

인버터로 운전되는 유도형 리니어 모터의 등가회로 구성

장석명*, 이성호*, 정상섭*
*충남대학교 전기공학과

박영태**
**한국표준과학연구원

Composition of Equivalent Circuit of Linear Induction Motors Driven by Inverter

Seok-Myeong Jang*, Sung-ho Lee*, Sang-sub Jeong* Young-Tae Park**
*Chungnam Nat'l Univ. **KRISS

Abstract -The input voltage of linear induction motors(LIMs) driven by inverter, involves the time harmonics. Therefore the equivalent circuit for an inverter-fed LIMs has to be modified to represent every harmonic in supply voltage.

In this paper, the equivalent circuit with considering harmonics is composed. Each parameters of the equivalent circuit obtained by static test are presented. The characteristics of LIM is reviewed by composed equivalent.

1. 서 론

유도형 리니어 모터의 구동에 사용되는 인버터는 시간고조파가 함유된 출력전압을 발생시킨다. 그런데 일반적으로 정현파 입력전압에 대한 등가회로를 구성하여 회로정수를 구하기 때문에 실제 현상과는 크게 달라지게 된다. 본 논문은 인버터로 구동되는 LIM에 대하여 정지시험을 통해 등가회로의 회로정수를 결정하였다. 등가회로정수는 다음과 같은 두 가지 시험을 통해 산정된다.

- 1) 보조모터를 사용하여 2차측을 동기속도로 운전하여 2차측 입력이 없는 무부하시험.
- 2) 2차측을 고정시킨 구속시험.

이를 기본으로 시간고조파가 함유된 입력전압의 영향을 고려하기 위하여 각각의 시간고조파에 대한 등가회로를 구성하게 되고, LIM의 특성 및 손실을 해석하게 된다. 이로써 LIM 특성의 해석은 물론 설계, 제어에 필요한 자료를 얻고자 한다.

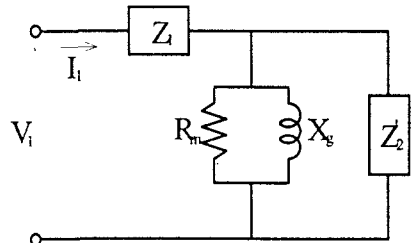
2. 인버터로 운전되는 LIM의 등가회로정수 결정을 위한 등가회로선정 및 정지시험

2.1 등가회로의 선정

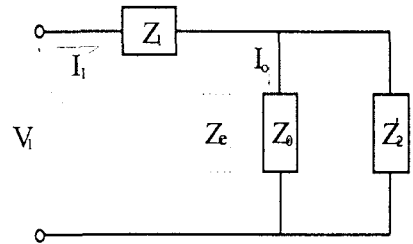
LIM은 그 구조적 특성상 공극이 매우 크므로 구속시험시에도 여자전류가 크기 때문에 회전형 유도전동기의 T형 등가회로에서 처럼 철손을 무시할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 그림 1 (a)와 같은 철손을 고려한 T형 등가회로를 선정하였다. 여기서 Z_1 은 1차측 임피던스, Z_2 는 1차측에서 본 2차측 임피던스, R_m 은 철손저항, X_g 는 공극의 상호리액턴스를 의미한다.

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.

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



(a)



(b)

그림. 1 선정된 LIM의 등가회로

2.2 계측 구성도

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

그림. 2은 인버터에서 LIM에 공급되는 3상 입력전력을 계측하기 위한 결선도를 나타내었다. 3상이 불평형하여 각각의 상에 대하여 전압, 전류, 전력, 역률등을 측정하여 그 평균치를 구하였다.

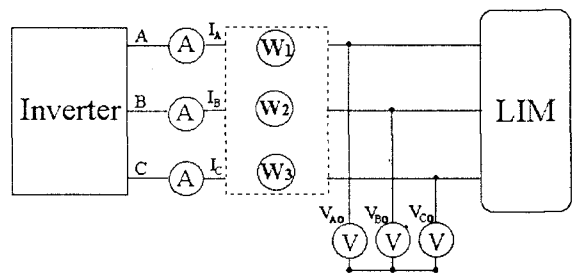


그림. 2 계측 구성도

2.3 무부하시험

등가회로의 2차측을 개방하여 1차측 권선의 교류저항, 누설리액턴스, 병렬철손저항 및 상호리액턴스를 결정하기 위한 시험이다. LIM의 무부하슬립은 회전기에 비해

매우 높기 때문에 고전적인 무부하시험은 적용될 수가 없다. LIM이 동기속도로 움직일 경우 1차측에서 발생하는 이동자계와 실제 운전되는 속도가 같으므로 상대속도가 영이 된다. 따라서, 리액션플레이트 상에 와전류가 생기지 않고 추력 또한 발생되지 않으므로 등가회로의 2차측이 개방된 것과 같은 효과를 나타낸다. 본 논문에서는 보조모터에 의하여 시험하고자 하는 LIM을 $s=0$ 인 동기속도까지 구동시킨 상태에서 시험을 수행하였다. 3상에서 소모되는 입력전력 P_{1o} , 상전압 V_{1o} , 상전류 I_{1o} 그리고 주파수 f 를 측정한다. 식 (2), (3), (5), (6)로부터 등가회로정수를 산정할 수 있다.

