

DESAIN PEMBANGKIT PULSA PENYALAAAN INVERTER 3 FASA MENGGUNAKAN SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION (SVPWM)

Setiyono

Fakultas Teknologi Industri Universitas Gunadarma
Jl. Margonda Raya No. 100, Depok 16424, Jawa Barat
setiyono@staff.gunadarma.ac.id

Abstrak

Pada paper ini disajikan 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. Metode SVPWM memiliki bentuk tegangan keluaran dengan indeks Total Harmonic Distortion (THD) lebih rendah dibandingkan dengan metode Sinusoida Pulse Width Modulation (SPWM). Deretan pulsa penyalaan dihasilkan melalui kalkulasi beberapa persamaan matematik yaitu perhitungan sinyal referensi, transformasi tegangan 3 fasa abc ke system dua dimensi dq, sektor, pola waktu penyalaan saklar inverter, dan pembanding sinyal pembawa segitiga dengan sinyal modulator. Kinerja saklar inverter membentuk 8 kombinasi keadaan dan diilustrasikan memiliki 6 buah sektor yang terpisah 60⁰ antar sektor. Inverter dua level yang dibangun menggunakan 3 buah pasang saklar semikonduktor MOSFET. Desain simulasi diharapkan dapat dijadikan bahan acuan para peneliti untuk di implementasikan menjadi peralatan pengendalian mesin. Pemodelan ini juga digunakan untuk mengetahui dan menganalisis kendali penyalaan saklar inverter, pengaruh indeks modulasi terhadap kinerja saklar, dan pola waktu penyalaan pulsa tiap pasang saklar inverter. Hasil simulasi menjelaskan bentuk gelombang pulsa penyalaan 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. The SVPWM method has an output voltage form with a lower Total Harmonic Distortion (THD) index compared to the Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) method. 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 sektor, 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 60⁰ 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*

PENDAHULUAN

Motor induksi 3 fasa adalah jenis motor listrik yang telah banyak digunakan pada sektor 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. 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)*. Peralatan elektronik yang biasa digunakan sebagai VSD adalah Inverter. Dewasa ini teknik modulasi masih digunakan dalam perancangan VSD untuk saklar inverter, antara lain *Sinusoida Pulse Width Modulation (SPWM)* dan *Space Vektor Pulse Width Modulation (SVPWM)*. Metoda *SPWM* merupakan teknik yang digunakan untuk menentukan penyalan dengan cara membandingkan gelombang pembawa segitiga dengan 3 gelombang sinus (fasa R, fasa S, dan fasa T) yang masing-masing berbeda fasa 120° [1]. Metode

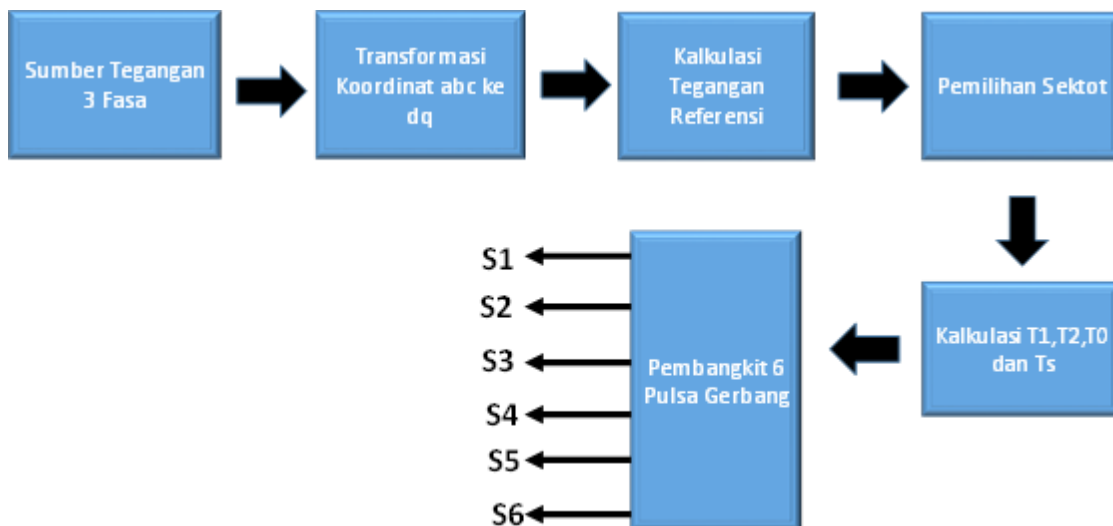
SPWM dapat meningkatkan kualitas keluaran inverter dengan nilai indek THD rendah. [2], [3]. Disisi lain metode ini masih memiliki kelemahan dimana magnitude tegangan keluaran masih rendah sehingga diperlukan cara lain agar tegangan keluaran yang dihasilkan meningkat. Solusi yang dipilih adalah dengan menggunakan metode *SVPWM*. Metode *SVPWM* adalah teknik pembangkit pulsa menggunakan prinsip keseimbangan tegangan-waktu (*volt-second balance*) dimana analisisnya menggunakan pendekatan vector. Penyalan gerbang saklar inverter menggunakan metode *SVPWM* diperlukan untuk mengurangi distorsi harmonik dan meningkatkan tegangan keluaran pada rangkain inverter sehingga diperoleh bentuk aliran tegangan yang mendekati sinusoida[4]. 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[5]. Mihoub Youcef, mengimplementasikan RST dan kontroler fuzzy adaptif (AFC) untuk meningkatkan kecepatan variable Sistem kontrol penggerak motor induksi [6]. 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 desain yang diusulkan[7]. Beberapa peneliti lain mengembangkan penggerak motor induksi dengan kendali vector ruang untuk memperoleh riak torsi yang lebih rendah dan pengaturan kecepatan yang lebih lebar [8-11]. Pengendalian dengan VSD umumnya dilakukan dengan pengaturan pola penyalan saklar inverter menggunakan kendali saklar ataupun kendali vector. Pengaturan penyalan saklar dengan kendali *space vector* memiliki keunggulan antara lain energy yang digunakan lebih efisien [12], dan menghasilkan rugi rugi pensaklaran (*lose switching*) [13]. Cara ini juga memiliki riak torsi dan *error steady* pada sisi keluaran yang kecil dibandingkan dengan metode lainnya [14,15]. Pada penelitian ini dipaparkan teknik

