

# 선형 유도전동기의 슬립주파수 제어 알고리즘에 관한 연구

이재현\*, 목형수\*, 이진우\*\*, 김상훈\*\*\*, 김명한\*\*\*\*

\*건국대학교, \*\*두원공과대학, \*\*\*강원대학교, \*\*\*\*현대로템주식회사

## A Study on Slip Frequency Control Algorithm of Linear Induction Motor

Jae-Hyun Lee\*, Hyung-Soo Mok\*, Jin-Woo Lee\*\*, Sang-Hoon Kim\*\*\*, Myong-Han Kim\*\*\*\*

\*Konkuk Univ., \*\*Dowon Technical College, \*\*\*Kangwon Univ.,\*\*\*\*Hyundai-Rotem Company

### ABSTRACT

This paper presents a vector control of Linear Induction Motor(LIM) based on a slip frequency control. And a Linear Induction Motor modeling included the end effect using circuit and equation method is also presented. We demonstrated through simulation the improvements achieved by the proposed scheme.

### 1. 서 론

현재, 경제적 공간적 측면에서 효율이 뛰어난 경전철 시스템이 국내외적으로 점차 사용화 조짐을 보이고 있다. 이미 상용 운전 중인 경전철 시스템의 추진모터로는 회전형 유도전동기가 주로 이용되고 있으나, 회전형 방식의 단점을 보완시킨 선형 유도전동기도 최근 경전철 구동시스템으로써 각광을 받고 있는 추세이다.<sup>[1]</sup>

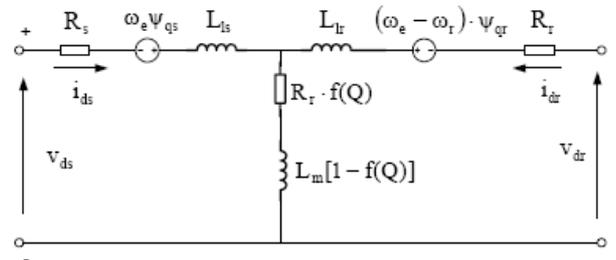
선형 유도전동기(Linear Induction Motor, LIM)는 다양한 환경조건에서도 전자력에 의한 비점착 방식의 안정적인 추력 및 제동력을 발생하고, 조용하고 편안한 승차감을 제공할 뿐만 아니라 가감속 능력이 우수한 특징을 갖고 있어 열차용 추진 장치로 널리 사용되고 있다. 또한, 일반적인 회전형 전동기와는 단부 효과, 수직력 발생, 큰 공극 등과 같은 비선형적인 특징을 가지고 있어 일반적인 벡터제어로 제어할 경우 비선형적 특징으로 인해 제어에 어려움이 따른다.<sup>[2]</sup>

본 논문에서는 회로와 수식을 혼합하여 단부효과를 고려한 선형 유도전동기를 모델링 하고 슬립주파수 제어 개념에 근거한 추진 제어 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 철도 차량에 적용 가능성을 보이고자 한다.

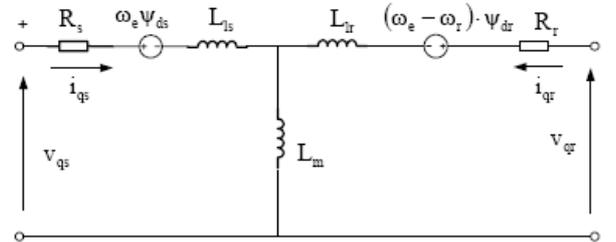
### 2. 선형 유도전동기의 모델링

선형유도전동기는 다양한 비선형적 특성들로 인해 회전형 유도전동기와 비교하여 선형유도전동기의 정확한 수학적 모델을 도출 하기는 매우 어렵다. 본 논문에서 단부효과를 고려한 선형 유도전동기 모델을 사용하였다.

선형 유도전동기의 동적 모델은 단부 효과를 고려한 전기적인 d-q 등가 회로 모델을 사용하였다.<sup>[4][5]</sup> 그림 1. (a)에서와 같이 d축 magnetization branch가 회전형 전동기와 차이가 있는 반면, 그림 1.(b)서는 q축 등가회로는 일반적인 회전형 전동기와 일치함을 나타낸다.



