

Desain dan Analisa Inverter Tiga Fasa Dengan Metode SVPWM Sebagai Penggerak Motor Induksi Tiga Fasa Pada Aplikasi Sepeda Listrik

Ronaldi Hutabalian*, Amir Hamzah**

*Teknik Elektro Universitas Riau **Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau**

Kampus Binawidya Km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru 28293

Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau

Email: ronaldi1899@gmail.com

ABSTRACT

Along with the increased use of fuel oil, so that necessary to manufacture in producing electric vehicles. One of them the electric bike. On an electric bike, motors drive consist of electric motors, power converters and electronic controllers are the mover of electric vehicle systems. This study discusses the three-phase inverter method Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) as a three-phase induction motor drive in electric bike applications that are modeled by using Matlab / Simulink.

The purpose of this study is to get the design of the three-phase inverter SVPWM as a three-phase induction motor drive 500 W, 50 V, 50 Hz and 750 rpm. The inverter design using battery voltage 48 V. Before the battery voltage is converted by an inverter, battery voltage must first be raised through a boost converter to 70,62 Volt. Through simulation with Matlab software is then obtained curve of sinusoidal voltage box, current, and speed of the motor in the unit pu SVPWM controlled by the system. In this study also tested against changes in the value of the fundamental frequency inverter. From the test results that the inverter can set the speed of the motor at a frequency of 20 Hz to 50 Hz. At the time of the frequency inverter 5-15 Hz current increases exceeding motor nominal current of 8.25 A.

Keywords : *Three Phase Inverter, Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM), Three Phase Induction Motor, Matlab/ Simulink, Electric bike.*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi semakin inovatif guna mempermudah manusia dalam melakukan pekerjaan. Namun perkembangan teknologi tidak lepas dari sumber energi yang digunakan. Hampir semua kendaraan bermotor di dunia menggunakan energi bahan bakar minyak atau yang biasa disebut dengan BBM. Seperti dewasa ini, sumber energi semakin hari semakin menipis, maka dibutuhkan energi lain sebagai alternatif sumber energi baru untuk mengurangi krisis energi yang pada akhirnya akan meningkatkan kesejahteraan manusia.

Dengan meningkatnya penggunaan energi BBM, maka diperlukan manufaktur dalam memproduksi kendaraan listrik, seperti mobil listrik dan sepeda listrik. Pada sepeda listrik, motor penggerak terdiri dari motor listrik, konverter daya dan pengendali elektronik merupakan inti dari sistem penggerak kendaraan listrik. Motor induksi tiga fasa memiliki banyak kelebihan selain harganya yang relatif lebih murah juga perawatannya yang lebih mudah dibanding jenis motor lainnya. Namun kelemahannya kesulitan dalam pengaturan kecepatan. Karena pada dasarnya pengaturan kecepatan motor

induksi dapat dilakukan dengan mengubah jumlah kutub motor atau mengubah frekuensi suplai motor. Pengaturan kecepatan dengan mengubah kutub motor sangat sulit dilakukan karena harus mengubah bentuk fisik motor, jadi pengaturan kecepatannya sangat terbatas. Namun jika pengaturan kecepatan dengan mengubah nilai frekuensi, variasi untuk pengaturan kecepatan akan lebih banyak dan tidak akan merubah bentuk fisik dari motor tersebut. Jadi lebih simpel dan efisien. Pengaturan kecepatan bisa dilakukan dengan inverter. Dimana inverter berfungsi untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC. Perubahan frekuensi pada inverter sangat dimungkinkan, sebab bisa diatur sesuai yang diinginkan.

Dewasa ini pengendalian motor induksi dilakukan dengan cara mengatur frekuensi, tegangan, arus, fluks dan torsi secara proposional. Divais seperti ini umumnya dinamakan *Variable Speed Drive* (VSD), dengan sistem kendali menggunakan skalar kontrol ataupun vektor kontrol. Pengendalian motor induksi dengan menggunakan vektor kontrol selain dapat mengendalikan torsi dan kecepatan secara baik, juga mempunyai keuntungan lain, yaitu: Penggunaan energi menjadi efisien, peningkatan fleksibilitas produksi, peningkatan umur komponen mekanik, memudahkan untuk pemeliharaan. Inverter SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*) adalah alat yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi. Metode SVPWM merupakan penggabungan dari pengaturan vektor kecepatan motor dengan PWM yang digunakan sebagai pengatur amplitudo dan frekuensi.[1]

2. LANDASAN TEORI

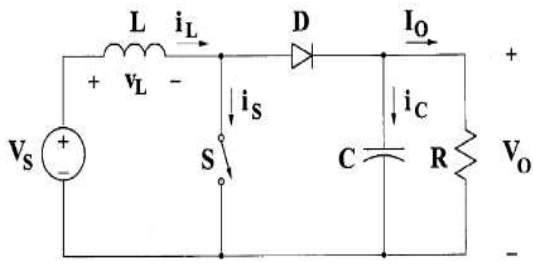
2.1 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor listrik adalah alat yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik (gerak putar). Secara umum konstruksi motor listrik terdiri dari 2 bagian utama yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian yang diam sedangkan rotor adalah bagian yang berputar.

