

Desain Simulasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan *Switching Space Vector Pulse Width Modulation*

Muhamad Yusuf¹, Vicky Prasetya², Sugeng Dwi Riyanto³, Arif Ainur Rafiq⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Elektronika, Politeknik Negeri Cilacap

Email : yusuf@politeknikcilacap.ac.id¹⁾

vickyprasetya@politeknikcilacap.ac.id²⁾

sugeng@politeknikcilacap.ac.id³⁾

arifainurrafiq@politeknikcilacap.ac.id⁴⁾

ABSTRACT

Induction motor has been used by industry as a source of mechanical energy. Induction motors are very reliable, inexpensive, and easy to maintain. Induction motor is difficult to control because one of the nonlinear plant categories. The method can be used to regulate the speed of an induction motor is to set the vector. In order for an induction motor to be easily controlled like a separate dc booster motor, the induction motor is modeled in the rotary axis reference (d-q model). This research applies an induction motor speed regulation scheme using Switching Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM). This system produces a steady state error averaging below 4 (four) rpm or equal to 0.3% with a load torque of between 5 Nm to 35 Nm.

Keywords : *d-q model, SVPWM, Three phase induction motor*

INTISARI

Motor induksi telah dimanfaatkan industri sebagai sumber energi mekanik. Motor induksi sangat handal, murah, dan mudah dalam perawatannya. Motor induksi sulit dikendalikan karena salah satu kategori *plant nonlinier*. Salah satu cara yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi adalah mengatur vektornya. Agar motor induksi mudah untuk dikendalikan seperti motor dc penguat terpisah, maka motor induksi dimodelkan dalam referensi sumbu putar (model d-q). Penelitian ini menerapkan skema pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan *Switching Space Vector Pulse Width Modulation* (SVPWM). Sistem ini menghasilkan *error steady state* rata-rata di bawah 4 (empat) rpm atau sebesar 0,3 % dengan diberi torsi beban antara 5 Nm sampai 35 Nm.

Kata kunci: Model d-q, Motor Induksi Tiga Fasa , SVPWM

I. PENDAHULUAN

Sejak bergulirnya revolusi industri ke-3, banyak peralatan industri digantikan dengan mesin. Saat ini mesin-mesin listrik banyak beroperasi menggantikan tugas dari manusia. Salah satu mesin listrik yang banyak dipakai adalah motor induksi. Motor induksi merupakan salah satu mesin listrik yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Motor jenis ini banyak diaplikasikan dalam bidang HVAC (*Heating, Ventilation dan Air-Conditioning*), *Industrial drives (motion control, Robotic)*, *Automotive (Electric Vehicle)* dll. Motor jenis ini memiliki beberapa kelebihan diantaranya konstruksinya sederhana dan kokoh, harganya relatif murah, serta perawatannya mudah. Pengaturan motor induksi lebih sulit bila dibandingkan dengan motor arus searah/dc, karena fluks dan torsi yang dihasilkan oleh motor induksi saling berkaitan atau tidak bebas. Metode pengaturan vektor adalah pengaturan melalui pemisahan (*decoupling*) variabel stator dari motor induksi, sehingga seperti motor arus searah atau motor dc penguat terpisah. Banyak

penelitian tentang pengaturan kecepatan motor induksi berbasis pengaturan vektor yang pernah dilakukan oleh [3], [4], [6], [7], [8] untuk menyederhanakan struktur pengaturan kecepatan motor induksi yang digunakan sebagai penggerak elektrik dengan menggunakan transformasi koordinat model d-q.

Pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa umumnya menggunakan inverter tiga fasa. Masukkan inverter adalah tegangan dc kemudian diubah menjadi tegangan ac dengan melakukan *switching* pada tegangan DC. Banyak berkembang metode *switching* pada inverter salah satunya adalah SVPWM. Metode PWM ini berdasar adanya vektor ruang pada koordinat abc (tiga fasa). SVPWM ini adalah sebuah teknik tingkat lanjut untuk membangkitkan gelombang sinus yang menghasilkan bentuk tegangan yang lebih baik untuk motor induksi dan total distorsi harmonik yang rendah. Torsi beban yang berubah menyebabkan kecepatan motor juga berubah. Penelitian ini merancang sebuah pengaturan motor induksi tiga fasa dengan *switching* SVPWM menggunakan *fuzzy PI* kontroler. Penambahan

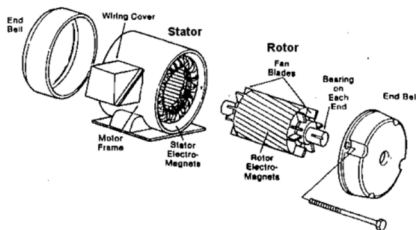
fuzzy diharapkan nilai parameter kontroler juga berubah agar didapat *error steady state* di bawah 10rpm.

