

Peredaman Osilasi Frekuensi Rendah Pada Sistem Tenaga Multimesin Dengan PSS Sinyal Global Berbasis PSO

Fajar Prasetya¹, Sasongko Pramono Hadi²
 Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
 Universitas Gadjah Mada
 Yogyakarta, Indonesia
 E-mail : fajar_prasetya@mail.ugm.ac.id

Abstract—Paper ini menyajikan investigasi pengaruh pemasangan PSS berbasis sinyal global pada sistem tenaga multimesin terhadap peredaman osilasi frekuensi rendah. Filter dalam struktur PSS dirancang berdasarkan tanggapan frekuensinya, sedangkan parameter *lead-lag* dioptimisasi dengan PSO. Fungsi obyektif diformulasikan berbasis *eigenvalue* untuk menggeser komponen real *eigenvalue* sistem ke kiri dan meminimalkan *overshoot* yang terjadi. Unjuk kerja perancangan PSS berbasis sinyal global diuji pada sistem tenaga 3-Mesin 4 Bus sebagai *test system* dibawah kondisi operasi dan dikenakan gangguan berupa kenaikan beban. Hasil analisis *eigenvalue*, *participation factor* dan simulasi domain waktu menunjukkan bahwa sistem dengan PSS berbasis koordinasi antara sinyal lokal dan sinyal global lebih efektif meredam osilasi frekuensi rendah daripada PSS berbasis sinyal lokal saja.

Keywords— PSS, sinyal global, sistem tenaga multimesin, PSO

I. PENDAHULUAN

Koordinasi antara sinyal lokal dengan sinyal global mampu secara efektif meredam Osilasi Frekuensi Rendah atau *Low Frequency Oscillations* (LFO) [1-2]. Sinyal global yang dimaksud adalah sinyal kecepatan rotor yang berasal dari berbagai generator dalam suatu sistem interkoneksi. Sinyal-sinyal ini memungkinkan dikirim dari berbagai tempat yang jauh dan dikoordinasikan untuk dijadikan sinyal masukan PSS dengan piranti *Wide Area Measurement Systems* (WAMS) seperti *Phasor Measurement Unit* (PMU) dan *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA).

Studi terkait sinyal global selama ini hanya menggunakan *High-Pass Filter* (HPF) pada blok *washout* dari struktur ini meskipun efektif dalam meredam LFO [1-2] akan tetapi penggunaan *Low-Pass Filter* (LPF) dalam studi perancangan PSS berbasis sinyal global perlu diinvestigasi lebih lanjut.

Teknik komputasi *heuristics* untuk mengoptimisasi fungsi obyektif dengan menggunakan *Genetic Algorithm* (GA) telah dipakai oleh [3-4]. Teknik komputasi GA dilaporkan akan mengalami penurunan unjuk kerja ketika diterapkan pada sistem yang memiliki fungsi obyektif *epistatic* yang tinggi-

dimana parameter yang akan dioptimisasikan sangat terkorelasi sehingga mengakibatkan konvergensi yang prematur [5-6]. Teknik komputasi *heuristics* lain yaitu *Particle Swarm Optimization* (PSO) telah dipakai oleh [6-7]. Teknik komputasi PSO memiliki kelebihan dibandingkan dengan GA yaitu memiliki konsep yang sederhana, mudah untuk diimplementasikan, dan komputasinya lebih efisien [6].

Studi ini dilakukan untuk menginvestigasi pengaruh pemasangan PSS dengan memanfaatkan sinyal global terhadap stabilitas sistem tenaga multimesin setelah terjadi gangguan. Perancangan LPF berbasis tanggapan frekuensi dipertimbangkan dalam struktur PSS, sedangkan parameter *lead-lag* dioptimisasi dengan PSO. Skema pengendalian diuji pada *test system* melalui analisis modal (*eigenvalue* dan *participation factor*) dan simulasi domain waktu.

II. METODOLOGI

A. Model Sistem Tenaga Multimesin

Model Phillips–Heffron untuk sistem tenaga multimesin dapat diformulasikan sebagai berikut [8-10]:

$$\Delta \delta_i = \omega_{bi} \Delta \omega_i \quad (1)$$

$$\Delta \omega_i = \frac{1}{M_i} (-K_{1i} \Delta \delta_i - K_{2i} \Delta E'_{qi}) \quad (2)$$

$$\Delta E'_{qi} = \frac{1}{T_{doi}} (-K_{4i} \Delta \delta_i + \Delta E_{fdi}) - \frac{1}{T_{doi} K_{3i}} \Delta E'_{qi} \quad (3)$$

$$\Delta E'_{fdi} = -\frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} (K_{5i} \Delta \delta_i + K_{6i} \Delta E'_{qi}) - \frac{1}{T_{Ai}} \Delta E_{fdi} \quad (4)$$

dimana variabel dan parameter sistem pada persamaan (1)-(4) dinyatakan dalam vektor atau matriks dimensi n , sebagai contohnya:

$$\Delta \delta = [\Delta \delta_1 \quad \Delta \delta_2 \quad \Delta \delta_3 \quad \dots \quad \Delta \delta_n]^T$$

Konstanta K_{1i} , K_{2i} , K_{3i} , K_{4i} , K_{5i} dan K_{6i} dinamakan konstanta Phillips–Heffron.

