

IMPROVEMENT OF ELECTRICAL POWER SYSTEM DYNAMIC STABILITY USING FUZZY LOGIC

Paulus Setiawan

Program Studi Teknik Aeronautika
Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto
Jl. Janti Blok-R Lanud Adisutjipto, Yogyakarta 55198
Email: paulussetiawanstta@gmail.com

Abstract

This research has an aim to know the effectiveness of fuzzy logic which takes over the controlling of Proportional Integral Derivative (PID) in repairing the dynamic stability of electrical power system. This research begins with making the mathematic model of electrical power system into a circumstances variable equation and the plant system diagram block model. The structure of fuzzy logic controller system is designed by using 2-input which has three, five, and seven membership functions. The formed system work test is conducted by giving a disruption of increase and decrease electric power, to perceive the result of dynamic order on system variable to rotor speed deviation, angle rotor, voltage terminal, and power electric. Fuzzy logic can increase PIDPSS performance in repairing the electrical power system dynamic stability. The overshoot value decrease to 73.881% - 89.069% and settling time is 57.81% - 67.01% to the rotor speed deviation.

Keywords: PID, PIDPSS, fuzzy logic.

1. Pendahuluan

Salah satu permasalahan yang muncul pada suatu sistem tenaga listrik adalah masalah stabilitas dan dinamika sistem terhadap adanya gangguan. Pada bekerjanya suatu generator dengan baik, kecepatan mekanik dari rotor akan sama dengan kecepatan berputarnya medan putar stator. Kesamaan kecepatan ini cenderung dipertahankan apabila terjadi gangguan karena timbulnya kopel-kopel pesinkron pada generator **Error! Reference source not found.** Jika pada suatu generator yang terhubung pada jaring, yang mengandung generator-generator lain, putaran rotornya turun, maka sudut dayanya akan berkurang. Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik seperti pada generator dapat menimbulkan osilasi terhadap parameter-parameter sistem seperti tegangan, frekuensi, dan daya. Sementara itu, kebutuhan sistem menghendaki agar parameter-parameter tersebut bernilai tetap pada suatu titik operasi tertentu. Oleh karena itu, permasalahan dalam stabilitas sistem tenaga adalah bagaimana agar osilasi yang terjadi akibat gangguan tersebut dapat secepat mungkin stabil.

Studi stabilitas yang tepat dan berkesinambungan sangat diperlukan untuk menganalisis sistem supaya dapat bekerja dengan efektif. Untuk mempelajari stabilitas dinamik yaitu stabilitas generator yang mengalami perubahan beban, maka digunakan pemodelan terhadap komponen-komponen seperti generator sinkron, saluran transmisi, dan beban yang diturunkan dari persamaan-persamaan matematis yang mewakili perilaku dinamika sistem.

Penurunan persamaan-persamaan matematis yang mewakili perilaku dinamika sistem dapat dideskripsikan dengan menggunakan persamaan diferensial linear dan akibat yang terjadi yang berupa osilasi frekuensi rendah dapat distabilkan kembali dengan menambahkan sinyal kendali tambahan [2]. Penambahan sinyal kendali tersebut dilakukan dengan menambahkan blok PSS (*Power System Stabilizer*) berupa blok washout dan lead compensator dengan masukan berupa perubahan kecepatan rotor, perubahan frekuensi atau perubahan akselerasi daya. Penalaan sinyal kendali tambahan secara konvensional dilakukan

dengan menghitung parameter PSS berdasarkan data sistem yang telah diketahui.

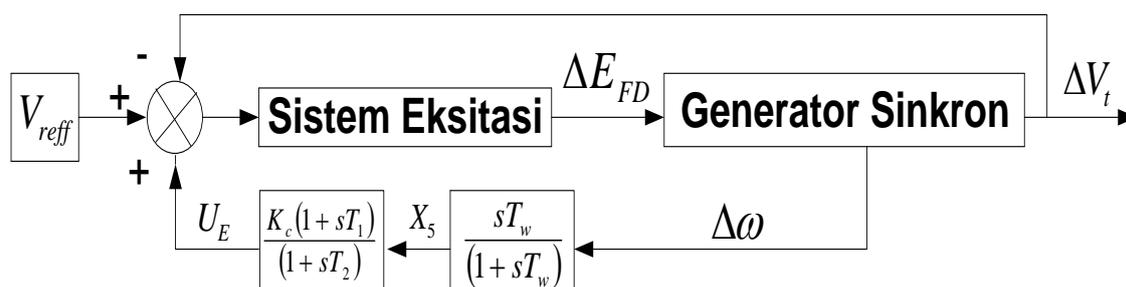
Seiring dengan berkembangnya dan kemajuan penelitian dibidang ilmu pengetahuan, untuk memperbaiki kompensator mendahului kemudian digunakan kendali kompensator PID (*Proportional Integral Derivative*). Pengendali ini merupakan pengendali proses linear dengan teori matematika yang lengkap dan mampu merancang secara tepat dan aman suatu kendali terprogram. Kendali PID dapat memperbaiki tanggapan transien dan mengeliminasi galat pada kondisi tunak. Tetapi disisi lain, PID juga mempunyai kelemahan, diantara timbulnya lonjakan yang relatif besar dan waktu pencapaian kondisi tunak yang relatif lama.

