

Pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan *direct torque control* menggunakan jaringan saraf tiruan

Suwarni¹, Abdul Muis Prasetya²

e-mail: suwarniwarni617@gmail.com, prasetya.eletric@gmail.com

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 18 Januari 2022

Direvisi 12 Juli 2022

Diterbitkan 28 Oktober 2022

Kata kunci:

Jaringan saraf tiruan
Direct torque control
Motor induksi

Keywords:

Artificial Neural Networks
Direct Torque Control
Induction Motor

ABSTRAK

Pengaturan kecepatan merupakan salah satu permasalahan yang terjadi pada motor induksi. Motor induksi merupakan motor yang paling umum digunakan didunia industri, bisnis transportasi dan lain-lain. Keunggulan motor induksi ialah memiliki rancangan yang sederhana dan kuat, harganya murah, efisiensi tinggi, *power factor* cukup baik, dan perawatannya lebih mudah. Pada penelitian ini metode pengaturan kecepatan yang digunakan adalah metode *Direct Torque Control* (DTC) dimana DTC mampu mengatur fluks dan torsi secara langsung serta dapat dilakukan tanpa menggunakan sensor kecepatan. Adapun kontrol yang digunakan yaitu Jaringan Saraf Tiruan (JST) menggunakan *Model Reference Control* (MRC). Respon *plant* mampu beradaptasi terhadap nilai dari kecepatan referensi yang diberikan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kontrol JST mampu mengendalikan motor induksi dengan respon waktu yang cukup baik, hal ini dapat dilihat saat diberi kecepatan referensi sebesar 150 rad/s didapatkan nilai *time constan* sebesar 0,8693 s, *rise time* sebesar 1,2917 s, *settling time* sebesar 1,5536 s, *time delay* sebesar 0,622 s serta *error steady state* sebesar 0,9%.

ABSTRACT

Speed regulation was one of the problems that occurred in induction motors. induction motors were the most commonly used motors in industry world, transportation business and others. The advantages of an induction motor were it had a simple and robust design, low cost, high efficiency, good power factor, and easier maintenance. In this study, the speed regulation method used was the Direct Torque Control (DTC) method where DTC was able to regulate flux and torque directly and it can be done without using a speed sensor. The control used was Artificial Neural Networks (ANN) using Model Reference Control (MRC). The plant response was able to adapt to the value of reference speed given. The test results showed that the ANN control was able to control the induction motor with a good response time. It can be seen when it was given a reference speed of 150 rad/s, the time constant value of 0.8693 s, rise time of 1.2917 s, settling time of 1.5536 s, delay time of 0.622 s and error steady state of 0.9%.

Penulis Korespondensi:

Suwarni,

Jurusan Teknik Elektro,

Universitas Borneo Tarakan,

Jl. Amal Lama No. 1, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia.

Email: suwarniwarni617@gmail.com

1. PENDAHULUAN

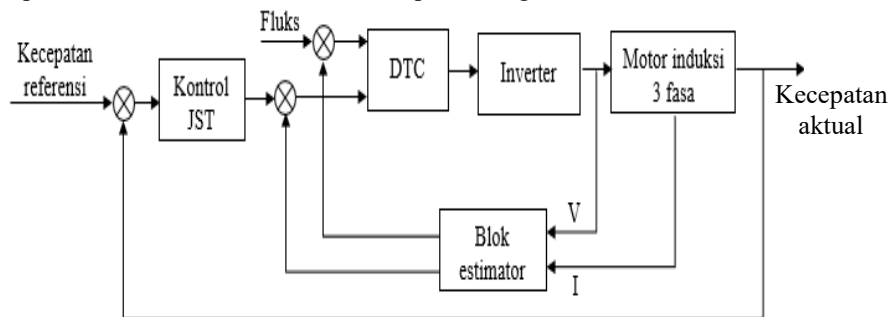
Dengan kemajuan teknologi yang sangat pesat saat ini terutama di bidang industri rekayasa yang sebagian besar banyak menggunakan motor listrik sebagai alat penggerak utama. Salah satu mesin listrik banyak digunakan ialah motor induksi [1]. Tetapi pengaturan kecepatannya, motor induksi tidaklah mudah. Oleh sebab itu diperlukannya teknologi yang tepat untuk dapat mengatur putaran motor induksi agar tetap stabil [2]. Motor induksi merupakan jenis motor yang digerakkan oleh sumber daya bolak-balik tiga fasa [3]. Keunggulan motor induksi konstruksinya sederhana dan kokoh, harga murah, handal, tenaga yang besar dengan daya listrik yang rendah dan perawatan mudah [4]. Sedangkan kelemahannya yaitu, sulitnya mengatur kecepatan karena karakteristiknya bersifat nonlinear, terutama resistansi rotor yang memiliki nilai yang bervariasi untuk kondisi operasi yang berbeda, sehingga tidak dapat mempertahankan kecepatannya secara konstan bila terjadi perubahan beban [5], [6], [7]. Untuk mendapatkan kecepatan yang konstan serta memperbaiki kinerja motor induksi maka dibutuhkan suatu rangkaian kontrol [8].

