

Implementasi Algoritma PSO untuk Perancangan dan Koordinasi Peredam Osilasi di Sistem Tenaga Listrik dengan UPFC

Sasongko Pramono Hadi¹

Abstract— This paper presents an effective design and coordination of controllers in power system equipped with UPFC. Each controller produce different supplementary signals, the power system stabilizer PSS signal for machine and the power oscillation damping POD signal for UPFC. A single stage lead-lag compensator scheme was considered in the PSS and POD structure. A new computational approach was proposed using PSO algorithm to determine simultaneously the parameter controllers for both PSS and POD. Pole assignment technique was proposed in controller parameter design, the dominant pole should be assigned to locate close to threshold -0.1 . The controller performances were investigated by using 0.2 pu additional load to power system. The simulation results show that both PSS and UPFC POD controller simultaneously present a positive interaction. PSS and POD could enhance dynamic responses performance. The dominant eigenvalues shift and approach their real part threshold. The controllers could give a better rotor angle response, only 4.5 s settling time and the first swing overshoot reduced to 23.38% .

Intisari— Paper ini menyajikan cara efektif perancangan dan koordinasi peredam di sistem tenaga listrik yang dilengkapi dengan UPFC. Masing-masing peredam menghasilkan sinyal tambahan, sinyal peredam dihasilkan dari PSS masuk ke sistem eksitasi, sinyal tambahan hasil dari POD masuk ke UPFC. Struktur kompensator *lead-lag* satu tingkat digunakan sebagai peredam. Pendekatan baru dalam teknik komputasi dengan bantuan algoritma PSO diusulkan untuk menentukan secara simultan parameter peredam, baik parameter PSS maupun POD. Teknik perancangan peredam berbasis pada *pole assignment*, kutub sistem diarahkan akan berada sedekat mungkin ke nilai ambang -0.1 . Unjuk kerja peredam diuji pada sistem saat sistem mengalami kenaikan beban 0.2 pu. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PSS dan POD dapat berinteraksi secara positif. PSS dan POD dapat meningkatkan kestabilan sistem. Kutub dominan dapat mendekati ambang lokasi di sumbu riil negatif. Peredam dapat memberi respons sistem yang lebih baik, ditandai dengan memendeknya *settling time* menjadi 4.5 detik dan berkurangnya simpangan ayunan pertama menjadi hanya 23.38% .

Kata Kunci— UPFC, SMIB, power oscillation damping, power system stabilizer, PSO, pole assignment

I. PENDAHULUAN

Unified power flow control (UPFC) merupakan salah satu jenis flexible AC transmission system (FACTS) yang

dipasang di sistem jaringan tenaga listrik. Peralatan ini memiliki fungsi utama sebagai pengatur aliran beban, khususnya pemanfaatan kapasitas jaringan agar berfungsi optimal [1]. Dalam perkembangannya, UPFC ternyata memiliki peran tambahan sebagai peredaman osilasi dan perbaikan stabilitas sistem [2].

Fungsi peredaman osilasi di sistem tenaga sebagai tanggapan pada perubahan yang terjadi terutama di sisi beban, pada umumnya dilakukan di mesin melalui *power system stabilizer* (PSS). PSS menghasilkan sinyal tambahan yang diumpankan ke sistem eksitasi mesin. Dengan terpasangnya peralatan tambahan UPFC, karakteristik sistem menjadi berubah, parameter kelistrikan berubah nilainya, terutama reaktans. Untuk dapat mempertahankan kemampuan sistem dalam menanggapi perubahan beban, sistem dengan peralatan tambahan UPFC harus dilengkapi dengan peredam khusus, lazim disebut sebagai *power oscillation damping* (POD). Peredam ini menghasilkan sinyal tambahan, seperti halnya sinyal tambahan di PSS, diumpan ke rangkaian kendali UPFC [2], [3].

Berbagai teknik perancangan peredam PSS dan/atau POD telah dikembangkan dan hasilnya sungguh nyata dalam perbaikan tingkat stabilitas sistem. Teknik kompensasi dengan struktur *lead-lag* atau *proportional integral derivative* PID telah banyak digunakan [4] - [8]. Panda, dkk dan Qiang [4], [9] telah melakukan penelitian dan membandingkan antara kompensasi *lead-lag* dan PID, hasilnya adalah *lead-lag* lebih efektif dalam meredam osilasi yang terjadi pada berbagai gangguan. Studi lain [5] menunjukkan pula efektifitas *lead-lag* dalam menanggapi gangguan tanpa menyebabkan sistem keluar dari kecepatan sinkronnya. Dengan struktur kendali tersebut, berbagai teknik penentuan nilai parameter peredam telah dipakai. Teknik konvensional, dengan asas fase minimal, sangat populer dilakukan untuk menghitung nilai parameter ini. Teknik berbasis pada *eigenvalue assignment*, *mathematical programming*, teknik optimisasi secara numeris, telah digunakan pula di beberapa paper terdahulu [1]-[3],[10]. Beban komputasi menjadi alasan utama untuk melakukan terobosan perancangan yang lebih lanjut.

