

단부 효과를 고려한 농형 2차축을 갖는
선형 유도전동기의 직접 추력 제어 응답 특성 고찰

김 경 민*, 박 승 찬
동양대학교 대학원 시스템제어공학과

Direct Thrust Control Response of
Linear Induction Motor with Cage-type Secondary Considering End Effect

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

Abstract - In this paper, direct thrust control(DTC) scheme is applied to a linear induction motor(LIM) with cage-type secondary. The line voltages and phase currents are detected and a thrust correction coefficient considering the end effect of the LIM is introduced in order to improve the accuracy of thrust estimation in the DTC implementaion. Experimental results for thrust and flux responses are presented.

1. 서 론

선형 유도전동기(LIM)에 대한 직접 추력 제어 알고리즘에서는 순시 추력이 지령치와 직접 비교되므로 정확한 추력을 연산하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 농형 2차축을 갖는 순시 추력을 연산하기 위하여 인버터의 DC 링크 전압의 변동을 고려 할 수 있는 선간전압과 상전류를 직접 검출하였다. 또한 단부 효과(end effect)를 고려하기 위하여 추력 보정계수를 도입하였다.

본 논문에서는 농형 2차축을 갖는 LIM에 대하여 직접 추력제어를 행하였으며, 이때의 추력 응답, 자속 응답, d-q축 전류등의 특성을 고찰한다.

2. 농형 선형 유도전동기의 추력 연산

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

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

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

$$i_{ds} = i_a \quad (3)$$

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

따라서, 고정자 채교자속은 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, α 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 low pass filter 개념을 도입하여 적분 포화 현상을 방지하여 오차를 개선하였다[1][2].

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 τ 는 극간격이고, k 는 단부 효과를 고려한 추력 보정계수이다. 여기서 추력 보정 계수 k 는 속도, 주파수 등에 대하여 비선형 특성을 갖지만 본 논문에서는 단부 효과를 고려하지 않았을 시의 순시 추력과 로드셀로부터 측정된 추력을 비교함으로써 추력 보정계수를 $k = 0.9$ 로 결정하였다.

3. 직접 추력 제어

본 논문은 직접 토크 제어 이론을 농형 LIM에 적용하여 그림 1과 같이 직접 추력 제어를 구현하였다. 추력과 고정자 자속의 지령치는 전동기에 인가되어지는 선간 전압 및 상전류 검출로부터 연산된 순시 추력과 고정자 자속을 각각 비교하여 히스테리시스 제어기에서 일정한 밴드 내에 존재하도록 적절한 인버터의 스위칭 상태를 결정함으로써 제어되어진다.

그림 2는 본 실험에 사용된 실제 실험 장치도를 나타내고 있다.

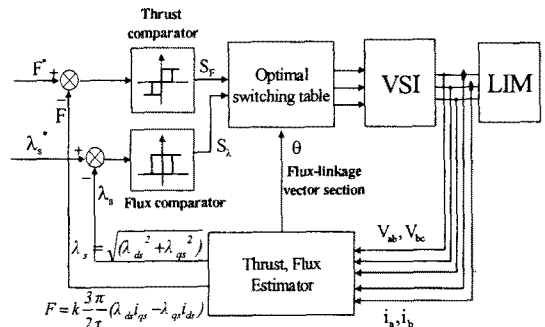


그림 1 직접 추력 제어기의 구성도
Fig. 1 Schematic diagram of direct thrust control

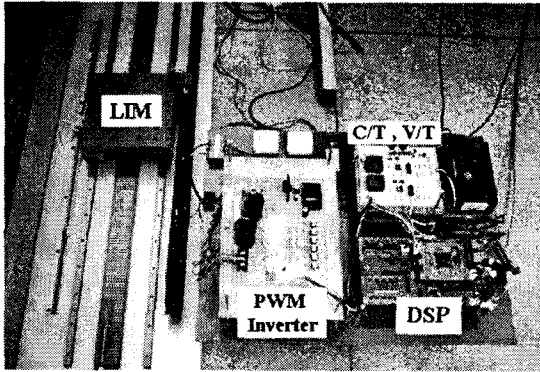


그림 2 직접 추력 제어의 실험 장치도
Fig. 2 Experimental apparatus for the DTC of LIM

그림 3은 PWM 인버터 구동 시스템의 구성도로서 인버터의 스위칭 상태(S_a, S_b, S_c)에 따라 6개의 유효전압 벡터 \vec{V}_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)와 2개의 영 전압벡터 \vec{V}_0, \vec{V}_7 로 구성된다.

