

## Simulink를 이용한 공간전압벡터 PWM 인버터 모델링 및 시뮬레이션

이재도 황재호 이학주\* 김영록\*\* 이기홍\*\*\* 성세진  
 충남대학교 전기공학과 \*한전 전력연구원 \*\*수영전기(주) \*\*\*대한주택공사

## Space Voltage Vector PWM Modeling and Simulation Using Simulink

Lee, JaeDo Hwang, JaeHo Lee, HakJu\* Kim, YoungNok\*\* Lee, KiHong\*\*\* Seong, SeJin  
 Dept. of Electrical Engineering Chungnam Nat'l University  
 \* Korea Electric Power Research Institute \*\*Electric Su-Young  
 \*\*\*Korea National Housing Corp.

## ABSTRACT

본 논문에서는 유도전동기 속도 및 토크 제어시 고조파의 왜형률을 감소시키고, 디지털 구현이 용이하며 선형제어 영역을 증가시킬 수 있는 스위칭 방식으로 Space voltage Vector PWM(Pulse Width Modulation) 설명하였으며, 시뮬레이션하기 위한 user\_tool로써 Matlab/ Simulink를 이용하여 SVPWM을 구현하는 방법을 설명하였다. 결과적으로 개루프 운전 시 유도기에 인가되는 기준전압을 각각 비과변조와 과변조 시 전압비율 변경방식을 사용하여 나타나는 응답으로 가상스위칭 시간  $T_1, T_2, T_0$ 와 속도, 상전류, 토크 응답을 알아보았다.

## 1. 서 론

유도전동기 제어에 있어서 원하는 속도 및 토크 응답을 얻어내기 위해 전동기에 유입되는 전류가 정현파를 유지할 수 있도록 정밀한 전류제어가 요구된다. 전류제어는 주로 전압형 인버터에 의해 제어되며 인버터의 스위칭 게이트 신호 발생은 전압변조가 필요하다. 전압변조는 삼각파 비교 PWM, 공간전압벡터(Space voltage Vector) PWM 기법등을 통해 실현하고 있으나, SVPWM은 타 방식에 비해 고조파의 왜형률을 감소시키고, 디지털 구현이 용이하며 선형제어 영역을 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 먼저 SVPWM의 스위칭 이론 및 각 섹터에 따른 스위칭 순서와 방향에 대해 설명하였고, 마지막으로 Matlab/ Simulink를 이용하여 공간벡터 PWM블럭화, 인버터를 통해 유도기에 전압을 인가하였다. 결론적으로 본 논문에서 구현한 공간전압벡터 PWM 인버터 블럭 모델의 유효성을 보이기 위해 개루프 시스템에 기준전압의 변조율을 각각 0.83과 1.11로 하여 시뮬레이션한 스위칭 시간과 출력파형으로 속도, 상전류, 토크파형을 비교하였다.

## 2. 본 론

## 2.1 공간전압벡터 PWM

공간전압벡터 PWM 인버터의 출력전압은 기준전압  $V_{ref}$ 의 위치에 따라 서로 다른 7개의 전압벡터와 이에 대응하는 서로 다른 8개의 스위칭상태(000), (100), (110), (010), (011), (001), (101), (111)로 가정할 수 있다.<sup>[1]</sup> 그림 2.1은 일반적인 인버터 스위칭 상태에 따른 출력전압을 나타낸다. 스위칭 상태는 유효전압벡터  $V(1) \sim V(6)$ 과 영전압 벡터  $V(0), V(7)$ 로 구분할 수 있으며, 부하의 임피던스가 모두 일정하다고 가정할 때, 한 상에 인가되는 최대 전압은  $\frac{2}{3} V_{dc}$ 가 된다. 공간전압벡터 PWM 방식에서는 인버터의 8가지 스위칭상태에 따른 출력전압을 벡터도로 표시하면 그림 2.2와 같이 정지좌표계  $\alpha, \beta$ 축에  $60^\circ$  위상차를 갖는 정육각형을 형성하게 된다.

