

FEM을 이용한 선형유도 전동기의 벡터제어 특성 해석

임달호*, 권병일*, 이종호*, 우경일*, 김창업**
 한양대학교 전기공학과* 효성중공업(주) 기술연구소**

The Analysis on Vector Control Characteristics of LIM Using Finite Element Method

D.H. IM* B.I. KWON* J.H. LEE* K.I. WOO* C.E. KIM**
 Dept. of Electrical eng., Hanyang University* R&D Institute, Hyosung Industries Co., Ltd.**

ABSTRACT

For a linear induction motor(LIM), the constants of each phase are different due to the structure. In this paper, a vector control analysis method of a LIM taking into consideration its asymmetrical constants are proposed.

And, in order to prove the propriety of proposed vector control method and to analyze the dynamic characteristics of LIM's vector control, FEM taking into account of movement and using stator tapped winding is used in the analysis region.

So, It is confirmed that the proposed asymmetrical constants vector control theory and simulation method of mixing with FEM is appropriate to dynamic characteristics analysis of LIM.

1 서론

LIM을 고성능 동적특성이 요구되는 서보 시스템으로 실현하기 위해서는 순시추력 제어가 가능한 벡터 제어가 필요하다. 그러나, LIM은 회전기와 달리 구조에 의한 단부효과(Static End Effect) 때문에 기존 벡터 제어 이론으로는 LIM의 정확한 변환각을 산출할 수 없다.

본 논문에서는 LIM의 상비대칭성을 고찰한 d-q 등가회로 [1]로 LIM의 제어계를 구성하였으며, 해석영역에 이동을 고려한 과도상태 해석기법(FEM)[2]을 적용하여 LIM의 동특성해석을 위한 간단한 모의실험기법을 제안하였다. 또한 해석영역 내부 일차축의 권선부분을 Tapped winding[3] 형태로 구현하여 일차축 쇄교자속을 직접 검출하는 형식을 위해 구성된 제어계의 슬립각과 검출되는 자속각의 일치함을 확인하였다.

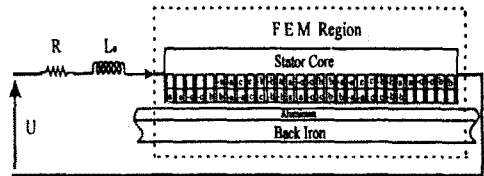
2 해석 방법

2.1 해석 모델

LIM의 2-D 유한요소 해석모델을 그림1에 나타냈고, 사양은 다음과 같다.

표1 실험기의 사양

상 수	3상	일차축 길이	59.6 mm
극 수	4극	Aluminium 무게	4.0 mm
일차축 길이	323 mm	Back iron 무게	6.0 mm
일차축 폭	82.0 mm	공극	6.0 mm
슬롯 피치	11.0 mm	슬롯 깊이	4.0 mm
슬롯 폭	7.0 mm	극 간격	69.5 mm
일차축 질량	15 Kg	매극 예상당 슬롯 수	2



R : 일차 저항 [Ω], L_o : 일차 누설 인덕턴스 [H]
 i : 상 전류 [A]

그림1 LIM의 해석모델

2.2 이동을 고려한 유한요소 해석 [2]

LIM의 자기벡터 포텐셜에 관한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} = \vec{J}_o - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

여기서, σ 는 Russell and Norsworthy factor에 의한 평방향 단부효과를 고려한 이차축 도체의 등가 도전율이다. \vec{v} 는 이동부분의 속도이다. Moving coordinate system을 이용하여, 방정식(2.1)은 (2.2)로 변형할 수 있다.

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} = \vec{J}_o - \sigma \frac{d\vec{A}}{dt} \quad (2.2)$$

계방정식과 결합된 회로방정식은 다음과 같다.

$$[U] = [R] [I] + [L_o] \frac{d[I]}{dt} + [E] \quad (2.3)$$

여기서, [E] = 권선의 기전력
 [U] = 공급 전압

(2.2)를 풀기 위해, Galerkin법을 사용하고, 해의 시간적인 변화를 고려하기 위해 시간에 대해 이산화한 후, 각 시각에 대한 해를 구하는 시간차분법을 적용했다.

