

직접 추력 제어에 의한 농형 선형 유도 전동기의 속도 제어

김경민\*, 박승찬  
 동양대학교 대학원 시스템제어공학과

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

Kyung-Min Kim\*, Seung-Chan Park  
 Dept. of System Control Engineering, Graduate School of Dongyang University

**Abstract** - This paper presents a speed control system for a linear induction motor(LIM) with cage-type secondary using direct thrust control(DTC). The actual speed of the LIM is detected by the linear scale with the resolution of 100 $\mu$ m. Thrust correction coefficient due to the end effect of the LIM is utilized in estimating actual thrust. As a result, responses of the thrust, current, speed, and flux are shown.

샘플링 주기마다 지령치와 비교하여 그림 2와 같이 인버터 스위칭 함수에 따라 전압 벡터를 적절히 제어함으로써 히스테리시스 밴드폭 내에서 고정자 자속과 순시 추력이 제어되어진다. 표 1은 고정자 자속의 위치 정보가 구해졌을 때 자속과 추력에 따른 전압벡터를 나타내고 있다[2][3]. 여기서,  $S_\lambda = 1, S_\lambda = 0$ 은 각각 자속의 증가 또는 감소를,  $S_F = 1, S_F = 0, S_F = -1$ 은 각각 추력의 증가, 감소, 반대 방향 추력 증가를 나타낸다.

1. 서론

농형 2차축을 갖는 LIM의 제어 응답 특성을 향상시키기 위해서는 제어 변수를 정확하게 연산하여야 한다. 따라서, 본 논문에서는 전동기에 인가되어지는 선간 전압 및 상전류를 검출하여 연산된 순시 추력을 제어하는 직접 추력 제어(Direct Thrust Control) 알고리즘을 도입하고, DSP인 TMS320F2812를 사용하여 속도 제어를 구성하였다. 속도 계측을 위해 100 $\mu$ m의 분해능을 가지는 리니어 스케일을 이용하여 속도를 연산하였다. LIM의 단부 효과를 고려하기 위하여 추력 연산시에 추력 보정 계수를 도입하였다[1]. 본 논문에서는 농형 2차축을 갖는 LIM에 대하여 직접 추력 제어를 이용하여 속도 제어를 행하였으며, 이때의 추력, 속도 및 자속 응답등의 특성을 고찰하였다.

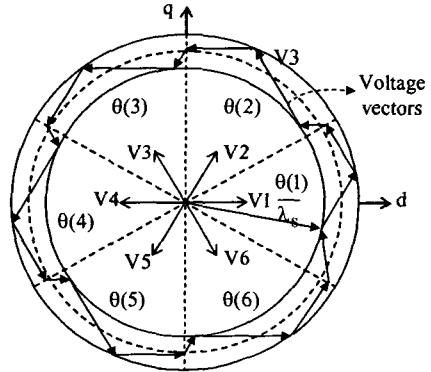


그림 2. 전압 벡터도  
 Fig. 2. Voltage vector

2. 직접 추력 제어

2.1 추력 연산 알고리즘

그림 1은 직접 추력 제어법을 이용한 속도제어의 기본적인 원리를 나타낸다. DTC는 빠른 추력 응답을 가지는데, 본 논문에서는 전동기에 인가되어지는 두 개의 선간 전압과 상 전류만으로 제어 변수인 고정자 자속과 순시 추력값을 연산하였다.

표 1. 최적의 스위칭 전압벡터 테이블  
 Table 1. Optimal switching voltage vector

		$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	$\theta(4)$	$\theta(5)$	$\theta(6)$
$S_\lambda = 1$	$S_F = 1$	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	$S_F = 0$	V7	V0	V7	V0	V7	V0
	$S_F = -1$	V6	V1	V2	V3	V4	V5
$S_\lambda = 0$	$S_F = 1$	V3	V4	V5	V6	V1	V2
	$S_F = 0$	V0	V7	V0	V7	V0	V7
	$S_F = -1$	V5	V6	V1	V2	V3	V4

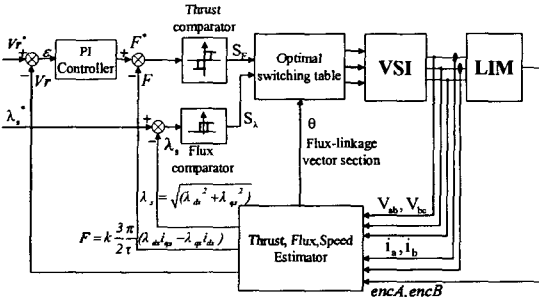


그림 1. 직접 추력 제어법을 이용한 속도 제어기의 구성도  
 Fig. 1. Speed control block diagram using direct thrust control for linear induction motor