Berdasarkan kelemahan-kelemahan tersebut, sistem kendali PID mulai diganti dengan pengendali logika *fuzzy*. Pengendali logika *fuzzy* yang tidak memerlukan model analisis telah terbukti memiliki banyak keunggulan. Sebagai contoh pada sistem kendali mesin cuci, transmisi otomatis pada mobil, dan sistem kendali pemberhentian otomatis pada kereta api bawah tanah. Namun, kinerja pengendali logika *fuzzy* sangat bergantung pada keahlian dan pengalaman seorang pakar untuk menentukan aturan-aturan dan fungsi keanggotaan. Hal ini dikarenakan seorang pakar telah seringkali atau banyak melakukan percobaan.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Kendali Power System Stabilizer (PSS)

Blok diagram *Power System Stabilizer (PSS)* terdiri dari rangkaian *washout* dan kompensator seperti pada Gambar 1. Rangkaian *washout* diperlukan untuk mengeliminasi bias keadaan tetap pada keluaran PSS, sedangkan kompensator diberikan untuk derajat mendahului (*lead*).



Gambar 1. Blok Diagram PSS

T_w merupakan konstanta waktu *washout*, K_c merupakan penguat PSS, T_1 dan T_2 merupakan konstanta waktu derajat *lead*, $\Delta\omega$ merupakan sinyal masukan untuk PSS berupa perubahan kecepatan rotor, dan U_E merupakan sinyal keluaran PSS yang ditambahkan kedalam sistem eksitasi sebagai sinyal kendali tambahan (*supplementary control*).

Untuk menentukan nilai K, T, dan T dapat dihitung dari blok diagram sistem tenaga listrik [3] sebagai:

1. Mendesain PSS dari frekuensi mode mekanis alami tak teredam (*undamped natural mechanical mode frequency*). Frekuensi mode mekanis alami tak teredam diberikan oleh

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\omega_b \cdot K_1}{M}} \quad (1)$$

2. Menentukan fungsi alih G_E bagian maju (*forward path*) sistem tenaga, yakni fungsi alih dari keluaran PSS ke torsi elektrik. Dari perhitungan fungsi alih ini dapat ditentukan apakah diperoleh fase *lead* atau *lag*. Fase *lead* atau *lag* $G_E = \angle G_E|_s$.

3. Mendesain kompensasi fase *lead* atau *lag* T_w . Jika sinyal masukan untuk PSS dipilih T_w , maka

$$\angle G_E + \angle G_c = 0 \quad (2)$$

Kemudian menentukan konstanta waktu derajat *lead* atau *lag*

$$G_c = \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \quad (3)$$

4. Mendesain penguat PSS K_c

$$K_c = \frac{D_E}{|G_E|_s |G_c|_s} \quad (4)$$

Dimana D_E merupakan peredaman elektrik, untuk frekuensi mode mekanis alami tak teredam $D_E = 2\zeta_n \cdot \omega_n \cdot M$ dan ζ_n merupakan koefisien peredaman berkisar antara 0,1 sampai 0,3 pu. Diagram fungsi alih dari sinyal eksitasi tambahan dapat dinyatakan sebagaimana terdapat pada Gambar 8. Persamaan yang diperoleh dari fungsi alih tersebut adalah

$$(1 + sT_w)X_5 = sT_w \Delta \omega \quad (5)$$

$$(1 + sT_2)U_E = K_c(1 + sT_1)X_5 \quad (6)$$

Vektor variabel keadaan baru yang terbentuk adalah

$$x = [\Delta \omega, \Delta \delta, \Delta e_q, \Delta E_{FD}, X_5, U_E]^T \quad (7)$$

2.2 Pengendali PIDPSS

Berdasarkan pada persamaan (6) terdapat blok *lead compensator* dengan $H_2(s) = K_c \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)$, blok *lead compensator* ini dapat dianalogikan dengan blok *Proportional Derivative* (PD) [3]:

$$H_2(s) = K_c \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right) = K_c \left(\frac{T_1 s + 1}{\alpha T_1 s + 1} \right) = K_p \frac{\left(\frac{K_d}{K_p} s + 1 \right)}{\left(\frac{K_d}{NK_p} s + 1 \right)} = H_{PD}(s) \quad (8)$$

$$K_p = K_c$$

Dimana: $K_d = K_c T_1$, sehingga $T_1 = \frac{K_d}{K_p}$ (9)

$$N = \frac{1}{\alpha}$$

$$G_c(s) = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} = (1 + K_{d2} s) \left(K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s} \right) \quad (10)$$

