

PENGATURAN TORSI MOTOR INDUKSI 3 PHASA MENGGUNAKAN *DIRECT TORQUE CONTROL*

Alvin Tri Nugroho¹, Yuliyanto AgungPrabowo²
Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya^{1,2}
alvintrinugroho666@gmail.com, agungp@itats.ac.id

Submitted February 28, 2022; Revised July 7, 2022; Accepted July 28, 2022

Abstrak

Motor induksi tiga fasa merupakan penggerak yang paling banyak digunakan di industri dikarenakan konstruksi yang kokoh dan harga yang relatif terjangkau. Akan tetapi terdapat kelemahan sulit mengontrol torsi dan kecepatan secara dinamis secara terpisah. Karakteristik torsi dan kecepatan dari motor induksi 3 bersifat couple dan *nonlinear*. Sehingga sulit untuk dapat mengendalikan torsi dan kecepatan secara terpisah. Untuk mengatasi permasalahan tersebut terdapat metode kontrol *decouple* yang akan memisahkan kontrol antara torsi dan kecepatan menggunakan DTC (*Direct Torque control*) dengan cara mengatur nilai fluks stator sebagai switching sektor selektor. DCT merupakan salah satu bentuk pengendalian *vector control*. Metode estimasi *least square* digunakan untuk peramalan kecepatan pada motor induksi melalui data pengukuran fluks stator dan fluks rotor yang di regresikan kedalam bentuk non linier untuk memonitoring laju kecepatan motor. Berdasarkan pengujian menggunakan simulasi diperoleh hasil, bahwa saat motor induksi diberikan beban torsi berubah (*tracking*) respons torsi motor induksi dapat mengikuti perubahan tersebut. Dimana nilai karakteristik response transient, time constan (τ) 0,082 detik, rise time (T_R) 0,242 detik dan settling time (T_s) 0,246 detik.

Kata Kunci : Motor Induksi, Vector Control, DTC, *Least Square*

Abstract

The three-phase induction motor is the most widely used drive in the industry due to its sturdy construction and relatively affordable price. However, there is a disadvantage that it is difficult to control torque and speed dynamically and separately. The torque and speed characteristics of the three-phase induction motor are a couple and are nonlinear. So it is difficult to be able to control torque and speed separately. To overcome these problems, there is a decoupling control method that will separate the control between torque and speed using DTC (Direct Torque Control) by setting the value of the stator flux as a sector selector switching. DCT is a form of vector control. The least square estimation method is used for speed forecasting on induction motors through measurement data of stator flux and rotor flux which are regressed into non-linear form to monitor motor speed. Based on tests using simulations, the results show that when an induction motor is given a torque load, the torque response changes (tracking) the torque response of the induction motor can follow these changes. Where the characteristic value of the response transient, time constant (τ) is 0.082 seconds, the rise time (T_R) is 0.242 seconds and the settling time (T_s) is 0.246 seconds.

Key Words : Induction Motor, Vector Control, DTC, *Least Square*

1. PENDAHULUAN

Motor listrik merupakan suatu peralatan yang paling banyak penggunaan sebagai penggerak elektrik dalam kehidupan sehari-hari baik di rumah maupun di industri. Pada penggunaannya motor AC (*Alternating Current*) diaplikasikan untuk putaran konstan sedangkan motor

DC (*Direct Current*) untuk putaran yang variabel. Motor induksi yang merupakan bagian dari motor AC memiliki kelebihan berupa struktur konstruksi yang kokoh, harga yang terjangkau, dan perawatannya yang relatif mudah. Tetapi juga memiliki kelemahan berupa tidak mudah untuk dikendalikan kecepatan dan torsi

dibandingkan dengan pengaturan motor DC. Pada dasarnya pengaturan motor induksi lebih kompleks dari pada motor DC serta kompleksitas tersebut jadi lebih rumit bila performa yang diinginkan lebih baik [1].

