

# Perancangan PSS dan POD-LQR Menggunakan PSO pada Sistem Tenaga Listrik Bermesin Tunggal dengan TCSC

Hatta Imaduddin Wiennetou<sup>1</sup>, Sarjiya<sup>2</sup>

**Abstract**— Nowadays sudden change in load could lead to instability in power system. Power system needs to be protected to prevent loss synchronization. Power system stability could be increased by installing power system stabilizer (PSS) and thyristor controlled series capacitor (TCSC). A TCSC increases power system stability with helps from power oscillation damping (POD). The performances of PSS and POD are depended on its controller structure. In this research, lead-lag two stages was proposed as controller structure of PSS, and proposed controller structure for POD is linear quadratic regulator (LQR). The controller parameters of PSS and POD were designed by using particle swarm optimization (PSO). The dynamic and stability of power system with proposed controllers was investigated in single machine infinite bus (SMIB) with 0.2 pu increment in electrical power as disturbance. The main objective of this study is to investigate the effectiveness of damping function of proposed method in three different loads. The simulation results show that proposed controller could increase power system stability and reliable in different loads.

**Intisari**— Pada saat ini, ketidakstabilan sistem tenaga dapat disebabkan oleh perubahan beban secara mendadak ataupun gangguan seperti hubung singkat. Kestabilan sistem tenaga perlu dijaga untuk mencegah lepas sinkronisasi. Kestabilan sistem tenaga dapat ditingkatkan dengan memasang *power system stabilizer* (PSS) dan *thyristor controlled series capacitor* (TCSC). Sebuah TCSC mampu meningkatkan kestabilan sistem tenaga dengan bantuan kendali berupa *power oscillation damping* (POD). Kinerja dari PSS dan POD dipengaruhi oleh struktur kendali peralatan tersebut. Pada penelitian ini, struktur kendali *lead-lag* dua tingkat digunakan pada PSS, sedangkan struktur kendali bagi POD adalah *linear quadratic regulator* (LQR). Parameter kendali PSS dan POD dirancang menggunakan *particle swarm optimization* (PSO). Kendali yang sudah dirancang akan diuji pada model sistem tenaga *single machine infinite bus* (SMIB) dan menggunakan kenaikan daya listrik sebesar 0,2 pu sebagai gangguan. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kemampuan peredaman dari metode yang diusulkan pada tiga kondisi beban yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu meningkatkan kestabilan sistem tenaga dan andal pada tiga kondisi beban yang berbeda.

**Kata Kunci**— SMIB, TCSC, LQR, stabilitas, PSO, PSS.

## I. PENDAHULUAN

Pada saat ini, peralatan berdasarkan elektronika daya semakin berkembang. Salah satunya adalah *flexible*

*alternating current transmission system* (FACTS). Peralatan FACTS memiliki beberapa kemampuan antara lain meningkatkan fleksibilitas operasi, kestabilan sistem, dan pemanfaatan jaringan yang sudah ada [1].

Salah satu jenis FACTS yang sering digunakan adalah *thyristor controlled series capacitor* (TCSC). Sebuah TCSC terdiri dari induktor, kapasitor, dan *bidirectional thyristor*. Beberapa peran TCSC dalam sistem tenaga listrik, yaitu penjadwalan *power flow*, memperbaiki tegangan sistem, membatasi arus hubung singkat, meredam osilasi daya, dan meningkatkan kestabilan transien [2], [3].

Perubahan beban secara tiba-tiba dapat menyebabkan osilasi frekuensi rendah. Jika osilasi ini tidak diredam, osilasi ini dapat berkembang dan menyebabkan lepas sinkronisasi antar generator. Salah satu peralatan yang sering digunakan untuk meredam osilasi frekuensi rendah adalah *power system stabilizer* (PSS). Peredaman yang diberikan oleh PSS terkadang tidak mencukupi. Koordinasi kendali TCSC, yaitu *power oscillation damping* (POD), dan PSS dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan peredaman osilasi frekuensi rendah [2].

Berbagai metode sudah digunakan untuk merancang PSS dan POD. Permasalahan dalam perancangan PSS dan POD adalah menentukan struktur kendali dan parameter kendali. Struktur kendali yang sering digunakan adalah *lead-lag* dan *proportional-integral-differential* (PID). Referensi [4] membandingkan kinerja *lead-lag* dan PID. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur kendali berupa *lead-lag* memberikan kestabilan sistem yang lebih baik. Beberapa penelitian lain juga menunjukkan bahwa metode *lead-lag* memberikan peredaman osilasi dan kestabilan sistem yang lebih baik [2], [5], [6], [7].

Penelitian-penelitian terkait perancangan PSS dan POD menunjukkan bahwa setiap struktur kendali memiliki kemampuan peredaman yang berbeda-beda. Oleh karena itu, untuk meningkatkan peredaman osilasi dapat diterapkan konsep optimisasi berupa *estimator linear optimal*. Perkembangan konsep optimisasi mencapai bentuk optimisasi sistem multivariabel berdasarkan indeks performansi kuadratis untuk kasus-kasus deterministik yang disebut *linear quadratic regulator* (LQR). Metode LQR sudah pernah diterapkan pada peralatan FACTS berupa *unified power flow controller* (UPFC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa LQR dapat diterapkan pada UPFC dan dapat meningkatkan kestabilan sistem tenaga [8], [9]. Kemampuan optimisasi dari LQR ditentukan oleh nilai matriks pembobot yang digunakan [10]. Penentuan nilai matriks pembobot ini memerlukan suatu metode yang tepat, sehingga diperoleh peredaman osilasi terbaik.

