

Optimasi AVR Pada Generator Sinkron Menggunakan Metode Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)

Abdul Muis Prasetya¹, Linda Sartika², Abdul Saad³

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik,
Universitas Borneo Tarakan, Indonesia

ABSTRAK

Generator sinkron merupakan mesin-mesin listrik yang berfungsi untuk mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Generator sinkron mempunyai permasalahan yaitu ketidakstabilan tegangan pada saat perubahan beban, sehingga dibutuhkan peralatan yang dapat mengendalikan kestabilan tegangan generator sinkron yaitu Automatic Voltage Regulator (AVR). AVR merupakan sebuah divais pengatur tegangan yang digunakan pada generator sinkron untuk menstabilkan tegangan keluaran yang dihasilkan dari generator sinkron. AVR bekerja dengan mengatur arus penguatan (excitacy) pada eksiter, apabila beban bertambah maka AVR akan memerintahkan eksiter untuk berkerja dengan menambah arus eksitasi sebaliknya apabila beban berkurang maka AVR akan memerintahkan eksiter untuk mengurangi arus eksitasi. Pada tugas akhir ini, untuk pengoptimalan tegangan generator sinkron agar konstan maka digunakan metode Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS). Adapun Training data yang di gunakan, diperoleh oleh Fuzzy Logic Control (FLC) pada penelitian sebelumnya mendesain sebagai acuan dalam pelatihan FIS menggunakan algoritma ANFIS. Kendali ANFIS bekerja dengan baik berdasarkan respon transien tegangan generator yang mengalami perubahan beban. Adapun hasil respon yang lebih baik dengan steady state 220,067 volt, relative optimal, settling time 6,65 s, overshoot 0,35% di bandingkan dengan kendali FLC pada penelitian sebelumnya diperoleh respon dengan steady state 220,2 volt, settling time 7,75 s, dan overshoot 0,33%. Hasil yang diperoleh membuktikan bahwa kendali ANFIS sangat sesuai di gunakan dalam pengoptimalan tegangan generator sinkron tiga fasa.

Kata Kunci: Automatic Regulator Voltage (AVR), Generator sinkron tiga fasa, Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS).

ABSTRACT

Synchronous generators are electrical machines that function to convert mechanical energy into electrical energy. Synchronous generators have problems, namely voltage instability when the load changes, so that equipment is needed that can control the stability of the synchronous generator voltage, namely the Automatic Voltage Regulator (AVR). AVR is a voltage regulator device used in

synchronous generators to stabilize the output voltage generated from synchronous generators. The AVR works by adjusting the excitation current in the exciter, if the load increases, the AVR will instruct the exciter to work by increasing the excitation current, otherwise if the load decreases, the AVR will instruct the exciter to reduce the excitation current. In this final project, to optimize the synchronous generator voltage so that it is constant, the Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) method is used. The training data used was obtained by Fuzzy Logic Control (FLC) in a previous study designed as a reference in FIS training using the ANFIS algorithm. The ANFIS control works well based on the transient response of the generator voltage when the load changes. The results of a better response with a steady state of 220.067 volts, relatively optimal, a settling time of 6.65 s, an overshoot of 0.35% compared to the FLC control in previous studies, a response was obtained with a steady state of 220.2 volts, a settling time of 7.75 s, and an overshoot of 0.33%. The results obtained prove that the ANFIS control is very suitable for use in optimizing the voltage of a three-phase synchronous generator.

Keywords: *Automatic Voltage Regulator (AVR), Three-phase synchronous generator, Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS).*

1. PENDAHULUAN

Pembangkit energi listrik terdiri berdasarkan alat-alat primer salah satunya merupakan generator sinkron. Generator memiliki peranan yang begitu penting pada pembangkit tenaga listrik yang berukuran besar. Sebagian besar tenaga listrik yang digunakan oleh konsumen buat kebutuhan sehari-hari didapatkan oleh generator fasa banyak (*poly phase*) yang terdapat pada pusat pembangkit. Secara generik prinsip kerja generator sinkron adalah, jika berputarnya rotor yang diputar oleh penggerak mula (*prime mover*) dan stator yang dieksitasi dalam kecepatan sama.

Namun pada generator sinkron terdapat permasalahan yaitu pada tegangan yang kurang stabil dalam generator sinkron akan menjadi sehingga penyebab ketidakstabilan sistem secara keseluruhan Nurdin dkk., (2018). utamanya pada kualitas sistem dan kualitas kemampuan pengiriman daya yang berdasarkan dari pembangkit ke konsumen, dan keadaan terparah bila terjadinya mekanisme terlepasnya beban sehingga dengan demikian maka akan diperlukan alat-alat yang bisa untuk mengendalikan kestabilan tegangan generator sinkron yaitu *Automatic Voltage Regulator (AVR)*.

