

Matrix Converter* sebagai Pengendali Kecepatan Motor Induksi 3 Fase dengan *ISVM

MENTARI PUTRI JATI, ERA PURWANTO, BAMBANG SUMANTRI, GAMAR BASUKI

Teknik Elektro Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Email: mentaripj@gmail.com

Received 9 Desember 2019 | *Revised* 3 Februari 2020 | *Accepted* 10 Mei 2020

ABSTRAK

Makalah ini membahas matrix converter digunakan sebagai pengendali kecepatan motor induksi 3 fase pada sistem closed loop. Matrix converter merupakan konverter AC – AC yang efektif dan efisien untuk menghasilkan tegangan dan frekuensi keluaran berubah – ubah. Metode modulasi matrix converter Indirect Space Vector Modulation (ISVM) diterapkan pada sistem. Masalah pengendalian kecepatan motor induksi dapat diatasi dengan kendali Proporsional Integral (PI) yang diterapkan pada sistem untuk mencapai kecepatan referensi. Hasil simulasi Simulink software Matlab dengan variasi setpoint kecepatan dapat dicapai matrix converter sebagai drive motor induksi 3 fase dan menjaga harmonisa sistem closed loop pada rata – rata 24.27%.

Kata kunci: *matrix converter, kendali kecepatan, motor induksi, ISVM*

ABSTRACT

This paper discusses the matrix converter used as a three phase induction motor speed controller in a closed loop system. Matrix converter is an effective and efficient AC - AC converter to produce variable output voltage and frequency. Matrix converter Indirect Space Vector Modulation (ISVM) is applied to the system. Induction motor speed control problems can be overcome by proportional integral control (PI) that applied to the system to achieve reference speed. Simulink simulation in Matlab results with speed setpoint variations can be achieved matrix converter as a three-phase induction motor drive and preserve the closed loop system harmonics at an average of 24.27%.

Keywords: *matrix converter, speed control, induction motor, ISVM*

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan isu dunia mengenai pembatasan emisi gas buang, kendaraan listrik mengambil peranan penting sebagai solusi yang diusulkan **(Dobrucky, dkk, 2018)(Kusumah & Kyyra, 2019)(Munuswamy & Wheeler, 2017)**. Kendaraan listrik menjadi alat transportasi ramah lingkungan karena menghasilkan emisi gas buang nol **(Riba, dkk, 2016)**. Kendaraan listrik menggunakan mesin elektrik berupa motor sebagai komponen utama. Jenis motor listrik yang mempunyai keandalan tinggi yaitu motor induksi **(Rind, dkk, 2017)**. Motor induksi banyak diaplikasikan pada berbagai bidang, seperti peralatan rumah tangga, industri, dan kendaraan transportasi. Beberapa kelebihan dari motor induksi diantaranya konstruksi yang sederhana, harga relatif murah dan sedikit perawatan **(Hannan, dkk, 2018)**. Berdasarkan hal tersebut, maka pengendalian motor induksi menjadi suatu kebutuhan.

Secara umum, pengendalian motor induksi dilakukan dengan mengubah tegangan dan/atau variasi frekuensi pada kendali vektor atau skalar menggunakan konverter. Adanya harmonisa, yang mana menyebabkan rugi – rugi motor, dikurangi dengan pengendalian frekuensi pada motor induksi sehingga dapat menghasilkan gelombang tegangan keluaran yang sinusoidal tanpa distorsi **(Bondarev, dkk, 2018)**. Konverter konvensional yang biasa digunakan berupa *inverter* dengan mengubah tegangan searah/*direct current* (DC) ke tegangan bolak balik/*alternating current* (AC) yang mana membutuhkan sumber DC. Perubahan sumber AC – DC – AC tidak efisien dan mempercepat umur pemakaian peralatan dalam konversi tegangan AC yang variabel. Maka, konverter konvensional dapat diganti dengan penggunaan konverter AC – AC berupa *matrix converter*.

Matrix converter merupakan konverter AC – AC yang menghubungkan secara langsung jumlah fase masukan dengan fase keluaran yang mana amplitudo dan frekuensi bervariasi sesuai kebutuhan **(Purwanto, dkk, 2019)(Roy, dkk, 2018)(Su, dkk, 2018)**. Dalam hal ini, sumber 3 fase dihubungkan dengan beban motor induksi 3 fase. Sehingga kebutuhan sumber tegangan DC pada konversi AC – AC dapat dihilangkan dengan menggunakan *matrix converter*.

Aplikasi *matrix converter* sebagai *drive* motor induksi 3 fase dikombinasi dengan metode *Space Vector Modulation* (SVM) yang mana mempunyai keunggulan keandalan sistem stabil pada sistem *closed loop* **(Ahmed, dkk, 2014)(Sebtahmadi, dkk,, 2014)**. Umpan balik dan *set point* kecepatan motor induksi 3 fase dibutuhkan pada pengendalian sistem. Tipe pengendali konvensional, fuzzy, atau gabungan diterapkan pada sistem dengan aplikasi modulasi *matrix converter* yang kompleks dan kendali kecepatan motor induksi 3 fase agar sesuai *set point* masukan **(Chowdhury & Khan, 2017)(Guo, dkk, 2018)(Vidhya & Venkatesan, 2017)**.

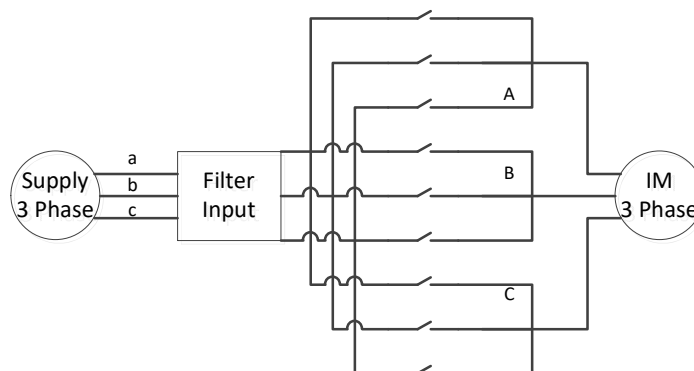
Dalam makalah ini membahas kebaruan mengenai *matrix converter* diaplikasikan sebagai *drive* motor induksi 3 fase untuk pengendalian kecepatan. Teknik modulasi SVM, yang mana menentukan sudut penyulutan pensakelaran dengan perhitungan vektor ruang arus dan tegangan referensi, digunakan pada *matrix converter* agar harmonisa sistem minimal. Hasil simulasi Simulink kecepatan tinggi, rendah, dan nominal motor induksi 3 fase dapat dicapai dengan sistem *closed loop* yang mana dibuktikan pada *software* Matlab. *Matrix converter* sebagai *drive* motor induksi 3 fase menjadi teknologi yang menjanjikan pada pengendalian kecepatan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Matrix Converter

