

유도형 리니어모터의 인버터 운전시의 동특성 시험

장석영*, 정상섭*, 이성래*, 양현섭*, 정락교**, 박찬일***
 *충남대학교 전기공학과, **한국철도기술연구원, ***한국기계연구원

Test for the Dynamic Characteristics of Inverter-fed LIMs

S.M.Jang*, S.S.Jeong*, S.L.Lee*, H.S.Yang*, R.K.Jung**, C.I.Park***
 Chungnam Nat'l Univ.*, KRRI**, KIMM***

Abstract - In this paper, the experiment on the dynamic characteristics of arch-type LIM is treated. The LIM has been experimented by using the rotational drum type system, which has a motionless short primary propelling a drum. Tests were performed by a PC-based data acquisition system. The input voltage of LIM driven by PWM inverter involves time harmonics. Therefore, the performance of inverter was analyzed for test and simulation.

1. 서 론

LIM(Linear Induction Motor)은 직선운동이 필요한 시스템에서 전기에너지를 동력전달의 변환과정없이 직접 직선구동력으로 변환시키는 장점을 지닌다. 이러한 장점 때문에 모터 자체의 효율면에서는 회전형 유도전동기에 비해 낮음에도 불구하고 시스템 측면에서 낮은 효율을 보상할 수 있다. 따라서 자기부상열차, 경전철, 엘리베이터, 그리고 자동차 서보시스템 등의 구동장치로 널리 이용되고 있으며 앞으로 그 응용범위는 더욱 확대 될 것으로 기대된다.

본 논문에서는 LIM을 Drum-Type 동특성 시험기를 이용하여 동특성 시험을 수행하였고, 이를 위해서 고조파분석은 물론 전기량과 추력 및 속도를 실시간으로 동시에 수집처리되는 자동계측방법을 개발하였다. 그리고 LIM의 추력과 수직력 및 안내력을 기존방법이 아닌, 운전중인 LIM 특성을 편리하면서도 정밀하게 측정할 수 있는 힘 측정용 블럭 게이지를 특별히 고안 제작하여 응용함으로써 리니어모터의 힘 측정시에 널리 사용할 수 있는 바탕을 마련하였다. 더욱이 시험시 사용되는 인버터의 출력은 고조파를 포함하고 이는 리니어모터 특성을 전적으로 결정하기 때문에 특성실험에 앞서 주파수에 따른 기본파 함유율, 왜형율을 분석 검토하였다.

2. 본 론

2.1 동특성 시험

2.1.1 Drum-Type 동특성 시험기

LIM의 주요 응용, 예를 들어 차량구동용 및 산업용 등에서는 모터링, 브레이킹, 그리고 발전모드에서의 모터 특성이 요구된다. 따라서 정상특성 및 동특성 시험을 위해서는 직선형의 매우 긴 2차축 선로가 필요하다. 그러나 낮은 경제성과 장비제작의 어려움 때문에 실제 디스크형이나 그림 1과 같은 드럼형 시험기를 사용한다. 표 1은 시험기의 사양을 보여준다.

2.1.2 Arch-Type LIM

시험용 LIM은 드럼형 시험기에 따라 아크형으로 설계 제작되었으며 그 사양은 표.2와 같다. 운전용 인버터는 정격출력 220(V)/24(A)급이며 제어방식은 등가정현파 PWM이다.

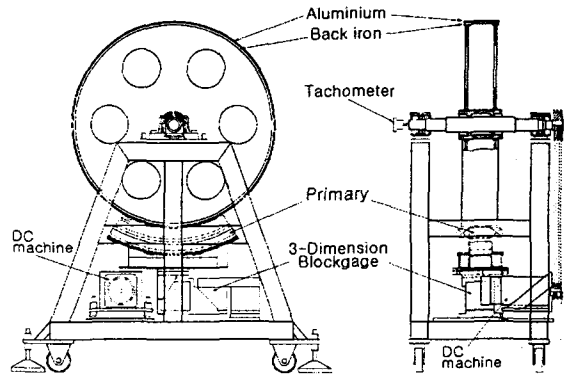


그림 1. Drum-Type 동특성 시험장치

표 1. Drum-type LIM 동특성 시험기

항 목	제 원	
전체 사양	길 이	1.35[m]
	폭	0.60[m]
	높 이	1.47[m]
Wheel 사양	지 름	0.86 [m]
	폭	0.15[m]
	알루미늄 두께	5[mm]
	Back iron 두께	10[mm]
DC 기기	DC 발전기 & 모터 : 240 [V]	