Persamaan (10) merupakan persamaan orde dua yang dipecah kedalam persamaan orde satu [4], sehingga didapatkan

$$K_p = K_{p2} + K_{d2} \cdot K_{i2} \quad (11)$$

$$K_d = K_{d2} \cdot K_{p2} \quad (12)$$

$$K_i = K_{i2} \quad (13)$$

Persamaan yang diperoleh dari fungsi alih tersebut adalah:

$$(1 + sT_w)X_5 = sT_w \cdot \Delta \omega \quad (14)$$

$$(1 + s0.001)X_6 = (1 + sK_{d2})X_5 \quad (15)$$

$$sU_E = (sK_{p2} + K_{i2})X_6 \quad (16)$$

Vektor variabel keadaan baru yang terbentuk adalah:

$$x = [\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta e_q, \Delta E_{FD}, X_5, X_6, U_E]^T \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\omega} \\ \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta e_q} \\ \dot{\Delta E_{FD}} \\ \dot{X}_5 \\ \dot{X}_6 \\ \dot{U}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D & -K_1 & -K_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M & M & M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_4 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T'_{d0}}{T_A} & \frac{(T'_{d0} K_3)}{T_A} & \frac{1}{T_A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_A K_5 & -K_A K_6 & -1 & 0 & \frac{K_A}{T_A} & 0 \\ 0 & \frac{T_A}{M} & \frac{T_A}{M} & \frac{T_A}{M} & 0 & \frac{T_A}{M} & 0 \\ 0 & -K_1 & -K_2 & 0 & -\frac{1}{T_w} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{M}{M} & \frac{M}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1000 \cdot K_1 K_{d2}}{M} & \frac{-1000 \cdot K_2 K_{d2}}{M} & 0 & 1000 - \left(\frac{1000 K_{d2}}{T_w}\right) & -1000 & 0 \\ 0 & \frac{-1000 \cdot K_1 K_{p2} K_{d2}}{M} & \frac{-1000 \cdot K_2 K_{p2} K_{d2}}{M} & 0 & K_{p2} \left(1000 - \frac{1000 K_{d2}}{T_w}\right) & K_{i2} - 1000 K_{p2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta e_q \\ \Delta E_{FD} \\ X_5 \\ X_6 \\ U_E \end{bmatrix} \quad \dots(18)$$

Data sistem generator sinkron terhubung ke bus tak berhingga yang digunakan sebagai *plant* yang dikendalikan [3] yang terdiri dari data generator, sistem eksitasi, jaringan dan beban, serta kondisi awal.

Generator:

$$\begin{aligned} M &= 9.26 & T_{d0} &= 7.76 & D &= 0 \\ x_d &= 0.973 & x'_d &= 0.190 & x_q &= 0.550 \end{aligned}$$

Sistem Eksitasi:

$$K_A = 50 \qquad T_A = 0.05$$

Saluran Transmisi dan Beban:

$$\begin{aligned} R &= -0.034 & X &= 0.997 \\ G &= 0.249 & B &= 0.262 \end{aligned}$$

Kondisi awal:

$$P_{e0} = 1.0 \qquad Q_{e0} = 0.015 \qquad V_{i0} = 1.05$$

Berdasarkan rumusan-rumusan diatas, dilakukan perhitungan parameter stabilitas sistem tenaga listrik yang meliputi nilai konstanta K_1 sampai K_6 . Hasil perhitungan tersebut adalah:

$$\begin{aligned} K_1 &= 0.5442 & K_2 &= 1.2120 & K_3 &= 0.6584 \\ K_4 &= 0.7037 & K_5 &= -0.0945 & K_6 &= 0.8150 \end{aligned}$$

