

# SVPWM을 이용한 PMSM 구동용 인버터 시뮬레이션

(Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Inverter System Simulation Using SVPWM)

김경민\* · 이정효 · 황준환 · 이원철 · 원충연

( Kyung-Min Kim, Jung-Hyo Lee, Chun-Hwan Hwang, WonCheol Lee, Chung-Yuen Won )

## Abstract

This paper is simulated overall composition of permanent magnet synchronous motor using Simulink in Matlab. In general permanent magnet synchronous motor drive system, SVPWM method is usually adopted. The simulation results in this paper show the speed and torque characteristics of PMSM with motor drive which is modulated by SVPWM. Through this simulation, it can be possible to verify the component which affects the torque and speed control causing the SVPWM.

## 1. 서론

영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM)의 회전자는 높은 자속밀도를 가지고 있는 영구자석으로 되어 있어 효율이 좋을 뿐 아니라 전동기 중량에 대한 토크비가 크다. 최근 영구자석의 가격 하락으로 PMSM을 이용한 대용량 산업기기와 가전기기 분야로 응용이 확대되고 있으며, 정밀한 출력전압을 생성할 수 있는 고성능 인버터 제어 시스템의 사용이 늘어나고 있다. [1] [6]

일반적으로 PWM(Pulse Width Modulation)방식은 정현파 변조 방식을 사용한다. 본 논문에서는 다른 PWM 방식에 비해 정상 상태에서의 전류 고조파 성분을 크게 억제 할 수 있는 공간 전압벡터 PWM (Space Vector Pulse Width Modulation: SVPWM)변조 방식을 이용하여 PMSM 구동용 인버터 시뮬레이션을 Matlab/Simulink로 구현해 보고자 한다. [2]

또한, 시뮬레이션을 통하여 구현된 시스템의 효율성과 안정성을 확인하였다.

## 2. 본론

그림 1은 PMSM의 전체 제어 블록도를 표현한 것이고, 그림 2에서는 Matlab/Simulink을 이용하여 전체 시스템을 모델링 하였다.

Matlab/Simulink를 이용하여 구성한 전체적인 PMSM 시스템은 영구자석 동기전동기의 벡터 제어 블록, SVPWM을 이용한 PMSM 인버터 블록, PMSM의 전기적인 모델링 블록, PMSM의 기계적인 모델링 블록으로 크게 4 가지로 나눌 수 있다.

본 논문은 각각의 블록에 대한 이론과 수식을 기본으

로 하여 Matlab/Simulink로 구현하는 방법을 상세하게 설명하고자 한다.

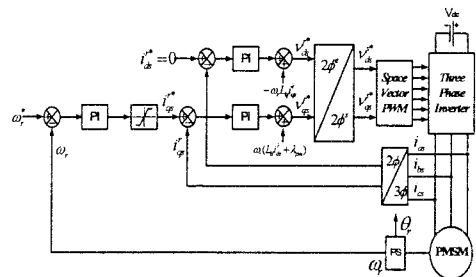


그림 1. PMSM의 전체 제어 블록도  
Fig. 1. Overall PMSM control block diagram

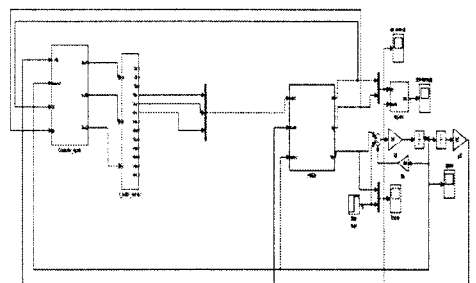


그림 2. Matlab/Simulink로 구현한 전체적인 PMSM 모델링  
Fig. 2. Entire composition of PMSM Modeling using Matlab/Simulink

### 2.1. 영구자석 동기 전동기의 벡터 제어

영구자석 동기 전동기의 벡터 제어는 속도 제어, 전류 제어 부분으로 나눌 수 있다.

