

Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan Metode Direct Torque Control

Vania Kurnia Alvi¹, Endro Wahjono², Ony Asrarul Qudsi³

^{1,2,3}Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jl. Raya ITS, Keputih, Kecamatan Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

email: vaniakurniaalvi@gmail.com¹, endro@pens.ac.id², ony@pens.ac.id³

Abstrak - Pada penelitian ini dilakukan pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan *vector control* menggunakan metode *Direct Torque Control*. Pada metode *vector control*, pengaturan kecepatan dapat dilakukan dengan mudah karena sistem dibuat seolah-olah menyerupai karakteristik motor DC, di mana pengaturan fluks dan torsi dapat dilakukan secara terpisah. Sistem pada metode *Direct Torque Control*, didasarkan pada pengaturan fluks dan torsi menggunakan Estimator DTC untuk menghasilkan nilai fluks dan torsi estimasi. Selanjutnya, keluaran dari estimator beserta sektor sudut fluks stator akan menentukan vektor tegangan yang sesuai dengan metode *switching Sinusoidal Pulse Width Modulation Inverter*, sehingga keluaran dari inverter dapat mengatur kecepatan putaran motor. Untuk memperbaiki hasil respon kecepatan putaran motor digunakan kontroler PID. Penelitian ini dilakukan melalui simulasi menggunakan MATLAB. Motor induksi yang digunakan, memiliki daya 4 KW dengan tegangan 400 Vrms dan kecepatan putaran nominal 1430 RPM. Pengujian dilakukan pada kondisi tanpa beban dan juga berbeban untuk mengetahui performansi sistem. Hasil simulasi menunjukkan nilai *rise time* 0,08 detik, nilai *settling time* 0,37 detik, dan nilai *overshoot* mencapai 14,11 %.

Kata Kunci - Motor induksi, *direct torque control*, inverter.

Abstract - In this research, a three-phase induction motor speed control was carried out using the *Direct Torque Control* method. In this *vector control* method, speed regulation can be done easily because the system is made as if it resembles the characteristics of a DC motor, where the torque and flux regulation can be done separately. The system in the *Direct Torque Control* method, is based on flux and torque control using the DTC Estimator to produce the estimated flux and torque values. Furthermore, the output of the estimator along with the stator flux angle sector will determine the voltage vector according to the *Sinusoidal Pulse Width Modulation Inverter* switching method, so that the output from the inverter can adjust the rotation speed of the motor. To improve the result of the speed response, PID controller is used. This research was conducted with a simulation using MATLAB. The induction motor used has a power of 4 KW with a voltage of 400 Vrms and a nominal rotation speed of 1430 RPM. The test is carried out at no load and also under load conditions to determine system performance. The simulation results show a *rise time* value of 0.08 seconds, a *settling time* value of 0.37 seconds, and an *overshoot* value equal to 14.11%.

Keywords - Induction motor, *direct torque control*, inverter.

I. PENDAHULUAN

Motor induksi merupakan jenis motor listrik yang paling banyak digunakan, khususnya dalam dunia industri. Motor induksi memiliki banyak kelebihan jika dibandingkan dengan motor DC. Kelebihan motor induksi di antaranya yaitu memiliki konstruksi yang sederhana dan kokoh, tidak memerlukan perawatan khusus, serta harganya relatif terjangkau. Meskipun demikian, pengaturan kecepatan motor induksi lebih sulit dilakukan daripada motor DC.

Hal ini disebabkan karena torsi dan fluks pada motor induksi tidak dapat dikendalikan secara langsung seperti halnya karakteristik fluks dan stator pada motor DC. Selain itu, motor induksi memiliki sifat yang non-linier, mudah dipengaruhi oleh perubahan parameter motor, dan kesulitan dalam pemrosesan sinyal umpan balik [1]. Dengan menggunakan metode *Direct Torque Control*, maka pengaturan fluks dan torsi dapat dilakukan secara langsung. Hal tersebut dikarenakan sistem dibuat seolah-olah menyerupai motor DC, di mana fluks dan torsi dapat diatur secara terpisah [2]. Pada sistem terdapat inverter untuk menyuplai tegangan pada motor induksi tiga fasa. Pada inverter digunakan teknik *switching* menggunakan *Sinusoidal Pulse Width Modulation (SVPWM)*. Teknik *switching* SVPWM digunakan untuk menjaga *switching frequency* pada inverter tetap konstan, meskipun terdapat distorsi pada torsi dan fluks.

