

IMPLEMENTASI *DIRECT TORQUE CONTROL* DALAM PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI

Harrij Mukti K¹

Penelitian ini membahas mengenai implementasi *Direct Torque Control* (DTC) yang diterapkan dalam pengaturan kecepatan motor induksi yang ditinjau terhadap pengaruh perubahan parameter tahanan stator dan pembebanan pada motor. Skema *Model Reference Adaptive System* (MRAS) dengan pendekatan back-EMF ditambahkan untuk mengestimasi kecepatan motor.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa skema DTC ini tidak sensitif terhadap perubahan parameter motor. Perubahan parameter tahanan stator ini relatif tidak berpengaruh terhadap kecepatan motor induksi, sedangkan perubahan beban akan mempengaruhi kecepatan motor. Dengan adanya penambahan beban, maka penurunan kecepatan dapat mencapai 7,5%. Pada keadaan tanpa beban diperoleh settling time = 0,03 detik dan error = 0,2%. Dengan bertambahnya beban menyebabkan bertambahnya ripple dan error yang terjadi dapat mencapai 3%.

Kata-kata Kunci: motor induksi, pengaturan kecepatan, *Direct Torque Control*, *Model Reference Adaptive System*

Abstract

This research discusses the implementation of Direct Torque Control (DTC) based on Back-EMF Model Reference Adaptive System (MRAS) to control induction motor speed. Speed estimation was evaluated from the effect of changing parameter of stator resistance and load torque of motor induction.

The simulation results show that DTC is insensitive to motor parameters. Changes in stator resistance has no significant effect on the value of rotor speed estimation of induction motors whereas changing in loads will have an effect on the value of rotor speed estimation of induction motor. Increasing loads will decrease speed estimation by

¹ Harrij Mukti K. Dosen Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Malang

7,5%. At no load condition, settling time is 0.03 seconds and error of 0.2%. At load condition, the ripple is higher than at no load, and the error reaches 3 %.

Keywords: induction motor, speed drive, direct torque control, model reference adaptive system

1. PENDAHULUAN

Selama dekade terakhir ini, telah banyak dilakukan penelitian mengenai sistem pengaturan kecepatan pada motor arus bolak-balik (motor AC) tanpa menggunakan sensor. Motor induksi, khususnya tipe rotor sangkar merupakan motor AC yang banyak digunakan pada industri.

Direct Torque Control (DTC) merupakan salah satu skema kontrol berdasarkan pengontrolan fluks stator dan torsi yang memberikan respon cepat dan *robust* yang diimplementasikan pada motor AC. DTC ini mempunyai kelebihan antara lain lebih sederhana, mempunyai performa dinamik yang baik, serta tidak sensitif terhadap perubahan parameter, khususnya tahanan stator. Sedangkan kelemahan dari DTC ini adalah mempunyai ripple torsi dan respon transien yang lambat selama *start-up* dan karena pembebanan.

Dalam banyak skema pengaturan kecepatan motor, skema *close-loop control* membutuhkan pengukuran kecepatan atau posisi dari motor. Padahal dalam beberapa kasus, penggunaan sensor pengukur kecepatan ini relatif sulit untuk diterapkan, antara lain karena membutuhkan sistem penyambungan yang kompleks antara motor dan driver, biaya yang lebih mahal serta mudah terpengaruh oleh *noise* dan getaran.

Dalam skema *speed sensorless*, kecepatan motor ini akan diestimasi dan digunakan sebagai umpan balik dalam *close-loop speed control*. *Model Reference Adaptive System* (MRAS) merupakan salah satu teknik yang digunakan untuk mengestimasi kecepatan motor. Dalam mengestimasi kecepatan motor, penggunaan MRAS dapat dilakukan dengan beberapa pendekatan, antara lain dengan pendekatan fluks rotor, daya dan *back-EMF*.

