

선형 유도전동기의 추진력 및 수직력 제어 방식

오 성철

한국기술교육대학교 전기공학과

Decoupling Control of Tractive and Vertical Force of Linear Induction Motor

Sung-Chul Oh

Dept. of Electrical Engineering, Korea Institute of Technology and Education

ABSTRACT

Linear induction motor(LIM) is widely used to drive magnetic levitation train. To drive LIM, different control method compared with conventional rotary type machine is needed. Since vertical force is generated inherently and it effects on the levitation system, vertical force should be kept constant for stable levitation. To keep vertical force constant, slip frequency should be kept constant. Once slip frequency is kept constant, tractive force can be controlled by adjusting motor currents. In this paper, control methods used so far are analyzed with some experimental results and decoupling control algorithm is proposed to control tractive and vertical force separately. Control algorithm is verified through simulation.

1. 서론

자기부상 열차의 추진을 위하여는 선형 유도전동기가 사용되고 있다. 이의 구동을 위해서는 기존의 원형 전동기의 구동과는 다른 제어방식이 사용되어야 한다. 특히, 선형전동기에서는 특성상 추진력뿐만 아니라 수직성분의 힘도 발생하게 된다. 이 수직력은 부상시스템에 영향을 미치게 된다. 자기부상열차의 운전에 있어서는 수직력 성분을 일정하게 하기 위하여 슬립 주파수를 일정하게 제어하고 있다. 또한, 운전시의 운전 슬립 주파수의 설정에는 수직력 뿐 아니라 흐울 등을 검토하여 결정되어야한다. 일다 슬립 주파수가 일정하게 유지되면, 추진력의 제어는 전동기에 흐르는 전류를 제어하면 이루어 질 수 있다.

현재까지의 자기부상열차의 연구 방향은 안정된 부상시스템을 구현하는데 초점을 맞추어 왔고 또한 실제의 속도를 열차를 추진할 수 있는 Track의 미비 등으로 인하여 추진 시스템에 대한 연구는 상대적으로 미진한 편이다. 추진에 있어서는 초기에는 V/f pattern 운전에 의한 open loop type으로 주로 저속도로 부상 시스템의 성능 시험을 위한 정도였으며, 이후 안정된 부상 시스템의 구현을 위하여 v/f pattern에 의한 일정 슬립 주파수 제어 방식이 구현되어, 실험을 통하여 여러 가지 특성이 확인되었다. 그러나, 추진력의 적절제어는 이루어지지 않았다.

추진력을 제어하기 위해서는 운전조건에 따라서 v/f pattern을 변경시킬 수 도 있다.

본 논문에서는 전압형 인버터를 이용하여 선형유도전동기의 추진력 및 수직력을 독립적으로 제어하는 방법이 제시되었다.

2. 선형유도 전동기의 제어 특성

선형 유도전동기는 일반 회전형 전동기와는 달리 공극(air gap)이 크기 때문에 자화 전류(magnetizing current)가 크고 역율과 흐율이 떨어지고 1차측(primary)과 2차측(secondary)에 흡인력과 반발력으로 나타나는 normal force가 존재한다. 선형 유도전동기의 추진 특성은 차상 1차에 교류를 인가하면 추진력 또는 회생 제동력이 연속적으로 발생되기 때문에 인버터 제어 시에는 열차의 속도를 feedback 받아 제어하여야 한다. 자기 부상열차에 있어서 힘의 발생 원은 코일에 의한 것으로 추진력을 발생하는 선형 유도 전동기의 코일과 부상력을 발생하는 전자석 코일 등이 독립적으로 존재하기 때문에 제어 시에는 각각 독립적으로 제어한다. 그러나, 선형유도 전동기의 코일은 추진력 만을 내는것이 아니고 수직력도 발생시킨다. 수직력의 크기와 방향은 선형유도전동기의 입력 전류를 일정하게 할 때 그림과 같이 슬립 주파수에 따라 변화되고 부상시스템에 대해서 흡인력 또는 반발력으로서 영향을 미친다. 따라서 제어가 간섭을 받지 않도록 슬립 주파수를 고정하는 것이 필요하므로 이를 고려하여 설계하도록 한다.

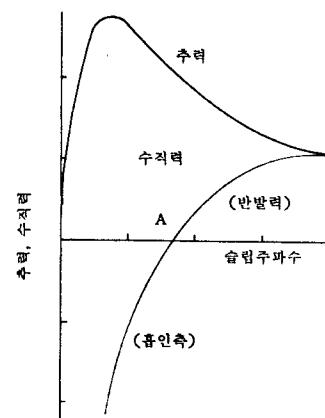


그림 1. 선형유도 전동기의 추진력, 수직력

유도 전동기의 정상상태 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + jw_s L_1 & jw_s M \\ jw_s M & R_2 + jw_s L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (1)$$

위 식에서 i_2 를 제거하면 추진력은 1차측 전류의 공간 벡터의 크기를 사용하여 (2)로 표시된다.

$$F_1 = \frac{\pi}{Z_p} \frac{W_s R_2 M^2}{R_2^2 + W_s L_2^2} I^2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

슬립 각 주파수 W_s 를 상수로 고정하면 전류 벡터 I 가 추진력 F 를 제어하기 위하여 조절되어야 한다.

