

# AVR-PSS Generator dengan Kendali Logika *Fuzzy* dan Konvensional pada Peredaman Osilasi Frekuensi Rendah

Ari Santoso

Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Semarang  
E-mail : ari.santoso@polines.ac.id

## Abstrak

Terdapat beberapa variasi kendali yang dipasangkan pada generator untuk meningkatkan efisiensi peredamannya terhadap eksistensi osilasi operasi. Peralatan kendali AVR dan PSS konvensional yang dipasangkan pada pembangkit tenaga listrik, bertujuan untuk memperbaiki kestabilan sistem operasinya. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah aplikasi kendali berbasis logika fuzzy. Dilakukan studi kombinasi AVR dan PSS sistem konvensional dengan berbasis logika fuzzy dengan simulasi perangkat lunak, untuk mengetahui karakteristik waktu tanggapan peredaman osilasi dan perbandingan kinerja kedua kendali tersebut. Konfigurasi simulasi yang dilakukan yaitu: AVR-C dengan PSS-C, AVR-FLC dengan PSS-C, AVR-C dengan PSS-FLC dan AVR-FLC dengan PSS-FLC. Diamati pada masalah yang spesifik, yaitu variable keluaran  $P_e$  dan  $V_t$ , dengan disimulasikan waktu tanggapan sistem *startup* penggerak mula pada  $t = 1$  detik, dilanjutkan *startup* eksitasi elektris pada  $t = 20$  detik. Dengan referensi uji masukan  $V_t = 1$  pu pada  $\Delta P_L = 0.2$  pu, hasil konfigurasi terbaik adalah kombinasi AVR-FLC dengan PSS-C, yaitu dengan tanggapan *overshoot* = 1.37 %, frekuensi teredam  $f_d = 0.3030$  Hz, frekuensi osilasi teredam  $\omega_d = 1.0930$  Hz dengan rasio peredaman  $\xi = 0.1425$  dan sistem tunak infinit. Dari simulasi dibuktikan bahwa aplikasi sistem berbasis fuzzy yang diimplementasikan pada dua peralatan stabilisasi generator, bilamana masing-masing inferensinya dirancang terpisah tidak menunjukkan kinerja yang terbaik, bahkan tidak stabil.

**Kata kunci :** AVR-FLC (Automatic Voltage Regulation - Fuzzy Logic Controller), PSS-C (Power System Stabilizer-Conventional), SMIB (Single Machine Infinite Bus)

## Abstract

*There is several control variations attached to a generator to increase efficiency of damping operations to oscillations existence. Conventional AVR and PSS control equipment attached to a power plant, aiming for touch ups operating system stability. One approach use is based on fuzzy logic control applications. Combination AVR and PSS conventional and a fuzzy logic-based system study simulated by application software, to determine oscillation damping response time characteristics and to compare of these two controls performance. Simulation configuration as follows: AVR-C with PSS-C, AVR-FLC with PSS-C, AVR-C with PSS-FLC and AVR-FLC with PSS-FLC. Observed on a specific issue,  $P_e$  and  $V_t$  output variable, simulated system response time of prime mover drive startup at  $t = 1$  second, followed startup electrical excitation at  $t = 20$  seconds. The best configuration is AVR-FLC with PSS-C combination, i.e. overshoot response = 1.37 %, damped frequency  $f_d = 0.3030$  Hz, damped oscillation frequency  $\omega_d = 1.0930$  Hz, damping ratio  $\xi = 0.1425$  and continuous steady-state system. By simulations proved that fuzzy-based system application are implemented on two generators stabilization equipment, when each inferences are designed separately to show the worst performance, even unstable.*

**Keywords :** AVR-FLC (Automatic Voltage Regulation-Fuzzy Logic Controller), PSS-C (Power System Stabilizer-Conventional), SMIB (Single Machine Infinite Bus)

## I. PENDAHULUAN

Studi tentang osilasi daya pada frekuensi rendah telah dilakukan awal tahun 1960, kemudian beberapa kejadian tentang osilasi daya frekuensi rendah tersebut dapat di amati secara tipikal diantara 0.1 Hz sampai dengan 0.4 Hz [1][2]. Terdapat beberapa variasi kendali yang dipasangkan pada generator untuk membuat

efisien terhadap eksistensi peredaman osilasi tersebut. Sistem tenaga merupakan sistem dinamik yang kompleks dan operasinya sangat stokastik maka selalu timbul gejala natural fisik pada kejadian tersebut dan dimungkinkan adanya osilasi daya diantaranya [3].

Untuk mengatasi ketidakstabilan sistem yang terjadi karena gangguan kecil pada frekuensi rendah dipasangkan peralatan tambahan PSS [4].

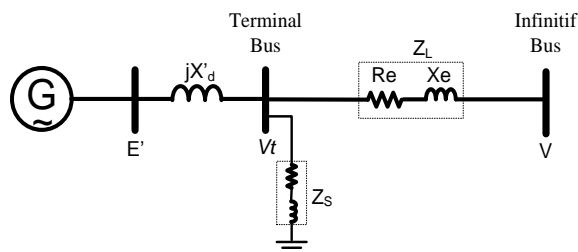
Beberapa PSS yang digunakan dalam sistem tenaga listrik dikembangkan berdasarkan teori kendali klasik linier, yang biasanya disebut PSS konvensional [5]. Salah satu kunci keberhasilan dalam menjaga stabilitas sistem adalah penggunaan AVR dan PSS yang handal. Keandalan perangkat AVR dan PSS biasanya dilihat dari kemampuannya mengatasi osilasi rotor generator dalam waktu yang singkat. Ada pendekatan utama untuk menstabilkan sistem tenaga listrik pada rentang kondisi operasi yang luas, yaitu dengan pendekatan kendali berbasis pada logika fuzzy [6][7][8].

Masalah stabilitas pada sistem pembangkit tenaga listrik dengan kendali fuzzy masih menjadi penelitian terkini. Sistem fuzzy didasarkan pada karakteristik kualitatif maupun bebas model. Belum didapatkan solusi umum yang tepat untuk memecahkan masalah tersebut walaupun sejumlah kriteria analisis stabilitas bagi sistem kendali fuzzy telah diusulkan dalam berbagai literatur.

Penelitian ini menjadi penting karena mencoba menggabungkan dua jenis pengendali untuk memperoleh kebaikan dalam hal kinerja tanpa harus mengorbankan stabilitas sistem. Pada sistem kendali yang terpisah tersebut, dilakukan implementasi kombinasional antara kendali konvensional dengan kendali berbasis logika fuzzy pada AVR dan PSS yang bekerja secara bersamaan.

