

공간 벡터 PWM를 이용한 직선형 동기 전동기의 속도 FOC의 구현

장석명, 유대준, 장원범, 조한욱
충남대학교

Implementation of speed-FOC Using SV PWM in slot less air-cored PMLSM

Seok-Myeong Jang, Dae-Joon You, Won-Bum Jang, Han-wook Jo
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - This paper presents modeling of dynamic system for slot less air-cored PM linear synchronous motor using space vector PWM. The vector control requires information about rotor position. And we can need to the Hall sensor for sampling current. In order to agree with this purpose, Digital Signal Processor(TMS320F2406A) developed for implementation of a speed Field Oriented Control.

1. 서 론

영구 자석 선형 동기 전동기(PMLSM)는 기존의 회전형 전동기와 달리 직선 운동에 의한 공장 및 사무 자동화, 운송 운용, 벨트, 체인 등에 널리 응용되며, 각각의 파라미터를 통한 d, q 비간섭 형태의 모델링이 단순하여 산업 현장에서 널리 이용된다. 본 논문은 Halbach 배열로 구성된 표면 부착형 영구 자석 고정자와 3상 슬롯리스 공심형 고정자를 갖는 PMLSM의 속도 Field Orient Control의 구현을 통해 제작된 동기 모터의 동특성을 수행한다.

공간 벡터 제어를 하기 위해서는 항상 정확한 회전자의 절대 위치 정보를 알고 있어야 하므로 정밀한 엔코더의 사용은 불가피 하며, 회전형 엔코더의 직선형 변환이 필요하다. 또한 속도 제어기의 설계에 있어서 d, q축 비간섭 형태의 PI 제어기는 속도 특성과 더불어 전류의 제한에 의한 토크특성이 고려되어야 하므로 속도 PI 제어기와 전류 PI 제어기는 병행되어야 한다.

따라서, 본 논문은 DSP 2406를 이용하여 엔코더와 전류 AD를 통해 역기전력과 PI제어기의 보상 전압을 이용하여 공간 벡터에 의한 속도 제어 시스템을 설계하고, 속도 제어 시스템과 제작된 PMLSM의 상호관계를 통한 동특성을 제시한다.

2. PMLSM의 동특성

고정자의 3상 좌표에 대해 회전자의 2상 좌표 변환된 d, q축을 갖는 공심형 PMLSM의 모델은 그림1과 같다. 표면 부착형 영구 자석의 경우에 있어서 d, q축 인덕턴스 성분이 같으므로, 인덕턴스 차에 의한 영향을 고려되지 않으며 추력 및 역기전력 상승은 쇄교 자속 λ_f 의 영향만을 받는다. 또한, 직선형 동기 속도 u_s 는 회전형 기기에 대한 각속도 $\omega = \pi u_s / \tau$ 로 표현된다. 설계시 각각의 회로정수는 벡터자위 및 동특성 전압 방정식과 실험

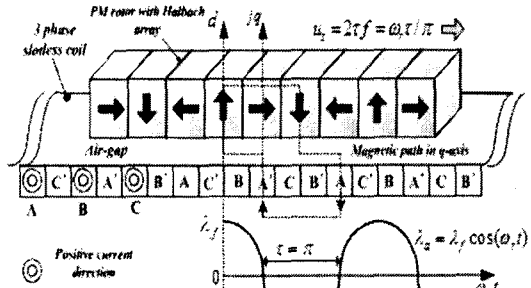


그림 1. d, q축 좌표 공심형 슬롯리스 PMLSM의 모델

에 의해서 얻어진다. 회로 정수에 의한 그림. 1의 영구 자석형 동기전동기의 전압방정식은 식(1)과 같다 [1].

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p(L_m + L_l) & -pM & -pM \\ -pM & R_s + p(L_m + L_l) & -pM \\ -pM & -pM & R_s + p(L_m + L_l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

- 여기서,
- V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : 고정자 a, b, c 상전압
- i_{as}, i_{bs}, i_{cs} : 고정자 a, b, c 상전류
- e_{as}, e_{bs}, e_{cs} : 영구자석 계자가 a,b,c상 고정자권선에 유기되는 속도 기전력
- R_s : 고정자 권선 저항
- L_m : 자화 인덕턴스
- L_l : 누설 인덕턴스
- M : 전기자 권선의 상호 인덕턴스
- P : 미분연산자 이다.

