

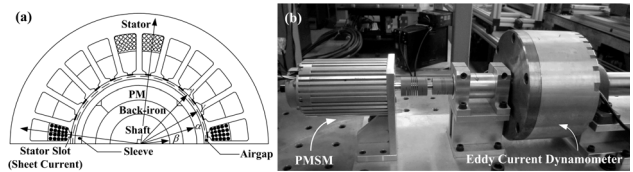
공간 벡터 PWM 스위칭 기법을 이용한 고속 영구자석 동기전동기의 구동특성

장석명*, 이운호*, 유대준*, 박지훈*, 김일중**, 성태현***
 충남대학교*, 호서대학교**, 전력연구원***

Dynamic Characteristic of High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor using the Space Vector PWM Switching Methods

SeoK-Myeong Jang*, Un-Ho Lee*, Dae-Joon You*, Ji-Hoon Park*, Il-Joong Kim**, Tae-Hyun Sung***
 Chungnam National University*, Hosoe University**, Korea Institute of Machinery and Materials***

Abstract - This paper presents dynamic characteristic of permanent magnet synchronous motor using the space vector PWM(pulse-width modulated) which are drove by offset voltage modulation. It is shown by simulation which has the modeling about PWM inverter and PMSM. The validity of dynamic simulation has been confirmed by the phase back-EMF from FEM(Finite Element Methods) under the equal restrict.



〈그림 1〉 (a)제시된 PMSM의 기하학적 모델, (b)제작된 PMSM

1. 서 론

오늘날 마이크로 터빈 발전기, 펌프 그리고 팬과 같은 전기기기의 응용분야에 있어서 고속전동기의 수요는 날이 증가하고 있으며 특히 높은 효율과 작은 부피를 장점으로 갖는 초고속 영구자석 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM)는 다양한 분야에서 응용의 범위를 넓혀 가고 있다.[1] PMSM의 효율적인 제어를 위한 전압변조 방식에는 크게 삼각파 비교 전압 변조 방식과 공간벡터 전압 변조 방식으로 구분되어 질 수 있다. 삼각파 비교 전압 변조 방식은 지령 전압과 삼각파를 비교하여 인버터 각 상의 스위치를 조작하는 방식이고, 공간 벡터 전압 변조 방식은 한 주기내에서 기준 전압 벡터와 평균적으로 동일한 전압을 인버터 유효 벡터들을 이용해서 합성해내는 것이다. 본 논문에서는 오프셋 전압을 이용하여 제작된 PMSM의 공간벡터 전압 변조 방식을 구현하고 이를 통해 PMSM의 동특성에 대해 알아보고자 한다.

2. PMSM 전압 변조 방식

2.1 PMSM의 모델링

그림 1은 제작된 PMSM의 모델을 보여준다. 평행 착자된 영구자석이 표면에 부착된 회전자를 갖는 구조로 회전자 외경(α)은 14.5[mm], 축반경 거리(β)는 11[mm], 고정자 내경(γ)은 17.3[mm], 슬롯수는 24, 극수는 4, 극당 상당 턴수는 28, 축 길이는 48[mm], 영구자석은 잔류자속밀도 1.23[T]인 NdFeB이다. 일반적으로 3상 전류의 합이 0이라는 조건하에 영구자석형 동기 전동기의 3상전압 방정식은 식(1) 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{d}{dt}L_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s + \frac{d}{dt}L_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s + \frac{d}{dt}L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 V_{as}, V_{bs}, V_{cs} 는 고정자의 상전압이고, i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 는 고정자 상전류, R_s 는 고정자 권선 저항, e_{as}, e_{bs}, e_{cs} 는 영구자석으로부터 고정자 권선에 유기되는 역기전력, L_s 는 누설인덕턴스와 상호 인덕턴스의 합으로 이루어진 동기 인덕턴스이다. 영구자석형 동기 전동기에 대한 동특성을 알아보기 위해서는 우선 식(2)로 표현되는 'clack and park transformation'이 전제되어야 한다.