Secara umum, konverter AC - AC hubungan secara langsung antara masukan 3 fase ke keluaran 3 fase dengan frekuensi dan amplitudo sisi beban bervariasi disebut *matrix converter*. *Matrix converter* menggantikan beberapa tahap konversi dan elemen penyimpanan energi antara sumber dan beban dengan satu tahap konversi daya beserta kendali amplitudo dan frekuensi keluaran. konstruksi sakelar *bidirectional* semikonduktor seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pada Gambar 1 indeks a, b, c merepresentasikan sumber masukan 3 fase dari jala – jala PLN sedangkan indeks A, B, C mewakili keluaran berupa beban motor induksi 3 fase. Tiap fase keluaran A, B, maupun C mempunyai kemungkinan mendapat sumber dari fase masukan a, b, dan c yang dihubungkan oleh sembilan gerbang sakelar.

Matrix converter 3 fase terdiri dari sembilan sakelar *bidirectional* yang mana bekerja berdasarkan kondisi sisi masukan dan keluaran tidak hubung singkat serta sekurang – kurangnya satu sakelar pada tiap fase yang terhubung ke keluaran untuk menghindari rangkaian terbuka (**Dabour & Rashad, 2012**)(**Roy, dkk, 2018**). Dengan komposisi umum sakelar ini, aliran daya melalui konverter dapat mempunyai arah maju/terus atau arah sebaliknya. Karena tidak ada elemen penyimpanan energi DC, masukan daya aktif harus sama dengan keluaran daya (**Roy, dkk, 2018**). Namun, masukan daya reaktif tidak harus sama dengan keluaran daya reaktif. Hal ini menghasilkan sudut fase antara tegangan dan arus pada masukan yang dapat dikendalikan. Maka, bentuk dan frekuensi di sisi masukan dan keluaran tidak saling mempengaruhi satu sama lain.



Gambar 1. Matrix Converter 3 Fase

Persamaan matematis dari vektor tegangan masukan ditunjukkan seperti Persamaan 1. (**Purwanto, dkk, 2019**):

$$|V_i| = V_{im} \begin{bmatrix} \cos \omega_i t \\ \cos \left(\omega_i t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\omega_i t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sedangkan vektor tegangan keluaran persamaan matematisnya seperti Persamaan 2. (**Purwanto, dkk, 2019**):

$$|V_o| = V_{om} \begin{bmatrix} \cos \omega_o t \\ \cos (\omega_o t - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos (\omega_o t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

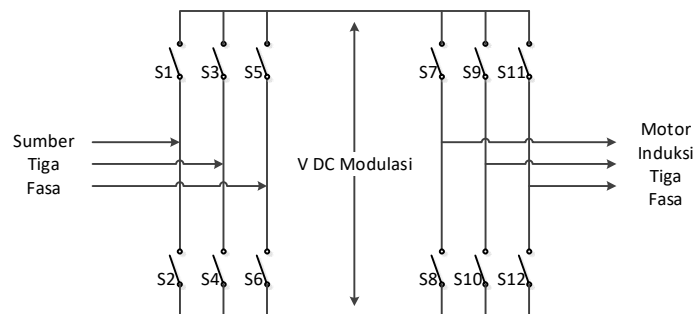
Banyak metode yang berbeda telah diterapkan untuk menganalisis dan merancang *matrix converter*. Karena kompleksitas pensakelaran yang diperlukan, penggunaan logika kendali juga kompleks dan melibatkan algoritma yang rumit. Munculnya sakelar *bidirectional* membuat *matrix converter* beroperasi lebih tangguh di semua kuadran siklus operasi untuk *drive* motor (Halde, dkk, 2017). Pada semua konverter daya, modulasi menjadi bagian penting yang perlu diperhatikan. Teknik modulasi konverter mempunyai peran dalam menghasilkan kendali bentuk gelombang masukan dan keluaran yang sinusoidal dengan distorsi minimal.

2.2 Space Vector Modulation

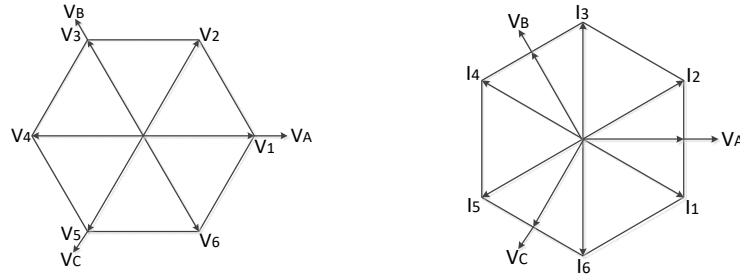
Space vector modulation (SVM) adalah teknik kendali yang telah banyak digunakan dalam *drive* kecepatan bervariasi. Teknik SVM didasarkan pada representasi vektor ruang dari sumber dan/atau beban tegangan dan/atau arus pada konverter daya. SVM merupakan strategi modulasi yang paling banyak digunakan untuk *matrix converter* (Nguyen & Lee, 2017)(She, dkk, 2012). Modulasi vektor ruang tidak langsung/Indirect SVM (ISVM) di mana *matrix converter* dideskripsikan sama dengan rangkaian setara yang menggabungkan penyearah sumber arus dan *inverter* sumber tegangan yang terhubung melalui virtual DC link seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Tahap *Inverter* memiliki topologi sumber tegangan 3 fase standar yang terdiri dari enam sakelar, S7 - S12 dan tahap penyearah memiliki topologi daya yang sama dengan enam sakelar lainnya, S1 - S6. Kemungkinan keadaan sakelar dan vektor ruang arus dan tegangan yang relevan ditentukan berdasarkan 27 kombinasi pensakelaran (Nguyen & Lee, 2017)(Purwanto, dkk, 2019). Kedua tahapan daya terhubung langsung melalui virtual DC link dan secara inheren memberikan kemampuan aliran daya mengalir pada dua arah yang berbeda. Prinsip operasi ISVM akan diilustrasikan dengan pendekatan vektor segi enam dari tegangan keluaran dan arus masukan yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Tegangan keluaran mendapat referensi vektor tegangan sumber sedangkan arus masukan dari arus beban. Besaran 3 fase dikonversi ke sumbu 2 fase alfa beta yang menjadi dasar perhitungan amplitudo |mag| dan sudut θ referensi. Selanjutnya amplitudo |mag| dan sudut θ referensi diklasifikasikan dalam 6 vektor tegangan maupun arus. Amplitudo dan sudut untuk arus dan tegangan yang memenuhi vektor tertentu, menentukan nilai dan sudut dalam sektor. Nilai sektor menentukan sakelar yang on dan off dari kombinasi sektor tegangan dan arus referensi yang berbeda. Dengan demikian teknik ISVM dapat meminimalisir rugi – rugi pensakelaran pada konverter daya.