Selanjutnya, respon kecepatan yang didapatkan akan diperbaiki menggunakan kontroler PID. Pengujian dilakukan dengan dua kondisi yaitu kondisi tanpa beban dan kondisi berbeban dengan variasi pembebanan yang berbeda. Melalui sistem *Direct Torque Control* diharapkan dapat diperoleh pengaturan kecepatan motor induksi, di mana kecepatan motor mampu menyesuaikan dengan kecepatan referensi yang diberikan baik dalam kondisi tanpa beban maupun berbeban.

II. METODE

A. Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa dalam sistem ini dimodelkan ke dalam bentuk koordinat dq. Hal ini dilakukan karena motor akan lebih fleksibel dan mudah dianalisa baik dalam kondisi *steady state* maupun kondisi *transient* [3]. Pemodelan motor induksi dapat dilakukan dengan Persamaan 1 [3].

$$\begin{aligned} V_{qs} &= r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \\ V_{ds} &= r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \\ V'_{qr} &= r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \\ V'_{dr} &= r'_r i'_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \end{aligned} \quad (1)$$

Persamaan 2 merupakan rumus fluks dalam kumparan [3]:

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= L_{ls} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \\ \lambda'_{qr} &= L'_{lr} i'_{qr} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \\ \lambda'_{dr} &= L'_{lr} i'_{dr} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \end{aligned} \quad (2)$$

Torsi elektromagnetik yang dihasilkan pada motor dapat dihitung melalui Persamaan 3 [3]:

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \\ T_e - T_L &= \frac{2J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

Torsi elektromagnetik akan diperoleh melalui persamaan (3) dengan nilai tegangan dan arus stator pada sumbu dua fasa.

B. Direct Torque Control

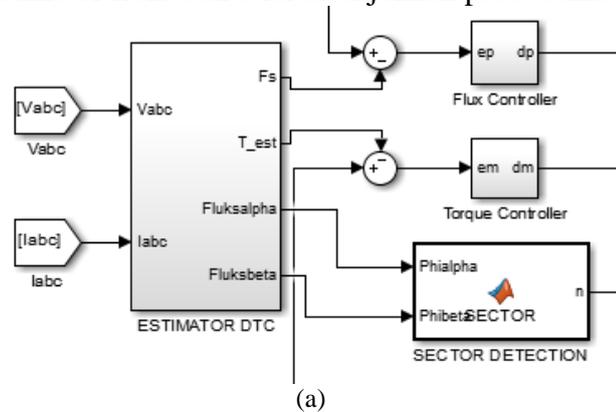
Direct Torque Control (DTC) merupakan salah satu metode pengaturan kecepatan pada motor induksi. Melalui metode ini, dapat dilakukan pengaturan kecepatan secara langsung dengan mengontrol fluks stator dan torsi, sehingga diperoleh nilai estimasi kecepatan tanpa menggunakan sensor kecepatan [4]. Kelebihan yang dimiliki oleh pengaturan kecepatan metode DTC, di antaranya yaitu:

