

## 직선형 유도전동기의 동특성 시뮬레이션을 통한 저크의 특성 해석

장 석명\*, 유 대준\*, 한 형석\*\*  
충남대학교\*, 기계연구원\*\*

## jerk characteristics through dynamic simulation of Linear induction motors

Seok- Myeong Jang\*, Dae-Joon You\*, and Hyung-Suk Han\*\*  
Chungnam National University\*, Korea Institute of Machinery & Materials\*\*

**Abstract** - Generally, the dynamic parameters by dynamic simulation are calculated from an equivalent circuit parameters in design process. By performing dynamics of motors, it can be achieved design considering control pattern. In this paper, dynamic characteristics of LIM (Linear Induction Motors) is discussed using the new method of equivalent circuit parameters by field analysis. And the system response of VVVF(Variable Voltage Variable frequency) are presented for jerk characteristics represented as acceleration and deceleration by steep trust ripple.

## 1. 서 론

구조가 단순하고, 유지보수가 용이한 직선형 유도전동기는 동력 변환 장치 없이 추진력을 직접 얻을 수 있으므로 직선 운동이 필요한 공장자동화 서보 시스템 및 반송 시스템에서 그 용도가 점차 증가되고 있으며, 동특성의 해석이 강조되고 있다[1]. 이러한 직선형 유도전동기의 동특성 해석을 위해서는 정확한 등가회로 정수를 계산하는 것이 중요하지만, 직선형 유도전동기의 구조상 등가회로 정수를 계산하는 것은 상당히 어렵다.

본 논문에서는 전자장 이론을 적용한 공간고조파법을 이용하여 직선형 유도전동기의 추력 특성과 1차축 등가회로 파라미터를 도출하였다. 2차축 등가회로 파라미터는 공간고조파법에 의한 추력 특성과 등가회로 해석법에 의한 추력 특성이 같아지도록 해석적 기법을 이용하였다. 또한, 직선형 유도전동기의 jerk 특성(급격한 가감속 특성)을 평가하기 위하여 V/F비 일정 제어시 가동자의 정격 속도를 고려한 동특성 시뮬레이션이 이루어졌으며 이를 바탕으로 jerk의 특성해석을 위한 가속, 정속, 감속의 운전패턴에 따른 동특성을 수행하였다[2].

## 2. 직선형 유도 전동기의 동특성 해석

## 2.1 해석 모델

그림 1은 특성 해석을 위한 모델의 기하학적인 구조로서 자기부상 열차의 차량 한 칸 최대 무게 20(ton)사용되는 직선형 유도 전동기를 보여주고 있다. 가동자는 치와 슬롯을 갖는 철심 코어에 회전자계를 위한 3상 권선이 구성되어 있으며, 고정자는 와전류 발생을 위한 알루미늄판과 권선에 의한 자속밀도를 높이기 위한 철심 레일로 이루어져 있다. 이러한 직선형 유도 전동기의 설계 변수는 표 1에 제시하고 있다. 표 1에 있어서 인버터의 최대 상 전압은 직류링크 전압 510(V)에 대해 3상 정현파 구동과 스위칭 소자의 전압 손실을 고려하여 240(V)로 계산되었으며, 상당 정격 전류는 코일의 단면적에 있어서 전류 밀도  $4(A/mm^2)$ 의 선정으로부터 212(A)로 얻어졌다. 또한 선형 기기의 극간격  $r$ 를 고려한 입력 주파수인 동기속도는 식(1)과 같이 정의된다.

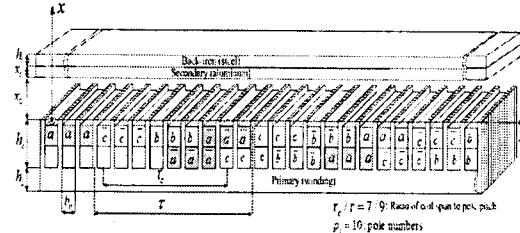


그림 1. 직선형 유도전동기의 해석 모델.

