

ANALISIS PENGARUH PEMASANGAN KOMPENSATOR KAPASITOR SERI TERHADAP STABILITAS SISTEM SMIB DAN SISTEM IEEE 14 BUS

Rifai Rahman Hasan (L2F 004 505)¹

Dr. Ir. Hermawan, DEA – Susatyo Handoko, ST, MT²

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

ABSTRAK

Tenaga Listrik dewasa ini sudah merupakan kebutuhan setiap manusia. Penyediaan tenaga listrik yang andal dan efisien merupakan tuntutan yang harus dipenuhi oleh penyedia tenaga listrik. Listrik yang andal harus mampu menyuplai tenaga listrik kepada konsumen secara terus menerus. Sistem penyaluran merupakan salah satu bagian dalam sistem tenaga listrik. Sistem penyaluran yang andal akan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.

Ada tiga macam kestabilan dalam sistem tenaga listrik, yaitu *steady state stability*, *transient stability* dan *dynamic stability*. *Transient stability* dapat disebabkan oleh hubung singkat, surja hubung, lepasnya generator atau lepasnya beban besar. Salah satu cara dalam meningkatkan kestabilan transien adalah dengan memasang kapasitor seri. Simulasi pada Tugas Akhir ini menggunakan metode Runge-Kutta Orde 5 sebagai salah satu metode numerik untuk memplot kurva ayunan sudut rotor. Sedangkan aliran daya pada sistem dianalisis menggunakan metode Newton Raphson.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor seri dapat menurunkan reaktansi saluran transmisi, sehingga transfer daya optimal, sudut pemutusan kritis dan waktu pemutusan kritis akan meningkat dan limit stabilitas akan meningkat pula. Peningkatan waktu pemutusan akan meningkatkan amplitude kurva ayunan sudut rotor.

Kata-kunci : *transient stability*, metode numerik, Runge-Kutta orde 5, kapasitor seri, limit stabilitas

I. PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Sistem penyaluran merupakan salah satu bagian dalam sistem tenaga listrik. Sistem penyaluran yang andal akan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan. Ada tiga macam kestabilan dalam sistem tenaga listrik, yaitu *steady state stability*, *transient stability* dan *dynamic stability*. *Transient stability* sangat berhubungan erat dengan gangguan dalam sistem tenaga listrik

Stabilitas transien sering dianalogikan sebagai kemampuan sistem untuk kembali ke keadaan stabil setelah mengalami gangguan besar, misalnya hubung singkat atau surja hubung. Dalam tugas akhir ini akan dibahas pengaruh pemasangan kapasitor seri terhadap stabilitas sistem. Sistem yang dianalisis adalah sistem *Single Machine Infinite Bus* dan sistem IEEE 14 Bus. Sebagai variasi masukan akan disimulasikan berdasarkan waktu pemutusannya dan besarnya kompensator. Sebagai metode dalam membuat plot kurva ayunan generator, dipakai metode Runge-Kutta orde 5.

1.2 TUJUAN

Tujuan yang hendak dicapai dari tugas akhir ini adalah untuk mengetahui pengaruh pemasangan kompensator kapasitor seri terhadap stabilitas sistem. Pemasangan kapasitor seri berhubungan dengan peningkatan transfer daya optimum, sudut pemutusan kritis dan waktu pemutusan kritis. Selain itu akan dianalisis juga pengaruh waktu pemutusan terhadap kurva ayunan generator.

1.3 PEMBATASAN MASALAH

Untuk menyederhanakan permasalahan dalam Tugas Akhir ini diperlukan adanya batasan-batasan, yaitu:

1. Penelitian terhadap stabilitas transien, sedangkan stabilitas *steady state* dan stabilitas dinamis tidak dibahas
2. Kompensator yang digunakan adalah kapasitor seri
3. Studi kasus pada sistem *Single Machine Infinite Bus* dan sistem *Multi machine IEEE 14 Bus*
4. Pada pemodelan multimesin, setiap mesin sinkron direpresentasikan sebagai sumber tegangan konstan di samping reaktansi *transient* sumbu langsung. Representasi ini mengabaikan efek saliensi / kutub tonjol dan mengasumsikan fluks bocor yang konstan.

5. Aksi *governor* diabaikan dan daya masukan diasumsikan selalu konstan selama keseluruhan periode simulasi.
6. Semua beban diubah menjadi admitansi ke *ground* dan diasumsikan konstan.
7. Redaman akibat kinerja *Power System Stabilizer* diabaikan.
8. Sudut mekanik rotor setiap mesin bertepatan dengan sudut tegangan disamping reaktansi mesin.
9. Kompensator seri dipasang di saluran 4-7, saluran 4-9 dan saluran 5-6 pada sistem IEEE 14 Bus.

