

DTC를 이용한 능형 선형유도전동기의 위치 제어

김경민 , 박승찬

동양대학교 대학원 시스템제어공학과

Position Control of Linear Induction Motor with Cage-type Secondary Using Direct Thrust Control

Kyung-Min Kim\*, Seung-Chan Park

Dept. of System Control Engineering, Grauate School of Dongyang University

**Abstract** - This paper presents a position control system for a linear induction motor(LIM) with cage-type secondary using direct thrust control(DTC). The position controller, that combines the merits of integral-proportional(IP) speed control, is designed for the LIM. The actual position of the LIM is detected by the linear scale the resolution of 100 . Thrust correction coefficient due to the end effect of the LIM is utilized in estimating actual thrust. As a result, responses of the positon, speed, thrust, and flux are shown.

1. 서 론

산업 응용 분야에서 선형 유도전동기(Linear Induction Motor)는 회전기에 비해 부과적인 기계적 장치가 불필요하기에 마찰 손실, 소음등이 적으며, 또한 보다 정확한 위치 제어 정밀도, 빠른 가·감속 특성등을 갖고 있어 제어시스템에 다양하게 응용되고 있다[1].

본 논문에서는 능형 2차축을 갖는 선형 유도전동기에 순시 추력 및 고정자 자속으로 제어되는 직접 추력 제어(Direct Thrust Control) 알고리즘을 적용하여 구동하고, 또한 위치 제어를 구현하고자 위치 및 속도 제어를 P-IP 제어기를 이용하여 구현하였다. 이를 32비트 고속 DSP로 150MIPS 고속 처리 능력을 가진 TMS320F2812와 100μs의 분해능을 가지는 리니어 스케일을 사용하여 위치 제어 시스템을 구성하였다. 그러나, LIM은 구조적으로 비대칭을 이루어 이동방향 및 현재 위치에 따라서 다른 단부 효과를 가지게 된다. 이는 정확한 위치 제어시에는 단부 효과를 비교려시 보다 나은 제어 응답 특성을 요구할 수 없다[2]. 따라서, 본 논문에서는 단부 효과를 고려한 능형 2차축을 갖는 LIM을 DTC 알고리즘으로 구동하고 위치 제어를 행하였으며, 이때의 위치, 속도, 추력 및 전류 응답 등의 특성을 살펴보았다.

2. 제어 시스템 구성

2.1 LIM 모델링

제어기의 설계와 해석을 위해 Y-결선된 능형 2차축을 갖는 LIM의 모델은 추력 연산식으로부터 식(1)과 같이 유도되어진다.

$$\begin{aligned}
 F &= K_f (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \\
 &= M \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + F_L
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서,  $K_f = \frac{3}{2} k \frac{\pi}{\tau}$  로서 추력 상수이고,  $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$ 는  $d, q$  축 고정자 자속,  $i_{ds}, i_{qs}$ 는  $d, q$  축 전류,  $\tau$ 는 극간격,  $x$ 는 이동자의 위치,  $M$ 은 이동자의 전체 무게,  $B$ 는 마찰 점성계수,  $F_L$ 은 부하 외란을 나타낸다. 또한, 단부 효과를 고려하기 위해 추력보정계수  $k$ 를 적용하였고, 여기서  $k=0.9$ 로 정하였다. 그림 1의 전체 시스템 구성도는 그림 3과 같은 제어 블록도로 나타낼 수 있다. 식(2)의 LIM 전달함수는 식(1)을 라플라스 변환함으로써 얻어진다.

$$G_p(s) = \frac{1}{Ms + B} = \frac{b}{s + a}
 \tag{2}$$

여기서,  $a = B/M, b = 1/M$  이다.

2.2 직접 추력 제어

그림 1은 직접 추력 제어법을 이용한 능형 2차축을 갖는 LIM의 전체 제어시스템 구성도를 나타내고 있다. DTC는 연산된 고정자 자속과 순시 추력값을 각각의 지령치와 비교하여 오차가 설정한 히스테리시스 밴드폭 내에 존재하면서, 자속 벡터의 위치에 따라 최적의 전압 벡터 테이블에 의해 인버터 전압 벡터를 제어함으로써 빠른 추력 응답 특성을 가진다. 또한, 샘플링 주기마다 지령치와 비교되기에 불필요한 스위칭이 제거되어 고조파 손실과 노이즈 성분을 줄일 수 있다[3]. 본 논문에서는 그림 1과 같이 전동기에 인가되어지는 두 개의 선간 전압과 상전압을 전압 센서 및 전류 센서를 통해 검출하여 고정자 자속의 크기 및 벡터값, 순시 추력값을 연산함으로써 DTC를 구현하였다. 그림 2는 히스테리시스 밴드폭 내에서 전압 벡터를 적절히 제어함으로써 추력 및 자속이 제어됨을 나타내고 있다.

