

슬라이딩 모드를 이용한 SLIM의 위치제어

*金奎卓, **孫永大, *崔台熙
*昌原大學校 電氣工學科, **東西工科大學校 電子工學科

Position control of SLIM using the sliding mode

*Gyu-Tak Kim, **Young-Dae Son, *Tae-Hee Choi^o
*Dept. of Electrical Eng. Chang-won Nat'l Univ.
**Dept. of Electronic Eng. Dong-Seo Univ.

ABSTRACT

This paper presented the four section sliding mode control algorithm based on indirect field oriented control method and PI current controller design in a synchronous frame and applied it to the position control of LIM.

1. 서론

최근, 산업사회의 고도화에 따른 전기기기응용의 다양화에 부응하여 직선운동을 필요로하는 시스템의 수요가 날로 증가하고 있다. 그러나 이들 시스템을 구동하는 동력장치는 대부분 회전형 전동기를 이용하고 있는 실정이다. 회전형 전동기를 직선 운동계에 이용할 경우 회전운동을 직선운동으로 변환하는 동력 변환 장치가 필요하여 시스템 구성이 복잡하게 되며, 이들 변환 장치에 의한 손실, 소음, 진동 등이 발생하여 정밀 위치제어가 어려워 직선추력을 직접 발생하는 리니어 모터의 응용이 요망된다.

즉, 리니어 모터는 회전운동을 직선운동으로 변환시키는데 필요한 기어나 링크등의 기구가 필요치 않아 에너지 전달효율이 1이며 회전형 기기에 비해 운전속도에 제한이 없는등의 장점으로 인하여 Power용으로는 교통시스템에, 서어보용으로는 컴퓨터 주변기기, FA기기와 같은 정밀위치 제어장치등의 구동용으로 이용되고 있으며 앞으로 그 응용범위는 더욱 더 확대될 것으로 기대된다.

현재까지의 LIM의 제어 방식으로서 VVVF 인버터를 사용한 V/f 일정하의 슬립 주파수 일정제어가 주로 사용되어 왔으나 이 방식은 본질적으로 자속의 위상검출을 행하지 않고 평균치적인 제어를 행하므로, 추력지령에 대한 응답은 인덕턴스와 저항으로 결정되는 전동기 2차 시정수만큼 지연이 발생하여 자동반송장치와 같이 속응성을 요구하는 시스템에 적용하기에는 적합하지 않으며 시스템 파라미터 변동이나 외란에 대한 즉각적인 대처가 불가능하다.

따라서, 본 연구에서는 Maxwell의 전자방정식에 의해 리니어 모터의 회로정수를 도출하고, 기존의 회전기에만 적용되어 왔던 순시 토오크제어 개념에 기반을 둔 벡터제어 이론을 리니어 모터에 적용하여 공극자속을 일정히 유지시킨채 추력지령에 따른 토오크 전류의 제어를 위해, PI 보상부와 공간벡터 PWM법을 이용한 변조부로 이루어지는 동기프레임상의 전류제어기를 설계하였다. 또한, 외란이나 파라미터 변동에 대해 강인한 특성을 갖는 슬라이딩 모드 제어방식을 이용하여 일정한 속도패턴을 갖는 위치제어 루프를 구성하여, 설계 및 제작된 자동반송장치용 리니어 모터에 적용하여 제어성능 및 특성을 파악하였다.

2. Maxwell방정식에 의한 리니어 모터의 회로정수 도출

철손을 무시한 경우, SLIM의 1상당의 등가회로는 그림 2 와 같다. 그림에서 $r_{2e}(0)$ 는 직렬 등가 2차 저항, $x_{2e}(0)$ 는 등가 2차 리액턴스이다[1,2].

편축식 선형 유도 전동기의 정상특성 해석을 위하여 Maxwell의 전자방정식으로 부터 그림 2 의 등가 2차정수를 유도하면 다음식으로 주어진다[1,2].

$$Z_{2e} = r_{2e} + x_{2e} = 4m \frac{(k_w N_{pb})^2 h v_s}{P \tau} \mu_o \cdot j P_s \quad (2.1)$$

여기서, P_s 는

$$P_s = \frac{(K+L)\cosh\left(\frac{\pi}{\tau} g_o\right) + (M+N)\sinh\left(\frac{\pi}{\tau} g_o\right)}{(K+L)\sinh\left(\frac{\pi}{\tau} g_o\right) + (M+N)\cosh\left(\frac{\pi}{\tau} g_o\right)} \quad (2.2)$$