II. DASAR TEORI

2.1 Persamaan Ayunan (*Swing Equation*)

Persamaan yang mengatur gerakan (putaran) rotor suatu mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dalam dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) merupakan hasil kali dari momen kelambaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Untuk generator sinkron, persamaan ayunan dapat ditulis sebagai berikut

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

dengan

J = momen kemlembaman total dari massa rotor (kg.m²)

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

T_a = momen putar percepatan bersih (Nm)

T_m = momen putar percepatan mekanik (Nm)

T_e = momen putar elektrik (Nm)

Jika generator sinkron membangkitkan torsi elektromagnetik dalam keadaan berputar pada kecepatan sinkron ω_{sm} maka

$$T_m = T_e \dots\dots\dots(2.2)$$

Jika terjadi gangguan akan menghasilkan suatu percepatan ($T_m > T_e$) atau perlambatan ($T_m < T_e$) dengan

$$T_a = T_m - T_e \dots\dots\dots(2.3)$$

Pada persamaan (2.1) karena θ_m diukur terhadap sumbu yang diam, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron adalah seperti persamaan berikut:

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \dots\dots\dots(2.4)$$

dengan δ_m adalah pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron. Penurunan persamaan (2.4) terhadap waktu memberikan kecepatan putaran rotor seperti persamaan berikut

1- Mahasiswa Teknik Elektro Undip

2- Dosen Teknik Elektro Undip

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \dots\dots\dots(2.5)$$

dan percepatan rotornya adalah

$$\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \dots\dots\dots(2.6)$$

Substitusi persamaan (2.6) ke persamaan (2.1) didapatkan

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \dots\dots\dots(2.7)$$

Kemudian dengan mengalikan persamaan (2.7) dengan

ω_m akan menghasilkan

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \dots\dots\dots(2.8)$$

Jika kecepatan putar dikali torsi adalah sama dengan daya, maka persamaan (2.8) dapat ditulis dengan persamaan daya sebagai berikut

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \dots\dots\dots(2.9)$$

dengan $J\omega_m$ adalah momen sudut (*angular momentum*) rotor yang dinyatakan dengan M. Hubungan energi kinetik dengan massa berputar adalah sebagai berikut

$$W_k = \frac{1}{2} J\omega_m^2 = \frac{1}{2} M\omega_m$$

atau

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \dots\dots\dots(2.10)$$

Bila ω_m tidak berubah sebelum stabilitas hilang, maka M dievaluasi pada kecepatan serempak sebagai berikut

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \dots\dots\dots(2.11)$$

Persamaan ayunan dalam hubungannya dengan momen sudut adalah

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \dots\dots\dots(2.12)$$

Persamaan (2.11) lebih sesuai untuk menuliskan persamaan ayunan dengan parameter sudut daya listrik δ . Jika p adalah jumlah kutub generator sinkron, maka sudut daya listrik δ dalam hubungannya dengan sudut daya mekanik δ_m adalah

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m$$

dan

$$\omega = \frac{p}{2} \omega_m$$

Persamaan ayunan dalam hubungan dengan sudut daya listrik adalah

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \dots\dots\dots(2.13)$$

Bila nilai M pada persamaan (2.11) disubstitusikan kedalam persamaan (2.13) dan dibagi dengan daya dasar S_B , akan menghasilkan persamaan sebagai berikut

$$\frac{2}{p} \times \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \times \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{S_B} \dots\dots\dots(2.14)$$

Sekarang mendefinisikan suatu besaran yang dikenal sebagai konstanta H. Konstanta H didefinisikan sebagai energi

kinetik (MJ) pada kecepatan sinkron dibagi rating mesin (MVA) yang dituliskan seperti persamaan berikut

$$H = \frac{W_k}{S_B} \dots\dots\dots(2.15)$$

Substitusi persamaan (2.15) ke persamaan (2.14) maka didapatkan

$$\frac{2}{p} \times \frac{2H}{\omega_{sm}} \times \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \dots\dots\dots(2.16)$$

dengan

$P_{m(pu)}$ = daya mekanik dalam satuan pu

$P_{e(pu)}$ = daya listrik dalam satuan pu

Kecepatan putar listrik dalam hubungannya dengan kecepatan

putar mekanik dengan $\omega_{sm} = \frac{2}{p} \omega_s$ sehingga persamaan

(2.16) menjadi

$$\frac{2H}{\omega_s} \times \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \dots\dots\dots(2.17)$$