자속 히스테리시스 제어기에 의해 고정자 자속은 선택된 전압 벡터에 따라 특정 밴드내에서 원하는 회전 방향

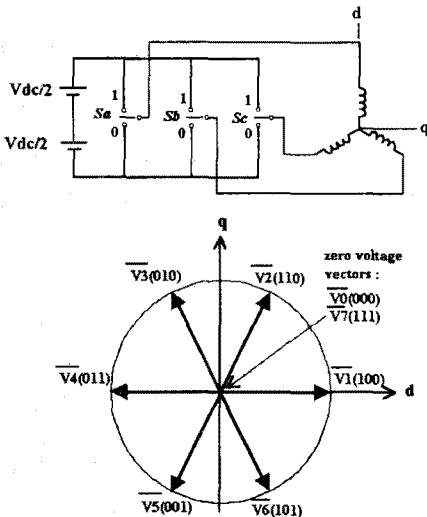


그림 3 전압원 인버터 구성도
Fig. 3 Voltage source inverter schematic

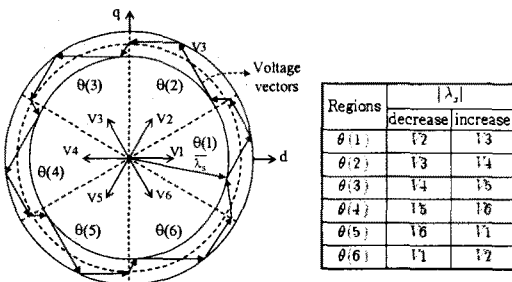


그림 4 자속 밴드 제어 원리
Fig. 4 Principle of flux band control

및 주파수를 가진다. 그림 4는 식(9)에 의해 d-q평면상에 6개로 나뉘어진 각 영역에서 두 개의 전압 벡터만이 선택되어진다. 이는 최소의 스위칭 주파수로서 추정값이 밴드 내에 존재하도록 한다.

$$(2N-3)\frac{\pi}{6} \leq \theta(N) \leq (2N-1)\frac{\pi}{6} \quad (10)$$

여기서 $N = 1, \dots, 6$ 이다.

고정자 자속의 위치는 식(5)에서 구한 고정자 자속 λ_{ds} 의 부호와 표 1의 고정자 자속간의 비율($r = \lambda_{qs}/\lambda_{ds}$)로서 결정되어진다[3].

표 1 고정자 자속 벡터 선택
Table 1 Selection of the stator vector sector

	$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	$\theta(4)$	$\theta(5)$	$\theta(6)$
λ_{sd}	+	+	-	-	-	+
r	$-\frac{1}{\sqrt{3}} \leq r < \frac{1}{\sqrt{3}}$	$r \geq \frac{1}{\sqrt{3}}$	$r \leq -\frac{1}{\sqrt{3}}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}} < r \leq \frac{1}{\sqrt{3}}$	$r > \frac{1}{\sqrt{3}}$	$r < -\frac{1}{\sqrt{3}}$

그림 5는 추력 제어 원리로서 순시 추력 F 가 추력 밴드 F^* 보다 작을 때 가장 빠르게 순시 추력을 증가시키기 위한 최적의 유효 전압벡터를 선택해야 하고, $F^* + dF_e$ 이상이면 인버터 스위칭 주파수에 따른 손실을 최소화하기 위해서 가능한 천천히 순시 추력 F 를 감소시킨다. 가장 늦게 추력을 감소시키기 위해서는 영전압 벡터를 사용함으로써 얻어진다[4]. 여기서 dF_e 는 추력 히스테리시스 제어기의 밴드폭을 나타낸다.

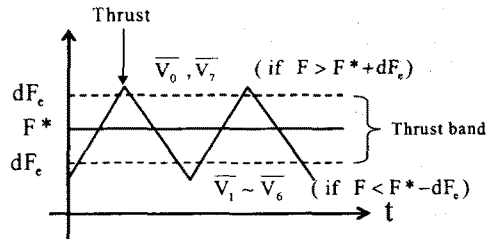


그림 5 추력 제어 원리
Fig. 5 Thrust control

직접 추력 제어에서는 순시 추력과 고정자 자속의 오차값에 따라 히스테리시스 제어기에 의해 스위칭 상태가 결정되어 전압 벡터를 제어하게 된다. 표 2는 고정자 자속과 추력의 히스테리시스 제어기 출력과 고정자 자속의 위치 섹터에 따라 결정되어진다.

표 2 최적의 전압 벡터
Table 2 Optimum voltage vectors

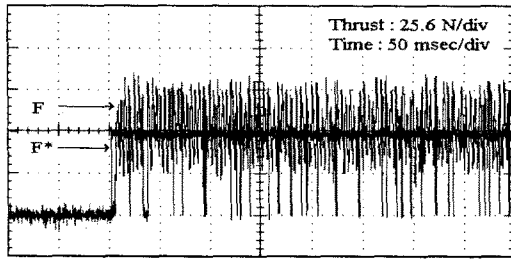
		$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	$\theta(4)$	$\theta(5)$	$\theta(6)$
$S_\lambda = 1$ (자속 증가)	$S_F = 1$	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	$S_F = 0$	V7	V0	V7	V0	V7	V0
	$S_F = -1$	V6	V1	V2	V3	V4	V5
$S_\lambda = 0$ (자속 감소)	$S_F = 1$	V3	V4	V5	V6	V1	V2
	$S_F = 0$	V0	V7	V0	V7	V0	V7
	$S_F = -1$	V5	V6	V1	V2	V3	V4