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

METODE PENELITIAN

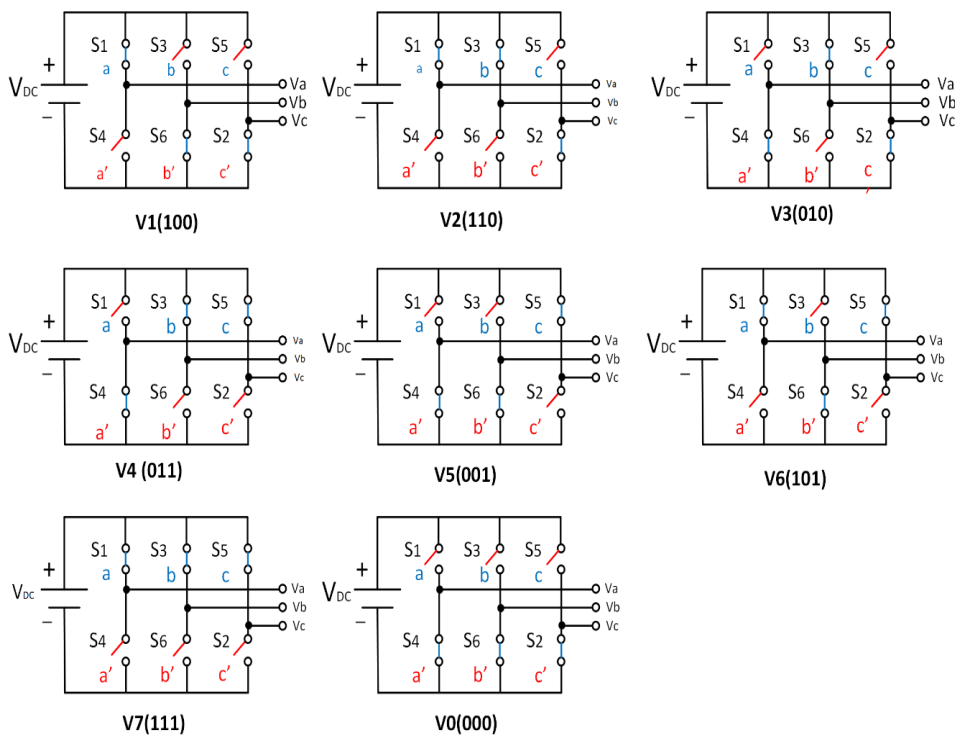
Penelitian ini dilakukan dengan mendesain system melalui dua tahap yakni mendesain system secara elektronik dan merancang pemodelan system menggunakan Matlab Simulink. Desain system secara elektronik tampak pada gambar 1 sedangkan desain pemodelan tampak pada gambar 7 dan dambar 8. Beberapa parameter yang dianalisis dalam artikel ini antara lain pembangkit tegangan referensi, pola waktu penyalan saklar inverter tiap tiap sektor, dan format pulsa penggerbangan enam buah saklar gerbang.



Gambar 1. Alur Penelitian Pembangkit Pulsa Penyalan Menggunakan SVPWM Inverter

Pada Gambar 1 dijelaskan langkah langkah pembangkit pulsa penyalan gerbang inverter keseluruhan. Bagian awal merupakan sumber listrik tiga fasa merupakan generator tiga gelombang sinus pada frekuensi 50 Hz, amplitudo variabel dengan beda fasa tiap tiap kawat sebesar 120° . Tahap kedua menentukan transformasi koordinat abc ke koordinat dq untuk mentukan tegangan referensi. Langkah berikutnya adalah menentukan sektor mana yang akan dilakukan penyalan dengan lebar pusa terkendali. Tahap berikutnya adalah menghitung waktu penyalan referensi T1, T2, T0 dan Ts yang telah ditentukan pada persamaan 10, 11 dan 12. Sebagaimana diketahui bahwa pembangkit pulsa ini dibangun untuk menggerakan enam buah saklar MOSFET inverter. Inverter Mosfet ini memiliki 8 kondisi *switching* yang dapat

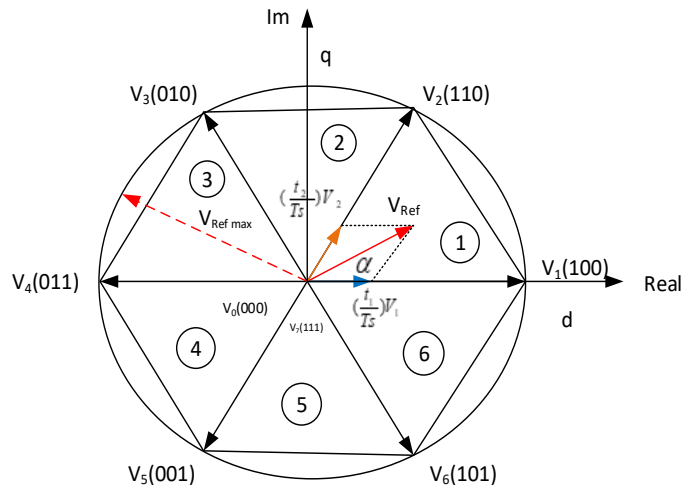
dibentuk dalam delapan komposisi biner dari 000 sampai dengan 111. Pada tiap komposisi dinotasikan dengan $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ dan V_7 selanjutnya disebut *vector switching*. V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 dan V_6 disebut *non zero vector* karena menghasilkan tegangan *output* tidak sama dengan 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. Delapan Kombinasi Kondisi Saklar Inverter

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.

Gambar 3 terlihat 6 vektor dipetakan pada enam bagian sektor (sektor 1 sampai 6) pada posisi mengelilingi titik pusat membentuk sebuah bangun hexagonal sedangkan dua vector terpetakan pada titik pusat (origin). Tiap tiap sektor mempunyai jarak sudut vector sebesar 60° . Dalam satu kali putaran pada bidang koordinat kompleks dq V_{ref} 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 sektor.