표 1 해석 모델의 설계 변수

파라미터	값
가동자의 정격 속도 $u_{rate}$	14[m/s]
1차축 최대 상전압	240[V]
공극( $x_0$ )	11[mm]
1차 철심폭 ( $l_L$ )	200[mm]
극수( $p_1$ )	10
극간격( $r$ )	180[mm]
슬롯폭( $b_0$ )	14[mm]
치폭	6[mm]
상당 턴수	120
상당 슬롯당 턴수	4
코일단면적	53[mm <sup>2</sup> ]
코일간격	7슬롯/9슬롯
상당 정격 전류 $i_{srate}$	212[A]
알루미늄판 두께( $x_1$ )	6[mm]
백아이린 두께( $h_1$ )	16[mm]

$$u_s = 2\pi f_s \quad (1)$$

여기서,  $f_s$ 는 권선의 입력 주파수이다. 따라서 직선형 유도전동기의 정격속도를 위한 슬립은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$s = \frac{u_s - u_{rate}}{u_s} \quad (2)$$

여기서, 슬립이 1은 정격속도가 0이므로 가동자가 정지했을 때를 의미하며 슬립이 0에 가까울수록 동기속도와 가동자의 정격 속도가 같음을 알수 있다.

유도전동기는 슬립과 입력 전류의 변화에 의해 추력이 변하는 특성을 가지므로 식 (3)과 같이 일정한 전압과 주파수 비에 의한 V/F 제어 특성을 갖는다.

$$\alpha = \frac{V_m - V_0}{f_m - f_0} \quad (3)$$

여기서,  $m$ 은 최대값을,  $0$ 는 초기값을 의미한다.

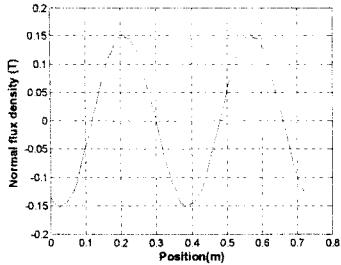


그림 3. 슬립 0.12와 정격 입력시 알루미늄 표면의 수직 자속 밀도

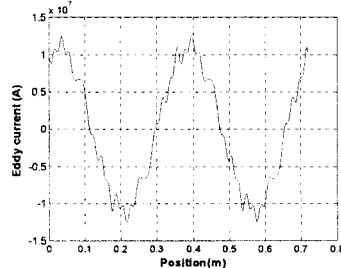


그림 4. 슬립 0.12와 정격 입력시 알루미늄 표면의 와전류

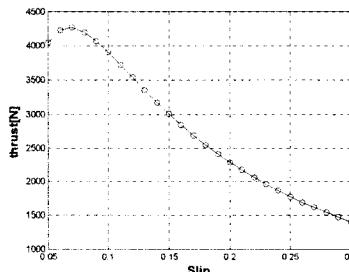


그림 5. 정격 입력과 속도시 슬립에 따른 추력 특성

그림.3~5는 그림.1의 해석 모델과 표.1의 설계변수에 있어서, 가동속도 14(m/sec), 입력 전류 212(A)일 때의 전자계와 추력 특성을 각각 보여주고 있다. 그림.3의 알루미늄 표면의 수직 자속밀도의 왜곡은 와전류에 의해 발생함을 볼 수 있으며, 알루미늄 표면의 와전류도 일정한 극간격을 유지함을 보여주고 있다. 또한 그림.5는 정격 속도 시 최대 추력을 얻기 위한 슬립에 따른 추력 특성을 보여주고 있다.

## 2.2 동특성 모델링

회전형 유도전동기의 경우 유도전동기의 중성점이 외부에 연결되어 있지 않고, 각 상전압의 순시합이 0이라고 가정하면 임의의 속도  $w$ 로 회전하는 좌표축에서 고정자와 회전자의 dq축 전압 방정식은 식 (4)와 같다.

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + P \lambda_{ds} - w_s \lambda_{qs} \quad (4.a)$$

$$0 = r_r i_{dr} + P \lambda_{qr} - (w_s - w_r) \lambda_{qr} \quad (4.b)$$

$$0 = r_r i_{qr} + P \lambda_{qr} + (w_s - w_r) \lambda_{dr}$$

여기서,  $r_s, r_r$ 은 고정자와 가동자의 상저항 값이며,  $P$ 는 시간에 대한 미분 연산자이다. 또한 고정자와 회전자의 쇄교자속은 식(5)와 같이 표현된다.