Pada umumnya, parameter PSS dan POD dihitung secara konvensional. Akan tetapi, proses perhitungan secara konvensional memiliki beberapa kelemahan, seperti beban komputasi yang tinggi dan waktu komputasi yang lama [6].

<sup>1</sup> Mahasiswa Pascasarjana, Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA (e-mail: hattaimaduddin@gmail.com)

<sup>2</sup> Pengajar, Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA (e-mail: sasongko@te.ugm.ac.id, sarjiya@gadjahmada.edu)

Permasalahan tersebut dapat disiasati menggunakan metode optimisasi heuristik. Ada beberapa metode optimisasi heuristik yang dapat digunakan untuk merancang POD dan PSS. Salah satu metode yang sering digunakan untuk merancang parameter POD dan PSS adalah *particle swarm optimization* (PSO). Beberapa penelitian dilakukan untuk mengetahui kemampuan PSO dalam merancang POD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa POD yang dirancang menggunakan PSO dapat meningkatkan kestabilan sistem tenaga [11], [12].

Penelitian terdahulu mengenai jenis struktur kendali dan metode pencarian parameter optimal kendali yang digunakan, menunjukkan bahwa perancangan PSS dan kendali TCSC selalu menarik untuk dikembangkan dan diteliti. Selain itu, penelitian mengenai perancangan PSS dan kendali TCSC selalu diperlukan untuk semakin meningkatkan kestabilan sistem tenaga. Tujuan utama penelitian ini adalah mengetahui kemampuan peredaman osilasi dari metode yang diusulkan. Struktur kendali *lead-lag* diterapkan pada PSS, sedangkan struktur kendali POD didasarkan pada LQR. Parameter PSS dan POD akan dicari menggunakan metode PSO. Kemampuan peredaman osilasi akan diuji pada model sistem tenaga *single machine infinite bus* (SMIB).

## II. PEMODELAN SISTEM TENAGA DAN DESAIN KENDALI

### A. SMIB dengan TCSC

Model sistem tenaga SMIB dengan TCSC ditunjukkan oleh Gbr. 1. Generator yang digunakan pada SMIB dilengkapi dengan sebuah PSS.  $X_T$  dan  $X_L$  secara berurutan merepresentasikan reaktans trafo dan saluran transmisi. Tegangan terminal generator direpresentasikan dengan  $V_T$ , sedangkan  $V_B$  merepresentasikan tegangan bus tak berhingga.

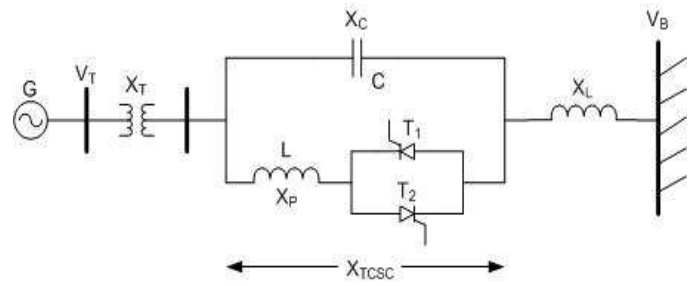
Sebuah TCSC terdiri dari tiga komponen utama, yaitu kapasitor, induktor dan *bidirectional thyristor*.  $X_C$  and  $X_L$  merepresentasikan reaktans kapasitor dan induktor, sedangkan  $T_1$  dan  $T_2$  merepresentasikan *bidirectional thyristor*. Reaktans yang diberikan oleh TCSC dapat bernilai kapasitif maupun induktif. Nilai reaktans yang diberikan bergantung pada sudut konduksi yang diberikan pada *bidirectional thyristor* sesuai dengan persamaan berikut ini [1] :

$$X_{TCSC}(\alpha) = X_C - \frac{X_C^2}{(X_C - X_P)} \frac{(\sigma + \sin \sigma)}{\pi} + \frac{4X_C^2}{(X_C - X_P)(k^2 - 1)} \frac{\cos^2(\frac{\sigma}{2}) [k \tan(\frac{k\sigma}{2}) - \tan(\frac{\sigma}{2})]}{\pi} \quad (1)$$

Model dinamis sistem tenaga yang digunakan dalam penelitian ini akan dikembangkan berdasarkan konfigurasi sistem ini [3].

### B. Model Dinamis Sistem

Model dinamis sistem tenaga dapat diperoleh dari persamaan *non-linear* SMIB dengan TCSC. Persamaan *non-linear* akan dilinearisasi untuk memperoleh model sistem tenaga yang digunakan.



Gbr. 1 Model SMIB dengan TCSC

#### 1) Persamaan Non-linear

Persamaan *non-linear* model SMIB dengan TCSC dapat ditulis sebagai berikut [6] :

$$\dot{\delta} = \omega_b \Delta\omega \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} [P_m - P_e - D\omega] \quad (3)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} [-E'_q + E_{fd}] \quad (4)$$

$$\dot{E}'_{fd} = \frac{K_A}{1 + sT_A} [V_R - V_T] \quad (5)$$

dengan

$$P_e = \frac{E'_q V_B}{X_{d\Sigma'}} \sin \delta - \frac{V_B^2 (X_q - X'_d)}{2X_{d\Sigma'} X_{q\Sigma'}} \sin 2\delta \quad (6)$$

$$E_q = \frac{X_{d\Sigma'} E'_q}{X_{d\Sigma'}} - \frac{(X_d - X'_d)}{X_{d\Sigma'}} V_B \cos \delta \quad (7)$$

$$V_{Td} = \frac{X_q V_B}{X_{q\Sigma'}} \sin \delta \quad (8)$$

$$V_{Tq} = \frac{X_{eff} E'_q}{X_{d\Sigma'}} + \frac{V_B X'_d}{X_{d\Sigma'}} \cos \delta \quad (9)$$