표 2. 아크형 LIM 사양

항 목	제 원
상 수	3
극 수	6
공 극	5[mm]
1차축 길이*폭*높이	570*190*130[mm]
1차축 arch 반경	R545[mm]
단 절 율	4/6
극 간 격	66[mm]
코일 간격	44[mm]
슬롯 폭	12[mm]
슬롯 간격	23[mm]
치 폭	11[mm]
병렬회로수	2
매 슬롯당 권선수	(25턴/층) × 2층

2.1.3 계측 시스템 구성

그림.2는 동특성 시스템을 위한 계측시스템의 구성도 이고 표.3은 계측장비의 제원이다. LIM의 추력, 수직력, 횡력은 각각 x , y , z 방향으로 load cell을 설치하여 3차원 계측이 이루어지도록 하였다. load cell을 장착한 블록게이지는 LIM의 밑에 설치하였고 측정된 힘은 앰프를 통해 출력된다. LIM에서 발생된 힘을 정확히 측정하기 위해 발생력에 대한 기계구조적 견고성, 측정 센서의 선형성과 반복성을 확인하였고 load cell과 indicator의 교정(Calibration)을 하였다. 또한 매번 시험 후에는 반드시 재교정하여 재시험을 실시하였다.

LIM의 속도는 시험기의 바퀴 중심에 타코메터를 설치하여 1회전 1000 pulse를 출력된다. LIM의 입력 전기량은 전력분석기로 측정하였다. 실제 시험에서 측정된 물리량은 추력, 수직력, 안내력, 속도, 전압, 전류, 주파수 등이 연산 또는 실시간 처리가 가능하도록 GPIB와 A/D 카트를 통해 컴퓨터로 자동 입출력된다.

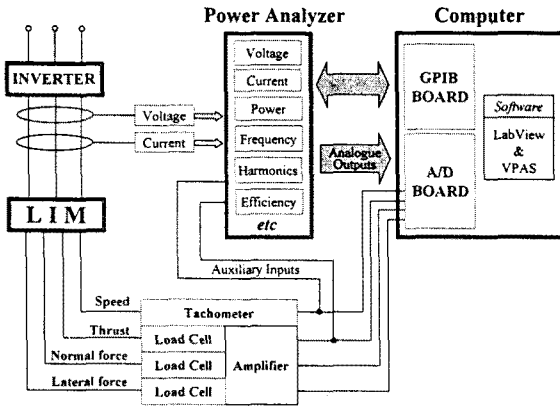


그림 2. 동특성시험을 위한 계측 시스템 구성도

표 3. 계측 장비의 제원

계측량 및 계측장비		제원
힘	Load Cell	추력(x방향) 100(kgf) 用
		수직력(y방향) 100(kgf) 用
		안내력(z방향) 20(kgf) 用
	Indicator	-
	Block Gauge	-
속도	타코메터	1000 pulses/1회전
전기량	전력분석기	-

2.2 LIM의 등가회로와 특성 해석식

LIM의 모의실험을 위한 특성계산식은 널리 이용되고 있는 등가회로법을 기본으로 한다. LIM의 등가회로는 그림 4와 같은데 r_1, x_1, r_2, x_2 등의 등가회로 정수들은 전자장이론을 적용한 공간고조파법과 무부하 및 구속시험에 의해 구해진 각 정수들을 얻을 수 있었다. 따라서 이러한 등가회로정수와 모터의 입력 전압, 전류 특성에 의해 LIM 특성이 결정된다.

LIM의 발생 추력 F_x 는 다음 식(1)과 같다.

$$F_x = \frac{mI_1^2 r_{2e}}{v_s} \quad (1)$$

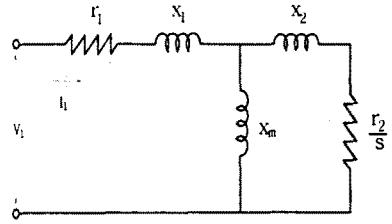


그림 3. LIM의 등가회로

그리고 수직력 F_n 은 다음식(2)로 표현된다.

$$F_n = h [pr + (3q-1)(\omega_s + \omega_i) + \omega_i] \mu_0 f_m^2 \frac{U^2 + V^2 - 1}{4} \quad (2)$$