### 1.1 Model Mesin Pembangkit Tunggal

Representasi model dinamik sistem tenaga listrik mesin tunggal sederhana terdiri dari turbin, generator sinkron, sistem eksitasi, dan beban statik. Representasi, sistem linier tenaga listrik mesin tunggal dengan beban bus infinitif ditunjukkan pada diagram garis Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Garis Sistem Linier Tenaga Listrik Mesin Tunggal dengan Infinitif Bus

Persamaan aljabar stator dipresentasikan sebagai berikut :

$$E'_q + x'_d i_d = v_q \quad (1)$$

$$-x_q i_q = v_d \quad (2)$$

Dengan pemisahan dan substitusi didapatkan,

$$\begin{bmatrix} (x'_d + x_e) & -Re \\ -Re & (x_q + x_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_b \cos \delta - E'_q \\ E_b \sin \delta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$i_d = A^{-1} [R_e E_b \sin \delta + (x_q + x_e)(E_b \cos \delta - E'_q)] \quad (4)$$

$$i_q = A^{-1} [(x'_d + x_e) E_b \sin \delta - R_e (E_b \cos \delta - E'_q)] \quad (5)$$

$$\Delta v_d = -x_d C_3 \Delta \delta - x_q C_4 \Delta E'_q \quad (6)$$

$$\Delta v_q = x'_d C_1 \Delta \delta + (1 + x'_d C_2) \Delta E'_q \quad (7)$$

Dengan persamaan mekanis rotor,

$$\Delta S_m = \frac{1}{2HS} [\Delta T_m - \Delta T_e - D \Delta S_m] \quad (8)$$

$$T_e = E'_q i_q - (x_q - x'_d) i_d i_q \quad (9)$$

untuk penurunan fluks pada kumparan medan dapat dituliskan persamaan sebagai berikut,

$$T'_{do} \frac{dE'_d}{dt} = E_{fd} - E'_q + (x_d + x'_d) i_d \quad (10)$$

Analisis stabilitas keadaan tunak dengan ayunan diawali dengan persamaan ayunan (11) dan (12) berikut :

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} = P_m - P_{\max} \sin \delta \quad (11)$$

$$P_s = \frac{dP}{d\delta} \Big|_{\delta_0} = P_{\max} \cos \delta_0 \quad (12)$$

Di identifikasikan untuk gangguan kecil dengan  $\Delta \delta$  merupakan derivasi dari bentuk  $\delta = \delta_0 + \Delta \delta$  adalah penyederhanaan fungsi non linier sudut daya  $\delta$ . Analisis stabilitas keadaan tunak dengan persamaan ayunan pada term  $\Delta \delta$  adalah :

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + P_m \cos \delta_0 \Delta \delta = 0 \quad (13)$$

Dari bentuk persamaan turunan kedua,

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + P_s \Delta \delta = 0 \quad (14)$$

Daya redaman dengan torsi redaman dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut :

$$P_d = D \frac{d\delta}{dt} \quad (15)$$

Dengan menghubungkan daya peredaman pada persamaan ayunan didapatkan persamaan karakteristik sebagai berikut :

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + D \frac{d \Delta \delta}{dt} + P_s \Delta \delta = 0 \quad (16)$$

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + 2\zeta \omega_n \frac{d \Delta \delta}{dt} + \omega_n^2 \Delta \delta = 0 \quad (17)$$

Untuk solusi akar akar persamaan karakteristiknya adalah :

$$s_1, s_2 = -\zeta \omega_n \pm j \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (18)$$

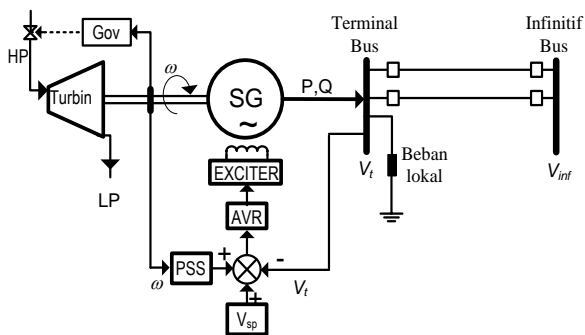
Dengan harga frekuensi peredaman osilasinya adalah :

$$f_d = \frac{1}{T_d} = \frac{1}{|T_{mak} - T_{min}| * 2} \quad (19)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (20)$$

$$\xi = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\pi f_d}{HP_s}} \quad ; \quad 0 < \xi < 1 \quad (21)$$

Model sistem yang dibangun adalah model dari sebuah mesin pembangkit generator tunggal dengan beban infinitif yang dilengkapi dengan sebuah AVR dan PSS, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



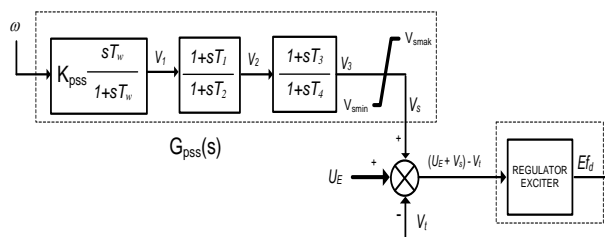
Gambar 2 Model Mesin Pembangkit Generator Tunggal dengan AVR dan PSS

## 1.2 Model PSS dan AVR

### 1.2.1 Model PSS

PSS berfungsi memperluas batas kerja stabilitas sistem dengan cara memodulasi sinyal variabel eksitasi generator guna menghasilkan redaman osilasi. Blok diagram model PSS tipe II seperti pada Gambar 3. Osilasi tersebut biasanya

terjadi pada batas rentang frekuensi antara 0.2 Hz sampai dengan 3.0 Hz, dan osilasi ini dapat mengganggu kemampuan sistem dalam menyalurkan daya listrik [7]. Dengan representasi  $K_{pss}$  sebagai *gain stabilizer*, karakteristik tanggapan frekuensi PSS diatur dengan memvariasikan konstanta waktu  $T_w, T_1, T_2, T_3$  dan  $T_4$  harus ditala untuk memberikan peredaman pada kisaran frekuensi osilasi yang mungkin terjadi.



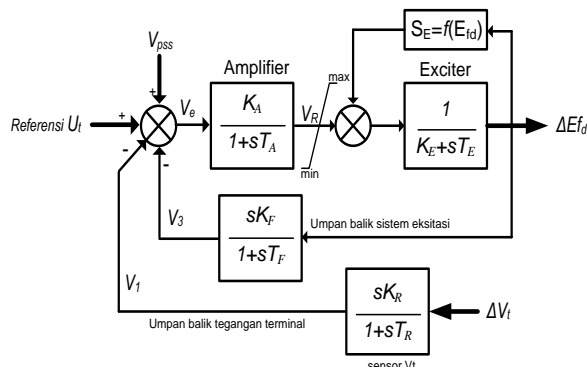
Gambar 3 Blok Diagram Model PSS Tipe II

Fungsi alih PSS secara umum dinyatakan sebagai berikut:

$$G_{pss}(S) = K_{pss} \left[ \frac{T_w S}{1 + T_w S} \right] \left[ \frac{(1 + T_1 S)(1 + T_3 S)}{(1 + T_2 S)(1 + T_4 S)} \right] \quad (22)$$

### 1.2.2 Model AVR

Model sistem eksitasi IEEE tipe ST1 ini meregulasi tegangan secara kontinu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Dengan asumsi mengabaikan sistem pembatasan dan dilinierkan, bagian bagiannya terdiri dari penguat isyarat, filter, penyearah, pembatas saturasi dan eksiter itu sendiri.

