

Analisis Pembangkit Pulsa Penyalan Inverter 3 Fasa Menggunakan *Space Vector Pulse Width Modulation* (SVPWM)

Setiyono

Jurusan Teknik Elektro Universitas Gunadarma, Jakarta
Jl. Margonda Raya 100 Pondokcina Depok 16424
setiyono@staff.gunadarma.ac.id

Intisari — Paper ini menyajikan algoritma pembangkit pulsa kendali untuk mengatur kinerja saklar inverter sebagai driver motor induksi 3 fasa dengan metode Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) melalui simulasi pemodelan menggunakan tools matlab Simulink. Deretan pulsa penyalan dihasilkan melalui kalkulasi beberapa persamaan matematik yaitu perhitungan sinyal referensi, transformasi tegangan 3 fasa abc ke system dua dimensi dq, sudut sector, pola waktu penyalan saklar inverter, dan pembandingan sinyal pembawa segitiga dengan sinyal modulator. Kinerja saklar inverter membentuk 8 kombinasi keadaan dan diilustrasikan memiliki 6 buah sector yang terpisah 60° antar sector. Inverter dua level yang dibangun menggunakan 3 buah pasang saklar semikonduktor MOSFET. Disain simulasi diharapkan dapat dijadikan bahan acuan para peneliti untuk di implementasikan menjadi peralatan pengendalian mesin. Pemodelan ini juga digunakan untuk mengetahui dan menganalisis kendali penyalan saklar inverter, pengaruh indeks modulasi terhadap kinerja saklar, dan pola waktu penyalan pulsa tiap pasang saklar inverter. Hasil simulasi menjelaskan bentuk gelombang pulsa penyalan yang dibangun menghasilkan deretan pulsa terkendali yang dapat menjalankan performa saklar inverter tiga fasa.

Kata kunci — Inverter, Space Vector Pulse Width Modulation SVPWM, Motor Induksi Tiga Fasa.

Abstract — This paper presents an algorithm for generating control pulses to control the performance of the inverter switch as a 3-phase induction motor driver using the Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) method through modeling simulations using the Simulink matlab tools. A series of ignition pulses is generated through the calculation of several mathematical equations, namely the calculation of the reference signal, the transformation of the 3-phase abc voltage to a two-dimensional dq system, the angle sector, the timing pattern of the inverter switch, and the comparison of the triangular carrier signal with the modulator signal. The performance of the inverter switch forms 8 combinations of states and is illustrated as having 6 sectors separated by 60° between sectors. The two-level inverter is built using 3 pairs of MOSFET semiconductor switches. The simulation design is expected to be used as a reference for researchers to be implemented into machine control equipment. This modeling is also used to determine and analyze the ignition control of the inverter switch, the effect of the modulation index on the performance of the switch, and the pulse ignition timing pattern for each pair of inverter switches. The simulation results describe the pulse waveform that is built to produce a series of controlled pulses that can run the performance of a three-phase inverter switch.

Keywords — Inverter, Space Vector Pulse Width Modulation SVPWM, Three Phase Induction Motor.

I. PENDAHULUAN

Motor induksi 3 fasa adalah jenis motor listrik yang telah banyak digunakan pada sector industri maupun rumah tangga. Keunggulan motor ini antara lain memiliki konstruksi sederhana, harga murah, dan mudah didapatkan dipasaran. Namun disisi lain motor ini dalam pengendalian kecepatan putarnya tidak mudah [1],[2]. Ada dua cara pengendalian atau pengasutan motor induksi yaitu pengasutan secara langsung dan tak langsung. Pengasutan secara langsung dilakukan menghubungkan motor dengan tegangan jala jala. Metode ini memiliki kelemahan yakni menimbulkan rugi rugi daya

pada saat awal motor dihubungkan dengan sumber daya, karena pada saat itu motor menarik arus start yang sangat besar. Metode pengasutan secara tak langsung dengan cara mengatur tegangan suplai, arus masukan, fluks medan stator, dan frekuensi menggunakan perangkat elektronik yang dikenal dengan nama *Variable Speed Drive* (VSD) [3]. Peralatan elektronik yang biasa digunakan sebagai VSD adalah Inverter. Dewasa ini teknik modulasi masih digunakan dalam perancangan VSD untuk saklar inverter, antara lain *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) dan *Space Vektor Pulse Width Modulation* (SVPWM) [4], [5]. Metoda SPWM merupakan teknik yang digunakan

