

## 선간 전압 및 상전류 측정에 의한 농형 선형 유도전동기의 추력 연산

김 경민\*, 박승찬  
동양대학교 대학원 시스템제어공학과

### Thrust Estimation of Linear Induction Motor with Cage-type Secondary using Line Voltages and Phase Currents Measurement

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

**Abstract** - In this paper, the instantaneous thrust of a linear induction motor (LIM) with cage-type secondary is estimated by the line voltages and phase currents measurement when the LIM is fed by PWM inverter. The estimated thrust values according to various input frequencies are compared with the measured ones.

### 1. 서 론

선형 유도전동기 (Linear Induction Motor : 이하 LIM)의 동특성을 결정짓는 순시 추력을 연산하는 여러 방법에 대하여 연구된 바가 있다. 기존에 연구되어진 추력 연산 방법에는 서치코일을 이용하여 공극쇄교자속을 구하고 전류를 측정하여  $d$ ,  $q$ 축 등가회로로부터 추력식을 유도하여 계산하는 방법이 있다[1]. 그러나 이 방법은 공극쇄교자속을 측정하기 위해서 전동기의 1차측에서 서치코일을 다시 설치해야하는 문제점이 있다. 또한 인버터의 DC 링크 전압을 이용하여 상전압을 구하고, 이를 적분하여 쇄교자속을 구하는 방법이 있는데, 이때는 DC 링크 전압을 일정하게 두기 때문에 입력 전원이나 부하의 영향에 의한 리플 성분이 고려되지 않는다. 반면에 전동기에 인가되는 선간 전압은 직접 측정할 수 있고, DC 링크 전압의 변화 등을 고려할 수 있으므로 선간전압을 측정하여 자속을 구하면 개선된 순시추력을 연산할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 DSP를 이용하여 PWM 인버터로 구동되는 농형 LIM의 선간 전압 및 상전류를 검출하여 구한 순시추력 파형을 제시하고, 로드셀로부터 측정된 추력의 평균값과 비교한다.

### 2. 순시 추력 연산 알고리즘

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  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ 를 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 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.

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

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

여기서,  $R_s$ 는 고정자 저항,  $T_s$ 는 샘플링 시간,  $n$ 은 샘플링을 나타낸다. 위 식을 이용하여 End effect를 무시한 농형 LIM의 추력식을 유도하면,

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

여기서  $\tau$ 는 극간격이다.

### 3. 시스템 구성

#### 3.1 농형 선형 유도전동기의 실험 장치 구성

본 실험에서는 인버터의 출력전압을 제어하기 위한 디지털 제어기 구현을 TI사의 TMS320F240 DSP를 사용하였다. TMS320F240은 A/D Converter, Event manager(EV) module, Watchdog timer 등 제어를 위해 필요한 기능들이 내장되어 있다. 그래서 Register의 세팅만으로, EV module을 제어하여 PWM을 쉽게 구현할 수 있다[2]. 그림 1은 전체적인 실험 장치 구성도이다.

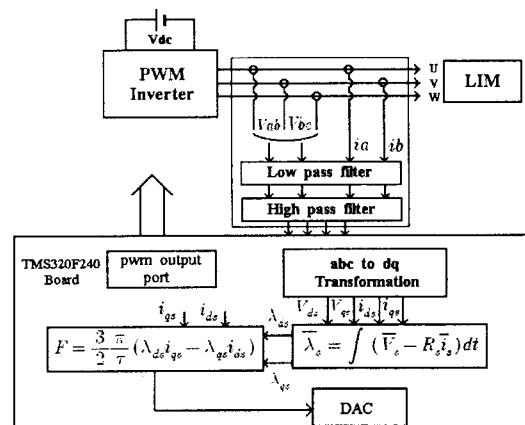


그림 1 실험 장치 구성도

Fig. 1 Block diagram of the experimental apparatus

그림 2는 실제로 구성한 LIM의 추력 측정 시스템의 사진이다. LIM의 추력 연산의 정확도를 알아보기 위해 외부 장치인 Loadcell를 통해 측정값과 비교하였다.