Dalam pengaturan kecepatan motor induksi terdapat beberapa metode untuk mengatasi keterbatasan tersebut yaitu dengan metode pengaturan skalar dan vektor. Untuk pengaturan skalar tidak dapat beroperasi dalam keadaan transient state dan membutuhkan pengaturan sudut kecepatan dari fluks, tegangan dan arus, dalam *space vector*. Sedangkan pada pengaturan vektor permasalahan tersebut dapat diatasi karena metode ini dapat bekerja dalam keadaan transient state dan dapat mengatur sudut kecepatan, magnitudo, arus, tegangan, dan fluks. Metode vector terdiri dari beberapa jenis antara lain yaitu FOC (*Field Oriented Control*) yang mengatur kecepatan motor dengan cara mendapatkan umpan balik dari fluks rotor dan DTC (*Direct Torque Control*) yang mempunyai garis besar mengontrol kecepatan motor dengan cara mendapatkan umpan balik dari fluks stator [2].

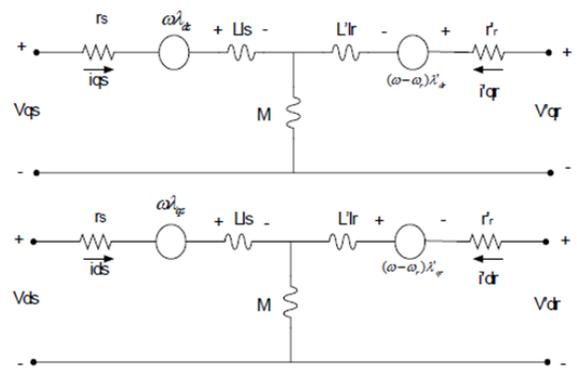
Direct Torque Control (DTC) merupakan metode pengaturan yang mengontrol fluks stator dan torsi secara langsung sehingga didapatkan respon cepat dan kokoh yang diimplementasikan pada motor induksi. Kelebihan dari metode tersebut ialah mempunyai performa dinamik yang baik, pengaturannya lebih sederhana, serta tidak sensitif saat terjadi perubahan parameter, khususnya tahanan stator. Metode DTC memungkinkan secara langsung mengatur kondisi switching pada inverter dengan *Space Vector Modulation* [3].

Pada penelitian ini metode DTC untuk mengatur umpan balik dari torsi motor induksi dan akan dibandingkan dengan kecepatan referensi baik pada kondisi *steady state* maupun saat kondisi terjadi

perubahan beban pada motor. Kemudian Least Square estimator digunakan untuk memprediksi kecepatan motor dengan inputan fluks stator dan fluks rotor.

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini menggunakan metode kualitatif dengan memberikan percobaan dan pengujian terhadap perancang yang telah dilakukan. Perancangan awal dilakukan dengan melaksanakan pemodelan secara matematis terhadap motor induksi. Model matematis di peroleh dari rangkaian ekivalen motor induksi tiga fasa dalam sumbu d-q yang digunakan untuk mempermudah analisa simulasi [4] [5]. Rangkaian motor induksi tiga fasa dalam sumbu d-q dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

Berdasarkan rangkaian tersebut, maka dapat diturunkan menjadi persamaan (1)

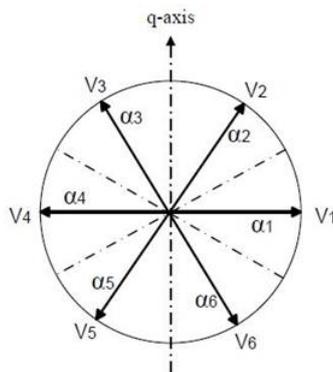
$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega.L_s & pL_m & \omega.L_m \\ -\omega.L_s & R_s + pL_s & -\omega.L_m & pL_m \\ pL_m & (\omega - \omega_r)L_m & R_r + pL_r & (\omega - \omega_r)L_r \\ -(\omega - \omega_r)L_m & pL_m & (\omega - \omega_r)L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

Maka diperoleh bentuk persamaan yang lebih sederhana pada persamaan (2)

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + Q \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

dimana parameter dan variabel $V_{qs} \cdot V_{ds}$ adalah tegangan stator pada sumbu dq (V), $V_{qr} \cdot V_{dr}$ adalah tegangan rotor pada sumbu dq (V), $i_{qs} \cdot i_{ds}$ adalah arus stator pada sumbu dq (A), $i_{qr} \cdot i_{dr}$ adalah arus rotor pada sumbu dq (A), $\lambda_{qs} \cdot \lambda_{ds}$ adalah fluks stator pada sumbu dq (Webber), $\lambda_{qr} \cdot \lambda_{dr}$ adalah fluks rotor pada sumbu dq (Webber), R_s adalah tahanan stator (Ohm), R_r adalah tahanan rotor (Ohm), L_s adalah induktansi stator (Henry), L_r adalah induktansi rotor (Henry) dan L_m adalah induktansi mutual (Henry).