Melalui metode *Direct Torque Control* (DTC) dapat dilakukan pengaturan kecepatan secara langsung dengan mengontrol fluks stator dan torsi, sehingga diperoleh nilai estimasi kecepatan tanpa menggunakan sensor kecepatan [9]. Pengendalian motor tiga fasa dengan DTC menggunakan pengontrol histeresis konvensional dari ripple torsi tinggi dan pemilihan variabel frekuensi [10]. Keunggulan DTC adalah lebih sederhana, performa yang dinamik, pada perubahan parameter tahanan stator tidak sensitif. DTC juga mempunyai kelemahan diantaranya ripple torsi dan respon transien yang lambat selama start-up, serta tingginya faktor noise sehingga perlu di kontrol agar linear [11], [12].

Motor induksi adalah suatu motor yang mempunyai dinamika sistem kontrol yang non linear, hal inilah yang memberikan motivasi kuat untuk mengaplikasikan Jaringan Saraf Tiruan (JST) dengan menggunakan teknik *adaptive*. Penggunaan JST dirasa tepat untuk menghadapi permasalahan tersebut karena teknologi ini memiliki kemampuan untuk memodelkan sistem yang tidak linear. Kelebihan lainnya yaitu kemampuan untuk memperoleh, dan menyimpan informasi berdasarkan pengalaman. Sehingga pengembangan dan penelitian mengenai hal ini menjadi sangat diperlukan. Pada penelitian ini mensimulasikan pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan DTC menggunakan JST yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik respon *transient* dan respon *error steady state* dari motor induksi [13].

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini akan mensimulasikan pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan DTC menggunakan JST pada Simulink Matlab. Berikut merupakan diagram blok simulasi :



Gambar 1. Blok Diagram Simulasi

Pada diagram blok simulasi, input berupa kecepatan referensi untuk memasukkan kecepatan putaran motor yang diinginkan yang selanjutnya akan dibandingkan dengan kecepatan aktual dari motor dan menghasilkan *error*. *Error* akan menjadi masukan pada blok kontrol JST yang berisi struktur kontrol JST. Keluaran dari kontrol JST adalah sinyal kontrol berupa torsi referensi. Blok DTC berisi kontrol histeresis torsi dan fluks untuk membandingkan nilai torsi dan fluks referensi dengan torsi dan fluks aktual untuk memperoleh kondisi switching pada switching table DTC. Keluaran dari switching table mengatur perangkat switching pada inverter untuk menghasilkan tegangan tiga fasa yang disuplai ke motor induksi tiga fasa. Blok motor induksi tiga fasa berisi persamaan state dari model matematik motor induksi tiga fasa. Selanjutnya tegangan dan arus dari motor induksi masuk ke dalam blok estimator untuk mengestimasi nilai torsi dan fluks aktual yang dibandingkan dengan nilai torsi dan fluks referensi. Keluaran yang diperoleh dari model motor induksi tiga fasa adalah kecepatan rotor (ω_r), arus tiga fasa, dan nilai torsi elektrik (T_e) dari motor.

2.1 Pemodelan Motor Induksi Tiga Fasa

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu menggunakan metode pengembangan simulasi untuk pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan DTC menggunakan JST. Model motor induksi

yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari parameter – parameter fisik motor induksi. Spesifikasi dari motor induksi tiga fasa yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi motor induksi tiga fasa

No	Spesifikasi	Keterangan
1	Tegangan (Volt)	560
2	Frekuensi (Hz)	50
3	Kecepatan (Rpm)	1500.2
4	Jumlah pasang kutub	4
5	Tahanan stator (Ohm)	4.1250
6	Tahanan rotor (Ohm)	2.4860
7	Induktansi stator dan rotor (H)	0.0156
8	Induktansi magnetik (H)	0.2848
9	Momen inersia (J)	0.1390
10	Reaktansi stator dan rotor (Ohm)	4.8915
11	Reaktansi magnet motor (Ohm)	89.4726

Berikut ini akan dijelaskan tahapan dan persamaan yang digunakan dalam pemodelan motor induksi tiga fasa pada simulink matlab berikut [14].