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

Tabel 1. Tegangan Keluaran Inverter pada Tiap Saklar Bekerja

Tegangan Vektor	Sektor	Sambungan Saklar			Tegangan Saluran ke Netral			Tegangan Saluran ke saluran		
		a	b	c	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ac}
V_0	0 (titik pusat)	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 (titik pusat)	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Keterangan 0 = Saklar Terbuka , 1 = Saklar Tertutup/Tersambung

Enam sektor tersebut dipetakan dalam sumbu koordinat dq masing masing sektor berjarak 60° . Langkah selanjutnya adalah menentukan nilai T_z , T_1 , T_2 dan T_0 untuk mendapatkan pola pola waktu pulsa penyalaan 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 penyalaan. 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 Inverter = 0 A. Semua tegangan pada setiap sektor 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 susd fasa 0° , 120° , dan 120° .

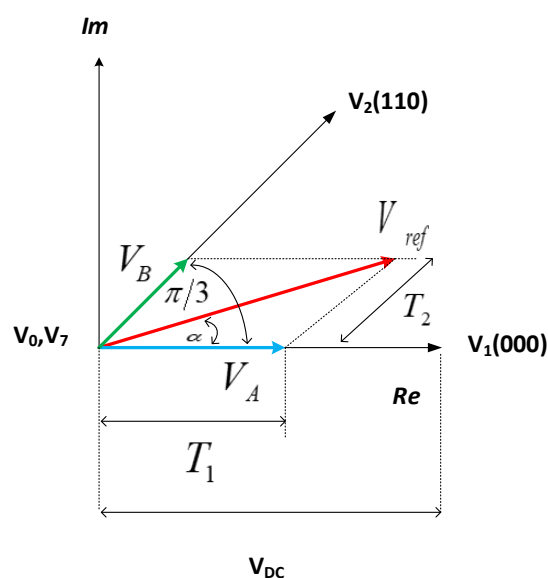
$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

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 sektor 1. V_{ref} merupakan resultan dari panjang vector V_A dan vector V_B , dapat direpresentasikan dengan persamaan

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



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

Pada tiap sektor nilai α selalu berada pada interval $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$. Tegangan V_{ref} di sektor 1 sudut 60° , nilai $V_A = V_1$, $V_B = V_2$, kemudian tegangan V_{ref} pada sektor 2 $V_A = V_2$ dan $V_B = V_3$. Dengan cara yang sama untuk tiap tiap sektor yang lain, V_{ref} bergeser atau

bergerak kekiri 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 sektor 1 analisis matematik durasi tiap tiap T waktu ditentukan persamaan [16]:

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

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

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

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

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

$$T_z = T_1 + T_2 + T_0, \text{ sehingga}$$

$$T_0 = T_z - (T_1 + T_2) \quad (8)$$

$$\text{Dimana, } 0 \leq \alpha \leq 60^\circ, T_z = \frac{1}{f_z} \text{ dan } a = \frac{|\bar{V}_{ref}|}{\frac{2}{3}V_{dc}} \quad (9)$$

Pada tiap sektor nilai α selalu berada pada interval $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$, Pada sektor 1 V_{ref} sudut $\alpha = 0^\circ$ arahnya sama dengan V_1 , untuk sudut $\alpha = \frac{\pi}{3}$ sejajar dengan V_2 . Pada sektor 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 sektor yang lain. Durasi waktu pada sektor ke n

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_z|\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3}\pi \right) \right) \quad (10)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_z|\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\alpha - \frac{n-1}{3}\pi \right) \right) \quad (11)$$

$$T_0 = T_z - T_1 - T_2 \quad (12)$$

Dimana, $n = 1, 1 \text{ through } 6$ (that is , sector 1 to 6, $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$)

Tabel 2. Durasi Pensaklaran Untuk Tiap Sektor

Sektor	Saklar Atas (S1, S2, S3)	Saklar Bawah (S4,S6,S2)
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

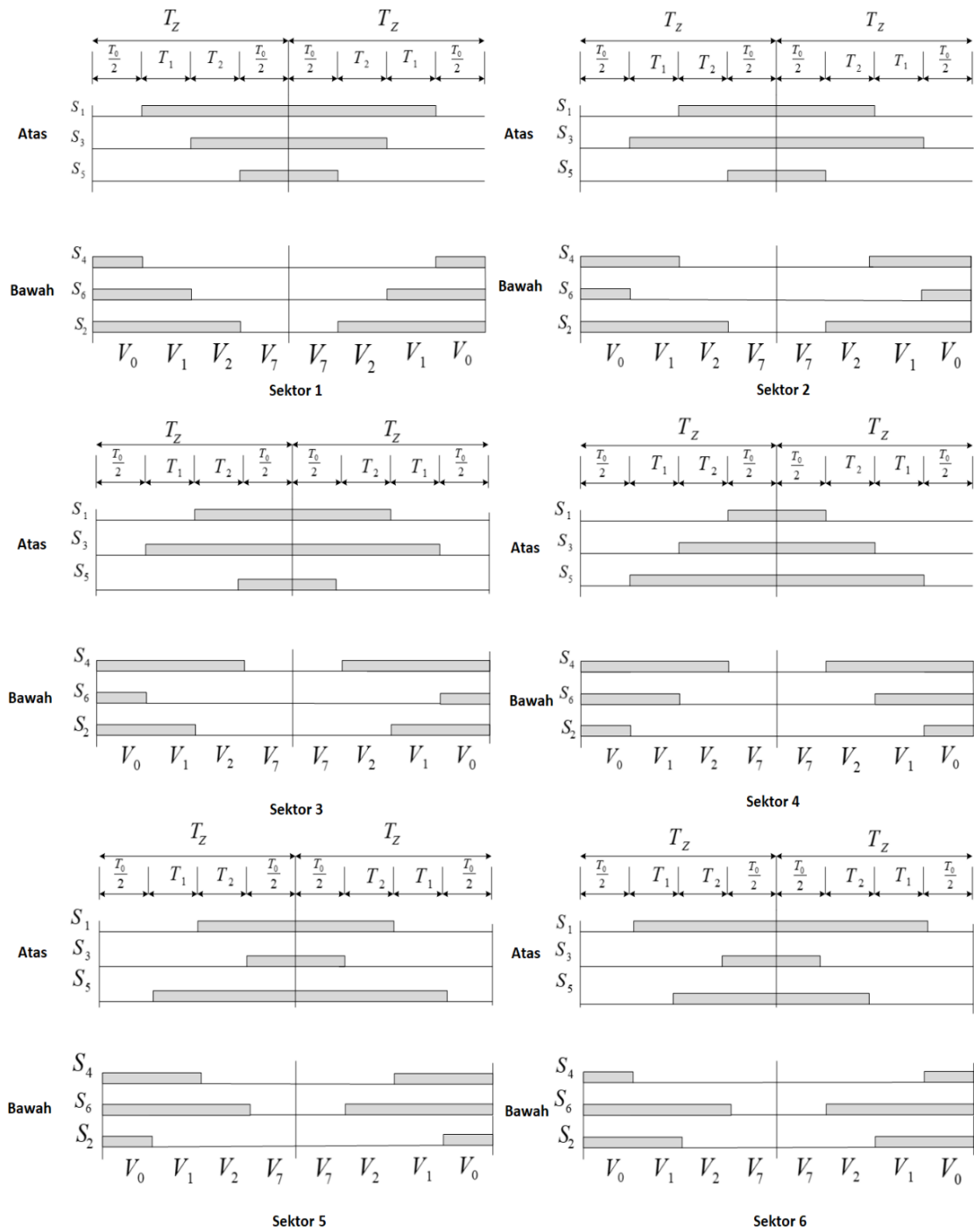
Tabel 2 menjelaskan durasi waktu kinerja saklar pasangan saklar (S1,S3, S5) dengan saklar komplementernya pada inverter 3 fasa di semua sektor.