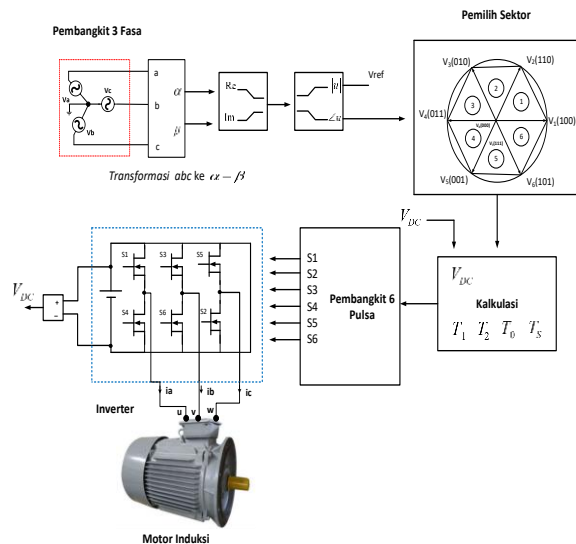
untuk menentukan sudut penyalan dengan cara membandingkan gelombang pembawa segitiga dengan 3 gelombang sinus (fasa R, fasa S, dan fasa T) yang masing-masing berbeda fasa 120° [6],[7]. Sedangkan Metode SVPWM adalah teknik pembangkit pulsa menggunakan prinsip keseimbangan tegangan-waktu (*volt-second balance*) dimana analisisnya menggunakan pendekatan vector [5],[8],[9]. Untuk mensintesa tegangan referensi tiga tegangan vector terdekat dengan tegangan referensi dioperasikan dalam kurun waktu tertentu. Yassine Zahraoui, mengatakan modulasi vektor ruang adalah solusi yang sangat tepat untuk mengurangi tingkat riak yang tinggi terlepas dari kerumitannya [4]. Mihoub Youcef, mengimplementasikan RST dan kontroler fuzzy adaptif (AFC) untuk meningkatkan kecepatan variable Sistem kontrol penggerak motor induksi [10]. Arkan A. Kadum menyajikan pendekatan kontrol pita histeresis adaptif baru yang digunakan dalam kontrol torsi langsung (DTC) dari penggerak motor induksi (IM) dengan pola switching untuk pembangkit sinyal PWM, hasilnya simulasi pada kondisi operasi yang berbeda pada rentang kecepatan yang lebar menunjukkan validitas, efektivitas, dan kelayakan dari disain yang diusulkan [11]. Beberapa peneliti lain mengembangkan penggerak motor induksi dengan kendali vector ruang untuk memperoleh riak torsi yang lebih rendah dan pengaturan kecepatan yang lebih lebar. [12],[13],[14],[8]. Pengendalian dengan VSD umumnya dilakukan dengan pengaturan pola penyalan saklar inverter menggunakan kendali saklar ataupun kendali vector. Pengaturan penyalan saklar dengan kendali vector memiliki keunggulan antara lain energy yang digunakan lebih efisien, dan menghasilkan pengaturan kecepatan putar yang lebar.

Penelitian ini memaparkan teknik pembangkit sinyal penyalan saklar Inverter 3 fasa dengan metode Space Vector Pulse Width Modulation melalui simulasi pemodelan menggunakan tools matlab Simulink.

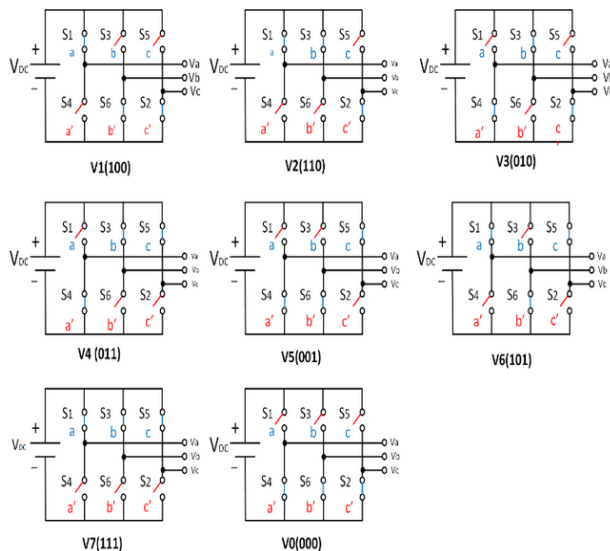
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan mendisain system melalui dua tahap yakni mendisain system secara elektronik dan merancang pemodelan system menggunakan Matlab Simulink. Disain system secara elektronik tampak pada gambar 1 sedangkan disain pemodelan tampak pada gambar 7 dan gambar 8. Beberapa parameter yang dianalisis dalam artikel ini antara lain pembangkit tegangan referensi, pola waktu penyalan saklar inverter tiap tiap sector, dan format pulsa penggerangan enam buah saklar gerbang. Gambar 1 menjelaskan disain system elektronik secara keseluruhan. Sumber listrik tiga fasa merupakan generator tiga gelombang sinus pada frekuensi 50 Hz, amplitudo variable dengan beda fasa tiap tiap kawat sebesar 120° . Inverter Mosfet tiga fase pada gambar 1 memiliki 8 kondisi switching yang dapat dibentuk dalam delapan komposisi biner dari 000 sampai dengan 111. Pada tiap komposisi dinotasikan dengan $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ dan V_7 selanjutnya disebut vector switching. V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 dan V_6 disebut *non zero vector* karena menghasilkan tegangan output tidak sama dengan nol, sedangkan V_0 dan V_7 disebut dengan *zero vector* dimana vector ini menghasilkan tegangan output sama dengan nol. Kinerja saklar inverter tiga fasa dapat di kelompokkan dalam delapan keadaan. Saklar **a,b,c** mempunyai pasangan saklar komplementer **a', b', c'** dimana apabila saklar **a** dalam keadaan tersambung atau ON maka pasangan saklar komplementernya **a'** dalam keadaan terbuka atau OFF. Demikian juga dengan saklar **b** dan saklar **c** bekerja secara kebalikan keadaan dengan saklar komplementernya **b'** dan **c'**.

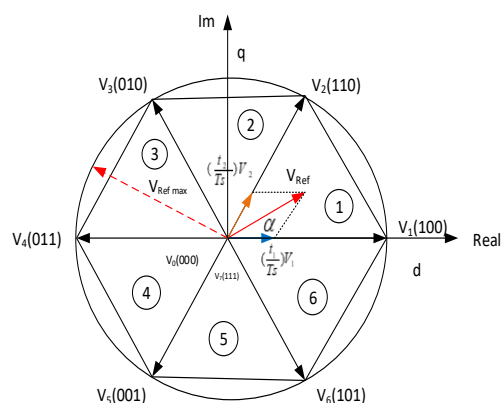
Gambar 2 Menjelaskan sebuah inverter tiga fase memiliki 8 kondisi switching yang dapat dibentuk dalam delapan komposisi biner dari 000 sampai dengan 111. Pada tiap komposisi dinotasikan dengan $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ dan V_7 selanjutnya disebut vector switching. V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 dan V_6 disebut non zero vector karena menghasilkan tegangan output tidak sama dengan nol, sedangkan V_0 dan V_7 disebut dengan zero vector dimana vector ini menghasilkan tegangan output sama dengan nol.