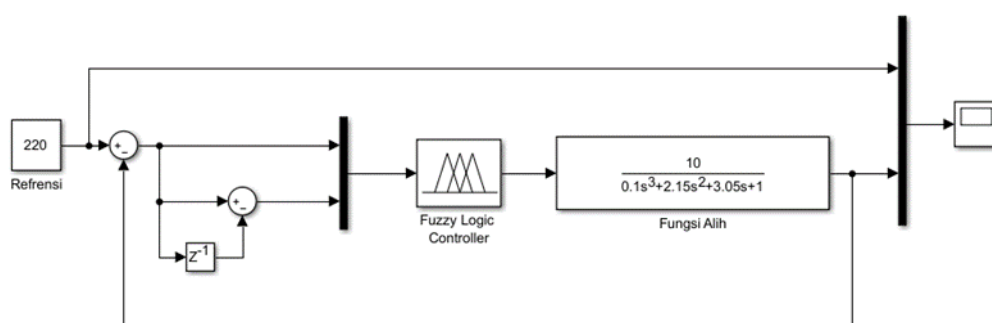
Untuk mendapatkan kestabilan sistem yang lebih praktis dapat ditentukan dengan kestabilan sistem regulasi tegangan pada sistem eksitasi generator sinkron dan beberapa rangkaian pengontrol lain, saling terintegrasi dalam suatu sistem yang disebut AVR Endriyanto dkk, (2018). AVR ini memiliki fungsi menjaga profil tegangan terminal dalam

suatu titik operasi tertentu seperti 180 volt, 220 volt, dll. Fungsi AVR yang lain berkaitan pada aksi kendali regulasi daya reaktif dan pengaturan osilasi rotor jika terjadi gangguan.

Pengontrolan menggunakan metode ANFIS sebetulnya memiliki banyak sekali keuntungan dan keunggulan dalam penerapannya, kontroler tersebut dapat beradaptasi jika terjadi keadaan perubahan tegangan masukan secara mendadak karena pada dasarnya controller tersebut dilengkapi dalam metode proses pembelajaran Pramudijanto dkk., (2001), pada metode pembelajaran tersebut terdapat parameter *fuzzy* yang di gunakan dalam metode *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*.

2. METODE PENELITIAN

Meningkatkan tegangan atau menggunakan kapasitor seri pada saluran transmisi listrik adalah salah satu strategi untuk meningkatkan stabilitas jaringan dan mencapai tingkat tegangan nominal; namun, keuntungan biaya mengendalikan generator dengan AVR menarik perhatian. Kopling elektromekanis antara rotor dan sistem lainnya menyebabkannya berperilaku dengan cara yang analog dengan sistem peredam massa pegas. Hal ini menyebabkan sistem menunjukkan perilaku osilasi di sekitar keadaan kesetimbangan sebagai respons terhadap gangguan, seperti perubahan beban yang tiba-tiba, perubahan parameter saluran transmisi, fluktuasi keluaran turbin, dan hal-hal lain (Verma et al 2015)[4]. Salah satu langkah terpenting dalam meningkatkan stabilitas sistem dan memastikan kualitas kelistrikan dari daya yang disediakannya adalah kontrol eksitasi generator yang disinkronkan.

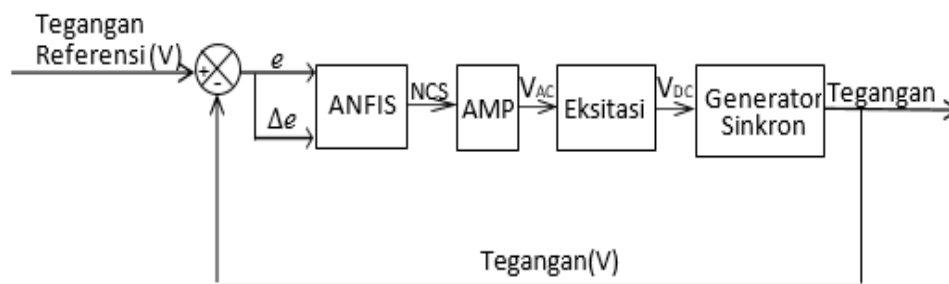


Gambar 1. Skematik Sistem AVR Dalam Pengoptimalan Tegangan Generator Sinkron Tiga Fasa

