

## 직선형 영구 자석 동기 모터의 시스템 정격 선정에 따른 속도 제어 특성

장 석명, 유 대준, 장 원범, 양 문섭

충남대학교

### Speed Field orient control of permanent magnet linear motor according to determination of system rate.

Seok-Myeong Jang, Dae-Joon You, Won-Bum Jang, Moon-Sub Yang  
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

**Abstract** - This paper presents design of speed control system for slot less iron-cored PM linear synchronous motor using space vector PWM. the design must be considered by the useable limits of the DC link voltage and dynamic operating rage as well as the characteristics of design parameters in a point of system. Therefore, in this paper, the permissible operating range of manufactured motor by determination of rate speed and rate thrust according to switching scheme of DC link voltage are offered. 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(TMS320F240x) 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 비간접 형태의 모델링이 단순하여 산업 현장에서 널리 이용된다[1]. 본 논문은 수직 자화 배열로 구성된 표면 부착형 영구 자석 가동자와 3상 슬롯리스 철심형 고정자를 갖는 PMLSM 시스템의 최대 효율을 위한 정격 추력-속도 계산을 통하여 속도 Field Orient Control의 구현과 동특성을 제시한다.

제작된 모터의 정격 추력-속도 계산은 모터의 설계 파라미터와 DC link 전압에 의해 계산되어지며, 전기적 에너지 전달을 위한 제어 패턴은 공간 벡터 PWM을 사용하였다. 따라서, 본 논문은 직선형 영구 자석 동기 모터에 대한 3상에 대한 전압 방정식으로부터 2상 d-q 변환을 통하여 제작된 모터의 동특성 해석과 전압 방정식으로부터 얻어진 추력, 속도 특성에 관한 해석을 하였다. 공간 벡터 제어를 하기 위해서는 항상 정확한 회전자의 절대 위치 정보를 알고 있어야 하므로 정밀한 엔코더의 사용은 불가피하며, 회전형 엔코더의 직선형 변환이 필요하다. 또한 DSP 240을 이용한 속도 제어기의 설계에 있어서 d, q축 비간접 형태의 PI 제어기는 속도 특성과 더불어 전류의 제한에 의한 토크특성이 고려되어야 하므로 속도 PI 제어기와 전류 PI 제어기는 병행되어야 한다.

### 2. PMLSM 동특성 방정식

#### 2.1 PMLSM 모델 및 특성

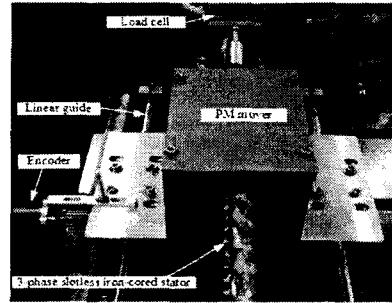


그림 1. 제작된 양축식 가동자와 슬롯리스 iron-core 고정자 를 갖는 직선형 영구자석 동기 전동기

동특성의 해석과 실험을 위한 모델은 그림 1과 같다. 여기서 제작된 영구자석 직선형 동기 모터는 추력 효율을 높이기 위하여, 한 면이 4극으로 이루어진 수직 자화 배열을 구성하는 양축식 가동자로 되어 있으며, 가동자의 영구 자석 효율을 높이기 위하여, 영구 자석 뒷면과 고정자는 iron과 적층된 규소강판을 사용하였다. 자기적 불균형에서 오는 detent force 및 파라미터 값을 일정하게 하기 위하여 가동자의 영구자석은 surface-mounted type으로 이루어져 있으며, 고정자의 3상 코일은 환상 코일로 슬롯리스 형태를 이루고 있다. 그러한 구조를 갖는 그림 1의 직선형 동기 모터에 대한 해석으로 식(1)과 같이 표현된다 [1].

