

병렬 운전되는 선형 유도전동기의 추력 계측

Thrust Measurement of Parallel-operated Linear Induction Motors

김경민*

이원민*

박승찬**

김정철***

박영호***

김국진***

Kim, Kyung-Min Lee, Won-Min Park, Seung-Chan Kim, Jeong-Cheol Park, Yeong-Ho Kim, Kuk-Jin

ABSTRACT

LIMs propelling the MAGLEV which has been developed in Korea have 3-series and 2-parallel connection, so that 6 LIMs per one vehicle are fed by one inverter. Thrust performance of the parallel-operated LIMs can be different from each other because of variant magnetic air gaps and electrical impedance. The thrust difference between the parallel LIMs cause a twist force on the vehicle. This paper proposes an algorithm to measure thrust of the parallel-operated LIMs. The method uses a digital signal processor(TMS320F2812), voltage and current sensors.

As a result, thrust, flux and currents of the parallel-operated small LIMs which are manufactured in our laboratory are monitored by the developed measurement system.

1. 서 론

자기부상열차의 각 차량 하부에는 하나의 인버터로 구동되는 3S2P(3-series 2-parallel) 방식의 선형유도전동기(Linear Induction Motor: 이하 LIM)가 사용되어 추진력을 발생할 때, 외란의 영향 등으로 병렬 운전 중인 LIM의 공극이 변화하게 되면, 각 전동기의 임피던스가 변동하게 되어 LIM에 공급되는 전류가 불평형 상태로 된다[1]. 따라서 동일한 속도로 운전되고 있는 모듈에 장착된 병렬 연결된 전동기의 추진력이 서로 다르게 발생하여 차량의 동력학적 특성에 영향을 미치게 되므로 정확한 성능 요소 즉, 추력, 자속 및 전류 등을 계측하여 특성을 파악할 필요성이 있다.

본 논문에서는 자기부상열차와 같이 2P(2-parallel)방식으로 운전되어지는 LIM의 성능을 계측할 수 있는 알고리즘을 제시하고, 또한 성능 계측시스템을 통해 실험적으로 검증하고자 한다. 이를 위해 연구실에 보유하고 있는 축소형 병렬 운전되는 LIM의 선간전압과 상전류를 검출할 수 있도록 두 개의 전압센서와 네 개의 전류센서, DSP인 TMS320F2812를 사용한 DAQ 보드를 제작하고 성능 계측데이터는 visual basic으로 구현된 모니터링 프로그램을 사용한다[2]. 또한, 계측된 추력 데이터의 정확성은 로드셀로부터 측정된 데이터와 비교·검증을 통해 확인하였다. 따라서 제안한 성능 계측알고리즘을 바탕으로 구현되어진 모니터링 프로그램과 계측시스템을 사용하여 2P 방식의 운전에 따른 선형유도전동기의 추력, 자속 및 전류 등의 특성들을 검증한다.

