

# Optimasi *Fuzzy Supervisory Control* pada Performa *Matrix Converter Drive 3x3* di Empat Kuadran Operasi

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

Teknik Elektro Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia  
Email: era@pens.ac.id

*Received* 27 Mei 2020 | *Revised* 25 Juni 2020 | *Accepted* 4 Juli 2020

## ABSTRAK

*Teknologi pengemudian motor dengan efisiensi tinggi serta untuk mencapai empat kuadran operasi menjadi perhatian pada bidang pengemudian elektrik. Matrix converter menjadi alternatif utama konverter drive motor karena keunggulan – keunggulannya. Walaupun matrix converter sebagai drive motor mempunyai kompleksitas tinggi, namun dengan dikombinasikan teknik Indirect Space Vector Modulation (ISVM) dapat menghasilkan kepresisian lebar pulsa modulasi (PWM). Untuk pengendali sistem, diterapkan Fuzzy Supervisory Control (FSC), yang merupakan kendali gabungan, agar kecepatan referensi bisa tercapai. FSC dibandingkan dengan kendali konvensional (PI control) untuk membuktikan keoptimalan performa sistem yang diusulkan. Parameter performa sistem dan Total Harmonic Distortion (THD) dianalisis lebih lanjut. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan dapat mencapai Error Steady state (ESS) 0% dan THD lebih kecil.*

**Kata kunci:** *Matrix converter, ISVM, FSC, motor induksi.*

## ABSTRACT

*Motor-driving technology with high efficiency and to achieve four quadrants of operation is a concern in the area of electric steering. Matrix converter is the main alternative for motor drive converters because of its advantages. Although the matrix converter as a motor drive has a high complexity, combined with the Indirect Space Vector Modulation (ISVM) technique can produce precision pulse width modulation (PWM). For the system controller, Fuzzy Supervisory Control (FSC) is applied, which is a combined control, so that the reference speed can be achieved. FSC is compared with conventional control (PI control) to prove the optimization of the proposed system performance. System performance parameters and Total Harmonic Distortion (THD) are further analyzed. Simulation results show that the proposed system can reach 0% Error Steady State (ESS) and smaller THD.*

**Keywords:** *Matrix converter, ISVM, FSC, induction motor.*

## 1. PENDAHULUAN

Pembahasan menarik mengenai pengemudian elektrik terdapat pada peningkatan performa kinerja mesin listrik. Subbagian pengemudian elektrik tidak terlepas dari motor AC di sisi beban, operasi mesin listrik sesuai referensi masukan dan konverter elektronika daya sebagai *drive*. Tantangan baru konverter *drive* berupa konverter yang mempunyai efisiensi tinggi dan fleksibel di semua kuadran operasi motor **(Li, dkk, 2019) (Mushenya, dkk, 2019) (Tiwari, & Rajendran, 2019)**. Berdasarkan regulasi yang berlaku dan kompetisi pabrikan, beberapa aplikasi peralatan yang mengandung mesin listrik dituntut untuk memenuhi empat kuadran operasi yaitu maju dipercepat, maju diperlambat, mundur dipercepat, dan mundur diperlambat **(Dendouga, & Dendouga, 2019) (Guo, dkk, 2018) (Krishnan, dkk, 2005)**.

*Matrix converter* sebagai pengemudi elektrik motor induksi mempunyai keunggulan menghasilkan aliran daya *bidirectional*, gelombang AC masukan dan keluaran berbentuk sinusoidal dan kemampuan regenerasi **(Ellabban, dkk, 2014) (Ma, dkk, 2018)**. Pengemudian mesin listrik khususnya kendali kecepatan motor induksi dengan *matrix converter* mempunyai kompleksitas tinggi karena *variable voltage variable frequency* ditentukan oleh pensakelaran satu tahap konversi. Karena pengaturan motor induksi *matrix converter* membutuhkan perubahan perbandingan frekuensi dan tegangan yang konstan, maka dapat menggunakan  $v/f$  atau kendali *scalar* **(Purwanto, dkk, 2019) (Rivera, dkk, 2016)**.

Algoritma yang canggih juga dibutuhkan untuk mengatur sakelar yang lebih banyak pada *bidirectional switch matrix converter*. Sehingga ketepatan dan kepresisian modulasi *matrix converter* harus dicapai yang mana dipengaruhi oleh tiga frekuensi independen yaitu frekuensi masukan dan keluaran serta frekuensi pensakelaran **(Ansari, & Chandel, 2017) (Su, dkk, 2018)**. Modulasi konverter memegang peranan untuk menghasilkan gelombang keluaran sinusoidal. Salah satunya, modulasi vektor yang mempunyai keunggulan menjaga rugi – rugi pensakelaran dan harmonisa keluaran pada keadaan minimal **(Jiang, dkk, 2018) (Nguyen, & Lee, 2017)**. SVM *matrix converter* diterapkan pada sistem *close loop* untuk dapat melakukan pengendalian motor induksi. *Feedback* kecepatan aktual menjadi masukan sistem kendali. Dalam hal pengendalian, kendali proportional integral (PI) atau konvensional merupakan solusi yang baik namun mempunyai performa terbatas jika digunakan pada sistem non linier motor induksi. Sedangkan pengendali logika *fuzzy* mempunyai kelebihan sebagai pengendali pada sistem dengan non linieritas tinggi. Maka, kombinasi dari kedua pengendali ini membentuk *Fuzzy Supervisory Control* (FSC) yang mampu memberikan performa yang lebih baik. Logika *fuzzy* telah banyak digunakan sebagai sistem kendali kecepatan karena keandalan, efisiensi, dan algoritma yang mudah **(Jati, dkk, 2020) (Ullah, dkk, 2019)**.

