

STUDI KESTABILAN TRANSIENT SISTEM TENAGA LISTRIK MULTIMESIN (MODEL IEEE 9 BUS 3 MESIN)

Heru Dibyo Laksono

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Andalas Padang, Kampus Limau Manis

Padang, Sumatera Barat

Email : heru_dl@ft.unand.ac.id

ABSTRAK

Terjadinya gangguan pada sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan terjadinya perubahan parameter-parameter listrik yang berperan penting. Parameter-parameter tersebut antara lain tegangan, arus, daya, kecepatan rotor, frekuensi dan sudut daya. Pada studi stabilitas peralihan ini akan dilihat perubahan parameter-parameter tersebut terhadap lamanya gangguan, dari awal terjadinya gangguan sampai sistem menjadi stabil kembali (critical clearing time) bila terjadi gangguan besar. Studi stabilitas peralihan (transient stability) ini menyangkut kemampuan sistem untuk tetap dalam keadaan sinkron (stabil) setelah terjadi gangguan yang besar secara tiba-tiba, berupa gangguan hubung singkat tiga fasa simetris pada saluran. Dengan melakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak Matlab akan dilihat unjuk kerja kestabilan suatu sistem tenaga listrik dengan contoh kasus sistem tenaga listrik Model IEEE 9 Bus 3 Mesin. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa unjuk kerja kestabilan transient sistem tenaga listrik Model IEEE 9 Bus 3 Mesin menunjukkan unjuk kerja yang memenuhi kriteria yang ditentukan, dengan waktu clearing time sebesar 0.2 detik atau lebih cepat dan waktu studi 3 detik.

Keyword : Model IEEE 9 Bus 3 Mesin , Kestabilan Transient, Clearing Time, Gangguan Tiga Fasa Simetris

I. PENDAHULUAN

Suatu sistem kelistrikan umumnya memiliki beberapa pusat pembangkit yang terdiri pusat pembangkit listrik tenaga air, pusat pembangkit listrik tenaga uap (termal), pusat pembangkit listrik tenaga diesel dan jenis pusat pembangkit lainnya. Semua unit pembangkit yang ada tersebut terhubung satu sama lain melalui jaringan transmisi untuk mensuplai kebutuhan listrik bagi para konsumen.

Sistem kelistrikan yang luas dan kompleks ini tak luput dari seringnya terjadi gangguan. Gangguan-gangguan yang terjadi dapat berupa gangguan yang kecil dan gangguan yang besar, dimana gangguan ini ada yang bersifat temporer (sementara) dan ada yang bersifat permanen. Gangguan yang kecil tidak begitu mempengaruhi kondisi sistem, biasanya sistem langsung bekerja normal kembali setelah terjadi gangguan. Gangguan yang besar seperti gangguan pada pembangkit, pembebanan yang berlebihan, gangguan pada saluran transmisi dan gangguan hubung singkat, besar pengaruhnya pada kondisi sistem dimana bila gangguan ini bersifat permanen dan akhirnya dapat menyebabkan sistem menjadi padam total.

Apabila sistem tenaga listrik tersebut mengalami gangguan maka kemampuan dari sistem tersebut untuk dapat bekerja normal kembali pada kondisi operasi dikenal dengan kestabilan sistem tenaga listrik. Untuk perencanaan, pengembangan dan pengoperasian sistem yang andal, perlu adanya studi mengenai kestabilan dari sistem kelistrikan. Penelitian ini membahas tentang studi stabilitas peralihan (transient stability), menyangkut kemampuan sistem untuk tetap dalam keadaan

sinkron (stabil) setelah terjadi gangguan yang besar secara tiba-tiba, berupa gangguan hubung singkat tiga fasa simetris pada saluran.

Terjadinya gangguan pada sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan terjadinya perubahan parameter-parameter listrik yang berperan penting. Parameter-parameter tersebut antara lain tegangan, arus, daya, kecepatan rotor, frekuensi dan sudut daya. Pada studi ini akan dilihat perubahan parameter-parameter tersebut terhadap lamanya gangguan, dari awal terjadinya gangguan sampai sistem menjadi stabil kembali (*critical clearing time*) bila terjadi gangguan besar.