$$V_T = \sqrt{V_{Td}^2 + V_{Tq}^2} \quad (10)$$

$$X_{eff} = X_T + X_L - X_{TCSC}(\alpha) \quad (11)$$

$$X_{d\Sigma'} = X'_d + X_{eff}; X_{q\Sigma'} = X_q + X_{eff} \quad (12)$$

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_{eff} \quad (13)$$

#### 2) Model Terlinearisasi

Desain kendali sistem tenaga seperti PSS dan POD dapat diperoleh dengan melinearisasikan model sistem tenaga. Model sistem tenaga yang dilinearisasi adalah model SMIB dengan TCSC yang direpresentasikan oleh (2) hingga (5). Jika hambatan dalam, proses *sub-transient*, dan fungsi generator diasumsikan bernilai nol, proses linearisasi (2) hingga (5) akan menghasilkan persamaan sistem baru sebagai berikut [6] :

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_b \Delta\omega \quad (14)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{M} [-K_1 \Delta\delta - K_2 \Delta E'_q - K_p \Delta\sigma - D \Delta\omega] \quad (15)$$

$$\Delta \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} [-K_3 \Delta E'_q - K_4 \Delta \delta - K_q \Delta \sigma + \Delta E_{fd}] \quad (16)$$

$$\Delta \dot{E}'_{fd} = \frac{1}{T_A} [-K_A (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_v \Delta \sigma) - \Delta E_{fd}] \quad (17)$$

dengan

$$K_1 = \partial P_e / \partial \delta; K_2 = \partial P_e / \partial E'_q; K_p = \partial P_e / \partial \sigma \quad (18)$$

$$K_4 = \partial E_q / \partial \delta; K_3 = \partial E_q / \partial E'_q; K_q = \partial E_q / \partial \sigma \quad (19)$$

$$K_5 = \partial V_T / \partial \delta; K_6 = \partial V_T / \partial E'_q; K_v = \partial V_T / \partial \sigma \quad (20)$$

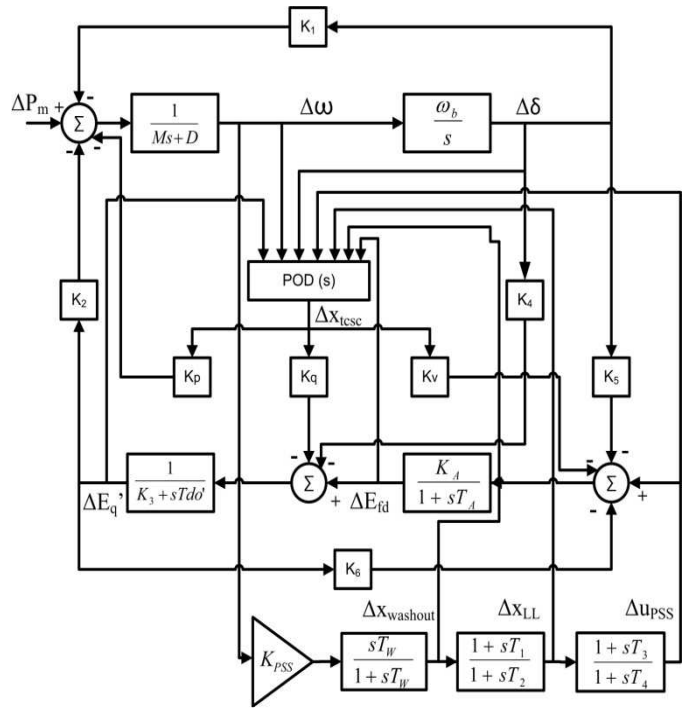
Model terlinearisasi SMIB dan TCSC dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan *state space*. Persamaan *state space* ditulis dalam bentuk matriks. Persamaan *state space* dari model SMIB dengan TCSC diperoleh dari (14) hingga (17) dan hasilnya adalah :

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}'_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ -\frac{K_4}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{K_3}{T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_p}{M} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_q}{T'_{d0}} & 0 \\ \frac{K_A}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_v}{T_A} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{pss} \\ 0 \\ \Delta x_{tcsc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Gbr. 2 menunjukkan blok diagram SMIB dengan metode yang diusulkan. Metode yang diusulkan berbasis LQR. Masukan untuk POD tidak hanya perubahan kecepatan sudut ( $\Delta\omega$ ) saja, tetapi juga perubahan sudut torsi ( $\Delta\delta$ ), tegangan jangkar ( $\Delta E'_q$ ), tegangan dalam ( $\Delta E_{fd}$ ), serta umpan balik dari PSS ( $\Delta x_{washout}$ ,  $\Delta x_{LL}$ ,  $\Delta u_{PSS}$ ).

C. Perancangan Kendali

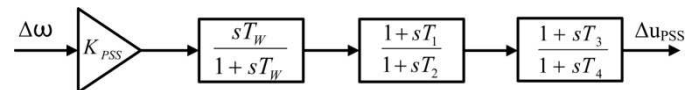
Peningkatan kestabilan sistem dapat dilakukan dengan memasang kendali tambahan untuk eksitasi generator berupa PSS. Perubahan kecepatan sudut generator ( $\Delta\omega$ ) digunakan sebagai masukan PSS, sedangkan keluaran PSS akan menjadi sinyal kendali tambahan untuk sistem eksitasi generator. Struktur kendali POD akan didesain berdasarkan metode LQR. Metode LQR akan memanfaatkan sinyal-sinyal dalam sistem tenaga sebagai masukan kendali. Sinyal-sinyal yang digunakan antara lain perubahan kecepatan sudut ( $\Delta\omega$ ), perubahan sudut torsi ( $\Delta\delta$ ), tegangan jangkar ( $\Delta E'_q$ ), tegangan dalam ( $\Delta E_{fd}$ ), serta umpan balik dari PSS ( $\Delta x_{washout}$ ,  $\Delta x_{LL}$ ,  $\Delta u_{PSS}$ ). Keluaran dari POD akan menjadi sinyal kendali bagi TCSC.