2개의 선간 전압  $V_{ab}, V_{bc}$ 와 2개의 상전류  $i_a, i_b$ 로부터  $d, q$ 축 전압  $V_{ds}, V_{qs}$  및  $d, q$ 축 전류  $i_{ds}, i_{qs}$ 을 유도하면 식(1)~식(4)와 같다.

$$V_{ds} = \frac{2V_{ab} + V_{bc}}{3} \quad (1)$$

$$V_{qs} = \frac{V_{bc}}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$\ddot{i}_{ds} = i_a \quad (3)$$

$$i_{qs} = \frac{i_a + 2i_b}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

따라서, 고정자 쇄교자속은 각각 다음과 같이 유도된다.

$$\lambda_{ds} = \int (V_{ds} - R_s i_{ds}) dt \quad (5)$$

$$\lambda_{qs} = \int (V_{qs} - R_s i_{qs}) dt \quad (6)$$

식(5)와 식(6)을 DSP에서 연산하기 위하여, 식(7)~(8)과 같은 디지털 연산식을 도입하였다.

$$\lambda_{ds}(n) = \alpha \lambda_{ds}(n-1) + \{V_{ds}(n) - R_s i_{ds}(n)\} T_s \quad (7)$$

$$\lambda_{qs}(n) = \alpha \lambda_{qs}(n-1) + \{V_{qs}(n) - R_s i_{qs}(n)\} T_s \quad (8)$$

여기서,  $R_s$ 는 고정자 저항,  $T_s$ 는 샘플링 시간,  $n$ 은 샘플링을 나타내고,  $\alpha$ 는 디지털 적분 연산시에 발산을 방지하기 위한 보정 상수로서  $\alpha = 0.99$ 이다. 그리고, 자속 적분시 순수 적분기를 사용하게 되면 전압 및 전류의 센서 출력 신호들에 포함되어 있는 고주파 성분 및 DC offset 성분등으로 적분포화 현상이 발생하게 된다. 따라서 high pass filter 개념을 도입하여 적분 포화 현상을 방지하여 오차를 개선하였다[4][5]. 또한, 샘플링 시간 동안에 A/D 값을 수만 번 읽어 들여 평균값을 구하는 방식인 이동 평균 필터 이론을 적용하였다[6].

위 식(3)~식(6)을 이용하여 단부 효과를 고려한 농형 LIM의 추력식을 유도하면 다음과 같다.

$$F(n) = k \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \{ \lambda_{ds}(n) i_{qs}(n) - \lambda_{qs}(n) i_{ds}(n) \} \quad (9)$$

여기서  $\tau$ 는 극간격이고,  $k$ 는 단부 효과를 고려한 추력 보정계수이다. 추력 보정 계수는  $k = 0.9$ 로 결정하였다.

## 2.2 실험 장치 구성

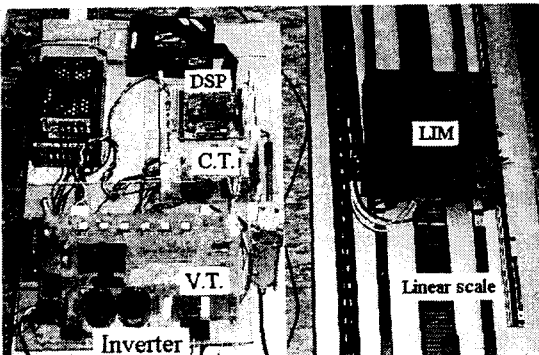


그림 3. 농형 LIM의 속도 제어 실험 장치  
Fig. 3. Photograph of speed control of LIM using direct thrust control

본 논문에서는 DSP인 TMS320F2812를 사용하여 제어를 구성하였으며, 또한 600[V], 30[A]용인 IPM을 사용하여 인버터를 제작하였다. 또한 전동기에 인가되어지는 선간 전압과 상전류 신호를 검출하고자 전압 센서 및 전류 센서를 사용하였다. 32bit인 TMS320F2812는 150MHz로 동작하기에 복잡한 연산이라도 빠른 시간내에 수행할 수

있다. 또한 4채배 하여 엔코더 신호 검출 회로가 있어 보다 용이하게 속도를 연산하고, 12bit의 A/D converter도 내장되어 있어 센서 신호를 보다 정확하게 검출할 수 있어 정밀한 연산 및 응답 특성을 요구할 수 있다[7]. 그림 3은 본 실험에 사용된 LIM의 속도 제어 실험 장치의 사진이다.

