

PERANCANGAN VEKTOR KENDALI SPWM INVERTER SEBAGAI KONTROL MOTOR TURBIN ANGIN PADA GENERATOR INDUKSI 3 FASA

Heru Danarbroto

Abstrak

Metode vektor kontrol SPWM inverter merupakan metode pengaturan vektor tegangan yang digabungkan dengan pengaturan amplitudo dan frekuensi untuk mengendalikan kecepatan motor induksi melalui teknik pengendalian inverter. Pengaturan vektor berfungsi untuk mentransformasikan sistem arus 3 fasa kerangka acuan tetap (a,b,c) menjadi elemen dua fasa kerangka acuan tetap (α,β) melalui transformasi clarke. Kemudian dari kerangka acuan tetap diubah menjadi elemen dua fasa kerangka acuan bergerak (d,q) melalui transformasi park. Didalam sistem 2 fasa inilah analisis vektor ruang dilakukan untuk menghasilkan konfigurasi penyaklaran IGBT pada rectifier atau inverter.

Spacevector PWM ditujukan untuk membentuk tegangan keluaran dari PWM converter mendekati tegangan referensi yang melalui proses switching dari 8 konfigurasi penyaklaran IGBT yang dihasilkan dari 6 buah vector yang membentuk 6 interval waktu yang masing-masing tergeser 60° dan dua buah vektor tegangan nol (zero voltage vectors) yang berada di pusat koordinat.

Dengan metode ini berhasil meningkatkan efisiensi kerja motor-generator induksi melalui peningkatan kerja inverter 3 fasa jika dibandingkan dengan teknik SPWM ataupun scalar kontrol yang hanya menitik beratkan pada pengendalian frekuensi dan tegangan tanpa mempertimbangkan acuan gerak stator motor.

Kata kunci : *Space vector control, Rectifier, Inverter, Transformasi Clarke, Transformasi Park.*

1 PENDAHULUAN

1.1 Motor Induksi

Pengendalian motor induksi secara konvensional menyebabkan konsumsi energi listrik tidak efisien, hasil produksi tidak fleksibel, dan sangat mungkin menyebabkan mudah rusaknya motor listrik karena selalu dipaksa bekerja pada kecepatan maksimal. Permasalahan lain adalah munculnya daya reaktif induktif yang menyebabkan menurunnya kualitas daya listrik dan faktor daya

dengan impedansi tinggi, serta meningkatnya jatuh tegangan.

Dengan berkembangnya elektronika daya, pengendalian motor arus bolak-balik induksi dilakukan dengan cara mengubah tegangan, frekuensi sumber dan keseimbangan kerapatan fluks secara proposional dapat diimplementasikan. Divalis seperti ini umumnya dinamakan *Variable Speed Drive* (VSD), dengan sistem kendali menggunakan *skalar control* ataupun *vector control*.

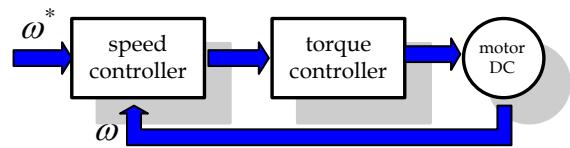
Pengendalian motor induksi dengan menggunakan *Vector Control* selain dapat mengendalikan torsi dan kecepatan secara baik, juga mempunyai keuntungan lain, antara lain :

1. Penggunaan energi menjadikannya efisien,
2. Peningkatan fleksibilitas produksi,
3. Peningkatan jumlah komponen mekanik
4. Memudahkan untuk pemeliharaan.