II. LANDASAN TEORI

Pada bagian ini dibahas mengenai model matematis motor induksi dalam model d-q dan metode *switching* SVPWM.

A. Motor Induksi Tiga Fasa

Salah satu jenis motor induksi tiga fasa adalah tipe *squirrel cage* yang mempunyai beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan motor DC. Beberapa kelebihannya adalah perawatannya mudah, lebih handal, harganya relatif murah, dan memiliki efisiensi yang tinggi. Motor jenis ini banyak dioperasikan pada kecepatan dan beban konstan [2].

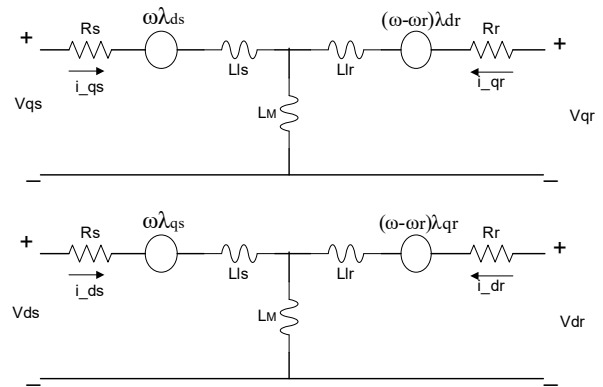


Gambar 1. Konstruksi motor induksi tiga fasa

Motor induksi terdiri dari rangkaian stator (bagian yang tetap), rangkaian rotor (bagian yang bergerak), bearing mekanik dan celah udara yang ditunjukkan pada Gambar 1.

B. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Analisis motor induksi dimulai dengan menggunakan rangkaian ekuivalen seperti pada Gambar 2. Pada gambar tersebut, keadaan motor induksi dapat dianggap sebagai transformator dimana stator merupakan rangkaian primer dan rotor sebagai rangkaian sekunder. Diasumsikan tegangan sumber adalah sinusoidal dan dalam keadaan tunak. Pada kenyataannya ditemui permasalahan tegangan sumber yang tidak sinusoidal dan ada perubahan beban. Oleh karena itu, dibutuhkan pemodelan lain dari motor induksi sehingga analisis terhadap motor induksi dapat dilakukan lebih mudah dan fleksibel.



Gambar 2. Rangkaian ekuivalen dq motor induksi 3 fasa [2]

Dalam hal ini, model yang digunakan adalah model motor induksi dalam koordinat d-q. Diperlukan suatu transformasi koordinat motor induksi dari koordinat tiga fasa (koordinat abc) menjadi koordinat dua fasa (koordinat d-q) dengan mengikuti Persamaan (1).

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \omega \cdot \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_{qs} \quad (1.a)$$

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \omega \cdot \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_{ds} \quad (1.b)$$

$$V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + (\omega - \omega_r) \cdot \lambda_{dr} + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_{qr} \quad (1.c)$$

$$V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + (\omega - \omega_r) \cdot \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_{dr} \quad (1.d)$$

Keunggulan dari model motor induksi koordinat d-q selain mempermudah analisis adalah juga agar motor induksi tiga fasa memiliki sifat atau perilaku yang menyerupai motor DC sehingga lebih mudah dikontrol. Analisis tersebut meliputi tegangan stator dan tegangan rotor, fluks stator dan fluks rotor, serta torsi elektromagnetik dari motor induksi. Berdasarkan Gambar 2, persamaan tegangan stator dan rotor motor induksi merupakan fungsi arus stator dan arus rotor, serta fungsi fluks yang tercakup pada kumparan dinyatakan dengan persamaan (2).