Prinsip kerja motor induksi tiga fasa berdasarkan induksi elektromagnetis. Bila kumparan tiga fasa stator diberi tegangan tiga fasa maka akan timbul fluks yang besarnya konstan. Fluks yang timbul akan memotong permukaan rotor yang semula diam sehingga timbul tegangan induksi pada kumparan rotor (ggl) dalam rangkaian tertutup sehingga arus mengalir dan timbul gaya. Rotor akan berputar searah dengan medan magnet putar tetapi kecepatan tidak akan sama dengan stator karena bila sama maka kecepatan relatif (n_r) = 0 sehingga rotor tidak akan terinduksi tegangan dan tidak ada arus yang mengalir lagi pada rotor akibatnya torsi tidak akan timbul. Karena itu rotor selalu berputar pada $n_r < n_s$ akibatnya selalu timbul *slip*. [2]

2.2 Konverter Penaik

Konverter DC ke DC adalah sebuah rangkaian penyaklaran elektronik yang dapat membuat sumber tegangan searah menjadi tegangan searah dengan besar tegangan dan frekuensi yang dapat diatur. Pengaturan tegangan dapat dilakukan di luar konverter atau di dalam konverter. Pengaturan tegangan di luar konverter dilakukan dengan mengatur variasi tegangan searah masukan konverter. Pengaturan tegangan di dalam konverter dikenal sebagai Modulasi Lebar Pulsa (Pulse Width Modulation, PWM). [3]



Gambar 2.1 Rangkaian skematis *Boost Converter*

Dengan menggunakan hukum faraday untuk induktor penaik:

$$V_s DT = (V_o - V_s)(1 - D)T \dots\dots (2.1)$$

Dimana :

V_s = Tegangan masukan konverter penaik (Vdc)

D = Siklus Kerja

T = Waktu (Detik)

V_o = Tegangan Keluaran konverter Penaik (Vdc)

Sehingga fungsi nilai modulasi dari konverter penaik ialah :

$$M_v = \frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{(1 - D)} \dots\dots (2.2)$$

dimana :

M_v = Modulasi

V_o = Tegangan Keluaran Konverter Penaik (Vdc)

V_s = Tegangan Masukan Konverter Penaik

Nilai filter induktor untuk konverter penaik ini ialah:

$$L_b = \frac{(1 - D)^2 DR}{2f} \dots\dots (2.3)$$

dimana :

L_b = Filter Induktor (H)

D = Siklus Kerja

R = Tahanan (Ω)

f = Frekuensi (Hz)

Lalu, untuk filter kapasitor diberikan dengan persamaan :

$$C_{min} = \frac{DV_o}{V_r Rf} \dots\dots (2.4)$$

dimana:

C_{min} = Filter Kapasitor (F)

D = Siklus Kerja

V_o = Tegangan Keluaran Konverter Penaik (Vdc)

V_r = Riak Tegangan (1%)

R = Tahanan (Ω)

f = Frekuensi (Hz)

2.3 PWM (*Pulse Width Modulation*)

PWM merupakan sebuah mekanisma untuk membangkitkan sinyal keluaran yang periodenya berulang antara *high* dan *low* dimana kita dapat mengontrol durasi sinyal *high* dan *low* sesuai dengan yang kita inginkan. *Duty cycle* merupakan prosentase periode sinyal *high* dan periode sinyal, presentase *duty cycle* akan bebanding lurus dengan tegangan rata-rata yang dihasilkan. (Leothamrin Gultom. 2011)

Pengaturan lebar pulsa modulasi atau PWM merupakan salah satu teknik yang ampuh yang digunakan dalam sistem kendali (*control system*) saat ini. Pengaturan lebar modulasi dipergunakan di berbagai bidang yang sangat luas, salah satu diantaranya adalah: *speed control* (kendali kecepatan), *power control* (kendali sistem tenaga), *measurement and communication* (pengukuran atau instrumentasi dan telekomunikasi). [4]

2.4 Inverter Tiga Fasa Metode SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*)

2.4.1 Pengertian Inverter Tiga Fasa SVPWM

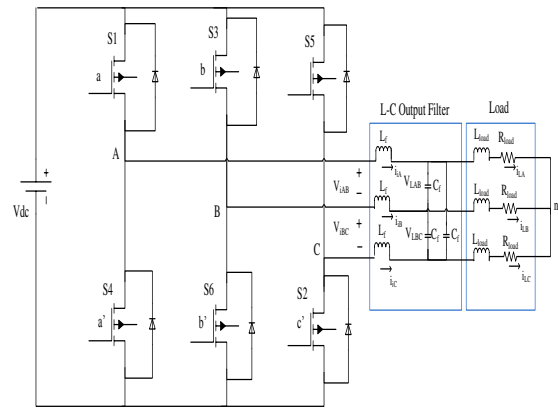
Inverter SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*) adalah alat yang digunakan untuk mengatur kecepatan

motor induksi. Metode SVPWM merupakan penggabungan dari pengaturan vektor kecepatan motor dengan PWM (*Pulse Width Modulation*) yang digunakan sebagai pengatur amplitudo dan frekuensi. [1]