Sebagai pengembangan, makalah ini membahas kebaruan sistem kendali pada *matrix converter* yaitu *Fuzzy Supervisory Control* (FSC) sebagai *drive* motor induksi tiga fase yang dapat memenuhi empat kuadran operasi. Dalam sistem ini kendali utama adalah kendali PI sedangkan kendali logika *fuzzy* bekerja membantu untuk meminimalkan *overshot/undershot* yang terjadi dan juga meminimalkan *recovery time* dari respon sistem. Sistem kendali logika *fuzzy* yang didesain mempunyai 2 *input* yaitu error dan delta error dan *output* parameter  $K_p$  dan  $K_i$ , dimana sistem kendali ini akan digunakan pada *matrix converter* untuk mengoptimalkan performa *drive* pada motor induksi. Simulasi Simulink *software* Matlab dicoba pada kecepatan bervariasi. Hasil simulasi FSC *matrix converter* sebagai *drive* motor induksi dapat mencapai variable *speed*.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1 Motor Induksi Kendali Skalar

Metode *drive* motor induksi terdapat 2 tipe yaitu kendali skalar dan vektor. Kendali skalar merupakan topik penelitian yang menarik karena kemudahan dan kekokohan kendali yang mana dapat menghasilkan *error steady state* minimal. Teknik kendali skalar juga tidak membutuhkan model motor induksi pada pengemudian elektrik sehingga banyak diterapkan pada pengaturan kecepatan motor tanpa proses decoupled. Kendali sistem konvensional telah banyak diadopsi oleh peneliti untuk bekerja bersama dengan *scalar control* motor induksi 3 fase karena termasuk teknik yang terbukti efektif. Metode *scalar* dapat dinyatakan dalam Persamaan (1) (Zhang & Bazzi, 2019).

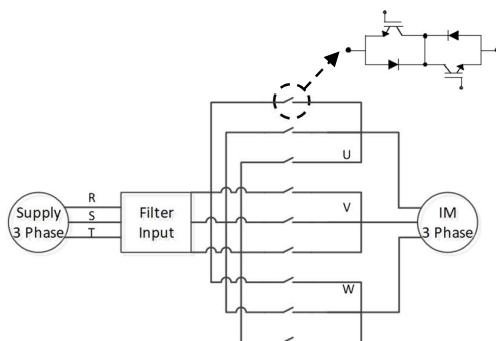
$$\Psi_m \cong \frac{V_p}{f} \cong K_v \quad (1)$$

Dimana  $\Psi_m$  adalah medan magnet di celah udara,  $V_p$  adalah tegangan maksimal, dan  $K_v$  adalah rasio dari  $V_p$  dengan  $f$ .

### 2.2 Matrix Converter

#### 2.2.1. Topologi

*Matrix converter* yang menghubungkan sumber 3 fase dari jala – jala dengan beban motor induksi 3 fase dicirikan oleh topologi matriks 9 sakelar (3x3). Hal ini memungkinkan aliran daya dua arah dengan langsung menghubungkan sistem masukan dan tegangan keluaran. Konfigurasi sakelar *bidirectional* merupakan bagian *hardware* yang penting karena menentukan *switching* dan *power loss* konverter. Konfigurasi yang sering digunakan yaitu *common emitter*. *Power losses matrix converter* terdiri dari konduksi dan pensakelaran IGBT/Mosfet dan dioda.



