

PERBANDINGAN KENDALI LOGIKA FUZZY DAN JARINGAN SARAF TIRUAN PADA SISTEM EKSTIASI *AUTOMATIC VOLTAGE* REGULATOR UNTUK GENERATOR SINKRON

Abdul Muis Prasetya¹, Linda Sartika², Adjie Satria³

^{1,2,3}Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia

¹prasetia.electric@gmail.com

²lindasartika75@gmail.com

³satriadunia@gmail.com

Abstract— Synchronous generators require a device that functions to regulate the terminal voltage to be maintained, the device is known as an Automatic Voltage Regulator (AVR) or a device that can supply excitation current to the generator so that the generator terminal voltage remains stable. This research compares two different controls, namely fuzzy logic and artificial neural networks on AVR which are expected to regulate the generator terminal voltage at a nominal 220V. Artificial neural network research data is taken from the input and output of PID control while fuzzy logic rules design using trial and error method on the same AVR. The results showed the transient response of the generator performance with the results that fuzzy logic produced a response delay Time (t_d) 1.058s, rise Time (t_r) 2.576s, peak Time (t_p) 20s, settling Time (t_s) 5.354s, maximum overshoot (M_p) 0%, steady state error (e_{ss}) 0%. Artificial neural network produces response delay Time (t_d) 1.031s, rise Time (t_r) 1.518s, peak Time (t_p) 3.128s, settling Time (t_s) 2.3286s, maximum overshoot (M_p) 1.345%, steady state error (e_{ss}) 0.045%. Based on the transient response value, fuzzy logic has a slower response than artificial neural networks, but fuzzy logic can minimize overshoot.

Keywords— AVR, Fuzzy Logic, Artificial Neural Network, Synchronous.

Intisari— Generator Sinkron memerlukan alat yang berfungsi untuk mengatur tegangan terminal tetap terjaga, alat tersebut dikenal sebagai Automatic Voltage Regulator (AVR) atau alat yang dapat arus eksitasi yang disuplai ke generator sehingga tegangan terminal generator tetap stabil. Penelitian ini membandingkan dua kendali yang berbeda yaitu logika fuzzy dan jaringan saraf tiruan pada AVR yang diharapkan dapat mengatur tegangan terminal generator pada nominal 220V. Data penelitian jaringan saraf tiruan diambil dari input dan output kendali PID sedangkan desain rules logika fuzzy menggunakan metode trial and error pada AVR yang sama. Hasil penelitian menunjukkan respon transient kinerja generator dengan hasil yaitu Logika fuzzy menghasilkan respon delay Time (t_d) 1.058s, rise Time (t_r) 2.576s, peak Time (t_p) 20s, settling Time (t_s) 5.354s, maximum overshoot (M_p) 0%, error steady state (e_{ss}) 0%. Jaringan saraf tiruan menghasilkan respon delay Time (t_d) 1.031s, rise Time (t_r) 1.518s, peak Time (t_p) 3.128s, settling Time (t_s) 2.3286s, maximum overshoot (M_p) 1.345%, error steady state (e_{ss}) 0.045%. Berdasarkan nilai respon transient logika fuzzy memiliki respon lebih lambat dibandingkan jaringan saraf tiruan, akan tetapi logika fuzzy dapat meminimalisir overshoot.

Kata Kunci— AVR, Generator Sinkron, Jaringan Saraf Tiruan, Logika Fuzzy.

I. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik yang umum digunakan adalah generator yang merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Jenis generator yang sering digunakan dalam pembangkit energi listrik adalah generator Sinkron. Generator Sinkron dalam pengoperasiannya membutuhkan sistem proteksi yang dapat menjaga sistem keandalannya sehingga dapat menjaga kestabilan tegangan yang dihasilkan. Salah satu yang menyebabkan generator tidak aman adalah beban yang berubah-ubah dari konsumen listrik yang mengakibatkan tegangan pada terminal generator tidak setabil, sehingga dibutuhkan Automatic Voltage Regulator (AVR) yang mampu untuk menstabilkan tegangan keluaran generator sinkron, di mana AVR akan mengatur tingkat arus eksitasi sebagai penguatan medan magnet [1]. Logika fuzzy adalah himpunan yang unsur-unsurnya mempunyai derajat keanggotaan atau kesesuaian dengan konsep yang merupakan syarat keanggotaan himpunan tersebut. Logika fuzzy digunakan sebagai suatu cara untuk memetakan permasalahan dari input menuju ke output yang diharapkan [2]. Jaringan saraf tiruan merupakan implementasi dari teknologi artificial intelligent. Jaringan saraf tiruan adalah sistem pemroses informasi yang memiliki karakteristik mirip dengan jaringan saraf biologi. Pada dasarnya jaringan saraf tiruan adalah pendekatan rekayasa neuron biologis yang memiliki perangkat dengan banyak input dan satu output. JST terdiri dari sejumlah besar elemen pemrosesan sederhana yang saling berhubungan satu sama lain dan juga berlapis [3].

