

Direct Torque Control Berbasis Adaptive Neuro Fuzzy Inference System Untuk Pengendali Kecepatan Motor Induksi

Tommy Nana Pradana¹

¹PT. Amythas
Korespondensi: tommynana@gmail.com

Received: Juli 2023; Accepted: September 2023; Published: November 2023

DOI: <https://doi.org/10.30649/je.v5i2.126>

Abstrak

Motor induksi merupakan motor yang banyak digunakan pada dunia industri, disamping harga yang relatif murah, perawatan yang mudah. motor ini memiliki kemampuan yang baik pada kecepatan putar. Kelemahan motor ini adalah pada saat terjadinya perubahan torsi beban, kecepatan motor akan berubah. Dalam penulisan Skripsi ini dibahas tentang sistem pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode DTC (*Direct Torque Control*) yang dapat memberikan respon yang cepat pada saat terjadinya perubahan torsi beban sehingga motor tetap pada kedudukan *steady state* dan akan kembali kekedudukan *setpoint* dengan cepat. Untuk memperoleh performansi pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode DTC (*direct torque control*) memerlukan sistem kontrol yang baik, artinya sistem kontrol yang dapat mengikuti perubahan kecepatan (*setpoint*) dengan cepat. Maka dari itu pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan menggunakan metode DTC (*direct torque control*) dikembangkan dengan menggunakan kontrol kecerdasan Anfis (*Adaptive neuro Fuzzy Inference system*). Hasil simulasi dengan simulink menunjukkan bahwa dengan kontroler Anfis pengaturan kecepatan motor induksi tidak berbebani saat start terjadi overshoot 0.7%, rise time 1 detik dan setling time 1.1 detik untuk kecepatan referensi 1800 rpm, dan saat di beri beban 20Nm terjadi overshoot 0.27% pada kecepatan referensi 1500rpm. Dengan menggunakan *Direct Torque Control* (DTC) berbasis *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*(ANFIS) mampu untuk mengikuti kecepatan referensi yang dinamis dengan baik serta dapat menekan ripple sampai ke derajat yang sangat rendah.

Kata kunci: Motor Induksi, DTC (*Direct Torque Control*), ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*)

Abstract

*Induction motors are the motors are widely used in the industrial world, in addition to relatively low prices, easy maintenance. This motor has a good Traffic on rotational speed. The weakness of this motor is at that point in the load torque, the motor speed will change. In writing this thesis discussed the induction motor speed control system with the method of DTC (*Direct Torque Control*) that can provide rapid response in the event of changes in the load torque so the motor stays on steady footing steate and will return position at setpoint quickly. To*

obtain performance speed control of three phase induction motors with the method of DTC (direct torque control) requires a good control system, meaning that the control system that can follow changes in speed (setpoint) quickly. Thus the speed control of three-phase induction motor using DTC (direct torque control) was developed using intelligence control ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System). The results of the simulation with Simulink shows that the controller ANFIS control induction motor speed does not load at start overshoot 0.7%, rise time of 1 second and settling time 1.1 seconds for a speed reference 1800 rpm, and when given the burden of 20nm overshooting 12.27% on the speed reference 1500rpm. By using Direct Torque Control (DTC) based Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) were able to keep pace with the dynamic reference well and can suppress ripple down to a very low level.

Key words: *Induction Motor, DTC (Direct Torque Control), ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)*

I. PENDAHULUAN

Motor DC adalah motor yang paling ideal untuk dipakai dalam pengemudian elektrik, karena motor tersebut adalah motor yang linier dan pengaturan kecepatannya mudah. Kelemahan dari motor dc adalah harganya cukup mahal, ukurannya relative besar, dan adanya komutator dan sikat-sikat dalam motor, memerlukan suatu pemeliharaan yang rutin dan selama pemeliharaan operasi system terhenti. Sedangkan motor induksi harganya murah, kokoh dan bebas dari pemeliharaan. Kelemahan motor induksi adalah bahwa motor induksi adalah motor yang tidak linier, dan metoda untuk mengatur kecepatan adalah rumit, disamping itu diperlukan suatu konverter yang akan menimbulkan harmonisa.