여기서, $U = \text{Real}(K)$, $V = \text{Imag}(K)$

$$K = \coth \left\{ \frac{\pi}{\tau} (g + d_2 \lambda_2) \right\}$$

이다. 역률 Pf 과 효율 η 은 각각 식(3)과 식(4)와 같다.

$$Pf = \frac{(r_1 + r_{2e})}{Z_1} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{F_x v_s (1-s)}{F_x v_s + 3r_1 I_1^2} \quad (4)$$

그림 5는 LIM의 운전특성, 동특성해석을 위한 알고리즘이며, 이를 결정하는 기본적인 것은 주파수, 전압, 속도이다. 주파수와 속도에 의해서 동기속도와 슬립이 결정되고, 전압에 의해서 추력 등의 특성값을 구할 수 있다. 그리고 인버터의 V/f 설정치에 따라 시간 증분치와 주파수 증분치, 전압이 정해지고 현재 속도를 통해 시간변화에 따른 동특성이 계산된다.

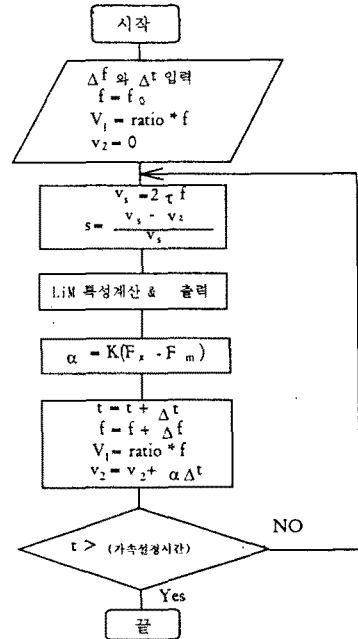


그림 4. 동특성계산 흐름선도

2.3 V/f 일정 운전 패턴

V/f 일정운전은 그림 5과 같이 정격속도이하의 저속 영역에서는 V/f비를 일정하게 하여 운전하고, 정격속도에 도달하게 되면 전압일정, 주파수가변에 의하여 속도를 제어하게 된다. 이러한 경우에 인버터는 운전패턴에 따라 초기에 운전조건을 설정하게 된다.

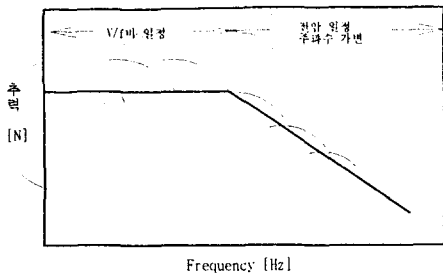


그림 5. LIM의 일반적인 운전패턴

2.4 인버터 성능 분석

LIM의 운전특성은 인버터의 성능에 의해 좌우된다. 따라서 동특성시험 결과를 분석하기 위해 인버터의 성능을 파악해야 한다. 인버터 성능시험에 사용된 계측기는 정현파 뿐만 아니라 비 정현파인 경우에도 전기량을 정확하게 계측할 수 있는 전력분석기를 사용하였다. 그림 6는 출력주파수에 따른 선간전압과 상전류의 실효치 및 기본파 실효치를 계측한 결과이다. 이 그림에서 전류의 실효치와 기본파 실효치가 거의 비슷하므로 전류는 거의 정현파에 가깝고, 인버터에 출력 기본파 실효치 전압은 $V/f=220/60$ 에 따라 출력됨을 알 수 있다. 또한 저주파수영역에서 전체실효치에 대한 기본파 실효치의 비가 낮다. 그림 7은 출력 전압과 전류의 왜곡률 DF 를 보여준다.

