

DESAIN PENGENDALIAN *POWER SYSTEM STABILIZER* DENGAN *POLE PLACEMENT FUZZY LOGIC CONTROL*

Tamaji¹, Achmad Shoim²

^{1,2}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Widya Kartika

^{1,2}Jalan Sutorejo Prima Utara II/ 1 Surabaya 60113, Jawa Timur,

e-mail: tamajikayadi@gmail.com

Abstrak

Power system stabilizer (PSS) berguna untuk meredam osilasi elektro mekanik yang menyebabkan gangguan. Beberapa metode desain pengendalian PSS telah dilakukan antara lain adaptive control dan robust control selain itu logika fuzzy juga berperan dalam meningkatkan performansi PSS. Kestabilan dan pencapaian performansi dari kontrol sistem berdasarkan model fuzzy output feedback controller dapat diperoleh dengan menggunakan teknik kestabilan dengan metode pole placement. Selanjutnya dilakukan defuzzyfikasi untuk mendapatkan performansi system. Pada paper ini akan dikaji pembentukan model fuzzy Takagi-Sugeno dengan metode pole placement dan dilakukan perbandingan performansi sistem untuk sistem tanpa kontrol, sistem dengan kontrol pole placement dan sistem kontrol fuzzy pole placement serta dikaji mana yang lebih baik.

Kata kunci : *fuzzy Takagi-Sugeno, output feedback controller, PSS, pole placement*

1. PENDAHULUAN

Pada sistem pembangkit listrik, *power system stabilizer (PSS)* berguna untuk meredam osilasi elektro mekanik yang menyebabkan gangguan. Beberapa gangguan pada sistem pembangkit disebabkan oleh beban yang bervariasi secara kontinu, perubahan *setting point* dan sebagainya. Beberapa metode desain pengendalian PSS telah dilakukan antara lain, *direct feedback linearization* (Tamaji, 2009; Yadaiah & Ramana, 2006), *adaptive control* dan *robust control* selain itu logika fuzzy juga berperan dalam meningkatkan performansi PSS (Peng zhao and O.P. Malik, 2009). Kestabilan dan pencapaian performansi dari kontrol sistem berdasarkan model fuzzy dapat diperoleh dengan menggunakan teknik metode *Pole Placement* (Tanaka & Wang, 2001 dalam Soliman).

Pada paper ini akan dikaji desain *controller* sistem pembangkit mesin tunggal dengan bus tak hingga (*single machine infinite bus-SMIB*). Model matematika dari sistem SMIB merupakan sistem tak linear (Soliman, 2009; Yadaiah & Ramana, 2006). Untuk mendesain PSS akan dibentuk model fuzzy T-S dengan metode *Pole Placement* dari SMIB, ditentukan kondisi agar sistem stabil, desain *output feedback* serta simulasi untuk menganalisa performansi PSS.

2. METODOLOGI

Secara garis besar makalah ini dilakukan model yaitu PSS *single machine*. Untuk model SMIB dilakukan pembentukan model sistem yang merupakan sistem tak linear dan membuat model fuzzy sistem dengan parameter fuzzifikasi P, Q, X_e , jenis fuzzy yang digunakan adalah Fuzzy T-S. Dalam menentukan *gain K* dengan metode yang akan digunakan yaitu metode kestabilan *Pole Placement*

2.1 Model Fuzzy SMIB

Sistem pembangkit SMIB merupakan system tak linear (Soliman, 2009; Yadaiah&Ramana, 2006) sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 \dot{\delta} &= \omega_0 \omega \\
 \dot{\omega} &= (T_m - E_q' I_q - (x_q - x_d') I_d I_q) / M \\
 \dot{E}_q' &= (-E_q' - (x_q - x_d') I_d + E_{fd}') / T_{d0}' \\
 \dot{E}_{fd}' &= \frac{K_E}{T_E} (V_{ref} - V_T + u_{pss}) - \frac{1}{T_E} E_{fd}'
 \end{aligned} \tag{1}$$

