

## V/f일정제어로 제어되는 LIM의 동특성

장석명\*, 정현갑\*\*, 김봉섭\*\*, 박영태\*, 정연호\*, 이현구\*  
 \*충남대학교 전기과, \*\*한국기계연구원

### Dynamic Characteristics of LIM controlled by constant V/f

S.M. Jang\*, H.G. Jeong\*\*, B.S. Kim\*\*, Y.T. Park\*, Y.H. Jeong\*, H.G. Lee\*  
 \*Chungnam Nat'l Univ., \*\*Korea Institute of Machinery & Metals

#### Abstract

This paper deals with the dynamic characteristics of LIM which is controlled by constant V/f ratio and the characteristics of the Inverter acted as interface between the utility power system and LIM. Though open-loop control method is less reliable than closed-loop control method, it's commonly used because it is simple and cheap.

This paper shows the consideration for dynamic characteristics of LIM under open-loop control and for Inverter.

#### 1. 서론

LIM(Linear Induction Motor)은 전기에너지를 역학적인 에너지로 직접변환하여 직선 추력을 발생시키는 장치로 자기부상열차, 경전철, 엘리베이터는 물론 입체반송장치등의 자동화 서보시스템에도 널리 이용되고 있으며 앞으로 그 응용범위는 더욱 확대될 것으로 기대된다.

LIM의 운전제어는 개루프제어와 폐루프제어로 분류할 수 있다. 개루프제어는 V/f 일정제어, 폐루프제어는 슬립 주파수제어와 벡터제어법이 있으며 자동운전이 가능하게 된다. 특히 벡터제어는 직류기와 같은 정밀도를 갖는 제어특성을 구현할 수 있는 특징을 갖는다. 이에 비해 V/f 일정제어는 부하에 의해 슬립주파수가 변화하고, 전동기의 속도검출이 이루어지지 않기 때문에 슬립주파수를 자동으로 제어할 수 없으므로 사실상 추력 제어가 불가능하다. 그러나, 제어구조상 가장 단순하여 범용성이 좋다. 본 연구에서는 LIM의 운전패턴에 따른 가속, 정격운동, 감속등에 따른 제반 문제를 다루었다. 또 운전시의 전력 공급과 관련하여 전압, 주파수의 공급, 인버터의 출력특성 및 V/f 일정제어시의 LIM의 동특성등에 관하여 다루었다.

#### 2. LIM의 운전

LIM의 추력 및 자속, 전력, 전압, 전류, 역률, 속도등의 특성은 아래와 같이 간략히 표현 할 수가 있다.

$$F = \frac{P_2}{v_s} = \frac{3E_1 I_2' \cos \phi_2}{v_s} = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{\tau} N_1 k_{w1} \Phi I_2' \cos \phi_2$$

$$\frac{V}{f} = \pi \sqrt{2} N_1 k_{w1} \Phi = \text{일정}$$

$$v_s = 2\pi f, \quad v = v_s(1-s)$$

따라서 LIM의 가속, 정격주행, 감속의 운전패턴에 따른 제어를 위한 전원공급은 아래와 같이 구현하게 된다. 즉 가속시에는 추력과 자속을 일정한 크기로 공급해 주며 속도를 상승시켜야 하므로, 입력주파수와 전압을 일정 크기의 비로 동시에 변화를 시키며 공급해야 만 한다. 이러한 조건하에서 전력을 공급하는 전원장치로는 VVVF 기능을 갖는 인버터를 사용하게 된다. 즉 정격속도이하의 저속영역에서는 V/f 일정으로 전원을 공급하여 운전을 한다. 또한 정격속도에서의 주행시에는 정격전압을 공급하고, 주파수는 가변을 시켜 속도제어를 하게 된다. 이 경우에 인버터는 주행패턴에 따라 초기에 운전조건을 설정하므로써 원하는 제어를 하게 된다. 그런데 최근에 시판되는 범용인버터는 모터의 기동특성을 양호하게 하기 위하여 전압과 주파수의 설정조건을  $V_1 = af + V_0$  [V] ( $a$ ; V/f 비로 초기에 설정)로 하여 boost를 하기도 한다.

