

영구자석 직선형 리니어 동기전동기의 오프셋 전압에 의한 공간벡터 PWM의 구현

장석명, 박지훈, 장원범, 유대준
충남대학교 전기공학과

Realization of Space Vector PWM using Offset Voltage for PMLSM

Seok-Myeong Jang, Ji-hoon Park, Won-Bum Jang, Dae-Joon You
Dept. of Electrical Engineering Chungnam National Univ.

Abstract - This paper presents control pattern of air-cored slotless permanent magnet linear synchronous motor using voltage modulation method which is used space vector voltage modulation and offset voltage modulation.

1. 서 론

공장 및 사무자동화용 기기에서의 직선운동은 대부분 기존의 회전형 전동기와 스크류, 크랭크, 캠, 체인, 벨트 등과 같이 회전운동을 직선운동으로 변환하는 기구들로 시스템을 구성하여 구현한다. 따라서 시스템이 복잡해지고 기구에서의 손실에 따른 시스템 효율의 저하, 기구적인 한계에 의한 정밀도 저하, 운전속도의 제한 등을 초래한다. 그런데 리니어 전동기는 직접 직선추력을 발생하므로, 별도의 동력변환장치가 필요 없으며 회전형 모터에 비해 운전속도에 크게 제한을 받지 않는 등의 이점이 있어 응용분야가 점점 다양하며 광범위해지고 있다.[1]

영구자석 리니어 동기 전동기(이하: PMLSM)를 제어하는 방법으로 삼각파 비교 전압 변조 방식과 공간 벡터 전압 변조 방식 등이 있다. 삼각파 비교 전압 변조 방식은 지령전압과 삼각파를 비교하여 그 크기로 인버터 각상의 스위치를 조작하는 방식이고, 공간 벡터 전압 변조 방식은 지령 전압 벡터와 평균적으로 동일한 전압을 인버터의 유효 벡터들을 이용하여 합성하여 스위치를 조작하는 방식으로 삼각파 비교 전압 변조 방식에 비해 전류 고조파 성분을 크게 억제할 수 있음이 밝혀져 있다.[2]

본 논문에서는 PMLSM을 제어하기 위한 공간 벡터 전압 변조 방식의 원리와 방법을 설명할 것이고, 공간 벡터 전압 변조 방식을 이용한 방법과 오프셋 전압을 이용한 방식을 비교하고자 한다. 오프셋 전압을 이용한 방식은 기존의 삼각파 비교 전압 변조 방식 및 다양한 연속 또는 불연속 공간 벡터 전압 변조 방식도 적절한 오프셋 전압을 선택함으로써 구현될 수 있다. 그러므로 공간 벡터 전압 변조 방식과 오프셋 전압을 이용한 방식으로 구현된 특성을 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 비교하여 제어특성을 제시하고자 한다.

2. PMLSM의 전압 변조 방식

2.1 PMLSM의 모델링

그림 1은 실험에 사용된 PMLSM 모델을 보여주고 있다. 그림 1의 PMLSM 모델은 공간 벡터 전압 변조 방식을 이용하여 개회로(open-loop) 특성을 실험하였으며, 그림 2는 제작된 PMLSM의 등가 모델로 추력 특성 및 제어 효율을 높이기 위해 halbach 배열을 갖는

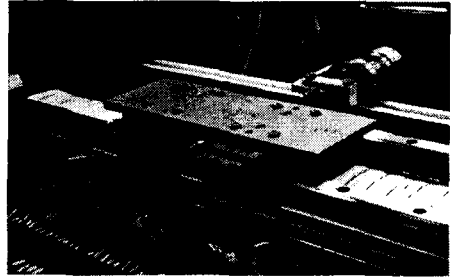


그림 1 제작된 PMLSM 모델

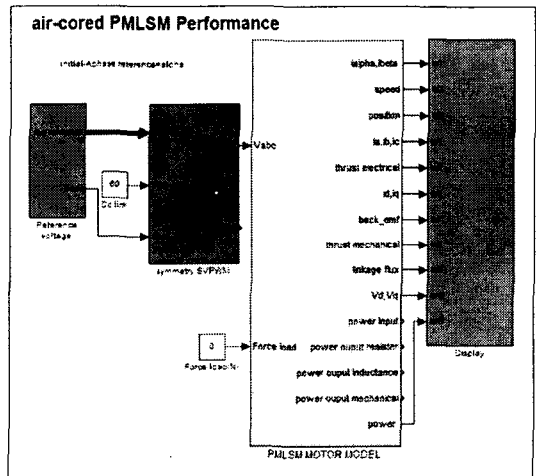


그림 2 제작된 PMLSM의 시뮬레이션 등가 모델(오프셋 전압 변조 방식 인버터)

