
PSO FUZZY POLE PLACEMENT STATE FEEDBACK CONTROL UNTUK MENINGKATKAN KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK

Tamaji

Teknik Elektro – Fakultas Teknik - Universitas Widya Kartika Jl. Sutorejo Prima Utara II/1, Surabaya 60113

Correspondence : tamaji@widyakartika.ac.id

Received: 15/10/20 – Revised: 29/10/20 - Accepted: 29/10/20- Published: 15/12/20

Abstrak. Pada penelitian ini dilakukan desain kontrol *state feedback* untuk sistem *Single Machine Infinite Bus* (SMIB) model tak linier, fuzzifikasi Takagi-Sugeno diterapkan sehingga terbentuk model *fuzzy controller*, penentuan *state feedback gain* dilakukan dengan menggunakan metode *Pole Placement*, pada model sistem baik tanpa fuzzy maupun dengan fuzzy. Sistem SMIB tak linier mempunyai performansi yang stabil dan beresilasi, oleh karena itu desain kontrol diterapkan dengan tujuan untuk memperbaiki performansi kecepatan sudut rotor. *Feedback gain* tersebut memuat parameter yang mempengaruhi performansi SMIB, oleh karena itu pada penelitian ini juga dilakukan optimasi parameter yang termuat pada *feedback gain* dengan menggunakan *Partikel Swarm Optimisation (PSO)*. Dengan hasil simulasi diperoleh untuk sudut rotor dan kecepatan sudut yang terbaik adalah *PSO Fuzzy Pole Placement* tetapi untuk tegangan generator dan tegangan medan generator yang terbaik adalah *PSO Pole Placement*

Kata kunci: *PSS, Pole Placement, Kontrol Fuzzy, Performansi, PSO*

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan suatu bentuk energi yang memiliki peran sangat penting dalam aktivitas sehari-hari. Setiap tahun terjadi peningkatan kebutuhan energi yang signifikan dan menuntut pihak penyedia tenaga listrik untuk memberikan supply tenaga yang cukup dan berkualitas. Salah satu faktor penting dalam menghasilkan listrik yang berkualitas adalah kestabilan sistem. Kestabilan terkait dengan kemampuan sistem untuk dapat mempertahankan kondisi sinkron ketika terjadi gangguan. Terdapat dua macam gangguan yang mempengaruhi kondisi kestabilan sistem yaitu gangguan transien dan gangguan dinamik (Robandi, 2006). Gangguan transien adalah gangguan besar yang terjadi seperti sambaran petir, maupun putus jaring transmisi. Sedangkan gangguan dinamik adalah gangguan kecil yang sering terjadi dan dapat mengganggu kestabilan. Salah satu penyebab gangguan dinamik adalah perubahan beban (Robandi, 2006).

Ketika terjadi perubahan beban maka terjadi perubahan kondisi supply daya dan permintaan daya pada sistem, sehingga terjadi pergeseran titik operasi yang ditandai dengan munculnya osilasi. Salah satu alat yang dapat digunakan untuk meredam osilasi pada sistem pembangkit adalah Power System Stabilizer (PSS).

Salah satu jenis sistem tenaga adalah Single Machine Infinite Bus (SMIB), sistem SMIB merupakan sistem yang tidak linear sehingga dalam melakukan desain kontrol, dilakukan pelinieran terlebih dahulu. Pelinieran dapat dilakukan dengan melakukan deret Taylor (Campos, 2006; Alfi, 2012; Ataei, 2012), dilakukan pelinieran umpak balik/feedback linierization (Yadaiah, 2006; Tamaji, 2009).

Sampai saat ini, metode desain kontrol dinamik baik untuk sistem linear maupun tak linear telah banyak dilakukan, termasuk dalam desain kontrol pada SMIB. Beberapa metode desain kontrol juga telah dilakukan para peneliti untuk mengoptimalkan kemampuan PSS antara lain dengan menggunakan PID Fuzzy yang digabungkan dengan Particle Swarm Optimization (PSO) untuk mendapatkan parameter yang optimal (Mukherjee, 2007, Ermanu, 2007), robust control dengan LMI dan fuzzy (Soleman, 2009). Parameter-parameter pada PSS harus dilakukan penalaan yang tepat agar mendapatkan performansi yang optimal antara lain menggunakan metode PSO (Al-Awami, 2007; Mukherjee, 2007). Selain itu juga penggunaan pole placement dan LMI telah dilakukan untuk meningkatkan kestabilan PSS (Ataei, 2012; Tamaji, 2017). Sedangkan parameter kendali dirancang dengan menggunakan PSO untuk meningkatkan kestabilan SMIB (Wiennetou, 2013; Tamaji, 2017).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini akan mengkaji tentang: *PSO Fuzzy Pole Placement State Feedback Control* Untuk Meningkatkan Kestabilan Tenaga Listrik pada SMIB model. Proses persiapan, desain, analisis, komputasi