Direct Torque Control merupakan sebuah metode kontrol motor induksi dengan cara mengatur secara langsung perubahan fluks dan torsi berdasarkan estimasi fluks stator yang didapatkan. Putaran fluks stator sebagai arah torsi dapat menghasilkan perubahan cepat dari torsi elektromagnetik. Dengan kata lain fluks stator memberi masukan nilai pada vektor tegangan stator untuk dapat mengatur kecepatan dengan seketika sesuai pemilihan vektor tegangan [6]. Vektor tegangan ditunjukkan pada Gambar 2.



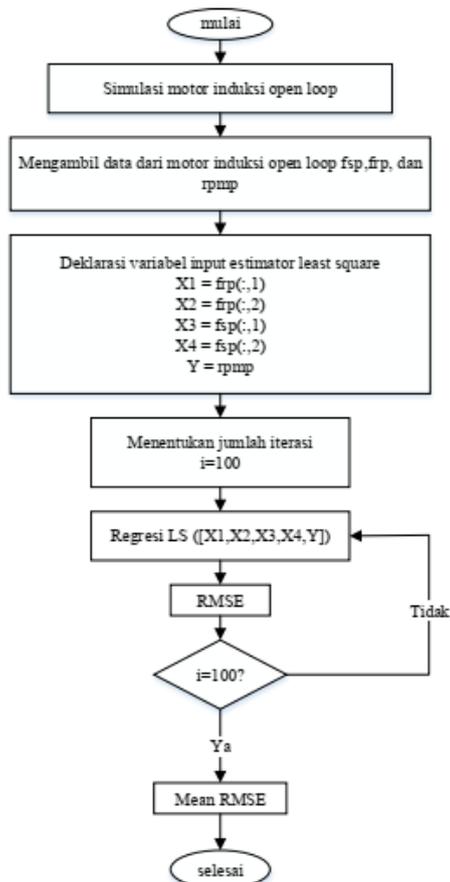
Gambar 2. Vektor Tegangan dan sektor switching

Tabel 1. Switching Tegangan Inverter

Hψ	HTe	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	1	0 0 1	101	100	110	010	011
	0	0 0 0	111	000	111	000	111
	-1	0 1 0	011	001	101	100	110
0	1	1 0 1	100	110	010	011	001
	0	1 1 1	000	111	000	111	000
	-1	1 1 0	010	011	001	101	100

dimana nilai vektor tegangan aktif terdiri dari yaitu $V1 = (100)$; $V2 = (010)$; $V3 = (110)$; $V4 = (001)$; $V5 = (101)$; $V6 = (011)$ Sedangkan vektor tegangan bernilai nol adalah $V0 = (000)$; $V7 = (111)$.

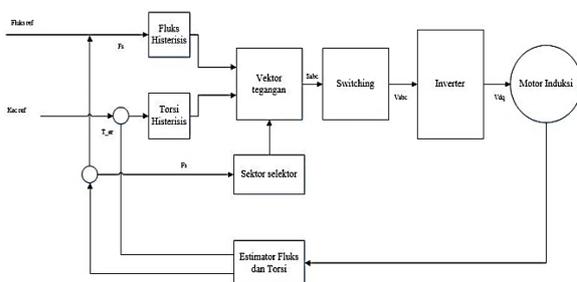
Sebagai mekanisme estimasi nilai kecepatan yang akan digunakan dalam perancangan ini menggunakan least square. Metode ini merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menaksir koefisien regresi. Tujuan utama dari metode ini adalah mengestimasi koefisien regresi untuk meminimumkan jumlah kuadrat galat [7] [8] [9]. Pada penelitian ini *least square* digunakan untuk estimasi perilaku kecepatan motor yang akan datang. Estimator ini merupakan estimator mode observasi yang didapat dari keluaran sistem *open loop* dari motor induksi. Data yang diambil untuk estimasi kecepatan ialah f_s (fluks stator) f_r fluks rotor yang kemudian keluaran tersebut yang digunakan sebagai inputan untuk estimasi kecepatan. Adapun diagram alir dari estimasi *least square* sebagaimana pada Gambar 3.