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + pL_{self} & pL_M & pL_M \\ pL_M & R_s + pL_{self} & pL_M \\ pL_M & pL_M & R_s + pL_{self} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 시간 축 ( $p = d/dt$ )에 대해 전압 방정식은 저항  $R_s$ , 인덕턴스  $L_{self}$ , 역기전력  $e$ 의 성분으로 나타내어지며, 본 논문에서 사용된 상호 인덕턴스 성분은  $L_M = L_{self}/2$ 로 계산되어 진다. 따라서, 3상의 각 상에 대한 해석을 위한 동기 인덕턴스는  $3L_{self}/2$ 로 주어지며, 또한 식 (1)의 전압방정식을 완성시키기 위한 모터의 데어 정수를 보여주고 있다.

표 1. 제작된 직선형 동기 모터의 제어 정수

회로 정수	실험 결과
극 간격 [mm]	33
저항 [ $\Omega$ ]	33.386
상 인덕턴스 [ $mH$ ]	32.85
상호 인덕턴스 [ $mH$ ]	16.425
동기 인덕턴스 [ $mH$ ]	49.275
역기전력 상수 [ $Vsec/m$ ]	16.7

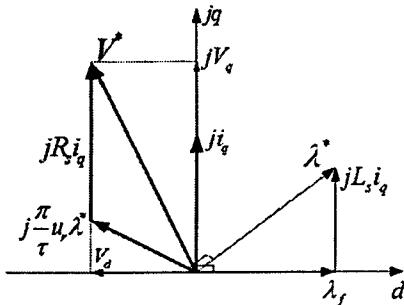


그림. 2  $i_d=0$ 에서의 phasor diagram

## 2.2동특성해석에 의한 모터의 정격 계산

식(1)의 3상 시간 좌표에 대하여 Clark's & Park's transform을 통하여 가동자의 수직, 수평축으로의 2상 좌표계에 의한 간단항 d-q 모델링을 얻을 수 있다 [2].

$$\begin{aligned} \bar{f}_s &= f_\alpha + j f_\beta = \frac{2}{3}(f_a + e^{j2\pi/3}f_b + e^{-j2\pi/3}f_c) \\ \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) \\ -\sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

여기서,  $f$ 는 전압, 전류, 기자력 등의  $120^\circ$ 회전 물리량을 의미하며,  $\theta_r = \int w_r dt$  또는,  $\theta_r = -\int w_r dt$ 로 나타내어지는 좌표이며,  $w_r$ 은 직선형 각 주파수로서 극 간격  $r$ , 속도  $u_s$ 에 의해  $\pi u_s / r$ 로 표현된다. 그러므로, 식 (2)에 의한 2상 전압방정식은 (3) 으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_f \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에 의한 출력전력은 고정자 동순, 자기에너지의 변화에 해당하는 무효전력 성분과 기계적인 출력이므로 식 (4)와 같은 기계적 전력식을 얻을 수 있다.

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

여기에서, 힘은 q축 전류에 비례함을 알 수 있으며, 제어 변수에 있어서 전류에 의한 실시간 제어가 가능함을 알 수 있다.

그림. 2는 식(3)에 있어서, d축 전류를 0으로 제한함으로써 얻어지는 phasor diagram을 보여준다. 여기서, 일정한 q축 전류에 의한 추력 제어를 위해서는 d축 전압이 필요함을 알 수 있으며, 인가전압에 대한 d축, q축 성분에 의하여 DC link 전압이 계산 되어짐을 알 수 있다. 즉 d축 전류 제어시, 인가전압에 대한 직선형 모터의 회로 정수에 의한 전압 강하는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$|V^*|^2 = \left( \frac{\pi L_s u_s i_q}{\tau} \right)^2 + (R_s i_q + \frac{\pi}{\tau} u_s \lambda_f)^2 \quad (5)$$

여기서,  $V^* = V_d + jV_q$ 에 의해서 d축, q축에 대한 전압 벡터이며, 역기전력 상수 항  $\pi \lambda_f / \tau$ 은 표 1에서 계산된 역기전력 상수에 의해 계산된다.