2. DASAR TEORI

Metode *vector control* bertujuan mengendalikan kinerja mesin induksi (motor dan generator AC) yang diemulasikan dari kinerja mesin DC. Pada mesin DC, fluksi stator ψ_s dihasilkan oleh arus yang dialirkan pada belitan medan stator (*field winding*) dan fluksi rotor ψ_r dihasilkan oleh arus yang dialirkan ke belitan jangkar (*armature winding*) melalui sikat dan komutator yang selalu menyebabkan posisi medan magnet stator dan medan magnet rotor saling tegak lurus sehingga torsi elektromagnet yang dihasilkan kedua medan magnet tersebut selalu maksimum. Kondisi demikian sering dinamakan berbasis orientasi medan (*field orientation*). Sekali kondisi *field orientation* tercapai, maka torsi pada motor DC dapat dikendalikan dengan mudah melalui pengaturan arus jangkar dengan tetap menjaga arus medan konstan (Riyadi Slamet, *Penggerak kecepatan variable*

pada motor induksi tiga fasa berbasis V/Hz dan Direct torque control, 2010). Pada Gambar 1 ditunjukkan pengendalian kecepatan motor DC yang membutuhkan *outer loop* untuk mengendalikan kecepatan dan *inner loop* untuk mengendalikan torsi.



Gambar 1. Pengendalian kecepatan pada motor DC

Dari uraian di atas, *Variable Speed Drive* yang menggunakan motor DC memiliki beberapa keunggulan, yaitu :

- Pengendalian torsi dapat dilakukan secara cepat dan akurat
- Respon kecepatan tinggi
- Rangkaian kendali sederhana

Tetapi beberapa kelemahan juga akan muncul, yaitu :

- Motor DC memerlukan perawatan secara berkala

- Harga motor DC relatif mahal
- Diperlukan encoder sebagai alat ukur posisi

Dengan kelebihan-kelembahan di atas, dewasa ini banyak dikembangkan *VSD* yang menggunakan motor AC jenis motor induksi (IM) yang menawarkan beberapa keunggulan, di antaranya kurangnya lemah, kokoh, konstruksi sederhana, bebas perawatan dan harga murah.

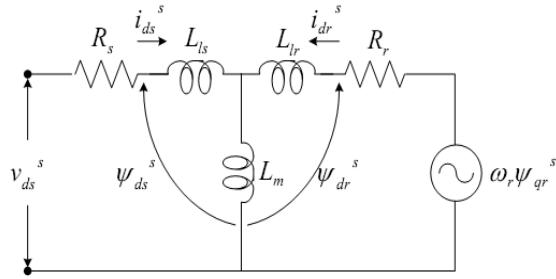
Sehingga banyak dikembangkan teknik-

teknik mengendalikan kecepatan motor AC yang bertujuan mengemulasi kinerja motor DC pada VSD berbasis motor AC (Ojo, O., Consoli, A., dan Lipo, T.A., 1990, *An Improved Model of Saturated Induction Machines*).

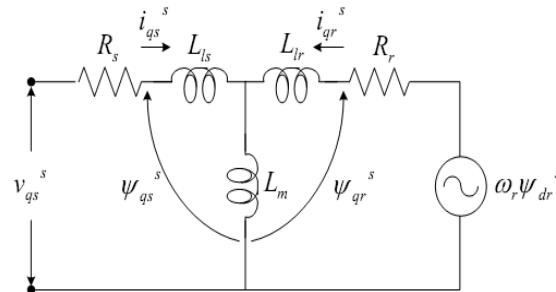
2.1 Rangkaian Ekuivalen

Motor/Generator Induksi

Model motor/generator diperoleh dari rangkaian ekivalen motor/generator induksi seperti terlihat pada gambar 2 (a) dan (b).



(a) Rangkaian sumbu- ds^s



(b). Rangkaian sumbu- qs^s

Gambar 2. Rangkaian ekivalen model dinamik motor induksi tiga fasakerangka acuan stator

Dari gambar rangkaian 2, dengan asumsi tegangan rotor motor induksi adalah nol ($v_{qr} = v_{dr} = 0$), maka persamaan tegangan stator dan rotor motor induksi adalah :

$$\bar{V}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d}{dt} \bar{\psi}_s^{[1]}$$

$$\bar{V}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d}{dt} \bar{\psi}_r + j\omega_r \bar{\psi}_r = 0^{[2]}$$