II. LANDASAN TEORI

A. Automatic Voltage Regulator (AVR)

Automatic Voltage Regulator (AVR) adalah sebuah divais pengatur tegangan yang digunakan pada generator sinkron untuk menyetabilkan tegangan keluaran yang dihasilkan. Bagian AVR terbagi pada dua bagian utama yaitu bagian penyearah (*rectifier*) yang berfungsi untuk mengubah energi AC menjadi DC yang dibutuhkan oleh generator sinkron dalam proses eksitasi dan bagian *voltage regulator* terdapat kontrol PI yang berfungsi untuk mengatur tegangan DC yang akan diinjeksikan pada medan generator sinkron. Masukan dari pengatur tegangan merupakan tegangan DC yang berasal dari

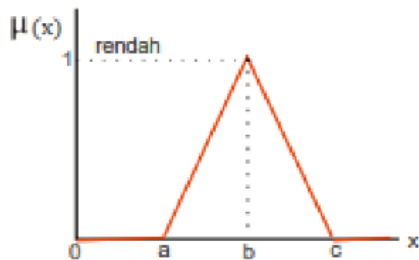
penyearah serta tegangan referensi yang diinginkan dengan kontrol PI yang digunakan maka didapat keluaran berupa tegangan eksitasi yang menjadi masukan generator sinkron. Apabila tegangan output generator dibawah tegangan normal tegangan generator, maka AVR akan memperbesar arus pengutangan (*excitacy*) pada *exiter*. Dengan demikian apabila terjadi perubahan tegangan output generator akan dapat distabilkan oleh AVR secara otomatis [4].

B. Logika Fuzzy

Logika fuzzy memiliki derajat keanggotaan dalam rentang 0 hingga 1. Logika fuzzy adalah suatu cara yang tepat untuk memetakan suatu ruang input kedalam suatu ruang output. Logika fuzzy adalah himpunan yang unsur-unsurnya mempunyai derajat keanggotaan atau kesesuaian dengan konsep yang merupakan syarat keanggotaan himpunan tersebut. Logika fuzzy digunakan sebagai suatu cara untuk memetakan permasalahan dari input menuju ke output yang diharapkan. Dasar logika fuzzy adalah teori himpunan fuzzy [5]. Tahapan logika fuzzy meliputi 3 langkah, yakni *fuzzification*, modifikasi keanggotaan (*Rules Base*) dan *defuzzification*:

1. Fuzzification

Fuzzification merupakan tahapan yang bertujuan untuk membuat variabel *real* berubah menjadi variabel fuzzy. Langkah melakukan *fuzzification* yaitu melalui pemodelan fungsi keanggotaan sehingga dapat diketahui besar kecilnya input (derajat keanggotaan). Adapun fungsi keanggotaan ($\mu[x]$) seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Fungsi keanggotaan kurva segitiga

Fungsi keanggotaan menggunakan Persamaan (1):

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{(x-a)}{(b-a)}; & a \leq x \leq b \\ \frac{(c-x)}{(c-a)}; & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (1)$$

Dengan *a* adalah nilai domain terkecil yang mempunyai derajat keanggotaan nol, *b* adalah nilai domain terkecil yang mempunyai derajat keanggotaan satu, *c* adalah nilai domain terbesar yang mempunyai derajat keanggotaan satu dan *x* adalah nilai input yang akan diubah ke dalam bilangan fuzzy.

2. Rules Base

Aturan fuzzy diungkapkan dalam bentuk “IF antecedent THEN consequent” yang mana adalah inti dari relasi fuzzy. Fungsi implikasi yang bisa digunakan dalam fuzzy metode mamdani adalah dengan menggunakan fungsi min. Fungsi min menggunakan Persamaan (2):

$$a1 = \min\{\mu_{Ai}[x], \mu_{Bi}[x]\} \quad (2)$$

Dengan *a1* adalah nilai minimum dari himpunan fuzzy A dan B pada aturan ke-*i*. $\mu_{Ai}[x]$ adalah derajat keanggotaan *x* dari himpunan fuzzy A pada aturan ke-*i*. $\mu_{Bi}[x]$ adalah derajat keanggotaan *x* dari himpunan fuzzy B pada aturan ke-*i*.

