

## 유한요소법(FEM)과 제어알고리즘이 결합된 기법을 이용한 선형 유도전동기(LIM)의 동특성 해석

전 수진, 박성준, 이종호  
한밭대학교 전기공학과

### Dynamic Characteristic Analysis of LIM Using Coupled FEM and Control Algorithm

Su-Jin Jeon, Seong-June Park, Junn-Ho Lee  
Hanbat National University

**Abstract** – It is necessary to modify the state-of-the-art of vector control theory, because of the phase asymmetry (static end effect) in the Linear Induction Motor (LIM). The dynamic characteristic analysis method of the vector controlled LIM using coupled FEM and control algorithm taking into account the movement is proposed. The focus of this paper is the analysis relative to phenomena of static end effect due to the motor structure. To prove the propriety of the proposed method, the Digital Signal Processor (DSP) installed experimental devices are equipped and the experiment is performed.

**Index Terms**– Coupled Control Algorithm & FEM, LIM

### 1. 서 론

LIM은 모터구조상 각 상의 상수들이 다르므로 회전기 이론에 의한 LIM의 정확한 벡터 제어가 어렵다. 특히, 정확한 변환각은 간접 연산 벡터제어로 계산할 수 없다. 유한요소법은 비선형해, 이방성 특성, 운동 특성 해석 등에 있어서 등가회로법보다 더 우수하다.

본 논문에서는 1)운동량을 계산하는 FEM과 제어알고리즘이 결합된 기법을 이용한 LIM의 동특성 해석법이 제안되었다. 2)시뮬레이션에서 제어 시스템의 변환각과 유한요소법으로 계산된 자속각, 추력, 전류가 분석되어진다. 3)제안한 기법의 타당성을 입증하기 위해 DSP가 장착된 실험 장치를 갖추어서 실험을 수행하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 해석 모델

그림 1은 LIM의 2차원 모델이고 표1,2는 각각 사양과 비대칭 상수이다.

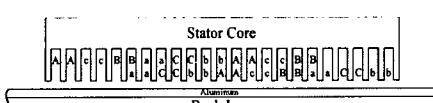


그림 1. LIM의 해석 모델

표 1. 해석 모델의 사양

모터 부문	사양
상 수	3
극 수	3
1차축 길이	198.5 (mm)
1차축 너비	80.0 (mm)
1차축 높이	49.0 (mm)
알루미늄 두께	4.0 (mm)
back·iron 두께	6.0 (mm)
공극	3.0 (mm)

표 2. LIM의 계산된 비대칭 상수

	d축	q축
고정자 철손 등가 저항(Rs)	1183.8 [ $\Omega$ ]	1808.3 [ $\Omega$ ]
2차축 저항(Rdr, Rqr)	16.95 [ $\Omega$ ]	17.78 [ $\Omega$ ]
고정자 자기 인덕턴스(Lds, Lqs)	176.4mH	162.6mH
2차축 자기 인덕턴스(Ldr, Lqr)	128.3mH	109.7mH
고정자 누설 인덕턴스(lds, lqs)	70.5mH	67.13mH
2차축 누설 인덕턴스(ldr, lqr)	22.4mH	14.1mH
상호 인덕턴스 (Md, Mq)	105.9mH	95.1mH

#### 2.2 벡터 제어 이론

LIM은 비대칭 상의 상수들 때문에 회전하는 좌표축을 변환하는데 있어서 상호간에 상쇄되는 조건들이 없으므로 변환된 전압공식은 복잡하다. 표3은 대칭·비대칭적인 가정하에 LIM의 슬립 각속도와 추력을 나타낸다.

표 3

대칭·비대칭적인 가정 하에서 LIM의  
각슬립 속도와 추력

#### 비대칭적인 가정 하에서 LIM의 슬립 각속도와 추력

$$\omega_{sl} = \frac{[M_d R_{dr} L_{qr}(1-\cos\theta) + M_q R_{qr} L_{dr}(1+\cos\theta)]}{(M_d R_{dr} L_{qr} - M_q R_{qr} L_{dr})\sin\theta} \cdot i_{ds}$$

$$- \frac{(R_{dr} L_{qr} + R_{qr} L_{dr})\sin\theta \cdot i_{ds} + (R_{dr} L_{qr} + R_{qr} L_{dr})\sin\theta \cdot \lambda_{rp}}{2L_{dr} L_{qr} \lambda_{rp}}$$

$$F_s = \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{(M_d L_{qr} + M_q L_{dr}) \cdot \lambda_{rp} \cdot i_{ds}}{2L_{dr} L_{qr}}$$