Akhir-akhir ini, metode heuristik, khususnya algoritma genetika (GA) banyak dipilih sebagai metode untuk menghitung parameter peredam [4],[9]. Metode ini dapat memberikan hasil yang lebih baik, dimungkinkan memperoleh nilai optimum global, meskipun kadang-kadang hasilnya kurang konsisten. Metode lain adalah metode *particle swarm optimization* (PSO) yang telah mulai digunakan dalam perancangan peredam untuk PSS dan POD di sistem yang dilengkapi UPFC [5]. Meskipun hasilnya telah menunjukkan peningkatan yang signifikan, peredam yang digunakan masih terbatas pada *lead-lag* sederhana dan

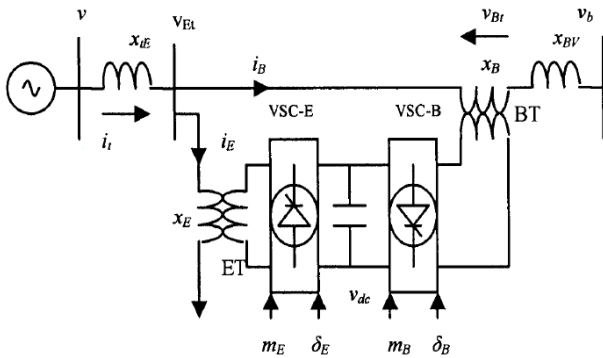
¹ Dosen, Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA (telp: 0274-552305; fax: 0274-552305; e-mail: sasongko@te.ugm.ac.id)

perhitungan parameter PSS dan POD dilakukan secara terpisah.

Paper ini menyajikan teknik perancangan peredam yang lebih komprehensif, yaitu proses perhitungan seluruh parameter dilakukan secara simultan. Perhitungan parameter peredam dilaksanakan dengan algoritma PSO, perhitungan simultan menjamin adanya koordinasi antara PSS dan POD. Teknik ini disimulasikan ke sistem tenaga listrik mesin tunggal bus tak berhingga yang dilengkapi dengan UPFC.

II. MODEL SISTEM TENAGA LISTRIK DENGAN UPFC

Gbr. 1 adalah rangkaian sistem tenaga listrik dengan mesin tunggal terhubung ke bus tak berhingga, *single machine infinite bus* (SIMB), yang dilengkapi dengan UPFC. Sebuah transformator eksitasi paralel dan VSC E, sebuah transformator *boosting* seri di saluran transmisi dilengkapi dengan VSC B, dan sebuah DC link capacitor adalah bentuk dasar sebuah UPFC. Dari Gbr. 1, rasio modulasi amplitudo m_E dan m_B , dan sudut fase δ_E dan δ_B adalah sinyal kendali UPFC.



Gbr. 1 SIMB dilengkapi dengan UPFC

Model linear sistem dapat diturunkan dari model nonlinear mesin, saluran transmisi dan UPFC. Tinjauan dinamika sistem karena perubahan beban dengan intensitas kecil, dapat menggunakan anggapan bahwa resistans dalam dari generator dan reaktans sub-transien dapat diabaikan [11], [12].

Model linear dinamika mesin disajikan dalam bentuk persamaan peubah keadaan, dibangun dari sebuah sistem persamaan diferensial orde satu dari sistem seperti tertera di Gbr.1. Sistem persamaan dapat dinyatakan dalam bentuk matriks persamaan peubah keadaan, dengan vektor peubah keadaan x mengandung 5 peubah: $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, ΔE_q , ΔE_{fd} , ΔV_{dc} , dan vector masukan u mengandung 4 sinyal: Δm_E , $\Delta\delta_E$, Δm_B , $\Delta\delta_B$, persamaan keadaannya:

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{1}$$

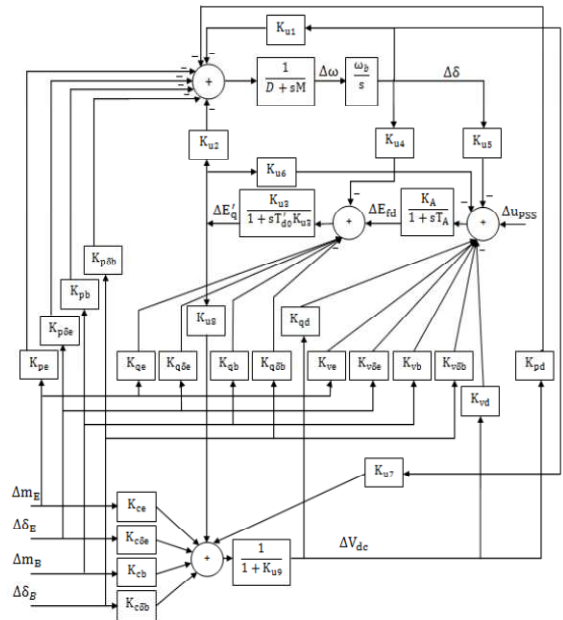
Dengan matriks A adalah:

$$\begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ -M^{-1}K_{u1} & -M^{-1}D & -M^{-1}K_{u2} & 0 & -M^{-1}K_{pd} \\ -T'_{d0}{}^{-1}K_{u4} & 0 & -T'_{d0}{}^{-1}K_{u3} & T'_{d0}{}^{-1} & -T'_{d0}{}^{-1}K_{qd} \\ -T_A{}^{-1}K_A K_{u5} & 0 & -T_A{}^{-1}K_A K_{u6} & -T_A{}^{-1} & -T_A{}^{-1}K_A K_{vd} \\ K_{u7} & 0 & K_{u8} & 0 & -K_{u9} \end{bmatrix}$$

dan matriks B adalah:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -M^{-1}K_{pe} & -M^{-1}K_{p\delta e} & -M^{-1}K_{pb} & -M^{-1}K_{p\delta b} \\ -T'_{d0}{}^{-1}K_{qe} & -T'_{d0}{}^{-1}K_{q\delta e} & -T'_{d0}{}^{-1}K_{qb} & -T'_{d0}{}^{-1}K_{q\delta b} \\ -T_A{}^{-1}K_A K_{ve} & -T_A{}^{-1}K_A K_{v\delta e} & -T_A{}^{-1}K_A K_{vb} & -T_A{}^{-1}K_A K_{v\delta b} \\ K_{ce} & K_{c\delta e} & K_{cb} & K_{c\delta b} \end{bmatrix}$$

Gbr. 2 berikut adalah model sistem tenaga listrik yang dilengkapi dengan UPFC.



Gbr. 2 Model Phillips-Heffron dari SIMB dengan UPFC.

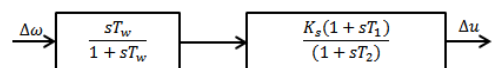
K_7, K_8, K_9 adalah parameter yang terkait dengan UPFC, khususnya menggambarkan dinamika bagian *DC link*. Tanggapan sistem dengan UPFC ini terhadap perubahan beban pada umumnya masih kurang baik, bahkan cenderung berkurang stabilitasnya. Dibutuhkan sinyal peredam untuk meningkatkan stabilitas.

III. PERANCANGAN PEREDAM

A. Struktur Peredam

Peningkatan stabilitas sistem akan dilakukan melalui penambahan PSS di mesin dan POD di UPFC. Sinyal umpan balik adalah deviasi kecepatan putar rotor generator $\Delta\omega$, digunakan sebagai masukan ke PSS dan POD. Keluaran PSS (Δu_{PSS}) masuk ke sistem eksitasi (sebagai *excitation system stabilizer ESS*) dan keluaran POD ($\Delta m_E, \Delta m_B, \Delta\delta_E, \Delta\delta_B$) adalah sinyal tambahan yang masuk ke UPFC.

Struktur peredam adalah rangkaian *lead-lag* satu tingkat yang lazim digunakan di sistem tenaga [2], [3], [5], [11], seperti berikut:



Gbr. 3 Kompensator *lead-lag* satu tingkat

Rangkaian *wash out* digunakan untuk mengeliminasi bias *steady state* pada keluaran peredam, sehingga hanya sinyal gangguan saja yang diolah oleh sistem. *Lead-lag compensation* berfungsi untuk memberikan kompensasi sudut, bertujuan untuk membuat sudut fasa dari sistem menjadi atau mendekati *unity phase* sehingga respon sistem menjadi lebih baik. Selain dituntut mampu memberikan kompensasi fasa yang sesuai, PSS dan POD juga harus mampu memberikan kompensasi dengan magnitudo yang sesuai, direpresentasikan dengan K_{PSS} dan K_{POD} .

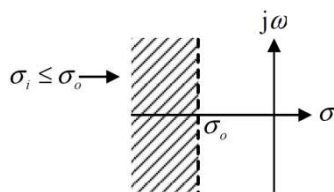
Perancangan PSS dilakukan simultan dengan perancangan 4 POD, keberadaan peredam ini ke dalam model sistem akan memunculkan peubah keadaan baru, PSS dua buah dan masing-masing POD menambah 2 peubah, sehingga matriks sistem lengkap dengan PSS dan POD menjadi berdimensi 15x15. Model peubah keadaan sistem secara lengkap tertera di Gbr. 4.

