

선형유도전동기의 벡터제어 모의실험

권병일, 이종호^o, 김성영
한양 대학교 전기공학과

The Vector Control Simulation of LIM

Byung-Il Kwon, Jung-Ho Lee^o, Sung-Yung Kim
Dept. of Electrical Eng. Hanyang Univ.

Abstract

LIM has been developed for use in the industry, transportation, OA, FA because of the merits of direct drive and simple structure. The thrust control of LIM usually has been the average thrust control. However, vector control is required to control the instantaneous thrust force for an accurate positioning and speed control. To obtain dynamic vector control characteristics, it is important to make equivalent circuits which represent exactly LIM.

In this paper, asymmetrical d-q equivalent circuits is built [1] and vector control characteristics is calculated by simulation using these circuits.

1. 서론

선형유도전동기의 동특성을 해석하기 위해서는 선형유도전동기의 단부효과 및 edge effect를 어느정도 고려하는 유한요소법, 프리에곱수법 및 프리에변환법 등에 의한 수치적인 기법이 적용될 수 있다. [2 - 5] 하지만, 이러한 방법은 계산시간이 많이 걸리고 또한 계산의 준비 및 계산을 위한 기초지식이 필요하여 용이하지 않다.

이에 비하여, 간단한 등가회로를 이용하는 방법으로서는 수치적인 계산에 의한 Pole by pole d-q modelling [6] 에 의하여 2차축의 각극당의 비대칭성을 고려하는 d-q 등가회로와, 구속시험 및 등가무부하시험(2차축 도체를 제거하여 등가적으로 무부하상태를 만들어서 행하는 시험)에 의한 비대칭 d-q 등가회로 [1]의 작성이 발표되어 있다.

본 논문에서는 정지형 지상 1차식 선형유도전동기를 제작하고, 이를 이용하여 구속시험 무부하등가시험을 행하여 비대칭 d-q 등가회로를 구성한다. 또한, 이 등가회로 및 기존의 벡터제어기법을 이용하여 선형유도전동기의 벡터제어 모의실험을 행하므로써 선형유도전동기의 벡터제어의 가능성 및 간단한 모의실험기법을 제시한다.

2. LIM의 비대칭 d-q 등가 회로

2.1 실험기의 구조

LIM의 정수는 그 구조상 각상에 따라 다르다. 정수의 상비대칭은 추력백동의 원인이 되고, 제어에 어려움이 따른다. 따라서, 벡터제어를 위한 d-q 등가회로를, 상비대칭을 고려하여 구할 필요가 있으며, 실험에 의해 등가회로의 정수를 구하기 위하여 실험기를 제작 하였다.

실험기는 편축식 단일차형이며, 3상 4극이다. 1차권선은 이층권, 분포권, 단결권이며, 권선 배치는 a, -c, b순이다. 2차축은 비자성도체판을 알루미늄판으로, 자성도체판으로는 철판을 사용하였다. LIM의 사양을 표1에 나타낸다.

표1 실험 LIM의 사양
Table 1 Specification of LIM

1. Number of pole	4
2. Number of phase	3
3. Series turns/coil	720
4. Pole pitch	0.0695 [m]
5. Primary length	0.34 [m]
6. Primary width	0.082 [m]
7. Primary height	0.055 [m]
8. Aluminium's thickness	0.035 [m]

2.2 d-q 등가 회로 구성 [1]

LIM이 위와같은 구조일 경우 저속으로 사용할 때에 End effect를 무시할 수 있으며, a 상과 b상 1차권선은 자기, 상호 유도회로가 대칭이다. 그러나, c상은 자기회로는 a, b상에 대하여 대칭이지만, 상호 유도회로는 비대칭이다. 이러한 비대칭을 고려하여 본절에서 비대칭 정수를 산정하였다.