Pada gambar 5 ditunjukkan Timing Diagram Pulsa Penyalan Saklar inverter Atas dan Bawah tiap Sektor. Semua Pola waktu ON dan OFF kinerja saklar tiap saklar atas dan bawah akan melalui laju L1,L2 dan L3 sejauh:

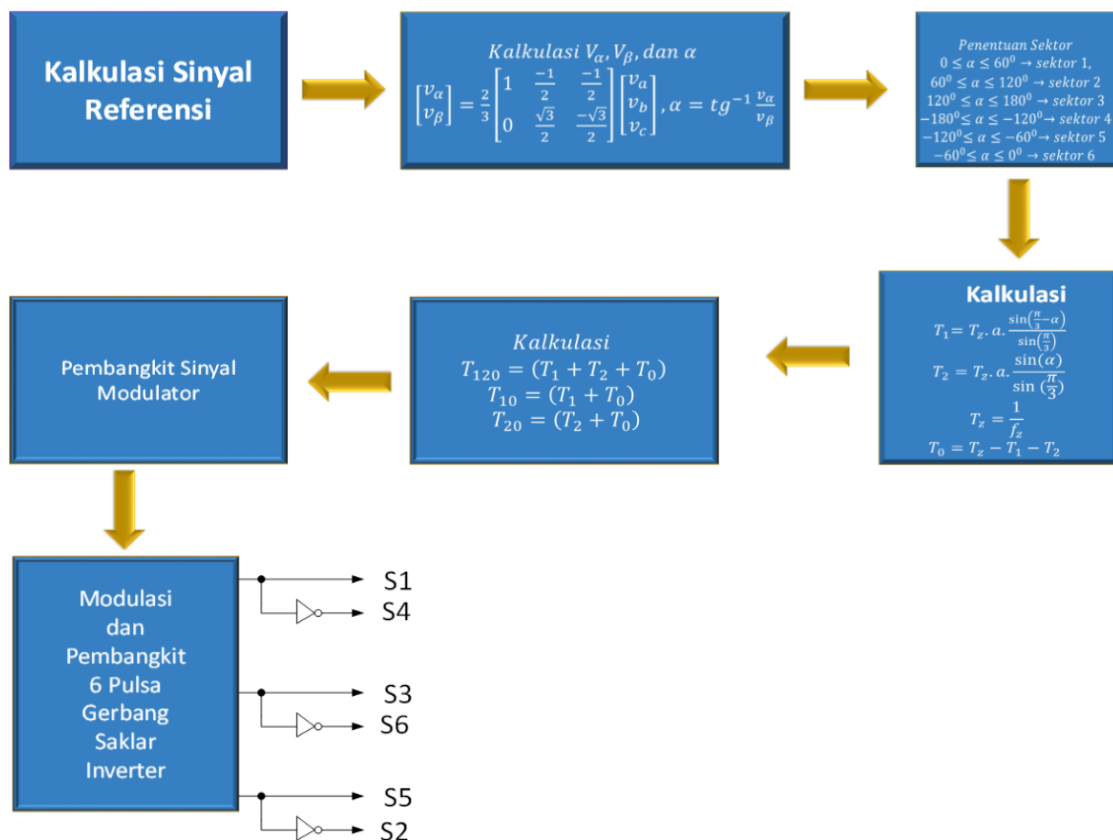
$$L1 = T1 + T2 + T0/2, L2 = T2 + T0/2, L3 = T0/2 \quad (13)$$

Pergerakan laju kinerja saklar ini menghasilkan gelombang non sinusoida yaitu sinusoida dengan dua punuk gelombang baik pada siklus positif maupun pada siklus negative. Enam sektor tersebut dipetakan dalam sumbu koordinat dq masing masing sektor 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 vektor posisi pada V_0 dan V_7 maka tidak ada arus yang mengalir pada beban atau $I_{inverter} = 0$ A. Semua tegangan pada setiap sektor 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 susd fasa 0° , 120° , dan 120° .



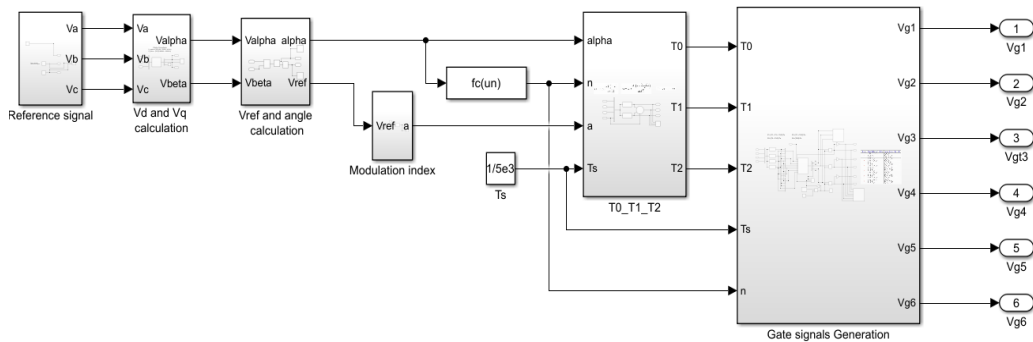
Gambar 5. Diagram Waktu Switching Saklar Bagian Atas dan Bagian Bawah Inverter .



