

공간 벡터를 이용한 직선형 동기 전동기의 비간섭 속도 제어 시스템 설계

장 석명, 유 대준, 장 원범, 박 지훈
충남대학교

Design of Speed Controller System for PM Linear Synchronous Motor using the Space Vector modulation

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

Abstract - This paper presents design of speed control 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 단위 무게 당 토크 비율 및 효율에 있어서 일반 유도전동기에 비해 신뢰성이 높고, d, q에 의한 비간섭 형태의 모델링이 단순하여 각각의 파라미터를 구하기 쉬어 제어성이 우수하다. 본 논문의 직선형 동기 모터는 Halbach 배열로 구성된 표면 부착형 영구 자석 가동자와 3상 슬롯리스 고정자로 구성되어 있으며, 설계시 각각의 파라미터는 벡터자위에 의한 해석 및 실험에 의해 얻어진다. 또한 제어 성능을 높이기 위하여 제어 패턴은 공간 벡터를 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 홀센서에 의한 전류 센싱에 의해 전류 PI 제어기는 병행되어야 한다. 본 논문은 제작된 공심형 PMLSM에 대해 엔코더와 전류 AD를 통해 직선형 기기의 제어 시스템을 설계하고 역기전력과 PI제어기의 보상 전압을 이용하여 공간 벡터에 의한 속도 제어 시스템을 설계하였다. 전체 제어기는 TMS320F2406을 사용하였으며, 제작한 구동 시스템은 470uF(1마력) 콘덴서, 1500V 절연 드라이버, 허용전류가 60A까지 가능한 IGBT와 정류기로 구성되어 있다.

2. PMLSM

2.1 PMLSM 모델 및 특성

고정자의 3상 좌표에 대해 회전자의 2상 좌표 변환된 d, q축을 갖는 공심형 PMLSM의 모델은 그림1과 같다. 영구 자석에 의한 쇄교 자속 λ_s 는 역기전력 상수로 표현되며, 직선형 동기 속도 u_s 는 회전형 기기에 대한 각속도 $\omega = \pi u_s / \tau$ 로 표현된다. 설계시 각각의 파라미터는 벡터자위 및 동특성 전압 방정식과 실험에 의해서 얻어진다. 그림1은 d, q축 좌표를 갖는 공심형 PMLSM에 대한 모델이며, 그림1에 대한 설계사양은 표1과 같다. 제작된 PMLSM의 제어시 정격치에 대해 base 값은 $\sqrt{2}$ 의 크기로 선정하였으며, 마찰력은 존재하지 않는다.

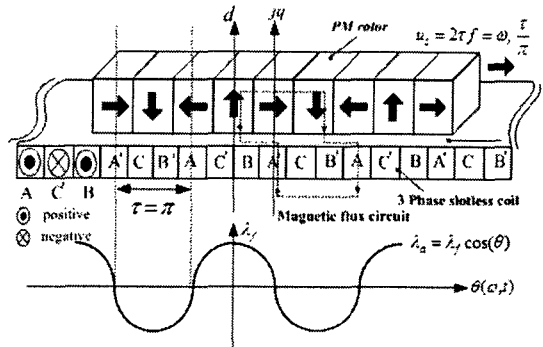


그림1. d, q축 좌표 공심형 슬롯리스 PMLSM의 모델

표1. 제작된 PMLSM의 회로정수 및 정격

| 항목 | 기호 | 크기(단위) |
|------------|----------------------------------|------------------|
| 극 간격 | τ | 0.051(m) |
| 상당 동기 저항 | R_s | 17.2(Ω) |
| 영구 자석 쇄교자속 | λ_s | 0.1274(V · s) |
| 상당 공극 인덕턴스 | L_{sm} | 0.00294(H) |
| 상당 상호 인덕턴스 | $M = L_{sm}/2$ | 0.00147(H) |
| 상당 누설 인덕턴스 | L_l | 0.01308(H) |
| 상당 동기 인덕턴스 | $L_s = L_l + 3L_{sm}/2$ | 0.01749(H) |
| 역기전력 속도 상수 | $K_{emf} = \pi \lambda_s / \tau$ | 7.844(V · s/m) |
| 추력 상수 | $K_T = 3K_{emf}/2$ | 11.766(N/A) |
| 가동자 무게 | M | 3.8(kg) |
| 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 | $V_{base}(1000h)$ | 34.5[V] |
| base 상전류 | $i_{base}(1000h)$ | 2.828[A] |
| base 속도 | $u_{base}(1000h)$ | 0.288[m/sec] |
| DC link 전압 | $V_{DC}(MI = \sqrt{3}/3)$ | 60[V] |

그림1의 PMLSM 모터를 제어하기 위한 제어부는 DSP 2406(A)이고 fixed point 연산을 기본으로 하는 2차 보수 형태를 가지며, A/D 전류 샘플링은 10bit를 사용한다. 또한 오실로스코프에 변수 및 샘플링 되는 값을 보기 위해 12 bit 단방향 D/A를 사용하였다. 그림1의 초기 위치는 a상을 기준으로 한 d축이 성립하며, 90도 위상차를 지닌 q축으로 고정자는 여자 된다.