등가 무부하 상태에서 3상 등가회로를 표현하면 그림1과 같다. 등가 무부하상태는 2차축 알루미늄판을 떼어내, 2차축에 전류를 흐르지 않게하여 2차축을 고려하지 않는 것을 의미한다.

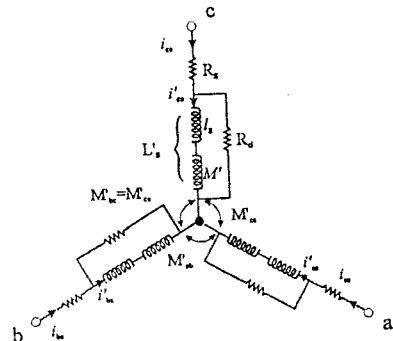


그림1 무부하상태의 3상등가회로
Fig.1 Three-phase equivalent circuit under no-load state

여기서, L' 는 자기인덕턴스이며, M 는 L' 중의 상호인덕턴스이며, 상호 대칭일 경우의 자화 인덕턴스와 같다. L_s 은 누설인덕턴스이다.

$$L'_{cs} = M' + L_s \quad (2.1)$$

$M'_{cs} M'_{ab}$ 는 c상 a상 권선간 및 a상 b상 권선간의 상호 인덕턴스이다.

$$\begin{aligned} M'_{cs} &= -(k_{ca} M') \\ M'_{ab} &= -(k_{ab} M') \end{aligned} \quad (2.2)$$

여기서, k_{ca} , k_{ab} 는 결합계수이다.

그리고, 그 전압방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{ba} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + k_1 PL'_{cs} & k_2 PM'_{ca} & k_3 PM'_{cb} \\ k_2 PM'_{ca} & R_s + k_1 PL'_{cb} & k_3 PM'_{ab} \\ k_3 PM'_{ca} & k_3 PM'_{cb} & R_s + k_1 PL'_{ab} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{ca} \\ i'_{cb} \\ i'_{ba} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

식 (2.3)을 변환행렬 [C]를 이용하여 d-q 변환을 행하면, 다음식과 같이된다.

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$[ds \ qs]^T = [C] [cs \ as \ bs]^T$$

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + k_d PL_{ds} & 0 & k_d PM_d & 0 \\ 0 & R_s + k_q PL_{qs} & 0 & k_q PM_q \\ PM_d & \omega_n M_q & R_{d2} + PL_{d2} & \omega_n L_{q2} \\ -\omega_n M_d & PM_q & -\omega_n L_{d2} & R_{q2} + PL_{q2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{ds} \\ i'_{qs} \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

ω_n 는 2차축의 전기적 각속도이며, 기계적 각속도를 ω_m , 극간격을 τ 라 하면, 다음의 관계가 성립한다.

$$\omega_n = \left(\frac{\tau}{\tau}\right) \omega_m \quad (2.6)$$

식 (2.5)에 의해 d-q 등가회로를 그리면 그림2와 같다.

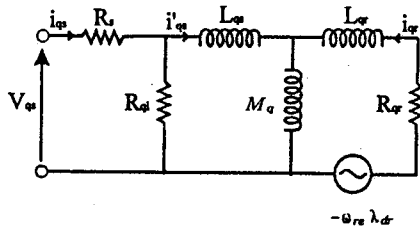
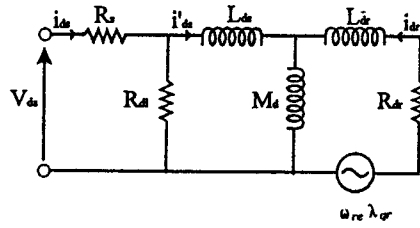


그림2 d-q 등가 회로
Fig. 2 d-q Equivalent Circuit

그림중의 λ_d , λ_q 은 d, q축 2차 쇄교자속수이며, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_d &= M_d i'_{ds} + L_{ds} i_d \\ \lambda_q &= M_q i'_{qs} + L_{qs} i_q \end{aligned} \quad (2.7)$$

d-q 등가회로의 정수 산정은 결합계수를 결정 한 후, 등가 무부하시험, 구속시험을 통해 각 회로의 정수를 결정한다. [1]