A. Perancangan blok diagram simulasi

Pada system pemodelan penelitian ini memiliki beberapa bagian utama yaitu blok controller ANFIS, blok *amplifier*, blok eksitasi, dan blok generator sinkron tiga fasa,

secara umum di tunjukan pada gambar 6 pada system AVR dalam pengoptimalan tegangan generator tiga fasa dengan kontrol ANFIS inputannya merupakan tegangan refrensi (V_{ref}) yang diinginkan. Output tegangan aktual dari generator sinkron yang di bandingkan dengan tegangan refrensi untuk menghasilkan *error* dan *delta error*. *Error* dan *delta error* merupakan inputan dari kontroller ANFIS. Output dari kontroller adalah sinyal kontrol yang terhubung dengan *amplifier* untuk direpresentasikan dalam sebuah system orde satu sebagai factor penguat dan konstanta waktu. Apabila telah melewati amplifier maka eksitasi akan mengubah tegangan listrik bolak-balik (AC) yang di hasilkan pada generator melalui trafo ekasitasi menjadi listrik arus searah (DC) untuk disalurkan ke rotor generator, sehingga terjadinya putaran pada rotor yang digerakkan oleh pengarak mula (*primer mover*). Terjadinya energi listrik karna adanya proses induksi elektromagnetik yang terjadinya timbul gaya gerak listrik pada kumparan stator. Sedangkan pada *feedback* genarator menggunakan transformator potensial yang berfungsi sebagai menyamakan tegangan terminal.

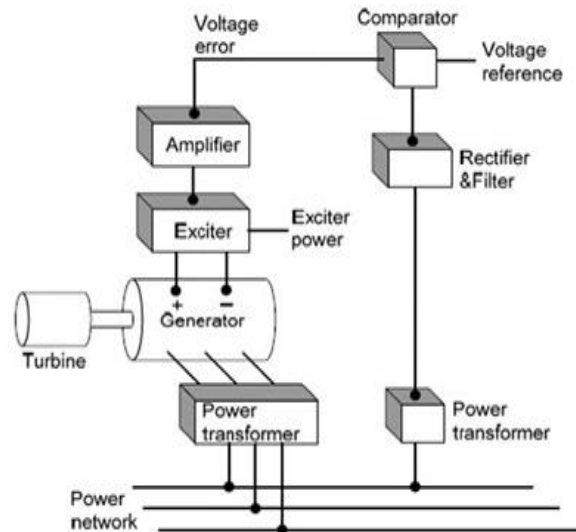


Gambar 2. Blok Diagram Simulasi

B. *Automatic Voltage Regulator* (AVR)

Menurut Gunadin (2008)[5], AVR adalah alat yang dipasang pada generator dan dapat mengatur tegangan generator secara otomatis untuk menjaga kestabilan. Gambar 3 menggambarkan model AVR yang biasanya ditemukan di generator. Berikut adalah cara kerja AVR:

1. Pada saat generator terhubung ke tumpukan, arus akan mengalir ke belitan stator, yang besarnya sesuai dengan beban yang terkait. Belitan stator menghasilkan garis gaya magnet yang berorientasi berlawanan arah dengan garis gaya magnet belitan rotor.



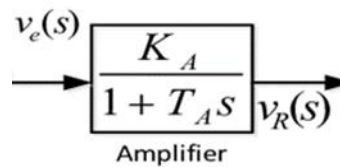
Gambar 3. *Automatic Voltage Regulator*

2. Tegangan belitan stator berkurang sebagai akibat dari gaya magnet lawan yang mengurangi gaya magnet rotor.
3. AVR akan mendeteksi penurunan tegangan dan membandingkannya dengan tegangan referensi. AVR akan menaikkan tegangan exciter untuk memberikan arus tambahan jika rasio tegangan terminal lebih rendah dari tegangan referensi.
4. Tegangan yang dihasilkan oleh exciter rotor dipengaruhi oleh kenaikan arus pada exciter stator. Medan magnet yang dihasilkan juga meningkat ketika arus suplai ke rotor generator utama meningkat sebagai respons terhadap peningkatan arus rotor exciter.
5. Tegangan yang dihasilkan akan terus besar karena hambatan garis gaya magnet terhadap arus pada belitan stator setara dengan penambahan garis gaya magnet.

Pada bagian ini, komponen sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) dibahas. Bagian ini antara lain membahas model amplifier, model eksitasi, dan model generator (Saadat, 1999)[6].

