
Jurnal ***Rekayasa Elektrika***

VOLUME 14 NOMOR 1

APRIL 2018

**Desain Power System Stabilizer Berbasis Fuzzy Tipe-2 untuk Perbaikan Stabilitas
Mesin Tunggal** 1-8

I Made Ginarsa, Agung Budi Muljono, I Made Ari Nrartha, dan O. Zebua

JRE	Vol. 14	No. 1	Hal 1-82	Banda Aceh, April 2018	ISSN. 1412-4785 e-ISSN. 2252-620X
-----	---------	-------	----------	---------------------------	--------------------------------------

Desain Power System Stabilizer Berbasis Fuzzy Tipe-2 untuk Perbaikan Stabilitas Mesin Tunggal

I Made Ginarsa¹, Agung Budi Muljono¹, I Made Ari Nrartha¹, dan O. Zebua²

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram
Jl. Majapahit No. 62, Mataram 83125

²Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145
e-mail: kadekgin@unram.ac.id

Abstrak—Perkembangan sistem fuzzy tipe-2 sekarang telah memasuki bidang sistem tenaga listrik (STL) terutama pada sub-bidang kendali STL untuk mempermudah perancangan *power system stabilizer* (PSS). Secara tradisional PSS konvensional berfungsi untuk meredam osilasi rotor ketika terjadi gangguan yang disebabkan oleh perubahan konfigurasi jaringan transmisi atau/dan beban. Akan tetapi PSS konvensional memberikan respons dengan *settling time* (st) yang lambat dan *peak overshoot* (Po) yang masih tinggi. Untuk mengatasi hal itu maka diusulkan PSS yang berbasis sistem fuzzy tipe-2 (PFT2). Hasil simulasi menunjukkan bahwa PFT2 mampu memperbaiki stabilitas mesin tunggal untuk tiga skenario yaitu dua skenario menggunakan transmisi tunggal dan satu skenario menggunakan transmisi ganda. Dari ketiga skenario tersebut beban divariasikan. PFT2 memberikan *settling time* yang lebih cepat dan *peak overshoot* yang lebih kecil daripada PSS konvensional untuk semua skenario dan variasi beban.

Kata kunci: *fuzzy tipe-2, power system stabilizer, perbaikan stabilitas, pengurangan peak overshoot, laju settling time*

Abstract—The growth of type-2 fuzzy logic system is penetrating electric power system field, especially on electric power system control sub-field in order to simplify the design of power system stabilizer (PSS). Traditionally, the function of conventional PSS is to damp rotor oscillation when a disturbance occurred due to transmission configuration or/and loading changes. However, the response of conventional PSS is slow with long settling time and high peak overshoot. To cover this problem, PSS based on type-2 fuzzy logic system (PFT2) is proposed. Simulation results show that the PFT2 is able to improve the stability of a single machine with 3 scenarios on transmission configuration and loading variation. The PFT2 gives shorter settling time for all scenarios and loading variation than the settling time of conventional PSS. Also, the peak overshoot of the PFT2 is smaller than the peak overshoot of the other competing PSS.

Keywords: *power system stabilizer, peak overshoot reducing, rapid settling time, stability improvement, type-2 fuzzy*

Copyright © 2018 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Perkembangan *interval type-2 fuzzy logic system* sangat pesat beberapa tahun memasuki bidang kendali cerdas, teknologi elektro, metode optimisasi dan teknologi komputasi [1]. Sistem logika fuzzy tipe-2 (SFT2) adalah suatu model pendekatan secara umum dan banyak digunakan pada sistem identifikasi dan kendali. Alasan untuk menggunakan fuzzy tipe-2 dalam sistem kendali adalah karena fuzzy tipe ini lebih baik menyelesaikan permasalahan dalam dunia nyata yang mengandung sifat ketidak-pastian (*uncertainty*) dibandingkan dengan fuzzy tipe-1. Adapun kemunculan ketidak-pastian tersebut adalah karena interpretasi dari pengamatan manusia bersifat subyektif, misalnya hasil pembacaan satu orang dengan orang lain bisa berbeda-beda walaupun sumber informasinya sama [2-5]. Bentuk dari fungsi keanggotaan tipe-2 ini sangat berguna untuk kasus yang fungsi

keanggotaan sangat sulit diperoleh secara eksak [5]. Pada awalnya, fuzzy tipe-2 masih sulit untuk dipelajari dan diterapkan. Dengan berjalannya waktu, usaha telah banyak dilakukan untuk menyederhanakan perhitungan dan analisis fuzzy tipe-2 ini [6]. *Power system stabilizer* (PSS) berbasis IT2 *controller* logika fuzzy digunakan untuk memperbaiki stabilitas STL untuk beberapa kondisi operasi. PSS berbasis pada IT2 *fuzzy logic* diterapkan pada STL karena mempunyai kelebihan yaitu mampu mengatasi ketidakpastian dan ketidakakuratan dari operasi STL [7]-[8]. Penggunaan PSS berbasis-IT2 *fuzzy* yang ditala secara optimum dengan metode tracking *H-infinity* telah mampu memperbaiki stabilitas secara signifikan [9]. Di sisi lain, munculnya masalah stabilitas pada STL adalah usaha untuk tetap beroperasi secara sinkron dari mesin mengikuti operasi sinkron jaringan listrik. Ketika mesin beroperasi pada keadaan sinkron dan mensuplai daya ke beban, maka stabilitas dipengaruhi oleh keseimbangan energi mekanik-

listrik pada mesin yang direpresentasikan dengan sudut rotor. Jika muncul ketidakseimbangan energi, maka diikuti oleh osilasi rotor yang berlanjut pada rentang frekuensi 0,2–2,5 Hz. Peredaman osilasi rotor pada frekuensi ini sangat penting untuk meningkatkan kapasitas transmisi daya dan meningkatkan stabilitas STL. Usaha yang telah dilakukan untuk memperbaiki stabilitas STL adalah sebagai berikut: Aplikasi PSS pada sistem pembangkit hidro yang mempunyai fasilitas bendungan penyimpanan air [10]. Dalam operasinya unjuk kerja PSS konvensional mampu diperbaiki menggunakan *auxiliary loop* [11]. Desain dan penalaan PSS menggunakan teknik optimisasi mampu meredam osilasi rotor dan meningkatkan stabilitas sistem multimesin [12]. Perbaikan stabilitas mesin tunggal dilakukan dengan PSS berbasis ANFIS dan nilai-nilai parameter PSS-ANFIS tersebut diperoleh menggunakan metode *feedback-linearization* [13].