Sedangkan persamaan untuk fluks stator dan rotor adalah :

$$\bar{\psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r^{[3]}$$

$$\bar{\psi}_r = L_r \bar{i}_r + L_m \bar{i}_s^{[4]}$$

Jika persamaan ⁽⁴⁾ disubstitusikan ke persamaan ⁽²⁾, maka :

$$\bar{V}_r = \frac{R_r}{L_r} (\bar{\psi}_r - L_m \bar{i}_s) + \frac{d}{dt} \bar{\psi}_r - j\omega_r \bar{\psi}_r = 0^{[5]}$$

Sehingga dari persamaan ⁽⁵⁾ dapat diperoleh persamaan turunan fluks rotor :

$$\frac{d}{dt} \bar{\psi}_r = \left(\frac{R_r}{L_r} L_m \right) \bar{i}_s + \left(\frac{R_r}{L_r} + j\omega_r \right) \bar{\psi}_r^{[6]}$$

Jika persamaan ⁽³⁾, ⁽⁴⁾, dan ⁽⁶⁾ disubstitusikan ke persamaan (1), maka :

$$\bar{V}_s = \left(R_s + \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} \right) \bar{i}_s + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{d}{dt} \bar{i}_s + \left(\frac{L_m j\omega_r}{L_r} - \frac{L_m R_r}{L_r^2} \right) \bar{\psi}_r$$

Dari persamaan ⁽⁷⁾, persamaan turunan arus stator dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\frac{d}{dt} \bar{i}_s = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \left[\left(-R_s + \frac{L_m^2}{L_r} \right) \bar{i}_s + \left(\frac{L_m}{L_r} R_r - j \frac{L_m}{L_r} \omega_r \right) \bar{\psi}_r + \bar{\psi}_s \right]$$

Sehingga dari persamaan ⁽⁶⁾ dan ⁽⁸⁾, muncul model motor induksi dalam kerangka acuan stator (sumbu $\alpha\beta$) adalah :

$$\frac{d}{dt} i_{s\alpha} = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \left(-R_s - \frac{L_m R_r}{L_r} \right) i_{s\alpha} + \frac{L_m}{(\sigma L_s L_r T_r)} \psi_{r\alpha} + \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} \psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{s\alpha}$$

$$\frac{d}{dt} i_{s\beta} = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \left(-R_s - \frac{L_m R_r}{L_r} \right) i_{s\beta} - \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} \psi_{r\alpha} + \frac{L_m}{(\sigma L_s L_r T_r)} \psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{s\beta}$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{r\alpha} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \psi_{r\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta}^{[11]}$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{r\beta} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\beta} + \omega_r \psi_{r\alpha} - \frac{1}{T_r} \psi_{r\beta}^{[12]}$$

(Nguyen PhungQuang, Jörg-Andreas Dittrich, "VectorControl of ThreePhase AC Machine", September 1965).

Strategi Pengendalian Vektor Kontrol

Dalam sistem kendali motor berbasis vektor maka tegangan motor harus dimanipulasi dari sistem 3 fasa kedalam kerangka referensi 2 fasa. Ini berarti bahwa arus motor harus diukur secara matematis berubah dari tiga-fase frame kerangka acuan stasioner (a, b, c) dari gulungan stator ke dua sumbu tegak lurus kerangka acuan diam atau yang disebut dengan transformasi clarke.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad [13]$$

Sedangkan matriks transformasi dua fasa menjadi tiga fasa adalah :

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad [14]$$

Demikian pula, tegangan yang akan diterapkan pada motor secara matematis berubah dari frame kerangka acuan diam / tegak lurus diubah kedalam kerangka acuan bergerak dari rotor yang disebut dengan transformasi park (SZABÓ C, Maria IMECS, Ioan Iov, Incze, "Voltage-Hertz Control of the Synchronous Motor

With Ramp Exciting Voltage", Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 30, 2006)

$$\begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_e t) & -\sin(\omega_e t) \\ \sin(\omega_e t) & \cos(\omega_e t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad [15]$$