* 동양대학교 전기기기 시스템 연구실, 정회원

** 동양대학교 철도운전제어학과 부교수, 정회원

E-mail : scspark@dyu.ac.kr

TEL : (054)630-1106 FAX : (054)630-1106

*** (주)로템

2. 축소형 병렬구동 LIM의 추력 계측 알고리즘

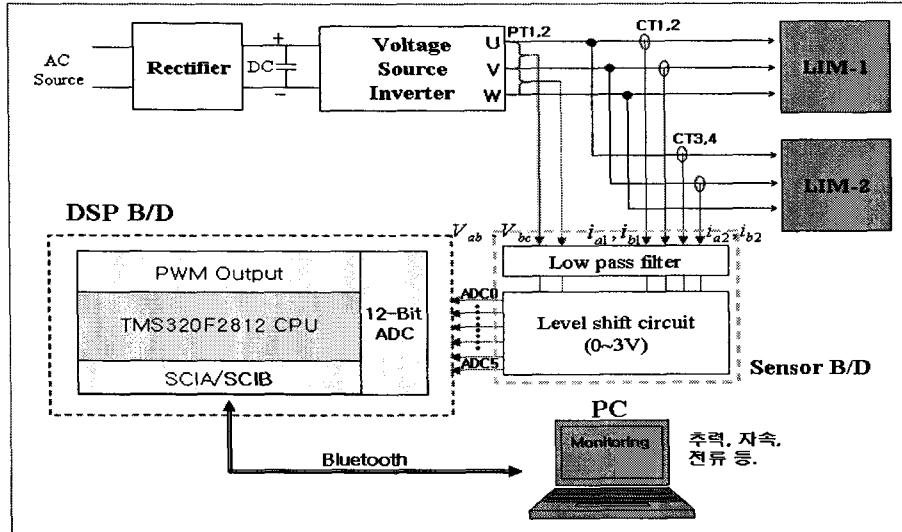


그림 1. 축소형 실험 장치 구성도

그림 1은 병렬 운전되는 LIM의 성능 평가 요소인, 추력, 자속 및 전류 등을 모니터링할 수 있도록 구현한 축소형 실험 장치 구성도를 나타내고 있다. 2개의 전압센서와 4개의 전류센서로부터 검출된 신호(전압 : V_{UV} , V_{VW} , 전류 : i_{U1} , i_{V1} , i_{U2} , i_{V2})를 이용하여 추력 계측 알고리즘을 전개할 수 있다. d-q축 전압, 전류 및 자속은 식 (1) ~ 식 (6)과 같다.

$$V_{ds} = \frac{2V_{UV} + V_{VW}}{3} \quad (1)$$

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

$$i_{ds1} = i_{U1}, \quad i_{qs1} = \frac{i_{U1} + 2i_{V1}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

$$i_{ds2} = i_{U2}, \quad i_{qs2} = \frac{i_{U2} + 2i_{V2}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

$$\lambda_{ds1} = \int (V_{ds} - R_s i_{ds1}) dt, \quad \lambda_{qs1} = \int (V_{qs} - R_s i_{qs1}) dt \quad (5)$$

$$\lambda_{ds2} = \int (V_{ds} - R_s i_{ds2}) dt, \quad \lambda_{qs2} = \int (V_{qs} - R_s i_{qs2}) dt \quad (6)$$

위에서 전개되어진 d-q축 전류와 자속을 이용하여 순시추력을 유도하면 다음과 같다.

$$F_1 = k \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} (\lambda_{ds1} i_{qs1} - \lambda_{qs1} i_{ds1}) \quad (7)$$

$$F_2 = k \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} (\lambda_{ds2} i_{qs2} - \lambda_{qs2} i_{ds2}) \quad (8)$$

$$F = F_1 + F_2 \quad (9)$$

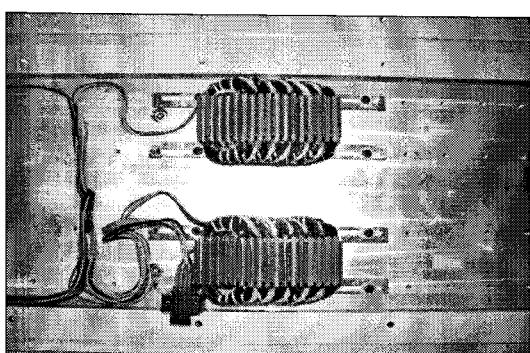
여기서, τ 는 극간격, k 는 단부효과 보정계수, F_1 , F_2 는 병렬 운전되는 각 LIM의 추력을 나타내고, F 는 합성 추력을 나타낸다.

3. 전체 실험 장치 구성

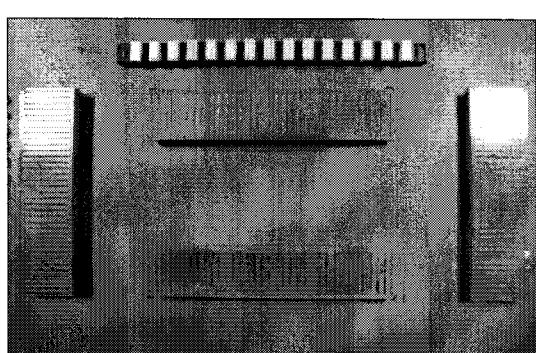
그림 2는 병렬 운전되는 LIM의 특성을 모니터링할 수 있도록 구성된 LIM 구동시스템과 계측시스템 사진이다. LIM의 구동시스템은 1차측이 지상에 고정되어 있고 농형 2차측이 캐리어의 하단부에 장착되어 있다[3]. 그림 3은 병렬 운전되는 LIM 사진으로써 그림 3(a)는 지상 1차측이고 그림 3(b)는 캐리어 하단에 부착된 농형 2차측 사진이다. 병렬 운전되는 LIM의 특성을 모니터링하기 위한 계측시스템은 인버터 출력선간전압을 검출하기 위해 2개의 전압센서와 병렬 운전 전동기에 흐르는 상전류 검출을 위한 4개의 전류센서를 사용하여 제작된 센서보드, 계측 알고리즘과 데이터 통신을 수행할 DSP (TMS320F2812)와 Bluetooth로 구성되어 있다. 계측된 데이터는 그림 4와 같이 visual basic으로 구현된 모니터링 프로그램으로 확인할 수 있으며, 모니터링 데이터의 정확성 검증은 로드셀을 이용하여 측정된 수치와 비교하는 방법을 사용한다.



