

간접 벡터 제어에 근거한 선형유도전동기의 제어 알고리즘

A Control Algorithm of Linear Induction Motor based on Indirect Vector Control

이재현¹ 전미림² 목형수³ 이진우⁴ 김상훈⁴ 김철호⁵ 정은성⁶
Lee Jae-Hyun, Jeon Mi-Rim, Mok Hyung-Soo, Lee Jin-Woo, Kim Sang-Hoon,
Kim Chul-Ho, Chung Eun-Sung

ABSTRACT

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

1. 서 론

교통수단이 발달하면서 도시에서는 환경 문제, 에너지 문제 및 공간문제가 발생 하고 있다. 이에 대량수송이 가능하고 환경 친화적인 관점에서 지하철이나 전철이 도입되었으며, 현재는 경제적, 공간적 측면에서 효율이 뛰어난 경전철 시스템이 국내외적으로 점차 상용화 조짐을 보이고 있다. 이미 상용 운전 중인 경전철 시스템의 추진모터로는 회전형 유도전동기가 주로 이용되고 있으나, 회전형 방식의 단점을 보완시킴 선형 유도전동기도 최근 경전철 구동시스템으로써 각광을 받고 있는 추세이다.[1]

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

본 논문에서는 회로와 수식을 혼합하여 단부효과를 고려한 선형유도전동기를 모델링 하고 슬립주파수 일정제어에 기초한 벡터제어 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 철도 차량에 적용 가능성을 보이고자 한다.

† 책임저자 : 비회원, 건국대학교 전기공학과 박사과정

E-mail : call1016@empal.com

TEL : (02)444-4701 FAX : (02)447-9186

1 비회원, 건국대학교 전기공학과 박사과정

2 비회원, 건국대학교 전기공학과 석사과정

3 비회원, 건국대학교 전기공학과 교수

4 비회원, 두원공과대학교 메카트로닉스과 교수

5 비회원, 강원대학교 전기·전자공학부 교수

6 비회원, 현대로템주식회사 기술연구소 전장품개발팀 수석연구원

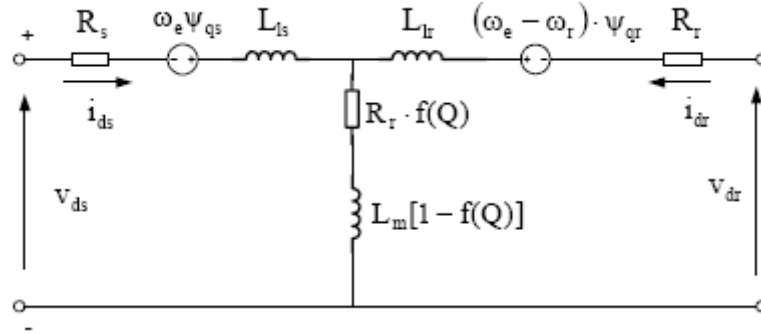
7 비회원, 현대로템주식회사 기술연구소 전장품개발팀 선임연구원

2. 본 문

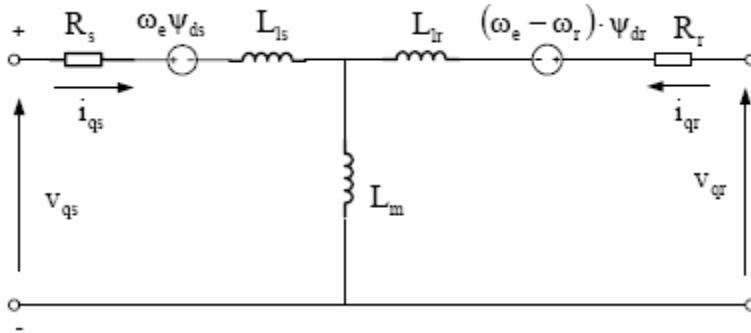
2.1 선형유도전동기의 모델링

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

선형 유도전동기의 동적 모델은 단부 효과를 고려한 전기적인 d-q 등가 회로 모델을 사용하였다.[4][5]



(a) d축 등가회로



(b) q축 등가회로

그림 1. 단부효과를 고려한 LIM의 등가회로 모델

그림 1. (a)에서와 같이 d축 magnetization branch가 회전형 전동기와 차이가 있는 반면, 그림 1.(b)서는 q축 등가회로는 일반적인 회전형 전동기와 일치함을 나타낸다.

