

Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Matrix Konverter dengan Metode Sliding Mode Control

Muh. Novian Hadi Zaen¹, I Ketut Wiryajati¹, I Made Ari Nrartha¹

¹ Jurusan Teknik Elektro Universitas Mataram, Jl. Majapahit No.62 Mataram 83125, Indonesia, Telp (0370)636126 Fax (0370)636523

ARTICLE INFO

Article history (8 pt):

Received July 26, 2023
Revised August 28, 2023
Accepted August 28, 2023

Keywords (8 pt):

matrix converter;
motor induksi 3 fasa;
sliding mode control;
space vector modulation;

ABSTRACT

The most widely used electric motor in the industrial is the 3-phase induction motor. It is advantageous since its strong characteristics, reliability and low maintenance costs. A 3 phase induction motor can be controlled by changing the input voltage and frequency. One technique to change the amount of voltage and frequency is to use a matrix converter. Matrix converters can produce bidirectional power flow with sinusoidal AC waves and regeneration capabilities for input and output. On the other hand, a 3-phase induction motor is not able to maintain a constant speed, so a controller is needed to fix the speed problem of an induction motor. In this study, a matrix converter with a sliding mode control method was used to control the speed of a 3-phase induction motor. Sliding mode control is a control technique that is robust against disturbances and parameter changes. The results of the speed response of a 3-phase induction motor using a matrix converter with the sliding mode control method can accelerate the system to reach steady state and reduce the settling time value and reduce the overshoot value both at no-load and load conditions. Obtained an overshoot value of 0.50% and a settling time of 0.05 seconds.

Motor listrik yang paling banyak digunakan pada bidang industri adalah motor induksi 3 fasa, karena karakteristiknya yang kokoh, handal, dan biaya perawatannya murah. Motor induksi 3 fasa dapat dikendalikan dengan mengubah besar tegangan dan frekuensi masukannya. Salah satu teknik untuk mengubah besaran tegangan dan frekuensinya yaitu dengan menggunakan *matrix converter*. *Matrix converter* dapat menghasilkan aliran daya *bidirectional* dengan gelombang AC berbentuk sinusoidal dan kemampuan regenerasi untuk masukan dan keluarannya. Disisi lain motor induksi 3 fasa tidak mampu mempertahankan kecepatannya dengan konstan, sehingga dibutuhkan suatu kontroler untuk memperbaiki masalah kecepatan motor induksi. Pada penelitian ini digunakan *matrix converter* dengan metode *sliding mode control* untuk mengendalikan kecepatan motor induksi 3 fasa. *Sliding mode control* adalah salah satu teknik kendali yang memiliki sifat kokoh terhadap gangguan maupun perubahan parameter. Hasil respon kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan *matrix converter* dengan metode *sliding mode control* dapat mempercepat sistem mencapai *steady state* dan memperkecil nilai *settling time* serta memperkecil nilai *overshoot* baik pada kondisi tanpa beban dan berbeban. Didapatkan nilai *overshoot* 0,50 % dan *settling time* 0,05 detik.

1. PENDAHULUAN

Sejak berkembangnya revolusi industri, banyak peralatan industri yang digantikan dengan mesin listrik. Mesin listrik yang paling umum digunakan yaitu jenis motor induksi. Motor induksi banyak digunakan karena karakteristiknya yang kokoh, handal, dan biaya perawatannya murah. Salah satu motor induksi yang dibutuhkan industri pada proses produksinya adalah motor induksi 3 fasa[1].

Motor induksi 3 fasa merupakan motor arus bolak-balik (AC) yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor induksi 3 fasa memiliki rancangan yang sederhana dengan karakteristik yang dimiliki

yaitu kecepatannya dapat dikendalikan dengan mengubah-ubah besar tegangan masukan maupun mengubah frekuensinya [2]. Ide untuk mengatur kecepatan motor secara elektronik dapat dari artikel [3]. Selain beberapa teknik untuk mengubah tegangan masukan dan frekuensi masukan yaitu dengan menggunakan converter yang berbasis Teknik modulasi [4]. Salah satunya dengan menggunakan *matrix converter*.

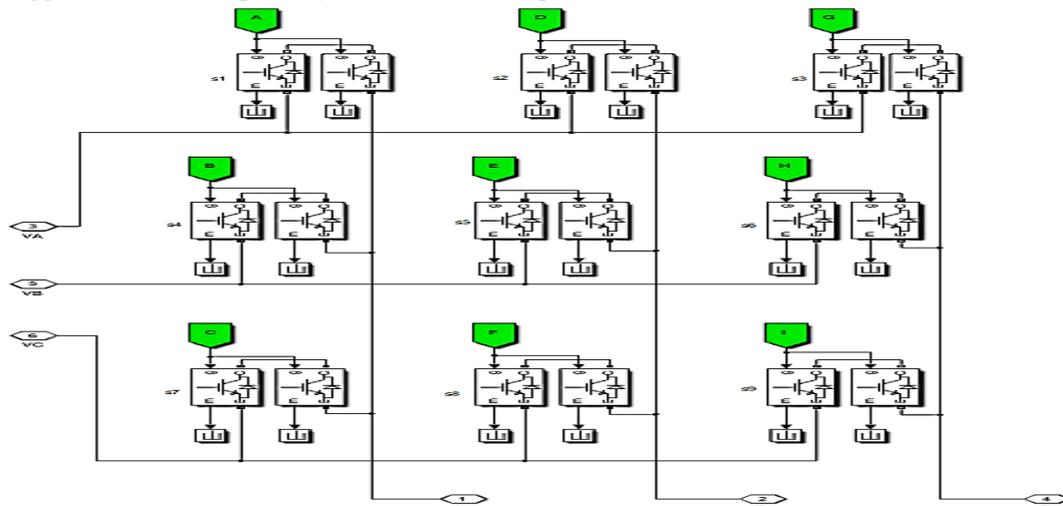
Matrix converter adalah konverter yang mengubah listrik AC menjadi listrik AC dengan parameter berbeda. *Matrix converter* sebagai pengendali motor induksi yang memiliki kelebihan dalam menghasilkan aliran daya bidirectional, gelombang AC masukan dan keluaran berbentuk sinusoidal dan kemampuan regenerasi [9]. *Matrix converter* menghasilkan gelombang sisi masukan dan keluaran fase yang sama dengan bentuk sinusoidal tetapi terdapat riak [5].