그림 2. 병렬 운전 LIM의 계측시스템 사진



(a) 병렬 운전되는 LIM의 지상 1차측



(b) 캐리어의 농형 2차측

그림 3. 병렬 운전되는 LIM의 1차측과 농형 2차측 사진

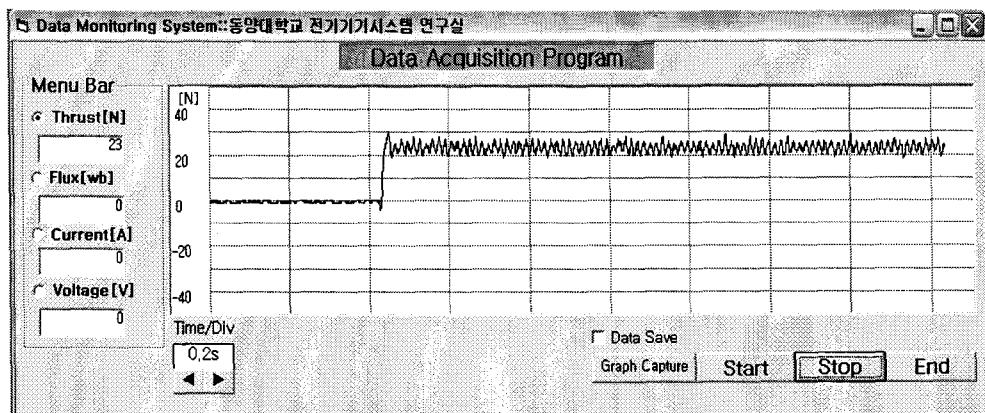


그림 4. Visual basic으로 구현된 모니터링 프로그램

4. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서는 각 주파수 변경에 따라 발생되는 측정치와 계산치의 오차를 개선하고자 LIM의 1차측 길이가 유한하여 나타나는 단부효과(end effect)의 영향을 고려할 수 있는 보정계수를 유도한다.

본 실험에서는 병렬 운전되는 LIM의 구속 시험에서 정현파 PWM의 캐리어주파수를 300Hz로 고정하고 기본주파수를 15Hz에서 60Hz 범위 이내로 변경하면서 로드셀로 측정된 수치와 계측된 연산치에서 발생되는 평균오차 13.30%를 개선하고자 LIM의 단부효과의 영향을 보상할 수 있는 보정계수 k 를 유도하면 다음과 같다.

$$k = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (10)$$

여기서, e_i 는 각 주파수 구동시 추력측정치에 대한 계산치의 오차를 나타내고, n 은 실험 횟수를 나타낸다. 위 식 (10)으로부터 각 주파수에 대한 보정계수 $k = 0.867$ 을 유도할 수 있었다.

그림 5, 그림 6은 병렬 운전되는 LIM의 구속 시험시 기본주파수를 30Hz로 설정한 상태에서 각 전동기에서 발생되는 전류 및 자속, 추력 등의 응답 특성이다.

표 1. 병렬 운전되는 LIM의 단부효과를 고려한 추력 계측 비교

		f=15[Hz]	f=30[Hz]	f=40[Hz]	f=50[Hz]	f=60[Hz]
	Load-cell 측정값 [N]	9.73	34.95	47.66	57.95	67.46
계산치[N] (평균치)	LIM1 추력 $F_1 = k \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds})$	4.97	16.16	23.24	28.30	31.88
	LIM2 추력 $F_2 = k \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds})$	5.03	16.68	23.99	29.28	32.92
	합성추력 $F = F_1 + F_2$	10.0	32.84	47.23	57.58	64.80
	오차 [%]	2.72	6.04	0.90	0.64	3.94