Tujuan dari penelitian ini adalah mensimulasikan dan mengetahui unjuk kerja kestabilan sistem tenaga listrik model IEEE 9 Bus 3 Mesin jika pada sistem tersebut terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa simetris yang terjadi pada saluran transmisi.

Dalam penelitian ini dilakukan pembatasan sebagai berikut :

- Gangguan yang terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa simetris yang terjadi pada saluran transmisi pada bus-bus beban. Hal ini dikarenakan selama hubung singkat, daya-daya generator yang dekat dengan gangguan akan berkurang secara mendadak sedangkan daya generator yang jauh dari titik gangguan tidak begitu terpengaruh.
- Kondisi yang diambil pada sistem tenaga listrik adalah : saluran transmisi, beban dan trafo pada keadaan tunak
- Pada generator ditinjau kondisi mantap dan transiennya dengan mengabaikan pengaruh sistem exciter, AVR (*automatic voltage regulator*) dan governor. Pengabaian AVR dan governor karena waktu yang dipandang selama studi cukup singkat

karena dalam waktu yang singkat peralatan tersebut dapat dianggap belum bekerja. Disini daya keluaran dari turbin dianggap konstan.

- Kondisi sistem tenaga listrik sebelum gangguan ditentukan dengan studi aliran daya, dalam hal ini dipakai metode Fast Decouple
- Simulasi dilakukan dengan menggunakan program Matlab

II. KESTABILAN TRANSIENT

Untuk mendapatkan perhitungan studi kestabilan transien sistem tenaga listrik perlu diketahui kondisi sebelum masuk kondisi transien yang merupakan kondisi pada keadaan tetap (tunak) dari sistem. Pada kondisi ini persamaan differensial menjadi tidak perlu karena semua variabel bernilai konstan atau merupakan fungsi sinusoidal terhadap waktu sehingga persamaan fasor lebih cocok dipakai. Dari kondisi ini diketahui daya output, tegangan terminal dan arus dari setiap generator. Jika tidak diketahui dapat dihitung dengan mempergunakan studi aliran daya.

Misalkan untuk generator – n, tegangan fasor terminal \bar{V}_{an} pada sudut β_n terhadap referensi sistem dan sumbu-q pada sudut δ_n terhadap referensi yang sama. Sudut β_n ditentukan dari data hasil perhitungan aliran daya dan δ_n merupakan sudut awal sumbu-q generator yang menunjukkan posisi rotor. Selisih nilai dari kedua sudut ini $\beta_n - \delta_n$ merupakan sudut antara sumbu-q dan tegangan terminal generator.

Dari aliran daya dapat menentukan arus terminal generator I_{an} dengan fasor ϕ_n terhadap tegangan terminal. Dengan rumusan :

$$\bar{I}_{an} = \frac{P_n - jQ_n}{\bar{V}_n} = I_{an} \angle \phi_n \tag{2.1}$$

dimana : $P_n - jQ_n$ adalah konjugate dari daya kompleks pada generator n.

Pada keadaan tunak ini arus kumparan peredam dan tegangan sumbu-d bernilai nol atau :

$$i_D = i_Q = v_0 = 0 \tag{2.2}$$

maka tegangan stator pada sumbu-d dan sumbu-q adalah :

$$\begin{aligned} V_d &= -r \cdot i_d - x_q \cdot i_q \\ V_q &= -r \cdot i_q + x_d \cdot i_d + k \cdot \omega_R \cdot M_F \cdot i_F \end{aligned} \tag{2.3}$$

Dari transformasi Park didapatkan :

$$\begin{aligned} v_a &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left(i_d \cos\theta + v_q \sin\theta \right) \\ v_a &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\left(i_d + x_q \cdot i_q \right) \cos\theta + \left(r \cdot i_q + x_d \cdot i_d + k \cdot \omega_R \cdot M_F \cdot i_F \right) \sin\theta \right] \end{aligned} \tag{2.4}$$

dimana θ adalah posisi sumbu-d terhadap referensi yang diam, besar θ pada $t = t'$ adalah

$$\theta = \omega_R \cdot t' + \delta + \frac{\pi}{2} \tag{2.5}$$

δ adalah posisi sumbu-q terhadap referensi yang berputar pada kecepatan serempak. Dalam pemodelan mesin sinkron didapatkan :

