

슬라이딩모드 관측기를 이용한 영구자석 선형 동기전동기의 센서리스 위치제어

손영대, 노동훈, 조성호, 김규탁
 동서대학교 정보시스템공학부, 창원대학교 전기공학부

Sensorless Position Control of a PM Linear Synchronous Motor by Sliding Mode (

Young-Dae Son, Dong-Hun No, Sung-Ho Cho, Gyu-Tak Kim
 Dongseo Univ., Changwon Nat'l Univ.

Abstract - This paper presents the implementation of a position sensorless vector control system of a PM linear synchronous motor by sliding mode observer based on TMS320F240 DSP controller. Sliding mode observer estimates the secondary velocity and position based on the measurement of current, and it shows very robust characteristic to parameter variation. Therefore, it improves the system performance deterioration caused by system parameter variations. Simulation and experimental considerations are presented to confirm the applicability of sliding mode observer to the sensorless position control of PMLSM.

1. 서 론

영구자석 선형동기전동기(PMLSM)는 다른 선형전동기에 비해 단위 무게 당 높은 추력을 얻을 수 있고 효율이 높은 이점이 있으므로 직선 추진력을 필요로 하는 정밀 시스템에 폭 넓게 적용되고 있다[1]. 그리고, PMLSM의 고성능제어를 위해서는 위치 및 속도 정보가 필요하므로 속도나 위치센서가 필수적이다. 그러나 이런 센서는 제작상 비용의 증가를 가져올 뿐만 아니라 시스템이 복잡해지고 주위환경에 민감하여 종종 문제를 발생시키는 단점이 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해 최근 회전자들 중심으로 센서리스 제어에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으나 PMLSM과 같은 선형 전동기 특히, 행정이 짧은 저속 구동 위치제어 시스템에 적용한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

영구자석형 동기기의 센서리스 제어방식에 대한 초기 연구는 주로 전류 및 전압 파형을 분석하여 회전자 위치를 평가하는 방법이었다. 이러한 방법은 몇 개의 이산적인 각도만 알 수 있으며 고속 페루프 제어시스템에는 적용할 수 없다. 또 다른 연구로서, 역기전력을 측정하여 회전자각을 검출하는 방법이다. 이 방법은 PMLSM의 위치제어와 같은 저속운전에 부적합하며 측정 노이즈에 민감하다. 최근들어 높은 정밀도와 큰 적용범위 때문에 관측기를 이용한 회전자 위치 및 속도 평가방법들이 폭 넓게 연구되고 있다[2][3][4].

따라서, 본 논문에서는 연속치 제어계통 설계에 있어서 가장 널리 쓰이고 있는 제어방식인 PI제어기를 주제어기로 구성하고, 주제어기의 제어입력값을 추정하기 위하여 파라미터 변동에 강한 슬라이딩 모드 관측기를 적용하여 PMLSM의 센서리스 위치제어를 행하였다. 센서리스 위치제어를 위한 가동자의 위치 및 속도는 PMLSM으로 인가되는 측정전류로부터 추정하였으며, 고정프레임상의 전류오차를 스위칭 함수로 하는 슬라이딩 모드 관측기를 설계하였다. 또한, 슬라이딩 모드 관측기의 관측성능 확인과 PMLSM의 센서리스 위치제어의 타당성 검증을 위해 TMS320F240 DSP를 기반으로 한 제어시스템을 구성하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였으며 그 결과를 검토하였다.

2. 본 론

2.1 PMLSM의 수학적 모델링

영구자석형 선형 동기기의 수학적 모델링은 근본적으로 회전형 동기기와 같으며 고정프레임상에서의 2축 전압방정식을 각각 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$V_a = (R_s + pL_s) \cdot i_a - \omega_r \psi_f \sin \theta_r \tag{1}$$

$$V_b = (R_s + pL_s) \cdot i_b + \omega_r \psi_f \cos \theta_r \tag{2}$$

이 전압 방정식을 동기프레임상으로 좌표변환하여 전류에 대한 방정식으로 나타내면 식 (3)과 (4)와 같다.

$$p i_d = \omega_r i_q + \frac{R_s}{L_s} i_d + \frac{1}{L_s} V_d \tag{3}$$

$$p i_q = -\frac{R_s}{L_s} i_q + \omega_r i_d - \frac{\psi_f}{L_s} \omega_r + \frac{1}{L_s} V_q \tag{4}$$