그림 2.2에서와 같이 섹터 II에 기준전압벡터  $V_{ref}$ 가 놓이면 근접한 전압벡터  $V(2)$ 와  $V(3)$  그리고, 영전압 벡터  $V(0), V(7)$ 의 시간적인 합성으로 한 샘플링 시간 내에서 생성될 수 있다. 각 유효전압 벡터의 가상스위칭 시간을 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$\int_0^{T_s} V_{ref} dt = \int_0^{T_1} V_n dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} V_{n-1} dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} V_0 dt \quad (1)$$

기준전압  $V_{ref}$ 은 입력되는 3상전압을 정지좌표계  $\alpha, \beta$ 축으로 변환하여 합성한 값으로 식(2)와 같다.

$$\begin{cases} V_{ref} = V_\alpha^s + jV_\beta^s \\ |V_{ref}| = \sqrt{V_\alpha^s{}^2 + V_\beta^s{}^2} \\ \theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_\beta^s}{V_\alpha^s}\right) \end{cases} \quad (2)$$

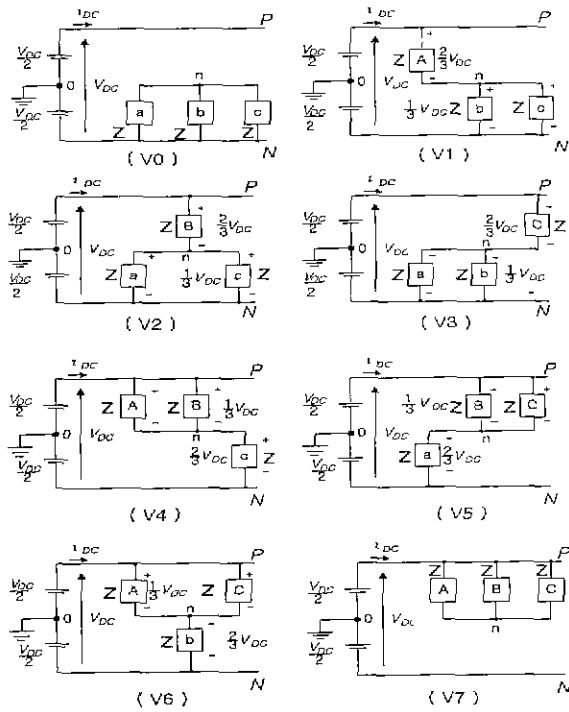


그림 2.1 스위칭 상태에 따른 출력 전압 분배도

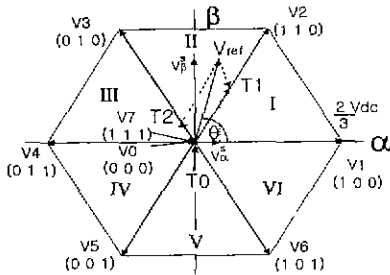


그림 2.2 인버터의 출력전압 벡터

스위칭 주기가 매우 짧다면 스위칭 주기 내에서 V(2)와 V(3)는 각각 일정하다고 간주할 수 있으며 V(0)는 영벡터이므로 식(1)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ref} T_s = V(7) \frac{T_0}{2} + V(2) T_1 + V(3) T_2 + V(0) \frac{T_0}{2} \quad (3)$$

여기서 V(0), V(7)은 영전압이므로 식(3)은 다음과 같이 식(4)와 같다.

$$V_{ref} = \frac{T_1}{T_s} V(2) + \frac{T_2}{T_s} V(3) \quad (4)$$

식(5)와 같이 기준벡터전압  $V_{ref}$ 은 정좌표계의  $\alpha, \beta$ 로 변환한다.

$$\begin{cases} V_{\alpha}^s = -|V_{ref}| \cdot \sin(\theta) \\ V_{\beta}^s = |V_{ref}| \cdot \cos(\theta) \end{cases} \quad (5)$$

유효전압벡터 V(2), V(3)를 인가하는 시간 T1, T2와 영전압벡터 V(0), V(7)를 인가하는 시간 T0는 식(6)에 의해 결정된다.<sup>[2]</sup>

$$\begin{cases} T_1 = \frac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \left[ V_{\alpha}^s \cos\left(\frac{m\pi}{3}\right) + V_{\beta}^s \sin\left(\frac{m\pi}{3}\right) \right] \\ T_2 = \frac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \left[ -V_{\alpha}^s \cos\left(\frac{(m-1)\pi}{3}\right) - V_{\beta}^s \sin\left(\frac{(m-1)\pi}{3}\right) \right] \\ T_0 = T_s - T_1 - T_2 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 m은 기준벡터 전압  $V_{ref}$ 이 위치한 섹터로써  $V_{\alpha}^s, V_{\beta}^s$ 의 크기와 식(2)에서 계산한  $\theta$ 에 의해 선정한다.