Untuk mendesain *controller* dari sistem tak linear ada beberapa metode antara lain *adaptive controller*, *robust control*, pelinearan secara langsung, *direct feedback linear* dan pembentukan dalam model fuzzy T-S. Dalam paper ini metode yang digunakan adalah metode pembentukan model fuzzy T-S. Sebelum dibentuk dalam sistem fuzzy terlebih dahulu dilakukan pengaturan sistem sehingga dapat diperoleh sistem ruang keadaan (*state space*) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \dot{X} &= AX + Bu \\
 \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\omega} \\ \dot{E}_q' \\ \dot{E}_{fd}' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & A_1 & -D_1 & 0 \\ 0 & 0 & -B_1 & \frac{1}{T_{d0}'} \\ 0 & 0 & C_1 & -\frac{1}{T_E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \\ E_q' \\ E_{fd}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_E}{T_E} \end{bmatrix} u_{pss}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Dengan

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{(T_m - (x_q - x_d') I_d I_q)}{M \omega}; B_1 = \left(\frac{1}{T_{d0}'} + \frac{(x_d - x_d') I_d}{T_{d0}' E_q'} \right); \\
 C_1 &= \frac{K_E}{T_E E_q'} (V_{ref} - V_T); D_1 = \left[\left(\frac{P x_{d\varepsilon}'}{E_q' X_e M} - \frac{V_d}{X_e M} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Secara umum model fuzzy T-S adalah (Soliman, 2009, Tanaka,2001). Pada kasus ini yang dibentuk dalam *variable fuzzy* adalah P, Q, X_e yaitu

$P \in [P^- \ P^+]; Q \in [Q^- \ Q^+]; X_e \in [X_e^- \ X_e^+];$ sehingga diperoleh:

Rule 1

IF $P(t)$..adalah.. P^- ..AND... $Q(t)$..adalah.. Q^- AND... $X_e(t)$..adalah.. X_e^-
THEN..... $\dot{x}(t) = A_1 x(t) + B u(t)$
 $y(t) = C x(t)$

Rule 2

IF $P(t)$..adalah.. P^- ..AND... $Q(t)$..adalah.. Q^- AND... $X_e(t)$..adalah.. X_e^+
THEN..... $\dot{x}(t) = A_2 x(t) + B u(t)$
 $y(t) = C x(t)$

.....

Rule 8

IF $P(t)$..adalah.. P^+ ..AND... $Q(t)$..adalah.. Q^+ AND... $X_e(t)$..adalah.. X_e^+
THEN..... $\dot{x}(t) = A_8 x(t) + B u(t)$
 $y(t) = C x(t)$

Didefinisikan :

$$\text{fungsi keanggotaan } P \text{ adalah } L_1 = \frac{P - P^-}{P^+ - P^-}; L_2 = \frac{P^+ - P}{P^+ - P^-},$$

fungsi keanggotaan Q adalah $M_1 = \frac{Q-Q^-}{Q^+ - Q^-}; M_2 = \frac{Q^+ - Q}{Q^+ - Q^-}$, dan

fungsi keanggotaan X_e adalah $N_1 = \frac{X_e - X_e^-}{X_e^+ - X_e^-}; N_2 = \frac{X_e^+ - X_e}{X_e^+ - X_e^-}$.

Misalkan $h_1 = L_1M_1N_1; h_2 = L_1M_1N_2; h_3 = L_1M_2N_1; h_4 = L_1M_2N_2$
 $h_5 = L_2M_1N_1; h_6 = L_2M_1N_2; h_7 = L_2M_2N_1; h_8 = L_2M_2N_2$.

