waktu *clearing*, $T_{cr} = 0,45$ detik dan $T_{cr} = 0,475$ detik:

i. Untuk $T_{cr} = 0,45$ detik



Gambar 7. Hasil simulasi proses kestabilan pada saat pelepasan beban saluran 14 di waktu clearing 0,45 detik (a) sudut rotor, (b) Kecepatan Angular (c) Daya elektrik output generator (d) Daya akselerasi rotor (e) sudut fasa generator terhadap tegangan terminal (f) frekuensi (g) Sudut delta theta generator

ii. Untuk $T_{cr} = 0,475$ detik



Gambar 8. Hasil simulasi proses kestabilan pada saat pelepasan beban saluran 14 di waktu clearing 0,475 detik (a) sudut rotor, (b) Kecepatan Angular (c) Daya elektrik output generator (d) Daya akselerasi rotor (e) sudut fasa generator terhadap tegangan terminal (f) frekuensi (g) Sudut delta theta generator

Hasilnya kondisi sistem tidak stabil, δ meningkat secara eksponensial tanpa batas. Dari aspek keserempakan antar generator, terjadi ketidakserempakan pada Grafik P_e dan P_a menunjukkan osilasi antar rotor tanpa peredaman. Terjadi pertukaran energi kinetik antar rotor generator untuk waktu yang lama. Semua generator berosilasi antara *motoring* dan *generating* yang disebabkan terjadi saling tukar daya antar generator.

Dilihat dari tegangan terminal, (V_1, V_2, V_3) terus berosilasi tidak teredam antara 0,75 pu sampai 1,2 pu. Sedangkan (V_4, V_5) terus berosilasi antara 0,65 pu sampai 1,2 pu. Terlihat bahwa ketidakstabilan sudut rotor mengakibatkan semua parameter penting seperti *output* daya aktif, tegangan, dan frekuensi tidak stabil. Pada kasus ini titik kesetimbangan atau kondisi operasi stabil yang baru tidak tercapai.

4. Kesimpulan

a. Kestabilan terhadap gangguan simetris sangat dipengaruhi oleh waktu *clearing* gangguan.

- b. Respon sistem terhadap perubahan ditentukan oleh kondisi pengoperasian awal.
- c. Untuk sistem dengan generator paralel, kinerja terbaik akan diperoleh apabila untuk setiap kondisi *steady state* dilakukan kontrol terhadap input daya mekanik dan/atau kontrol eksitasi sehingga mampu menyesuaikan titik operasi terhadap konfigurasi jaringan dan beban saat itu serta berdasar pada rating dan kapabilitas masing – masing pembangkit.
- d. Pembebanan berfungsi sebagai *damping* yang memperlambat rotor dan mempercepat penyesuaian sudut daya generator.
- e. Gangguan di sisi 13,8 KV mengakibatkan osilasi antar generator dan antar kelompok generator. Saling memberi dan menerima daya antar generator menyebabkan semua generator berosilasi antara *mode motoring* dan *generating*. Osilasi - osilasi ini mempengaruhi frekuensi dan tegangan pada sistem. Osilasi antar rotor menyebabkan kondisi kesetimbangan atau *steady state* yang baru lebih lama tercapai.
- f. Gangguan di sisi tegangan 4,16 KV atau jauh dari unit pembangkit kurang mempengaruhi kestabilan sistem serta kondisi *steady state* yang baru dapat lebih cepat tercapai.

Daftar Pustaka

- [1] Nagrath, I.J., 1985, *Electric Machines*, Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- [2] Nihad, M., 2007, *Computer Aided Transient Stability Analysis*, Journal of Computer Science 3, Science Publication.
- [3] Vittal, V., 2003, *Transient Stability and Control for Large Scale Power System*, Iowa State University.
- [4] Yaman, C., 1997, *A Comparison of Classical and Detailed Model for Transient Stability Analysis*, Istanbul Technical University.
- [5] Canizares, C., 1999, *Stability*, University of Waterloo.
- [6] Dugan, R., 1996, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, NY.
- [7] Grainger, J.J., 1994, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, NY.
- [8] Taylor, J., 2001, *Modeling and Simulation of Dynamic Systems*, University of New Brunswick.