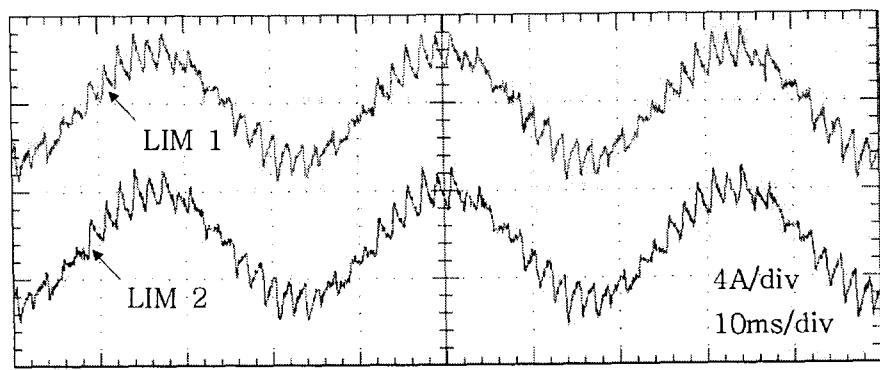


그림 5. 병렬 운전되는 LIM의 d축 전류

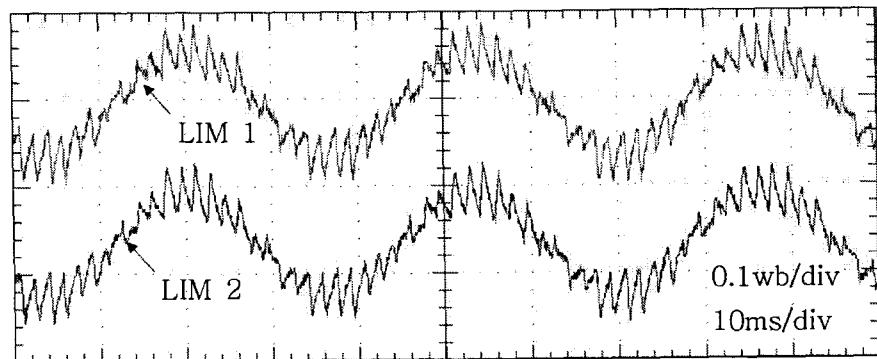


그림 6. 병렬 운전되는 LIM의 d축 자속 특성

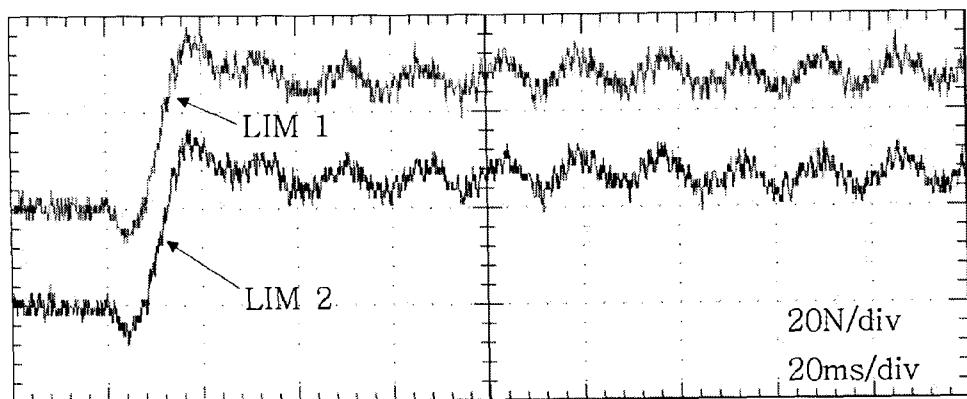


그림 7. 병렬 운전되는 LIM1, LIM2의 추력 특성

5. 결 론

본 논문에서는 자기부상열차와 같이 2P(2-parallel)방식으로 운전되는 선형 유도전동기의 추력, 자속, 전류등을 계측할 수 있는 알고리즘을 제시하고, 병렬 운전되는 선형 유도전동기의 선간전압과 상전류를 검출함으로써 얻어진 데이터를 이용한 추력 계측 시스템을 구현하였다. 또한 계측된 데이터와 로드 셀로부터 측정된 수치에서 발생된 실험적 평균 오차로부터 단부효과를 고려할 수 있는 추력 보정 계수를 유도하므로써 추력 연산시의 정확도를 향상시켰다. 본 논문에서 제시한 병렬운전중의 LIM 추력 계측 방법은 실제 자기부상열차의 운전시 차량의 추진력 계측에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 건설교통부 건설교통기술연구개발사업의 연구비지원
(과제번호 : T606A1510001-06A0154002211)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 박승찬, 김경민(2005년), “선형 유도전동기의 병렬 운전 특성 실험”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.12.
2. 김경민, 박승찬(2005년), “농형 2차축을 갖는 선형유도전동기의 제어특성 모니터링”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1098-1100.
3. 박승찬, 남윤호, 김경민(2003년), “직각분기로가 있는 선형유도전동기 반송시스템의 PLC제어 특성”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.726-728.