$$\text{Transform matrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 1.5\pi) & \cos(\theta + 1.5\pi) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 1.5\pi) & -\sin(\theta + 1.5\pi) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

이 변환을 통해 3상 정지 좌표에서 2상 회전좌표로 제어의 기준축을 변

〈표1〉 제작된 PMSM의 파라미터

항목	값[단위]
상당 동기 저항	0.244[Ω]
상당 동기 인덕턴스	0.457e-3[H]
쇄교자석	0.0462[Wb]
DC link 전압	100[v]
관성계수	0.0000125
질량계수	2.3521e-4

화시킴으로서 일정전류를 통한 제어가 가능하고 동특성 방정식을 간략화 시킬 수 있으며 시간과 위치에 대한 의존에서부터 벗어 날 수 있다. 그러므로 변환된 정상상태에서 상전류에 대한 기본과 성분은 식(3),(4)와 같이 나타낼 수 있다.

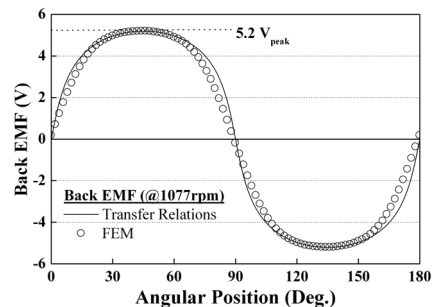
$$V_d = R_s i_d + L_s \frac{d}{dt} i_d \quad (3)$$

$$V_q = \omega_m L_s i_d + R_s i_q + L_s \frac{d}{dt} i_q + \omega_m \lambda_f \quad (4)$$

여기서 R_s 는 상 저항이고, L_s 는 자기인덕턴스와 상호인덕턴스가 포함된 상당 동기 인덕턴스이다. ω_m 은 기계적 각주파수이고, λ_f 는 영구자석 분포와 역기전력 상수로부터 유도된 쇄교자속의 최대값이다. i_d 와 i_q 는 d-q축 상전류 최대값에서 얻어진 직류이고, 이 식을 바탕으로 제어에 입각한 PMSM의 내부 모델링이 가능하다.

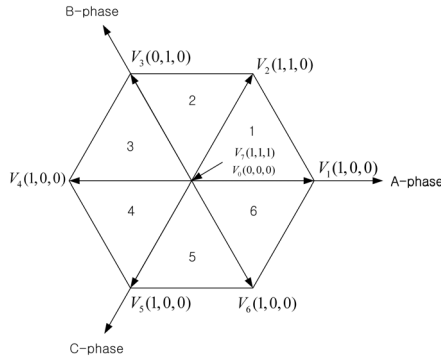
동특성 시뮬레이션을 통한 검증은 위해 전자기 전달관계를 통해 알아본 쇄교자속과 역기전력의 관계는 식(5)에 의해 그림 2와 같이 나타난다.[2] 전달관계를 통한 해석적 기법은 1077[rpm]에서의 역기전력 파형을 통해 유한 요소 해석으로 검증하였다.

$$V_{emf} = -\frac{d\lambda_{(PM)}}{dt} = -jnp\omega_r \lambda_{(PM)} \quad (5)$$