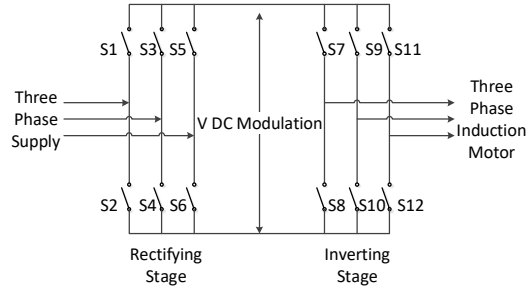
Gambar 1. Topologi *Matrix Converter* dengan Sakelar *Bidirectional*

#### 2.2.2. Indirect Space Vector Modulation

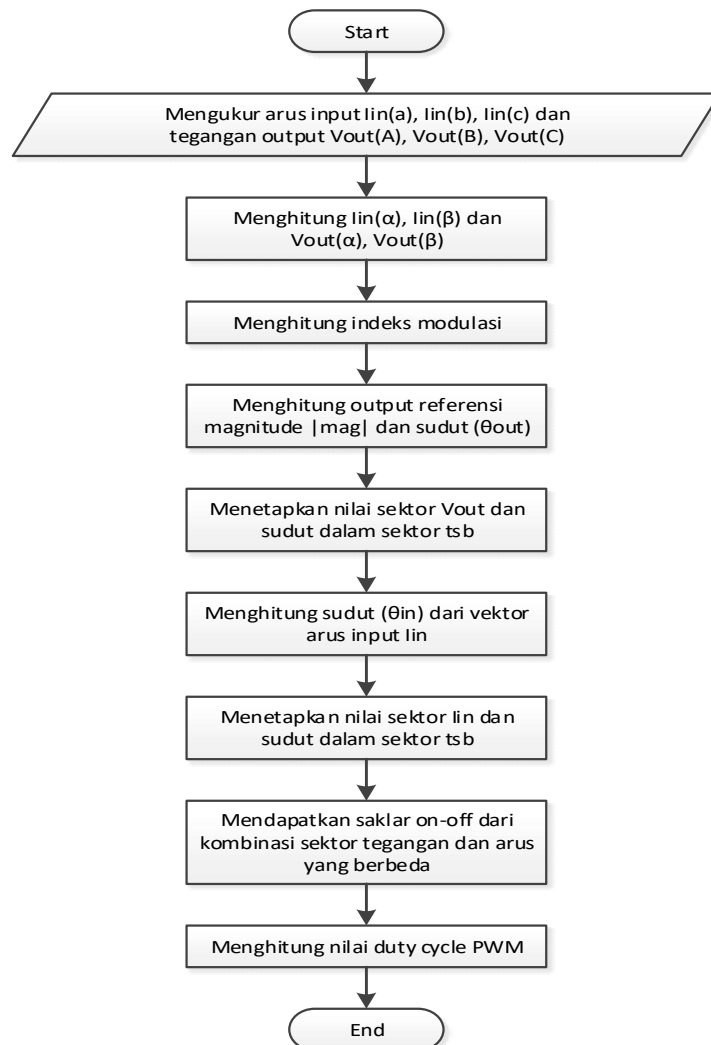
Pendekatan modulasi vektor ruang tidak langsung (*Indirect Space Vector Modulation*) digunakan untuk menentukan kombinasi *switching matrix converter*. Konsep dasar teknik modulasi ini dengan memisahkan kendali dari arus masukan dan tegangan keluaran. Dengan merepresentasikan pengendalian arus masukan pada proses penyearahan (*rectifying*) dan tegangan keluaran pada proses pembalikan (*inverting*), ISVM mempunyai rangkaian ekuivalen seperti pada Gambar 2.

*Matrix converter* dengan masukan 3 fase ke beban 3 fase menggunakan 9 sakelar *bidirectional* terhubung anti parallel. Tiga fase sisi masukan mempunyai frekuensi dan tegangan yang

konstan sedangkan tiga fase sisi keluaran dengan frekuensi dan tegangan yang bervariasi. Agar *matrix converter* beroperasi secara aman, terdapat batas aturan yang harus dipenuhi berupa fase masukan tidak terhubung singkat dan fase keluaran tidak berupa rangkaian terbuka. Berdasarkan aturan tersebut, kombinasi *on – off* sakelar yang umum diperbolehkan pada *matrix converter* ISVM ini ialah 27 kombinasi.



**Gambar 2. Rangkaian Ekuivalen *Indirect Space Vector Modulation* (ISVM)**



**Gambar 3. Proses *Indirect Space vector Modulation* (ISVM)**

Kedua tahapan konversi 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. 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  $\theta$  referensi.

Selanjutnya amplitudo  $|mag|$  dan sudut  $\theta$  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.

Terdapat referensi tegangan keluaran ( $V_o^*$ ) and arus masukan ( $I_i^*$ ) pada ISVM *matrix converter* yang berdasarkan Gambar 3 ditentukan menggunakan pendekatan vektor – vektor (**Jati, dkk, 2020**) (**Purwanto, dkk, 2019**). Persamaan (2),(3),(4), dan (5) digunakan pada inverter sumber tegangan.

$$V_o^* = d_a V_a + d_b V_b \quad (2)$$

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

$$d_b = \frac{T_b}{T_s} = m_v \sin(\theta_v) \quad (4)$$

$$0 \leq m_v \leq 1; m_v = \frac{\sqrt{3}V_o^*}{V_{DC}} \quad (5)$$

Sedangkan persamaan *rectifier* sumber arus dinyatakan seperti Persamaan (6), (7), (8), dan (9).