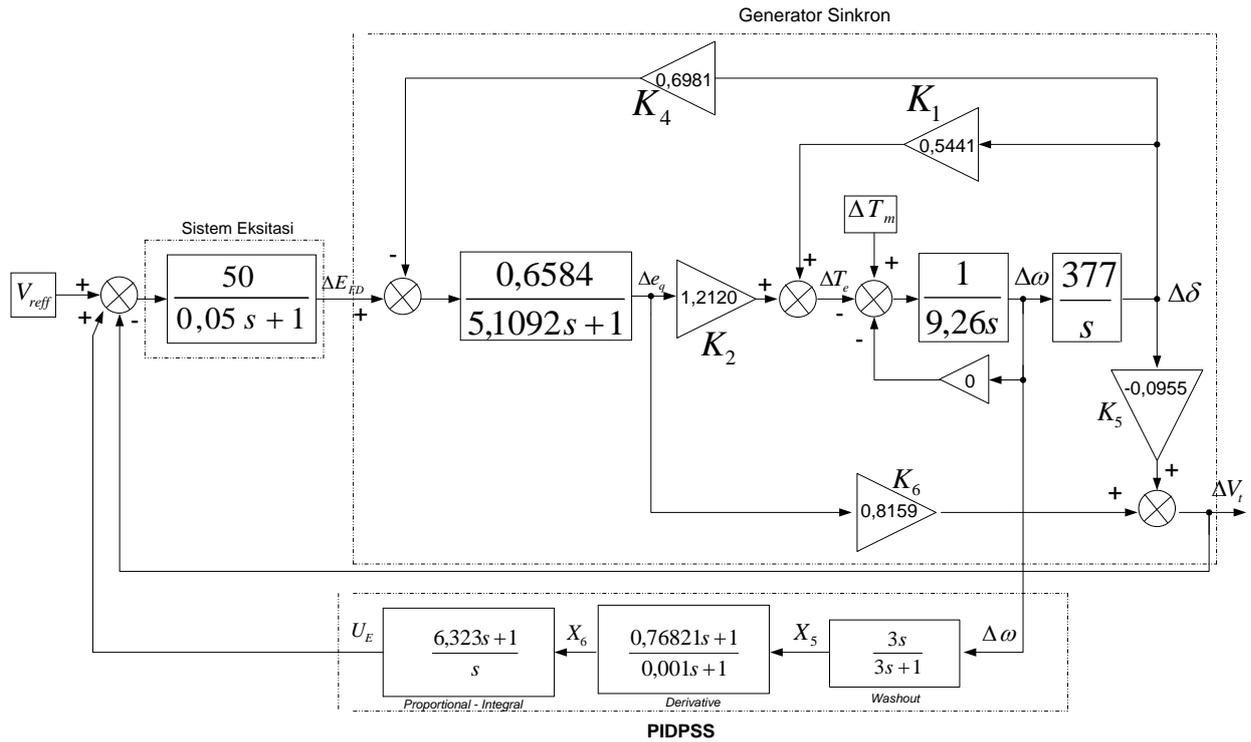
Sedangkan parameter PSS seperti ditunjukkan pada fungsi alih PSS adalah:

$$T = 3.0 \qquad T_1 = 0.6581 \qquad T_2 = 0.1 \qquad K_c = 7.0911$$

Setelah kita mendapatkan perhitungan konstanta PSS berupa T_1 dan K_c , perhitungan lebih lanjut untuk mendapatkan konstanta dalam PID. Dari persamaan (9) dimana: $K_c = 7.0911$,

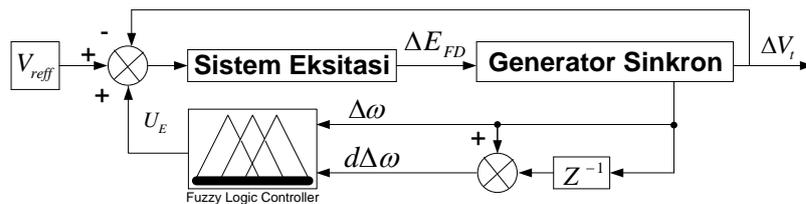
$K_p = K_c = 7.0911$, dan $T_1 = 0.685 = \frac{K_d}{K_p}$ sehingga kita dapatkan $K_d = 4.857$. Kemudian dari

persamaan (10) sampai (13), kita bisa mendapatkan konstanta untuk PID yaitu: $K_{p2} 6.323$, $K_{d2} = 0.76821$, dan $K_{i2} = 30$. Nilai dari parameter PID ini selanjutnya kita gunakan untuk menentukan fungsi alih blok diagram PIDPSS seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