Gambar 2. Rangkaian Pengganti untuk Topologi Modulasi ISVM



Gambar 3. Vektor Ruang Tegangan Gambar 4. Vektor Ruang Arus

Terdapat referensi tegangan keluaran (V_o^*) and arus masukan (I_i^*) pada ISVM *matrix converter* yang berdasarkan Gambar 5 ditentukan menggunakan pendekatan vektor - vektor (Espina, dkk, 2014)(Nguyen & Lee, 2017)(Purwanto, dkk, 2019). Persamaan di bawah ini digunakan pada *inverter* sumber tegangan:

$$V_o^* = d_a V_a + d_b V_b \quad (3)$$

$$d_a = \frac{T_a}{T_s} = m_v \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_v\right) \quad (4)$$

$$d_b = \frac{T_b}{T_s} = m_v \sin(\theta_v) \quad (5)$$

$$0 \leq m_v \leq 1; m_v = \frac{\sqrt{3}V_o^*}{V_{DC}} \quad (6)$$

Sedangkan persamaan *rectifier* sumber arus dinyatakan seperti di bawah ini:

$$I_i^* = d_\gamma I_\gamma + d_\delta I_\delta \quad (7)$$

$$d_\gamma = \frac{T_\gamma}{T_s} = m_c \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_c\right) \quad (8)$$

$$d_\delta = \frac{T_\delta}{T_s} = m_c \sin(\theta_c) \quad (9)$$

$$0 \leq m_c \leq 1; m_c = \frac{I_i^*}{I_{DC}} \quad (10)$$

Dari persamaan *rectifier* and *inverter*, vektor tegangan V_a dan V_b diterapkan dengan vektor arus I_γ , yang mana terdapat pasangan $V_a - I_\gamma$ dan $V_b - I_\gamma$. Sehingga *duty cycle* dari vektor yang baru terbentuk didefinisikan pada Persamaan (11) – Persamaan (14).

$$d_a d_\gamma = m_v \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_v\right) \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_c\right) = \frac{T_{\alpha\gamma}}{T_s} \quad (11)$$

$$d_a d_\delta = m_v \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_v\right) \sin(\theta_c) = \frac{T_{\alpha\delta}}{T_s} \quad (12)$$

$$d_b d_\gamma = m_v \sin(\theta_v) \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_c\right) = \frac{T_{\beta\gamma}}{T_s} \quad (13)$$

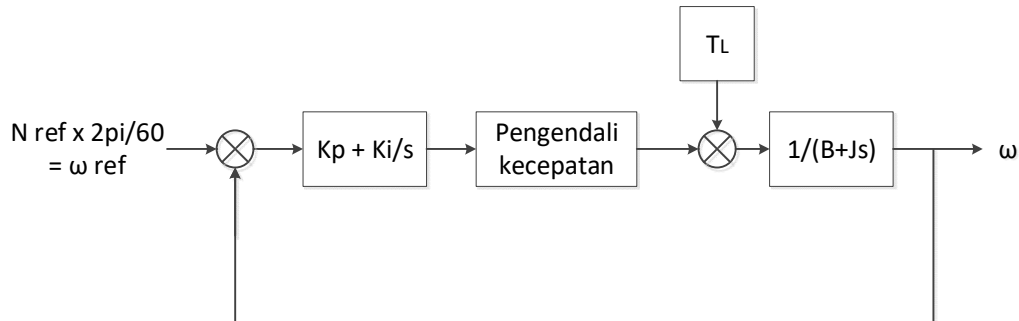
$$d_b d_\delta = m_v \sin(\theta_v) \sin(\theta_c) = \frac{T_{\beta\delta}}{T_s} \quad (14)$$

Dengan menggunakan prosedur serupa untuk komponen vektor lainnya, konfigurasi rasio *duty cycle* dapat dihitung. Vektor penentu pensakelaran yang beroperasi untuk semua sektor masukan dan keluaran yang berbeda diberikan berdasarkan 27 kombinasi pensakelaran (Purwanto, dkk, 2019). Nilai yang dihitung dari rasio *duty cycle* harus positif. Selanjutnya,

jumlah rasio *duty cycle* harus lebih rendah dari atau sama dengan satu. Untuk *matrix converter* 3 fase, nilai maksimum rasio transfer tegangan (q) dalam kisaran modulasi linier adalah 0.866.

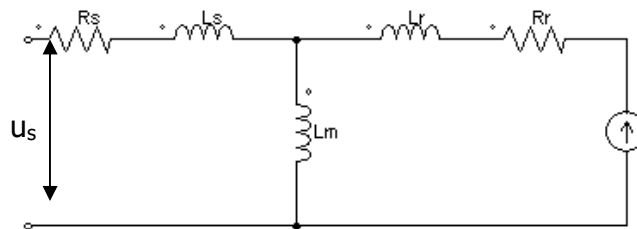
2.3 Pengendalian Kecepatan Motor Induksi

Kendali konvensional telah banyak diadopsi oleh peneliti pada pengendalian kecepatan motor induksi 3 fase karena termasuk teknik yang efektif. Pembahasan performa pengendali kecepatan motor induksi 3 fase tergantung pada pemilihan dan penalaan parameter Proportional Integral (PI). Penalaan parameter PI dilakukan untuk mendapatkan respon sistem yang stabil (Nugroho, dkk, 2019).