II.1 Pemodelan Sistem SMIB

Sistem SMIB terdiri dari beberapa model yaitu dinamika sinkronisasi pembangkit, model SMIB ditulis dalam bentuk persamaan ruang keadaan (*state space*) (Soleman, 2009; Tamaji, 2019),

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\omega} \\ \dot{E}'_q \\ \dot{E}'_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & A_1 & -D_1 & 0 \\ 0 & 0 & -B_1 & \frac{1}{T'_0} \\ 0 & 0 & C_1 & -\frac{1}{T_E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \\ E'_q \\ E'_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_E}{T_E} \\ 0 \end{bmatrix} u_{pss} \quad (1)$$

Dengan

δ : Sudut rotor

ω : Kecepatan sudut

E'_q : Tegangan generator

E'_{fd} : Tegangan medan generator

$$A_1 = \frac{1}{M\omega} \left(T_m - (x'_d - x'_q) K_2 \left(\left(Q + \frac{V_s^2}{x'_{d\alpha}} \right) \frac{x'_{d\epsilon}}{E'_q} - E'_q \right) K_1 \frac{Px'_{d\epsilon}}{E'_q} \right);$$

$$B_1 = -\frac{1}{T'_{d0}} + \frac{1}{T'_{d0} E'_q} (x'_d - x'_q) K_2 \left(\left(Q + \frac{V_s^2}{x'_{d\alpha}} \right) \frac{x'_{d\epsilon}}{E'_q} - E'_q \right);$$

$$C_1 = \frac{K_E}{T_E E'_q} (V_{ref} - V_T)$$

$$D_1 = \frac{Px'_{d\epsilon}}{E'_q X_e M} - \frac{V_d}{X_e M} .$$

Dan $K_1; K_2$ memuat parameter fuzzy X_e .

Secara umum persamaan (1) dapat ditulis menjadi

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (2)$$

dengan

$$X = [\delta \quad \omega \quad E'_q \quad E'_{fd}]^T;$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & A_1 & -D_1 & 0 \\ 0 & 0 & -B_1 & \frac{1}{T_0'} \\ 0 & 0 & C_1 & -\frac{1}{T_E} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_E}{T_E} \end{bmatrix}$$

Sistem SMIB merupakan sistem tak linear sehingga beberapa desain kontroler tidak dapat langsung diterapkan, tetapi perlu dilakukan pelinearan terlebih dahulu. Pada penelitian ini model tidak dilinierkan tetapi dilakukan pendekatan dengan menggunakan fuzzy sehingga sistem akan menjadi *piecewise linear*. Desain kontroler diterapkan pada sistem setelah dilakukan fuzzifikasi.

II.2 Model SMIB Fuzzy Takagi Sugeno

Pada kasus ini yang dibentuk Fuzzy Takagi Sugeno dalam variabel fuzzy adalah *active power*, *reactive power* dan *tie-line reactance*, yaitu P, Q, X_e .

Misalkan masing-masing variabel fuzzy berada dalam interval

$$P \in [P^- \quad P^+]; \quad Q \in [Q^- \quad Q^+]; \quad X_e \in [X_e^- \quad X_e^+]$$

sehingga diperoleh 8 kemungkinan keadaan variable fuzzy yaitu P^-, Q^-, X_e^- , P^-, Q^-, X_e^+ , P^-, Q^+, X_e^- , P^-, Q^+, X_e^+ , P^+, Q^-, X_e^- , P^+, Q^-, X_e^+ , P^+, Q^+, X_e^- , P^+, Q^+, X_e^+ dan diperoleh 8 aturan fuzzy sebagai berikut:

Model aturan ke 1

$$\text{IF } P(t) \text{ is } P^- \text{ AND } \dots Q(t) \text{ is } Q^- \text{ AND } \dots X_e(t) \text{ is } X_e^-$$

$$\text{THEN } \dots \dot{x}(t) = A_1 x(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

Model aturan ke 2

$$\text{IF } \dots P(t) \text{ is } P^- \text{ AND } \dots Q(t) \text{ is } Q^- \text{ AND } \dots X_e(t) \text{ is } X_e^+$$

$$\text{THEN } \dots \dot{x}(t) = A_2 x(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

.....