Sedangkan untuk mempresentasikan kerangka acuan bergerak (d, q) menjadi kerangka acuan bergerak (α, β), maka digunakan transformasi Park balik

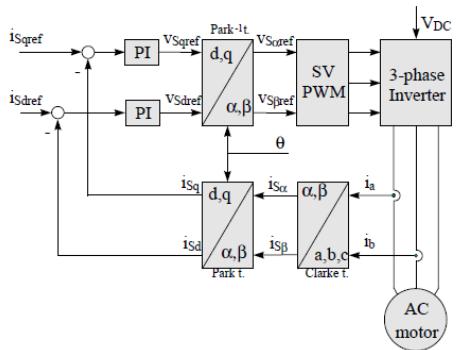
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_e t) & \sin(\omega_e t) \\ -\sin(\omega_e t) & \cos(\omega_e t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} \quad [16]$$

Pada gambar 3 menunjukkan strategi pengendalian motor induksi 3 fasa dengan sistem vektor SPWM. Pada sistem ini arus 3 fasa motor diambil melalui sensor arus di ubah kedalam referensi melalui persamaan clarke. Output dari persamaan ini adalah sistem 2 fasa dalam kerangka acuan stator (kerangka acuan diam). Komponen ini digunakan sebagai masukan transformasi park yang menghasilkan komponen dq sebagai kerangka acuan bergerak (Zhenyu Yu and David Figoli, "AC Induction Motor Control Using Constant V/Hz Principle and Space Vector PWM Technique with TMS320C240", Texas Instruments Incorporated, April, 1998)

3.METODOLOGI PENELITIAN

Untuk menjalankan sistem Vektor PWM inverter maka komponen arus dq

diumpan balikan melalui referensi arus dq yang diolah melalui PI kontroller untuk menghasilkan transformasi park balik dari dq ke Komponen dimodulasikan dengan sinyal carrier segitiga dalam suatu sistem SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*) sehingga menghasilkan pulsa-pulsa kontrol yang sudah terkendali secara vektor untuk menjalankan saklar daya IGBT pada inverter 3 fasa.



Gambar 3. Skema dasar inverter terkendali vektor

3.1 Sistem inverter 3 fasa

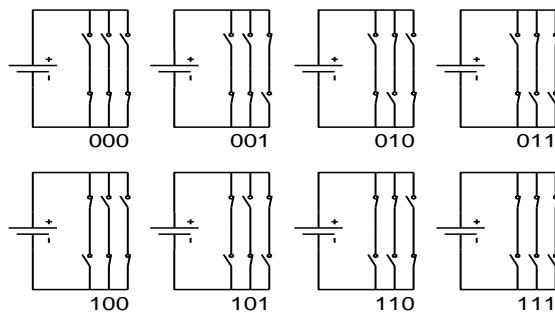
Skema yang digunakan untuk pengendalian arus bolak-balik (AC Drive) pada sistem inverter terdiri dari Bridge Rectifier yang disusun dari enam dioda yang dihubungkan jembatan berfungsi untuk mengkonversikan tegangan bolak-balik menjadi tegangan searah (penyearah). Selain dengan penyearah dioda sistem rectifier ini juga bisa menggunakan metode Rectifier SPWM yaitu sistem penyearah yang terkendali melalui penyakalaran IGBT sehingga

menghasilkan tegangan DC yang linier dengan sifat gelombang arus sefasa terhadap tegangannya. Untuk meratakan tegangan keluaran rectifier dipasang tapis kapasitor elektronik C pada terminal keluaran penyearah. Tegangan searah yang dihasilkan dari sistem penyearah adalah :

$$E_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{ll} \quad \dots\dots\dots \quad (17)$$

dengan E_d dan E_{ll} masing-masing adalah tegangan keluaran searah dan tegangan bolak-balik antar fasa-masukan. Tegangan searah keluaran bridge rectifier setelah ditapis dengan kapasitor, selanjutnya dikonversi menjadi tegangan bolak-balik oleh inverter. Untuk mengendalikan saklar IGBT pada sistem inveretr diperlukan driver yang berfungsi memindahkan sinyal kontrol dengan tegangan kecil kedalam rangkaian daya yang bekerja pada tegangan yang relatif lebih besar.