Sliding mode control adalah salah satu teknik kendali yang memiliki sifat kokoh terhadap gangguan maupun perubahan parameter [6]. *Sliding mode control* dapat menghasilkan respon kecepatan motor induksi yang hampir tidak mengalami perubahan kecepatan dari referensi yang diberikan pada saat terjadi perubahan beban dan pada saat *steady state* awal fluktuasi *ripple* yang dibangkitkan kecil [7]. Metode *sliding mode control* dipilih karena kekokohan yang dimiliki. *sliding mode control* memiliki respon keluaran yang baik dalam meredam *chattering* [8]. Sehingga pada penelitian ini penulis menggunakan metode *sliding mode control* untuk mengatasi permasalahan pada pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan *matrix converter*. Dengan digunakan kontroler *Sliding Mode Control* (SMC), diharapkan sistem memiliki kemampuan yang kokoh terhadap perubahan respon kecepatan motor induksi 3 fasa.

2. METODE

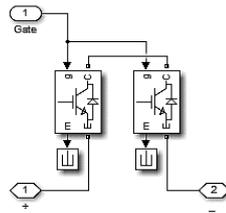
2.1. Simulasi *Matrix Converter*

Pada penelitian ini yang menjadi salah satu bagian penting adalah pembuatan dan perencanaan *matrix converter* dan metode *sliding mode control*. simulasi *matrix converter* terdiri dari 9 saklar *bidirectional* disusun secara matriks 3x3 dengan teknik modulasi *direct space vector modulation* yang telah disimulasikan menggunakan simulink pada *software* MATLAB seperti Gambar 1.



Gambar 1. Simulasi *Matrix Converter*

Simulasi *matrix converter* memungkinkan masukan 3 fasa dari sumber terhubung langsung dengan keluaran 3 fasa untuk motor induksi 3 fasa. *matrix converter* memiliki susunan baris dan kolom saklar *bidirectional* yang dapat difungsikan pada frekuensi tinggi dan bertujuan untuk mengatur keluaran *matrix converter* yang menghasilkan tegangan dan frekuensi mengikuti karakteristik dari keluaran yang diinginkan [1]. Saklar *bidirectional* disimulasikan menggunakan susunan IGBT/dioda seperti Gambar 2.

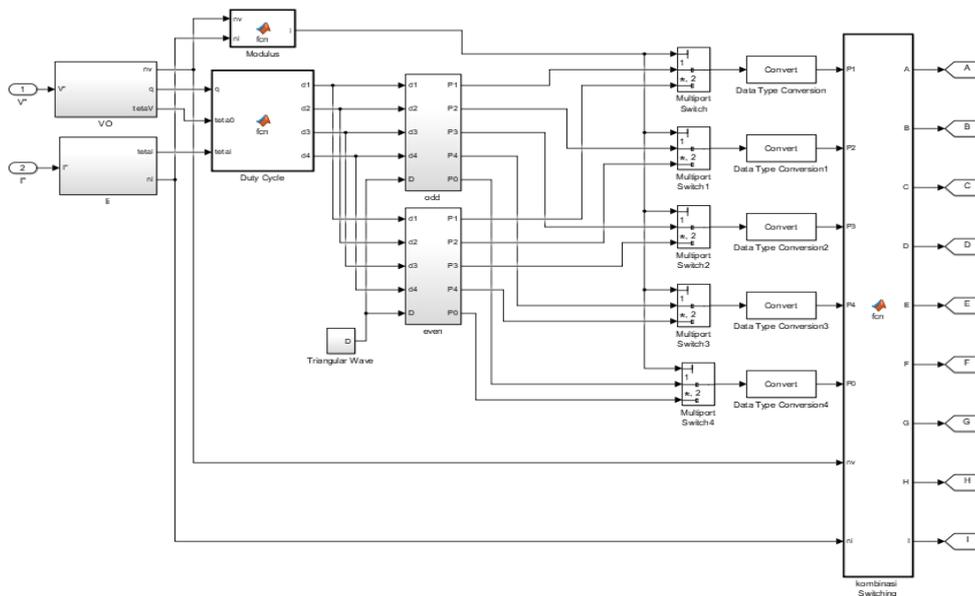


Gambar 2. Simulasi Rangkaian Saklar *Bidirectional* Menggunakan IGBT/Dioda

Saklar *bidirectional* disusun menggunakan 2 IGBT/dioda dihubungkan secara *common emitter* yang memungkinkan arus mengalir secara bolak balik. IGBT memiliki kaki *gate* yang menerima sinyal PWM yang dihasilkan dari teknik modulasi *space vector modulation* dengan mengikuti aturan untuk proses modulasi pensaklaran *matrix converter*, maka hasil keluaran pada *matrix converter* akan menghasilkan tegangan keluaran yang memiliki nilai frekuensi tetap maupun berubah[7].

