

# Pemodelan dan Simulasi Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan *Matrix Converter* Berbasis *Vector Control* Menggunakan MATLAB/Simulink

Charles Ronald Harahap<sup>1</sup>, Endah Komalasari<sup>2</sup>, Bagus Prasajo<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Jurusan Teknik Elektro FT UNILA

Jl.Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung 35145 INDONESIA

Charles.harahap69@gmail.com<sup>1</sup>, endah.komalasari@eng.unila.ac.id<sup>2</sup>,  
bagusprasajo94@gmail.com<sup>3</sup>

**Intisari**— Makalah ini membahas tentang sistem *matrix converter* dalam pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode *vector control*. *Matrix converter* adalah konverter yang mengubah tegangan AC menjadi tegangan AC dengan parameter berbeda. Penggunaan metode *vector control* dengan pengendali PI dipilih untuk mendapatkan pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa yang baik. Metode *vector control* akan membuat motor induksi tiga fasa dapat dikendalikan seperti motor DC penguatan terpisah. Pengujian sistem disimulasikan menggunakan perangkat lunak *Simulink* MATLAB dengan memvariasikan nilai kecepatan serta nilai frekuensi masukan 50 Hz dan 60 Hz untuk kondisi berbeban dan tidak berbeban. Dari hasil pengujian yang dilakukan respon kecepatan, dan arus ( $i_q$ ) motor induksi tiga fasa memiliki karakteristik respon yang baik seiring dengan penambahan nilai frekuensi masukan *matrix converter*. Penggunaan pengendali PI mampu mengurangi nilai *overshoot* dan dapat meningkatkan kecepatan aktual menuju kecepatan referensi dengan waktu yang cepat meskipun diberi pembebanan. Hasil harmonisa arus dan tegangan yang dihasilkan oleh keluaran *matrix converter* dengan perubahan frekuensi nilainya di bawah 5%.

**Keywords**— Motor Induksi Tiga Fasa, , *Matrix Converter*, *Vector Control*, Pengendali PI, *Simulink* MATLAB.

## I. PENDAHULUAN

Motor induksi banyak digunakan dalam dunia industri. Hal ini dikarenakan motor induksi mempunyai konstruksi yang lebih sederhana, kokoh, harganya relatif murah serta perawatannya yang mudah. Namun, motor induksi tiga fasa memiliki kelemahan yaitu sulit dikendalikan kecepatannya karena motor induksi tidak linier dan parameter motornya dapat berubah-ubah [1].

Salah satu teknik pengendalian kecepatan pada motor induksi umumnya menggunakan sistem *inverter* dengan sumber menggunakan sumber DC berupa baterai dan sistem *rectifier* dan *inverter* di mana dalam prosesnya sumber tegangan AC diubah menjadi tegangan DC menggunakan *rectifier* selanjutnya diubah kembali menjadi AC menggunakan *inverter* [2]. Hal ini membuat sistem pengendalian motor

induksi tidak ekonomis dan kurang efisien. Untuk mengatasi tersebut dibuatlah suatu teknik pengendalian kecepatan motor induksi dengan *matrix converter*.

*Matrix converter* (juga dikenal sebagai konverter matriks) adalah konverter yang mengubah tegangan AC menjadi AC secara langsung dengan aliran daya dua arah. Kelebihan *matrix converter* mudah diimplementasikan pada operasi motor empat kuadran tanpa menggunakan kapasitor filter besar, memiliki respon cepat yang dinamis dengan tingkat pengontrolan yang mudah, keluaran amplitudo tegangan dan rentang frekuensi secara terus menerus dapat disesuaikan melalui keluaran kontrol pada faktor daya yang dapat mencapai 1,0 dengan beban apa pun.

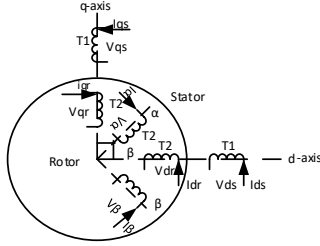
Penelitian penggunaan *matrix converter* dalam pengendalian motor induksi sudah banyak dilakukan oleh para peneliti, seperti yang dilakukan oleh Tenti yang menjelaskan proses kerja *matrix converter* [3]. Puja menggunakan *matrix converter* dalam kendali kecepatan motor induksi, namun tidak memberikan hasil simulasi dari penelitiannya, sehingga penelitiannya hanya memberikan metode pengendalian motor induksi dengan *matrix converter* saja [4]. Vinod menerapkan *matrix converter* dalam kendali motor induksi, tetapi hasil simulasi masih dalam bentuk *step response* tidak disertai dengan *disturbance response* [5], demikian juga dengan Coskun yang menerapkan *matrix converter* dalam kendali motor induksi, namun tidak memberikan hasil simulasi response kecepatannya dalam bentuk *step response* dan *disturbance response* [6].