Gbr. 2 Model terlinearisasi SMIB dengan PSS dan POD-LQR

1) Perancangan PSS

Pada studi dinamis sistem tenaga, desain struktur kendali PSS yang sering digunakan lead-lag dan PID [4]. Pada penelitian ini, struktur kendali yang digunakan adalah *leag-lag* dua tingkat seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 3. Struktur kendali lead-lag terdiri dari 3 blok utama, yaitu blok *gain*, *washout*, dan kompensasi fasa dua tingkat. Masukan PSS adalah  $\Delta\omega$ , sedangkan keluaran PSS adalah  $\Delta u_{PSS}$  yang akan menjadi masukan tambahan bagi sistem eksitasi.



Gbr. 3 PSS dua tingkat

Blok *gain* berfungsi untuk menguatkan amplitudo  $\Delta\omega$ . Blok *washout* berperan sebagai *high pass filter*, sehingga sinyal yang diproses hanya sinyal gangguan. Nilai parameter *washout*,  $T_w$ , dipilih 10 s [13]. Blok kompensasi dua tingkat berfungsi untuk mengkompensasi fasa *lead* atau *lag* pada sistem. Nilai parameter *time constant*  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , dan  $T_4$  akan menentukan nilai kompensasi yang dihasilkan. Pada penelitian ini, parameter  $K_{PSS}$  dan *time constant* ditentukan menggunakan metode optimisasi PSO.

2) Perancangan POD

Desain struktur kendali yang sering digunakan untuk POD adalah *lead-lag*. Berdasarkan (21), LQR dapat digunakan untuk merancang desain struktur kendali POD untuk menghasilkan sinyal kendali tambahan [14]. Proses perhitungan untuk mencari parameter LQR dapat ditulis sebagai berikut [14] :

Persamaan sistem tenaga dapat ditulis sebagai persamaan *state space* seperti berikut ini :

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{22}$$

$A$  adalah matriks sistem tenaga,  $x$  adalah *state variable* sistem tenaga,  $B$  adalah matriks kendali, dan  $u$  adalah sinyal kendali. Sinyal kendali  $u$  ditentukan dengan :

$$u = -Kx \tag{23}$$

dengan  $K$  adalah umpan balik *state variable* matriks kendali.  $K$  dicari dengan meminimalkan indeks kinerja  $J$  yang direpresentasikan dalam bentuk kuadratis :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \tag{24}$$

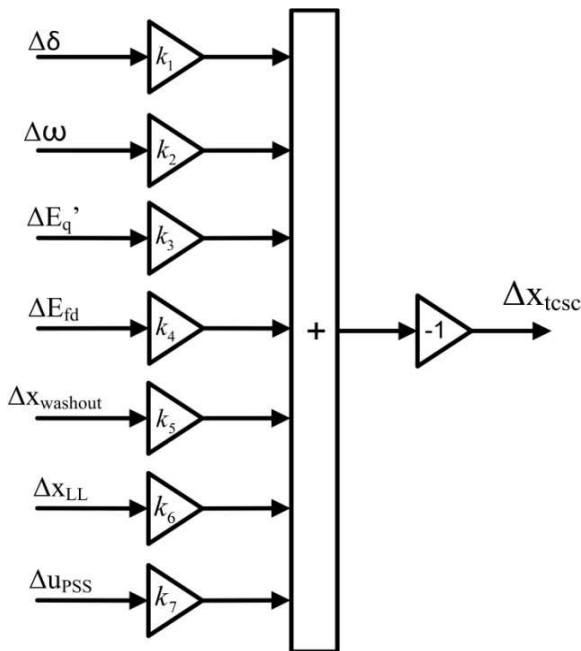
$Q$  dan  $R$  secara berurutan adalah matriks pembobot untuk *state variable* sistem tenaga dan sinyal kendali.  $Q$  dan  $R$  pada sebagian besar pemanfaatan merupakan matriks diagonal. Ukuran matriks  $Q$  adalah  $7 \times 7$  karena masukan untuk POD ada 7. Dengan meminimalkan Hamiltonian  $H$  dan menghubungkannya dengan Lagrange, kendali optimal dapat ditulis sebagai berikut :

$$u = -(R^{-1} B^T P) x \tag{25}$$

dengan  $P$  harus memenuhi persamaan Riccati :

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \tag{26}$$

Kinerja LQR dipengaruhi oleh nilai matriks pembobot  $Q$  dan  $R$  yang digunakan.  $R$  dipilih sebagai matriks diagonal 1 [15]. Berdasarkan (25) dan (26), nilai parameter  $Q$  akan mempengaruhi  $P$ , sehingga nilai  $K$  ( $k_1-k_7$ ) akan berubah. Metode optimisasi PSO digunakan untuk mencari nilai matriks pembobot  $Q$ , sehingga diperoleh sinyal kendali yang optimal. Gbr. 4 menunjukkan kendali TCSC yang didasarkan pada metode LQR.



Gbr. 4 Struktur kendali POD-LQR

Kestabilan sistem tenaga dapat lebih ditingkatkan dengan mengendalikan posisi *eigenvalue* supaya berada di wilayah yang semakin kiri pada bidang  $s$ . Cara ini dapat dilakukan dengan memilih fungsi *fitness* yang digunakan oleh PSO [14].