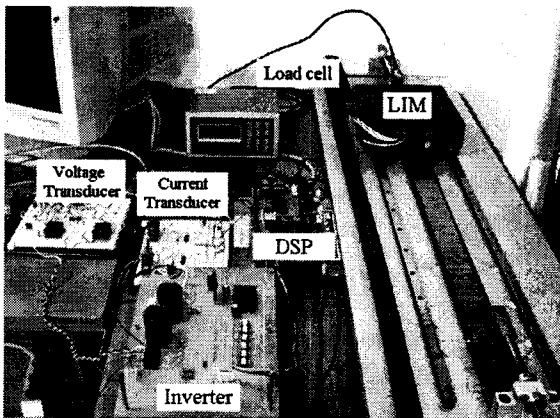


그림 2 LIM 추력 측정 시스템의 사진

Fig. 2 Photograph of the thrust measurement system

본 논문의 실험에서는 인버터의 출력전압을 정현화 PWM법을 이용하여 제어하였다. 또한, 실험에 사용된 동형 LIM의 사양을 표 1에 나타내었다[3].

표 1 동형 선형 유도전동기 사양  
Table 1 Specification of LIM

파라미터	단위	설계치
1차측 길이 L	mm	200
1차 철심적층폭	mm	36
극수 p		4
매극매상 슬롯수 q		2
슬롯피치 $t_{s1}$	mm	8.33
슬롯폭 W <sub>s</sub>	mm	5
단절율 $\beta$		5/6
1상의 직렬턴수 N <sub>ph</sub>	turns	660
1차측 저항 R <sub>1</sub>	Ω	12.3
기계적 공극 g	mm	1.5
2차측 슬롯피치 $t_{s2}$	mm	6.4
back-iron 두께 d <sub>iron</sub>	mm	10
바직경 D <sub>bar</sub>	mm	3

### 3.2 DC offset 및 연산에 따른 오차 보상 알고리즘

자속연산을 위한 적분 수행과정에서 발생하는 포화를 방지하기 위한 DC offset을 제거하는 기준의 방법에 대해 살펴보면 다음과 같다. 첫 번째로, 전압, 전류 센서들의 DC offset을 보상하기 위해 시스템이 실행 되기 전에 A/D converter의 값을 수천 번 읽어 들어 이를 평균값을 구해 시스템이 실행되었을 때 보상해 주는 방법이다. 또한, 샘플링 시간 동안에 A/D 값을 수십 번 읽어 들여 평균값을 구하는 방식인 이동 평균 필터를 사용하는 방법이다[4]. 두 번째로는 고역필터를 사용하여 적분기의 직류오차를 제거하고, 여기에 어떤 주파수에도 적분 특성을 낼 수 있도록 프로그램어를 고역 필터를 사용하는 방법이다[5]. 세 번째로 매우 낮은 차단 주파수를 갖는 간단한 아날로그 High Pass Filter를 사용하여 DC offset를 제거하는 방법도 연구되어졌다[6]. 그 밖에도 A/D converter의 분해능에 따른 Truncation errors를 줄이기 위해서 A/D 변환 값을 Full scale를 적용하는 경우도 있었다[7]. 그림 3은 본 논문에 적용한 오차 보상 및 적분 연산 알고리즘을 블록도로 나타낸 것이다.

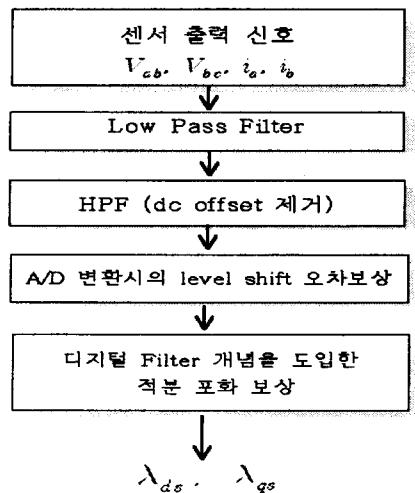


그림 3 오차 보상 알고리즘 블록도

Fig. 3 Block diagram of error compensation

전압 및 전류의 센서 출력 신호들에 포함되어 있는 고주파 성분 및 DC offset 성분을 제거하기 위해서 하드웨어적으로 Low Pass Filter와 High Pass Filter를 추가하였다. 그러나 DC offset을 정확하게 제거할 수 없으므로 인해 자속 적분시 야기되는 적분포화 현상을 방지하기 위해서 식(10) 및 식(11)과 같이 디지털 필터링 개념을 도입하여 오차를 개선하였다.