B. Parameter Peredam dan Pole Assignment

Jumlah parameter yang harus dicari nilainya dari sebuah peredam PSS dan 4 buah peredam POD dengan struktur kompensator *lead-lag* adalah 15 buah, setiap peredam mengandung sebuah pengali dan 2 buah konstanta waktu. Dengan peredam POD terpisah satu sama lain untuk setiap masukan UPFC (ada 4 buah) memungkinkan nilai parameter masing-masing POD berbeda, dan hal ini menunjukkan bahwa peran sinyal masukan memang harus dibedakan dalam memberi kontribusi peredaman.

Konsep peredaman yang diusulkan di paper ini adalah terpilihnya parameter peredam yang membuat stabilitas sistem meningkat, bila dikaitkan dengan tata-letak kutub adalah terjaminnya letak kutub sistem di area sebelah kiri sumbu imajiner bidang s. Jadi, teknik peletakan kutub (*pole assignment*) yang akan diterapkan di penelitian ini adalah penentuan sinyal tambahan oleh PSS dan POD yang membuat kutub sistem menjadi berada di tempat tertentu, yaitu di area yang ditentukan terlebih dahulu. Hanya kutub yang dominan saja yang harus diletakkan ke area yang ditetapkan, sementara kutub yang tidak atau kurang dominan dibiarkan, tidak mendapat perlakuan.

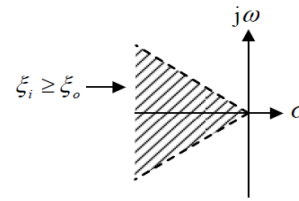
Berikut adalah tempat kedudukan kutub yang diinginkan [2], [5], [13], yaitu komponen riil kutub harus dibawa sedekat mungkin ke *threshold* tertentu:



Gbr. 5 Area peletakan kutub stabil

Setiap kutub sistem yang (semula) dominan harus diletakkan di area berarsir ($\sigma_i \leq \sigma_o$), nilai *threshold* σ_o disesuaikan dengan simpangan yang diperkenankan. Terkait dengan tingkat peredaman, masing-masing kutub

dominan harus dibawa ke area dengan koefisien peredaman $\xi_i \geq \xi_o$, seperti tertera berikut:



Gbr. 6 Area peletakan koefisien peredaman

Upaya penempatan tersebut, dapat dinyatakan melalui ungkapan berikut:

Tentukan nilai parameter PSS dan POD sedemikian rupa sehingga fungsi:

$$J_1 = \sum_{\sigma_i \geq \sigma_o} (\sigma_o - \sigma_i)^2 \tag{2}$$

dan

$$J_2 = \sum_{\zeta_i \leq \zeta_o} (\zeta_o - \zeta_i)^2 \tag{3}$$

minimum. Fungsi di atas berbentuk fungsi yang tidak dapat diturunkan langsung ke peubah yang mewakili nilai parameter peredam (*non-differentiable*), pendekatan penyelesaian numeris menjadi pilihan. Pendekatan yang akan diusulkan adalah pendekatan heuristik, dengan pertimbangan bahwa fungsi di atas adalah fungsi tidak eksplisit dan tidak terstruktur. Metode heuristik yang diusulkan adalah metode PSO.

C. Algoritma PSO

Particle swarm optimization (PSO) merupakan metode optimisasi yang berbasis populasi seperti *genetic algorithm* (GA). PSO didasarkan pada perilaku sebuah kawanan burung, dimana perilaku sosial terdiri dari tindakan individu dan pengaruh individu – individu lain dalam suatu kelompok. PSO memiliki kemampuan yang baik untuk memecahkan persoalan yang memiliki karakteristik *nonlinear* dan *nondifferentiability*, *multiple optima*, dimensi besar melalui adaptasi yang diturunkan dari teori psikologi sosial.

Proses inisialisasi PSO dimulai dengan populasi acak yang dinamakan partikel, setiap partikel pada PSO memiliki 2 nilai, yaitu kecepatan dan posisi. Kecepatan partikel selalu berubah sesuai dengan pengalaman partikel itu sendiri dan juga interaksi dengan partikel lainnya. Oleh karena itu, partikel – partikel akan mempunyai solusi semakin baik dalam daerah proses pencariannya. Algoritma PSO yang original dapat dijelaskan dengan persamaan berikut [5],[14] :

$$v_{i,m}^{(t+1)} = v_{i,m}^{(t)} + c_1 \times R \times (pbest_{i,m} - x_{i,m}^{(t)}) + c_2 \times R \times (gbest_m - x_{i,m}^{(t)}) \tag{4}$$

$$x_{i,m}^{(t+1)} = x_{i,m}^{(t)} + v_{i,m}^{(t+1)} \tag{5}$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$m = 1, 2, \dots, d$$

dengan :

