

선형유도전동기의 등가회로 구성

- LIM의 T형 등가회로 산정을 위한 구속시험 -

장석평*, 이현구*, 박영태*, 김봉섭**, 정현갑**
 충남대학교 전기공학과* 한국기계연구원**

Equivalent Circuit Composition of a Linear Induction Motor

S.M. Jang*, H.G. Lee*, Y.T. Park*, B.S. Kim**, H.G. Jeong**
 Chungnam Nat'l University* KIMM**

Abstract

The equivalent circuit of LIM is generally composed as the same that of rotary induction motor. However it is very difficult to move the LIM at synchronous velocity for open-secondary circuit test. The resistance representing the core losses in the primary core can not be ignored because the air-gap of LIM is larger than that of rotary induction motor.

In this paper, the T-type equivalent circuit of a LIM with the core loss resistance is chosen using static zero slip test and theoretical analysis.

1. 서 론

선형유도전동기(이하 LIM)의 특성해석법으로 가장 대표적인 것에는 전자장 해석법과 등가회로 해석법이 있다. 전자장 해석법은 기하학적 형상을 물리적으로 고려하기가 용이한 장점이 있고, 등가회로 해석법은 배터리와 등의 제이시스템 구성에 반드시 필요하다.

등가회로 해석법에서 회로정수를 산정하는 방법에는 Nonaka, Yoshida 등에 의하여 제안된 바와 같이 공간고조파를 고려한 전자장이론에 의한 방법과 무부하 및 구속시험을 통해 산정하는 방법이 있다. 실제 시험에 의하여 정수를 산정하는 경우 교류 1차저항과 천손지향, 1차누설리액턴스와 여자리액턴스가 각각 결합된 형태로 산출되기 때문에 그 분리방법이 회로정수의 결정에 가장 중요하다.

본 연구에서는 인버터로 구동되는 LIM에 대하여 정지시험 및 이론적인 해석을 통해 등가회로의 회로정수를 산정하는 방법을 제안한다. 즉, 2차측을 개방시키기 위해 안투미늄 리액션플레이트를 제거하는 방법으로 등가무부하시험을 하였으며 구속시험 및 이론적인 해석을 통해 회로정수를 선정하였다. LIM의 정지시험을 통해 측정된 천손에 의하여 적정분배계수를 추정할 수 있는 방법을 제시하고자 하였고 이를 토대로 하여 실험에 의하여 실제의 값에 가장 접근하는 회로정수를 선정하고자 하였다. 이를 통해 보다 정확한 LIM 등가회로를 구성하여 특성해석 및 제어에 용-용하고자 한다.

2. 등가회로의 선정

LIM은 그 구조적 특성상 공극이 매우 크므로 구속시험시에도 여자전류가 크기 때문에 회전형 유도전동기의 T형 등가회로에서처럼 천손을 무시할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 그림 1 (a)와 같은 천손을 고려한 T형 등가회로를 선정하였다. 여기서 Z_1 은 1차측 임피던스, Z_2 는 1차측에서 본 2차측 임피던스, R_m 은 천손저항, X_g 는 공극의 상호리액턴스를 의미한다.

그림 1 (a)의 등가회로는 2차측 회로정수를 산정하는데 불편하므로 그림 1 (b)와 같이 변환한다. 여기서 Z_0 는 병렬 연결된 R_m 과 X_g 를 직렬 연결된 R_0 와 X_0 로 변환한 것이다. 이들의 관계는 식 (1)과 같다.

$$R_0 = \frac{R_m X_g^2}{R_m^2 + X_g^2}, \quad X_0 = \frac{R_m^2 X_g}{R_m^2 + X_g} \quad (1)$$

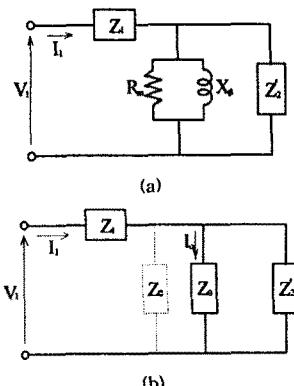


그림 1 제안한 LIM의 등가회로

3. 등가회로 구성을 위한 구속시험

시험에 앞서 1차 저항 R_{1d} 를 측정한다. 일반적으로 3상이 불평형이므로 각 상의 저류지향값은 다르다. 따라서, 3상 각각에 대하여 측정된 저항의 평균치를 사용한다.