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

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

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

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

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

쇄교자속에 관한 수식은 다음과 같다.

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

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

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

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

$$Q = \frac{DR_r}{L_r v} \quad (9)$$

$$f(Q) = \frac{1-e^{-Q}}{Q} \quad (10)$$

추진력에 관한 수식은 다음과 같다.

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} \cdot \frac{n_p}{2} (\psi_{ds}^e i_{qs}^e - \psi_{qs}^e i_{ds}^e) \quad (11)$$

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, ω_r 은 2차측 주파수, n_p 은 극수, p 는 수학적 미분 연산자, v 는 2차측 m/s 속도, τ 는 극간격, D 는 1차측 길이(m), Q 는 1차측 길이와 관련한 요소로 속도의 함수이며 단부효과의 수치를 계산할 수 있게 한다.

그림 2.에서는 Ansoft사의 Simplorer를 이용하여 회로와 수식을 혼합한 모델을 나타내었다.

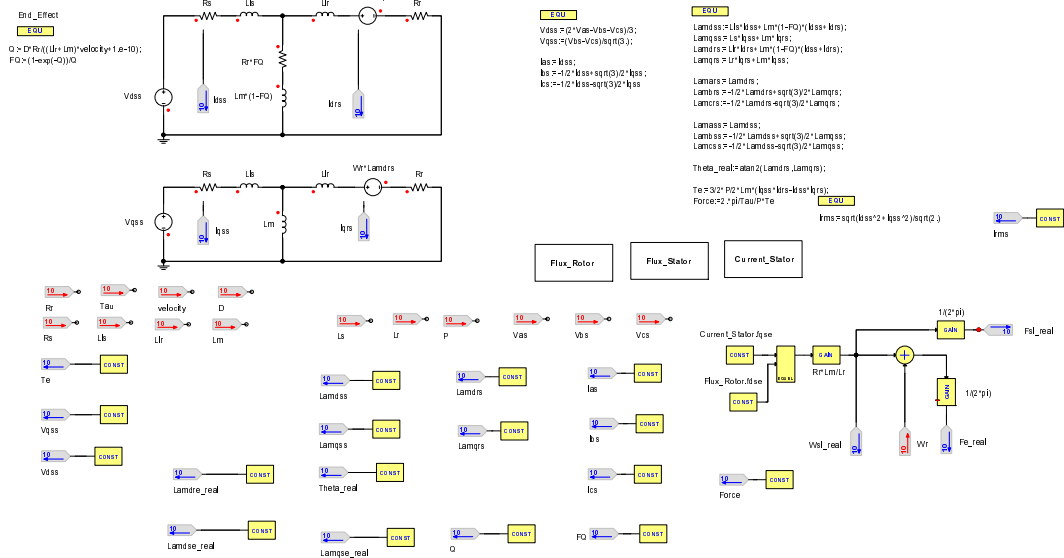


그림 2. 회로와 수식을 이용한 LIM 모델

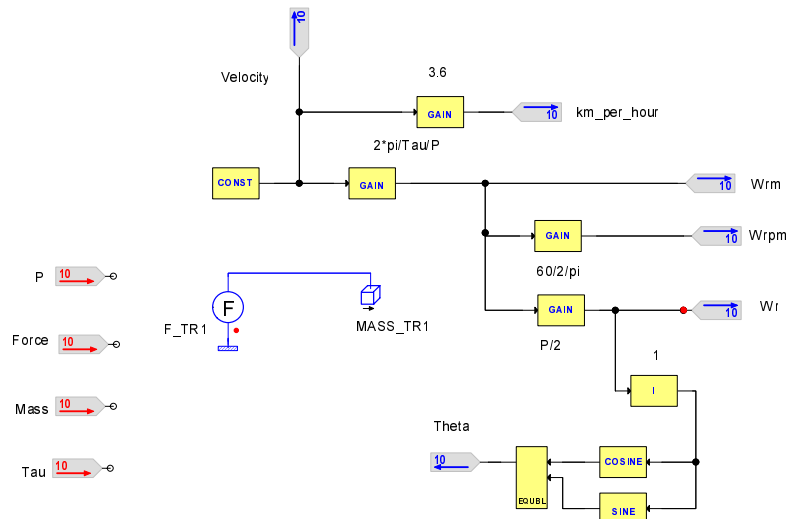


그림 3. 기계 부하 시스템 모델

그림 3.에서는 Mass모델을 이용한 기계 부하 시스템 모델을 나타내었다. 회전형 전동기는 달리 횡방향으로 이동하는 부하의 특성을 고려하여 Force를 입력으로 하는 Mass모델을 선정하고 각 부분의 결과 출력을 위한 수식을 이용하여 모델링을 수행하였다.

그림 2.와 그림 3.에서의 혼합 모델은 전기, 기계, 자기와 같이 각각 다른 물리적 영역의 모델을 하나의 Schematic 내부에서 구현이 가능한 장점을 가진다.

표 2.에서는 모델링에 사용된 제정수를 나타내었다. 사용된 제정수는 FEM 해석을 수행에 의한 계산 수치이며 기저 속도 45 km/h, 43.6Hz, 275V,에서 계산되었다.

표 2. 시뮬레이션 모델에 사용된 LIM 제정수

47.2 [kW], 275 [V], 654 [rpm], 8 <i>poles</i> , $Mass = 3500$ [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]
τ	0.201 [m]

또한, 슬립주파수의 관계식은 자속이 일정할 경우 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\omega_{sl} = \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{gs}^e}{i_{ds}^e} \quad (12)$$

2.2 간접 벡터 개념에 근거한 선형유도전동기 제어 알고리즘

그림 4.에서는 간접 벡터 제어 전체 블록 다이어그램을 나타내었다.