2.1.1 Transformasi tegangan abc ke dq

Sumber ditransformasikan kedalam koordinat rotasi dua fasa untuk menghubungkan sumber dengan motor induksi. Untuk mentransformasikan tegangan abc ke dq *stationary frame* digunakan persamaan berikut.

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Persamaan (2) digunakan untuk transformasi dua fasa *synchronously rotating frame*

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.1.2 Transformasi arus dua fasa ke tiga fasa

Adapun persamaan yang digunakan untuk memodelkan rangkaian transformasi arus dua fasa ke tiga fasa adalah sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.1.3 Persamaan model motor induksi tiga fasa

Persamaan hubungan fluk yang berkaitan dengan rangkaian dapat dilihat sebagai berikut:

$$\frac{d\Psi_{qs}}{dt} = \omega_b \left[v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \Psi_{ds} - \frac{R_s}{X_{ls}} (\Psi_{qs} - \Psi_{mq}) \right] \quad (5)$$

$$\frac{d\Psi_{ds}}{dt} = \omega_b \left[v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \Psi_{qs} - \frac{R_s}{X_{ls}} (\Psi_{ds} - \Psi_{md}) \right] \quad (6)$$

$$\frac{d\Psi_{qr}}{dt} = -\omega_b \left[-\frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \Psi_{dr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (\Psi_{qr} - \Psi_{mq}) \right] \quad (7)$$

$$\frac{d\Psi_{dr}}{dt} = -\omega_b \left[-\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \Psi_{qr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (\Psi_{dr} - \Psi_{md}) \right] \quad (8)$$

Dimana

$$\Psi_{mq} = X_{ml} \left[\frac{\Psi_{qs}}{X_{ls}} + \frac{\Psi_{qr}}{X_{lr}} \right] \quad (9)$$

$$\Psi_{md} = X_{ml} \left[\frac{\Psi_{ds}}{X_{ls}} + \frac{\Psi_{dr}}{X_{lr}} \right] \quad (10)$$

$$X_{ml} = 1 / \left(\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lr}} \right) \quad (11)$$

Berikut merupakan persamaan untuk penghitungan arus

$$i_{qs} = 1/X_{ls} (\Psi_{qs} - \Psi_{mq}) \quad (12)$$

$$i_{ds} = 1/X_{ls} (\Psi_{ds} - \Psi_{md}) \quad (13)$$

$$i_{qr} = 1/X_{lr} (\Psi_{qr} - \Psi_{mq}) \quad (14)$$

$$i_{dr} = 1/X_{lr} (\Psi_{dr} - \Psi_{md}) \quad (15)$$

Berdasarkan persamaan diatas torsi dan kecepatan rotor dapat ditentukan sebagai berikut

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \frac{1}{\omega_b} (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad (16)$$

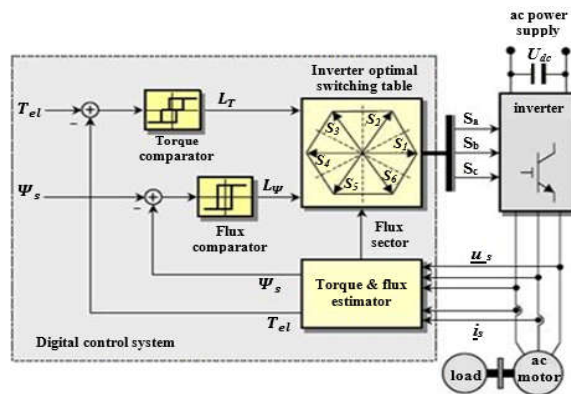
$$\omega_r = \frac{P}{2 \cdot J} (T_e - T_L) \tag{17}$$

2.2 Inverter

Inverter merupakan suatu rangkaian elektronika yang mengkonversi sumber tegangan DC menjadi sumber tegangan AC [15]. Fungsi *inverter* adalah untuk merubah kecepatan motor AC dengan cara merubah frekuensi inputnya [16]. Secara sederhana prinsip dasar *inverter* untuk dapat mengubah frekuensi menjadi lebih kecil atau lebih besar yaitu dengan mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC kemudian dijadikan tegangan AC lagi dengan frekuensi yang berbeda atau dapat diatur [17].