Berdasar uraian tersebut maka penelitian ini akan membahas mengenai implementasi DTC yang diterapkan dalam pengaturan kecepatan motor induksi. Sedangkan skema MRAS dengan

pendekatan *back-EMF* ditambahkan untuk mengestimasi kecepatan motor karena pengaruh perubahan tahanan stator dan beban motor; dan Simulasi dengan Program Simulink Matlab digunakan untuk mengetahui unjuk kerja DTC dalam pengaturan kecepatan motor induksi.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Pemodelan Dinamik Motor Induksi

Pemodelan dinamik pada motor induksi tiga fasa dilakukan dengan menggunakan transformasi model tiga fasa (a-b-c) ke model dua fasa (d-q).

Persamaan motor induksi yang dinyatakan dalam *stationary reference frame* dalam satuan per unit, dinyatakan dalam persamaan :

$$\begin{aligned}
 v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{P}{\omega_b} \psi_{qs} \\
 v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{P}{\omega_b} \psi_{ds} \\
 v_{0s} &= R_s i_{0s} + \frac{P}{\omega_b} \psi_{0s}
 \end{aligned} \tag{1}$$

R_s = tahanan stator

$\psi_{qs}, \psi_{ds}, \psi_{0s}$ = fluks stator dalam d-q

i_{qs}, i_{ds}, i_{0s} = arus stator dalam d-q

ω = Kecepatan sudut medan stator

ω_r = Kecepatan sudut putaran rotor

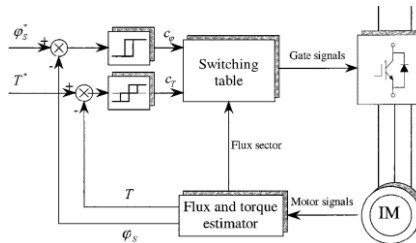
Torsi inerti bila dinyatakan dalam nilai per unit adalah :

$$2H \frac{d(\omega_r / \omega_b)}{dt} = T_{em} - T_L - T_{damp} \tag{2}$$

Dengan T_L adalah torsi beban dan T_{damp} adalah torsi redaman.

2.2 Metode *Direct Torque Control* (DTC)

Metode DTC adalah suatu metode yang digunakan dalam *variable frequency drive* untuk mengontrol torsi dan kecepatan pada motor induksi tiga fasa. Metode ini meliputi perhitungan estimasi fluks dan torsi motor berdasarkan tegangan dan arus pada motor. Fluks stator diestimasi berdasarkan tegangan stator. Torsi diestimasi dari estimator vektor fluks stator dan arus motor. Magnitude fluks dan torsi yang diestimasi kemudian dibandingkan dengan nilai referensinya.



Gambar 1. *Direct Torque Control* (DTC) pada Motor Induksi

DTC ini terdiri dari empat bagian utama, yaitu *Voltage Source Inverter* (VSI), fluks stator dan torsi estimator, tabel switching serta hysteresis fluks dan torque estimator.

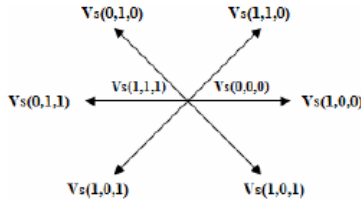
Hysteresis band controller akan menentukan switching vector yang ditunjukkan dalam Tabel 1 untuk mengurangi error fluks stator dan torsi menuju nol.

Tabel 1. Tabel Switching (Ozkop dan Okumus, 2006)

Flux error position	Torque error position	Sector I	Sector II	Sector III	Sector IV	Sector V	Sector VI
1	1	V2 (110)	V3 (010)	V4 (011)	V5 (001)	V6 (101)	V1 (100)
	0	V7 (111)	V0 (000)	V7 (111)	V0 (000)	V7 (111)	V0 (000)
	-1	V6 (101)	V1 (100)	V2 (110)	V3 (010)	V4 (011)	V5 (001)