Gbr. 1 Disain Pembangkit Pulsa Penyalan Menggunakan SVPWM Inverter



Gbr. 2 Delapan Kombinasi Kondisi Saklar Inverter



Gbr. 3 Posisi Tiap Vektor pada Bidang Koordinat Ruang 2 Dimensi d q

Gambar 3 terlihat 6 vektor dipetakan pada enam bagian sector (sector 1 sampai 6) pada posisi mengelilingi titik pusat membentuk sebuah bangun hexagonal sedangkan dua vector terpetakan pada titik pusat (origin). Tiap tiap sector mempunyai jarak sudut vector sebesar 60° . Dalam satu kali putaran pada bidang koordinat kompleks dq Vref akan melalui keenam non zero vector dan zero vector. Tabel 1 memperlihatkan keadaan tegangan output ($V_0 - V_7$) pada berbagai kondisi saklar tiap tiap sector.

Tabel 1. Tegangan Keluaran Inverter pada Tiap Saklar Bekerja

V c	S c	Saklar			V _{L-N}			V _{L-L}		
		a	b	c	Van	Vbn	Vcn	V _{ab}	V _{bc}	V _{ac}
V ₀	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V ₁	1	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	1	0	-1
V ₂	2	1	1	0	1/3	1/3	-2/3	0	1	-1
V ₃	3	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1	1	0
V ₄	4	0	1	1	-2/3	1/3	1/3	-1	0	1
V ₅	5	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	0	-1	1
V ₆	6	1	0	1	1/3	-2/3	1/3	1	-1	0
V ₇	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Keterangan Vc = Vector, Sc = Sector, 0 = Saklar terbuka, 1 = Saklar terhubung

Enam sector tersebut dipetakan dalam sumbu koordinat dq masing masing sector berjarak 60° . Langkah selanjutnya adalah menentukan nilai Tz, T1, T2 dan T0 untuk mendapatkan pola pola waktu pulsa penyalan inverter. Pembangkit pulsa inverter diperoleh dengan membandingkan signal modulator space vector dengan signal pembawa segitiga frekuensi 4 kHz. Inverter tersusun oleh 3 buah Leg pasangan saklar IGBT sebagai VSD (Variable Speed Driver) di aktifkan oleh pulsa penyalan. Motor induksi 3 fasa sebagai beban di simulasikan dengan parameter 54 HP (4 kW), 400 V, 50 Hz, 1430 rpm. Nilai tegangan DC link pada inverter sebesar 400 V. Ketika vector posisi pada V₀ dan V₇ maka tidak ada arus yang mengalir pada beban atau Iinverter = 0 A. Semua tegangan pada setiap sector dikalikan dengan Vdc. Persamaan 1 dibutuhkan untuk mengubah besaran abc – αβ atau yang lebih terkenal dengan tranformasi park tegangan sumber 3 fasa diturunkan ke level 1 Vol, 50 Hz dengan beda sudut fasa 0° , 120° , dan 120° .

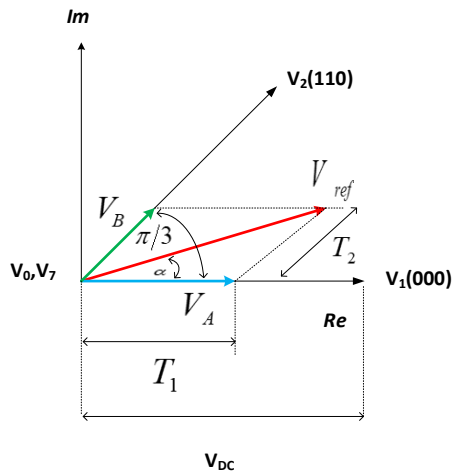
$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Tegangan referensi dan sudut pemilihan sector digunakan untuk menentukan sector bidang pada sumbu koordinat dq (alpha-beta) dimana tegangan vector dipilih.

A. Perhitungan Waktu dan Pola Penyalaan Gerbang

Penyalaan gerbang saklar inverter dengan metode SVPWM menjadi bagian paling penting pada penelitian ini. Gambar 4 menjelaskan dasar perhitungan pewaktuan penyalaan saklar gerbang inverter berdasarkan analisis vector pada sector 1. V_{ref} merupakan resultan dari panjang vector V_A dan vector V_B , dapat direpresentasikan dengan persamaan 2 :

$$V_{ref} = V_A + V_B \quad (2)$$



Gbr. 4 Kalkulasi V_{ref} , T_1 dan T_2 Sektor 1

Pada tiap sector nilai α selalu berada pada interval $0 < \alpha < \pi/3$. Tegangan V_{ref} di sector 1 sudut 60° , nilai $V_A = V_1$, $V_B = V_2$, kemudian tegangan V_{ref} pada sector 2 $V_A = V_2$ dan $V_B = V_3$. Dengan cara yang sama untuk tiap sector yang lain, V_{ref} bergeser atau bergerak ke kiri berlawanan dengan arah jarum jam dengan selang waktu T_z . T_1 adalah selang waktu untuk V_A , T_2 adalah jeda waktu untuk V_B dan T_0 adalah jarak waktu untuk V_0 dan V_7 . Pada sector 1 analisis matematik durasi

tiap tiap T waktu ditentukan persamaan 2, [15]:

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

$$T_2 = T_z \cdot a \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\frac{\pi}{3})} \quad (4)$$

$$\int_0^{T_z} \bar{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \bar{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \bar{V}_0 dt \quad (5)$$

$$T_z \bar{V}_{ref} = (T_1 \cdot \bar{V}_1 + T_2 \cdot \bar{V}_2) \quad (6)$$

$$T_z \cdot |\bar{V}_{ref}| \cdot \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix} = T_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \cdot \frac{2}{3} \cdot V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{3}) \\ \sin(\frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T_z = T_1 + T_2 + T_0 \text{ sehingga} \quad (8)$$

$$T_0 = T_z - (T_1 + T_2) \quad (9)$$

Dimana

$$0 \leq \alpha \leq 60^\circ, T_z = \frac{1}{f_z} \text{ dan } a = \frac{|\bar{V}_{ref}|}{\frac{2}{3}V_{dc}} \quad (10)$$

Pada tiap sector nilai α selalu berada pada interval $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$. Pada sector 1 V_{ref} sudut $\alpha = 0^\circ$ arahnya sama dengan V_1 , untuk sudut $\alpha = \frac{\pi}{3}$ sejajar dengan V_2 . Pada sector 2 V_{ref} sudut $\alpha = 0^\circ$ arahnya sama dengan V_2 , untuk sudut $\alpha = \frac{\pi}{3}$ sejajar dengan V_3 . Demikian seterusnya untuk perhitungan pada sector yang lain.

Durasi waktu T_1, T_2 , dan T_0 pada sector ke n, ditentukan pada persamaan 11, 12 dan 13:

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_z |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3}\pi\right) \right) \quad (11)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_z |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin\left(\alpha - \frac{n-1}{3}\pi\right) \right) \quad (12)$$

$$T_0 = T_z - T_1 - T_2 \quad (13)$$

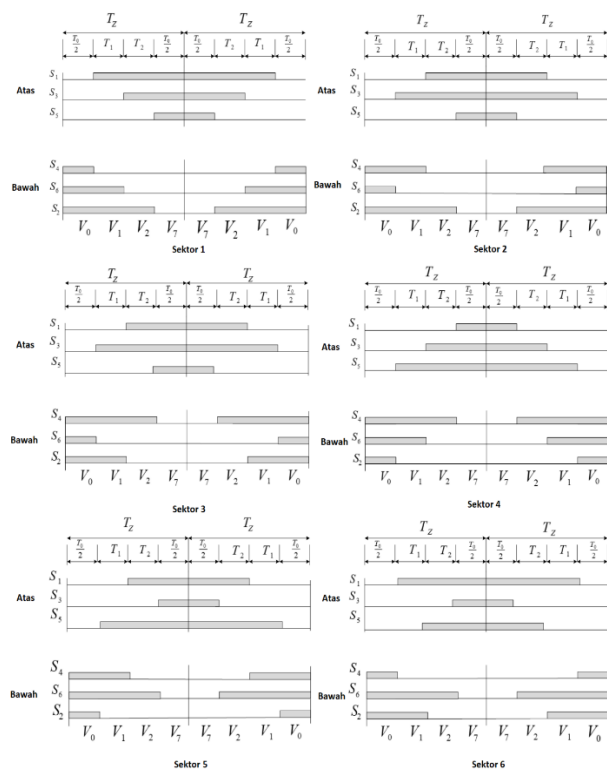
$$n = 1, 1 \text{ sektor } 1 \text{ hingga } 6, 0 \leq \alpha \leq 60^\circ$$

Tabel 2 menjelaskan durasi waktu kinerja saklar pasangan saklar (S_1, S_3, S_5) dengan saklar komplementernya pada inverter 3 fasa di semua sector.

Tabel 2. Durasi Pensaklaran Untuk Tiap Sektor

Sektor	Saklar Atas (S1, S2, S3)	Saklar Bawah (S4, S5, S6)
1	$S1 = T1 + T2 + T0/2$ $S3 = T2 + T0/2$ $S5 = T0/2$	$S4 = T0/2$ $S6 = T2 + T0/2$ $S2 = T1 + T2 + T0/2$
2	$S1 = T0/2$ $S3 = T1 + T2 + T0/2$ $S5 = T0/2$	$S4 = T2 + T0/2$ $S6 = T0/2$ $S2 = T1 + T2 + T0/2$
3	$S1 = T1 + T0/2$ $S3 = T1 + T2 + T0/2$ $S5 = T2 + T0/2$	$S4 = T1 + T2 + T0/2$ $S6 = T0/2$ $S2 = T1 + T0/2$
4	$S1 = T0/2$ $S3 = T1 + T0/2$ $S5 = T1 + T2 + T0/2$	$S4 = T1 + T2 + T0/2$ $S6 = T2 + T0/2$ $S2 = T0/2$
5	$S1 = T2 + T0/2$ $S3 = T0/2$ $S5 = T1 + T2 + T0/2$	$S4 = T1 + T0/2$ $S6 = T1 + T2 + T0/2$ $S2 = T0/2$
6	$S1 = T1 + T2 + T0/2$ $S3 = T0/2$ $S5 = T1 + T0/2$	$S4 = T0/2$ $S6 = T1 + T2 + T0/2$ $S2 = T2 + T0/2$

Keterangan, $T1$ = Waktu V_A maksimum, $T2$ = Waktu V_B maksimum, $T0$ = Waktu $T1+T2$ kembali ke titik pusat.