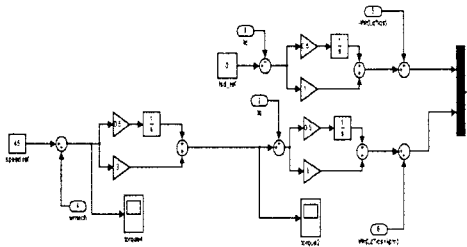


그림 3. PMSM의 속도제어기와 전류제어기 모델링  
Fig 3. PMSM speed sensor and current sensor modeling

실제적으로 전동기에서 속도제어를 위해서는 토크를 제어하여야 한다. 또한, 토크를 제어하기 위해서는 토크 성분전류를 조절함으로써 가능하다.

속도 제어기는 PMSM의 기계적 모델링을 통해 얻은 실제 속도와 지령속도, 비례적분(PI)제어기를 사용하여 구성하였다. 속도 제어기의 출력을 통해 토크를 조절할 수 있는 지령전류 정보를 얻을 수 있다.

PMSM은 자속을 제어하는 d축 전류와 토크를 제어하는 q축 전류로 나누어서 각각 독립적으로 제어가 가능하다. 일정 토크 운전 영역에서는 d축 성분 전류를 0으로 유지하면, 그림 4에서와 같이 영구자석의 자속과 q축 성분 전류는 공간적으로 90°의 위상관계 갖게 된다. [3]

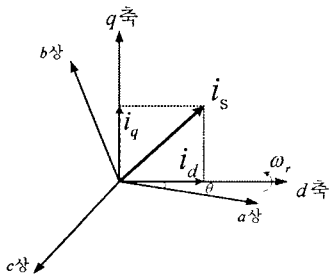


그림 4. PMSM의 페이서 선도  
Fig 4. PMSM phaser plot

PMSM의 전기적 토크는 식 (1)과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} P [\lambda_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (1)$$

$i_d, i_q$ 는 d, q축 전류,  $L_d, L_q$ 는 d, q축 인덕턴스,  $\lambda_f$ 는 제자자속이다.

여기서,  $L_d$ 와  $L_q$ 가 같다면, PMSM의 토크는 식 (2)와 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda_f i_q \quad (2)$$

위에서 살펴본 PMSM의 특징을 기본으로 토크는 q축

전류에 비례한다. 이를 바탕으로 전류제어 블록을 구성하면, d축 지령 전류를 0으로 제어하고, 속도 제어 블록에서 얻은 출력을 q축 지령 전류로 하여 PI제어기를 통해 전동기의 토크를 제어할 수 있다.

## 2.2 SVPWM을 이용한 PMSM 인버터 블록

SVPWM 방식은 정현파 PWM 방식보다 15% 상승된 변조비를 얻을 수 있고, 출력 상전류의 고조파 함유율이 다른 종류의 전압변조 방식보다 작다는 장점을 가지고 있다. 공간전압벡터 PWM 인버터는 60°의 위상 차이를 가지고 있는 6개의 유효전압벡터  $V_1 \sim V_6$ 와 영전압 벡터  $V_0, V_7$ 로 구분되며, 유효전압벡터의 크기는  $\frac{2}{3} V_{dc}$ 로 고정된다.

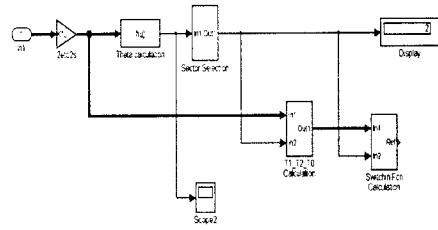


그림 5. SVPWM 제어 블록도  
Fig 5. SVPWM control block diagram

인버터 스위칭을 하기 위해서는 스위칭 영역 결정, 스위칭 시간 계산, 스위칭 함수 계산의 3가지 순서로 결정 되어야 한다.

### 2.2.1 스위칭 영역 결정

먼저, d, q축 동기 회전좌표계를  $\alpha, \beta$ 의 2상 고정 좌표계로 변환하는 공식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (3)$$

이를 이용하여  $\alpha$ 축으로부터 지령전압 벡터까지의 회전각  $\theta$ 를 식 (4), 식 (5)를 사용하여 구할 수 있다.

$$V^* = V_{\alpha s}^* + jV_{\beta s}^* \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{V_{\beta s}^*}{V_{\alpha s}^*} \right) \quad (5)$$

지령 전압벡터는 공간 전압벡터상에서 식 (5)에서 얻은  $\theta$  정보를 이용하여 그림 7과 같이 6개의 영역 중에 하나로 나타낼 수 있고, 이를 블록도로 표현하면 그림 6과 같다.