2.3 Metode Direct Torque Control (DTC)

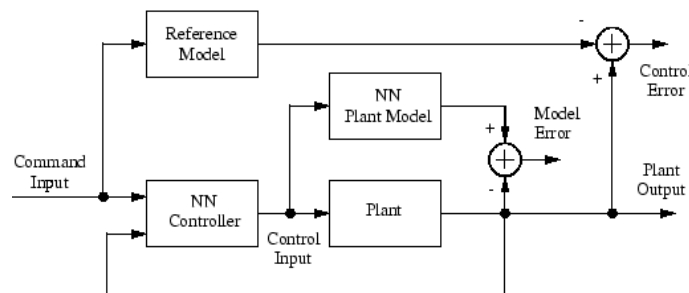
Dasar dari metode DTC adalah perubahan torsi sebanding dengan *slip* antara fluks stator dan fluks rotor pada kondisi fluks bocor stator tetap. Oleh karena itu, pada keadaan perubahan yang cepat fluks rotor cenderung tidak berubah [18]. Perubahan cepat dari torsi elektromagnetik dapat dihasilkan dari putaran fluks stator, sebagai arah torsi. DTC ini terdiri dari beberapa bagian yaitu blok estimator, komparator, *switching* tabel, dan inverter [19].



Gambar 2. skema DTC

2.4 Kontrol JST Model Reference Control (MRC) [20] [21]

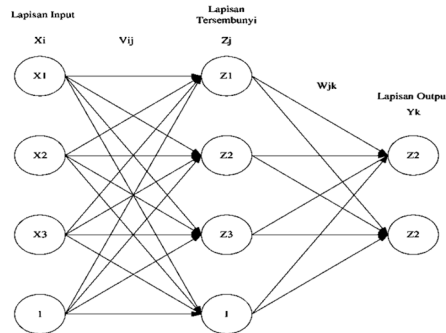
Jaringan Saraf Tiruan (JST) merupakan suatu sistem pemrosesan informasi yang mempunyai karakteristik menyerupai jaringan saraf biologis (JSB), JST tercipta sebagai suatu generalisasi model matematis dari pemahaman manusia (*human cognition*). Arsitektur MRC menggunakan dua jaringan saraf yaitu jaringan pengontrol dan model *plant*. Satu jaringan saraf digunakan untuk memodelkan sistem dan satu jaringan saraf digunakan untuk mengontrol sistem. Gambar 3 menunjukkan kontrol JST mengontrol *input plant* sesuai data pelatihan. *Plant* juga memproses *input* sesuai dengan data pelatihan dalam model *plant* JST. Perbedaannya memberikan kesalahan, sedangkan *output plant* dan kesalahan kontrol berkontribusi terhadap keluaran model. Kemudian *output plant* diumpungkan kembali ke *input* pengontrol JST, dimana bekerja pada model propagasi balik jaringan saraf.



Gambar 3. Diagram blok kontrol JST

Backpropagation memiliki beberapa unit yang ada dalam satu atau lebih lapisan tersembunyi (*hidden layer*) [22]. Jumlah unit *hidden* tergantung pada kebutuhan. Umumnya ada lapisan bobot-bobot yang terletak antara 2 lapisan yang bersebelahan. Jaringan dengan banyak lapisan ini dapat menyelesaikan permasalahan yang lebih sulit daripada lapisan tunggal, tentu saja dengan pembelajaran yang lebih rumit. bobot input diteruskan ke lapisan tersembunyi untuk diproses. Lapisan tersembunyi melewati bobot yang dihitung ke lapisan keluaran. Kesalahan diberikan ke lapisan input melalui propagasi balik (umpan balik) ketika output aktual berbeda dari yang diinginkan. Oleh karena itu, bobot disesuaikan untuk meminimalkan kesalahan

melalui pelatihan dan pembelajaran jaringan saraf. Proses berlanjut sampai output dapat diterima atau waktu pembelajaran yang telah dikonfigurasi tercapai [23].