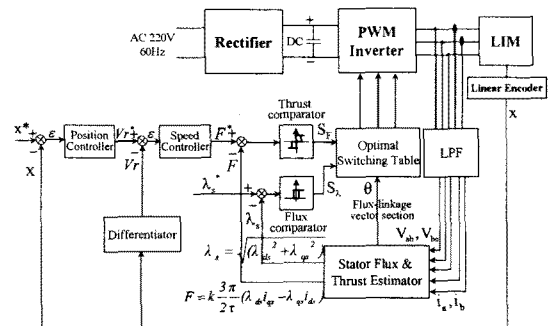


그림 1. 직접 추력 제어법을 이용한 시스템 구성도  
Fig. 1. System configuration using direct thrust control for linear induction motor

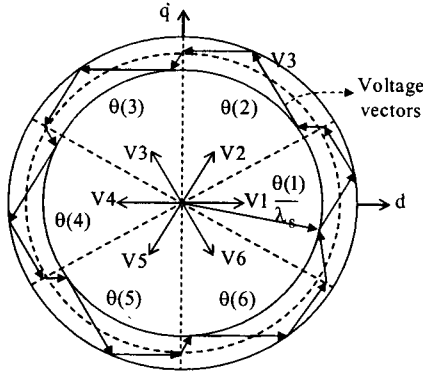


그림 2. 직접 추력 제어 원리  
Fig. 2. Control principle of the direct thrust

### 2.3 농형 2차축을 갖는 LIM의 위치 제어

그림 3과 같이 위치 제어 시스템을 구성하여 위치 제어는 P제어기, 속도 제어에서는 IP제어기를 구현하였다. 이로써 농형 2차축을 갖는 LIM의 위치 제어 응답에서 오버 슈트 및 정상 상태 오차를 발생하지 않고 상승 시간을 설정할 수 있는 특성을 얻을 수 있다[4]. 여기서 속도 제어기에 사용된 IP제어기는 그림 4와 같이 등가 변환되어진다[5].

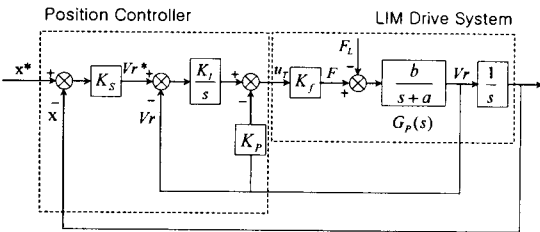


그림 3. 위치 제어 시스템  
Fig. 3. Position control system block diagram

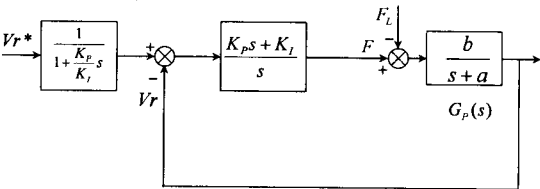


그림 4. IP 속도 제어기 블록도의 등가 변환  
Fig. 4. IP position control system block diagram

그림 4에서 보는 바와 같이 IP 속도 제어기는 지령치를 1차 지연하여 PI제어기를 통과시킨 것과 같다. 또한 기준 속도에 대한 실제속도의 전달함수를 구하면 식(3)과 같이 영점이 존재하지 않는다. 이는 기준 속도의 급격한 변동에 대하여 PI 제어기에 비해 제어기 출력이 작다. 그러므로 지령치에 대해서는 1차 지연 요소를 이용하여 원하는 응답을 얻을 수 있고, 외란에 대해 강인한 응답은 PI제어기를 통해 구현되어진다.