3.1 등가회로하시험

동가회로의 2차측을 개방하여 1차측 전선의 교류저항, 누설리에던스, 병렬철손저항 및 상호리에던스를 결정하기 위한 시험이다. LIM의 무부하슬립은 회전기에 비해 매우 높기 때문에 고전적인 무부하시험은 적용될 수가 없다. LIM이 동기속도로 움직인 경우 1차측에서 발생하는 이동자계와 실제 운전되는 속도가 같으므로 상대속도가 영이 된다. 따라서, 리액션플레이트 상에 완전류가 생기지 않고 추력 또한 발생되지 않으므로 등가회로의 2차측이 개방된 것과 같은 효과를 나타낸다.

LIM을 동기속도로 운전하는 무부하시험에는

- 1) 가변주파수 전원으로 구동되는 보조모터에 의하여 시험하고자 하는 LIM을 $s=0$ 인 동기속도까지 구동시킨 상태에서 시험을 한다.
- 2) 2차측 알미늄 리액션플레이트를 제거하고 공극, 첫수가 동일한 back iron만 놓으면 2차측에 완전류가 없으므로 추력의 발생이 없어 동기속도로 운전되고 있는 경우와 같은 조건의 상태가 된다.

위 두 가지 방법 중 첫 번째 보조모터를 이용하는 시험은 정확도는 높으나 시험용 LIM에서 요구하는 2차측 선로가 필수적이므로 제작, 비용면에서 어렵다. 두 번째 알미늄 리액션플레이트를 제거하는 방법은 LIM을 정지상태에서 시험하기 때문에 용이한 시험법이므로 본 연구에서는 이 방법을 사용하였다. 이 때 Back Iron에 완전류가 발생되어 적으나마 추력이 발생한다. 이 추력은 2차측 Back Iron에서 발생하므로 2차 동손으로 환산하여 등가철손 산정에 고려하였다.

그림 2는 정지시험시 LIM에 입력되는 전력을 계측하기 위한 결선도이다. 3상에서 소모되는 입력전력 P_{1o} , 상전압 V_1 , 상전류 I_{1o} 그리고 주파수 f 를 측정한다. 이 때 3상이 불평형이므로 전압, 전류는 3상 모두에 대하여 측정하여만 하며 각각의 평균치를 사용한다.

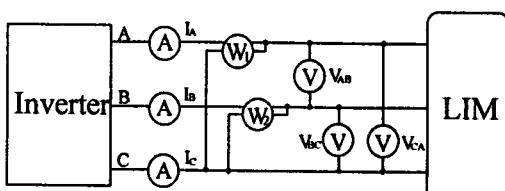


그림 2 LIM의 입력전력 계측을 위한 결선도

3.2 구속시험

알미늄 리액션플레이트와 back iron으로 구성되는 2차측과 1차측으로 정지시험장치를 구성한다. 1차측과 2차측 모두를 구속한 상태에서 등가무부하시험과 마찬가지로 3상에서 휴수되는 입력전력 P_{1sh} , 선간전압 V_1 , 상전류 I_{1sh} 를 측정한다. 여기서 침자 'sh'는 LIM의 구속시험이 단파회로 시험에 상당하므로 'short circuit'을 의미한다.

이상의 정지시험장치에 대한 구성도는 그림 3과 같다. 로드센을 사용하여 추력을 측정하였으며, 전기량 계측에는 PM3000이란 전력계를 사용하였다. 또한, 2차측 리액션플레이트 및 1차권선에서 많은 열이 발생하므로 같은 온도 하에서 실험이 이루어져야 한다.