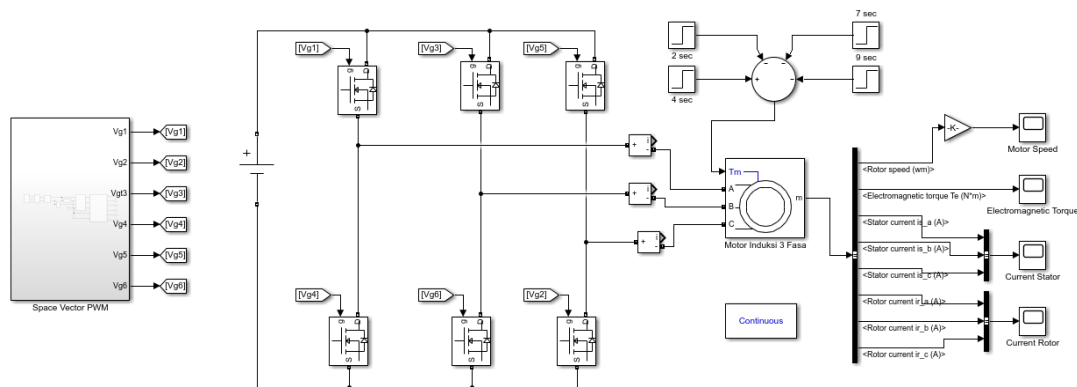
Gambar 6. Alur Perhitungan Matematik Pembangkit 6 Pulsa Penyalan Inverter SVPWM

Gambar 6 menjelaskan tahapan akhir urutan perhitungan matematik pembangkit 6 pulsa penyalan gerbang saklar inverter yang dibangun pada desain system gambar 1. Beberapa persamaan yang diterapkan digunakan untuk memperoleh parameter tegangan referensi (V_{reff}), sudut (angle) pemilihan sektor, 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. Desain 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.



Gambar 7. Pemodelan pembangkit pulsa penyalan menggunakan metode SVPWM



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

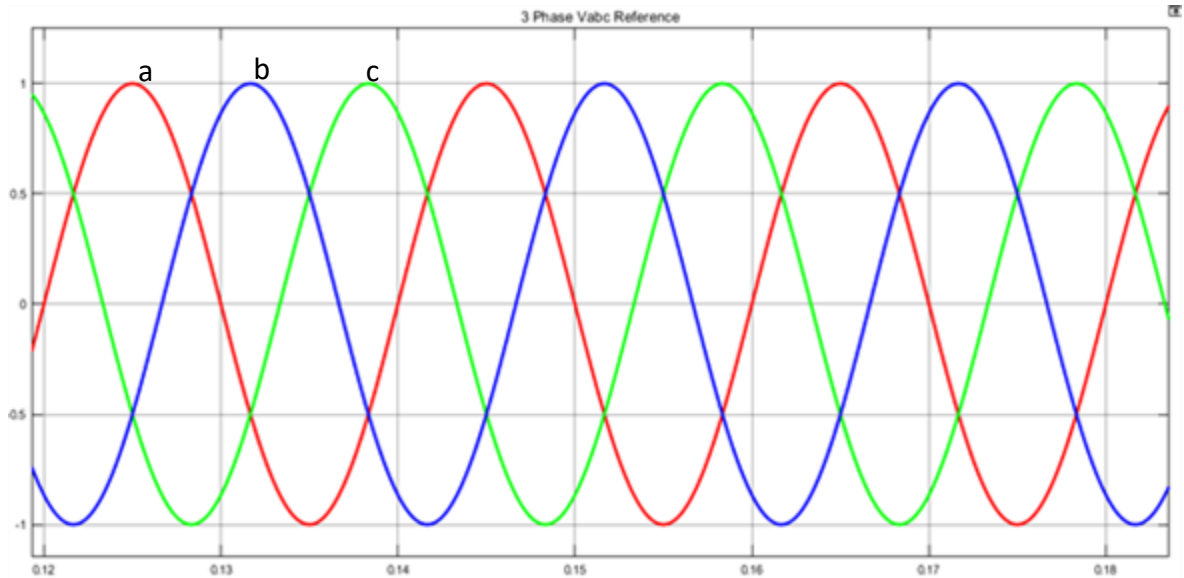
HASIL DAN PEMBAHASAN

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

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 120^0 tiap saluran. Gelombang tegangan dengan warna merah, biru dan hijau masing masing mewakili bentuk gelombang fasa a, fasa b dan fasa c . 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.

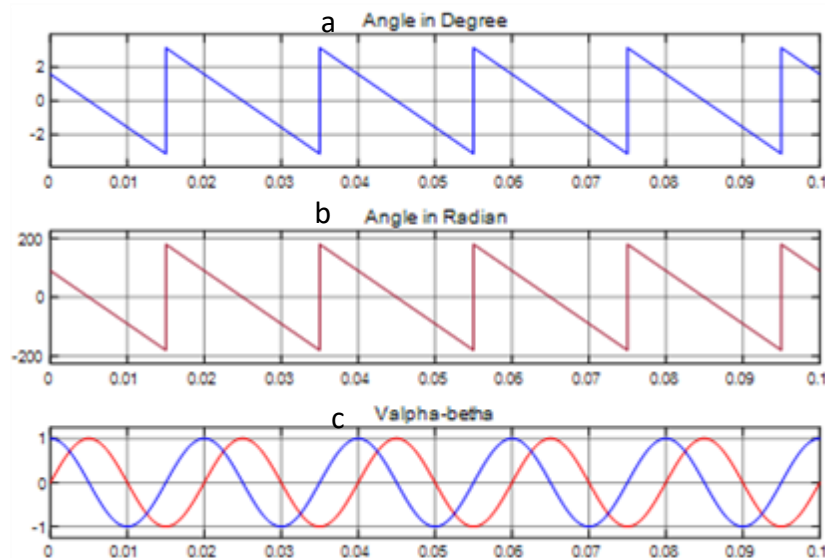


Gambar 9. Gelombang Tegangan Referensi 3 Fasa

Analisa Sudut Sektor , Tegangan Referensi dan Level Sektor

Tiap tiap sektor memiliki perbedaan sudut sebesar 60° . Besar sudut sektor ditentukan dengan persamaan 9, sehingga sektor 1 berada pada $0 < \alpha < 60^{\circ}$, sektor 2