0	1	V3 (010)	V4 (011)	V5 (001)	V6 (101)	V1 (100)	V2 (110)
	0	V0 (000)	V7 (111)	V0 (000)	V7 (111)	V0 (000)	V7 (111)
	-1	V5 (001)	V6 (101)	V1 (100)	V2 (110)	V3 (010)	V4 (011)

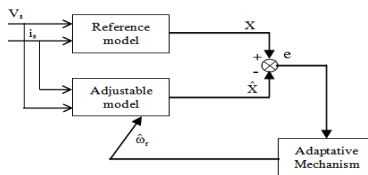
Dalam DTC pemilihan switching vector yang optimal ini sangat penting. Data dalam Tabel 1 menunjukkan berbagai kombinasi torsi dan fluks stator yang dibutuhkan dalam beberapa sektor dengan memilih salah satu dari 8 vektor tegangan yang ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Vektor Tegangan

2.3 Model Reference Adaptive System (MRAS)

Model Reference Adaptive System (MRAS) terdiri atas dua model, yaitu model referensi (*reference model*) dan model adaptif (*adjustable model*). Model referensi adalah model yang tidak dipengaruhi oleh kuantitas nilai yang diestimasi (misal: kecepatan rotor). Model adaptif adalah model yang dipengaruhi oleh nilai yang diestimasi. Keluaran dari model adaptif dibandingkan dengan model referensi, dan perbedaan itu digunakan untuk mengatur mekanisme adaptasi (*adaptive mechanism*) yang keluarannya adalah nilai yang diestimasi (kecepatan rotor).



Gambar 3. Diagram Blok MRAS

2.3.1 MRAS dengan Pendekatan *Back-EMF*

Model referensi yang digunakan adalah (Meziane, Toufouti dan Benalla, 2007) :

$$\begin{aligned} e_d &= v_{sd} - R_s i_{sd} - L_s \dot{i}_{sd} \\ e_q &= v_{sq} - R_s i_{sq} - L_s \dot{i}_{sq} \end{aligned} \quad (3)$$

Model adaptif yang digunakan adalah :

$$\begin{aligned} \hat{e}_d &= \frac{L_m}{L_r} \left(\frac{L_m \dot{i}_{sd} - \hat{\psi}_{rd} - \omega_r T_r \hat{\psi}_{rq}}{T_r} \right) \\ \hat{e}_q &= \frac{L_m}{L_r} \left(\frac{L_m \dot{i}_{sq} - \hat{\psi}_{rq} + \omega_r T_r \hat{\psi}_{rd}}{T_r} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

e_d, e_q : GGL lawan dari model referensi

\hat{e}_d, \hat{e}_q : GGL lawan dari model adaptif

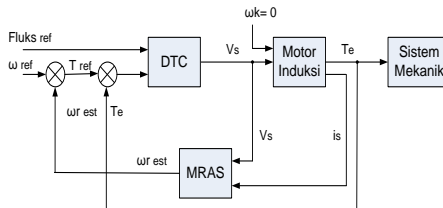
Kecepatan rotor diperoleh dari mekanisme adaptasi berikut :

$$\omega_{re} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) (e_q \hat{e}_d - e_d \hat{e}_q) \quad (5)$$

3. RANCANGAN SIMULASI DAN ANALISIS

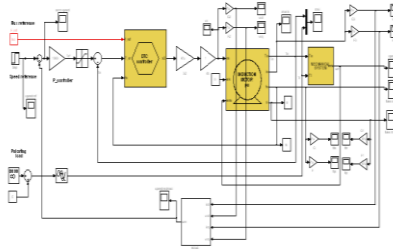
3.1 Perancangan Simulasi

Rancangan sistem yang digunakan dalam penelitian implementasi DTC dalam pengaturan kecepatan motor induksi ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Blok Sistem

Diagram implementasi DTC pada motor induksi dengan dilengkapi estimator MRAS ini disimulasikan dalam program Simulink Matlab yang ditunjukkan dalam Gambar 5.



