

Model Power Sistem Stabilizer Berbasis Standar IEEE untuk Stabilitas Transien Sistem Tenaga Listrik

(Power System Stabilizer Model Based on IEEE Standard for Power System Transient Stability)

AGUS JAMAL

ABSTRACT

Power System Stabilizers (PSS) are added to excitation systems, in order to enhance the damping of electric power system during low frequency oscillations. For large scale power systems comprising of many interconnected machines, the PSS parameter tuning is a complex exercise due to the presence of several poorly damped modes of oscillation. The problem is further being complicated by continuous variation in power system operating conditions. In the simultaneous tuning approach, exhaustive computational tools are required to obtain optimum parameter settings for the PSS, while in the case of sequential tuning, although the computational load is fewer, evaluating the tuning sequence is an additional requirement. There is a further problem of eigenvalue drift. This research proposes the PSS model based on IEEE Standard 421.5 PSS 4B for designing robust power system stabilizers for a multi machine system. Simulations were carried out using several fault tests at transmission line on a Two-Area Multimachine Power System. As a reference the PSS model, Delta w PSS and Delta Pa PSS has been used for comparison with the PSS under consideration. The result shows that power transfer response using the model is more robust than Delta w PSS and Delta Pa PSS, especially for three phase faults and phase to ground faults.

Keywords : Power System Stabilizer, transient stability, multimachine power system .

PENDAHULUAN

Dalam operasionalnya, sistem tenaga listrik sering mengalami gangguan hubung singkat, baik yang bersifat permanen maupun sementara. Gangguan hubung singkat tersebut dapat menyebabkan simpangan pada variabel-variabel sistem tenaga listrik, misalnya tegangan, frekuensi, dan lain-lain. Deviasi ini dapat mempengaruhi stabilitas sistem tenaga listrik. Stabilitas dalam sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan sistem tenaga listrik untuk menjaga sinkronisasi pada saat gangguan maupun setelah gangguan terjadi (Robandi dan Kharisma, 2008).

Power System Stabilizer (PSS) merupakan suatu piranti yang berfungsi untuk menjaga stabilitas sistem tenaga listrik (Grainger dan Stevensson, 1994; Saadat, 1999). Aksi PSS adalah memperluas batas stabilitas sistem tenaga listrik dengan memberikan peredaman osilasi rotor mesin sinkron melalui eksitasi generator. Peredaman ini diberikan oleh torsi

elektrik yang diterapkan pada rotor sejalan dengan variasi kecepatan.

Dalam kurun waktu empat dekade terakhir, berbagai metode telah diterapkan untuk merancang PSS guna meningkatkan unjukkerja sistem secara keseluruhan. Sebagian besar PSS yang digunakan dalam sistem tenaga listrik dikembangkan berdasarkan teori kendali linear klasik (Lerm dan Silva, 2003). Teori kendali linear mengacu pada model linear konfigurasi sistem tenaga yang tetap. Dengan kata lain, PSS dengan parameter tetap yang sering disebut PSS konvensional dapat menjalankan fungsinya secara optimum untuk suatu kondisi operasi tertentu dan tidak efektif untuk kondisi operasi yang berubah secara drastis (Mithulanathan dan Cafiizares, 2004; Mahabuba dan Khan, 2008). PSS konvensional banyak digunakan perusahaan listrik karena strukturnya yang sederhana, fleksibel, dan mudah diimplementasikan. Akan tetapi unjukkerja PSS dapat menurun dengan berubahnya kondisi operasi sistem tenaga listrik. Karena sistem tenaga listrik bersifat sangat nonlinear, PSS konvensional dengan

parameter tetap tidak dapat menanggulangi dengan baik perubahan kondisi operasi sistem tenaga listrik. Guna mengatasi hal tersebut ada dua pendekatan utama untuk menstabilkan sistem tenaga listrik pada rentang kondisi operasi yang luas, yaitu pendekatan kendali adaptif dan kendali kokoh (*robust*) (Chetty, 2002; Bevrani dan Hiyama, 2006; Harmas et al., 2007; Jyothsna dan Vaisakh, 2009). Kendali adaptif berdasarkan ide dimana secara kontinyu memperbaharui parameter pengendali sesuai pengukuran terkini. Akan tetapi, pengendali adaptif biasanya mengalami unjukkerja yang buruk pada saat proses pembelajaran, kecuali jika diperoleh inisialisasi yang benar-benar sesuai. Keberhasilan operasi pengendali adaptif membutuhkan pengukuran yang andal dan berlangsung kontinyu untuk mendapatkan hasil yang diinginkan, jika tidak maka pengaturan parameter pengendali akan mengalami kegagalan. Pengendali kokoh akan memberikan pendekatan yang efektif meskipun kondisi operasi sistem listrik sangat bervariasi. Unjukkerja yang sempurna pada pengendali kokoh akan diperoleh bilamana dapat mengatasi ketaktentuan parameter pengendali. Akan tetapi guna mencapai kondisi tersebut diperlukan biaya yang relatif mahal.