Gambar 5. Diagram Blok Pengendali PI Kecepatan Motor Induksi

Jika kendali PI diterapkan pada modulasi pensakelaran yang kompleks dan kontinu, parameter PI harus dipilih setiap waktu sampling. Untuk mendesain parameter kendali PI pada sistem yang kompleks, modifikasi pengendali dilakukan pada *drive* motor induksi 3 fase. Diagram blok pengendali PI motor induksi ditunjukkan pada Gambar 5 (Shin, dkk, 2003).



Gambar 6. Rangkaian Pengganti Motor Induksi Per Fase

Analisis *loop* rangkaian listrik digunakan untuk menentukan persamaan model matematis motor induksi per fase. Berdasarkan Gambar 6 maka persamaan matematis motor induksi pada kerangka acuan berputar terhadap waktu menjadi seperti di bawah ini (Abu-rub, dkk, 2012):

$$\frac{di_{sx}}{d\tau} = \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{L_r w_\sigma} i_{sx} + \frac{R_r L_m}{L_r w_\sigma} \psi_{rx} + \omega_k \cdot i_{sy} + \omega_r \frac{L_m}{w_\sigma} \psi_{ry} + \frac{L_r}{w_\sigma} u_{sx} \quad (15)$$

$$\frac{di_{sy}}{d\tau} = \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{L_r w_\sigma} i_{sy} + \frac{R_r L_m}{L_r w_\sigma} \psi_{ry} - \omega_k \cdot i_{sx} - \omega_r \frac{L_m}{w_\sigma} \psi_{rx} + \frac{L_r}{w_\sigma} u_{sy} \quad (16)$$

$$\frac{d\psi_{rx}}{d\tau} = -\frac{R_r}{L_r} \psi_{rx} + \omega_r \psi_{ry} + \frac{R_r L_m}{L_r} i_{sx} \quad (17)$$

$$\frac{d\psi_{ry}}{d\tau} = -\frac{R_r}{L_r} \psi_{ry} + \omega_r \psi_{rx} + \frac{R_r L_m}{L_r} i_{sy} \quad (18)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{L_m}{JL_r} (\Psi_{rx}i_{sy} - \Psi_{ry}i_{sx}) - \frac{1}{J} t_o \quad (19)$$

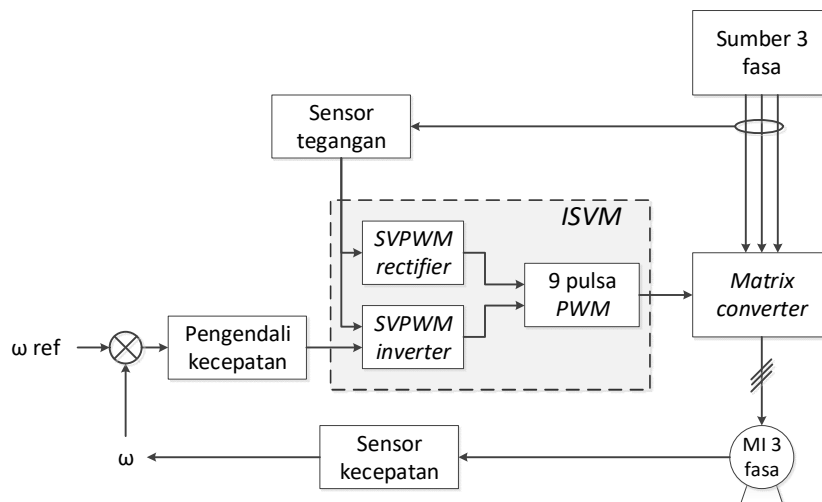
Dimana T_M adalah konstanta waktu mekanis; dimana u_s , i_s , Ψ_s , Ψ_r adalah tegangan, arus, dan fluks vektor (stator dan rotor); R_s , R_r adalah hambatan stator dan rotor; ω_r adalah kecepatan sudut rotor; ω_k adalah kecepatan sudut frame referensi; J adalah momen inersia; dan t_0 adalah beban torsi nol.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk membuktikan pengendalian *closed loop matrix converter* sebagai *drive* motor induksi 3 fase, simulasi Simulink dilakukan menggunakan *software* Matlab dengan beban 4 kW yang mana parameter sistem ditunjukkan pada Tabel 1. Simulasi dilakukan pada 3 variasi *set point* kecepatan yaitu kecepatan tinggi, rendah, dan nominal dengan diagram blok pada Gambar 7.

Tabel 1. Parameter Sistem

Parameter	Nilai
Tegangan masukan AC <i>line-to-line</i>	311 V
Frekuensi masukan AC	50 Hz
Frekuensi pensakelaran	6 kHz
Induktansi filter masukan	1.26mH
Kapasitansi filter masukan	20uF
Daya keluaran motor induksi	4 kW
Tegangan RMS motor induksi	400 V
Resistansi dan induktansi stator	1.405 Ω ; 5.839 mH
Resistansi dan induktansi rotor	1.395 Ω ; 5.839 mH
Induktansi magnetis	172.2 mH
Momen inersia	0.0131 kg.m ²
Koefisien gaya gesek	0.002985 N.m.s



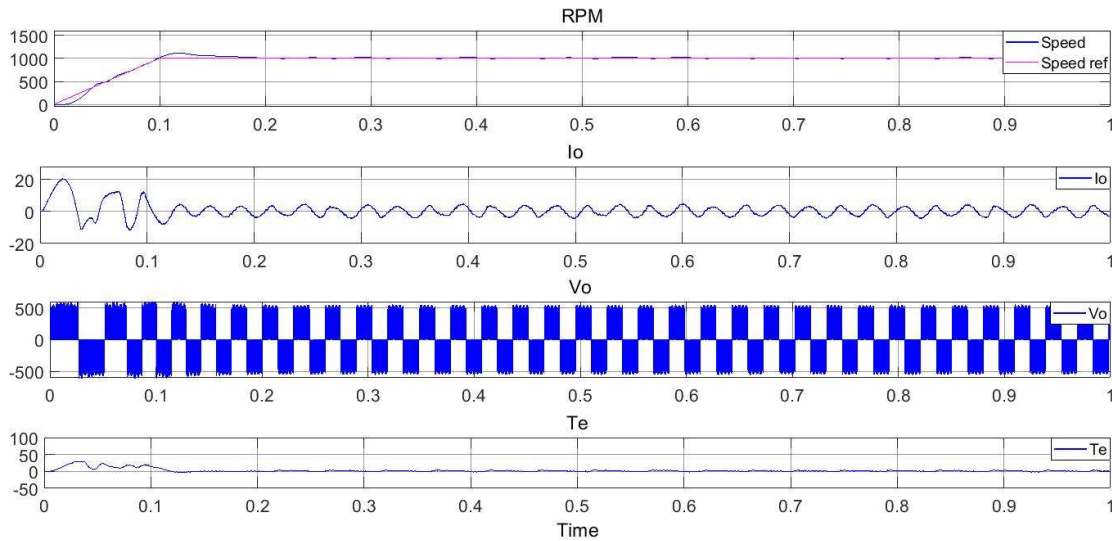
Gambar 7. Diagram Blok Sistem

Keluaran respon dengan *set point* kecepatan tinggi 1000 Rpm ditunjukkan pada Gambar 8. Gambar 8 menunjukkan sistem *closed loop* dapat mengikuti *set point* kecepatan tinggi motor induksi 3 fase tanpa beban menggunakan kendali konvensional PI. Umpan balik pengukuran

