

유도형 리니어모터의 동특성 해석

장석명\*, 장건우\*, 이성호\*, 정삼섭\*, 박영태\*\*, 김봉섭\*\*\*  
 충남대학교 전기공학과\* 한국표준과학원\*\* 한국기계연구원\*\*\*

Dynamic Characteristics Analysis of Linear Induction Motor

S. M. Jang\*, K. W. Chang\*, S. H. Lee\*, Y. T. Park\*\*, B.S.Kim\*\*\*  
 Chungnam National Univ.\* KRISS\*\* KIMM\*\*\*

**Abstract** - This paper treats the dynamic analysis and test results of Linear Induction Motor. The dynamic analysis is performed by the d,q axis equivalent-circuit model. Equivalent-circuit parameters are obtained with no-load, lock test and field analysis. As a results, simulation results are compared with that of dynamic test.

$$\begin{aligned}
 T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} [\omega(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) \\
 &\quad + (\omega - \omega_r)(\lambda_{dr}'i_{qr}' - \lambda_{qr}'i_{dr}')] \\
 &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{qr}'i_{dr}' - \lambda_{dr}'i_{qr}') \\
 &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{dm}i_{qs} - \lambda_{qm}i_{ds})
 \end{aligned} \tag{2}$$

1. 서 론

유도형 리니어모터(Linear Induction Motors : 이하 LIM)의 특성해석법은 크게 전자장 해석법과 등가회로 해석법을 들 수 있다. 이 중 등가회로 해석법은 전자장 해석이나 등가회로 시험으로부터 회로정수를 산정하여 이를 토대로, 등가회로를 구성하여 LIM의 성능을 예측하는 방법이다.

한 상에 대한 등가회로를 토대로 d축과 q축의 등가회로를 재구성하여 과도상태 해석 및 벡터제어를 위한 제어시스템 구성에 활용할 수 있다.

그러므로 LIM 동특성 해석에 회전형 유도기의 d,q축 등가회로 모델을 적용할 수 있다. 그런데 회전형 유도기와 달리 LIM은 길이방향 단부효과와 횡방향 모서리효과에 의해 공극자속이 불균일하게 분포함으로, 이에 대한 적절한 보정이 필요하다. 이는 산정된 회로정수 또는 계산된 추력에 단부효과를 고려한 보정을 취하여 회전형 유도기와는 구별되는 d,q 모델링 및 해석을 하여야 함을 의미한다.

본 논문은 등가회로 시험법 즉, 무부하 시험 및 구속시험을 통해 회로정수  $R_1, X_1, R_2, X_2$ 를 구하고, 전자장 해석을 혼합, 적용하여  $X_m$ 를 산정하여, 이를 토대로 한 d,q축 등가회로를 구성하였다. 이로부터 상용전원과 인버터 전원 각각에 대한 LIM 성능에 관한 동특성을 해석을 하고, 동특성 시험을 통해 구한 시험치와 비교, 검토하였다.

2. d,q 모델링

2.1 회전형 유도기 d,q 모델링

그림 1은 3상 유도전동기의 dq0 등가회로이다. 이로부터 식 (1)과 같은 전압방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 v_{qs} &= p\lambda_{qs} + i_{qs}r_s \\
 v_{ds} &= p\lambda_{ds} + i_{ds}r_s \\
 v_{os} &= p\lambda_{os} + i_{os}r_s \\
 v_{qr}' &= p\lambda_{qr}' - \omega_r\lambda_{dr}' + i_{qr}'r_r' \\
 v_{dr}' &= p\lambda_{dr}' + \omega_r\lambda_{qr}' + i_{dr}'r_r' \\
 v_{or}' &= p\lambda_{or}' + i_{or}'r_r'
 \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)로부터 회전형 유도기의 전자기적 토크는 식 (2)로 표현된다.