Dalam penelitian ini akan diuraikan model PSS Standar IEEE 421.5 untuk merancang PSS guna mengatasi masalah stabilitas transien pada sistem multimesin. Dalam pendekatan ini, dilakukan linearisasi model mesin pada sistem tenaga. Dengan pendekatan ini diharapkan akan diperoleh metode yang relatif sederhana dan sesuai untuk kondisi sistem tenaga multimesin yang sangat variatif.

STABILITAS SISTEM TENAGA LISTRIK

Sistem tenaga listrik yang besar umumnya merupakan sistem multimesin yang terhubung ke *infinite bus*. Semakin berkembang suatu sistem tenaga listrik maka semakin rentan terhadap gangguan terutama gangguan hubung-singkat. Salah satu dampak gangguan adalah osilasi daya yang akan menyebabkan sistem keluar dari area kestabilannya dan dapat mengakibatkan dampak yang lebih buruk lagi seperti pemadaman total (Grainger dan Stevenson, 1994; Saadat, 1999). Berdasarkan data dari Westinghouse pada tahun 1964, probabilitas terjadinya gangguan hubung singkat untuk berbagai tipe gangguan yaitu

untuk gangguan tiga fase sebesar 5%, gangguan dua fase ke tanah sebesar 10%, gangguan fase ke fase sebesar 15%, dan gangguan satu fase ke tanah sebesar 70% (Ram dan Vishwakarma, 1995).

Pada dasarnya, stabilitas sistem tenaga listrik terbagi dalam stabilitas *steady state* dan stabilitas transien (Saadat, 1999). Stabilitas transien berhubungan dengan gangguan besar yang terjadi secara tiba-tiba, seperti gangguan hubung singkat, pemutusan saluran, pemindahan atau pemutusan beban. Sedangkan stabilitas *steady state* berhubungan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali pada kondisi *operating point*-nya setelah terjadi gangguan kecil seperti perubahan daya atau beban secara perlahan. Stabilitas *steady state* disebut juga stabilitas dinamik. Perubahan kecil pada beban akan mengakibatkan perubahan kecepatan sudut pada rotor dan tegangan terminal generator. Kecepatan sudut akan berayun di sekitar kecepatan sinkron dan tegangan terminal generator konvergen di sekitar tegangan nominalnya.

Pada sistem multi-mesin, suatu sistem dikatakan stabil secara dinamik apabila setelah gangguan (perubahan beban) selisih sudut rotor menuju pada nilai tertentu yang berhingga. Bila ada selisih sudut rotor generator semakin lama semakin membesar maka sistem tidak stabil. Dikarenakan perubahan beban pada studi kestabilan dinamik relatif kecil, maka model sistem tenaga listrik yang dipakai dalam studi ini adalah model linear atau model non-linear yang dilinearakan. Perubahan beban yang kecil pada sistem tenaga listrik adalah suatu hal yang tidak dapat dihindari dan selalu terjadi. Oleh karena itu perlu dirancang suatu pengendali yang dapat menjaga sistem tenaga listrik tetap stabil, yang lazim disebut Power System Stabilizer (PSS).

Power System Stabilizer

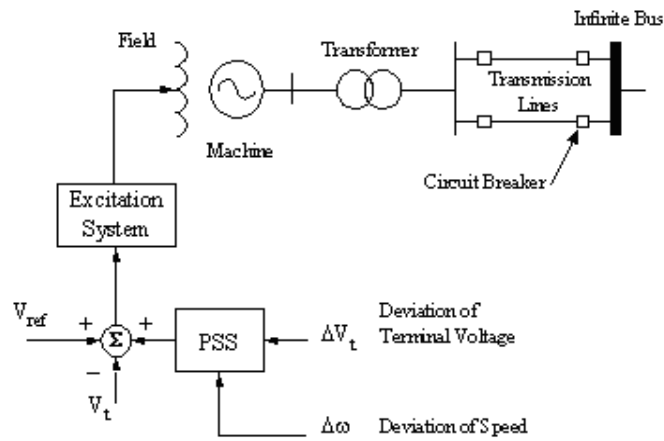
Fungsi dasar PSS adalah untuk memperluas batas stabilitas dengan memodulasi eksitasi generator guna menghasilkan redaman osilasi rotor motor sinkron. Osilasi tersebut biasanya terjadi dalam rentang frekuensi sekitar 0,2 sampai 3,0 Hz, dan dapat mengganggu kemampuan sistem dalam mentransmisikan daya listrik (Bandal et al., 2006). Guna meredam osilasi tersebut, PSS harus mampu menghasilkan komponen torsi elektrik sesuai

dengan perubahan kecepatan rotor generator. Salah satu contoh implementasi PSS dalam mengatasi stabilitas sistem ditunjukkan pada Gambar 1.

Model PSS pada penelitian ini mengacu pada Standar IEEE 421.5, yang dikenal dengan *Multi Band Power System Stabilizer (MB-PSS)*, seperti terlihat pada Gambar 2. Pada MB-PSS diterapkan tiga macam tapis yaitu tapis *low-pass*, tapis *intermediate-pass*, dan tapis *highpass*, yang berfungsi untuk meredam osilasi lokal, osilasi antar jaringan, dan osilasi global (Anonim, 2005). Dengan menggunakan PSS jenis ini maka pengaruh pada sinyal stabilitas akibat perubahan daya turbin juga dapat diredam.