(a)



(b)

그림 1 LIM의 (a) d축 등가회로 (b) q축 등가회로

Fig. 1 (a) A d-axis equivalent circuit of LIM  
(b) A q-axis equivalent circuit of LIM

그림 1. 로부터 동기 좌표계(subscript "e")에서의 1차축과 2차축 전압 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + R_r f(Q)(i_{ds}^e + i_{dr}^e) + p\psi_{ds}^e - \omega_e \psi_{qs}^e \quad (1)$$

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + p\psi_{qs}^e + \omega_e \psi_{ds}^e \quad (2)$$

$$v_{dr}^e = R_r i_{dr}^e + R_r f(Q)(i_{ds}^e + i_{dr}^e) + p\psi_{dr}^e - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr}^e = 0 \quad (3)$$

$$v_{qr}^e = R_r i_{qr}^e + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr}^e + p\psi_{qr}^e = 0 \quad (4)$$

또한, 쇠교자속에 관한 수식은 다음과 같다.

$$\psi_{ds}^e = L_{ls} i_{ds}^e + L_m (1 - f(Q))(i_{ds}^e + i_{dr}^e) \quad (5)$$

$$\psi_{qs}^e = L_{ls} i_{qs}^e + L_m (i_{qs}^e + i_{qr}^e) \quad (6)$$

$$\psi_{dr}^e = L_{lr} i_{dr}^e + L_m (1 - f(Q))(i_{ds}^e + i_{dr}^e) \quad (7)$$

$$\psi_{qr}^e = L_{lr} i_{qr}^e + L_m (i_{qs}^e + i_{qr}^e) \quad (8)$$

위 수식에서  $f(Q)$ 에 관한 수식은 식(9)과 같이 표현된다.

$$f(Q) = \frac{1 - e^{-Q}}{Q} \quad (9)$$

이때,  $Q = \frac{DR_r}{L_r v}$ 으로 정의 된다.

여기서,  $v_s = v_{ds} + jv_{qs}$ 는 1차측 전압,  $v_r = v_{dr} + jv_{qr}$ 은 2차측 전압,  $L_s = L_{ls} + L_m$ 은 1차측 인덕턴스,  $L_r = L_{lr} + L_m$ 은 2차측 인덕턴스,  $L_{ls}$ 는 1차측 누설 인덕턴스,  $L_{lr}$ 은 2차측 누설 인덕턴스,  $L_m$ 은 자화 인덕턴스, 첨자 "s"와 "r"은 각각 1차측과 2차측을 나타낸다.  $v_{ds}, v_{qs}$ 은 1차측 전압,  $v_{dr}, v_{qr}$ 은 각각 2차측 전압,  $i_{ds}, i_{qs}$ 는 각각 1차측 전류,  $i_{dr}, i_{qr}$ 은 각각 2차측 전류,  $\psi_s = \psi_{ds} + j\psi_{qs}$ ,  $\psi_r = \psi_{dr} + j\psi_{qr}$ 은 각각 1차측과 2차측 쇄교자속을 나타낸다. 또한  $R_s, R_r$ 은 각각 1차측과 2차측 저항,  $\omega_r$ 은 2차측 주파수,  $n_p$ 는 극수,  $p$ 는 수학적 미분 연산자,  $v$ 는 2차측  $m/s$  속도,  $\tau$ 는 극간격,  $D$ 는 1차측 길이( $m$ ),  $Q$ 는 1차측 길이와 관련된 요소로 속도의 함수이며 단부효과의 영향을 분석할 수 있다.

그림 2와 그림 3에서는 각각 위의 수식으로부터 회로와 수식을 혼합한 시뮬레이션 모델과 기계 부하 시스템 모델을 나타내었다.

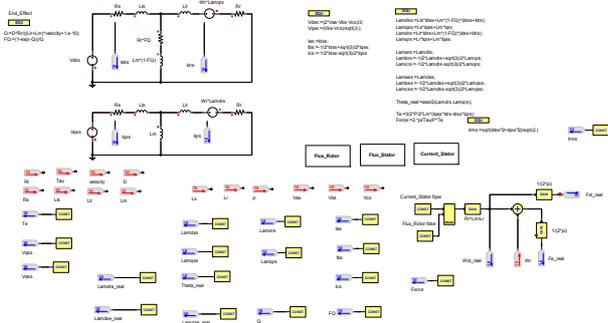


그림 2 선형 유도전동기의 시뮬레이션 모델  
Fig. 2 A simulation model of Linear Induction Motor

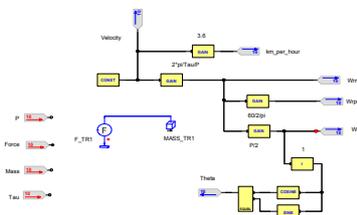


그림 3 기계 부하 시스템 모델  
Fig. 3 A model of mechanical load system

표 1.에서는 모델링에 사용된 제정수를 나타내었다. 사용된 제정수는 FEM 해석을 수행에 의한 계산 수치이며 기저 속도 45 km/h, 43.6Hz, 275V,에서 계산되었다.