$$\lambda_{dg}(n) = \alpha \lambda_{dg}(n-1) + \{V_{dg}(n) - R_s i_{dg}(n)\} T_s \quad (10)$$

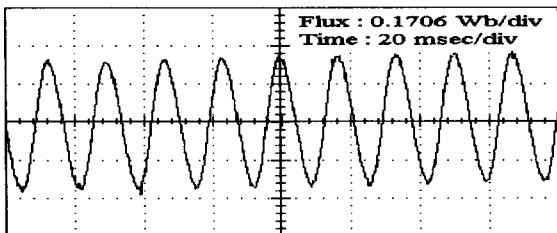
$$\lambda_{sg}(n) = \alpha \lambda_{sg}(n-1) + \{V_{sg}(n) - R_s i_{sg}(n)\} T_s \quad (11)$$

여기서,  $\alpha$ 는 디지털 적분 연산시에 발산을 방지하기 위한 보정 상수로서  $\alpha < 1$  이다.

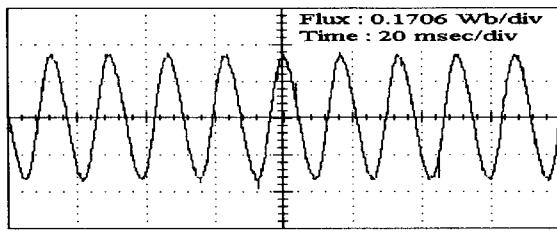
### 4. 실험 결과 및 고찰

그림 4(a)는 식(7)로부터 구한 d축 자속 파형으로서, HPF를 통해 센서 출력신호의 DC offset을 제거하고, A/D 입력의 기준값을 보상하기 위하여 시스템이 실행 전 수천 번 읽어들인 값을 평균치를 구해 보상하였으나, 자속 파형은 발산하고 있다. 이는 DC offset이 완전하게 제거되지 않는다는 것을 뜻한다. 따라서 이 적분 포화를 보상하기 위하여 디지털 필터링 개념을 도입한 식(10), (11)과 같이 보정 계수를 적용함으로써 그림 4(b)와 같이 안정된 파형을 얻을 수 있었다. 이는 식(10)과 식(11)에 보정 계수를 사용함으로써 DC offset을 제거하는 HPF 기능이 존재함을 의미한다. 여기서 보정계수  $\alpha = 0.99$ 로서 시행 착오법을 통해 구하였다. 그럼 5는 X-Y 자속파형을 나타내고 있다. End effect가 존재하는 LIM의 특성상 반경이 일정한 원이 되지 않음을 알 수 있다. 그림 6는 주파수 f=60Hz, 진폭변조지수 m<sub>a</sub>=1일 경우의 추력 연산 결과이며, 평균 추력은 F=49.7[N]이다. 그림 7은 주파수 f=30Hz, m<sub>a</sub>=0.5일 경우이며, 평균 추력은 F=33.3[N]이다.

표 2는 연산한 추력의 평균값을 측정값과 비교한 것으로서, 약 10%의 오차가 발생함을 알 수 있다. 이러한 오차는 식 (9)의 추력 연산식에 End effect를 고려하지 않았고, 또한 전압 및 전류 검출을 위한 샘플링 시간이 다소 긴 400 μs로 인하여 자속의 디지털 적분시에 오차가 수반되었기 때문인 것으로 사료된다.



(a) 보상 전 ( $\alpha=1$ )



(b) 보상 후 ( $\alpha=0.99$ )

그림 4 디지털 필터 개념을 도입한 보상 전·후  
d축 자속 파형

Fig. 4 Flux waveform a) before compensation,  
b) after compensation

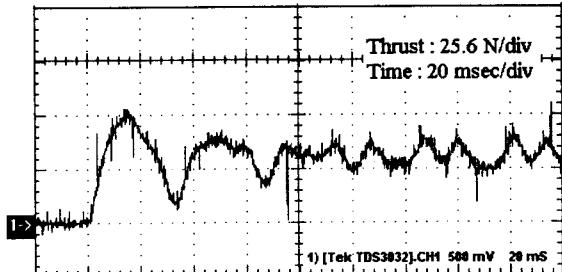


그림 7 추력 파형( $f = 30\text{Hz}$ ,  $m_a = 0.5$ )