1. Tidak membutuhkan kontrol umpan balik arus
2. Tidak membutuhkan algoritma PWM konvensional

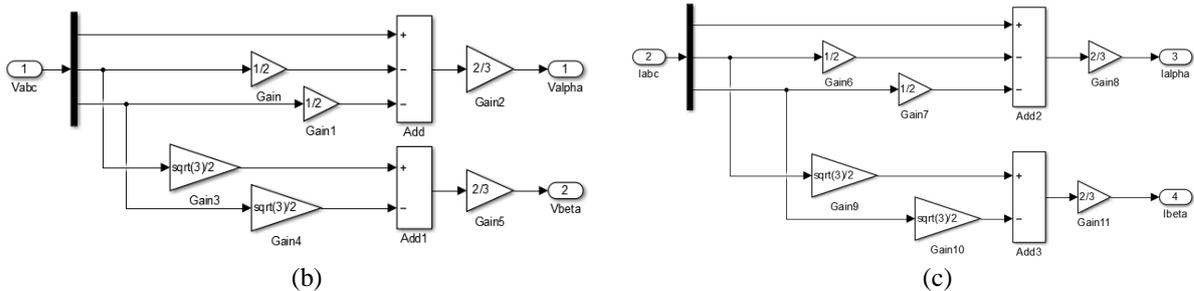
3. Tidak membutuhkan transformasi vektor
4. Proses sinyal umpan balik hampir sama dengan kontrol fluks stator [5]

C. *Estimator DTC*

Masukan estimator DTC berupa tegangan dan arus stator dengan besaran tiga fasa. Selanjutnya, besaran 3 fasa tersebut akan ditransformasikan menjadi 2 fasa. Perubahan ini dilakukan sesuai dengan Transformasi Clark dan Transformasi Park. Tegangan dan arus yang dihasilkan kemudian digunakan untuk menghitung nilai fluks stator, torsi dan kecepatan estimasi pada motor. Estimator fluks dan torsi ditunjukkan pada Gambar 1 (a).



Blok transformasi tegangan dan arus besaran tiga fasa menjadi besaran dua fasa ditunjukkan pada Gambar 1 (b) dan (c). Konversi tegangan dan arus ke dalam dua fasa dibutuhkan karena persamaan tegangan dan arus stator berada pada sumbu dq.



Selanjutnya, menentukan nilai fluks stator dan torsi estimasi yang ditunjukkan seperti pada Gambar 1 (d).

Fluks stator estimasi dapat dihitung melalui Persamaan 4 dan 5 [6].

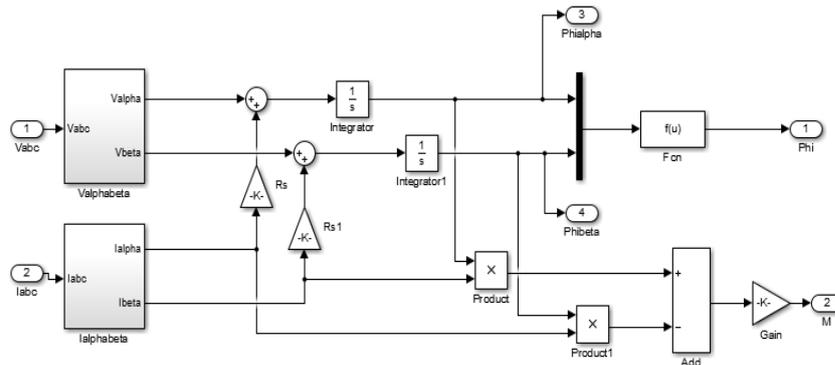
$$\Psi_{qs} = \int (V_{qs} - I_{qs} \cdot R_s) dt \tag{4}$$

$$\Psi_{ds} = \int (V_{ds} - I_{ds} \cdot R_s) dt \tag{5}$$

Di mana Δt adalah periode sampling, kemudian nilai magnitude dan sudut fluks stator dihitung dengan Persamaan 6 dan 7 [6].

$$|\Psi_s| = \sqrt{\Psi_{ds}^2 + \Psi_{qs}^2} \tag{6}$$

$$\alpha = \Delta \Psi_s = \tan^{-1} \frac{\Psi_{qs}}{\Psi_{ds}} \tag{7}$$

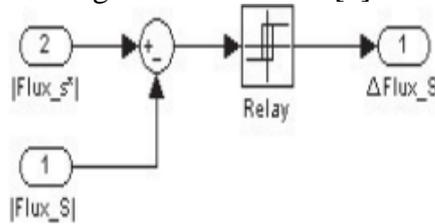


(d)