$$\frac{V_r}{V_r^*} = \frac{bK_f}{s^2 + (a + bK_p)s + bK_f} \quad (3)$$

여기서  $V_r^*$ 는 속도 지령값,  $V_r$ 은 실제 속도,  $K_s$ 는 위치 제어기의 비례 이득,  $K_p$ ,  $K_f$ 는 각각 속도 제어기의 비례 이득과 적분이득이다. 본 실험에서는  $K_s = 0.00310$ ,  $K_p = 8.90$ ,  $K_f = 795.0$ 으로 정하였다. 본 논문에서 구현된 농형 2차축을 갖는 LIM의 위치 제어는 RSF사의 리니어 스케일을 사용하였다. 리니어 스케일은 MS 63-35GA로서 grating pitch가 100 이고, 최대 측정 길이는 720 를 가진다. 리니어 스케일의 출력 신호의 분해능을 높이고자 커넥터 body에 내장되어 있는 subdividing 회로를 통해 출력 신호는 25배배 되어진다. 또한 DSP인 F2812에서도 엔코더 신호의 4배배 로직을 내장하고 있어 분해능은 1 을 가지게 되므로 높은 정밀도를 요구하는 시스템에 적용할 수 있다.

### 3. 실험 장치 구성

본 실험에서는 DSP인 TMS320F2812를 사용하여 농형 2차축을 갖는 LIM의 위치 제어기를 구현하였으며, 600[V], 30[A]용인 IPM을 사용하여 인버터를 제작하였다. 또한 전동기에 인가되어지는 두 개의 선간 전압과 상전류 신호를 검출하고자 전압 센서 및 전류 센서를 사용하였다. 그러나 센서 출력 신호들에 포함되어 있는 고주파 성분 및 dc offset 성분을 제거하고자 LPF를 설계하여 사용하였다. 여기서 32bit인 TMS320F2812는 150 로 동작하기에 복잡한 연산이라도 빠른 시간내에 수행할 수 있다. 또한 4배배 엔코더 신호 검출회로가 있어 보다 용이하게 위치 및 속도를 연산하고, 12bit의 A/D converter도 내장되어 센서 신호를 보다 정확하게 검출할 수 있어 정밀한 연산 및 응답 특성을 요구할 수 있다 [6].

### 4. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서는 DTC로 구동되어지는 농형 2차축을 갖는 LIM의 위치 제어를 구현하였다. DTC의 알고리즘은 선간 전압 및 상전류를 검출하여 연산된 순시 추력과 고정자 자속을 히스테리시스 제어기의 출력에 의해 최적의 전압 벡터를 선택함으로써 구현되었다. 또한, 추력 보정 계수를 도입하여 LIM의 단부효과를 고려하였다. 그리고 LIM의 위치 제어는 리니어 스케일의 A, B상 신호를 받아 위치 및 속도 제어를 P-IP 제어기로 구현하여 위치 응답 특성을 살펴보았다.

그림 5는 LIM의 위치 지령치를 400mm 왕복 구동시 위치 오차를  $\pm 50\mu$  이내로 설정하였을 때의 응답 특성을 나타내고 있다. 그림 6은 위치 제어시 속도 응답으로서 실제 속도가 최대 1.4m/s가 나옴을 알 수 있고, 그림 7은 추력 응답, 그림 8과 그림 9는 d, q축 전류와 자속을 보여주고 있다.

