

ANALISIS PERUBAHAN REAKTANSI SALURAN TERHADAP TRANSIENT STABILITY OF MULTIMACHINE DENGAN METODE RUNGE-KUTTA FEHLBERG

Petrus Prasetyo¹, Dikpride Despa², Herri Gusmedi³, Lukmanul Hakim⁴

¹²³⁴Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung

¹petrus1790@gmail.com, ²despa@eng.unila.ac.id, ³herri.gusmedi@eng.unila.ac.id, ⁴plgsekip@unila.ac.id

Abstrak

Keandalan sistem tenaga listrik dalam menjaga dan mempertahankan kontinuitas distribusi tenaga listrik, berkaitan dengan kestabilannya dalam menjaga synchronism generator ketika terjadi gangguan. Studi stabilitas transien berhubungan dengan gangguan-gangguan besar seperti surja hubung, hubung singkat, lepasnya beban atau lepasnya generator. Ada berbagai metode yang digunakan dalam analisis kestabilan diantaranya adalah metode Runge-Kutta Fehlberg yang merupakan salah satu metode Time Domain Simulation yang digunakan pada penelitian ini karena mampu meningkatkan akurasi dalam penyelesaian persamaan ayunan (swing- equation) sistem multimesin IEEE 9 bus. Tujuan penelitian ini adalah mempelajari dan menganalisis pengaruh perubahan reaktansi saluran terhadap transient stability dengan menerapkan gangguan lepasnya beban dan gangguan 3 fasa simetris yang terjadi pada salah satu saluran. Hasil simulasi menunjukkan pemberian kompensasi dan penambahan jumlah saluran transmisi mampu meningkatkan stabilitas sistem tenaga listrik dengan menurunkan reaktansi saluran. Selanjutnya, diperoleh Critical Clearing Time (CCT) sebesar 0.19-0.20s. Dengan kompensasi 30%, 50% dan 70% diperoleh CCT berturut-turut 0.20-0.21s, 0.21-0.22s dan 0.22-0.23s. Ketika penambahan jumlah saluran, diperoleh CCT sebesar 0.21-0.22s. Sedangkan lokasi gangguan hilangnya beban memberikan ayunan sudut rotor generator terdekat menjadi lebih besar dibandingkan dengan generator yang berada jauh dari lokasi terjadinya lepas beban.

Kata kunci : Transient Stability, Runge-Kutta Fehlberg, Time Domain Simulation, Critical Clearing Time, sistem IEEE 9 bus.

Abstract

The reliability of power system energy in maintaining the continuity of electricity distribution is related to its power system stability on keeping and maintaining the synchronism of generators when the disturbances occur. Transient stability is related to large disturbances such as lighting, short circuit, loss of loads or loss of generations. These disturbances influence the whole system, so study of transient stability is needed. There are some methods that have been used in stability analysis, one of them is Runge-Kutta Fehlberg method. This method is one of Time Domain Simulation (TDS) method which is used in this research to increase the accuration of solving the swing equation of IEEE 9 buses system. The purpose of this research is to study and investigate the influence of line reactance changing to transient stability by applying loss of loads and 3 phase fault at one of transmission lines. The results show that addition of line series compensation and parallel lines transmission were able to decrease line reactances, so the stability of power system was improved. Furthermore, the critical clearing time (CCT) was reached on 0.19-0.20s while 3 phase fault was applied on transmission line. By series compensation: 30%, 50% and 70%, CCT was reached on 0.20-0.21s, 0.21-0.22s and 0.22-0.23s. Whereas, by applying the parallel lines reached the CCT on 0.21-0.22s. In addition, the closest generator to the loss of loads disturbance has higher rotor angle swing than the generator located far away from the disturbance.

Key words: Transient Stability, Runge-Kutta Fehlberg, Time Domain Simulation, Critical Clearing Time(CCT), IEEE 9 buses system.

I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik (*power system energy*) terdiri dari 3 komponen utama, yaitu: sistem pembangkit, transmisi dan distribusi tenaga listrik. Sistem tenaga listrik dapat dikatakan andal jika sistem tersebut mampu menjaga dan mempertahankan kontinuitas pendistribusian tenaga listrik kepada konsumen dari berbagai gangguan (*disturbances*).

Keandalan dalam sistem tenaga listrik (STL) berkaitan dengan kestabilan sistem tersebut. Sehingga dalam perencanaan, pengembangan maupun pengoperasian sistem tenaga listrik yang andal, sangat

berhubungan dengan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk beroperasi dalam keadaan normal kembali setelah mengalami gangguan.

Studi kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi 3, yaitu: *steady state stability*, *dynamic stability* dan *transient stability*. Studi kestabilan *transient*/peralihan berkaitan dengan CCT (*Critical Clearing Time*). CCT merupakan waktu pemutusan kritis yang diperlukan oleh sistem/generator untuk dapat tetap mem-pertahankan *synchronism*/kestabilannya.

Pengurangan reaktansi saluran transmisi mampu meningkatkan stabilitas peralihan dengan menaikkan transfer daya. Metode tambahan yang digunakan untuk mengurangi reaktansi jaringan adalah dengan menambahkan kompensator kapasitor seri pada saluran transmisi serta menambah jumlah saluran transmisi. Maka pada penulisan ini, akan diketahui pengaruh pemasangan kompensator kapasitor seri dan penambahan jumlah saluran transmisi terhadap kestabilan peralihan pada sistem tenaga listrik multimesin (sistem IEEE 9 bus).

