

Wavelet 변환을 이용한 PMLSM의 적응제어

이준*, 이진우*, 서진호*, 이영진**, 이권순***
 *동아대학교 전기공학과, **한국항공기능대학 전기계측제어과, ***동아대학교 전기전자컴퓨터공학부

Adaptive Control of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor using Wavelet Transform

June Lee*, Jin Woo Lee*, Jin Ho Suh*, Young Jin Lee**, and Kwon Soon Lee***

* Department of Electrical Engineering, Dong-A University

** Dept. of Electrical Instrument and Control, Korea Aviation Polytechnic College

*** Division of Electrical, Electronic and Computer Eng., Dong-A University

Abstract- 이 논문에서, 우리는 PMLSM(permanent magnet linear synchronous motor) 시스템에서 발생하는 detent force의 ripple 저감을 위한 진동보상 모델과 제안한 구조에 대한 제어기 설계 방법을 제시한다. 본 논문에서 고려되어진 제어기는 feedforward 보상기, PID feedback 보상기, 그리고 adaptive feedforward 보상기의 세 부분으로 구성된 제어기를 사용한다. 특히, PMLSM의 위치 정밀성 향상에 관한 연구를 위한 정밀 위치 제어의 문제는 PM으로 인해 발생하는 detent force이며, 이를 해결하기 위해 출력신호를 웨이블릿 변환하여 추출 후 이를 보상하였다.

(4) Tan [4]에 의하여 제안되어진 반복학습 제어기는 대상의 반복 작동 되풀이 응용에 사용되었다.

그러나 이러한 논문들에서는 detent force의 비선형적인 불확실성을 보상하기 위한 연구를 수행하였지만, detent force 부분에 대한 명확한 모델링은 제시되지 않았고, 특히 운송 시스템 설계의 경제적인 문제를 고려한 고정자(state module)들의 불규칙적 배치로 대한 연구는 진행되어지지 않고 있다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 시스템에 대한 detent force의 억제를 위한 모델링 및 제어기를 제시하고자 한다. 이러한 연구결과는 PMLSM을 이용한 운송 시스템 운용에 있어서 위치 정밀성 향상에 유용할 것이다.

1. 서 론

대규모 공장에서는 고용의 숫자를 줄이고 작업의 효율을 높이기 위해 자동화의 한 부분으로 복잡한 운송 시스템이 요구 되고 있다. 특히, 대부분의 운송 시스템 사이에서는 회전기가 기어 박스나 체인, 스크류 같은 변환기를 필요로 하므로 이송 시스템의 덩치가 커지고 복잡한 구조를 가지게 되는 문제를 내포하고 있으므로, 현재 선형 모터를 사용함으로써 이러한 문제점들을 해결하려고 하고 있다. 이러한 운송 시스템을 위해 LSM(linear synchronous motor), LIM(linear inductor motor), LPM(linear plus motor) 등이 연구 되어지고 있다. 하지만 이러한 기계적 이송 시스템을 위하여 선형모터를 사용하게 되면 모델의 불확실성 효과 또는 외란 저감 등의 고유의 능력을 결과적으로 잃게 되므로, 이러한 효과는 물리적 시스템 설계 및 제어기 설계를 통하여 감소시켜야 할 것이다. 특히 이러한 요소는 높은 속력과 높은 위치 정밀 제어를 요구하는 운송 시스템에 있어서 매우 중요한 요소이다.

2. 본 론

2.1 PMLSM의 모델링

일반적으로, PMLSM의 동적모델은 다음과 같이 동기 회전기와 같이 묘사 될 수 있다.

$$v_d = R_s i_s + p\lambda_d + \omega_e \lambda_q \tag{1}$$

$$v_q = R_s i_q + p\lambda_q - \omega_e \lambda_d \tag{2}$$

여기서

$$\lambda_q = L_q i_q \tag{3}$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{PM} \tag{4}$$

$$\omega_e = P\omega_r \tag{5}$$

그리고 v_d 와 v_q 는 $d-q$ 축의 전압, i_d 와 i_q 는 $d-q$ 축의 전류, R_s 는 고정자의 권선 저항, L_d 와 L_q 는 $d-q$ 축의 인덕턴스(inductance), ω_r 은 이동자의 각속도, ω_e 는 이동자의 전기적 각속도, λ_{PM} 은 영구자석의 누설자속, P는 Primary의 양극의 수, 그리고 p 는 미분 연산자이다. 더불어서,

$$\omega_r = \frac{\pi v}{\tau} \tag{6}$$

$$v_e = P v = 2\tau f_e \tag{7}$$

단, v 는 선형 속도, τ 는 pole pitch, v_e 는 선형 전기적 속도, f_e 는 전기적 주파수이다.