Model aturan ke 8

$$\text{IF } \dots P(t) \text{ is } P^+ \text{ AND } \dots Q(t) \text{ is } Q^+ \text{ AND } \dots X_e(t) \text{ is } X_e^+$$

$$\text{THEN } \dots \dot{x}(t) = A_8 x(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

Didefinisikan fungsi keanggotaan P, Q dan X_e adalah

$$L_1 = \frac{P - P^-}{P^+ - P^-}; L_2 = \frac{P^+ - P}{P^+ - P^-}, \quad M_1 = \frac{Q - Q^-}{Q^+ - Q^-}; M_2 = \frac{Q^+ - Q}{Q^+ - Q^-}, \quad N_1 = \frac{X_e - X_e^-}{X_e^+ - X_e^-}; N_2 = \frac{X_e^+ - X_e}{X_e^+ - X_e^-}$$

II.3 State Feedback Fuzzy Controller

Pada desain *state feedback fuzzy controller* berarti *input* diberikan berdasarkan variabel keadaan yaitu

$$u(t) = -\sum_{i=1}^8 F_i x_i(t) \tag{3}$$

Dengan mensubstitusi persamaan (3.) ke dalam persamaan (2) diperoleh

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^8 \xi_i A_i x - B \sum_{j=1}^8 \xi_j F_j x$$

Atau dapat ditulis menjadi

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^8 \xi_i (A_i - B F_i) x \tag{4}$$

Dengan

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{li} & -D_{li} & 0 \\ 0 & 0 & -B_{li} & \frac{1}{T_0} \\ 0 & 0 & C_{li} & -\frac{1}{T_E} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_E}{T_E} \end{bmatrix}; F_i = [F_{1i} \quad F_{2i} \quad F_{3i} \quad F_{4i}]$$

Pada penelitian ini desain kontroler *state feedback* berarti menentukan matriks *state feedback gain* F_i sehingga sistem pada persamaan (3) stabil.

Pada penelitian ini, penentuan *feedback gain* F_i dilakukan dengan menggunakan metode *Pole Placement*

II.4 Pole Placement State Feedback Control

Pada metode ini *feedback gain* ditentukan dengan menggunakan *Pole Placement*, berarti akan ditentukan *feedback gain* F_i sehingga sistem pada persamaan (4) mempunyai *Pole* $P = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4]$ dengan bagian real negatif (terletak pada *left half plane*). Pemilihan pole, P akan menentukan performansi dari PSS. Penentuan *feedback gain* dapat dilakukan secara langsung dengan menggunakan fungsi pada Matlab, yaitu $F = \text{place}(A, B, P)$. Metode *Pole Placement*, khususnya *function* pada Matlab berupa *place* dapat diterapkan jika sistem terkontrol. Oleh karena perlu di cek dulu sifat keterkontrolan dari sistem SMIB, sebagai berikut: misalkan

$M_i = [B \ A_i B \ A_i^2 B \ A_i^3 B]$ matriks keterkontrolan. Jika matriks M_i mempunyai rank 4 maka sistem dikatakan terkontrol.

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{1i} & -D_{1i} & 0 \\ 0 & 0 & -B_{1i} & \frac{1}{T_0'} \\ 0 & 0 & C_{1i} & -\frac{1}{T_E} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_E}{T_E} \end{bmatrix};$$

maka

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_E}{T_E} \end{bmatrix}; A_i B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_E}{T_0' T_E} \\ -\frac{K_E}{T_E^2} \\ \frac{K_E}{T_E^3} \end{bmatrix}; A_i^2 B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{D_{1i} K_E}{T_0' T_E} \\ \frac{K_E}{T_0' T_E} - \frac{K_E}{T_E^2 T_0'} \\ \frac{C_{1i} K_E}{T_0' T_E} + \frac{K_E}{T_E^3} \end{bmatrix};$$