#### 대칭적인 가정 하에서 LIM의 슬립 각속도와 추력

$$\omega_{sl} = \frac{M}{\lambda_{rp}} \cdot \frac{R}{L_p} \cdot i_{ds}, \quad F_s = \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{M}{L_p} \cdot i_{ds} \cdot \lambda_{rp}$$

#### 2.3 해석 기법

2.3.1 운동을 고려한 유한요소 정식화  
지배방정식은 LIM의 지배방정식이다.

$$rot \frac{1}{\mu} rot \vec{A} = \vec{J}_0 - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$ 는 Russell and Norsworthy factor에 의한 횡방향 효과의 영향을 고려한 2차 등가 도전율이며, 식(1)을 풀기 위해 Galerkin 법을 사용하였다. 또한 회로방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[U] = [R][I] + [L_0] \frac{d}{dt}[I] + [E] \quad (2)$$

여기서,  $[E]$ : 유기기전력 벡터,  $[U]$ : 공급 전압 벡터,  $[L_0]$ : 누설 인덕턴스,  $[R]$ : 고정자 저항,  $[I]$ : 출력 전류

후회 시간차분법을 사용하였으며 (1), (2)가 결합된 시스템 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \left[ \begin{matrix} [S] + \frac{[D]}{\Delta t} & -[N] \\ [N]^T & \frac{[L] + \Delta t[R]}{h_{\text{eff}}} \end{matrix} \right] \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix} &= \\ \left[ \begin{matrix} \frac{[D]}{\Delta t} & [0] \\ -[N]^T & \frac{-[L]}{h_{\text{eff}}} \end{matrix} \right] \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix}_t &+ \left[ \begin{matrix} [0] \\ -\frac{\Delta t}{h_{\text{eff}}}[U] \end{matrix} \right]_{t+\Delta t} \quad (3) \end{aligned}$$

여기서,  $[A]$  : 자기 벡터 포텐셜,  $[D]$  : 와전류와 관계된 계수 행렬,  $[h_{\text{eff}}]$  : 고정자의 적층폭

### 2.3.1 추력과 자속 계산

각각의 시간에 대해 LIM에 작용하는 추력  $F_x$ 는 맥스웰응력법에 의해 계산된다.

$$F_x = \int \frac{w}{2\mu_0} ((B_x^2 - B_y^2)) n_x + 2n_x B_x B_y dI \quad (4)$$

여기서,  $n_x$ 와  $n_y$ 는 단위 법선 벡터이고  $w$ 는 1차축 적층폭이다. 유한요소법에서 상의 극당 쇄교자속은 다음과 같이 계산된다.

$$\lambda = N \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = N(A_1 - A_2)w \quad (5)$$

여기서,  $w$ 는 1차축 적층폭,  $N$ 은 코일 턴수,  $A_1$ ,  $A_2$ 는 슬롯의 벡터 포텐셜 평균값이다.

### 2.4 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 2,3은 각각 동특성 해석시의 시스템 블록선도와 해석흐름도이다. 비대칭 슬립각 계산 알고리즘은 FEM의 자속각과 비교하기 위해 제어기에 적용되어졌다. 본 논문에서 제안된 해석 기법은 샘플링 타임을  $10 \mu\text{sec}$ 로 사용하였으며, 벡터 제어기에서 스텝속도 지령 ( $0.5 \text{m/sec}$ )을 적용하였다. 추력 지령전류는  $i_{ds}$ 이고 자화 지령전류는  $i_{rs}$ 이다.

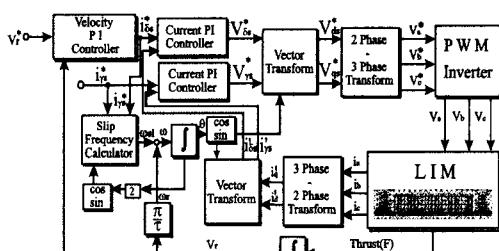


그림 2. 시스템의 블록 선도

동특성 해석에서 LIM의 속도는 다음 방정식에 의해 계산된다.

$$V_r = \int (F_x - F_t) / m \cdot dt, \quad \omega_r = (\pi/\tau) \cdot V_r, \quad \theta = \int (\omega_r + \omega_{st}) \cdot dt \quad (6)$$