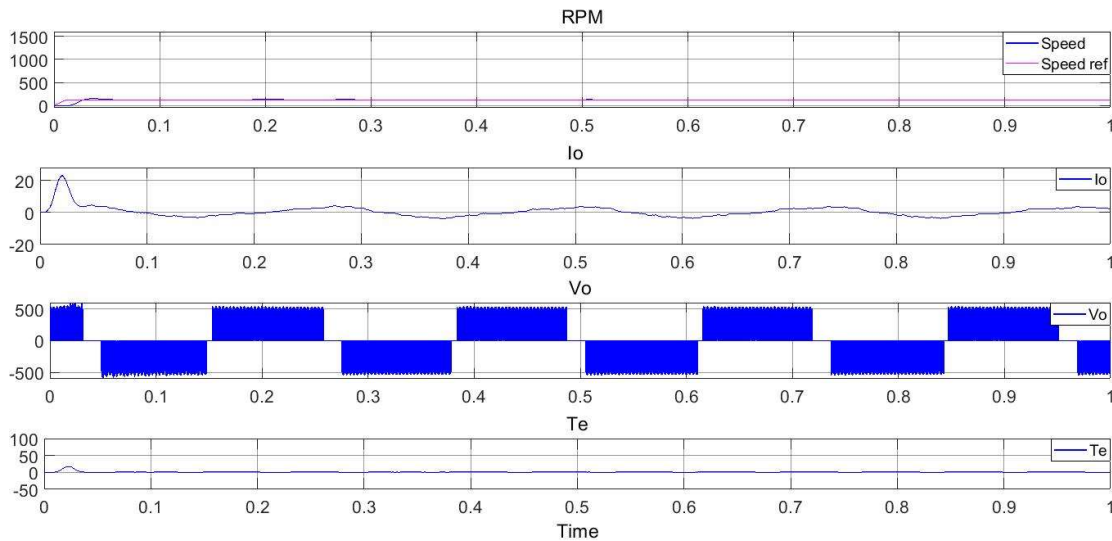
kecepatan dari sensor kecepatan dan *set point* digunakan sebagai masukan pengendali PI. Bentuk gelombang arus keluaran sisi beban mendekati sinusoidal yang mana mencapai 20 Ampere untuk *starting*.

Amplitudo sisi tegangan keluaran pada semua *set point* kecepatan diatur sama yaitu mencapai 538 Volt tanpa dipasang filter keluaran. Pada kecepatan tinggi, frekuensi arus dan tegangan masukan 50 Hz dijadikan referensi untuk menghasilkan frekuensi arus dan tegangan keluaran setara 33.3 Hz. Sedangkan respon torsi (T_e) motor induksi 3 fase tidak dikendalikan sehingga grafik torsi pada keadaan tunak semua kondisi bernilai konstan nol karena motor induksi 3 fase tanpa diberikan beban.

Pada Gambar 9 menunjukkan sistem pengendalian kecepatan rendah motor induksi 3 fase tanpa beban 120 Rpm. Arus *starting* sisi keluaran kecepatan rendah mencapai 23 Ampere yang mana lebih besar daripada saat kecepatan tinggi. *Matrix converter* mengubah frekuensi masukan 50 Hz menjadi frekuensi keluaran setara 4 Hz untuk mencapai kecepatan 120 Rpm.