$$A_i^3 B = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_0 D_{1i} K_E}{T_0' T_E} \\ \frac{-A_{1i} D_{1i} K_E}{T_0' T_E} + \frac{D_{1i} B_{1i} K_E}{T_0' T_E} + \frac{D_{1i} K_E}{T_E^2 T_0'} \\ \frac{B_{1i}^2 K_E}{T_0' T_E} + \frac{B_{1i} K_E}{T_E^2 T_0'} + \frac{C_{1i} K_E}{T_0' T_E} + \frac{K_E}{T_0' T_E^3} \\ \frac{-C_{1i} B_{1i} K_E}{T_0' T_E} - \frac{C_{1i} K_E}{T_E^2 T_0'} - \frac{C_{1i} K_E}{T_0' T_E^2} + \frac{K_E}{T_E^4} \end{bmatrix};$$

Bahwa matriks $M = [B \ A_i B \ A_i^2 B \ A_i^3 B]$ mempunyai rank 4, sehingga sistem terkontrol.

Misalkan $\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\}$ nilai eigen atau *poles* dari sistem pada persamaan (4) maka persamaan karakteristik yang terbentuk adalah $(\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2)(\lambda - \lambda_3)(\lambda - \lambda_4) = 0$. Sedangkan persamaan karakteristik dari persamaan (4) adalah $|(A - BF_i) - \lambda I| = 0$. Sehingga dapat diperoleh *State feedback gain* $F = [F_{1i} \ F_{2i} \ F_{3i} \ F_{4i}]$. Nilai F_i dapat ditentukan, untuk semua nilai $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, karena sistem terkontrol. Selain itu penentuan *feedback gain* dapat diperoleh dengan menggunakan *Toolbox Matlab place*.

II.5 Particle Swarm Optimization

Metode *PSO* diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhard pada tahun 1995. *PSO* terinspirasi oleh kegiatan atau pola dari sekelompok burung saat mencari makanan. Sejumlah ilmuwan telah melakukan simulasi komputer dari berbagai penafsiran terhadap gerakan organisme seperti kawanan burung maupun ikan yang sedang mencari makan (Nedjah, 2006). *PSO* merupakan teknik optimisasi yang berbasis pada populasi dan *PSO*

diawali dengan menyebarkan sekelompok populasi partikel pada suatu ruang permasalahan. Partikel-partikel yang disebar ini kemudian disebut sebagai *swarm*. Partikel ini menyimpan informasi tentang keberadaannya dan potensi nilai yang dihasilkan dengan keberadaan tersebut.

PSO merupakan koleksi, metode iterasi dengan menitikberatkan pada kerjasama. *PSO* berbentuk *random* parsial dan tanpa seleksi. Pendekatan *PSO* digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi. Pendekatan ini mempunyai banyak kelebihan antara lain sederhana, cepat dan dapat dikodekan dalam beberapa jalur (*lines*). Selain itu *PSO* mempunyai memori artinya setiap partikel mengingat (menyimpan) penyelesaian terbaik (*local*) dan juga penyelesaian ter-baik *global* (Nedjah, 2006). Populasi awal pada *PSO* dipertahankan sehingga tidak diperlukan operator pada populasi. *PSO* didasarkan pada kerjasama konstruktif antara partikel (Al-Awami, 2007). Dalam hal ini, polulasi setiap kandidat penyelesaian disebut dengan partikel. Partikel menempatkan posisinya berdasarkan pengalamannya dan pengalaman dari sekitar partikel tersebut. Jika partikel menemukan penyelesaian yang baru maka partikel-partikel yang lain akan bergerak mendekat, mengeksplorasi daerah tersebut lebih detail (Mukherjee, 2007).



Gambar 1. Pola dari sekelompok burung saat mencari makanan. (Nedjah, 2006).