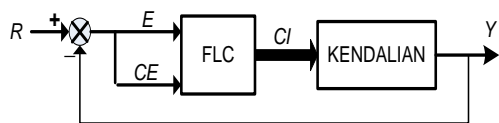


Gambar 4 Blok Diagram Model Eksitasi Tipe ST1 IEEE

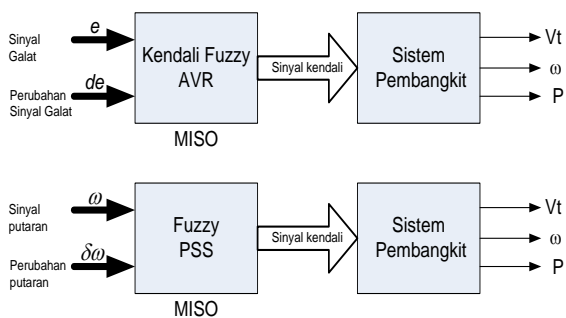
### 1.3 Model Kendali Fuzzy

Dipilih model fuzzy *Mamdani*, dengan kendali lingkaran tertutup MISO. Dengan dua masukan sinyal galat dan perubahan galat dari

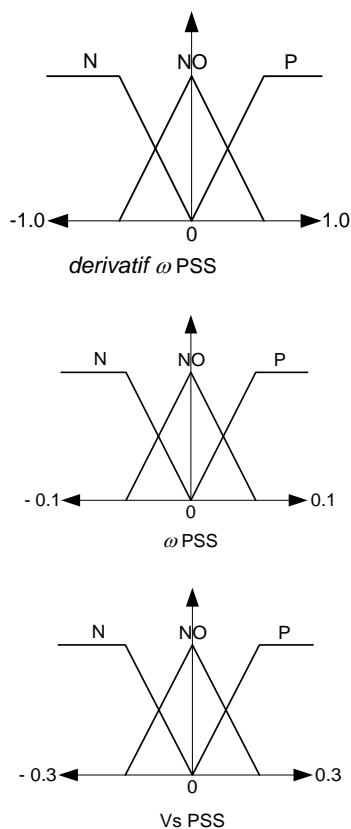
variabel kendali dengan satu keluaran sebagai sinyal aktuasi kendali sistem.



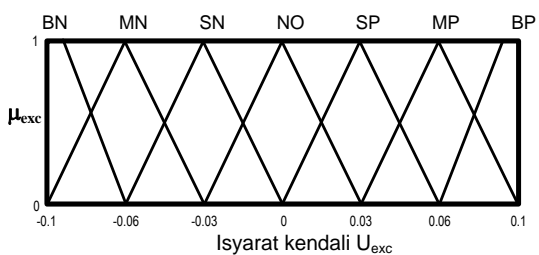
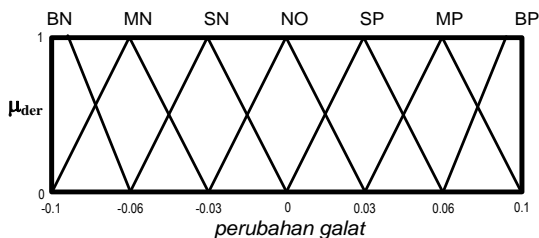
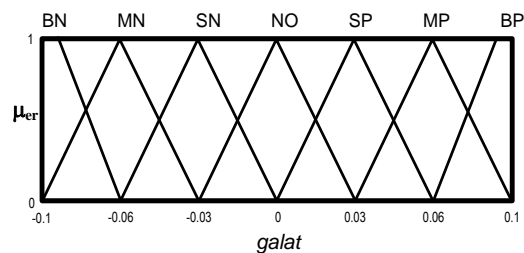
Gambar 5 Blok Dasar Kendali Fuzzy Lingkar Tertutup



Gambar 6 Blok MISO Sistem Kendali Fuzzy



Gambar 7 Fungsi Keanggotaan Fuzzy PSS untuk Derivatif  $\omega$ ,  $\omega$  dan Vs



Gambar 8 Fungsi Keanggotaan Kendali Fuzzy AVR untuk Error, Derivatif Error dan  $V_{exc}$

TABEL 1  
Matrik FAM Aturan Kendali Fuzzy PSS

|                          |    |    |    |
|--------------------------|----|----|----|
| $\frac{d\omega}{\omega}$ | NE | ZO | PO |
| NE                       | NE | NE | NE |
| ZO                       | NE | ZO | PO |
| PO                       | PO | PO | PO |

TABEL 2  
Matrik FAM Aturan Kendali Fuzzy AVR

|                |    |    |    |    |    |    |    |
|----------------|----|----|----|----|----|----|----|
| $\frac{de}{e}$ | BN | MN | SN | ZO | SP | MP | BP |
| BN             | BN | MN | MN | SN | ZO | ZO | ZO |
| MN             | BN | MN | MN | SN | ZO | ZO | ZO |
| SN             | BN | SN | SN | ZO | ZO | ZO | SP |
| ZO             | MN | SN | SN | ZO | SP | SP | MP |
| SP             | SN | ZO | ZO | ZO | SP | SP | BP |
| MP             | ZO | ZO | ZO | SP | MP | MP | BP |
| BP             | ZO | ZO | ZO | SP | MP | MP | BP |