$$\lambda_{qs} = L_{ls} \cdot i_{qs} + M \cdot (i_{qs} + i_{qr}) \quad (2.a)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} \cdot i_{ds} + M \cdot (i_{ds} + i_{dr}) \quad (2.b)$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr} \cdot i_{qr} + M \cdot (i_{qs} + i_{qr}) \quad (2.c)$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr} \cdot i_{dr} + M \cdot (i_{ds} + i_{dr}) \quad (2.d)$$

Persamaan (1) dan (2) dapat dinyatakan dalam persamaan matriks dengan melakukan substitusi hasilnya seperti pada Persamaan (3)

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega L_s & pM & \omega M \\ -\omega L_s & R_s + pL_s & -\omega M & pM \\ pM & (\omega - \omega_r)M & R_r + pL_r & (\omega - \omega_r)L_r \\ -(\omega - \omega_r)M & pM & -(\omega - \omega_r)L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

dengan,

$$L_s = L_{ls} + M \tag{3}$$

Persamaan model matematis motor induksi tiga fasa jika dibuat dalam bentuk *state space* ditunjukkan pada Persamaan (4) sampai (6). Diferensial arus stator dan rotor pada sumbu koordinat d (*direct axis*) ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \end{bmatrix} &= \frac{1}{D} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_r M^2 & R_r M & \omega_r L_r M \\ R_s M & -\omega_r L_s M^2 & -R_s L_s & \omega_r L_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \\ &+ \frac{1}{D} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -M & 0 \\ -M & 0 & L_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \\ D &= L_s L_r - M^2 \end{aligned} \tag{4}$$

Sedangkan diferensial arus stator dan rotor pada sumbu koordinat q (*quadratur axis*) ditunjukkan pada Persamaan (5).

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} &= \frac{1}{D} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_r M^2 & R_r M & \omega_r L_r M \\ R_s M & -\omega_r L_s M^2 & -R_s L_s & \omega_r L_r L_s \\ -\omega_r M^2 & R_s L_r & \omega_r L_r M & R_r M \\ \omega_r L_s M & R_s M & \omega_r L_r L_s & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \\ &+ \frac{1}{D} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -M & 0 \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -M \\ 0 & M & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{5}$$

Jika pada sumbu d dan q digabungkan akan menjadi *diferensial* arus motor pada sumbu d-q (*direct-quadratur axis*) dengan menggabungkan persamaan (4) dan (5) maka bentuk *state space* model motor induksi menjadi persamaan (6).

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} &= \frac{1}{D} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_r M^2 & R_r M & \omega_r L_r M \\ R_s M & -\omega_r L_s M^2 & -R_s L_s & \omega_r L_r L_s \\ -\omega_r M^2 & R_s L_r & \omega_r L_r M & R_r M \\ \omega_r L_s M & R_s M & \omega_r L_r L_s & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \\ &+ \frac{1}{D} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -M & 0 \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -M \\ 0 & M & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{6}$$

Persamaan torsi yang dihasilkan oleh motor dinyatakan sebagai jumlah dari daya dibandingkan dengan kecepatan mekanik. Nilai torsi motor induksi dapat dinyatakan dalam Persamaan (7).

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{\omega_r} [\omega (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r) (\lambda_{dr} i_{qr} - \lambda_{qr} i_{dr})] \tag{7}$$

Hubungan torsi dengan fluks dapat dinyatakan dalam Persamaan (8).

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} &= -(\lambda_{dr} i_{qr} - \lambda_{qr} i_{dr}) \\ &= L_M (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \end{aligned} \tag{8}$$

Sehingga persamaan torsinya dapat dirumuskan pada Persamaan (9) sebagai berikut:

$$T_e = \frac{3}{2} p L_M (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \tag{9.a}$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_{qr} i_{dr} - \lambda_{dr} i_{qr}) \tag{9.b}$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \tag{9.c}$$

Kecepatan putaran motor induksi merupakan fungsi dari torsi elektromagnetik dan torsi beban. Adapun rumusan untuk mendapatkan kecepatan motor induksi ditunjukkan pada Persamaan (10) dan (11).

$$\frac{J}{p} \frac{d}{dt} \omega_r + B \omega_r = T_e - T_L \tag{10}$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \tag{11}$$