$$I_i^* = d_\gamma I_\gamma + d_\delta I_\delta \quad (6)$$

$$d_\gamma = \frac{T_\gamma}{T_s} = m_c \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_c\right) \quad (7)$$

$$d_\delta = \frac{T_\delta}{T_s} = m_c \sin(\theta_c) \quad (8)$$

$$0 \leq m_c \leq 1; m_c = \frac{I_i^*}{I_{DC}} \quad (9)$$

## 2.2 *Fuzzy Supervisory Control*

Pembahasan performa pengendali kecepatan motor induksi 3 fase menggunakan kendali konvensional tergantung pada ketepatan penalaan parameter *Proportional Integral Derivative* (PID). Kombinasi parameter kendali konvensional yang digunakan berupa *Proportional* dan *Integral* (PI) karena parameter *Derivative* tidak berpengaruh pada respon sistem orde 1.

*Fuzzy logic controller* sering dijadikan alternatif kendali karena kemudahannya merepresentasikan keadaan *plan* ke bahasa atau lisan dalam mengelola dan memproses informasi sistem. *Fuzzy logic controller* juga terkenal dengan keandalan mengatasi sistem dengan *uncertain parameters*. Karena kompleksitas kendali akan meningkat ketika digunakan untuk mengendalikan sistem yang kompleks atau non linier, maka kurang efisien untuk merancang dan menala kendali secara manual. Sehingga dengan adanya kendali gabungan logika *fuzzy* dan kendali konvensional dapat menala sistem secara otomatis.

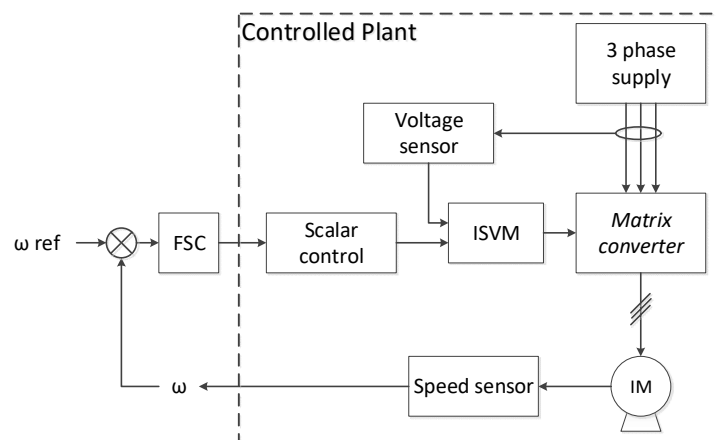
Pengendali yang diusulkan pada penelitian ini berupa kendali konvensional PI dikombinasikan dengan logika *fuzzy* menjadi kendali gabungan *Fuzzy Supervisory Control* (FSC). Kendali PI

mendapat masukan *error* kecepatan sebagai dasar set pengetahuan. Parameter pengendali PI ditentukan pada interval tertentu oleh logika *fuzzy* berdasarkan *error* kecepatan dan derivative *error* untuk menghasilkan nilai yang setara dengan kecepatan slip ( $\omega_{sl}$ ) *matrix converter*. Selanjutnya *scalar control* dikombinasi dengan FSC menjadi kendali gabungan dengan kelebihan penanganan sistem nonlinier. Tugas dari *Fuzzy Supervisory Control* adalah memperbarui parameter kendali konvensional berdasarkan data *feedback* yang memenuhi. Beberapa kelebihan dari sistem ini yaitu strukturnya yang sederhana, kemudahan implementasi, dan kekokohan.

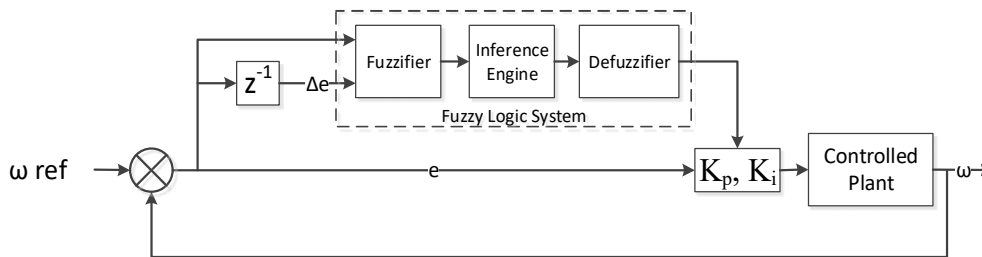
Model Simulink dari sistem *loop* tertutup FSC *matrix converter* digambarkan pada Gambar 4. Kendalier *fuzzy* mendapat masukan berupa selisih dari kecepatan referensi dan umpan balik sensor kecepatan serta nilai perubahan *error* rata – rata. *Error* kecepatan sebagai *input fuzzy* dijaga bernilai nol agar sama dengan kecepatan referensi. Selanjutnya, proses dalam logika *fuzzy* meliputi *fuzzification*, *fuzzy rules*, and *defuzzification* seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

Fuzzification atau *input membership function* mempunyai peran penting yang mana menentukan derajat keanggotaan tiap fase transisi keadaan. Dengan menggunakan tujuh fungsi berbentuk segitiga sebagai fungsi keanggotaan, menghasilkan deteksi keadaan *input* yang lebih halus dan sederhana. Sedangkan sisi *output*  $K_p$  menggunakan fungsi Gaussian yang dipilih berdasarkan karakteristik operasi parameternya.