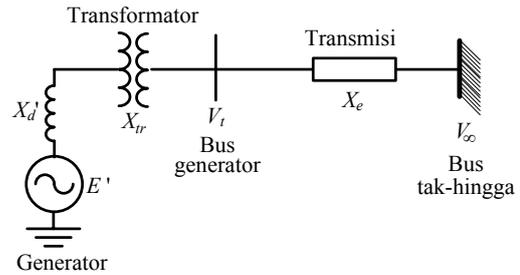
Selain itu, *controller* berbasis kecerdasan buatan diterapkan pada sistem tenaga listrik seperti: *controller* berbasis-ANFIS untuk memperbaiki respons tegangan transien dan mencegah *voltage collapse* pada STL [14], pengendalian dan pencegahan *voltage collapse* pada STL [15], pengendalian sudut penyalaan *rectifier* pada sistem HVDC [16] dan PSS berbasis-ANFIS juga digunakan untuk memperbaiki stabilitas sistem multimesin [17].

Dari permasalahan bagaimana caranya meredam osilasi rotor dengan cepat dan tepat, dan beberapa metode kecerdasan buatan yang telah diaplikasikan untuk mendesain PSS, maka metode *fuzzy* tipe-2 ini sangat berpotensi untuk dimanfaatkan untuk mendesain PSS. Tujuan penggunaan *fuzzy* tipe-2 dalam mendesain PSS adalah untuk memperkecil *peak overshoot* dan mempersingkat *settling time* respons dari PSS. Adapun bahasan pada paper ini adalah: model mesin tunggal akan dibahas pada Bagian II. Selanjutnya, desain PSS berbasis *fuzzy* tipe-2 interval akan dibahas pada Bagian III. Bagian III ini berisi teori *fuzzy* tipe-2, *power system stabilizer* dan langkah-langkah yang dikerjakan dalam mewujudkan desain PSS tersebut dalam lingkungan program Matlab/Simulink. Berikutnya, hasil simulasi PSS yang diterapkan pada mesin tunggal dan pembahasannya ditunjukkan pada Bagian IV. Terakhir, kesimpulan diberikan pada Bagian V

II. MODEL MESIN TUNGGAL

Secara umum, sistem tenaga listrik (STL) terdiri dari pembangkit, transmisi/distribusi dan beban yang beroperasi secara sinkron. Dalam analisis stabilitas sinyal kecil, STL yang besar dan kompleks dapat disederhanakan menjadi model mesin tunggal yang terdiri dari mesin (generator), transmisi dan bus tak-hingga (bus ∞) [18]. Kata generator digantikan dengan kata mesin pada bahasan-bahasan selanjutnya. Ilustrasi mesin tunggal terhubung ke bus ∞ terdapat pada Gambar 1.

Untuk menjaga kecepatan sinkron maka torsi mekanik-torsi listrik yang bekerja pada mesin harus selalu seimbang. Dalam menjaga keseimbangan torsi mesin maka daya mekanik pada poros mesin harus selalu sama dengan



Gambar 1. Diagram segaris mesin tunggal terhubung bus tak-hingga

daya listrik yang dikeluarkan oleh mesin ke beban dengan rugi-rugi daya diabaikan. Ketika kelebihan/kekurangan daya input/output pada mesin maka akan menimbulkan ayunan (*swing*) pada rotor mesin. Persamaan ayunan yang dilinearisasi dirumuskan sebagai berikut [18]:

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega_r \quad (1)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{M} (\Delta T_m - \Delta T_e - D \Delta \omega) \quad (2)$$

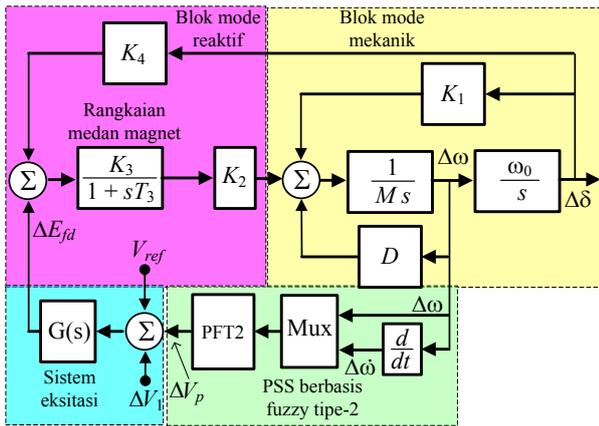
dimana ω_0 , $\Delta \omega$, $\Delta \delta$, M , ΔT_m , ΔT_e , dan D adalah masing-masing kecepatan rotor dasar, kecepatan rotor, sudut rotor, konstanta inersia, torsi mekanik, torsi listrik, dan konstanta peredaman. Stabilitas mesin tunggal yang terhubung ke bus tak berhingga dalam operasinya sangat tergantung pada konfigurasi transmisi yang digunakan dan beban yang dikoneksikan pada mesin tersebut.

III. DESAIN PSS BERBASIS FUZZY TIPE-2 INTERVAL

Desain PSS pada penelitian ini menggunakan metode logika *fuzzy* tipe-2 interval karena metode logika *fuzzy* tipe-2 interval mampu mengatasi *uncertainty* [6]. Selanjutnya, PSS berbasis *fuzzy* tipe-2 interval disingkat menjadi PFT2 saja pada artikel ini. *Fuzzy* tipe-2 adalah sebuah kelas logika *fuzzy* yang mempunyai fungsi keanggotaan *antecedent* dan *consequent*.

Pemodelan mesin tunggal terhubung ke bus tak-hingga dapat diilustrasikan dengan diagram blok. Blok ini dapat dibagi menjadi blok mekanik dan blok reaktif. Blok mekanik menggambarkan daya mekanik yang bekerja pada mesin. Blok reaktif mengilustrasikan daya reaktif yang diperlukan untuk membangkitkan medan magnet. Blok sistem eksitasi juga termasuk mode reaktif. Diagram blok model mesin tunggal yang terhubung ke bus tak-hingga dapat diilustrasikan pada Gambar 2. Model mesin tunggal ini dilengkapi dengan PSS berbasis *fuzzy* tipe-2 (PFT2).

Fungsi dari PFT2 adalah memberikan redaman tambahan pada sistem mode mekanik ketika terjadi osilasi pada rotor sehingga rotor dengan cepat mencapai keadaan mantap (*steady state*). Cara kerja: ketika rotor berosilasi maka akan muncul perubahan kecepatan rotor ($\Delta \omega$). Kecepatan rotor akan masuk ke blok *multiflexer* (MUX) dan menjadi input1 dari PFT2. Kecepatan rotor ini diderivatifkan oleh blok waktu tunda (d/dt) dan berubah menjadi derivatif



Gambar 2. Diagram blok mesin tunggal dilengkapi dengan PFT2

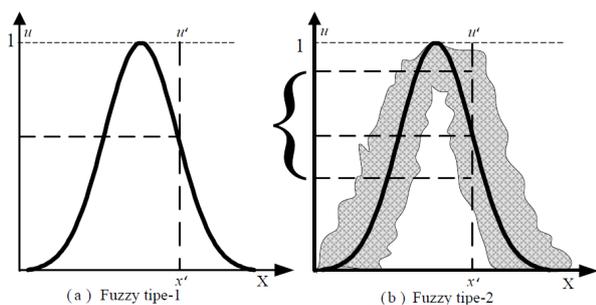
kecepatan rotor ($\Delta\omega$) dan masuk ke MUX yang kemudian menjadi input2 dari PFT2.