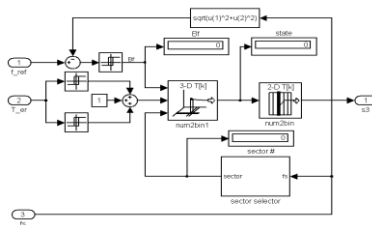
Gambar 5. Implementasi DTC pada Motor Induksi dalam Simulink.

3.2 Spesifikasi Motor Induksi

Spesifikasi motor induksi yang digunakan adalah motor induksi 3 fasa 1,5 kW, 220V/380V, 50 Hz, 1415 rpm, $\cos \phi=0,79$, $J=0,031 \text{ kg.m}^2$:

3.3 Pemodelan Direct Torque Control (DTC)

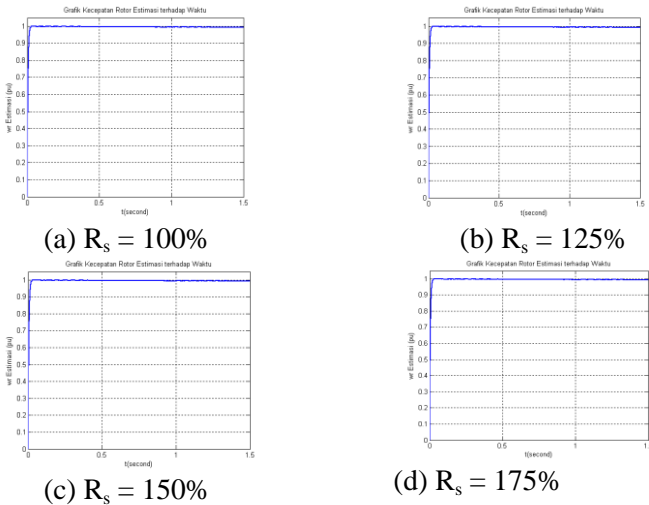
DTC membutuhkan masukan fluks referensi yang dibandingkan dengan fluks stator yang diperoleh dari model motor induksi serta torsi *error*. DTC ini akan menentukan vektor tegangan yang diperoleh berdasarkan *error* yang terjadi pada besaran torsi dan fluks stator. DTC akan menghasilkan tegangan stator (V_s) dalam bentuk tiga fasa, yang kemudian ditransformasikan menjadi bentuk dua fasa (V_{ds} dan V_{qs}) untuk menjadi masukan motor induksi.



Gambar 6. Direct Torque Control (DTC) dalam Simulink Matlab (Riaz, 2008)

3.4 Simulasi dan Analisis

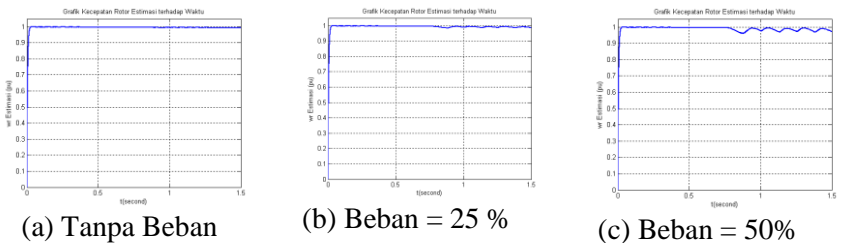
3.4.1 Pengaruh Perubahan Tahanan Stator (R_s)

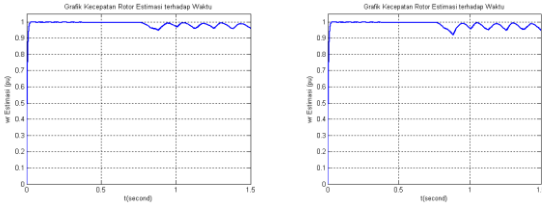


Gambar 7. Pengaruh Perubahan R_s terhadap Kecepatan Rotor Estimasi

Gambar 7 mulai keadaan $R_s = 100\%$ - 175% menunjukkan kurva kecepatan rotor relatif sama. Pada kurva diperoleh *settling time* = 0,03 detik. Pada kurva terjadi *ripple* dan *error* yang dihasilkan = 0,2 %. Perubahan R_s tidak terlihat pengaruhnya terhadap kecepatan rotor yang dihasilkannya.