## 3. 농형 LIM의 속도 제어

본 논문에서는 농형 LIM의 속도 제어를 구현하고자 RSF사의 리니어 스케일을 사용하여 속도 제어를 구현하였다. 실험에서 사용한 리니어 스케일은 MS 63-35 GA로서 grating pitch가 100 $\mu$ m이고, 최대 측정 길이는 720mm를 가진다. 리니어 스케일의 출력 신호의 분해능을 높이고자 커넥터 body에 내장되어 있는 subdividing 회로를 통해 출력 신호는 25채배 되어진다. 또한 DSP인 F2812에서도 엔코더의 신호를 4채배하는 로직을 내장하고 있기에 분해능은 1 $\mu$ m를 가지므로 높은 정밀도를 요구하는 시스템에 적용할 수 있다.

본 실험에서는 사용된 리니어 스케일이 1 $\mu$ m의 분해능을 가지기에 저속에서도 속도 오차는 그다지 문제로 발생되지 않으므로 속도연산 방법에서 M-method을 이용하여 농형 LIM의 실제 속도 연산식은 식(10)과 같다.

$$v = \frac{N}{T_c \times 10^{-6}} \text{ [m/s]} \quad (10)$$

여기서,  $N$ 은 엔코더 펄스 수이고,  $T_c$ 는 샘플링 시간이다. 본 논문에서는 농형 LIM의 속도 제어에 사용된 디지털 PI제어기는 식(11)과 식(12)로 표현되어진다.

$$e(n) = v^*(n) - v(n) \quad (11)$$

$$F^*(n) = K_p e(n) + \frac{K_I T_c}{2} \{e(n-1) + e(n)\} \quad (12)$$

여기서,  $e$ 는 속도 오차값이고,  $v^*$ 는 속도 지령값,  $v$ 는 실제 속도,  $F^*$ 는 직접 추력 제어 지령값,  $T_c$ 는 샘플링 시간,  $K_p$ 는 비례 상수,  $K_I$ 는 적분 상수이다.

본 논문에서 비례 상수는 100이고 적분 상수는 150으로 정하였다. PI제어기의 입력은 속도 지령치와 실제 속도의 오차값이고, 출력은 추력 지령치로 내보내어져 연산된 순시 추력과 비교되어 DTC에서 설정된 순시 추력과 자속이 일정 밴드 내에 존재하면서 속도 지령치를 추종하게 제어되어진다. 그리고, F2812에서는 리니어 스케일 펄스 신호 카운팅을 타이머2를 사용하였고, 방향 정보 업-다운 카운팅 모드로 설정함으로써 보다 쉽게 알 수 있다. 또한, 높은 분해능을 지닌 리니어 스케일의 이 점은 펄스 신호를 카운팅으로서 현재 위치를 연산할 수 있다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서는 TMS320F2812를 사용하여 농형 LIM의 제어기를 구성하고, 전압 센서와 전류 센서를 사용하여 선간 전압과 상전류 검출하였다. 또한, 단부효과를 고려하여 직접 추력 제어 알고리즘을 구현하였다. 농형 LIM의 속도 제어는 리니어 스케일의 A, B상 신호를 받아 PI제어기로 구현하여 속도 제어 응답특성을 살펴보았다.

그림 4은 속도 지령치를 0.7[m/s]로 설정하였을 때 응답 특성이고, 그림 5는 추력의 히스테리시스 제어기의 밴드폭을  $\pm 2.5\%$ 로 설정하였을 때 속도 제어시 추력응답 특성을 나타내고 있다. 그림 6과 그림 7은 d-q축 전류와 자속 응답 특성이다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 농형 LIM의 속도 제어를 위하여 높은 정밀도를 지닌 리니어 스케일을 사용하였고, 직접 추력 제어기법과 PI제어기를 사용하여 속도 제어를 구현하였다. 또한, 직접 추력 제어시 농형 LIM의 단부 효과를 고려하였고, 속도 제어시 추력, 자속 및 전류 응답 특성을 고찰하였다.