*Rules base*, yang merupakan bagian terpenting dari *fuzzy set*, membutuhkan basis pengetahuan untuk mewakili klasifikasi sistem dari sekumpulan masukan ke sekumpulan keluaran. Hal ini menggunakan metode estimasi penalaran dalam bentuk "IF-THEN" yang menyajikan teknik inferensi dengan keunggulan yang lebih kuat dan fleksibel yang mengacu pada Tabel 1 dan Tabel 2. Basis pengetahuan diperoleh dari penalaan kendali PI secara manual untuk menentukan range atas – bawah *membership function*. Proses selanjutnya berupa defuzzifikasi yang mengubah *output fuzzy* dari basis aturan menjadi nilai linguistic parameter yang mempengaruhi kendali PI. *Variable linguistic* yang digunakan berupa NB (*Negative Big*), NM (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), ZE (*Zero Error*), PS (*Positive Small*), PM (*Positive Medium*), and PB (*Positive Big*). Akibatnya, *fuzzy supervisor* mempunyai wewenang untuk menentukan dan menyimpulkan pengaruh nilai parameter kendali PI sesuai kondisi *input* berdasarkan *rule base inference system*. Dengan demikian, parameter kendali PI dapat lebih *flexible* mengacu pada keadaan *error* yang bernilai nol.



**Gambar 4. Diagram Blok Sistem**



**Gambar 5. Diagram Blok *Fuzzy Supervisory Control***

**Tabel 1. *Fuzzy Rules Kp***

U	E							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
ΔE	NB	B	S	S	S	S	S	B
	NM	B	B	S	S	S	B	B
	NS	B	B	B	S	B	B	B
	ZE	B	B	B	B	B	B	B
	PS	B	B	B	S	B	B	B
	PM	B	B	S	S	S	B	B
	PB	B	S	S	S	S	S	B

**Tabel 2. *Fuzzy Rules Ki***

U	E							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
ΔE	NB	S	M	B	B	B	M	S
	NM	S	M	M	B	M	M	S
	NS	S	S	M	M	M	S	S
	ZE	S	S	S	M	S	S	S
	PS	S	S	M	M	M	S	S
	PM	S	M	M	B	M	M	S
	PB	S	M	B	B	B	M	S

### 3. PENGUJIAN DAN ANALISIS

#### 3.1 Pengujian *Fuzzy Supervisory Control* Pada *Matrix Converter*

Pada suatu sistem yang membutuhkan suatu sistem kontrol dengan kecepatan tinggi dan keakuratan data output, maka pemakaian aksi kontrol PI mungkin masih dianggap kurang memuaskan. Sebab jika menggunakan aksi kendali PI didapatkan jika suatu kontroler di set sangat sensitif, maka *overshot/undershot* yang dihasilkan akan semakin peka, sehingga osilasi yang ditimbulkan akan lebih tinggi, sedangkan bila kontroler di set kurang peka maka terjadinya *overshot/undershot* dapat diperkecil, tetapi waktu yang dibutuhkan akan semakin lama, dan ini akan menjadikan suatu masalah dalam suatu proses sistem tersebut.

Untuk mengatasi hal ini, diterapkan sistem kendali gabungan yaitu sistem kendali PI yang akan digabungkan dengan sistem kendali logika *fuzzy* menjadi *Fuzzy Supervisory Control* (FSC). Dalam sistem ini kendali utama adalah kendali PI sedangkan kendali logika *fuzzy* bekerja membantu untuk meminimalkan *overshot/undershot* yang terjadi dan juga meminimalkan *recovery time* dari respon sistem. Sistem kendali logika *fuzzy* yang didesain mempunyai 2 *input* yaitu error dan delta error dan *output* parameter  $K_p$  dan  $K_i$ , dimana sistem kendali ini akan digunakan pada *matrix converter* untuk mengoptimalkan performa *drive* pada motor induksi.