3. Defuzzification

Defuzzification bisa diartikan proses mengubah variabel fuzzy yang dinyatakan dalam sebuah bentuk himpunan fuzzy output dengan membership function untuk mengembalikan kebentuk nyata, untuk *Defuzzification* menggunakan Persamaan (3):

$$Defuzzifikasi = \frac{\sum_{i=1}^{A1} x_i \mu_{Ai}}{\sum_{i=1}^{A1} \mu_{Ai}} \quad (3)$$

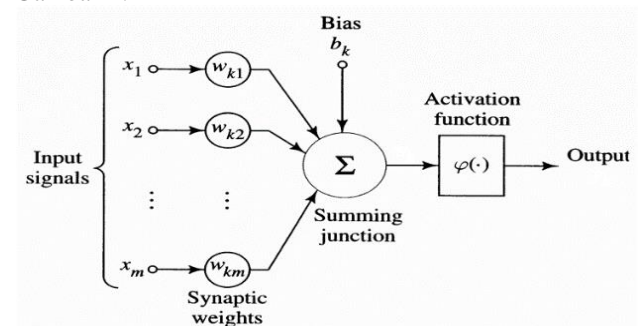
Dengan A adalah luas area, serta *Xi* adalah centroid atau titik pusat rata rata.

C. Jaringan Saraf Tiruan

Jaringan Saraf Tiruan (JST) merupakan metode komputasi yang menyerupai jaringan saraf biologis. JST dibangun guna menyelesaikan masalah tertentu, misalnya mengenali pola atau mengklasifikasi karena adanya proses pembelajaran.

1. Model Jaringan Saraf Tiruan

Sebuah sel saraf terdiri dari tiga bagian, yaitu: fungsi jumlah (*summing function*), fungsi aktivasi (*activation function*), dan output. Jika nilai input melampaui nilai ambang batas tertentu, maka neuron akan teraktivasi, jika tidak maka neuron tidak akan teraktivasi. Secara umum, arsitektur JST dibedakan menjadi beberapa, yaitu jaringan dengan lapisan tunggal, lapisan banyak, dan lapisan kompetitif. Untuk pemodelan JST seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Model neuron pada Jaringan Saraf Tiruan

Dengan *x* adalah input, *w* adalah bobot, Σ adalah proses pengumpulan data, φ adalah fungsi aktivasi, dan *y* adalah output.

2. Fungsi Aktivasi

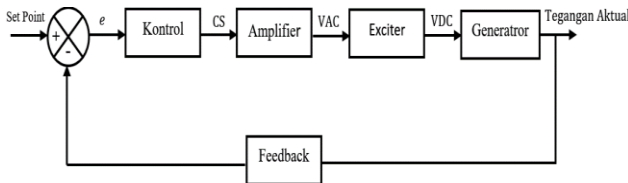
Fungsi aktivasi berfungsi menjembatani perbandingan antara hasil penjumlahan nilai semua bobot yang akan datang dengan nilai input dengan suatu nilai ambang (*threshold*) tertentu pada setiap neuron JST. Fungsi aktivasi inilah yang akan menentukan besarnya bobot. Beberapa fungsi aktivasi yang biasa digunakan adalah:

- a. *Logsig* (fungsi sigmoid biner); nilai output pada range 0 sampai 1.
- b. *Tansig* (fungsi sigmoid bipolar); maksimal output dari fungsi ini pada range -1 sampai 1.
- c. *Purelin* (fungsi linier); nilai output sama dengan nilai input.

III. METODE PENELITIAN

A. Diagram Blok

Dalam upaya untuk meningkatkan kendali AVR, pendekatan menggunakan logika *fuzzy* dan jaringan saraf tiruan menjadi fokus utama penelitian. Pada bagian ini, kami akan membahas secara rinci perbandingan antara dua metode kendali yang inovatif, yaitu logika *fuzzy* dan JST, dalam konteks simulasi kontrol AVR generator *sinkron*. Diagram blok pada Gambar 3 akan memberikan gambaran visual tentang struktur keseluruhan sistem.