Gambar 2. Estimasi Least Square

dimana fsp adalah data fluks stator, frp adalah data fluks rotor, rpmp adalah data kecepatan motor, X1, X2 adalah vektor fluks rotor, X3, X4 adalah vektor fluks stator, Y adalah estimasi kecepatan.

Secara keseluruhan dalam perancangan sistem dapat ditunjukkan pada diagram blok pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Blok Sistem

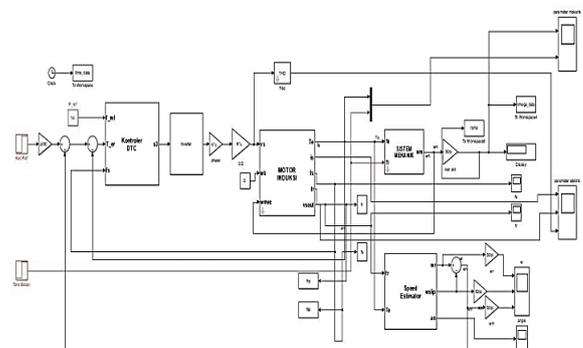
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini untuk menguji metode yang telah dirancang, maka dilakukan simulasi. Model parameter dan variabel motor induksi motor 3 fase yang digunakan sebagaimana pada Tabel 2 [5]. Motor induksi yang digunakan pada penelitian ini sendiri digunakan sebagai penggerak crane.

Tabel 2. Parameter dan Variabel Motor Induksi 3 Fase

No	Parameter dan Variabel	Nominal
1	Kecepatan Nominal	1440 RPM
2	Daya Nominal (P)	7.5 kW
3	Tegangan (V)	380 V
4	Frekuensi (f)	50 Hz
5	Jumlah Pasang Kutub	2
6	Tahanan Stator (Rs)	0,7384 Ohm
7	Tahanan Rotor (Rr)	0,003045 Ohm
8	Induktansi Rotor (Lr)	0.7402 H
9	Induktansi Stator (Lr)	0.003045 H
10	Induktansi Mutual (Lm)	0.1241 H
11	Inersia (J)	0,0343 kg/m ²
12	Faktor Friksi	0.000503 N.m.s/rad

Perancangan berupa model dari motor induksi 3 fase dan vektor control selanjutnya dilakukan simulasi untuk menguji metode. Simulasi menggunakan software Simulink Matlab. Adapun hasil perancangan yang dilakukan sebagaimana terdapat pada Gambar 4.

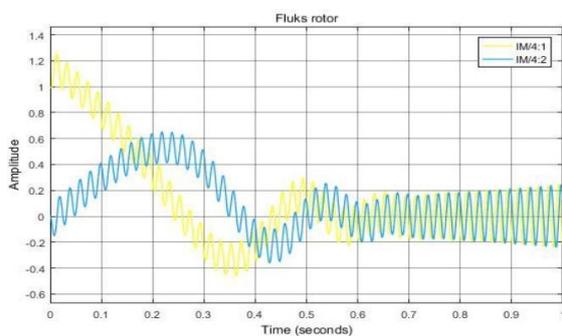


Gambar 4. Perancangan Simulasi DTC Motor Induksi

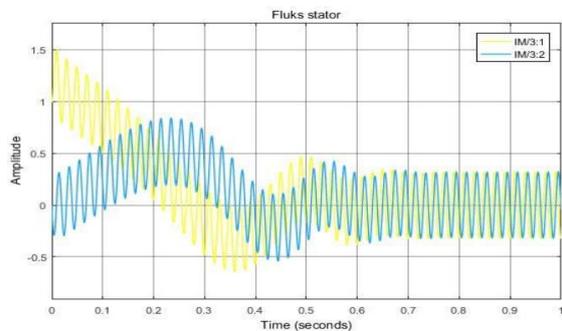
Pada pengujian dilakukan beberapa skenario untuk mengetahui hasil dari perancangan. Pengujian dilakukan dari mulai motor induksi dan pengujian kontroller tanpa beban dan berbeban.

a. Pengujian Motor Induksi

Pada pengujian ini dilakukan dengan memberikan tegangan nominal pada motor 3 fasa sebesar 380 V. Kemudian dianalisa nilai keluaran *fluks* rotor, *fluks* stator, arus, kecepatan dan Torsi. Hasil sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, 6, 7, 8 dan 9.