3. 제어기 설계 및 시스템 구성

3.1 인버터 및 구동 드라이브

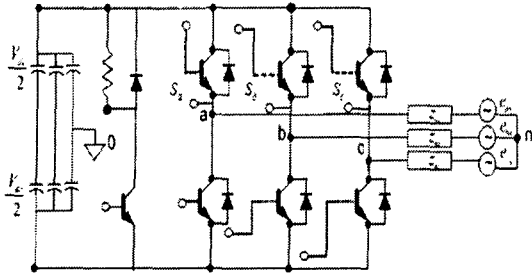


그림2. 3상 평형 인버터

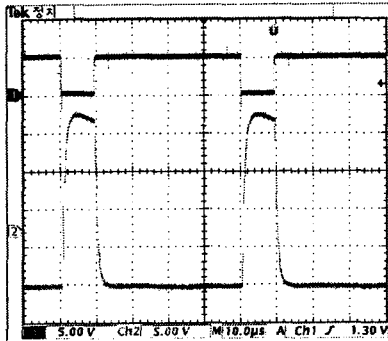


그림3. PWM 스위칭 전압. (ch.1) DSP PWM (ch.2) 구동 드라이브 PWM

3상 전압형 인버터는 그림2와 같이 단일 직류 입력 전원에서부터 3상 교류 출력 전압을 발생하여 3상 부하에 공급하는 기능을 갖는다. 그림1에서 V_{dc} 는 직류단 전압을 의미하며, 0은 직류단 중성점 전위이다. S_a, S_b, S_c 는 각각 3상의 양방향 전력 스위치의 스위칭 함수로서, $S_a=1$ 은 a상 상단 스위치가 도통됨을 의미하고, $S_a=0$ 은 하단 스위치가 도통됨을 의미한다.[1] 본 논문의 DSP는 기본적으로 3.3V의 저 전위로 PWM 스위칭을 내보내며, IGBT 구동을 위하여, TTL 소자의 구동 드라이브에 의하여 turn on 5[V], turn off 0[V]로 PWM을 증폭하고 구동드라이브에 의한 IGBT는 turn on 16[V], turn off -8[V]로 그림3과 같이 제작하였다.

3.2 전류 및 속도 센싱부

그림4는 모터의 정격 상전류 2[A]에 대한 $\sqrt{2}$ 배수를 base 전류로 하며, 전류에 대한 전압 스케일은 2배수를 제시하고 있다. base 전류에 대해 OP-amp를 이용한 배율과 offset 전압에 의해 DSP에는 3.063[V]전압이 걸리며, A/D 전류 변수에는 03B5h의 숫자로 입력된다. offset 1.65(0200h)를 영전위로 한 전류 base에 대한 D/A 파형은 그림5와 같다. 또한 DSP 2406(A)에 있어서 fixed point 연산에 의하여 음의 값은 2차 보수에 의해 결정된다. 그림5의 전류 파형에 대한 스케일링은 식(1)과 같다.[2]

$$(A/D\text{입력값} - 512) * K_{\text{current}}(9.37) = Q(12) \quad (1)$$

여기서, 최대로 받을 수 있는 전류는 $\pm 3.3[A]$ 이다.

그림6은 엔코더에 의한 위치 정보에 따라 생기는 한 정현파로서 Q(12)form 형태를 갖는 look up table로 구성되어 있다. 그림6은 1(Hz)의 속도를 갖는 정현파를 제시하고 있다.

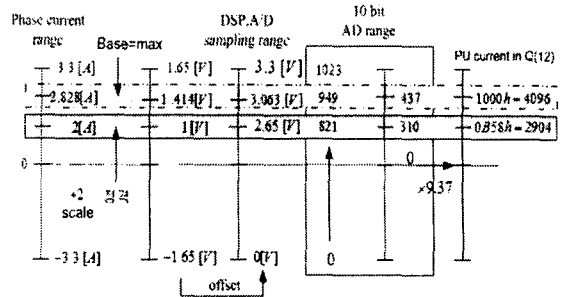


그림4. 전류 스케일(A/D 10bit)