## 2.2 스위칭 시간계산

공간전압벡터 PWM은 식(6)에 의해 인버터의 실제 게이팅 시간을 결정하게 되는데, 표 1은 가상스위칭 시간을 재합성하여 계산한 실제 스위칭 시간이다.

	On이 되는 시간		Off가 되는 시간
$T_H$	$T_0/2$	$T_k$	$T_0/2 + T_1 + T_2$
$T_M$	$T_0/2 + T_1$	$T_m$	$T_0/2 + T_2$
$T_M^-$	$T_s - (T_0/2 + T_1)$	$T_m^-$	$T_s + T_0/2 + T_1$
$T_L$	$T_0/2 + T_1 + T_2$	$T_l$	$T_0/2$

표 2 실제 스위칭 시간

섹터 I, III, V와 섹터 II, IV, VI의 스위칭 패턴이 다른데 짝수 섹터의 스위칭을 연속적으로 하기 위해 영전압벡터 V(7)으로 스위칭을 시작하여야 한다. 또한 On, Off 상태가 서로 일치하지 않는 것은 전압 불평형을 방지하기 위함이다.

섹터 I에서는 V(0) → V(1) → V(2) → V(7) → V(2) → V(1) → V(0)의 순서로, 섹터 II는 V(0) → V(3) → V(2) → V(7) → V(2) → V(3) → V(7)에 의해 스위칭 시간을 구한다.

이와 같은 스위칭을 위해서 특히 짝수 섹터에서는  $T_M, T_m$  대신에 표1의  $T_M^-, T_m^-$ 에 의해 스위칭 시간을 계산한다.

## 2.3 파변조

기준전압이 6각형 외부에 위치한 경우에는 어떠한 벡터의 조합으로도 전압을 생성할 수 없다. 이러한 경우에는 인버터에서 생성할 수 있는 전압 중에서 기준전압에 가장 근사한 전압을 발생시키는 수 밖에 없는데 이러한 경우를 파변조라 한다.<sup>[3]</sup> 본 논문에서는 파변조시 대책을 위해 비교적 간단하게 구현할 수 있는 전압비율 변경 방식을 구현하였다. 샘플링 시간  $T_s$  보다  $T_1, T_2$ 을 합한 시간이 길다고 가정하면 새로운 유효시간을 계산하게 되는데 다음 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 T_1' &= T_s \times \frac{T_1}{(T_1 + T_2)} \\
 T_2' &= T_s \times \frac{T_2}{(T_1 + T_2)} \\
 T_0' &= T_s - T_1' - T_2'
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

### 3. 시스템 모델링

본 장에서는 2장에서 SVPWM 이론을 바탕으로 한 수식을 Matlab/Simulink를 이용하여 모델링하였다. 모델링 블록은 크게 섹터블럭, 가상스위칭 시간 및 과변조 모델블럭, 게이트 신호발생 블록으로 나눌 수 있다.

#### 3.1 Sector Block

SVPWM에서는 현재 기준전압의 위치 선정이 중요하다. 따라서 식(2)를 이용하여 모델링을 하면 그림3.1과 같은 섹터 선정 블록을 구현할 수 있다.

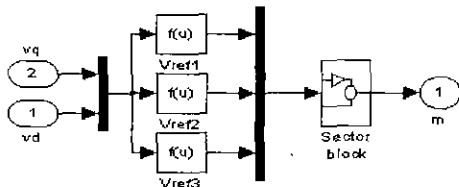


그림 3.1 3상 입력전압을 이용한 섹터 선정

#### 3.2 가상 스위칭 시간 및 과변조 모델

스위칭 시간을 계산하기 위해 가상 스위칭 시간  $T_1, T_2, T_0$ 와, 실제 스위칭 시간  $T_H, T_M, T_M^-, T_L$ 을 계산하는 Block을 구현한다. 그림3.2는 가상 스위칭 시간을 구하는 block이다