이때, 발생된 전자기력은 다음과 같이 기술되어진다.

$$P_e = F_e v_e = 3P[\lambda_d i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \frac{\omega_e}{2} \tag{8}$$

따라서 전자기 힘은

$$F_e = \frac{3\pi F[\lambda_d i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]}{2\tau} \tag{9}$$

이며, 이동자의 운동 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$F_e = Mdv + Dv + \alpha(\dot{\theta}) \tag{10}$$

단, M 은 시스템의 이동요소의 전체 질량, D 는 마찰력과 손실 상수, $\alpha(\dot{\theta})$ 는 외란 요소이다. 따라서, 식(4), (7), (8), (9)을 이용함으로써 운동 방정식은 다음과 같이 정

본 논문에서는, PMLSM의 위치 정밀성 향상을 위한 연구를 수행하기 위한 단계로서, PMLSM의 동특성 효과 중에서 자석 구조의 위치와 속도에 의하여 발생하는 detent force에 관한 연구를 수행한다. 이러한 detent force는 PMLSM 운영의 제한적 요소로 작용하는데 이를 해결하기 위한 소프트웨어적인 방법으로서 적응제어기(adaptive controller)를 제안한다. 더불어서 이러한 비선형적 형태로 발생하는 detent force를 극복하기 위한 많은 방법들이 제안되고져 있고, 관련 연구들을 간략히 기술하면 다음과 같이 정리되어질 수 있다.

- (1) [1]에서, H_∞ 최적 제환 제어는 외란의 높은 동특성을 제공하기 위하여 사용되었다.
- (2) [2]에서, 신경회로망(neural network) feedforward 제어기는 재생시간 지연 잡음으로 인해서 발생하는 위치의 부 정확성을 줄일 수 있다.
- (3) Yao와 Tomizuka는 기계의 고속 고정밀 운동 제어를 위해서 적응 강인성 제어기를 제시하였다 [3].

리되어진다.

$$F_e = \frac{3\pi\lambda_{PM}i_d}{2\tau} \quad (11)$$

본 논문에서 고려되어진 시스템의 블록선도는 Fig. 1 과 같이 표현되어질 수 있다.

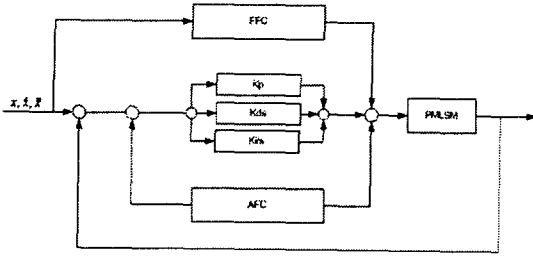


Fig. 1 Block diagram of the proposed control scheme for PMLSM

또한, PMLSM의 서보 드라이브 시스템은 Fig. 2와 같이 나타내어지고, 이러한 시스템은 다음과 같이 기술되어진다.

$$F_e = K_F i_d^* \quad (12)$$

$$K_F = 3\pi P \lambda_{PM} / 2\tau \quad (13)$$

$$H_p(s) = \frac{1}{Ms + D} = \frac{b}{s + a} \quad (14)$$

여기서 K_F 는 추력 상수, i_d^* 는 추력전류의 지시값, s 는 라플라스 연산자(Laplace operator)이다.

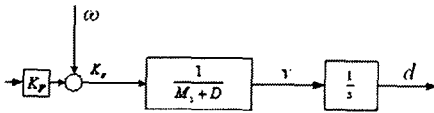


Fig. 2 PMLSM servo drive

2.2 제어기 설계

PMLSM의 동적 방정식은 다음과 같이 표현되어진다.

$$u(t) = k_e \dot{x}(t) + R_i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (15)$$

$$i(t) = \frac{1}{k_f} f(t) \quad (16)$$

$$f(t) = m \dot{x}(t) + f_{load}(t) + f_{fric}(t) + f_{ripple}(x, \dot{x}) + f_n(t) \quad (17)$$