결합계수는 그림1의 등가무부하의 상태에서 1상(a상 또는 b상)에 전압을 걸어, 다른상에서 유기되는 전압의 비와 쇄교자속의 면적비를 가지고 계산한다. 그리고, 실험 회로를 구성하여, 등가 무부하시험과 구속시험을 60 Hz, V_{ds} , V_{qs} 의 정격 141 [V], V_m 의 정격 115 [v]에서 행하였다.

그림1과 그림2의 등가회로로부터 회로정수에 대한 식들이 유도되며, 이 식들에 실험치를 대입하여 정수를 계산하였다. 계산된 정수들은 표2에 나타낸다.

표2 계산된 전기적 정수
Table2 Calculated Electric Parameters.

60 Hz	
d 축	q 축
R _s = 9.2 [Ω]	
R _{d1} = 1083.8 [Ω]	R _{q1} = 1508.3 [Ω]
R _{d2} = 17.4 [Ω]	R _{q2} = 17.96 [Ω]
L _{ds} = 218.95 mH	L _{qs} = 197.59 mH
L _{d2} = 151.73 mH	L _{q2} = 133.85 mH
L _{ds} = 80.76 mH	L _{qs} = 78.81 mH
L _{d2} = 13.54 mH	L _{q2} = 15.07 mH
M _d = 138.19 mH	M _q = 118.78 mH
K _{ca} = -0.7172	K _{ab} = -0.5297

그리고, 산정된 정수의 타당성을 확인하기 위하여 계산된 정수를 이용하여 추력파형을 시뮬레이션하고, 구속 상태에서 로드셀로 추력을 측정하여, 정상상태 추력을 비교하였다. 추력에 대한 식은 식(2.8)이며, 추력파형은 그림4에 나타냈다.

$$F = \left(\frac{\tau}{\tau}\right) (M_d i'_{qs} i_d + M_q i'_{ds} i_q + (L_{qs} - L_{ds}) i_d i_q) \quad (2.8)$$

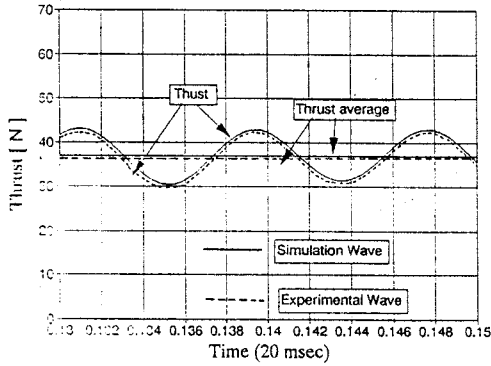


그림3 추력 특성
Fig.3 Characteristics of the thrust

시뮬레이션 추력은 중심 36.5 [N] 에서 백동함을 알 수 있으며, 실험파형도 거의 같은 크기로 백동함을 알 수 있다. 로드셀 측정치 또한, 36.5 [N]을 나타냈다. 이로써, 상비대칭성을 고려한 d-q 동기회로 정수 산정의 정확성을 확인 하였다.

3. 벡터제어 모의실험

이상에서 구한 d-q 동기회로와 기존의 원통형 유도 전동기의 벡터제어 이론을 적용한 LIM의 벡터제어 시스템구성도를 그림4에 나타내었다. 속도 제어기는 속도명령 V_r^* 를 따라 적절한 추력분 전류명령 $i_{s\alpha}^*$ 를 발생시켜 feedback 된 속도가 명령에 추종하도록 동작한다. 좌표변환 부분과 2상-3상 변환 부분으로 이루어진 벡터제어기는 3상전류 명령을 생성시켜 전류제어형 PWM 인버터의 출력전류를 제어하게 된다.