일반적으로 3상 코일은 120도 간격에 의해 분포하므로 상호 인덕턴스 $M = L_m/2$ 로 존재하며, 3상 전류의 합은 0이므로 동기 인덕턴스 $L_s = L_l + 3L_m/2$ 이다. 이때 모든 인덕턴스는 영구자석을 고려하지 않았다.

그림 1에서와 같이, a상 기준의 영구자석의 초기 위치에 대해 쇄교자속 분포 및 2상 좌표 변환에 의한(d, q) 좌표변환은 식(2)와 같다.

표 1. 동특성을 위한 제작된 모터의 설계 변수

항목	기호	크기(단위)
극 간격	τ	0.051 (m)
동기 저항	R_s	17.2 (Ohm)
동기 인덕턴스	L_s	17.49 (mH)
쇄교자속	λ_f	0.1274 (V.s)
역기전력 상수	K_e	7.844 (V.s/m)
추력 상수	K_t	11.772 (N/A)
무게	M	3.8 (kg)
마찰 계수 damping	B	180 (N.sec/m)

$$V_d = R_s i_d + L_s \dot{i}_d - \frac{\pi}{\tau} u_s L_s i_q \quad (2)$$

$$V_q = \frac{\pi}{\tau} u_s L_s \dot{i}_d + R_s i_q + L_s \dot{i}_q + \frac{\pi}{\tau} u_s \lambda_f$$

여기서, 동기인덕턴스 L_s 는 실험에 의한 한 상에 흐르는 전압과 전류의 위상차에 의해 얻어진 자기 인덕턴스와 해석 방법에 의해 얻어진 자화 인덕턴스에 얻어질 수 있다.

제작된 직선형 동기 모터의 출력 전력은 식(2)의 전압 방정식에 의해 식(3)과 같이 구해진다.

$$P_{out} = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \\ = \frac{3}{2} [R_s (i_d^2 + i_q^2) + L_s \frac{d}{dt} (i_d^2 + i_q^2) + \frac{\pi \lambda_f}{\tau} u_s i_q] \quad (3)$$

첫 번째 항은 고정자 동손이고, 두 번째 항은 자기에너지 변화에 해당하는 전력으로서 무효전력 성분이다. 우변의 마지막 항이 속도를 갖는 기계적 출력이므로 추력은 식(4)와 같다.

$$F = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \lambda_f i_q \quad (4)$$

식(2)와 식(4)에 의해 표면 부착형 직선형 영구자석 동기 모터에 있어서 역기전력 및 추력 상수는 식(5)와 같이 쇄교자속 성분에 의해 표현된다.

$$K_e = \frac{\pi \lambda_f}{\tau} \quad (5.1)$$

$$K_t = \frac{3\pi \lambda_f}{2\tau} \quad (5.2)$$

3. SVPWM의 구현

그림. 2는 추력에 의한 속도를 얻기 위해 q축 정격 전압의 인가에 따른 DSP의 상전압과 상전압에 의한 섹터를 나타내고 있다. 공간 벡터를 구현하기 위한 기준 전압에 대한 d, q축 스위칭 패턴과 스위칭 시간에 대해 제시하고 있다. 부하의 기준 상전압과 스위칭 함수는 스위칭 함수에 따라 8개의 전압이 출력 가능하고 이를 공간상에 벡터로 도시하면 그림. 3과 같다. 그림 3.에서 선형적으로 출력이 가능한 인버터의 최대 출력 전압을 나타내고 있으며 그때의 상전압은 직류링크 전압의 $\sqrt{3}V_{DC}/3$ 이다. 그림. 3의 기준 전압 V_{sref} 은 섹터 3에 위치하고 있으며, 근접 스위칭 벡터 V_4, V_6 의 응용시간에 대해 식 (6)과 같이 표현가능하다 [2].