Gambar 3. Diagram blok simulasi kontrol AVR generator *sinkron*

Penjelasan dari diagram blok diatas adalah sebagai berikut:

1. *Set point* adalah penentuan nilai tegangan terminal generator, yang ditentukan sebesar 220V.
2. Nilai *error* (*e*) merupakan selisih antara tegangan referensi dengan *feedback* tegangan aktual dari terminal generator *sinkron* dan merupakan *input* untuk blok kontrol.
3. Pada blok sistem kontrol menggunakan dua metode yaitu logika *fuzzy* dan jaringan saraf tiruan yang digunakan sebagai pengendali.
4. *Control signal* (*CS*) merupakan *output* dari sistem kontrol yang ada lalu terhubung sebagai inputan *amplifier* untuk direpresentasikan dalam sebuah sistem orde satu sebagai faktor penguat dan konstanta waktu.
5. Blok *exciter* akan memerintahkan sistem eksitasi untuk menginjeksi *Volt Alternating Current* (*VAC*) ke *Volt Dirrect Current* (*VDC*) atau mengurangi arus *Dirrect Current* (*DC*) pada kumparan rotor generator sesuai dengan kebutuhan.
6. Pada Generator *sinkron*, rotor akan berputar oleh penggerak mula (*prime mover*) dan kemudian kutub-kutub pada rotor akan berputar, terjadinya energi listrik karena adanya proses induksi elektromagnetik sehingga timbul gaya gerak listrik pada kumparan stator.

B. Sistem Model AVR Serta Parameter *Transfer Function*
 Pemodelan sistem AVR dan Generator *Sinkron* menggunakan *transfer function* sesuai dengan parameter pada Tabel 1. Pada penelitian ini model sistem AVR melakukan studi literatur sebagai referensi.

1. Model *Amplifier*

Model *amplifier* digambarkan sebagai sistem orde pertama dengan sebuah faktor penguatan (K_a) dan konstanta waktu (T_a). Penetapan nilai K_a menggunakan nilai minimal yaitu 10 dan T_a menggunakan nilai maksimal yaitu 0.1 [6].

2. Model *Exciter*

K_e adalah konstanta penguatan *eksiter* dan T_e adalah konstanta waktu *eksiter*. Penetapan nilai K_e menggunakan nilai minimal yaitu 1 dan T_e menggunakan nilai minimal yaitu 0.4 [6].

3. Model Generator *Sinkron*

Untuk model yang *linier* sebuah generator dapat pendekatan dengan sistem orde satu, yang memiliki faktor penguatan (K_g) dan konstanta waktu (T_g). Pada nilai konstanta waktu ini bergantung pada beban. Penetapan nilai K_g menggunakan nilai maksimal yaitu 1 dan T_g menggunakan nilai minimal yaitu 1 [6].

Tabel I
 Parameter model AVR dan *transfer function*

Component	Transfer Function	Parameter Range
<i>Amplifier</i>	$TF_{amplifier} = \frac{K_a}{1 + T_a S}$	$10 \leq K_a \leq 40; 0.02 \geq T_a \leq 0.1$
<i>Exciter</i>	$TF_{exciter} = \frac{K_e}{1 + T_e S}$	$1 \leq K_e \leq 10; 0.4 \leq T_e \leq 1.0$
Generator <i>Sinkron</i>	$TF_{generator} = \frac{K_g}{1 + T_g S}$	$0.7 \leq K_g \leq 1.0; 1.0 \leq T_g \leq 2$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Logika *Fuzzy*

Sistem inferensi *fuzzy* yang digunakan adalah mamdani yang menggunakan metode *centroid* untuk defuzzifikasi. Kontrol logika fuzzy ini terdiri dari *multiple input* dan *single output* (MISO) yang berarti memiliki dua masukan dan satu keluaran. Nilai *error* tegangan dan laju perubahan *error* tegangan atau *delta error* adalah masukan dari kendali *fuzzy* yang berasal dari selisih tegangan terminal generator *sinkron* dengan tegangan referensi.

1. Input Logika *Fuzzy*

Logika *fuzzy* menunjukkan fungsi keanggotaan dari *input* pertama dalam simulasi yang diberi nama *error*. Rentang pada *input error* ini diatur antara -220 hingga 220. Terdapat lima keanggotaan, dan masing-masing memiliki bentuk segitiga. Fungsi keanggotaan *error fuzzy* dapat diamati pada Tabel 2.

