

공간 전압벡터 PWM의 SIMULINK 시뮬레이션

이학주* 황재호** 조항신** 이재도** 성세진**
 * 한전 전력연구원 ** 충남대학교 전기공학과

A SIMULINK Approach to Space Voltage Vector PWM Simulation

Lee, HakJu* Hwang, JaeHo** Jo, HangShin** Lee, JaeDo** Seong, SeJin**

* Korea Electric Power Research Institute ** Dept. of Electrical Engineering Chungnam Nat'l University

Abstract - 전동기의 속도 및 토크제어 운전시 인버터 제어 방식으로서 최대 효과적인 전력을 사용할 수 있으며, 저차 고조파를 저감시키는데 효율적인 스위칭방식으로 공간전압벡터 변조(SVPWM)를 사용하고 있다. 따라서 많은 논문들이 SVPWM의 방식을 이용한 시뮬레이션을 하게 되는데, 본 논문에서는 최근 시뮬레이션에 많이 사용되고 있는 Matlab/Simulink를 이용하여 SVPWM 인버터를 구현, 이를 유도전동기 구동시스템에 적용하여 속도 및 토크 응답, 상전류 파형을 시뮬레이션 결과를 제시하여 본 논문에서 제안한 SVPWM 인버터의 블록 모델의 유효성을 보이고 있다.

1. 서 론

유도전동기 속도제어 시스템에서 벡터제어에 의해 발생된 기준전류를 전동기의 고정자에 공급하여 빠른 응답 특성을 얻기 위해, 성능이 우수한 전류제어형 인버터를 이용하고 있다. 인버터를 이용하여 정현파 전류를 제어하려면 고속의 스위칭 소자에 의한 펄스폭 변조법을 이용하여야 한다. 삼각파 비교방식, 히스테리시스 방식은 원리가 간단하고 구현이 용이한 장점이 있는 반면에 응답특성, 출력전류의 고조파 함유율 및 제어 선형성에서 미흡함이 있다. PWM 방식은 제어가 복잡하여 많은 연산이 요구되어 구현이 복잡하나, 다른 방식의 단점을 극복할 수 있다. 본 논문에서는 유도전동기 서보 제어시스템에 적용이 보편화된 SVPWM의 SIMULINK 모델을 제안하였으며, 이를 유도전동기 제어 시스템에 적용하여 시뮬레이션 하였다. 본 논문에서 제안한 방법의 시뮬레이션 결과를 통하여 전력변환회로와 전동기 통합 시스템의 개발, 평가 도구로 Matlab/Simulink를 유용하게 활용할 수 있음을 확인하였다.

2.1 공간전압벡터 PWM

3상 전압형 인버터는 스위치의 스위칭상태에 따라 6가지의 전압벡터를 출력할 수 있다. 여기서, 각상의 윗쪽 스위치가 턴온되면 "1", 아래쪽 스위치가 턴온되는 경우는 "0"을 의미한다. 또한, 각상의 스위치가 모두 "0"이거나 "1"이면 출력은 영전압이 되어 무효벡터가 된다. 인버터의 동작모드에서 출력전압을 벡터도로 표시하면 그림 1과 같이 정육각형을 형성하고, 전압 V(1) ~ V(6)은 인버터의 최대 출력전압이다. 정육각형 내부의 임의의 출력전압 벡터는 이것이 위치한 삼각형 두변에 해당하는 전압벡터를 이용하여 시간적으로 합성되고, 인가시간의 합이 샘플링주기보다 작으면 나머지 시간은 영벡터를 인가한다. 즉, 공간 전압벡터 PWM방식은 실제 스위칭 시간이 인버터가 출력할 수 있는 8개의 스위칭 상태를 기준으로 결정된다. 이는 실제 스위칭 패턴을 생성하기 위하여 벡터공간 상에서 기준전압벡터에 인접한 2개의 유효 스위칭 벡터를 선정하고, 각각의 벡터가 인가되는 시간을 한 주기의 평균으로 산출한다. 산출된 시간은 실제 스위칭 시간을 구하기 위하여 재합성 한다. 부하의 임피던스가 모두 일정하다고 가정할 때, 한 상에 인가되