Kedua input1 dan input2 akan memicu PFT2 untuk bekerja dan PFT2 memberikan respons berupa output tegangan stabilizer (ΔV_p). Tegangan stabilizer ini akan dibandingkan dengan tegangan terminal (ΔV_t) dan tegangan referensi (V_{ref}). Hasil dari perbandingan tegangan ini akan memodulasi sistem eksitasi dan akan menghasilkan tegangan medan (ΔV_{fd}).

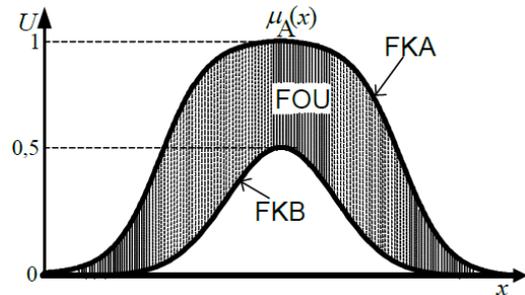
Tegangan ini dibandingkan terlebih dulu dengan blok sudut rotor (K_4) dan masuk ke sistem rangkaian medan magnet. Rangkaian medan magnet ini akan memberikan redaman tambahan ke blok mode mekanik. Kecepatan rotor terletak pada blok mekanik seperti yang terlihat pada Gambar 2. Sehingga osilasi rotor mampu diredam dan rotor dengan cepat mencapai keadaan mantap (*steady state*).

A. Sistem Logika Fuzzy Tipe-2

Himpunan logika fuzzy tipe-2 pertama kali dikemukakan oleh Zadeh sebagai perluasan konsep dari sistem logika fuzzy tipe-1. Bentuk dari SFT2 mirip dengan sistem fuzzy tipe-1 (SFT1). Salah satu himpunan fuzzy tipe-2 adalah himpunan fuzzy tipe-2 interval yang didefinisikan sebagai berikut: Sebuah himpunan fuzzy tipe-2 interval memiliki derajat fungsi keanggotaan setiap titik domain adalah himpunan 'crisp', yang mana domain intervalnya berada pada rentang $[0,1]$. Jika fungsi keanggotaan fuzzy tipe-1 (Gambar 3(a)) disamarkan (*blurred*) pada sisi kanan dan



Gambar 3. Fungsi keanggotaan fuzzy



Gambar 4. Fungsi keanggotaan fuzzy tipe-2 interval

sisi kirinya maka dihasilkan fungsi keanggotaan fuzzy tipe-2, seperti yang terlihat pada Gambar 3(b). Pada kasus ini, untuk nilai x' yang spesifik, fungsi keanggotaan (u') dengan mengambil pada nilai yang berbeda, yang mana tidak semua bobot sama, selanjutnya kita bisa menandai derajat keanggotaan ke semua titik tersebut.

Dengan mengerjakan hal sama untuk semua $x \in X$, akan dibentuk fungsi keanggotaan 3-dimensi. Sebuah himpunan fuzzy tipe-2 dikarakteristikkan dengan fungsi keanggotaan sebagai berikut:

$$\tilde{A} = \{((x,u), \mu_{\tilde{A}}(x,u)) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1]\} \quad (3)$$

dengan $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x,u) \leq 1$. Kenyataannya $J_x \subseteq [0,1]$ merepresentasikan fungsi keanggotaan primer dari x , dan adalah himpunan fuzzy tipe-1 yang dikenal sebagai himpunan sekunder. Sebuah fungsi keanggotaan tipe-2 derajat bisa terdiri dari sub-himpunan sembarang dalam $[0,1]$, keanggotaan primer, dan berhubungan ke setiap keanggotaan primer, adalah keanggotaan sekunder (bisa juga dalam $[0,1]$). Ketidak-pastian diwujudkan dalam sebuah bidang, yang disebut dengan *footprint of uncertainty* (FOU) [4]. Bila $\mu_{\tilde{A}}(x,u)=1, \forall u \in J_x \subseteq [0,1]$ maka kita mempunyai fungsi keanggotaan fuzzy tipe-2 interval, seperti pada Gambar 4. Bentuk seragam dari *shading* untuk FOU merepresentasikan keseluruhan himpunan fuzzy tipe-2 interval dan bisa digambarkan dengan fungsi keanggotaan atas ($\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)$, FKA) dan fungsi keanggotaan bawah ($\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$, FKB).

Sistem fuzzy tipe-2 terdiri atas 5 bagian [4], yaitu: *Fuzzifier*, basis aturan, mesin inferensi, pereduksi tipe dan defuzzifikasi. Masing-masing bagian dan fungsinya dijelaskan berikut:

Fuzzifier: Fuzzifier bertugas untuk memetakan input crisp vektor numerik $x=(x_1, \dots, x_p)^T \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_p \equiv X$ ke bentuk himpunan fuzzy tipe-2 (\tilde{A}_x) dalam X digunakan himpunan fuzzy tipe-2 interval pada penelitian ini. Yang mana pada fuzzifikasi singleton yang digunakan pada penelitian ini, input himpunan fuzzy hanya mempunyai satu fungsi keanggotaan. Sehingga \tilde{A}_x adalah sebuah fuzzy tipe-2 singleton jika $\mu_{\tilde{A}_x}(x)=1/1$ untuk $x=x'$ dan $\mu_{\tilde{A}_x}(x)=1/0$ untuk $x \neq x'$ semua yang lainnya.

Basis aturan: Struktur dari basis aturan adalah sama dengan basis aturan fuzzy tipe-1, tetapi untuk fuzzy tipe-2 antecedent dan consequent diekspresikan dengan bentuk himpunan fuzzy tipe-2. Selanjutnya, untuk basis aturan fuzzy tipe-2 untuk input p $x_1 \in X_1, \dots, x_p \in X_p$ dan satu output $y_1 \in Y_1$, multiple input single output (MISO). Diasumsikan

terdapat M aturan, maka aturan ke- l ditulis sebagai berikut:

$$R^l: \text{If } x_i \text{ is } \tilde{F}_i^l \text{ and, ..., If } x_p \text{ is } \tilde{F}_p^l \text{ Then } y_p \text{ is } \tilde{G}^l \quad (4)$$

dimana F_i^l adalah himpunan *antecedent* tipe-2, $y \in Y$ adalah output dan G_j adalah himpunan konsekuen tipe-2. Aturan ini merepresentasikan hubungan *fuzzy* tipe-2 antara ruang input dan output pada sistem logika *fuzzy*.