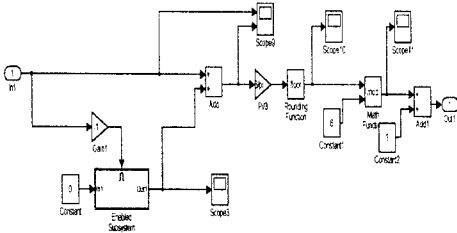


그림 6. 스위칭 영역 결정 블록도  
Fig 6. Switching select block diagram

스위칭 영역 결정 블록도에서 영역을 판별하기 위해서 입력받은  $\theta$  값에 따라 floor와 mod 함수를 이용하여 6개의 영역을 변수로 나타내는 출력을 만들 수 있다.[4]

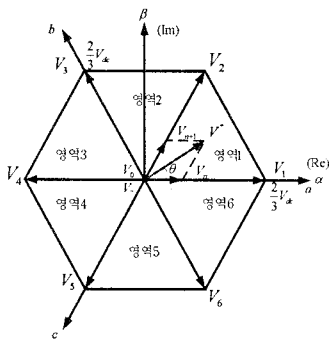


그림 7. 인버터의 공간전압 벡터  
Fig 7. Space voltage vector of inverter

### 2.2.2 스위칭 시간 계산

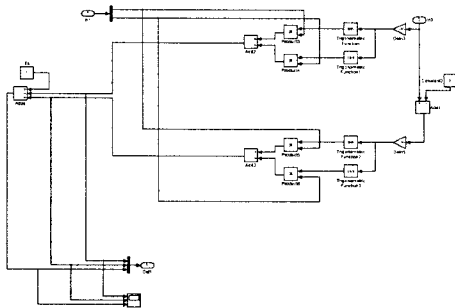


그림 8. 스위칭 시간 계산 블록도  
Fig 8. Switching time calculation block diagram

그림 7에서 6개 영역중 하나가 결정되면 근접한 두 유효전압벡터와 영벡터를 이용하여 평균적으로 지령 출력전압 벡터와 크기가 동일한 전압을 발생 시킬 수 있다. 각 유효전압 벡터들의 인가 시간 관계는 식 (6)과 같다. [7]

$$\int_0^T V^* dt = \int_0^{T_1} V_n dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} V_{n+1} dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} V_{7,0} dt \quad (6)$$

스위칭 주기가 짧다면 식 (6)은 식 (7), 식 (8)과 같이 표현이 가능하다.

$$V^* T_s = V_n T_1 + V_{n+1} T_2 + V_0 (T_s - T_1 - T_2) \quad (7)$$

$$V^* = V_n \frac{T_1}{T_s} + V_{n+1} \frac{T_2}{T_s} + V_0 \left( 1 - \frac{T_1}{T_s} - \frac{T_2}{T_s} \right) \quad (8)$$

여기서,  $T_1$ 과  $T_2$ 는 제어주기  $T_s$  동안에 유효전압벡터  $V_n, V_{n+1}$ 를 인가한 시간이다. 식 (8)을  $T_1, T_2, T_0$ 에 관한 식으로 표현하면 식 (9), 식 (10), 식 (11)과 같이 표현 할 수 있다.