는 최대 전압은 $\frac{2}{3} V_{dc}$ 가 된다. 공간전압벡터 PWM방식에서는 인버터의 8가지 스위칭상태에 다른 출력전압을 벡터도로 표시하면 그림 2.1과 같이 정지 좌표계 α, β 축에 60° 위상차를 갖는 정육각형을 형성하게 된다. 그림 2.1에서와 같이 섹터 II에 기준전압벡터 V_{ref} 가 놓이면 근접한 전압벡터 V(2), V(3) 및 영전압벡터 V(0), V(7)을 시간적으로 합성한 샘플링 시간 내에서 생성될 수 있다. 각 유효전압벡터의 가상스위칭 시간을 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

기준전압 V_{ref} 은 입력되는 3상전압을 정지좌표계 α, β 축으로 변환하여 합성한 값으로 식(2)과 같다.

$$V_{ref} = V_\alpha + jV_\beta$$

$$|V_{ref}| = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (2)$$

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

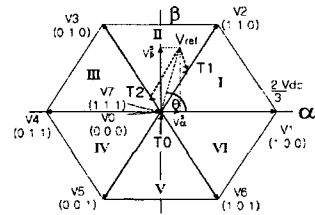


그림 2.1 인버터의 출력전압 벡터

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 영전압으로 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 정지좌표계의 α, β 로 변환한다.

$$V_\alpha = -|V_{ref}| \cdot \sin(\theta) \quad (5)$$

$$V_\beta = |V_{ref}| \cdot \cos(\theta)$$

유효전압벡터 V(2), V(3)를 인가하는 시간 T1, T2

와 영전압벡터 $V(0)$, $V(7)$ 의 인가시간 T_0 는 식(6)에 의해 결정된다.

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

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \left[-V_\alpha \cos\left(\frac{(m-1)\pi}{3}\right) - V_\beta \sin\left(\frac{(m-1)\pi}{3}\right) \right] \quad (6)$$

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2$$

여기서 m 은 기준벡터 전압 V_{ref} 이 위치한 섹터로써 V_α , V_β 의 크기와 식(2)에서 계산한 θ 에 의해 선정한다.

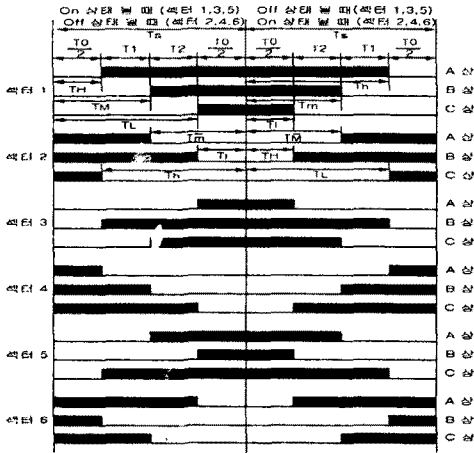


그림 2.2 SVPWM의 실제 게이팅 신호패턴

2.2 스위칭 시간의 계산

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

	On		Off
T_H	$T_0/2$	T_h	$T_0/2 + T_1 + T_2$
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 1 실제 스위칭 시간

그림 2.3과 같이 짝수 섹터의 연속적인 스위칭을 위하여 영전압벡터 $V(7)$ 로 스위칭을 시작하여야 한다. 또한 On, Off 상태가 서로 일치하지 않는 것은 전압 불평형을 방지하기 위해서이다. 즉, 섹터 I은 $V(0) \rightarrow V(1) \rightarrow V(2) \rightarrow V(7) \rightarrow V(2) \rightarrow V(1) \rightarrow V(0)$ 로, 섹터 II는 $V(0) \rightarrow V(3) \rightarrow V(2) \rightarrow V(7) \rightarrow V(2) \rightarrow V(3) \rightarrow V(7)$ 에 의해 스위칭 시간을 구한다. 이러한 스위칭 패턴을 위해 섹터에서는 T_M , T_m 대신에 표1의 T_M , T_m 에 의해 스위칭 시간을 계산한다.