Jika didefinisikan

$$\alpha_i = \frac{h_i}{\sum_{j=1}^8 h_j}; i = 1, 2, \dots, 8 \tag{3}$$

maka sistem ruang keadaan pada persamaan (4) dapat ditulis dalam model fuzzy

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^8 \alpha_i A_i x + Bu \tag{4}$$

Dan keluaran

$$y = Cx \tag{5}$$

Selanjutnya, desain *controller* didasarkan pada model fuzzy pada persamaan (4) dan (5) yang dikenal dengan nama Kompensasi terdistribusi parallel (*Parallel Distributed Compensation-PDC*)

2.2 Desain Controller Model Fuzzy SMIB

Kompensasi terdistribusi parallel adalah prosedur desain *controller fuzzy* dari model fuzzy Takagi-Sugeno (Model fuzzy T-S). Ada beberapa desain *controller* antara lain *state feedback* yaitu $u = -Fx$, dan *output feedback* *controller* yaitu $u = Fy$, dengan y adalah keluaran seperti persamaan (5). Pada paper ini desain *controller* yang digunakan adalah *output feedback controller*. *Output feedback fuzzy controller* yang dikonstruksi melalui PDC adalah

$$u = -\sum_{j=1}^8 K_j y_j = -\sum_{j=1}^8 K_j Cx_j \tag{6}$$

Dengan dengan mensubstitusi persamaan (8) ke dalam persamaan (6) diperoleh

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^8 h_i (A_i x_i - B \sum_{j=1}^8 K_j Cx_j)$$

Atau dapat ditulis menjadi

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^8 h_i (A_i - BK_j C_j) x_i \tag{7}$$

Desain *controller* adalah menentukan matriks K_j sehingga sistem pada persamaan (7) stabil. Sistem pada persamaan (7) akan stabil jika nilai eigen dari $h_i(A_i - BK_j C_j)$ mempunyai bagian *real negatif* atau terletak pada separuh kiri bidang kompleks.

Dalam makalah ini, sistem output $y = \omega$, sehingga kita memiliki output persamaan

$y = [0 \ 1 \ 0 \ 0]x$ or matrix $C = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$ dan kita mendapatkan persamaan

$$A_i - BK_j C = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{li} & -D_{li} & 0 \\ 0 & 0 & -B_{li} & \frac{1}{T_0} \\ 0 & -\frac{K_E}{T_E} K_j & C_{li} & -\frac{1}{T_E} \end{bmatrix} \tag{8}$$

Karakteristik polinomial pada matriks persamaan (10) adalah

$$\lambda^4 + \left(B_{li} + \frac{1}{T_E} - A_{li} \right) \lambda^3 + \left(\frac{B_{li}}{T_E} - \frac{C_{li}}{T_0} - A_{li} B_{li} - A_{li} \frac{1}{T_E} \right) \lambda^2 - \left(\frac{B_{li} A_{li}}{T_E} - \frac{C_{li} A_{li}}{T_0} + D_{li} \frac{1}{T_0} \frac{K_E}{T_E} K \right) \lambda = 0 \tag{9}$$

Pada sistem SMIB persamaan (9) adalah stabil jika K_j negatif. Di sini, kita akan menentukan *output feedback controller* menggunakan metode *Pole Placement*.

2.3 Metode Pole Placement

Sistem persamaan ruang keadaan pada persamaan (7) tidak dapat dikontrol maka kita tidak dapat menerapkan *toolbox* " tempat " di *Matlab* untuk menentukan *output feedback controller*, K_j . Dalam makalah ini, kita memecahkan analitis dan tidak simulasi berdasarkan pada solusi analitis. Misalkan, kita ingin kutub atau nilai *eigen*

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ maka polinomial karakteristik adalah

$$(\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2)(\lambda - \lambda_3)(\lambda - \lambda_4) = 0$$

Persamaan (9) adalah polinomial karakteristik yang sama persamaan (2) , oleh karena itu, harus memenuhi

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = - \left(B_{li} + \frac{1}{T_E} - A_{li} \right) \tag{10}$$

$$\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_4 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_4 + \lambda_3 \lambda_4 = \left(\frac{B_{li}}{T_E} - \frac{C_{li}}{T_0} - B_{li} A_{li} - \frac{A_{li}}{T_E} \right) \tag{11}$$