따라서 (2.2)와 (2.3)을 결합한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\left\{ \begin{bmatrix} \frac{1}{\mu} S & -N \\ \mu & R \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} T & 0 \\ L_{eff} N^T & L \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} T & 0 \\ L_{eff} N^T & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}_{t-\Delta t} + \begin{bmatrix} 0 \\ U \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.3 추력 및 자속 계산

각 시각에 대한 LIM의 추력 F_x는 맥스웰 용력으로 부터 구하면 다음과 같다.

$$F_x = \int_1 \frac{w}{2\mu_0} ((B_x^2 - B_y^2)n_x + 2n_x B_x B_y) dl \quad (2.5)$$

n_x, n_y : 단위 방향법선벡터, w : 적층폭

Tapped winding 기법[3]을 적용하기 위하여, 실제 Tap이 나옴 권선부분의 Element 번호를 찾아 권선 쇠교자속을 계산하였다. End effect의 영향을 줄이기 위하여 LIM의 중앙 부분을 계산하였다. 매극 매상당 쇠교자속식은 다음과 같다.

$$\Psi = N \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = N(A_1 - A_2)l \quad (2.6)$$

l 은 Z축 방향 길이, N 은 슬롯 내부의 권선수, A_1, A_2 는 슬롯 내부의 벡터 포텐셜이다.

3 LIM의 벡터 제어법[1]

LIM의 상비대칭 전압방정식을 회전 좌표축으로 변환하여 Field orientation을 취한후, 비간섭 정계수화한 전압방정식은 다음과 같다. (기호는 Ref.[1] 참조)

$$P \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \lambda_r \end{bmatrix}^T = D \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \lambda_r \end{bmatrix}^T + [E \ 0]^T \begin{bmatrix} v_r \\ v_s \end{bmatrix}^T \quad (3.1)$$

v_r, v_s 은 정계수화, 비간섭화를 행한 후의 전압이며, 정계수화, 비간섭화에 따른 전압은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_s \end{bmatrix}^T = [B^{-1} \ 0^T] \cdot ((-T \cdot AA - PT + DT) \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \lambda_r \end{bmatrix}^T + [E \ 0]^T \cdot \begin{bmatrix} v_r \\ v_s \end{bmatrix}^T) \quad (3.2)$$

그리고, 슬립주파수, 자화분전류와 추력분전류는 다음과 같다.

$$\omega_s = \omega - \omega_r = [(\tilde{a}_5 - \tilde{a}_5 \cos 2\theta) i_d - \tilde{a}_5 \sin 2\theta i_q] / \lambda_r + \tilde{a}_5 \sin 2\theta$$

$$\begin{aligned} i_d^* &= (1 + \tilde{a}_5 \cos 2\theta / \tilde{a}_5) \cdot i_d - (\tilde{a}_5 \sin 2\theta / \tilde{a}_5) i_q - (\tilde{a}_5 \cos 2\theta / \tilde{a}_5) \lambda_r \\ i_q^* &= -\frac{1}{\tilde{a}_1} i_q \\ &= -\frac{\tilde{a}_1}{\tilde{a}_1} \sin 2\theta i_d + (1 - \frac{\tilde{a}_1}{\tilde{a}_1} \cos 2\theta) i_q + \frac{\tilde{a}_5}{\tilde{a}_1} \sin 2\theta \lambda_r \end{aligned} \quad (3.3)$$

이차 쇠교자속 제어법을 식으로 표현하면 (3.4)와 같으며, 그 출력은 자화 지령전류이다.

$$i_d^* = K_d (1 + \frac{1}{T_{ds}}) (\lambda_r^* - \lambda_r) \quad (3.4)$$

전류제어기를 표현하면 다음과 같으며, 그 출력은 전압지령치이다.

$$V_d^* = K_v (1 + \frac{1}{T_{ds}}) (i_d^* - i_d) \quad (3.5)$$

$$V_q^* = K_v (1 + \frac{1}{T_{ds}}) (i_q^* - i_q) \quad (3.6)$$

$$T_d = 1 / \tilde{a}_5 \quad T_q = 1 / (\tilde{a}_1 + \tilde{a}_2) \quad T_\lambda = 1 / (\tilde{a}_1 + \tilde{a}_2)$$