Pemodelan matematis sistem tenaga listrik (STL) dengan gangguan besar (*large disturbances*)/transien adalah dalam bentuk persamaan *non-linier*. Sehingga penyelesaian numerik dari persamaan ini menggunakan penyelesaian secara integrasi. Pemilih metode *Runge-Kutta Fehlberg* sebagai metode penyelesaian numerik dari persamaan ayunan (*swing equation*) guna mendapatkan dan me-ningkatkan akurasi kurva ayunan (*swing curve*) dalam penyelesaian persamaan *non-linier* ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Rotor Angle Stability

Rotor angle stability atau stabilitas sudut rotor adalah kemampuan suatu generator/mesin sinkron yang terhubung dalam sistem tenaga untuk menjaga keserempakannya (*synchronism*) di bawah kondisi operasi normalnya setelah mengalami gangguan[4]. Dalam sistem tenaga, sudut rotor (δ) dan kecepatan (ω) dari generator sinkron merupakan kuantitas terpenting. Stabilitas ini bergantung pada kemampuan dari masing-masing mesin sinkron dalam sistem tenaga untuk mempertahankan keseimbangan antara masukan generator (*mechanical torque*) dan keluaran generator (*electrical torque*). Fenomena dan analisis dalam stabilitas sudut rotor dibagi kedalam 2 bentuk, yakni: *small disturbance*, *transient stability*.

Small disturbance rotor angle stability mengacu pada kejadian gangguan-gangguan kecil seperti perubahan pada beban. Sedangkan *transient stability* mengacu pada kejadian dengan gangguan-gangguan besar seperti: gangguan hubung singkat (*short circuit*) pada saluran transmisi, penambahan beban secara tiba-tiba, lepasnya generator dari sistem maupun terjadinya kehilangan beban.

2.2. Persamaan Ayunan (Swing Equation)

Merupakan persamaan yang mengatur putaran/gerakan rotor pada mesin sinkron yang berdasarkan pada prinsip dasar dalam dinamika, yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah perkalian dari momen kelembaman J (*moment of inertia*) rotor dengan percepatan sudutnya $\frac{d^2\theta_m}{dt^2}$ [10]. Pengaturan persamaan diferensial dinamis rotor dapat dituliskan sebagai berikut[7],[10],[11].

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.1)$$

dengan

J = Momen kelembaman total dari masa rotor (kg.m^2)

θ_m = Pergeseran sudut rotor (*angular displacement*) terhadap sumbu yang diam (rad)

T_a = Momen putar percepatan bersih (Nm)

T_m = Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula dikurangi dengan momen putar perlambatan yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran (Nm).

T_e = Momen putar listrik/elektromagnetis (Nm).

Jika generator sinkron membangkitkan torsi elektromagnetik dalam keadaan berputar pada kecepatan sinkron (ω_{sm}) maka $T_m = T_e$. Ketika terjadi gangguan maka akan menghasilkan percepatan (*accelerating*) $T_m > T_e$ atau perlambatan (*decelerating*) $T_m < T_e$. Berdasarkan pada persamaan 2.1 yaitu θ_m diukur terhadap sumbu yang diam maka untuk mendapatkan pengukuran posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron dapat dituliskan dengan persamaan berikut.

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (2.2)$$

(δ_m adalah adalah pergeseran angular rotor atau biasa disebut dengan sudut putaran/sudut daya pergeseran sudut rotor terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron dalam radian).

Untuk mendapatkan persamaan kecepatan putaran rotor (ω_m) maka persamaan 2.2 dapat diturunkan terhadap waktu menjadi

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.3)$$

Sedangkan untuk mendapatkan persamaan percepatan rotornya maka persamaan 2.3 dapat diturunkan kembali terhadap waktu menjadi

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.4)$$

Dengan substitusi persamaan 2.4 ke dalam persamaan 2.1 akan didapatkan

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.5)$$

Selanjutnya dengan mengalikan persamaan 2.5 dengan ω_m akan menghasilkan

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.6)$$

Karena daya adalah sama dengan perkalian kecepatan putar dan torsi (momen putar) maka persamaan 2.7 dapat ditulis kembali dengan bentuk persamaan daya

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.7)$$

dengan

P_m adalah masukan daya mekanik (MW)

P_e adalah keluaran daya elektrik (MW)

Rugi-rugi tembaga stator diabaikan.

Dimana $J \omega_m$ adalah momen sudut rotor yang dapat dinyatakan dengan M (disebut juga konstanta inersia[7]). Masa putar memiliki hubungan dengan energi kinetik yang dituliskan pada persamaan berikut.

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m^2 \text{ atau } M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}^2} \quad (2.8)$$

Persamaan ayunan dalam hubungannya dengan momen sudut adalah

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e MW \quad (2.9)$$

Apabila p adalah jumlah kutub dari generator sinkron, maka sudut daya listrik δ dalam hubungannya dengan sudut daya mekanik δ_m adalah sebagai berikut.