이며 K, L, M, N는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K &= \mu_1 \mu_2 \lambda_2 \sinh\left(\frac{\pi}{\tau} d_1 \lambda_1\right) \cosh\left(\frac{\pi}{\tau} d_2 \lambda_2\right) \\ L &= \mu_2^2 \lambda_1 \cosh\left(\frac{\pi}{\tau} d_1 \lambda_1\right) \sinh\left(\frac{\pi}{\tau} d_2 \lambda_2\right) \\ M &= \mu_o \mu_1 \lambda_2^2 \sinh\left(\frac{\pi}{\tau} d_1 \lambda_1\right) \sinh\left(\frac{\pi}{\tau} d_2 \lambda_2\right) \\ N &= \mu_o \mu_2 \lambda_1 \lambda_2 \cosh\left(\frac{\pi}{\tau} d_1 \lambda_1\right) \cosh\left(\frac{\pi}{\tau} d_2 \lambda_2\right) \end{aligned}$$

식 (2.1) 및 (2.2)에서 m:상수, k_w :권선계수, N_{pb} :1상당 직렬 턴수, h:1차 철심적층폭, v_s :동기속도, P:극수, τ :극간격, g_o :유효공극, μ_1, d_1 :2차측 back iron의 투자율 및 두께이며 μ_2, d_2 은 2차측 알루미늄의 투자율 및 두께이다. 또한, λ_1 및 λ_2 는 $\lambda_1 = 1 + j\sigma_{1o} \mu_1 v_s \tau / \pi$, $\lambda_2 = 1 + j\sigma_{2o} \mu_2 v_s \tau / \pi$ 로 주어지며 σ_{1o}, σ_{2o} 는 등가 도전율이다. 이때의 전 임피던스는 다음식으로 주어진다.

$$Z_1 = (r_1 + r_{2e}) + j(x_1 + x_{2e}) \quad (2.3)$$

한편, 본 연구에 사용된 편축식 선형 유도 전동기의 사양은 표 2.1에 나타내었으며 회로정수는 표 2.2와 같다.

Table 2.1 The specification of test facility

출력 - 극수	300W-4P	슬롯 폭	7.5 mm
전압 - 주파수	220V-60Hz	슬롯 깊이	40 mm
동기 속도	8.28 m/s	공극	2.5 mm
정격 속도	3 m/s	1 차 권선	
정격 전류	5.5 A	단철율	5/6
1 차 철심	상당직렬턴수	480	
철심 길이	338 mm	도체수/슬롯	120
철심 적층폭	80 mm	2 차 측	
극간격	69 mm	AI판 두께	3 mm
슬롯수/극, 상	2	폭	134 mm
슬롯 피치	11.5 mm	Back iron	10 mm

Table 2.2 Constants of circuit

Rs	2.8 Ω	Lm	63.6 mH
Rr	16.8 Ω	이동자질량	25 Kg
Ls	23.5 mH	마찰계수	2.2 Kg/m/s
Lr	6.1 mH		

3. 리니어 모터의 위치제어 시스템

3-1. 슬라이딩 모드를 이용한 위치제어기 구성

리니어 모터의 벡터제어시 2차축의 저항변동의 보상이 이상적이라면 리니어 모터의 응답특성은 직류기와 유사하게 되어 제어 변수로서 추력을 취할 수 있으며 과도상태에서의 2차축 자속의 변화는 매우 적으므로 상수로 취급할 수 있다. 그러므로, 리니어 모터의 기계계 동특성 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dv}{dt} = (F_0 - F_L - Bv) / M \quad (3.1)$$

$$x = \int v dt \quad (3.2)$$

여기서, M은 Carrier의 중량, B는 마찰계수, F₀는 추력, F_L은 부하, x는 위치를 나타낸다. 따라서, x₁을 위치오차, x₂를 그 미분으로 두고 시스템의 상태벡터를

$$x = [x_{ref} - x, -v]^T \quad (3.3)$$

와 같이 두면 이 때의 기계계 상태방정식은 다음 식과 같이 간단한 행렬식으로 표현된다.

$$P \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -B/M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -K_f/M \end{bmatrix} i_{qs} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \end{bmatrix} F_L \quad (3.4)$$

여기서, 추력 상수 K_f = $\frac{4}{3} \left(\frac{\pi}{\tau} \right)^2 \frac{L_m}{L_r} \lambda r$ 이며, p는 미분연산자, τ는 극간격이다.