1차측의 교류저항은

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

표1에 나타낸 설계변수에 따라 공극의 상호리액턴스는 다음 식에 의해서 구한다.

$$X_g = 4m\mu_o f \frac{(N_1 k_w)^2}{\pi b} \frac{W_{primary} \tau}{g k_c} \quad (3)$$

여기서 k_c 는 공극에 대한 Carter 계수이며 개방슬롯에 대해 다음 식 (4)와 같다.

$$k_c = \frac{\tau(5g + w_s)}{\tau(5g + w_s) - w_s^2} \quad (4)$$

식 (1)의 R_o 와 공극의 상호 리액턴스 X_g 를 이용하여 철손저항 R_{Fe} 를 구하면

$$R_{Fe} = \frac{X_g^2 + X_g \sqrt{X_g^2 - 4R_o}}{2R_o} \quad (5)$$

철손저항 R_{Fe} 와 공극의 상호 리액턴스 X_g 를 식 (1)에 대입하여 X_o 를 구할 수 있으며 1차측 누설리액턴스는 다음 식 (6)에 의하여 구한다.

$$X_1 = \frac{V_1}{I_{1o}} \sqrt{1 - \cos \phi_o} - \frac{R_{Fe} X_g}{R_{Fe}^2 + X_g^2} \quad (6)$$

단부효과 임피던스 Z_e 는 정지시 무한대이므로 생략한다.

2.4 구속시험

알루미늄 리액션플레이트와 back iron으로 구성되는 2차측과 1차측으로 정지시험장치를 구성한다. 1차측과 2차측 모두를 구속한 상태에서 등가무부하시험과 마찬가지로 3상에서 흡수되는 입력전력 P_{1sh} , 상전압 V_1 , 상전류 I_{1sh} 를 측정한다. 1차권선에서 많은 열이 발생하므로 같은 온도하에서 실험이 이루어져야 한다.

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

$s=1$ 일 때 역률은

$$\cos \phi_{sh} = \frac{P_{1sh}}{3V_1 I_{1sh}} \quad (7)$$

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

$$R_t = \frac{V_1}{I_{1sh}} \cos \phi_{sh} - R_1 \quad (8)$$

$$X_t = \frac{V_1}{I_{1sh}} \sqrt{1 - \cos^2 \phi_{sh}} - X_1 \quad (9)$$

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

$$Z_t = \frac{Z_o Z_2'}{Z_o + Z_2'} \quad (10)$$

식 (10)에서 구속 시의 2차측 저항과 리액턴스를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_2'(s=1) &= \text{Re}[Z_2'(s=1)] \\ &= \frac{(R_t R_o - X_t X_o)(R_o - R_t) + (X_t R_o + R_t X_o)(X_o - X_t)}{(R_o - R_t)^2 + (X_o - X_t)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} X_2'(s=1) &= \text{Im}[Z_2'(s=1)] \\ &= \frac{(X_t R_o + R_t X_o)(R_o - R_t) - (R_t R_o - X_t X_o)(X_o - X_t)}{(R_o - R_t)^2 + (X_o - X_t)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

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

위에서 구한 등가회로의 회로정수를 이용하여 기동추력을 구하면

$$F_{st} = \frac{3}{\nu_s} (I_2')^2 R_2'(s=1) \quad (13)$$

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

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

시험에 사용된 LIM의 사양은 표1과 같다. 2차측 코어는 개방슬롯이고 2층권이다.

표1. 시험용 LIM의 사양

극 수		1 차 측	
극 수	6	극 간 격	65 [mm]
상 수	3	슬롯 폭	11.5[mm]
상극당슬롯수	1	치 간 격	22 [mm]
공 극	5 [mm]	1차철심폭	92 [mm]
2 차 측		매상당권선수	530
Al판 두께	4.5 [mm]	권선계수	0.9
Back Iron 두께	10.5[mm]	단 절 륜	2/3
2 차 폭	150[mm]		

2.5 n 차 시간고조파에 대한 LIM의 등가회로

시간고조파가 함유된 비정현파 전압이 공급될 경우 등가회로는 공급전압에 나타나는 각각의 고조파 차수에 대하여 구성되어야만 한다. 각각의 고조파 차수에 대하여 그림. 3의 등가회로와 같은 개별적인 등가회로를 구성한다. 여기서 $Z_{1n} = R_{1n} + jX_{1n}$ 은 1차측 권선 임피던스, Z_{0n} 은 철손저항 R_{Fen} 과 상호인덕턴스 X_{gn} 을 직렬연결한 임피던스 그리고 $Z_{2n} = R_{2n}(s_n)/s_n + jX_{2n}/s_n$ 은 2차측 임피던스이다. 단부효과 임피던스 Z_e 는 기본파 고조파에 대해서만 계산되어지며 $n > 1$ 인 고차시간고조파에 대해서는 등가회로에서 무시된다. 고조파에 의해 등가회로의 회로정수는 주파수가 증가함

에 따라 표피효과의 영향으로 등가회로 저항과 리액턴스가 변화한다. 리액턴스를 변화시키는 다른 요인은 부하 전류에 의한 포화이다. 고조파 전류는 누설자속을 증가시키며 상호리액턴스 X_{gn} 과 누설리액턴스 X_{1n} , X_{2n} 에 영향을 미친다.