Pada penelitian ini dilakukan sebuah pengembangan penggunaan *matrix converter* dalam sistem pengendalian kecepatan motor induksi di mana hasil simulasi memberikan response kecepatan motor induksi dengan *step response* dan *disturbance response*. Sistem pengendalian kecepatan motor induksi dinyatakan baik jika pada saat kondisi kecepatannya naik dan ketika dibebani, kecepatan motor induksi stabil. Pada penelitian ini dilakukan juga pengujian harmonisa *matrix converter* pada pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa, meliputi pengujian harmonisa tegangan dan pengujian harmonisa arus.

## II. STUDI PUSTAKA

### A. Vector Control pada Motor Induksi Tiga Fasa

Vector control adalah suatu metode pengaturan kumparan medan pada motor AC, di mana dari sistem *coupling* dirubah menjadi sistem *decoupling*. Sistem ini arus penguatan dan arus beban motor dapat dikendalikan secara terpisah, sehingga torsi dan fluks juga dapat diatur secara terpisah, seperti halnya motor DC. Penggambaran motor induksi dua fasa banyak digunakan dengan model kerangka referensi dq (*direct-quadrature*) [7]-[11].

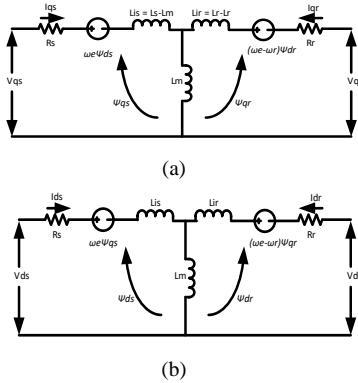


Gbr 1. Kumparan Stator dan Rotor Motor Induksi Tiga Fasa dalam Model dq [10],[11]

Dari Gambar di atas diperoleh persamaan:

$$L_{sr} = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Jika  $v_{qr} = v_{dr} = 0$  dan  $\omega_e = 0$  maka itu menjadi model dinamis kerangka acuan stasioner.



Gbr 2. Rangkaian Ekuivalen Model d-q Motor Induksi Tiga Fasa (a) Rangkaian Sumbu-d (b) Rangkaian Sumbu-q [10],[11]

Analisa dari rangkaian ekuivalen meliputi tegangan stator dan rotor, *flux linkage*, dan torsi dari motor induksi. Persamaan di bawah ini menyatakan persamaan untuk stator dan rotor:

$$\Psi_{ds} = \int (v_{ds} - R_s i_{ds}) dt \quad (2)$$

$$\Psi_{qs} = \int (v_{qs} - R_s i_{qs}) dt \quad (3)$$

$$\Psi_{dr} = \frac{-L_r \omega_r \Psi_{dr} + L_m i_{qs} R_r}{R_r + s L_r} \quad (4)$$

$$\Psi_{dr} = \frac{-L_r \omega_r \Psi_{dr} + L_m i_{qs} R_r}{R_r + s L_r} \quad (5)$$

$$i_{ds} = \frac{v_{ds}}{R_s + s L_s} - \left[ \frac{\Psi_{dr} + s L_m}{L_r (R_s + s L_s)} \right] \quad (6)$$

$$i_{qs} = \frac{v_{qs}}{R_s + s L_s} - \left[ \frac{\Psi_{qr} + s L_m}{L_r (R_s + s L_s)} \right] \quad (7)$$

Di mana d adalah *direct axis*; q adalah *quadrature axis*; s adalah stator; r adalah rotor;  $\Psi$  adalah *flux linkage*;  $V_{qs}$ ,  $V_{ds}$  adalah tegangan stator sumbu q dan d;  $V_{qr}$ ,  $V_{dr}$  adalah tegangan rotor sumbu q dan d;  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$  adalah arus stator sumbu q dan d;  $R_s$  adalah tahanan stator;  $R_r$  adalah tahanan rotor;  $L_s$  adalah induktansi stator;  $L_r$  adalah induktansi rotor;  $\omega_r$  adalah Kecepatan radian rotor;  $L_m$  adalah induktansi magnetic;  $L_{sr}$  adalah Induktansi diri stator dan rotor;  $M_{sr}$  adalah Induktansi bersama stator dan rotor.