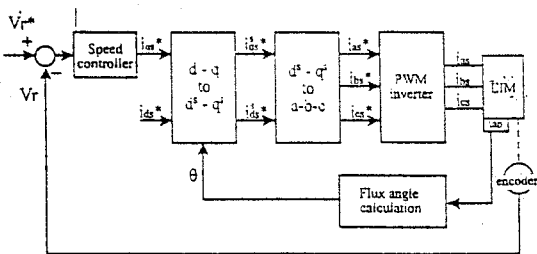


그림4. 선형 유도전동기의 벡터제어 모의실험 블럭도.
Fig.4 Simulation Block Diagram of Vector control of LIM

시뮬레이션에서는 식(2.5), (2.8) 을 Runge-Kutta방법으로 풀어 식(2.6)의 관계를 이용하여 LIM의 벡터제어 특성을 고찰하였다. 속도제어기는 일반적인 PI제어기를 이용하였고, 인버터는 히스테리시스 전류형 인버터가 사용되었다. 그림5 는 속도의 단위계단 응답으로서 가동부가 초기에 정지하고있을때 2[m/s]의 속도명령을 주고 0.8초후에 다시 0[m/s]의 속도명령을 주었을때의 속도응답을 나타낸다. 속도 명령에 따라 가동부의 속도가 빠르게 응답함을 알 수 있다.

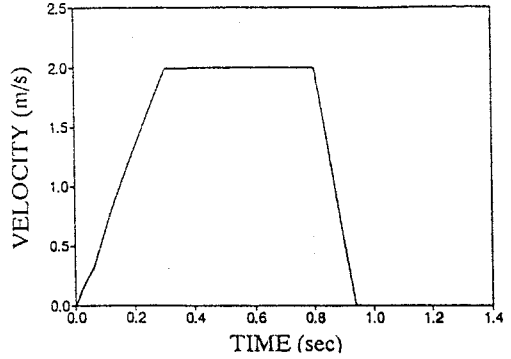


그림5 모의 실험에 의한 벡터제어의 속도특성
Fig.5 Velocity Characteristic of Vector Control Simulation.

4. 결론

선형유도전동기의 동특성 모의 실험을 위해, 정지실험기를 제작하고 무부하실험, 구속실험을 통해 비대칭 d-q동기회로를 작성하였다. 작성된 d-q동기회로의 타당성은 이에 의한 추력특성과 실험에 의한 추력특성을 비교검토하므로써, 확인하였다.

또한, 작성된 d-q동기회로에 일반적인 유도전동기의 벡터제어 기법을 적용하여 벡터제어 모의 실험을 행하여 바람직한 제어특성을 얻으므로써, 선형유도전동기의 벡터제어의 가능성을 확인하고, 간단한 벡터제어 모의 실험기법을 개발하였다.

5. 참고문헌

- [1] 杉本英彦 外, "片側式 リニア 誘導 モタの 拘束試驗 基づく 非對稱 定數 算定法", 日本 電學論 D 113卷 2號 平成 5年, pp247-255
- [2] S.Yamamura, H. Ito, "Three-dimensional analysis of Linear Induction Motors", 1975 IEEE-IAS Annual Meeting Conference Record, pp.1180-1187
- [3] K.Oberret, "Three-dimensional analysis of Linear motor taking account of edge-effects and distribution of the winding," Arc. f. Elek Vol.55 pp181-190, April 1973 (In German)
- [4] H. Mosebach, "Effect of finite length and width on short stator and short rotor linear motors", PhD Dissertation, Tech. Univ. Braunschweig, May 1972 (In German)
- [5] B.-T. Ooi, "A generalized machine theory of linear motor," IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol.PAS-92, pp 1252-1259, Jul/Aug 1973.
- [6] T.A. Lipo, T.A. Nondahl, " Pole-by-Pole d-q model of a linear induction machine" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.2 March/April 1979.