Space Vector PWM (SVPWM) pada awalnya dikembangkan sebagai pendekatan vektor untuk *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk tiga inverter fasa. Ini adalah teknik yang lebih canggih untuk menghasilkan gelombang sinus yang menyediakan tegangan yang lebih tinggi untuk motor dengan total distorsi harmonik yang lebih rendah. Tujuan utama dari setiap teknik modulasi untuk mendapatkan variabel output memiliki komponen fundamental maksimal dengan harmonik yang minimum. SVPWM adalah lanjutan perhitungan metode PWM yang intensif dan mungkin teknik terbaik untuk aplikasi *Variable Frequency Drive* (VFD). [5]

2.4.2 Prinsip Kerja Inverter Tiga Fasa SVPWM

Model rangkaian dari inverter PWM tiga fase sumber tegangan ditunjukkan pada gambar 2.3. Saklar $S_1 - S_6$ adalah enam skalar daya yang membentuk output, yang dikontrol oleh variabel *switching*, sebuah a, a', b, b', c dan c' . Ketika saklar daya atas diaktifkan, yaitu, ketika a, b atau c adalah 1 (hidup), maka sisi bawah saklar dayanya harus mati, yaitu, sesuai dengan a', b' atau c' adalah 0 (mati). Oleh karena itu, keadaan hidup dan mati saklar daya sisi atas S_1, S_3 dan S_5 dapat digunakan untuk menentukan tegangan output.



Gambar 2.2 Inverter PWM tiga fasa Sumber Tegangan

Hubungan antara variabel *switching* vektor $[a, b, c]^t$ dan vektor tegangan fasa ke fasa $[V_{ab} \ V_{bc} \ V_{ca}]^t$ adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

dimana vektor variabel *switching* $[a \ b \ c]^t$

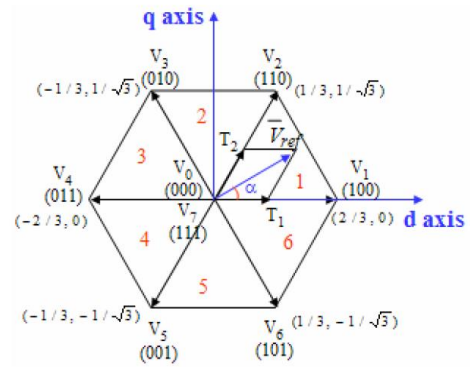
Dan hubungan antara variabel *switching* vektor $[a, b, c]^t$ dan vektor tegangan fasa ke netral $[V_{an} \ V_{bn} \ V_{cn}]^t$ adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

Seperti yang diilustrasikan pada Gambar. 2.2, ada delapan kemungkinan kombinasi pola hidup dan mati tiga saklar daya atas.. Menurut persamaan (2.5) dan (2.6), delapan *switching vectors*, output tegangan fasa ke netral, dan output tegangan fasa ke fasa dari rangkaian DC-link V_{dc} , ditunjukkan pada Tabel 2.1

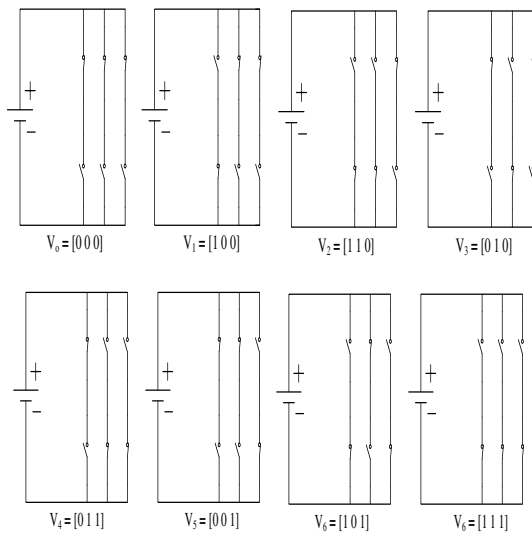
Tabel 2.1 Delapan Kombinasi tegangan Fasa ke Netral dan Tegangan Fasa ke Fasa

Voltage Vectors	Switching Vectors			Line to Neutral voltage			Line to line Voltage		
	a	b	c	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
V_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$	1	0	-1
V_2	1	1	0	$1/3$	$1/3$	$-2/3$	0	1	-1
V_3	0	1	0	$-1/3$	$2/3$	$-1/3$	-1	1	0
V_4	0	1	1	$-2/3$	$1/3$	$1/3$	-1	0	1
V_5	0	0	1	$-1/3$	$-1/3$	$2/3$	0	-1	1
V_6	1	0	1	$1/3$	$-2/3$	$1/3$	1	-1	0
V_7	1	1	1	0	0	0	0	0	0



Gambar 2.4 Dasar vektor dan sektor switching

Konfigurasi saklar daya inverter ditunjukkan pada gambar 2.3



Gambar 2.3 Konfigurasi saklar daya inverter tiga fasa tiga lengan

Gambar 2.3 menjelaskan konfigurasi penyaklaran inverter yang dibentuk dari 3 pasang saklar daya sehingga menghasilkan 8 kondisi penyaklaran inverter dari 000 hingga 111.