여기서, $p = \frac{d}{dt}$, ω_r = 동기각속도, R_s = 고정자 저항

ψ_f = 영구자석에 의한 쇄교자속

추력 방정식은 전기적인 입출력 관계에 의해 다음과 같이 식 (5)으로 표현된다.

$$F_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{\pi}{\tau} \psi_f i_q \tag{5}$$

그리고, 속도 방정식의 경우 운동 방정식을 이용하여 다음과 같이 식 (6)로 나타낼 수 있다.

$$p v = -\frac{D}{M} v + \frac{1}{M} (F_e - F_L) \tag{6}$$

여기서, $p = \frac{d}{dt}$, D = 점성 계동 계수, F_L = 부하력,

F_e = 발생추력, M = secondary의 무게

선형동기속도는 $v_s = 2\tau f$ 로 나타낸다.

2.2 제어기 설계

본 논문에서는 PI제어기법을 적용한 위치제어 시스템을 구성하였다. 여기서, 전동기의 속도에 관계없이 전류 제어 특성이 우수한 공간전압벡터 PWM기법을 사용하기 위하여 비선형 요소를 포함하는 식 (3)과 (4)의 역기전력 성분 $-\omega_r L_s i_q$, $\omega_r (L_s i_d + \psi_f)$ 을 별도로 처리하는 전압분리제어를 적용하였다.

그림 1은 PI제어 시스템을 블록다이어그램으로 나타낸 것이다.

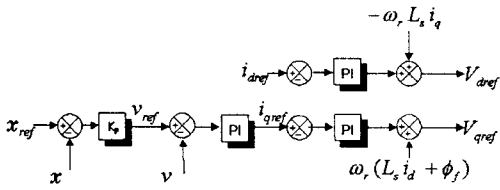


그림 1 PI제어기 구성도

2.3 슬라이딩 모드 관측기 설계

PI제어기의 입력변수인 속도 및 위치를 추종하기 위하여 외부 파라미터 변동에 강인한 슬라이딩 모드 관측기를 사용하였다. PMLSM을 위한 관측기의 고정프레임상의 수학적 모델링은 식 (7)~(10)로 나타낼 수 있다.

$$p i_\alpha = -\frac{R_s}{L_s} i_\alpha + \frac{\omega_r}{L_s} \psi_f \sin \theta_r + \frac{1}{L_s} u_\alpha \quad (7)$$

$$p i_\beta = -\frac{R_s}{L_s} i_\beta - \frac{\omega_r}{L_s} \psi_f \cos \theta_r + \frac{1}{L_s} u_\beta \quad (8)$$

$$p x = v \quad (9)$$

$$p v = -\frac{\psi_f}{M} (i_\alpha \sin \theta_r - i_\beta \cos \theta_r) - \frac{F_L}{M} - \frac{D}{M} v \quad (10)$$

여기서, u_α 와 u_β 는 고정프레임상에서 측정된 유기전압 성분이다. 먼저, 스위칭 함수와 보정항을 정의하면,

$$S = \begin{Bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{Bmatrix} = 0; \quad (11)$$

$$w = \begin{Bmatrix} w_\alpha \\ w_\beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_s \cdot \text{sgn}(S_\alpha) \\ K_s \cdot \text{sgn}(S_\beta) \end{Bmatrix} \quad (12)$$

슬라이딩 관측기는 식 (13)~(16)과 같은 구조를 가진다.

$$p \hat{i}_\alpha = -\frac{R_s}{L_s} \hat{i}_\alpha + \frac{\hat{\omega}_r}{L_s} \psi_f \sin \hat{\theta}_r + \frac{1}{L_s} u_\alpha - w_\alpha \quad (13)$$

$$p \hat{i}_\beta = -\frac{R_s}{L_s} \hat{i}_\beta - \frac{\hat{\omega}_r}{L_s} \psi_f \cos \hat{\theta}_r + \frac{1}{L_s} u_\beta - w_\beta \quad (14)$$

$$p \hat{x} = \hat{v} \quad (15)$$

$$p \hat{v} = -\frac{\psi_f}{M} (\hat{i}_\alpha \sin \hat{\theta}_r - \hat{i}_\beta \cos \hat{\theta}_r) - \frac{D}{M} \hat{v} + G_1 w_\alpha + G_2 w_\beta \quad (16)$$