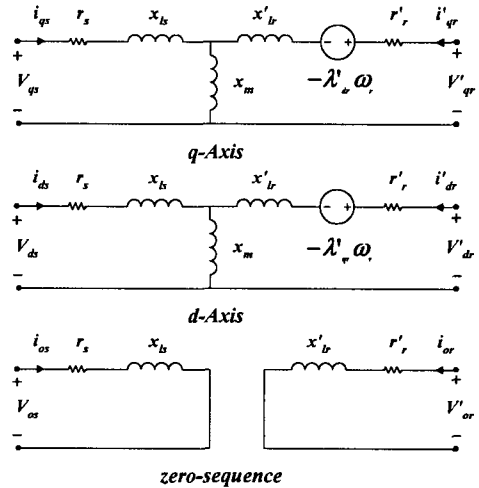


그림 1 3상 유도전동기의 q,d,0 등가회로

또한, 동특성 방정식은 식 (3)과 같다.

$$J \frac{d\omega_{rm}}{dt} = T_{em} - T_{mech} \tag{3}$$

여기서, J는 회전자의 관성모멘트이고  $\omega_{rm}$ 는 회전자의 각속도,  $T_{em}$ 은 전자기적인 토크이고  $T_{mech}$ 는 회전자속도 방향의 외부 역학적 토크를 나타낸다[1][2].

2.2 LIM d,q 모델링

회전형 유도기의 d,q 등가회로를 적용하여 LIM d,q 등가회로를 구성할 경우에, LIM은 직선운동을 함으로 회전운동의 각속도를 식 (4)에 의해 속도로 변환하여야 한다.

$$\omega_b = \frac{\pi}{\tau} v_b \tag{4}$$

식 (4)를 식 (2)에 대입하여 식 (5)와 같은 LIM 추력 특성식을 산출할 수 있다.

$$F_{em} = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} (\lambda_{dm}^s i_{qs}^s - \lambda_{qm}^s i_{ds}^s) \tag{5}$$

회전기의 동특성 방정식인 식 (3)에서와 같이 직선운동을 하는 LIM에 대한 동특성 방정식은 식 (6)과 같다.

$$M \frac{dv_{rm}}{dt} = F_{em} - F_{mech} \quad (6)$$

여기서,  $M$ 은 추진체의 질량이며,  $v_{rm}$ 는 추진체의 속도,  $F_{em}$ 은 전자기적 추력,  $F_{mech}$ 는 역학적인 힘에 해당한다[3].

또한 동특성 해석시, 역률과 효율은 식 (7)과 식 (8)에 의해 각각 구할 수 있다.

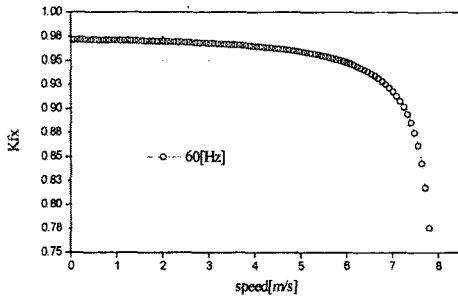
$$pf = \cos \theta = \frac{P_1 + P_2}{\sqrt{P_1^2 + P_2^2 - 2P_1P_2}} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{F_x v}{P_1 + P_2} \quad (8)$$

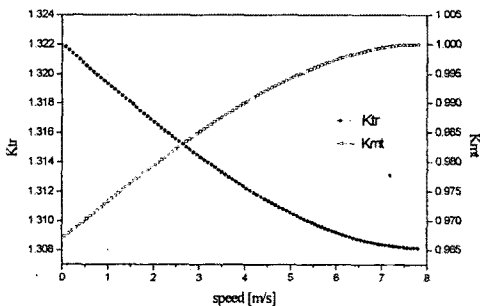
여기서,  $P_1, P_2$ 는 2전력계법에 의한 입력되는 2상에 대한 전력값이다.

### 2.3 보정된 d,q 모델링

LIM은 회전기와 달리 길이방향 단부효과와 횡방향 모서리 효과에 의하여 공극자속이 불균일하게 분포하므로, 전자장해석을 적용하여 불균일한 공극자속 분포에 따른 추력감소를 보정하였다.  $K_{fx}$ 는 길이방향 단부효과를 고려하기 위한 보정계수이며,  $K_{mt}, K_{tr}$ 는 횡방향 모서리효과를 고려하기 위한 보정계수이다[4]. 그림 2는 LIM 속도에 따른 각 보정계수값의 변화를 나타낸다.  $K_{mt}, K_{tr}$ 는 상호리액턴스  $X_m$ 과 2차측 저항  $R_2$ 를 각각 보정하는 계수이며,  $K_{fx}$ 는 식 (5)에 의해 계산되는 추력을 직접 보정하여 길이방향 단부효과가 고려되도록 하였다.