Dasar vektor dan sektor *switching* dapat dilihat pada gambar 2.4

Teknik PWM ini memperkirakan tegangan referensi V_{ref} lewat kombinasi kedelapan pola switching (V_0 - V_7). Vektor – vektor (V_1 - V_6) membagi bidang menjadi 6 sektor (masing – masing 60 derajat). V_{ref} dibangkitkan oleh dua vektor bukan nol yang berdekatan dan dua vektor nol.

3. Metodologi Penelitian

3.1 Alat dan Bahan

Adapun sarana yang digunakan untuk menyelesaikan tugas akhir ini antara lain :

1. Laptop DELL – INSPIRON N4050.
2. Software Matlab R2008b.

3.2 Metode Pengumpulan Data

Adapun parameter yang ditentukan, yaitu:

1. MOSFET NTB35N15, Rating Maksimal: $V_{DS} = 150$ V, $I_D = 37$ A
2. Tegangan baterai: $V_S = 48$ V
3. Frekuensi Fundamental: $f = 50$ Hz
4. Frekuensi PWM: $f_z = 3$ kHz
5. Indeks Modulasi: $a = 0,6$
6. Beban Motor Induksi Tiga Fasa: $P_{rated} = 500$ W, $V_{LL} = 50$ V, $I_{rated} = 8,25$ A, $P = 8$ Kutub, $R_s = 1,791$ Ω , $R_r = 1,2$ Ω , $f = 50$ Hz, $R_r = 1,2$ Ω , $X_{ls} = 1,71$ Ω , $R_m = 100$ Ω , $X_m = 11,62$ Ω

3.3 Pengolahan Data

Pada Penerapan SVPWM terdapat tiga langkah yang akan ditentukan, yaitu:

1. Menentukan V_d , V_q , V_{ref} , dan sudut (α)

Dari gambar di bawah V_d , V_q , V_{ref} , dan sudut (α) dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_d &= V_{an} \cdot \cos 0 + V_{bn} \cdot \cos 60 - V_{cn} \cdot \cos 60 \\ &= V_{an} - \frac{1}{2}V_{bn} - \frac{1}{2}V_{cn} \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} V_q &= V_{an} \cdot \cos 90 + V_{bn} \cdot \cos 30 - V_{cn} \cdot \cos 30 \\ &= 0 + \frac{\sqrt{3}}{2}V_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2}V_{cn} \end{aligned} \quad (3.2)$$

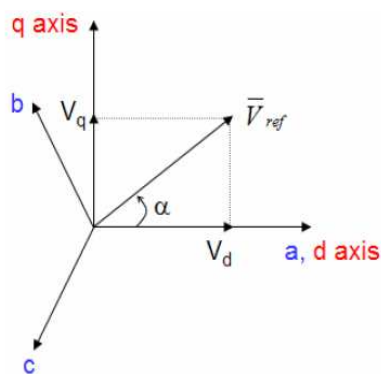
Persamaan (3.1) dan (3.2) dapat dimasukkan ke dalam persamaan matriks:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix}$$

$$|\bar{V}_{ref}| = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (3.3)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V_q}{V_d} \right) = \omega t = 2\pi f t, \quad (3.4)$$

dimana f= Frekuensi Fundamental



Gambar 3.1 Vektor ruang tegangan dan komponennya dalam (d,q)

2. Menentukan durasi waktu T_1 , T_2 , T_0

Dari gambar 3.3, waktu *switching* dapat ditentukan sebagai berikut:

- Durasi waktu *switching* pada sektor 1

$$\begin{aligned} \int_0^{T_z} \bar{V}_{ref} dt &= \int_0^{T_1} \bar{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_1} \bar{V}_0 dt \\ \therefore T_z \cdot \bar{V}_{ref} &= (T_1 \cdot \bar{V}_1 + T_2 \cdot \bar{V}_2) \\ \Rightarrow T_z \cdot |\bar{V}_{ref}| \cdot \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix} &= T_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \cdot \frac{2}{3} \cdot V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(dimana, $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$)

$$\therefore T_1 = T_z \cdot a \cdot \frac{\sin(\pi/3 - \alpha)}{\sin(\pi/3)} \quad (3.5)$$

$$\therefore T_2 = T_z \cdot a \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\pi/3)} \quad (3.6)$$

$$\therefore T_0 = T_z - (T_1 + T_2), \quad \left(\text{dimana } T_z = \frac{1}{f_z} \text{ dan } a = \frac{|\bar{V}_{ref}|}{\frac{2}{3}V_{dc}} \right)$$