Fuzzy inference: Untuk fuzzy tipe-2 interval, operasi product digunakan dalam implementasinya dengan minimum atau *t-norm*, yang terdiri dari himpunan penyalan $\prod_{(i=1)}^p \mu(\tilde{F}_i^l) (x_i \equiv F^l(x'))$ adalah himpunan fuzzy tipe-1 interval:

$$F^l(x') = [\underline{f}^l(x'), \bar{f}^l(x')] = [\underline{f}^l, \bar{f}^l] \quad (5)$$

dimana

$$\underline{f}^l(x') = \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1) * \dots * \underline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \quad (6)$$

$$\bar{f}^l(x') = \bar{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1) * \dots * \bar{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \quad (7)$$

Pereduksi tipe: Pereduksi tipe membangkitkan output himpunan fuzzy tipe-1 dan kemudian mengkonversinya menjadi output numerik dengan menjalankan defuzzifikasi. Metode *center of set* (COS) digunakan dalam penelitian ini karena metode ini mempunyai komputasi yang efektif dan waktu komputasi cepat. Metode COS dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Y_{\text{COS}}(x) = [y_l, y_r] \quad (8)$$

Himpunan interval ini diperoleh dari dua titik terakhir, y_l dan y_r , yang berhubungan dengan *centroid* dari himpunan consequent fuzzy tipe-2 interval (\tilde{G}^l)

$$C_{\tilde{G}^l} = \int_{\theta_1 \in J_{y_1}} \dots \int_{\theta_N \in J_{y_N}} \frac{1}{\sum_{i=1}^N y_i \theta_i} = [y_l^i, y_r^i] \quad (9)$$

dengan nilai dari y_l dan y_r dapat dihitung sebagai berikut:

$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^M f_l^i y_l^i}{\sum_{i=1}^M f_l^i} \quad (10)$$

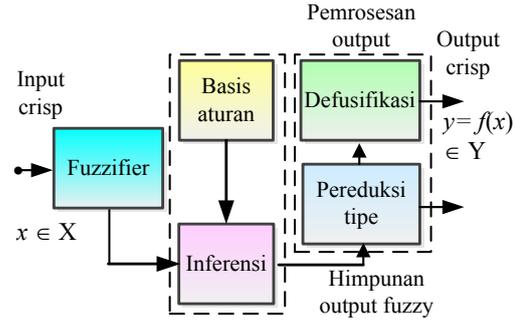
$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^M f_r^i y_r^i}{\sum_{i=1}^M f_r^i}, \quad (11)$$

nilai dari y_l dan y_r mendefinisikan output interval dari sistem fuzzy tipe-2.

Defuzzifikasi: Himpunan tipe yang direduksi (Y_{COS}) menggunakan metode COS, output defuzzifikasi *crisp* diperoleh sebagai berikut:

$$y(x) = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (12)$$

Penelitian ini menggunakan Matlab/Simulink toolbox untuk mengimplementasikan *fuzzy* tipe-2, yang disediakan oleh Taskin dan Kumbasar [3], [19]. Ilustrasi pemodelan sistem *fuzzy* tipe-2 dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram blok sistem logika fuzzy tipe-2

B. Power System Stabilizer

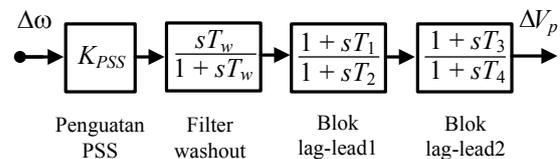
Power system stabilizer (PSS) adalah suatu alat yang menyediakan redaman ketika rotor mesin berosilasi dengan mengatur sistem eksitasi untuk memberikan sinyal *stabilizer* tambahan. Peranan PSS sangat penting dalam memperbaiki stabilitas STL dengan memberi komponen torsi peredaman. Output dari PSS adalah tegangan kompensasi tambahan yang diumpangkan pada sistem eksitasi. PSS konvensional terdiri dari blok penguatan, *washout*, dan kompensator fasa *lag-lead*. Blok *washout* berfungsi sebagai filter pada frekuensi tinggi. Kompensator *lag-lead* berfungsi untuk memberi kompensasi fasa maju untuk mengatasi keterlambatan fasa antara sistem eksitasi dan generator (celah-udara). PSS dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$V_p = K_{PSS} \frac{sT_w}{1+sT_w} \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \left(\frac{1+sT_3}{1+sT_4} \right) \Delta\omega \quad (13)$$

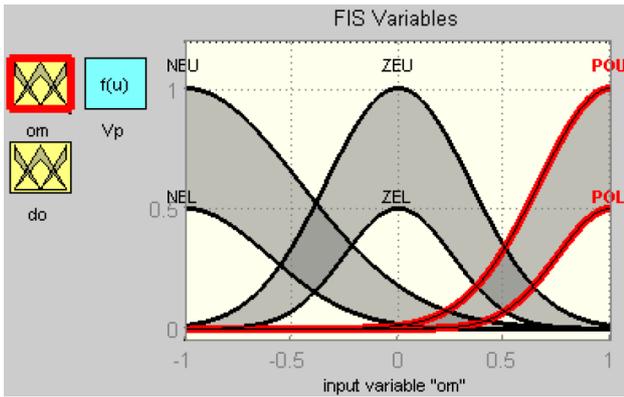
dimana K_{PSS} , ΔV_p dan T_w adalah masing-masing gain dari PSS, tegangan stabilizer dan konstanta waktu *washout*. Sementara itu, T_1 , T_2 , T_3 , dan T_4 adalah konstanta waktu dari kompensator *lag-lead*. Gambaran PSS konvensional dapat dilihat pada Gambar 6.

Adapun prosedur yang dilakukan dalam mendesain PSS berbasis logika *fuzzy* tipe-2 (PFT2) adalah:

1. Menentukan model mesin: digunakan model mesin tunggal [18], seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1. Data mesin [18]: unit generator thermal, kapasitas 2220 MVA; tegangan 24 kV; frekuensi 60 Hz. $H=3,5$ MW.s/MVA; $X_d'=0,3$ pu; $T_{do}'=8$ s; $K_D=0,0$ Sistem eksitasi: $K_A=200$; $Tr=0,02$ s. PSS konvensional (seperti Gambar 6): $T_w=1,4$; $T_1, T_3=0,154$; $T_2, T_4=0,033$. Penguatan PSS dinaikkan menjadi $K_{PSS}=40$.
2. Menentukan variabel input yang digunakan untuk PFT2 yaitu: kecepatan rotor ($\Delta\omega$) dan derivatifnya ($\Delta\dot{\omega}$). Variabel output dari PFT2 adalah tegangan *stabilizer* (V_p).