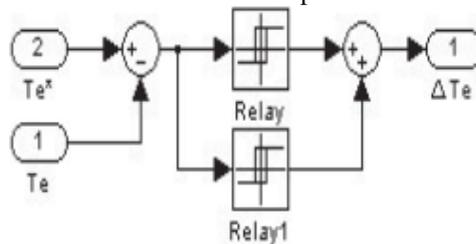
Gambar 1. (a) Blok Estimator DTC, (b) Blok Tranformasi Tegangan Tiga Fasa ke Sumbu Dua Fasa, (c) Blok Tranformasi Arus Tiga Fasa ke Sumbu Dua Fasa, (d) Blok Perhitungan Nilai Fluks dan Torsi Estimasi

D. Komparator DTC

Komparator DTC digunakan sebagai pembanding antara nilai fluks stator dan torsi referensi dengan nilai estimasi. Selisih dari nilai referensi dan estimasi masing-masing dikontrol menggunakan perbandingan histerisis. Fluks torsi dikontrol menggunakan penyesuaian dua titik, yang bernilai -1 dan 1. Torsi dikontrol menggunakan penyesuaian tiga titik, yang bernilai -1, 0, dan 1 [7]. Jika nilai fluks dan torsi melebihi atau kurang dari batas histerisis yang ditetapkan, maka akan dilakukan pemilihan vektor tegangan yang sesuai hingga hasil mendekati atau hampir sama dengan nilai referensi [8].



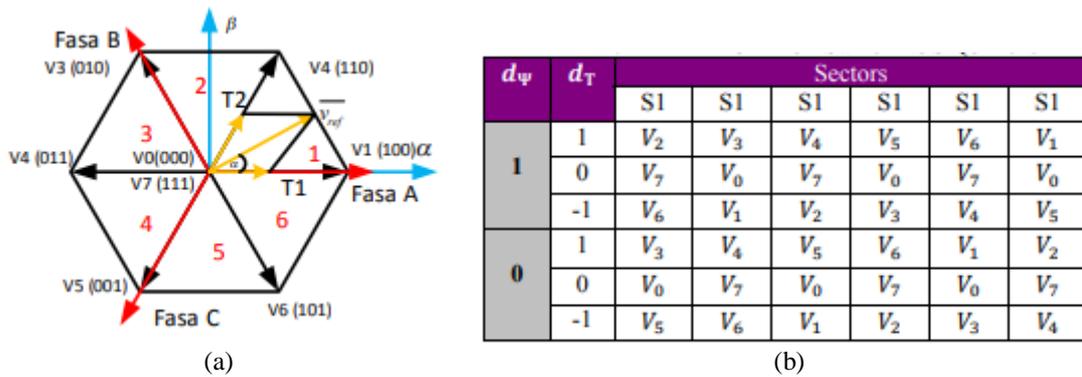
Gambar 2. Komparator fluks



Gambar 3. Komparator Torsi

E. Sinusoidal Pulse Width Modulation

Teknik *switching* SVPWM merupakan salah satu teknik penyaklaran pada inverter VSI. Teknik ini menghasilkan delapan vektor tegangan yang terdiri dari enam vektor tegangan aktif dan dua vektor tegangan bernilai 0. Vektor tersebut membentuk bidang heksagonal seperti pada Gambar 4 (a). SVPWM memberikan tegangan dengan periode sampling tertentu pada inverter. Kombinasi dari vektor tegangan didasarkan sesuai dengan tabel vektor tegangan atau *switching table* yang ditunjukkan pada Gambar 4(b). Tegangan ini digunakan untuk membangkitkan komponen *switching*. Dengan menggunakan *Switching Table*, kombinasi vektor tegangan dapat menghasilkan nilai tegangan rata-rata pada inverter yang hasilnya sama dengan tegangan referensinya [9].