Tabel II
 Fungsi keanggotaan *input error fuzzy*

	Range	Name	Params	Type
<i>Error</i>	[-220 220]	<i>NB</i>	[-220 -220 -110]	<i>trimf</i>
		<i>NS</i>	[-220 -110 0]	
		<i>Z</i>	[-110 0 110]	
		<i>PS</i>	[0 110 220]	
		<i>PB</i>	[110 220 20]	

Logika *fuzzy* menunjukkan fungsi keanggotaan dari *input* kedua dalam simulasi yang diberi nama *delta error*. Rentang pada *input delta error* ini diatur dalam rentang nilai -220 hingga 220. Terdapat lima keanggotaan, dan masing-masing memiliki bentuk segitiga. Fungsi keanggotaan *input delta error fuzzy* dapat diamati pada Tabel 3.

Tabel III
Fungsi keanggotaan *input delta error fuzzy*

	Range	Name	Params	Type
<i>deltaerror</i>	[-220 220]	<i>NBd</i>	[-220 -220 -110]	<i>trimf</i>
		<i>NSd</i>	[-220 -110 0]	
		<i>Zd</i>	[-110 0 110]	
		<i>PSd</i>	[0 110 220]	
		<i>PBd</i>	[110 220 220]	

2. Output Logika Fuzzy

Logika fuzzy menunjukkan fungsi keanggotaan dari *output* dalam simulasi yang diberi nama *output*. Jangkauan pada *output* ini diatur dalam rentang nilai 17 hingga 27. Sebagaimana dua *input* sebelumnya, *output* ini juga memiliki lima keanggotaan, dan masing-masing memiliki bentuk segitiga. Fungsi keanggotaan *output fuzzy* dapat diperhatikan pada Tabel 4.

Tabel IV
Fungsi keanggotaan *output fuzzy*

	Range	Name	Params	Type
<i>Output</i>	[17 27]	<i>NB</i>	[17 17 19.5]	<i>trimf</i>
		<i>NS</i>	[17 19.5 22]	
		<i>Z</i>	[19.5 22 24.5]	
		<i>PS</i>	[22 25.5 27]	
		<i>PB</i>	[24.5 27 27]	

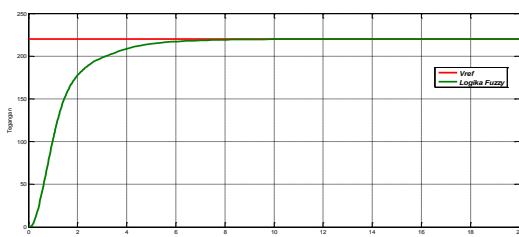
3. Rules Logika Fuzzy

Input dan *output* logika fuzzy ini memiliki 5 fungsi keanggotaan yang disimbolkan sebagai NB (*Negative Big*), NS (*Negative Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), PB (*Positive Big*). Sedangkan untuk jumlah aturan pada tabel dapat ditentukan dari hasil perkalian jumlah keanggotaan pada kedua input yang dimana masing-masing memiliki 5 keanggotaan sehingga didapatkan hasil $5 \times 5 = 25$ aturan, aturan tersebut dapat diamati pada Tabel 5.

Tabel V
Aturan fuzzy

<i>e/Δe</i>	NB	NS	Z	PS	PB
NBd	NB	NB	NB	NS	Z
NSd	NB	NB	NS	Z	PS
Zd	NB	NS	Z	PS	PB
PSd	NS	Z	PS	PB	PB
PBd	Z	PS	PB	PB	PB

4. Pengujian Kendali Logika Fuzzy



Gambar 4. Respon sistem AVR berbasis kendali logika fuzzy

Pada Gambar 4 diatas, terlihat hasil simulasi AVR yang telah dijalankan berbasis kendali logika fuzzy dengan tegangan referensi 220V. Dari simulasi ini, diperoleh nilai *respons transient* dan *error steady state* yang dicantumkan pada Tabel 6 berikut.