그리고 운동방정식은 다음과 같다.

$$V_r = \int \frac{F - F_l}{m} dt \quad (3.7)$$

여기서, V_r : 속도, F_l : 부하력, m : 질량

4 시뮬레이션

FEM을 해석영역에 적용하여 시뮬레이션을 행함에 있어,

제어계를 구성하는 등가회로에 의한 회로정수와 FEM해석 영역의 회로정수와 동가성을 확인하기 위해 LIM의 정상상태 추력을 등가회로법과 FEM으로 계산 비교하였고, 그 결과를 그림2에 나타냈다. 그림2로부터 FEM을 이용한 동특성 해석기법의 타당성을 입증했다.

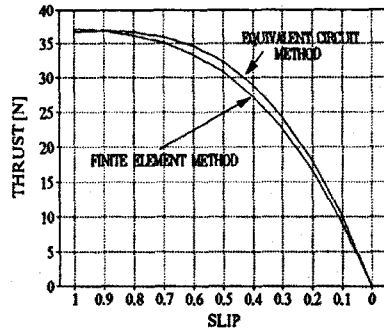


그림2 등가회로법과 FEM을 이용한 정상상태 추력 특성

시뮬레이션 시스템 구성도를 그림3에 나타냈고, 시뮬레이션에 사용된 LIM의 회로정수는 실험에 의해 구한 상비대칭 회로정수이다.[4] 그리고, 해석 순서도를 그림4에 나타냈다.

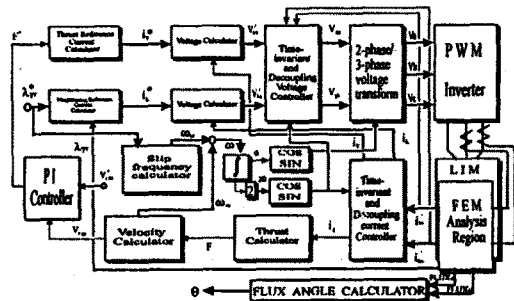


그림3 시뮬레이션 시스템 구성도

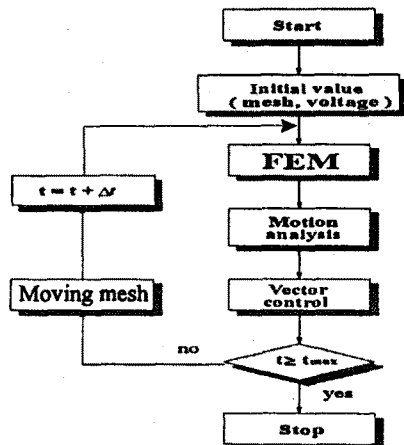


그림4 FEM을 적용한 동특성 해석 순서도

그림3의 LIM을 구동하는 인버터는 전압형정현파 PWM인 버터로 구성하였다.

속도 제어기는 속도명령에 따라 적절한 추력분 전류명령을 발생시켜 Feedback된 속도가 명령에 추종하도록 동작한다.

FE영역에서 계산된 3상전류로 i_r, i_s 을 계산하고, 비간섭, 정계수화를 행한 추력분, 자화분 전류가 Voltage calculator로 명명된 전류제어기에 Feedback되어, Motor가 명령치에 추종할 수 있는 알맞은 전압지령을 출력한다.

속도명령은 Ramp입력으로 초기시간 0초에서 0.2초까지 10 [m/sec²]의 가속도 명령을 주고, 다시 0.9초에서 -10 [m/sec²]의 가속도 명령을 주었고, Motor의 질량은 15 Kg, 부하는 없는 것으로 가정하였다. 시뮬레이션의 Sampling Time은 0.2 [msec]로 하였다.