Fig. 7 Thrust waveform at  $f=30\text{Hz}$  and  $m_a=0.5$  op

표 2 추력 측정값과 연산값 비교  
Table 2 Comparison of thrust

주파수 힘	$f=30\text{Hz}$		$f=60\text{Hz}$	
	Load cell	19.6	Load cell	34.3
측정값 [N]	마찰력	10.3	마찰력	10.3
	합계	29.9	합계	44.6
연산값 [N] (평균치)		33.3		49.7
오차 [%]		10.2		10.3

## 5. 결 론

본 논문에서는 PWM 인버터로 구동되는 농형 LIM의 순시 추력을 인버터의 선간 전압과 상전류를 검출하여 연산하였다. 농형 LIM의 End effect를 무시한 추력의 연산값을 측정값과 비교한 결과 약 10%의 오차가 발생함을 확인하였다.

## (참 고 문 헌)

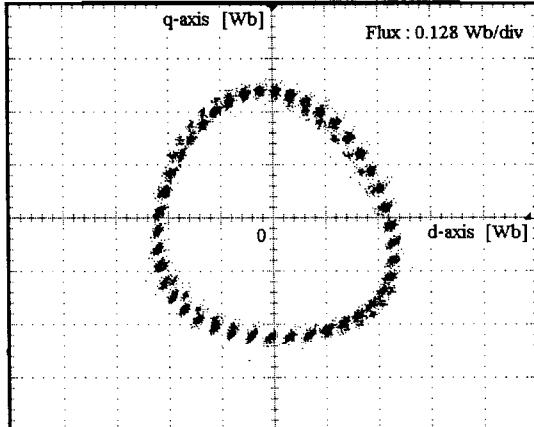


그림 5 X-Y 자속 파형 ( $f=60\text{Hz}$ )  
Fig. 5 X-Y flux waveform ( $f=60\text{Hz}$ )

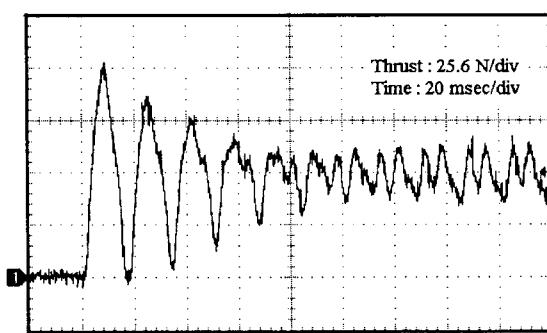


그림 6 추력 파형( $f = 60\text{Hz}$ ,  $m_a = 1$ )  
Fig. 6 Thrust waveform at  $f=60\text{Hz}$  and  $m_a=1$  opera

- [1] 장석명, 이성호, 장건우, 정상섭, "유도형 리니어모터 성능의 온·라인 모니터링을 위한 가상계측시스템 구현", 대한전기학회논문지, 제50권 제5호, pp205-213, 2001.
- [2] Texas Instruments, "TMS320F/C240 DSP Controllers Reference Guide", Texas Instruments, 1998.
- [3] 박승찬, 우경일, "농형 2차축을 갖는 선형유도전동기의 설계", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집, pp.105-108, 2001. 4.
- [4] Xingyi Xu, and D.W.Novotny, "Implementation of Direct Stator Flux Orientation Control on a Versatile DSP Based System", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol.27, No.4, pp.694-700, July/Aug., 1991.
- [5] 전태원, 최명규, "프로그램어블 고역필터를 사용한 직접 벡터제어 유도전동기 구동시스템의 고정자 자속 계산", 대한전기학회논문지, 제49권, pp.48-53, July., 2000.
- [6] Lahzar Ben-Brahim, "A Fully Digitized Field-Oriented Controlled Induction Motor Drive Using Only Current Sensors", IEEE Trans. on Ind., Vol.39, No.3, pp. 241-249, June., 1992.
- [7] Y.A.Cchapuis, 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.