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_2 \lambda_4 + \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 + \lambda_1 \lambda_3 \lambda_4 = \left(A_{li} B_{li} \frac{1}{T_E} - A_{li} \frac{C_{li}}{T_0} + D_{li} \frac{K_E}{T_E} K_j \frac{1}{T_0} \right) \tag{12}$$

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 = 0 \tag{13}$$

Dari Persamaan (8), kita tahu bahwa salah satu nilai eigen atau kutub adalah nol . Misalkan kita memilih $\lambda_4 = 0$ dan pengganti Persamaan (12), kita mendapatkan

$$\lambda_3 = - \left(B_{li} + \frac{1}{T_E} - A_{li} + \lambda_1 + \lambda_2 \right) \tag{14}$$

Substitusi persamaan (15) dan (11) and $\lambda_4 = 0$, kita peroleh

$$\lambda_1 \lambda_2 - (\lambda_1 + \lambda_2) \left(B_{li} + \frac{1}{T_E} - A_{li} + \lambda_1 + \lambda_2 \right) = \left(\frac{B_{li}}{T_E} - \frac{C_{li}}{T_0} - B_{li} A_{li} - \frac{A_{li}}{T_E} \right) \tag{15}$$

Kita dapat menulis persamaan (16), dalam bentuk sebagai kuadrat λ_1 , kami memperoleh

$$\lambda_1^2 + \left(B_{li} + \frac{1}{T_E} - A_{li} + \lambda_2 \right) \lambda_1 + \lambda_2^2 + \left(B_{li} + \frac{1}{T_E} - A_{li} \right) \lambda_2 + \left(\frac{B_{li}}{T_E} - \frac{C_{li}}{T_0} - B_{li} A_{li} - \frac{A_{li}}{T_E} \right) = 0$$

atau

$$\lambda_1 = - \frac{1}{2} \left(B_{li} + \frac{1}{T_E} - A_{li} + \lambda_2 \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(B_{li} + \frac{1}{T_E} - A_{li} + \lambda_2 \right)^2 - 4 \left(\lambda_2^2 + \left(B_{li} + \frac{1}{T_E} - A_{li} \right) \lambda_2 + \left(\frac{B_{li}}{T_E} - \frac{C_{li}}{T_0} - B_{li} A_{li} - \frac{A_{li}}{T_E} \right) \right)} \tag{16}$$

Misalkan diberikan $\lambda_2 < 0$ Sistem stabil jika

$$B_{li} + \frac{1}{T_E} - A_{li} + \lambda_2 > 0 \rightarrow |\lambda_2| < B_{li} + \frac{1}{T_E} - A_{li} \tag{17}$$

Oleh karena itu , kita bisa memilih λ_2 seperti yang persamaan (17) yang memenuhi, dan λ_1, λ_3 dapat dipilih sebagai persamaan (16) dan (14) . *Output feedback gain* dapat diperoleh dari persamaan(18),

$$K_j = \left(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 - A_{li} B_{li} \frac{1}{T_E} + A_{li} \frac{C_{li}}{T_0} \right) \frac{T_0 T_E}{D_{li} K_E} \tag{18}$$

dimana A_{li}, B_{li}, C_{li} parameter , yang berisi P, Q, X_e

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam simulasi ini kita mengambil beberapa parameter dari (Yadaiah & Ramana, 2006) $\omega_0 = 0.2; T_m = 8; x_q = 1.2; x_d = 1.8; M = 13; K_E = 20; T_E = 0.001; T_{d0} = 8; ,$ dengan kondisi awal $\delta = 0.3; \omega = 0.2; E_q = 0.2$ dan $E_{fd} = 0.1$. Interval keanggotaan fuzzy adalah