식 (3.4)에서 알 수 있듯이 벡터제어 리니어 모터의 기계계 상태방정식은 2계 시스템으로 정의할 수 있으며 제어변수인 위치와 속도를 이용하여 슬라이딩 모드 위치제어기를 구성할 수 있게 된다. 추력 전류성분 i_{qs}는 벡터제어 리니어 모터 구동을 위한 제어입력 즉, 기준 추력이 된다.

3-2. 슬라이딩 궤적 설정

가변구조제어(Variable Structure Control) 이론은 제어구조가 미리 설정된 스위칭 함수에 따라 불연속적으로 변화된다는 점에서 고전적인 제어이론과 다르며, 이 경우 변화되는 각 구간에서는 없는 새로운 성질을 가지게 되는데 이를 슬라이딩 모드(sliding mode)라 한다. 상태가 슬라이딩 모드라는 새로운 형태의 동작상태에 머무를 때는 파라미터 변동과 한정된 외란에 거의 영향을 받지 않게 되며 오버슈트가 없는 고속응답을 실현할 수 있다. 또한, 물리적 실현이 간단하여 실시간 제어에 유리한 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 식 (3.4)에서 결정된 리니어 모터의 위치오차 및 속도의 상태공간상에서 상태궤적이 그리는 전 영역에서 안정한 슬라이딩 모드와 강인성 향상을 위해 그림 3.1과 같이 도달시간(reaching phase)을 제거한 슬라이딩 궤적을 설정하며 각 영역별로 정가속 구간과 정속구간, 그리고 정감속 구간으로 나누어진다. 정속구간은 전동기 제어시 전동기가 낼 수 있는 최대속도의 영역내로 속도를 제한한다는 의미를 가지며, 정가속 및 정감속 구간은 발생 추력의 활용도를 높이고 일정한 속도패턴으로 위치를 제어하기 위해 설정하는데, 이 구간들에서는 리니어 모터 제어시스템의 추력 발생능력과 응답속도 그리고 슬라이딩 모드의 존재를 감안하여 적절한 이득값을 선정해야 한다.

이 구간들은 목적과 용도에 따라 여러가지로 나뉘질 수 있으나 여기서는 그림 3.1에서 보듯이 전동기의 정방향 운동에 대해 4구간으로 나누며 역방향 운전에 대해서도 부호만을 바꿔 적용할 수 있다. 초기위치오차 x₁₀에서 출발한 상태궤적은 설정한 정가속

구간의 슬라이딩 궤적을 따라 일정 가속도로 속도를 증가하다가 정속구간의 슬라이딩 궤적을 만나면 일정속도로 운전하며 정감속 구간에 도달하면 전동기가 낼 수 있는 최대 가속도로 감속하게 되는데 이 때 슬라이딩 모드가 파괴되지 않는 한도내에서 제어입력의 이득값을 조정해야 한다. 특히, 상태궤적이 위상평면상의 원점 가까스로 수렴할 때 즉, 전동기 위치가 기준위치에 거의 근접할 때 부터는 제어입력의 채터링 현상으로 인해 슬라이딩 모드가 파괴되어 전동기가 제어성을 잃게 될 우려가 있으므로 마지막 구간에서는 직선 형태의 고전적 슬라이딩 라인을 설정하여 이를 완화시키도록 해야 한다. 각 구간의 슬라이딩 궤적식은 다음과 같다.

$$\text{구간 I : 정가속 영역 } S_{p1} = \frac{x_2^2}{2a} + x_1 - x_{10} \quad (3.5)$$

여기서, a(s_{amax})는 가속도, x₁₀는 전동기의 초기 위치오차를 나타낸다.

$$\text{구간 II : 정속 영역 } S_{p2} = x_2 + x_{20} \quad (3.6)$$

여기서, x₂₀ ≤ v_{max} 이며 v_{max}는 전동기의 최대속도이다.

$$\text{구간 III : 정감속 영역 } S_{p3} = -\frac{x_2^2}{2a} + x_1 \quad (3.7)$$

이와같이, 주어진 속도 패턴아래 기준위치에 따라 가능한 한 정확히 시스템을 제어하기 위하여 식 (3.5), (3.6) 및 (3.7)과 같은 슬라이딩 커브를 선택했다. 그러나, 위상 평면상의 원점 주위에서 슬라이딩 커브의 기울기가 매우 커지므로 슬라이딩 모드가 파괴되어 고전적인 선형제어 상태로 변하게 될 우려가 있으므로, 이를 고려하여 원점 근처에서의 슬라이딩 궤적식은 다음과 같이 정한다.

$$\text{구간 IV : 감속 영역 } S_{p4} = cx_1 + x_2 \quad (3.8)$$

여기서, c는 슬라이딩 라인의 기울기를 나타낸다.