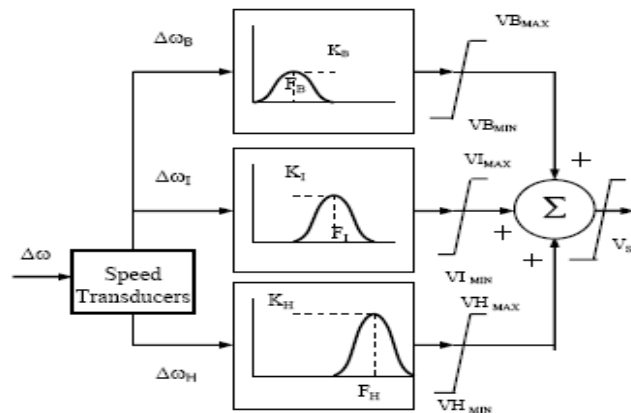
Parameter utama untuk setting MB-PSS adalah: *gain band*: $K_L = 3$, $K_I = 5,5$, $K_H = 53$, frekuensi band pusat: $F_L = 0,1076$ Hz, $F_I = 1,1958$ Hz, $F_H = 12$ Hz. MB PSS dirancang untuk meredam gangguan-gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Gangguan-gangguan tersebut menyebabkan osilasi elektromekanik pada generator dalam sistem tenaga listrik. Osilasi elektromekanik dapat diklasifikasikan:

- 1). Osilasi lokal (*local oscillations*). Osilasi ini disebabkan oleh gangguan yang terjadi antara satu unit generator aktif dan generator yang tidak aktif dalam suatu stasiun pembangkit listrik. Frekuensi osilasinya pada umumnya berkisar pada rentang antara 0,8 hingga 4,0 Hz.



GAMBAR 1. Implementasi PSS pada generator

SUMBER Heniche et al. (2005)



GAMBAR 2. Diagram MB-PSS Stabilizer

SUMBER Heniche et al. (2005)

2). Osilasi antar stasiun (*interplant oscillations*). Osilasi ini disebabkan oleh gangguan yang terjadi antara dua stasiun pembangkit listrik yang berdekatan. Frekuensi osilasinya pada umumnya berkisar pada rentang antara 1Hz hingga 2 Hz.

3). Osilasi antar area (*inter-area oscillations*). Osilasi ini disebabkan oleh gangguan yang terjadi antara dua kelompok besar stasiun pembangkit dalam suatu sistem tenaga listrik. Frekuensi osilasinya pada umumnya berkisar pada rentang antara 0,2 hingga 0,8 Hz.

4). Osilasi global (*global oscillation*). Osilasi ini dikarakteristikan oleh osilasi pada fase yang sama pada seluruh generator. Frekuensi osilasi global ini umumnya di bawah 0,2 Hz. Osilasi ini disebut juga ayunan daya (*power swings*), dan secara efektif harus diredam untuk menjaga stabilitas sistem tenaga listrik.

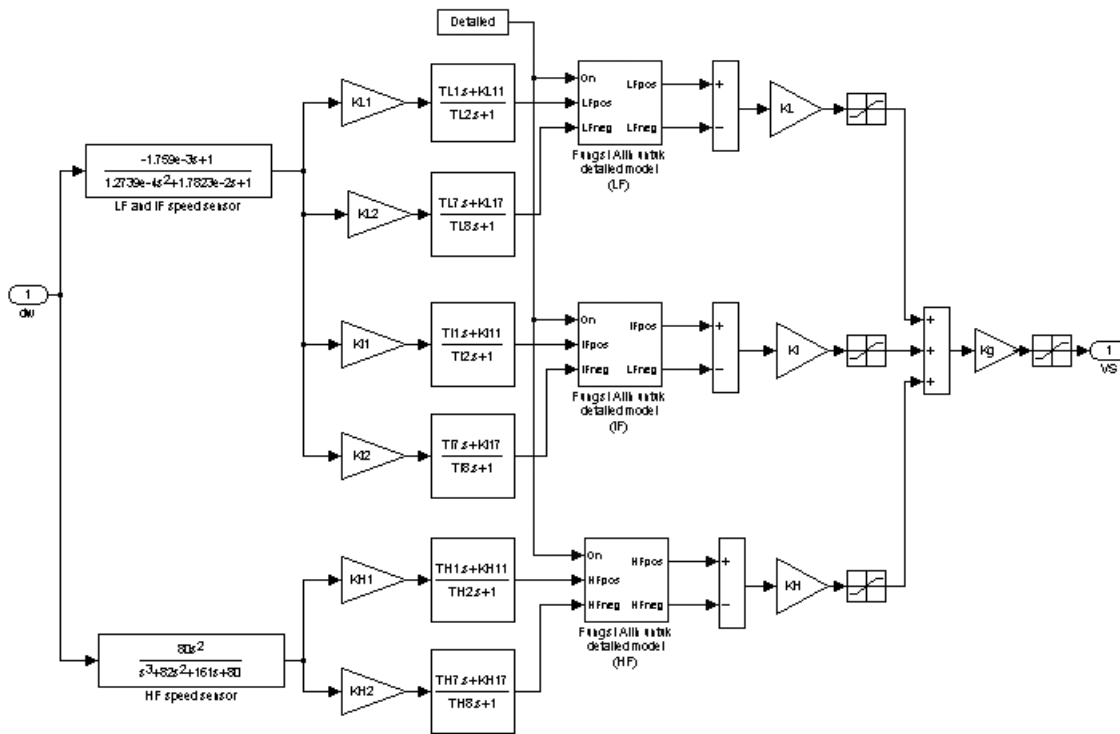
MB PSS melakukan aksi peredaman osilasi menggunakan tiga bidang frekuensi berbeda untuk meredam seluruh spectrum frekuensi osilasi yang dapat terjadi pada sistem tenaga listrik. Ada tiga bidang frekuensi yang