2.2.1 Model *Amplifier*

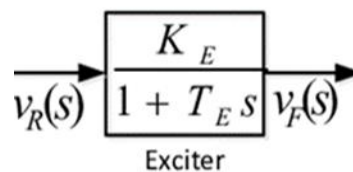
Dalam sistem eksitasi, amplifier dapat bersifat magnetis, berputar, atau elektronik. Model penguat diwakili oleh sistem orde pertama dengan faktor amplifikasi dan konstanta waktu. Berikut ilustrasi fungsi alih amplifier pada Gambar 4:

**Gambar 4.** Model *Amplifier*

di mana K_A adalah konstanta penguatan penguat dan τ_A adalah konstanta waktu penguat. Nilai konstanta waktu penguat berkisar antara 0,02 detik hingga 0,10 detik, sedangkan nilai konstanta waktu penguatan berkisar antara 10 hingga 40.

2.2.2 Model Eksitasi

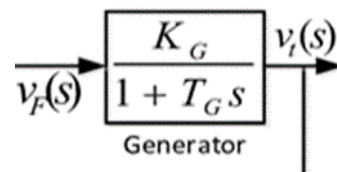
Sistem eksitasi adalah sistem suplai listrik arus searah yang berfungsi sebagai penguat generator listrik atau generator medan magnet. Hal ini memungkinkan generator menghasilkan energi listrik dengan tegangan keluaran generator yang besar berdasarkan besarnya arus eksitasi. Dengan bentuk fungsi alih sistem pembangkit yang dinyatakan dengan persamaan pada Gambar 5, suatu pembangkit dapat dimodelkan menggunakan sistem orde pertama:

**Gambar 5.** Model Eksitasi

dimana konstanta waktu exciter adalah τ_E dan konstanta gain adalah K_E . Nilai konstanta penguat exciter berkisar antara 1,0 hingga 10,0, dan nilai konstanta waktu exciter berkisar antara 0,40 hingga 1,00.

2.2.3 Model Generator

Salah satu model generator sinkron tipe fungsi transfer pada aplikasi MATLAB toolbox digunakan untuk generator sinkron pada penelitian ini. Tegangan terminal dipengaruhi oleh beban generator, dan gaya gerak listrik (GGL) yang dihasilkan oleh generator sinkron adalah fungsi kurva untuk mengatasi kurva magnetisasi mesin. Gain K_G dan konstanta waktu τ_G dari fungsi transfer dalam model linier, yang menghubungkan tegangan terminal generator dengan tegangan medan, dan fungsi transfernya adalah,



Gambar 6. Model Generator Sinkron

Nilai parameter yang relevan dengan simulasi dan konfigurasi generator sinkron dapat dimasukkan ke dalam model generator sinkron menggunakan blok. K_G dapat berfluktuasi antara 0,7 dan 1,0 hingga 2,0 detik antara beban penuh dan tidak ada beban pada nilai konstan saat ini.

C. Model Sistem AVR Dan Parameter Fungsi Transfer

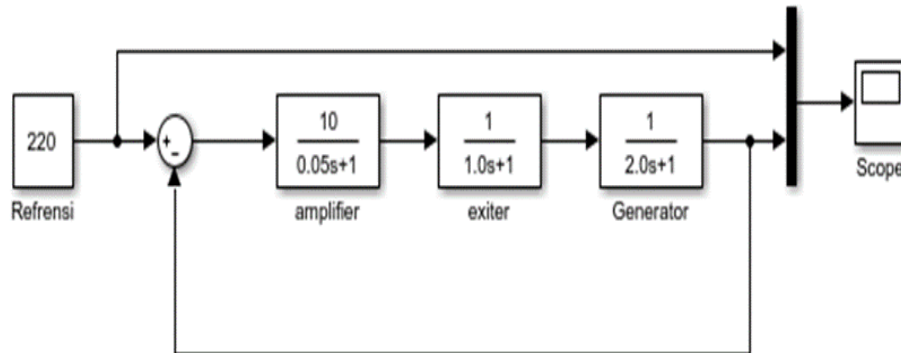
Pada titik ini, model dan parameter generator sinkron tiga fasa ditetapkan. Generator sinkron yang digunakan dalam penelitian ini memanfaatkan salah satu sistem pemodelan sistem tenaga *Automatic Voltage Regulator* (AVR). Parameter generator sinkron tiga fase aplikasi tercantum dalam tabel di bawah ini. Generator diasumsikan memiliki parameter berikut:

Tabel 1. Parameter model AVR dengan fungsi Transfer dan batas parameter.