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \text{ dan } \omega = \frac{p}{2} \omega_m \quad (2.10)$$

Persamaan ayunan dalam hubungan dengan sudut daya elektrik adalah

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.11)$$

Jika nilai M pada persamaan 2.8 disubstitusikan ke dalam persamaan 2.11 akan diperoleh

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.12)$$

Selanjutnya membagi persamaan 2.12 dengan S_{base} (S_B) maka akan menghasilkan

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{S_B} \quad (2.13)$$

Akan diperoleh persamaan 2.14 ketika mensubstitusikan $H = W_k/S_B$ ke dalam persamaan 2.13.

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2H}{\omega_{sm}} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \text{ (dalam pu)} \quad (2.14)$$

Kecepatan putar elektrik dalam hubungannya dengan kecepatan putar mekanik adalah $\omega_{sm} = \frac{p}{2} \omega_s$, sehingga persamaan 2.14 menjadi

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.15)$$

Dengan mensubstitusikan $\omega = 2\pi f$ ke dalam persamaan 2.15 akan diperoleh

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \text{ pu} \quad (2.16)$$

Persamaan 2.15 atau 2.16 dinamakan dengan persamaan ayunan (*swing equation*) [7],[11],[12],[13] yang merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika (gerak) perputaran mesin sinkron dalam studi kestabilan.

2.3. Stabilitas Peralihan Mesin Majemuk

Studi stabilitas mesin majemuk (*multimachine*) klasik umumnya menerapkan gangguan 3 fasa simetris. Pemilihan gangguan 3 fasa simetris diambil menjadi salah satu variasi gangguan peralihan (*transient*) karena gangguan ini memberikan pengaruh terbesar terhadap sistem tenaga listrik. Arus gangguan yang diakibatkan oleh gangguan 3 fasa simetris ini adalah yang paling besar dibandingkan dengan arus gangguan 1 atau 2 fasa. Oleh karena itu, analisis stabilitas peralihan (*transient*) mesin majemuk memperhitungkan gangguan yang lebih berdampak besar terhadap sistem tenaga listrik.

Analisis kestabilan pada sistem mesin majemuk akan lebih kompleks dan rumit dibandingkan dengan analisis kestabilan pada sistem SMIB (*Single Machine Infinite Bus*). Sehingga beberapa asumsi digunakan dalam analisis ini untuk mengurangi kerumitan

tersebut. Berikut ini adalah beberapa asumsi yang digunakan [7],[10],[11],[15]:

- Merepresentasikan setiap mesin sinkron sebagai sumber tegangan E'_i konstan disamping reaktansi peralihan (*transient*) X'_d sumbu langsung dengan mengabaikan efek saliensi/kutub tonjol dan mengasumsikannya sebagai fluks bocor yang konstan.
- Mengansumsikan daya masukan P_m dan aksi governor selalu konstan selama simulasi.
- Mengubah semua beban yang terhubung menjadi admitansi ke *ground* dan dianggap konstan.
- Mengabaikan redaman (*damping*) atau daya asinkron.

2.4. Runge-Kutta Fehlberg^[19]

Permasalahan utama dalam studi kestabilan adalah dalam penyelesaian persamaan ayunan (*swing equation*). Metode yang dipilih dalam penyelesaian permasalahan ini adalah *Runge-Kutta Fehlberg*. Pemilihan metode ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi penyelesaian *swing equation* (δ dan ω). Metode *Runge-Kutta Fehlberg* untuk pertama kalinya diperkenalkan oleh E. Fehlberg pada tahun 1970. Rumusan umum metode *Runge-Kutta Fehlberg* ini adalah sebagai berikut :

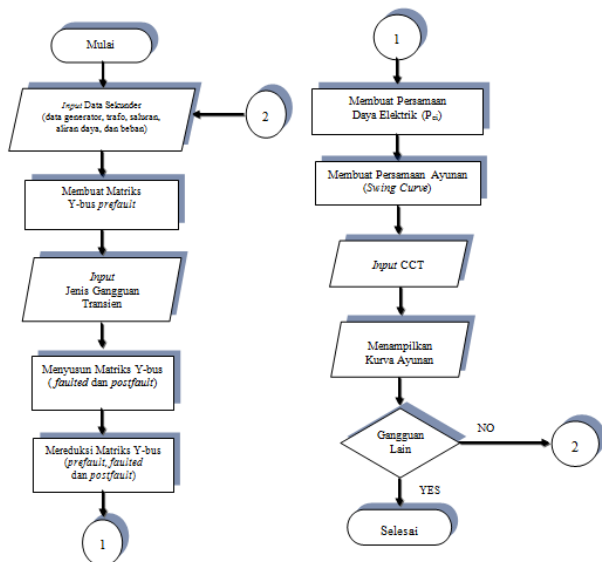
$$y_{i+1} = y_i + \left(\frac{16}{135} k_1 + \frac{6656}{12825} k_3 + \frac{28561}{56430} k_4 - \frac{9}{50} k_5 + \frac{2}{55} k_6 \right) h$$

Dimana :

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_i, y_i) \\ k_2 &= f\left(x_i + \frac{1}{4}h, y_i + \frac{1}{4}hk_1\right) \\ k_3 &= f\left(x_i + \frac{3}{8}h, y_i + \frac{3}{32}hk_1 + \frac{9}{32}hk_2\right) \\ k_4 &= f\left(x_i + \frac{12}{13}h, y_i + \frac{1932}{2197}hk_1 - \frac{7200}{2197}hk_2 + \frac{7296}{2197}hk_3\right) \\ k_5 &= f\left(x_i + h, y_i + \frac{439}{216}hk_1 - 8hk_2 + \frac{3680}{513}hk_3 - \frac{845}{4104}hk_4\right) \\ k_6 &= f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i - \frac{8}{27}hk_1 + 2hk_2 - \frac{3544}{2565}hk_3 + \frac{1859}{4104}hk_4 - \frac{11}{40}hk_5\right) \end{aligned}$$

III. METODE PENELITIAN

Berikut ini adalah diagram alir pengerjaan penelitian kestabilan transien sistem tenaga IEEE 9 bus.