2차측 Flux linkage는 (3)으로 정의된다.

$$\phi_2 = M i_1 - L_2 i_2 \quad \dots \dots \dots (3)$$

식 (1)과 (3)에서 두 번째 Column을 제거하면 ϕ_2 는 W_s 와 i_1 을 사용하여 (4)로 표시된다.

(4)의 ϕ_2 의 크기로 부터 추진력은 (5)로 된다.

$$\phi_2 = \frac{R_2 M}{R_2^2 + W_s L_2} i_1 \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$F_1 = \frac{\pi}{Z_p} \frac{W_s}{R_2} \phi_2 \quad \dots \dots \dots (5)$$

(5)에서 추진력은 고정된 슬립 각 주파수 W_s 에서 추진력은 2차측 flux를 조절하여 제어됨을 알 수 있다. 반면 일반적인 유도기의 벡터제어는 2차측 flux를 고정하고 슬립 각 주파수를 제어함으로서 토크가 제어된다.

3. V/F Pattern 운전에 의한 일정 슬립주파수 제어

추진용 인버터는 기존의 산업용 인버터의 V/F 일정 패턴에 의하여 주파수를 조정하여 시험용 모듈을 운전하였으나 저속 운전에 그쳤다. 또한, 수직력이 부상 시스템에 미치는 영향을 최소화 하기 위하여 슬립 주파수 제어의 필요성이 제기되었다. 이를 구현하기 위한 방법은 여러 가지가 제시되었다.

슬립 주파수를 일정하게 제어하기 위한 가장 구현이 간단하고, 신뢰성이 높은 시스템이 그림 2와 같이 제시되었다. 그림 2에서 인버터는 일정 V/F pattern에 의하여 운전되는 인버터 이었으며, 이를 구현하기 위하여 Microprocessor 8797이 사용되었다. 비 접촉으로 차량의 속도를 측정하기 위하여 간격이 일정하지 않게 설치된 track의 cross arm과 2개의 근접 스위치가 사용되어, 2개의 근접 스위치가 crossarm을 통과 할 때의 시간을 측정하여 근접 스위치 사이의 거리를 시간으로 나누어 차량의 속도를 측정하였다.

인단 차량의 속도가 측정되면 이를 각주파수로 환산하여 주어진 슬립 주파수 명령에 더하여 인버터의 저령 주파수가 된다. 그림 2의 추진제어기를 사용하여 자기부상열차의 추진 시스템의 특성을 살펴보았다. 그림 3에는 슬립 주파수 명령이 8.5 Hz 일 때의 전동기의 전류 파형을 나타내었다. 그림 4에는 슬립 주파수를 구동 시킬 때의 전자석의 전류 파형을 나타내고 있다. 이 파형에서는 LIM의 수직력이 부상시스템에 미치는 영향이 인버터를 구동하지 않을 때 보다 20% 증가됨을 알 수 있다.