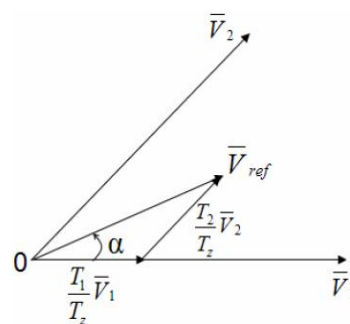
- Durasi waktu *switching* pada setiap sektor

$$\begin{aligned} \therefore T_1 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3} \pi \right) \right) \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\frac{n}{3} \pi - \alpha \right) \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \frac{n}{3} \pi \cos \alpha - \cos \frac{n}{3} \pi \sin \alpha \right) \\ \therefore T_1 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\alpha - \frac{n-1}{3} \pi \right) \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(-\cos \alpha \cdot \sin \frac{n-1}{3} \pi + \sin \alpha \cdot \cos \frac{n-1}{3} \pi \right)$$

dimana, n = 1 sampai 6 (sektor 1 – 6) dan $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$



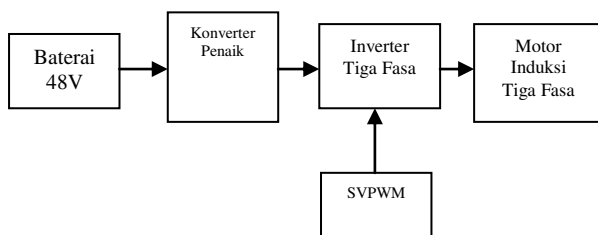
Gambar 3.2 Vektor referensi sebagai kombinasi vektor – vektor berdekatan pada sektor 1

3. Menentukan waktu *switching* masing – masing sektor saklar daya (S1 – S6)

Tabel 3.1 Waktu *switching* pada setiap sektor

Sektor	Sakelar atas	Sakelar bawah
1	$S_1=T_1+T_2+T_0/2$ $S_3=T_2+ T_0/2$ $S_5= T_0/2$	$S_4= T_0/2$ $S_6=T_1+ T_0/2$ $S_2=T_1+T_2+ T_0/2$
2	$S_1=T_1+ T_0/2$ $S_3= T_1+T_2+ T_0/2$ $S_5= T_0/2$	$S_4= T_2+ T_0/2$ $S_6= T_0/2$ $S_2=T_1+T_2+ T_0/2$
3	$S_1= T_0/2$ $S_3= T_1+T_2+ T_0/2$ $S_5= T_2+ T_0/2$	$S_4= T_1+T_2+ T_0/2$ $S_6= T_0/2$ $S_2= T_1+ T_0/2$
4	$S_1= T_0/2$ $S_3= T_1+ T_0/2$ $S_5= T_1+T_2+ T_0/2$	$S_4=T_1+T_2+ T_0/2$ $S_6= T_2+ T_0/2$ $S_2=T_0/2$
5	$S_1= T_2+ T_0/2$ $S_3= T_0/2$ $S_5= T_1+T_2+ T_0/2$	$S_4= T_1+ T_0/2$ $S_6= T_1+T_2+ T_0/2$ $S_2=T_0/2$
6	$S_1=T_1+T_2+T_0/2$ $S_3= T_0/2$ $S_5= T_1+ T_0/2$	$S_4= T_0/2$ $S_6= T_1+T_2+ T_0/2$ $S_2= T_2+ T_0/2$

3.4 Blok Diagram Penelitian

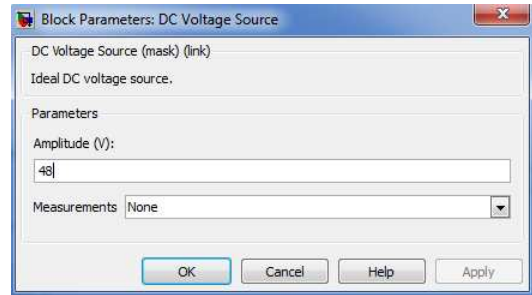


Gambar 3.3 Blok Diagram Penelitian

3.5 Perancangan Model Simulasi

3.5.1 Desain Baterai

Pada penelitian ini, baterai merupakan tegangan masukan DC (V_s). Besar dari tegangan nominal V_s adalah sebesar 48 Volt. Dari tegangan 48 Volt akan dinaikkan menggunakan konverter penaik kemudian dikonversi menjadi tegangan AC untuk beban motor induksi tiga fasa.