Persamaan (1)-(4) dibawa ke bentuk sistem matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta}_i \\ \Delta \dot{\omega}_i \\ \Delta \dot{E}'_{qi} \\ \Delta \dot{E}'_{fdi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{bi} & 0 & 0 \\ -\frac{K_{1i}}{M_i} & 0 & -\frac{K_{2i}}{M_i} & 0 \\ \frac{K_{4i}}{T'_{doi}} & 0 & -\frac{1}{T'_{doi}K_{3i}} & \frac{1}{T'_{doi}} \\ -\frac{K_{Ai}K_{5i}}{T_{Ai}} & 0 & -\frac{K_{Ai}K_{6i}}{T_{Ai}} & -\frac{1}{T_{Ai}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta \omega_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E'_{fdi} \end{bmatrix} \quad (5)$$

B. Model PSS

Rancangan pengendali pada studi ini terdiri dari dua cabang *Lead-Lag* PSS seperti pada Gambar 1 yaitu cabang pertama untuk LFO Lokal dan cabang kedua untuk LFO Inter-area. Kedua cabang secara umum memiliki struktur *gain*, *washout filter*, dan kompensator *lead-lag*. *Gain* G, K_L , dan K_I dipilih untuk menyediakan redaman yang memadai baik dari modus lokal maupun *inter-area* pada kondisi operasi yang bervariasi. Ada dua jenis *washout filter*, pertama berupa *High Pass Filter* (HPF) yang memuat T_W dan lainnya berupa *Low Pass Filter* (LPF) yang memuat T_V keduanya dapat mengurangi bias steady state pada keluaran PSS, sehingga PSS hanya akan menanggapi osilasi pada kecepatan rotor. Kompensator *lead-lag* yang memuat konstanta waktu T_1 - T_4 dan τ_1 - τ_4 menyediakan *phase lead* bagi masukan sinyal PSS dengan *range* frekuensi sekitar 0.1-3 Hz.

Cabang pertama memiliki sinyal masukan perubahan kecepatan rotor generator lokal $\Delta \omega_i$ yang selanjutnya dinamakan sinyal lokal $\Delta \omega_i$. Fungsi alih dari cabang pertama yaitu:

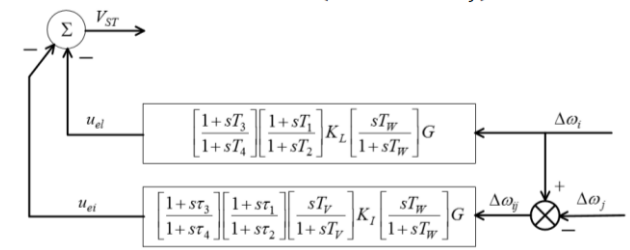
$$H_{PSS1i}(s) = GK_L \left[\frac{sT_W}{1+sT_W} \right] \left[\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right] \left[\frac{1+sT_3}{1+sT_4} \right] \quad (6)$$

Cabang kedua memiliki sinyal masukan selisih perubahan kecepatan rotor generator tetangga di area yang berbeda yang selanjutnya dinamakan sinyal global $\Delta \omega_{ij}$. Fungsi alih dari cabang kedua yaitu:

$$H_{PSS2i}(s) = GK_I \left[\frac{sT_W}{1+sT_W} \right] \left[\frac{sT_V}{1+sT_V} \right] \left[\frac{1+s\tau_1}{1+s\tau_2} \right] \left[\frac{1+s\tau_3}{1+s\tau_4} \right] \quad (7)$$

Sinyal kendali total V_{ST} didapat dari persamaan berikut:

$$V_{ST} = (H_{PSS1i} * \Delta \omega_i) + (H_{PSS2i} * \Delta \omega_{ij}) \quad (8)$$



Gambar 1. Blok diagram model PSS dalam studi

Nilai parameter G, K_L , dan $K_I = 0.1-50$; T_1, T_3, τ_1 , dan $\tau_3 = 0.2 - 1.5$ dtk; T_2, T_4, τ_2 , dan $\tau_4 = 0.02 - 0.15$ dtk; $T_W = 10$ dtk [11]; $T_V = 1/\alpha_{L,PF}$, dimana besarnya nilai *cut off* $\alpha_{L,PF}$ 0.2 kali dari nilai frekuensi osilasi saat sistem dikenakan gangguan ω_d [12].