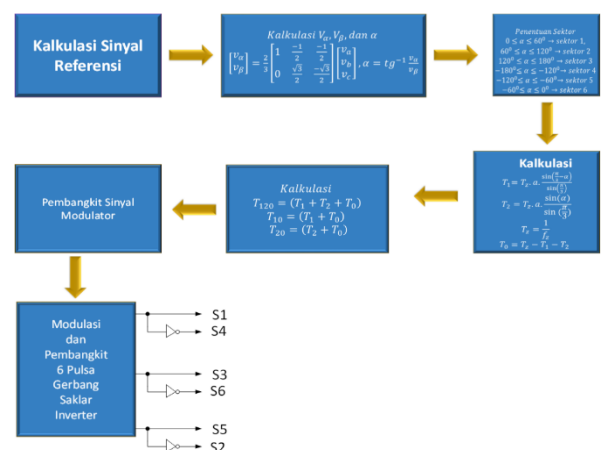


Gbr. 5 Diagram Waktu Swithing Saklar Bagian Atas dan Bagian Bawah Inverter

Gambar 5 Timing Diagram Pulsa Penyalaan Saklar inverter Atas dan Bawah tiap Sector Semua pola waktu ON dan OFF kinerja saklar tiap saklar atas dan bawah akan melalui laju $L1, L2$ dan $L3$ sejauh

$$\begin{aligned} L1 &= T1 + T2 + T0/2 \\ L2 &= T2 + T0/2 \\ L3 &= T0/2 \end{aligned} \quad (14)$$

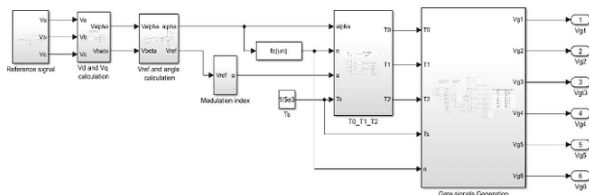
Pergerakan laju kinerja saklar ini menghasilkan gelombang non sinusoida yaitu sinusoida dengan dua punuk gelombang baik pada siklus positif maupun pada siklus negative. Enam sector tersebut dipetakan dalam sumbu koordinat dq masing masing sector berjarak 60° . Langkah selanjutnya adalah menentukan nilai Tz , $T1, T2$ dan $T0$ untuk mendapatkan pola pola waktu pulsa penyalan inverter. Pembangkit pulsa inverter diperoleh dengan membandingkan signal modulator space vector dengan signal pembawa segitiga frekuensi 4 kHz. Inverter tersusun oleh 3 buah Leg pasangan saklar IGBT sebagai VSD (Variable Speed Driver) di aktifkan oleh pulsa penyalan. Motor induksi 3 fasa sebagai beban di simulasikan dengan parameter 54 HP (4 kW), 400 V, 50 Hz, 1430 rpm. Nilai tegangan DC link pada inverter sebesar 400 V. Ketika vector posisi pada V_0 dan V_7 maka tidak ada arus yang mengalir pada beban atau $I_{inverter} = 0$ A. Semua tegangan pada setiap sector dikalikan dengan V_{dc} . Untuk mengubah besaran $abc - \alpha\beta$ atau yang lebih terkenal dengan tranformasi park tegangan sumber 3 fasa diturunkan ke level 1 Vol, 50 Hz dengan beda sudut fasa $0^\circ, 120^\circ$, dan 120° .



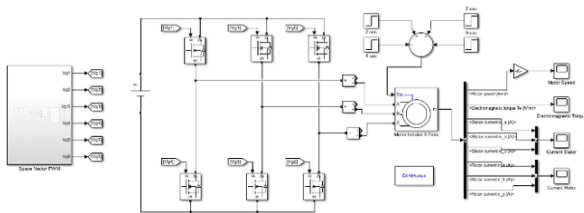
Gbr. 6 Alur Perhitungan Matematik Pembangkit 6 Pulsa Penyalaan Inverter SVPWM

Gambar 6 menjelaskan urutan perhitungan matematik pembangkit 6 pulsa penyalan gerbang saklar inverter yang dibangun pada disain system gambar 1. Beberapa persamaan

yang diterapkan digunakan untuk memperoleh parameter tegangan referensi (V_{ref}), sudut (α) pemilihan sector, pola waktu penyalan saklar gerbang, sinyal modulator, indeks modulasi dan pembangkit 6 pulsa penyalan. Pada rangkaian inverter memiliki 3 buah pasang saklar Mosfet (S1 berpasangan dengan S4, S3 berpasangan dengan S6, dan S5 berpasangan dengan S2) yang bekerja secara komplementer sehingga dibutuhkan untai pembalik (gerbang NOT) yang bertujuan agar pola penyalan saling bertolak belakang logika. Disain sistem pada gambar 1 kemudian dimodelkan ke dalam Matlab Simulink. Hasil pemodelan seperti tampak pada gambar 7 dan 8. Gambar 7 merupakan pemodelan alur pembangkit pulsa penyalan saklar inverter menggunakan SVPWM. Gambar 8 merupakan inverter Mosfet 3 fasa dua level dengan beban motor induksi 3 fasa.



Gbr. 7 Pemodelan pembangkit pulsa penyalan menggunakan metode SVPWM



Gbr. 8 Pemodelan MOSFET inverter dua level sebagai penggerak motor induksi 3 fasa

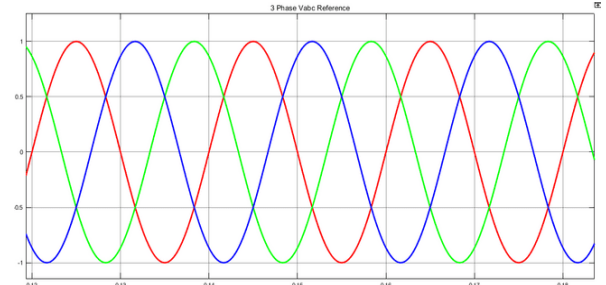
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan dilakukan dengan menjalankan pemodelan kemudian dilakukan analisis gelombang gelombang hasil simulasi pada titik titik gambar pemodelan yang diamati.