여기서, G_1 과 G_2 는 관측기 이득이다. 식 (7)~(16)에서 관측기의 동적 오차를 얻을 수 있다. 만일 K_s 가 충분히 큰 값이라면 관측기 상태는 스위칭 함수 $S=0$ 와 $\dot{S}=0$ 에 도달할 것이다. 이 상태에서 보정항의 등가값은 식 (17)~(18)으로 나타난다.

$$w_\alpha = \frac{\psi_f}{L} (\hat{\omega}_r \sin \hat{\theta}_r - \omega_r \sin \theta_r) \quad (17)$$

$$w_\beta = -\frac{\psi_f}{L} (\hat{\omega}_r \cos \hat{\theta}_r - \omega_r \cos \theta_r) \quad (18)$$

식 (17)~(18)을 이용하면 이득 G_1 과 G_2 를 결정할 수 있다,

2.4 시스템구성

그림 2는 전체 시스템의 구성도이다. 3상 인버터의 출력전류는 2상 고정프레임상의 값으로 변환된 후 슬라이딩 모드 관측기의 입력이 된다. 슬라이딩 모드 관측기에서 추정된 속도 \hat{v} 와 위치 $\hat{\theta}$ 는 PI제어기로 입력되며, PI제어기에서 고정자 전압의 전압지령치를 얻는다. 이 값에 기준하여 공간벡터 펄스폭 변조 패턴이 결정된다.

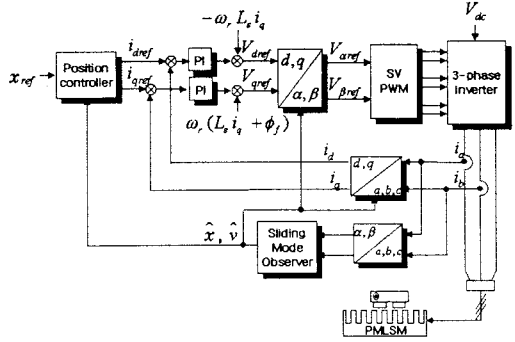


그림 2 전체 시스템 구성도

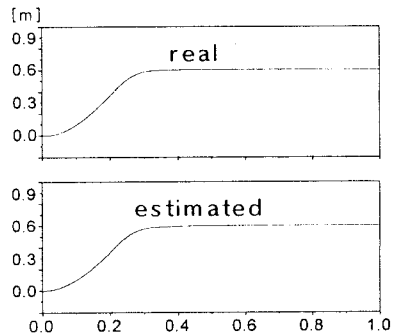
2.5 시뮬레이션

시뮬레이션 및 실험에 사용된 영구자석 선형동기전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

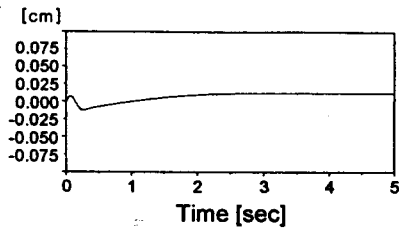
표 1 PMLSM의 파라미터

극수 P	4극
정격출력 P _{out}	500 [W]
상전류 I _p	2.74 [A]
권선저항 R _s	9.9 [Ω]
인덕턴스 L _s	0.055 [H]
가동자 질량 M	15 [kg]
마찰계수 D	0.005 [kgm/sec]
극간격 τ	69 [mm]

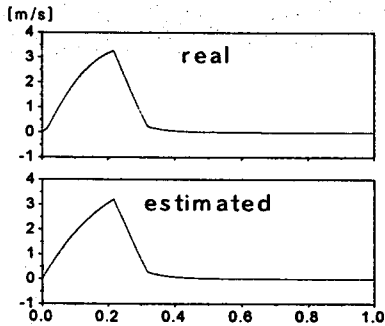
슬라이딩 모드 관측기를 이용한 PMLSM의 동특성과 강인성을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 사용한 샘플링 주기 T_s는 0.1[ms]이다. 본 논문에서 사용된 시험기의 경우 영구자석 자극폭 조절법과 영구자석 재배치법의 디텐트력 저감기법을 적용해 20[N] 정도의 디텐트력을 1[N]미만까지 줄였고, 주기성 또한 발생하지 않았다. 따라서, 시뮬레이션에서는 디텐트력을 고려하지 않았다. 그림 3은 무부하에서 위치지령 0.6[m]를 주었을 때의 시뮬레이션 결과이다.