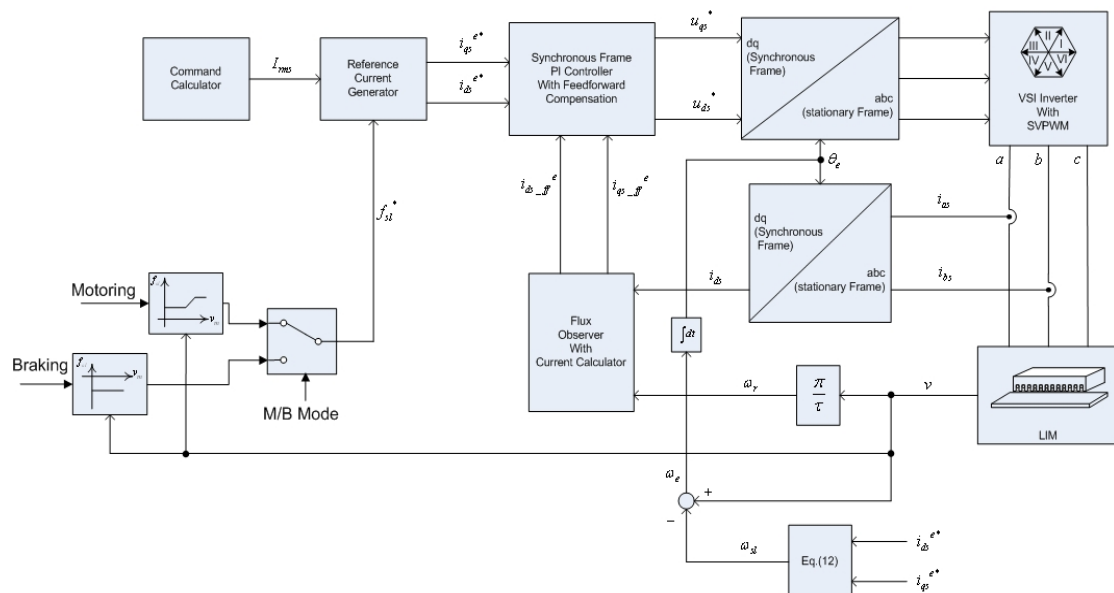


그림 4. 간접 벡터 제어 전제 블록 다이어그램

본 논문에서는 기본적으로 널리 알려진 전류 모델을 이용한 자속 추정방법을 이용한 간접벡터 제어 기법을 사용하였다. 전류제어는 역기전력을 전향 보상한 동기 좌표계 PI전류제어기를 사용하였으며, 전압 변조방식으로는 과변조를 포함한 SVPWM을 사용하였다.

또한 수직력에 영향을 최소화 하기 위해 슬립주파수를 일정하게 하는 전류 지령 계산기를 추가 하였다.

그림 5.에서는 그림 4.의 블록 다이어그램을 이용하여 수행한 모델링을 나타내었다.

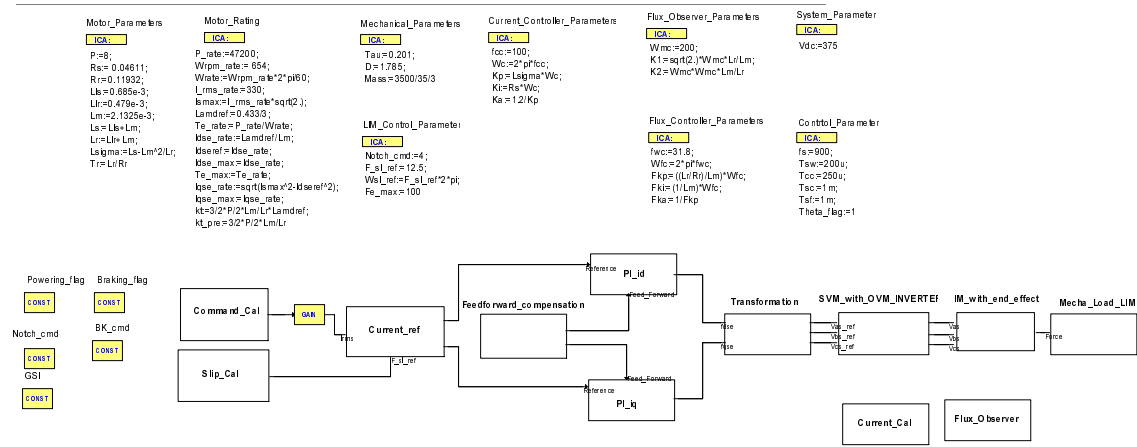


그림 5. 본 논문에 사용된 전체 시뮬레이션 모델

본 논문에서는 슬립주파수가 일정하게 유지되어야 하는 철도차량 추진 시스템 조건하에서 d,q축 전류 지령을 슬립주파수가 일정하게 유지되기 위한 그림 6.에서 나타낸 별도의 계산 알고리즘을 사용하였다.