Dengan teknik kendali SPWM maka konfigurasi saklar daya inverter diatas dapat menghasilkan beberapa kemungkinan pensaklaran seperti pada gambar berikut :



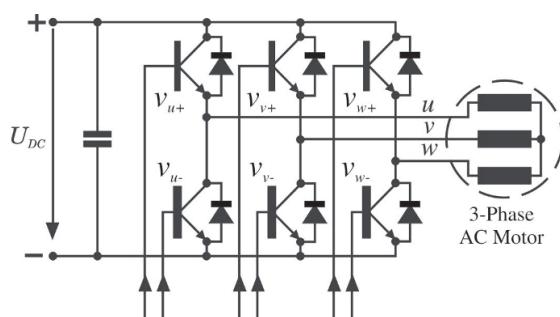
Gb. 5 Konfigurasi saklar daya inverter 3 fasa 3 lengan

Tabel-1: Konfigurasi Switching dari Three-Leg Voltage Source PWM Converter

SV _{u+}	SV _{u-}	SV _{v+}	SV _{v-}	SV _{w+}	SV _{w-}	V _u	V _v	V _w	Vektor
1	0	0	1	0	1	E	0	-E	V ₁
1	0	1	0	0	1	0	E	-E	V ₂
0	1	1	0	0	1	-E	E	0	V ₃
0	1	1	0	1	0	-E	0	E	V ₄
0	1	0	1	1	0	0	-E	E	V ₅
1	0	0	1	1	0	E	-E	0	V ₆
1	0	1	0	1	0	0	0	0	V ₇
0	1	0	1	0	1	0	0	0	V ₈

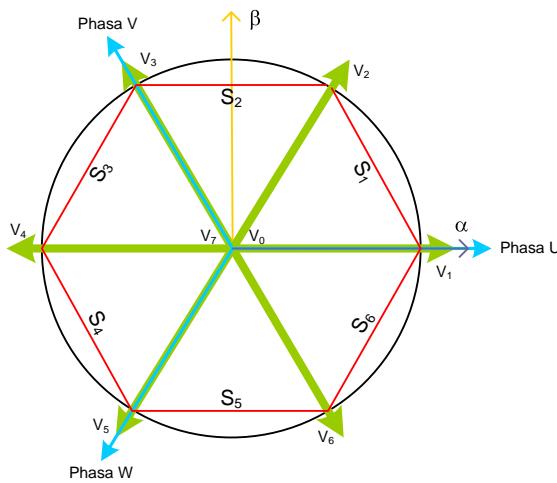
4.HASIL PENELITIAN

Inverter 3 fasa memiliki enam buah saklar daya (3 lengan) yang masing-masing saklar dapat dikendalikan waktu On dan Off-nya. Setiap pasang saklar (1 lengan) inverter bekerja pada sistem 1 fasa sehingga keduanya harus dikendalikan secara berlawanan, sementara terhadap lengan yang laen masing-masing bekerja berdasarkan pergantian fasa sistem 3 fasa yaitu tergeser 120° sehingga terbentuk logika pensaklaran inverter 3 fasa ditunjukkan pada tabel 1.