Dengan perkembangan kemajuan teknologi dibidang Mikrokontroler, Microkomputer, Devices, Teori kontrol, dan *Artificial Intelligence* (AI) memberikan pengaruh dalam operasi dan kinerja dari pengemudian elektrik sehingga motor induksi dapat mengantikan fungsi motor DC di industry [4]. Motor induksi umumnya dioperasikan untuk kecepatan tetap. Berdasarkan survey bahwa bila motor

dioperasikan dengan kecepatan variabel, maka motor akan mengkonsumsi daya listrik yang kecil. Karena itu motor ini banyak dipakai dengan kecepatan variabel. Untuk mengatur kecepatan motor induksi pada kecepatan tetap dan kecepatan variabel diperlukan frekuensi atau torka. Konverter daya difungsikan untuk mengatur parameter - parameter motor induksi, sehingga dengan mengatur parameter motor induksi akan dapat mempengaruhi kecepatan putar motor. Pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan metoda *Direct Torque Control* berbasis *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*.

Ada banyak metode untuk pengaturan kecepatan motor induksi. Diantara kontrol tersebut adalah kontrol tegangan / frekuensi (v/f) kontrol ini paling sederhana, karena banyak digunakan di industri. Dan juga dikenal sebagai kontrol skalar yang menggunakan metode antara tegangan / frekuensi konstan. Kontrol ini digunakan tanpa umpan balik kecepatan. Menurut pendapat Casadei, 2006 kelemahan dari kontrol ini belum mencapai nilai yang akurat pada respon kecepatan, dimana kontrol fluks stator dan torka masih menggunakan kontrol tidak langsung. Vektor Kontrol, untuk jenis ini ada loops kontrol untuk mengontrol torka dan fluks.

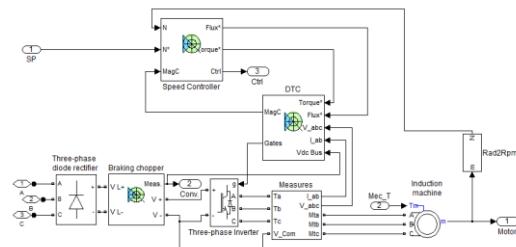
Yang umum digunakan adalah transformasi vektor.

Dalam skripsi ini dirumuskan suatu penyelesaian untuk mendapatkan estimasi kecepatan pada motor induksi tiga fasa dengan respon dinamis yang cepat. Dengan menggunakan Metode Direct Torque Control untuk mengontrol secara langsung fluks stator dan torsi. Hasil simulasi dengan simulink menunjukkan bahwa dengan kontroler Anfis pengaturan kecepatan motor induksi tidak berbebana saat start terjadi overshoot 0.7%, rise time 1 detik dan settling time 1.1 detik untuk kecepatan referensi 1800 rpm, dan saat di beri beban 20Nm terjadi overshoot 0.27% pada kecepatan referensi 1500Rpm. Dengan menggunakan *Direct Torque Control* (DTC) berbasis *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) mampu untuk mengikuti kecepatan referensi yang dinamis dengan baik serta dapat menekan ripple sampai ke derajat yang sangat rendah.

II. METODE PENELITIAN

1. Pemodelan Motor Induksi Tiga Fasa

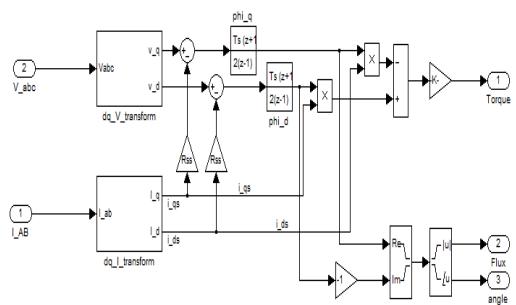
Model $d-q$ motor induksi merupakan dasar pengaturan kecepatan motor induksi dengan metode transformasi vektor. Sistem koordinat tiga fasa statis ditransformasikan ke koordinat dinamis $d-q$, koordinat ini berputar mengikuti kecepatan sinkron motor atau medan putar stator. Dengan transformasi ini didapatkan model-model motor induksi yang lebih sederhana, model tegangan dan arus pada persamaan ini merupakan variabel dengan referensi koordinat $d-q$, transformasi tegangan tiga fasa ke koordinat $d-q$ menggunakan transformasi part. Sedangkan bentuk pemodelan motor induksi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pemodelan ANFIS berbasis *Direct Torque Control* untuk kecepatan motor induksi