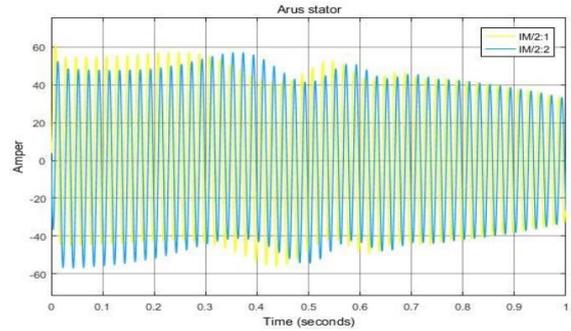


Gambar 5. Fluks Rotor Koordinat d-q



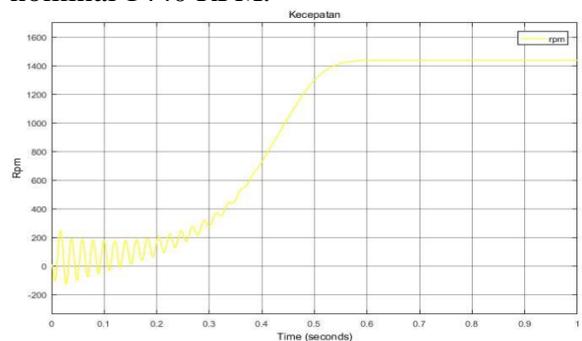
Gambar 6. Fluks Stator Koordinat d-q

Berdasarkan Gambar 5 menunjukkan bahwa hasil output dari fluks rotor koordinat d (IM/4:1) dan koordinat q (IM/4:2). Untuk fluks rotor koordinat d mempunyai nilai awal sebesar 1,5 Wb kemudian pada saat 0,6 detik akan menuju nilai *steady state* sebesar $\pm 0,38$ Wb. Untuk fluks rotor koordinat q mempunyai nilai awal sebesar $\pm 0,38$ Wb kemudian akan mengalami flukstuasi perubahan pada saat selang waktu 0,6 detik akan menuju nilai *steady state* sebesar $\pm 0,38$ Wb.

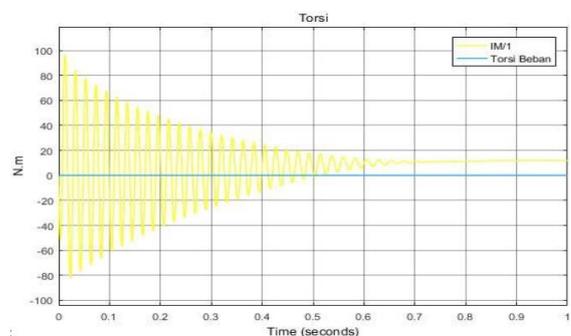


Gambar 7. Arus Pada Koordinat d-q

Pada Gambar 7 menunjukkan sinyal output dari arus stator dimana pada saat motor starting awal arus mencapai 60 A. Arus akan terus menurun saat kondisi telah mencapai *steady state* dengan nominal ± 20 A. Terlihat pada Gambar 8 menunjukkan, bahwa saat *starting* awal motor induksi mengalami *ripple starting* yang sangat tinggi hal itu juga mempengaruhi panas pada motor dan mempengaruhi waktu *steady state* yang mencapai sebesar 0.6 detik sampai menuju kondisi *steady state* dengan kecepatan nominal 1440 RPM.