A. Analisa Tegangan Referensi

Gambar 9 merupakan gelombang tegangan referensi tiga fasa dimana tegangan sumber tiga fasa diturunkan dari 220 V menjadi 1 V

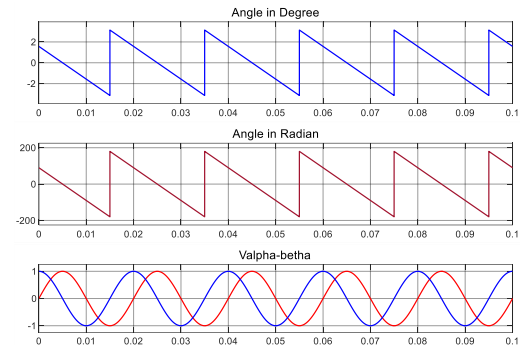
dengan frekuensi 50 Hz dan berbeda fasa 120° tiap saluran. Melalui transformasi park tegangan referensi 3 fasa ini digunakan untuk menentukan nilai V_d dan V_q dimana $V_d = V_{\alpha}$ dan $V_q = V_{\beta}$. Nilai V_d dan V_q dapat di tentukan dengan persamaan 1.



Gbr. 9 Gelombang Tegangan Referensi 3 Fasa

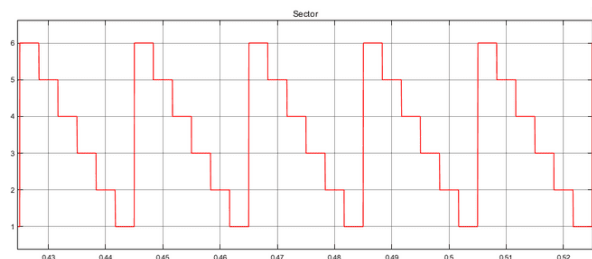
B. Analisa Sudut Sektor , Tegangan Referensi dan Level Sektor

Tiap tiap sektor memiliki perbedaan sudut sebesar 60° . Besar sudut sector ditentukan dengan persamaan 9, sehingga sector 1 berada pada $0 < \alpha < 60^\circ$, sector 2 $60^\circ < \alpha < 120^\circ$, sector 3 $120^\circ < \alpha < 180^\circ$, sector 4 $-180^\circ < \alpha < -120^\circ$, sector 5 $-120^\circ < \alpha < -60^\circ$ dan sector 6 berada pada $-60^\circ < \alpha < 0^\circ$ sedangkan tegangan referensi di tentukan dengan persamaan 5.



Gbr. 10 Kalkulasi Sudut alpa (degree), Radian dan Tegangan alpha –beta

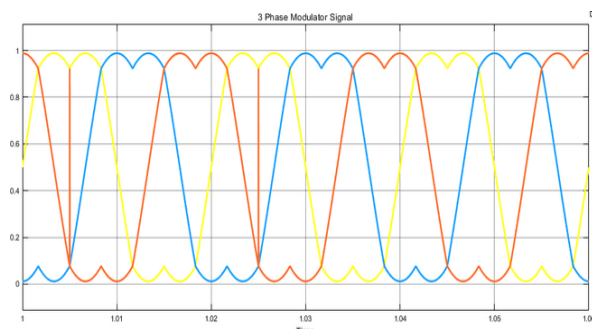
Gambar 10 Menggunakan persamaan 2 dan 9 Sudut α ($Angle$) dapat diperoleh pada gambar paling atas dalam besaran Derajat berbentuk gelombang gigi gergaji dengan aplitudo 3 V_{p-p} . Gambar 10 tengah adalah sudut (α) dalam radian dengan amplitudo 180 V_{p-p} . Sedangkan gambar yang paling bawah adalah nilai V_{β}/V_{α} berbentuk gelombang sinusoida amplitudo 1 V_{p-p} dengan beda fasa 90° .



Gbr. 11 Level Tiap sektor

Gambar 11 adalah perhitungan dan penentuan level sector, nampak berbentuk gelombang step tangga. Urutan level sector 1,2,3,4,5,6 dimulai dari step tangga paling bawah keatas dari aras 1 V naik menuju 6 V. Pola gelombang ini diperoleh menggunakan persamaan 9.

C. Analisa Sinyal Modulator



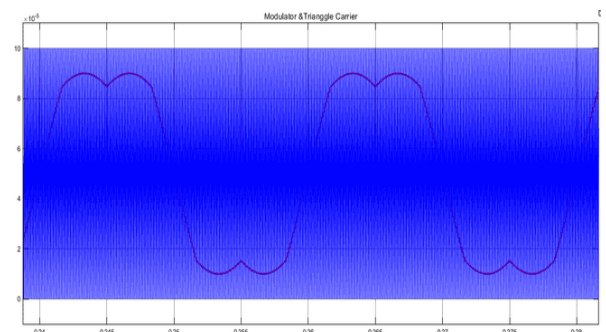
Gbr. 12 Tiga Buah Sinyal Modulator Fasa a, b, c

Gambar 12 merupakan gelombang modulator hasil kalkulasi persamaan 13 yang diimplementasikan pada kinerja saklar inverter a,b,c dan saklar komplementernya a', b', c' dengan durasi waktu tiap tiap sector. Pada siklus positif dan siklus negative tampak dua buah puncak gelombang menyerupai gelombang penyearah diode gelombang penuh tiap tiap siklusnya. Hal ini dikarenakan terdapat dua buah pasangan saklar di tiap fasa inverter yang harus dinyalakan dalam waktu yang berbeda fasa 180° . Sehingga besarnya frekuensi modulator yang dibutuhkan adalah 2 kali frekuensi masukannya.