Persamaan torsi elektromagnetik ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

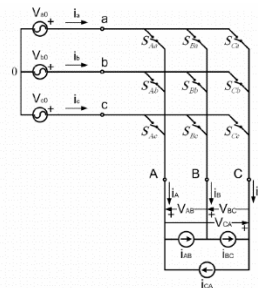
$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) I_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (8)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) \frac{L_m}{L_r} (i_{qs} \Psi_{dr} - i_{ds} \lambda_{qr}) \quad (9)$$

Di mana  $T_e$  adalah torsi elektromagnetik; P adalah daya;  $I_m$  adalah arus magnetisasi.

### B. Matrix Converter

*Matrix converter* adalah konverter yang mengubah tegangan AC menjadi tegangan AC dengan parameter berbeda. *Matrix converter* memiliki beberapa keunggulan dibandingkan konverter frekuensi daya *rectifier-inverter*. *Matrix converter* menyediakan bentuk gelombang masukan dan gelombang keluaran berupa gelombang sinusoidal dengan harmonisa yang memiliki nilai yang rendah dan hampir tidak ada subharmonik, faktor daya masukan dapat dikendalikan sepenuhnya, memiliki kemampuan penyimpanan energi minimal yang memungkinkan untuk dapat menggantikan kapasitor sebagai penyimpanan energi yang besar dan hemat energi [12]. *Matrix converter* disusun oleh 9 saklar dua arah.



Gbr 3. Rangkaian Matrix Converter [12]

*Matrix converter* dapat ditulis dengan bentuk persamaan matriks 3x3. Hasil keluaran tegangan pada *matrix converter* ditulis dengan persamaan (10):

$$\begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_A(t) \\ V_B(t) \\ V_C(t) \end{bmatrix}$$

$$V_o = S \times V_i \quad (10)$$

Di mana S adalah *switching*; A,B,C adalah urutan *switching*; a,b,c adalah fasa; V adalah tegangan;  $V_o$  adalah tegangan keluaran;  $V_i$  adalah tegangan masukan.

Arus masukan pada *matrix converter* persamaan (11):

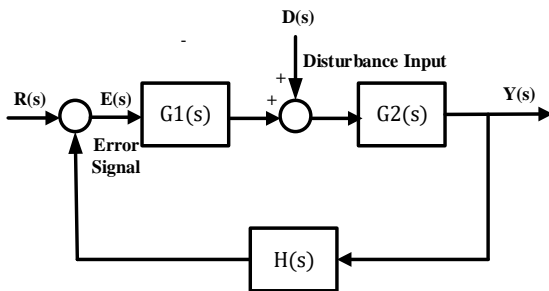
$$\begin{bmatrix} I_A(t) \\ I_B(t) \\ I_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_b(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix}$$

$$I_i = S \times I_o \quad (11)$$

Di mana I adalah arus;  $I_i$  adalah arus masukan;  $I_o$  adalah arus keluaran

### C. Sistem Kendali Kalang Tertutup

Sistem kendali kalang tertutup adalah sistem kendali yang sinyal keluarannya memberikan pengaruh terhadap sistem pengendalian. Pada sistem kendali kalang tertutup selisih nilai masukan dengan keluaran (*error*) akan menjadi perbandingan dan akan diproses kembali oleh elemen pengendali. Pada sistem kendali kalang tertutup terdapat tambahan berupa elemen pembanding dan elemen pengukuran atau umpan balik (*feedback*) [13]-[16].



Gbr 4. Sistem Kendali Kalang Tertutup [13]

## III. METODE

Berikut ini langkah-langkah dalam membuat perancangan simulasi pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode *vector control* pada *Simulink* MATLAB.

### A. Rangkaian Sumber Tiga Fasa

Simulasi pemodelan membuat rangkaian sumber tiga fasa dengan perbedaan sudut fasa sebesar 120°. Sumber dihubungkan dengan *ground*, dan ketiga fasa akan dinetralkan di bagian sisi negatif dari rangkaian.