Gambar 8. Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa

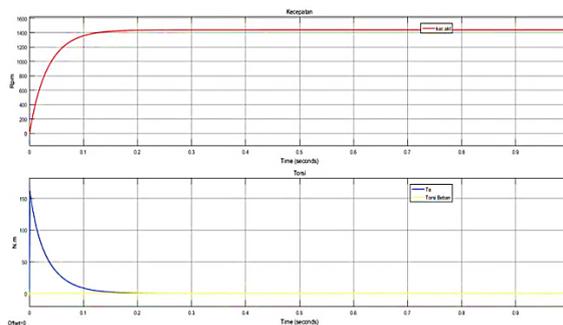


Gambar 9. Torsi Motor Induksi 3 Fasa

Pada Gambar 9 menunjukkan respon sinyal torsi motor induksi. Pengujian dilakukan dalam kondisi tidak berbeban. Terlihat bahwa saat starting torsi motor induksi mencapai ± 96 N.m dan pada saat steady state torsi beban turun sekitar ± 15 N.m. Berdasarkan simulasi pengujian ini menunjukkan, bahwa keluaran dari response motor induksi sudah sesuai dengan variable yang terdapat pada spesifikasinya.

b. Pengujian DTC Tanpa Beban

Pada pengujian ini dilakukan untuk menguji perancangan controller DTC. Pengujian dilakukan dengan *set point* kecepatan nominal 1440 RPM dalam kondisi tanpa beban dengan memberikan referensi fluk 0,996 Wb. Hasil response kecepatan dan torsi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10.

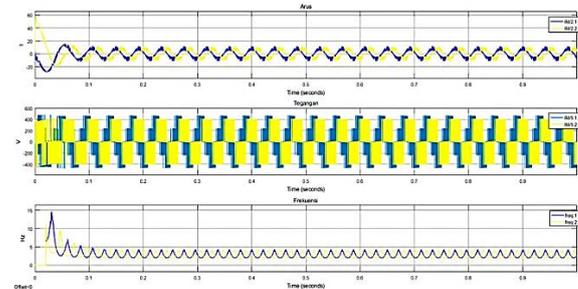


Gambar 10. Kecepatan dan Torsi Motor Induksi 3 Fasa

Berdasarkan Gambar 10 menunjukkan response kecepatan motor induksi dapat mencapai kondisi kecepatan nominal dalam waktu 0,17 detik. Pada saat starting awal torsi bernilai sebesar ± 161 N.m yang kemudian seiring waktu turun saat motor akan ke kondisi *steady state* bernilai 0 N.m sesuai dengan kondisi tanpa beban. Motor memerlukan waktu sekitar $\pm 0,26$ detik dari kondisi starting menuju kondisi *steady state* dengan time constan (τ) 0,164 detik, *rise time* (T_R) 0,484 detik dan *settling time* (T_S) 0,493 detik.

Untuk respons keluaran dari arus, tegangan dan frekuensi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11. Berdasarkan gambar

response tersebut menunjukkan bahwa, saat starting arus sangat tinggi hingga mencapai $\pm 55,5$ A, tegangan sebesar 363 V, dan frekuensi sebesar 14,6 Hz. Pada kondisi motor *steady state* arus turun menjadi $\pm 11,2$ A, tegangan naik menjadi ± 472 V dan frekuensi turun menjadi $\pm 4,2$ Hz.



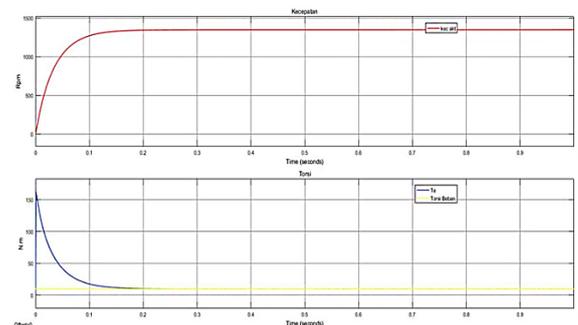
Gambar 11. Response Arus, tegangan dan frekuensi dalam koordinat d-q

c. Pengujian DTC dengan Beban

Pada pengujian ini dilakukan beberapa skenario untuk dapat mengetahui performa dari kontrol yang dilakukan. Jenis skenario yang dilakukan berupa pengujian dengan menggunakan beban tetap dan berubah. Beban motor induksi 3 fasa yang digunakan untuk sebuah *crane* untuk mengangkat sebuah beban berupa benda.