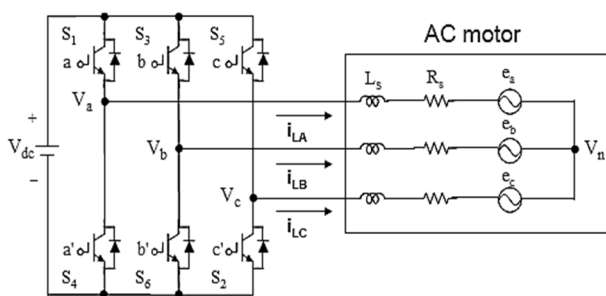
dimana,

- T_L : torsi beban (N.m)
- T_e : torsi elektromagnetik (N.m)
- B : konstanta gesek motor (kg.m²/s)
- J : momen inersia (kg.m²)
- p : jumlah pasang kutub

- ω_r : kecepatan angular rotor (rad/detik)
- θ_r : posisi sudut (rad)
- V_{qs}, V_{ds} : tegangan stator pada sumbu dq (Volt)
- V_{qr}, V_{dr} : tegangan rotor pada sumbu dq (Volt)
- i_{qs}, i_{ds} : arus stator pada sumbu dq (Ampere)
- i_{qr}, i_{dr} : arus rotor pada sumbu dq (Ampere)
- $\lambda_{qs}, \lambda_{ds}$: fluks stator pada sumbu dq (Webber)
- $\lambda_{qr}, \lambda_{dr}$: fluks rotor pada sumbu dq (Webber)
- R_s : tahanan stator (Ω)
- R_r : tahanan rotor (Ω)
- L_{ls} : induktansi diri stator (Henry)
- L_{lr} : induktansi diri rotor (Henry)
- M : induktansi mutual (Henry)

C. Switching SVPWM

Space Vector Modulation (SVM) awalnya dikembangkan sebagai pendekatan vektor pada Pulse Width Modulation (PWM) untuk Inverter tiga fasa. Metode PWM ini didasarkan pada adanya vektor ruang pada koordinat abc (tiga fasa). SVPWM adalah sebuah pendekatan yang berbeda dengan Modulasi PWM, yang mana ini berdasarkan pada vektor ruang dari tegangan dalam bidang α - β . Komponen α - β dicari dengan transformasi *clarke*. SVPWM mengacu pada urutan pensaklaran yang khusus dari enam transistor power yang menghasilkan distorsi harmonik dalam tegangan output dan arus yang lebih efisien.



Gambar 3. Skema inverter tiga fasa

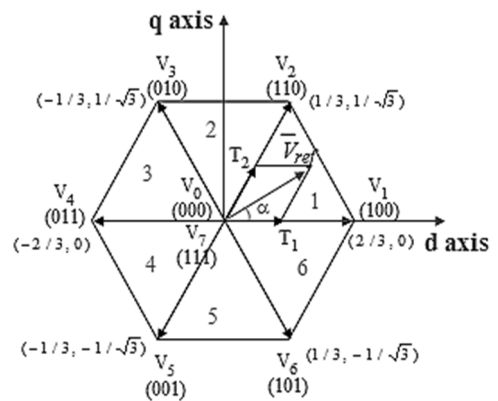
Model rangkaian dari Inverter SVPWM sumber tegangan tiga fasa secara umum ditunjukkan pada Gambar 3. S_1 sampai S_6 adalah 6 (enam) saklar-saklar *power* yang membentuk *output*, yang dikendalikan oleh perubahan pensaklaran a, a', b, b' dan c, c' dalam hal ini saklar *power* dapat menggunakan mosfet atau IGBT. Ketika saklar atas "ON" atau a, b dan c adalah "1", maka saklar

bawah yang berhubungan adalah "OFF" atau a', b' dan c' adalah "0". Oleh karena itu variabel *switching* a,b,c dengan a',b',c' akan menghasilkan delapan kemungkinan seperti yang terlihat pada Tabel 1. Delapan kemungkinan menghasilkan delapan buah vektor tegangan yang terdiri dari V_0 sampai dengan V_7 . Untuk menjalankan SVPWM, persamaan tegangan pada kerangka acuan abc harus diubah menjadi kerangka acuan $\alpha\beta$ yang terdiri dari sumbu horizontal α dan sumbu vertikal β .