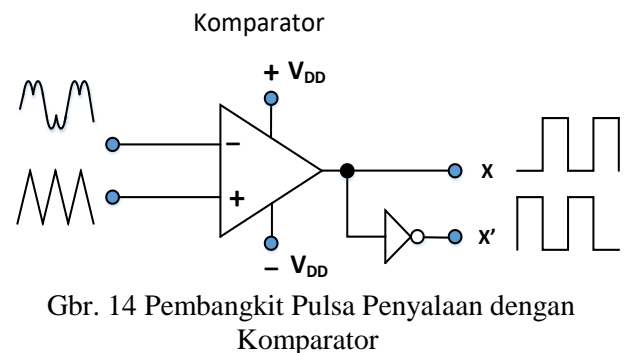
D. Analisa Pembanding (Komparator) Pembangkit Pulsa

Gambar 13 menjelaskan gelombang segitiga pembawa (V_{tri}) (carrier) 4 kHz yang dibandingkan dengan sinyal modulator (V_m) menyerupai gelombang sinusoida terdistorsi

(terdapat dua puncak gelombang) pada puncak siklus positif dan puncak siklus negative berfrekuensi 50 Hz menggunakan rangkaian komparator.



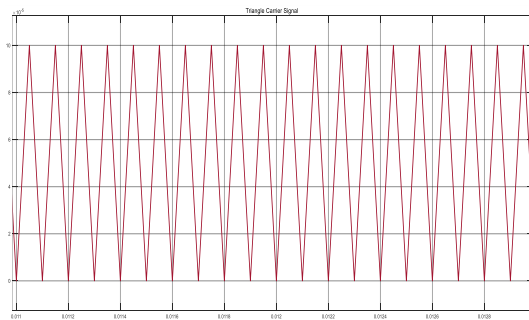
Gbr.13 Gelombang Modulator dan Sinyal Pembawa Segitiga



Gbr. 14 Pembangkit Pulsa Penyalan dengan Komparator

Gambar 14 sebuah pembangkit pulsa penyalan menggunakan komparator yang membandingkan gelombang modulator (V_m) dengan sinyal segitiga (V_{tri}) menghasilkan deretan pulsa dengan lebar pulsa terkendali. Prinsip dasar komparator diatas adalah sebagai berikut : Apabila $V_{tri} > V_m$ maka output sama dengan X atau $-V_{DD}$. Pulsa ini digunakan untuk penyalan saklar inverter bagian atas. Demikian sebaliknya jika $V_{tri} < V_m$ maka output akan sama dengan $+V_{DD}$. Rangkaian pembalik (Gerbang NOT) digunakan untuk penyalan pasangan saklar komplementernya atau saklar inverter bagian bawah. Untuk melayani 6 buah saklar inverter maka dibutuhkan 3 buah komparator dan 3 buah untai pembalik.

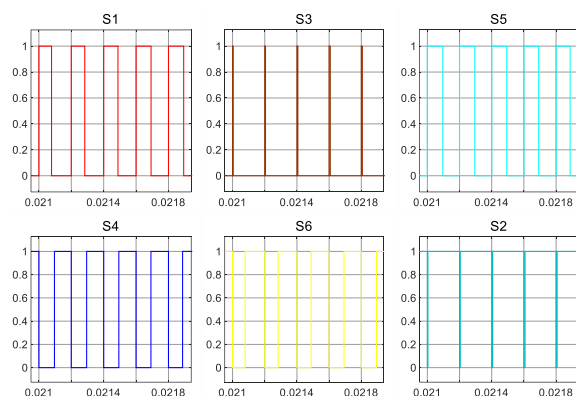
Gambar 15 adalah sebuah gelombang pembawa segitiga dengan frekuensi 4 kHz amplitude 10×10^{-5} Volt. Gelombang ini di gunakan sebagai pembanding dengan sinyal modulator V_m frekuensi 50 Hz untuk menghasilkan 6 buah pulsa penyalan yang digunakan menyalakan saklar inverter bagian atas dan bagian bawah.



Gbr. 15 Gelombang pembawa segitiga

E. Analisa Pulsa Penyalan Gerbang Saklar

Gambar 16 adalah 6 buah deretan pulsa yang dihasilkan oleh 3 buah rangkaian komparator dan 3 buah rangkaian pembalik. Pulsa tersebut memiliki amplitude 1 volt, frekuensi 4 kHz dengan lebar pulsa terkendali oleh frekuensi sinyal pembawa (carrier), sinyal modulator dan indeks modulasi. Saklar inverter bagian atas (S1,S3,S5) dan pasangannya yaitu saklar bagian bawah (S4,S6 ,S2) dikendalikan oleh pulsa pada gambar 16. Pulsa S1 adalah komplementer pulsa S4, pulsa S3 adalah negasi dari S6 dan pulsa S5 berkebalikan logika dengan pulsa S2. Watak kinerja dari inverter tiga fasa sangat dipengaruhi oleh keenam pulsa tersebut.