• Pengujian DTC Beban Tetap

Pada pengujian pertama diberikan beban tetap dengan nominal 9,64 N.m. Hasil response dan kecepatan ditunjukkan pada Gambar 12.

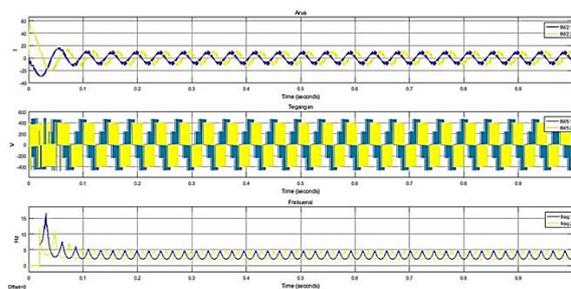


Gambar 12. Response Kecepatan dan Torsi Motor Induksi 3 Fasa

Pada saat starting torsi bernilai sebesar ± 162 N.m yang kemudian seiring waktu turun saat motor akan ke kondisi *steady*

state. Respon torsi motor memerlukan waktu sebesar 0,24 detik dari kondisi starting sampai kondisi *steady state* dengan time constan (τ) 0,152 detik, *rise time* (T_R) 0,447 detik dan *settling time* (T_S) 0,455 detik. Pada saat kondisi *steady state* motor berputar di kecepatan 1348 RPM dikarenakan terdapat beban.

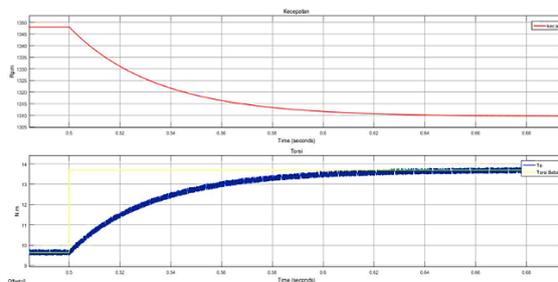
Untuk respons keluaran dari arus, tegangan dan frekuensi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13. Berdasarkan respons tersebut saat starting arus tinggi hingga mencapai $\pm 55,6$ A, tegangan sebesar 363 V, dan frekuensi sebesar 16,6 Hz. Pada saat kondisi motor *steady state* arus turun menjadi $\pm 11,9$ A, tegangan naik menjadi ± 470 V dan frekuensi turun menjadi $\pm 4,5$ Hz.



Gambar 13. Response Arus, tegangan dan frekuensi dalam koordinat d-q

• **Pengujian DTC Beban Berubah (*Tracking*)**

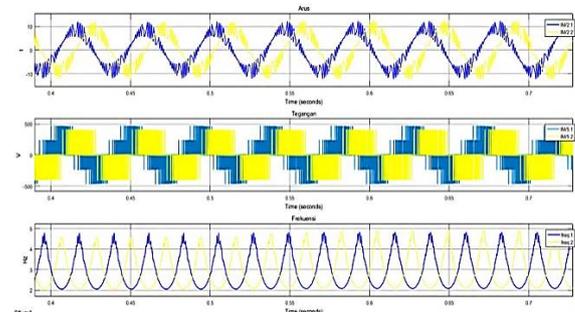
Pada pengujian kedua dilakukan skenario pengoperasionalan *crane* dengan beban berubah. Saat kondisi awal beban bernilai 9,64 N.m kemudian beban berubah menjadi 13,7 N.m. Hasil respons dan kecepatan ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Response Kecepatan dan Torsi Motor Induksi 3 Fasa

Respon torsi motor induksi mampu menyesuaikan dengan beban dengan memakan waktu sekitar 0,13 detik dimana pembebanan awal bernilai 9,64 Nm ke 13,7 N.m. Dimana *time constan* (τ) 0,082 detik, *rise time* (T_R) 0,242 detik dan *settling time* (T_S) 0,246 detik. Berdasarkan percobaan ini saat beban 9,64 N.m motor di kecepatan 1348 yang kemudian turun ke 1310 dan membutuhkan waktu sekitar $\pm 0,13$ detik untuk motor tetap stabil.