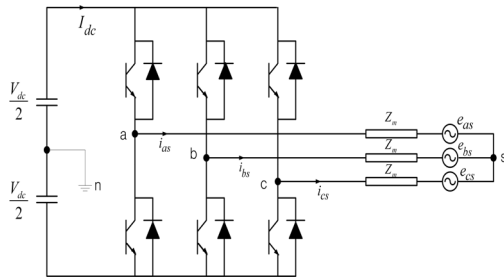
〈그림 2〉 해석적 방법과 유한 요소법을 통한 역기전력 파형

2.2 공간벡터 전압변조 방식



〈그림 3〉 스위칭 함수에 따른 공간 접압 벡터

PMSM의 구동을 위한 전압 변조 방식에는 삼각파 비교 전압 변조 방식과 공간 벡터 전압 변조 방식이 있다. 삼각파 비교 전압 변조 방식은 지령 극전압과 삼각파를 비교하여 인버터 각상의 스위칭을 조절하는 것이고 공간 벡터 변조 방식은 한 주기내에서 기준 전압 벡터와 동일한 벡터를 인접한 두 벡터의 합성을 통해 재현하는 것으로 그림 3 과 같이 6각형 모양으로 나타내어 질 수 있다. 공간 벡터 전압 변조 방식은 선형 제어 영역의 증가로 직류단 전압에서 가장 큰 교류전압을 얻을 수 있고 삼각파 비교 전압 변조 방식에 비해 정상상태에서 전류의 고조파를 크게 억제 할 수 있는 장점이 있으나 벡터합성을 위해 스위칭 시간을 고려한 유효벡터 인가시간을 계산해 주어야 하기 때문에 계산 시간이 오래 걸리고 CPU에 많은 메모리가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 오프셋 전압을 이용한 전압변조 방식을 이용하여 공간벡터전압 변조 방식을 구현하기로 한다.[3]



〈그림 4〉 3상전압형 인버터의 회로구성

그림 4는 3상전압형 인버터의 회로를 보여준다. 점 a와 점 n 양단에 유겨되는 전압을 극전압(V_{an})이라 하고, 점 a와 점 s에 유겨되는 전압은 상전압(V_{as}), 점 s와 n 양단 전압은 오프셋전압(V_{sn})이라하면 식 (6)이 성립한다.

$$V_{an} = V_{as} + V_{sn} \quad (6.1)$$

$$V_{an} = V_{as} + V_{sn} \quad (6.2)$$

$$V_{an} = V_{as} + V_{sn} \quad (6.3)$$

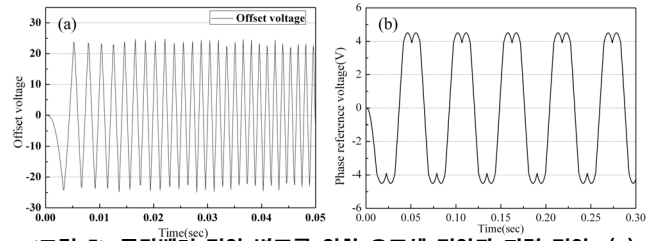
오프셋 전압을 최대치 극전압 과 최소치 극전압의 절대 값이 동일하도록 설정하면 오프셋 전압은 식(7)과 같으며 그림 5(a)와 같이 표현된다.

$$V_{sn} = -\frac{V_{max}^s + V_{min}^s}{2} \quad (7)$$

여기서 V_{max}^s, V_{min}^s 은 상전압 지령치의 최대값과 최소값이다. 상전압과 오프셋 전압을 합성한 극전압은 지령전압으로써 그림 5(b)와 같이 정형파에 3고조파가 합성된 형태의 파형으로 나타난다.