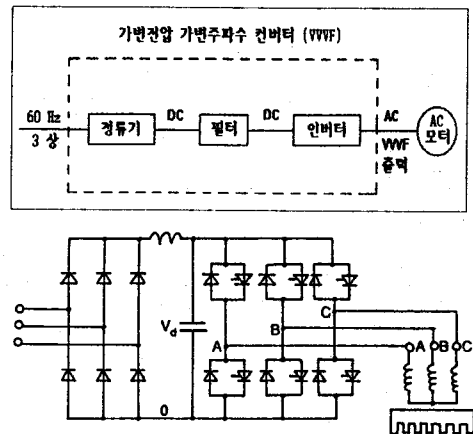


그림. 1 LIM운전제어 시스템

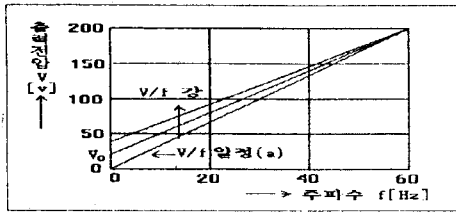


그림 2 인버터의 설정조건

VVVF 제어는 개루프 제어의 한 방법으로 폐루프제어에 비해 수동제어라는 점이 단점되지만, 제어법이 간단하고 쉽다는 장점에 의하여 일반적으로 널리 채용되고 있다. 그런데 인버터의 원리상 출력단에서의 출력전압이 고조파가 함유되는 것은 피할 수가 없다. 따라서 이에 의하여 운전되는 LIM은 시간고조파를 포함하는 비정현파가 입력되므로써 운전성능의 예측 및 시험을 매우 어렵게 한다. LIM의 운전제어의 정밀성을 위한 특성해석에는 이렇게 필연적으로 따르게 되는 문제를 고려하여 야 만하므로 주요한 관심대상이 되고 있다.

### 3. LIM의 동특성

V/f 일정제어는 주파수를 변화시킬 때 인버터의 출력전압을 동시에 제어함으로써, 공극자속과 추력을 일정하게 유지하고 가변속 운전에 대해 LIM의 효율, 역률을 저하시키지 않도록 제어하는 방식이다.

이 경우 V/f일정 전원에 의한 가속이 끝나고, 정격주행으로 진입하는 주파수의 동작점은 시뮬레이션을 통한 동특성산정에 의해 결정하게 된다. 본 연구에서의 특성해석 방법으로는 Nonaka교수가 제시한 바 있는 등가회로에 의한 간이산정법과, 1차측 전류분포를 여자전류에 의해 만들어지는 기자력과 등가되는 가상적인 등가표면전류로 치환한 후 맥스웰 전자방정식과 경계조건으로 부터 해석한 공간고조파해석법을 사용한다.

동특성계산에 사용되는 LIM의 사양은 표1과 같다.

표 1. LIM의 설계 파라메타

최대속도	30	[m/s]
인버터 출력전압	0 ~ 220	[V]
1차 철심높이(d <sub>1</sub> )	42	[mm]
극수(p)	4	[poles]
상/극당 슬롯수(q)	3	[개]
극간격(τ)	75	[mm]
1차 철심폭(h)	100	[mm]
Overhang 폭(c)	32	[mm]
2차 Al판 두께(d <sub>2</sub> )	5	[mm]
Backiron 두께(d <sub>1</sub> )	10	[mm]

주행패턴 시뮬레이션에서 주파수 100 [Hz]까지는 V/f 일정제어로 운전하다가 100 [Hz] 이상에서는 전압일정으로 운전하게 된다. 이러한 사양의 특성해석모델에 대하여 입력 주파수 f에 대한 입력전압의 기본파성분 V의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{cases} V = \frac{220}{100} f = 2.2f \quad [V] & (f < 100 \text{ Hz}) \\ = 220 \quad [V] & (f \geq 100 \text{ Hz}) \end{cases}$$