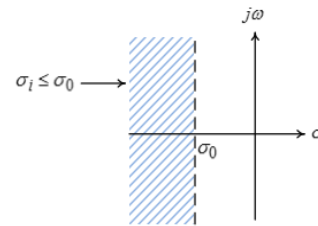
C. Teknik Optimisasi PSO

Parameter G, K_L , K_I , T_1 - T_4 , dan τ_1 - τ_4 dioptimisasi untuk meminimalkan fungsi obyektif berikut agar diperoleh kendali yang optimal [7]:

- Fungsi obyektif untuk menempatkan komponen real *eigenvalue* σ di sebelah kiri sumbu imajiner, yaitu:

$$J_1 = \sum_{\sigma_i \geq \sigma_0} (\sigma_0 - \sigma_i)^2 \quad (9)$$

dimana, σ_i adalah bagian *real eigenvalue* ke-i, sedangkan σ_0 adalah *threshold* yang dipilih. Nilai *real eigenvalue* yang diharapkan berada pada $\sigma_i = \sigma_0$ sebagaimana Gambar 2 berikut:

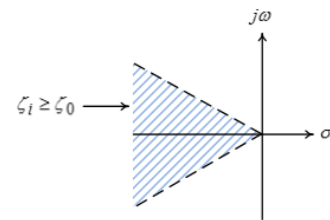


Gambar 2. Area lokasi *eigenvalue* untuk fungsi obyektif J_1

- Fungsi obyektif untuk membatasi *overshoot* maksimum, yaitu:

$$J_2 = \sum_{\zeta_i \geq \zeta_0} (\zeta_0 - \zeta_i)^2 \quad (10)$$

dimana, ζ_i adalah rasio peredaman dari *eigenvalue* ke-i. Nilai rasio redaman yang diharapkan berada pada $\zeta_i = \zeta_0$ sebagaimana Gambar 3 berikut:



Gambar 2. Area lokasi *eigenvalue* untuk fungsi obyektif J_2

Permasalahan optimisasi dengan dua fungsi obyektif diformulasikan sebagai berikut:

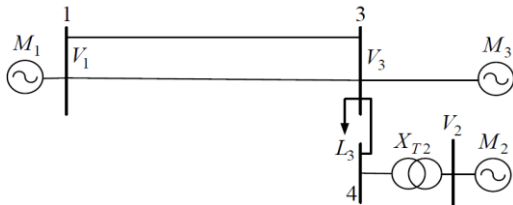
Minimalkan J_1 dan J_2
 tunduk kepada
 $G^{min} \leq G \leq G^{max}$
 $K_L^{min} \leq K_L \leq K_L^{max}$
 $K_I^{min} \leq K_I \leq K_I^{max}$
 $T_1^{min} \leq T_1 \leq T_1^{max}, \tau_1^{min} \leq \tau_1 \leq \tau_1^{max}$
 $T_2^{min} \leq T_2 \leq T_2^{max}, \tau_2^{min} \leq \tau_2 \leq \tau_2^{max}$
 $T_3^{min} \leq T_3 \leq T_3^{max}, \tau_3^{min} \leq \tau_3 \leq \tau_3^{max}$
 $T_4^{min} \leq T_4 \leq T_4^{max}, \tau_4^{min} \leq \tau_4 \leq \tau_4^{max}$ (11)

Parameter *threshold* σ_0 dipilih -0.3 dan ζ_0 dipilih 0.2. Teknik komputasi PSO diterapkan untuk menyelesaikan permasalahan optimisasi persamaan (11). Konfigurasi komputasi PSO ditentukan: jumlah populasi 100, jumlah iterasi maksimum 100 dan *initial inertia weight* 0.9 - 0.4.

III. HASIL DAN ANALISIS

A. Model Sistem Tenaga Multimesin Dengan PSS Sinyal Global

Sistem tenaga 3-Mesin 4-Bus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 digunakan sebagai *test system* pada studi ini. Parameter *test system* telah dimodifikasi dari [13] dan disajikan pada Lampiran.