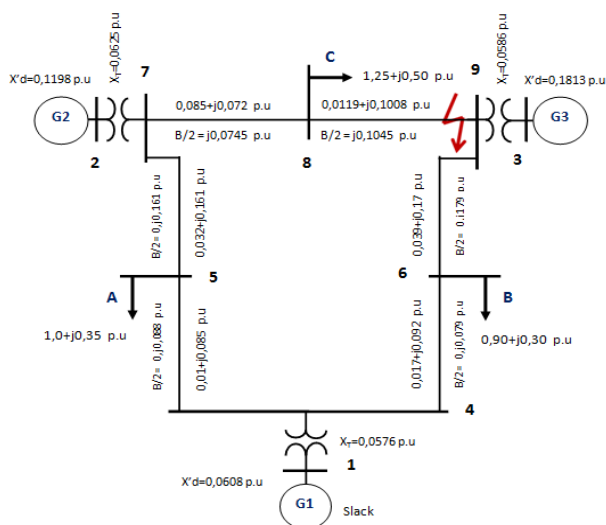


Gbr. Diagram Alir Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pemodelan Sistem Tenaga Listrik^[21]

Model sistem tenaga listrik (STL) multi-mesin yang diujikan dalam studi stabilitas transien ini adalah sistem IEEE 9 bus dengan 3 buah mesin. Pemilihan gangguan 3 fasa simetris terjadi pada saluran 8-9 dekat dengan bus 9, yang dapat dilihat pada Gambar 1.



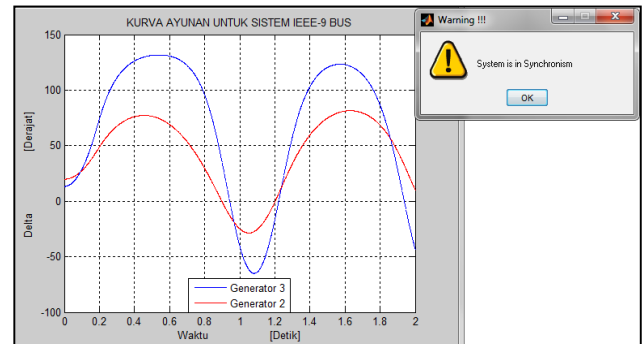
Gbr 1. Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus

4.2. Kurva Ayunan Sistem IEEE 9 Bus dengan Metode RK Fehlberg

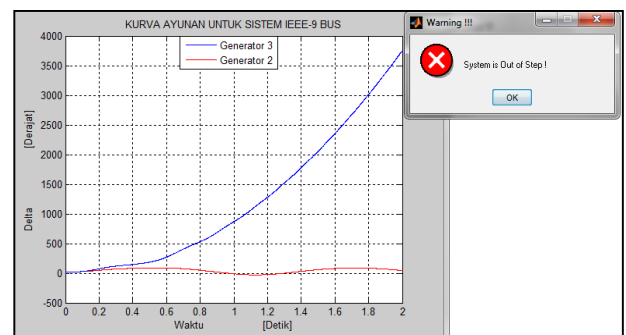
Analisis kestabilan peralihan (*transient stability*) sistem IEEE 9 bus menerapkan generator 1 (Generator *Slack*) sebagai *infinite bus*. Pemilihan generator 1 sebagai *infinite bus* ini adalah karena generator 1 memiliki kapasitas pembangkitan paling besar diantara generator lainnya. Dengan kapasitas pembangkitan terbesar ini, generator 1 dianggap mampu mempertahankan operasinya ketika terjadi

gangguan dibandingkan generator 2 dan 3. Sehingga dalam studi kestabilan *transient* sistem IEEE 9 bus ini akan mem-*plot* kurva ayunan generator 2 dan 3 untuk mewakili kestabilan *transient* sistem. Berikut ini adalah beberapa pengujian yang dilakukan:

a. Tanpa Pemberian Kompensasi Saluran



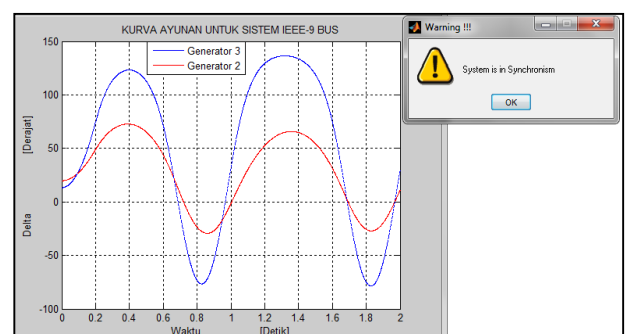
Gbr 2. Swing curve saat pemutusan 0.19s



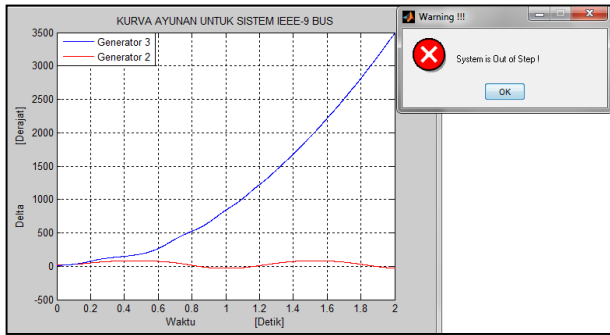
Gbr 3. Swing curve saat pemutusan 0.20s

Gambar 2 menunjukkan kurva ayunan generator 2 dan 3 dalam keadaan stabil ketika pemutusan gangguan dilakukan saat 0.19s. Ketika gangguan dihilangkan pada waktu pemutusan lebih dari 0.19s maka generator 3 mengalami *out of step* yang mengakibatkan sistem menjadi tidak stabil. Terjadinya *out of step* hilang langkah pada generator 3 disebabkan oleh salah-satunya adalah lokasi terjadinya gangguan. Gangguan terjadi di saluran 8-9 dekat bus 9 dimana lokasi gangguan ini berada paling dekat dengan generator 3. Oleh sebab itu generator 3 mengalami dampak yang paling besar akibat gangguan ini.

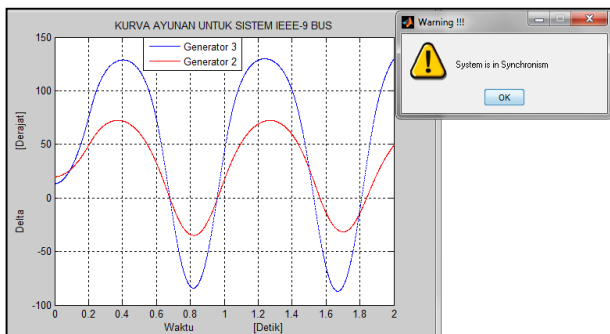
b. Pengaruh Penambahan Kompensasi Seri Saluran Terhadap Kestabilan Sistem



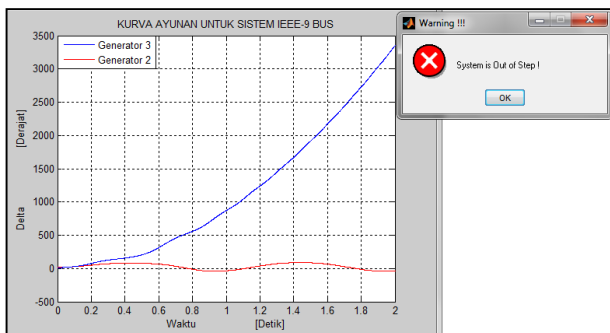
Gbr 4. *Swing curve* saat pemutusan 0.20s dengan kompensasi 30%



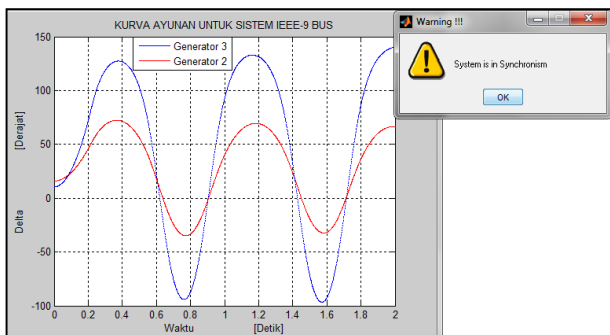
Gbr 5. *Swing curve* saat pemutusan 0.21s dengan kompensasi 30%



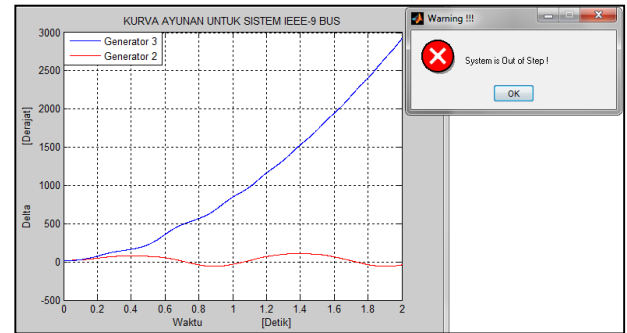
Gbr 6. *Swing curve* saat pemutusan 0.21s dengan kompensasi 50%



Gbr 7. *Swing curve* saat pemutusan 0.22s dengan kompensasi 50%



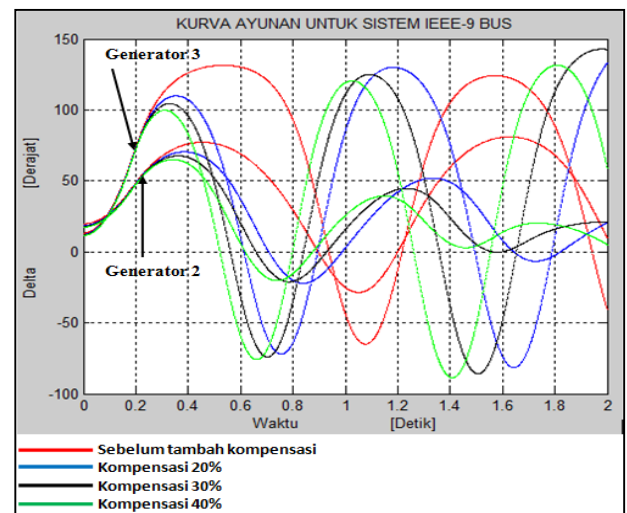
Gbr 8. *Swing curve* saat pemutusan 0.22s dengan kompensasi 70%