Persamaan (2.17) sering diekspresikan dalam bentuk frekuensi f_0 dan subskrip per unit dihilangkan sehingga daya dinyatakan dalam satuan per unit dari persamaan (2.17) adalah

$$\frac{H}{\pi f_0} \times \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

dengan δ dalam radian. Jika δ dinyatakan dalam derajat, maka persamaan ayunan menjadi

$$\frac{H}{180 f_0} \times \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \dots\dots\dots(2.18)$$

2.2 Penyelesaian Numerik Persamaan Ayunan dengan Metode Runge-Kutta Orde 5

Untuk menyelesaikan persamaan ayunan dimana daya input P_m diasumsikan konstan, pada operasi *steady state* di mana $P_e = P_m$ dan sudut daya mula – mula diberikan oleh persamaan berikut

$$\delta_0 = \sin^{-1} \left[\frac{P_m}{P_{mak}} \right]$$

dengan

$$P_{1mak} = \frac{|E''||V|}{X_1}$$

dengan X_1 adalah reaktansi transfer sebelum gangguan. Rotor berputar pada kecepatan sinkron dan kemudian kecepatan putar berubah menjadi nol, sehingga $\omega_0 = 0$

Kemudian gangguan hubung singkat tiga fasa terjadi pada salah satu saluran transmisi sehingga persamaan sudut daya menjadi

$$P_{2mak} = \frac{|E''||V|}{X_2}$$

dengan X_2 adalah reaktansi transfer selama gangguan. Dengan demikian persamaan ayunan pada studi kestabilan sistem tenaga listrik pada generator sinkron menjadi seperti persamaan berikut ini

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} \times (P_m - P_{2mak} \sin \delta) = \frac{\pi f_0}{H} \times P_a$$

Kemudian persamaan ayunan diatas ditransformasikan ke dalam bentuk pernyataan variabel sebagai berikut

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \dots\dots\dots(2.19)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi f_0}{H} P_a \dots\dots\dots(2.20)$$

Dengan penyelesaian Runge – Kutta orde 5, dimana untuk menentukan nilai x(t), terlebih dulu harus menentukan enam konstanta sebagai berikut

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = f(x_i + \frac{1}{4}h, y_i + \frac{1}{4}hk_1)$$

$$k_3 = f(x_i + \frac{1}{4}h, y_i + \frac{1}{8}hk_1 + \frac{1}{8}hk_2)$$

$$k_4 = f(x_i + \frac{1}{2}h, y_i - \frac{1}{2}hk_2 + hk_3)$$

$$k_5 = f(x_i + \frac{3}{4}h, y_i + \frac{3}{16}hk_1 + \frac{9}{16}hk_4)$$

$$k_6 = f(x_i + h, y_i - \frac{3}{7}hk_1 + \frac{2}{7}hk_2 + \frac{12}{7}hk_3 - \frac{12}{7}hk_4 + \frac{8}{7}hk_5)$$

Sehingga algoritma perhitungan untuk nilai y berturut – turut dapat dicari dengan persamaan berikut

$$y_{i+1} = y_i + h \left[\frac{1}{90} (7k_1 + 32k_3 + 12k_4 + 32k_5 + 7k_6) \right]$$

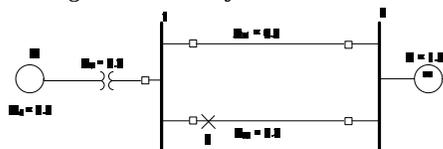
2.3 Stabilitas Sudut Rotor (Rotor Angle Stability)

Rotor angle stability atau stabilitas sudut rotor merupakan kemampuan dari mesin sinkron (generator sinkron) pada sistem tenaga listrik untuk mencapai sinkronisasi. Stabilitas sudut rotor berhubungan dengan osilasi pada rotor.

Ketika dua atau lebih mesin sinkron terinterkoneksi, tegangan pada stator dan arus pada semua mesin harus memiliki frekuensi yang sama dan kecepatan mekanik rotornya harus sama akibat frekuensi yang sama. Intinya, rotor pada semua mesin yang terinterkoneksi harus dalam keadaan sinkron.