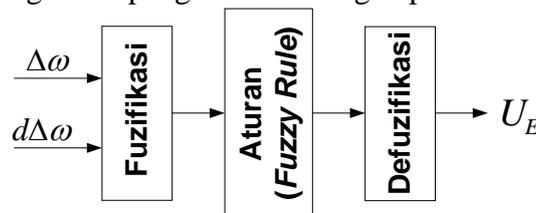


Gambar 2. Fungsi alih pengendali dengan penambahan PIDPSS

Pengendali *fuzzy* yang menggantikan blok diagram PIDPSS dan PSS konvensional, dengan pengolahan dua sinyal masukan ke pengendali, yaitu sinyal perubahan kecepatan rotor ($\Delta\omega$), dan sinyal delta perubahan kecepatan rotor ($d\Delta\omega$)[4]. Sinyal $d\Delta\omega$ didapatkan dari pengurangan sinyal $\Delta\omega$ saat ini, $\Delta\omega_{(k)}$, dengan sinyal $\Delta\omega$ sebelumnya, $\Delta\omega_{(k-1)}$, dan kedua sinyal tersebut diolah oleh pengendali *fuzzy*. Dengan demikian terdapat dua masukan ke pengendali dan satu keluaran dari pengendali tersebut. Maka aturan yang digunakan nantinya akan meliputi tiga komponen yaitu dua komponen masukan (*antecedent*) dan satu komponen keluaran (*consequent*).

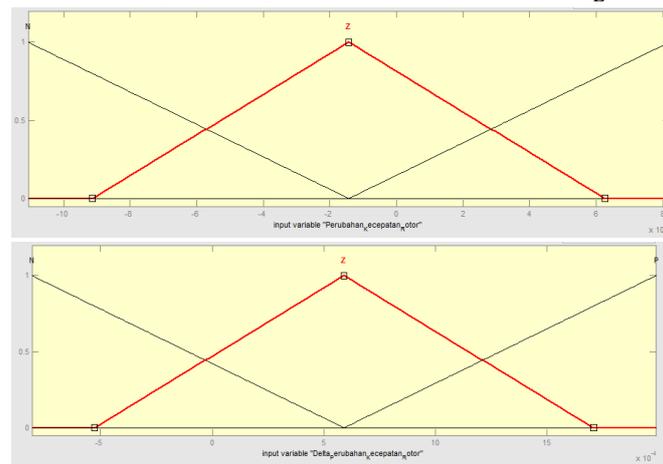


Gambar 3 Fungsi alih pengendalian dengan penambahan FPIDPSS



Gambar 4. Struktur Pengendali FPIDPSS

Sembilan buah data untuk masing-masing data $\Delta\omega$, $d\Delta\omega$, dan U_E .



Gambar 5. Fungsi keanggotaan dari nilai input variabel $\Delta\omega$ (perubahan kecepatan rotor) dan $d\Delta\omega$ (delta perubahan kecepatan rotor)

Kesembilan data ini merupakan penalaran *fuzzy* dengan tiga fungsi keanggotaan, sehingga aturan yang diperlukan juga sebanyak sembilan aturan. Penjabarannya adalah sebagai berikut:

1. **Titik $\Delta\omega = 0.0078173$, $d\Delta\omega = 0.0003506$, dan $U_E = 0.44074$**

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = 0,44074$$
2. **Titik $\Delta\omega = 0.0081969$, $d\Delta\omega = 0.0001679$, dan $U_E = 0.29677$**

$$z = \frac{0.6162.x_1 + 0.1639.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0.6162 + 0.1639 + 0 + \dots + 0} = 0,29677$$
3. **Titik $\Delta\omega = 0.0076427$, $d\Delta\omega = -0.00027972$, dan $U_E = 0.4031$**

$$z = \frac{0.4483.x_1 + 0.5517.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0.4483 + 0.5517 + 0 + \dots + 0} = 0,4031$$
4. **Titik $\Delta\omega = -0.010832$, $d\Delta\omega = -0.00015471$, dan $U_E = -0.40062$**

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = -0,40062$$
5. **Titik $\Delta\omega = -0.011057$, $d\Delta\omega = -0.00003615$, dan $U_E = -0.35874$**

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = -0,35874$$
6. **Titik $\Delta\omega = -0.01095$, $d\Delta\omega = -0.000067$, dan $U_E = -0.31291$**

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = -0,31291$$
7. **Titik $\Delta\omega = 0.0029633$, $d\Delta\omega = 0.000039$, dan $U_E = -0.040643$**

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = -0,040643$$
8. **Titik $\Delta\omega = 0.0030211$, $d\Delta\omega = 0.0000098$, dan $U_E = 0.030635$**