digunakan, masing-masing digunakan untuk menangani osilasi pada mode frekuensi rendah (*low*), menengah (*intermediate*), dan tinggi (*high*). Bidang frekuensi rendah (*low band*) umumnya diasosiasikan dengan mode global sistem tenaga. Bidang frekuensi menengah (*intermediate band*) diasosiasikan dengan mode antar-area sistem tenaga listrik. Bidang frekuensi tinggi (*high band*) diasosiasikan dengan mode lokal (dalam satu stasiun pembangkit).

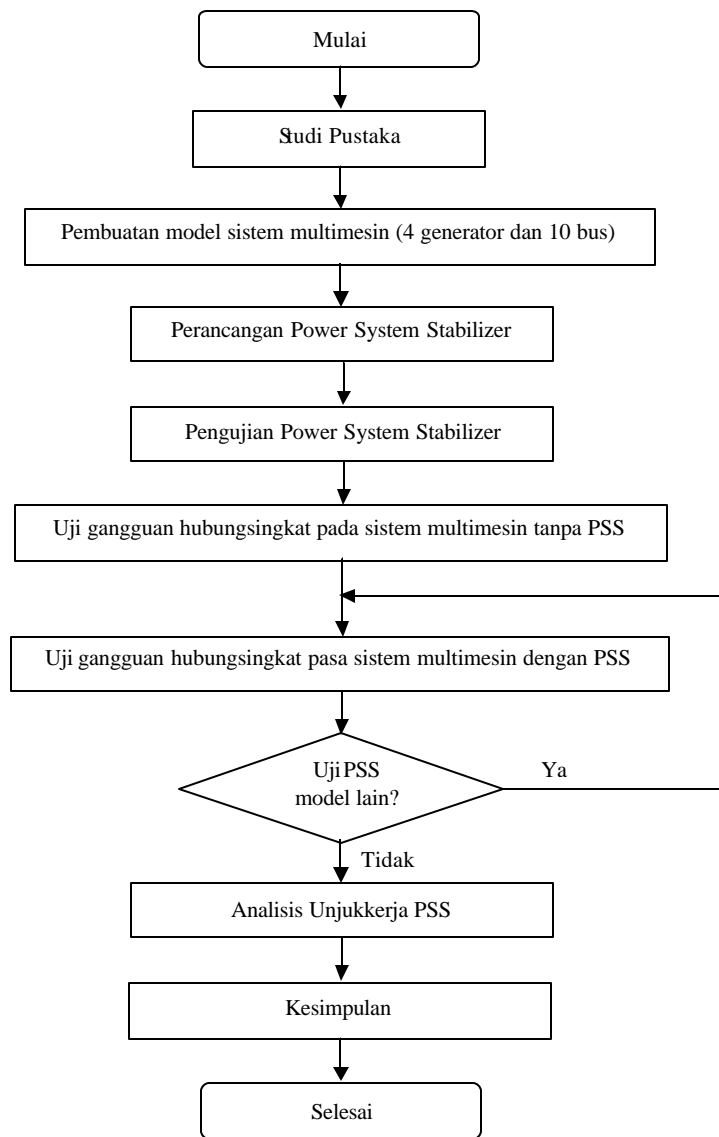
Selanjutnya model PSS berbasis standar IEEE diterapkan dalam perangkat lunak Simulink Matlab seperti terlihat pada Gambar 3.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini berupa pengembangan model PSS dan melakukan pengujian model PSS tersebut dalam model rangkaian sistem tenaga listrik multimesin. Model PSS dan simulasinya dikembangkan dalam perangkat-lunak Matlab-Simulink. Langkah-langkah penelitian dirangkum dalam diagram alir seperti terlihat pada Gambar 4.