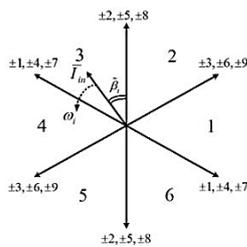
2.2. *Space Vector Modulation*

Space vector modulation merupakan teknik modulasi yang didasarkan pada transformasi jumlah *input* dan *output* menjadi vektor ruang[6]. Pada penelitian ini *space vector modulation* disimulasikan seperti Gambar 3

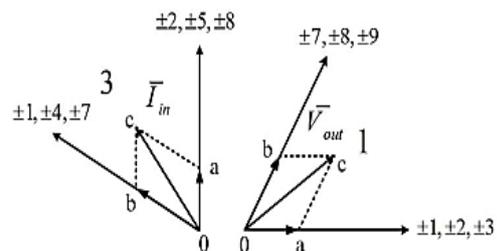
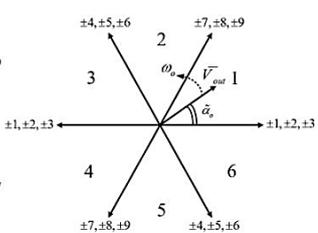


Gambar 3. Simulasi Rangkaian *Space Vector Modulation*

Teknik modulasi *space vector modulation* digunakan untuk mengatur sinyal PWM sebagai masukan untuk kaki gate IGBT dengan mengikuti aturan *switching* untuk *matrix converter*. Kombinasi *switching matrix converter* dan Vektor tegangan kluararan dan arus masukan *space vector modulation* ditunjukkan pada tabel 1.



Gambar 4. Vektor arus masukan pada sektor 1 dan vektor,



Gambar 5. Vektor arus masukan pada sektor 3 dan vektor

Untuk memperjelas prinsip utama *space vector modulation*, dapat diasumsikan \vec{V}_{out} dan \vec{I}_{in} masing-masing berada sektor 1 dan 3. Vektor referensi dapat disintesis menggunakan vektor aktif yang berdekatan. Karena tegangan keluaran dan arus masukan vektor harus dihasilkan secara bersamaan, vektor yang dapat digunakan jika berdekatan dengan kedua vektor. Kondisi yang diasumsikan, vektor aktif diantaranya hanya ($\pm 1, \pm 2, \pm 7, \pm 8$) yang dapat dipilih. Tabel 2. merangkum status switching aktif untuk semua kemungkinan kombinasi tegangan keluaran dan arus masukan sektor [11].

Tabel 1. Kombinasi switching matrix converter vektor space vektor modulation

States	Switches on	$ \vec{V}_o $	$\angle \vec{V}_o$	$ \vec{I}_{in} $	$\angle \vec{I}_{in}$
+1	$S_{Aa} S_{Bb} S_{Bc}$	$2/3 v_{AB}$	0	$2/\sqrt{3} I_a$	$-\pi/6$
-1	$S_{Ba} S_{Ab} S_{Ac}$	$-2/3 v_{AB}$	0	$-2/\sqrt{3} I_a$	$-\pi/6$
+2	$S_{Ba} S_{Cb} S_{Cc}$	$2/3 v_{BC}$	0	$2/\sqrt{3} I_a$	$\pi/2$
-2	$S_{Ca} S_{Bb} S_{Bc}$	$-2/3 v_{BC}$	0	$-2/\sqrt{3} I_a$	$\pi/2$
+3	$S_{Ca} S_{Ab} S_{Ac}$	$2/3 v_{CA}$	0	$2/\sqrt{3} I_a$	$7\pi/6$
-3	$S_{Aa} S_{Cb} S_{Cc}$	$-2/3 v_{CA}$	0	$-2/\sqrt{3} I_a$	$7\pi/6$
+4	$S_{Ba} S_{Ab} S_{Bc}$	$2/3 v_{AB}$	$2\pi/3$	$2/\sqrt{3} I_b$	$-\pi/6$
-4	$S_{Aa} S_{Bb} S_{Ac}$	$-2/3 v_{AB}$	$2\pi/3$	$-2/\sqrt{3} I_b$	$-\pi/6$
+5	$S_{Ca} S_{Bb} S_{Cc}$	$2/3 v_{BC}$	$2\pi/3$	$2/\sqrt{3} I_b$	$\pi/2$
-5	$S_{Ba} S_{Cb} S_{Bc}$	$-2/3 v_{BC}$	$2\pi/3$	$-2/\sqrt{3} I_b$	$\pi/2$
+6	$S_{Aa} S_{Cb} S_{Ac}$	$2/3 v_{CA}$	$2\pi/3$	$2/\sqrt{3} I_b$	$7\pi/6$
-6	$S_{Ca} S_{Ab} S_{Cc}$	$-2/3 v_{CA}$	$2\pi/3$	$-2/\sqrt{3} I_b$	$7\pi/6$
+7	$S_{Ba} S_{Bb} S_{Ac}$	$2/3 v_{AB}$	$4\pi/3$	$2/\sqrt{3} I_c$	$-\pi/6$
-7	$S_{Aa} S_{Ab} S_{Bc}$	$-2/3 v_{AB}$	$4\pi/3$	$-2/\sqrt{3} I_c$	$-\pi/6$
+8	$S_{Ca} S_{Cb} S_{Bc}$	$2/3 v_{BC}$	$4\pi/3$	$2/\sqrt{3} I_c$	$\pi/2$
-8	$S_{Ba} S_{Bb} S_{Cc}$	$-2/3 v_{BC}$	$4\pi/3$	$-2/\sqrt{3} I_c$	$\pi/2$
+9	$S_{Aa} S_{Ab} S_{Cc}$	$2/3 v_{CA}$	$4\pi/3$	$2/\sqrt{3} I_c$	$7\pi/6$
-9	$S_{Ca} S_{Cb} S_{Ac}$	$-2/3 v_{CA}$	$4\pi/3$	$-2/\sqrt{3} I_c$	$7\pi/6$
0 ₁	$S_{Aa} S_{Ab} S_{Ac}$	0	-	-	0
0 ₂	$S_{Ba} S_{Bb} S_{Bc}$	0	-	-	0
0 ₃	$S_{Ca} S_{Cb} S_{Cc}$	0	-	-	0