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = 0,030635$$

9. Titik $\Delta\omega = 0.0029981$, $d\Delta\omega = -0.000016$, dan $U_E = 0.01985$

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = 0,01985$$

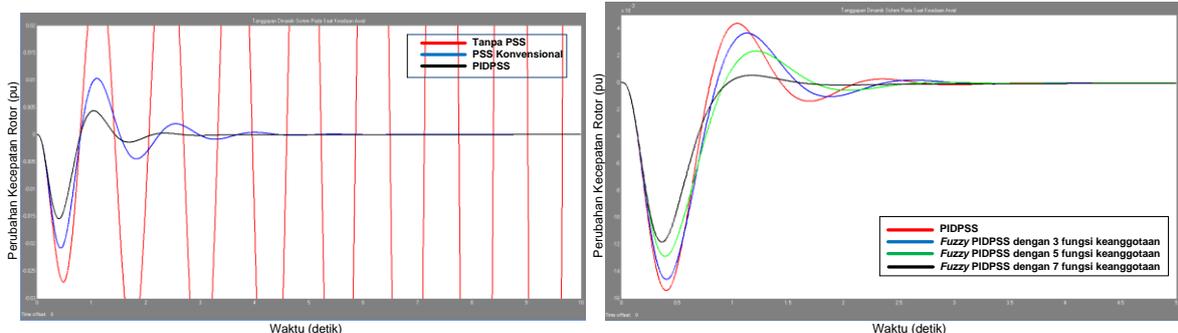
Kesembilan persamaan diatas, kemudian kita susun kedalam matriks $A.x = C$, dimana:

$$\text{Matriks}_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.4104 & 0.5896 & 0 & 0.4104 & 0.5896 & 0 \\ 0.6162 & 0.1639 & 0 & 0.013838 & 0.0394 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4483 & 0.5517 & 0 & 0.0003115 & 0.0003115 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2757 & 0.7073 & 0 & 0.2757 & 0.2027 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4154 & 0.5376 & 0 & 0.4154 & 0.4624 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.44236 & 0.5764 & 0 & 0.0673 & 0.0673 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4223 & 0.5777 & 0 & 0.1696 & 0.1696 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4258 & 0.5742 & 0 & 0.1485 & 0.1485 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4221 & 0.5777 & 0 & 0.1498 & 0.1498 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Matriks}_x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix} \quad \text{Matriks}_C = \begin{bmatrix} 0.59354 \\ -0.5712 \\ -0.359 \\ 0.1013 \\ 0.056 \\ -0.08194 \\ -0.06161 \\ -0.06902 \\ -0.05185 \end{bmatrix}$$

Pada matriks A diatas, kemudian kita menghitung matriks A invers. Setelah nilai-nilai matriks A invers kita dapatkan, barulah kita bisa mendapatkan nilai x_1 sampai dengan x_9 . Nilai x_1 sampai dengan x_9 inilah yang kemudian merupakan nilai keluaran himpunan fungsi keanggotaan fuzzy seperti:

$$\begin{aligned} x_1 &= -0.6726 & MF1 &= -0.6726 \\ x_2 &= -0.1488 & MF2 &= -0.1488 \\ x_3 &= 3.2497 & MF3 &= 3.2497 \\ x_4 &= -0.4745 & MF4 &= -0.4745 \\ x_5 &= 0.08766 & \Rightarrow MF5 &= 0.08766 \\ x_6 &= -0.2532 & MF6 &= -0.2532 \\ x_7 &= -0.1129 & MF7 &= -0.1129 \\ x_8 &= 0.6104 & MF8 &= 0.6104 \\ x_9 &= 2.0633 & MF9 &= 2.0633 \end{aligned}$$