$60^{\circ} < \alpha < 120^{\circ}$, sektor 3 $120^{\circ} < \alpha < 180^{\circ}$, sektor 4 $-180^{\circ} < \alpha < -120^{\circ}$, sektor 5 $-120^{\circ} < \alpha < -60^{\circ}$ dan sektor 6 berada pada $-60^{\circ} < \alpha < 0^{\circ}$ sedangkan tegangan referensi di tentukan dengan persamaan 5

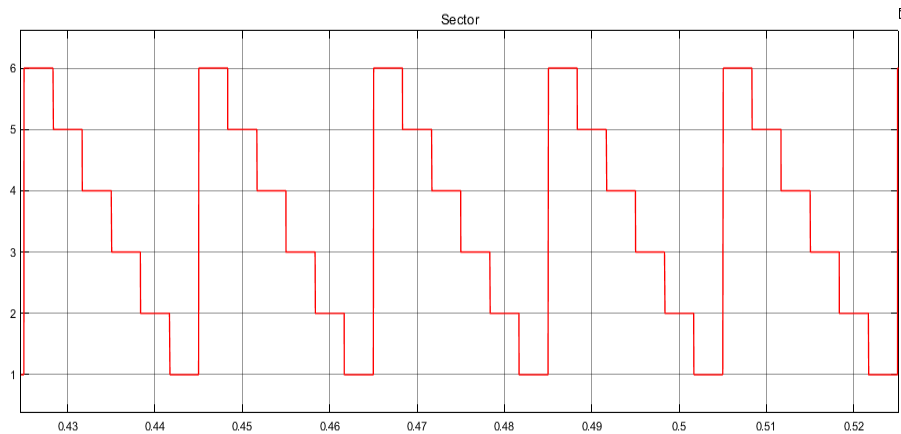


Gambar 10. a. Kalkulasi Sudut alpa (degree), b. Radian dan c. Tegangan alpa -beta

Gambar 10 menggunakan persamaan 2 dan 9 Sudut α (*Angle*) dapat diperoleh pada gambar 10.a dalam besaran Derajat berbentuk gelombang gigi gergaji dengan amplitudo $3 V_{p-p}$. Gambar 10 b adalah sudut (*angle*) dalam radian dengan amplitudo $180 V_{p-p}$. Sedangkan gambar 10 c adalah nilai V_{β}/V_{α} berbentuk gelombang sinusoida amplitude 1

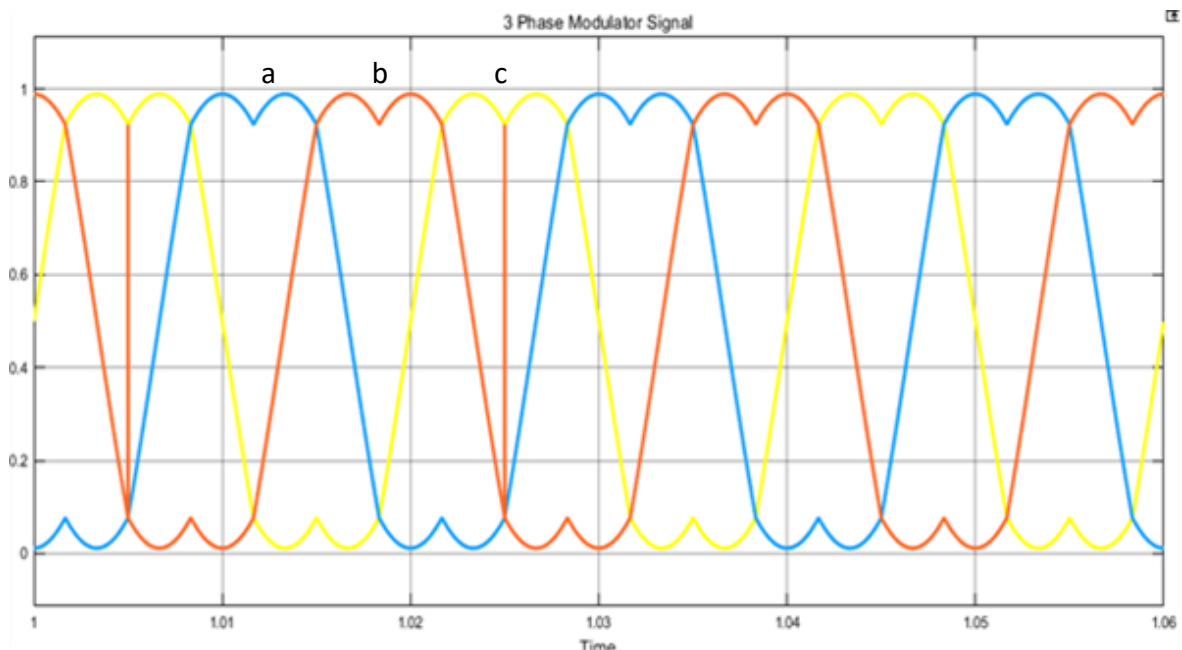
V_{p-p} dengan beda fasa 90° .

Gambar 11 adalah perhitungan dan penentuan level sektor, tampak berbentuk gelombang step tangga. Urutan level sektor 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.



Gambar 11. Level Tiap sektor

Analisa Sinyal Modulator



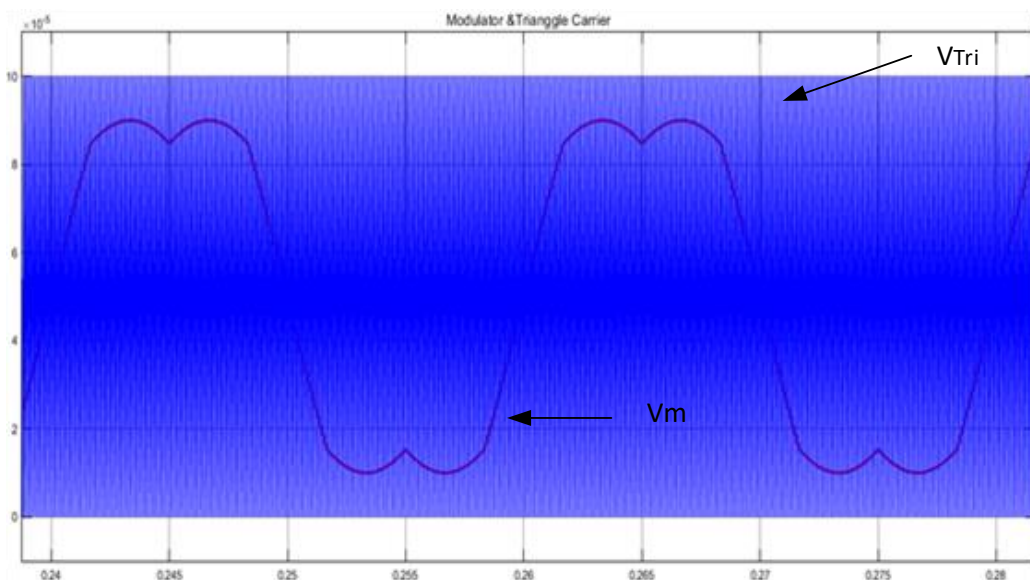
Gambar 12. Tiga Buah Sinyal Modulator Fasa a, b, c