II. METODE PENELITIAN

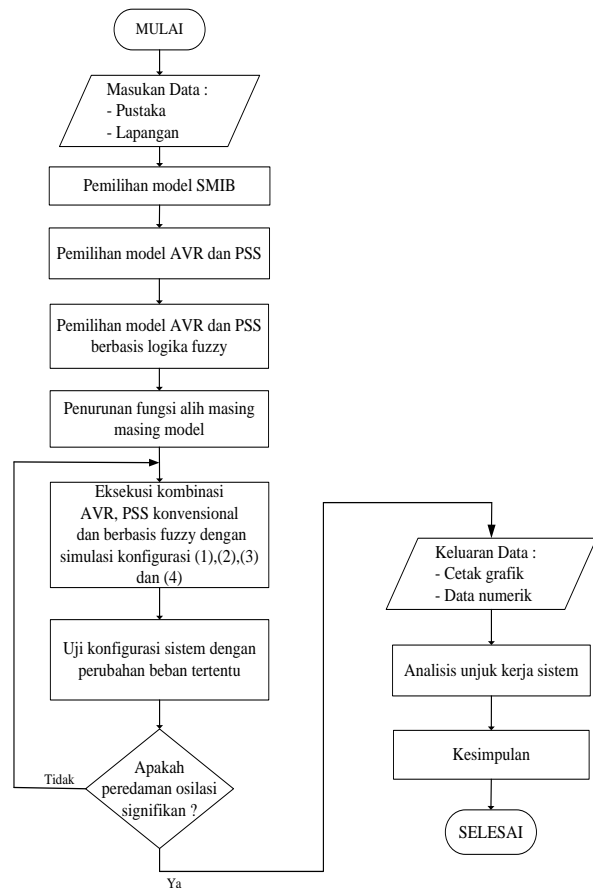
2.1 Langkah Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah :

1. Studi pustaka terkait
2. Pengumpulan data operasi pengukuran lapangan
3. Pemilihan model sistem dan membuat model sistem tenaga listrik standar IEEE
4. Pemilihan tipe AVR dan PSS konvensional yang terpasang pada sistem
5. Pemilihan tipe AVR dan PSS berbasis logika fuzzy
6. Pengujian kombinasi AVR dan PSS konvensional dan berbasis logika fuzzy dengan perubahan beban tertentu, guna mengetahui waktu tanggapan sistem dengan pengujian sebagai berikut :
  - 1) AVR-C dengan PSS-C
  - 2) AVR-FLC dengan PSS-C
  - 3) AVR-C dengan PSS-FLC
  - 4) AVR-FLC dengan PSS-FLC
7. Komparasi masing masing redaman osilasi AVR dan PSS hasil konfigurasi kombinasi rancangan yang disimulasikan
8. Analisis unjuk kerja masing-masing konfigurasi kombinasi AVR dan PSS hasil rancangan
9. Kesimpulan penelitian

2.2 Diagram Alir Penelitian

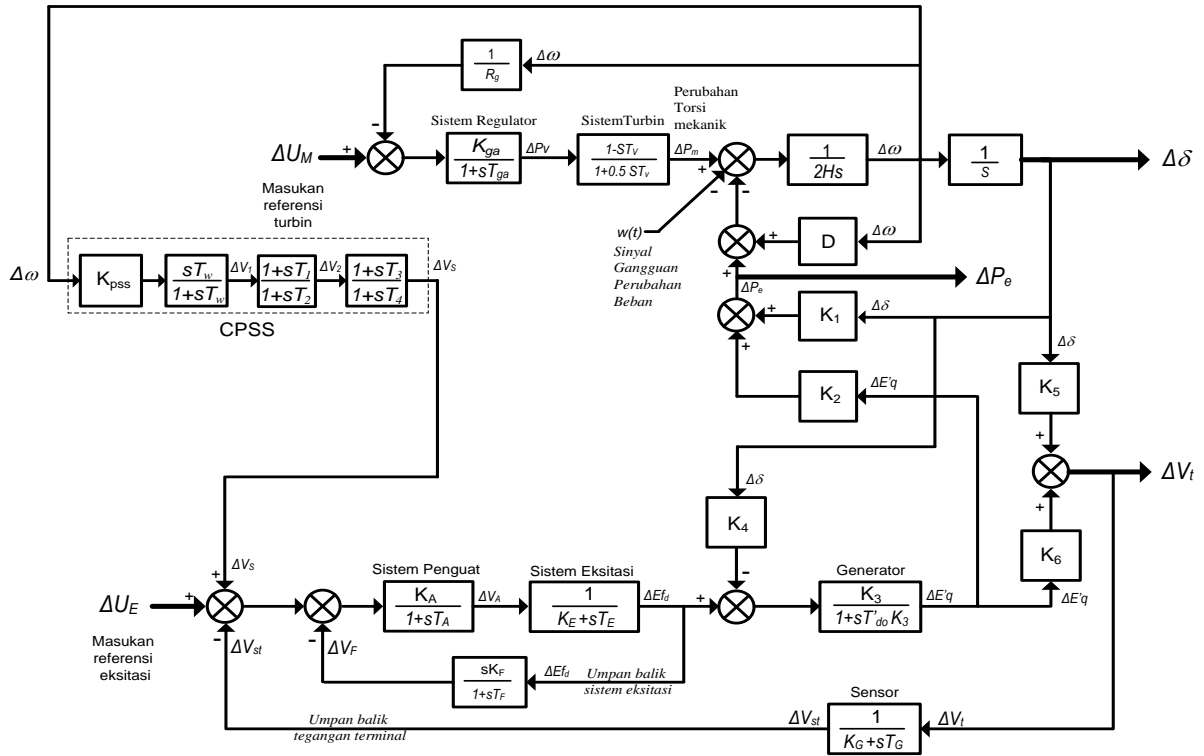
Variabel masukan PSS adalah perubahan putaran mesin, □ pengamatan keluaran dari tanggapan waktu dan kinerja tegangan bus terminal  $V_t$ , daya listrik  $P_e$ , perubahan sudut  $\Delta\delta$  dan perubahan putaran rotor  $\Delta\omega$ .