Tabel 2. Kombinasi *switching* tegangan keluaran dan arus masukan sektor

		Tegangan Keluaran <i>vector sector</i>											
		1 atau 4				2 atau 5				3 atau 6			
Arus masukan <i>Vector sector</i>	1 atau 4	± 9	± 7	± 3	± 1	± 6	± 4	± 9	± 7	± 3	± 1	± 6	± 4
	2 atau 5	± 8	± 7	± 2	± 3	± 5	± 6	± 8	± 9	± 2	± 3	± 5	± 6
	3 atau 6	± 7	± 8	± 1	± 2	± 2	± 5	± 7	± 8	± 1	± 2	± 4	± 5
Duty Cycle		d_1	d_2	d_3	d_4	d_1	d_2	d_3	d_4	d_1	d_2	d_3	d_4

2.3. Simulasi *Sliding Mode Control*

Untuk meningkatkan performa putaran motor induksi 3 fasa pada kondisi ada gangguan, maka kontrol putaran menggunakan *Sliding mode control* (SMC). Jenis *control* SMC sangat kokoh (*robust*) pada saat

terjadi gangguan dengan variasi parameter dan torsi beban berubah [5]. *Sliding mode control* terdiri dari penjumlahan dua sinyal kontrol yang didefinisikan sebagai persamaan (1):

$$u = u_n + u_{eq} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana, u_n adalah sinyal kontrol natural yang berfungsi untuk menjaga sistem tetap berada pada referensi. Dengan sliding surface $s = 0$. u_{eq} adalah sinyal kontrol *equivalen*, berfungsi untuk memindahkan sistem ke titik referensi, didefinisikan sebagai error putaran rotor yang merupakan selisih antara putaran yang dihasilkan dengan referensi. Dapat ditulis dengan persamaan (2).

$$e(t) = \omega_m(t) - \omega_{ref} \dots\dots\dots (2)$$

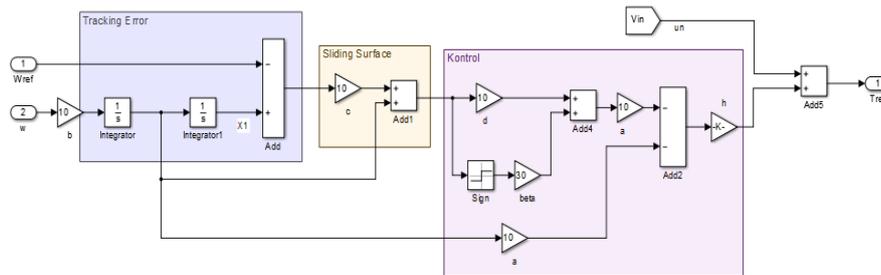
Sehingga *tracking error* putaran cenderung menuju ketitik nol sehingga menuju kondisi tak berhingga. Langkah berikutnya adalah menentukan *sliding surface* didefinisikan oleh persamaan (3).

$$s = \dot{e} + he \dots\dots\dots (3)$$

Dimana, h adalah konstanta penguat untuk menentukan alur putaran. Didefinisikan sinyal *equivalen* sebagai persamaan (4).

$$u_{eq} = \frac{1}{b} [he(t) - \beta \text{sgn}(S(t)) + a\omega_m + \omega_m + d] \dots\dots\dots (4)$$

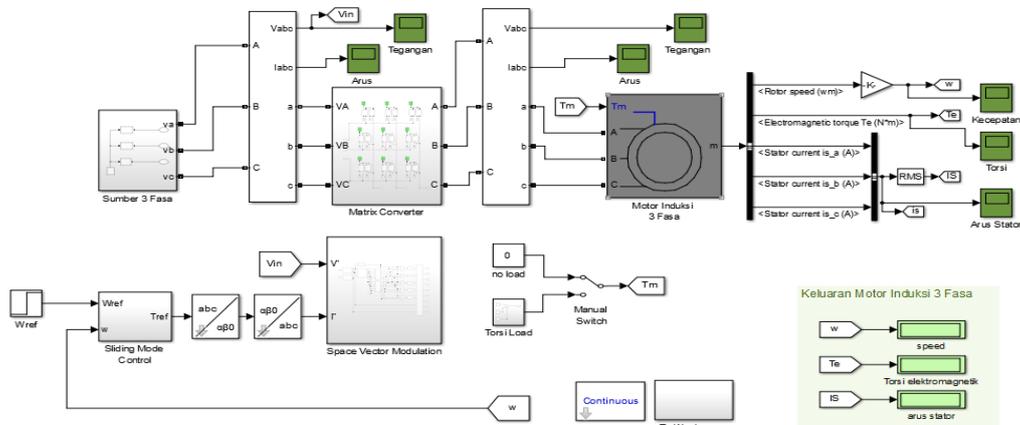
Kemudian persamaan (1),(2),(3),(4) digunakan untuk membuat blok simulasi *sliding mode control* seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Simulasi *Sliding Mode Control*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini telah dibuat simulasi pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan *matrix converter* dengan metode *sliding mode control* yang dibuat menggunakan simulink MATLAB, seperti pada Gambar 7.