지금까지, 전동기가 운전되는 전 영역에서 슬라이딩 모드를 얻기 위해 4구간의 스위칭 커브를 설정하였다. 설정된 스위칭 커브 상에 슬라이딩 모드가 존재하도록 하는 제어입력을 다음 식의 형태로 구성된다.

$$u = \psi_1 x_1 + \psi_2 x_2 + K_f \text{sgn}(S_p) \quad (3.9)$$

$$\text{여기서, } \begin{cases} \text{sgn}(S_p) = +1 & \text{if } S_p > 0 \\ \text{sgn}(S_p) = -1 & \text{if } S_p < 0 \end{cases}$$

스위칭 이득은 다음 식과 같다.

$$\psi_1 = \begin{cases} \alpha_1, & \text{if } S_{p1} x_1 > 0 \\ \beta_1, & \text{if } S_{p1} x_1 < 0 \end{cases} \quad (3.10a)$$

$$\psi_2 = \begin{cases} \gamma_1, & \text{if } S_{p1} x_2 > 0 \\ \zeta_1, & \text{if } S_{p1} x_2 < 0 \end{cases} \quad (3.10b)$$

각 스위칭 이득은 다음 식과 같은 슬라이딩 모드 존재조건을 만족해야 한다.

$$\lim_{S_p \rightarrow 0} S_p \dot{S}_p < 0 \quad (3.11)$$

3-3 전류제어법

일반적으로 벡터제어 시스템에서는 전동기의 실제전류가 기준 전류에 정확히 추종함을 가정하므로 고성능 전류제어기가 필수적이다. 최근들어, 고정프레임상에서 동작하는 고전적 제어기보다 동기프레임상에서 동작하는 소프트웨어적 전류제어기를 선호하는 추세에 있으며 이는 제어되는 전류값이 직류이므로 전동기 동작 조건에 따라 과도 및 정상상태 특성이 변화하는 고정 프레임 제어기에 비해 밴드폭의 제한없이 양호한 전류제어 성능을 보이기 때문이다. 따라서, 본 논문에서 적용한 동기프레임 PI제어기는

위에서 언급한 장점을 가지면서 PI제어기로 전류오차를 보상하는 방법이므로 전동기 속도에 무관하게 오차를 보상할 수 있고 d축과 q축을 독립제어하므로 2축 전류성분이 분리제어 된다. 또한, 이러한 전류제어기의 변조부로서는 공간벡터 PWM법을 사용하는데 두 PI제어기의 출력을 성분으로 하는 기준 전압벡터의 크기와 각에 따라 인버터 스위치의 도통시간(지속시간)을 변조한다. 이 제어기의 구성도를 그림 3.2에 나타내었다.

4. 시스템 구성 및 결과 검토

본 연구에 사용된 시험기는 자동 반송장치의 구동용 리니어 모터로서 수직력 측정을 위한 Load cell과 속도 및 위치측정을 위한 엔코더가 부착되어 있다.

위치 제어 시스템을 구현하기 위한 하드웨어의 구성은 세부적으로 CPU회로, 전류 검출회로, 게이트 구동회로, 속도 및 위치 검출회로, 그리고 전력회로로 나누어 진다. 이외에도 통신 회로와 D/A 컨버터 회로가 있다.

주 제어기로서는 인텔사의 80C196KC 16비트 μ -controller를 사용하였으며, 제어 알고리즘은 전적으로 소프트웨어로 처리되고 있으므로 CPU회로는 제어부의 핵심적인 부분이라 할 수 있다.

그림 4.1에 실험 장치를 나타내었으며, 그림 4.2에 제어 시스템의 블록선도를 나타내었다.