III. PERANCANGAN PERANGKAT LUNAK

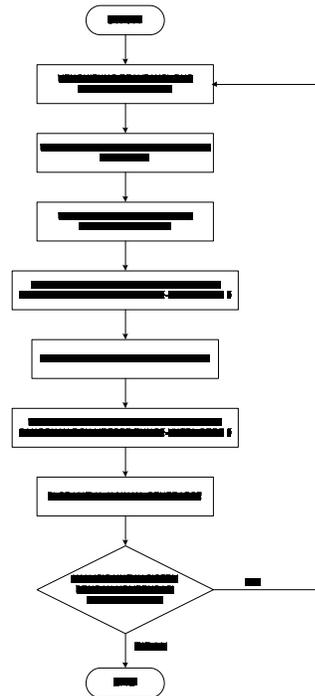
3.1 Sistem Single Machine Infinite Bus^[21]



Gambar 3.1 Sistem Single Machine Infinite Bus

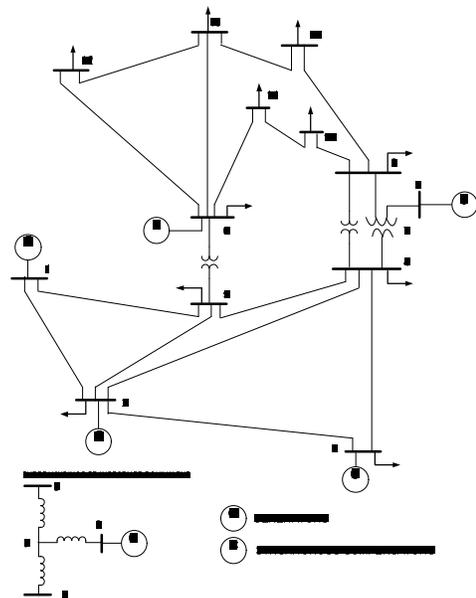
Adapun perancangan perangkat lunak pada sistem SMIB adalah sebagai berikut

1. Menghitung reaktansi bus sebelum gangguan
2. Menghitung reaktansi bus selama gangguan
3. Menghitung reaktansi bus setelah gangguan
4. Menghitung kestabilan sistem selama gangguan dgn metode Runge-Kutta orde 5
5. Memasukkan waktu pemutusan kritis
6. Menghitung kestabilan sistem setelah gangguan dgn metode Runge-Kutta orde 5
7. Plot kurva ayunan generator



Gambar 3.2 Flowchart Program Simulasi sistem SMIB

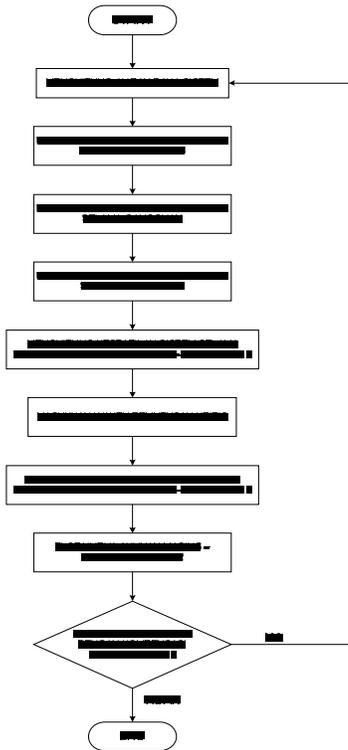
3.2 Sistem IEEE 14 Bus^[16]



Gambar 3.3 IEEE 14 Bus

Adapun perancangan perangkat lunak pada sistem IEEE 14 Bus adalah sebagai berikut

1. Menghitung Aliran Daya sistem
2. Menghitung matriks admitansi bus sebelum gangguan
3. Menghitung Matriks admitansi bus selama gangguan
4. Menghitung Matriks admitansi bus setelah gangguan
5. Menghitung kestabilan sistem selama gangguan dgn metode Runge-Kutta orde 5
6. Memasukkan waktu pemutusan kritis
7. Menghitung kestabilan sistem setelah gangguan dgn metode Runge-Kutta orde 5
8. Plot kurva ayunan generator



Gambar 3.4 Flowchart Program Simulasi Sistem IEEE 14 Bus

IV. PENGUJIAN PERANGKAT LUNAK DAN ANALISA

4.1 Sistem *Single Machine Infinite Bus*

Untuk menghitung kestabilan sistem *Single Machine Infinite Bus* ada beberapa tahapan yang harus dilakukan. Perhitungan berdasarkan persamaan – persamaan kestabilan adalah sebagai berikut

Pertama adalah mencari arus yang mengalir ke *infinite bus*.