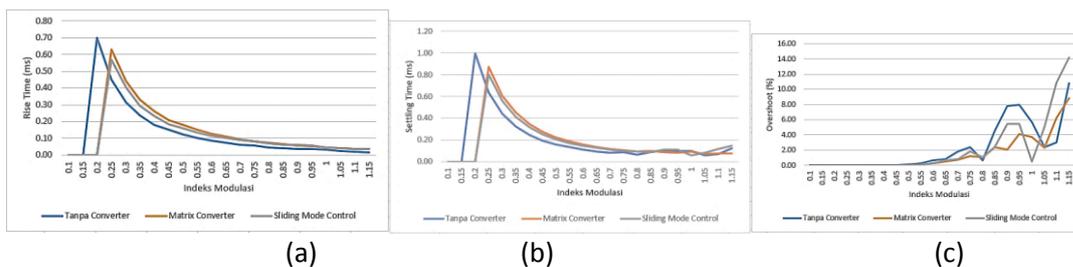
Gambar 7. Simulasi pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan *matrix converter* dengan metode *sliding mode control*

Untuk mendapatkan kinerja dari pengaturan kecepatan motor induksi yang digunakan, maka pada penelitian ini dilakukan pengujian simulasi Gambar 7. Pengujian yang dilakukan diantaranya yaitu pengujian simulasi dengan indeks modulasi 0,1:0,05:1,15 terhadap tegangan sumber yang diberikan, Pengujian simulasi pada kondisi tanpa beban dan berbeban dengan melihat respon kecepatan, torsi elektromagnetik dan arus stator. Selanjutnya pengujian metode *sliding mode control* dengan melihat perbandingan respon kecepatannya dengan model simulasi yang lain. Model simulasi yang lain didapat dari pembagian simulasi keseluruhan Gambar 7 yaitu simulasi tanpa *converter* dan menggunakan *matrix converter*. Ketiga model simulasi tersebut diuji dengan perlakuan yang sama.

3.1. Respon Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa

Pengujian ini dilakukan pada 3 model simulasi dengan penambahan indeks modulasi terhadap tegangan sumber 3 fasa yang mensupply sistem. Indeks modulasi yang digunakan yaitu 0,1:0,05:1,15. Hasil respon kecepatan yang dibandingkan yaitu nilai *rise time*, *settling time* dan *overshoot*.

Hasil respon sistem kecepatan yang ditunjukkan pada Gambar 8.(a) dan Gambar 8.(b) yaitu perbandingan nilai *rise time* dan nilai *settling time* Dihasilkan nilai *rise time* dan *settling time* semakin kecil dengan bertambahnya nilai indeks modulasi yang diberikan. Nilai *rise time* dan *settling time* dengan indeks modulasi 0,8-1,15 menghasilkan respon kecepatan yang baik dikarenakan nilai *rise time* dan *settling time* yang kecil. Pada indeks modulasi 1 didapatkan nilai *rise time* tanpa *converter* lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan *matrix converter* dan *sliding mode control* dengan nilai 0,03 detik. Sedangkan untuk nilai *settling time* yang baik dihasilkan oleh sistem *sliding mode control*, dengan nilai *settling time* 0,06 detik.

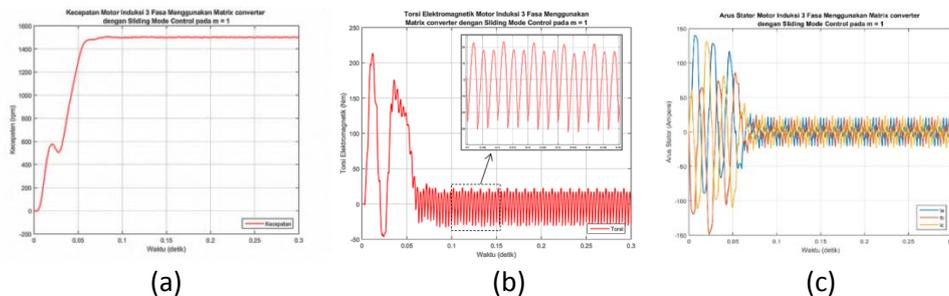


Gambar 8. Perbandingan respon sistem kecepatan motor induksi 3 fasa, (a) *Rise time* (b) *Settling time* (c) *Overshoot*

Nilai *overshoot* pada Gambar 8.(c) menunjukkan nilai *overshoot* yang rendah pada indeks modulasi 0,1 sampai dengan 0,55. Pada indeks modulasi 1 didapatkan nilai *overshoot* dengan *sliding mode control* lebih kecil dibandingkan tanpa *converter* dan menggunakan *matrix converter* dengan nilai 0,50 %.

3.2. Pengujian simulasi pada kondisi tanpa beban dan berbeban

Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan respon kecepatan, torsi elektromagnetik dan arus stator yang dihasilkan oleh sistem pada kondisi tanpa beban dan berbeban. Pengujian dilakukan untuk simulasi Gambar 7. dengan indeks modulasi 1 yang merupakan tegangan maksimal dari motor induksi 3 fasa.

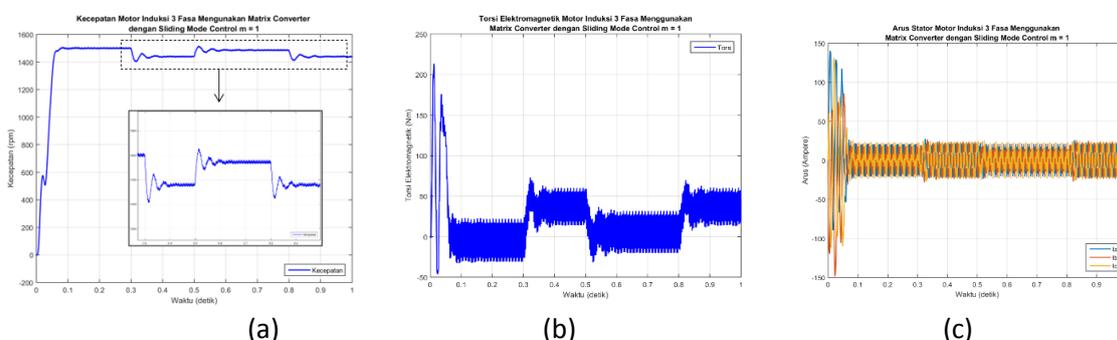


Gambar 9. (a) respon kecepatan, (b) respon torsi elektromagnetik (c) Respon arus stator motor induksi 3 fasa pada kondisi tanpa beban.