GAMBAR 3. Model PSS berbasis standar IEEE 421.5



GAMBAR 4. Diagram alir langkah-langkah penelitian

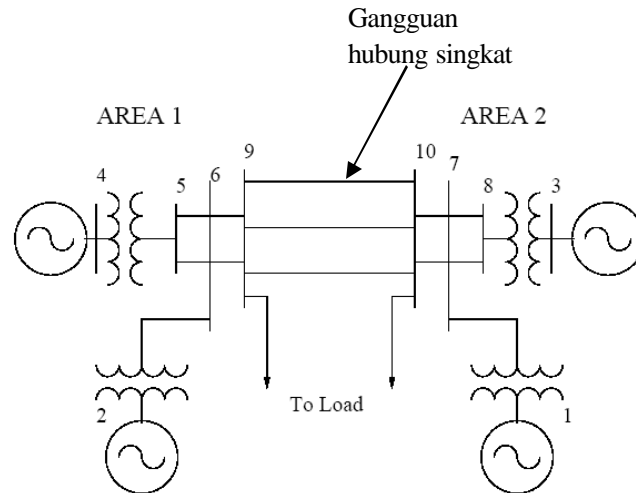
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan Sistem Tenaga Multimesin

Model sistem tenaga listrik multimesin yang digunakan adalah sistem tenaga listrik yang terdiri dari dua area dengan jumlah generator sebanyak 4 unit dan jumlah busnya sebanyak 10 buah, seperti terlihat pada Gambar 5. Sistem multimesin terdiri dari dua area yang saling terhubung oleh saluran transmisi sepanjang 220 km. Tegangan nominal sistem yang digunakan adalah 230 kV. Masing-masing area mempunyai dua buah generator

sinkron dengan kapasitas yang sama yaitu 900MVA pada tegangan 20 kV. Setiap generator pada kedua area tersebut (M_1 , M_2 , M_3 , dan M_4) terhubung dengan transformator daya (T_1 , T_2 , T_3 , dan T_4). Keempat generator mempunyai parameter yang identik, kecuali inersianya (H) yaitu untuk generator di area 1 sebesar 6,5 detik dan untuk generator di area 2 sebesar 6,175 detik.

Setiap generator mampu menghasilkan daya aktif sebesar 700 MW. Beban generator diasumsikan sebagai beban dengan besar impedans yang konstan. Beban pada area 1 sebesar 967 MW (L_1) dan pada area 2 sebesar 1767 MW (L_2).



GAMBAR 5. Sistem multimesin standar IEEE untuk 4 generator 10 bus yang diberi gangguan pada saluran transmisinya.

SUMBER: Robandi & Kharisma (2008)

Pada kondisi ini terlihat bahwa area 1 mempunyai kelebihan daya, sedang pada area 2 sebaliknya yaitu kekurangan daya, oleh karenanya seperti terlihat pada Gambar 6 ada daya sejumlah 413 MW yang ditransfer dari area 1 ke area 2. Guna memperbaiki profil tegangan pada masing-masing area maka dipasang dua buah kapasitor daya (C_1 dan C_2) masing-masing dengan kapasitas 187 MVar guna memperbaiki faktor dayanya.

Diagram rangkaian sistem tenaga listrik multimesin pada Gambar 5 berdasarkan data-data di atas diimplementasikan dalam perangkat lunak Matlab-Simulink guna dilakukan simulasi sistem tenaga listrik yang mengalami gangguan pada saluran transmisi.

Unjukkerja PSS Terhadap Small-Signal

Guna menguji unjukkerja sinyal-kecil (*small-signal*) yang berupa pulsa 12-siklus pada acuan tegangan M_1 , maka dilakukan simulasi tanggapan sistem kalang-tertutup. Untuk mensimulasikan tanggapan sistem kalang-tertutup sinyal kecil (*small-signal*), waktu transisi CB dan piranti gangguan pada diagram utama harus dinonaktifkan dengan mengalikannya dengan 100. Kemudian blok *timer* pengendali acuan tegangan M_1 diaktifkan dengan cara mengubah faktor pengali dari 100 menjadi 1. Dipilih jenis PSS untuk melakukan simulasi dengan menentukan PSS model pada pilihan 1, 2, atau 3. Selanjutnya dilakukan simulasi dan direkam beberapa variabel yang akan digunakan sebagai studi banding antar

jenis PSS. Variabel-variabel yang penting misalnya kecepatan putaran mesin dan tegangan terminal disimpan dalam matriks W dan matriks V_t , yang dapat dilihat pada blok "Mesin" dan blok "Sistem" pada diagram utama. Proses yang sama dilakukan untuk ketiga jenis PSS yang akan diuji. Guna melihat perbandingan unjukkerja masing-masing PSS, maka klik ganda *icon* "Tampilkan Hasil: Step Vref M_1 ". Pada gambar yang ditampilkan terdapat empat plot yaitu plot pertama menunjukkan transfer daya dari area 1 ke area 2, plot kedua menunjukkan kecepatan putaran mesin M_1 , plot ketiga menunjukkan daya akselerasi mesin M_1 , dan plot keempat (paling bawah) menunjukkan tegangan terminal mesin M_1 .

Berdasarkan Gambar 6 terlihat bahwa seluruh PSS dapat bekerja dengan baik dalam rangka menstabilkan sistem yang pada dasarnya merupakan sistem yang tidak stabil. Dari Gambar 6 juga terlihat bahwa secara umum PSS hasil rancangan dalam penelitian ini mempunyai unjukkerja yang relatif lebih baik dibanding PSS Delta w dan PSS Delta Pa. PSS hasil rancangan dalam penelitian ini secara signifikan mampu meredam osilasi sistem.