Tabel 1. Nilai tegangan tiap vektor tegangan

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

Enam buah vektor aktif tersebut dapat dipetakan dalam bentuk hexagonal dengan beda sudut 60 derajat seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Dasar pensaklaran vektor dan sektor

Tujuan dari teknik SVM adalah berusaha mendekati vektor tegangan referensi (V_{ref}) menggunakan 8 pola pensaklaran di atas. Salah satu caranya adalah dengan menghasilkan tegangan keluaran rata-rata dari inverter pada selang waktu T yang akan sama hasilnya dengan besar V_{ref} pada selang waktu yang sama juga. Prinsip kerja dari SVM adalah menghasilkan tegangan sinusoidal dengan amplitudo konstan dan

frekuensi pensaklaran yang konstan dari vektor yang berputar. Teknik ini menghasilkan tegangan keluaran yang besarnya tepat dengan tegangan referensinya melalui kombinasi dari 8 bentuk pensaklaran ($V_0 - V_7$). Hubungan antara vektor perubahan *switching* [a, b, c]^t dan tegangan vektor *line ke line* [$V_{ab} V_{bc} V_{ca}$]^t ditunjukkan pada Persamaan (12).

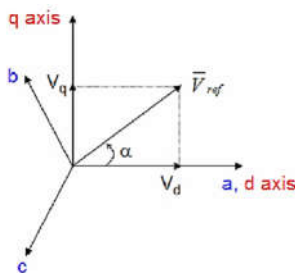
$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (12)$$

Untuk mendapatkan nilai besarnya tegangan fasa terhadap sumbu netral [$V_{an} V_{bn} V_{cn}$]^t dapat digunakan Persamaan (13).

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (13)$$

Sehingga dapat dibuat tabel tegangan pada setiap vektornya yang ditunjukkan pada Tabel 1. Adapun langkah-langkah dalam menyusun SVPWM sebagai berikut:

1. Membuat sumber tiga fasa yang bisa diatur baik frekuensi dan tegangannya oleh sinyal kontrol.
2. Mengubah sinyal tiga fasa V_{abc} menjadi V_{α}, V_{β} dan mencari sudut fasa (α)
3. Menentukan lamanya waktu *switching* T_1, T_2 dan T_0
4. Menentukan lamanya waktu *switching* tiap transistor (S_1 sampai S_6)



Gambar 5. Posisi α dan V_{ref} dalam sumbu dq

Membuat sumber tiga fasa dengan beda fasa 120° . Membuat fungsi sinus kemudian menggesernya dengan $-2\pi/3$ dan $2\pi/3$. Penentuan tegangan V_{α}, V_{β} dan sudut α menggunakan transformasi *Clarke* yang ditunjukkan pada

Persamaan (14). Posisi α referensi dua fasa ditunjukkan pada Gambar 5.

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Sedangkan untuk mencari tegangan V_{ref} dan α dapat ditentukan jika diketahui nilai V_{α} dan V_{β} yang ditunjukkan pada Persamaan (15) dan (16).

$$|V_{ref}| = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \quad (15)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}}\right) = \omega t = 2\pi f t \quad (16)$$

Menentukan lamanya waktu *switching* T_1, T_2 dan T_0 pada tiap sektornya ditunjukkan Persamaan (17) yang mengacu pada Gambar 5.

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot V_{ref}}{V_{dc}} \left(\sin \frac{n}{3} \cdot \cos \alpha - \cos \frac{n}{3} \cdot \sin \alpha \right) \quad (17.a)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot V_{ref}}{V_{dc}} \left(-\cos \alpha \cdot \sin \frac{(n-1)\pi}{3} + \sin \alpha \cdot \cos \frac{(n-1)\pi}{3} \right) \quad (17.b)$$

$$T_0 = T_z - T_1 - T_2 \quad (17.c)$$

dimana, n adalah urutan sektor ($n = 1, 2, \dots, 6$)

Menentukan lamanya waktu *switching* tiap transistor pada tiap sektor menggunakan pola pada Tabel 2.