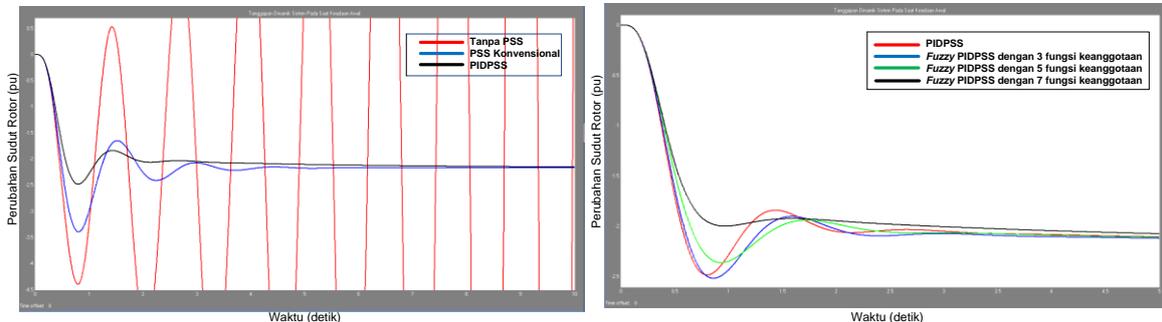
3. Hasil dan Pembahasan



Gambar 6. Grafik osilasi pada variabel perubahan kecepatan rotor

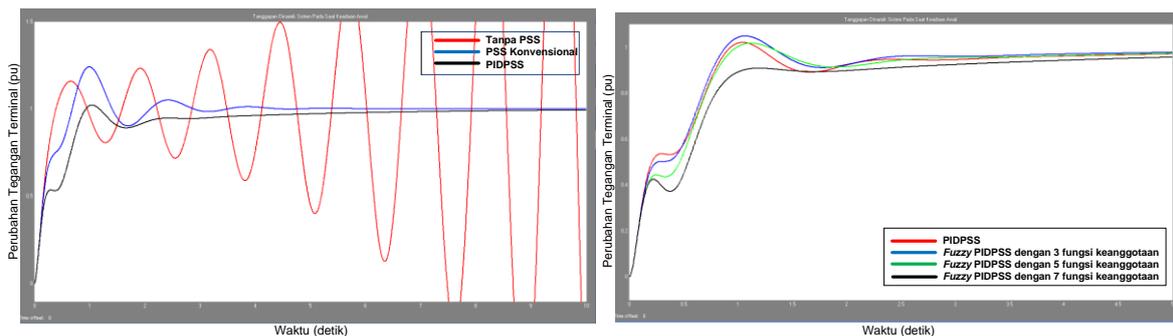
Perubahan kecepatan rotor ($\Delta\omega$) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 6, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.00672 pu menjadi 0.003 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 55.36% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.003 pu menjadi 0.0024 pu – 0.00176 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.00672 pu menjadi 0.0024 pu – 0.00176 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 20% - 41.33% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 64.29% - 73.81% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 6.4 detik menjadi 3.45 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 46.09% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 3.45 detik

menjadi 3.4 detik – 2.7 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 6.4 detik menjadi 3.4 detik – 2.7 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 2.89% - 21.74% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 47.66% - 57.81% terhadap PSS konvensional.



Gambar 7. Grafik osilasi pada variabel perubahan sudut rotor

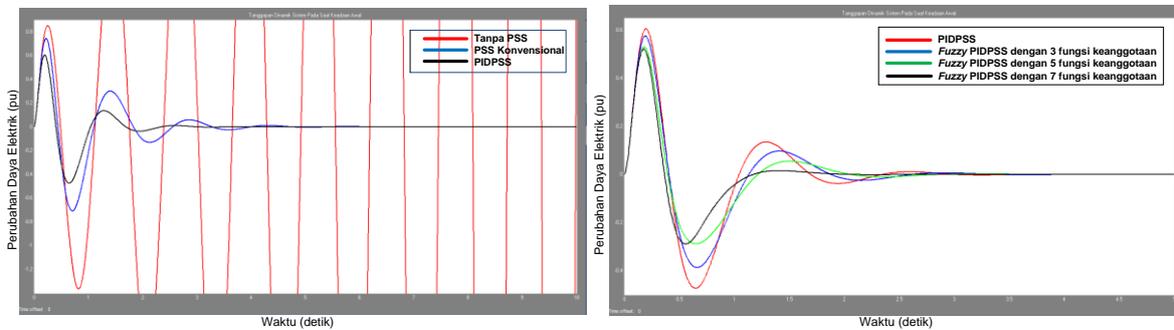
Perubahan sudut rotor ($\Delta\delta$) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 7, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.34 pu menjadi 0.0905 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 73.38% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.0905 pu menjadi 0.0705 pu – 0.0255 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.34 pu menjadi 0.0705 pu – 0.0255 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 22.09% - 71.82% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 79.26% - 92.5% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 6.95 detik menjadi 3.8 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 45.32% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 3.8 detik menjadi 3.7 detik – 3.1 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 6.95 detik menjadi 3.7 detik – 3.1 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 2.63% - 18.42% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 46.76% - 55.39% terhadap PSS konvensional.



Gambar 8. Grafik osilasi pada variabel perubahan tegangan terminal

Perubahan tegangan terminal (ΔV_t) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 8, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.1617 pu menjadi 0.1078 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 33.33% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 1.078 pu menjadi 0.0845 pu – 0.078 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.1617 pu menjadi 0.0845 pu – 0.078 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 21.61% - 27.64% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 47.74% - 51.76% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 6.4 detik menjadi 3.4 detik terhadap

PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 46.88% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 3.4 detik menjadi 3.3 detik – 2.6 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 6.4 detik menjadi 3.3 detik – 2.6 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 2.94% - 23.53% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 48.44% - 59.38% terhadap PSS konvensional.



Gambar 9. Grafik osilasi pada variabel perubahan daya elektrik

Perubahan daya elektrik (ΔT_e) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 25, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.195 pu menjadi 0.091 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 53.33% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.091 pu menjadi 0.055 pu – 0.039 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.195 pu menjadi 0.055 pu – 0.039 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 39.56% - 57.14% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 71.79% - 80% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 6.05 detik menjadi 3.1 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 48.76% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 3.1 detik menjadi 3.05 detik – 2.8 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 6.05 detik menjadi 3.05 detik – 2.8 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 1.61% - 9.68% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 49.59% - 53.72% terhadap PSS konvensional.