$$\begin{aligned} \sqrt{3} \cdot E &= k \cdot \omega_R \cdot M_F \cdot i_F \\ I_d &= \frac{i_d}{\sqrt{3}} \\ I_q &= \frac{i_q}{\sqrt{3}} \end{aligned} \tag{2.6}$$

sehingga persamaan tegangan stator dalam bentuk fasor :

$$\begin{aligned} \bar{V}_a &= - \left(I_d + x_q \cdot I_q \right) \angle \delta + \frac{\pi}{2} + \left(r \cdot I_q + x_d \cdot I_d + E \right) \angle \delta \\ \bar{V}_a &= E \angle \delta - r \cdot \left(I_q + j \cdot I_d \right) \angle \delta + x_d \cdot I_d \angle \delta + x_q \cdot I_q \angle \delta - j \cdot x_q \cdot I_q \end{aligned} \tag{2.7}$$

Fasor arus fasa a terdiri atas komponen sumbu-d dan sumbu-q yaitu :

$$\begin{aligned} \bar{I}_a &= \bar{I}_q + \bar{I}_d \\ \bar{I}_q &= I_q \angle \delta \\ \bar{I}_d &= j \cdot I_d \angle \delta \end{aligned} \tag{2.8}$$

Posisi fasor I_a terhadap sumbu – q adalah $\delta + \phi_1$ maka I_d dan I_q dapat ditentukan dengan rumusan

$$\begin{aligned} I_d &= -I_a \sin \left(\delta + \phi_1 \right) \\ I_q &= I_a \cos \left(\delta + \phi_1 \right) \end{aligned} \tag{2.9}$$

Jadi EMF stator pada fasa a adalah :

$$\bar{E}_a = \bar{V}_a + r \cdot \bar{I}_a + j \cdot x_q \cdot \left(-I_d \right) + j \cdot x_d \cdot I_d = \bar{V}_a + \left(+x_q \cdot I_d \right) + j \left(I_d - x_q \cdot I_d \right) \tag{2.10}$$

Karena fasor $j \cdot I_d$ terletak pada sumbu-q sehingga untuk menentukan besar δ hanya perlu menyelesaikan persamaan sebagai berikut :

$$\bar{E}_{q,a} = \bar{V}_a + \left(+j \cdot x_q \cdot I_d \right) \tag{2.11}$$

Nilai awal tegangan internal sumbu-d dan sumbu-q stator adalah :

$$\begin{aligned} E'_q &= V_q + r \cdot I_q - x'_d \cdot I_d \\ E'_d &= V_d + r \cdot I_d + x'_q \cdot I_q \end{aligned} \tag{2.12}$$

Dimana V_q dan V_d adalah komponen sumbu-q dan sumbu-d tegangan terminal generator. Dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_d &= -V_a \sin \left(\delta - \beta \right) \\ V_q &= V_a \cos \left(\delta - \beta \right) \end{aligned} \tag{2.13}$$

2.1 Model Matematis Sistem Selama Periode Peralihan

Dalam studi kestabilan ini jenis gangguan yang dianalisa adalah gangguan hubung singkat tiga fasa

simetris yang terjadi pada bus. Model matematis sistem selama periode transien adalah :

1. Pada pemodelan generator terdapat empat buah persamaan differensial yaitu

$$\tau_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} = E_{fd} - E_q' + (X_d - X_d') J_d \quad (3.1)$$

$$\tau_{q0}' \frac{dE_d'}{dt} = -E_d' - (X_q - X_q') J_q \quad (3.2)$$

$$\frac{2.H}{\omega_s} \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (3.3)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s$$