2. Perancangan *Direct Torque Control*

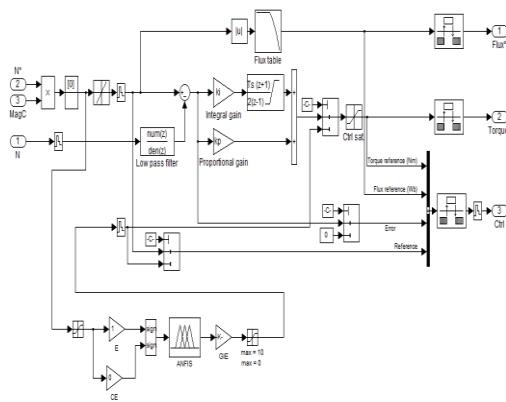
Pada metode DTC kontrol torsi motor induksi di dapat dari i^e_{sq} , sedangkan fluks rotor dikontrol melalui i^e_{sq} . Sedangkan untuk mendapatkan frekuensi dari vector fluks rotor, di dapat dengan menambahkan frekuensi dari vektor fluks rotor, didapat dengan menambahkan frekuensi slip (ω_s) kepada kecepatan shaft (ω_r). Kecepatan shaft didapat dari sensor kecepatan yang dipasang pada motor induksi. merupakan perhitungan aliran arus motor induksi untuk mendapatkan sinyal perintah arus medan dan arus torsi sebagai trigger pada inverter. Blok Field Control adalah blok dimana terjadi perhitungan i^*_{ds} , i^*_{qs} dan ρ . penghitung Arus torsi ini dapat dimodelkan seperti pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Model Penghitung Torsi

3. Perancangan Kontroler ANFIS

Pada penelitian ini, sinyal kontrol yang digunakan dalam blok rangkaian simulasi *Speed Controller* berupa ANFIS. Kontroler yang digunakan untuk mengontrol kecepatan (Rpm). Maka bisa dikatakan pengaturan kecepatan dalam skripsi ini ditentukan input serta *train data* untuk menentukan besarnya *set point* dan kontroler ANFIS yang mempunyai *set point* dan keluaran *feed-back* dengan satu keluaran sehingga akan menuju nol (*error steady state* minimal). Dengan demikian kontroler ANFIS dapat dimodelkan seperti Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Perancangan model *speed control* menggunakan ANFIS

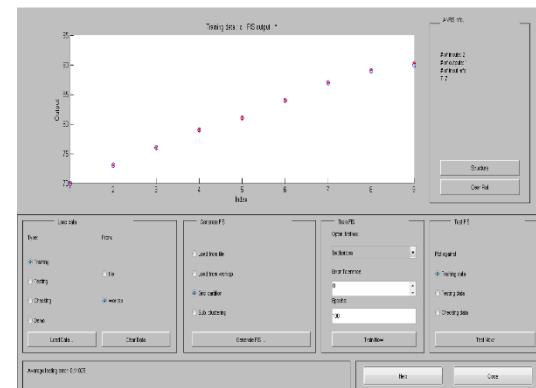
Setelah proses *fuzzification*, keluaran dari *fuzzification* akan di training dulu dengan menggunakan ANFIS editor dengan mengetikkan comand “anfisedit” pada comand prom matlab setelah itu hasil *fuzzification* yang telah di train tadi masuk ke proses *Inference Mechanisme* dengan mempertimbangkan *rule base* serta *membership function* yang secara otomatis terbuat setelah melakukan train data. Setelah itu diproses di *defuzzification* untuk merubah *variable fuzzy* ke bentuk keluaran akhir dalam sistem ini yaitu kecepatan (rpm). *Rule base* yang digunakan dalam kontroler ANFIS tergantung dari training datanya.