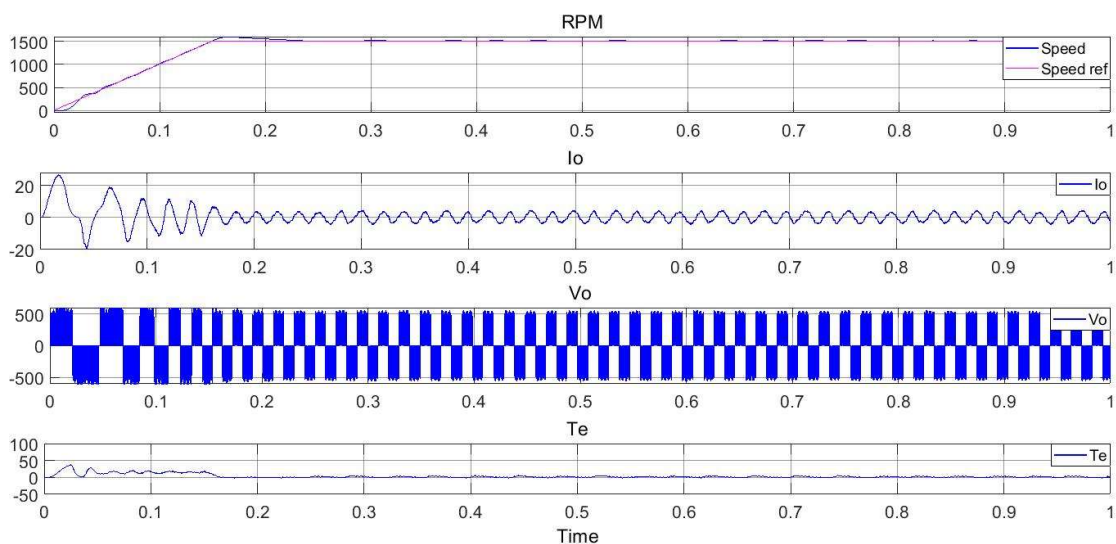


Gambar 8. Respon Motor pada Kecepatan Tinggi



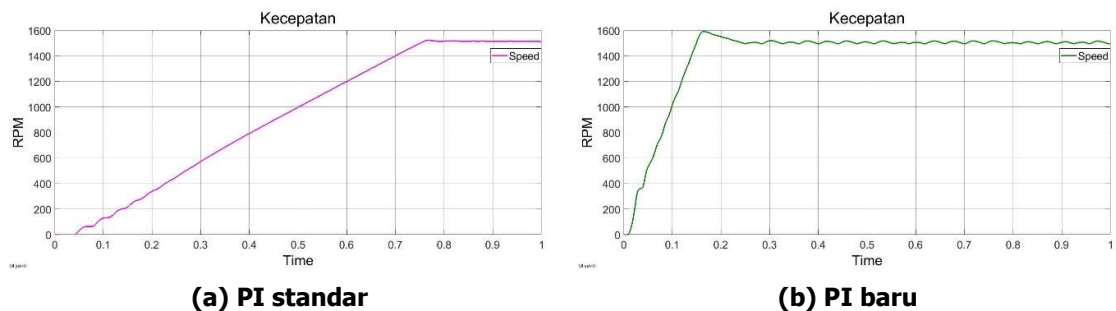
Gambar 9. Respon Motor pada Kecepatan Rendah

Respon kecepatan nominal 1500 Rpm ditunjukkan pada Gambar 10 dengan waktu naik (*rise time*) lebih lama daripada kecepatan lainnya. Pada kecepatan nominal, frekuensi masukan sama dengan frekuensi keluaran yaitu 50 Hz dan nilai arus *starting* mencapai 27 Ampere. 3 variasi *set point* kecepatan dapat dipenuhi secara optimal oleh sistem *closed loop* pengendali PI.



Gambar 10. Respon Motor pada Kecepatan Nominal

Pengendali yang diterapkan pada sistem *matrix converter closed loop* ini bertipe konvensional yang mana mempunyai perbandingan respon antara menggunakan kendali standar dan kendali PI yang baru ditunjukkan pada Gambar 11. Sistem kendali standar merupakan pengendalian kecepatan motor induksi menggunakan modulasi SVM dengan konverter dan PI konvensional standar. Sedangkan kendali kecepatan motor induksi yang baru merupakan sistem yang dikembangkan menggunakan *matrix converter* - ISVM dan PI konvensional. Hasil perbandingan menunjukkan waktu naik (*rise time*) yang berkurang hingga 629.131 ms. Walaupun hal ini menyebabkan *error steady state* 0.006 dan overshoot 5.821%, namun total nilai respon sistem kendali PI yang baru lebih baik daripada kendali PI standar yang mana ditunjukkan pada Tabel 2.



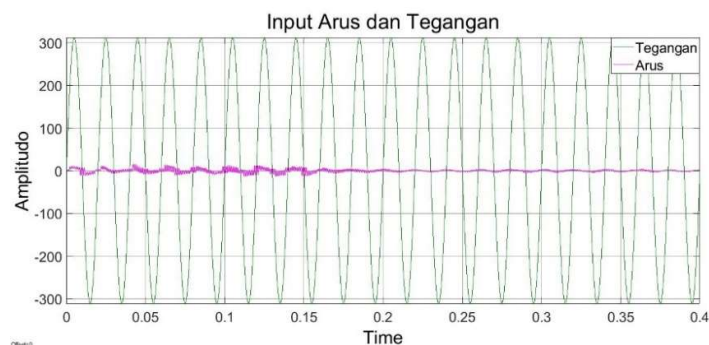
(a) PI standar **(b) PI baru**
Gambar 11. Perbandingan Keandalan Pengendali Konvensional

Tabel 2. Perbandingan Performa Sistem

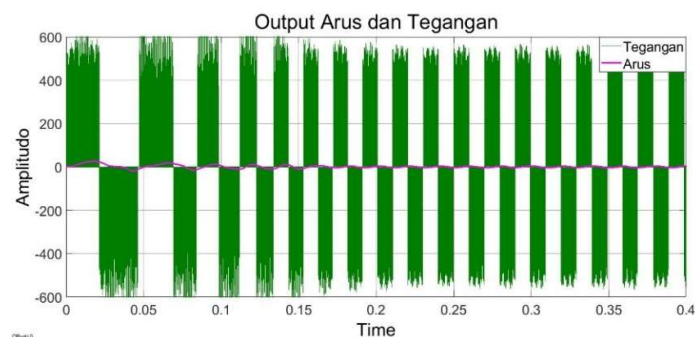
Metode	^a Overshoot (%)	^b Rise Time (ms)	^c Settling time (ms)	^d Error steady state	$\Sigma a+b+c+d$
Standar	0	743.177	786.082	0	1529.259
Baru	5.821	114.046	230.806	0.006	350.679

Pada konverter daya terdapat operasi pensakelaran tinggi yang dapat mempengaruhi bentuk gelombang baik sisi masukan maupun keluaran yang tidak sinusoidal. Hal ini jika diterapkan pada peralatan AC akan mengakibatkan banyak permasalahan seperti mempercepat umur pemakaian alat. Sehingga performa konverter daya dapat dilihat dari bentuk gelombang arus dan tegangan sisi masukan dan keluaran.

Gelombang arus dan tegangan sisi masukan dan keluaran *matrix converter* pada kecepatan nominal ditunjukkan pada Gambar 12 dan 13. Gelombang kecepatan nominal diamati lebih rinci karena gelombang tersebut mempunyai frekuensi masukan dan keluaran yang sama sehingga dapat fokus melihat bentuk gelombang dengan mengabaikan fase. Sedangkan pada *set point* kecepatan yang lain terjadi beda fase. Gelombang tegangan masukan mempunyai bentuk gelombang sinusoidal murni karena sumber dari jala – jala berupa suplai tegangan dengan frekuensi 50 Hz. Selanjutnya, bentuk gelombang tegangan keluaran mempunyai amplitudo 3 fase $\sqrt{3} \times 311$ Volt tegangan masukan. Baik pada gelombang arus masukan, arus dan tegangan keluaran mempunyai riak (*ripple*) sedikit. Hal ini dikarenakan adanya frekuensi pensakelaran *matrix converter* yang tinggi menyebabkan adanya rugi – rugi. Pemasangan filter dapat mengurangi adanya riak tersebut. Maka dari itu, sistem dipasang filter sisi masukan untuk mencegah riak yang besar yang mana dapat mengalir kembali ke sumber sehingga mempengaruhi kualitas daya.