Gambar 4. Test System 3-Mesin 4-Bus

Konfigurasi PSS dalam *test system* ditunjukkan pada blok diagram Gambar 5, dimana PSS berbasis sinyal lokal dan sinyal global dipasang di mesin 1, sedangkan PSS berbasis sinyal lokal dipasang di mesin 2 dan 3. Sinyal global dalam studi ini adalah selisih perubahan kecepatan rotor generator 1 $\Delta\omega_1$ dengan perubahan kecepatan rotor generator 2 $\Delta\omega_2$. Tiap mesin dideskripsikan oleh persamaan (5), sehingga persamaan dinamis dari konfigurasi ini adalah sebagai berikut:

$$\dot{x} = A_C x \tag{12}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \tag{13}$$

dengan,

$$x_1 = [\Delta\delta_1 \quad \Delta\omega_1 \quad \Delta E'_{q1} \quad \Delta E'_{fd1} \quad x_{11} \quad x_{21} \quad u_{e11} \quad x_{31} \quad x_{41} \quad x_{51} \quad u_{e11}]^T \tag{14}$$

$$x_2 = [\Delta\delta_2 \quad \Delta\omega_2 \quad \Delta E'_{q2} \quad \Delta E'_{fd2} \quad x_{12} \quad x_{22} \quad u_{e12}]^T \tag{15}$$

$$x_3 = [\Delta\delta_3 \quad \Delta\omega_3 \quad \Delta E'_{q3} \quad \Delta E'_{fd3} \quad x_{13} \quad x_{23} \quad u_{e13}]^T \tag{16}$$

Matriks gabungan A_C berdimensi (25,25), yang terdiri dari A_{11} , A_{22} dan A_{33} adalah matriks sistem lokal; A_{12} , A_{13} , A_{21} , A_{23} , A_{31} dan A_{32} terkait dengan interaksi dinamis diantara mesin.

B. Hasil Analisis Modal dan Domain Waktu

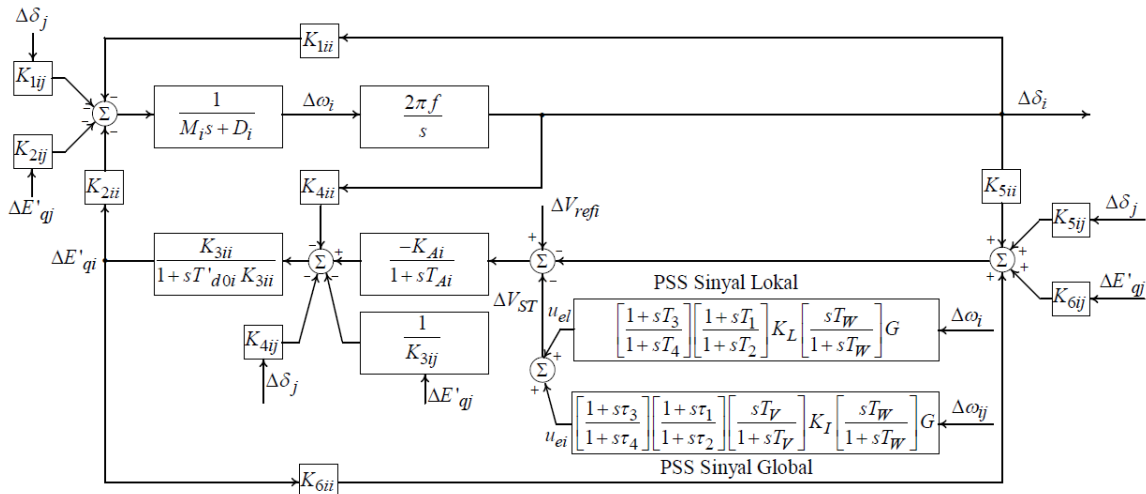
Investigasi pengaruh pemasangan PSS sinyal global terhadap stabilitas sistem setelah sistem diganggu berupa kenaikan daya 0.1 pu dilakukan dengan analisis modal (*eigenvalue* dan *participation factor*) dan tanggapan simulasi domain waktu pada tiga skenario model dan simulasi untuk dibandingkan yaitu:

1. Sistem Tanpa kendali
2. Sistem Dengan PSS Sinyal Lokal
3. Sistem Dengan PSS Sinyal Global

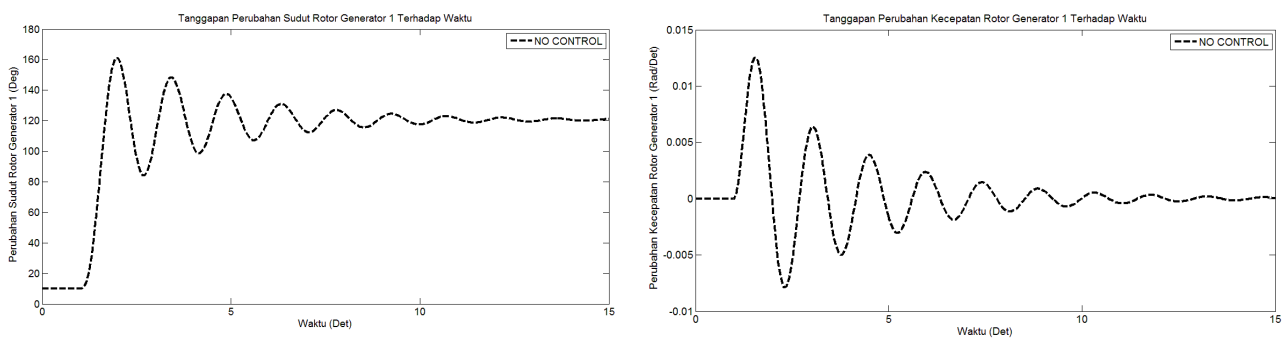
Parameter-parameter pada skenario ke-2 dan ke-3 dioptimisasi dengan PSO untuk membandingkan pengaruh penambahan sinyal global.