Tabel 1 adalah tabel dari train data yang digunakan.

Tabel 1. Training data pada ANFIS

<i>Input 1 (error)</i>	<i>Input 2 (de error)</i>	<i>Ouput (Wref)</i>
-50	10	70
-45	15	73
-40	20	76
-35	25	79
-30	30	81
-25	35	84
-20	40	87
-15	45	89
-10	50	90

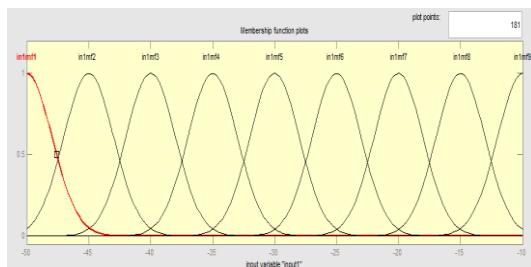
Data train pada Tabel 1 akan di masukkan ke dalam ANFIS *editor windows*. Gambar 4 adalah hasil train datanya.



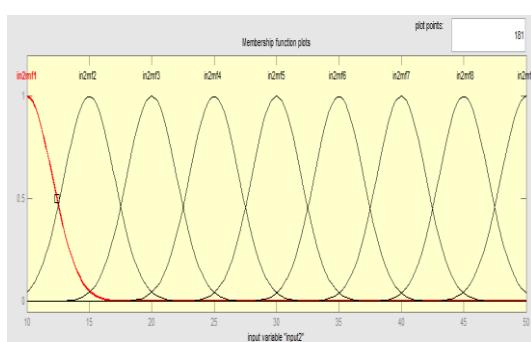
Gambar 4. Train data dengan ANFIS editor window

Gambar 5 di bawah ini adalah *membership function* yang terbentuk setelah training data pada ANFIS yang digunakan pada sistem ini. Pada gambar 6 merupakan *membership function* dari masukan (input) untuk ANFIS yaitu berupa *error*. Pada Gambar 6 tersebut terdapat sembilan *membership function*. Pada *membership function* *error*

memiliki batas antara -50 sampai dengan -10 dan menggunakan tipe gbellmf.

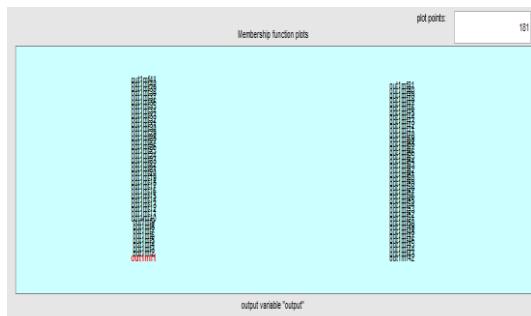


Gambar 5. Membership Function pada *input1*



Gambar 6. Membership Function pada *input2*

Pada Gambar 6 merupakan *membership function* dari masukan (*input*) untuk ANFIS yaitu *derivative error*. Pada Gambar 6 tersebut juga terdapat sembilan *membership function*. Pada *membership function derivative error* memiliki batas antara 10 sampai dengan 50 dan menggunakan tipe gbellmf. Sedangkan Derajat keanggotaan keluaran dapat dilihat pada Gambar 7.