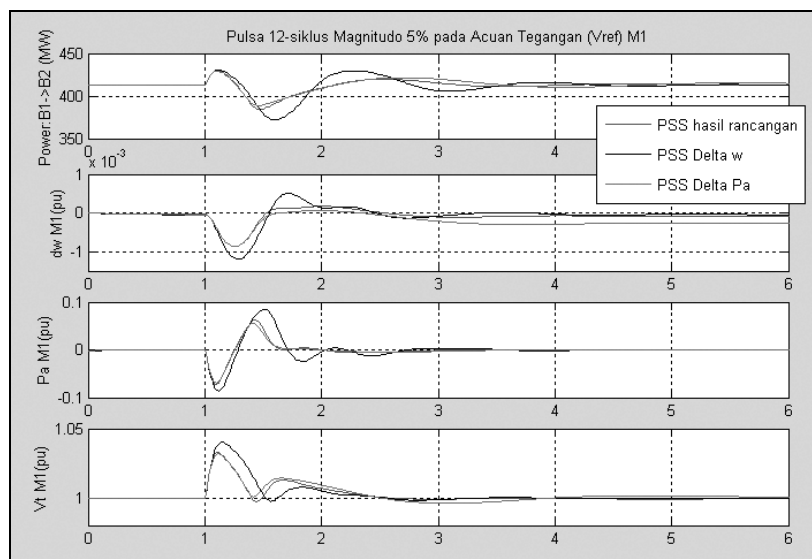
Unjukkerja PSS pada Gangguan Tiga Fase

Guna menguji unjukkerja PSS dalam menangani masalah stabilitas dinamik sistem tenaga listrik khusus sistem multimesin, maka dilakukan uji sistem dengan sinyal besar (*large-signal*) yang biasanya diakibatkan oleh

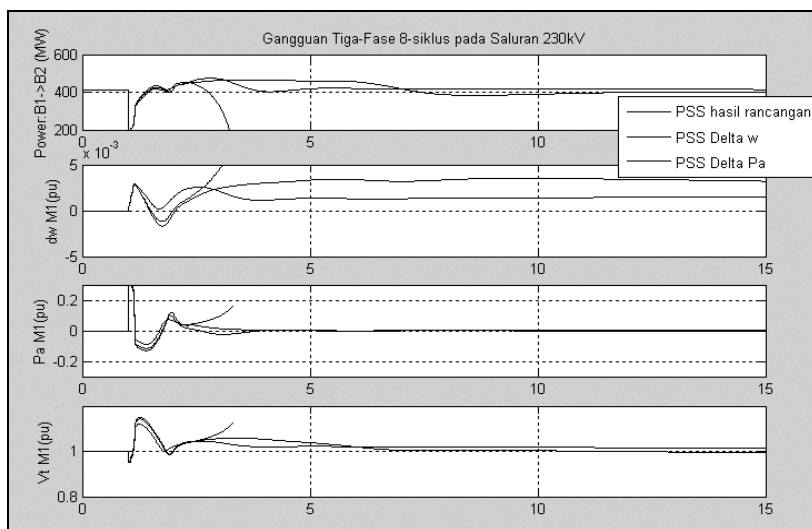
perubahan kondisi operasi sistem. Berdasarkan Gambar 7 terlihat bahwa unjukkerja sistem dengan menggunakan PSS Delta Pa sangat buruk. Hal ini terlihat bahwa sistem gagal melakukan sinkronisasi. Kegagalan sinkronisasi ini disebabkan dalam PSS Delta Pa menggunakan sistem kalang terbuka sehingga tidak mampu memperbaiki tanggapan hasil yang buruk. Sedangkan sistem menggunakan PSS hasil rancangan dalam penelitian ini dan juga PSS Delta w berhasil menjaga kestabilan sistem tenaga listrik multimesin.

Terlihat dalam gambar bahwa baik PSS hasil rancangan maupun PSS Delta w sangat efektif

dalam meredam osilasi transfer daya. Akan tetapi dalam hal frekuensi ayunan kalang tertutup, PSS hasil rancangan lebih rendah dibanding PSS jenis lain, yaitu waktu untuk mencapai tegangan terminal yang normal relatif lebih singkat. Sementara PSS Delta w membutuhkan waktu yang sangat lama untuk mencapai kondisi tegangan terminal. Selain itu juga dalam hal akselerasi daya, PSS hasil rancangan mampu meredam lebih cepat dibanding PSS jenis lainnya. Hal ini disebabkan dalam PSS hasil rancangan digunakan tapis LF, MF, dan HF.