Konsep matematika pada proses pencarian penyelesaian optimal berdasarkan *PSO* adalah

Persamaan *updating* kecepatan

$$v_i^{k+1} = \phi^k v_i^k + \alpha_1 (\gamma_{1i} (p_i - x_i^k)) + \alpha_2 (\gamma_{2i} (G - x_i^k)) \quad (5)$$

Persamaan *updating* posisi

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (6)$$

Dengan

i : indeks partikel

k : waktu diskrit

v : kecepatan partikel

x : posisi partikel

p : posisi terbaik oleh partikel

G : posisi terbaik oleh populasi

$\gamma_{1,2}$: bilangan random besarnya antara 0 dan 1

$\alpha_{1,2}$: konstanta percepatan

ϕ : fungsi inersia (proses *training* untuk menurunkan kecepatan)

HASIL DAN PEMBAHASAN

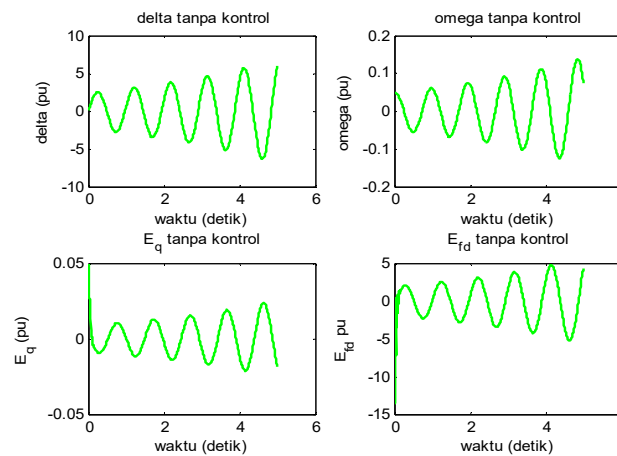
III.1 Performansi SMIB dengan *State Feedback Control*

Pada penelitian ini dilakukan simulasi performansi sistem SMIB persamaan (4) setelah dilakukan desain kontroler yang berupa *State feedback controller*. *Feedback gain* pada kontroler tersebut ditentukan dengan menggunakan metode *Pole Placement*. Simulasi pada penelitian ini nilai parameter diambil dari Alfi, [Alfi, 2012], yaitu

$$\omega_0 = 314; T_m = 0.8; x_q = 1.55; x_d' = 0.32; x_d = 1.8; M = 10; K_E = 200; T_E = 0.005; T_{d0}' = 6;$$

Dengan kondisi awal $\delta(0) = 0.05; \omega(0) = 0.05; E_q(0) = 0.05$ dan $E_{fd}(0) = 0.05$.

Berdasarkan parameter-parameter tersebut, untuk sistem tanpa kontrol ($U_{ps} = 0$), perilaku dinamik SMIB tanpa kontrol digambarkan pada gambar 2.



Gambar 2. Performansi SMIB tak linier tanpa control

Untuk sistem SMIB hasil simulasi dengan menggunakan parameter-parameter pada Alfi, 2012 diperoleh matriks

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 314 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0001 & 0 \\ 66 & 0 & -27102 & 200 \end{bmatrix}$$

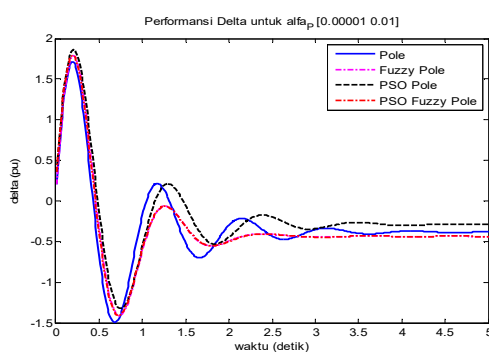
sedangkan matriks $B=[0 \ 0 \ 0 \ -40000]^T$. Nilai eigen matriks A adalah $[-173.96 \ 6.51i \ -6.51i \ -26.55]$. Berdasarkan nilai eigen matriks A dari sistem SMIB, tampak bahwa sistem SMIB tak linier adalah stabil dan mempunyai performansi seperti pada gambar.2. Performansi sistem SMIB hasil bagus pada sistem tak linear semua variabel beresilasi oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan desain kontrol dengan *State feedback gain PSO Fuzzy Pole Placement*.