### III. PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

*Particle swarm optimization* atau PSO merupakan teknik optimisasi yang didasarkan pada perilaku sekelompok burung dalam mencari makanan [3]. Dalam PSO, setiap individu berevolusi melalui kerja sama dan kompetisi antar individu setiap generasinya. Setiap individu menentukan rencana terbangnya berdasarkan pengalaman terbang dirinya serta kawan-kawannya. Setiap individu ini disebut partikel. Partikel ini merupakan representasi solusi dari permasalahan yang ada.

Perilaku kawanan burung ini akan direpresentasikan dalam bentuk 2 dimensi yang dapat dinamakan sebagai dimensi  $D$ . Partikel ke- $i$  dalam PSO direpresentasikan ke dalam vektor  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$ , sedangkan perpindahan partikel direpresentasikan ke dalam vektor  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$ . Posisi terbaik partikel pada generasi sebelumnya disimpan dan dinotasikan sebagai  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})^T$  dan  $p_g$  adalah posisi terbaik salah satu partikel secara keseluruhan dalam kelompok. Untuk mengendalikan pergerakan keseluruhan partikel dalam kelompok, digunakan persamaan berikut ini [11], [12], [16] :

$$v_i^{t+1}(d) = wv_i^t(d) + c_1 rand(p_i^t(d) - x_i^t(d)) + c_2 rand(p_g^t(d) - x_i^t(d)) \tag{27}$$

$$x_i^{t+1}(d) = x_i^t(d) + v_i^{t+1}(d) \tag{28}$$

dengan

$$w = \frac{w_{max} - w_{min}}{it_{max}} it \tag{29}$$

$g$  menunjukkan variabel dalam kelompok dan  $t$  adalah generasi ke- $t$ , maka  $v_i^t(d)$  dan  $x_i^t(d)$  merupakan perpindahan dan posisi partikel ke- $i$  saat ini pada dimensi  $D$ . *Rand* merupakan sebuah angka acak dalam rentang  $[0,1]$ ,  $c_1$  dan  $c_2$  adalah konstanta bernilai positif, disebut konstanta percepatan, sedangkan  $w$  adalah *inertia weight*. Parameter  $w_{max}$  dan  $w_{min}$  secara berurutan adalah batas atas dan bawah *inertia weight*, sedangkan  $it$  adalah generasi saat ini dan  $it_{max}$  adalah jumlah maksimal generasi.

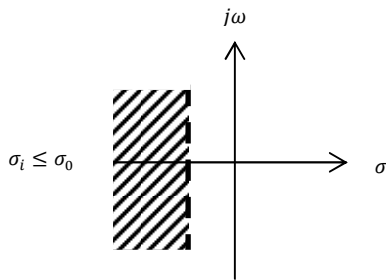
#### 1) Fungsi Fitness PSO

Kinerja PSO dalam menyelesaikan suatu permasalahan dipengaruhi oleh fungsi *fitness* yang digunakan. Suatu sistem tenaga dapat dikatakan lebih stabil saat *eigenvalue* yang dihasilkan bernilai semakin negatif atau berada di wilayah yang semakin kiri pada bidang  $s$ . Fungsi *fitness* yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi untuk menggeser nilai *eigenvalue* sistem tenaga ke wilayah yang lebih stabil.

Fungsi *fitness* yang digunakan, yaitu :

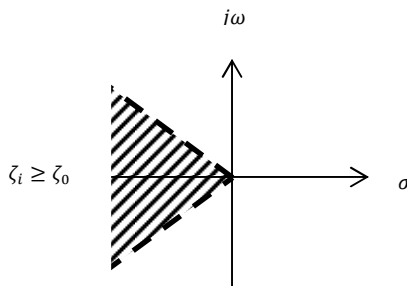
$$J_1 = \sum (\sigma_0 - \sigma_i)^2 \tag{30}$$

$$J_2 = \sum (\xi_0 - \xi_i)^2 \tag{31}$$



Gbr. 5 Wilayah real eigenvalue yang diinginkan

$\sigma_i$  adalah bagian real eigenvalue ke- $i$  dan  $\sigma_0$  merupakan batas minimal eigenvalue yang diinginkan. Fungsi fitness  $J_1$  bertujuan untuk menggeser real eigenvalue yang bernilai kritis (mendekati nilai positif) ke wilayah yang semakin negatif [17]. Gbr. 5 menunjukkan wilayah real eigenvalue yang diinginkan.



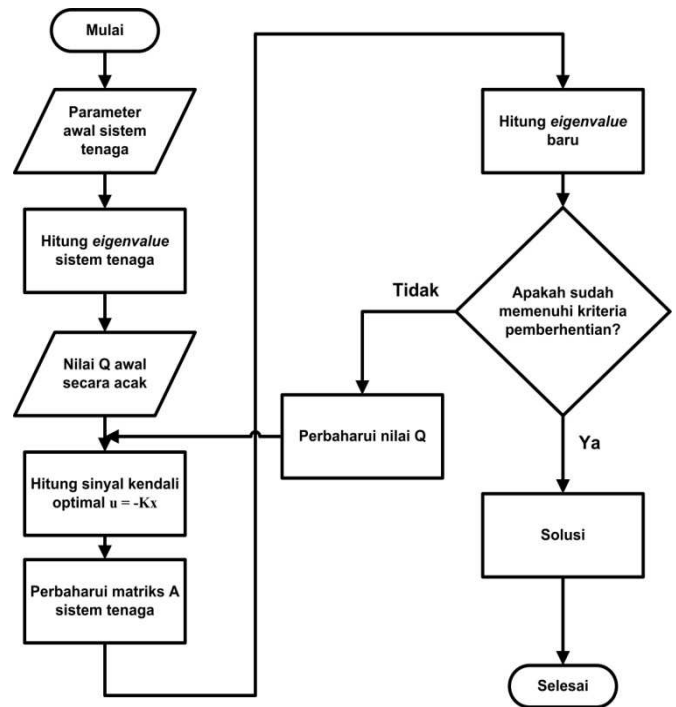
Gbr. 6 Wilayah koefisien peredaman yang diinginkan

$\zeta_i$  adalah representasi rasio peredaman dari eigenvalue ke- $i$ , sedangkan  $\zeta_0$  adalah batas fungsi fitness  $J_2$ . Fungsi fitness  $J_2$  bertujuan untuk menggeser imajiner eigenvalue supaya berada di wilayah yang diinginkan sesuai dengan Gbr. 6.