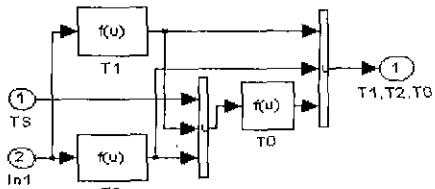


그림 3.2 가상스위칭 블럭

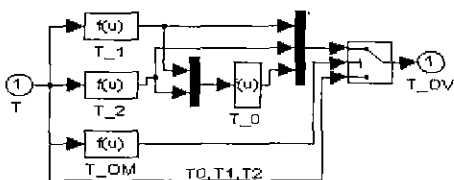


그림 3.3 과변조 시 동작 블럭

과변조시 전압비율 변경으로써 식(7)을 블록화 한

것은 그림3.3으로 과변조시에는  $T_{OM}$  블록이 동작하여  $T_1, T_2, T_0$ 가 인가되고, 비과변조에는  $T_0, T_1, T_2$ 가 인가된다. 그림 3.4는 실제 스위칭 시간을 계산하는 block으로 표1을 이용하였다. 출력단자의 게이트신호 순서는 위에서부터  $T_h, T_m, T_l, T_H, T_M, T_L, T_M^-, T_m^-$ 이다. 시뮬레이션을 실행하여 한 섹터를 보면  $T_M$ 에서  $T_m$ 까지 시간간격이 증가하고, 반면에  $T_M^-$ 에서  $T_m^-$ 까지 시간간격은 감소하다. 만약 짝수 섹터에서  $T_M$ 과  $T_m$ 을 사용하면, 연속적인 정현파가 발생하지 않고 왜곡된다.

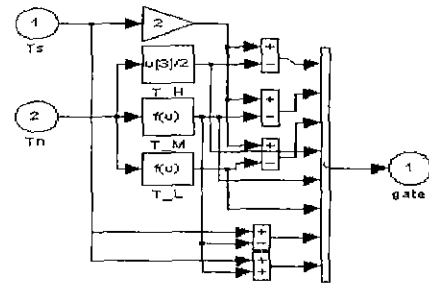


그림 3.4 실제 스위칭 시간계산 block

#### 3.3 게이트 신호 발생 Block

그림3.5는 인버터에 인가되는 신호를 발생하는 블록이며, 그림안의 그래프는 블록에서 발생하는 3상에 대한 신호를 보이고 있다.

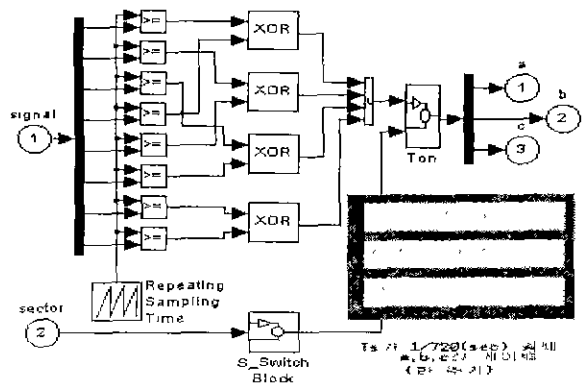


그림 3.5 공간전압벡터 PWM 게이트 신호 발생기

### 4. 시스템 시뮬레이션

유도전동기에 SVPWM 인버터를 연결하고 변조지수는 0.83과 1.11로 각각 150V와 200V인 사인파 최대치를 공급한다. 외부 부하토크는 0.8sec시 50%, 1.2sec시 100%을 1.6sec에는 50%을 인가하였다. 그림 4.1은 공간전압벡터 PWM 인버터 구동 유도전동기의 시스템 모델이다. 표3은 유도기 사양을 나타내고 있다. 그림 4.2은 비변조시와 과변조시의  $T_1, T_2, T_0$  스위칭 시간에 대한 그래프이다. 그

림4.3은 비과변조시, 그림4.4는 과변조시 속도, 상전류, 토크응답을 나타내고 있다.

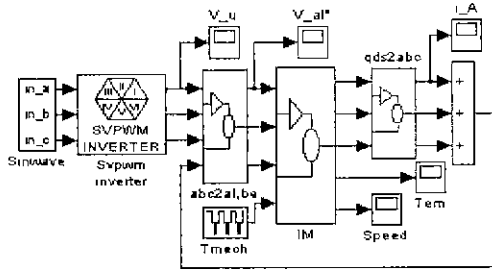
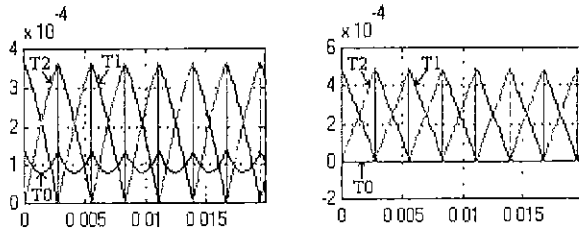