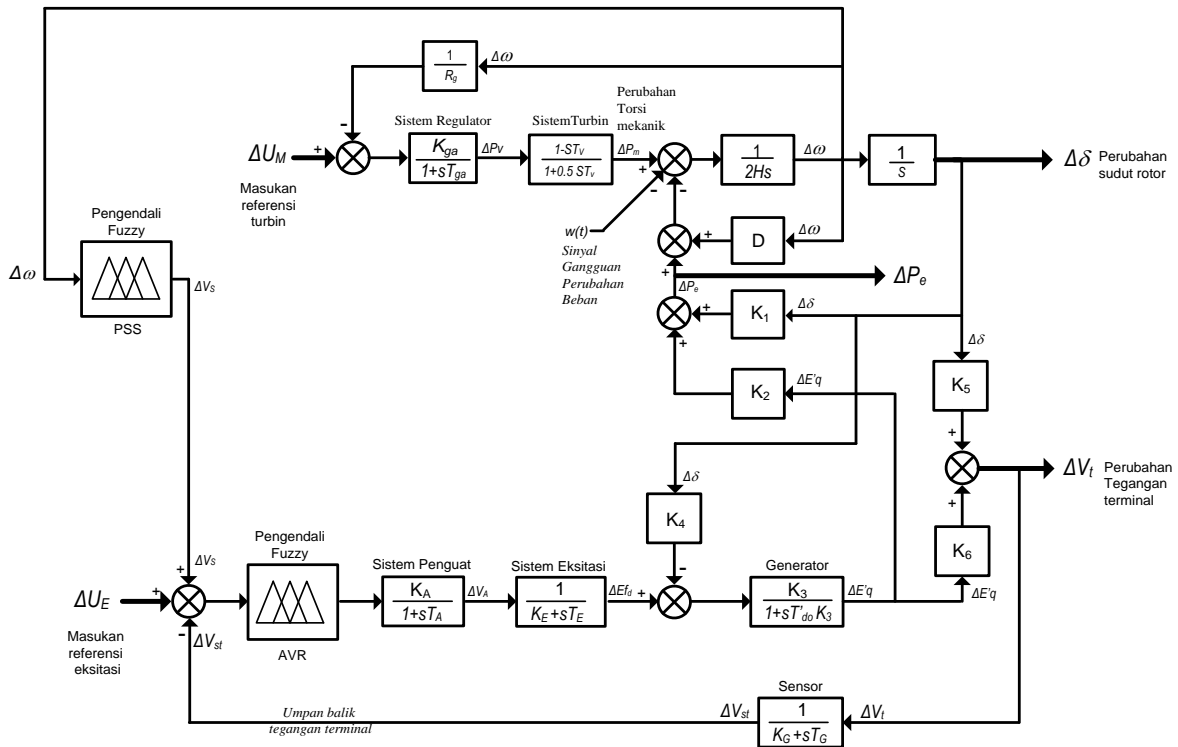
Gambar 9 Diagram Alir Metode Penelitian

2.3 Uji Simulasi Model

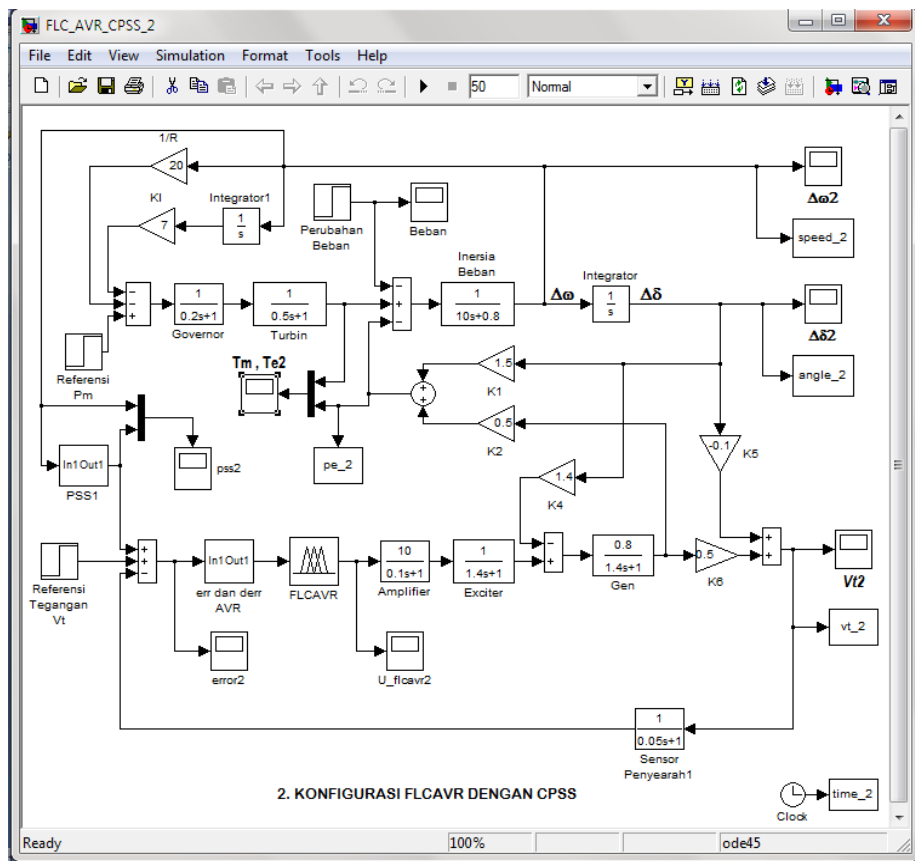
Gambar pemodelan sistem lengkap antara lain seperti Gambar 10 dan 11, masing-masing pengujian dilakukan dengan pemodelan perangkat lunak SIMULINK. Kombinasi diagram rangkaian Gambar 10 dan Gambar 11 secara terpisah sesuai dengan konfigurasi sistem kombinasi yang dirancang dan disimulasikan dengan rangkaian SIMULINK sebagai berikut pada Gambar 12, Gambar 13, Gambar 14, dan Gambar 15.



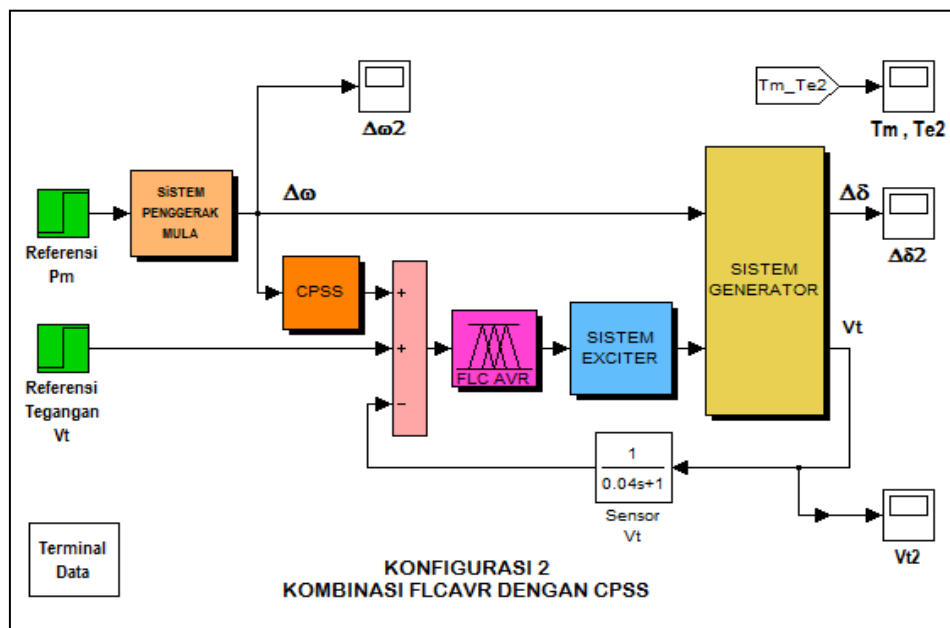
Gambar 10 Diagram Fungsi Alih Sistem Pembangkit dengan PSS dan AVR