Gambar 4. Banyak lapisan (*multi layer*) jaringan saraf

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pelatihan *Model Reference Control* (MRC)

Untuk melatih blok pengontrol dari pengontrol JST, pengguna bebas memasukkan nilai yang diinginkan sesuai dengan persyaratan operasional sebelum dimulainya pelatihan pengontrol. Pada langkah awal, data dibangkitkan untuk melatih pengontrol. Sementara proses pembuatan data, respon *plant* mengikuti MRC. Jika respon JST tidak akurat, kumpulan data dapat dibuat ulang dan jika kumpulan data dapat diterima maka pengontrol dapat dilatih melalui opsi *train controller*, kemudian pelatihan pengontrol JST akan dimulai sesuai dengan parameter yang diberikan. Namun, hal itu dilakukan setelah '*Plant Identification*' melatih unit *plant* pengontrol JST melalui prosedur yang sama. Pelatihan pengontrol JST dapat memakan waktu yang cukup lama tergantung pada parameter dan kecepatan pemrosesan yang diberikan.

Berikut merupakan parameter dan hasil pelatihan *plant identification* :

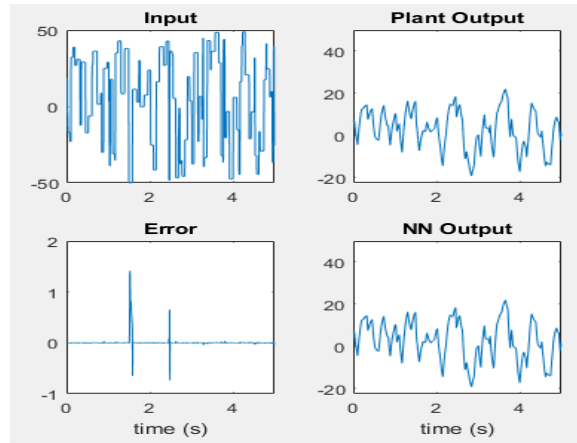
(a)

(b)

Gambar 5. (a) Parameter *plant identification*, dan (b) *Input-output plant* selama pelatihan

(a)

(b)

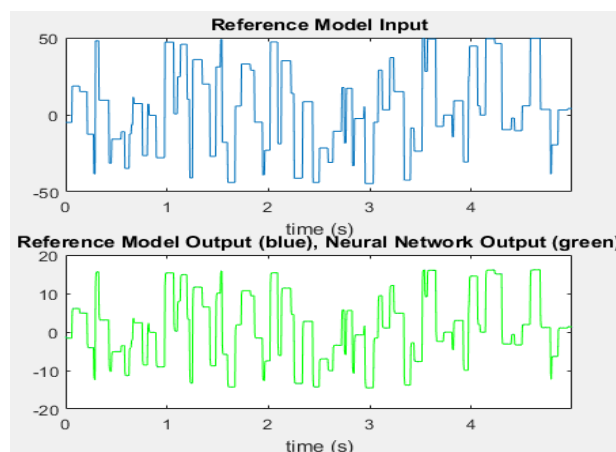


Gambar 6. (a) Training Data, (b) Validation Data, dan (c) Testing Data for NN Reference Control

Berikut merupakan parameter dan hasil pelatihan MRC yang pada dasarnya dalam proses pelatihan sama dengan pelatihan pada *plant identification*. Setelah pelatihan selesai respon dari sistem yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 8 dimana keluaran pengontrol jst (hijau) mengikuti reference model (biru).



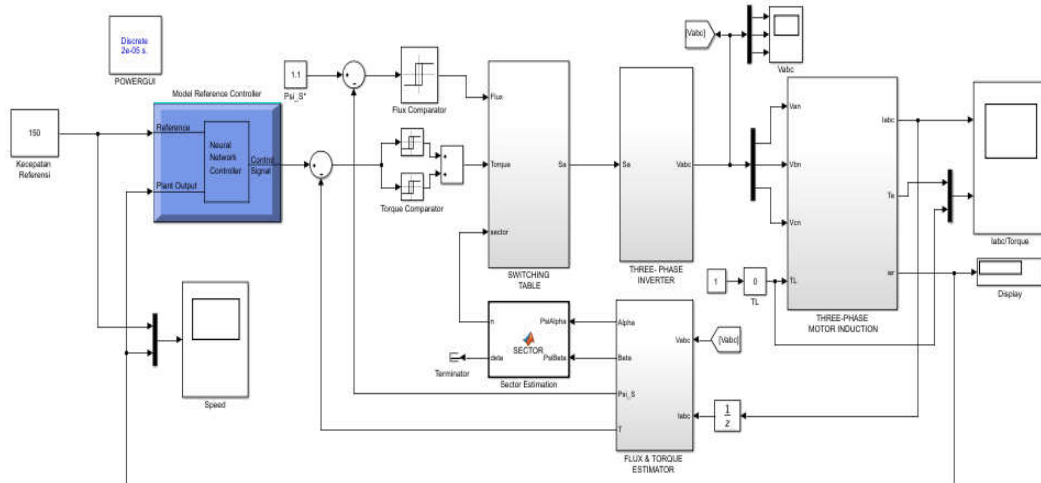
(a) (b)
Gambar 7. (a) Parameter MRC, dan (b) input-output MRC