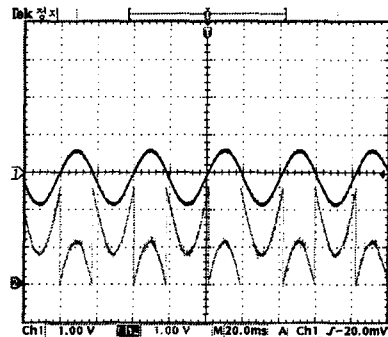


그림5. 입력 전류에 대한 DSP 출력 전류 (ch.1) 상전류 =1(A), (ch.2) D/A 12 bit

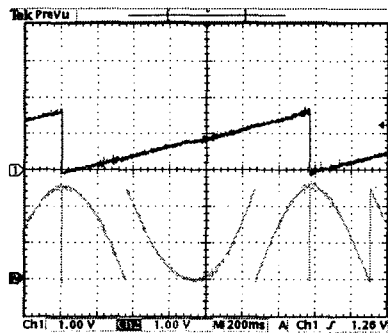


그림6. 엔코더의 위치 센싱에 의한 정현파 (ch.1) 위치, (ch.2) 정현파 lookup table

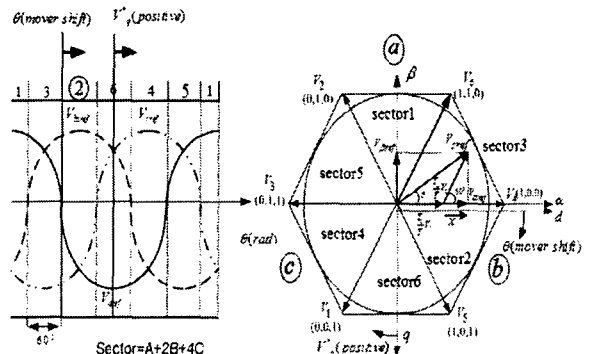


그림7. 기준 전압에 대한 공간 벡터의 스위칭 패턴과 시간

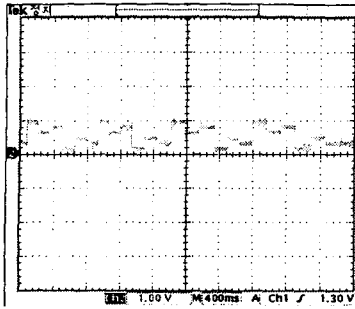


그림8. 기준 전압에 의한 색터 판별

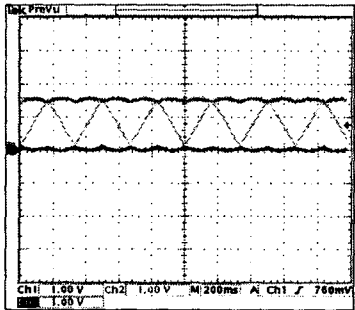


그림9. 3상 정현파 기준 전압에 대한 폴전압

3.3 공간 벡터의 구현

그림7은 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 그림7과 같다. 공간 벡터는 기본적으로 고정자의 위치를 판독하여 그림8과 같이 색터를 결정하여야 하며, 각각의 색터에 의한 스위칭 시간은 α 축과 β 축으로 계산되어 진다. 그림9는 색터 판별과 기준 전압에 의한 α 축과 β 축으로 계산되어진 스위칭 비교를 제시하고 있다. 그림9의 경우 선형적으로 출력이 가능한 인버터의 최대 출력 전압을 나타내고 있으며 그때의 상전압은 직류링크 전압의 $\sqrt{3}V_{dc}/3$ 이다.

4. 속도 제어기 설계

고정자의 3상 좌표에 대해 2상 좌표 변환된 d, q축 전압 방정식은 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{de} \\ V_{qe} \\ F_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & R_s + pL_s \\ 0 & 1.5\pi\lambda_f/\tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{de} \\ i_{qe} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, 저항, 인덕턴스, d, q축 전류는 상에 존재하며, 회전자의 속도기전력 상수와 고정자의 전류에 의한 추력 상수는 쇄교 자속에 의해 표현됨을 알 수 있다.

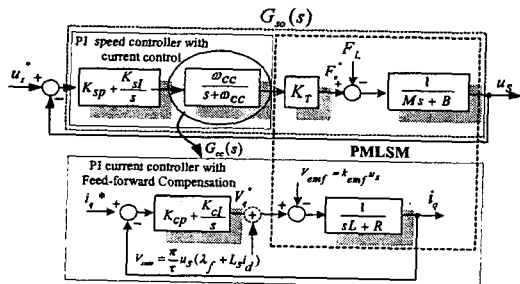


그림10. q축 PI 속도 제어기

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

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

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]

표2. 제어기의 설계사양 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 |

5. 결 론

본 논문은 직선형 동기 전동기의 공간 벡터 속도 제어를 위한 인코더 및 홀 센서에 의한 샘플링을 제시하였으며, 공간 벡터를 구성하기 위한 스위칭 함수와 속도 제어를 위한 PI제어기의 구성에 대해 제시했다. 향후 본 논문에 제시된 PI 이득과 공간벡터에 의한 속도제어 알고리즘과 데이터를 제시할 것이다.

[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.