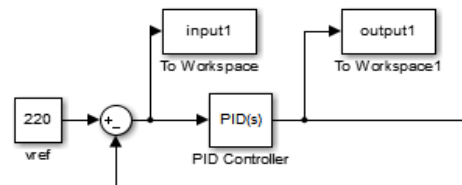
Tabel VI
Respon sistem AVR berbasis kendali logika Fuzzy

Respon Sistem	Logika fuzzy
<i>Delay Time</i>	1.058s
<i>Rise Time</i>	2.576s
<i>Peak Time</i>	20s
<i>Settling Time</i>	5.354s
<i>Max Overshoot</i>	0%
<i>Steady State Error</i>	0%
<i>Steady State</i>	220v

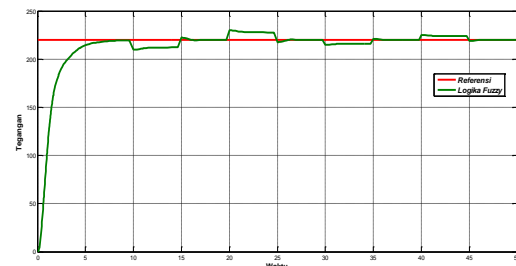
B. Jaringan Saraf Tiruan

1. Pengambilan Data *Input* dan *Output*

Dalam merancang kendali JST, diperlukan data *input* dan target untuk melakukan pelatihan jaringan saraf tiruan. Data tersebut diperoleh dari *input* dan *output* kontrol PID dengan menggunakan *blok to workspace*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Pengambilan data PID to Workspace



Gambar 6. Respon sistem AVR berbasis kendali JST

Pada Gambar 6 diatas, terlihat hasil simulasi AVR yang telah dijalankan berbasis kendali jaringan saraf tiruan dengan tegangan referensi 220 Volt. Dari simulasi ini, diperoleh nilai *respons transient* dan *error steady state* yang tercantum pada Tabel 7 berikut.

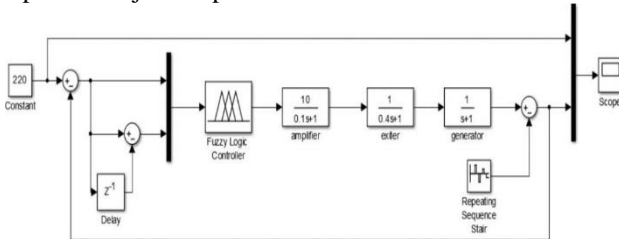
Tabel VII
Respon sistem AVR berbasis kendali JST

Respon Sistem	JST
<i>Delay Time</i>	1.031s
<i>Rise Time</i>	1.518s
<i>Peak Time</i>	3.128s
<i>Settling Time</i>	2.328s
<i>Max Overshoot</i>	1.345%
<i>Steady State Error</i>	0.045 %
<i>Steady State</i>	219.9V

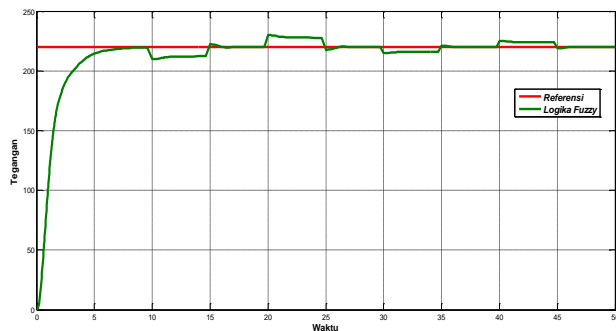
C. Pengujian Kendali Logika Fuzzy dan Jaringan Saraf Tiruan Berbeban

1. Logika Fuzzy

Pengujian ini dilakukan pada tegangan referensi 220V dengan beban sebesar 10, -10, 5 dan -5 yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik respon sistem yang dihasilkan. Beban yang diberikan berupa step yang diberikan pada $t = 10s$ untuk beban 10, $t = 20s$ untuk beban -10, $t = 30s$ untuk beban 5, dan $t = 40s$ untuk beban -5 seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Sistem AVR berbasis logika fuzzy berbeban



Gambar 8. Respon Sistem AVR Berbasis Kendali Logika Fuzzy Berbeban

Dari hasil pengujian beban yang telah dilakukan pada Gambar 8 dengan kendali logika fuzzy menggunakan tegangan referensi 220 Volt, diperoleh nilai *error steady state* yang tercatat pada Tabel 8.