Gambar 4. (a) Dasar pensaklaran vektor dan sektor (b) *Switching table*

Gambar 4(b) menunjukkan hubungan antara vektor tegangan inverter dengan sektor fluks stator. Dalam *Voltage Source Inverter (VSI)*, terdapat 8 nilai vektor tegangan yang terdiri dari 6 vektor tegangan bernilai bukan nol ($V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$), dan 2 vektor tegangan bernilai nol (V_0, V_7). Prinsip kerja pada SVPWM, yaitu ketika terdapat dua tegangan seperti pada sektor 1 ($0^\circ-60^\circ$) seperti pada Gambar 4(a), maka V_1 akan menghasilkan periode T_1 , V_2 menghasilkan periode T_2 , dan vektor tegangan nol yaitu V_0 dan V_7 digunakan untuk menghasilkan T_0 . Dari kombinasi beberapa vektor tegangan tersebut kemudian didapatkan nilai periode *switching* melalui Persamaan 4 dan 8 sebagai berikut [10] :

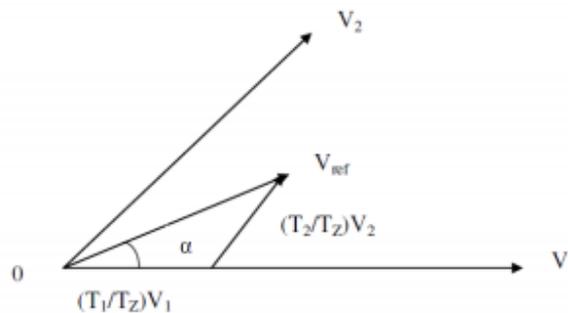
$$T_s = T_1 + T_2 + T_0 \tag{8}$$

$$T_1 = T_s \times A \times \frac{\sin(\frac{\pi}{3}-\alpha)}{\sin(\frac{\pi}{3})} \tag{9}$$

$$T_2 = T_s \times A \times \frac{\sin \alpha}{\sin(\frac{\pi}{3})} \tag{10}$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \tag{11}$$

$$A = \frac{V_{ref}}{V_{dc}} \tag{12}$$



Gambar 5. Vektor referensi pada kombinasi kedua vektor tegangan SVPWM

F. Kontroler PID

Kontroler PID berfungsi untuk memperbaiki performansi kecepatan putaran motor induksi tiga fasa. Kontroler ini memiliki parameter di antaranya proporsional, integral dan differensial. Keluaran sinyal PID dirumuskan dengan Persamaan 9 dapat dihitung melalui Persamaan 13 [11]:

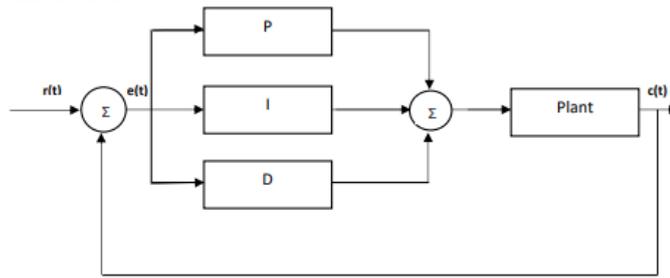
$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) + K_d \cdot de(t)/dt \tag{13}$$

Dengan:

$u(t)$ = Sinyal keluaran kontroler PID

K_p = Konstanta proporsional

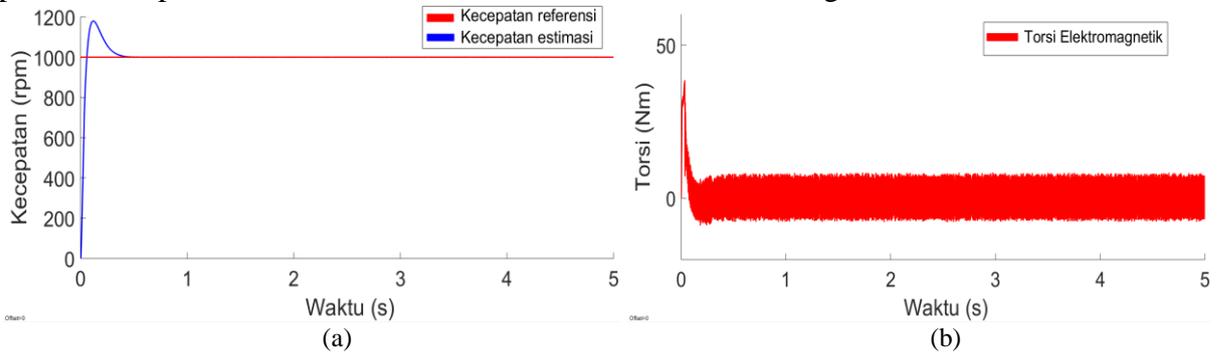
K_i = Konstanta integral
 K_d = Konstanta differensial