III.2. Performansi SMIB dengan *PSO Fuzzy State Feedback Control*

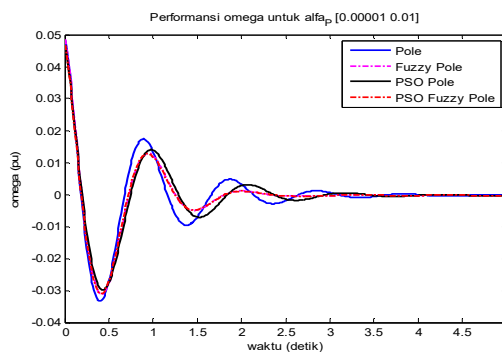
Penelitian selanjutnya adalah penerapan optimasi PSO pada *Fuzzy Pole Placement, State feedback control*. Metode PSO digunakan untuk menentukan parameter pada *feedback gain* untuk masing-masing metode. Parameter fuzzy yang digunakan adalah P, Q dan X_e dengan interval fuzzy $P \in [0.4 \ 1]; Q \in [-0.2 \ 0.5]; X_e \in [0.2 \ 0.4]$. Untuk simulasi $P=0.8; Q=0.3; X_e=0.3$ Hasil simulasi ditampilkan pada gambar 3.a-d. Nilai eigen yang dipilih untuk metode *Pole Placement* adalah $\lambda_1 = -5; \lambda_2 = -8; \lambda_3 = -6$ dan

$$\lambda_4 = -\left(\frac{1}{T_{do}K_3} + \frac{1}{T_E} + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3\right),$$

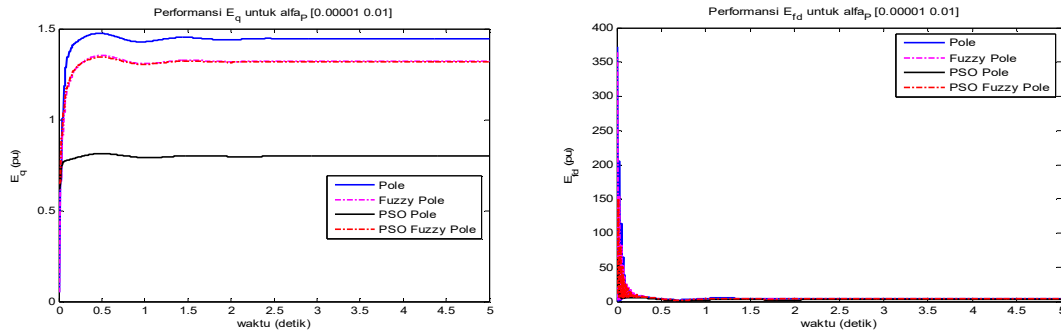
sehingga pada metode *PSO Pole Placement* dan *PSO Fuzzy Pole Placement* diambil $\lambda_1 = -5\alpha_L; \lambda_2 = -8; \lambda_3 = -6$. Untuk parameter tersebut, nilai eigen sistem SMIB setelah dikontrol untuk metode *Pole Placement* adalah $\lambda_{pole} = [-976.87 \ -2.48 + 6.01i \ -2.48 - 6.01i \ -23.69]$,



a. Performansi δ



b. Performansi ω

c. Performansi E_q d. Performansi E_{fd} Gambar 3. a-d. Performansi SMIB tak linier dengan *Pole Placement State feedback control* untuk $\alpha_p \in [0.00001 \ 0.01]$

Dari Gambar 3.a tampak bahwa metode *Fuzzy Pole Placement*, dan *PSO Fuzzy Pole Placement* menghasilkan performansi yang sama untuk variabel δ , dan ω , serta lebih bagus dibandingkan dengan metode *Pole Placement* dan *PSO Pole Placement*, (gambar 3. a-b), yaitu mempunyai *overshoot* yang lebih rendah dan *settling time* yang lebih cepat. Performansi E_q yang dihasilkan *Fuzzy Pole Placement* dan *PSO Fuzzy Pole Placement* hampir sama. Metode *Pole Placement*, *Fuzzy Pole Placement*, *PSO Pole Placement* dan *PSO Fuzzy Pole Placement* menghasilkan performansi E_q yang stabil dengan kondisi steady yang berbeda, sedangkan variabel E_{fd} mengalami osilasi dengan amplitude sangat besar pada waktu kurang dari 0.25 det dan selanjutnya stabil menuju nol.