Sebagaimana dijelaskan teori diatas, sistem *matrix converter* 3x3 fase dirancang berupa simulasi menggunakan *software* Matlab dengan parameter sisi sumber yaitu  $V=311V$  dan  $f=50Hz$ . Sedangkan sisi beban berupa motor induksi dengan parameter yaitu  $V=400V$  dan  $P=4kW$  yang lebih rinci ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 3. Paramater Simulasi Motor Induksi menggunakan *Matrix converter***

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan masukan AC <i>line-to-line</i>	311	V
Frekuensi masukan AC	50	Hz
Frekuensi pensakelaran	6	kHz
Induktansi filter masukan	1.26	mH
Kapasitansi filter masukan	20	$\mu F$
Daya keluaran motor induksi	4	kW
Tegangan RMS motor induksi	400	V

Untuk membuktikan *matrix converter* sebagai *drive* motor induksi tiga fase dapat mencapai operasi maju dipercepat, maju diperlambat, mundur dipercepat, dan mundur diperlambat, sistem dianalisa lebih lanjut. Dengan masukan selisih kecepatan referensi ( $\omega_{ref}$ ) dan kecepatan actual ( $\omega$ ) ke FSC, diproses untuk menghasilkan sistem pengendalian kecepatan motor induksi 3 fase. Pengendali *drive* yang digunakan berupa kendali skalar *v/f*. Keluaran kendali *v/f* menjadi masukan proses modulasi *matrix converter* yang mana menggunakan *Indirect SVM* (ISVM). ISVM berfungsi menghasilkan pulsa pensakelaran *matrix converter* sebagai *drive* motor induksi.

Pada bagian ini, hasil grafik respon simulasi pada empat kuadran operasi ditunjukkan pada Gambar 6. Gambar 6(a) menunjukkan sistem *close loop* dapat mengikuti *set point* kecepatan 1200rpm, 300rpm, -500rpm, dan -120rpm dengan waktu peralihan secara berturut – turut 0s, 1s, 2s, dan 3s motor induksi 3 fase tanpa beban.

Sebagai komparasi performa sistem, simulasi menggunakan dua pengendali yaitu PI *control* dan FSC. Umpan balik pengukuran kecepatan dari sensor kecepatan dan set point digunakan sebagai masukan kedua pengendali. Pada operasi dinamik, percepatan maju mulai dari keadaan motor diam sampai mencapai 1200 rpm yang mana FSC mempunyai nilai *overshoot* lebih rendah dibanding PI *control*. Namun PI *control* memiliki *rise time* lebih cepat dibanding FSC dengan selisih 23.11ms.

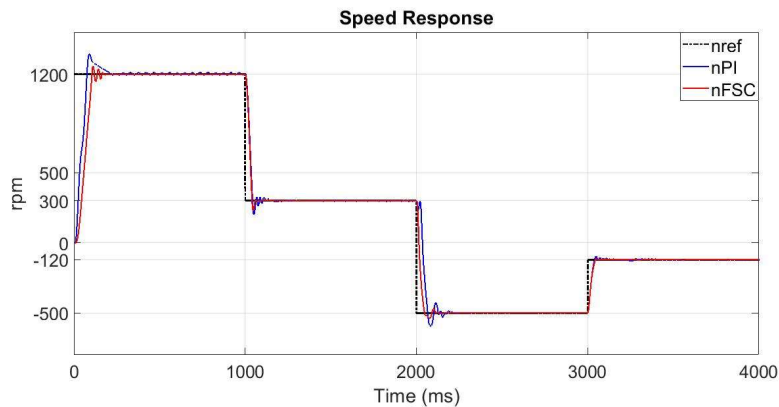
Selanjutnya, operasi motor maju diperlambat dimulai dari kecepatan 1200rpm berkurang menjadi 300rpm atau setara dengan frekuensi keluaran 10 Hz yang mana FSC mempunyai *undershoot* lebih kecil daripada PI *control*. Begitu juga pada operasi putar balik atau mundur dipercepat kecepatan -500rpm dan mundur diperlambat kecepatan -120rpm, nilai *overshoot* FSC lebih kecil daripada PI *control*. Perbandingan performa kecepatan dua PI *control* dan FSC ditunjukkan pada Tabel 4 dilengkapi dengan total keseluruhan nilai masing – masing pengendali.

Bentuk gelombang arus masukan sisi sumber mempunyai frekuensi dan tegangan diatur konstan yang mana mencapai 35 Ampere untuk pada kondisi awal. Pada Gambar 6(b), arus masukan PI *control* dengan grafik berwarna biru menunjukkan amplitudo yang hampir sama dengan FSC. Namun, pada waktu peralihan secara rata – rata FSC mempunyai amplitudo lebih kecil dibanding PI *control*.