제어를 위한 소프트웨어의 주 제어 루틴은 소프트웨어 타이머 인터럽트에 의해 실행되는데 TIMER 1에 가입된 임의의 데이터에 기초하여 일정하게 주기적으로 실행될 수 있다. 이 루틴에서는 상전류 검출, 벡터 제어, 전류 제어 부분으로 구성되며 또한, 가변구조 제어루틴, 전압벡터 선택루틴과 같은 부 루틴들을 호출하게 되어 있다.

본 연구의 시뮬레이션은 IBM PC 486으로 행하였으며, 사용한 언어는 Borland C이다. 그림 4.3은 동기프레임 PI제어기를 본 시스템의 내부 전류제어기로 적용할 때 공간벡터 PWM법과 제어기 이득을 적용한 경우의 시뮬레이션 파형이다.

5. 결 론

본 연구에서는 슬라이딩 모드 제어법을 이용하여 리니어 모터의 정밀 위치 제어를 행하였다. 위치제어 알고리즘으로서 외란이나 파라미터 변화에 무관한 강인성을 보이고 일정 속도패턴을 가지는 전 영역 슬라이딩 모드를 이용하여 양호한 제어특성을 얻었다.

참고문헌

1. 白木學, 宮美修美, "리ニア모-타設計應用의要點", 日本工業技術センタ, 1985.
2. 任達鎬 外 2人, "等價回路法과 SLMT를 利用한 片側式 線型 誘導 電動機의 設計變數 最適化", 電氣學會論文誌 vol.42, no.5, pp. 20-28, 1993.
3. Y. J. Lee, Y. D. Son, "Implementation and characteristic analysis of variable structure vector control system for position control of induction motor," Trans. KIEE, vol. 42, no. 1, pp 95 - 106, 1993.

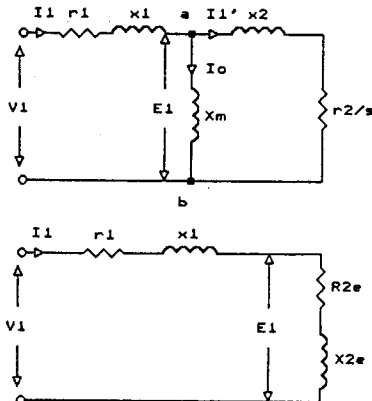


Fig. 2 Equivalent circuit per phase

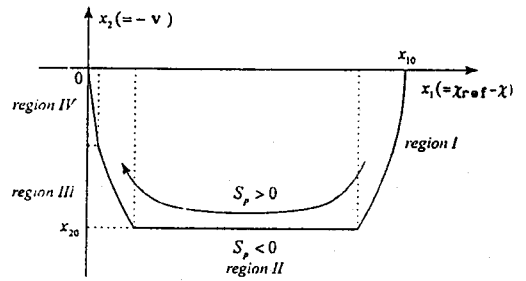


Fig. 3.1 Selection of sliding trajectory

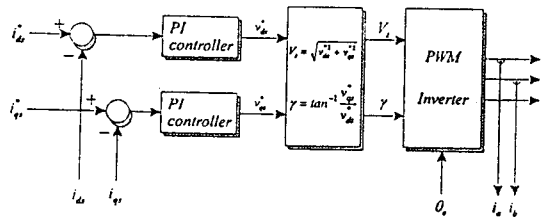


Fig. 3.2 Synchronous frame PI current controller

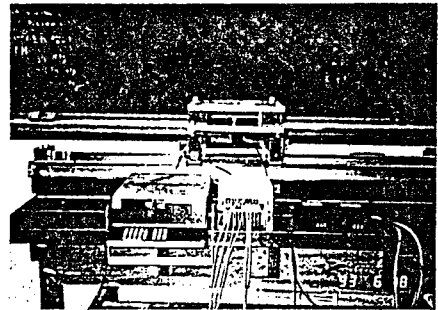


Fig. 4.1 Test apparatus

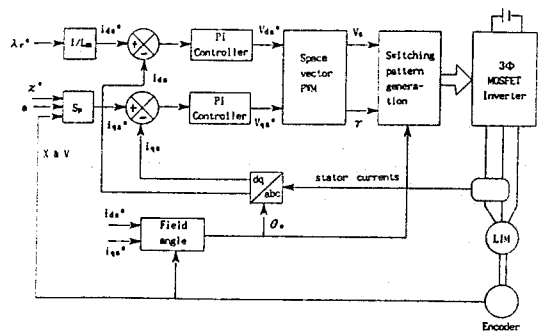


Fig. 4.2 Block diagram of control system