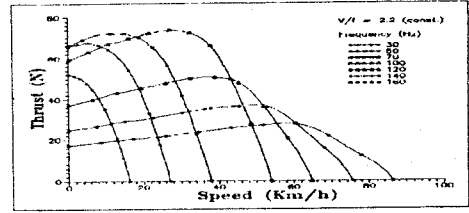


그림 3. 추력-속도 곡선

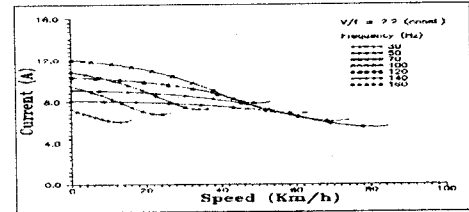


그림 4. 1차 전류-속도 곡선

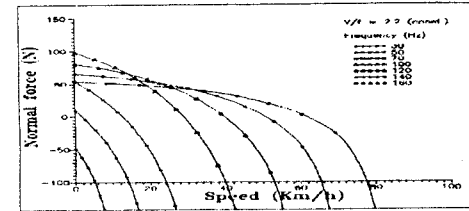


그림 5. 수직력-속도 곡선

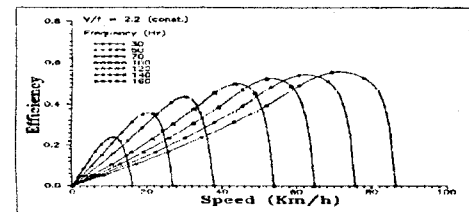


그림 6. 효율-속도 곡선

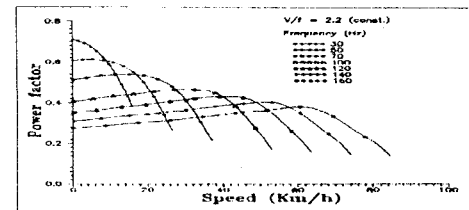
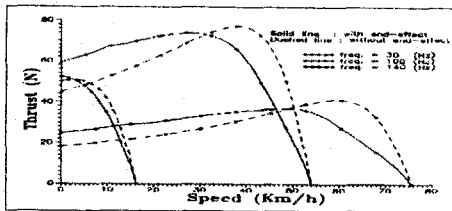


그림 7. 역률-속도 곡선

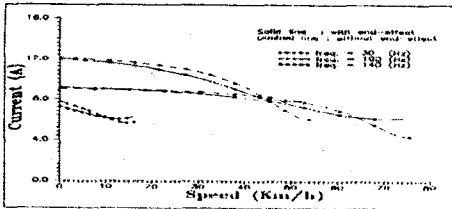
그림 3은 각각의 주파수에 따른 정전압 구동시의 추력-속도 특성을 나타낸다. LIM은 회전에 비해 등가 2차 저항이 크기 때문에 V/f 일정 제어 구간에서 주파수를 가변시킬 때, 저 주파수에서는 외부에 2차저항을 삽입한 것과 같이 수하 특성으로 나타난다. 이것은 저 주파수 영역에서 전체 임피던스에 끼치는 영향이 리액턴스 성분보다는 저항 성분이나 크게 작용하므로 그림 4에서 나타낸 전류특성 곡선과 같이 저 주파수에서 전류가 작아져 추력이 감소된다. 따라서 기동시의 추력을 크게하기 위하여 일정 주파수까지는 전압을 Boost시키기도 한다. 가속이 끝난 후 정격주행영역으로 진입하면 일정전압이 공급되기 시작하게 되는데, 이때는 주파수 만에 의하여 속

도를 제어하게 되며 리액턴스의 영향으로 임피던스가 커져 전류와 추력이 작아지게 된다. 속도에 따른 1차전류 특성을 각 주파수에 대하여 조사한 것이다. 그림 5의 수직력 특성곡선에서는 slip이 작아짐에 따라 흡인력이 커지므로, 비교적 큰 동작점을 선정함으로써 흡인력의 영향을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 그림 6의 효율 특성곡선에서는 1차 저항의 영향이 크므로 효율은 그다지 높지 않음을 볼 수 있다. 그림 7의 역률특성에 있어서 저 주파수에서는 리액턴스성분이 작고 1차저항의 영향이 크기 때문에 높은 역률을 나타내다가 주파수가 커짐에 따라 리액턴스의 영향으로 작아지는 분포를 나타낸다.

이러한 특성곡선은 단부효과와 표피효과를 고려하여 계산되었다. 따라서, 단부효과와 표피효과를 고려하지 않은 경우에 비해서 2차측의 임피던스 성분이 크게 나타나므로 2차의부저항을 삽입한 것과 같은 효과로서 그림 8(a)의 추력특성곡선에서 처럼 수하 특성으로 나타난다. 또한, 주파수가 감소함에 따라 추력일정구간에 대해 최고 추력이 크게 나타나고, 전압일정구간에서는 주파수가 증가함에 따라 최고추력이 훨씬 감소한다. 이것은 주파수의 변화가 단부효과와 표피효과에 끼치는 영향이 크다는 것을 의미한다.



(a) 추력특성곡선



(b) 전류특성곡선  
그림 8. 단부효과와 표피효과의 영향

이상에서 V/f 일정으로 제어되는 LIM의 동특성에 대해 시뮬레이션을 통하여 알아보았다.

#### 4. 인버터의 특성고찰

LIM의 특성은 전적으로 인버터의 성능에 의하여 결정된다. 따라서, 실제운전의 LIM 동특성을 산정하기 위해서는 인버터의 특성에 대하여 보다 자세한 고찰을 할 필요가 있다.