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}} \left[ V_{\alpha}^s \cos\left(\frac{m\pi}{3}\right) - V_{\beta}^s \sin\left(\frac{m\pi}{3}\right) \right] \quad (9)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}} \left[ -V_{\alpha}^s \cos\left(\frac{(m-1)\pi}{3}\right) + V_{\beta}^s \sin\left(\frac{(m-1)\pi}{3}\right) \right] \quad (10)$$

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (11)$$

### 2.2.3 스위칭 함수 계산

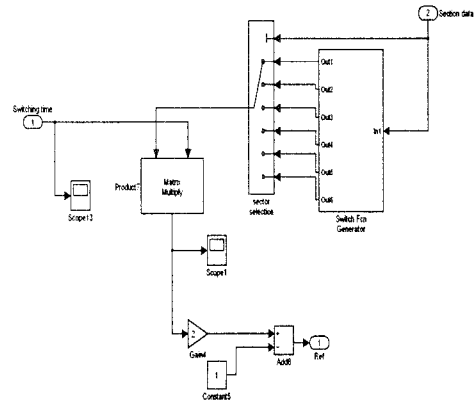


그림 9. 스위칭 함수 계산 블록도  
Fig 9. Switching function block diagram

스위칭 함수 계산 블록의 입력중 하나인 Section data는 공간좌표상에서 영역을 나타내는 변수로 Sector Selection 블록의 입력이 되고 6개중 하나가 선택 된다.

Switch Fcn Generator 블록에서는 표 1과 같이 영역에 따른 스위칭 함수를 결정하고 출력된  $T_a, T_b, T_c$ 는 또 다른 입력으로 받은 스위칭 시간인  $T_1, T_2, T_0$ 와 행렬 곱셈 블록을 통해 곱해서 인버터의 지령전압을 결정하게 된다.

표 1. 인버터의 스위칭 함수

Sector	ON sequence	OFF sequence
1	$T_a = T_s / 2$ $T_b = T_s / 2 + T_i$ $T_c = T_s / 2 + T_i + T_i$	$T_a = T_s / 2 + T_i + T_i$ $T_b = T_s / 2 + T_i$ $T_c = T_s / 2$
2	$T_a = T_s / 2 + T_i$ $T_b = T_s / 2$ $T_c = T_s / 2 + T_i + T_i$	$T_a = T_s / 2 + T_i$ $T_b = T_s / 2 + T_i + T_i$ $T_c = T_s / 2$
3	$T_a = T_s / 2 + T_i + T_i$ $T_b = T_s / 2$ $T_c = T_s / 2 + T_i$	$T_a = T_s / 2$ $T_b = T_s / 2 + T_i + T_i$ $T_c = T_s / 2 + T_i$
4	$T_a = T_s / 2 + T_i + T_i$ $T_b = T_s / 2 + T_i$ $T_c = T_s / 2$	$T_a = T_s / 2$ $T_b = T_s / 2 + T_i$ $T_c = T_s / 2 + T_i + T_i$
5	$T_a = T_s / 2 + T_i$ $T_b = T_s / 2 + T_i + T_i$ $T_c = T_s / 2$	$T_a = T_s / 2 + T_i$ $T_b = T_s / 2 + T_i$ $T_c = T_s / 2 + T_i + T_i$
6	$T_a = T_s / 2$ $T_b = T_s / 2 + T_i + T_i$ $T_c = T_s / 2 + T_i$	$T_a = T_s / 2$ $T_b = T_s / 2 + T_i$ $T_c = T_s / 2 + T_i$

스위칭 함수로 계산된 지령전압은  $T_s$ 를 주기로 하는 삼각파와 비교하여 3상 인버터의 게이트 신호를 발생 시킨다.

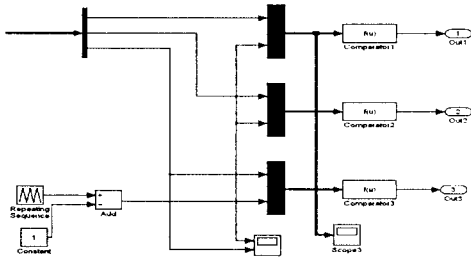


그림 10. 3상 인버터 게이트 신호 발생 블록도  
Fig 10. 3-phase inverter gate pulse generator block diagram