Untuk respons keluaran dari arus, tegangan dan frekuensi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 15. Berdasarkan respons tersebut saat pembebanan awal arus bernilai sebesar $\pm 11,9$ A yang kemudian naik dikarenakan beban bertambah menjadi $\pm 12,2$ A. Tegangan yang semula bernilai sebesar 470 V turun menjadi 469 V pembebanan pada motor tidak begitu berpengaruh pada nilai tegangan. Sedangkan pada frekuensi yang awalnya bernilai 4,85 Hz menjadi 4,8 Hz.



Gambar 15. Response Arus, tegangan dan frekuensi dalam koordinat d-q

Hasil karakteristik respon transient dari berbagai pengujian yang telah dilakukan dapat dirangkum dalam Tabel 3.

Tabel 3. Hasil karakteristik respon transient pengujian sistem

Kondisi	Time Constan (τ)	Rise Time (T_R)	Settling Time (T_S)
Tanpa Beban	0.164	0.484	0.493
Beban Tetap	0.152	0.447	0.455
Beban Berubah(<i>Tracking</i>)	0.082	0.242	0.246

4. SIMPULAN

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan dapat diperoleh, bahwa penggunaan metode DTC pada motor induksi 3 fasa untuk pengendalian torsi mempunyai performa yang baik. Pada saat digunakan penggerak *crane* dalam kondisi berbeban mempunyai nilai karakteristik response transient *time constan* (τ) 0,082 detik, *rise time* (T_R) 0,242 detik dan *settling time* (T_S) 0,246 detik. Dimana kecepatan motor bervariasi sesuai dengan perubahan beban. Hasil tersebut membuat perancangan DTC untuk pengendalian motor induksi 3 fasa sebagai penggerak *crane* dapat berjalan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Harrij Mukti K, "Implementasi Direct Torque Control Dalam Pengaturan Kecepatan Motor Induksi," *Jurnal ELTEK*, vol. 12, no. 1, pp. 64–73, Apr. 2014.
- [2] V. K. Alvi, E. Wahjono, O. A. Qudsi, and J. Timur, "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan Metode Direct Torque Control," vol. 2, no. 3, p. 9, 2020.
- [3] Alva Brisbananda Ashari, "Kontrol Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Metode Field Orientation Control (FOC) Berbasis Fuzzy-PID," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 9, no. 3, pp. 763–771, 2020.
- [4] U. Khasanah, S. Supari, and S. Heranurweni, "Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Direct Torque Control Menggunakan Matlab," *elektrika*, vol. 9, no. 1, p. 13, Dec. 2018, doi: 10.26623/elektrika.v9i1.1109.
- [5] R. Ridwan, E. Purwanto, H. Oktavianto, M. R. Rusli, and H. Toar, "Desain Kontrol Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Fuzzy Pid Berbasis Idirect Field Oriented Control," *Jl*, vol. 11, no. 2, pp. 146–155, Oct. 2019, doi: 10.30871/ji.v11i2.1356.
- [6] E. Sunarno, S. Soebagio, and M. H. Purnomo, "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tanpa Sensor Kecepatan dengan Metoda Direct Torque Control Menggunakan Observer Recurrent Neural Network," *jte*, vol. 8, no. 2, pp. 88–95, Apr. 2010, doi: 10.9744/jte.8.2.88-95.
- [7] W. S. Pambudi, E. A. Zuliari, R. A. Firmansyah, Y. A. Prabowo, and A. Syaifurrizal, "Identification of Flip Folder Model on Folding Machine," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 462, p. 012009, Jan. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/462/1/012009.
- [8] Y. A. Prabowo, R. I. Imaduddin, W. S. Pambudi, R. A. Firmansyah, and A. Fahruzi, "Identification of automatic guided vehicle (agv) based on magnetic guided sensor for industrial material transfer," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1010, p. 012028, Jan. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1010/1/012028.
- [9] Y. A. Prabowo, W. S. Pambudi, and I. R. Imaduddin, "Identification of the Flip Folder Folding Machine Using Artificial Neural Network with Nonlinear Autoregressive Exogenous Structure," vol. 5, no. 2, p. 6, 2020.