공심형 슬롯리스 PMLSM에 대해 해석적 방법으로 유도된 매개변수와 d축, q축으로 분리된 관계식을 통해 오프셋 전압 변조 방식을 이용한 인버터 설계를 제시한다. 고정자의 3상 좌표에 대해 2상 좌표 변환된 d, q축 전압 방정식은 식(1)과 같다.

$$V_d = R_s i_d + L_s \frac{d}{dt} i_d - \frac{\pi}{\tau} u_s L_s i_q \quad (1.a)$$

$$V_q = \frac{\pi}{\tau} u_s L_s i_d + R_s i_q + L_s \frac{d}{dt} i_q + \frac{\pi}{\tau} u_s \lambda_f \quad (1.b)$$

영구자석에 의한 쇄교 자속 λ_f 는 역기전력 상수로 표현되며, 정격 속도 u_s 는 회전형 기기에 대한 각속도 $\omega = \pi u_s / \tau$ 로 표현된다.

표 1 실험 모델의 회로정수 및 정격

항목	기호	크기(단위)
극 간격	τ	0.051(m)
상당 동기 저항	R_s	17.2(Ω)
상당 동기 인덕턴스	L_s	0.01749(H)
영구자석 쇄교자속	λ_f	0.1274(V Φ)
정격 속도	u_s (2[Hz])	0.204(m/sec)
정격 상전압	V_s	34.5[V]
정격 상전류	i_s	2[A]
base 상전압	V_{base}	34.5[V]
base 상전류	i_{base}	2.828[A]
base 속도	u_{base}	0.288(m/sec)
DC link 전압	V_{DC}	60[V]

표 1은 오프셋 전압에 의한 공간 벡터 전압 변조 방식을 구현하기 위한 회로정수 및 정격을 나타내고 있다. 식(1)과 모델의 회로정수에 의해 base 상전압, 상전류, 속도 등을 구할 수 있다. 또한 제작된 PMLSM의 제어 시 정격에 대한 base를 $\sqrt{2}$ 의 크기로 선정하였으며, 마찰력은 고려하지 않는다.

2.2 공간 벡터 전압 변조 방식

공간 벡터 전압 변조에 의한 전압 변조 방식이 주어진 직류단 전압에서 가장 큰 교류 전압을 얻을 수 있다는 점에서 다른 어떠한 종류의 전압 변조 방식보다도 우수하다고 알려져 있다.[2]

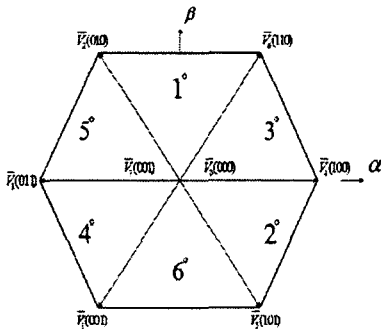


그림 3 인버터의 출력 전압 벡터

그림 3은 스위칭 함수에 따른 공간 전압 벡터를 나타내고 있다. 이 육각형의 꼭짓점을 형성하는 전압 벡터 $V_n(XXX)$ 은 인버터의 최대 출력 전압을 나타내는 것이며, 숫자로 표현된 것은 각각의 섹터를 나타내고 있다. 그림 4는 공간 벡터 전압 변조 방식의 방법을 설명하는 것으로 지령 전압 벡터가 섹터 3에 위치한 경우 한 주기 내에서 기준 전압 벡터와 평균적으로 동일한 전압을 인버터의 유효 벡터를 이용하여 합성해내는 것을 의미한다. 즉, 지령 출력 전압 벡터 V_{ref} 가 주어진 경우 일정 주기(T_s)동안 지령 전압 벡터에 가장 가까운 두 유효 전압벡터(V_n, V_{n+1})와 영벡터(V_0, V_2)를 이용하여 평균적으로 전압 지령 벡터와 동일한 전압을 발생시키는 것이고, 이것은 식(2)와 같다.[3]

