

KAJIAN SISTEM KENDALI *SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION* SEBAGAI PENGENDALI MOTOR INDUKSI 3 FASA

Emmanuel Agung Nugroho^{*)}, Joga Dharma Setiawan
 Program Studi Magister Teknik Mesin Spesialisasi Mekatronika
 Universitas Diponegoro Semarang
^{*)} Email : lekagung@yahoo.com

Abstrak

Penelitian ini membahas metode Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) inverter sebagai pengendali motor induksi yang dimodelkan dengan software Power Simulator. Tujuan kajian ini adalah memberikan referensi agar dapat diimplementasikan ke dalam hardware untuk mendorong pemanfaatan metode SVPWM inverter sebagai pengendali motor induksi secara lebih luas. Melalui simulasi dengan software Power Simulator ini diketahui kurva tegangan, arus, torsi dan kecepatan motor yang terkendali oleh sistem SVPWM, selain itu juga menghasilkan data pola penyaklaran inverter yang secara langsung dapat digunakan untuk diaplikasikan kedalam pemrograman mikrokontroler. Kajian ini sangat membantu bagi para peneliti untuk menyelesaikan algoritma pemrograman SVPWM yang sangat panjang menjadi mudah sebab data pola penyaklaran inverter dapat secara langsung diprogram kedalam mikrokontroler secara look up table sehingga menghemat flash memory yang digunakan oleh mikrokontroler.

Kata kunci : motor induksi, space vector pulse width modulation, power simulator, look up table

PENDAHULUAN

Dewasa ini pengendalian motor induksi dilakukan dengan cara mengatur tegangan, arus, fluks dan torsi secara proposional. Divais 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, yaitu :

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

Landasan Teori

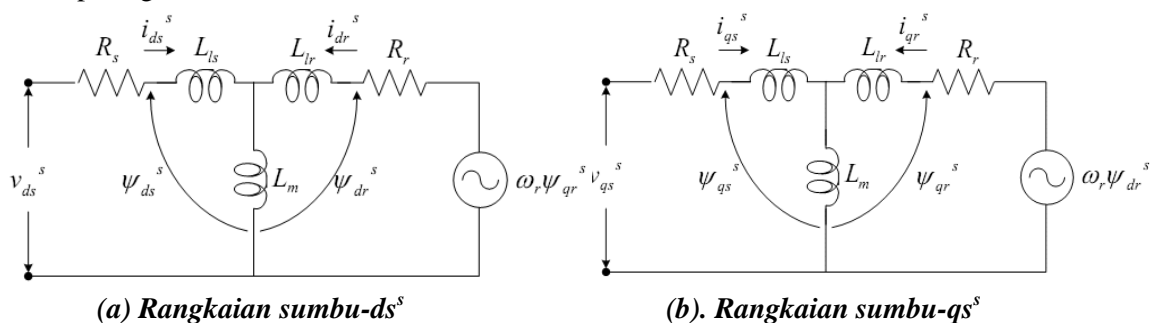
Kumparan stator motor induksi dinyatakan dengan persamaan :

$$i_{as} = I_{s_mak} \cos(\omega t), \dots\dots\dots (1)$$

$$i_{bs} = I_{s_mak} \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \dots\dots\dots (2)$$

$$i_{cs} = I_{s_mak} \cos\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) \dots\dots\dots (3)$$

Motor induksi 3 fasa dapat dianalisa melalui rangkaian ekuivalen sumbu Vd dan Vq seperti terlihat pada gambar 1.