Gambar 9 menunjukkan hasil respon sistem pada kondisi tanpa beban. Hasil respon kecepatan pada Gambar 9.(a) dihasilkan nilai *overshoot* 0,5 %, nilai *rise time* 0,04 detik dan nilai *settling time* 0,06 detik, dengan *error steady state* sebesar 0,002%. Respon torsi elektromagnetik Gambar 9.(b) dapat dilihat ketika *start* dihasilkan nilai torsi elektromagnetik yang cukup besar yaitu 213,1 Nm dan akan terus mengecil sampai mencapai *steady state* yaitu sebesar 22,6 Nm. Respon arus stator Gambar 9.(c) didapatkan arus *start* yang cukup besar yaitu 39,6 Ampere dan akan terus mengecil sampai mencapai *steady state* yaitu 22 Ampere. Hal ini sesuai dengan karakteristik motor induksi yaitu pada saat *start* dibutuhkan torsi elektromagnetik dan arus stator yang besar untuk membuat rotor menjadi berputar.

Sedangkan untuk pengujian pada kondisi berbeban ditunjukkan pada Gambar 10 (a) Respon Kecepatan, (b) Respon Torsi Elektromagnetik dan (c) Respon Arus Stator. Pada sistem ini diberikan torsi beban yang bervariasi yaitu ditambahkan 40 Nm pada waktu 0,3 detik, dikurangi 30 Nm pada waktu 0,5 detik dan ditambahkan 30 Nm dan pada waktu 0,8 detik.

Dapat dilihat Gambar 10.(a) respon kecepatan yang dihasilkan yaitu nilai *overshoot* 5,11 %, nilai *rise time* 0,04 detik dan nilai *settling time* 0,82 detik. Saat torsi beban ditambahkan 40 Nm kecepatan yang didapatkan mengalami penurunan menjadi 1447 rpm. Selanjutnya kecepatan putar mengalami kenaikan ketika torsi beban dikurangi 30 Nm kecepatannya menjadi 1486 rpm dan mengalami penurunan saat torsi beban ditambahkan 30 Nm menjadi 1441 rpm. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan torsi beban dan kecepatan berbanding terbalik.



Gambar 10. (a) Respon kecepatan, (b) Respon torsi elektromagnetik (c) Respon arus stator motor induksi 3 fasa pada kondisi berbeban

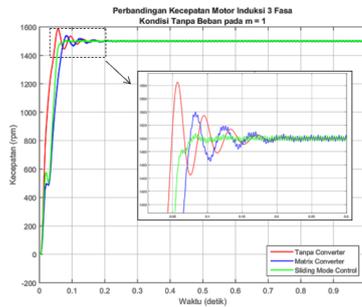
Untuk respon torsi elektromagnetik yang dihasilkan yaitu saat start nilai torsi elektromagnetik yang cukup besar yaitu 213,3 Nm dan akan terus mengecil sampai mencapai *steady statenya*. Ketika beban torsi ditambahkan 40 Nm torsi elektromagnetik yang dihasilkan mengalami kenaikan menjadi 58,8 Nm. Selanjutnya mengalami penurunan ketika beban torsi dikurangi 30 Nm menjadi 28,6 Nm dan mengalami kenaikan saat torsi beban ditambahkan 30 Nm menjadi 58,61 Nm. Hal ini menunjukkan bahwa torsi beban berbanding lurus dengan torsi elektromagnetik yang dihasilkan.

Arus *start* yang dihasilkan cukup besar yaitu 138,5 Ampere dan akan terus mengecil sampai mencapai *steady statenya*. Saat torsi beban ditambahkan 40 Nm arus yang dihasilkan sebesar 22,8 Ampere. Selanjutnya torsi beban dikurangi 30 Nm arus yang dihasilkan turun menjadi 21,9 Ampere dan ketika torsi beban ditambahkan 30 Nm dihasilkan arus sebesar 22,1 Ampere. Hal ini menunjukkan bahwa arus stator berbanding lurus dengan torsi beban yang diberikan.

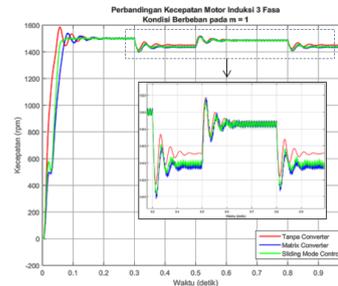
3.3. Perbandingan Respon Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Tanpa Beban dan berbeban

Gambar 11 menunjukkan perbandingan respon kecepatan motor induksi 3 fasa pada kondisi tanpa beban. Didapatkan respon kecepatan dengan *sliding mode control* yang relatif lebih kecil dibandingkan sistem menggunakan *matrix converter* dan tanpa menggunakan *converter*. Nilai respon kecepatan yang diamati diantaranya nilai *rise time*, *settling time*, *overshoot* yang didapatkan dari tabel 4.1 pada indeks modulasi 1 serta didapatkan nilai *error steady state* yang lebih kecil. Sesuai dengan data hasil pada Tabel 4. Tabel 4 menunjukkan performa respon kecepatan antara pengaturan kecepatan motor induksi tanpa *converter*, menggunakan *matrix converter* dan dengan *sliding mode converter*. Nilai *overshoot* dan *settling time* yang dihasilkan sistem dengan menggunakan *sliding mode control* lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan *matrix converter* dan tanpa *converter* yaitu sebesar 0,50 % dan 0,05 detik. Sedangkan nilai *rise time*

dihasilkan sistem tanpa *converter* lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan *matrix converter* dan *sliding mode control* yaitu 0,03 detik. *Error steady state* dengan menggunakan *sliding mode control* lebih kecil dibandingkan dengan simulasi yang lain.