Gambar 6. Kontroler PID

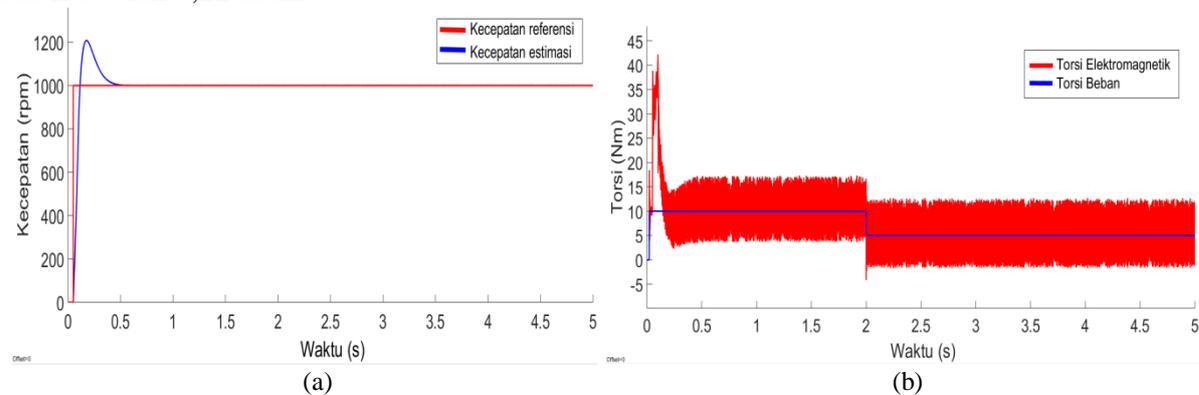
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, diperoleh hasil simulasi pada sistem pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode DTC. Simulasi dilakukan menggunakan simulink pada Matlab. Pengujian dilakukan pada dua keadaan ketika sistem dijalankan tanpa beban dan berbeban. Pada simulasi digunakan kontroler PID untuk memperbaiki respon kecepatan motor dengan parameter $K_p = 450$, $K_i = 4500$, $K_d = 11,25$ melalui metode Ziegler-Nichols.



Gambar 3. (a) Respon kecepatan saat kondisi tanpa beban. (b) Torsi Elektromagnetik saat kondisi tanpa beban.

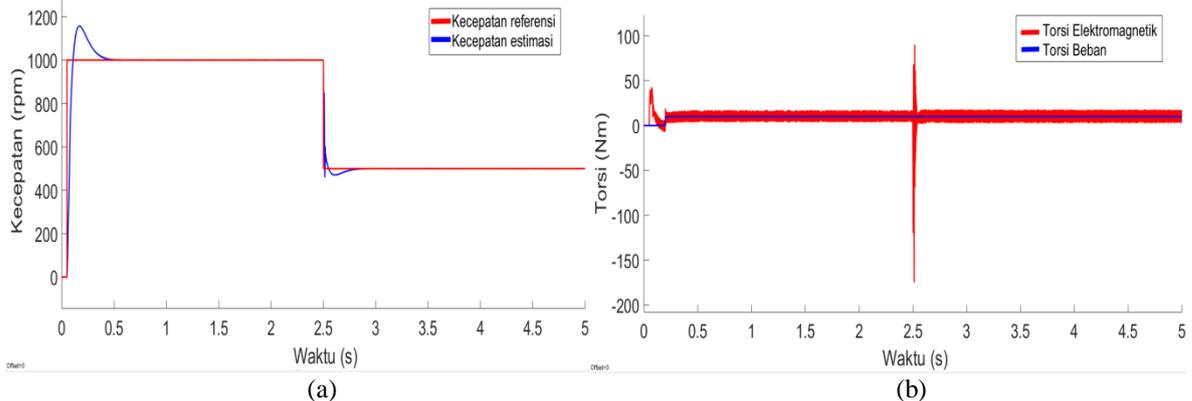
Pengujian kondisi tanpa beban pada Gambar 3 (a) dan (b), dilakukan dengan memberikan kecepatan referensi sebesar 1000 RPM. Kemudian diamati hasil simulasi berupa respon kecepatan pada Gambar 3 (a) yang terukur sebesar 1000 RPM dan torsi elektromagnetik pada Gambar 3 (b). Ketika kondisi *starting*, torsi elektromagnetik dapat mencapai 40 Nm, dan akan stabil setelah 0,22 detik.