Gambar 3.4 Pengaturan Masukan Tegangan Baterai

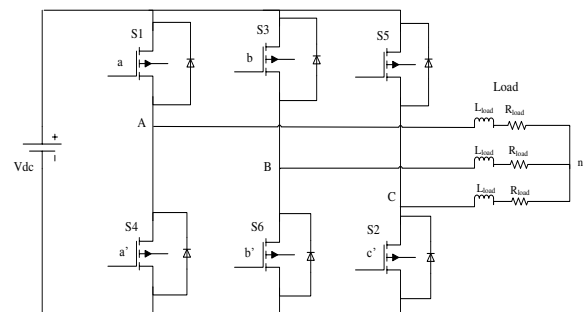
3.5.2 Desain Konverter Penaik

Tabel 3.2 Parameter konverter Penaik

Tegangan Masukan	48 Vdc
Induktor konverter penaik	3×10^{-5} H
Kapasitor konverter penaik	$9,6 \times 10^{-3}$ F
Rasio Kerja	0.33
Frekuensi pensaklaran	25000 Hz
Tegangan Keluaran	70,62 Vdc

3.5.3 Desain Inverter tiga fasa

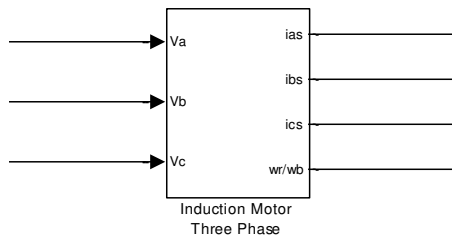
Model rangkaian dari inverter PWM tiga fasa sumber tegangan ditunjukkan pada gambar 3.5. Pada desain inverter ini, tegangan yang akan dikonversi inverter menjadi tegangan AC berasal dari nilai V_o pada konverter penaik sebesar 70,62 Volt. Untuk pensaklaran mosfet yaitu sebesar 3000 Hz. Kemudian untuk keluaran inverter penelitian ini tidak membahas tentang output filter.



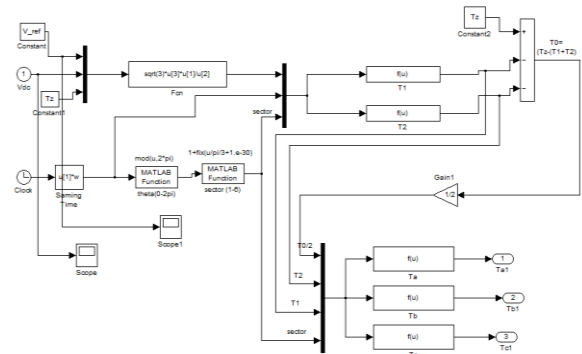
Gambar 3.5 Model Rangkaian Inverter tiga fasa dengan Saklar MOSFET

3.5.4 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor Induksi tiga fasa dimodelkan dalam kerangka stasioner dq.



Gambar 3.6 Model *Subsystem* Motor Induksi Tiga Fasa

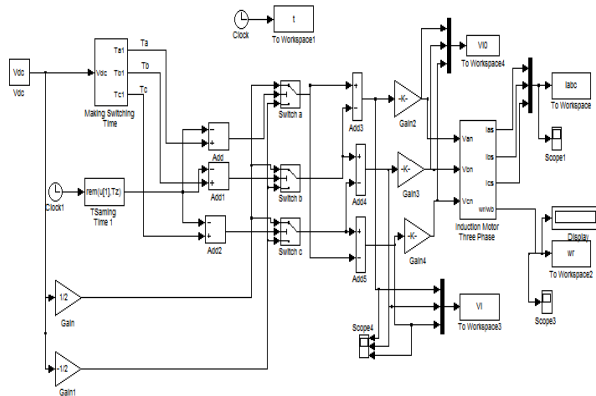


Gambar 4.2 Model *Simulink* untuk Waktu *Switching*

4. ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Desain Inverter Tiga Fasa dengan Metode SVPWM

Pemodelan keseluruhan sistem untuk inverter tiga fasa Metode SVPWM akan ditampilkan pada gambar 4.1 dimana model ini terdiri dari blok – blok dan *subsystem*. Bentuk Keseluruhan desain inverter tiga fasa ini akan menampilkan karakteristik keluaran tegangan inverter, arus beban inverter, dan kecepatan motor.



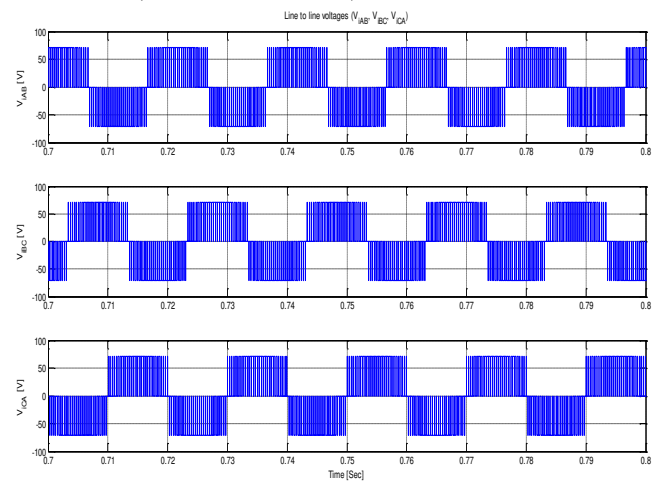
Gambar 4.1 Model *Simulink* Keseluruhan Inverter SVPWM

Pada gambar 4.1 nilai V_{dc} merupakan output dari tegangan konverter penarik (boost converter) yaitu sebesar 70,62 Volt

Sementara itu untuk *subsystem Making Switching Time* akan ditunjukkan pada Gambar 4.2.