- n = jumlah partikel
- d = dimensi
- t = penunjuk iterasi
- $v_{i,m}^{(t)}$ = kecepatan partikel ke-i pada iterasi ke-t
- c_1, c_2 = konstanta akselerasi (*learning rate*)
- R = bilangan random (0-1)
- $x_{i,m}^{(t)}$ = posisi saat ini dari partikel ke-i pada iterasi ke-t
- $Pbest$ = posisi terbaik sebelumnya dari partikel ke-i
- $gbest$ = partikel terbaik diantara semua partikel dalam urutan suatu kelompok atau populasi

Modifikasi terhadap algoritma PSO original dapat dilakukan untuk mengendalikan konvergensi partikel dengan memasukan parameter *inertia weighting*, w , pada persamaan PSO [5,14], sehingga persamaannya menjadi :

$$v_{i,m}^{(t+1)} = w \times v_{i,m}^{(t)} + c_1 \times R \times (pbest_{i,m} - x_{i,m}^{(t)}) + c_2 \times R \times (gbest_m - x_{i,m}^{(t)}) \tag{6}$$

dengan :

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \times iter$$

- w_{max} = *initial inertia weight*
- w_{min} = *final inertia weight*
- $iter$ = iterasi berjalan
- $iter_{max}$ = jumlah iterasi maksimal

Algoritma PSO dapat dituliskan :

1. Bangkitkan partikel atau populasi awal secara acak.
2. Hitung nilai fungsi *fitness*.
3. Bandingkan nilai *fitness* dengan *pbest*.
4. Identifikasi partikel – partikel lain yang mempunyai *pbest*, jika nilai *pbest* lebih besar dari *gbest*, maka set *gbest* sama dengan *pbest*.
5. *Update* nilai kecepatan dan posisi suatu partikel.
6. Ulangi langkah 2 sampai kriteria telah cocok (mempunyai *fitness* yang optimum atau jumlah iterasi telah tercapai).

IV. HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

A. Sistem Tenaga Listrik

Model sistem tenaga listrik yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *single machine infinite bus*, dengan UPFC terpasang seperti di Gbr. no 1, data sistem sebagai berikut:

Generator dan sistem eksitasi :

$$H = 4.0 \text{ s}, T_{d0} = 4.044 \text{ s}, D = 0, x_d = 1.0 \text{ pu}, x'_d = 0.3 \text{ pu}, x_q = 0.6 \text{ pu}, f = 60 \text{ Hz}, K_A = 100 \text{ dan } T_A = 0.01 \text{ s}$$

Parameter saluran transmisi

$$V_b = 1.0 \text{ pu}, \alpha = 0^0, X_{BV} = 0.3 \text{ pu}, X_{TE} = 0.1 \text{ pu}$$

Parameter UPFC

$$m_E = 0.56 \text{ pu}, \delta_E = 270^0, m_B = 0.56 \text{ pu}, \delta_B = 270^0, X_E = 0.1 \text{ pu}, X_B = 0.1 \text{ pu}, C_{dc} = 1.0 \text{ pu dan } V_{dc} = 0.49 \text{ pu}$$

Kondisi operasi 0.8 pu, $V_t = 1.0 \text{ pu}$

Letak awal dari kutub sistem tanpa UPFC tertera di Table I berikut ini:

TABEL I
LETAK KUTUB MESIN

no	Peubah	Eigenvalue
1	Delta	0.0032 + 3.8608i
2	Omega	0.0032 - 3.8608i
3	Eq	-50.189 +32.575i
4	Efd	-50.189 -32.575i

Nampak bahwa ada 2 kutub yang dominan, kutub ke 1 dan ke 2 dan berpasangan *conjugate*, memiliki komponen riil positif, berada di kanan sumbu imajiner bidang s. Perancangan peredam PSS dan POD dilakukan berbasis teknik kendali modal, artinya penambahan sinyal kendali pada mesin dan UPFC harus dapat membuat kutub dominan tersebut pindah atau bergeser ke area tertentu, yaitu area stabil di kanan sumbu imajiner. Area dimaksud adalah area di sebelah kiri atau di sekitar *threshold* $\sigma_o = -0.1$.