### B. Rangkaian Matrix Converter

Rangkaian *matrix converter* menggunakan komponen IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) dan dioda dengan jumlah sebanyak 18 buah dan disusun secara matriks 3x3.

### C. Rangkaian Vector Control

Rangkaian *vector control* ini terdiri dari koordinat transformasi, PWM (*Pulse Width Modulation*), dan pengendali PI.

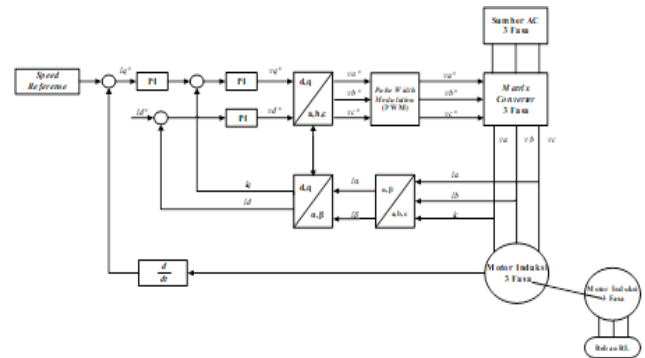
### D. Rangkaian Pensaklaran (Switching)

Rangkaian pensaklaran menggunakan pembangkit pulsa dengan sebuah sinyal kotak yang waktunya dapat diatur dan ditentukan dari frekuensi sumber.

### E. Rangkaian Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa yang digunakan adalah motor asinkron yang memiliki satuan pu (*per unit*). Motor ini memiliki sumber tiga fasa dan memiliki masukan torsi dengan nilai masukan berupa sinyal, parameter pada motor ini dapat diubah sesuai dengan kebutuhan.

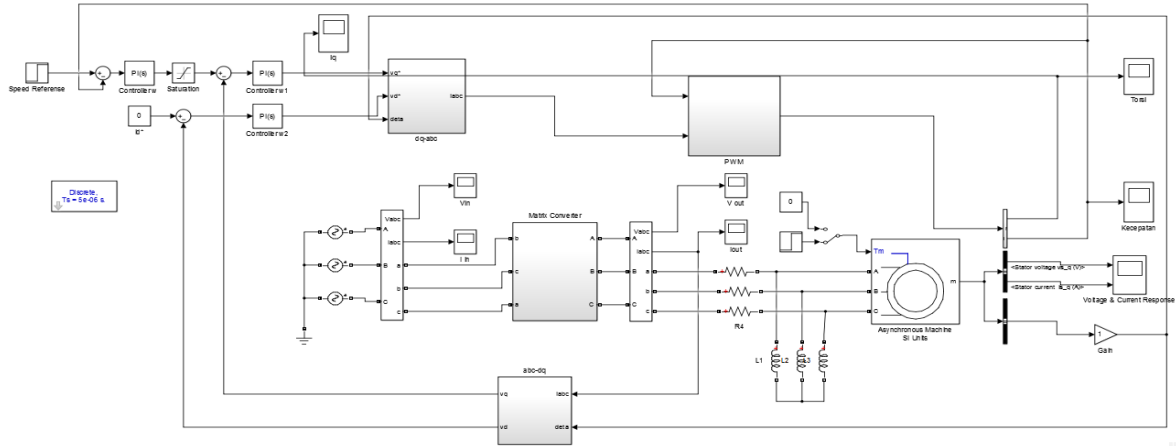
Secara umum, desain sistem yang akan dirancang ditunjukkan pada gambar 5.



Gbr 5. Diagram Blok Perancangan Simulasi

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### A. Hasil Pemodelan

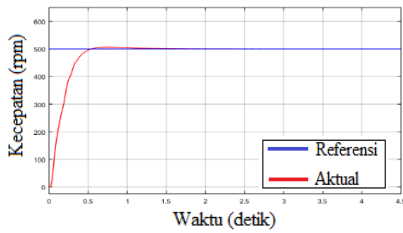


Gbr 6. Hasil Pemodelan pada Simulink Matlab

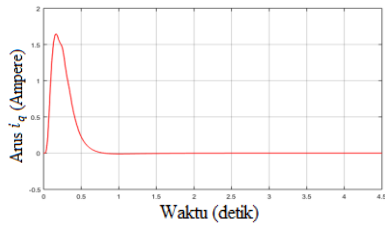
##### B. Hasil Simulasi

###### 1) Pengujian Matrix Converter pada Motor Induksi Tiga Fasa dengan Pengendali PI

Pada pengujian ini motor yang digunakan adalah motor induksi tiga fasa, 10 HP dengan daya aktif 7,5 Kw dan mempunyai spesifikasi kecepatan 1440 rpm. Pengujian dilakukan dengan nilai kecepatan referensi berturut-turut sebesar 0-500 rpm, tegangan masukan 360 V, frekuensi masukan sebesar 60 Hz. Simulasi menampilkan respon kecepatan dan respon arus ( $i_q$ ). Selanjutnya, hasil respon dari motor induksi tiga fasa seperti pada gambar 7 di bawah ini.