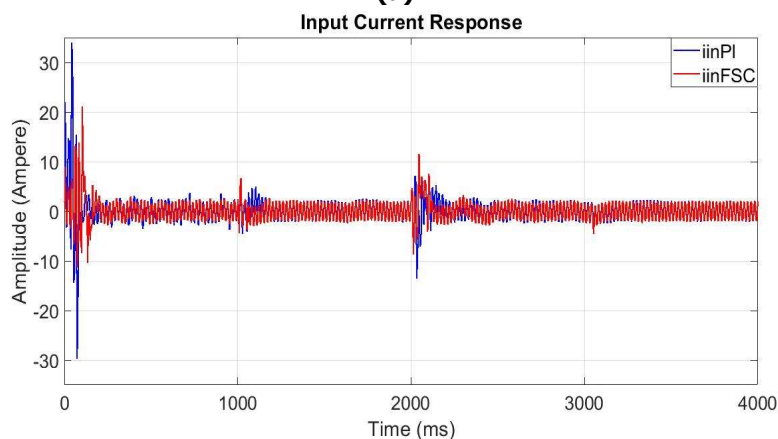


Optimasi *Fuzzy Supervisory Control* pada Performa *Matrix Converter Drive 3x3* di Empat Kuadran Operasi

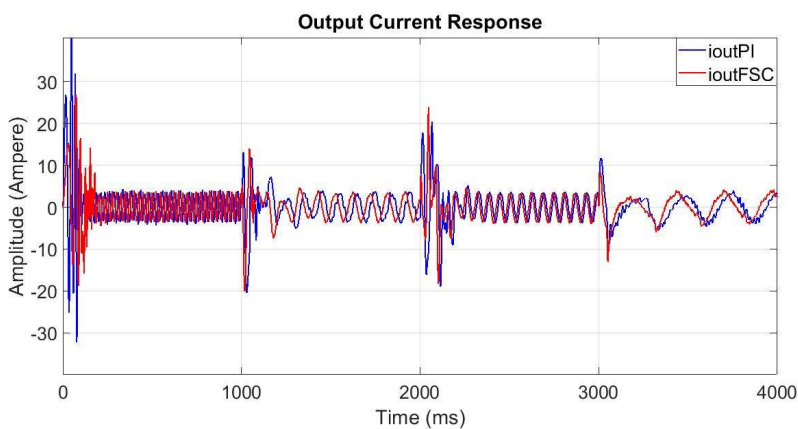
Sebagai penentuan nilai perbandingan arus keluaran sisi beban dua pengendali, ditunjukkan pada Gambar 6(c). Arus *starting* motor menggunakan *PI control* mempunyai amplitudo mencapai 40 Ampere. *Matrix converter* mengubah frekuensi masukan 50 Hz menjadi frekuensi keluaran setara dengan *setpoint* kecepatan.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 6. (a) Perbandingan Respon Sistem Kecepatan, (b) Arus Masukan, (c) Arus Keluaran**

Kendali PI yang digunakan pada *matrix converter*– ISVM membutuhkan *tuning* parameter tiap perubahan *setpoint* kecepatan untuk mendapatkan respon yang memenuhi. Parameter penentu perbandingan performa lainnya merupakan hasil nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) antara FSC dan kendali PI yang ditunjukkan pada Tabel 5. Nilai THD yang diamati pada sisi arus masukan (THDi *input*), arus keluaran (THDi *output*), dan tegangan keluaran (THDv *output*). Harmonisa tegangan masukan ((THDv *input*) tidak ditampilkan karena sistem mendapatkan sumber tegangan yang mana frekuensinya dianggap ideal 50 Hz. Nilai THD diamati pada setiap perubahan *setpoint* kecepatan (yang mewakili tiap kuadran operasi) karena *matrix converter* bertindak sebagai *Variable Frequency Drive* (VFD) yang mana mengubah frekuensi masukan yang konstan ke frekuensi keluaran yang berbeda. Maka, dengan adanya perubahan referensi kecepatan, diikuti frekuensi keluaran yang berubah.

Sebagaimana pada Tabel 5, THDi kecepatan 1200rpm (maju dipercepat) PI *control* mengandung harmonisa bernilai 26.53%. Sedangkan FSC mempunyai harmonisa 23.64% yang mana lebih rendah daripada PI *control*. Selanjutnya, FSC pada operasi maju diperlambat (300rpm), mundur dipercepat (-500rpm), dan mundur diperlambat (-120rpm) memiliki kandungan harmonisa secara berturut – turut 12.27%, 13.35%, dan 6.02%. THD masukan paling kecil saat -120rpm atau operasi mundur diperlambat. Sedangkan jika diamati THD sisi keluaran, mempunyai nilai terkecil pada operasi mundur dipercepat. Keseluruhan THD FSC mempunyai nilai relatif 4.36% lebih kecil dibanding PI *control*.