2) Penentuan Nilai  $Q$  Menggunakan PSO

Kinerja POD-LQR dipengaruhi oleh nilai matriks pembobot  $Q$  yang digunakan. Metode PSO digunakan untuk mencari parameter  $Q$  yang akan membuat sistem lebih stabil. Metode LQR dikombinasikan dengan PSO dengan tujuan meminimalkan  $J, J_1$ , dan  $J_2$ .

Proses pencarian  $Q$  optimal menggunakan PSO ditunjukkan oleh Gbr. 7. Sistem tenaga dengan parameter awal yang sudah ditentukan, dicari nilai eigenvalue sistem tenaga tersebut. Metode PSO akan menentukan nilai  $Q$  awal. Perhitungan LQR akan menghasilkan parameter  $K$  dan matriks  $A$  baru. Eigenvalue dari matriks  $A$  baru akan dihitung untuk mengetahui kestabilan sistem tenaga. Kriteria pemberhentian digunakan untuk menghentikan operasi PSO. Kriteria pemberhentian yang digunakan adalah jumlah maksimal generasi dan toleransi kesalahan. Jika kriteria pemberhentian belum tercapai, PSO akan mengganti nilai  $Q$ , sehingga diperoleh eigenvalue matriks  $A$  baru yang sudah diganti. Eigenvalue baru yang dihasilkan, diharapkan memiliki kestabilan sistem yang lebih baik. Saat kriteria pemberhentian terpenuhi, parameter akhir sistem yang diperoleh merupakan solusi yang diharapkan.



Gbr. 7 Pencarian  $Q$  optimal dengan PSO.

IV. HASIL SIMULASI

A. Parameter Sistem Tenaga

Model sistem tenaga yang digunakan adalah SMIB dan diberi peralatan tambahan berupa PSS dan TCSC. Tabel I menunjukkan parameter sistem tenaga yang digunakan.

TABEL I  
PARAMETER SISTEM TENAGA

Parameter	Nilai
$H$	3,12 s
$x_d$	1,014
$x'_d$	0,314
$D$	0
$x_a$	0,77
$T'_{d0}$	6,55 s
$K_A$	400
$T_A$	0,05 s

Saluran transmisi:  $R_a = 0$ ;  $X_T = 0,07$  pu;  $X_L = 0,325$  pu.  
 TCSC:  $X_c = 0,21$  pu;  $X_p = 0,0525$  pu;  $\alpha = 160^\circ$ .  
 Kondisi awal sistem beroperasi pada  $P_e = 0,9$  pu.

B. Hasil Simulasi dan Pembahasan

Metode yang diusulkan akan diuji kemampuannya dalam meningkatkan kestabilan sistem tenaga. Kestabilan sistem tenaga dilihat dari nilai eigenvalue dan tanggapan dinamis perubahan sudut torsi ( $\Delta\delta$ ) pada saat sistem tenaga mengalami gangguan. Gangguan yang diberikan adalah kenaikan daya elektrik sebesar 0,2 pu. Metode yang diusulkan akan diuji keandalannya pada tiga kondisi beban yang berbeda, yaitu

beban nominal ( $P_e = 0,9$  pu), beban ringan ( $P_e = 0,5$  pu), dan beban berat ( $P_e = 1,1$  pu). Metode optimisasi PSO akan menghasilkan parameter PSS dan POD-LQR seperti yang ditunjukkan oleh Tabel II dan Tabel III.

TABEL II  
PARAMETER PSS

$K_{PSS}$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
1,3113	4,0424	2,9413	4,7652	1,1045

TABEL III  
PARAMETER POD-LQR

No.	$Q$	$k$
1	1,9174	-0,6749
2	0,8605	-89,2021
3	0,5179	-4,9002
4	0,0113	-0,0983
5	0,4982	2,3244
6	0,3349	-1,3880
7	0,3116	11,9621

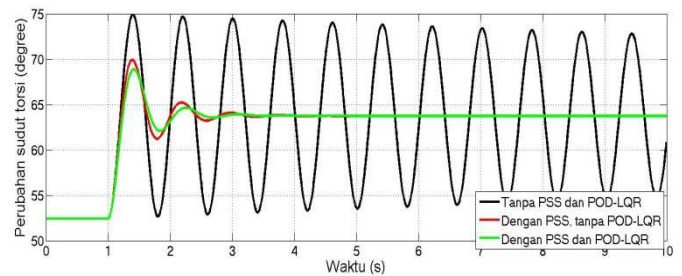
1) *Beban Nominal*

Kinerja metode yang diusulkan dalam meningkatkan kestabilan sistem tenaga dapat dilihat dari nilai *eigenvalue* yang dihasilkan. *Eigenvalue* pada beban nominal ditunjukkan oleh Tabel IV. Metode yang diusulkan mampu menggeser *eigenvalue* ke wilayah yang lebih negatif. Metode yang diusulkan memiliki *eigenvalue* kritis paling negatif, yaitu sebesar -0,2.