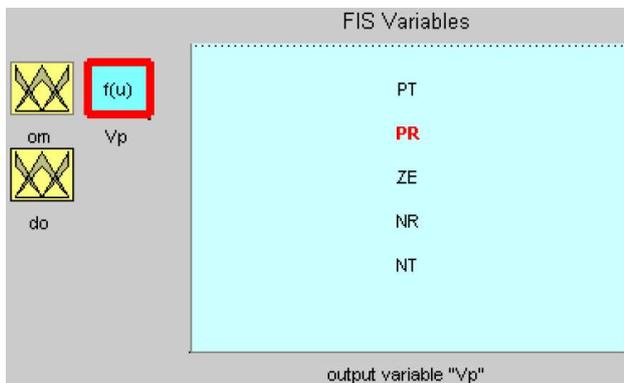


Gambar 6. Diagram blok power system stabilizer konvensional

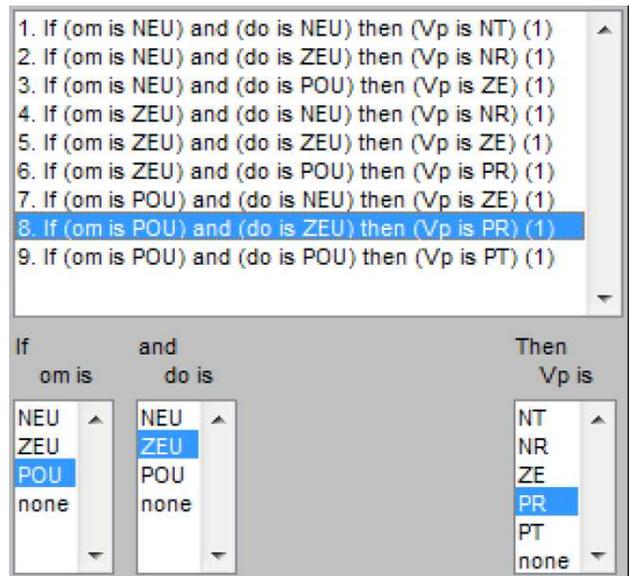


Gambar 7. Fungsi keanggotaan fuzzy Gauss untuk input 1 kecepatan rotor $\Delta\omega$ (om) pada PFT2

3. Pemilihan variabel linguistik. Tiga buah variabel linguistik seperti: Negatif (NE), Zero (ZE), dan Positif (PO) yang digunakan untuk mendeskripsikan masing-masing variabel input.
4. Pemilihan fungsi keanggotaan input: fungsi keanggotaan Gauss yang digunakan dalam penelitian ini. Seperti yang dicontohkan untuk variabel input kecepatan rotor yaitu: NEU dan NEL untuk masing-masing fungsi keanggotaan Gauss Negatif atas dan Gauss Negatif bawah. ZEU dan ZEL untuk masing-masing fungsi keanggotaan Gauss Zero atas dan Gauss Zero bawah. POU dan POL untuk fungsi keanggotaan Gauss Positif atas dan Gauss Positif bawah. Seperti yang dicontohkan pada Gambar 7. Untuk derivatif kecepatan rotor prosesnya sama.
5. Pemilihan model fuzzy: fuzzy model Sugeno (T-S) orde nol yang digunakan pada penelitian ini. Lima buah fungsi keanggotaan untuk output (y) konstan dengan nilai masing-masing ditetapkan sebagai berikut: (Negatif Tinggi, NT = -1); (Negatif Rendah, NR = -0,8); (Zero, ZE = 0); (Positif Rendah, PR = 0,8) dan (Positif Tinggi, PT=1). Hal ini diilustrasikan pada Gambar 8.
6. Menentukan aturan: digunakan 9 aturan untuk menghubungkan 2 buah input dengan masing-masing 3 fungsi keanggotaan. Contoh aturan: If om is POU and do is ZEU then Vp is PR. Arti dari aturan ini adalah: jika kecepatan rotor bernilai positif dan derivatif kecepatan rotor bernilai zero maka tegangan stabilizer yang dikeluarkan oleh PFT2 adalah positif rendah (PR).



Gambar 8. Lima fungsi keanggotaan (PT, PR, ZE NR dan NT) untuk merepresentasikan output Vp dari PFT2



Gambar 9. Basis aturan untuk PFT2

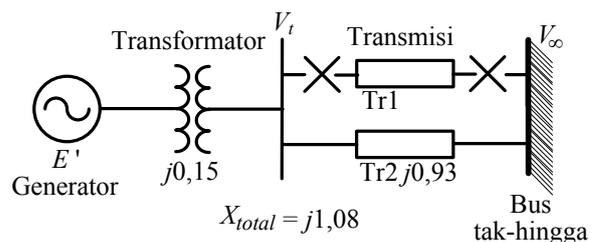
Ilustrasi aturan yang disusun seperti yang diperlihatkan pada Gambar 9.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

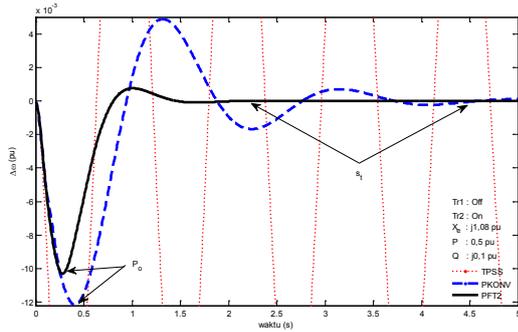
Penelitian ini menggunakan tiga skenario yaitu: (a) hanya satu transmisi yaitu Tr2 yang beroperasi, sedangkan transmisi Tr1 tidak beroperasi, (b) hanya transmisi Tr2 yang dioperasikan, Tr1 tidak beroperasi, (c) kedua transmisi Tr1 dan Tr2 dioperasikan secara paralel. Semua skenario dijalankan pada komputer pribadi Intel Pentium G2020 @ 2.90 GHz dan menggunakan Program Paket Matlab/Simulink 2013a [20].

A. Sistem transmisi TR2 yang beroperasi

Sistem transmisi TR2 beroperasi secara normal, sementara itu transmisi Tr1 dinonaktifkan sehingga saluran transmisi dan transformator menghasilkan reaktansi eksternal (X_e) sebesar $j1,08$ pu. Ilustrasi dari skenario ini dengan hanya TR2 yang beroperasi dapat dilihat pada Gambar 10. Dengan pembebanan sebesar $0,5+j0,1$ pu maka diperoleh unjuk kerja masing-masing PSS sebagai berikut: PFT2 memberikan *peak overshoot* (P_o) sebesar $-10,21 \times 10^{-3}$ pu dan *settling time* (s_s) pada waktu 2,11 s. Sementara itu, PSS konvensional (PKONV) memberikan P_o dan s_s masing-masing sebesar $-12,22 \times 10^{-3}$ pu dan waktu 4,25 s. Untuk STL yang tanpa dilengkapi dengan



Gambar 10. Rangkaian ekuivalen transmisi ketika TR2 beroperasi



Gambar 11. Perbaikan stabilitas transmisi Tr2 yang dioperasikan

PSS (TPSS) memberikan P_o dan s_f masing-masing sebesar $-24,72 \times 10^{-3}$ pu dan waktu lebih lama dari 20 s. Gambaran dari unjuk kerja masing-masing PSS pada keadaan operasi ini dapat dilihat pada Gambar 11.