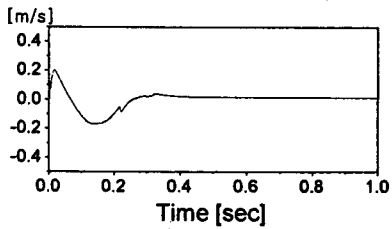
(a) 실제 및 추정위치



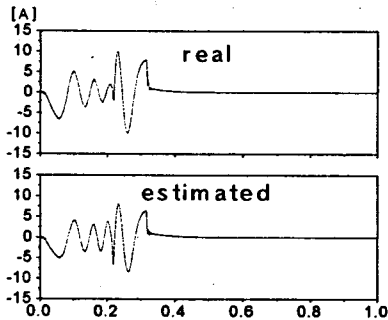
(b) 실제치와 추정치의 오차
그림 3 PMLSM의 위치특성



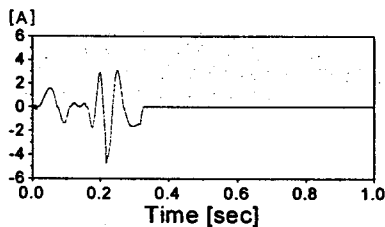
(a) 실제 및 추정속도



(b) 실제치와 추정치의 오차
그림 4 PMLSM의 속도특성

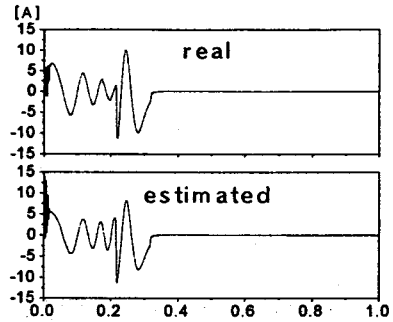


(a) i_a 전류의 실제 및 추정파형

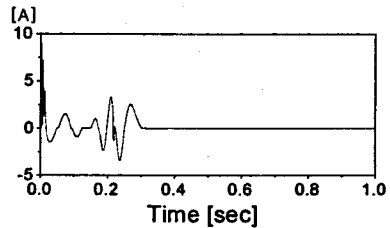


(b) 실제치와 추정치의 오차

그림 5 PMLSM의 i_a 전류 특성



(a) i_β 전류의 실제 및 추정파형



(b) 실제치와 추정치의 오차

그림 6 PMLSM의 i_β 전류 특성

그림 4는 위치제어시 위치변화에 따른 가동자의 속도 특성을 나타낸 시뮬레이션 결과이다.

그림 5와 6은 위치 제어시 i_a , i_β 전류 파형을 나타내고 있다.

그림 3~4에서 시뮬레이션 결과를 보면 위치의 경우 오버슈트 없이 위치 지령치에 약 0.4[sec]만에 도달하고 추정치와 오차가 0.025[cm]정도로 아주 정확히 추종하는 것을 알 수 있다. 속도와 전류도 양호한 응답특성을 보이고 있다.

3. 결 론

PMLSM의 정확한 센서리스 위치제어를 위해 슬라이딩 모드 관측기를 적용하여 위치제어 특성을 검토해 보았다. 시뮬레이션 결과를 통해 위치를 추종하는 파형과 속도 및 전류를 비교함으로써 제안한 시스템의 타당성을 확인하였다.

현재 TMS320F240 DSP를 기반으로 한 제어기를 구성하여 실제 시험기에 적용하는 연구를 진행중에 있으며 차후 본 논문의 내용과 비교할 계획이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Jacek F. Gieras and Zbigniew J. Piech, Synchronous Motors, CRC press, 2000.
- [2] Kan-Ping Chin, Z. H. Hong, and H. R. "Shaft-Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors Using a Sliding Observer". *Trans. on Control Applications*, Vol. Sept-4, pp.38 1998.
- [3] Vadim I. Utkin, "Sliding Mode Control Design Pr and Applications to Electric Drives". *IEEE Trans on Industrial Electronics*, Vol.IE-40, No.1, 1993.
- [4] Jun Hu, Dongqi Zhu, Yongdong Li and Jing "Application of Sliding Observer to Sensorless Perm Magnet Synchronous Motor Drive System". *I Annual Power Electronics Specialists Conference*, pp.532~536, 1994.