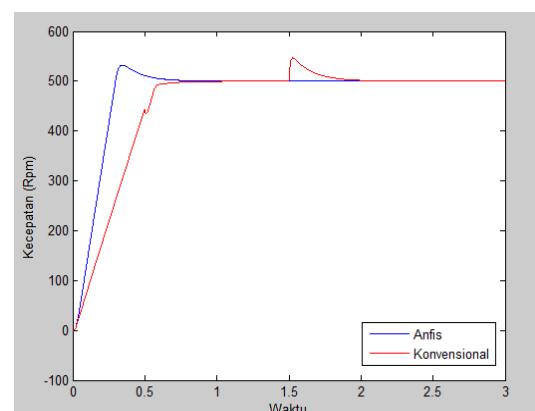
Gambar 7. Derajat keanggotaan keluaran

Pada Gambar 7 merupakan urutan *membership function* dari keluaran (*output*) untuk ANFIS berbeda dari fuzzy yang menggunakan metode mamdani untuk *output* nya yaitu mengatur sendiri sedangkan pada ANFIS metode yang digunakan yaitu sugeno dimana nilai *output* di dapat pengaturan *rule base* pada *input 1* dan *input 2* yang akan membentuk *output*. Pada Gambar 7 tersebut juga terdapat 49 *membership function*. Pada *membership function Output* terbentuk dari nilai membership function *input 1* dan *input 2* yang secara otomatis dibentuk oleh *rule editor*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengujian Simulasi Respon Kecepatan Tanpa Beban

Pengujian ini untuk mengetahui respon kecepatan terhadap sinyal referensi yang diberikan. Pada pengujian ini diberikan sinyal referensi 500 rpm, 1000 rpm, 1800 rpm dan torsi tanpa beban. Respon kecepatan 500 rpm keadaan tanpa beban dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Respon kecepatan 500 rpm keadaan tanpa beban

Pada kondisi ini respon diuji pada kedudukan setpoint (kecepatan referensi " ω -ref"). Pada tahap pertama sistem diuji

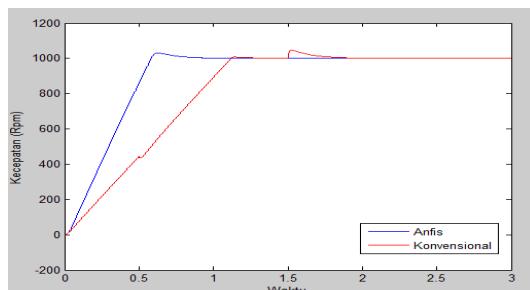
pada kedudukan setpoint 500 rpm, dengan waktu sampling dari 0 detik sampai 1,5 detik tanpa beban (beban nol). Tabel 2 adalah tabel hasil Pengujinya.

Tabel 2. Perbandingan kecepatan tanpa beban set poin 500 rpm

Kecepatan 500rpm	Anfis	Konvensional
Overshoot	0,2 %	0,5 %
Rise time	0,38	0,62
Setling time	0,39	0,64

Pada Kontoler Anfis menunjukkan *Overshoot* pada kecepatan 501.1 (rpm) adalah 0.2% , waktu pencapaian setpoint (*Rise time*) adalah 0.38 detik dan *Setling time* 0.39 detik. Sedangkan pada kontrol konvensional, *overshoot* yang di dapat adalah 0.5% ,waktu pencapaian setpoint (*rise time*) yaitu 0.62 detik dan setling time 0.64 detik.

Selanjutnya kita akan menguji pada respon kecepatan 1000 rpm tanpa beban. Pada kondisi ini respon diuji pada kedudukan setpoint (kecepatan referensi “ ω -ref”). Pada tahap pertama sistem diuji pada kedudukan setpoint 1000 rpm, dengan waktu sampling dari 0 detik sampai 1,5 detik tanpa beban (beban nol). Respon kecepatan 1000rpm keadaan tanpa beban dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Respon kecepatan 1000 rpm keadaan tanpa beban

Hasil Pengujian pada Gambar 9 dapat dianalisis pada tabel 3 berikut.

Tabel 3. Perbandingan kecepatan tanpa beban set poin 1000 rpm

Kecepatan 1000rpm	Anfis	Konvensional
Overshoot	0,7%	1,0%
Rise time	0,65	1,4
Setling time	0,67	1,5

Pada Kontoler ANFIS menunjukkan *Overshoot* pada kecepatan 1002 (rpm) adalah 0,7% , waktu pencapaian setpoint (*Rise time*) adalah 0,65 detik dan *Setling time* 0,67 detik. Sedangkan pada kontrol konvensional, *overshoot* yang di dapat adalah 1,0% ,waktu pencapaian setpoint (*rise time*) yaitu 1,4 detik dan settling time 1,5 detik.