Component	Transfer Function	Parameter Range
<i>Amplifier</i>	$TF = \frac{K_A}{1 + \tau_a(s)}$	$10 \leq K_A \leq 40;$ $0.05 \leq \tau_a \leq 0.1$
Eksiter	$TF = \frac{K_E}{1 + \tau_e(s)}$	$1 \leq K_E \leq 10;$ $0.4 \leq \tau_e \leq 1.0;$
Generator Sinkron	$TF = \frac{K_g}{1 + \tau_g(s)}$	$0.7 \leq K_g \leq 1.0;$ $1.0 \leq \tau_g \leq 2.0;$

Sistem AVR memberikan respon menggunakan matlab/simulink sebagai respon terhadap parameter tersebut. Sistem AVR harus mampu menahan tegangan terminal generator sinkron pada level tertentu. Akibatnya, keamanan sistem tenaga listrik akan sangat dipengaruhi oleh stabilitas sistem AVR. Ada tiga komponen utama pada sistem AVR: *Amplifier*, exciter, dan generator. seperti digambarkan pada Gambar 7. Kelebihan

amplifier, exciter, dan generator adalah K_A, K_E dan K_G . Pada Gambar 7, konstanta waktu inersia generator, exciter, dan amplifier ditunjukkan sebagai τ_A, τ_E , dan τ_G . Respon langkah unit sistem yang tidak terkontrol ini memiliki sejumlah osilasi yang membuatnya lebih sulit untuk diatur.



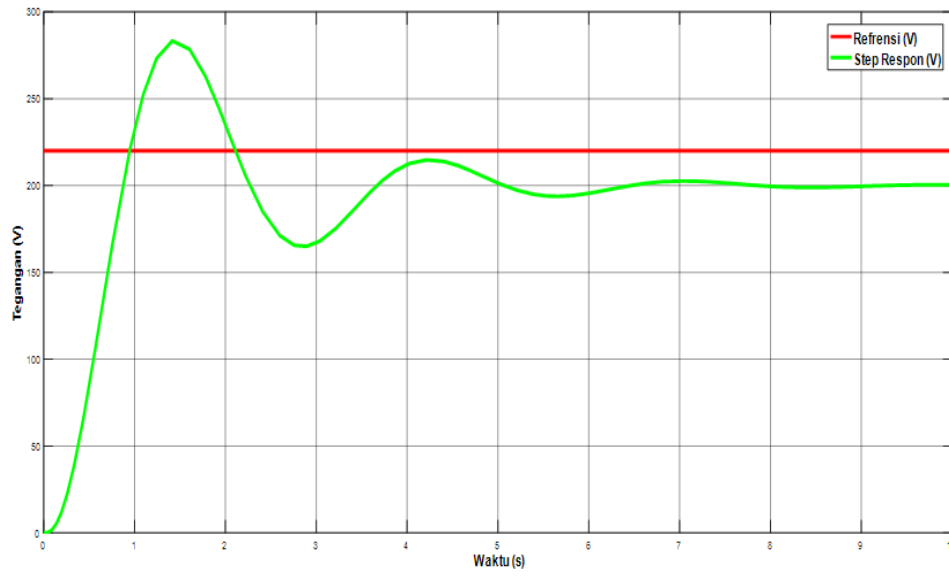
Gambar 7. Diagram blok sistem AVR

Fungsi utama AVR adalah menahan tegangan terminal generator sinkron tahap tertentu, V_s . Sistem AVR lugas terdiri dari tiga komponen dan parameter, seperti digambarkan dalam diagram blok sistem AVR pada Gambar 6. Dengan mengubah nilai parameter yang dipilih, fungsi transfer sistem loop tertutup dapat ditentukan menjadi. $K_A = 10, \tau_A = 0.05, K_E = 1, \tau_E = 1.0, K_G = 1, \tau_G = 2.0$. Fungsi alih loop tertutup untuk menyamakan tegangan terminal genertor dengan tegangan refrensi:

$$T(s) = \frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} \quad (1)$$

$$TF(s) = \frac{10}{0.1s^3 + 2.15s^2 + 3.05s + 1} \quad (2)$$

Respon loop tertutup dari sistem AVR di bawah teredam seperti yang ditunjukkan pada gambar 8.