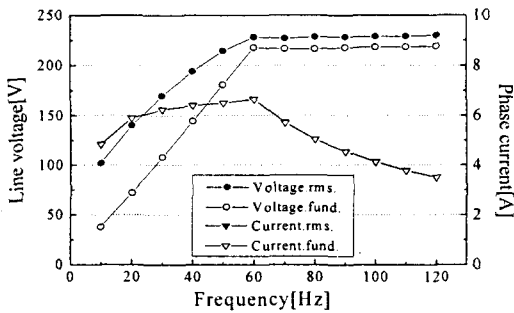


그림 6. 인버터 출력전압 및 전류 특성

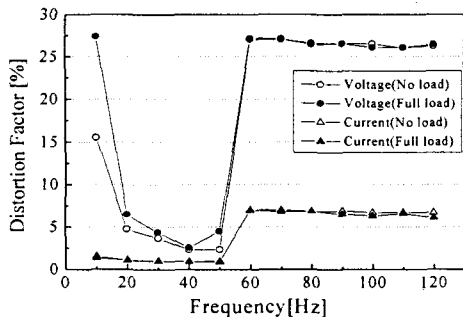


그림 7. 인버터 출력전압 및 전류 왜곡률 특성

2.5 V/f 일정 운전에 따른 동특성 시험

그림 8은 기동시부터 정상속도까지의 전압, 전류, 주파수 실효치이다. 전압과 주파수는 인버터 운전패턴에 따라 출력되었으며, 가속시간동안 7[A]까지 급격히 상승하며, 정속구간에서는 6.5 [A]로 감소되어 일정하게 유지되었다. 그림 9는 그림 8과 같은 조건에서 전력과 역률 특성곡선으로 가속구간에서는 슬립이 크므로 역률은 0.37까지 증가하다가 정속구간에서 역률은 0.17로 유지되었다.

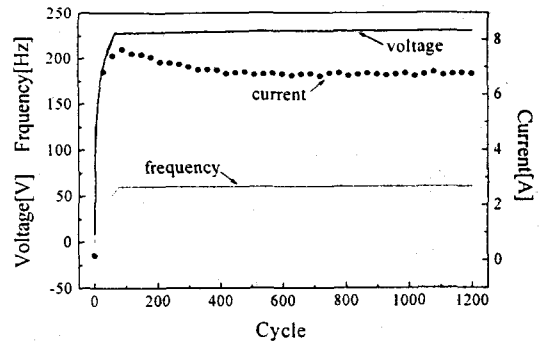


그림 8. 기동시 전압, 전류, 주파수 곡선 ($V/f=220/60$)

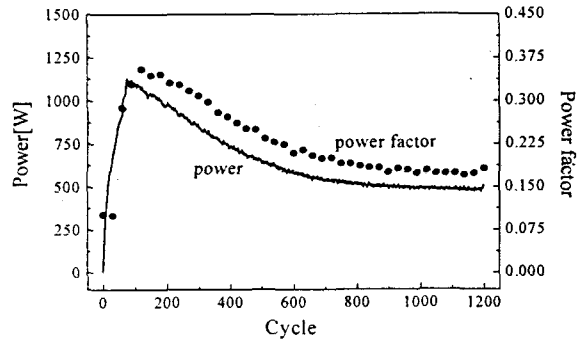


그림 9. 기동시 전력, 역률 특성 곡선 ($V/f=220/60$)

3. 결 론

본 연구에서는 인버터로 운전되는 LIM을 무한계도 연속운전이 가능한 드림형 시험기를 통하여 동특성시험과 함께 인버터 특성도 실측·분석하였다. 따라서 인버터로 제어되는 LIM을 원활히 운전할 수 있는 기본자료 및 그 방법을 제시하게 되었다. 또한 컴퓨터를 통한 자동계측시스템을 구축하여 특성에 관한 각종 데이터를 수집처리 하여 동특성을 실시간으로 계측하는 방법을 시도하였다. 그리고 LIM의 추력과 수직력 및 안내력을 기 존방법이 아닌, 운전중인 LIM 특성을 편리하면서도 정밀하게 측정할 수 있는 힘 측정용 블록 게이지를 특별히 고안 제작하였다. 더욱이 인버터의 출력은 고조파를 포함하므로 특성 실험과 모의실험에 앞서 주파수에 따른 기본파 함유율, 왜형율을 분석 검토하였다.

이로써 LIM으로 추진되는 시스템에서 LIM의 V/f비 일정제어, 페루프제어 등 자동운전시스템을 구성하는데 꼭 필요한 운전추종능력 등을 종합적으로 고려할 수 있는 제반 기본자료들을 제시하게 되었다.

[참고 문헌]

1. 野中作太郎 외 3인, "新都市交通用 リニア誘導モータの特性に関する實驗的研究", 電學論D, 108卷5號, 1988.
2. 장석명 외 2인, "시간고조파를 함유한 전원에 의하여 구동되는 유도형 리니어모터의 등가회로구성 및 특성해석", 전기학회논문지, 제46권 8호, pp.1154-1160, 1997.8.
3. 장석명 외 2인, "유도형 모터 구동용 인버터의 고조파 파형분석과 효율측정", '97 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A권(EMP 49), pp. 282-284, 1997. 7.

본 연구는 한국과학재단 핵심연구과제 971-0910-060-2로 지원되어 수행된 연구결과의 일부입니다.