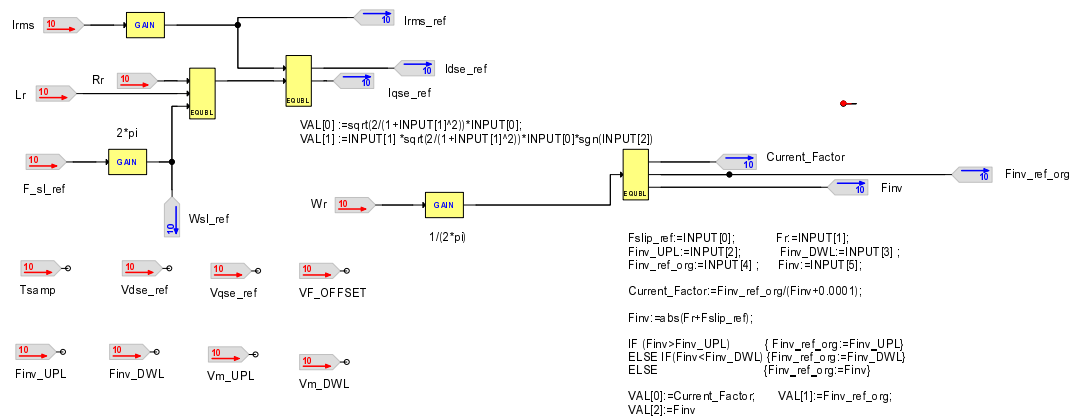


그림 6. d,q축 전류 지령 발생기

2.3 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 시뮬레이션 실행 시간의 제약으로 인해 Mass 조건을 3.5[t]의 350분의 1로 지정한 후 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 7.에서는 각각 동기 좌표계 q축과 d축 파형을 나타내었고, 그림 8.에서는 각각의 전류 오차를 나타내었다.

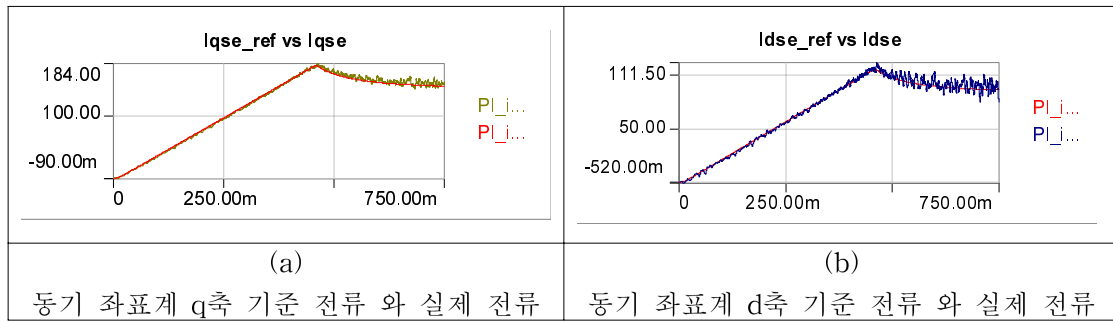


그림 7. 전류지령과 동기좌표계 d축 전류 및 q축 전류

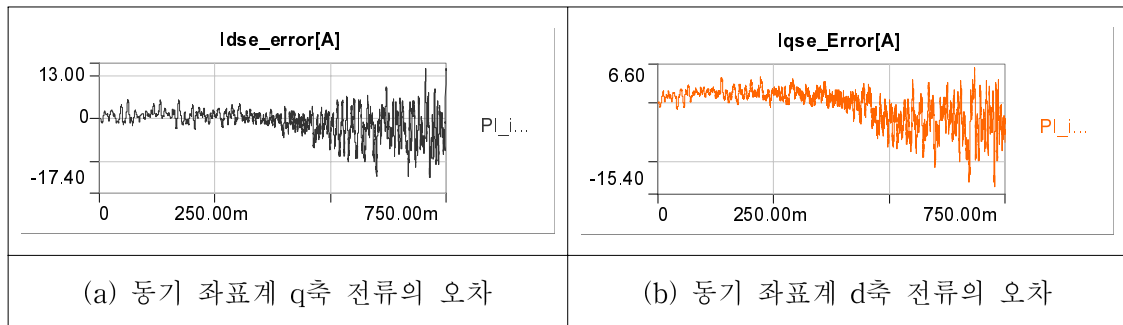


그림 8. 전류 오차

그림. 9에서는 추진력 지령에 따른 실제 추진력에 대한 결과와 속도를 나타내었다.