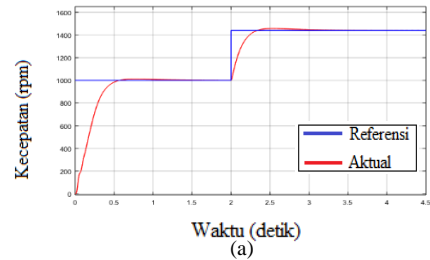
(a)



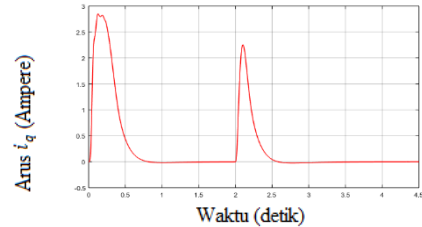
(b)

Gbr.7 Hasil Simulasi  $\omega_{ref}$  0-500 rpm, 60 Hz (a) Respon Kecepatan (b) Respon Arus ( $i_q$ )

Berikut ini adalah hasil pengujian *matrix converter* pada motor induksi tiga fasa secara bertingkat dari 0-1000 rpm dan 1000 – 1440 rpm.



(a)



(b)

Gbr 8. Hasil Simulasi untuk  $\omega_{ref}$  0-1000 rpm ke 1440 rpm dengan frekuensi 60 Hz (a) Respon Kecepatan, (b) Respon arus ( $i_q$ )

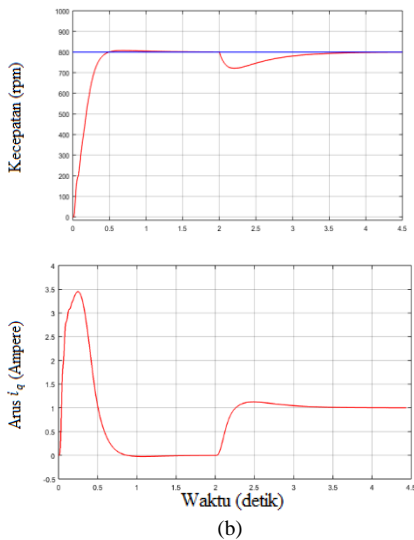
Berdasarkan data hasil pengujian yang ditunjukkan pada, karakteristik respon kecepatan pada putaran 1000-1440 rpm memiliki nilai *rise time* yang kecil dibandingkan dengan yang lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan aktual yang diperoleh tersebut cepat menuju kecepatan referensi. Respon arus ( $i_q$ ) yang diperoleh dari pengujian ini pada frekuensi 60 Hz dari setiap putarannya pada awal *starting* mengalami lonjakan dan osilasi. Selanjutnya dengan penambahan nilai frekuensi juga dapat berpengaruh dalam mengurangi nilai lonjakan yang terjadi pada saat awal proses motor *starting*.

2) *Pengujian Matrix Converter pada Motor Induksi Tiga Fasa dengan Pengendali PI Beban RL (Resistif Induktif)*

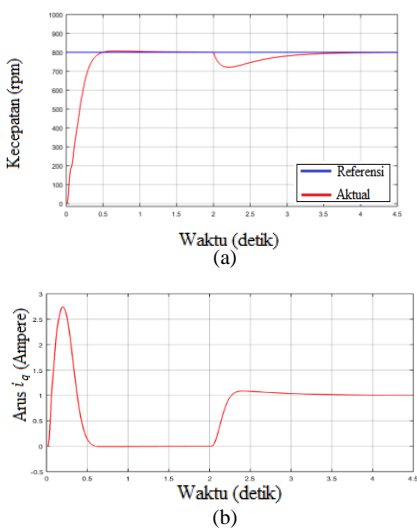
Pada pengujian ini ditambahkan beban RL (resistif - induktif). Parameter lainnya pada pengujian ini yaitu dengan nilai kecepatan referensi sebesar 0-800 rpm ,tegangan masukan 360 V, serta frekuensi masukan sebesar 50 Hz dan 60 Hz.