### 2.2.4 3상 인버터부의 모델링

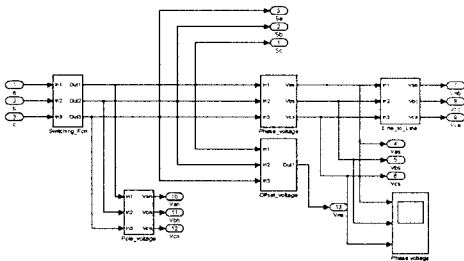


그림 11. 3상 인버터 모델링  
Fig 11. 3-phase inverter modeling

3상 인버터는 서로 상보적으로 동작할 수 있는 3개의 극으로 구성되어 있고, 3상 인버터의 출력 상전압과 출력 극전압은  $S_a, S_b, S_c$ 의 스위칭 상태에 따라 각각 8개의 동작모드로 표현된다. [5]

3상 인버터부는 크게 극전압(Pole voltage)블록, 상전압(Phase voltage)블록, 오프셋전압(Offset voltage)블록 3가지로 모델링을 할 수 있다.

#### 2.2.4.1 극전압 블록

식 (12)은 스위칭 함수와 극전압과의 관계를 나타낸 것으로 그림 12와 같이 모델링 할 수 있다.

$$V_{an} = \frac{V_{dc}}{2} (2S_a - 1)$$

$$V_{bn} = \frac{V_{dc}}{2} (2S_b - 1)$$

$$V_{cn} = \frac{V_{dc}}{2} (2S_c - 1)$$

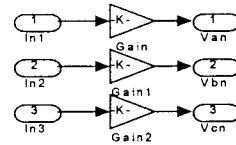


그림 12. 극전압 블록도  
Fig 12. Pole voltage block diagram

#### 2.2.4.2 상전압 블록

식 (13)는 스위칭 함수( $S_a, S_b, S_c$ )와 상전압과의 관계를 나타낸 것으로 그림 13과 같이 모델링 할 수 있다.

$$V_{as} = \frac{V_{dc}}{3} (2S_a - S_b - S_c)$$

$$V_{bs} = \frac{V_{dc}}{3} (2S_b - S_c - S_a)$$

$$V_{cs} = \frac{V_{dc}}{3} (2S_c - S_a - S_b)$$

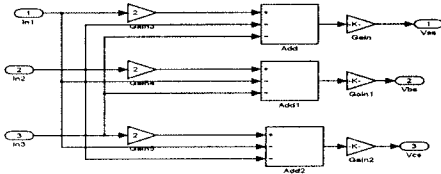


그림 13. 상전압 블록도  
Fig 13. Phase voltage block diagram

#### 2.2.4.3 오프셋전압 블록

식 (14)는 스위칭 함수와 오프셋전압과의 관계를 나타낸 것으로 그림 14와 같이 모델링 할 수 있다.

$$V_{on} = \frac{1}{3} (V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) = \frac{V_{dc}}{6} (2S_a + 2S_b + 2S_c - 3)$$

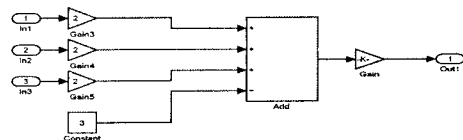


그림 14. 오프셋전압 블록도  
Fig 14. Offset voltage block diagram

### 2.3 PMSM의 전기적인 모델링 블록

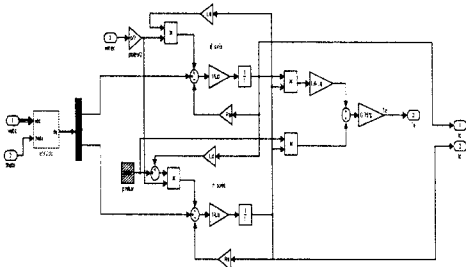


그림 15. PMSM 전기적인 모델링 블록도  
Fig 15. Electrical modeling of PMSM block diagram

먼저, 3상 인버터에서 입력 받은 출력 상전압은 식 (15)를 이용하여 2상 동기 좌표로 변환되고, 그림 16과 같이 모델링 하였다.

$$\begin{bmatrix} v_{de} \\ v_{qe} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad (15)$$

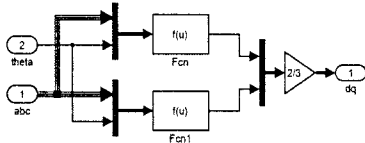


그림 16. 3상 정지좌표계를 2상 동기좌표계로 변환하는 블록도

Fig 16. 3-phase stationary reference frame to 2-phase synchronous reference frame transformation block diagram