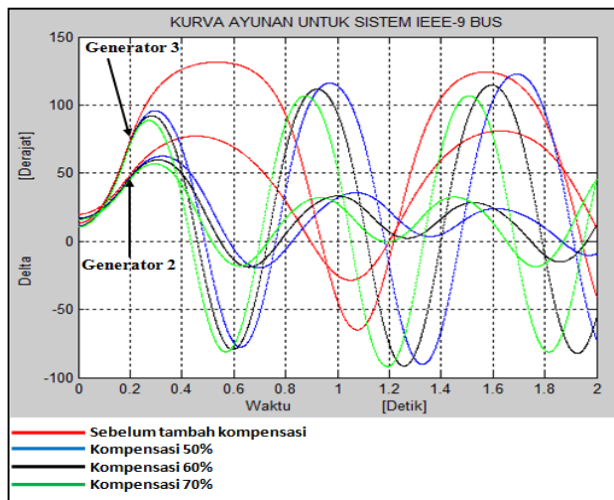
Gbr 9. *Swing curve* saat pemutusan 0.23s dengan kompensasi 70%

Persentase kompensasi seri saluran yang diujikan adalah 20%, 30%, 40%, 50%, 60% dan 70%. Dari pengujian pemberian kompensasi kapasitor seri pada saluran memberikan kenaikan terhadap waktu pemutusan kritis gangguan. Kenaikan waktu pemutusan ini sebanding dengan bertambahnya persentase kompensasi saluran. Namun kenaikan waktu pemutusan kritis gangguan terjadi secara signifikan saat pemberian kompensasi 30%, 50% dan 70%, yaitu sebesar 0.20s, 0.21s dan 0.22s. Kurva ayunannya ditunjukkan pada Gambar 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 di atas.

Selain mengakibatkan kenaikan terhadap waktu pemutusan kritis gangguan, pemberian kompensasi ini juga mampu menurunkan ayunan sudut rotor generator. Perbedaan ayunan sudut rotor generator secara lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11 di bawah ini.

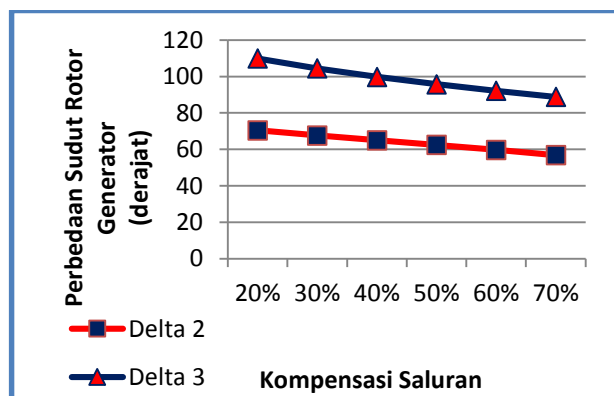


Gbr 10. *Swing curve* saat pemutusan 0.19s dengan kompensasi 20-40%



Gbr 11. *Swing curve* saat pemutusan 0.19s dengan kompensasi 50-70%

Dengan penambahan persentase kompensasi saluran dan pemutusan gangguan dilakukan pada waktu yang sama (saat 0.19s) maka terlihat jelas penurunan terhadap ayunan sudut rotor kedua generator. Selanjutnya, grafik hubungan antara penambahan persentase kompensasi saluran terhadap perbedaan sudut rotornya dapat dilihat pada Gambar 12 berikut ini.

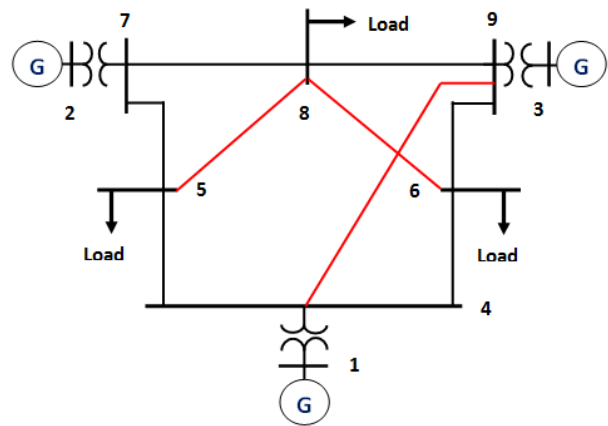


Gbr 12. Grafik hubungan kompensasi dengan sudut rotor

Gambar 12 menunjukkan penurunan terhadap ayunan sudut rotor, penurunan ini sebanding dengan kenaikan persentase kompensasi seri saluran yang diberikan. Dengan kata lain, pemberian kompensasi seri mampu meningkatkan stabilitas sistem dengan cara menurunkan reaktansi total saluran yang selanjutnya akan meningkatkan daya transfer.

4.3. Pengaruh Penambahan Jumlah Saluran Terhadap Kestabilan Sistem

Pengurangan reaktansi saluran juga dapat dilakukan dengan penambahan jumlah saluran transmisi. Pengujian penambahan jumlah saluran sistem IEEE 9 bus ditunjukkan pada Gambar 13.