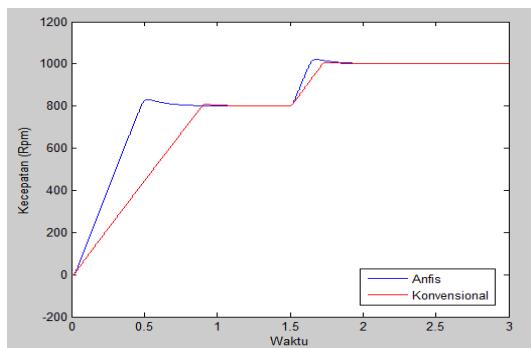
2. Pengujian Respon Kecepatan Berubah

Pada kondisi ini, kedua kontroler diuji melalui dua tahap kecepatan, atau perubahan kedudukan setpoint (kecepatan referensi “ ω -ref”).

- Tahap pertama : setpoint awal ditetapkan menjadi 800 rpm, dan setelah simulasinya berjalan 1,5 detik (dalam kondisi steady state) setpoint dinaikkan menjadi 1000 rpm.
- Tahap kedua : setpoint awal ditetapkan 1200 rpm, dan setelah simulasi berjalan 0,7 detik (dalam kondisi steady state) set point diturunkan menjadi 800 rpm. Simulasi dimulai dari kecepatan awal motor 0 rpm hingga mencapai kedudukan setpoint, dengan waktu sampling dari 0 sampai 1,2 detik tanpa beban (beban nol).

Tahap Pertama Perubahan kecepatan 800rpm ke 1000rpm. Hasil pengujian kedua kontroler dari kecepatan motor induksi untuk tahap pertama (perubahan kecepatan dari 800 rpm menjadi 1000 rpm) ditunjukkan pada Gambar 10. Sedangkan respon sistem

yang diamati dan dianalisis hanya saat setpoint 800 rpm dari kedudukan awal 0 rpm pada Tabel 4.

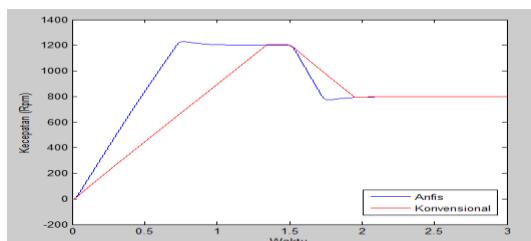


Gambar 10. Simulasi perubahan kecepatan dari 800 rpm ke 1000 rpm

Tabel 4. Perbandingan kecepatan beruban 800-1000 rpm

Tahap Pertama 800rpm-1000rpm	Anfis	Konvensional
Overshoot	0,2%	0,4%
Rise time	0,49 detik	0,89 detik
Settling time	0,53 detik	1,5 detik

Sedangkan hasil pengujian pada kedua kontroler kecepatan motor induksi untuk tahap kedua (perubahan kecepatan dari 1200 rpm menjadi 800 rpm) ditunjukkan pada Gambar 11. Sementara itu respon sistem yang diamati dan dianalisis hanya saat setpoint 800 rpm dari kedudukan awal 1200 rpm pada Tabel 5.



Gambar 11. Simulasi perubahan kecepatan dari 1200 rpm ke 800 rpm

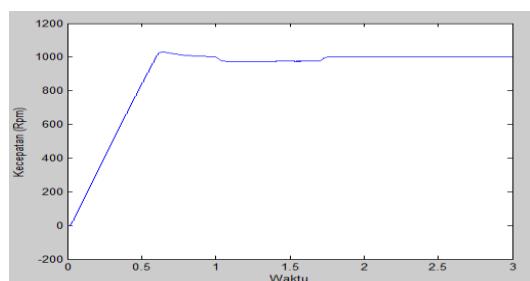
Tabel 5. Perbandingan kecepatan beruban 1200-800 rpm

Tahap kedua 1200rpm-800rpm	Anfis	Konvensional
Undershoot	0,12%	0,21%
Rise time	0,69 detik	1,37 detik
Settling time	1,6 detik	2 detik

Berdasarkan hasil pengujian dari simulasi kecepatan motor induksi seperti terlihat pada Gambar 10 dan Gambar 11, serta dari pengujian terhadap perubahan setpoint hingga mencapai titik maksimum. Dapat kita analisa bahwa kontrol ANFIS yang dikembangkan ini memiliki kemampuan mengontrol kecepatan terhadap perubahan kecepatan atau perubahan setpoint dengan baik, dengan waktu pencapaian setpoint dan *settling time* relatif cepat.