표 1 선형 유도전동기의 제정수

Table 1 Parameters of Linear Induction Motor

47.2[kW], 275[V], 654[rpm], 8poles, Mass = 3500[kg]	
$R_s$	0.04611[Ω]
$R_r$	0.11932[Ω]
$L_{ls}$	0.685[mH]
$L_{lr}$	0.479[mH]
$L_m$	2.1325[mH]
$D$	1.785[m]
$\tau$	0.201[m]

### 3. 선형 유도전동기의 추진 제어 알고리즘

선형 유도전동기의 특성을 고려하면 슬립주파수를 일정한 양상으로 제어하는 상태에서 전동기 인가전류를 제어하면 전동기의 발생 추력을 제어할 수 있으며, 수직력을 일정 범위내로 제한할 수 있다. 한편, 선형 유도전동기의 슬립에 따른 추력과 수직력 특성 곡선으로부터 슬립을 일정 값 이상으로 제어하여 과도한 수직력이 발생하는 것을 방지하도록 한다. 그림 4.는 이러한 개념에 근거한 선형 유도전동기의 제어 알고리즘을 블록도로 나타낸 것이다.

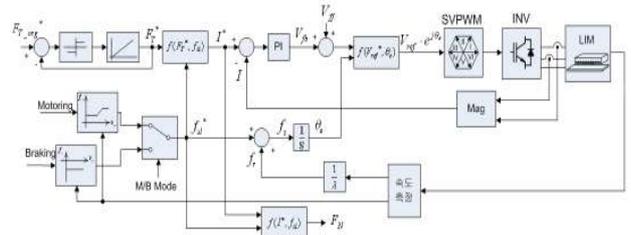


그림 4 슬립 주파수 제어 개념에 근거한 선형 유도전동기의 제어 알고리즘 블록도  
Fig. 4 A Control algorithm block diagram of Linear Induction Motor based on slip frequency control concept

추력 지령치가 주어지면 추력, 슬립주파수, 전류 관계식을 이용하여 전류 지령치를 계산한다. 그리고 슬립주파수와 전류 지령치를 이용하여 수직력을 계산한다. 전류제어기에서는 측정된 전류와 전류 지령치를 이용한 PI제어기를 사용하여 전압 지령치를 구하고 공간벡터 PWM방법을 이용하여 구현한다. 구동모드와 제동모드에 따라 슬립주파수를 다르게 설정하며, 전동기의 속도에 해당하는 2차측 주파수를 구하여 인가전압의 주파수를 구하고, 이를 적분하여 위상각을 구한다. 추력 지령치가 갑자기 바뀌는 경우에 수직력도 급격하게 변할 수 있기 때문에 이를 제한하기 위해 지령치 변화를 제한기를 사용한다. 그림 4.의 추력 및 수직력에 관한 수식은 다음과 같다.<sup>[6][7]</sup>

$$F_T = \frac{l\lambda\mu_0}{2} \frac{R_m S}{(\sinh \beta g)^2 + (R_m S \cosh \beta g)^2} (Z_m I_m)^2 \quad (10)$$

$$F_N = \frac{l\lambda\mu_0}{4} \frac{1 - (R_m S)^2}{(\sinh \beta g)^2 + (R_m S \cosh \beta g)^2} (Z_m I_m)^2 \quad (11)$$

여기서,  $R_m = \sigma_t \mu_0 \lambda f$  은 자기적 레이놀즈수(magnetic Reynolds number),  $\sigma_t = \sigma t_{eff}$  은 유효 도전율,  $\beta g = \frac{2\pi}{\lambda} g$  은 공극과장비율(air-gap-wavelength ratio),  $S = 1 - \frac{V_m}{V_{sy}} = \frac{f_{sl}}{f}$  은 슬립,  $Z_m$  은 최대권선밀도,  $I_m$  은 최대전류( $\sqrt{2} I$ ),  $g$  는 유효공극,  $\lambda = 2\tau$ ,  $\tau$  는 극간격,  $t_{eff}$  은 2차측 도체의 유효 두께,  $f$  는 전원 주파수,  $\sigma$  는 2차측 도체의 도전율,  $f_{sl}$  은 슬립주파수,  $l$  은 1차측 철심의 폭이다. 그리고 추력에 대한 수직력의 비는 다음과 같다.

$$\frac{F_N}{F_T} = -0.5 \left( R_m S - \frac{1}{R_m S} \right) \quad (12)$$

#### 4. Simulation 결과

본 논문에서는 Simpler를 사용하여 선형 유도전동기의 제어 알고리즘 모의 해석을 수행 하였다. 또한 시뮬레이션 시간의 제약 조건으로 인해 선형 부하의 질량을 350분의 1로 설정 후 해석하였다.