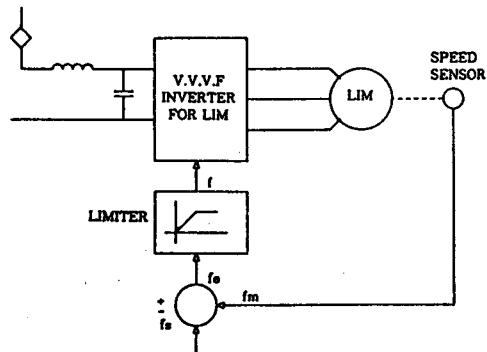


그림 2. 추진제어기의 구성

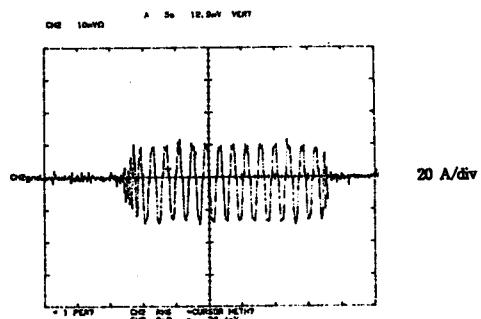


그림 3. 인버터의 전류 파형

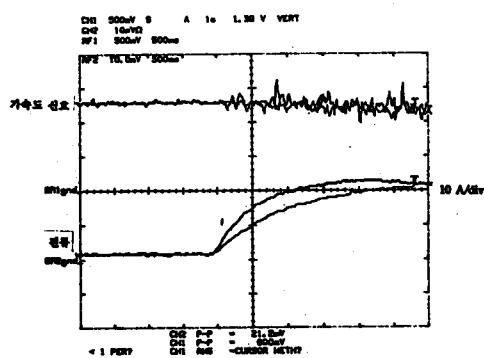


그림 4. 전자석에 흐르는 전류

4. LIM의 추진력, 수직력 독립제어

앞절에서 제시된 방법을 추진에 사용하게 되면 수직력 성분은 제어하게 되어 안정된 부상 시스템은 구현되지만, 추진력을 직접 제어 할 수 없는 단점이 있어, 속도 제어 및 ATC와의 연계 등이 불가능하게 된다. 선형 유도전동기의 제어를 위한 기본 방향은 앞절에서 제시한 슬립 주파수를 일정하게 하고 추진력의 제어를 위해서는 전동기의 전류를 제어하는 방식을 채택하였다. 제이기의 불리도는 그림 5와 같다. 그럼 5에서 운행 제어기에게서 입력받은 추진력 명령은 주어진 슬립 주파수 명령에 의해서 임력으로 변환된다. 이 과정에서 d, q 축간에 서로 영향을 미치는 성분이 보상된다. 즉

여기서 정의된 전압 명령을 동기 기준 좌표계의 성분이므로 이를 다시 정지 기준 좌표계의 값으로 변환되어 전압형 인버터의 기준 전압 명령이 된다. 기준 전압 명령으로부터 인버터의 gate 신호를 결정하기 위해서 서광 베타 PWM 방식을 채택하였다.

제안된 제어 알고리즘의 검증을 위하여 그림 5의 블럭도에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 각 축의 전류를 제어하기 위하여 PI 제어기가 사용되었다. 즉, 주어진 토크 명령에 의해서 q 축의 기준 전류가 연산된다. 속도 제어 모드로 동작할 때의 슬립 주파수 명령의 변화에 따른 속도의 변화를 그림 6, 7와 같다. 슬립 주파수 명령이 증가함에 따라 속도의 속응성이 개선됨을 보여주고 있다.

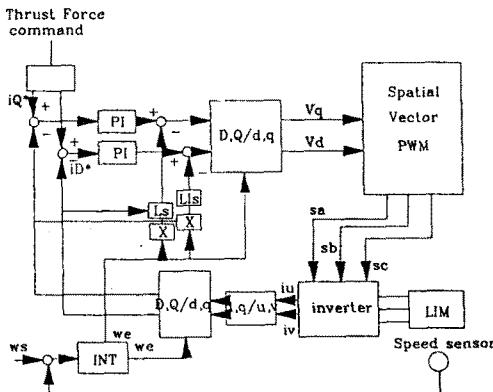


그림 5. 제어기의 불력도

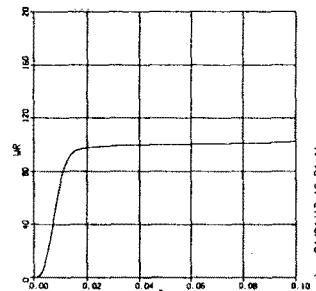


그림 6. 전동기 속도의 속용성($sf=30\text{Hz}$)

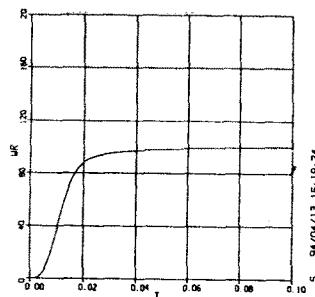


그림 7. 전동기 속도의 속응성($sf=10\text{Hz}$)

5. 결론

본 논문에서는 슬립 주파수 제어의 필요성과 현재까지 수행되었던 선형 전동기의 제어 방식에 대하여 실현 결과를 바탕으로 분석하였다. 추진력 및 수직력을 독립적으로 제어 할 수 있는 제어 알고리즘이 제안되었으며, 시뮬레이션을 통한 결과가 제시되었다. 알고리즘은 IGBT 인버터에 구현되어 자기부상열차의 추진 시험에 활용될 예정이다. 이후 ATC와 연계되어 자동 운전이나 pattern운전도 가능하게 된다.

〈참고 문헌〉

1. S. Nonaka and N. Fujii, "Dynamic Characteristics of Urban Transit LIM with Feedback Speed Control", Proc. of Maglev '89
 2. S. C. Oh, "Slip Frequency Control of a Linear Induction Motor with Speed Feedback", Proc. ISPE'92
 3. I. Miyashita and Y. Ohmori, "Current Control for Thrust Force Controlling Inverter of HSST", Proc. of Maglev '93, 1993
 4. 오 성철 외, "시험용 자기부상 열차의 전력 변화장치 개발 특성", 대한 전기학회 학제학술대회, 1993.7