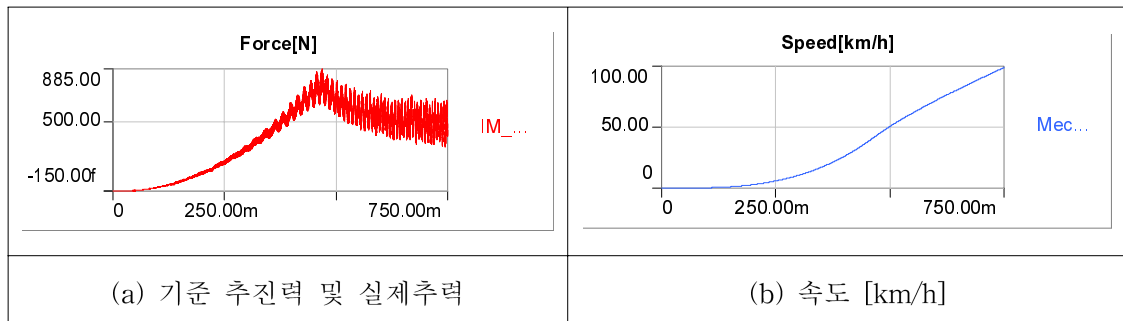


그림 9. 전류 오차

본 논문에서 적용한 모델링과 알고리즘으로 안정된 추진력 제어에 의해 속도가 100[km/h] 까지 도달함을 확인 하였다.

그림 10.에서는 추진력 제어구간에서의 슬립주파수를 나타내었다. 전류지령 계산 알고리즘에 의해 슬립주파수가 일정함을 나타내었다. 본 논문에서는 FEM 해석을 수행을 통한 수직력을 고려해 슬립주파수를 12.5[Hz]를 선정하였다.

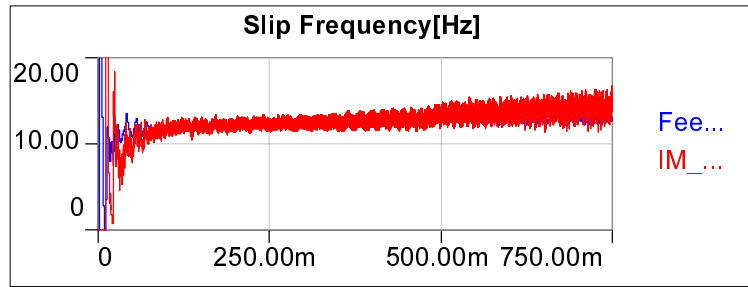


그림 10. 슬립 주파수 [Hz]

3. 결 론

본 논문에서는 철도차량 추진 시스템에 사용되는 선형유도전동기에 대한 추진력 제어 알고리즘 및 최적화에 관한 연구를 수행하였다.

일반적인 간접벡터제어에서는 수직력에 의한 영향을 무시할 수 없으므로 철도 차량에 간접 벡터제어 알고리즘을 적용하기 위해서는 반드시 슬립주파수 제어를 통해 수직력을 제어하는 과정이 필요하다.

참고 문헌과 유한 요소해석을 바탕으로 회로와 수식을 혼합한 선형유도전동기의 모델링을 수행 하였고, 안정된 추진력 제어를 위해 간접 벡터제어 개념에 근거한 추진력 제어 알고리즘을 시뮬레이션을 통해 확인 하였다. 몇가지 제한적인 시뮬레이션 조건하에 이론적으로 모델링 되어진 알고리즘이 시뮬레이션 결과와 비교해 타당한 오차범위를 가짐을 확인하였다.

참고문헌

1. 철도기술연구원(2007), “리니어 추진모터 방식 선정의 Case별 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 Contorl of Linear Induction Motor Considering Attraction Force & End-Effects" IP EMC2006.