4.2 Analisa Hasil Simulasi

1. Tegangan Output Inverter Fasa ke Fasa (V_{iAB} , V_{iBC} , V_{iCA})

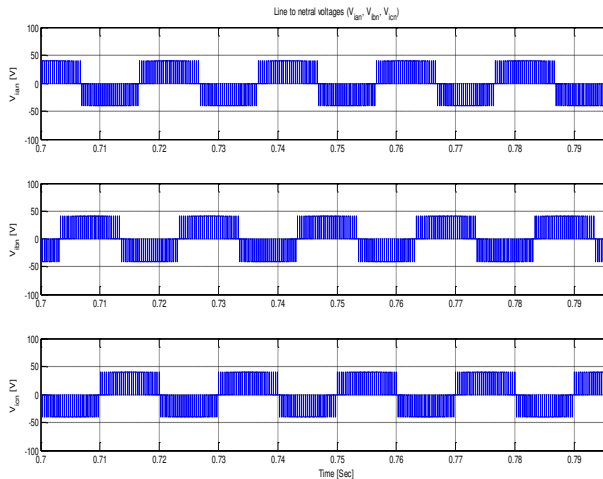


Gambar 4.3 Tegangan Output Inverter Fasa ke Fasa

Pada gambar 4.3 dapat dilihat bahwa terdapat gelombang tegangan berbentuk kotak, tegangan yang terukur pada simulasi adalah 70,62 Volt.

2. Tegangan Output Inverter Fasa Ke Netral

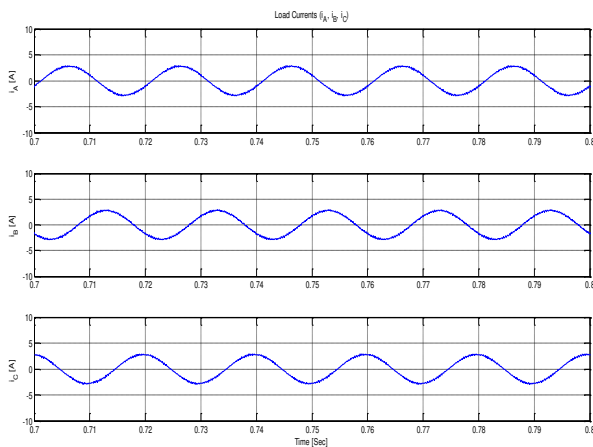
Tegangan output fasa ke netral ini akan menjadi tegangan input model motor induksi tiga fasa.



Gambar 4.4 Tegangan Output Inverter Fasa ke Netral

Pada gambar 4.4 dapat dilihat bahwa tegangan puncak fasa ke netral yang terukur pada simulasi menjadi 40,77 Volt.

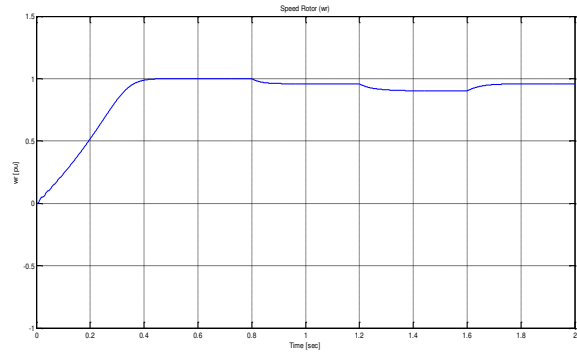
3. Arus beban inverter (i_A , i_B , i_C)



Gambar 4.4 Arus Beban Inverter

Pada gambar 4.4 Nilai arus sebesar 3.16 A pada saat frekuensi 50 Hz.

4. Kecepatan Motor (w_r)



Gambar 4.5 Kecepatan Motor (w_r)

Pada gambar 4.5 merupakan hasil simulasi dari kecepatan motor induksi tiga fasa saat frekuensi 50 Hz. Dimana dapat dilihat pada saat $t=2$ nilai kecepatan (w_r) adalah 0,9581 pu.

5. Pengaruh Perubahan Frekuensi Terhadap Arus dan Kecepatan Motor

Inverter dapat diaplikasikan sebagai pengatur kecepatan putaran motor induksi tiga fasa, yaitu dengan mengatur nilai tegangan dan frekuensi. Pada sistem inverter tiga fasa ini, untuk membuat variasi kecepatan sepeda listrik maka dibutuhkan pengendalian kecepatan putaran motor dengan mengatur frekuensi listrik yang diberikan pada motor tersebut (*Variable Frequency Drive*).