Gambar 4. (a) Respon kecepatan saat kondisi berbeban. (b) Torsi Elektromagnetik saat kondisi berbeban.

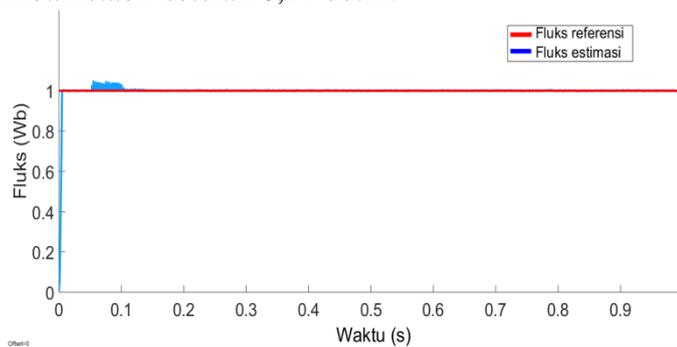
Pengujian pada kondisi berbeban ditunjukkan melalui Gambar 4 (a) dan (b), diberikan torsi beban sebesar 10 Nm dan 5 Nm pada kecepatan 1000 RPM. Diperoleh grafik respon kecepatan seperti pada Gambar 4 (a) di mana respon kecepatan estimasi mampu mencapai kondisi *steady*

state dalam waktu 0,66 detik. Torsi elektromagnetik ditunjukkan pada Gambar 4 (b), diketahui bahwa terjadi penurunan torsi beban hingga 5 Nm dan mencapai *steady* setelah 0,02 detik.



Gambar 5. (a) Respon kecepatan saat kondisi berbeban. (b) Torsi Elektromagnetik saat kondisi berbeban.

Pengujian selanjutnya yaitu pada kondisi berbeban ditunjukkan melalui Gambar 5 (a) dan (b) dengan variasi kecepatan referensi yang diberikan. Kecepatan referensi diberikan sebesar 1000 RPM, kemudian setelah 2,5 detik, kecepatan diturunkan menjadi 500 RPM. Respon kecepatan motor setelah terjadi penurunan kecepatan memerlukan waktu 0,49 detik untuk kembali stabil ditunjukkan pada Gambar 5 (a). Selanjutnya, torsi elektromagnetik yang ditunjukkan pada gambar 5 (b) mengalami *ripple* yang cukup besar ketika respon mencapai 2,5 detik. Torsi dapat kembali stabil setelah 0,24 detik.



Gambar 6. Fluks referensi dan fluks estimasi

Respon fluks estimasi yang diperoleh dari pengujian pada kondisi tanpa beban ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan hasil simulasi, sistem mampu menyesuaikan nilai fluks referensi yang diberikan sebesar 1 Wb, sehingga diperoleh nilai fluks estimasi sebesar 1,00 Wb. Terdapat sedikit *ripple* pada respon fluks estimasi pada selang waktu 0,6-0,12 detik. Selanjutnya, fluks estimasi dapat stabil kembali pada nilai 1 Wb setelah 0,12 detik.