Gambar 8. Input-Output reference model dan JST

3.2 Pengujian Respon Motor Induksi Tiga Fasa dengan DTC Menggunakan JST

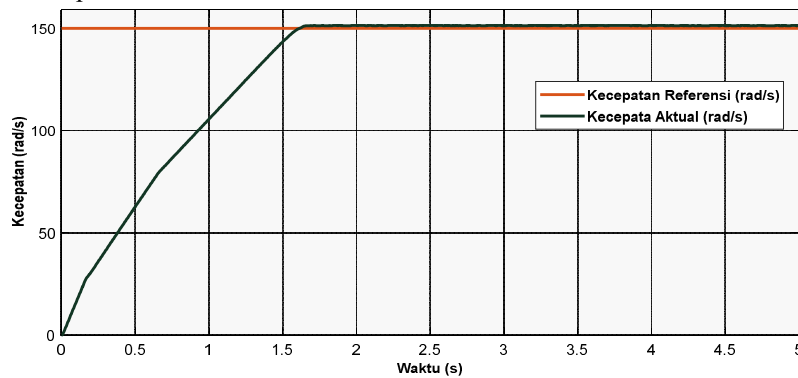
Pengujian dilakukan untuk mengetahui karakteristik respon *transient* dan respon *steady state* dari motor induksi. Adapun variabel-variabel yang diamati ialah *time constant*, *rise time*, *settling time*, *time delay*, dan *error steady state*.



Gambar 9. Rangkaian simulasi pengaturan kecepatan motor induksi tiga fase dengan DTC menggunakan JST

3.2.1 Pengujian Respon dengan Kecepatan Referensi Konstan

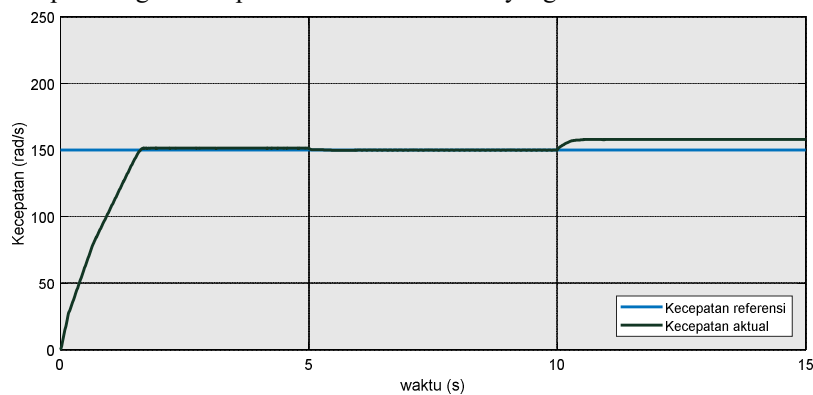
Pengujian dilakukan selama 5 s dengan memberikan input kecepatan referensi konstan sebesar 150 rad/s menggunakan kontrol JST, dimana batas maksimum kecepatan dari motor induksi sebesar 154 rad/s. Pengujian dilakukan tanpa beban.



Gambar 10. Respon kecepatan dengan kecepatan referensi konstan

Respon kecepatan hasil simulasi didapatkan nilai *Time constan* sebesar 0.8693 s, *Rise time* sebesar 1.2917 s, *Setling time* sebesar 1.5536 s, *Time delay* sebesar 0.622 s, dari hasil simulasi juga dapat dilihat bahwa kecepatan aktual dapat mengikuti kecepatan referensi yang diberikan dimana didapatkan *error steady state* sebesar 0.9 %, sehingga kecepatan yang terukur sebesar 151.3 rad/s.