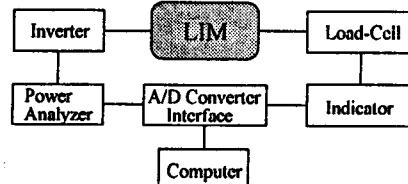


그림 3 LIM의 정지시험장치 구성도

4. 등가회로 파라미터의 결정

4.1 2차측 개방시험

그림 1 (b)의 등가회로에서 2차측이 개방되면

$$R_1 + R_o = \frac{V_1}{I_{1o}} \cos \phi_o \quad (2)$$

여기서 $\cos \phi_o = \frac{P_{1o}}{3V_1 I_{1o}}$

$$X_1 + X_o = \frac{V_1}{I_{1o}} \sqrt{1 - \cos^2 \phi_o} \quad (3)$$

이다.

등가무부하시험시 발생되는 약간의 추력과 동기속도와의 관계로 부터 2차 입력을 구하면 다음 식 (4)와 같다.

$$P_{12} = T_L \cdot v_s \quad (4)$$

1차측 철손은

$$P_{1Fe} = k(P_{1o} - 3I_{1o}^2 R_{1dc} - P_{12}) \quad (5)$$

여기서 k 는 설계된 LIM에 따른 계수이다.

철손전류를 I_{1Fe} 라 하면 1차측 철손으로 나타나는 저빙먼 지향온은

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{1Fe}}{m_1 I_{1Fe}^2}, \quad R_o = \frac{\Delta P_{1Fe}}{m_1 I_{1o}^2} \quad (6)$$

그림 4의 베타선도에서 알 수 있듯이 철손전류 I_{1Fe} 의 위상을 알 수 없으므로 식 (6)에서 R_o 만을 구할 수 있다.

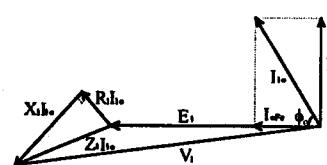


그림 4 무부하 시험의 베타선도

1차측의 교류저항은

$$R_1 = \frac{V_1}{I_{1o}} \cos \phi_o - R_o \quad (7)$$

표 1에 나타낸 설계변수에 따라 공극의 상호리에던스는 다음 식에 의해 구한다.

$$X_g = 4\pi\mu_0 f \frac{(N_1 k_m)^2}{xp} \frac{W_{primary}}{gk_c} \quad (8)$$

여기서 k_c 는 공극에 대한 Carter 계수이며 개방슬롯에 대해 다음과 식 (9)와 같다.

$$k_c = \frac{r_t(5g + w_s)}{r_t(5g + w_s) - w_s^2} \quad (9)$$

식 (6)에서 구한 R_o 와 공극의 상호리에던스 X_g 를 이용하여

철손지향 R_{Fe} 를 구하면

$$R_{Fe} = \frac{X_g^2 + X_g \sqrt{X_g^2 - 4R_o}}{2R_o} \quad (10)$$

철손지향 R_{Fe} 와 공극의 상호 리액턴스 X_g 를 식 (1)에 대입하여 X_o 를 구할 수 있으며 1차축 누선리액턴스는 다음 식에 의하여 구한다.

$$X_1 = \frac{V_1}{I_o} \sqrt{1 - \cos \phi_o} - \frac{R_{Fe}^2 X_g}{R_{Fe}^2 + X_g^2} \quad (11)$$

단부효과 임피던스 Z_o 는 정지시 무한대로 생략한다.