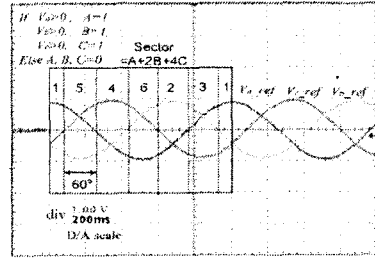


그림. 2 q축 정격 기준 전압에 따른 기준 상전압과 섹터 $V_m = 35.4(V), fre = 1(Hz)$

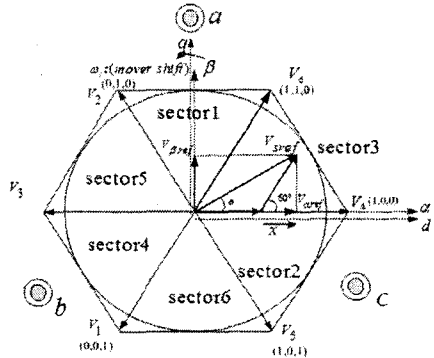


그림 3. 기준 전압에 대한 공간 벡터의 스위칭 패턴과 시간

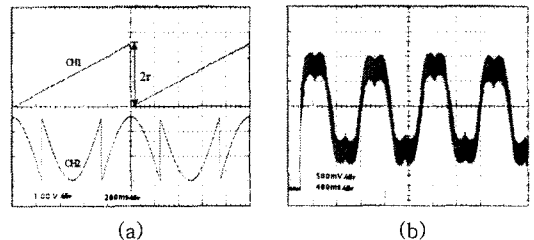


그림. 4 위치 센싱에 의한 SVPWM 파형(a) CH1. 기계적 위치 CH2. 위치에 따른 DSP의 cos Look-up Table (b) SVPWM으로 구현된 a상 전압 파형. Voltage 35.4(V), frequency 1(Hz)

$$T = T_4 + T_6 + T_0 \quad (6) \\ V_{sref} = \frac{T_4}{T} V_4 + \frac{T_6}{T} V_6$$

식(6)에 대해 스위칭 벡터는 V_{aref} , 와 V_{bref} 로 정의된 벡터에 의해 식(7)과 같이 표현 된다 [2].

$$T_4 = \frac{T}{2V_{DC}} (3V_{aref} - \sqrt{3}V_{bref}) \\ T_6 = \sqrt{3} \frac{T}{V_{DC}} V_{bref}$$

공간 벡터는 기본적으로 고정자의 위치를 판독하여 그림 2와 같이 섹터를 결정지어야 하며, 각각의 섹터에 의한 스위칭 시간은 a축과 b축으로 계산되어 진다. 따라서 SVPWM은 엔코더의 위치 센싱에 의해 그림. 4와 같이 직류기준 전압에 대해 구현되어 진다.

4. PMLSM의 모델링 및 실험

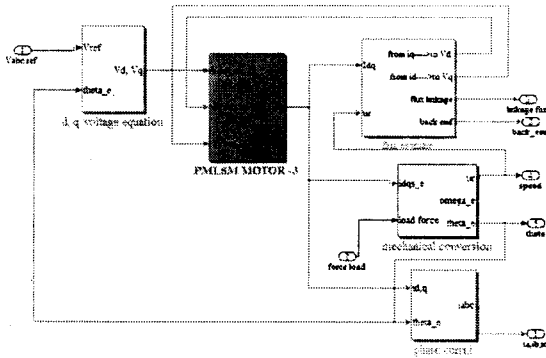


그림 5 표면 부차형 PMLSM의 모델링

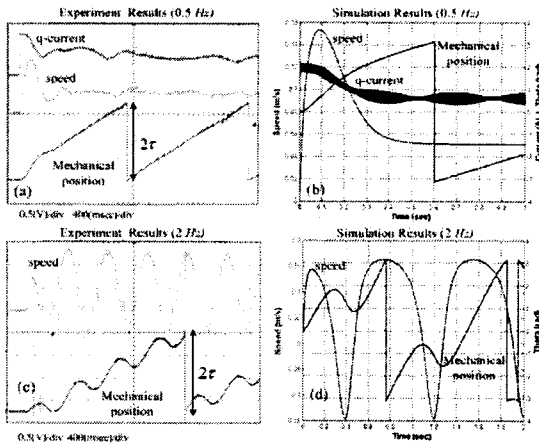


그림 6 제작된 직선형 동기 모터의 개루프 실험 및 simulation 결과 (a),(b) Experiment and simulation Vs 1(Hz),2(A). (c),(d) Experiment and simulation Vs 2(Hz),2(A).

그림 5는 공간 벡터 PWM 인버터를 갖는 표면 부차형 영구자석 전동기의 모델링이다. 동기기는 가동자의 위치 변화에 따른 위치 값이 입력 전압에 맞추어가는 동기형태의 모델링이 가능하다.