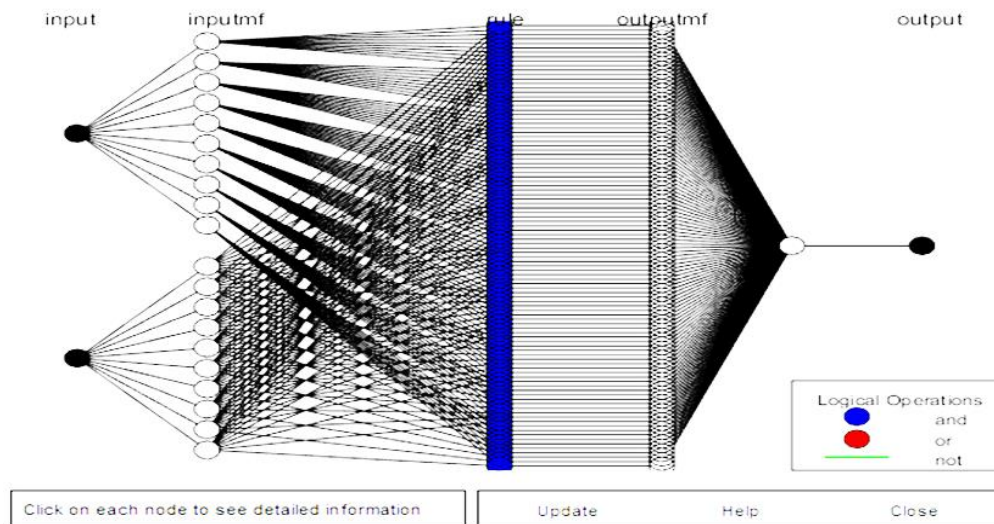


Gambar 8 Respon loop tertutup dari sistem AVR

Berdasarkan hasil simulasi, pada respon step tanpa menggunakan pengontrol, dengan menggunakan tegangan refrensi 220 volt, menghasilkan respon tegangan pada kondisi steady state adalah 200 volt. Kemudian memiliki *Delay time* 0.5799s, *Rise time* 0.9457s, *Peak time* 1.415s, *Settling time* 6.03s, *Overshoot* sebesar 283.3% dan memiliki *Error steady state* 10%. Tanpa pengontrol, kinerja sistem AVR stabil tetapi berfluktuasi. Akibatnya, menambahkan pengontrol *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) urutan bilangan bulat ke sistem seperti itu akan bermanfaat.

D. Kontrol ANFIS

Arsitektur jaringan tipe Sugeno dengan lima lapisan digunakan dalam penelitian ini untuk merancang ANFIS sebagai pengontrol. Fungsi keanggotaan tipe Gaussian digunakan, ada 10 fungsi keanggotaan input untuk setiap subsistem, 10 fungsi keanggotaan output, dan 100 aturan dihasilkan. Arsitektur jaringan ANFIS ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Arsitektur Jaringan ANFIS

Ada dua masukan untuk setiap FIS yang dibentuk sebelumnya: kesalahan dan kesalahan delta. Label linguistik kecil (S) dan besar (B) mewakili dua fungsi keanggotaan kesalahan masukan (A) dan kesalahan delta (B) untuk himpunan fuzzy. kemudian menghasilkan fungsi linear z (Triwiyanto al et.2015)[7]. sebagai keluarannya. Berikut adalah deskripsi dari model FIS Tagaki Sugeno:

$$\text{Rule 1: if } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1 \text{ then } z = f_1 = a_0^1 + a_1^1 x a_2^1 y \quad (3)$$

$$\text{Rule 2: if } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_2 \text{ then } z = f_2 = a_0^2 + a_1^2 x a_2^2 y \quad (4)$$

$$\text{Rule 2: if } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_1 \text{ then } z = f_3 = a_0^3 + a_1^3 x a_2^3 y \quad (5)$$

$$\text{Rule 4: if } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2 \text{ then } z = f_4 = a_0^4 + a_1^4 x a_2^4 y \quad (6)$$

- Layer 1

Pada layer 1, setiap node i melayani peran berikut sebagai node adaptif:

$$O_{1,i} = A_i(x) \text{ untuk } i = 1, 2 \text{ dan} \quad (7)$$

$$O_{1,i} = B_{i-2}(y) \text{ untuk } i = 3, 4 \quad (8)$$

Dengan

x (atau y): masukan i

$A_i(x)$ atau $B_{i-2}(y)$: label linguistik (seperti 'besar' atau 'kecil') Yang terkait dengan node tersebut.

$O_{1,i}$ derajat keanggotaan himpunan fuzzy A_1, A_2 , atau B_1, B_2 .

- Layer 2

Output dari setiap node pada lapisan ini adalah jumlah dari semua sinyal yang masuk, dan itu adalah node wajah berlabel.

$$O_{2,i} = w_i = A_i^{(X)} B_i^{(Y)}, i = 1, \quad (9)$$

Kekuatan pemacu aturan diwakili oleh setiap node yang dihasilkan oleh lapisan ini.

- Layer 3

Node I menghitung rasio kekuatan tembak aturan i dengan jumlah semua kekuatan tembak aturan di lapisan ini, yang merupakan simpul tetap dengan nomor N.

$$O_{4,1} = \widehat{W}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \text{ untuk } i = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

Lapisan ini menghasilkan kekuatan tembak yang dinormalisasi sebagai outputnya.