향후 리니어 스케일이 지닌 높은 분해능을 이용하여 정확한 위치 제어가 이루어진다면 이를 응용한 시스템은 여러 분야에서 적용 가능할 것으로 기대되어진다.

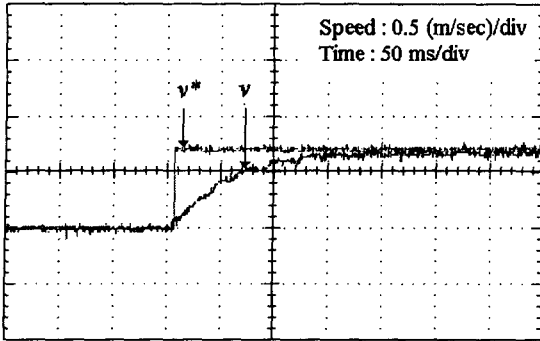


그림 4. 속도 응답  
Fig. 4. Speed response

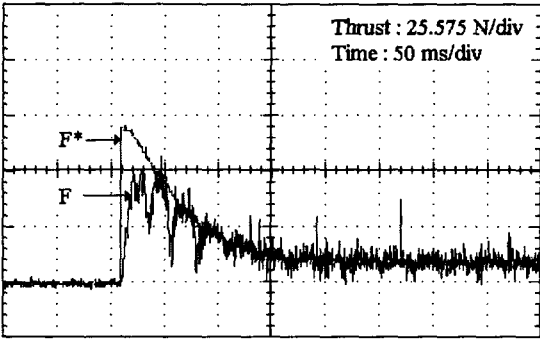


그림 5. 속도 제어시 추력 응답 파형  
Fig. 5. Thrust waveform

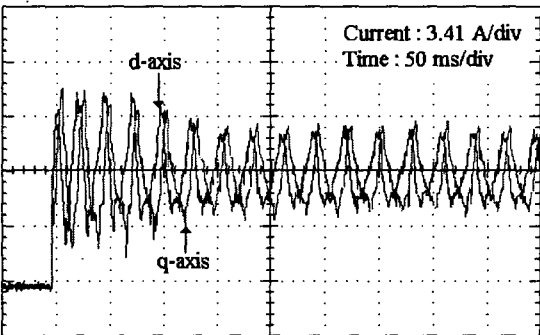


그림 6. d-q축 전류 파형  
Fig. 6. Current waveform of d-q axis

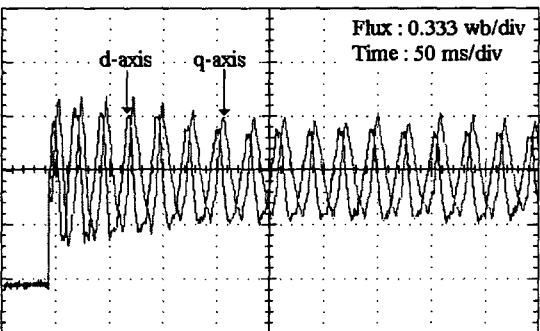


그림 7. d-q축 자속 파형  
Fig. 7. Flux waveform of d-q axis

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(과제번호:R-2003-B-418) 주관으로 수행된 과제임.

## [참 고 문 헌]

- [1] 김경민, 박승찬, "단부 효과를 고려한 농형 2차축을 갖는 선형 유도전동기의 직접 추력 제어 응답 특성 고찰", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 추계학술대회는논문집, pp.15-17, 2003. 10.
- [2] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford Press, 1988
- [3] Kwon, Byung-Il, Woo, Kyung-Il, Kim, Sol, Oh, Won Seok, "High Performance Direct Thrust Control of Linear Induction Motor", LDIA, pp.130-133, 1998.
- [4] K. D. Hurst, T. G. Habetler, G. Griva, F. Profumo, "Zero-Speed Tacholeless IM Torque Control: Simply a Matter of Stator Voltage Integration" IEEE Trans. on Industry Application., vol. 34, No. 42, pp. 790-795, 1998.
- [5] Y.A.Chapuis, D.Roye, J.Davoine, "Principles and Implementation of Direct Torque Control by Stator Flux Orientation of an Induction Motor", IEEE Trans. pp.185-191, 1995.
- [6] X. Xu and D. W. Novotny, "Implementation of direct Stator Flux Orientation Control on a Versatile DSP Based System", IEEE Trans. on Industry Application., vol. 27, pp. 694-700, 1991.
- [7] Texas Instruments, "TMS320F28x Event Manager Reference Guide", spru065b