Tabel 1. Hasil analisis *eigenvalue* dan *participation factor* untuk ketiga skenario

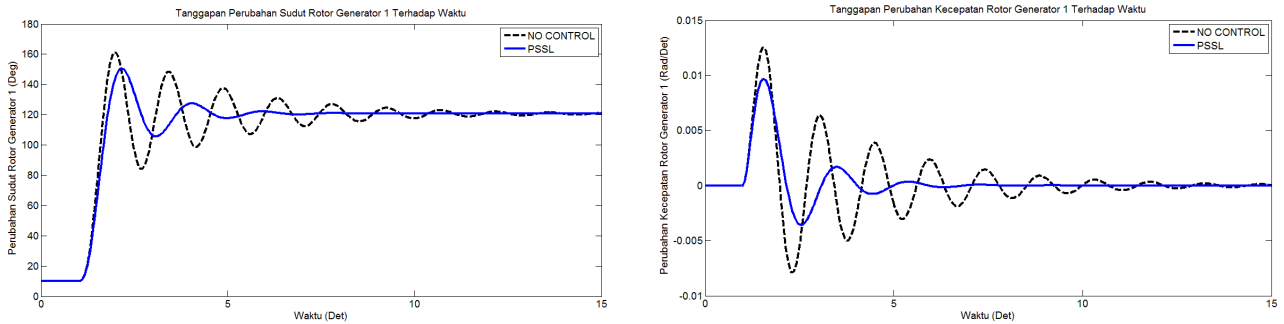
Tanpa Kendali			Dengan PSS Sinyal Lokal			Dengan PSS Sinyal Global		
Eigenvalues	State Dominan	ζ (pu)	Eigenvalues	State Dominan	ζ (pu)	Eigenvalues	State Dominan	ζ (pu)
-96.9281	$\Delta E'_{fd1}$	1	-97.5978	$\Delta E'_{fd1}$	1	-98.1621	$\Delta E'_{fd1}$	1
-97.0876	$\Delta E'_{fd3}$	1	-97.0941	$\Delta E'_{fd3}$	1	-97.0531	$\Delta E'_{fd3}$	1
-0.3971 ± 6.4391i	$\Delta\delta_2, \Delta\omega_2$	0.0616	-7.1555 ± 7.4296i	u_{e11}	0.694	-5.6977 ± 10.4455i	$\Delta E'_{q1}$	0.4789
-0.2144 ± 4.6202i	$\Delta\delta_1, \Delta\omega_1$	0.0464	-0.4327 ± 6.3737i	$\Delta\delta_2, \Delta\omega_2$	0.068	-13.7072 ± 0.1227i	u_{e11}	1
-0.0061 ± 3.1361i	$\Delta\delta_3, \Delta\omega_3$	0.0019	-10.1802	u_{e12}	1	-0.4617 ± 6.3815i	$\Delta\delta_2, \Delta\omega_2$	0.0722
-2.3995 ± 2.4564i	$\Delta E'_{q2}$	0.6988	-9.7725	u_{e13}	1	-8.7829	u_{e12}	1
-2.4439	$\Delta E'_{q1}$	1	-8.5213	x_{213}	1	-7.9832	x_{311}	1
-2.8896	$\Delta E'_{q3}$	1	-6.8137	x_{212}	1	-7.3561 ± 0.5641i	u_{e13}	0.9971
			-0.9487 ± 4.0815i	$\Delta\delta_1, \Delta\omega_1$	0.226	-1.4326 ± 3.4937i	$\Delta\delta_1, \Delta\omega_1$	0.3794
			-0.0229 ± 3.0428i	$\Delta\delta_3, \Delta\omega_3$	0.008	-0.0809 ± 3.0248i	$\Delta\delta_3, \Delta\omega_3$	0.0267
			-2.2779 ± 2.3242i	$\Delta E'_{q2}$	0.700	-2.0897 ± 2.0349i	$\Delta E'_{q2}$	0.7164
			-2.7373	$\Delta E'_{q3}$	1	-3.0015	x_{111}	1
			-2.3529	$\Delta E'_{q1}$	1	-2.5602	$\Delta E'_{q3}$	1
			-0.174	x_{111}	1	-0.3307	x_{111}	1
			-0.0554	x_{112}	1	-0.0271	x_{112}	1
			-0.1101	x_{113}	1	-0.1393	x_{211}	1
						-0.1075	x_{113}	1
						-0.1	x_{111}	1