Gambar 1. Model dinamik motor induksi tiga fasa [Bose, 2002]

Konsep pengendalian motor induksi

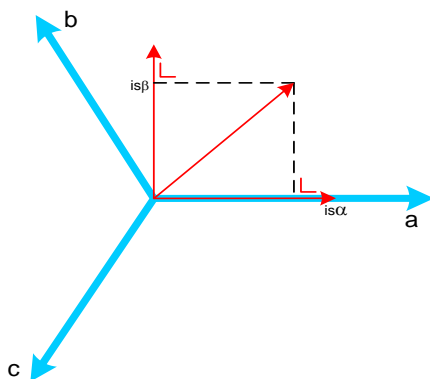
Metode *vector control* bertujuan mengendalikan motor induksi yang diemulasikan dari kinerja mesin DC. Pada mesin DC, fluksi stator ψ_s dihasilkan oleh arus yang dialirkan pada belitan medan stator (*field winding*) dan fluksi rotor ψ_r dihasilkan oleh arus yang dialirkan ke belitan jangkar (*armature 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. Dengan melihat rangkaian ekuivalen motor induksi pada gambar 1 maka pengendalian motor induksi 3 fasa dapat di lakukan seperti pada pengendalian motor DC yaitu dengan metode pengendaliem vektor ruang. Pengendalian vektor ruang adalah mentransformasikan elemen tiga fasa kerangka acuan tetap (a,b,c) menjadi elemen dua fasa kerangka acuan tetap (α,β) kemudian menjadi elemen dua fasa kerangka acuan bergerak (d,q).

Perubahan sistem tiga fasa menjadi dua koordinat dipisahkan menjadi dua langkah yaitu : Transformasi Clarke (a,b,c) \rightarrow (α,β) dan Transformasi Park (α,β) \rightarrow (d,q)

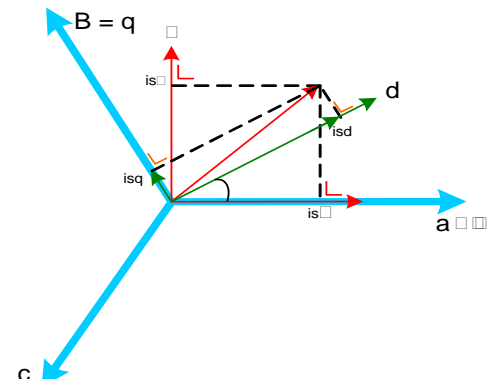
Transformasi arus tiga fasa (I_a, I_b, I_c) menjadi dua fasa kerangka acuan diam (I_α, I_β) yang saling tegak lurus satu sama lain dinyatakan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

Representasi persamaan tersebut dapat dijelaskan seperti pada gambar 2. Sedangkan untuk mempresentasikan kerangka acuan tetap (α,β) menjadi kerangka acuan bergerak (d,q), maka digunakan transformasi Park. Transformasi Park dapat dilihat pada gambar 3 :



Gambar. 2 Transformasi Clarke (a,b,c) \rightarrow (α,β)



Gambar. 3 Transformasi Park (α,β) \rightarrow (d,q)

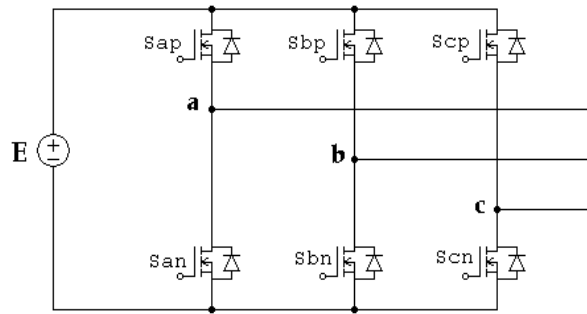
Gambar 3 menunjukkan proyeksi sistem dua dimensi diam (α,β) menjadi sistem dua dimensi bergerak (d,q). Proyeksi sistem ini menghasilkan arus direct (i_{sd}) yang merepresentasikan fluksi dan arus quadratur (i_{sq}) yang merepresentasikan torsi. Besarnya komponen fluksi dan torsi dalam sistem ini dijelaskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_e t) & -\sin(\omega_e t) \\ \sin(\omega_e t) & \cos(\omega_e t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

Dengan memproyeksikan menjadi sistem 2 fasa (d,q) yang mengendalikan fluksi dan torsi secara terpisah maka motor induksi dapat dikendalikan seperti motor DC.