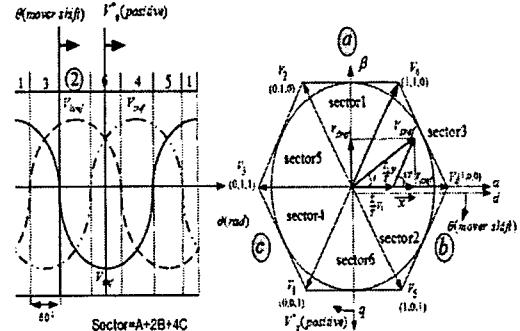


그림.3 기준 전압에 대한 공간 벡터의 스위칭 패턴과 시간

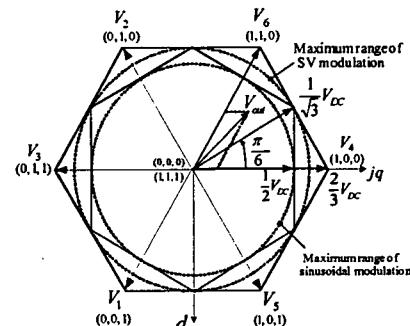


그림.4 공간벡터에 의한 인버터 DC link 전압의 최대 이용률

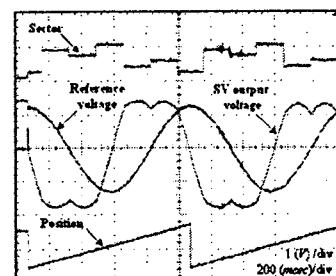


그림. 5 reference전압에 대한 공간벡터의 파형

## 3. 공간 벡터와 인버터의 구현

그림3은 공간 벡터를 구현하기 위한 기준 전압에 대한  $d$ ,  $q$ 축 스위칭 패턴과 스위칭 시간에 대해 제시하고 있다. 부하의 기준 상전압과 스위칭 함수는 스위칭 함수에 따라 8개의 전압이 출력 가능하고 이를 공간상에 벡터로 도시하면 그림3과 같다. 공간 벡터는 기본적으로 고정자의 위치를 판독하여 그 섹터를 결정지어야 하며, 각각의 섹터에 의한 스위칭 시간은 식(6)과 같이  $\alpha$ 축과  $\beta$ 축으로 계산되어 진다 [2].

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T}{2V_{DC}} (3V_{s\alpha ref} - \sqrt{3}V_{s\beta ref}) \\ T_2 = \sqrt{3} \frac{T}{V_{DC}} V_{s\beta ref} \end{cases} \quad (6)$$

그림4의 경우 선형적으로 출력이 가능한 인버터의 최대 출력 전압을 나타내고 있으며 그때의 상전압은 직류링크 전압의  $\sqrt{3} V_{DC}/3$ 이다. 그림 5는 공간벡터에 있어서 기준 전압에 대한 출력 파형을 보여주고 있다 따라서, 식(5)의 전압과 속도 특성에 대한 입력 최대 전압은  $\sqrt{3} V_{DC}/3$ 이

다. 이때, q축의 전류만 흐르게 하기 위한 q축 전압 뿐 아니라 d축이 전압이 필요하다. 그러므로 d축 전류를 0이라 가정할 때, 시스템의 일정 속도를 위한 d축, q축 전압은 식(6)과 같이 표현된다.

$$V_d = -\frac{\pi L_s i_q}{\tau} u_s \quad (6)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{\pi \lambda_f}{\tau} u_s$$

또한, 전류에 의한 힘의 관계식에 있어서, 일정전압에 대한 힘과 속도와의 관계에 의해 시스템의 정격 속도와 정격 추력이 식 (7)과 같이 결정된다.

$$F_t = \frac{3\pi\lambda_f}{2\tau R_s} \left( \sqrt{\left(\frac{V_{DC}}{\sqrt{3}}\right)^2 - \left(\frac{\pi L_s i_q}{\tau} u_s\right)^2} - \pi \lambda_f \frac{u_s}{\tau} \right) \quad (7)$$

여기서, q축 전류와 속도에 의한 추력 특성 곡선이 얻어짐을 알 수 있다.