$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{P_e - jQ}{V^*} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$I = \frac{0,8 - j0,074}{1,0 \angle 0^\circ} = 0,8 - j0,074 \text{ pu}$$

Reaktansi transfer antara tegangan internal mesin (generator) dan *infinite bus* sebelum gangguan adalah

$$X_{\text{sebelum_gangguan}} = X'_d + X_T + \frac{X_{L1}}{2} = 0,3 + 0,2 + \frac{0,3}{2} = 0,65 \text{ pu}$$

Tegangan internal *transient*

$$E' = V + jX_1 I = 1,0 + (j0,65) \times (0,8 - j0,074) = 1,17 \angle 26,387^\circ \text{ pu}$$

Persamaan sudut daya sebelum dan sesudah gangguan adalah

$$P_{\text{mak}} \sin \delta = \frac{|E'| |V|}{X_{\text{sebelum_gangguan}}} \sin \delta$$

$$P_{\text{mak}} \sin \delta = \frac{(1,17) \times (1,0)}{0,65} \sin \delta = 1,8 \sin \delta$$

Sudut kerja awal

$$\delta_0 = 26,387^\circ = 0,46055 \text{ rad}$$

$$1,8 \sin \delta_0 = 0,8$$

$$\delta_{\text{mak}} = 180^\circ - \delta_0 = 153,612^\circ = 2,681 \text{ rad}$$

Selama terjadi gangguan pada saluran transmisi, transfer daya selama gangguan adalah nol, dan sudut pemutusan kritis dinyatakan oleh

$$\cos \delta_k = \frac{0,8}{1,8} \times (2,681 - 0,46055) + \cos(153,61^\circ) = 0,09106$$

atau

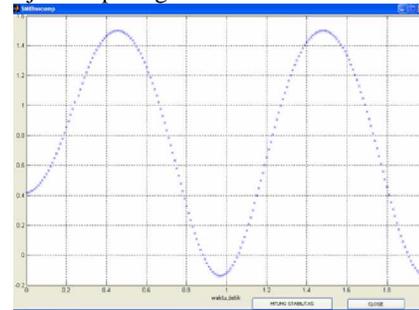
$$\delta_k = \cos^{-1}(0,09106) = 84,775^\circ = 1,48 \text{ rad}$$

Waktu pemutusan kritis dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut

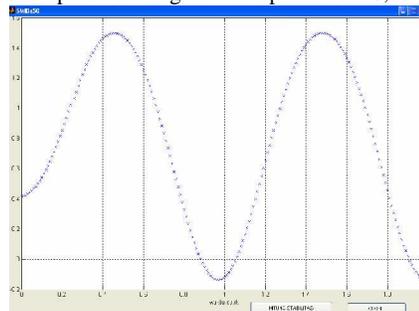
$$t_k = \sqrt{\frac{2H(\delta_k - \delta_0)}{\pi f_0 P_m}} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$t_k = \sqrt{\frac{2 \times 5 \times (1,48 - 0,46055)}{\pi \times 60 \times 0,8}} = 0,25996 \text{ detik}$$

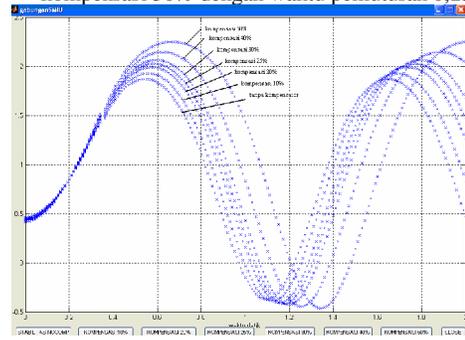
Dengan menggunakan algoritma perhitungan seperti diatas dan kemudian diaplikasikan kedalam metode Runge-Kutta orde 5, maka akan didapatkan kurva ayunan rotornya, seperti ditunjukkan pada gambar 4.2 berikut



Gambar 4.1 Kurva ayunan generator pada sistem SMIB tanpa kompensator dengan waktu pemutusan 0,25 sekon



Gambar 4.2 Kurva ayunan generator sistem SMIB dengan kompensasi 50% dengan waktu pemutusan 0,25 sekon