3. Pengujian Respon Kecepatan Pada Kondisi Berbeban

Simulasi kondisi berbeban 19Nm (bebannya sesaat) dapat dilihat pada Gambar 12.



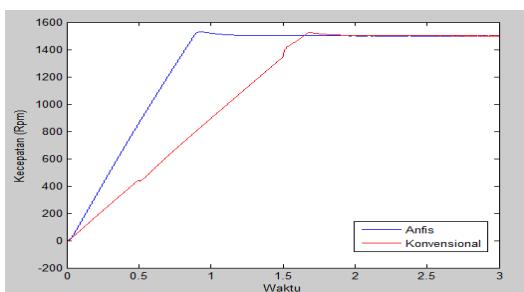
Gambar 12. Simulasi kondisi berbeban 19Nm (bebana sesaat)

Pada pembebanan sesaat ini, kondisi yang diamati dan dianalisa adalah respon sistem pada saat torsi beban maksimum ($TL = 19 \text{ N.m}$) mulai dimasukkan, yaitu pada $t = 1$ detik hingga sistem kembali kekedudukan setpoint

(stabil). Waktu yang diberikan pada pembebanan sesaat selama 1 detik dan hasil kemudian beban akan dilepas atau dikembalikan pada posisi 0 N.m, sehingga sistem akan berkerja pada kondisi tanpa beban.

4. Pengujian Simulasi Respon Kecepatan dengan Torsi Beban Tetap

Pengujian berikutnya adalah pengujian dengan memberikan torsi beban (TL) tetap pada pengujian ini akan diberikan tetap sebesar 20Nm dan sistem harus bisa mempertahankan kecepatan sesuai dengan sinyal referensi yang diberikan. Pada pengujian ini akan diberikan sinyal referensi konstan 1500 rpm. Hasil simulasi dapat dilihat Pada Gambar 13.



Gambar 13. Respon kecepatan dengan beban tetap sebesar 20Nm

Pada Gambar 13 terlihat bahwa keluaran berupa kecepatan putaran rotor dapat mengikuti sinyal referensi yang diberikan walaupun masih terjadi penurunan kecepatan pada daerah keadaan tunak (*steady state*). Kemudian dibuat perbandingan kesalahan keadaan tunak terhadap perubahan torsi beban (TL). Dari hasil tersebut dapat dihitung persen *error* dari pembacaan sistem seperti berikut.

- Kontroller ANFIS

$$\%error = \frac{Aktual - Nominal}{Aktual} \times 100\%$$

$$\%error = \frac{1510 - 1500}{1510} \times 100\%$$

$$\%error = 0,006\%$$

- Kontroller kovensional

$$\%error = \frac{Aktual - Nominal}{Aktual} \times 100\%$$

$$\%error = \frac{1525 - 1500}{1525} \times 100\%$$

$$\%error = 0,016\%$$

Hasil Perbandingan kecepatan dengan beban tetap dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan kecepatan dengan beban tetap

Setpoint (1500rpm)	TL (Nm)	Erot (%)
Kontroler Anfis	20	0.006
Kontroler Konvensional	20	0.016

IV. SIMPULAN

1. Simpulan

Dari hasil pengujian simulasi kecepatan motor induksi seperti terlihat pada Gambar 8 dan Gambar 9, hasil kecepatan tanpa beban pada kecepatan 500rpm terjadi *overshoot* 0,2%, *risetime* 0,38 detik, *setling time* 0,39 detik, dan pada kecepatan 1000rpm terjadi *overshoot* 0,7%, *risetime* 0,65 detik, *setling time* 0,67 detik. serta dari pengujian terhadap perubahan setpoint hingga mencapai titik maksimum, yaitu 1800rpm terjadi *overshoot* 0,7%, *risetime* 1 detik, *setling time* 1 detik seperti ditampilkan pada Gambar 10 dan Gambar

11 serta Tabel 4 dan Tabel 5, dapat kita simpulkan bahwa kontrol logika ANFIS yang dikembangkan ini memiliki kemampuan mengontrol terhadap perubahan kecepatan atau perubahan setpoint dengan baik, dengan waktu pencapaian *setpoint* dan *settling time* relative cepat.