여기서 $u(t)$ 와 $i(t)$ 는 각각 시변 모터의 종단 전압과 권선 전류이고, $f(t)$ 와 $f_{load}(t)$ 는 각각 추력과 부하를 표현하며 $x(t)$ 는 모터위치이다. 또한 $f_{fric}(t)$ 와 $f_{ripple}(t)$ 는 마찰력과 ripple force를 의미한다. 더불어서 $f_n(t)$ 는 시스템의 잡음(noise)과 다른 불명확한 요소들을 나타낸다. 위의 식들에서 모든 불확실성과 비선형성을 무시하면, 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$u(t) = k_e \dot{x} + \frac{Rm}{k_f} \ddot{x} + \frac{Lm}{k_f} \dddot{x} \quad (18)$$

2.2.1 Feedforward-Feedback

위에서 기술되어진 식 (18)에 기초함으로써, 우리는 다음과 같은 feedforward 제어기를 간단히 설계할 수 있다.

$$u_{FF} = k_e \ddot{x}_d + \frac{Rm}{k_f} \ddot{x}_d + \frac{Lm}{k_f} \dddot{x}_d \quad (19)$$

또한 고려되어진 피드백 제어기는 식 (20)과 같이 표현되어진 간단한 PID 제어기로 이용한다.

$$u_{PID} = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + k_d \dot{e}(t) \quad (20)$$

여기서 k_p, k_i, k_d 는 제어기의 세 가지 이득이며, 오차 신호(error signal)는 다음과 같이 나타내어진다.

$$e = x_d - x$$

2.2.2 Feedforward component-wavelet transform

본 단원에서는, 센서를 통하여 들어오는 외란 신호에서 detent force를 추출하기 위한 방법으로 웨이블릿 변환(wavelet transform)을 이용한다.

특히, 웨이블릿 해석은 척도가 중요한 역할을 하며, 척도가 큰 창을 통해서 신호를 관찰함으로써 그 신호의 전반적인 특징을 관찰할 수 있다. 반면에, 척도가 작은 창을 통해서 신호를 관찰하면, 신호의 세부적인 특징을 관찰할 수 있다. 따라서 신호가 가지고 있는 비정상적 성질들을 나타내는데 있어서 웨이블릿 해석이 유용하다고 할 수 있다.

(a) 척도 함수(Scaling Function)

$$\phi_{Dm}(t) = \sum_{n=0}^N c_n \phi_{Dm}(2t - n) \quad (21)$$

이 척도방정식을 풀기 위해 다음과 같은 반복 알고리즘을 사용한다.

$$\phi_{Dm}^{(j+1)} = \sum_{n=0}^N c_n \phi_{Dm}^{(j)}(2t - n) \quad (22)$$

이러한 반복의 과정을 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$[\phi_2] = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 c_0 \\ c_3 c_1 \\ c_2 c_0 \\ c_3 c_1 \\ c_2 c_0 \\ c_3 c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} [1] = M_2 M [1] \quad (23)$$

(b) 웨이블릿 함수 (Wavelet Function)

$$\psi_{Dm}(\omega) = \sum_{k=-K+1}^K (-1)^k c_{1-k} \phi_{Dm}(2t - k) \quad (24)$$

$$[\psi_2] = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 c_0 \\ c_3 c_1 \\ c_2 c_0 \\ c_3 c_1 \\ c_2 c_0 \\ c_3 c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -c_3 \\ c_2 \\ -c_1 \\ c_0 \end{bmatrix} [1] \quad (25)$$

3. 모의실험

먼저, Fig. 3에서 보여지는 것처럼 실제 PMLSM의 출력에서 검출한 Detent Force가 시스템에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있고, 또한 Fig. 4와 Fig. 5는 가속도 출력을 웨이블릿 변환한 결과들을 보여주고 있다. 특히, Fig. 5에서 나타내어지는 Level 7이 실제 가속도에 가장 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그리고, Level 1에서 Level 4까지의 신호는 크기는 작고 고주파인 관계로 알 수 없는 외란으로 분류 하였고 보상 신호에 반영하지는 않았다. 따라서 Level 5에서 Level