Gambar 4.3 Kurva ayunan generator sistem SMIB pada waktu pemutusan 0,35 detik

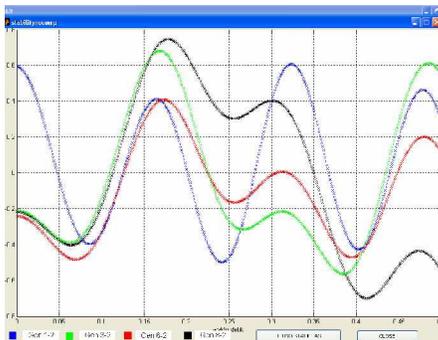
Berdasarkan kurva ayunan diatas dapat dilihat bahwa pada waktu pemutusan 0.35 sekon, dimana waktu pemutusan ini melebihi waktu pemutusan kritisnya, maka sudut rotor maksimum yang dicapai yaitu 2,251 radian, yaitu pada sistem yang diberi kompensasi 50%. Sedangkan sistem yang tidak diberi kompensator, sudut rotor maksimum dicapai pada 1,8 radian, dimana pada titik ini sistem dalam keadaan tidak stabil, karena melewati sudut kritisnya. Walaupun kurva masih berayun, namun sistem dalam keadaan seperti ini adalah dalam keadaan tidak stabil, karena sudut rotor maksimum melewati sudut kritisnya.

Tabel 4.1 Perbandingan Kestabilan sistem SMIB tanpa kompensator dengan sistem SMIB dengan Kompensator

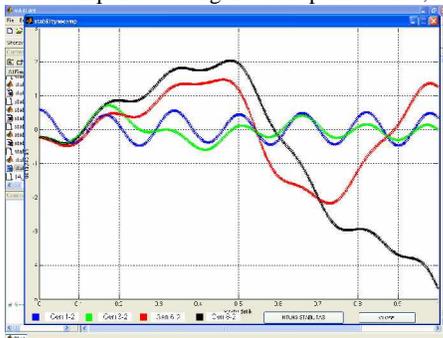
Sistem (SMIB)	P_{mak} (pu)	δ_k (radian)	t_k (detik)
Tanpa kompensator	1,8	1,48	0,25996
Kompensasi 10%	1,8326	1,493	0,26283
Kompensasi 20%	1,867	1,5076	0,26573
Kompensasi 25%	1,8849	1,5149	0,26719
Kompensasi 30%	1,9032	1,5223	0,26867
Kompensasi 40%	1,9414	1,5374	0,27164
Kompensasi 50%	1,9818	1,553	0,27464

Berdasarkan tabel diatas dapat disimpulkan bahwa dengan memasang kompensator kapasitor seri, maka Daya transfer maksimum, sudut pemutusan kritis dan waktu pemutusan kritis akan meningkat. Dan dengan memperbesar persentase kompensator, maka Daya transfer maksimum, sudut pemutusan kritis dan waktu pemutusan kritis akan meningkat pula sebanding dengan peningkatan persentase kompensator.

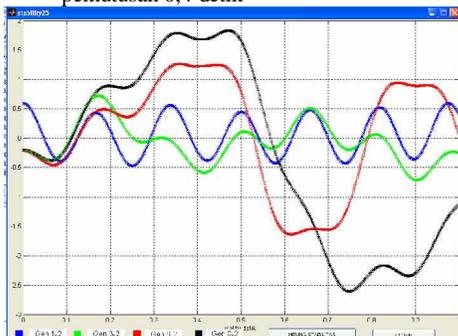
4.2 Sistem IEEE 14 Bus



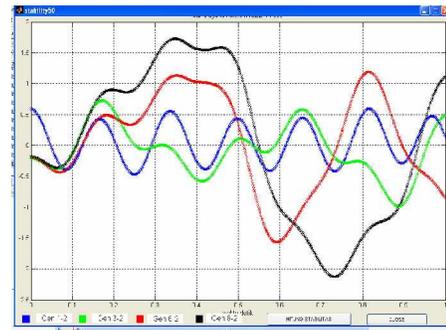
Gambar 4.4 Kurva ayunan generator sistem IEEE 14 Bus tanpa kompensator dengan waktu pemutusan 0,15 detik



Gambar 4.5 Kurva ayunan generator sistem IEEE 14 Bus tanpa kompensator selama 1 detik dengan waktu pemutusan 0,4 detik



Gambar 4.6 Kurva ayunan generator sistem IEEE 14 Bus dengan kompensasi 25% selama 1 detik dengan waktu pemutusan 0,4 detik



Gambar 4.7 Kurva ayunan generator sistem IEEE 14 Bus dengan kompensasi 50% selama 1 detik dengan waktu pemutusan 0,4 detik

Berdasarkan kurva ayunan rotor diatas dapat dilihat bahwa dengan pemasangan kompensator kapasitor seri 50%, maka sistem menjadi lebih stabil. Hal ini dikarenakan pada saat terjadinya gangguan, maka transfer daya maksimum akan menurun. Penurunan transfer daya ini akan dikompensasi dengan menggunakan kapasitor seri, dimana akibat pemasangan kapasitor seri, akan menyebabkan transfer daya menjadi naik.