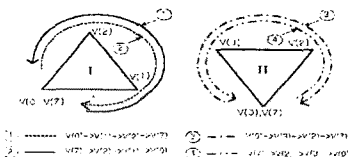


그림 2.4 스위칭 전압벡터 순서도

3. 시스템 모델링

공간전압벡터 PWM을 SMULINK에서 제공하는 블록 라이브러리에 의해 모델링하였으며, 공간전압벡터 PWM을 이용한 인버터에 의해 개루프 운전의 유도전동기 구동시스템의 모델링을 제안하고 있다.

3.1 섹터 선정

그림3.1은 3상 입력 전압을 정지좌표계 α, β 축으로 2상 변환하고 식(2)를 이용하여 섹터를 선정하기 위한 블록 모델이다.

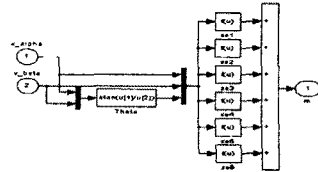


그림3.1 섹터 선정 Block

3.2 스위칭 시간의 계산

가상 스위칭시간 T_1, T_2, T_0 과, 실제 스위칭시간 T_H, T_M, T_m, T_L 을 계산하는 블록을 보면, 그림 3.2는 가상 스위칭 시간을 구하는 블록으로 식(6)의 내용을 $f(u)$ 에 적용하여 계산한다. 그림 3.3은 실제 스위칭 시간을 계산하는 블록모델로 표1을 이용하였다. 출력단자의 게이트신호 순서는 위에서부터 $T_h, T_m, T_l, T_H, T_M, T_m, T_L, T_M, T_m$ 이다. 시뮬레이션을 실행하여 한 섹터를 보면 T_H 에서 T_m 까지 시간간격이 증가하고, 반면에 T_M 에서 T_m 까지 시간간격은 감소하다. 만일 짝수 섹터에서 T_M 과 T_m 을 사용하게 되면, 연속적인 정현파가 발생하지 않는다.

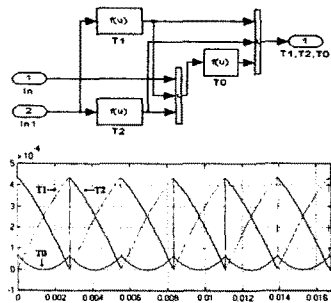


그림 3.2 유효벡터 스위칭 시간 계산

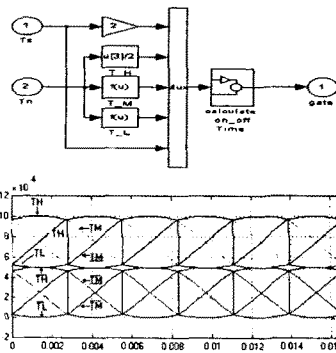


그림 3.3 실제 스위칭 시간의 계산

3 게이트 신호의 발생

실제 스위칭 시간을 연속된 게이트 신호로 발생하기 위해 On시간과 Off시간을 샘플링 시간 T_s 와 비교한 후, 서로 대응하는 On, Off스위칭 신호를 XOR함수를 이용하여 PWM 신호를 발생한다. 그림3.4와 같이 Repeating 함수를 사용하여 T_s 를 만들고, 실제 On, Off시간과 비교하기 위해 비교 함수를 사용하였다. 또한 XOR함수 블록을 이용하여 연속적인 게이팅 신호로 만들었다. 마지막으로, 섹터선정 블록에서 계산한 섹터 m 을 Ton 블록에 입력하여 섹터에 맞는 공간전압벡터 PWM 신호를 3상에 인가하도록 하였다.