GAMBAR 6. Unjukkerja masing-masing PSS



GAMBAR 7. Unjukkerja PSS pada gangguan tiga fase asimetris pada saluran transmisi

Unjukkerja PSS pada Gangguan Fase ke Tanah

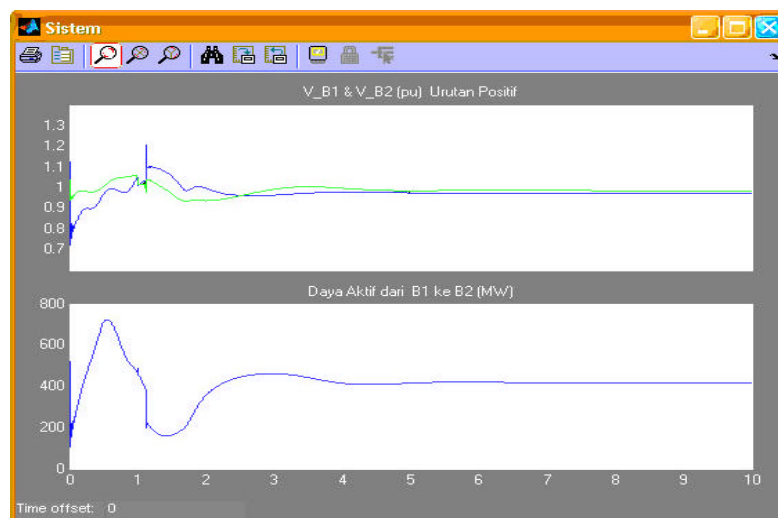
Selanjutnya dilakukan simulasi gangguan fase ke tanah pada saluran transmisi untuk keadaan tanpa PSS dan keadaan dengan PSS. Tujuannya adalah guna mengetahui lebih lanjut mengenai unjukkerja PSS terhadap karakteristik mesin M1, M2, M3, dan M4 pada sistem multimesin yang disimulasikan. Hasil-hasil uji gangguan tiga fase simetris guna melihat unjukkerja mesin ditunjukkan pada Gambar 8.

Pada Gambar 8 terlihat bahwa PSS hasil rancangan menggunakan metode pencuplikan cepat memberikan hasil yang sangat baik, yang ditandai dengan pencapaian kestabilan sistem multimesin. Terlihat bahwa tegangan bus B1 maupun bus B2 praktis mengalami kestabilan pada detik ke-4 setelah sebelumnya mengalami keadaan peralihan akibat adanya gangguan fase ke tanah pada saluran transmisi. Keadaan yang hampir sama juga terjadi pada grafik transfer daya dari area 1 ke area 2 seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Terlihat bahwa walaupun sempat mengalami *overshoot* pada detik ke-0,5 dan *undershoot* pada detik ke 1,2 akibat gangguan hubung singkat fase ke tanah maka sistem mengalami kestabilan daya pada detik ke-4. Keadaan ini merupakan keadaan yang sangat diharapkan guna memperbaiki unjukkerja sistem.

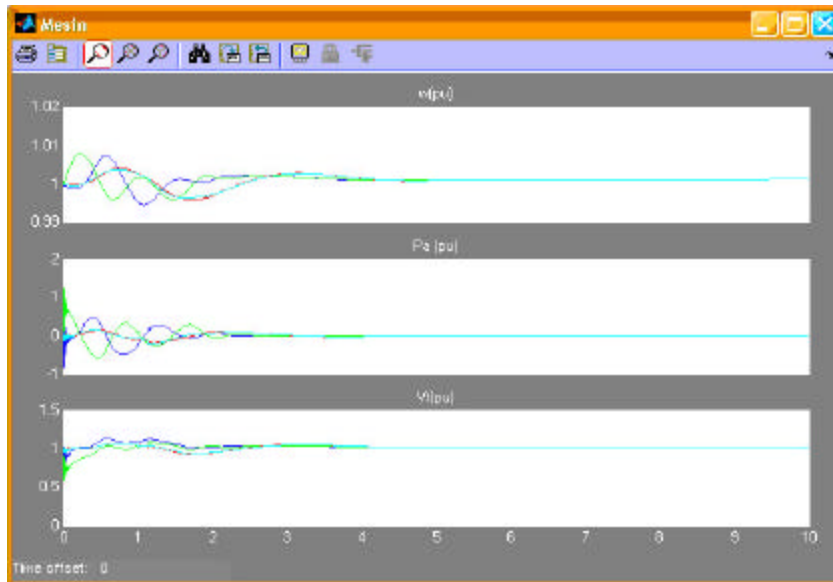
Keunggulan PSS hasil rancangan menggunakan metode pencuplikan cepat dalam mengatasi masalah stabilitas transien sistem juga diperlihatkan pada Gambar 9. Terlihat bahwa untuk variabel-variabel kecepatan sudut putaran mesin (w), perubahan daya mesin (P_a), dan tegangan terminal (V_t) juga mengalami kestabilan yang sangat signifikan pada detik ke-3, walaupun sempat mengalami osilasi hingga detik ke-1,5 akibat gangguan fase ke tanah pada saluran transmisi.

KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian penerapan PSS pada mesin M_1 pada sistem tenaga listrik multimesin untuk gangguan hubung singkat tiga fase simetris diperoleh bahwa bahwa baik PSS hasil rancangan dalam penelitian ini, PSS Delta w , maupun PSS Delta P_a memberikan hasil yang relatif baik dalam meredam osilasi variabel-variabel sistem di antaranya transfer daya listrik, perubahan kecepatan sudut generator, dan tegangan terminal generator. Ketiga PSS dapat bekerja dengan baik dalam rangka menstabilkan sistem yang pada dasarnya merupakan sistem yang tidak stabil. Akan tetapi, PSS hasil rancangan dalam penelitian ini mempunyai unjukkerja yang relatif lebih baik dibanding PSS Delta w dan PSS Delta P_a dalam hal kemampuan meredam osilasi dan kecepatan mencapai keadaan stabilnya.



GAMBAR 8. Profil tegangan pada masing-masing bus dan aliran daya aktif pada saat gangguan fase ke tanah untuk kondisi dengan PSS hasil rancangan.



GAMBAR 9. Grafik kecepatan sudut putaran mesin (w), perubahan daya mesin (P_a), dan tegangan terminal (V_t) untuk kondisi dengan PSS hasil rancangan.

Berdasarkan pengujian PSS guna melihat karakteristik keempat mesin dalam model sistem tenaga multimesin, diperoleh bahwa PSS hasil rancangan menggunakan metode umpan balik pencuplikan cepat memberikan hasil yang baik dibanding PSS Delta w dan PSS Delta P_a terutama pada keadaan sistem mengalami gangguan hubung singkat fase ke tanah dan gangguan fase ke fase pada saluran transmisi. Pada kedua jenis gangguan ini, PSS hasil rancangan mampu menjadikan keadaan sistem menjadi stabil setelah empat detik kemudian untuk berbagai variabel di antaranya tegangan pada bus-bus sistem multimesin, transfer daya dari area 1 ke area 2, kecepatan sudut rotor generator, perubahan daya generator, dan tegangan terminal generator.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada LP3M-UMY yang telah memberikan dukungan dana guna terselenggaranya penelitian ini. Ucapan terima kasih juga penulis haturkan kepada Ir. Soedjatmiko, M.Sc. dan Dr.Eng. Suharyanto, S.T., M.Eng. atas masukan-masukan yang sangat berharga dalam penelitian ini. Semoga kerjasama yang baik ini dapat terus berlanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, (2005). UNITROL Stand-alone Power System Stabilizer, Static Excitation Systems, *Voltage Regulators and Synchronizing Equipment*, ABB Switzerland Ltd. CH-5300 Turgi / Switzerland.
- Bandal, V., Bandyopadhyay, B., & Kulkarni, A.M. (2006). Design of Power System Stabilizer using Power Rate Reaching Law based Sliding Mode Control Technique, *IEEE Xplore*.
- Bevrani, H., & Hiyama, T. (2006). Stability and Voltage Regulation Enhancement Using an Optimal Gain Vector, *Proceedings of 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Canada. 6pp. doi: 10.1109/PES.2006.1708999.
- Chetty, M. (2002). A Fuzzy Logic Based Discrete Mode Power System Stabilizer, *Asian Journal of Control*, 4, 3, 327-332.
- Grainger, J.J., & Stevenson, W.D.Jr. (1994). *Power System Analysis*, Singapore: McGraw-Hill.
- Harmas, N.M., Abdelaziz, M., & Hamidi-Cherif, A. (2007). Observer Based Intelligent Power System Stabilizer,

International Journal of Electrical and Power Engineering, 6(10), 1057-1063.

- Heniche, A., Kamwa, I., & Grondin, R. (2005). Torsional-mode identification for turbogenerators with application to PSS tuning. *Proceeding os International Conference on Power Systems Transients, Montreal*, Paper No. IPST05 – 222.
- Jyothsna, T.R., & Vaisakh, K. (2009). Multi-objective Evolutionary Programming Based Design of PSS, SVC, and TCSC for Transient Stability Improvement, *Proceedings of World Academy of Science: Engineering & Technology*; 39, 859-863..
- Lerm, A.A.P., & Silva, A.S.E. (2003). PSS tuning via Hopf Bifurcation sensitivity analysis, *IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bologna, Italy.
- Mahabuba, A., & Khan, M.A. (2008). Optimal Location of Power System Stabilizers in a Multimachine Power System Using Relative Gain Array (RGA) and Genetic Algorithm (GA). *International Journal of Electrical and Power Engineering*, 2(1), 19-27.
- Mithulananthan, N., & Cafiizares, C.A. (2004). Effect of Static Load Models on Hopf Bifurcation Point and Critical Modes of Power Systems, *Thammasat Int. J. Sc. Tech.*, 9, 4, 69-76.
- Ram, B., & Vishwakarma, D.N. (1995). *Power System Protection and Switchgear*, New Delhi: McGraw -Hill.
- Robandi, I. & Kharisma, B. (2008). Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Based Power System Stabilizer. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 1, 682-689.
- Saadat, H. (1999). *Power System Analysis*, Singapore: McGraw-Hill.

Diskusi untuk makalah ini dibuka hingga tanggal 1 April 2011 dan akan diterbitkan dalam jurnal edisi Mei 2011.

PENULIS:

Agus Jamal

Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jalan Lingkar Selatan, Bantul 55183, Yogyakarta, Indonesia

E-mail: ajamal_me@yahoo.co.id