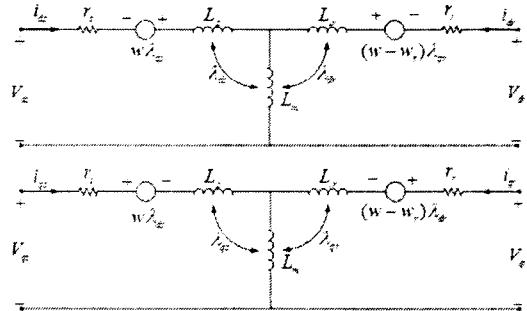


그림 6. 유도전동기의 d-q 전압 방정식

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (5.a)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}$$

$$\lambda_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr}$$

$$\lambda_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr}$$

식 (4)와 식(5)로부터 유도전동기의 추력 특성식은 식 (6)와 같이 계산된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \quad (6.a)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) \quad (6.b)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P_s}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (6.c)$$

여기서 식 (6.a)는 고정자와 회전자의 전류량으로 구한 토크식이며, 식 (6.b)는 고정자축 전류량과 회전자축 쇄교자속량으로 구한 토크식이다. 마지막으로 식 (6.c)는 고정자의 전류량과 쇄교자속량으로 구한 토크식이다. 회전형 유도전동기의 토크식은 회전자의 주파수에 의해 표현되므로 직선형 유도전동기의 추력식은 주파수를 가동자의 속도로 식(1)을 이용하면  $w_s = u_s \pi / \tau$ 로 유도되며, 식 (4)에 있어서 동기 좌표계의 표현에 있어서  $w_s$ 가 0이라고 가정하면, 회전자와 고정자의 쇄교자속은 식 (7)과 같이 얻어진다.

$$\lambda_{ds}^s = \int_0^t (V_{ds}^s - r_s i_{ds}^s) dt \quad (7.a)$$

$$\lambda_{qs}^s = \int_0^t (V_{qs}^s - r_s i_{qs}^s) dt \quad (7.b)$$

$$\lambda_{dr}^r = \int_0^t (-r_r i_{dr}^s - w_r \lambda_{qr}^s) dt \quad (7.c)$$

$$\lambda_{qr}^r = \int_0^t (-r_r i_{qr}^s + w_r \lambda_{dr}^s) dt \quad (7.d)$$

또한 이 계에 존재하는 운동방정식은 식 (8)와 같다.

$$M \frac{du_m}{dt} + B_m u_m + F_L = F_e \quad (8)$$

여기서  $M$ 은 가동자의 질량이며,  $B_m$ 은 마찰계수이고,  $F_L$ 은 부하이다.

### 3. jerk의 특성 해석

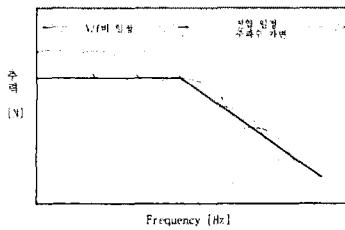


그림 7. 직선형 유도전동기의 일반적인 운전패턴.

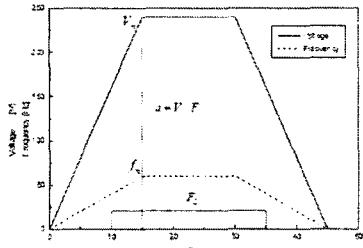


그림 8. 직선형 유도전동기의 운행 조건.