Apabila dibandingkan antara kurva ayunan rotor dengan kompensasi 25% dengan sistem dengan kompensasi 50%, maka sistem dengan kompensasi 50% lebih stabil. Namun dengan mempertimbangkan aliran daya pada sistem yang tidak mempertimbangkan kinerja *governor* dan sistem eksitasi generator, maka sistem dengan kompensasi 25% yang dipilih karena memiliki *losses* daya reaktif paling kecil.

Tabel 4.2 Perbandingan aliran daya (*power flow*) pada sistem IEEE 14 Bus dengan kompensator dan sistem tanpa kompensator

Sistem	Losses Saluran	
	MW	Mvar
Tanpa kompensator	14,01	1,979
Dengan kompensator 10%	14,014	1,290
Dengan kompensator 20%	14,023	0,612
Dengan kompensator 25%	14,029	0,279
Dengan kompensator 30%	14,037	-0,051
Dengan kompensator 40%	14,058	-0,694
Dengan kompensator 50%	14,091	-1,309

Berdasarkan tabel 4.2 diatas dapat dilihat bahwa *losses* daya aktif semakin naik sebanding dengan penambahan persentase kompensator. Namun *losses* daya reaktif menurun mulai kompensasi 10% hingga kompensasi 25%. Pada rangkaian dengan kompensasi 30% hingga 50%, *losses* daya reaktif bertanda negatif, artinya sistem kekurangan daya reaktif (Pembangkitan daya reaktif lebih kecil daripada kebutuhan beban daya reaktif). Dapat disimpulkan bahwa kompensator paling baik berdasarkan aliran daya adalah pada sistem dengan kompensasi 25%, karena *losses* daya aktifnya hanya bertambah kecil dan *losses* daya reaktifnya menurun daripada sistem tanpa kompensator.

V. PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari Tugas Akhir ini diantaranya adalah

1. Pada sistem *Single Machine Infinite Bus*, kompensator kapasitor seri tidak berpengaruh terhadap redaman ayunan sudut rotor. Pemasangan kompensator kapasitor seri hanya meningkatkan transfer daya maksimum, meningkatkan sudut pemutusan kritis dan meningkatkan waktu pemutusan kritis.

2. Semakin tinggi waktu pemutusannya, ayunan sudut rotor semakin tinggi, yang jika telah melewati batas waktu pemutusan kritisnya, maka sistem menjadi tidak stabil / kehilangan keserempakannya.
3. Kriteria kestabilan sistem mesin majemuk ditinjau dari grafik sudut rotor relatif terhadap mesin referensi. Mesin referensi adalah mesin dengan momen inersia terbesar didalam sistem.
4. Generator yang jaraknya dekat dengan titik gangguan memiliki ayunan sudut rotor paling tinggi.
5. Sistem dengan kompensasi 25% di saluran 4-7, 4-9 dan 5-6 pada sistem IEEE 14 Bus menghasilkan *losses* daya reaktif saluran paling rendah.

5.2 SARAN

1. Dalam integrasi langkah demi langkah dengan metoda Runge-Kutta dapat dikembangkan dengan menggunakan metoda Runge-Kutta berorde lebih tinggi. Misalnya dengan menggunakan metode *Runge-Kutta Fehlberg* orde 5. Dapat pula menggunakan metode *multiple step* agar simulasi lebih akurat, misalnya metode Adam-Basforth.
2. Tugas akhir mengenai kestabilan dapat pula dikembangkan dengan memasukkan pengaruh kinerja *governor* atau PSS (*Power System Stabilizer*).
3. Kompensator dapat diganti menggunakan teknologi yang lebih canggih, misalnya menggunakan FACTS.
4. Aplikasi gangguan sistem dapat diganti dengan memasukkan pengaruh pembebanan secara tiba-tiba, pengaruh lepasnya generator, atau pengaruh operasi *switching* (pengoperasian penghubung).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arismunandar, A. dan Kuwahara, S. "Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid II : Saluran Transmisi", cetakan kelima, Pradnya Paramita, Jakarta, 1982.
- [2] Away, Gunaidi Abdia. "The Shortcut of Matlab Programming", Informatika Bandung, Bandung. 2006.
- [3] Cekdin, Cekmas. "Sistem Tenaga Listrik Contoh Soal dan Penyelesaiannya Menggunakan Matlab", Andi Yogyakarta, Yogyakarta. 2007.
- [4] Chapra, Steven C and Raymond P. Canale, "Numerical Methods for Engineers". Second edition. Mc Graw-Hill Book Company. Singapore. 1990.
- [5] Deshpande, M.V. "Electrical Power System Design", Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, New Delhi. 1984.
- [6] Edris, Abdel-Aty. "Current Approaches and applications of control Technologies". Electric Power Research Institute. 2006.
- [7] Gönen, Turan. "Electric Power Transmission System Engineering : Analysis & Design". John Wiley and Sons, Inc. Toronto. 1988.
- [8] Gönen, Turan. "Modern Power System Analysis". John Wiley and Sons, Inc. Toronto. 1988.
- [9] H.P St. Clair, "Practical Concepts in Capability and Performance of Transmission Lines," AIEE Trans, Vol 72, pp. 1152 – 1157, December 1953.
- [10] Hutauruk, T. S. "Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja", cetakan kedua, Erlangga, Jakarta, 1988
- [11] Hutauruk, T. S. "Transmisi Daya Listrik," cetakan keempat, Erlangga, Jakarta, 1996.
- [12] Kimbark, Edward Wilson." *Power System Stability : Synchronous Machines*". Dover Publications, Inc, New York. 1956.