$$P \in [0.2 \quad 2]; Q \in [-0.2 \quad 0.4]; X_e \in [-0.2 \quad 2]$$

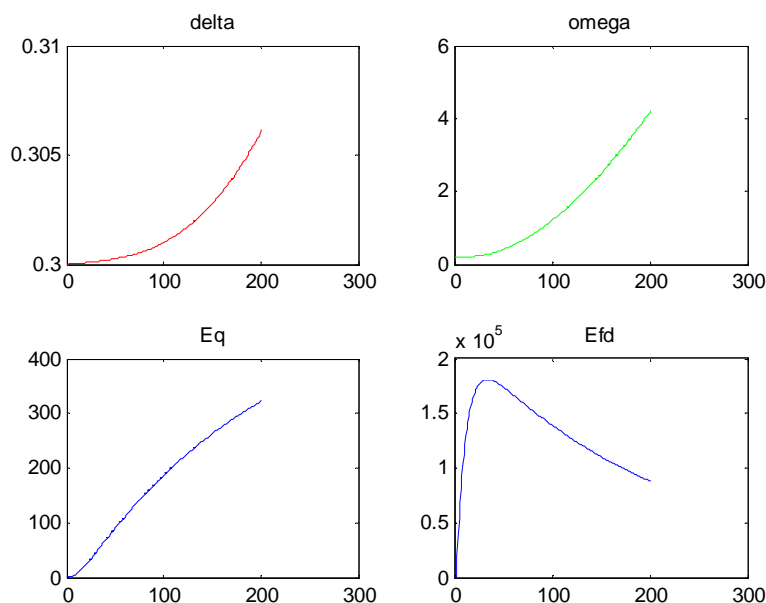
Dalam metode *pole placement*, kita memperoleh

$$\lambda_2 = -\alpha \left(B_{li} + \frac{1}{T_E} - A_{li} \right); 0 < \alpha < 1$$

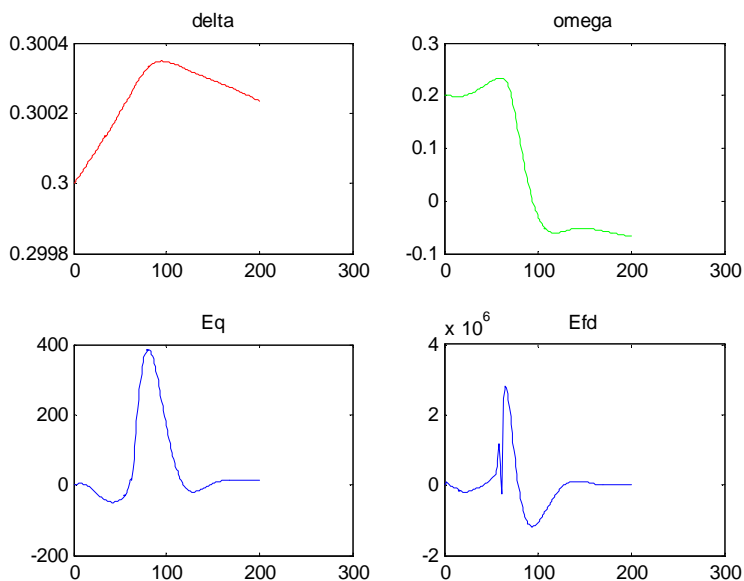
dan *output feedback gain*

$$K_{jpole} = \left(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 + A_{li} \frac{C_{li}}{T_0} - A_{li} B_{li} \frac{1}{T_E} \right) \frac{T_0 T_E}{D_{li} K_E}$$

Dalam makalah ini kami melakukan simulasi untuk membandingkan *performance* fuzzy *output feedback controller* SMIB dengan metode *pole placement* . Dari simulasi ini , kami juga menyajikan *performance* dari SMIB tanpa kontrol, dengan kontrol tanpa fuzzy, dan kontrol fuzzy. Gambar 1 - 7 adalah *performance* SMIB untuk $P = 1.8; Q = 0.2; X_e = 1.8$ dan $\alpha = 0.2$. SMIB tanpa kontrol mewakili pada Gambar 1, sistem tidak stabil . Kami menerapkan *output feedback controller*, gambar 2 mewakili kinerja SMIB dengan kontrol tapi kami tidak menerapkan *fuzzy controller*.