Performansi SMIB dengan semua desain kontrol diberikan tabel 1. - 4.. untuk $\alpha_p; \beta_R; \beta_L \in [0.00001 \ 0.01]$

Tabel.1. Performansi δ untuk $\alpha_p; \beta_R; \beta_L \in [0.00001 \ 0.01]$

	<i>Overshoot</i> (pu)	<i>Settling time</i> (detik)	<i>Steady state</i> (pu)
<i>Pole Placement</i>	1.705	4.09	-0.3017
<i>Fuzzy Pole Placement</i>	1.78	2.22	-0.4242
<i>PSO Pole Placement</i>	1.857	3.62	-0.2701
<i>PSO Fuzzy Pole Placement</i>	1.791	2.22	-0.409

Dari gambar 3.a. dan tabel 1. tampak bahwa performansi δ mengalami osilasi dengan *overshoot* paling tertinggi terjadi jika diterapkan desain kontrol *PSO Pole Placement state feedback* yaitu 1. 857 pu, sedangkan *overshoot* terendah, terjadi pada *Pole Placement*, yaitu 1.705 pu. *Settling time* tercepat terjadi pada desain kontrol *Fuzzy Pole Placement* dan *PSO Fuzzy Pole Placement* yaitu 2.2 detik dengan posisi *steady state* - 0.409 pu.

Tabel.2. Performansi ω untuk $\alpha_p; \beta_R; \beta_L \in [0.00001 \ 0.01]$

	<i>Overshoot (pu)</i>	<i>Settling time (detik)</i>	<i>Steady state (pu)</i>
<i>Pole Placement</i>	-0.03341	4.18	-0.0002955
<i>Fuzzy Pole Placement</i>	-0.03115	2.26	-0.001337
<i>PSO Pole Placement</i>	-0.03099	3.75	0.000712
<i>PSO Fuzzy Pole Placement</i>	-0.02919	2.26	-0.001337

Dari gambar 3.b. dan tabel 2. tampak bahwa performansi ω mengalami osilasi dengan *overshoot* paling tertinggi terjadi jika diterapkan desain kontrol *Pole Placement state feedback* yaitu -0.03341 pu, sedangkan *overshoot* terendah, terjadi pada *PSO Pole Placement*, yaitu -0.0309 pu. *Settling time* tercepat terjadi pada desain kontrol *Fuzzy Pole Placement* dan *PSO Fuzzy Pole Placement* yaitu 2.2 detik dengan posisi *steady state* - 0.001337 pu.

Tabel 3. Performansi E_q untuk $\alpha_p; \beta_R; \beta_L \in [0.00001 \ 0.01]$

	<i>Overshoot (pu)</i>	<i>Settling time (detik)</i>	<i>Steady state (pu)</i>
<i>Pole Placement</i>	1.483	1.48	1.456
<i>Fuzzy Pole Placement</i>	1.359	1.31	1.318
<i>PSO Pole Placement</i>	0.8134	0.87	0.7958
<i>PSO Fuzzy Pole Placement</i>	1.162	1.97	1.144

Dari gambar 3.c. dan tabel 3. tampak bahwa performansi E_q mengalami osilasi dengan *overshoot* paling tertinggi terjadi jika diterapkan desain kontrol *Pole Placement state feedback* yaitu 1.483 pu, sedangkan *overshoot* terendah, terjadi pada *PSO Pole Placement*, yaitu 0.8134 pu. *Settling time* tercepat terjadi pada desain kontrol *PSO Pole Placement* yaitu 0.87 detik dengan posisi *steady state* 0.7958 pu.

Tabel 4. Performansi E_{fd} untuk $\alpha_p; \beta_R; \beta_L \in [0.00001 \ 0.01]$

	<i>Overshoot (pu)</i>	<i>Settling time (detik)</i>	<i>Steady state (pu)</i>
<i>Pole Placement</i>	369	0.24	8.711

<i>Fuzzy Pole Placement</i>	360	0.34	6.406
<i>PSO Pole Placement</i>	60	0.09	5.688
<i>PSO Fuzzy Pole Placement</i>	150	0.34	6.406

Dari gambar 3.d. dan tabel 4. tampak bahwa performansi E_{fd} mengalami osilasi dengan *overshoot* paling tertinggi terjadi jika diterapkan desain kontrol *Pole Placement state feedback* yaitu 369 pu, sedangkan *overshoot* terendah, terjadi pada *PSO Pole Placement*, yaitu 60 pu. *Settling time* tercepat terjadi pada desain kontrol *PSO Pole Placement* yaitu 0.09 detik dengan posisi *steady state* 5.688 pu.