B. Parameter Peredam

Prosedur perhitungan parameter PSS dan POD menggunakan PSO dilaksanakan dengan menggabungkan matriks B ke dalam matriks A, dijumpai oleh peubah kendali yang dinyatakan sebagai fungsi deviasi kecepatan $\Delta\omega$. Dengan penggabungan ini, didapat matriks gabungan yang didalamnya terdapat parameter yang akan dihitung, yaitu: T_1, T_2 , dan K, baik untuk PSS maupun untuk POD. Tugas PSO adalah mencari nilai optimal dari parameter tersebut agar kutub dominan berada tepat di atau sedekat mungkin dengan σ_o . Untuk mengoptimalkan solusi yang dihasilkan oleh PSO, dipakai dua fungsi obyektif J_1 dan J_2 yang berfungsi sebagai nilai *fitness* dari algoritma PSO. Rentang nilai yang layak untuk parameter seperti yang diusulkan oleh Sauer dan Pai [11], digunakan sebagai nilai batas di program perhitungan (batas atas dan batas bawah). Hasil perhitungan ditabelkan berikut:

TABEL II
HASIL PERHITUNGAN SIMULTAN PARAMETER PEREDAM

peredam	sinyal	K	T_1	T_2
PSS	Δu	2.8052	0.3335	0.0158
	Δm_E	0.1992	0.8104	0.0206
POD	$\Delta \delta_E$	0.3304	0.3076	0.1122
	Δm_b	0.3836	1.4925	0.1007
	$\Delta \delta_b$	0.6272	0.2535	0.0255

Dengan parameter peredam seperti tertera di Tabel II, nampak bahwa dibutuhkan perbesaran (*gain*) yang berbeda untuk peredam mesin dan UPFC. *Gain* POD untuk UPFC berbeda dan lebih kecil dari PSS. Sinyal POD masih akan diperbesar atau diperkecil oleh parameter-parameter lain di

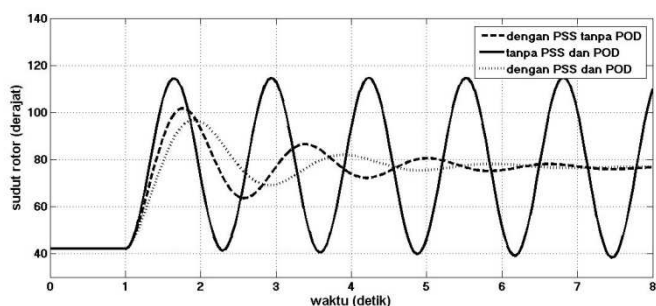
UPFC, sesuai dengan peran masing-masing, yang akhirnya terjadi proporsi yang tepat untuk meredam bersama. Nilai T_1 pada umumnya lebih kecil dari T_2 sesuai dengan nilai yang umum dipakai untuk perancangan peredam [11].

C. Unjuk Kerja Peredam

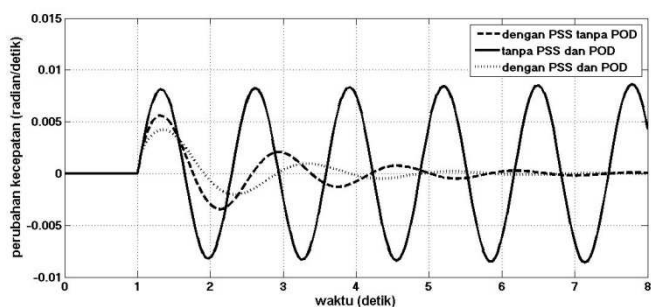
Simulasi dilakukan dengan beberapa skenario untuk menunjukkan efektivitas peredam PSS dan POD. Kondisi operasi pembebanan dipilih sebesar 0.8 pu, hal ini dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja peredam pada operasi normal dan rentang perubahan beban. Tanggapan sistem untuk kenaikan beban 0.2 pu, diamati untuk konfigurasi sistem:

1. dengan UPFC tanpa POD
2. dengan PSS dan UPFC tanpa POD
3. dengan PSS dan UPFC dengan POD

Berikut adalah tanggapan sistem, disajikan dalam bentuk kurva dinamika sudut rotor dan deviasi kecepatan putar rotor. Sudut rotor awal terhitung $\delta = 42.2^0$.



a. sudut rotor



b. deviasi kecepatan

Gbr. 7 Tanggapan terhadap perubahan beban 0.2 pu

Dari Gbr. 7 nampak bahwa sistem yang telah terpasang UPFC tanpa POD tidak teredam, osilasi sudut rotor dan kecepatan putar rotor cenderung semakin besar. Dengan terpasangnya PSS, tanggapan dinamik sistem membaik, osilasi sudut dan deviasi kecepatan teredam dengan *settling time* sebesar 5.4 detik, sudut rotor menuju nilai keseimbangan baru di 77^0 . Ayunan pertama sudut rotor mesin tanpa PSS (49.4% simpangan) sudah berkurang simpangannya menjadi hanya 32.5% saat mesin dilengkapi PSS. Peredaman osilasi semakin nyata dengan ditambahkannya sinyal peredam POD ke UPFC, ayunan pertama dan *settling time* dari sudut rotor semakin berkurang, menjadi 23.38% simpangan dan 4.5 detik *settling time*.