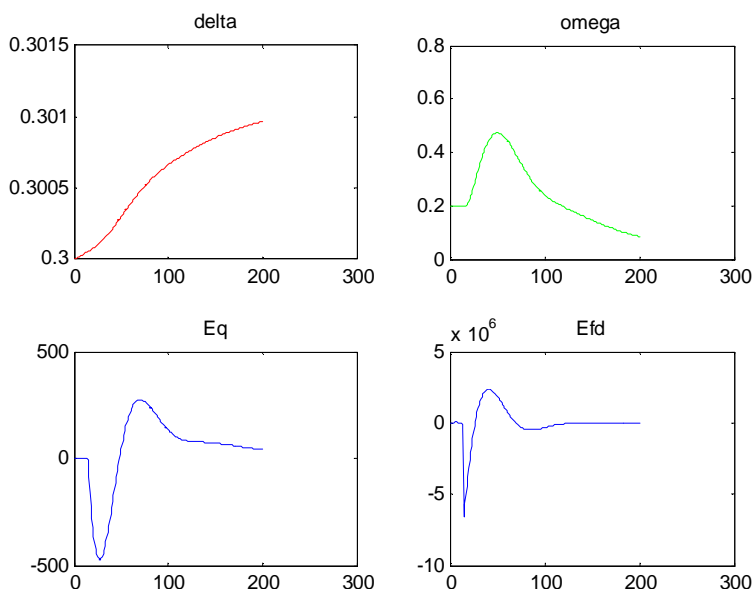


Gambar 1. SMIB *Performance* tanpa kontrol



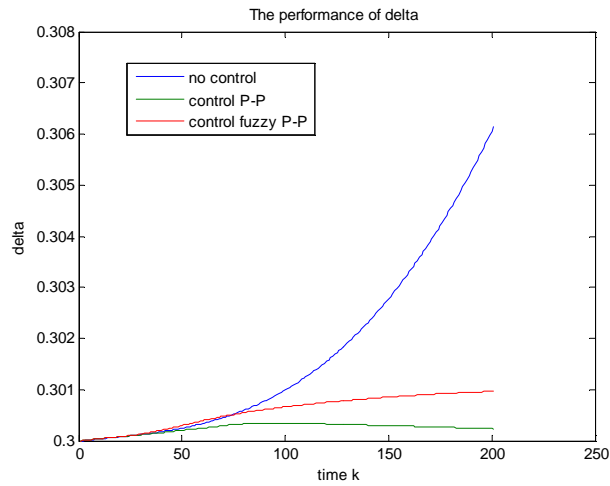
Gambar 2. SMIB Performance dengan kontrol Pole Placement

SMIB lebih stabil daripada tanpa kontroler, kita menggunakan metode *Pole Placement* untuk menentukan *feedback gain*. Dari Gambar 1 dan 2, kita tahu bahwa *performance* SMIB dengan metode *Pole Placement* lebih baik. Dalam simulasi terakhir, kami menerapkan hasil *feedback fuzzy controller* untuk SMIB, kami juga menggunakan *Pole Placement* untuk menentukan *feedback gain*, SMIB dengan *output feedback fuzzy controller*, gambar . 3 memiliki *performance* yang lebih baik dari *output feedback*