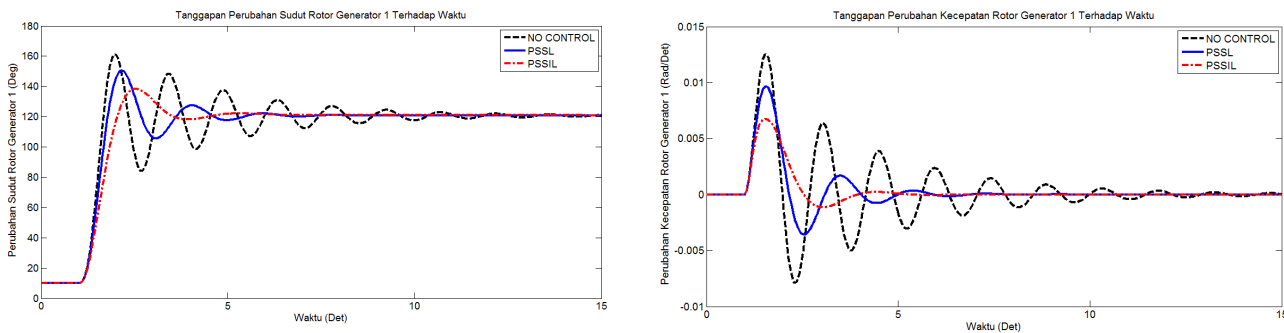
Gambar 5. Model Phillips-Hefron dengan PSS sinyal global terpasang



Gambar 6. Hasil simulasi domain waktu sistem tanpa pengendali



Gambar 7. Hasil simulasi domain waktu sistem dengan PSS sinyal lokal



Gambar 8. Hasil simulasi domain waktu sistem dengan PSS sinyal global
Sistem Tanpa Kendali

Hasil analisis modal sistem tanpa kendali ditunjukkan pada Tabel 1. Setiap mesin memiliki *eigenvalue* yang menyebabkan LFO, yaitu:

- Mesin 1 memiliki $\lambda = -0.2144 \pm 4.6202i$ dengan $\zeta = 0.0464$
- Mesin 2 memiliki $\lambda = -0.3971 \pm 6.4391i$ dengan $\zeta = 0.0616$
- Mesin 3 memiliki $\lambda = -0.0061 \pm 3.1361i$ dengan $\zeta = 0.0019$

Ketiga mesin memiliki rasio redaman yang rendah sehingga dibutuhkan pengendali untuk menaikkan redaman terhadap LFO.

Hasil simulasi domain waktu ditunjukkan pada Gambar 6, dimana tanggapan perubahan sudut rotor terhadap waktu memiliki *overshoot* sebesar 33.16% dan *settling time* 11.54 detik, sedangkan tanggapan perubahan kecepatan rotor terhadap waktu memiliki *settling time* 12.66 detik.

Sistem Dengan PSS Sinyal Lokal

Pengendali PSS sinyal lokal adalah PSS yang hanya memiliki satu jenis masukan sinyal berupa perubahan kecepatan rotor lokal. Hasil optimisasi parameter-parameter PSS sinyal lokal masing-masing mesin disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil optimisasi parameter PSS sinyal lokal

Param PSSL G1	Nilai	Param PSSL G2	Nilai	Param PSSL G3	Nilai
G _{L1}	1.9952	G _{L2}	0.3733	G _{L3}	0.6591
K _{L1}	2.7121	K _{L2}	0.4133	K _{L3}	0.7091
T _{1PSSL1}	1.0072	T _{1PSSL2}	0.9841	T _{1PSSL3}	0.3915
T _{2PSSL1}	0.1424	T _{2PSSL2}	0.1323	T _{2PSSL3}	0.1404
T _{3PSSL1}	0.5967	T _{3PSSL2}	0.8075	T _{3PSSL3}	1.2133
T _{4PSSL1}	0.1131	T _{4PSSL2}	0.1052	T _{4PSSL3}	0.0881

Hasil analisis modal sistem dengan PSS sinyal lokal ditunjukkan pada Tabel 1. Penambahan PSS ini pada sistem

secara umum menaikkan rasio redaman tiap-tiap mesin. Hasil ini sesuai dengan hasil simulasinya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, dimana penambahan ini mengakibatkan *overshoot* menurun 8.51% dan mempercepat *settling time* 6.33 detik untuk tanggapan perubahan sudut rotor, sedangkan untuk tanggapan perubahan kecepatan rotor mempercepat *settling time* sebesar 6.96 detik.