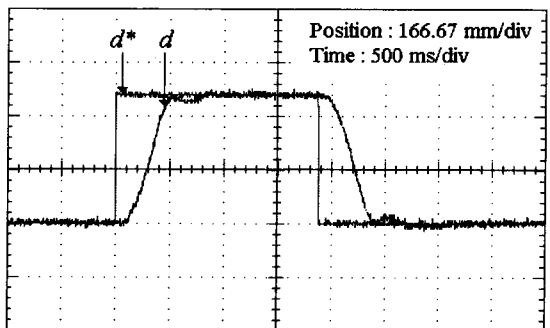


그림 5. 위치 응답  
Fig. 5. Position response

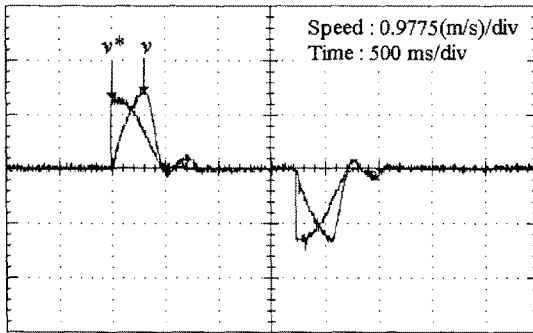


그림 6. 속도 응답  
Fig. 6. Speed response

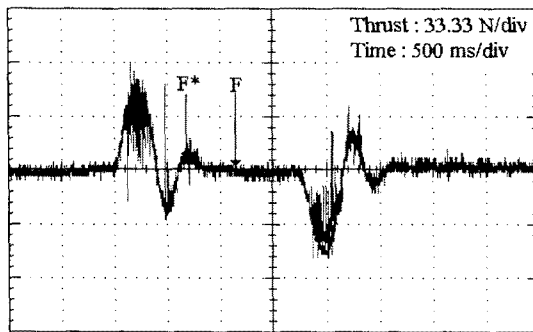
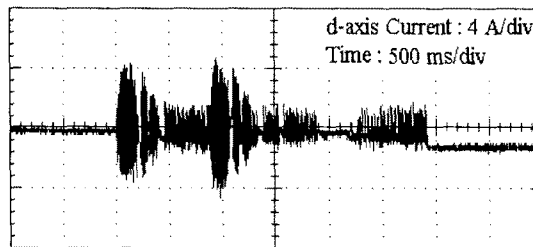
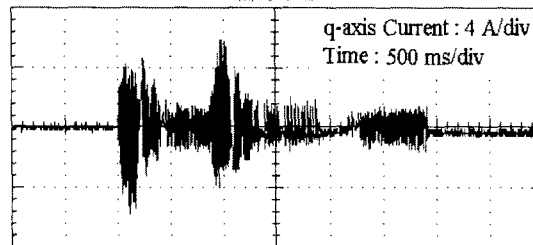


그림 7. 추력 응답  
Fig. 7. Thrust response

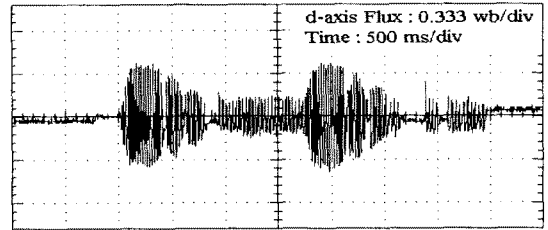


(a) d-axis

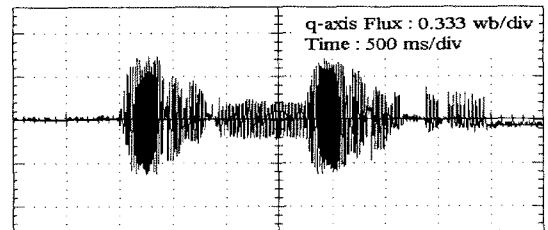


(b) q-axis

그림 8. d-q축 전류 응답  
Fig. 8. Current response of d-q axis



(a) d-axis



(b) q-axis

그림 9. d-q축 자속 응답  
Fig. 9. Flux response of d-q axis

## 5. 결 론

본 논문에서는 농형 2차축을 갖는 LIM에 대하여 단부 효과를 고려한 직접 추력 제어기법과 P-IP 제어기를 이용하여 위치 제어를 수행하였다. 이때 오버 슈트 및 정상 상태 오차를 발생시키지 않으면서 상승 시간을 미리 조절할 수 있는 P-IP제어기를 이용하여 위치 오차가  $\pm 50\mu\text{m}$  내에 존재함을 확인하였다. 또한 속도, 추력, d, q축 전류 및 자속 응답 특성을 고찰하였다.

본 연구는 한국전력연구원 기초전력공동연구소 지원에 의해 수행되었음(과제 번호 : R-2003-B-418).

## [참 고 문 헌]

- [1] I. Boldea and S. A. Nasar, *Linear Electric Actuators and Generators*. Cambridge, U.K.:Cambridge Univ.Press,1997.
- [2] 김경민, 박승찬, "단부 효과를 고려한 농형 2차축을 갖는 선형 유도전동기의 직접 추력 제어 응답 특성 고찰", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 추계학술대회 논문집, pp.15-17, 2003. 10.
- [3] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford Press, 1988
- [4] Faa-Jeng Lin, Rong-Jong Wai, "Robust Control Using Neural Network Uncertainty Observer for Linear Induction Motor Servo Drive", IEEE Trans on Power Electron., vol. 17, No. 2, pp.241-254, 2002
- [5] 설승기, "전기기기제어론", 브레인 코리아, 2002. 10.
- [6] Texas Instruments, "TMS320F28x Event Manager Reference Guide", spru065b