(a) 길이방향 단부효과 보정계수



(b) 횡방향 모서리효과 보정계수  
그림 2 속도에 따른 보정계수값의 변화

### 3. 동특성 시험

그림3은 동특성 시험을 위한 측정시스템으로서 역학적인 추력  $F=Ma$ 를 구하여 전자기적인 추력과 비교한

다. 여기서 LIM의 추력과 wheel의 회전력이 평형을 이루므로 질량  $M$ 은 wheel의 등가질량으로 구할 수 있다. 가속도  $a[m/s^2]$ 는 encoder의 입력값으로 얻어진 속도로부터 계산된다. 그리고 역률은 PM3300을 통해 측정하였으며 효율의 측정은 CT와 PT를 이용하여 전압과 전류를 측정하여 식(8)에서와 같이 시스템에서 측정된 추력과 속력을 이용하여 구하였다.

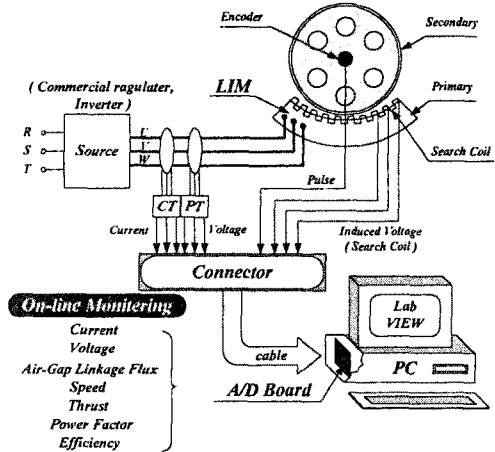


그림 3 동특성 측정 시스템

### 4. 동특성 해석 및 시험 결과

그림 4는 동특성 해석을 위한 시뮬레이션의 블럭선도를 나타낸 것이다. 입력부에서는 상용전원과 인버터 전원을 모델링하여 각각 특성을 시뮬레이션하였다.

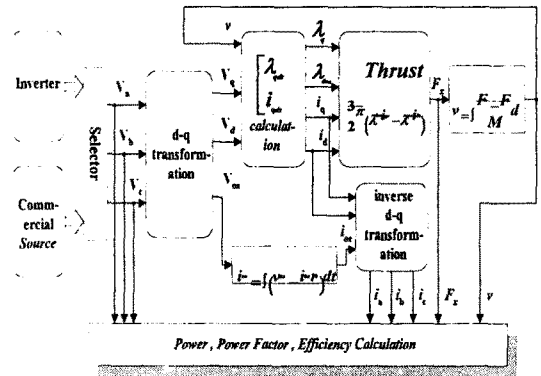
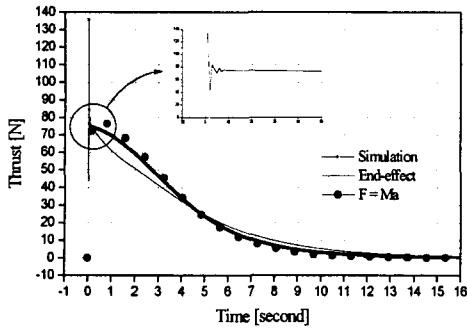


그림 4 동특성 해석 시뮬레이션 블럭선도

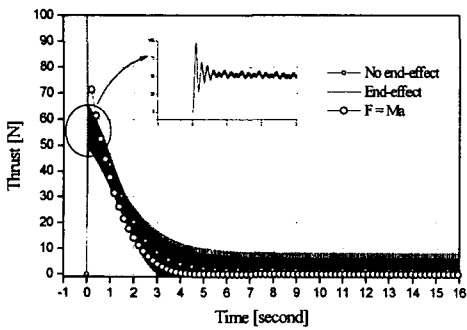
모델링한 전압을 d,q 변환을 통해서 식(1)의 자속과 전류의 관계와 관련된 속도로부터 식(5)의 추력관계식을 계산하였다.