**Tabel 4. Perbandingan Performa Sistem**

<i>Set point</i>	<i>Overshoot (%)</i>		<i>Rise Time (ms)</i>		<i>Settling Time (ms)</i>		<i>Error Steady state (%)</i>		<i>Total Performance</i>	
	FSC	PI	FSC	PI	FSC	PI	FSC	PI	FSC	PI
1200	4.92	12.00	95.517	72.407	173.48 9	213.307	0	1.17	269.06	285.85
300	17.9 0	33.33	35.088	39.139	74.074	144.814	0	13.0 0	109.34	184.42
-500	7.78	18.38	27.290	27.397	93.567	187.867	0	4.60	120.93	215.49
-120	7.00	19.47	31.189	31.311	54.581	101.761	0	5.58	85.84	133.32

**Tabel 5. Perbandingan THD Sistem**

<i>Set point</i>	THD					
	<i>Iin (%)</i>		<i>Iout (%)</i>		<i>Vout (%)</i>	
	FSC	PI	FSC	PI	FSC	PI
1200	23.64	26.53	14.49	18.85	24.17	27.68
300	12.27	14.23	16.32	19.2	17.53	20.56
-500	13.35	14.2	9.26	9.38	13.67	15.49
-120	6.02	7.04	19.99	20.66	30.41	31.78

Karakteristik umum yang digunakan dalam pengontrolan suatu sistem antara lain meliputi stabilitas, akurasi, kecepatan respon dan sensitivitas. Sedangkan jika diamati THD sisi keluaran, mempunyai nilai terkecil pada operasi mundur dipercepat. Keseluruhan THD FSC mempunyai nilai relatif 4.36% lebih kecil dibanding PI *control*.

#### 4. KESIMPULAN

Simulasi *matrix converter* sebagai *drive* motor induksi tiga fase untuk mencapai empat kuadran operasi dari kecepatan rendah hingga mendekati nominal telah dibuktikan. Kombinasi *matrix converter* dengan ISVM menjamin ketepatan modulasi sistem. Perbandingan performa FSC dengan PI *control* telah dianalisis lebih lanjut. FSC dapat mencapai parameter *error steady state* 0% di setiap *setpoint* kecepatan, akan tetapi FSC memiliki *rise time* yang lebih lambat dibanding pengendali PI dengan selisih 23,11 ms. Disamping itu, sistem dengan FSC mempunyai harmonisa (THD) lebih kecil 4.36% dibanding PI *control*.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Ansari, S., & Chandel, A. (2017). Simulation based Comprehensive Analysis of Direct and Indirect matrix Converter fed Asynchronous motor drive. *IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical Computer and Electronics (UPCON)*, (pp. 9 – 15).
- Dendouga, A., & Dendouga, A. (2019). High Performance Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Fed by Direct SVM Matrix Converter. *IEEE International Conference on Power Electronics and Their Applications (ICPEA)*, 1(September), (pp. 1 – 6).
- Ellabban, O., Abu-rub, H., & Baoming, G. (2014). A Quasi-Z-Source Direct Matrix Converter Feeding A Vector Controlled Induction Motor Drive. *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6777(c). <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2309979>
- 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>
- Jati, M. P., Purwanto, E., Sumantri, B., & Basuki, G. (2020). Matrix Converter Sebagai Pengendali Kecepatan Motor Induksi 3 Fase Dengan ISVM. *Jurnal Elkomika*, 8(2).
- Jiang, X., Xu, D., Gu, L., Li, Q., Xu, B., & Li, Y. (2018). Short-Circuit Fault-Tolerant Operation of Dual- Winding Permanent-Magnet Motor under the Four Quadrant Condition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 0046(c).
- Krishnan, R., Park, S., & Ha, K. (2005). Theory and Operation of a Four-Quadrant *Switched* Reluctance Motor Drive With a Single Controllable *Switch* — The Lowest Cost Four-Quadrant Brushless Motor Drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(4), 1047–1055.
- Li, B., Zhou, S., Han, L., Wang, J., & Xu, D. (2019). Back-to-Back Modular Multilevel Converter Topology with DC-Link *Switches* for High-Power Four-Quadrant Variable Speed Motor Drives. *21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)*, (pp. 1 – 7).
- Ma, X., Zhang, Z., Xu, D., & Wang, K. (2018). On Closed - loop Control of Matrix Converter

- with Double Voltage Control. *IEEE Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)*, (pp. 229 – 234).
- Mushenya, J., Khan, M. A., & Barendse, P. S. (2019). Development of a Test Rig to Automate Efficiency Testing of Converter-Fed Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 9994(c). <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2928504>
- 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>
- 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. *IEEE International Conference on Applied Information Technology and Innovation (ICAITI)*, (pp. 11 - 16).
- Rivera, M., Wheeler, P., Olloqui, A., & Khaburi, D. A. (2016). A review of predictive control techniques for matrix converters-Part I. *7th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, PEDSTC 2016*, (pp. 582 - 588).
- 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>
- Tiwari, S., & Rajendran, S. (2019). Four Quadrant Operation and Control of Three Phase BLDC Motor for Electric Vehicles. *IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*, (pp. 577 – 582).
- Ullah, S., Ahmad, I., & Muhammad, E. (2019). Design and Analysis of Fuzzy Supervisory Control of an Induction Motor. *IEEE International Conference on Applied and Engineering Mathematics (ICAEM)*, (pp. 244 – 250).
- Zhang, Z., & Bazzi, A. (2019). Robust Sensorless *Scalar* Control of Induction Motor Drives with Torque Capability Enhancement at Low Speeds. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, (pp. 1706 – 1710).