표. 2는 LIM의 운전을 위하여 사용될 인버터의 출력특성과 신뢰도를 분석하기 위하여, IGBT(PWM VSI) 범용 인버터를 사용하여 LIM에 비해 효율 및 역률특성이 양호한 일반 유도전동기를 선정하여 운전하면서 출력측의 전기량을 측정된 결과이다.

제원이 각기 다른 3종류의 계측기에 의해서 측정된 전기량은 표 2에 나타낸 것처럼 많은 차이를 보인다. 일반적으로

표 2. 인버터 출력측의 전기량의 실측치

계측기	주파수 (Hz)	3.3	6.6	13.3	19.9	26.7	33.2	40	46.6	53.3
PM300 (A/D type)	전력(W)	42.98	64.18	76.19	89.69	98.59	109.76	122.19	131.71	148.77
	전압(V)	35.06	51.12	77.51	102.64	123.34	142.81	161.05	177.76	197.61
	전류(A)	1.77	1.87	1.64	1.52	1.40	1.34	1.30	1.25	1.25
RFL636 (PWM)	전력(W)	54	63	64	93	99	102.5	123	134	141
	전압(V)	91	95.4	106.5	130	138.4	142	165.7	177.9	192.5
	전류(A)	1.71	1.75	1.57	1.48	1.37	1.31	1.27	1.22	1.22
VEW (Digital)	전력(W)	42	60	72	90	98	109	120	130	145
	전압(V)	80	96	124	145.7	163.5	179	194	207.3	220
일본	전압(V)	1.75	1.84	1.63	1.53	1.42	1.33	1.31	1.25	1.26
	전류(A)									

으로 인버터 제작사에서 제시한 자료에 의하면 V/f는 일정하게 유지하면서 제어를 할 수 있다. 그러나 실제로 계속하게 되면 주파수가 증가함에 따라 그 비가 약간 변하는 것을 볼 수 있다. 이것은 제원이 다른 인버터의 제작상태에 따라 그 변화특성이 다르므로 실제의 V/f 일정 운전시에는 이를 고려한 특성으로 보정해야만 한다. 또한 동일한 인버터에서 출력단 전기량들이 계측기에 따라서도 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 인버터의 출력단에 함유된 시간고조파의 측정능력이 계측기에 따라 다르기 때문이다. 즉 인버터의 출력단파형은 부하상태에 의해서가 아니라 회로구조, 스위칭패턴에 의해 결정되어진다. 따라서 고조파성분까지 정밀하게 측정할 수 있는 계측기의 선정, 그에 따른 측정방법 등에 대한 대책을 세워야만 인버터로 운전되는 LIM 특성의 정확한 분석이 가능하다. 따라서 V/f 일정으로 전원이 공급되는 LIM에 시간고조파가 포함되어, 운전성능의 예측은 물론 정밀한 제어가 어려워지게 되기 때문이다. 즉 시간고조파 때문에 발생하는 LIM의 등가회로 파라미터는 주파수에 따라 표피효과가 변하기 때문에 등가회로 저항과 리액턴스가 변하게 된다. 그러므로 정현파 전압으로 운전되는 LIM의 등가회로 정수 및 운전특성, 인버터에 의하여 비정현파 전압이 공급되는 경우의 특성은 매우 다르다. LIM의 운전시 고조파에 의한 두 가지의 주된 악영향은, 손실의 증가와 전자기력의 진동에 의한 힘의 맥동, 소음의 증가를 들 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 LIM의 운전패턴에 따른 가속, 정격운영, 감속 등에 따른 제반 문제를 다루었다. 즉 운전시의 전력 공급과 관련하여 전압, 주파수의 공급, 인버터의 특성검토 및 V/f 일정제어시의 LIM의 동특성에 관하여 다루었다.

#### 참고문헌

1. S.Nonaka and T.Higuchi, "study of High-Speed Single-Sided Linear Induction Motor Design", Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol.42, No.1, March 1982.
2. S. Nonaka et al, "新都市交通用리니어誘導모터의 V/f-一定運轉時의 動特性", Trans. IEE of Japan, Vol.109-D, No.7, pp.493-499, May, 1989.
3. S. Nonaka and K. Yoshida, "Analysis of Linear Induction Motors Using a Space Harmonic Technique", Transport without wheels(edited by E.R. Laithwaite), pp.187~216, 1977, Elek Science.
4. Jacek F. Gieras, "Linear Induction Drives", clarendon press, Oxford, 1994.