Gbr. 16 Enam Deret Pulsa Penyalan Yang Dihasilkan

IV. PENUTUP

Pulsa penyalan untuk saklar inverter tiga fasa telah selesai dibangun dengan metode Space Vektor Pulse Width Modulation (SVPWM) melalui simulasi pemodelan menggunakan Tools Matlab Simulink. Alur pembangkit pulsa penyalan melalui beberapa perhitungan matematik yakni proses

pembangkit sinyal referensi, transformasi besaran abc to alpha betha, kalkulasi tegangan referensi, kalkulasi sudut sektor, kalkulasi waktu penyalan saklar tiap tiap sektor. Enam pulsa yang dihasilkan digunakan untuk mengatur kinerja pasangan saklar Mosfet inverter tiga fasa. Lebar pulsa penyalan ditentukan oleh frekuensi gelombang segitiga pembawa (carrier) 4 kHz, gelombang modulator (sinusoida dengan dua puncak gelombang pada puncak siklus positif dan siklus negatif) 50 Hz dan nilai indeks modulasi.

Kinerja saklar inverter menghasilkan 8 buah vektor tegangan (enam buah *non zero vektor* dan 2 buah *zero vector*) dan dibagi dalam 6 buah sektor membentuk bangunan hexagonal dimana tiap tap sektor terpaut 60° . Pemilihan sektor yang aktif dapat ditentukan oleh besar sudut sektor dan pola kerja saklar inverter bagian atas dan saklar bagian bawah. Tegangan keluaran dari inverter dua level ini dikendalikan oleh pulsa SVPWM namun masih mengandung nilai harmonik yang cukup besar, sehingga ke depan dapat dikembangkan jenis inverter dengan level yang lebih tinggi untuk mereduksi indeks harmonisa tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terimakasih sebear besarnya kepada Universitas Gunadarma dan teman temana di jurusan teknik elektro yang telah mendukung penelitian hingga tersusunnya artikel ini.

REFERENSI

- [1] A. J. Ali, L. A. Khalaf, and A. H. Ahmed, "Modeling and simulation of a 3- ϕ induction motor based on two types of WFA," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 1105–1113, 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i2.pp1105-1113.
- [2] A. Sharma, N. Anandh, and S. Gao, "Modulation index effect on inverter based induction motor drive," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 11, no. 4, pp. 1785–1798, 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11i4.pp1785-1798.
- [3] K. T. Wróbel, K. Szabat, and P. Serkies, "Long-horizon model predictive control of induction motor drive," *Arch. Electr. Eng.*,

- vol. 68, no. 3, pp. 579–593, 2019, doi: 10.24425/ae.2019.129343.
- [4] Y. Zahraoui, M. Akherraz, C. Fahassa, and S. Elbadaoui, “Induction motor harmonic reduction using space vector modulation algorithm,” *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 452–465, 2020, doi: 10.11591/eei.v9i2.1682.
- [5] H. Benbouhenni, “A comparison study between fuzzy PWM and SVM inverter in NSMC control of stator active and reactive power control of a DFIG based wind turbine systems,” *Int. J. Appl. Power Eng.*, vol. 8, no. 1, p. 78, 2019, doi: 10.11591/ijape.v8.i1.pp78-92.
- [6] Ratmiaji, I. N. S. Wahyu, and Supriono, “Perbandingan Teknik Modulasi Inverter 3-Phasa 2-Tingkat Untuk Menghasilkan Tegangan Keluaran Variabel,” vol. 6, no. 1, pp. 67–74, 2019.
- [7] S. Shashibhushan and S. Sonoli, “Starting torque and torque ripple reduction using SVPWM based vector control of induction motor with nine-level cascaded multilevel inverter fed with solar PV power,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 10, no. 2, p. 1123, 2019, doi: 10.11591/ijpeds.v10.i2.pp1123-1132.
- [8] M. Hasoun, A. El Afia, M. Khafallah, and K. Benkirane, “A pwm strategy for dual three-phase pmsm using 12-sector vector space decomposition applied on electric ship propulsion,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 11, no. 4, pp. 1701–1710, 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i4.pp1701-1710.
- [9] S. Vashishtha and K. R. Rekha, “A survey: Space vector PWM (SVPWM) in 3 ϕ voltage source inverter (VSI),” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 11–18, 2018, doi: 10.11591/ijece.v8i1.pp11-18.
- [10] M. Youcef, T. Djilali, S. Moreau, H. Said, and D. Bachir, “Dsp improvement of a vector speed induction motor control with a rst and adaptive fuzzy controller,” *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 10, no. 3, pp. 1232–1244, 2021, doi: 10.11591/eei.v10i3.1798.
- [11] A. A. Kadum, “PWM control techniques for three phase three level inverter drives,” *Telkomnika (Telecommunication Comput. Electron. Control.)*, vol. 18, no. 1, pp. 519–529, 2020, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.V18I1.12440.
- [12] J. Fang, G. Wang, R. Li, S. Liu, and S. Wang, “Improved virtual space vector modulation for neutral point voltage oscillation and common-mode voltage reduction in neutral point clamped three-level inverter,” *Arch. Electr. Eng.*, vol. 70, no. 1, pp. 203–218, 2021, doi: 10.24425/ae.2021.136062.
- [13] O. A. Elkholi, M. A. Enany, A. F. Abdo, and M. Eid, “Novel approach for svpwm of two-level inverter fed induction motor drive,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 11, no. 4, pp. 1750–1758, 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i4.pp1750-1758.
- [14] A. A. Kadum, “New adaptive hysteresis band width control for direct torque control of induction machine drives,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 11, no. 4, pp. 1908–1917, 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i4.pp1908-1917.
- [15] A. Porwal, K. Baria, and A. Deshpande, “Modeling and Simulation of SVPWM Based Application,” vol. 3, no. 2, pp. 140–148, 2014.