그림. 5와 그림 6.에서는 각각 실효치 전류 지령과 실효치 전류 그리고 오차를 나타내었다.

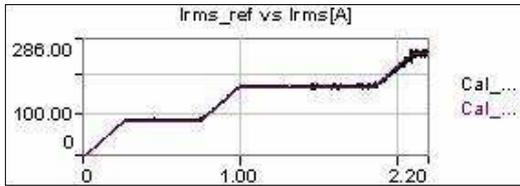


그림 5 실효치 전류 지령 과 실효치 전류  
Fig. 5 rms current value reference and rms current value

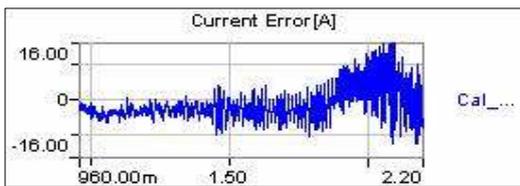


그림 6 실효치 전류 지령 과 실효치 전류  
Fig. 6 rms current value reference and rms current value

전류의 지령은 Notch에 따라 각각 100[A], 200[A], 300[A]로 바꾸어 가며 서서히 전류를 증가시켰다. 또한 추력의 경우 그림 7.에서 나타낸 것처럼 실효치 전류의 그래프와 유사하게 각 Notch에 따라 지령 추진력에 대해 추진력이 약 5%의 오차를 가지고 추종함을 나타내었다.

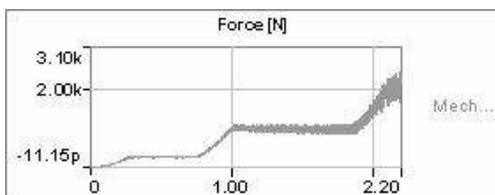


그림 7 지령 추진력과 추진력

Fig. 7 A reference thrust force and thrust force

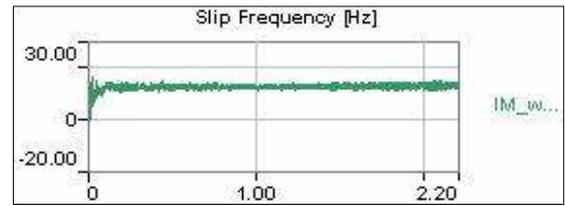


그림 8 슬립 주파수  
Fig. 8 A slip frequency

그림. 8에서는 추진력 제어 구간에서의 슬립 주파수가 일정함을 나타내었다. 본 논문에서는 선형 유도전동기의 설계 특성시 고려된 추진력과 수직력의 관계에 의하여 슬립주파수를 12.5[Hz]로 제어하였다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 선형 유도전동기의 추진력 제어에 관해 연구 하였다. 기존의 철도 차량에서 쓰이는 벡터제어 방식을 사용할 경우 수직력의 영향으로 인해 제어에 어려움이 따른다.

따라서, 본 논문에서는 선형 유도전동기의 추진력 제어시에 슬립 주파수의 제어를 통한 수직력의 영향을 고려한 제어 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 철도 차량 추진력 제어에 적용 가능성을 보였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 철도기술연구원(2007), "리니어 추진모터 방식 선정의 Case 별 검증 연구", 보고서
- [2] Changan Lu, Graham E. Dawson and Tony R. Eastham(1993), "Dynamic Performance of a Linear Induction Motor with Slip Frequency Control", CCECE/CCGEI '93, pp. 1057-1060
- [3] Jeong-hyoun, Kwanghee Nam(1999), "A New Approach to Vector Control for a Linear Induction Motor", 1999IEEE, pp.2284-2289
- [4] Rathore, A.K., Mahendra, S.N.,(2004), "Simulation of secondary flux oriented control of linear induction motor considering attraction force & transverse edge effect", Power Electronics Congress, 2004. CIEP 2004. 9th IEEE International, 17-22 OCT. 2004, pp.158-163.
- [5] Jianqiang Liu, Fei Lin, Zhongping Yang, Trillion Q.Zheng(2006), " Field Oriented Control of Linear Induction Motor Considering Attraction Force & End-Effects" IPEDMC2006.
- [6] H. Yu and B. Fahimi, "An Investigation on Asymmetry Effects in Linear Induction Machines", IEEE Proceedings of APEC, pp. 390-395, 2007.
- [7] J. F. Gieras, G. E. Dawson, and 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, No. 1, pp. 54-62, 1986.