KESIMPULAN

Berdasarkan pada hasil dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa

1. Metode *state feedback control* diterapkan untuk memperbaiki performansi system SMIB, khususnya kestabilan sistem. *Feedback gain* pada metode *state feedback control* ditentukan dengan menggunakan metode *Pole Placement*, *Fuzzy Pole Placement*. Pemilihan parameter *feedback gain* yang tepat akan menghasilkan performansi yang lebih stabil. *PSO* digunakan untuk melakukan penalaan parameter *feedback gain*, sehingga dihasilkan metode *PSO Fuzzy Pole Placement state feedback Control*.
2. Untuk Sudut Rotor (δ) *Settling time* tercepat terjadi pada desain kontrol *Fuzzy Pole Placement* dan *PSO Fuzzy Pole Placement* yaitu 2.2 detik dengan posisi *steadystate* - 0.409 pu.
3. Untuk Kecepatan Susdud (ω) *Settling time* tercepat terjadi pada desain kontrol *Fuzzy Pole Placement* dan *PSO Fuzzy Pole Placement* yaitu 2.2 detik dengan posisi *steady state* -0.001337 pu.
4. Untuk Tegangan Generator (E_q) *Settling time* tercepat terjadi pada desain kontrol *PSO Pole Placement* yaitu 0.87 detik dengan posisi *steady state* 0.7958 pu.
5. Untuk Tegangan Medan Generator (E_{fd}) *Settling time* tercepat terjadi pada desain kontrol *PSO Pole Placement* yaitu 0.09 detik dengan posisi *steady state* 5.688 pu.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfi, A. and Khosravi, M., (2012), "Optimal Power System Stabilizer design to Reduce Low Frequency Oscillations via an Improved Swarm Optimization Algorithm", International Journal on Technical and Physical problems of Engineering, International Organization of IOTPE, Issue 11, Vol 4, No.2, pp. 24-33.

- Ataei M., Hooshmand, R.A. and Parastegari,M., (2012), “A Wide Range Robust PSS Design Based on Power System Pole-Placement using Linear Matrix Inequality”, *Journal of Electrical Engineering*, Vol.63, No. 4., 2012, pp.233-241 .
- Al-Awami, AT., Abdel, YL., and Abido, MA., (2007), “A Particle Swarm Based Approach of Power System Stability Enhancement with Unified Power Low Controller”, *Electrical Power and Energy Systems* 29 p. 251-259, Elsevier, 2007
- Campos, V.A.F, et al, (2006), “Pole Placement and Robust Adjustment of Power Systems Stabilizers through Linear Matrix Inequalities”, *Conference: Power Systems Conference and Exposition* Elsevier.
- Ermanu A. Hakim, Adi Soeprijanto, Mauridhi H.P., (2007), “PSS Design Based on PD and PI Fuzzy Controller by Particle Swarm Optimization”, *Proceedings of International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, ITB Indonesia,
- Imam Robandi, (2006), *Desain Sistem Tenaga Modern : Optimisasi, Logika Fuzzy, Algoritma Genetika*, Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Mukherjee, V., Ghoshal,S.P., (2007), “Comparison of Intelligent Fuzzy based AGC Coordinated PID Controlled and PSS Controlled AVR System”, *Electrical Power and Energy Systems* 29, p. 679-689, Elsevier.
- Nedjah, N. and Mourelle, L.M., (2006), *Swarm Intelligent System*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Soliman, M, Elshafei, Bendary,F. and Mansour, W., (2009), “LMI static Output Feedback Design of Fuzzy PowerSystem Stabilizers”, *Expert systems with Application* 36 pp. 6817-6825, Elsevier.
- Tamaji, Musyafa, A., Darma, A. and Robandi, I., (2009), “Controller Design SMIB by Direct Feedback Linearization”, *Proceedings of National Seminar on Technology, Science and Arts*, pp. 2007-2010.
- Tamaji and Imam Robandi, (2017), “Routh Hurwitz and Pole Placement Fuzzy Logic Control for Power System Stability Improvement”, *International Review of Automatic Control (IREACO)*, Vol 10, No 1, pp. 40-48.
- Tamaji and Imam Robandi, (2017), “Fuzzy Logic Based on Lyapunov Solution In Power System Stability Improvement”, *International Journal of System Signal Control and Engineering Application*, 10 (1-6): 7-15 , 2017. ISSN : 1997-5422
- Wolkenhauer,O., (2001), *Data Engineering: Fuzzy in System Theory and Data Analysis*, John Wiley & Sons, Inc.
- Yadaiah,N., Ramana, N.Y, (2007),“Linearization of multimachine Power System: Modelingand Control”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 29, pp. 297-31