Sedangkan hasil simulasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13 bertujuan untuk menguji ketangguhan sistem kontrol yang dirancang terhadap kondisi pembebanan secara permanen (tetap). Dalam hal ini, kondisi beban yang diamati dan dianalisis adalah respon sistem pada saat torsi beban sebesar 20 N.m dengan respon kecepatan yang digunakan 1500 rpm memiliki kesalahan keadaan tunak saat terjadi *overshoot* 0,27%. Dari hasil yang ditampilkan pada Gambar 20, kita dapat melihat respon sistem tetap setabil.

2. Saran

Salah satu kelemahan dari penggunaan kontroler logika ANFIS yang dikembangkan adalah dalam menentukan aturan dasar ANFIS (*rule base*) dan parameter sistem menggunakan metode coba-coba (*heuristic*), sehingga bila terjadi kondisi perubahan sistem, perlu diadakan penyesuaian *rule base*. Untuk mengatasi kelemahan ini, maka perlu dikembangkan lagi dengan menggunakan metode kontroler lain yang lebih handal.

V. RUJUKAN

- [1] A. Kurniawan, "Pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode field-oriented control menggunakan kontrol logika fuzzy," Skripsi, Surabaya: Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan Universitas Hang Tuah, 2002.
- [2] B. Y. Dewantara, "Desain SVPWM Inverter Driver Sebagai Pengendali Kecepatan Motor 3 Fasa Berbasis Fuzzy Logic," Skripsi, Surabaya: Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan Universitas Hang Tuah, 2014.
- [3] D. Casadei, G. Serra, F. Profumo, A. Tani, "FOC and DTC: two variable scheme for induction motors torque control, *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 17, No. 5, 2002.
- [4] D. Casadei, G. Serra, A. Tani, L. Zarri, "Assessment of direct torque control for induction motor drives", *Buletin of the Polish academy of science tech. sciences*, Vol. 54, No.3, 2006.
- [5] E. Wahjono, S. Soebagio, "Fuzzy Logic Direct Torque Control Untuk Motor Induksi Yang Digunakan Pada Kendaraan Listrik (Electric Vehicle)," *Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi (SNATI)*, 2009
- [6] Isdiyarto, "Dampak Perubahan Putaran Terhadap Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Phasa Jenis Rotor Sangkar," *Jurnal Kompetensi Teknik*, Vol. 1, No. 2, 2010.
- [7] Jyh-S. R Jang, ANFIS: Adaptive-network-based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems, Mans and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3, 1993.
- [8] Jyh-S. R Jang, "Neuro-Fuzzy Modeling: Architectures, Analyses, and Applications," Disertasi, Berkeley: University of California, 1992.
- [9] M. A. Arifin, "Perancangan Kontrol Logika Adaptif Fuzzy Dalam Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa," Skripsi, Surabaya: Universitas Hang Tuah, 2013.
- [10] I. D. P. Karyatanti, B. Y. Dewantara, M. R. Hardiansyah, "Rancang Bangun Pengaturan Kecepatan Motor DC Menggunakan Metode Fuzzy Gain Scheduling PID Control," *ALINIER*:

Journal of Artificial Intelligence & Applications, Vol. 5, No. 1, 2024.

Voltage and Application, Vol. 2, No. 2, 2021.

- [11] A. I. Ridhatullah, A. Joret, I. D. P. Karyatanti, A. Ponniran, "Three-Phase Induction Motor Speed Estimation Using Recurrent Neural Network," *Journal of Electronic*
- [12] A. Rusmanegara, I. D. P. Karyatanti, "Simulasi Rancang Bangun Gridside Converter pada Double Fed Induction Generator Menggunakan Fuzzy Logic," *CYCLOTRON*, Vol. 4, No. 2, 2021.