Strategi pengendalian SVPWM pada motor induksi 3 fasa

Untuk mengendalikan motor induksi menggunakan SVPWM dilakukan melalui implementasi inverter 3 fasa seperti pada gambar 4.



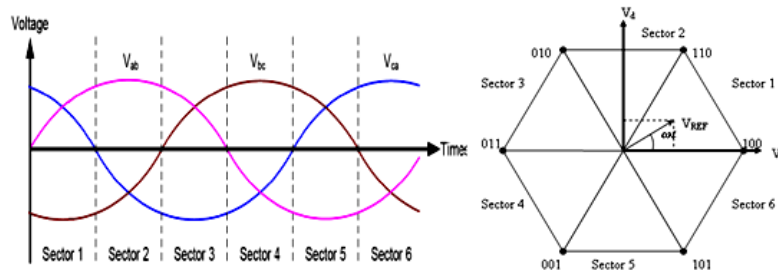
Gambar. 4 Konfigurasi inverter 3 fasa

Teknik pengendalian saklar daya inverter ditunjukkan pada tabel 1

Tabel 1 konfigurasi penyaklaran inverter

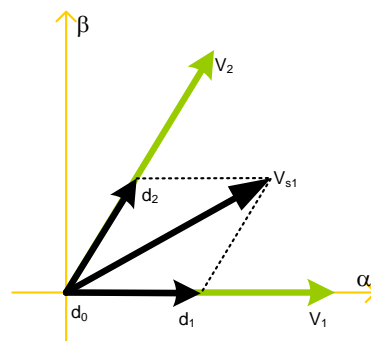
S_{ap}	S_{bp}	S_{cp}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
1	0	0	E	0	-E
1	1	0	0	E	-E
0	1	0	-E	E	0
0	1	1	-E	0	E
0	0	1	0	-E	E
1	0	1	E	-E	0
1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0

Dari konfigurasi penyaklaran pada tabel 1 dapat dilakukan dengan membangun 8 buah vektor yang terdiri dari 6 buah vektor aktif yang saling tergeser 60° dan 2 buah vektor pasif yang berada di pusat koordinat. Pembagian vektor gelombang sinusoida 3 fasa sepanjang 360° menjadi 6 buah sektor ditunjukkan pada gambar 5



Gambar. 5 Gelombang sinusoida 3 fasa, ruang vektor 3 fasa [Kelvin Lye 2008]

Untuk menyatakan pola penyaklaran dibuat suatu pendekatan dengan membentuk tegangan referensi dalam setiap sektor. Sebagai contoh suatu vektor tegangan referensi V_{s1} berada pada sektor-1 sehingga berada diantara vektor tegangan aktif V_1 dan V_2 seperti pada gambar 6



Gambar. 6 Realisasi tegangan referensi yang dibentuk oleh dua buah vektor [Zhenyu Yu, 1998]

Dari gambar 6, V_{s1} merupakan nilai tegangan referensi yang dihasilkan dari resultan *magnitude* vektor V_1 yang disimbolkan d_1 dengan *magnitude* vektor 2 yang disimbolkan dengan d_2 . Persamaan yang dapat diturunkan dari kondisi tersebut adalah

$$VT_s = V_1t_1 + V_2t_2 \dots\dots\dots(6)$$

T_s = waktu *sampling*

t_1 = durasi waktu *PWM converter* membentuk vektor V_1

t_2 = durasi waktu *PWM converter* membentuk vektor V_2

Karena $T_s = (t_0 + t_1 + t_2)$ maka dibutuhkan waktu tambahan sebesar t_0 di setiap sektor. Agar nilai persamaan (6) tetap berlaku maka t_0 harus dikalikan dengan vektor tegangan nol (dapat merupakan V_0 atau V_7).sehingga persamaan tersebut menjadi :

$$V_{s1}T_s = t_0(V_0 / V_7) + V_1t_1 + V_2t_2 \dots\dots\dots(7)$$

atau

$$V_{s1} = \frac{t_0}{T_s}(V_0 / V_7) + \frac{t_1}{T_s}V_1 + \frac{t_2}{T_s}V_2 = d_0(V_0 / V_7) + d_1V_1 + d_2V_2 \dots\dots\dots(8)$$