Gambar 11.



Gambar 12

Gambar 11. Respon Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan *Matrix Converter* Dengan *Sliding Mode Control* Tanpa Beban. **Gambar 12.** Respon kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan *matrix converter* dengan *Sliding Mode Control* kondisi berbeban.

Gambar 12 menunjukkan perbandingan respon kecepatan motor induksi 3 fasa pada kondisi berbeban. Didapatkan respon kecepatan dengan *sliding mode control* yang lebih baik daripada pada sistem menggunakan *matrix converter* dan tanpa *converter*. Sesuai dengan Tabel 5.

Tabel 4. Perbandingan Performa Sistem

Model Sistem	Overshoot (%)	Rise Time (ms)	Settling time (ms)	Steady state error
Tanpa <i>Converter</i>	5,66	0,03	0,10	0,006
<i>Matrix Converter</i>	3,72	0,05	0,09	0,2
<i>Sliding Mode Control</i>	0,50	0,04	0,05	0,002

Tabel 5 Perbandingan performa respon kecepatan sistem terhadap variasi torsi beban

Torsi Beban (Nm)	Tanpa <i>Convter</i>		<i>Matrix Converter</i>		<i>Sliding Mode Control</i>	
	Kecepatan (rpm)	Waktu (detik)	Kecepatan (rpm)	Waktu (detik)	Kecepatan (rpm)	Waktu (detik)
+40	1448	0,40	1437	0,38	1447	0,36
-30	1489	0,60	1484	0,58	1486	0,56
+30	1448	0,90	1436	0,86	1441	0,84

Tabel 5 menunjukkan data hasil respon kecepatan antara pengaturan kecepatan motor induksi tanpa *converter*, menggunakan *matrix converter* dan dengan *sliding mode control*. Ketika torsi beban ditambahkan 40 Nm dihasilkan kecepatan motor induksi 3 fasa tanpa *converter* yaitu 1448 rpm dengan waktu *steady state* 0.4 detik, ketika menggunakan *matrix converter* yaitu 1409 rpm dengan waktu *steady state* 0,38 detik dan dengan metode *sliding mode control* yaitu 1447 rpm dengan waktu *steady state* 0,36 detik. Kemudian sistem torsi beban dikurangi 30 Nm didapatkan respon kecepatan tanpa *converter* sebesar 1489 rpm dengan waktu *steady state* 0,6 detik, menggunakan *matrix converter* sebesar 1437 rpm, waktu *steady state* 0,58 detik, dengan metode *sliding mode control* sebesar 1486 rpm, waktu *steady state* 0,56 detik. dan ketika torsi beban ditambahkan 30 Nm, respon kecepatan tanpa *converter* yaitu 1450 rpm, waktu *steady state* 0,9 detik. menggunakan *matrix converter* didapatkan 1484 rpm, waktu *steady state* 0,86 detik dan metode *sliding mode control* sebesar 1441 rpm dengan waktu *steady state* 0,84 detik

4. KESIMPULAN

Pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan *matrix converter* dengan metode *sliding mode control* didapatkan hasil simulasi yang menunjukkan bahwa dengan *sliding mode control* dapat memperkecil nilai *settling time* dan *overshoot* terhadap kecepatan yang dihasilkan serta *Steady state* yang

didapatkan lebih cepat dari sistem tanpa *converter* dan sistem menggunakan *matrix converter*, baik ketika tanpa beban dan berbeban.

Respon kecepatan yang dihasilkan dengan menggunakan metode *sliding mode control* didapatkan nilai *overshoot* yang rendah dan *settling time* yang lebih kecil dari sistem yang lain. Nilai *overshoot* yang didapat yaitu 0,5 %, dan *settling time* 0,06 detik. Respon torsi elektromagnetik dan arus stator yang didapatkan pada saat *start* lebih kecil daripada sistem tanpa *converter* dengan torsi start sebesar 213,3 Nm dan torsi steady state 22,6 Nm, Arus start 138.6 Ampere dengan arus *steady state* 22 Ampere. Namun, pada kondisi *steady state* sinyal keluaran torsi elektromagnetik pada kondisi tanpa beban maupun berbeban dihasilkan sinyal yang tidak baik dengan sinyal berosilasi cukup besar yang disebabkan oleh arus masukan yang tidak sinus sempurna.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih yang tiada hentinya di tujukan kepada seluruh Civitas Akademika khususnya Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Mataram, Laboratorium Power Electronics and Drives atas support nya beserta fasilitas nya .