Nampak bahwa PSS dan POD dapat berinteraksi secara positif untuk meredam osilasi dengan lebih efektif.

Peredaman sistem dapat dikarakterisasi melalui analisis tata letak kutub sistem, terkait dengan beberapa konfigurasi sistem, berikut nilai eigenvalue sistem yang mencerminkan letak kutub sistem:

TABEL III
LETAK KUTUB MESIN DAN SISTEM DENGAN UPFC

no	Peubah	Mesin	Dengan UPFC	PSS dan UPFC non POD
1	δ	0.0032 + 3.8608i	0.0068 + 3.8604i	-0.3883 + 2.7330i
2	ω	0.0032 - 3.8608i	0.0068 - 3.8604i	-0.3883 - 2.7330i
3	E_q	-50.189 +32.575i	-50.189 +32.5758i	-33.2528 +23.2671i
4	E_{fd}	-50.189 - 32.575i	-50.189 - 32.5758i	-33.2528 - 23.2671i
5	Vdc		-0.00339	-0.00339
6	VPSS1			-0.1004
7	VPSS2			-43.3176

Saat sistem beroperasi hanya mengandalkan AVR tanpa sinyal tambahan dari PSS menunjukkan adanya sifat ketidakstabilan, ada 2 kutub dengan komponen riil bernilai positif, kutub state δ dan ω , seperti tertera di Tabel III. Kutub ini menjadi dominan, artinya menjadi penentu sifat stabilitas sistem, dan berarti pula sebagai kutub yang harus dipindah letaknya ke daerah yang menjamin kestabilan yang tinggi. Dengan penambahan UPFC, dua kutub tersebut semakin besar nilai positif dari komponen riilnya. Bila dikaitkan dengan tanggapan sistem terhadap waktu, seperti tertera di Gbr. 7, nampak bahwa osilasi sudut rotor dan deviasi kecepatan putar tidak teredam, hal ini menguatkan argumentasi ketidakstabilan. Dengan adanya pemasangan PSS, posisi kutub sistem menjadi lebih baik, seluruh kutub sistem berada di sisi kiri sumbu imajiner bidang s. Hal ini sejalan dengan teredamnya osilasi seperti tertera di Gbr. 7.

Sinyal tambahan PSS untuk mesin dan 4 sinyal POD untuk UPFC dirancang agar kelima sinyal ini mampu membawa kutub dominan sistem menjadi berada di sekitar *threshold* $\sigma_o = -0.1$ dan $\xi_o = 0.2$, berikut adalah nilai akhir peletakan kutub:

TABEL IV
LETAK KUTUB SISTEM DENGAN DAN TANPA UPFC

no	Peubah	PSS dan UPFC non POD	PSS dan UPFC POD
1	δ	-0.3883 + 2.7330i	-0.0821+ 3.7695i
2	ω	-0.3883 - 2.7330i	-0.0821 - 3.7695i
3	E_q	-33.2528 +23.2671i	-49.9336 +32.2447i
4	E_{fd}	-33.2528 -23.2671i	-49.9336 -32.2447i
5	Vdc	-0.00339	-0.0034
6	VPSS1	-0.1004	-0.056
7	VPSS2	-43.3176	-9.9048
8	me1		-0.1000
9	me2		-8.6684
10	de1		-0.1000
11	de2		-16.3593

12	mb1		-0.1000
13	mb2		-8.0427
14	db1		-0.1000
15	db2		-84.7368

Nampak bahwa upaya untuk menempatkan kutub dominan berhasil (kutub δ dan ω nilai riilnya mendekati -0.1, dan koefisien peredaman 0.022), upaya maksimal ini telah dilakukan melalui proses optimisasi dengan algoritma PSO. Fungsi sasaran J_1 dan J_2 (persamaan 2 dan 3) yang mencerminkan jumlah kuadrat jarak komponen riil dan koefisien peredaman ke masing-masing nilai *threshold*-nya, telah tercapai, meskipun tidak semua kutub dapat tepat sama dengan nilai *threshold*-nya. Nilai kutub baru terutama dari POD memiliki komponen riil sebesar *threshold* -0.1.

Tanggapan sistem yang dilengkapi dengan PSS dan POD teredam dengan efektif (Gbr. 7), sesuai dengan tata letak kutubnya yang seluruhnya telah berada di kiri sumbu imajiner (Tabel IV). Dapat diketahui pula bahwa kedua peredam PSS dan POD telah berfungsi saling melengkapi, karena parameter kedua peredam telah dihitung secara simultan oleh algoritma PSO.