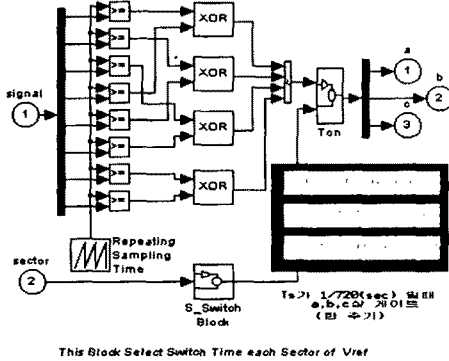


그림 3.4 공간전압벡터 PWM 게이트 신호 발생

4. 시뮬레이션 결과

그림 4.1은 공간전압벡터 PWM 인버터 구동 유도전동기의 시스템의 SIMULINK 모델이다. 시뮬레이션에 사용하고 있는 유도전동기의 파라미터는 표2와 같고, SVPWM 인버터는 $V_{dc} = 311[V]$, $V_{ref} = 180[V]$ 이며, 샘플링시간을 $100[\mu\text{sec}]$ 로 설정하였다. 부하토크는 0.8sec시 50%, 1.2sec시 100%를 1.6sec에는 50%를 인가하였다. 전체 시스템의 시뮬레이션 시간은 2[sec]로 하였다. 그림4.2 유도전동기에 교번전압을 인가한 경우 개루프 시스템의 동특성이며, 그림4.3은 공간전압벡터PWM 전압을 인가한 경우 개루프 시스템에서의 동특성이다.

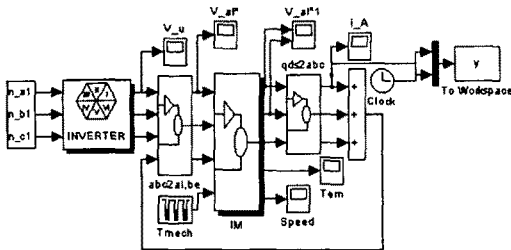


그림 4.1 시스템의 전체 구성도

Hp	1[HP]	Rs	3.35[Ω]
Ls	6.94[mH]	Lr	6.94[mH]
Rr	1.99[Ω]	Lm	163.73[mH]
J	0.1[kg-m ²]	P	4극

표 2 유도전동기 파라미터

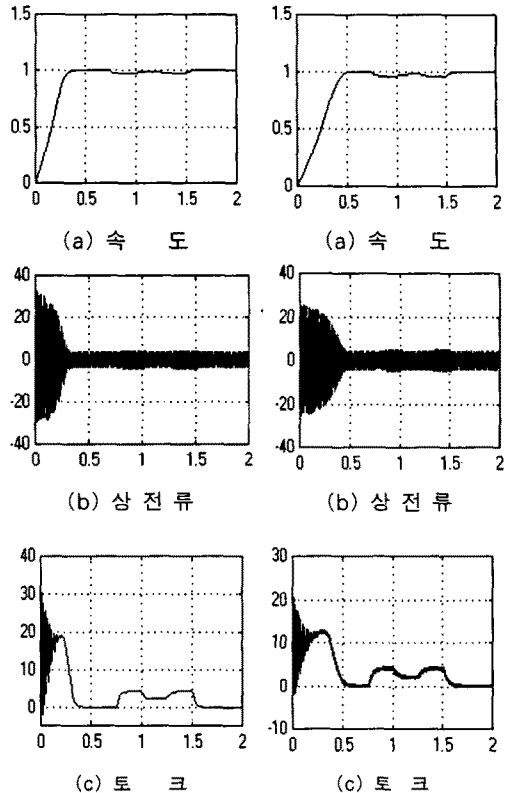


그림4.2 교번전압 인가시 시스템 응답

그림4.3 SVPWM 인버터 시스템 응답

5. 결론

본 논문에서는 SIMULINK가 제공하는 블록 라이브러리를 이용한 공간전압벡터 PWM인버터의 모델을 제안하였으며, 유도전동기 구동시스템 적용 시뮬레이션을 수행하고, 이를 교번전압을 직접 인가한 경우와 비교한 결과 거의 동등한 성능을 보이고 있음을 제시함으로써 제안한 모델의 유효성을 확인할 수 있었다. 또한, 전력변환회로와 전동기 통합 시스템의 개발 및 평가도구로써 Matlab/Simulink가 유용하게 활용될 수 있음을 확인 하였다.

[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 D EPE'91 Conf. Rec.No3, pp261-266 1991.
- [3] 김준석, 설승기 "공간전압벡터PWM의 새로운 기법" 전기학회 논문지 44권 7호 pp865-874., 1995.7
- [4] Chee-Mun Ong "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink" 1998. PTR
- [5] Simulink User Guide, Math Works Inc., 1999