IV. KESIMPULAN

Hasil simulasi pengaturan kecepatan pada motor induksi tiga fasa menggunakan *Direct Torque Control* berhasil dilakukan, kemudian diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengujian kondisi tanpa beban, pada kecepatan referensi 1000 rpm, diperoleh nilai *rise time* 0,08 detik, *overshoot* 14,11 %, *settling time* 0,37 detik.
2. Pengujian kondisi berbeban, pada kecepatan referensi 1000 rpm, dengan perubahan pembebanan dari 10 Nm menjadi 5 Nm diperoleh nilai *rise time* 0,048 detik, *overshoot* 21,34 %, *settling time* 0,39 detik.

3. Pengujian kondisi berbeban, dengan torsi beban 10 Nm, dan perubahan kecepatan dari 1000 rpm menjadi 500 rpm diperoleh nilai *rise time* 0,026 detik, *overshoot* 19,68 % dan *settling time* 2,7 detik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang mendukung penelitian ini. Semoga penelitian ini dapat dimanfaatkan untuk perkembangan penelitian selanjutnya dengan baik.

REFERENSI

- [1] Tarequzzaman, Md., Ahmed, S., and Moznuzzaman, Md. Performance Improvement of Direct Torque Control Induction Motor Drive using Genetic Algorithm Optimized PI Controller. Proceedings of the 2018 International Conference on Advancement in Electrical and Electronic Engineering (ICAEEE). Gazipur, Bangladesh. 2018: 1–4.
- [2] Yusuf, M., Prasetya, V., Riyanto, S. D., dan Rafiq, A. A. Desain Simulasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan *Switching* Space Vector Pulse Width Modulation. Jurnal Ecotipe. 2019; 6(1): 24–31.
- [3] Wahjono, E. Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Sebagai Penggerak Mobil Listrik Dengan Controller Fuzzy Logic Berbasis Direct Torque Control. Jurnal Ilmiah Mikrotek. 2015; 1(3): 9.
- [4] Mohan, N. Advanced Electric Drives: analysis, control, and modeling using MATLAB/Simulink. John Wiley & Sons, Inc. United States of America. 2014: 130.
- [5] Zahraoui, Y., Fahassa, C., Akherraz, M., and Bennassar, A. Sensorless vector control of induction motor using an EKF and SVPWM algorithm. Proceedings of the 2016 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS). Marrakech, Morocco. 2016: 588–593.
- [6] Brandstetter, P., Kuchar, M., Vo, H. H., and Dong, C. S. T. Induction motor drive with PWM direct torque control. Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Kouty nad Desnou, Czech Republic. 2017: 1-5.
- [7] Aberkane, H., Sakri, D., and Rahem, D. Comparative study of different variants of direct torque control applied to induction motor. Proceedings of the 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC). Hammamet. 2018: 1–6.
- [8] Fu-Cheng, L., Lin, Y., and Jia-Yi, M. Design of fuzzy PI controller for asynchronous motor direct torque. Proceedings of the 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Shenyang, Jun. 2018: 1116–1119.
- [9] Hutabalian, R., dan Hamzah, Amir. Desain dan Analisa Inverter Tiga Fasa Dengan Metode SVPWM Sebagai Penggerak Motor Induksi Tiga Fasa Pada Aplikasi Sepeda Listrik. Jurnal Fteknik. 2016; 3(2): 5.
- [10] Niravadya, V. S., Sam, C. A., and Samuel, E. R. Photovoltaic Pumping System using SVPWM based Induction Motor Drive with a High Gain Converter. Proceedings of the 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). Coimbatore. 2018: 1909–1914.

- [11] Allu, N., dan Salu, S. Aplikasi Penalaan Dengan Metode Ziegler Nichols Di Perancangan Pemandali PID Pada Putaran Motor Dc. Prosiding Seminar Nasional 2018 Sinergitas Multidisiplin Ilmu Pengetahuan dan Teknologi. Makassar. 2018: 5.