Sistem Dengan PSS Sinyal Global

Hasil perancangan PSS dengan sinyal global dengan teknik komputasi PSO ditunjukkan pada Tabel 3. Parameter T_w ditetapkan untuk PSS di tiap-tiap mesin sebesar 10 detik [11]. Konstanta waktu T_{V1} dari persamaan (7) yang merupakan persamaan fungsi transfer PSS dengan sinyal global dapat

dihitung dengan dua langkah. Langkah pertama yaitu dengan menentukan nilai frekuensi f_{d1} . Frekuensi f_{d1} dari generator 1 setelah *test system* mendapatkan kenaikan daya sebesar 0.1 pu dihasilkan dari perhitungan *eigenvalue* dan analisis modal sebesar 0.7396 Hz. Langkah kedua yaitu dengan menghitung nilai frekuensi α_{LPP1} sebesar 0.1479 Hz, sehingga T_{V1} bernilai 6.76 detik.

Tabel 3. Hasil optimisasi parameter PSS sinyal lokal dan global

Param PSSL G1	Nilai	Param PSSIL G1	Nilai	Param PSSL G2	Nilai	Param PSSL G3	Nilai
G _{L1}	9.5176	G _{I1}	3.5315	G _{L2}	0.5291	G _{L3}	0.4602
K _{L1}	2.5965	K _{I1}	0.1675	K _{L2}	0.5452	K _{L3}	0.4464
T _{1PSSL1}	0.3230	T _{1PSSIL1}	1.0192	T _{1PSSL2}	1.2521	T _{1PSSL3}	1.2015
T _{2PSSL1}	0.1456	T _{2PSSIL1}	0.1253	T _{2PSSL2}	0.0834	T _{2PSSL3}	0.1440
T _{3PSSL1}	0.9230	T _{3PSSIL1}	0.2168	T _{3PSSL2}	0.5901	T _{3PSSL3}	0.2524
T _{4PSSL1}	0.1301	T _{4PSSIL1}	0.0717	T _{4PSSL2}	0.0935	T _{4PSSL3}	0.1273

Hasil analisis modal sistem dengan kendali PSS sinyal global ditunjukkan dengan Tabel 1. Setiap mesin memiliki *eigenvalue* yang menyebabkan LFO, yaitu:

- Mesin 1 memiliki $\lambda = -1.4326 \pm 3.4937i$ dengan $\zeta = 0.3794$
- Mesin 2 memiliki $\lambda = -0.4617 \pm 6.3815i$ dengan $\zeta = 0.0722$
- Mesin 3 memiliki $\lambda = -0.0809 \pm 3.0248i$ dengan $\zeta = 0.0267$

Rasio redaman dari mesin 1 mengalami kenaikan yang signifikan jika dibandingkan dengan sistem dengan PSS sinyal lokal karena adanya sinyal global sebagai sinyal kendali. Kenaikan ini diikuti naiknya rasio redaman dari dua mesin yang lain.

Hasil simulasi domain waktu ditunjukkan pada Gambar 8. Berdasarkan hasil ini, pengaruh pemasangan pengendali PSS dengan memanfaatkan sinyal lokal dan sinyal global secara bersamaan jika dibandingkan dengan pemasangan pengendali PSS dengan hanya memanfaatkan sinyal lokal saja pada *test system* di generator 1 yaitu dapat mempercepat *settling time* 1.03 detik dan menurunkan *overshoot* 10.19% pada tanggapan perubahan sudut rotor terhadap waktu, sedangkan pada tanggapan perubahan kecepatan rotor dapat mempercepat *settling time* sebesar 0.86 detik.

IV. KESIMPULAN

Teknik komputasi PSO secara simultan menyelesaikan permasalahan optimisasi yang telah diformulasikan ke bentuk dua fungsi obyektif berbasis analisis modal. Teknik komputasi ini terbukti secara efektif menggeser *eigenvalue* penyebab LFO ke area yang lebih stabil dan mengubah nilai rasio redaman awal ke nilai rasio redaman yang dipilih pada fungsi *fitness*. Sinyal global yang dimanfaatkan sebagai sinyal kendali pada PSS adalah sinyal selisih perubahan kecepatan rotor generator lokal dengan perubahan kecepatan rotor generator tetangga di area yang berbeda. Pemasangan

pengendali PSS pada sistem tenaga multimesin dengan memanfaatkan dua sinyal kendali berupa sinyal lokal dan global memiliki unjuk kerja pengendalian yang lebih baik daripada PSS yang hanya memanfaatkan sinyal lokal saja. Hal ini ditunjukkan dengan skenario sistem dengan PSS sinyal global memiliki nilai rasio redaman tertinggi, *settling time* tercepat dan *overshoot* yang terendah dari dua skenario lainnya. Masukkan faktor ketidakpastian pada model Phillips-Heffron untuk sistem tenaga multimesin dan jenis sinyal global yang lain seperti *tie-line* aliran daya aktif dapat dikembangkan lebih lanjut untuk studi yang akan datang.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang sudah membantu dan memberikan donasi, bimbingan dan dukungan selama pelaksanaan penelitian.