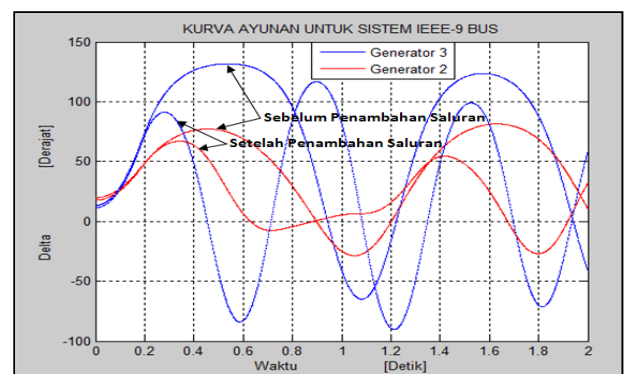
Gbr 13. Rangkaian Sistem IEEE 9 Bus dengan Konfigurasi Jaringan Baru

Saluran 5-8, 6-8, dan 3-4 adalah saluran yang ditambahkan pada sistem IEEE 9 bus. Besarnya impedansi saluran ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data penambahan jumlah saluran baru

Line	Resistansi (R) (p.u)	Reaktansi (X) (p.u)	Suseptansi (B/2) (p.u)
5-8	0.051	0.180	0.160
6-8	0.040	0.125	0.131
4-9	0.028	0.056	0.062

Penambahan jumlah saluran juga mampu meningkatkan waktu pemutusan kritis gangguan dan menurunkan ayunan sudut rotor generator. Penurunan ayunan sudut rotor generator dapat dilihat pada Gambar 14 dibawah ini.



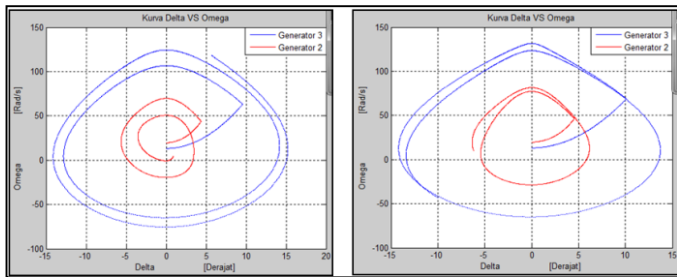
Gbr 14. *Swing curve* saat pemutusan 0.19s dengan penambahan saluran

Berdasarkan Gambar 14 dapat dilihat bahwa penambahan jumlah saluran mampu memberikan terhadap ayunan sudut rotor kedua generator secara signifikan. Dengan penambahan jumlah saluran ini maka *limit* waktu pemutusan kritis gangguan juga meningkat.

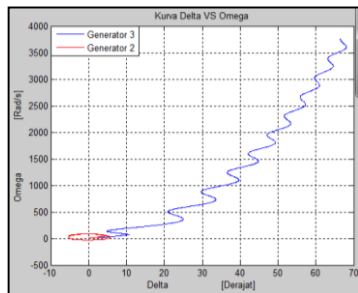
4.4. Grafik Hubungan Delta terhadap Omega

Dari penyelesaian persamaan ayunan sistem IEEE 9 bus diperoleh δ dan ω . Hubungan antara delta dan

omega dapat digambarkan melalui Gambar 15 dan 16 berikut ini.



Gbr 15. Trajectory saat pemutusan 0.18-0.19s



Gbr 16. Trajectory gangguan 3 fasa saluran 8-9 kondisi tidak stabil

Berdasarkan Gambar 15 menunjukkan bahwa saat pemutusan gangguan pada 0.18-0.19 detik masih menggambarkan *trajectory* kedua generator masih dalam keadaan stabil. Hal ini terlihat lintasan *trajectory* kedua generator berusaha mencapai titik keseimbangannya. Sedangkan untuk Gambar 16 mewakili *trajectory* salah satu generator yang kehilangan keserempakan/*unstable* saat pemutusan dilakukan lebih dari 0.20 detik.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Ketika gangguan 3 fasa simetris pada saluran 8-9 terjadi, generator 3 kehilangan keserempakan/*out of step (unstable)* ketika pemutusan gangguan saat 0.20 detik sedangkan saat 0.19 detik, kedua generator masih dalam keserempakan/stabil.
2. Waktu pemutusan kritis (CCT) sistem IEEE 9 bus dengan gangguan 3 fasa simetris pada saluran 8-9 dekat bus 9 adalah 0.19-0.20 detik. Ketika pemutusan gangguan dilakukan pada 0.20 detik, sistem menjadi tidak stabil. Dengan meningkatnya waktu pemutusan gangguan, amplitudo sudut rotor dari kurva ayunan (*swing curve*) juga akan meningkat. Jika waktu pemutusan gangguan telah melewati waktu pemutusan kritisnya maka sistem menjadi *out of step*/hilang sinkronisasi.
3. Pemberian kompensasi pada saluran dan penambahan jumlah saluran memberikan perbaikan kestabilan transien sistem IEEE 9 bus secara signifikan. Kompensasi dan penambahan jumlah

saluran ini menurunkan reaktansi saluran yang selanjutnya meningkatkan batas waktu pemutusan kritis gangguan. Dengan bertambahnya persentase kompensasi maka limit waktu pemutusan gangguan juga bertambah.