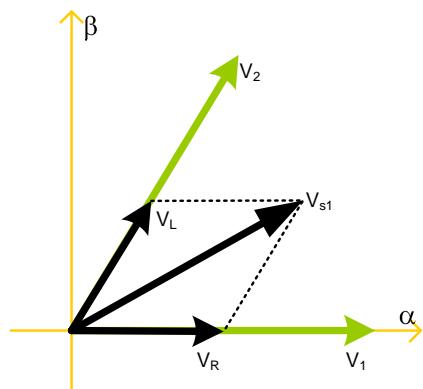
Gb. 6. Inverter 3 fasa dengan saklar IGBT

Konfigurasi switching dari sistem inverter 3 fasa diatas menghasilkan 8 buah vektor yang terdiri dari 6 buah vektor tegangan aktif (*active voltage vectors*) yang menghasilkan 3 buah tegangan *line to line* dan 2 buah vektor tegangan pasif (*pasive voltage vectors*) yang menghasilkan tegangan nol. Suatu vektor tegangan yang berada pada sumbu selalu merepresentasikan tiga buah tegangan *line-line* tersebut. Perputaran vektor berlawanan dengan arah jarum jam sepanjang 360° yang merepresentasikan tegangan sinusoidal tiga fasa ideal dengan amplituda ditentukan oleh besarnya *magnitude* dari vektor tegangan tersebut. Dalam radian masing-masing vektor ditunjukkan pada gambar 7



Gb. 7. Vektor-vektor tegangan pada sumbu dalam radian

Dari gambar 6 merepresentasikan 8 topologi switching dalam bentuk segi enam (atau Space Vector segi enam). Vektor dalam radian dibagi menjadi 6 sektor. Dari keenam sektor yang menghasilkan 8 logika pensaklaran tersebut dapat dihasilkan nilai tegangan stator motor induksi dengan metode pada gambar 8.



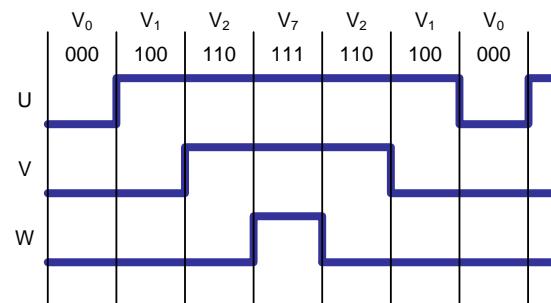
Gb. 8. Realisasi nilai tegangan yang dibentuk oleh dua buah vector

Dari gambar 8, V_{s1} merupakan nilai tegangan yang dihasilkan dari resultant *magnitute* vektor V_1 yang disimbolkan V_R dengan *magnitute* vektor 2 yang disimbolkan dengan V_L . Tegangan V_{s1} bekerja pada sektor 1 yang dibentuk dari 4 buah vektor V_0, V_1, V_2 dan V_7 sehingga menghasilkan logika pensaklaran yang ditunjukkan pada tabel 2

Tabel-2 :logika Switching vector tegangan pada sector 1

	V0	V1	V2	V7
U	0	1	1	1
V	0	0	1	1
W	0	0	0	1

Dalam bentuk logika pulsa yang menjalankan saklar daya IGBT pada inverter ditunjukkan pada gambar 8.



Gb. 9. Logika pulsa vector tegangan pada sector 1

Melalui metode penyaklaran saklar daya inverter dengan pola pengendalian berdasarkan pengendalian masing-masing

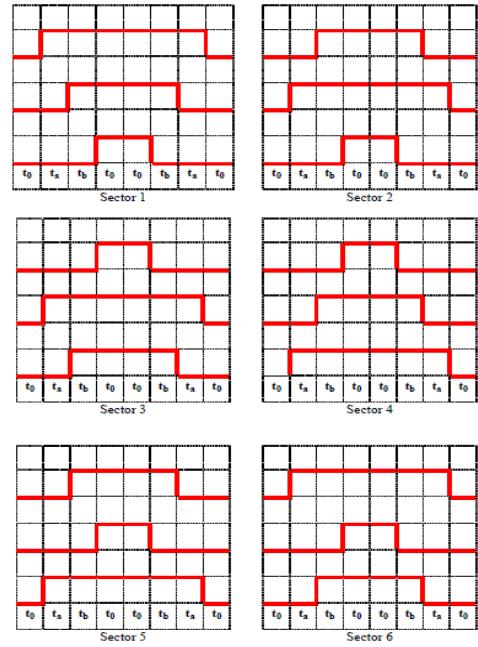
sektor maka meminimalkan rugi-rugi pensaklaran inverter.