2. Persamaan aljabar linier jaringan yaitu
 - Jaringan dimodelkan dengan persamaan simpul dalam bentuk matrik yaitu :

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (3.4)$$

dimana

I_{bus} : Arus injeksi pada bus

Y_{bus} : Matriks admitansi bus

V_{bus} : Tegangan bus terhadap bus referensi

- Beban dimodelkan sebagai impedansi konstan antara bus yang memiliki beban dengan bus referensi dimana besarnya admitansi beban adalah :

$$y_{beban} = \left(\frac{P_{beban} - jQ_{beban}}{|V_{busbeban}|^2} \right) \quad (3.5)$$

akibatnya matriks admitansi bus harus dirubah :

$$Y_{bus} = Y_{bus, lama} + diagonal (y_{beban}) \quad (3.6)$$

- Pembangkitan pada bus pembangkit dimodelkan dengan sumber tegangan dibelakang impedansi transien sumbu-d yaitu

$$\overline{E}_a = \overline{V}_a + (j \cdot X_d') \overline{J}_a$$

$$\overline{I}_a = \left(\frac{P_{gen} - jQ_{gen}}{V_{bus}^*} \right) \quad (3.7)$$

3. Langkah-Langkah Perhitungan Program Kestabilan Transient Dengan Matlab

Untuk lebih jelasnya langkah – langkah perhitungan program kestabilan transien berikut ini akan dijelaskan cara penggunaan program kestabilan transien dan diagram alirnya. Langkah – langkah menggunakan program ini adalah sebagai berikut :

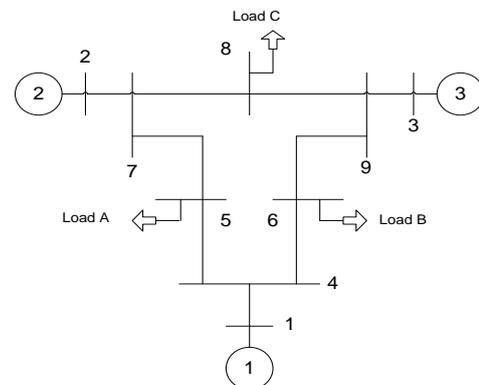
- Input data hasil analisis aliran daya untuk penentuan keadaan sebelum terjadinya gangguan.
 - Frekuensi
 - MVA dasar
 - Jumlah bus
 - Jumlah saluran

- Nomor bus, untuk memudahkan mengetahui letak bus / GI yang dimaksud
- Tipe bus (P-V, P-Q, atau Slack Bus)
- Nilai tegangan setelah dilakukan analisis aliran daya dan besar sudutnya
- Besar daya aktif dan reaktif beban dan generator yang mengalir setelah dihitung dengan mempergunakan analisis aliran daya .

- Input data saluran terdiri dari :
 - 2 nomor bus tempat saluran itu terletak
 - Impedansi saluran dalam per – unit (R dan X_L)
 - Nilai line charging dalam per – unit (Y/2)
 - Nilai tap trafo bila trafo dimasukkan, bila diabaikan tulis nilainya nol.
- Data Generator , terdiri dari :
 - Resistansi generator
 - Reaktansi sumbu-d dan sumbu-q
 - Reaktansi transien sumbu-d
 - Konstanta inersia (H)
 - Konstanta waktu rangkaian terbuka sumbu-d pada periode transien
 - Konstanta waktu rangkaian terbuka sumbu-q pada periode transien

4. Hasil Perhitungan dan Analisa

4.1 Diagram Segaris Sistem Tenaga Listrik Model IEEE 9 Bus 3 Mesin



Gambar-4.1 Diagram Segaris Sistem Tenaga Listrik Model IEEE 9 Bus 3 Mesin

4.2 Data Sistem Tenaga Listrik Model IEEE 9 Bus 3 Mesin

Data-data sistem tenaga listrik Model IEEE 9 Bus 3 Mesin sebagai berikut :

Tabel-4.1 Data Tegangan dan Tipe Bus Model IEEE 9 Bus 3 Mesin

Bus	Tegangan Pu	Jenis
1	1.0400 ∠0°	Bus Slack
2	1.0250 ∠0°	Bus PV
3	1.0250 ∠0°	Bus PV
4	1.0300 ∠0°	Bus PQ

5	1.0000 ∠0 ⁰	Bus PQ
6	1.0000 ∠0 ⁰	Bus PQ
7	1.0000 ∠0 ⁰	Bus PQ
8	1.0000 ∠0 ⁰	Bus PQ
9	1.0000 ∠0 ⁰	Bus PQ