TABEL IV  
EIGENVALUE SISTEM TENAGA PADA BEBAN NOMINAL

Tanpa PSS dan POD-LQR	Dengan PSS, tanpa POD-LQR	Dengan PSS dan POD-LQR
-10,0061 + 20,1916i	-7,8675 + 19,2906i	-1,1799 x 10 <sup>3</sup>
-10,0061 - 20,1916i	-7,8675 - 19,2906i	-2 + 8,3i
-0,0323 + 7,8079i	-2,1454 + 7,9349i	-2 - 8,3i
-0,0323 - 7,8079i	-2,1454 - 7,9349i	-2,8 + 1,3i
-	-0,9570	-2,8 - 1,3i
-	-0,1000	-0,3
-	-0,3394	-0,2

Gbr. 8 menunjukkan tanggapan dinamis  $\Delta\delta$  pada beban nominal. Tanpa PSS dan POD-LQR, sistem tenaga mengalami osilasi dengan *overshoot* sebesar 17,56% dan *settling time* yang belum diketahui hingga waktu simulasi selama 10 s. Meskipun *settling time* belum diketahui, tetapi osilasi sudah teredam dan menuju kondisi *steady state*, sehingga sistem tetap dapat diasumsikan stabil. Penambahan PSS mampu meningkatkan kestabilan (*overshoot* lebih rendah dan *settling time* lebih cepat), tetapi metode yang diusulkan memberikan kestabilan paling baik. Pada sistem tenaga dengan PSS dan POD-LQR, *overshoot* yang dihasilkan sebesar 8,08% dan *settling time* sebesar 1,71 s.



Gbr. 8 Tanggapan dinamis  $\Delta\delta$  pada beban nominal.

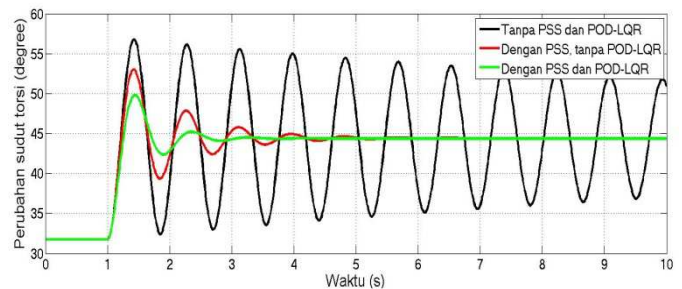
2) *Beban Ringan*

Pada beban ringan, *eigenvalue* yang dihasilkan ditunjukkan oleh Tabel V. Tanpa peraltan tambahan, sistem tenaga sudah stabil. Penambahan PSS akan menggeser *eigenvalue* kritis ke wilayah yang lebih negatif, yaitu -0,1. Pemasangan PSS dan POD-LQR semakin meningkatkan kestabilan dengan menggeser *eigenvalue* kritis ke nilai -0,19.

TABEL V  
EIGENVALUE SISTEM TENAGA PADA BEBAN RINGAN

Tanpa PSS dan POD-LQR	Dengan PSS, tanpa POD-LQR	Dengan PSS dan POD-LQR
-9,9777 + 22,6828i	-8,9228 + 22,2512i	-4,4663 x 10 <sup>2</sup>
-9,9777 - 22,6828i	-8,9228 - 22,2512i	-2,51 + 8,01i
-0,0607 + 7,3828i	-1,1008 + 7,4295i	2,51 - 8,01i
-0,0607 - 7,3828i	-1,1008 - 7,4295i	-4,30
-	-0,9355	-2,237
-	-0,1000	-0,27
-	-0,3396	-0,19

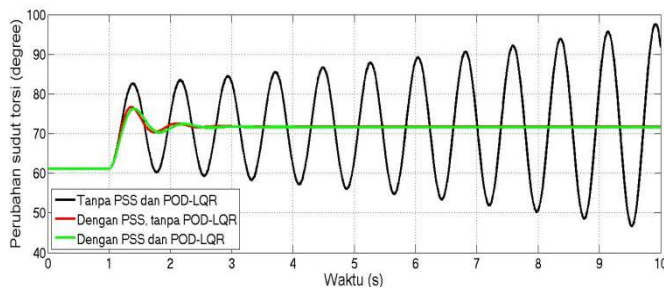
Tanggapan dinamis  $\Delta\delta$  pada beban ringan ditunjukkan oleh Gbr. 9. Kestabilan sistem paling baik diberikan oleh sistem tenaga yang dipasang PSS dan POD-LQR. *Overshoot* yang dihasilkan paling rendah, yaitu 12,16% dan *settling time* sebesar 1,88 s.



Gbr. 9 Tanggapan dinamis  $\Delta\delta$  pada beban ringan.

3) *Beban Berat*

Gbr. 10 menunjukkan tanggapan dinamis  $\Delta\delta$  pada beban berat. Sistem tanpa peralatan tambahan akan menuju ketidakstabilan. Hal ini ditunjukkan oleh osilasi yang semakin menjauh dari kondisi *steady state*. Penambahan PSS dan POD-LQR akan membuat sistem menjadi stabil dengan *overshoot* 6,48% dan *settling time* sebesar 1,24 s.



Gbr. 10 Tanggapan dinamis  $\Delta\delta$  pada beban berat.

Ketidakstabilan sistem tenaga saat tidak dipasang PSS dan POD-LQR juga ditunjukkan oleh *eigenvalue* yang dapat dilihat pada Tabel VI. Pada saat tidak dipasang PSS dan POD-LQR, terdapat nilai *real eigenvalue* yang bernilai positif. Pemasangan PSS saja atau PSS dan POD-LQR akan membuat sistem menjadi stabil, yaitu seluruh *real eigenvalue* bernilai negatif.