Dengan metode vektor kontrol yang menghasilkan 8 topologi penyaklaran seperti yang direpresentasikan pada gambar 8, menghasilkan tegangan fasa netral inverter 3 fasa dengan nilai tegangan berdasar tabel persamaan berikut :

Tabel-3 Nilai tegangan keluaran inverter dengan metode vektor kontrol

Switching State (S ₁ S ₂ S ₃)	V _{aN}	V _{bN}	V _{cN}	Sector number
0	0	0	0	0 (Origin)
1	$\frac{2}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	1
2	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{2}{3}V_{DC}$	2
3	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	3
4	$-\frac{2}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	4
5	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{1}{3}V_{DC}$	$\frac{2}{3}V_{DC}$	5
6	$\frac{1}{3}V_{DC}$	$-\frac{2}{3}V_{DC}$	$\frac{1}{3}V_{DC}$	6
7	0	0	0	7 (origin)

Nilai tegangan tersebut dihasilkan dari suatu algoritma pulsa penyaklaran inverter space vektor SPWM secara lengkap dari gambar 9.



Gb.10. Pola penyaklaran vektor secara berurutan pada masing-masing sektor

6. Kesimpulan

1. Metode vektor kontrol SPWM inverter ini dapat diimplementasikan dengan baik dalam untuk mengendalikan saklar IGBT pada rectifier dan inverter pada aplikasi turbin angin sebagai terobosan untuk pengembangan energi terbarukan
2. Untuk proses realisasi metode kendali Space vector Sinusoidal pulse width Modulation lebih mudah diimplementasikan secara digital yang merepresentasikan pulsa-pulsa penyaklaran pada masing-masing sector.

7. Daftar Pustaka

1. A. K. Sharma, R. A. Gupta, Laxmi Srivastava, “*Performance of ann based indirect vector control induction motor drive*”, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2007
2. Musafa,Akhmad,“*SimulasiPerancangan PengendaliVektorArusPada Motor Induksi 3 Fasadengan C-MEX S-FUNCTION*”, Seminar, Universitas Indonesia, 2007.
3. Nguyen PhungQuang, Jörg-Andreas Dittrich, “*vector control of three phase AC Machine*”, e-ISBN: 978-3-540-79029-7, September 1965
4. Ojo,O., Consoli, A., danLipo, T.A., 1990, “*An Improved Model of Saturated Induction Machines*”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol 26 no 2, maret, 1990
5. Rahsyid M.H, “*Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*”, PT Prehallindo, Jakarta, 1999.
6. Riyadi, Slamet, “*Penggerak kecepatan variable pada motor induksi tiga fasa berbasis V/Hz dan Direct torque control*”,Unika Soegijapranata, 2010
7. Soemarto, “*Metode Baru Dalam Identifikasi Parameter Motor Induksi*”, Epsilon : Journal of Electrical Engineering and Information Technology Vol. 1, No. 1, July 2003.
8. Trzynadlowsky Andrzej M, “*Control of induction motors*”, department of electrical engineering university of Nevada, 2001
9. Zhenyu Yu and David Figoli, “*AC Induction Motor Control Using Constant V/Hz Principle and Space Vector PWM Technique with TMS320C240*”, Texas Instruments Incorporated, April, 1998.
10. Simoes, M.G, Farret, F.A, “*Renewable energy systems Design and Analysis with Induction Generator*”,Crc press, Boca raton, Florida, 2004
11. SZABÓ C, Maria IMECS, Ioan Iov, Incze, ” Volt-Hertz Hontrol of the Synchronous Motor With Ramp Exciting Voltage”, Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 30, 2006.
12. “*Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors*”, Literature Number: BPRA073, Texas Instruments Europe, February 1998
13. www.st.com, “*Flux control simulink and software library of a PMSM*”, Application note, AN2290, March 2007