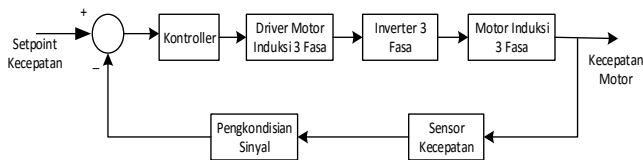
Tabel 2. Lama waktu pensaklaran S_1 sampai S_6

Sector	Upper Switches (S_1, S_3, S_5)	Lower Switches (S_4, S_6, S_2)
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	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_0 / 2$	$S_4 = T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_2 + T_0 / 2$

III. PERANCANGAN SISTEM

Pada bagian ini dirancang sistem pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa. Terdiri dari beberapa tahapan yaitu tahapan simulasi adalah

dengan membuat model matematis motor induksi tiga fasa, perancangan *switching* SVPWM dan perancangan kontroler. Diagram blok sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram blok sistem

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Motor induksi yang digunakan adalah motor induksi jenis rotor sangkar (*squirrel-cage*) hubungan bintang. Keluaran yang dihasilkan dari motor induksi tiga fasa ini terdiri dari sistem elektrik adalah nilai fluks stator dan torsi elektromagnetik sedangkan sistem mekanisnya adalah kecepatan putaran rotor. Parameter motor induksi yang digunakan mempunyai parameter ditunjukkan pada Tabel 3.

Dengan memasukkan parameter motor induksi ke dalam Persamaan (5) maka didapatkan parameter arus dalam sumbu d-q seperti pada Persamaan (16).

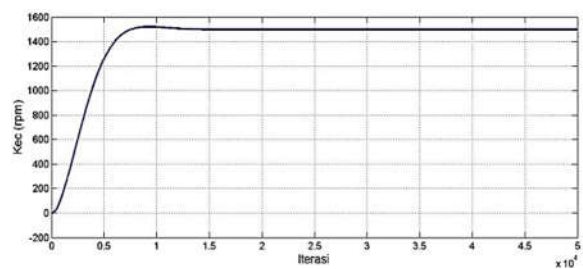
Tabel 3. Parameter Motor Induksi Tiga Fasa

Nama	Simbol	Nilai
Resistansi stator (W)	Rs	0,435
Induktansi stator (H)	Lls	0,002
Resistansi rotor (W)	Rr	0,186
Induktansi rotor (H)	Llr	0,002
Mutual induktansi (H)	M	0,069
Momen Inersia (kgm ²)	J	0,089
Konstanta Gesek (kg.m ² /s)	B	0,005
Kutub	P	2

Arus dalam sumbu d-q digunakan untuk menentukan torsi elektromagnetik (Te) yang dihasilkan oleh motor dengan menggunakan Persamaan (10).

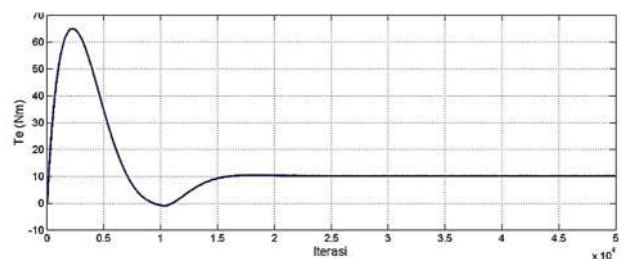
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{0,0028} \begin{bmatrix} -0,03 & \omega_r \times 0,0047 & 0,012 & \omega_r \times 0,049 \\ 0,03 & -\omega_r \times 0,0003 & -0,435 \times 0,071 & \omega_r \times 0,005 \\ \omega_r \times 0,047 & 0,030 & \omega_r \times 0,0048 & 0,0128 \\ \omega_r \times 0,0048 & 0,435 \times 0,069 & \omega_r \times 0,030 & -0,013 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{1}{0,0028} \begin{bmatrix} 0,071 & 0 & -0,069 & 0 \\ -0,069 & 0 & 0,071 & 0 \\ 0 & 0,071 & 0 & -0,069 \\ 0 & 0,069 & 0 & 0,071 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Untuk mendapatkan kecepatan dalam satuan (rpm), maka keluaran harus dikalikan dengan $30/\pi$. Respon kecepatan motor induksi tanpa beban dengan frekuensi 50Hz ditunjukkan pada Gambar 8, sedangkan torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh motor induksi dengan torsi ditunjukkan pada Gambar 9. Dimana torsi awal yang dihasilkan oleh motor induksi sangat besar sekitar 65Nm berlangsung selama 5ms. Ini terjadi karena saat *start* arus yang diperlukan motor induksi sangat besar.