Tabel-4.2 Data Pembangkitan Tiap Bus Model IEEE 9 Bus 3 Mesin

Bus	Pembangkitan	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0.0000	0.0000
2	163.0000	0.0000
3	85.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000

Tabel-4.3 Data Beban Tiap Bus Model IEEE 9 Bus 3 Mesin

Bus	Beban	
	P (MW)	Q (MVAR)
1	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000
4	125.0000	0.0000
5	90.0000	50.0000
6	0.0000	30.0000
7	0.0000	0.0000
8	100.0000	35.0000
9	0.0000	0.0000

Tabel-4.4 Data Saluran Urutan Model IEEE 9 Bus 3 Mesin

Line		Z seri (pu)	
Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)
1	4	0.0000	0.0576
2	7	0.0000	0.0625
3	9	0.0000	0.0586
4	5	0.0100	0.0850
4	6	0.0170	0.0920
5	7	0.0320	0.1610
6	9	0.0390	0.1700
7	8	0.0085	0.0720
8	9	0.0119	0.1008

Tabel-4.5 Data Line Charging Model IEEE 9 Bus 3 Mesin

Line		Y/2 perunit
Dari Bus	Ke Bus	
1	4	0.0000
2	7	0.0000
3	9	0.0000
4	5	0.1760
4	6	0.1580
5	7	0.3060
6	9	0.3580
7	8	0.1490
8	9	0.2090

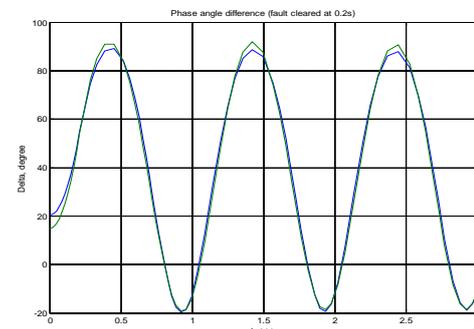
Tabel- 4.4 Data Pembangkit Sistem Tenaga Listrik Model IEEE 9 Bus 3 Mesin

BUS	R _a (PU)	X _d ' (PU)	H (PU)
1	0.0000	0.0608	23.6400
2	0.0000	0.1198	6.4000
3	0.0000	0.1813	3.0100

4.3 Analisis Kestabilan Transient

Pada studi ini akan disimulasikan terjadi gangguan tiga fasa simetris di masing – masing bus beban pada sistem tenaga listrik Model IEEE 9 Bus 3 Mesin. Dengan lama studi 3 detik dan gangguan dihilangkan setelah 0.2 detik. Hasilnya berupa perilaku pembangkit-pembangkit dalam sistem setelah terjadi gangguan dalam bentuk respon sudut rotor sebagai berikut :

1. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Simetris Pada Bus 4



Gambar-4.1 Plot Perbedaan Sudut Rotor Untuk Bus 2 s/d Bus 3 Terhadap Slack Bus Untuk Gangguan Pada Bus 4 Dengan Gangguan Dihilangkan Pada Saat t = 0.2 detik

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa gangguan dihilangkan pada saat t = 0.2 detik. Pada saat gangguan dihilangkan terjadi perbedaan besar sudut rotor pada bus-bus pembangkit terhadap Slack Bus. Adapun perbedaan besar sudut rotor untuk masing-masing bus pembangkit terhadap Slack Bus adalah

Bus 2 terhadap Slack Bus δ_{21} : 51.6072⁰

Bus 3 terhadap Slack Bus δ_{31} : 50.4396⁰

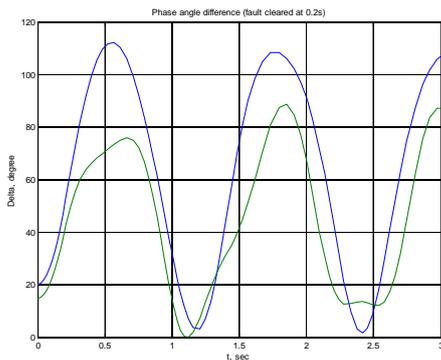
Sedangkan perbedaan sudut rotor maksimum untuk masing-masing bus pembangkit terhadap Slack Bus dengan nilai sebagai berikut

Bus 2 terhadap Slack Bus δ_{21} : 89.1144⁰ pada saat t = 0.4533 detik

Bus 3 terhadap Slack Bus δ_{31} : 90.9023⁰ pada saat t = 0.4533 detik

Setelah sudut rotor mencapai nilai maksimum maka perbedaan besar sudut rotor pada bus 2 dan bus 3 terus berkurang dan sistem menjadi stabil kembali.

2. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Simetris Pada Bus 5



Gambar -4.2 Plot Perbedaan Sudut Rotor Untuk Bus 2 s/d Bus 3 Terhadap Slack Bus Untuk Gangguan Pada Bus 5 Dengan Gangguan Dihilangkan Pada Saat t = 0.2 detik

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa gangguan dihilangkan pada saat t = 0.2 detik. Pada saat gangguan dihilangkan terjadi perbedaan besar sudut rotor pada bus-bus pembangkit terhadap Slack Bus. Adapun perbedaan besar sudut rotor untuk masing-masing bus pembangkit terhadap Slack Bus adalah

Bus 2 terhadap Slack Bus δ_{21} : 50.2007⁰

Bus 3 terhadap Slack Bus δ_{31} : 40.3138⁰

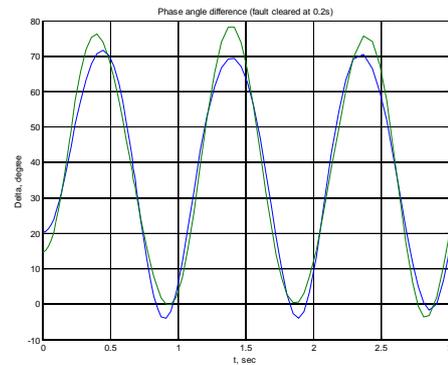
Sedangkan perbedaan sudut rotor maksimum untuk masing-masing bus pembangkit terhadap Slack Bus dengan nilai sebagai berikut

Bus 2 terhadap Slack Bus δ_{21} : 112.1506⁰ pada saat t = 0.5649 detik

Bus 3 terhadap Slack Bus δ_{31} : 76.0009⁰ pada saat t = 0.6613 detik

Setelah sudut rotor mencapai nilai maksimum maka perbedaan besar sudut rotor pada bus 2 dan bus 3 terus berkurang dan sistem menjadi stabil kembali.

3. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Simetris Pada Bus 6



Gambar-4.3 Plot Perbedaan Sudut Rotor Untuk Bus 2 s/d Bus 3 Terhadap Slack Bus Untuk Gangguan Pada Bus 6 Untuk Gangguan Dihilangkan Pada Saat t = 0.2 detik

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa gangguan dihilangkan pada saat t = 0.2 detik. Pada saat gangguan dihilangkan terjadi perbedaan besar sudut rotor pada bus-bus pembangkit terhadap Slack Bus. Adapun perbedaan besar sudut rotor untuk masing-masing bus pembangkit terhadap Slack Bus adalah

Bus 2 terhadap Slack Bus δ_{21} : 42.4036⁰

Bus 3 terhadap Slack Bus δ_{31} : 46.4141⁰

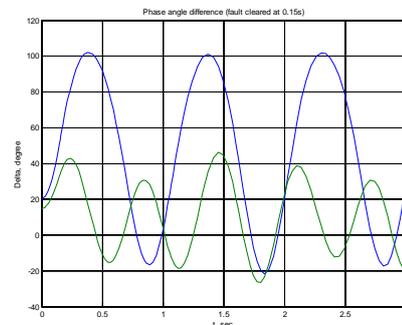
Sedangkan perbedaan sudut rotor maksimum untuk masing-masing bus pembangkit terhadap Slack Bus dengan nilai sebagai berikut

Bus 2 terhadap Slack Bus δ_{21} : 71.7559⁰ pada saat t = 0.4467 detik

Bus 3 terhadap Slack Bus δ_{31} : 76.1835⁰ pada saat t = 0.4006 detik

Setelah sudut rotor mencapai nilai maksimum maka perbedaan besar sudut rotor pada bus 2 dan bus 3 terus berkurang dan sistem menjadi stabil kembali.

4. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Simetris Pada Bus 7



Gambar-4.4 Plot Perbedaan Sudut Rotor Untuk Bus 2 s/d Bus 3 Terhadap Slack Bus Untuk Gangguan Pada Bus 7 Untuk Gangguan Dihilangkan Pada Saat t = 0.15 detik

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa gangguan dihilangkan pada saat t = 0.15 detik.

Pada saat gangguan dihilangkan terjadi perbedaan besar sudut rotor pada bus-bus pembangkit terhadap Slack Bus. Adapun perbedaan besar sudut rotor untuk masing-masing bus pembangkit terhadap Slack Bus adalah

Bus 2 terhadap Slack Bus δ_{21} : 51.6359⁰

Bus 3 terhadap Slack Bus δ_{31} : 33.2714⁰

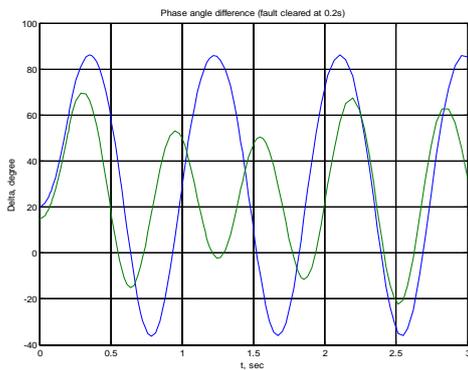
Sedangkan perbedaan sudut rotor maksimum untuk masing-masing bus pembangkit terhadap Slack Bus dengan nilai sebagai berikut

Bus 2 terhadap Slack Bus δ_{21} : 102.0133⁰
pada saat t = 0.3830 detik

Bus 3 terhadap Slack Bus δ_{31} : 42.7787⁰ pada saat t = 0.2370 detik

Setelah sudut rotor mencapai nilai maksimum maka perbedaan besar sudut rotor pada bus 2 dan bus 3 terus berkurang dan sistem menjadi stabil kembali.

5. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Simetris Pada Bus 8



Gambar-4.5 Plot Perbedaan Sudut Rotor Untuk Bus 2 s/d Bus 3 Terhadap Slack Bus Untuk Gangguan Pada Bus 8 Untuk Gangguan Dihilangkan Pada Saat t = 0.2 detik

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa gangguan dihilangkan pada saat t = 0.2 detik. Pada saat gangguan dihilangkan terjadi perbedaan besar sudut rotor pada bus-bus pembangkit terhadap Slack Bus. Adapun perbedaan besar sudut rotor untuk masing-masing bus pembangkit terhadap Slack Bus adalah

Bus 2 terhadap Slack Bus δ_{21} : 58.3036⁰

Bus 3 terhadap Slack Bus δ_{31} : 52.0528⁰

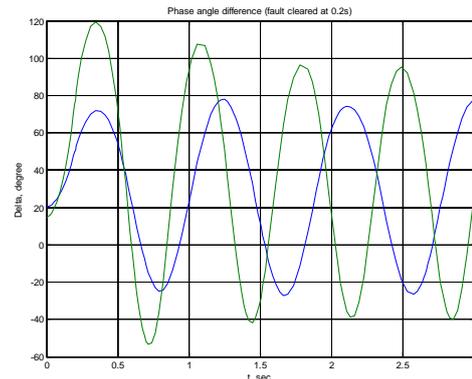
Sedangkan perbedaan sudut rotor maksimum untuk masing-masing bus pembangkit terhadap Slack Bus dengan nilai sebagai berikut

Bus 2 terhadap Slack Bus δ_{21} : 86.0897⁰
pada saat t = 0.3495 detik

Bus 3 terhadap Slack Bus δ_{31} : 69.4683⁰ pada saat t = 0.2884 detik

Setelah sudut rotor mencapai nilai maksimum maka perbedaan besar sudut rotor pada bus 2 dan bus 3 terus berkurang dan sistem menjadi stabil kembali.

9. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Simetris Pada Bus 9



Gambar-4.6 Plot Perbedaan Sudut Rotor Untuk Bus 2 s/d Bus 3 Terhadap Slack Bus Untuk Gangguan Pada Bus 9 Untuk Gangguan Dihilangkan Pada Saat t = 0.2 detik

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa gangguan dihilangkan pada saat t = 0.2 detik. Pada saat gangguan dihilangkan terjadi perbedaan besar sudut rotor pada bus-bus pembangkit terhadap Slack Bus. Adapun perbedaan besar sudut rotor untuk masing-masing bus pembangkit terhadap Slack Bus adalah

Bus 2 terhadap Slack Bus δ_{21} : 50.0204⁰

Bus 3 terhadap Slack Bus δ_{31} : 76.0437⁰

Sedangkan perbedaan sudut rotor maksimum untuk masing-masing bus pembangkit terhadap Slack Bus dengan nilai sebagai berikut

Bus 2 terhadap Slack Bus δ_{21} : 71.8726⁰
pada saat t = 0.3460 detik

Bus 3 terhadap Slack Bus δ_{31} : 119.4536⁰
pada saat t = 0.3460 detik

Setelah sudut rotor mencapai nilai maksimum maka perbedaan besar sudut rotor pada bus 2 dan bus 3 terus berkurang dan sistem menjadi stabil kembali.

5. KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan tentang studi kestabilan transien pada sistem tenaga listrik ini dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Permasalahan studi kestabilan transien secara matematis dapat dinyatakan dengan dua set persamaan yaitu sistem persamaan aljabar dan differensial. Sistem persamaan aljabar terdiri dari persamaan mantap untuk beban, saluran transmisi, transformator dan terminal generator. Persamaan differensial menggambarkan kondisi dinamis rotor generator seperti kecepatan rotor dan fluks lingkup rangkaian rotor.

2. Dalam penelitian ini, gangguan dihilangkan setelah 0.2 detik dan lama studi 0.3 detik. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa semua bus beban dalam sistem tenaga listrik model IEEE 9 Bus 3 Mesin memenuhi kriteria waktu yang telah ditentukan kecuali untuk bus 7, gangguan dihilangkan pada $t = 0.15$ detik dan lama studi 3 detik

DAFTAR PUSTAKA

1. Gonen. Turan .“*Modern Power System Analysis*” . Jhon Wiley & Sons. Inc. Singapore. 1998.
2. Stevenson. W.D. Jr. “*Analisis Sistem Tenaga Listrik*”. diterjemahkan oleh Idris. Kemal Ir. Edisi Keempat. Erlangga. Jakarta. 1994.
3. Sianipar. Gibson . DR. Ir “*Komputasi Sistem Tenaga*”. Institut Teknologi Bandung (ITB). Bandung. 1998.
4. Gross. Charles A. “*Power System Analysis*” . Jhon Wiley & Sons. Inc. Canada. 1986.
5. Marta Yudha. Hendra. Ir. MS. “*Diktat Studi Aliran Daya*”. Universitas Sriwijaya (Unsri). Palembang. 1995
6. M.A. PAI. “*Computer Technigues in Power System Analysis*”. Indian Institute of Technology. New Delhi. 1984
7. Grainger. John & Stevenson. William. Jr. “*Power System Analysis*” . McGraw-Hill. New York. USA. 1993
8. Stagg. Glenn W. El-Abiad. “*Computer Methods in Power System Analysis*”. McGraw-Hill. Tokyo. 1981.
9. Hutauruk. Ir. Msc. “*Transmisi Daya Listrik* “. Erlangga. Jakarta. 1985
10. Gonen. Turan. “*Electric Power Transmission System Engineering Analysis And Design*”. John Wiley & Sons. California . 1988
11. Part-Enander. Eva & Sjoberg. Anders “*The Matlab Handbook* “.John Wiley & Sons. California . 1999
12. Saadat Hadi. “*Power System Analysis*” McGraw-Hill, Singapore, 1999

BIODATA

Heru Dibyo Laksono ST. MT. Lahir di Sawah Lunto. 7 Januari 1977. Menamatkan S1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas (Unand) Padang tahun 2000 bidang Teknik Tenaga Listrik. Pendidikan S2 bidang Teknik Kendali dan Sistem diselesaikan di Institute Teknologi Bandung (ITB) tahun 2004. Masuk sebagai dosen Teknik Elektro Universitas Andalas sejak tahun 2005.