4. Kesimpulan

1. Penerapan pengendali *Proportional Integral Derivative* (PID) untuk memperbaiki stabilitas dinamik pada sistem SMIB dapat memberikan unjuk kerja peredaman osilasi yang lebih baik jika dibandingkan dengan pengendali PSS konvensional. Kemudian penerapan pengendali logika *fuzzy Proportional Integral Derivative* (FPID) untuk memperbaiki stabilitas dinamik pada sistem SMIB dapat memberikan unjuk kerja peredaman osilasi yang lebih baik lagi jika dibandingkan dengan pengendali PIDPSS. Hasil penurunan *overshoot* pada ketiga jenis pengujian yaitu berkisar antara 73.881% - 89.069% untuk variabel perubahan kecepatan rotor, 92.5% - 96.48% untuk variabel perubahan sudut rotor, 51.76% - 78.5% untuk variabel perubahan tegangan terminal, dan 80% - 91.89% untuk variabel perubahan daya elektrik. Sedangkan hasil penurunan *settling time* berkisar antara 57.81% - 67.01% untuk variabel perubahan kecepatan rotor.
2. Pada penelitian ini pengendali logika *fuzzy* dengan jumlah tujuh fungsi keanggotaan dapat memberikan hasil yang lebih baik jika dibandingkan dengan pengendali logika *fuzzy* yang menggunakan lima dan tiga fungsi keanggotaan, hal ini dapat dilihat dari hasil penurunan nilai *overshoot*, *settling time*. Tetapi untuk kecepatan waktu komputasi, pengendali logika

fuzzy dengan jumlah tujuh fungsi keanggotaan lebih lama jika dibandingkan dengan pengendali logika *fuzzy* yang menggunakan lima dan tiga fungsi keanggotaan.

Daftar Pustaka

- [1] Lim, C. M., & Elangovan, S. (1985). A new stabiliser design technique for multimachine power systems. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, (9), 2393-2400.
- [2] Hsu, Y. Y., & Liou, K. L. (1987). Design of self-tuning PID power system stabilizers for synchronous generators. *IEEE Transactions on Energy conversion*, (3), 343-348.
- [3] Yu, Y. N. (1983). Electric power system dynamics. *ACADEMIC PRESS, INC., 111 FIFTH AVE., NEW YORK, NY 10003, USA, 1983, 256*.
- [4] Hiyama, T., Kugimiya, M., & Satoh, H. (1994). Advanced PID type fuzzy logic power system stabilizer. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 9(3), 514-520.
- [5] Wolovich, W., A., (1994), *Automatic Control System Basic Analysis and Design*, Saunders College Publishing, Florida.
- [6] Kuo, B., C., (1995), *Automatic Control Systems*, Prentice-Hall Inc, New Jersey.
- [7] Emami, M. R., Turksen, I. B., & Goldenberg, A. A. (1998). Development of a systematic methodology of fuzzy logic modeling. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 6(3), 346-361.
- [8] Hiyama, T. (1994). Robustness of fuzzy logic power system stabilizers applied to multimachine power system. *IEEE Transactions on Energy conversion*, 9(3), 451-459.
- [9] Hoang, P., & Tomsovic, K., (1996), Design and Analysis of an Adaptive Fuzzy Power System Stabilizer, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 11 (2), 445-461.
- [10] Hu, B., Mann, G. K., & Gosine, R. G. (1999). New methodology for analytical and optimal design of fuzzy PID controllers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 7(5), 521-539.
- [11] Hu, B., G., Mann, G., K., I., & Gosine, R., G., (2001), A Systematic Study of Fuzzy PID Controllers Function Based Evaluation Approach, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 9 (5), 669-712.
- [12] Jamshidi, M., Vadiiee, N., & Ross, T. (1993). *Fuzzy logic and control: software and hardware applications* (Vol. 2). Pearson Education.
- [13] Kim, D., & Rhee, S. (2001). Design of an optimal fuzzy logic controller using response surface methodology. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 9(3), 404-412.
- [14] Li, W. (1998). Design of a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 6(4), 449-463.
- [15] Li, H. X. (1997). A comparative design and tuning for conventional fuzzy control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 27(5), 884-889.
- [16] Malki, H. A., Li, H., & Chen, G. (1994). New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2(4), 245-254.
- [17] Ogata, K., & Yang, Y. (2002). *Modern control engineering* (Vol. 4). India: Prentice hall.
- [18] Padiyar, K., R., (1984), *Power System Dynamics Stability and Control*, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore.
- [19] Toliyat, H. A., Sadeh, J., & Ghazi, R. (1996). Design of augmented fuzzy logic power system stabilizers to enhance power systems stability. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 11(1), 97-103.