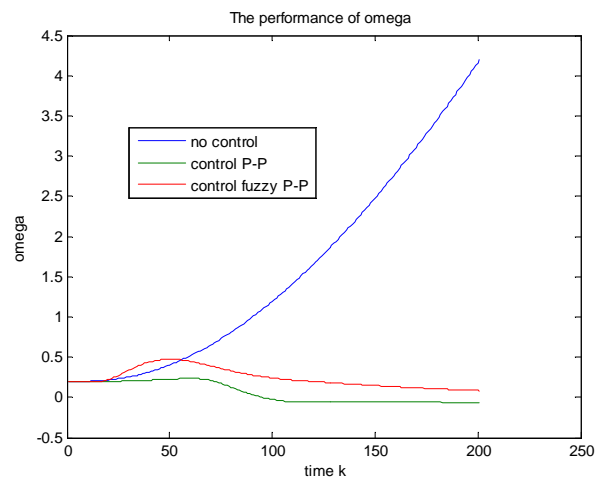


Gambar 3. SMIB Performance dengan fuzzy control Pole Placement

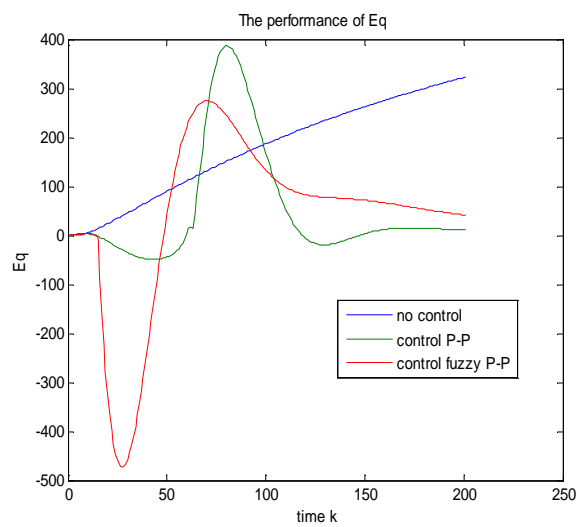
Gambar 4-7, mewakili *performance* δ, ω, E_q dan E_{fd} untuk $\alpha = 0.2$ semua simulasi. Tampaknya untuk, *output feedback fuzzy controller* oleh *Pole Placement* memiliki *performance* terbaik dibandingkan metode lain.



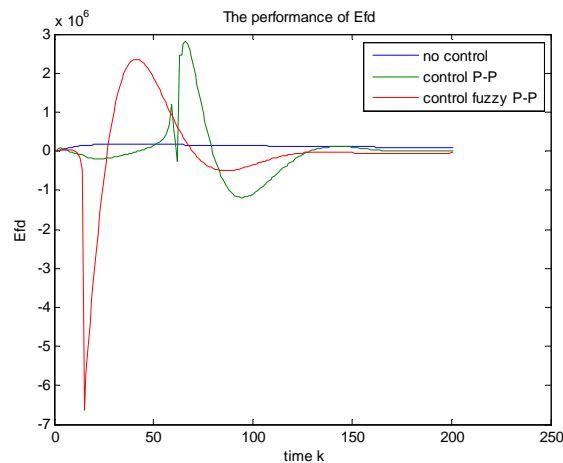
Gambar 4. The Performance of δ



Gambar 5. The Performance of ω



Gambar 6. The Performance of E_q



Gambar 7. The Performance of E_{fd}

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan dan hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa

- (1) Model sistem fuzzy dapat digunakan untuk desain *controller* untuk sistem SMIB yang merupakan sistem tak linear
- (2) Nilai parameter fuzzy yang diambil adalah P , Q , X_e
- (3) *Output feedback fuzzy control* membuat SMIB lebih stabil daripada menggunakan kontrol tanpa fuzzy

DAFTAR PUSTAKA

- Peng zhao and O.P. Malik, 2009, *Design of an Adaptive PSS Based on Recurrent Adaptive Control Theory*
- Soliman, M, Elshafei, Bendary, F. and Mansour, W, 2009, *LMI static Output Feedback design of fuzzy power system stabilizers*, *Expert systems with Application* 36 pp. 6817-6825, Elsevier
- Tamaji, Musyafa, Darma A and Robandi, I, 2009, *Controller Design SMIB by Direct Feedback linearization*, presented in Conference APTECS 2009, ITS, Surabaya, Indonesia
- Tanaka, K. and Wang, H. O., 2001, *Fuzzy Control Systems Design and Analysis*, John Wiley & Sons, Inc
- Yadaiah, N, Ramana, N.Y., 2006, *Linearization of Multi machine Power System: modeling and Control*