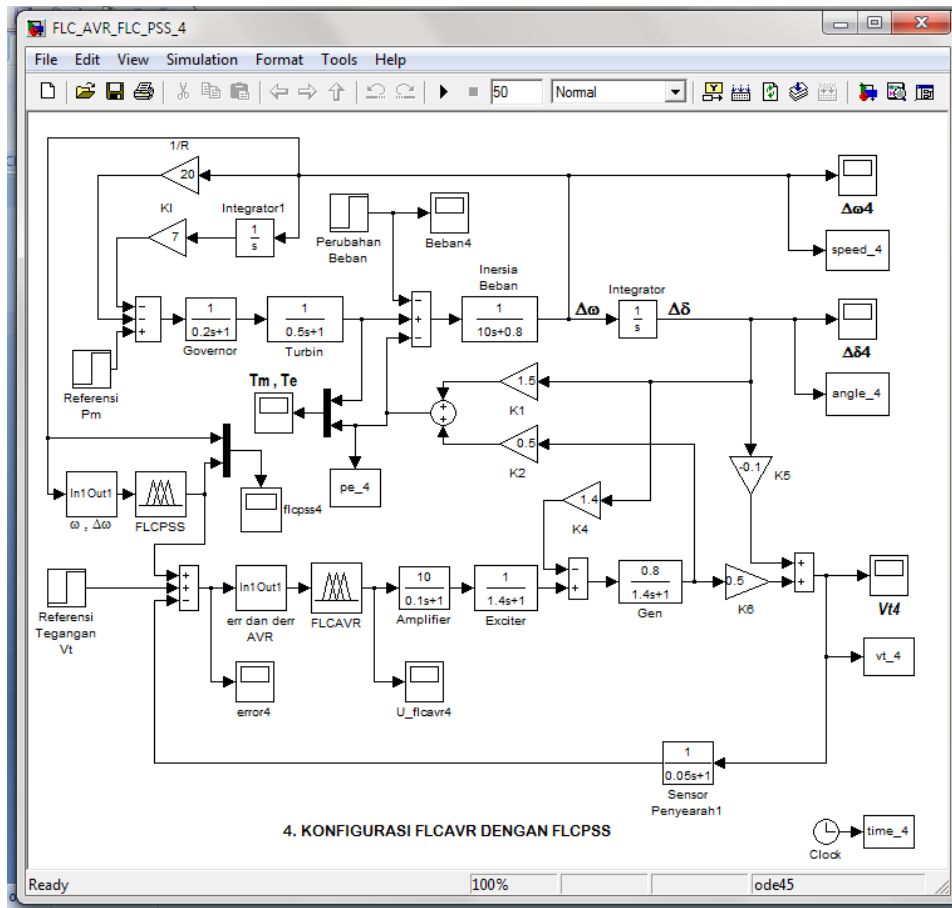
Gambar 11 Diagram Fungsi Alih Sistem Pembangkit dengan PSS dan AVR Berbasis Fuzzy



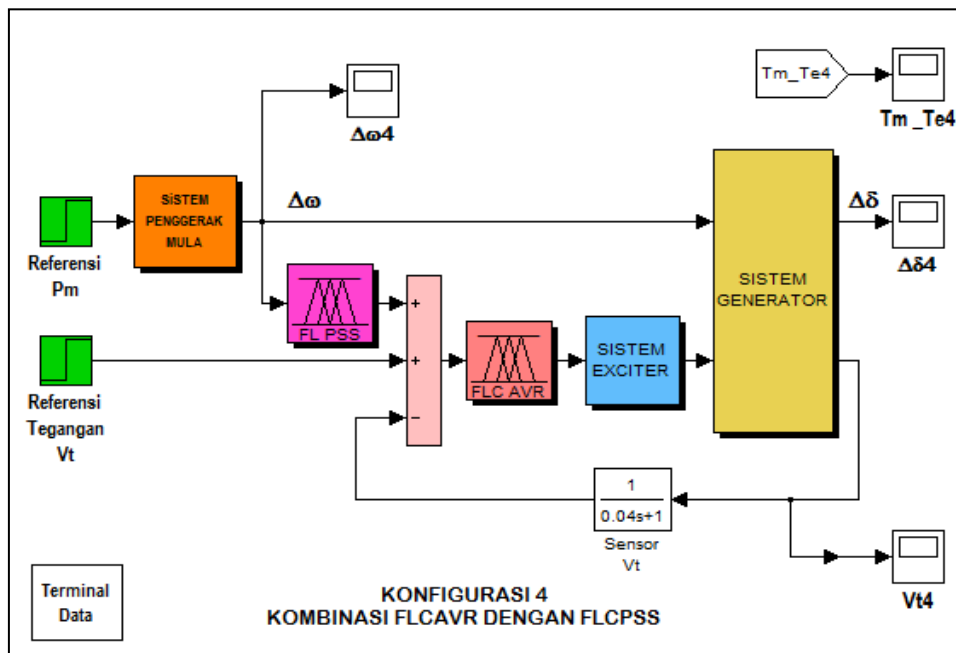
Gambar 12 Model SIMULINK Konfigurasi 2 AVR Fuzzy dengan PSS Konvensional



Gambar 13 Model Penyederhanaan SIMULINK Konfigurasi 2 AVR Fuzzy dengan PSS Konvensional



Gambar 14 Model SIMULINK Konfigurasi 4 AVR Fuzzy dengan PSS Fuzzy



Gambar 15 Model Penyederhanaan SIMULINK Konfigurasi 4 AVR Fuzzy dengan PSS Fuzzy

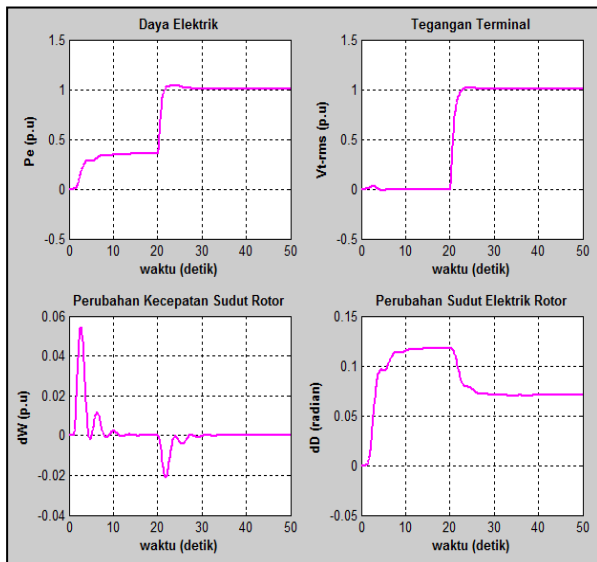


III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi dilakukan dengan mengamati kinerja tanggapan waktu keluaran  $P_e$  masing-masing konfigurasi, hasil pengujian simulasi *statup* sistem *prime mover* padat = 1 detik dan generator *excitation*  $t = 20$  detik, kondisi perubahan beban  $\Delta P_L = 0$ , dapat dilihat pada beberapa grafik berikut ini.