Lampiran :

Listing program mencari aliran daya

```
d0(1:18,1)=0;
v0(1:18,1)=1;
v0(1)=1.02;
v0(2)=1.02;
v0(3)=1.02;
v0(4)=1.02;
v0(5)=1.02;
p0(1:18,1)=0;
p0(1)=1.189;
p0(2)=1.189;
p0(3)=1.189;
p0(4)=1.189;
p0(5)=1.189;
p0(14)=-1.6786;
p0(15)=-1.9255;
p0(16)=-1.6419;
p0(17)=-0.7352;
p0(18)=-0.6739;
q0(1:18,1)=0;
q0(14)=-1.0403;
q0(15)=-1.1934;
q0(16)=-0.7952;
q0(17)=-0.3561;
q0(18)=-0.3264;
x0=[d0;v0;p0;q0];
x =
fsolve(@pflow,x0);
```

Listing fungsi persamaan aliran daya

```
function f =
pflow(x)
x(1)=0;
x(19)=1.02;
x(20)=1.02;
x(21)=1.02;
x(22)=1.02;
x(23)=1.02;
for k=1:18
    for n=1:18
        incr=absY(k,n)*x(n+1)
            *cos(x(k)-x(n)-
                thetaY(k,n));
        inci=absY(k,n)*x(n+1)
            *sin(x(k)-x(n)-
                thetaY(k,n));
        iY(k)=iY(k)+incr;
        iY(k+18)=iY(k+18)+inci;
    end
end
```

```
s(1:18)=x(19:36).*iY(1:18);
s(19:36)=x(19:36).*iY(19:36);
end
f(1)=x(37)-s(1);
f(19)=x(55)-s(19);
f(2)=x(38)-s(2);
f(20)=x(56)-s(20);
f(3)=x(39)-s(3);
f(21)=x(57)-s(21);
f(4)=1.189-s(4);
f(22)=x(58)-s(22);
f(5)=1.189-s(5);
f(23)=x(59)-s(5+N);
f(6:13)=-s(6:13);
f(24:31)=-s(24:31);
f(14)=-1.6786-s(14);
f(32)=-1.0403-s(32);
f(15)=-1.9255-s(15);
f(33)=-1.1934-s(33);
f(16)=-1.6419-s(16);
f(34)=-0.7952-s(34);
f(17)=-0.7352-s(17);
f(35)=-0.3561-s(35);
f(18)=-0.6739-s(18);
f(36)=-0.3264-s(36);
```

Listing program kestabilan transien

```
Tclear=input('Fault Duration, (s) = ');
Tend=input('Stop time, (s) = ');
Tfault=0.005;
h=0.005;
for k=1:5
    for n=1:5
        absYp(k,n)=Y(k,n);
        theta_p(k,n)=Y(k,5+n);
        absYf(k,n)=Y(5+k,n);
        theta_f(k,n)=Y(5+k,5+n);
        absYpf(k,n)=Y(10+k,n);
        theta_pf(k,n)=Y(10+k,5+n);
    end
end
fs=60;
ws=360*fs;
K=180*fs./H;
Ig0=(Pg0-
j*Qg0)/(Vg0.*(cosd(thetaVg0)-
j*sind(thetaVg0)));
thetaIg0=angle(Ig0)*180/pi;
absIg0=abs(Ig0);
Egg=(Vg0.*(cosd(thetaVg0)+j*sind(thetaVg0)))+(j*Xdd).*Ig0;
delta0=angle(Egg)*180/pi;
absEgg=abs(Egg);
```

```
t=0;
x=delta0;
x(6:10)=ws;
Pea=Pm;
Pea(6:10)=0;
vd=[Vg0;thetaVg0];
for nc=1:(Tend/h)
    if t<Tfault
        absY=absYp;
        thetaY=theta_p;
    elseif ((t >= Tfault) &&
(t < (Tfault+Tclear)))
        absY=absYf;
        thetaY=theta_f;
    elseif ((t >=
(Tfault+Tclear)) && (t <=
Tend))
        absY=absYpf;
        thetaY=theta_pf;
    end
    [fm,Peam]=dae(x);
xm=x+(h/2)*fm;
[E,Pea]=dae(xm);
x=x+h*f;
t=t+h;
end
```

Listing fungsi persamaan diferensial - aljabar

```
function [dx,P]=dae(x)
vd=fsolve(@getvd,vd,options);
function f=getvd(y)
for k=1:5
    for n=1:5
        incr=absY(k,n)*y(n)*cosd
            (thetaY(k,n)+y(n+5));
        inci=absY(k,n)*y(n)*sind
            (thetaY(k,n)+y(n+5));
        iY(k)=iY(k)+incr;
        iY(k+5)=iY(k+5)+inci;
    end
end
f=(absEgg.*sind(x(1:5))-
y(1:5).*sind(y(1+5:2*5)))/Xdd-
iY(1:5);
f(6:10)=(-
absEgg.*cosd(x(1:5))+y(1:5).*co
sd(y(1+5:2*5)))/Xdd-iY(6:10);
end
P=(absEgg.*vd(1:5)/Xdd).*sind(x
(1:5))-vd(6:10);
dx=x(6:10)-ws;
P(6:10)=Pm-P-(D.*dx);
dx(6:10)=K.*P(6:10);
end
```