영구자석 동기전동기의 전압방정식은 식 (16), 식 (17)과 같다.

$$V_{de} = Ri_{de} + L_d \frac{di_{de}}{dt} - \omega_m \frac{P}{2} \lambda_{qe} \quad (16)$$

$$V_{qe} = Ri_{qe} + L_q \frac{di_{qe}}{dt} + (\omega_m \frac{P}{2} \lambda_{de} + \phi_{PM}) \quad (17)$$

여기서,  $i_{de}$ ,  $i_{qe}$ 는 동기좌표계 d, q축 전류,  $L_d$ ,  $L_q$ 는 d, q축 인덕턴스,  $\omega_m$ 는 회전자 속도,  $\phi_{PM}$ 은 영구자석의 자속이다.

PMSM에서 발생하는 순시토크는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3P}{2} \left[ (L_d - L_q) i_{de} i_{qe} + \phi_{PM} i_{qe} \right] \quad (18)$$

### 2.4 PMSM의 기계적인 모델링

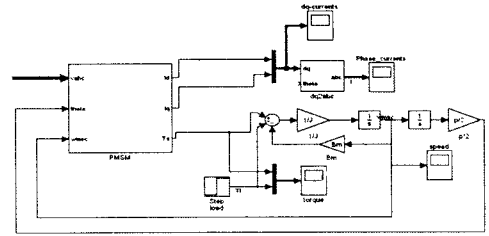


그림 17. PMSM의 기계적인 모델링 블록도  
Fig 17. Mechanical modeling of PMSM block diagram

PMSM의 기계적인 방정식은 식 (19)와 같고 그림 17과 같이 모델링 하였다.

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (19)$$

여기서,  $T_e$ 는 전기적인 토크,  $T_L$ 은 부하 토크,  $B$ 는 마찰계수,  $J$ 는 관성계수이다.

전기각과 기계각의 관계는 극수 P에 따라 식 (20)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\theta_{elec} = \frac{P}{2} \theta_{mech} \quad (20)$$

### 3. 시뮬레이션 파형과 파라미터

PMSM 모델링 각각의 블록에서 정상적으로 시뮬레이션 되어 출력된 파형을 크게 3가지로 나눌 수 있다.

그림 18, 그림 19, 그림 20은 SVPWM 제어 블록에서의 출력파형 이고, 그림 21, 그림 22, 그림 23은 3상 인버터에서의 출력파형이다. 그리고 그림 24, 그림 25는 PMSM의 전기적인 모델링과 기계적인 모델링에서의 출력파형이고, 표 2은 PMSM의 파라미터이다.

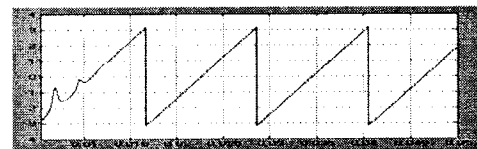


그림 18. 전기각 파형  
Fig 18. Waveform of mechanical position angle

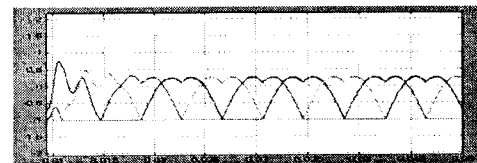


그림19. 지령전압 파형  
Fig 19. Voltage reference waveform

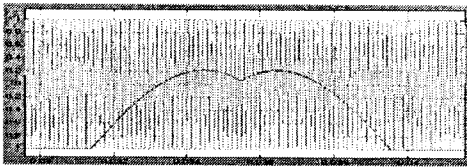


그림 20. 3상 인버터 게이트 신호를 만들기 위한 지령 전압과 삼각파 비교파형  
 Fig. 20. Composition of voltage reference and carrier waveform