시뮬레이션 결과를 고찰해보면, 그림5는 속도제어때의 발생하는 순시추력과 속도응답을 나타낸다. 질량이 15 Kg, 가속도 10 [m/sec²]일 경우의 추력 150 [N]이 응답함을 볼 수 있다. 그 추력에 의해 속도명령에 따라 가동부의 속도가 빨리 응답함을 알 수 있다. 그림6은 같은 상황에서 이동좌표계의 추력분전류와 일정자속을 나타낸다. 그림7은 상대칭 d-q 등가회로(회전기이론)로 제어계를 구성하여 시뮬레이션 했을 경우의 제어계의 변환각과 FE영역에서의 자속각의 변화를 보여준다. 그림에서도 볼 수 있듯이 두 각은 서로 오차가 있음을 알 수 있다. 그림8은 상대칭 d-q 등가회로 수식으로 시뮬레이션했을 경우의 슬립각과 자속각을 나타낸다. 두개의 각이 거의 일치되는 것을 볼 수 있다. 따라서, 상대칭 등가회로로 LIM의 제어계 구성은 타당하다고 말할 수 있다.

그리고, 그림9는 일차자속 파형을 나타낸다. 두 자속의 크기는 거의 같으며, 90도 위상차가 정확히 나오는 것을 볼 수 있다. 따라서, 상대칭 제어이론의 변환각과 자속각의 비교는 타당하다 말할 수 있다.

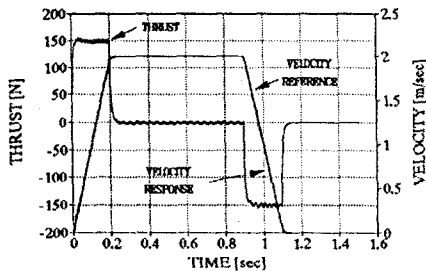


그림5 추력특성과 속도응답 특성

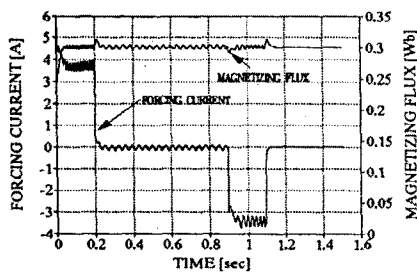


그림6 추력분전류와 자화분전류 응답특성

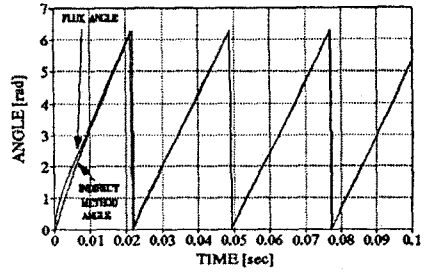


그림7 상대칭 제어계의 변환각과 자속각 특성

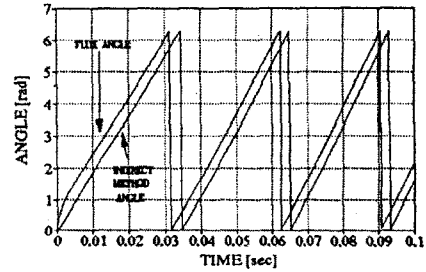


그림8 상대칭 제어계의 변환각과 자속각 특성

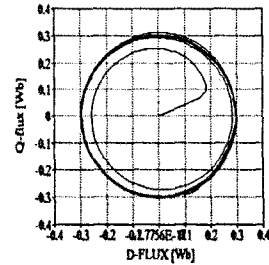


그림9 일차자속 응답특성

5 결론

본 논문에서는 제안한 시뮬레이션 기법을 통해 구성된 제어계의 변환각과 FE영역의 자속각의 일치함을 확인함으로써 LIM에 대한 상대칭 회로 구성의 타당성을 확인하였고, 여러가지 분석을 통해 제안된기법이 LIM의 동특성 해석에 적합함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] H. Sugimoto, M. Tomoe "A Vector Control Method of a Linear Induction Motor with Asymmetrical Constants and its Performance Characteristics," T. IEE Japan, vol 114-D, pp.17-23, 1994.1.
- [2] Dal-Ho Im and Chang-Eob Kim, "Finite element force calculation of a linear induction motor taking account of the movement," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.30, pp. 3495-3498, September, 1994.
- [3] T. A. Lipo and K. C. Chang, "A New Approach to Flux and Torque Sensing in Induction Machines," *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol.IA-22, pp 731-737, July/Aug, 1986.
- [4] 권병일, 이중호, "선형유도전동기의 벡터제어 모의실험" 1994년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 49-51