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 sektor. 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

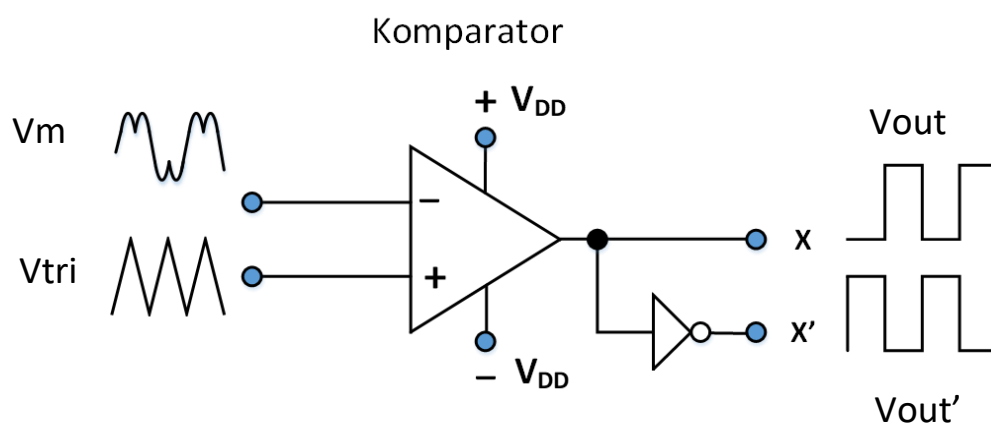
yang berbeda fasa 180^0 . Sehingga besarnya frekuensi modulator yang dibutuhkan adalah 2 kali frekuensi masukkannya.

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.

Analisa Pemanding (Komparator) Pembangkit Pulsa



Gambar 13. Gelombang Modulator (V_m) dan Sinyal Pembawa segitiga (V_{tri})



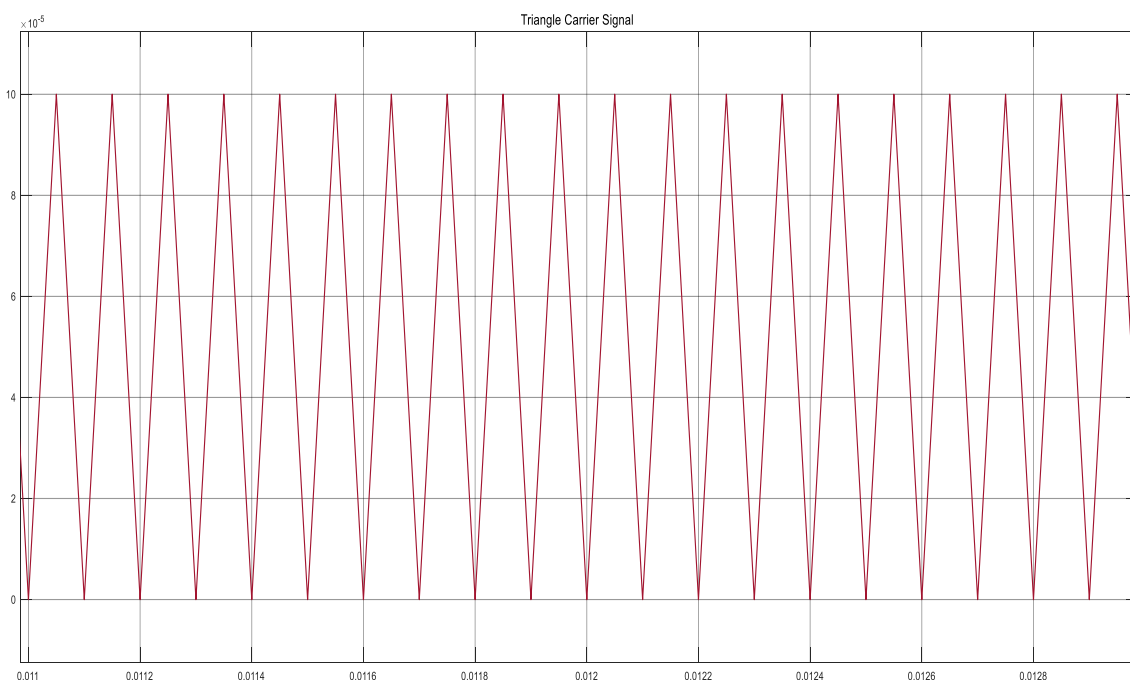
Gambar 14. Pembangkit Pulsa Penyalan dengan Komparator