- [13] Kodsı, Sameh Kamel Mena and Claudio A. Cañizares, "Modeling and Simulation of IEEE 14 Bus System with FACTS Controllers", Technical Report, IEEE # 2003-3
- [14] Kundur, Prabha. "Power System Stability and Control". Mc Graw Hill Inc, New York. 1994.
- [15] Matlab 7 User's Guide Release 14, The Math Works, inc. 2004.
- [16] N. Mithulanathan, C. A. Cañizares, and J. Reeve. "Indices to Detect Hopf Bifurcation in Power Systems". In Proc. of NAPS-2000, pp. 15–18–15–23, October 2000.
- [17] Padiyar, K. R. "Power System Dynamics Stability and Control", John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore, 1996.
- [18] Pai, M.A. *Computer Techniques in Power Systems Analysis*, Mc-Graw Hill Publishing Company, New Delhi, 1984.
- [19] Pai, M.A., D.P Sen Gupta, and K.R Padiyar, "Small Signal Analysis of Power System" Narosa Publishing House, New Delhi, 2004.
- [20] R. Bergen, Arthur and Vijay Vittal. "Power System Analysis". second edition. Prentice Hall, New Jersey. 2000.
- [21] Saadat, Hadi. "Power System Analysis". Mc Graw Hill Inc, Singapore, 1999.
- [22] Santoso, Agung Budi. "Program Simulasi Studi Kestabilan Peralihan Sistem Tenaga Listrik dengan Metode Euler yang Diperbaiki", Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang. 2001.
- [23] Sugiharto, Aris. "Pemrograman GUI dengan Matlab". Andi Yogyakarta, Yogyakarta, 2006.
- [24] Sulasno, Ir. "Analisis Sistem Tenaga Listrik". Edisi kedua, Badan Penerbit Universitas Diponegoro, Semarang. 2001.
- [25] Susanto, Kries Pudiyo. "Simulasi Kestabilan Transient Multi Mesin Pada Sistem Tenaga dengan Menggunakan Metoda Lyapunov" Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang. 2003.
- [26] William D Stevenson, Jr. "Analisis Sistem Tenaga Listrik", Edisi keempat, Erlangga, Jakarta, 1996.
- [27] ----"Protection Course for Breaker Failure", PT. Chevron Pacific Indonesia, Riau, 29 November 2006.
- [28] ----"Pengaman Diferensial Arus Untuk Sistem Transmisi", PT. Chevron Pacific Indonesia, Riau, December 2006.
- [29] ----"Protection Course", PT. Chevron Pacific Indonesia, Riau, 29 November 2006.
- [30] ----"Electric Power Transmission Stability", <http://www.ee.lut.fi/fi/lab/sahkomarkkina/>, May 2008
- [31] C70 – Capacitor Bank Protection & Control System. General Electric Multilin. PT. Guna Elektro Power Catalog 2007.



Rifai Rahman Hasan

Lahir di Tasikmalaya, menyelesaikan pendidikan dasar hingga pendidikan menengah di Tasikmalaya. Saat ini sedang menempuh pendidikan di jurusan Teknik Elektro Undip Bidang Konsentrasi Teknik Energi Listrik

Semarang, Agustus 2008
Menyetujui

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Ir. Hermawan, DEA
NIP 131 598 857

Susatyo Handoko, ST.MT
NIP 132 282 683