TABEL VI  
EIGENVALUE SISTEM TENAGA PADA BEBAN BERAT

Tanpa PSS dan POD-LQR	Dengan PSS, tanpa POD-LQR	Dengan PSS dan POD-LQR
-10,1413 + 18,7772i	-7,2944 + 17,4633i	-1,5768 x 10 <sup>3</sup>
-10,1413 - 18,7772i	-7,2944 - 17,4633i	-1,8 + 8,5i
0,1028 + 8,1072i	-2,7143 + 8,4334i	-1,8 - 8,5
0,1028 - 8,1072i	-2,7143 - 8,4334i	-2,6 + 1,5i
-	-0,9655	-2,6 - 1,5i
-	-0,1001	-0, 2
-	-0,3393	-0, 2

## V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, diusulkan struktur kendali POD menggunakan LQR, sedangkan struktur kendali PSS menggunakan *lead-lag* dua tingkat. PSO digunakan untuk mencari parameter POD dan PSS. PSO akan berusaha meminimalkan osilasi dan menggeser *eigenvalue* ke wilayah yang lebih stabil. Metode kendali yang diusulkan, diuji pada sistem tenaga SMIB dengan gangguan berupa kenaikan daya listrik. Keandalan metode yang diusulkan, diuji pada tiga kondisi beban yang berbeda, yaitu nominal, ringan, dan berat.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pemasangan PSS dan POD-LQR mampu menggeser *eigenvalue* kritis ke wilayah yang lebih stabil. *Eigenvalue* pada tiga kondisi beban, yaitu nominal, ringan, dan berat secara berurutan adalah -0,2, -0,19, dan -0,2. Selain itu, tanggapan dinamis  $\Delta\delta$  pada tiga kondisi beban yang berbeda menunjukkan bahwa sistem tenaga dengan PSS dan POD-LQR memiliki *overshoot* terendah dan *settling time* tercepat. Peredaman *overshoot* ayunan pertama oleh metode yang diusulkan dibandingkan sistem tanpa peralatan tambahan pada beban nominal, ringan, dan berat secara berurutan adalah 53,99%, 56,29%, dan 57,81%. Pada beban nominal, ringan, dan berat, secara berurutan *settling time* yang dibutuhkan dipercepat menjadi 1,71 s, 1,88 s, dan 1,24 s.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang sudah meluangkan waktu untuk memberi doa, bimbingan, dan dukungan selama pelaksanaan penelitian.

## REFERENSI

- [1] Narain G. Hingorani and Laszlo Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York: IEEE Press, 2000.
- [2] S.V. Heidari, M. Sedighzadeh, M. Ahmadzadeh, and S. Mohammadzadeh, "Optimal Coordination of PSS and TCSC for Improving of Dynamic Stability in Power Systems Using Genetic Algorithm," *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering*, vol. 2, no. 5, 2011.
- [3] Sidhartha Panda and N. P. Padhy, "Comparison of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm for TCSC-based Controller Design," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 27, 2007.
- [4] Sidhartha Panda and N. P. Padhy, "Thyristor Controlled Series Compensator-based Controller Design Employing Genetic Algorithm: A Comparative Study," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2, no. 9, 2007.
- [5] Sasongko P. Hadi, "Dynamic Modelling and Damping Function of GUPFC in Multi-Machine Power System," *The Journal for Technology and Science IPTEK*, vol. 22, no. 4, pp. 205-213, November 2011.
- [6] Sidhartha 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 Electrical and Computer Engineering*, vol. 1, no. 7, 2006.
- [7] Sidhartha Panda and N.P. Padhy, "Power System with PSS and FACTS Controller: Modelling, Simulation and Simultaneous Tuning Employing Genetic Algorithm," *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 1, no. 1, 2007.
- [8] R K Pandey, "Analysis and Design of Multi-Stage LQR UPFC," in *Power, Control and Embedded Systems (ICPACES)*, Allahabad, 2010.
- [9] Yathisha L. and S. Patil Kulkarni, "Optimal Feed-back Switching Control for the UPFC Based Damping Controllers," *ACEEE Int. J. on Control System and Instrumentation*, vol. 3, no. 2, March 2012.
- [10] Imam Robandi, *Desain Sistem Tenaga Modern*. Yogyakarta: Andi, 2006.
- [11] Sidhartha Panda and N. P. Padhy, "Coordinated Design of TCSC Controller and PSS Employing Particle Swarm Optimization Technique," *International Journal of Computer and Information Engineering*, vol. 1, no. 5, 2007.
- [12] Ali Misaghi, Said Houghoughi Isfahani, Abbas Kargar, Abjadi, and Navid Reza, "Increasing the Stability of Power Systems by Simultaneous Design of PSS and TCSC through the PSO Technique," *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, vol. 1, no. 10, pp. 1535-1540, 2011.
- [13] K.R. Padiyar, *Power System Dynamics Stability and Control*. Hyderabad: BS Publication, 2008.
- [14] Sasongko P. Hadi, M. Talaat, and R. Moret, "More Exact Method for Determining the Optimal Control Weighting Matrices," in *IASTED Internatl Conf on Electrical Power System*, Paris, 1987.
- [15] Yao-nan Yu, *Electric Power System Dynamics*. London: Academic Press, Inc, 1983.
- [16] P. Somasundaram and Muthuselvan N.B., "A Modified Particle Swarm Optimization Technique For Solving Transient Stability Constrained Optimal Power Flow," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 13, no. 2, 2010.
- [17] Abolfazl Jalilvand, Amin Safari, and Reza Aghmasheh, "Design of State Feedback Stabilizer for Multi Machine Power System Using PSO Algorithm," in *12th IEEE International Multitopic Conference*, Zanzan, Iran, 2008, pp. 2-3.