REFERENCES

- [1] M. Derick, P.A. Athira, & M. Bincy, (2015). Modified Single Stage AC-AC Converter. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), 6(1), 1-9.
- [2] N. Evalina, A. Azis, & Z. Zulfikar, (2018). Pengaturan Kecepatan Putaran Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Programmable Logic Controller. JET (Journal of Electrical Technology), 3(2), 73-80.
- [3] I. K. Wiryajati, I. A. D. Giriantari, I. N. S. Kumara, and L. Jasa, "Simple carrier based Space Vector PWM schemes of dual-inverter fed three-phase open-end winding motor drives with equal DC-link voltage," in *2018 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)*, 2018, pp. 65-70.
- [4] I. K. Wiryajati, I. A. D. Giriantari, I. N. S. Kumara, and L. Jasa, "The performance analysis of dual-inverter three phase fed induction motor with open-end winding using various PWM schemes," *Wireless Networks*, vol. 27, no. 2, pp. 871-880, 2021/02/01 2021
- [5] M.N. Faizi, & F. Gustame, (2021, December). Pengontrolan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Metode Sliding Mode Control (SMC) Berbasis Algoritma Genetika. In Seminar Nasional Industri dan Teknologi (pp. 442-449).
- [6] M.P. Jati, E. Purwanto, B. Sumantri, & G. Basuki, (2020). Matrix Converter Sebagai Pengendali Kecepatan Motor Induksi 3 Fase Dengan ISVM. ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika, 8(2), 373.
- [7] O. Kati, (2011). Pengendali Sliding Mode Control (SMC) Motor Induksi 3 Fasa Dengan Metode Direct Torque Control (DTC) Menggunakan Algoritma Genetika. Electrician, 5(3), 167-181.
- [8] Z. Malekjamshidi, M. Jafari, J. Zhu, & M. Rivera, (2020). Design, Implementation, and Stability Analysis of a Space Vector Modulated Direct Matrix Converter for Power Flow Control in a More Reliable and Sustainable Microgrid. Sustainability, 12(20), 8591.
- [9] S. Misra, & S. Arora, (2021). Modelling and Simulation of Matrix Converter Using Space Vector Modulation Techniques. In Proceedings of Integrated Intelligence Enable Networks and Computing (pp. 949-965). Springer, Singapore.
- [10] D.S.A. Pambudi, M. S. M. Sarwoko, & E. Kurniawan, (2016). Kontrol kecepatan motor induksi tiga fasa Menggunakan tegangan dan frekuensi Dengan modulasi vektor ruang. TEKTRIKA-Jurnal Penelitian dan Pengembangan Telekomunikasi, Kendali, Komputer, Elektrik, dan Elektronika, 1(1).
- [11] E. Purwanto, M. P. Jati, B. Sumantri, I. Ferdiansyah, & G. Basuki, (2021). Optimasi Fuzzy Supervisory Control pada Performa Matrix Converter Drive 3x3 di Empat Kuadran Operasi. ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika, 9(1), 31.
- [12] M. R. Utoro, & J. Pramudijanto, (2014). Perancangan dan Implementasi Kontroler Sliding Mode Pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa. Jurnal Teknik ITS, 3(1), F84-F89.
- [13] J. Vadillo, J. M. Echeverria, L. Fontan, M. Martinez-Iturralde, & I. Elosegui, (2008). Modeling and simulation of a direct space vector modulated Matrix Converter using different switching strategies. In 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (pp. 944-949). IEEE.

BIOGRAPHY OF AUTHORS

Muh. Novian Hadi Zaen lahir di Lombok Timur, Nusa Tenggara Barat, Indonesia, Tahun 1999. Pendidikan formal ditempuh dari Pendidikan Dasar hingga Pendidikan Menengah di tempuh di Lombok Timur. Muh. Novian Hadi Zaen memperoleh gelar Sarjana Teknik di Teknik Elektro Universitas Mataram (2023), dengan judul Penelitian Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan *Matrix Converter* dengan Metode *Sliding Mode Control*.



Dr. Ir. I Ketut Wiryajati, ST., MT., IPU., ASEAN Eng. Pendidikan formal Pendidikan SD, SMP dan SMAN semua di tempuh di kota Kelahirannya Negara, Kuliah S1 (UNUD 1994) Teknik Elektro, S2 (ITS 2003) Teknik Elektro, S3 (UNUD 2020) Teknik Elektro, Pendidikan Profesi Ir.(UNUD 2018), saat ini ia sebagai Insinyur Profesional Utama pada PII, ia juga telah teregistrasi sebagai ASEAN Engineer. Selain Aktif sebagai konsultan pada bidang MEP dan Komputer Dr.Wiryajati juga aktif sebagai Tenaga Ahli Elektronika Bandara, Tenaga Ahli Mekanikal dan Elektrikal di perusahaan swasta nasional, juga tersertifikasi sebagai Hipnoteraphis, CH.,CHt.,CTM. Keaktifan dalam mengajar sebagai dosen tetap pada Teknik Elektro Universitas Mataram,NTB, Indonesia. Selain aktif berorganisasi ia juga aktif menulis buku referensi dan ia sudah menerbitkan JurnalNasional maupun Internasionalketertarikan riset adalah pada bidang Konversi Daya, Pengembangan Energi terbarukan (Renewable Energy), Power Electronics and Drives, Motor-motor listrikdan member IET sejak 2014 IEEE, 2018. Sampai sekarang



Made Ari Nrartha, ST., MT. lahir di Denpasar, Bali Indonesia, pada April 1973. Pendidikan formal ditempuh dari Pendidikan Dasar hingga Pendidikan Menengah di tempuh di kota kelahiran Denpasar, Bali. Made Ari Nrartha memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro (ST) dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, pada tahun 1997 dan memperoleh gelar Magister Teknik (MT) dari Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, pada tahun 2001. Sejak 1999 sampai sekarang, I Made Ari Nrartha ST.,MT selain sebagai kepala Lab bidang Power Sistem Tenaga Listrik ia juga aktif sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro, Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia. Selain berorganisasi ia juga aktif menulis Buku dan Jurnalnasional maupun internasional fokus penelitiannya adalah Sistem Tenaga Listrik, Sumber Energi Terbarukan, Smart Metering, dan Smart Grid