Parameter algoritma PSO yang dipakai $w_{max} = 0.9$ dan $w_{min} = 0.4$, C_1 dan $C_2 = 2$, $N = 50$, iterasi maksimum 250, toleransi 1×10^{-8} . Simulasi yang telah dilakukan berulang-ulang menunjukkan bahwa solusi optimal tidak tunggal, dari karakteristik statistiknya dapat dipilih satu nilai sebagai solusi yang obyektif, seperti tertera di Tabel IV.

V. KESIMPULAN

Peredam POD untuk UPFC dan PSS untuk mesin dapat dikoordinasikan untuk memperbaiki stabilitas sistem. Algoritma PSO bisa diimplementasikan untuk penentuan parameter peredam PSS dan POD secara simultan.

Pemasangan UPFC pada sistem tenaga listrik berpotensi mengurangi stabilitas sistem. Struktur peredam *lead-lag* satu tingkat sudah mampu menghasilkan sinyal peredaman yang efektif. Parameter peredam PSS dan POD dihitung dengan bantuan algoritma PSO, metode *pole assignment* telah diimplementasikan, kutub sistem terutama yang dominan dapat ditempatkan di area yang lebih stabil, komponen riil kutub berhasil mendekat ke *threshold* -0.1, tetapi peredaman hanya berhasil ke 0.022.

Peningkatan peredaman telah diperoleh secara nyata, dari sistem tak teredam menjadi sistem yang memiliki *settling time* 4.5 detik. Simpangan pertama ayunan sudut rotor berkurang dari semula 49.4% menjadi hanya 23.38 %.

REFERENSI

- [1] C.R. Makkar, and L. Dewan, "Transient Stability Enhancement using Robust FACTS Controllers A Brief Tour", *Canadian Journal on Electrical & Electronics Engineering*, Vol. 1, No. 7, pp. 150-154, 2010.
- [2] Y. Hashemi, R. Kazemzadeh, M.R. Azizian, and A. Sadeghi, "Simultaneous Coordinated Design of Two-Level UPFC Damping Controller and PSS to Damp Oscillation in Multi-Machine Power System", *26th International Power System Conference*, Teheran, 2011, pp. 1-13.
- [3] S.N. Dhurvey, and V.K. Chandrakar, "Performance Comparison of UPFC in Co-ordination with Optimized POD and PSS on Damping of Power System Oscillations", *WSEAS Trans on Power System*, Vol. 3, Issue 5, pp. 287-299, 2008.
- [4] Q. Jiang, Z. Zou, Z. Wang, and Y. Cao, "Design of UPFC Controller in Large-Scale Power System Based on Immune Genetic Algorithm", *Trans of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 28, No. 1, pp. 15 - 25, 2006.
- [5] M. Eslami, H. Shareef, A. Mohamed and M. Khajehzadeh, "Design of UPFC Damping Controller Using Modified Particle Swarm Optimization", *International Conference on Power and Energy Systems*, 2012.
- [6] L.H. Hassan, M. Moghavvemi, and H.A.F. Mohamed, "Impact of UPFC-based Damping Controller on Dynamic stability of Iraqi Power Network", *Scientific Research and Essays*, Vol. 6, No. 1, pp. 136-145, 2011.
- [7] A.K. Sahoo, S.S. Dash, and T. Thyagarajan, "An Improved UPFC Control to Enhance Power System Stability", *Modern Applied Science*, Vol 6 No 6, pp. 37 - 47, 2010.
- [8] S. A. Taher, S. Akbari, A. Abdolalipour, and R. Hematti, "Design of Robust Decentralized Control for UPFC Controller Based on Structured Singular Value", *American Journal of Applied Sciences*, 5 (10), pp 1269 - 1280, 2008.
- [9] S. Panda, R.N. Patel, and N.P. Padhy, "Power System Stability Improvement by TCSC Controller Employing a Multi-Objective Genetic Algorithm Approach", *International Journal of Intelligent Systems and Technologies*, Vol. 1, No. 4, pp. 266-273, 2006.
- [10] V. Azbe and R. Mihalic, "Damping of Power System Oscillations with the Application of a GUPFC", *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, 2009.
- [11] P.W. Sauer, and M.A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*, Prentice-hall Inc., New Jersey, 1998.
- [12] P.H. Sasongko, "Dynamic Modeling and Damping Function of GUPFC in Multi-Machine Power System", *The Journal for Technology and Science*, Vol. 22, No. 4, pp. 205-213, November 2011.
- [13] P.H. Sasongko, H.I. Wiennetou, and R.F. Mochamad, "TCSC Power Oscillation Damping and PSS Design Using Genetic Algorithm Modal Optimal Control", *International Journal of Electrical and Computer Sciences*, Vol. 13, No. 1, 2013.
- [14] B. Santosa, "Tutorial Particle Swarm Optimization", *Lecture Note*, 2012.