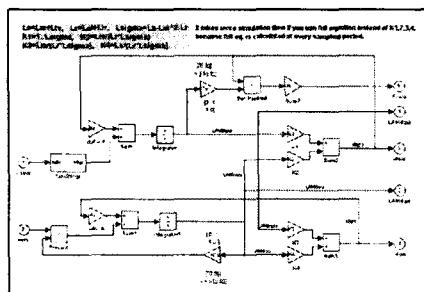


그림 9. 유도전동기 동특성 모델링

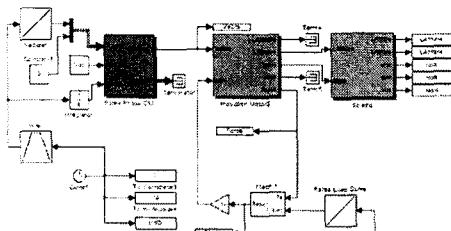


그림 10. V/F 일정 제어 시뮬레이션

그림.7은 직선형 유도전동기의 일반적인 운전패턴을 보여주고 있다. 직선형 유도전동기는 일정한 전압에 있어서 주파수를 커질수록 추력이 감소하는 경향을 갖으며, 일정한 V/F의 비에 있어서 추력이 일정한 값을 갖음을 알 수 있다. 이러한 운전 패턴을 갖는 직선형 유도전동기의 자기부상열차의 적용에 있어서 그림.8은 V/F의 일정한 비를 갖는 지령 속도와 운행시 부추력을 갖는 운행 조건을 보여주고 있다. 직선형 유도전동기의 급격한 가속력과 외부의 왜란에 의한 추력의 변동은 승객 안정성에 많은 영향을 끼치며, 시스템 효율 및 적용에 제한을 가져온다. 그러므로 가속력과 추력의 급격한 변동을 jerk로 규정하여 설계된 유도전동기의 동특성 시뮬레이션을 통해 설계된 유도전동기의 동특성을 본 논문은 제시하고 있다.

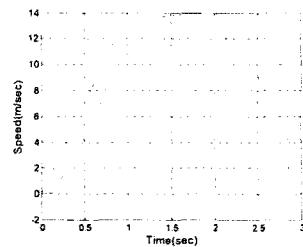


그림 11. 일정 V/F값을 갖는 지령 속도와 가동자 속도

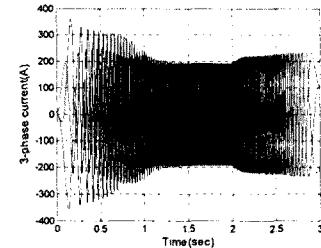


그림 12. 동특성 시뮬레이션에 의한 전류 특성

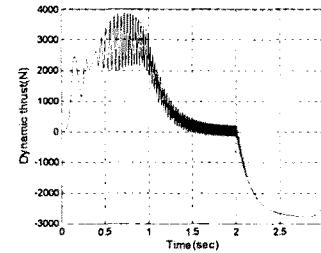


그림 13. 동특성 시뮬레이션에 의한 추력 특성

그림.9는 (d-q)축 좌표계에서의 직선형 유도전동기의 동특성 시뮬레이션을 보여주고 있으며, 그림.10은 일정한 V/F비의 지령과 부추력을 갖는 제어 시뮬레이션을 나타내고 있다.

그림.11은 그림. 10의 V/F 지령치에 의한 가동자 속도를 보여주고 있다. 정격 속도 14(m/sec)를 위한 최대 상전압은 3상 정현파 구동 제어로부터 240(V)로 설정되어졌다. 그림. 12와 그림. 13은 입력 전압에 의한 3상 전류와 추력 특성을 보여주고 있다. 본 논문에 있어서 jerk 특성은 V/F비에 의한 가속 계수만 단지 고려되어졌다.

### 4. 결 론

본 논문은 직선형 유도전동기의 jerk 특성 해석을 위한 유도전동기의 동특성 시뮬레이션에 대해 다루고 있다. 동특성을 위한 회로정수는 전자계 특성 방정식과 동특성 모델링의 등가회로를 일치시킴으로서 얻어졌으며, jerk 특성을 위한 유도전동기의 제어특성은 V/F비에 의해 주어졌다.

### 감사의 글

본 논문은 건설교통부에서 시행한 기계연구원의 자기부상열차 실용화 사업으로 수행된 논문입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Dae kyong Kim, Byung il Kwon, Kyung il Woo, "The Characteristic Analysis of Vector Control in a Linear Induction Motor Considering Static and Dynamic End Effects", 전기학회논문지 2002년 pp.413-424
- [2] J.K. Gieras, G.E. Dawson, A.R. Eastham, "Performance Calculation for Single-Sided Linear Induction Motors with a Double Layer Reaction Rail Under Constant Current Excitation", IEEE Trans. on MAGNETICS, Vol. MAG-22, Jan. 1986