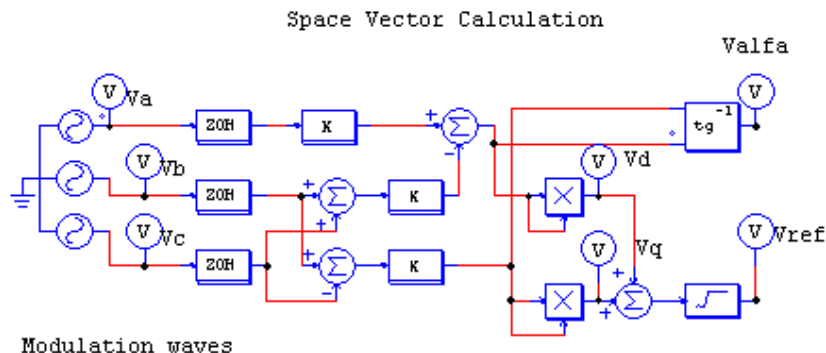
Dimana V_{s1} merupakan tegangan refrensi pada sektor 1. Tegangan V_{s1} yang bekerja pada sektor 1 dibentuk dari 4 buah vektor V_0, V_1, V_2 dan V_7 yang memiliki logika penyaklaran ditunjukkan pada tabel 2

Tabel 2. logika penyaklaran vektor tegangan pada sektor 1

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

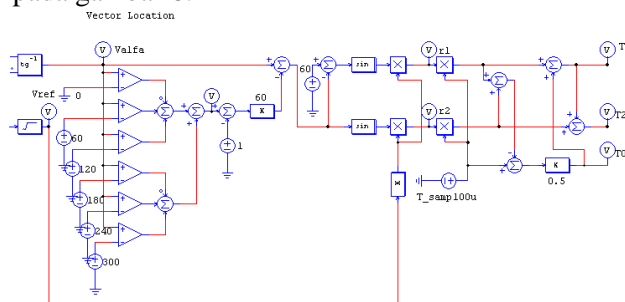
Pemodelan SVPWM inverter dengan software Power Simulator

Pemodelan dengan *Power Simulator* dimulai dari *transformasi Clarke* hingga pengukuran torsi pada rangkaian daya inverter dengan pembebanan motor induksi 3 fasa. Pemodelan transformasi Clarke dan transformasi Park untuk menghasilkan transformasi 3 fasa menjadi 2 fasa dari kerangka acuan diam menjadi kerangka acuan gerak ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Pemodelan transformasi Clarke dan Park untuk menghasilkan tegangan referensi dan sudut θ dengan PSim

Pada gambar 7 menjelaskan proses transformasi 3 fasa V_a, V_b dan V_c menjadi V_d dan V_q . Sudut θ berada disepanjang gelombang antara 0^0 hingga 360^0 harus dideteksi untuk menentukan lokasi vektor yang aktif. Dengan memodelkan menggunakan software *Power Simulator* hal ini dapat dilakukan seperti pada gambar 8.



Gambar 8. menentukan lokasi vektor dengan pemodelan software PSim

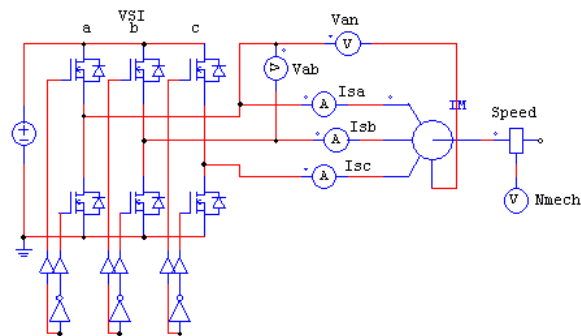
Gambar 8 digunakan untuk menentukan lokasi vektor yang aktif disepanjang gelombang. Dengan memberikan batasan referensi setiap kelipatan 60^0 pada komparator 1-6. Titik r_1 dan r_2 adalah koefisien tegangan disetiap sektor yang aktif dalam domain waktu. Besarnya nilai koefisien tegangan ini menentukan *time duration switching*. Untuk menentukan *time duration switching* dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$T_1 = \frac{T_z - (T_z(r_1 + r_2))}{2},$$