여기서,  $V_r$ ,  $\omega_r$ ,  $\omega_{st}$ 은 각각 속도, 각속도, 슬립 각속도이고  $F_x$ ,  $F_t$ 은 추력과 부하추력이며  $\tau$ 는 극 간격이다. 유한요소법에 의해 계산된 자속각은 다음과 같이 나타낸다.

$$\theta = \tan^{-1}(\lambda_{qs}/\lambda_{ds}) \quad (7)$$

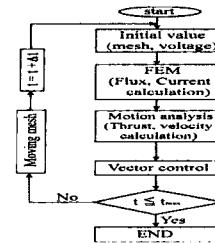


그림 3. 해석 기법의 플로어 차트

그림 4는 1193개의 절점과 2307개의 요소를 갖는 해석 모델의 매쉬 형태를 나타낸 것이고, 그림 5는 이동을 고려한 해석 모델의 자속선도를 보여준다.

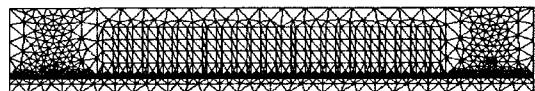
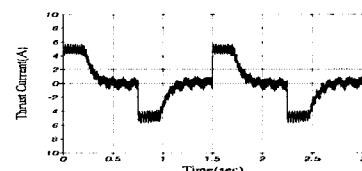


그림 4. 해석 모델의 매쉬

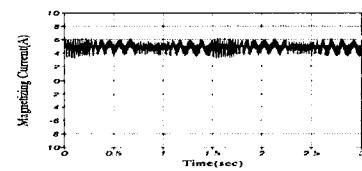


그림 5. 이동을 고려한 해석 모델의 자속 선도

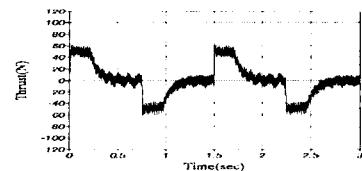
그림 6은 비대칭 제어시스템과 속도제어에서 추력전류, 자화 전류, 추력, 속도 피드백을 나타낸 것이고, 그림 7은 유한요소법에 의해 계산된 고정자 d, q 자속 응답특성을 보여준다.



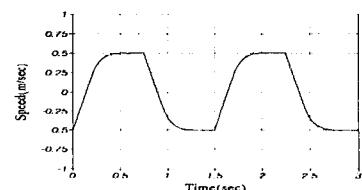
(a) 추력 전류



(b) 자화 전류



(c) 추력



(d) 속도 피드백

그림 6. 비대칭 제어시스템에서의 시뮬레이션 진폭

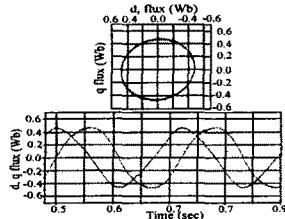


그림 7. 비대칭 제어시스템에서 고정자 자속  
그림 8,9는 유한요소법에 의해 계산된 자속각과 대칭·  
비대칭 베터제어에서 계산된 각의 비교를 나타낸다. 그  
림8의 대칭 제어 알고리즘으로부터 슬립 각속도의 계산  
은 오차를 수반하는 것으로 볼 수 있으며 그림9로부터  
비대칭 베터 제어알고리즘이 LIM에 우수한 것임을 알  
수 있다.

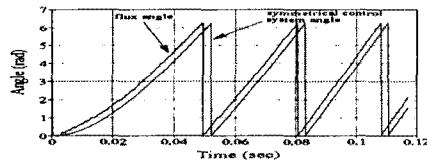


그림 8. FEM의 자속각과 대칭 제어에서 계산된 각의  
비교 특성

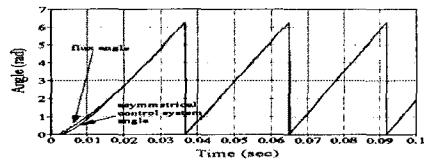


그림 9. FEM의 자속각과 비대칭 제어에서 계산된 각의  
비교 특성

## 2.5 실험

제어실험 시스템은 제어기, 표1에 실린 특성을 가진 선형유도 전동기, PC로 구성된다. 그림10은 대칭·비대칭 제어시의 자속각을 나타내며 대칭시의 각지연은 시뮬레이션치와 유사하다. 그림11은 비대칭 제어시스템의 고정자 자속 과형을 보이고 이 응답특성 또한 시뮬레이션과 유사함을 알 수 있다. 그림12,13은 추력전류, 자화전류, 추력, 속도 피드백파형이며 자속각의 불일치 때문에 대칭 제어시스템이 비대칭 제어시스템보다 추력과 전류에 있어서 더 큰 리플을 보인다. 또한 그림12에서 속도가 증가하는 동안 추력전류와 추력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 그림14에서 볼 수 있는 바와 같이 대칭 제어시스템의 속도응답이 비대칭 제어시스템보다 느리다는 것이 명백하다.