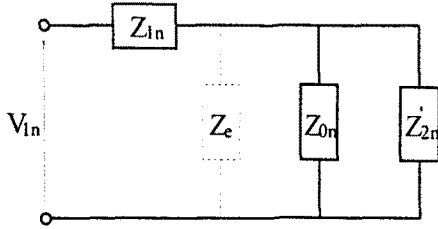


그림. 3. n 차 시간고조파에 대한 LIM의 등가회로

3. 산정된 등가회로정수와 등가회로에 의한 특성 해석 실험에 사용된 LIM의 1상에 대한 직류저항값은 2.65 [Ω]이다.

표2는 LIM에 인버터 출력주파수가 60(Hz)인 입력전원이 인가될 경우 기본파성분의 실효치에 대하여 전자장해석과 정지시험을 통해 구한 등가회로의 회로정수를 나타낸 것이다.

표2. 등가회로의 회로정수

회로정수	산정치
1차측 권선저항 R_1	2.95
1차측 누설리액턴스 X_1	8.11
상호 리액턴스 X_g	10.43

산정된 등가회로정수로 부터 전압에 대한 기동시의 추력 특성을 그림. 4에 나타내었다. 전자장해석을 통한 추력의 계산치와 등가회로법에 의한 추력의 계산치 사이에 차이가 발생함을 알 수 있다.

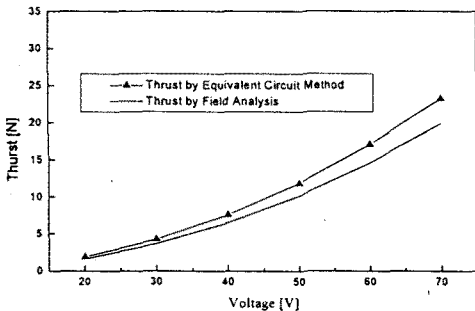


그림. 4. 기동시 전압과 추력특성

그림. 5는 정현적인 상용 입력전원이 LIM에 입력되는 경우와 시간고조파를 함유하는 인버터 전원이 인가되었을 경우 각각에 대한 추력의 특성을 나타낸다. LIM의 슬립이 0인 상태에서 인버터의 출력단 전압의 전고조파 왜형률(THD)은 28%였으며, 이에 따라 기본파 성분이 감소하였다. 그러므로 추력은 상용전원인 경우보다 시간고조파를 함유하는 인버터 전원에서, 상용전원과 실효치는 같아질지라도 감소하게 된다.

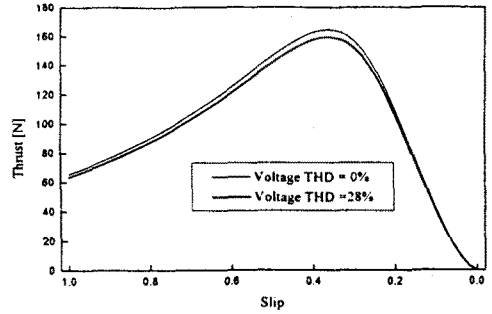


그림. 5. 정현파와 고조파 함유 입력에 대한 추력특성

4. 결 론

본 논문은 1차 권선저항 측정, 정지시험(구속시험, 등가 무부하시험)과 이론적 해석결과를 바탕으로 한 LIM 등가회로정수를 산정하였다. LIM은 공극이 크며 구속시험시에 입력전압이 정격전압에 가까우므로 철손 및 여자전류의 영향을 무시할 수 없다. 따라서, 실험과 이론적 해석을 통하여 이를 감안한 T형 등가회로를 선정하였다. 전압에 대한 기동시, 전자장해석을 통한 추력과 등가회로법에 의한 추력의 계산치를 서로 비교하였다.

대부분의 LIM은 인버터로 구동되기 때문에 입력전원은 시간고조파를 함유하게 된다. 따라서 시간고조파가 함유된 입력 전원에 대하여 각각의 n 차 고조파에 대한 등가회로를 구성하여 특성을 해석하여야 한다. 고조파와의 함유는 전압, 전류사이의 위상각차에 의한 역률에 파형의 왜형에 따른 역률을 가미시켜 총역률의 감소를 초래한다. 총역률의 감소는 기본파성분의 감소를 의미하며, LIM의 추력은 정현적인 상용전원과 비교하여 실효치가 같을지라도 감소하게 된다.

본 논문에서 구성된 시간고조파를 고려한 LIM의 등가회로를 통해, 보다 정확한 특성해석을 할 수 있으며, 이를 통해 얻어진 결과를 토대로 설계는 물론 벡터제어 등의 제어시스템 구성에 산정된 등가회로정수를 적용할 수 있다.

본 연구는 한국과학재단 핵심연구과제 971-0910-060-2로 지원되어 수행된 연구결과의 일부입니다.

(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 T형 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 拘束試驗時の 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