3.4.2 Pengaruh Perubahan Beban Motor Induksi





(d) Beban = 75% (e) Beban = 100%

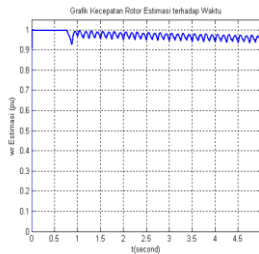
Gambar 8. Pengaruh Perubahan Beban terhadap Kecepatan Motor

Gambar 8 menunjukkan pada keadaan tanpa beban, ω_r estimasi relatif tetap, terjadi *ripple*. Dari kurva ini diperoleh bahwa perubahan beban motor mempengaruhi ω_r estimasi. Dengan masuknya beban *error* yang terjadi dapat mencapai 3%. Pada bertambahnya beban motor, penurunan ω_r estimasi dapat mencapai 7,5%.

3.4.3 Pengaruh Perubahan Tahanan Stator dan Beban Motor

Pada motor induksi 3 fasa yang digunakan, pada keadaan beban penuh temperatur pada belitan stator mencapai 75°C, sehingga diperoleh (Terco, 1979) :

$$R_{bp} = \frac{310}{235 + t} * R_{awal} \quad ; t = \text{suhu ruang (25°C)}$$



Gambar 9. Kurva ω_r terhadap Waktu

Gambar 9 menunjukkan dengan penerapan $R_s = 0,132$ pu dan $T_L = 100\%$, saat beban masuk terjadi penurunan kecepatan pada motor.

4. PENUTUP

Dari hasil simulasi dan analisis yang dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Perubahan parameter tahanan stator ($R_s = 100\% - 175\%$) tidak berpengaruh terhadap kecepatan motor (ω_r) . Skema DTC ini tidak sensitif terhadap perubahan parameter motor.
- 2) Perubahan beban motor mempengaruhi kecepatan rotor motor induksi. Makin besar beban yang ditambahkan maka penurunan ω_r estimasi juga makin besar.
- 3) Dengan penambahan beban, penurunan ω_r dapat mencapai 7,5%.
- 4) Pada keadaan tanpa beban diperoleh ω_r relatif tetap dengan terjadi sedikit *ripple*, *settling time* = 0,03 detik dan *error* = 0,2%. Pada saat dilakukan penambahan beban maka *ripple* yang terjadi makin besar dan *error* yang terjadi dapat mencapai 3%.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Meziane, S, Toufouti, R dan Benalla, H. 2007. *MRAS based Speed Control of Sensorless Induction Motor Drives*. ICGST-ACSE Journal Vol 7.
- Nabti, K, Abed, K dan Benalla, H. 2008. *Sensorless Direct Torque Control of Rushless AC Machine using Luenberger Observer*. Journal of Theoretical and Applied Information Technology.
- Ong, Chee-Mun. 1998. *Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/ Simulink*. Prentice Hall, Inc. New Jersey. USA.
- Ozkop, E dan Okumus, HI. 2005. *Direct Torque Controlled Induction Machine With MRAS Based Stator Resistance Estimation*. Karadeniz Technical University. Turkey
- Riaz, M. 2008. *Simulation of Electric Machine and Drive System*. University of Minnesota. USA.
- Vas, Peter. 1998. *Sensorless Vector and Direct Torque Control*.
- Wahab, A dan Sanusi, H. 2008. *Simulink Model of Direct Control of Induction Machine*. American Journal of Applied Sciences 5 (8) hal 1083-1090.