3.1 AVR PID dengan PSS Konvensional

*Startup* awal  $t = 1$ ,  $\Delta\omega = 0,056$  pu dan pada  $1 < t < 10$  detik  $\Delta\delta = 0.118$  rad,  $V_t$  relatif nol. Mulai  $t = 20$ , *overshoot*  $P_e = 3.9\%$  tunak, perubahan kecepatan sudut rotor  $\Delta\omega = -0,021$  pu pada  $t \geq 30$ ,  $\Delta\delta = 0.07$  rad.

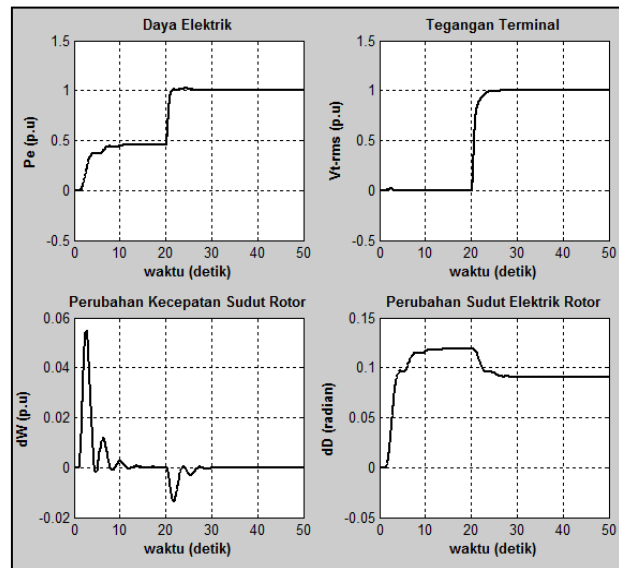


Gambar 16 Grafik Waktu Tanggap Hasil Uji Konfigurasi 1

Sistem tidak terjadi perubahan yang ekstrim dengan rasio peredaman  $\xi = 0.1335$ , kondisi *underdamped*.

3.2 AVR Fuzzy dengan PSS Konvensional

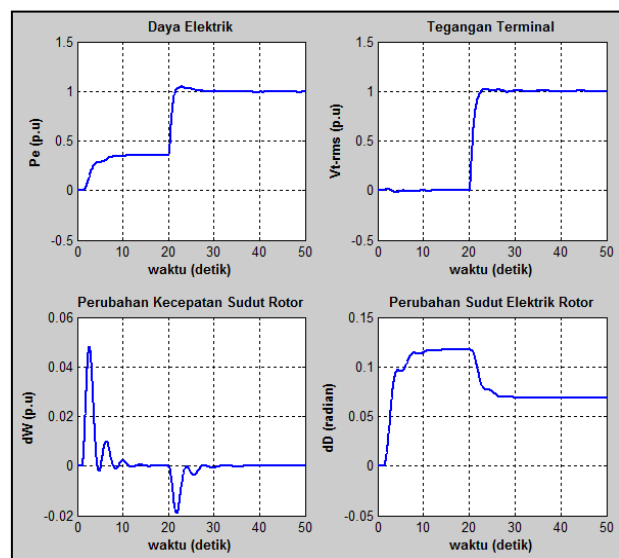
*Startup* awal  $t = 1$  detik,  $\Delta\omega = 0,056$  pu dan pada  $1 < t < 10$  detik  $\Delta\delta = 0.118$  rad tercapai tunak,  $V_t$  relatif nol. *Startup* eksitasi  $t = 20$  detik, terjadi *overshoot*  $P_e = 2.1\%$ , dicapai tunak,  $\Delta\omega = -0,0136$  pu dan pada  $t \geq 30$  detik,  $\Delta\delta = 0.09$  rad tercapai tunak dengan rasio peredaman  $\xi = 0.1328$ , kondisi *underdamped*.



Gambar 17 Grafik Waktu Tanggap Hasil Uji Konfigurasi 2

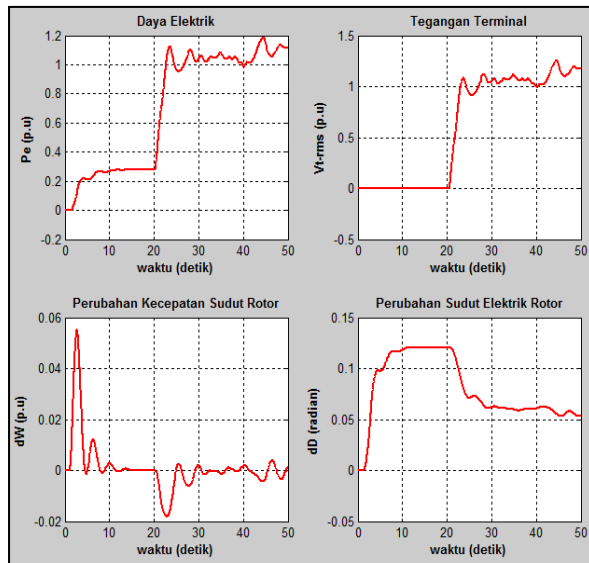
3.3 AVR Konvensional PID dengan PSS Fuzzy

$V_t$  relatif nol. Selanjutnya dimulai pada *startup* eksitasi  $t = 20$  detik, terjadi *overshoot*  $P_e = 4.5\%$ , dicapai keadaan tunak kontinyu, perubahan kecepatan sudut rotor  $\Delta\omega = -0,0186$  pu negatif, menurun dan perubahan pada  $t \geq 30$  detik, sudut elektris tercapai tunak pada  $\Delta\delta = 0.07$  rad. Sistem tidak terjadi perubahan yang ekstrim dengan rasio peredaman  $\xi = 0.0803$ , kondisi *underdamped*.