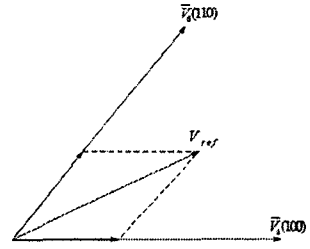


그림 4 벡터 합성을 통한 출력 전압 벡터

$$T_4 = \frac{T}{2V_{dc}}(3V_{sref} - \sqrt{3}V_s \beta_{ref}) \quad (2.a)$$

$$T_6 = \sqrt{3} \frac{T}{V_{dc}} V_s \beta_{ref} \quad (2.b)$$

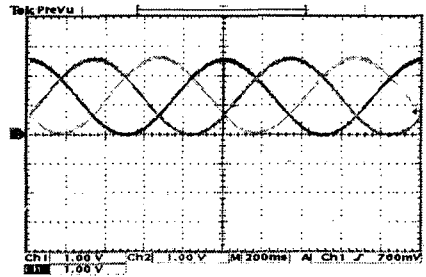


그림 5 base 상전압 파형

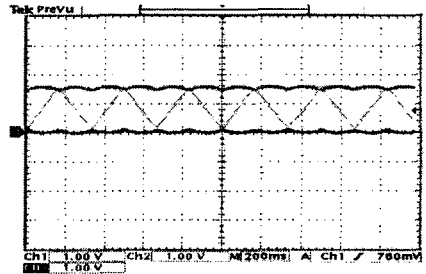


그림 6 base 상전압에 대한 풀전압 지령치

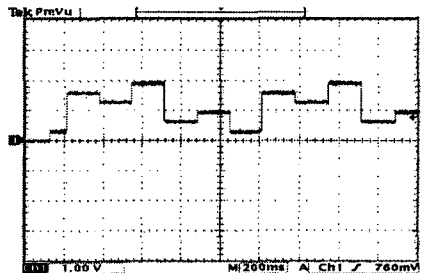


그림 7 공간 벡터 전압 변조 방식을 위한 섹터

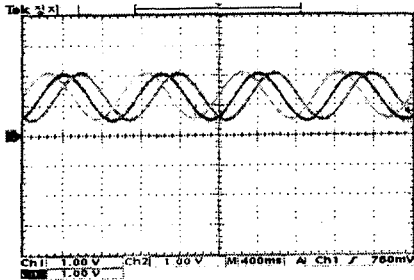


그림 8 게이팅 인가시간 결정 파형

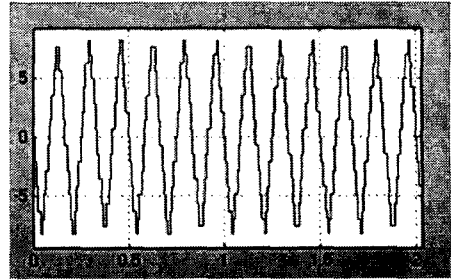


그림 10 오프셋 전압

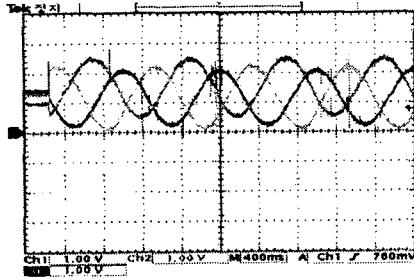


그림 9 a, b, c. 상전류 파형

그림 5~9는 공간 벡터 전압 변조 방식을 이용한 실험 결과 파형이다. 실험에 사용된 프로세서는 고속의 처리 속도를 TI사의 TMS320LF2406A의 DSP를 사용하였다.