Tabel 4.1 Hasil Simulasi Perubahan Frekuensi Terhadap Arus dan Kecepatan Tanpa Beban

No.	Frekuensi (Hz)	Arus (A)	w_r (pu)
1.	5	17,6	0,101
2.	10	12	0,1969
3.	15	8.8	0,2943
4.	20	6,93	0,3934
5.	25	5,63	0,4893
6.	30	4,74	0,5852

7.	35	4,17	0,6803
8.	40	3,81	0,7743
9.	45	3,52	0,8665
10.	50	3.16	0,9581

Dari hasil tabel 4.1 dapat dilihat bahwa perubahan nilai frekuensi mempengaruhi nilai arus dan kecepatan. Ketika frekuensi diturunkan dari 50 sampai 5 Hz dengan penurunan frekuensi sebesar 5 Hz mengakibatkan nilai arus menjadi lebih besar. Sementara itu untuk nilai kecepatan, ketika nilai frekuensi diturunkan maka kecepatan juga ikut menurun.

Dari data tabel tersebut saat frekuensi diturunkan menjadi 15 – 5 Hz arus yang dikeluarkan oleh inverter mencapai melebihi rating arus. Apabila arus yang dikeluarkan oleh inverter terlalu besar maka dapat merusak motor induksi. Beban disini menggunakan motor induksi tiga fasa dengan rating arus 8,25 A.

6. Pengaruh motor induksi saat sepeda listrik dibebani.

Tabel 4.2 Hasil Simulasi Perubahan Frekuensi Terhadap Arus dan Kecepatan dengan Beban

No.	Frekuensi (Hz)	Arus (A)	wr (pu)
1.	5	17,7	0,09904
2.	10	12.1	0,1977
3.	15	8.91	0,2954
4.	20	7	0,3933
5.	25	5,7	0,4896
6.	30	4,8	0,5854
7.	35	4,27	0,68

8.	40	3,9	0,7736
9.	45	3,62	0,8644
10.	50	3,43	0,9391

Berdasarkan hasil tabel 4.2 dapat dilihat bahwa ketika sepeda listrik dibebani perubahan nilai arus tidak terlalu besar (nilai arus diambil saat keadaan konstan) dibanding tanpa beban.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa dan pembahasan maka kesmpulannya adalah sebagai berikut:

1. Desain inverter ini menggunakan metode SVPWM sebagai pengaturan saklar. Pada hasil simulasi, inverter tiga fasa ini dapat menjalankan motor induksi tiga fasa 50 V_{LL}. Dimana inverter ini menggunakan tegangan masukan dari baterai 48 Volt yang kemudian dinaikkan terlebih dahulu oleh konverter penaik yaitu sebesar 70.62 Volt.
2. Pada saat kondisi *steady state*, saat frekuensi 50 Hz arus motor induksi sebesar 3,16 A dengan kecepatan motor mencapai 0,9581 pu.
3. Untuk membuat variasi kecepatan motor induksi pada sepeda listrik maka diperlukan pengendalian kecepatan motor induksi. Pengendalian kecepatan dilakukan dengan pengujian pengubahan nilai frekuensi inverter pada simulasi, ketika frekuensi diubah bernilai 5 – 10 Hz maka arus pada motor akan melebihi nilai nominal dari arus motor tersebut yakni sebesar 8,25 A.

5.2 Saran

Penelitian yang telah dilakukan masih terdapat kekurangan. Salah satu kekurangannya adalah harmonisa pada tegangan maupun arus pada inverter. Tegangan output yang digunakan masih dalam bentuk gelombang kotak – kotak. Kekurangan ini dapat dijadikan sebagai bahan penelitian lanjutan yaitu cara mengurangi harmonisa dengan menggunakan filter induktor dan kapasitor pada desain inverter ini. Diharapkan dengan penelitian yang akan datang didapatkan cara metode pengurangan harmonisa yang lebih efektif beserta perhitungannya.

Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura.

- [4] Gultom, Leothamrin. 2011. “*Aplikasi Pembangkit PWM Pada Mikrokontroler ATmega 8535 Untuk Mengendalikan Suhu Pemanas Air (Heater)*”. Skripsi Program Studi Sarjana Fisika, Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sumatera Utara. Medan.
- [5] Kumar, K.Vinoth, dkk. 2010. “*Simulation and Comparison of SPWM and SVPWM Control For Three Phase Inverter*”. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol.2, No.7:61-74. India

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nugroho, Emmanuel Agung. dan Joga Dharma Setiawan. 2012. “*Kajian Sistem Kendali Space Vector Pulse Width Modulation Sebagai Pengendali Motor Induksi 3 Fasa*”. Jurnal Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim. Semarang. Indonesia
- [2] Slamet dan Feri Yusivar. 2008. “*Perancangan Rangkaian Kontrol Kecepatan Motor Induksi AC Tiga Phasa Menggunakan Metode Space Vector dan Kendali V/f Konstan Berbasis Microcontroller AVR Tipe ATMEGA16*”. Seminar Ilmiah Nasional Komputer dan Sistem Intelijen. Universitas Indonesia. Depok.
- [3] Putra, Muclas. 2014.”*Perancangan Prototipe Konverter DC ke DC Penaik Tegangan Dengan Variabel Tegangan pada Sisi Output*”. Jurnal Program Studi Teknik Elektro