그림 5는 단부효과를 고려한 특성의 시뮬레이션을 한 것이다.  $F=Ma$ 에 의한 측정치를 상용전원과 인버터전원에서 각각 나타낸 것이다.

상용전원에서 시뮬레이션의 시험결과, 단부효과는 LIM의 속력이 7.5m/s정도의 저속을 나타내므로 큰 영향을 보이지 않았다. 무부하 상태에서 실험치와 비교할 때 시뮬레이션결과가 거의 비슷한 것을 알 수 있었다. 그리고 시뮬레이션에서는 그림 5에서 확대한 부분에서와 같이 과도상태를 나타내었다.



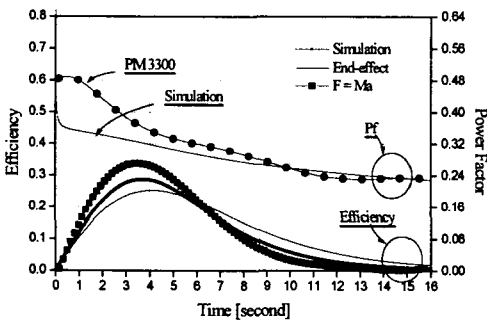
(a) 상용전원



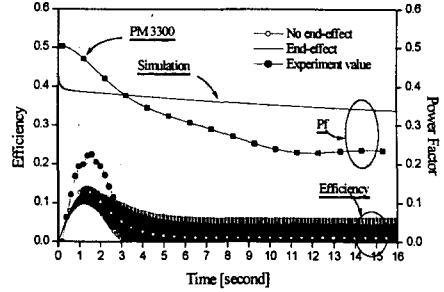
(b) 인버터 전원

그림 5 추력의 시뮬레이션과 측정결과 비교

그리고 전력과 역률, 효율은 그림 4의 d,q 전류를 이용하여 d,q 역변환을 통해 얻어진 3상의 전류로부터 전력을 구해서 식 (7),(8)에서와 같이 계산해 구하였다. 그림 6는 입력전원으로 각각 인버터와 상용전원을 사용했을 때 역률과 효율을 나타내었다. 상용전원에서는 추력이 정상상태에 도달하는 시간이 지연되므로 효율과 역률 역시 지연되어 나타나고 수치적으로만 볼 때 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 단부효과를 고려한 경우에는 단부효과를 고려하지 않은 경우보다 효율이 더 낮은 것을 알 수 있다.



(a) 상용전원



(b) 인버터 전원

그림 6 효율과 역률의 시뮬레이션과 측정결과 비교

인버터 전원에서는 정상상태에 도달할 수록 고조파를 많이 포함 하는 것을 알 수 있다. 정상상태에서 전력이 줄어드는 비율에 비해 추력이 '0'이 되지 않고 고조파를 함유한 상태로 지속되기 때문에 진폭이 증가하는 경향을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 d,q 변환 공식을 이용한 LIM의 동특성 해석과 시험결과를 비교해 보았다. 실험치에서  $F=Ma$  를 기준으로 한 추력은 시뮬레이션과 비교한 결과, 거의 같은 값을 나타낸다는 것을 알 수 있었다.

단부효과를 고려한 시뮬레이션을 통해 추력과 효율에 미치는 영향을 살펴보았다. 고려된 단부효과는 저속의 LIM을 사용하였기 때문에 시뮬레이션 결과에서 큰 차이를 보이지는 않았지만, 추후 고속의 선형유도기에 대한 시뮬레이션에 적용할 토대를 마련하였다.

## (참 고 문 헌)

- [1] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery", Prentice Hall PTR, 1998
- [2] D. W. Novotny and T. A. Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", CLARENDON PRESS · OXF 1996
- [3] I. Boldea and Syed A.Nasar, "Linear Electric Actuators and Generators", Cambridge University Press, 1997
- [4] R. M. PAI, ION BOLDEA, S. A. Narsar, "A Complete Equivalent Circuit of a Linear Induction Motor with Sheet Secondary", Transaction on magnetics, VOL. 24, NO. 1, pp. 639-654, Jan.1988