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

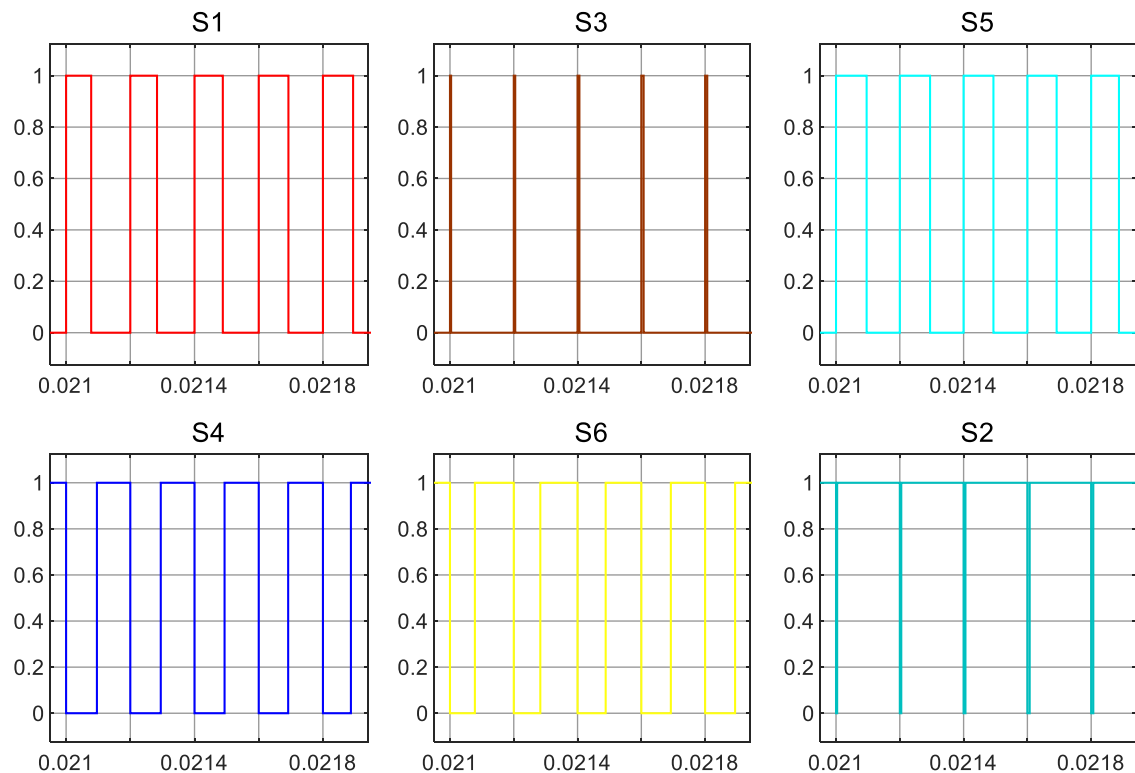
modulator V_m frekuensi 50 Hz untuk menghasilkan 6 buah pulsa penyalan yang digunakan menyalakan saklar inverter bagian atas dan bagian bawah.

Gambar 16 adalah 6 buah deretan pulsa yang dihasilkan oleh 3 buah rangkaian komparator dari gambar 14 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 (S_1, S_3, S_5) dan pasangannya yaitu saklar bagian bawah (S_4, S_6, S_2) dikendalikan oleh pulsa pada gambar 16 . Pulsa S_1 adalah komplementer pulsa S_4 , pulsa S_3 adalah negasi dari S_6 dan pulsa S_5 berkebalikan logika dengan pulsa S_2 . Watak kinerja dari inverter tiga fasa sangat dipengaruhi oleh keenam pulsa tersebut.



Gambar 15 Gelombang pembawa segitiga

Analisa Pulsa Penyalan Gerbang Saklar



Gambar 16. 6 (enam) Deret Pulsa Penyalan Yang Dihasilkan

KESIMPULAN DAN SARAN

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 punuk 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. Metode SVPWM ini dapat menekan nilai indeks THD yang lebih kecil dan mengurangi riak torsi pada penggunaan

beban motor serta efisiensi yang tinggi. 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.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ratmiaji, I. N. S. Wahyu, and Supriono, "Perbandingan Teknik Modulasi Inverter 3-Phasa 2-Tingkat Untuk Menghasilkan Tegangan Keluaran Variabel," vol. 6, no. 1, hal. 67–74, 2019.
- [2] A. I. T. Fasa, "Desain dan Analisis Inverter Tiga Fasa Menggunakan Metode SPWM," hal. 16–20.
- [3] I. D. Sara and S. Lubis, "Jurnal Rekayasa Elektrika," vol. 12, no. 2, 2016, doi: 10.17529/jre.v12i2.3966.
- [4] T. Elektro, F. Teknik, U. Mataram, and N. T. Barat, "UNTUK MENGHASILKAN TEGANGAN KELUARAN VARIABEL COMPARISON OF 2 LEVEL THREE PHASE INVERTER MODULATION TECHNIQUE," vol. 6, no. 1, hal. 67–74, 2019.
- [5] 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, hal. 452–465, 2020, doi: 10.11591/eei.v9i2.1682.
- [6] 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, hal. 1232–1244, 2021, doi: 10.11591/eei.v10i3.1798.
- [7] A. A. Kadum, "PWM control techniques for three phase three level inverter drives," *Telkomnika (Telecommunication Comput. Electron. Control.)*, vol. 18, no. 1, hal. 519–529, 2020, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.V18I1.12440.
- [8] 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, hal. 203–218, 2021, doi: 10.24425/aee.2021.136062.
- [9] 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, hal. 1750–1758, 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i4.pp1750-1758.
- [10] 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, hal. 1908–1917, 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i4.pp1908-1917.
- [11] 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, hal. 1701–1710, 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i4.pp1701-1710.
- [12] E. A. Nugroho, “IMPLEMENTASI INVERTER SEBAGAI PENGENDALI MOTOR INDUKSI TIGA FASA DENGAN METODE SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION (SVPWM),” vol. 7, no. 2, hal. 597–604, 2016.
- [13] N. A. W, Z. Efendi, and A. Ulinuha, “Implementasi Metode SPWM , THIPWM dan SVPWM Pada Rangkaian Inverter Tiga Fasa Menggunakan Mikrokontroler DSP.”
- [14] I. N. W. Satiawan, I. Bagus, and F. Citarsa, “Perbandingan Kinerja Teknik Modulasi Inverter Dua-Level untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga-Fase,” hal. 35–41.
- [15] J. Ecotipe, M. Yusuf, V. Prasetia, S. D. Riyanto, A. A. Rafiq, and I. Pendahuluan, “Desain Simulasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan Switching Space Vector Pulse Width Modulation II . LANDASAN TEORI matematis motor induksi dalam model d-q dan tipe squirrel cage yang mempunyai beberapa menggunakan rangkaian ekivalen seperti pada induksi dari koordinat tiga fasa (koordinat abc) koordinat d-q selain mempermudah analisis adalah,” vol. 6, no. 1, hal. 24–31, 2019.
- [16] A. Porwal, K. Baria, and A. Deshpande, “Modeling and Simulation of SVPWM Based Application,” vol. 3, no. 2, hal. 140–148, 2014.