3상 모터의 d-q 모델링은 실험에 의한 전압과 전류의 위상차에 대해 임피던스에 의해 얻어진 상 인덕턴스에 대해 누설 인덕턴스와 기계적 출력에 이용되는 자화인덕턴스에 의해 얻어지며, 추력 상수 및 역기전력 상수는 영구자석에 의한 쇠교자속에 의해 영향을 받는다. 또한 추력은 q축 전류의 영향만 받는다. 그림 6은 공간벡터에 의해 얻어진 동기 모터의 실험과 simulation을 나타내고 있다. 모터의 기준 전압, 전류, 속도를 얻기 위한 실험으로 그림 6 (a),(b)는1(Hz), 2(A)에 있어서 일정 속도로 얻을 수 있는 반면에 그림 6(c),(d)는 모터의 정격을 벗어나고 있음을 알 수 있다.

5. 속도제어기의 설계

그림10은 PI 보상을 갖는 속도 제어기에 대한 블록도이다. 속도를 측정할 수 있다면 전류 제어기의 출력에 역기전력 변동을 전압 보상함으로써 역기전력의 영향을 배제할 수 있다. 또한 전류 제어기의 샘플링 시간을 모터의 시정수와 같도록 설계하면 식(3)과 같으며 전류 제어기 폐루프(Closed Loop) 응답 특성을 1차 지연요소와 같이 되도록 할 수 있다.[1]

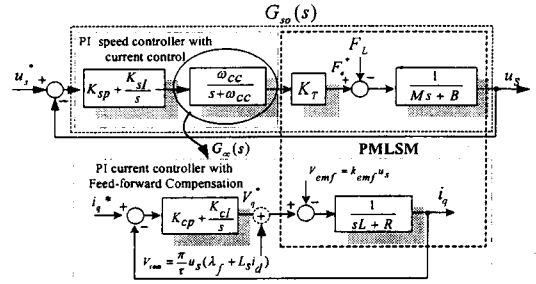


그림 7. q축 PI 속도 제어기

$$G_{cc}(s) = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \approx 1 \quad (3)$$

여기서, ω_{cc} 는 전류 폐루프의 시간응답을 나타낸다.

일반적으로 PI 제어기의 특성을 나타내는 변수는 폐루프의 주파수 대역(bandwidth)이다. 이 주파수 대역은 전류제어기의 제어 주기 혹은 샘플링 시간과 PWM의 스위칭 주파수에 의하여 제한된다. 전류제어기의 제어주파수의 1/10정도가 속도 제어기의 주파수 대역의 최대로 주어진다.[1]

표 2. 제작된 모터의 제어기 설계사항 및 PI 이득

항목	기호	크기(단위)
PWM 주파수	PWM_{fre}	1(KHz)
전류제어기 샘플링	T_{cs}	1(KHz)
전류제어기 각주파수	$\omega_{cc} = 6T_{cs}/20$	300(rad/sec)
전류 비례 제어기	$K_{cp} = L_s \omega_{cc}$	5.247
전류 적분 제어기	$K_{ci} = R_s \omega_{cc}$	5160
속도 제어기 샘플링	$T_{ss} = T_{cs}/10$	500(Hz)
속도 비례 제어기	K_{sp}	9.68
속도 적분 제어기	K_{si}	58.1

6. 결 론

본 논문은 표면 부차형 영구자석 타입과 슬롯리스 공심형 타입을 갖는 직선형 동기 모터에 대한 모델링과 공간 벡터의 구현에 대해 제시하고 있다. 동기 모터는 동기 속도를 얻기 위해 위치가 일정해 지는 feedback형으로 모델링 되며, 공간 벡터의 구현은 엔코더 신호의 위치 센싱에 의해 얻어지을 알 수 있다. 또한 속도 제어를 위한 자속 제어에 있어서 전류 제어기에 의해 전류의 1차 지연 함수로의 표현은 PWM 주파수 및 샘플링 주파수에 영향을 끼침을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1]Jun-Keun Ji, Seung-Ho Song, Seung-Ki Sul, "DSP-Based Self-Tuning IP Speed Controller and Predictive Current Controller for Rolling MillDC Drive", PCC-Yokohama, 1993.
- [2] Erwan Simon, "Implementation of a Speed Field Oriented Control of 3-phase PMSM Motor using TMS320F240", Texas Instruments application reprot, SPRA588, 1999.