3.2.2 Pengujian Respon dengan Kecepatan Referensi Konstan yang Terbebani

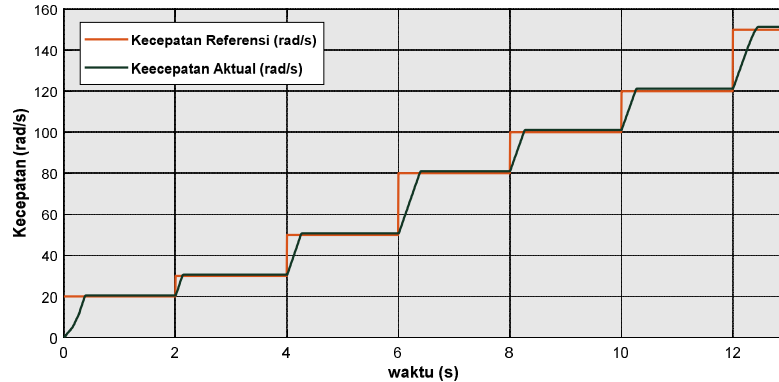


Gambar 11. Respon kecepatan saat diberi beban

Pengujian dilakukan pada kecepatan referensi sebesar 150 rad/s dengan beban 0, beban 5 N.m dan -5 N.m. Hasil pengujian didapatkan pada $t = 0$ s sampai dengan $t = 5$ s merupakan respon kecepatan dengan torsi beban 0 dengan kecepatan yang terukur sebesar 151.3 rad/s, kemudian pada $t = 5$ s sampai dengan $t = 10$ s merupakan respon kecepatan dengan torsi beban sebesar 5 N.m dimana terjadi penurunan pada respon

kecepatan menjadi 150 rad/s kecepatan akan menurun jika terdapat torsi beban pada motor induksi, dan pada t=10 s sampai dengan t= 15 s merupakan respon kecepatan dengan torsi beban sebesar -5 N.m dimana pada kondisi ini terjadi kenaikan kecepatan menjadi 158 rad/s. Beban -5 N.m diasumsikan saat terjadi pelepasan beban secara tiba-tiba.

3.2.3 Pengujian Respon dengan Kecepatan Berubah-ubah



Gambar 12. Respon Kecepatan dengan Kecepatan Referensi Berubah-ubah

Tabel 2. Respon kecepatan aktual dan *error steady state* dengan kecepatan referensi berubah-ubah

No	Kecepatan Referensi	Kecepatan Aktual	Selisih	<i>Error Steady State</i>
1	20 rad/s	20.56 rad/s	0.56	2.8 %
2	30 rad/s	30.63 rad/s	0.63	2.1 %
3	50 rad/s	50.75 rad/s	0.75	1.5 %
4	80 rad/s	80.93 rad/s	0.93	1.2 %
5	100 rad/s	101.1 rad/s	1.1	1.1 %
6	120 rad/s	121.2 rad/s	1.2	1 %
7	150 rad/s	151.3 rad/s	1.3	0.9 %

Dari tabel 2 didapatkan nilai selisih dengan mengurangi kecepatan aktual dan kecepatan referensi. Kemudian jumlah selisih dibagi dengan banyak data sehingga didapat rata-rata selisih kecepatan sebesar 0.924 rad/s. Dari tabel juga dapat dilihat bahwa semakin kecil kecepatan referensi yang diberikan maka *error steady state* semakin besar.

4. KESIMPULAN

Dari hasil analisa dan hasil simulasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan *Direct Torque Control* Menggunakan Jaringan Saraf Tiruan maka dapat disimpulkan bahwa kontrol berbasis JST yang diusulkan dapat mengendalikan kecepatan motor induksi tiga fasa, dimana nilai *error steady state* yang di peroleh masih dalam batas toleransi dalam sistem kontrol, batas toleransi yang diizinkan sebesar 2%-5%. Saat diberikan kecepatan referensi sebesar 150 rad/s respon waktu yang dihasilkan: *Time constan* sebesar 0.8693 s, *Rise time* sebesar 1.2917 s, *Setling time* sebesar 1.5536 s, *Time delay* sebesar 0.622 s dan *error steady state* sebesar 0.9 %.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Yusuf, V. Prasetya, . S. D. Riyanto and A. A. Rafiq, "Desain Simulasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan Switching Space Vector Pulse Width Modulation," *Jurnal ECOTIPE*, pp. 24-31, 2019.

[2] N. R. Mulyawan, S. Yahya and A. R. A. Al Tahtawi, "Pemodelan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Metode Proportional Integral Anti Wind Up (Pi-Aw)," *Prosiding SEMNASTERA* , pp. 112-119, 2020.

[3] J. Sinaga, H. Prayitno , F. Panjaitan and S. Napitupulu , "Kinerja Pengeraman Motor Induksi Tiga Fasa," *Jurnal Teknologi Energi Uda* , pp. 114-119, 2021.