$$T_2 = \frac{T_z - (T_z(r_1 + r_2))}{2} + T_z r_1 \text{ sedangkan}$$

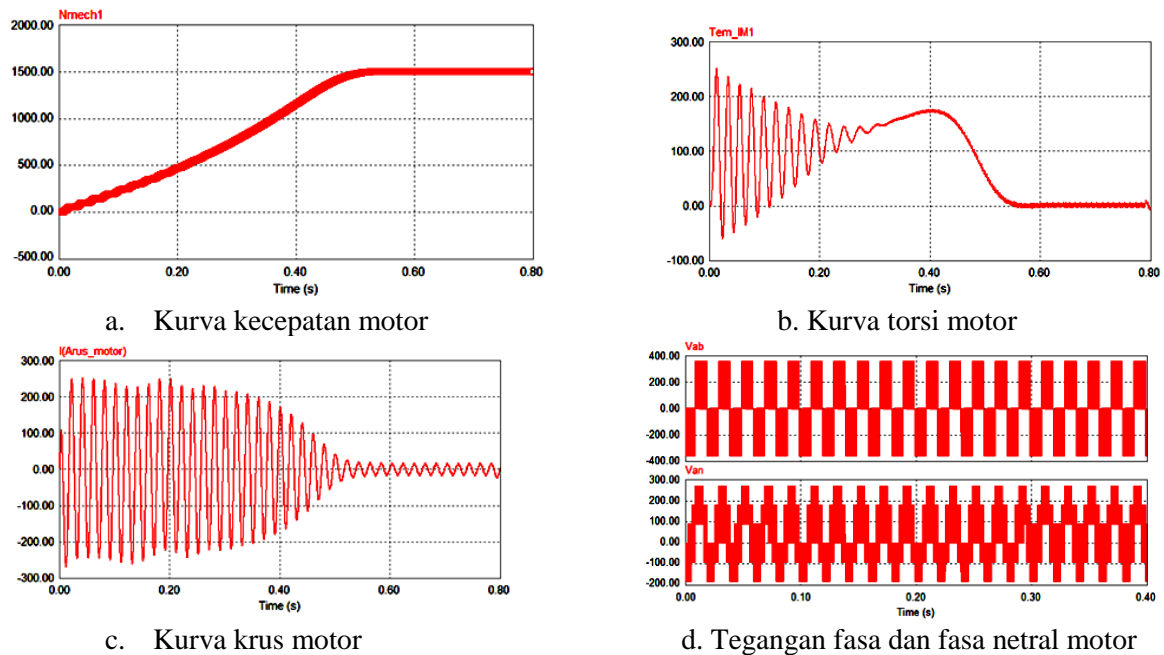
$$T_0 = \frac{T_z - (T_z(r_1 + r_2))}{2} + T_z(r_1 + r_2).$$

Penjumlahan T_1 dan T_2 belum memenuhi lama *time sampling* sehingga diperlukan tambahan waktu sebesar T_0 yaitu waktu sampling dikurangi dari total waktu T_1 dan T_2 . Pemodelan rangkaian daya yang dilakukan dengan software Power seperti pada gambar 9.