Referensi

- [1] Aboul-Ela ME, Fouad A A, McCalley JD, Sallam AA. Damping controller design for power system oscillations using global signals. *IEEE Trans. on Power Systems*. 1996; 11(2): 767-773.
- [2] Mohammad MMP. Sinyal Global Untuk Kendali Optimal Berbasis Nature-Inspired Metaheuristic Algorithm Pada Sistem Multi Mesin Dengan GUPFC. M.Eng Thesis. Yogyakarta, Indonesia: Universitas Gadjah Mada; 2015.
- [3] Abdel-Magid YL, Abido MA. Optimal Multi-objective Design of Robust Power System Stabilizers Using Genetic Algorithms. *IEEE Trans on Power Systems*. 2003; 18(3): 1125-1132.
- [4] Sasongko PH. Dynamic Modeling and Damping Function of GUPFC in Multimachine Power System. *IPTEK, The Journal for Technology and Science*. 2011; 22 (4): 205-213.

- [5] David BF. *Evolutionary Computation Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*. New York: IEEE Press. 1995.
- [6] Abido MA. *Particle Swarm Optimization for Multi-Machine Power System Stabilizer Design*. Proceedings of IEEE PES Summer Meeting. Vancouver, BC. 2001; 3: 1346-1351.
- [7] Jalilvand A, Safari A, Aghmasheh R. *Design of State Feedback Stabilizer for Multi-Machine Power System Using PSO Algorithm*. Proc. Of the 12th IEEE Intrnal Multi-topic Conf. Karachi. 2008; 17-33.
- [8] Yao-nan Y. *Electric Power System Dynamics*. New York: Academic Press. 1983.
- [9] Yao-nan Y and Moussa HAM. *Optimal Stabilization of A Multi-Machine System*. in The IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing. Portland, Ore. 1971; PAS-91(3): 18-23.
- [10] Yao-nan Y, El-Sharkawi MA. Estimation of External Dynamic Equivalents of a Thirteen-Machine System. *IEEE Trans. Power App. Syst.* 1981; PAS-100(3): 1324-1332.
- [11] Sauer PW, Pai MA. *Power System Dynamics and Stability*. New Jersey: Prentice Hall, Inc. 1998: 270-272.
- [12] Andrea AZ. *Power System Stabilizers for The Synchronous Generator Tuning and Performance Evaluation*. M.Sc Thesis. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology; 2013.
- [13] Wang HF. Application of Modelling UPFC into Multi-Machine Power Systems. *IEE Proc Gener. Transm. Distrib.* 1999; 146(3): 306-312.

Lampiran

Parameter-parameter dari test system 3-Mesin 4-Bus (dalam pu kecuali jika diindikasikan)

Generator: (I) $H_1 = 11.8$ dtk; $x_{d1} = 0.1675$; $x'_{d1} = 0.0392$; $D_1 = 0$; $x_{q1} = 0.1675$; $T'_{d01} = 7.5$ dtk; (II) $H_2 = 5.9$ dtk; $x_{d2} = 0.1675$; $x'_{d2} = 0.0392$; $D_2 = 0$; $x_{q2} = 0.1675$; $T'_{d02} = 7.5$ dtk; (III) $H_3 = 11.8$ dtk; $x_{d3} = 0.1715$; $x'_{d3} = 0.0208$; $D_3 = 0$; $x_{q3} = 0.1023$; $T'_{d03} = 7.5$ dtk;

Sistem Eksitasi: $K_{A1} = 20$; $T_{A1} = 0.01$; $K_{A2} = 20$; $T_{A2} = 0.2$; $K_{A3} = 20$; $T_{A3} = 0.01$;

Transformator: $Z_{12} = j0.03$

Saluran Transmisi: $Z_{13} = j1.2$; $Z_{23} = j0.3$; $Z_{14} = j0.4$; $L_3 = 1.5 + j0.5$

Kondisi Operasi: $V_{1t} = 1.0 \angle 9^\circ$; $V_{2t} = 1.0 \angle 5^\circ$; $V_{3t} = 1.0 \angle 0^\circ$; $P = 0.8$; $Q = 0.15$; $V_t = 1.032$;