#### 4. 시스템 구현 및 속도, 추력 곡선

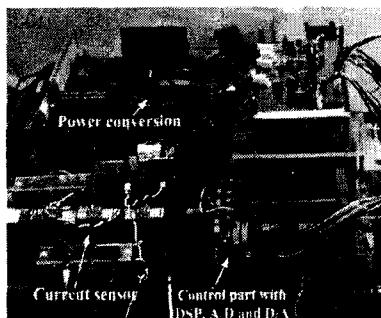


그림. 6 전류부와 센서를 포함한 제어부 구성

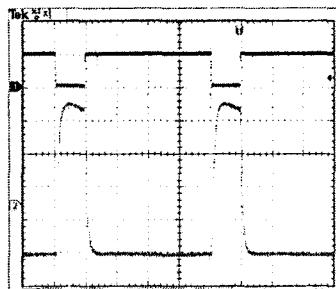


그림7. PWM 스위칭 전압. (ch.1) DSP PWM (ch.2) 구동 드라이브 PWM

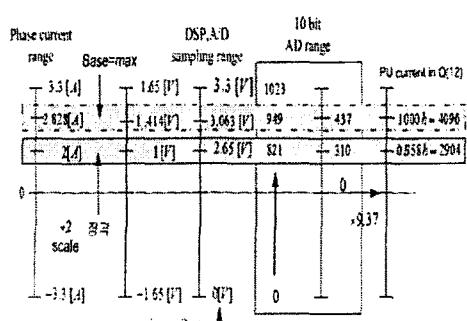


그림. 8 DSP 전류 Feedback를 위한 전류 처리 과정

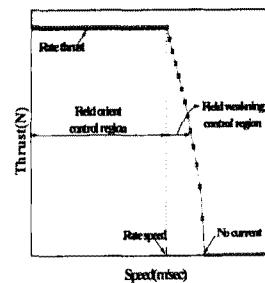


그림. 9 제작된 모터의 속도-추력 제어를 갖는 Profile

실질적인 제어를 위한 제어부로서 그림 7은 AD 10 bit, 엔코더 12 bit, DA 12bit를 갖는 DSP를 보여 주고 있으며, 전력 변환을 위한 정류회로부와 IGBT로 구성된 전력부를 보여주고 있다. 여기서, 그림. 7은 전력부와 제어부의 PWM 파형 연결을 위한 gate signal를 보여주고 있다. 여기서 전력의 역률을 방지하기 위해 Photo Diode를 이용한 전기적 절연을 하고 있다. 또한 본 논문에서 사용된 DSP 3.3[V]에 대해 gate driver의 전압은 +15[V], -8[V]의 전압을 사용하고 있다.

그림 8은 실질적인 모터의 전류 2[A]를 DSP의 연산을 위해 처리하는 과정으로서 추력 성분을 일정하게 하기 위한 전류 Feedback 연산 과정을 보여주고 있다. 또한 그림 9는 식 (7)로부터 DC link 단의 일정한 전압에 대한 속도, 추력 곡선을 보여주고 있다. 여기서, 제작된 모터의 DC link 전압 270[V]에 있어서 정격 전류는 2[A]에 있어서 정격 추력 50[N]이며, 정격 속도 2[m/sec]이다.

#### 5. 결 론

본 논문은 동특성 전압 방정식으로부터 제작된 직선형 영구 자석 동기 모터의 파라미터와 DC link 전압을 이용하여 혼석적 방법에 의한 속도, 추력 곡선을 얻어내었으며, 이때 사용된 제어 방식은 DC link 전압을 좀 더 효율적으로 이용하기 위한 공간 벡터 제어 방식을 제시하였다. 또한 제작된 모터의 제어를 위한 인버터의 구성에 있어서 전력과 DSP 제어부의 연결을 위한 gate 부의 구성과 전류의 DSP 처리 과정에 대하여 제시하였다. 향후 본 논문에 이어, 제작된 제어부를 통한 동특성 실험과 그 특성을 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 Mill DC 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.