Gambar 8. Kecepatan dengan torsi beban nol

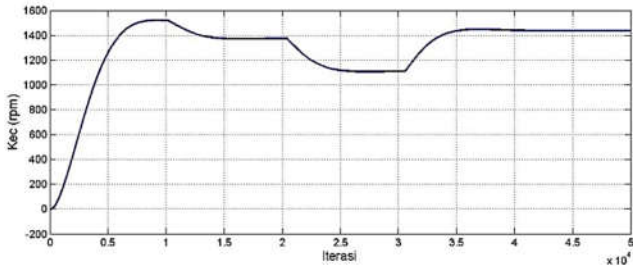
Kecepatan akan menurun jika terdapat torsi beban pada motor induksi hal ini sesuai dengan Persamaan (10). Pengaruh perubahan torsi beban (TL) terhadap kecepatan ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 9. Torsi Elektromagnetik

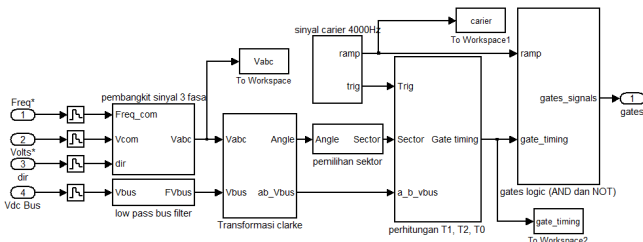
Terjadi penurunan kecepatan sebesar 400 rpm pada saat diberikan torsi beban sebesar 20Nm. Hal ini sangat mempengaruhi kinerja dari sistem. Jika model motor induksi sudah sesuai dengan yang

diharapkan langkah berikutnya adalah menyusun *switching* SVPWM untuk inverter.



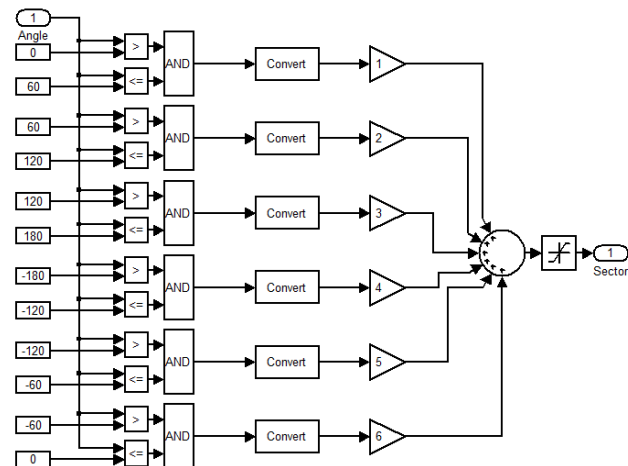
Gambar 10. Kecepatan dengan torsi beban 10,20,5 Nm

Blok diagram secara keseluruhan *switching* SVPWM ditunjukkan pada Gambar 11. Sinyal keluaran digunakan untuk mengatur frekuensi dan tegangan untuk membangkitkan sinyal sinus tiga fasa (V_{abc}).



Gambar 11. Diagram Simulink SVPWM

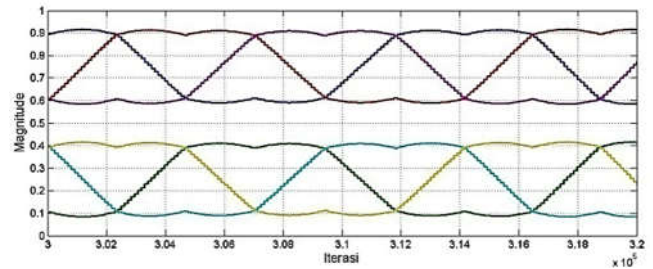
Sinyal sinus tiga fasa diubah menjadi dua fasa V_{α} dan V_{β} menggunakan transformasi Clarke pada Persamaan (14) kemudian dihitung sudut fasanya (α).