4. Besarnya nilai inersia (H) pada generator sangat berpengaruh signifikan terhadap kestabilan sistem. Generator yang memiliki H besar akan cenderung stabil ketika terjadi gangguan. Namun sebaliknya, jika H bernilai kecil maka generator tersebut akan cenderung kehilangan sinkronisasi.

REFERENSI

- [1] Zuhal. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama. 1995.
- [2] Wijaya, Mochtar. *Dasar-Dasar Mesin Listrik*. Jakarta: Djambatan. 2001.
- [3] Gomez, Antonio Exposito dkk. *Electric Energy Systems Analysis and Operation*. New York: Taylor & Francis Group. 2009.
- [4] P.Kundur. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill. 1994.
- [5] Paul M, Anderson. *Power System Control and Stability*. USA: Iowa State University Press. 1997.
- [6] Despa, Dikpride. *Stability Assessment and Stabilization of Wide Area Interconnected Power System*. Kyushu Institute of Technology: Departement of Electrical and Electronic Engineering. 2012.
- [7] Kothari, D.P & I J Nagrath. *Modern Power System Analysis Third Edition*. New York: Tata McGraw-Hill. 2003.
- [8] Das, Debapriya. *Electrical Power Systems*. New Delhi: New Age International (P) Ltd. 2006.
- [9] Murthy, P.S.R. *Power System Analysis*. India: BS Publications. 2007.
- [10] Rahman, Rifai Hasan. *Analisis Pengaruh Pemasangan Kompensator Seri Terhadap Stabilitas Sistem SMIB dan Sistem IEEE 14 Bus*. Universitas Diponegoro. 2008.
- [11] Grainger, Jhon J & Stevenson, William. *Power System Analysis*. Singapore: McGraw-Hill, Inc. 1994.
- [12] D.Stevenson, William. *Analisis Sistem Tenaga Listrik Edisi Keempat*. Jakarta: Erlangga. 1983.
- [13] Saadat, Hadi. *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill. 1999.
- [14] Weedy, B.M, Cory, B.J, Jenkins, N, Ekanayake, J.B, Strbac, G. *Electric Power Systems Fifth Edition*. UK: WILEY.
- [15] Cekdin, Cekmas. *Sistem Tenaga Listrik-Contoh Soal dan Penyelesaian Menggunakan Matlab*. Yogyakarta: ANDI. 2007.

- [16] Anderson, Paul M & Fouad, A.A. *Power System Control and Stability*. The Iowa State University Press. 1977.
- [17] Kamdar, Renuka dkk. *Transient Stability Analysis and Enhancement of IEEE-9 Bus System. Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ) Volume 3, Number 2, June 2014 India*. 2014.
- [18] Osorno, Bruno. *Determination of Admittance and Impedance Bus Matrices Using Linier Algebra and Matlab in Electric Power System. California State University Northridge. Proceedings of the 2003 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition, American Society for Engineering Education*. 2003.
- [19] Chapra, Steven C & Canale, Raymond P. *Numerical Methods for Engineers Second Edition*. Singapore: McGraw-Hill Book Co. 1988.
- [20] Chan, Kee Han. *Transient Analysis and Modelling of Multimachine Systems with Power Electronics Controllers for Real-time Application*. University of Glasgow. 2002.
- [21] Wang, Xi-Fan. *Modern Power Systems Analysis*. New York: Springer. 2008.
- [22] Surya Atmaja, Ardyono Priyadi dan Teguh Yuwono. *Perhitungan Critical Clearing Time dengan Menggunakan Metode Time Domain Simulation, Prosiding Seminar Tugas Akhir Teknik Elektro FTI-ITS, Juni 2012*.
- [23] Dibyo, Heru Laksono. *Studi Stabilitas Peralihan Multimesin Pada Sistem Tenaga Listrik dengan Metode Euler (Studi Kasus: PT.PLN P3B Sumatra) Vol. 19 No. 2 Oktober 2012*.
- [24] Al Marhoon, Hussain Hassan. *A Practical Method For Power Systems Transient Stability and Security. University of New Orleans Theses and Disertations, paper 114*. 2011.
- [25] K Pal, Mrinal. *Power System Stability*. New Jersey: Edison. 2007.
- [26] Despa, Dikpride. *Application of Phasor Measurement Unit (PMU) Data for Out-of-Step Detection-16th International Conference on Electrical Engineering, Busan Korea, July 11-14. 2010*.
- [27] Dikpride Despa, Yasunori Mitani, Masayuki Watanabe, Yaser Soleman Qudaih, Taro Fujita, Qing Liu, Michael Bernard, "PMU Based Monitoring and Estimation Power System Dynamic Stability Developed on 50-Hz Power System", *Proceeding of Power and Energy Systems (AsiaPES 2012)*, 2012.
- [28] Dikpride Despa, Yasunori Mitani, Masayuki Watanabe, Changsong Li, "PMU Based Monitoring and Estimation of Inter-area Power Oscillation for Singapore-Malaysia Interconnection Power System", *Journal of Energy and Power Engineering ISSN 1934-8975, USA, Vol.6, Number 3, Pp.463-468, March 2012*.
- [29] Dikpride Despa, Ady Kurniawan, M. Komarudin, Mardiana, Gigih F N, "Smart Monitoring of Electrical Quantities Based on Single Board Computer BCM2835", *International Conference ICITACEE, Semarang, 2015*.