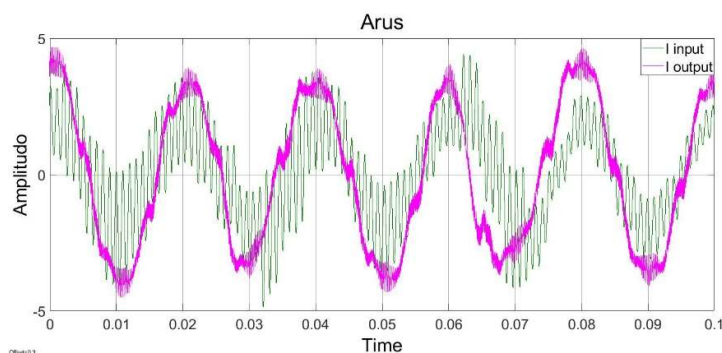
Gambar 12. Gelombang Arus dan Tegangan Masukan Motor pada Kecepatan Nominal



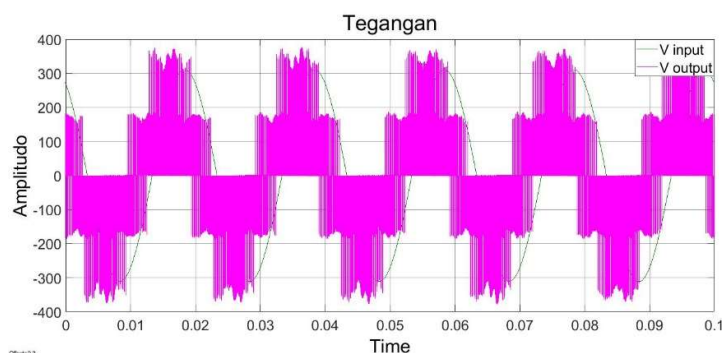
Gambar 13. Gelombang Arus dan Tegangan Keluaran Motor pada Kecepatan Nominal

Bentuk gelombang arus dan tegangan yang lebih detail pada keadaan tunak (*steady state*) tampak pada Gambar 14 dan Gambar 15. Adanya riak arus masukan dan keluaran ditunjukkan pada Gambar 14. Namun, arus masukan dan keluaran berada pada fase yang sama. Sedangkan gelombang tegangan masukan dari jala – jala dibandingkan dengan tegangan keluaran stator motor induksi pada Gambar 15. Riak gelombang menyatakan terdapat frekuensi selain frekuensi fundamental 50 Hz.

Pada kecepatan nominal, gelombang dengan frekuensi selain fundamental atau disebut harmonisa dapat menyebabkan rugi – rugi motor. Salah satu efek dari rugi – rugi motor yaitu suhu mesin listrik menjadi cepat panas. Nilai gangguan harmonisa total (*total harmonic distortion*) pada sistem ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 14. Gelombang Arus Masukan dan Keluaran *Matrix Converter* pada Keadaan Tunak



Gambar 15. Gelombang Tegangan Masukan dan Keluaran *Matrix Converter* pada Keadaan Tunak

Tabel 3. Perbandingan THD Sistem

Kecepatan	Iin		Iout		Vout		Rpm
	Iin	THD _i	Iout	THD _i	Vout	THD _v	
Nominal	2.032	39.93	3.438	24.23	335.9	28.32	1500
Tinggi	2.005	37.64	3.396	24.11	224.5	22.30	1000
Rendah	1.992	8.84	3.097	22.40	27.1	22.20	120

Total harmonic distortion (THD) yang muncul mempunyai nilai berbeda setiap *set point* kecepatan. Pada kecepatan nominal THD_i masukan, THD_i, dan THD_v keluaran berturut – turut

39.93%, 24.23%, dan 28.32%. Selanjutnya, THD_i masukan, THD_i , dan THD_v keluaran yaitu 37.64%, 24.11% dan 22.30% yang mana mengalami penurunan sebanding dengan berkurangnya *set point* kecepatan menjadi 1000 Rpm. Variasi kecepatan rendah mempunyai nilai THD_i masukan, THD_i , dan THD_v keluaran yaitu 8.84%, 22.40%, dan 22.20%.

Standar konstruksi motor listrik didesain untuk beroperasi pada kecepatan nominal, maka *set point* kecepatan rendah membutuhkan perlakuan khusus karena karakteristik torsi – kecepatan yang terbatas, parameter stator bervariasi, dan performa motor yang buruk (Alsofyani, dkk, 2016) (Garcia, dkk, 1998) (Lee, dkk, 2001) (Pongpant, dkk, 2006) (Tatte, dkk, 2018) (Zhang, dkk, 2011). Namun, penggunaan *matrix converter* sebagai *drive* motor induksi dapat menjaga THD_v keluaran kecepatan rendah bernilai 22.20%.

4. KESIMPULAN

Matrix converter sebagai *drive* motor induksi telah berhasil diterapkan untuk melakukan pengendalian kecepatan menggunakan kendali konvensional pada simulasi. *Set point* 3 variasi yaitu kecepatan 1000Rpm, 120Rpm, dan 1500Rpm dapat dicapai. Perbandingan kendali PI standar dan baru dapat mempersingkat waktu naik (*rise time*) menjadi lebih cepat. Respon nilai THD arus dan tegangan menggunakan *matrix converter* - ISVM menunjukkan gelombang sisi masukan dan keluaran pada fase yang sama dengan bentuk sinusoidal walaupun terdapat riak (*ripple*). Bentuk gelombang arus dan tegangan sisi masukan dan keluaran *matrix converter* sebagai *drive* motor induksi tidak mempengaruhi satu sama lain sehingga THD_v saat *set point* kecepatan rendah dapat dijaga pada nilai minimal dengan rata – rata harmonisa sistem *closed loop* 24.27%. Pengujian keefektifan *matrix converter* - ISVM telah diverifikasi dengan hasil simulasi Simulink software Matlab.