Gambar 12. Diagram simulink penentuan sektor

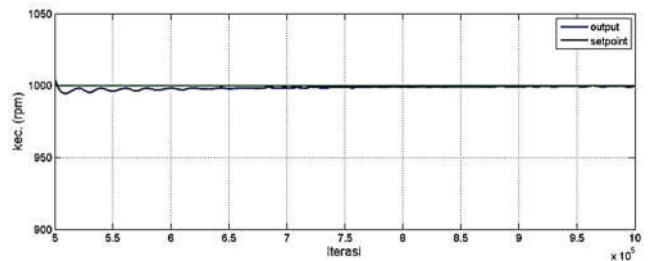
Diagram simulink untuk menentukan sektor yang aktif ditunjukkan pada Gambar 12. Sudut α digunakan menentukan sektor mana yang aktif.

Dari sektor yang aktif dapat ditentukan pola pensaklaran seperti pada Tabel 2. Diagram pewaktuan yang dihasilkan oleh T_1 , T_2 dan T_0 untuk pemacu *gate inverter* ditunjukkan pada Gambar 13.



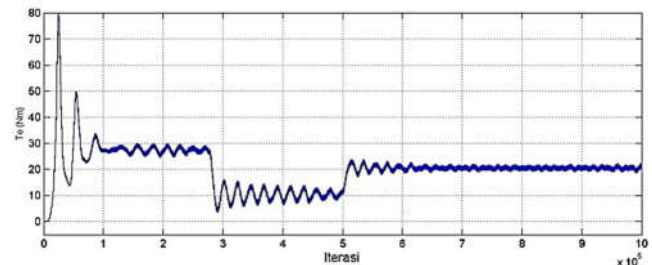
Gambar 13. Diagram pewaktu pemacu *gate inverter*

Tegangan yang diterima oleh motor induksi setelah melalui proses *switching* ditunjukkan pada Gambar 14. Tegangan tersebut adalah tegangan V_{ab} . Tegangan V_{ab} adalah hasil modulasi sinyal pembawa 4000Hz dengan sinyal *gate timing*.



Gambar 14. Respon kecepatan sistem

Sedangkan torsi elektromagnetik yang dihasilkan masih berosilasi pada kondisi *steady state*. Respon torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh motor induksi ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Torsi elektromagnetik

V. KESIMPULAN

Pada grafik respon diagram pewaktuan terlihat sinyal keluaran untuk diagram pewaktuan memiliki perbedaan pewaktuan sebesar 120° . Hal

ini sudah sesuai dengan system 3 fasa dengan perbedaan antar fasa sebesar 120° dan didapatkan nilai error steady state sebesar 0,2% atau dengan kesalahan tunak 2rpm. Torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh motor induksi terdapat osilasi. Penelitian selanjutnya bisa diterapkan kombinasi antara switching SVPWM dengan DTC untuk mengatasi osilasi pada torsi elektromagnetik yang dihasilkan motor induksi tiga fasa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dubey, G. K. (1989). *Power Semiconductor Controlled Drives*. Prentice-Hall International, New Jersey.
- [2] Boldea ion, Nasar S. A. (1999). *Electric Drives*. CRC Press LLC .
- [3] Purwanto, E. dan Ashary, M. (2008). *Pengembangan inverter fuzzy logic kontrol untuk pengendalian motor induksi sebagai penggerak mobil listrik dengan metoda vektor control*. Teknik Elektro, FTI ITS, Makara Teknologi.
- [4] Kar, B. N. dan Mohanty, K. B. (2011). *Indirect vektor kontrol of Induction Motor Using Fuzzy logic controller*. Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, IEEE.
- [5] R. Arulmozhiyal, R. dan Baskaran, K. (2009). *Space Vector Pulse Width Modulation Based Speed Control of Induction Motor using Fuzzy PI Controller*. IEEE International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 1, No. 1, April 2009.
- [6] Lepka, J. dan Stekl, P. (2005). *3-Phase AC Induction Motor vector control Using a 56F80x, 56F8100 or 56F8300 Device*. Freescale Semiconductor.
- [7] Anitha, P. dan Chowdhury, H. B. (2007). *Sensorless control of inverter-fed induction motor drives*. Electrical & Computer Engineering Department, University of Missouri-Rolla, Electric Power Systems Research 77 Hal 619–629.
- [8] Oguz, Y. dan Dede, M. (2010). *Speed estimation of vector controlled squirrel cage asynchronous motor with artificial neural networks*. Department of Electrical Education, Faculty of Technical Education, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Turkey, Energy Conversion and Management 52 Hal 675–686.