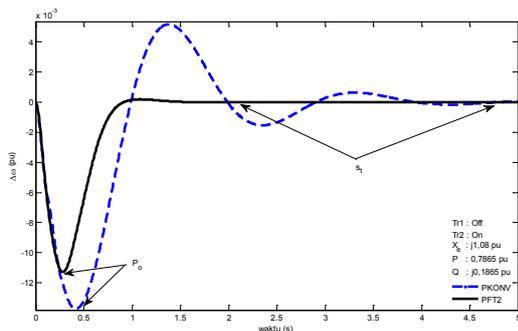
Ketika beban dinaikkan secara bertahap sampai pada beban terberat sebesar $0,7865 + j0,1865$ pu maka unjuk kerja PFT2 memberikan P_o dan s_f masing-masing sebesar $-11,29 \times 10^{-3}$ pu dan waktu 2,15 s. Unjuk kerja PKONV pada operasi ini untuk P_o dan s_f masing-masing sebesar $-13,75 \times 10^{-3}$ pu dan waktu 4,98 s. Gambaran dari unjuk kerja PFT2 dan PKONV pada operasi beban terberat dapat dilihat pada Gambar 12.

Sistem tenaga listrik tanpa dilengkapi dengan PSS (TPSS) hanya mampu beroperasi stabil pada beban $0,6 + j0,1$ pu yang memberikan P_o dan s_f masing-masing sebesar $-28,61 \times 10^{-3}$ pu dan >20 s. Ketika beban dinaikkan lagi maka untuk TPSS menuju ke keadaan instabil. Unjuk kerja masing-masing PSS untuk beban yang bervariasi diurutkan pada Tabel 1.

Unjuk kerja dari PFT2 pada mesin tunggal dengan hanya satu transmisi (Tr2) yang digunakan mampu memberikan hasil yang lebih baik yaitu *peak overshoot* yang lebih kecil dan *settling time* yang lebih pendek dibandingkan dengan PSS lainnya. Desain PFT2 yang telah diujikan pada model mesin tunggal dengan beban yang bervariasi memberikan perbaikan stabilitas yang signifikan. Skenario berikutnya adalah PFT2 akan diujikan hanya untuk transmisi Tr1 yang dioperasikan (Tr1 on; Tr2 off).

B. Sistem transmisi TR1 yang beroperasi

Unjuk kerja PSS berbasis *fuzzy* tipe-2 (PFT2) digunakan pada mesin tunggal dan hanya satu transmisi



Gambar 12. Perbaikan respons untuk kecepatan rotor

Tabel 1. Perbandingan kecepatan rotor ($\Delta\omega$) pada Tr2 On

Beban P+jQ	PFT2		PKONV		TPSS	
	P_o -10^{-3} pu	st s	P_o -10^{-3} pu	st s	P_o -10^{-3} pu	st s
0,5+ j0,1	10,21	2,11	12,22	4,25	24,72	>20
0,6+j0,1	10,73	2,12	12,91	4,44	28,61	>20
0,7+j0,1	11,20	2,13	13,60	4,51		
0,75+j0,15	11,23	2,14	13,67	4,73		Instabil
0,7865+j0,1865	11,29	2,15	13,75	4,98		

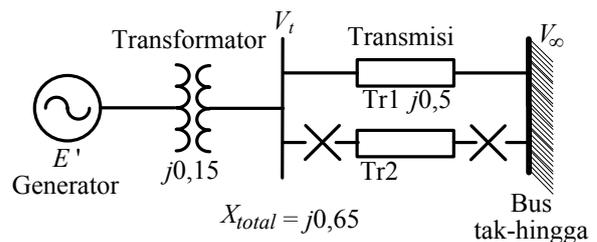
yang digunakan (Tr1 On), sebaliknya transmisi lainnya dimatikan (Tr2 Off). Diagram segaris untuk skenario B dapat dilihat pada Gambar 13. Pada kondisi ini maka reaktansi eksternal (X_e) menjadi $j0,65$ pu. Ketika beban ringan ($0,5 + j0,1$ pu), PFT2 mampu memberikan hasil P_o dan s_f masing-masing sebesar $-10,21 \times 10^{-3}$ pu dan waktu 2,10 s. Di sisi lain, PKONV dan TPSS memberikan P_o masing-masing sebesar $-12,22$ dan $24,67 \times 10^{-3}$ pu. *Settling time* (s_f) dicapai oleh PKONV dan TPSS adalah pada waktu 4,45 dan >20 s. Gambaran dari unjuk kerja masing-masing PSS pada operasi transmisi tunggal (Tr1 On) dan beban $0,5 + j0,1$ pu dapat dilihat pada Gambar 14.

Beban dinaikkan secara bertahap sampai pada beban terberat yang mampu ditanggung oleh STL, hasilnya diobservasi dan diurutkan pada Tabel 2. Pada beban $1,0 + j0,4$ pu, PFT2 memberikan P_o dan s_f masing-masing sebesar $-10,83 \times 10^{-3}$ pu dan waktu 2,16 s. Pada beban sebesar ini PKONV menghasilkan P_o dan s_f masing-masing sebesar $-13,01 \times 10^{-3}$ pu dan waktu 4,52 s.

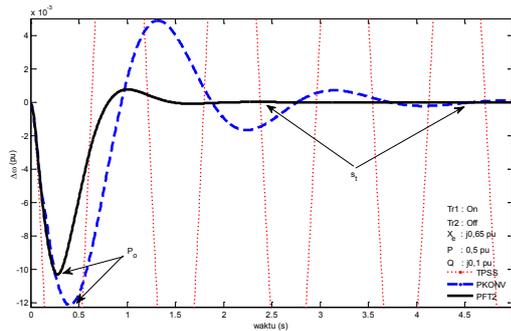
Pada keadaan beban terberat ($1,1019 + j0,5019$ pu), STL dengan PFT2 mampu mencapai P_o dan s_f masing-masing sebesar $-10,98 \times 10^{-3}$ pu dan waktu 2,18 s. Pada kondisi ini, PKONV mencapai P_o dan s_f masing-masing sebesar $-13,23 \times 10^{-3}$ pu dan waktu 4,58 s. Unjuk kerja PFT2 dan PKONV secara grafis pada beban terberat dapat dilihat pada Gambar 15.

Di sisi lain, STL tanpa PSS (TPSS) hanya mampu beroperasi stabil pada beban $0,8 + j0,2$ pu yang memberikan P_o dan s_f masing-masing sebesar $-31,95 \times 10^{-3}$ pu dan waktu >20 s. Ketika beban dinaikkan sekali lagi maka TPSS menuju ke keadaan tidak stabil.