표 1 LIM의 설계변수

기호	설계변수	기호	설계변수
p	극 수	w_t	슬롯폭
g	공극	r_t	치간격
r	극간격	N_1	매상당 권선수
k_w	권선계수	$W_{primary}$	1차침식폭

4.2 2차축 구속시험

저항 R_1 , R_{Fe} 와 리액턴스 X_1 , X_g 가 결정되면 2차축 저항 $R_2(s=1)$ 과 리액턴스 $X_2(s=1)$ 를 구속시험에 의하여 결정할 수 있다.

s=1일 때 역률은

$$\cos \phi_{sh} = \frac{P_{1sh}}{3V_1 I_{1sh}} \quad (12)$$

공극이 크기 때문에 등가회로의 이자전류 I_o 가 회전형 유도전동기에 비해 매우 커서 무시할 수 없다. 그러므로 2차축과의 합성 저항과 리액턴스를 구하면

$$R_t = \frac{V_1}{I_{1sh}} \cos \phi_{sh} - R_1 \quad (13)$$

$$X_t = \frac{V_1}{I_{1sh}} \sqrt{1 - \cos^2 \phi_{sh}} - X_1 \quad (14)$$

여기서 $R_t = Re[Z_t]$, $X_t = Im[Z_t]$ 이며 Z_t 는 다음과 같다.

$$Z_t = \frac{Z_o Z_2}{Z_o + Z_2} \quad (15)$$

식 (15)에서 구속 시의 2차축 저항과 리액턴스를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_2(s=1) &= Re[Z_2(s=1)] \\ &= \frac{(R_1 R_o - X_1 X_o)(R_o - R_1) + (X_1 R_o + R_1 X_o)(X_o - X_1)}{(R_o - R_1)^2 + (X_o - X_1)^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} X_2(s=1) &= Im[Z_2(s=1)] \\ &= \frac{(X_1 R_o + R_1 X_o)(R_o - R_1) - (R_1 R_o - X_1 X_o)(X_o - X_1)}{(R_o - R_1)^2 + (X_o - X_1)^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{여기서 } Z_2(s=1) = \frac{Z_o Z_t}{Z_o - Z_t}$$

위에서 구한 등가회로의 회로정수를 이용하여 기동출력을 구하면

$$F_s = \frac{3}{\nu_s} (I_2)'^2 R_2 \quad (s=1) \quad (18)$$

$$\text{여기서 } I_2' = \frac{E_1}{\sqrt{[R_2(s=1)]^2 + [X_2(s=1)]^2}}$$

$$E_1 = \frac{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}}{\sqrt{(R_1 + R_o)^2 + (X_1 + X_o)^2}} V_1$$

5. 결 과

본 연구에서는 1차 권선지향 측정, 구속시험, 등가무부하시험 등의 실험과 이론적 해석결과를 바탕으로 한 LIM 등가회로 산정법을 제안하였다. LIM은 공극이 매우 크며 구속시험시의 정격 전압에 가까우므로 철손 및 이자전류의 영향을 무시할 수 없다. 따라서, 실험과 해석을 통하여 이를 간안한 T형 등가회로를 산정하였다.

보다 정확한 등가회로 구성을 위해서는 단부효과에 대한 고려가 이루어져야만 하며 대부분의 LIM이 인버터에 의해 구동되기 때문에 고조파가 함유된 입력 전원에 대한 등가회로를 구성하여 고조파 손실에 대한 연구도 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. I. Boldea, S. A. Narsar, "Linear motion electromagnetic systems", John Wiley & Sons, 1985
2. J. F. Gieras, G. E. Dawson and A. R. Eastham, "A new longitudinal end effect factor for Linear Induction Motors", IEEE Trans. Vol. EC-2, No. 1, March, 1986
3. 物名英利 外3人 "片側式 LIM의 T形 等價回路 特性算定法", 電氣學會研究會資料 LD-91-43, pp.11-19, 1991
4. 水野孝行 外3人 "LIM 拘束試験時의 始動特性算定法", 日本電氣學會論文誌, vol.112-D, No.3, pp.172-180, 1992
5. Jacek F. Gieras, "Linear Induction Drives", CLARENDON PRESS · OXFORD, 1994