[4] A. W. Aditya, I. R. M. Utomo and H. , "Pemodelan State Space Motor Induksi Tiga Fasa Sebagai Penggerak Mobil Listrik," *Jurnal Teknologi* , vol. 12, pp. 39-48, 2020.

[5] R. Hardianto, Y. Shalahuddin and F. Yumono, "Karakteristik Respon Transien Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis Algoritma Vektor Kontrol," *jurnal ilmiah setrum*, vol. 8, pp. 205-217, 2019.

[6] R. Fauzi, J. and M. , "Pemodelan Direct Field Oriented Control (Dfoc) Pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa," *Jurnal Ilmiah Foristek* , vol. 9, pp. 39-46, 2019.

- [7] R. Fauzi, M. A. Indrajaya, . D. C. K and . W. , "Pemodelan Transformasi Direct Quadratur (D-Q) Pada Kendali Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Metode Vector Control," *Jurnal Ilmiah Foristek* , vol. 10, pp. 72-77, 2020.
- [8] Sukanto, "Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Kontroler Logika Fuzzy," *Journal of Electrical Electronic Control and Automotive Engineering* , vol. 4, pp. 245-252, 2019.
- [9] V. K. Alvi, E. Wahjono and O. . A. Qudsi, "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan Metode Direct Torque Control," *Jurnal Inovtek Seri Elektro*, vol. 2, pp. 159-167, 2020.
- [10] S. N. Mudhavath, Rao and Gudapati Sambasiva, "Direect Torque Control Of MMC FED 3-Phase Induction Motor Using Fuzzy Logic Controller," *Departement of Guntur*, vol. 29, pp. 2113-2121, 2020.
- [11] S. E. Nugroho , "Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Tiga Fasa Menggunakan Metode Direct Torque Control (DTC)," *Jurnal Teknik Elektro* , vol. 10, pp. 81-89, 2021.
- [12] M. S. A. Sari, H. Suyono and A. Lomi, "Analisis Kendali Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa dengan Metode Direct Torque Control (DTC) Berbasis PID Kontrol," *Jurnal ECOTIPE*, vol. 7, pp. 70-77, 2020.
- [13] P. Kurniawan, "Perancangan Dan Simulasi Metode Direct Torque," pp. 1-7.
- [14] A. Aktaibi , A. Ghanim and M. . A. Rahman, "Dynamic Simulation of a Three-Phase Induction Motor Using Matlab Simulink," 2011.
- [15] F. Hidayat and Krismadinata, "Rancang Bangun VVVFInverter 3 Fasa untuk Operasi Motor Induksi TigaFasa dengan Antarmuka Komputer," *Jurnal Inovasi Vokasional dan Teknologi*, vol. 19, pp. 47-56, 2019.
- [16] N. Evalina, A. . A. H and Zulfikar , "Pengaturan Kecepatan Putaran Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Programmable logic controller," *Journal of Electrical Technology*, vol. 3, pp. 73-80, 2018.
- [17] E. S. Nasution and A. Hasibuan , "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Merubah Frekuensi Menggunakan Inverter ALTIVAR 12P," *Jurnal Sistem Informasi* , pp. 25-34, 2018.
- [18] K. R. S. Suda, . E. Purwanto, B. Sumantri, H. H. Fakhruddin, A. A. Muntashir and M. R. Rusli, "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Menggunakan Pemodelan Sistem (DTC) Direct Torque Control," *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan* , vol. 18, pp. 237-248, 2021.
- [19] U. Khasanah, Supari and . S. Heranurweni, "Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Direct Torque Control Menggunakan Matlab," *Elektrikal*, vol. 09, pp. 13-16, 2017.
- [20] M. Jibril and . E. A. Tadese, "Comparison Of Neural Network Narma-L2 Model Reference And Predictive Controllers For Nonlinear Quarter Car Active Suspension System," *Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science* , vol. 02, pp. 178-188, 2020.
- [21] P. Mandal and B. Biswas , "To Identify a Torque Controller System Approximating a Neural Network Based on Model Reference Technique," *International Journal Of Engineering And Computer Science* , vol. 5, pp. 178833-178838, 2016.
- [22] E. D. Nurdiansyah, "Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa Berbasis Backpropagation," *Jurnal Teknik Elektro*, pp. 69-76, 2018.
- [23] Aamir, Muhammad , "On replacing PID controller with ANN controller for DC motor position control," *International Journal of Research Studies in Computing* , vol. 2, pp. 21-29, 2013.