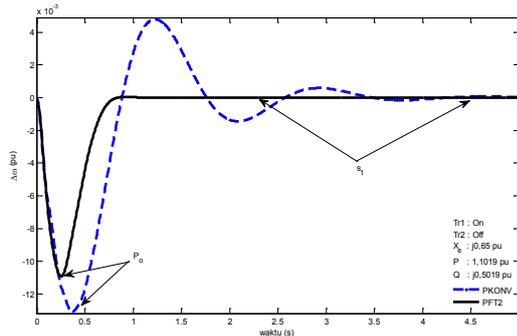
Desain PFT2 pada skenario pengujian pada transmisi tunggal (Tr1 On) telah sesuai dengan hasil yang diharapkan. Hasil simulasi dengan beban bervariasi menunjukkan bahwa PFT2 mampu memperbaiki stabilitas dengan memperkecil *peak overshoot* dan memperpendek *settling time* dibandingkan dengan hasil dari PKONV



Gambar 13. Reaktansi total (X_{total}) ketika hanya TR1 yang beroperasi



Gambar 14. Unjuk kerja PSS ketika hanya Tr1 On pada beban ringan



Gambar 15. Unjuk kerja PSS ketika hanya Tr1 On pada beban berat

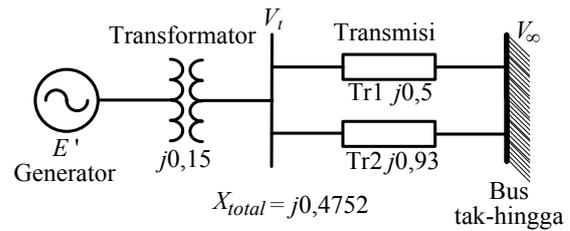
dan TPSS. Skenario berikutnya adalah pengujian dengan transmisi ganda (Tr1 On dan Tr2 On) yang akan dibahas pada sub-bahasan C.

C. Sistem transmisi ganda yang dioperasikan

Pada skenario ini, sistem transmisi Tr1 dan Tr2 beroperasi secara normal. Sehingga reaktansi eksternal (X_e) yang dihasilkan dari rangkaian ekuivalen transformator dan transmisi ganda tersebut adalah sebesar $j0,4752$ pu. Diagram segaris dari sistem untuk Skenario C ini dapat dilihat pada Gambar 16. Unjuk kerja PSS berbasis fuzzy tipe-2 (PFT2) digunakan pada mesin tunggal dengan beban ringan ($0,5+j0,1$ pu), PFT2 mampu memberikan hasil P_o dan s_t masing-masing sebesar $-10,31 \times 10^{-3}$ pu dan waktu 2,07 s. Pada keadaan operasi ini, PKONV dan TPSS memberikan P_o masing-masing sebesar $-12,21$ dan $29,62 \times 10^{-3}$ pu. *Settling time* (s_t) yang dicapai oleh

Tabel 2. Perbandingan kecepatan rotor ($\Delta\omega$) pada Tr1 On

Beban P+jQ	PFT2		PKONV		TPSS	
	P_o -10^{-3} pu	s_t s	P_o -10^{-3} pu	s_t s	P_o -10^{-3} pu	s_t s
0,5+ j0,1	10,21	2,10	12,22	4,45	24,67	>20
0,6+ j0,1	10,56	2,11	12,63	4,46	29,28	>20
0,7+ j0,1	10,63	2,13	12,83	4,49	30,47	>20
0,8+ j0,2	10,71	2,14	12,97	4,50	31,95	>20
0,9+ j0,3	10,74	2,15	12,98	4,51		
1,0+ j0,4	10,83	2,16	13,01	4,52		
1,1+ j0,5	10,96	2,17	13,22	4,53		Instabil
1,1019+ j0,5019	10,98	2,18	13,23	4,58		

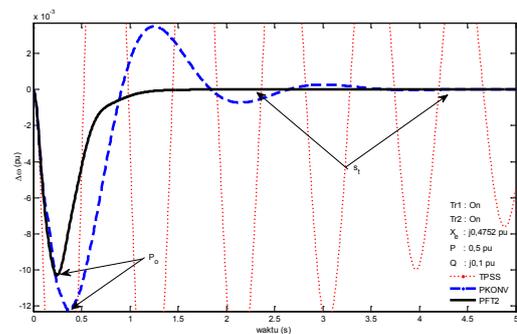


Gambar 16. Reaktansi total untuk transmisi ganda beroperasi

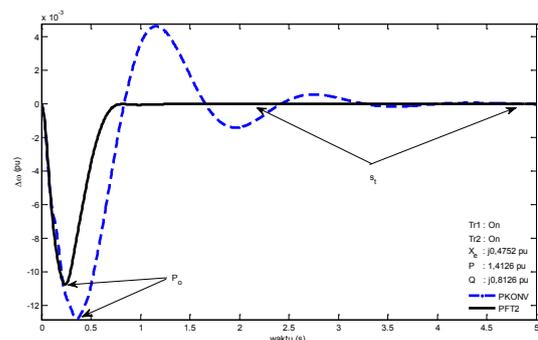
PKONV dan TPSS adalah pada waktu 4,17 dan >20 s. Gambaran dari unjuk kerja masing-masing PSS pada operasi transmisi ganda (Tr1 On dan Tr2 On) dan beban $0,5+j0,1$ pu dapat dilihat pada Gambar 17.

Beban dinaikkan menjadi $0,6+j0,1$ pu, PFT2 memberikan unjuk kerja dengan P_o dan s_t masing-masing dicapai pada nilai $-10,62 \times 10^{-3}$ pu dan waktu 2,09 s. Dengan kondisi yang sama, PKONV dan TPSS menghasilkan P_o masing-masing pada nilai $-12,27$ dan $33,48 \times 10^{-3}$ pu. *Settling time* untuk PKONV dan TPSS dicapai pada waktu 4,20 dan >20 s. Beban terus dinaikkan secara bertahap, ketika beban $1,1+j0,5$ pu PFT2 dan PKONV masih mampu beroperasi secara stabil. *Peak overshoot* yang dicapai oleh PFT2 dan PKONV adalah masing-masing sebesar $-10,44$ dan $-12,42 \times 10^{-3}$ pu. *Settling time* yang didapat dari PFT2 dan PKONV adalah masing-masing pada waktu 2,14 dan 4,39 s. Untuk STL yang tidak memakai PSS (TPSS) tidak mampu beroperasi secara stabil pada kondisi ini. Akan tetapi, STL ini hanya mampu beroperasi stabil pada beban $1,0+j0,4$ pu dengan P_o dan s_t masing-masing dicapai pada nilai $-35,82 \times 10^{-3}$ pu dan waktu >20 s. Perbaikan stabilitas untuk sistem transmisi yang dibebani berat disajikan pada Gambar 18.