DAFTAR RUJUKAN

- Abu-rub, H., Iqbal, A., & Guzinski, J. (2012). *High Performance Control Of AC Drives With Matlab / Simulink Models*. John Wiley & Sons.
- Ahmed, S. M., Salam, Z., & Abu-rub, H. (2014). An Improved Space Vector Modulation for Three-to-Seven Phase Matrix Converter with Reduced Number of Switching Vectors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 0046 (c). <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2381158>
- Alsofyani, I. M., Rumzi, N., Idris, N., & Member, S. (2016). Simple Flux Regulation for Improving State Estimation at Very Low and Zero Speed of a Speed Sensorless Direct Torque Control of an Induction Motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31 (4), 3027–3035. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2447731>
- Bondarev, A. V., Fedorov, S. V., & Muravyova, E. A. (2018). Control Systems with Pulse Width Modulation in Matrix Converters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052008>
- Chowdhury, N. S., & Khan, M. A. (2017). Performance Analysis of PI, PID and Hybrid Fuzzy Controller in Matrix Converter Applications. *2017 2nd International Conference on*

- Electrical & Electronic Engineering (ICEEE)*.
<https://doi.org/10.1109/CEEE.2017.8412866>
- Dabour, S. M., & Rashad, E. M. (2012). Analysis and implementation of space vector modulated three-phase matrix converter. *IET Power Electronics*, 5(April), 1374–1378. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2012.0014>
- Dobrucky, B., Kascak, S., Prazenica, M., Drgona, P., & Pavlasek, P. (2018). AC / AC Powertrain Control under Different HEV Supply Network. *2018 ELEKTRO*, 1–6.
- Espina, J., Ortega, C., Lillo, L. De, & Empringham, L. (2014). Reduction of Output Common Mode Voltage Using a Novel SVM Implementation in Matrix Converters for Improved Motor Lifetime. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 0046 (c). <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2304931>
- Garcia, A. M., Lipo, T. A., & Novotny, D. W. (1998). A New Induction Motor V / f Control Method Capable of High-Performance Regulation at Low Speeds. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34 (4), 813–821.
- Guo, Y., Wang, X., Guo, Y., & Deng, W. (2018). Speed-sensorless direct torque control scheme for matrix converter driven induction motor. *IET Power Electronics*, 2018 (November 2017), 432–437. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.0016>
- Halder, S., Agrawal, A., Agarwal, P., Srivastava, S. P., & Das, S. (2017). Matrix converter fed PMSM drive with maximum torque per ampere control. *1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, ICPEICES 2016*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2016.7853371>
- Hannan, M. A., Ali, J. A., Mohamed, A., & Hussain, A. (2018). Optimization techniques to enhance the performance of induction motor drives: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (September 2016), 1611–1626. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.240>
- Kusumah, F. P., & Kyyra, J. (2019). Successive injections modulation of a direct three-phase to single-phase AC / AC converter for a contactless electric vehicle charger. *IET Power Electronics*, 2019 (Pemd 2018), 4106–4110. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8076>
- Lee, K. B., Song, J. H., Choy, I., & Yoo, J. Y. (2001). Improvement of Low-Speed Operation Performance of DTC for Three-Level Inverter-Fed Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48 (5), 1006–1014.
- Munuswamy, I., & Wheeler, P. W. (2017). Third Method for Regenerative Braking in Matrix Converter Drive: More Electric Aircraft. In *International Conference on Innovations in Power and Advanced Computing Technologies* (pp. 5–10).

- Nguyen, H., & Lee, H. (2017). An Effective SVM Method for Matrix Converters with a Superior Output Performance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 0046 (c), 1–10. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2779438>
- Nugroho, M. A. B., Windarko, N. A., & Sumantri, B. (2019). Perancangan Kendali Multilevel Inverter Satu Fasa Tiga Tingkat dengan PI + feedforward pada Beban Nonlinier. *Elkomnika*, 7(3), 493–507.
- Pongpant, J., Po-ngam, S., & Konghirun, M. (2006). The Performance Improvement of Constant V/f Control of Induction Motor Drive in Low Speed Range. In *IEEE Region 10 Conference - TENCON 2006* (Vol. 00, pp. 1–4).
- Purwanto, E., Murdianto, F. D., & Basuki, G. (2019). Venturini Modulation Based Matrix Converter Controlled Induction Motor Drive. In *IEEE International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA)*.
- Purwanto, E., Murdianto, F. D., Herlambang, D. W., Basuki, G., & Jati, M. P. (2019). Three-Phase Direct Matrix Converter With Space Vector Modulation for Induction Motor Drive. In *IEEE International Conference on Applied Information Technology and Innovation (ICAITI)*.
- Riba, J. R., López-Torres, C., Romeral, L., & Garcia, A. (2016). Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 367–379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.121>
- Rind, S. J., Ren, Y., Hu, Y., Wang, J., & Jiang, L. (2017). Configurations and Control of Traction Motors for Electric Vehicles : A Review. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 3(3), 13–14.
- Roy, R. B., Cros, J., Basher, E., & Taslim, S. M. B. (2018). Fuzzy logic based matrix converter controlled induction motor drive. *5th IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference 2017, R10-HTC 2017, 2018-Janua*, 489–493. <https://doi.org/10.1109/R10-HTC.2017.8289005>
- Sebtahmadi, S. S., Pirasteh, H., Kaboli, S. H. A., Radan, A., & Mekhleif, S. (2014). A 12 - Sector Space Vector Switching Scheme for Performance Improvement of Matrix Converter Based DTC of IM Drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, XX (XX), 1–13. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2347457>
- She, H., Lin, H., He, B., Wang, X., Yue, L., & An, X. (2012). Implementation of Voltage-Based Commutation in Space-Vector-Modulated Matrix Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(1), 154–166.
- Shin, E. C., Park, T. S., Oh, W. H., & Yoo, J. Y. (2003). A Design Method of PI Controller for

- an Induction Motor with Parameter Variation. In *IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference (IECON)* (pp. 408–413).
- Su, M., Lin, J., Sun, Y., & Xie, S. (2018). A New Modulation Strategy to Reduce Common Mode Current of Indirect Matrix Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, PP* (c), 1. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2864698>
- Tatte, Y. N., Aware, M. V, Pandit, J., & Nemade, R. (2018). Performance Improvement of Three-Level Five- Phase Inverter Fed DTC Controlled Five-Phase Induction Motor during Low-Speed Operation. *IEEE Transactions on Industry Applications, 9994* (c). <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2798593>
- Vidhya, S., & Venkatesan, T. (2017). Quasi - Z - Source Indirect Matrix Converter Fed Induction Motor Drive for Flow Control of Dye in Paper Mill, *8993* (c). <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2675903>
- Zhang, B., Liang, B., Xu, G., Wang, W., & Feng, G. (2011). Research on Variable Frequency Low-speed High-torque Squirrel Cage Induction Machine for Elevator. In *IEEE International Conference on Electrical Machine and Systems*.