Gambar 9 Pemodelan rangkaian daya inverter dengan beban motor induksi 3 fasa menggunakan software PSim

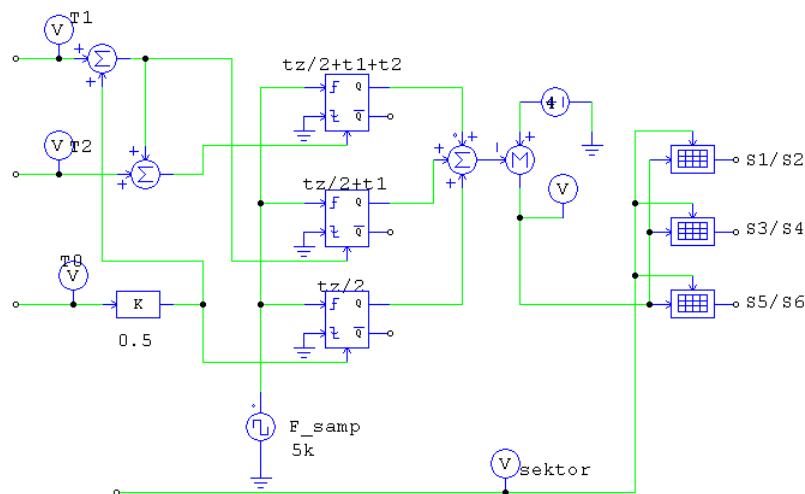
Parameter pemodelan motor induksi yang digunakan adalah :
 Tegangan kerja sebesar 380 Volt/50 Hz, Jumlah kutub (p) 4, Tahanan stator (R_s) $0,294\Omega$, Reaktansi stator (X_s) $0,0139 \Omega$, Tahanan rotor (R_r) $0,156 \Omega$, Reaktansi rotor (X_r) $0,0074 \Omega$, Reaktansi magnetic (X_m) $0,41 \Omega$.
 Dengan menggunakan parameter tersebut dihasilkan kurva pengukuran kecepatan torsi, arus dan tegangan motor seperti pada gambar 10



Gambar 10. Kurva kecepatan, torsi, arus dan tegangan motor induksi dengan kendali inverter SVPWM yang dimodelkan dari software Power Simulator

1. Menentukan pola penyaklaran IGBT pada tiap vektor .

Pola penyaklaran SVPWM inverter pada tiap-tiap sektor dapat dibentuk dengan pemodelan software Power Simulator. Dengan menggunakan informasi T_1, T_2 dan T_0 , maka dapat dibangun suatu kombinasi pulsa pada gambar 11 berikut :



Gambar 11. Metode penyaklaran IGBT

Dengan Pemodelan pada gambar 14 maka pola penyaklaran S_1/S_2 , S_3/S_4 dan S_5/S_6 dapat dibentuk. Pola inilah yang digunakan sebagai data untuk memprogram mikrokontroler sebagai kontrol digital saklar daya inverter

KESIMPULAN

1. Pemodelan SVPWM dengan Power Simulator ini menghasilkan data-data dan sinyal model ideal sehingga dapat dijadikan didalam merancang dan menguji implementasi alat SVPWM.
2. Pemodelan SVPWM dengan Power Simulator menghasilkan data digital yang diperlukan sebagai pengendali saklar inverter. Data digital tersebut dapat di-*download* secara langsung kedalam mikrokontroler untuk aplikasi penyaklaran inverter.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bose, Bimal K, *Modern Power Electronics and AC Drives*, The University of Tennessee, Knoxville, Prentice Hall, Inc. United State of America, 2002.
- [2] Kelvin Lye kwong Loong., Nik ramzi bin Idris, *Microcontroller Based Space Vector Modulation (SVM) Signal Generator*, Faculty of Electrical Engineering UTM, May 2008.
- [3] Mohan, Ned, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, John Willey & Sons, Inc, 1995.
- [4] Nguyen Phung Quang., Jörg-Andreas Ditttrich, “*Vector Control of Three Phase AC Machine*”, e-ISBN: 978-3-540-79029-7, September 1965.
- [5] Riyadi, Slamet, “*Penggerak Kecepatan Variable Pada Motor Induksi Tiga Fasa Bberbasis V/Hz dan Direct Ttorque Control*”, Unika Soegijapranata, 2010.
- [6] Trzynadlowsky Andrzej M, “*Control of Induction Motors*”, department of electrical engineering university of Nevada, 2001.
- [7] 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.
- [8] “*Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors*”, Literature Number: BPRA073, Texas Instruments Europe, February 1998.