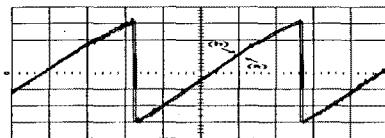


그림 10. 자속각의 실험 파형  
(1 rad/div, Time scale 50 msec/div)  
(a) 대칭 제어시스템, (b) 대칭 제어시스템

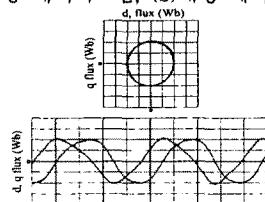


그림 11. 비대칭 제어시스템에서 고정자 자속의 실험

과형(0.25 Wb/div, Time scale 50 msec/div)

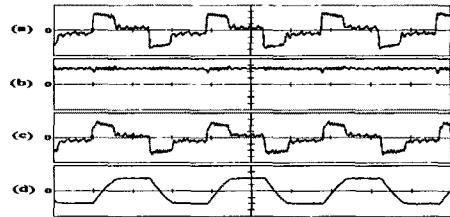


그림 12. 대칭 제어시스템에서의 실험 과형

- (Time scale 0.5 sec/div)
- (a) 추력전류(2A/div)
- (b) 자화전류(2A/div)
- (c) 추력(20N/div)
- (d) 속도피드백(0.25(m/sec)/div)

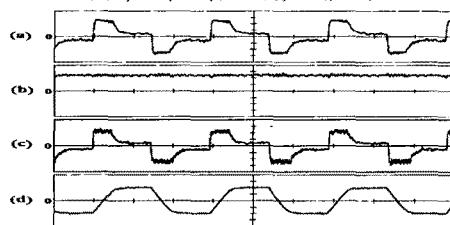


그림 13. 비대칭 제어시스템에서의 실험 과형

- (Time scale 0.5 sec/div)
- (a) 추력전류(2A/div)
- (b) 자화전류(2A/div)
- (c) 추력(20N/div)
- (d) 속도피드백(0.25(m/sec)/div)

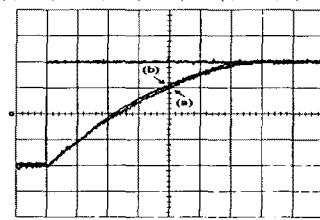


그림 14. 스텝 속도응답의 실험 파형

- (0.5m/sec/div, Time scale 0.1 sec/div)
- (a) 대칭 제어시스템 (b) 비대칭 제어시스템

## 3. 결 론

비대칭 제어알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 과도 특성 해석기법을 개발하였으며 제안한 기법을 통해서 자속각, 추력, 전류, 속도의 특성을 자세하게 관찰할 수 있었다. 또한 제어알고리즘과 FEM의 결합은 시뮬레이션과 실험을 위해 더 강하고 좋은 기법이라는 것이 확인되었다. 따라서 제안한 기법은 LIM과 다른 기기들을 위한 벡터 제어알고리즘의 개발에 유용하다.

## [참 고 문 헌]

- [1] T. A. Lipo and T. A. Nondahl, "Pole-by-pole d-q model of a linear induction machine," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 2, 1979.
- [2] H. Sugimoto and M. Tomoe, "A vector control method of a linear induction motor with asymmetrical constants and its performance characteristics," *Trans. on IEE Japan*, Vol. 114-D, pp. 17-23, 1994.
- [3] D. H. Im, B. I. Kwon and J. H. Lee, "Dynamic characteristics analysis of LIM's vector control using FEM," *Proceedings of LDIA '95*, pp. 307-310, 1995.
- [4] D. H. Im, and C. E. Kim, "Finite element force calculation of a linear induction motor taking account of the movement," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 30, No. 5, pp. 3495-3498, 1994.
- [5] R. L. Raussell and K.M. Norsworthy, "Eddy current and wall losses in screened rotor induction motors," *Proc. of IEE*, Vol. 105A, pp. 163-175, 1958.