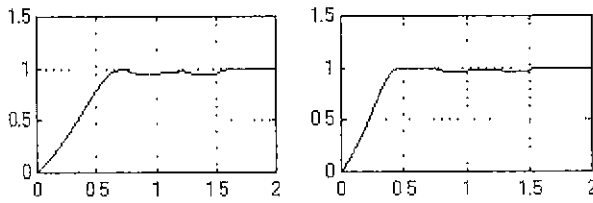
그림 4.1 시스템의 전체 구성도



(a) Vref=150일 때

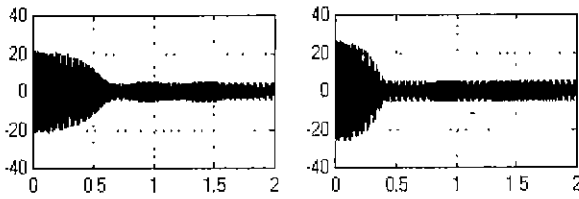
(b) Vref=200일 때

그림 4.2 비과변조시와 과변조시 T0, T1, T2



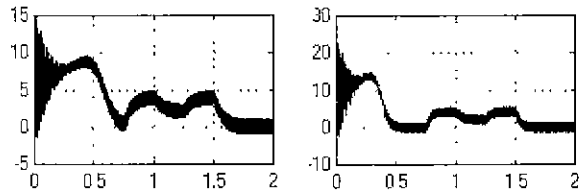
(a) 속 도

(a) 속 도



(b) 상 전 류

(b) 상 전 류



(c) 토 크

(c) 토 크

그림4.3 Vref =150 일 때 시스템 응답

그림4.4 Vref =200 일 때 시스템 응답

유도전동기 파라미터					
마력	1[HP]	Rs	3.35[Ω]	Rr	1.99[Ω]
Ls	6.94[mH]	Lr	6.94[mH]	Lm	163.73[mH]
J	0.1[kg-m <sup>2</sup> ]	P	4극		

표 3 유도기 및 인버터 시뮬레이션 조건

## 5. 결론

본 논문에서는 SVPWM를 Matlab/Simulink로 구현하였다. 시뮬레이션 결과, SVPWM 인버터를 유도전동기에 연결시 기준전압 변조지수의 가변에 따른 출력과형을 비교 하였을 때, 비과변조에 비해 과변조시 전압비율 변경방식을 사용하였을 때 속도 응답, 상전류, 토크응답이 과도상태에서 정상상태로 빨리 전이되는 것을 알 수 있었다. 따라서 SVPWM 방식은 과변조시라도 최대 효율 운전을 할 수 있었다.

### 기호설명

- $V(n)$  전압벡터  $n=0, 1, 2, \dots, 7.$
- $V_{ref}$  기준전압벡터
- $V_{\alpha}^s$  정지좌표계  $\alpha$ 축 전압
- $V_{\beta}^s$  정지좌표계  $\beta$ 축 전압
- $\theta$  위상
- $T_s$  샘플링 시간
- $m$  색터  $m=1, 2, \dots, 6.$
- $T_1, T_2$  유효전압벡터  $V(n), V(n+1)$ 이 인가되는 시간
- $T_0$  영전압 벡터가 인가되는 시간
- $T_H, T_M, T_L$  실제 스위칭 ON시간
- $R_s, R_r$  유도기 고정자,회전자 저항
- $L_s, L_r$  유도기 고정자,회전자 누설 인덕턴스
- $L_m$  유도기 상호 인덕턴스
- $P$  극수

### 참고 문헌

- [1] Victor R. Stefanovic and Slobdan N, vukosavic "Space-Vector PWM Voltage Control With Optimized Switching Strategy" IEEE CD-Room
- [2] J.F.Moynihan,R.c.Kavanagh,M.G.Egan, and J.M.D Murphy "Indirect Phase Current Detection for Field Oriented Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive" EPE'91 Conf. Rec.No3, pp261-266 1991.
- [3] 윤덕용 "공간전압벡터 PWM 기법을 이용한 영구자석형 동기전동기의 속도제어" 1995. 2
- [4] 김준석, 설승기 "공간전압벡터PWM의 새로운 기법" 전기학회 논문지 44권 7호 pp865-874., 1995년 7월
- [5] Chee-Mun Ong "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/simulink"1998. PTR
- [6] Simulink User Guide, Math Works Inc., 1999.