4. 실험 결과 및 고찰

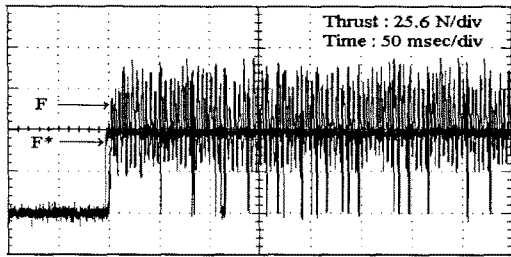
본 실험에서는 DSP인 TMS320F240, 전력 변환 장치 및 DC 링크 전압의 변동을 고려할 수 있는 선간 전압과 상전류 검출을 통해 단부효과를 고려한 농형 LIM의 직접 추력 제어시의 응답 특성을 살펴보았다.

그림 6은 직접 추력 제어시 단위 응답 특성이다. 여기서 자속의 히스테리시스 제어기 및 추력의 히스테리시스 제어기의 밴드폭을 각각 2%로 설정하였다.

추력 응답이 히스테리시스 제어기의 밴드내에 존재하지 않지만, 단부효과를 고려한 경우 응답 특성이 개선됨을 알 수 있다. 그림 7은 고정자 자속의 크기를 나타내고 있다. 고정자 자속의 크기도 지령치에 가까운 응답 특성을 보이나 히스테리시스 제어기의 밴드폭내에는 들지 않음을 알 수 있다. 그림 8는 d-q축 자속파형으로서 일정한 원을 형성하지 못하고 심하게 왜곡됨을 알 수 있다. 그림 9는 d-q축 고정자 전류 파형이다.



(a) End effect 고려시



(b) End effect 비교려시

그림 6 추력 응답 특성 ($F^* = 50\text{N}$)

Fig. 6 Thrust response

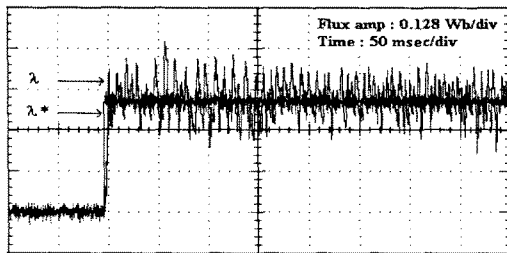


그림 7 고정자 자속 크기의 응답 특성 ($\lambda^* = 0.35\text{Wb}$)

Fig. 7 Response of stator flux amplitude

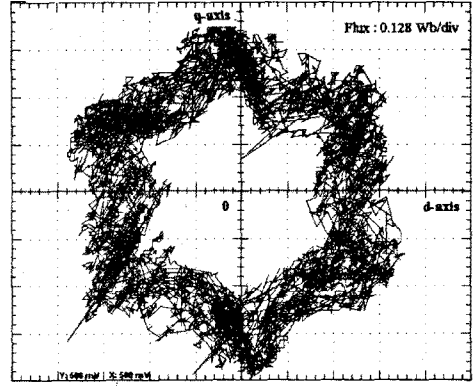


그림 8 고정자 자속의 리사주 파형

Fig. 8 Lissajou waveform of stator flux

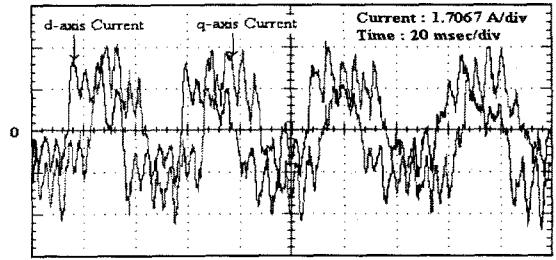


그림 9 d-q축 고정자 전류 파형

Fig. 9 d-q axis stator current waveform

5. 결 론

본 논문에서는 농형 2차축을 갖는 선형 유도전동기에 대하여 직접 추력 제어를 행하고, 추력, 자속 및 전류 응답 특성을 고찰하였다. 고정자 자속 및 순시 추력 응답 특성은 주어진 히스테리시스 밴드 2%를 다소 크게 벗어난 결과를 얻었다. 이러한 결과의 원인은 DSP의 부동소수점 처리에서 발생되는 오차, 전압 및 전류 검출시 필터에 의한 위상지연, 샘플링 시간 증가등에 의한 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김경민, 박승찬, "선간 전압 및 상전류 측정에 의한 농형 선형 유도 전동기의 추력 연산", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집, pp.25-27, 2003. 4.
- [2] K. D. Hurst, T. G. Habetler, G. Griva, F. Profumo, "Zero-Speed Tachless IM Torque Control: Simply a Matter of Stator Voltage Integration" IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, No. 42, pp. 790-795 July/August 1998.
- [3] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford Press, 1988
- [4] 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.