Kondisi operasi yang paling berat yang mampu



Gambar 17. Unjuk kerja PSS pada beban ringan



Gambar 18. Perbaikan stabilitas pada beban berat

Tabel 3. Kecepatan rotor ($\Delta\omega$) untuk Tr1 dan Tr2 On

Beban $P+jQ$	PFT2		PKONV		TPSS	
	P_o -10^{-3} pu	s_i s	P_o -10^{-3} pu	s_i s	P_o -10^{-3} pu	s_i s
0,5+j0,1	10,31	2,07	12,21	4,17	29,62	>20
0,6+j0,1	10,62	2,09	12,27	4,20	33,48	>20
0,7+j0,1	10,72	2,12	12,43	4,28	34,93	>20
0,8+j0,2	10,63	2,13	12,52	4,35	35,17	>20
0,9+j0,3	10,48	2,14	12,68	4,37	35,79	>20
1,0+j0,4	10,43	2,13	12,54	4,38	35,82	>20
1,1+j0,5	10,44	2,14	12,42	4,39		
1,2+j0,6	10,46	2,16	12,45	4,41		
1,3+j0,7	10,57	2,17	12,59	4,48		Instabil
1,4+j0,8	10,71	2,18	12,75	4,50		
1,4126+j0,8126	10,76	2,18	12,81	4,63		

dilakukan oleh PFT2 dan PKONV adalah pada beban 1,4126+j0,8126 pu. Pada kondisi ini, PFT2 dan PKONV memberikan P_o sebesar $10,76 \times 10^{-3}$ dan $12,81 \times 10^{-3}$ pu. Sementara itu, *settling time* (s_i) yang dicapai oleh PFT2 dan PKONV adalah masing-masing pada waktu 2,18 dan 4,63 s. Ilustrasi grafis untuk PFT2 dan PKONV dalam memperbaiki stabilitas STL pada kondisi beban yang paling berat dapat dilihat pada Gambar 18. Hasil simulasi dari unjuk kerja PSS yang diuji dengan transmisi ganda diurutkan pada Tabel 3.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mendesain *power system stabilizer* yang berbasis *fuzzy type-2* (PFT2). PFT2 yang diusulkan pada artikel ini mampu memperbaiki stabilitas sistem tenaga listrik model mesin tunggal. Pengujian dilakukan dengan konfigurasi sistem transmisi dan beban yang bervariasi. Perbaikan stabilitas yang dicapai oleh PFT2 adalah pada nilai *peak overshoot* yang lebih kecil dan percepatan waktu *settling time* dibandingkan dengan PSS konvensional (PKONV). Untuk konfigurasi transmisi tunggal (Tr2) dan beban terberat (0,7865+j0,1865 pu) PFT2 mampu memberikan nilai *peak overshoot* pada $11,29 \times 10^{-3}$ pu dan *settling time* pada waktu 2,15 s. Untuk transmisi tunggal (Tr1) dan beban terberat (1,4126+j0,8126 pu) PFT2 mampu memberikan *peak overshoot* dan *settling time* masing-masing sebesar $10,76 \times 10^{-3}$ pu dan 2,18 s. Ketika dioperasikan transmisi ganda (Tr1 dan Tr2) dan beban terberat (1,4726+j0,8126 pu) PFT2 mampu memberikan *peak overshoot* dan *settling time* masing-masing pada $10,76 \times 10^{-3}$ pu dan 2,18 s. Pengembangan penelitian berikutnya adalah penerapan PFT2 pada sistem tenaga listrik multi-mesin dan penerapan teknik optimasi untuk memperoleh *peak overshoot* yang optimal dan *settling time* yang lebih pendek.

REFERENSI

- [1] N.N. Karnik, et al., "Type-2 fuzzy logic systems," *IEEE Trans. on Fuzzy Syst.*, vol. 7, no. 6, 1999.
- [2] O. Castillo and P. Melin, *Recent advances in interval type-2 fuzzy systems*, Springer, Heidelberg, 2012, pp. 7-12.
- [3] A. Taskin and T. Kumbasar, "An open source Matlab/Simulink toolbox for interval type-2 fuzzy logic system," in *Proc. IEEE Symp. Series on Computational Intelligence*, Cape Town, South Africa, 2015.
- [4] O. Castillo and P. Melin, "A review on interval type-2 fuzzy logic applications in intelligent control," *Information Sciences*. 2014.
- [5] O. Castillo and P. Melin, *Type-2 fuzzy logic: Theory and applications*, Springer Verlag, Berlin Heiderberg, 2008.
- [6] J.M. Mendel, R.I.B. John, "Type-2 fuzzy set made simple," *IEEE Trans. on Fuzzy Syst.*, vol. 10, no. 2, 2002.
- [7] M.K. Panda, G.N. Pillai, V. Kumar, "Power system stabilizer design: Interval type-2 fuzzy logic controller approach," in *Proc. of The Int. Conf. on Power, Control and Embedded Systems*, 2012.
- [8] M.K. Panda, G.N. Pillai, V. Kumar, "Interval type-2 fuzzy logic controller as a power system stabilizer," in *Proc. of The Int. Conf. on Advances in Power and Energy Technologies*, 2012.
- [9] K.B. Meziane and I. Boumhidi, "An interval type-2 fuzzy logic PSS with the optimal H tracking control for multi-machine power system," in *Proc. Int. Conf. on Intelligent Systems and Computer Vision*, 2015.
- [10] Y.Y. Hsu and C.C. Su, "Application of power system stabilizer on a system with pumped storage plant," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 3, no. 1, 1988.
- [11] M. Saïdy and F.M. Hughes, "Performance improvement of a conventional power system stabilizer," *Elect. Power and Energy Syst.*, vol. 17 no. 5, 1995.
- [12] J. Talaq, "Optimal Power System Stabilizers for Multi Machine Systems," *IJEPES*, vol. 43, pp. 793-803, 2012.
- [13] I.M. Ginarsa and O. Zebua, "Stability Improvement of Single Machine using ANFIS-PSS Based on Feedback-linearization," *Telkomnika*, vol. 12, no. 2, 2014.
- [14] I.M. Ginarsa, et al., "Improvement of Transient Voltage Responses using an Additional PID-loop on an ANFIS-based Composite Controller-SVC (CC-SVC) to Control Chaos and voltage Collapse in Power Systems," *IEEJ Trans. on Power and Energy (Section B)*, vol. 131, no. 10, pp. 836-848, 2011.
- [15] I.M. Ginarsa, et al., "Controlling Chaos and Voltage Collapse using an ANFIS-based Composite Controller-static Var Compensator in Power Systems," *IJEPES*, vol. 46, pp. 79-88, 2013.
- [16] I.M. Ginarsa, et al., Regulation of 12-pulse Rectifier Converter using ANFIS-based Controller in a HVDC Transmission System, in *Integrated Sci-Tech: The Interdisciplinary Research Approach*, vol. 1, chapt. 6, UPT Perpustakaan UNILA Lampung, pp. 44-53, 2015.
- [17] A.B. Muljono, et al., "Dynamic Stability Improvement of Multimachine Power System using ANFIS-based Power System Stabilizer," *Telkomnika*, vol. 7, pp. 16-21, 2015.
- [18] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, EPRI McGraw-Hill, New York, 1994.
- [19] A. Taskin and T. Kumbasar (access on 20 Sept. 2016, 20:10 pm), Matlab/Simulink toolbox for interval type-2 fuzzy logic systems [Online]. Available: <http://web.itu.edu.tr/kumbasart/type2fuzzy.htm>.
- [20] Matlab, MATLAB Version 8.0 (2013a), The Mathworks Inc (2013).

Penerbit:

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: rekayasa.elektrika@unsyiah.net

Telp/Fax: (0651) 7554336