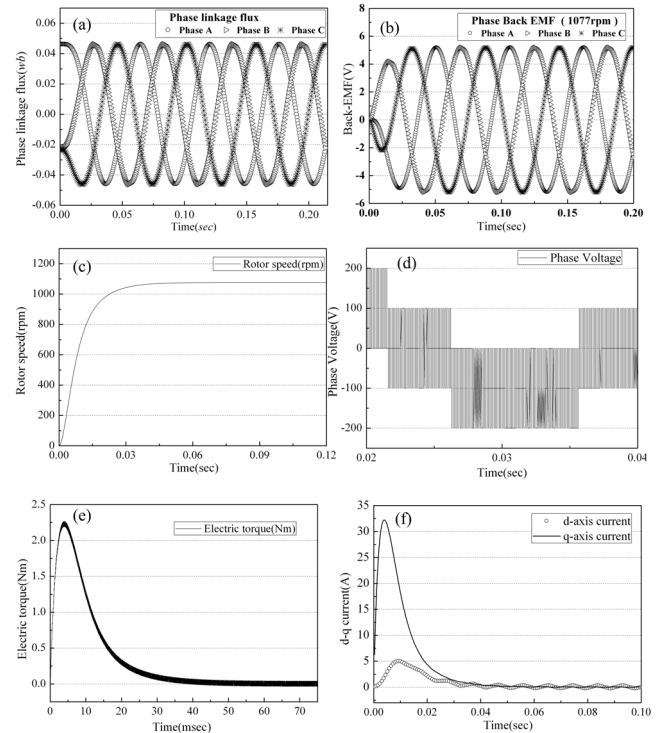
2.3 공간벡터 전압변조를 통한 PMSM의 동특성

시뮬레이션으로 구성된 PMSM 구동시스템의 입력으로 설정된 d-q 전압을 좌표 변환하여 오프셋 전압에 의한 전압변조를 통해 PWM 극전압을 PMSM의 입력으로 한다. 이에 따르는 PMSM의 동특성 시뮬레이션 결과는 그림 6과 같다. 그림 6(a)는 고정자 권선에 쇄교하는 자속의 양을 나타내고, 그림 6(b)는 유한 요소 해석시와 동등한 속도에서 역기전력 파형이 유한 요소 해석과 같음을 보임으로써 시뮬레이션에 대한 검증을 하고 있고, 그림 6(c)는 제시된 조건인 회전자 속도 1077[rpm]에



〈그림 5〉 공간벡터 전압 변조를 위한 오프셋 전압과 지령 전압: (a) 오프셋전압, (b) 극전압=상전압+오프셋 전압

수렴함을 보여준다. 그림 6(d)는 상전압에 인가되는 PWM파형이다. 그림 6(e)는 토크 특성을 나타내는데 무 부하 특성으로 인해 정상상태에서 0에 수렴함을 보여주고, 그림 6(f)에 나타난 d-q 전류 역시 초기 과도 상태에는 큰 값을 가지지만 이후 0으로 수렴하는 것을 알 수 있다.



〈그림 6〉 공간 벡터 PWM 스위칭 기법을 이용한 PMSM의 동특성: (a) 쇄교자속, (b) 상전압 PWM, (c) 회전자 속도, (d) 토크특성, (e) d-q 전류, (f) 역기전력파형-1077rpm

3. 결 론

본 논문에서는 4극 54슬롯 PMSM을 오프셋 전압을 이용한 전압 변조를 통해 공간 벡터 전압변조 방식에 의한 동특성 해석을 하였다. 기존의 방식에서는 주어진 상전압 지령치로부터 섹터의 판별을 통한 유효벡터 인가시간을 결정해주어야 했지만 제시된 방법은 오프셋 전압을 이용하여 기존의 유효벡터 인가시간을 통한 구동방법과 동일한 결과를 쉽고 빠르게 얻을 수 있다. 결론적으로 오프셋 전압을 이용한 전압변조 방식을 통해 공간 벡터 전압변조방식에 대한 간단한 모델링의 구현이 가능하다. 향후 유한 요소법과 시뮬레이션으로 얻어진 결과를 바탕으로 제작된 모델에 구동실험을 통하여 시뮬레이션의 정확성을 검토할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 서일수, 송의호, "데드 타임 없는 새로운 공간 벡터 전압 변조 인버터에 관한 연구", 2004년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1169p, 2004.
- [2] Seok-Myeong Jang, Kyoung-Jin Ko, Han-Wook Cho, and Jang-Young Choi "Electromechanical Parameters Calculation of Permanent magnet Synchronous Motor Using the Transfer Relation Theorem", *IEEE Trans. Magn.*, vol.43, No. 6, June 2007.
- [3] 설승기, 전기기기제어론, 브레인 코리아, 2002년 10월.