Tabel VIII
Respon Sistem AVR Berbasis Kendali Logika Fuzzy Berbeban

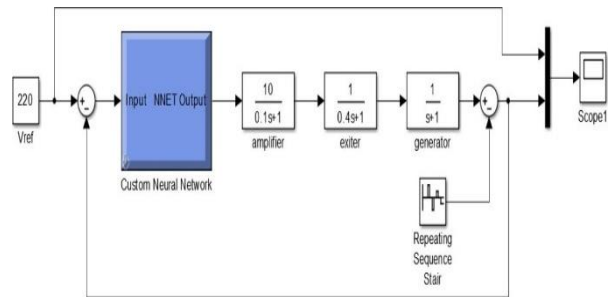
Time	Beban	Steady State	Error Steady State
10s	10	212.4	3.578%
20s	-10	227.6	3.339%
30s	5	216.2	1.757%
40s	-5	223.8	1.697%

Beban yang diberikan berupa *step repeating squence stair*. Dapat di perhatikan pada Gambar 8 pengujian pada $t = 10$ untuk beban 10 terjadi penurunan tegangan dari 220 volt menjadi 212.4 volt lalu pada $t = 15$ terjadi pelepasan beban sehingga terdapat sedikit *overshoot* pada responnya untuk kembali ke tegangan referensi. Dapat di perhatikan juga adanya usaha perbaikan respon tegangan pada saat berbeban, namun nilai perbaikan yang terjadi cukup kecil sehingga tidak dapat kembali ke tegangan referensi.

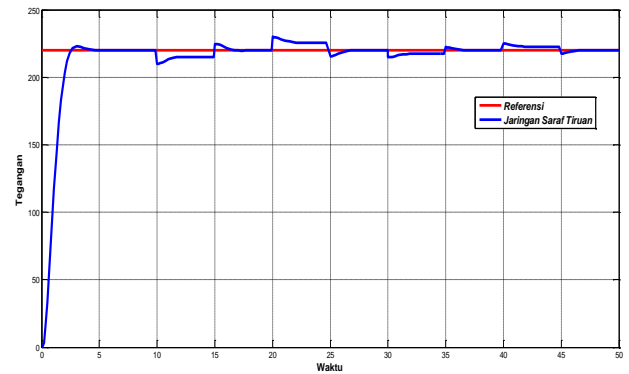
2. Jaringan Saraf Tiruan

Proses yang serupa juga dijalankan dalam pengujian berbeban ini, dengan pengaturan tegangan referensi sebesar 220V dan pemberian beban sebesar 10, -10, 5, dan -5. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengidentifikasi

karakteristik respon sistem yang dihasilkan. Pemberian beban dilakukan dalam bentuk step pada $t = 10s$ untuk beban 10, $t = 20s$ untuk beban -10, $t = 30s$ untuk beban 5, dan $t = 40s$ untuk beban -5, sebagaimana terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Sistem AVR berbasis JST berbeban



Gambar 10. Respon Sistem AVR Berbasis Kendali JST Berbeban

Dari hasil pengujian beban yang telah dilakukan pada Gambar 10 dengan kendali logika fuzzy menggunakan tegangan referensi 220 Volt, diperoleh nilai *error steady state* yang tercatat pada Tabel 9.

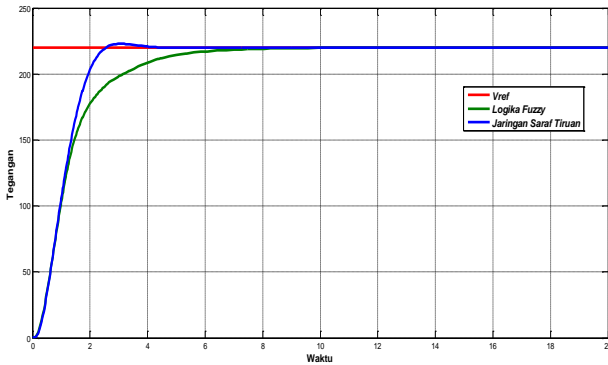
Tabel IX
Respon Sistem AVR Berbasis Kendali JST Berbeban

Time	Beban	Steady State	Error Steady State
10s	10	214.8	2.420%
20s	-10	225.6	2.482%
30s	5	217.3	1.242%
40s	-5	222.6	1.168%

Hal yang sama juga dilakukan dalam pengujian berbeban ini yaitu berupa *step repeating squence stair*. Dapat di perhatikan pada Gambar 10. hasil pengujian pada $t = 10s$ untuk beban 10 terjadi penurunan tegangan dari 220 Volt menjadi 214.8 Volt lalu pada $t = 15s$ terjadi pelepasan beban sehingga terdapat *overshoot* yang sedikit lebih besar daripada kendali logika fuzzy. Dapat di perhatikan juga adanya usaha perbaikan respon tegangan yang sedikit lebih baik daripada kendali logika fuzzy pada saat berbeban.