2.3 오프셋 전압 변조 방식

오프셋 전압 변조 방식은 오프셋 전압을 이용하여 폴 전압을 결정한 후, 게이팅 인가시간을 직접적으로 계산하므로 간단하게 구현될 수 있으며 식(3)에 폴전압, 상 전압 및 오프셋 전압의 관계를 나타내었다.

$$V_{on} = V_{os} + V_{sn} \quad (3.a)$$

$$V_{bn} = V_{bs} + V_{sn} \quad (3.b)$$

$$V_{cn} = V_{cs} + V_{sn} \quad (3.c)$$

이때 상전압 지령치의 최대치, 중간치, 최소치를 식(4)와 같이 정의한다.

$$V_{max} = \max(V_{as}, V_{bs}, V_{cs}) \quad (4.a)$$

$$V_{mid} = \text{mid}(V_{as}, V_{bs}, V_{cs}) \quad (4.b)$$

$$V_{min} = \min(V_{as}, V_{bs}, V_{cs}) \quad (4.c)$$

식(4)로 정의된 상전압의 최대치, 중간치, 최소치로부터 공간 벡터 전압 변조 방식을 위한 오프셋 전압은 식(5)와 같다.

$$V_{sn} = -\frac{V_{max} + V_{min}}{2} \quad (5)$$

식(5)에 의해 구현된 오프셋 전압은 그림 10과 같다. 그림 11은 그림 10의 오프셋 전압을 이용한 지령전압, 상전류, d, q축 전압-전류, 정지좌표계의 alpha, beta 축 전류 그리고 전동기의 속도가 수렴해 가는 것을 볼 수 있다.

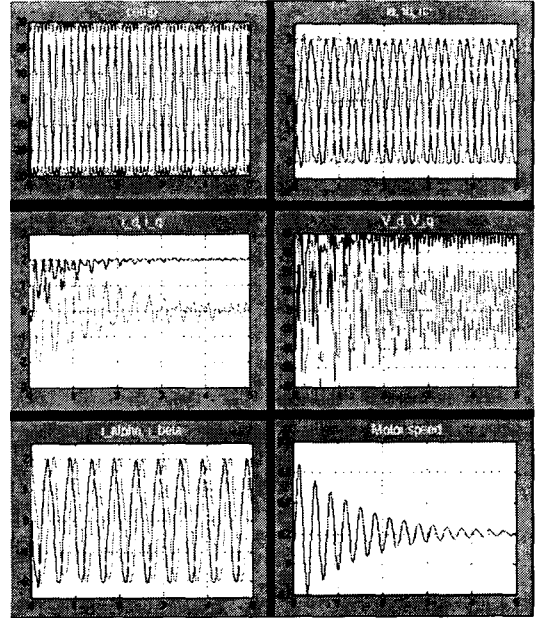


그림 11 오프셋 전압을 이용한 시뮬레이션 결과

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 공간 벡터 전압 변조 방식 및 오프셋 전압을 이용한 공간 벡터 전압 변조 방식의 구현 과정과 결과를 비교하였다. 기존 방식의 경우 주어진 상 전압 지령치로부터 지령 전압 벡터가 위치한 섹터를 판별하기 위해서는 상전압 지령치 중 최대치, 중간치, 최소치가 어느 상의 상전압인지를 판별해야 하고, 섹터별로 구분한 유효 벡터 인가 시간을 계산하고, 전압 변조 방식 및 섹터에 따라 게이팅 인가시간을 계산하는 반면에, 오프셋 전압 방식은 상전압의 최대치 및 최소치만 판별하고, 간단한 연산만으로 오프셋 전압을 결정하고 폴전압으로부터 게이팅 인가시간을 계산한다. 결론적으로 기존의 방식은 섹터 및 전압 변조 방식을 일일이 고려하여 구현되는 반면에, 오프셋 방식은 섹터의 판별 없이 간단히 구현할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 윤인기, "PMLSM의 특성성 해석 및 디텐트릭 저감방안에 관한 연구", 충남대 석사학위 논문, 2001년 2월.
- [2] 설승기, 전기기기제어론, 브레인코리아, 2002년 10월.
- [3] Erwan Simon, "Implementation of a speed field oriented control of 3-phase pmsm motor using tms320f240", Texas Instruments, Sept. 1999.