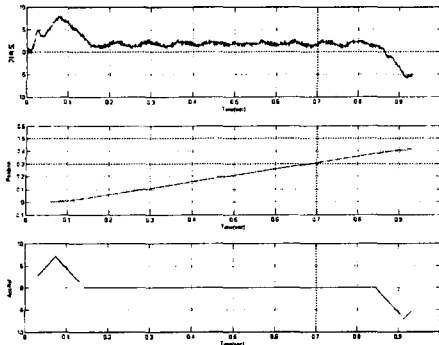


Fig.3 PMLSM의 가속도, 위치, 가속도 Reference

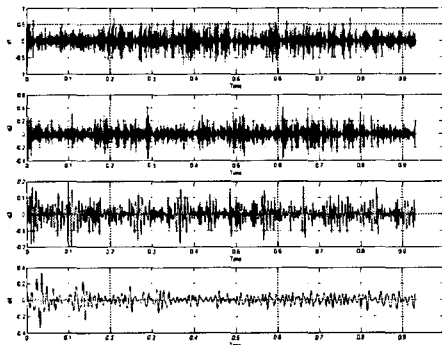


Fig.4 Wavelet; level 1, level 2, level 3, level 4

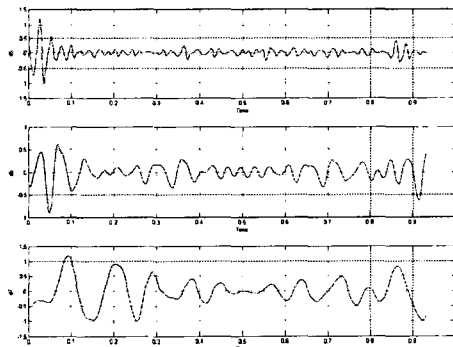


Fig.5 Wavelet; level 5, level 6, level 7

7까지의 신호를 보상신호로 사용하였다. 더구나 가속도 출력신호가 0으로 가지 않는 것은 등속도 운동을 시켰기 때문에 마찰력을 보상하기 때문이다. Fig. 6은 레벨 5에서 레벨 7까지의 신호를 제거한 가속도 신호, 출력된 가속도 신호 그리고 가속도 참조신호를 비교하여 보여주고 있다. 여기에 보상신호를 포함한 출력 신호를 Fig 7에서 보여 주고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 PMLSM의 위치 정밀성 향상에 관한 연구를 하였다. 정밀 위치 제어의 문제는 PM으로 인해

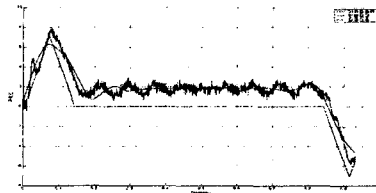


Fig. 6 Wavelet 변환된 신호, 가속도 출력, 참조신호

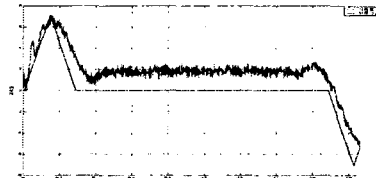


Fig. 7 보상이기 포함된 제어기의 출력신호

발생하는 Detent Force이며, 이를 해결하기 위해 출력 신호를 웨이블릿 변환하여 Detent Force를 추출 후 이를 보상하였다.

본 연구에 대한 향후 과제로서는 Detent Force 보상 신호의 시간 지연 문제로 인해서 완전히 보상되지 못하고 일부분이 여전히 존재 하고 있다.

본 연구는 한국과학기술부(MOST) 지정 국가지정연구실사업(NRL)의 지원에 의한 것입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] D. M. Alter and T. C. Tsao, "Control of linear motors for machine tool feed drives: design and implementation of H_{∞} optimal feedback control", ASME Journal of Dynamic systems. Measurement and Control, vol. 118, pp. 649-658, 1996.
- [2] G. Otten, T. J. Vries, J. Amerongen, A. M. Rankers, and E. W. Gaal, "Linear motor motion control using a learning forward controller", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 2, No. 3, pp. 179-187, 1997.
- [3] B. Yao and M. Tomizuka, "Adaptive robust control of SISO nonlinear systems in a semi-strict feedback form", J. of Automatica, Vo. 33, No. 5, pp. 893-900, 1997.
- [4] K. K. Tan, S. N. Huang, H. F. Dou, S. Y. Lim, S. J. Chin, "Adaptive Robust Motion Control for Precise Trajectory Tracking Applications", Mechatronics-submitted. 1999.
- [5] K. K. Tan, T. H. Lee, S. Y. Lim, and H. F. Dou, "Learning enhanced motion control of permanent magnet linear motor", Proc. of the 3rd IFAC Int. Workshop on Motion Control, pp. 397-402, 1998.
- [6] F. J. Lin, C. H. Lin, and C. M. Hong, "Robust control of linear synchronous motor servo-drive using disturbance observer and recurrent neural network compensator", Proc. of IEE Electrical Power Application, Vol. 47, No. 4, pp. 263-272, 2000.
- [7] K. K. Tan and S. Zhao, "Adaptive Force Ripple Suppression in Iron-core Permanent Magnet Linear Motors", Proc. of IEEE Int. Symposium on Intelligent Control, pp. 266-269, 2002.