그림 21. 3상 인버터의 출력 상전압 파형  
 Fig. 21. 3-phase inverter phase voltage waveform

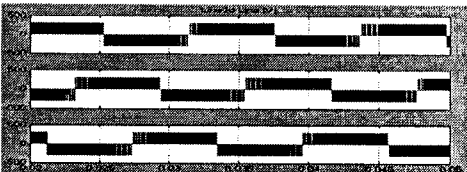


그림 22. 3상 인버터의 출력 선간전압 파형  
 Fig. 22. 3-phase inverter line to line voltage waveform

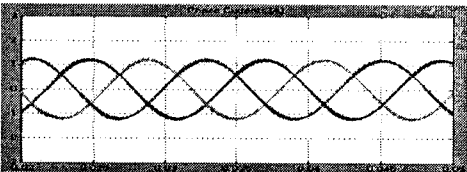


그림 23. 3상 인버터의 출력 상전류 파형  
 Fig. 23. 3-phase inverter phase current waveform

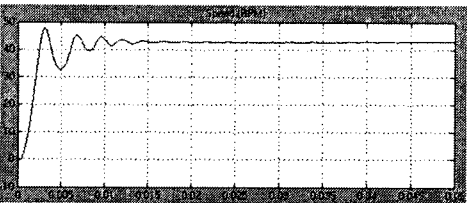


그림 24. 지령 속도가 45rpm일 때 PMSM의 속도파형  
 Fig. 24. Speed waveform of PMSM when the speed reference is 45 rpm

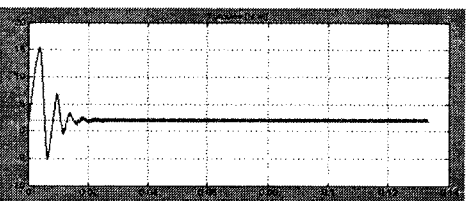


그림 25.  $3[N \cdot m]$ 의 부하가 인가시 추정 토크 파형  
 Fig. 25. The estimated Torque waveform when the  $3[N \cdot m]$  load is applied

표 2. PMSM Model Parameter

$T_L$	$3[N \cdot m]$
$B_m$	0
$J$	$0.0008[kg \cdot m^2]$
$L_d$	$0.031947[H]$
$L_q$	$0.031947[H]$
$P$	8 pole
$R_a$	3.3772
$V_{dc}$	300[V]
$\phi_{PM}$	$0.175[Wb]$

#### 4. 결론

본 논문에서는 Matlab/Simulink를 이용하여 SVPWM 기법을 3상 인버터에 적용하여 영구자석 동기전동기에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

영구자석형 동기전동기 구동을 위해 벡터 제어방식을 사용하였으며 SVPWM기법으로 고조파 왜형을 감소와 선형영역 증가를 확인하였다. Matlab/Simulink를 사용해서 전동기 수식을 표현 하였으며, 시뮬레이션을 통하여 속도와 토크제어에 영향을 주는 성분에 대하여 분석하였다.

#### 참고 문헌

- (1) 김상훈, "DC 및 AC 모터 제어", 북두출판사, 1993.11.22. 제 10-902호
- (2) 이동희, 오석규, "디지털 구현에 의한 SVPWM 인버터의 출력 특성 해석, 진주산업대논문집 39, pp.71-88, 2000
- (3) 이두복, "마이크로프로세서에 의한 영구자석형 동기 전동기의 벡터제어", 산업기술 제 3편, pp.685-689
- (4) 임종수, "Simulink Power", 도서출판 아진, 제300-1995-56호
- (5) 설승기, "전기기기제어론", 도서출판 브레인 코리아, 2002
- (6) 음두성, 서영수, "유도전동기의 구동을 위한 인버터와 공간전압벡터 PWM에 대한 모델링", Journal of the Research Institute of Industrial Technology Volume 19, pp.60-64, 2000
- (7) 이재도, 황재호, 이학주, 김영록, 이기흥, 성세진, "Simulink를 이용한 공간전압벡터 PWM 인버터 모델링 및 시뮬레이션", 전력전자 학술대회 논문집, pp.413~416, 2000.7.19-22
- (8) Iqbal, Atif, Lamine, Adoum, Ashraf, Mohibullah, Imtiaz, "Matlab/Simulink Model of Space Vector PWM for Three-Phase Voltage Source Inverte", IFEMC, 2006, pp.1096-1100