Tabel 1. Parameter Pengujian dengan Beban RL

No	Paramater	Nilai	Satuan
1	Tegangan Masukan	220	V
2	Frekuensi	50, 60	Hz
3	R	5,5	$\Omega$
4	L	75	mH



Gbr 9. Hasil Simulasi untuk  $\omega_{ref}$  0-800 rpm, Frekuensi 50 Hz dengan Beban RL (a) Respon Kecepatan (b) Respon Arus ( $i_q$ )



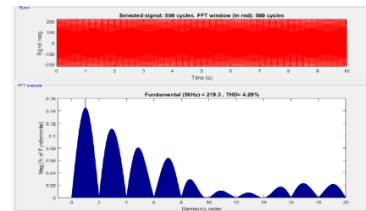
Gbr 10. Hasil Simulasi untuk  $\omega_{ref}$  0-800 rpm, Frekuensi 60 Hz dengan Beban RL (a) Respon Kecepatan (b) Respon Arus ( $i_q$ )

Pengujian dilakukan dengan memberikan beban pada saat detik kedua. Kecepatan dari motor induksi tiga fasa masing-masing turun sesaat sehingga mengalami *disturbance response* dan terjadi *undershoot* kemudian kecepatan kembali ke *setpoint* awal. Respon arus ( $i_q$ ) yang diperoleh dari pengujian ini, pada frekuensi 50 Hz dan 60 Hz pada detik kedua, nilai respon arus mengalami kenaikan hingga kecepatan stabil kembali. Hal ini disebabkan karena pengaruh dari beban RL yang dihubungkan pada motor induksi tiga fasa dan terlihat bahwa frekuensi 60 Hz memiliki nilai lonjakan yang kecil dan hampir tidak ada ripple gelombang dibandingkan dengan frekuensi 50 Hz.

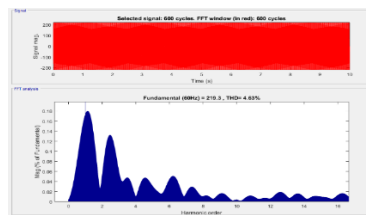
3) *Pengujian Harmonisa Matrix Converter*

Pada pengujian ini bertujuan untuk menganalisa lebih jauh terkait dari sisi harmonisa yang ditimbulkan oleh keluaran *matrix converter*. Pengujian pertama yaitu pengujian harmonisa tegangan keluaran, kemudian pengujian kedua yaitu pengujian harmonisa arus keluaran pada *matrix converter*.

a. *Pengujian Harmonisa Tegangan*



Gbr 11. THDv Keluaran Matrix Converter Frekuensi 50 Hz



Gbr 12. THDv Keluaran Matrix Converter Frekuensi 60 Hz

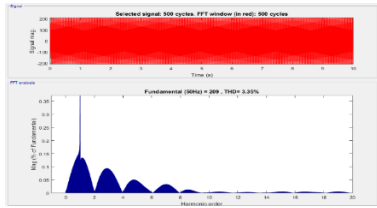
Tabel 2. Hasil Pengujian THDv Keluaran Matrix Converter

Frekuensi Masukan Matrix Converter (Hz)	Total Harmonic Distortion (THD)v (%)
50	4,29
60	4,63

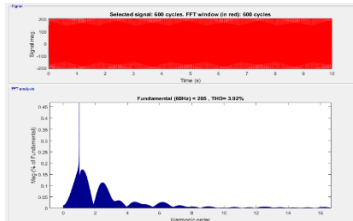
Pada tabel 2 terlihat harmonisa yang timbul tidak menunjukkan adanya harmonisa yang besar. Menurut standar IEEE Std 519-1992, harmonisa tegangan yang diperbolehkan pada sistem dengan tegangan di bawah 69 kV, THD tegangan mempunyai batas maksimum pada angka 5%. Terlihat nilai harmonisa tegangan keluaran *matrix converter* pada frekuensi 50 Hz yaitu sebesar 4,29% kemudian pada frekuensi 60 Hz nilai sebesar 4,63%.