- Layer 4

Semua simpul lapisan ini memiliki fungsi simpul adaptif:

$$O_{4,i} = w_i f_i = w_i (P_i X + q_i Y + r_i) \quad (11)$$

Dengan

w_i : kekuatan pengapian lapisan 3 yang dinormalisasi

$\{P_i, q_i, r_i\}$: set parameter simpul ini. Parameter konsekuensi adalah nama yang diberikan untuk parameter di lapisan ini.

- Layer 5

Satu simpul tetap pada lapisan ini diberi tanda "€ widodo thomas sri (2005). Ini menghitung total output dari jumlah total sinyal yang masuk.

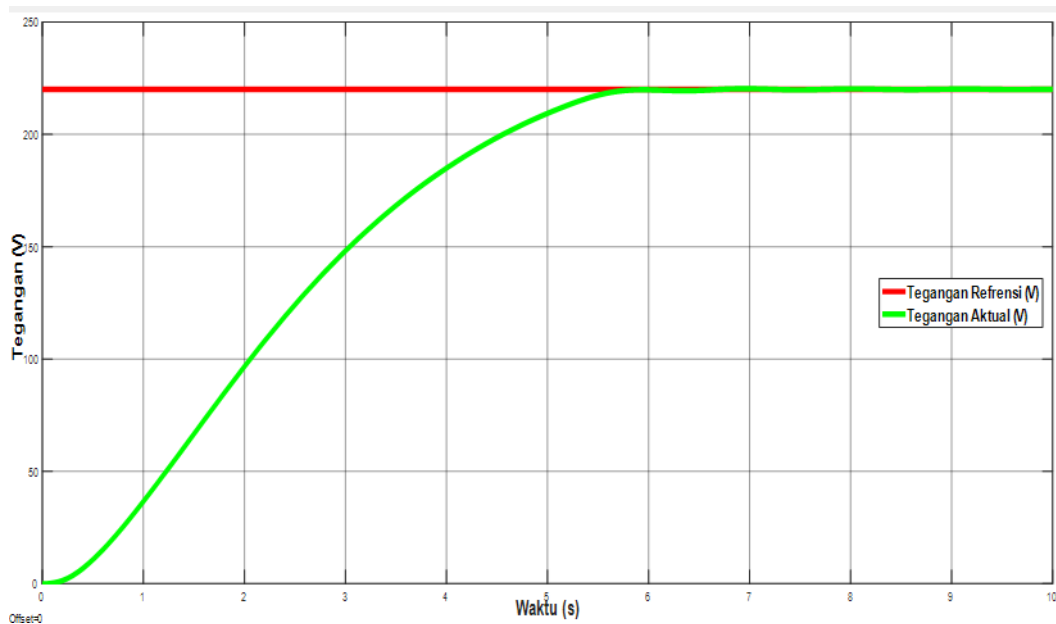
$$O_5 = \sum_1^i \widehat{w}_i f_i = \frac{\sum_1^i w_i f_i}{\sum_1^i w_i}, \text{ untuk } i=1, 2, 3, 4 \quad (12)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tegangan respon kontrol ANFIS dengan referensi tetap, respon sistem AVR tanpa kontroler referensi tetap, dan respon kontrol ANFIS dengan tegangan referensi berubah semuanya akan diuji dalam penelitian ini.

A. Uji Respon Tegangan dengan Tegangan Referensi Tetap

Menggunakan kontrol ANFIS, pengujian dilakukan dalam keadaan ini untuk mengamati respons tegangan dengan tegangan referensi tetap 220 volt. Gambar 10 menggambarkan hasil yang diperoleh sebagai berikut:

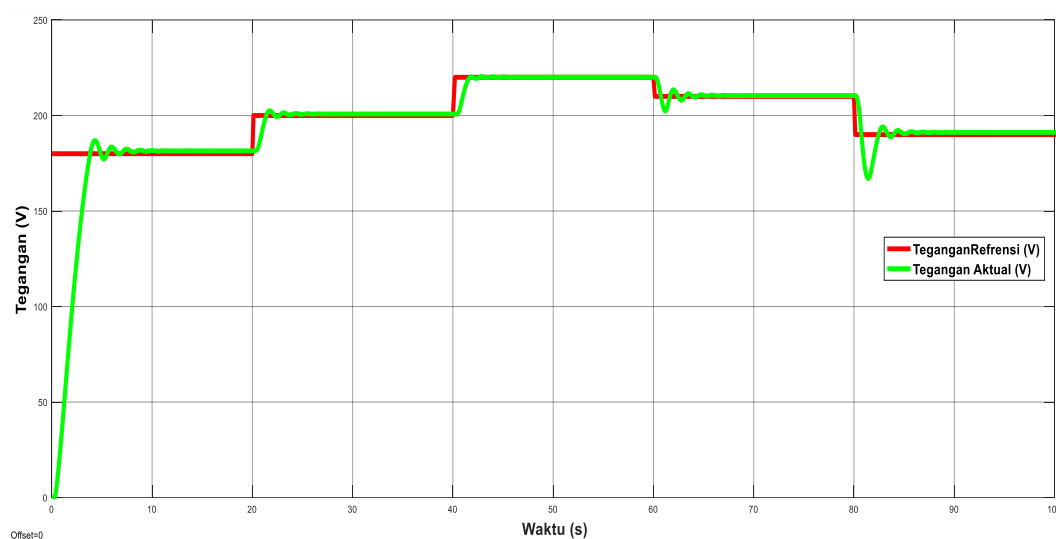


Gambar 10. Respon menggunakan *control* ANFIS pada tegangan refrensi tetap

Kendali ANFIS menunjukkan respon tegangan dengan nilai *steady state* 220,067 volt, seperti yang ditentukan oleh hasil simulasi. Kemudian memiliki *Delay time* 2,23 s, *Rise time* 6,684 s, *Peak time* 5,95 s, *Settling time* 6,65 s, *Overshoot* 0,35 % dan *Error steady state* sebesar 0,068%.

B. Uji Respon Tegangan dengan Tegangan Referensi Yang Berubah

Dalam situasi ini, tegangan referensi pada awalnya adalah 180 volt pada $t=0$ s, lalu berubah menjadi 200 volt, 220 volt, 210 volt, dan 190 volt pada $t=20$ s, $t=40$ s, $t=60$ s, $t=80$ s, dan $t=100$ s. Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 11 berikut ini.



Gambar 11. Respon *control* ANFIS dengan Tegangan Referensi Berubah

Ketika kecepatan referensi berubah, respon tegangan kontroler ANFIS memiliki rasio kesalahan kondisi tunak dari nilai tegangan referensi terhadap tegangan ANFIS yang sebenarnya, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 di bawah ini:

Tabel 2. Perbandingan Nilai E_{ss} Tegangan Referensi dan Tegangan Aktual ANFIS dengan Tegangan Referensi Berubah.

Tegangan Refrensi	Tegangan Aktual	<i>Error steady state</i>
180	181,48 volt	1,482%
190	191,13 volt	1,131%
200	200,78 volt	0,782%
210	210,42 volt	0,4215%
220	220,067 volt	0,068%

3. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari simulasi dan analisis Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) adalah dengan menggunakan kontroler ANFIS dapat mengoptimalkan tegangan generator sinkron tiga fasa diperoleh respon yang lebih baik dengan dengan steady state 220,067 volt, rise time 6,864 s, sedangkan setting time 6,65 s, overshoot 0,35%.

DAFTAR PUSTAKA

- Nurdin, A., Azis, A., & Rozal, R. A. (2018). Peranan Automatic Voltage Regulator Sebagai Pengendali Tegangan Generator Sinkron. *Jurnal Ampere*, 3(1), 163-176. eISSN: 2622-2981.
- Wilopo, Endriyanto Nursukmadi, Tedjo Sukmadi, and Trias Andromeda. (2011) Perencanaan Optimal Sistem Kontrol AVR (*Automatic Voltage Regulator*) Untuk Memperbaiki Kestabilan Tegangan Dengan Menggunakan Algoritma Genetik. Diss. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Undip.
- Pramudijanto Defit, S. (2013). Perkiraan Beban Listrik Jangka Pendek Dengan Metode Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. *Jurnal SAINTIKOM* Vol, 12 (3). ISSN: 1978-6603.
- Verma, S. K., Yadav, S., & Nagar, S. K. (2015, December). Controlling of an automatic voltage regulator using optimum integer and fractional order PID

controller. In 2015 IEEE Workshop on Computational Intelligence: Theories, Applications and Future Directions (WCI) (pp. 1-5). IEEE. [4]

- Gunadin, I. C. (2008). Analisis Penerapan PID Controller Pada AVR (Automatic Voltage Regulator). *Media Elektrik*, 155-161.
- Saadat, H. (1999). *Power System Analysis*. Boston: McGraw-Hill.
- K. N. Aryadi, A. Triwiyatno, and B. Setiyono, (2015) “Desain Sistem Kontrol Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (Anfis) Pada Model
- Mustang, A., & Prasetia, A. M. (2022). Implementasi Automatic Voltage Regulator Pada Generator Sinkron 3 Fasa Dengan Mengatur Arus Eksitasi. *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri*, 6(2), 46-55.