Gambar 18 Grafik Waktu Tanggap Hasil Uji Konfigurasi 3

### 3.4 AVR Fuzzy dengan PSS Fuzzy

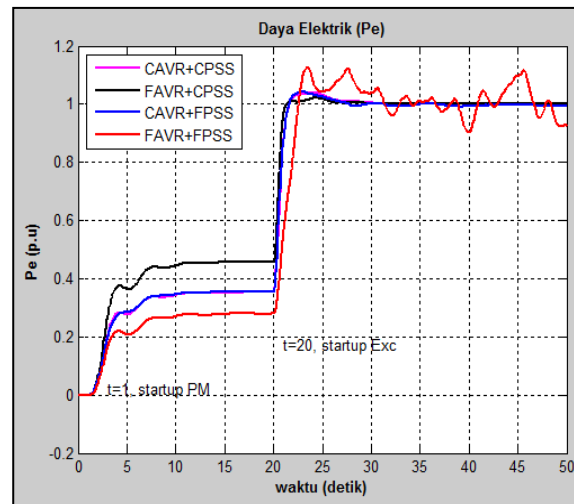


Gambar 19 Grafik Waktu Tanggap Hasil Uji Konfigurasi 4

Startup awal  $t = 1$  detik, kecepatan sudut rotor  $\Delta\omega = 0,056$  pu dan pada  $1 < t < 10$  detik sudut elektris rotor hingga  $\Delta\delta = 0.120$  rad tercapai tunak,  $V_t$  relatif nol. Selanjutnya dimulai pada startup eksitasi  $t = 20$  detik, terjadi overshoot  $P_e = 12.5\%$ , tidak kondisi tunak, osilasi non-periodik kontinu, perubahan kecepatan sudut rotor  $\Delta\omega = -0,0185$  pu negatif menurun dan perubahan pada  $t \geq 30$  detik, sudut elektris tidak kondisi tunak, rata-rata  $\Delta\delta = 0.062$  rad. Rasio peredaman  $\xi = 0.1494$ , kondisi underdamped. Terjadi perubahan yang tidak mencapai tunak, sistem tidak stabil.

### 3.5 Grafik Perbandingan Konfigurasi 1,2,3 dan 4

Grafik representasi perbandingan tanggapan waktu keluaran  $P_e$  empat konfigurasi, pada awal startup penggerak mula sampai kondisi mesin tunak, konfigurasi 1 dan 3 tipikal, untuk konfigurasi 2 dan 4 relatif mempunyai tanggapan yang berbeda. Dengan memberikan referensi eksitasi, masing-masing akan memberikan tanggapan yang berbeda. Dari keempat grafik tanggapan tersebut dapat dilihat bahwa keadaan ideal adalah konfigurasi 1 sedangkan untuk tanggapan terjelek adalah konfigurasi 4. Untuk kombinasi konvensional dan fuzzy yang terbaik adalah konfigurasi 2, kondisi laik overshoot = 2.10 %, tunak kontinu dan teredam  $\xi = 0.1328$ .



Gambar 20 Grafik Perbandingan Waktu Tanggap Perubahan Daya  $P_e$  Konfigurasi 1,2,3 dan 4

## IV. KESIMPULAN

Dari hasil dan analisis hasil penelitian yang sudah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dapat disimulasikan pengujian model kombinasi sistem kendali stabilisasi generator AVR-PSS konvensional dan berbasis fuzzy, dengan perangkat lunak MATLAB dan SIMULINK, bekerja dengan baik pada batas tertentu, dan hasil yang spesifik.
2. Konfigurasi AVR berbasis fuzzy dengan PSS konvensional (AVR-FLC + PSS-C) diperoleh hasil unjuk kerja terbaik dari empat konfigurasi yang diuji. Dengan tanggapan waktu overshoot  $V_t = 1,37\%$  dan  $P_e = 2,10\%$ , dengan kemampuan dalam meredam osilasi, tanggapan perubahan sudut daya listrik dan perubahan kecepatan sudut yang baik.
3. Kombinasi AVR berbasis fuzzy dengan PSS berbasis fuzzy mempunyai unjuk kerja terburuk dibanding ketiga konfigurasi lainnya. Menghasilkan waktu tanggapan keluaran dengan overshoot  $V_t = 15\%$  dan  $P_e = 12,5\%$ , waktu tanggapan variabel-variabel keluaran tidak stabil dan tidak tercapai keadaan tunak.
4. Dari hasil uji kombinasi aplikasi AVR-PSS konvensional dan berbasis fuzzy yang diimplementasikan pada sistem stabilisasi generator sinkron, bilamana kendali fuzzy masing-masing peralatan dengan aturan inferensinya dirancang terpisah, tidak merepresentasikan kinerja yang terbaik, bahkan tidak stabil, sehingga konfigurasi ini tidak dianjurkan untuk diimplementasikan pada sistem stabilisasi generator.

TABEL 3  
 GRAFIK ANALISIS UNJUK KERJA KONFIGURASI AVR DAN PSS UNTUK INTERVAL KE DUA PADA  
 $20 < T < 25$  DENGAN DAYA  $P_e$  (P.U)

| Configuration | Overshoot |           |           |       |       |      | $f_d$ (Hz) | $\omega_d$ (Hz) | $\xi$  |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|------|------------|-----------------|--------|
|               | $P_e$ ref | $P_e$ max | $P_e$ min | To    | T1    | %    |            |                 |        |
| CAVR + CPSS   | 1.00      | 1.0389    | 1.0100    | 24.38 | 22.50 | 3.9  | 0.2660     | 1.6702          | 0.1335 |
| FAVR + CPSS   | 1.00      | 1.0210    | 1.0085    | 24.40 | 22.50 | 2.1  | 0.2632     | 1.6526          | 0.1328 |
| CAVR + FPSS   | 1.00      | 1.0450    | 0.9920    | 23.00 | 28.20 | 4.5  | 0.0962     | 0.6038          | 0.0803 |
| FAVR + FPSS   | 1.00      | 1.1250    | 1.0400    | 23.50 | 25.00 | 12.5 | 0.3333     | 2.0933          | 0.1494 |

**DAFTAR PUSTAKA**

[1] D.K Sambariya, R Gupta, A K Sharma, “Fuzzy Application To Single Machine Power System Stabilizer”, *Journal Of Theoretical and Applied Information Technology*, 2009, pp.317-323.

[2] K. Prasertwong, N. Mithulananthan, “Conventional and Fuzzy Logic Controllers at Generator Location for Low Frequency Oscillation Damping”, *International Journal of Electric Power and Energy System Engineering*, No.2, Vol.3, 2009.

[3] A. Darabi, S.A. Soleamani, A. Hassanian, “Fuzzy Based Digital Automatic Regulator of a Synchronous Generator with Unbalance Loads”, *American Journal of Engineering and Applied Science* 1 (4), 2008, pp.280-286, ISSN 1941-7020.

[4] J.J. Grainger, W.D. Stevenson Jr., *Power System Analysis*, McGraw-Hill, Inc., Singapore, 1994.

[5] M.Chetty, “A Fuzzy Logic Based Discrete Mode Power System Stabilizer”, *Asian Journal of Control*, Vol. 4, No. 3, 2002, pp. 327-332.

[6] E.A.Hakim, A.Soeprijanto, H.P. Mauridhi, “PSS Design Based on PD and PI Fuzzy Controller by Particle Swarm Optimization”, *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Bandung*, 2007.

[7] E.A.Hakim, A.Suprijanto, H.P. Mauridhi, “Fuzzy PID Based PSS Design”, *International Journal of Electrical and Electronic Engineering*, No.4, Vol.5. 2007.

[8] Imam Robandi, *Design Sistem Tenaga Modern*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2006.