b. Pengujian Harmonisa Arus

REFERENSI



Gbr 13. THDi Keluaran *Matrix Converter* Frekuensi 50 Hz



Gbr 14. THDi Keluaran *Matrix Converter* Frekuensi 60 Hz

Tabel 3. Hasil Pengujian THDi Keluaran *Matrix Converter*

Frekuensi Masukan <i>Matrix Converter</i> (Hz)	Total Harmonic Distortion (THD)i (%)
50	3,35
60	3,92

Nilai harmonisa arus yang diperoleh dari frekuensi masukan berturut turut sebesar 50 Hz, dan 60 Hz yaitu 3,35%, dan 3,92%. Nilai keduanya memiliki selisih nilai yang kecil. Menurut standar IEEE Std 519-1992, jika sistem dengan arus nominal di bawah 20 ampere maka harmonisa yang diperbolehkan adalah di bawah nilai 5%.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dapat diambil kesimpulan bahwa penambahan nilai kecepatan mempengaruhi karakteristik respon pada motor induksi tiga fasa. Pada saat frekuensi masukan sebesar 60 Hz, memberikan performansi respon kecepatan dan respon arus yang lebih baik dari frekuensi 50 Hz, di mana respon kecepatan frekuensi 60 Hz memiliki respon yang tinggi dan lonjakan titik tertinggi pada respon arus memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan frekuensi 50 Hz. Pada sistem menggunakan metode *vector control* dengan pengendali PI, mampu mengembalikan kecepatan aktual motor sesuai dengan kecepatan referensi sebagai nilai acuannya, memiliki kinerja kontrol yang baik untuk kontrol kecepatan dan torsi.

[1] Arindya, Radita.2013. "*Penggunaan dan Pengaturan Motor Listrik*". Yogyakarta: Graha Ilmu

[2] J. Holtz. "Sensorless control of induction machines - with or without signal injection". IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 1, pp. 7–30, Feb. 2006.

[3] P. Tenti, L. Malesani, L. Rossetto. "Optimum Control of N-Input K-Output Matrix Converters". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 7, no. 4, pp. 707-713, 19924

[4] P. Chauchan, Dr.P.V. Thakre. 2020. "Study of Matrix Converter for Motor Application". India: Jalgaon

[5] V. Battu, G. Ramu. 2013. "Simplified Matrix Converter Fed Induction Motor Drive".

[6] I. Coskun, A. Saygin. 2004. "Speed Control Of Induction Motor by Matrix Converter". Turki: Teknikokullar

[7] Theraja, B.L., dan Theraja, A.K.2005. "*Electrical Technology Volume I: Basic Electrical Engineering*". New Delhi: S. Chand & Company.

[8] Wildi, Theodore. 2002. "*Electrical Machines, Drives, and Power Systems: Fifth Edition*". New Jersey: Prentice Hall.

[9] H. Sarde, A. Auti, V. Gadhave. "*Speed Control of Induction Motor Using Vector Control Technique*". Journal Engineering Science and Technology, Vol. 3 issue 4, April- 2014.

[10] Clarke, Circuit Analysis of AC Power Systems, Vol. 1- Symmetrical and Related Components, John Wiley and Sons, New York, 1943.

[11] R. H. Park. "Two-reaction theory of synchronous machines – Generalized method of analysis- Part I," AIEE Trans., Vol. 48 , pp.716-727, 1929.

[12] Alesina, M. Venturini. "Analysis and Design of Optimum-Amplitude Nine-Switch Direct AC-AC Converters". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 4, no. 1, pp. 101-112, January 1989.

[13] Sri Ratna Sulistiyanti, F.X. Arinto Setyawan. 2006. "*Dasar Sistem Kendali*". Bandar Lampung: Universitas Lampung.

[14] C Harahap, T Hanamoto. "Fictitious Reference Iterative Tuning-Based Two-Degrees-of-Freedom Method for Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Control Using FPGA for a High-Frequency SiC MOSFET Inverter". Applied Sciences 6 (12), 387.

[15] CR Harahap, T Hanamoto. 2015. "FRIT Based PI Tuning for Speed Control of PMSM using FPGA for High Frequency SiC MOSFET Inverter". International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 1-6.

[16] C.R.Harahap, R.Saito, H.Yamada, T.Hanamoto, "Speed control of permanent magnet synchronous motor using FPGA for high frequency SiC MOSFET Inverter," Journal Engineering Science and Technology, pp. 1 I -20, 2