D. Perbandingan Respon Logika Fuzzy dan Jaringan Saraf Tiruan

Perbandingan ini dilakukan pada tegangan referensi 220V dengan membandingkan karakteristik respon sistem AVR yang berbasis kendali logika fuzzy dan jaringan saraf tiruan. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Perbandingan Sistem AVR Berbasis Kendali Logika Fuzzy Dan JST pada saat berbeban

Tabel X
Perbandingan Respon AVR Berbasis Kendali Logika Fuzzy Dan JST

Respon Sistem	Logika Fuzzy	Jaringan Saraf Tiruan
Delay Time	1.058s	1.031s
Rise Time	2.576s	1.518s
Peak Time	20s	3.128s
Settling Time	5.354s	2.328s
Max Overshoot	0%	1.345%
Steady State Error	0%	0.045 %
Steady State	220V	219.9v

Respon yang dihasilkan pada kedua kendali memiliki selisih *steady state* yang kecil. Logika fuzzy memiliki nilai *steady state* sebesar 220 Volt, berbeda dengan jaringan saraf tiruan yang menghasilkan nilai *steady state* sebesar 219.9 volt. Dapat dilihat juga pada Tabel 10 bahwa pada respon *transient* dari kedua kendali juga terdapat selisih yang dimana logika fuzzy memiliki respon yang cukup lambat dengan *max overshoot* sebesar 0%, berbeda dengan kendali jaringan saraf tiruan memiliki respon yang lebih cepat namun memiliki *max overshoot* yang lebih tinggi sebesar 1.345%.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa pada sistem AVR menggunakan kendali logika fuzzy dan jaringan saraf tiruan didapat bahwa respon *transient* dan respon *steady state* yaitu, Logika fuzzy dengan respon *delay Time* (td) 1.058s, *rise Time* (tr) 2.576s, *peak Time* (tp) 20s, *settling Time* (ts) 5.354s, *maximum overshoot* (Mp) 0%, *error steady state* (ess) 0%. Jaringan saraf tiruan dengan respon *delay Time* (td) 1.031s, *rise Time* (tr) 1.518s, *peak Time* (tp) 3.128s, *settling Time* (ts) 2.3286s, *maximum overshoot* (Mp) 1.345%, *error steady state* (ess) 0.045%. Dari hasil respon yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa dalam hal ini respon kendali logika fuzzy lebih lambat tanpa memiliki *overshoot*, dibandingkan dengan respon jaringan saraf tiruan yang lebih cepat tetapi memiliki *overshoot*, sedangkan dalam memperbaiki tegangan terminal generator JST lebih baik dibandingkan logika fuzzy.

REFERENSI

- [1] A. M. Prasetya, L. Sartika, dan A. Ma'ruf, "Penggunaan PID pada *Automatic Voltage Regulator* (AVR) Untuk Kestabilan Tegangan Terminal Generator Sinkron 3 Fasa", *Jurnal Elektronika Borneo* (JEB), Vol. 9 No. 2, pp. 55-59, 2023.
- [2] A. Emirwati, L. Sartika, dan A. M. Prasetya, Analisis Keandalan Sistem Trafo *Step Down* Menggunakan Metode Logika Fuzzy", *Jurnal Eltek*, Vol. 21, No. 2, pp. 68-75, 2023.
- [3] A. Rahmah, "Pelepasan Beban Akibat Gangguan Beban Lebih Pada PT. Dian Swastatika Sentosa Power Plant dengan Metode Jaringan Saraf Tiruan", Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, 2022.
- [4] A. Nurdin, A. Azis, dan R. Rozal, "Peranan *Automatic Voltage Regulator* Sebagai Pengendali Tegangan Generator Sinkron", *Jurnal Ampere*, Vol. 3, No. 1, pp. 163-173, 2018.
- [5] S. Amalia, E. Saputra, dan E. Syukriansyah, "Pemodelan Sistem Pengontrolan Suhu Ruang Berbasis Logika Fuzzy Mamdani", *Jurnal Teknik Elektro Institut Teknologi Padang*, Vol. 10, No. 1, pp. 30-36, 2021.
- [6] Saadat, H. "Power System Analysis. Boston: McGraw-Hill", 1999.