

수직력을 고려한 자기부상열차의 LIM 벡터제어기법

송우현^{**}, 유성환^{*}, 김준석^{*}, 임재원^{**}, 박도영^{**}
 인천대학교^{*}, 한국기계연구원^{**}

LIM Vector Control for Magnetic Levitation Considering Normal Force

Woo Hyun Song^{**}, Sung Hwan Yoo^{*}, Jun Seok Kim^{*}, Jae Won Lim^{**}, Doh young Park^{**}
 Incheon National University^{*}, Korea Institute of Machinery & Materials^{**}

ABSTRACT

To implement servo system using LIM, thrust and normal force control must be made in a moment. Thus, vector control is required to control magnetic flux and toque.

In this paper, we applied to constant slip frequency vector control method by controlling d q axis current and presented various simulation results.

1. 서론

선형유도전동기는 구조가 단순하고, 유지 보수가 용이하여, 동력변환장치 없이 직선 추진력을 얻을 수 있는 장점이 있으며 또한 직선 운동이 필요한 시스템에 적합한 구조로 그 적용 범위가 점차 증가되어 가고 있는 실정이다. 그 중, 자기부상열차와 같은 고성능의 동특성이 요구되는 선형유도전동기를 이용한 서보시스템의 구현을 위해서는 순시 추력제어와 수직력 제어가 원활히 이루어져야만 한다. 따라서 기존의 LIM 제어방식에 속도제어와 토크제어를 할 수 있는 벡터제어를 도입하여야 한다.

본 논문에서는 LIM 제어에 따른 수직력을 고려하여 d축과 q축 전류를 제어함으로써, 필요로 하는 슬립주파수를 일정하게 유지하는 벡터제어기법을 적용하여 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

2. 본론

2.1 LIM 슬립일정 벡터제어 기법

회전자 자속기준 벡터제어(RFO)가 원활하게 수행되고 있을 때 식(1)에서와 같이 다음의 슬립식이 성립한다.

$$\omega_{sl} = \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{qs}^c}{i_{ds}^c} \quad (1)$$

LIM의 모델 상에서는 표현되지 않지만 슬립이 작은 경우 매우 큰 수직력이 나타나기 때문에 자기부상열차 제어 시스템의 경우 슬립주파수를 항상 일정 값 이상으로 크게 유지해야할 필요가 있다. 문제는 슬립이 작게 되면 LIM의 부상계에 부하가 가증되는 현상이 일어나므로 부상제어기가 정상적으로 작동하지 않을 가능성이 있다.

따라서 LIM 벡터제어에서는 필요로 하는 슬립이 구현되도록 d축 전류와 q축 전류를 연동시켜서 제어할 필요가 있다.

회전자자속 벡터제어가 원활하게 동작할 때의 토크 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_c &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr}^c i_{qs}^c - \lambda_{qr}^c i_{ds}^c) \quad \Leftarrow \lambda_{qr}^c = 0. \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^c i_{qs}^c \quad \Leftarrow \lambda_{dr}^c = L_m i_{ds}^c \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds}^c i_{qs}^c \end{aligned} \quad (2)$$

슬립주파수를 특정 값인 ω_{sl-set} 값으로 일정하게 유지할 때의 dq축 전류 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \omega_{sl} &= \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{qs}^c}{i_{ds}^c} \equiv \omega_{sl-set} \quad [rad/s] \\ \therefore i_{qs}^c &= \frac{L_r}{R_r} \omega_{sl-set} i_{ds}^c \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} T_c &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds}^c i_{qs}^c = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds}^c \left(\frac{L_r}{R_r} \omega_{sl-set} i_{ds}^c \right) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{R_r} \omega_{sl-set} (i_{ds}^c)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 필요로 하는 토크를 만족하는 dq축 전류는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$i_{ds}^{c*} = \left(\frac{T_c^*}{\frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{R_r} \omega_{sl-set}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$i_{qs}^{c*} = \frac{L_r}{R_r} \omega_{sl-set} i_{ds}^{c*} \quad (6)$$

필요로 하는 토크를 만족하는 d축 전류를 구한 다음 q축 전류를 연산하면 슬립주파수를 일정하게 유지하면서 필요한 토크를 발생시킬 수 있다.

2.2 단부효과를 고려한 LIM 모델링

단부효과의 가장 큰 특징은 속도가 증가하면 공극자속이 속도의 함수로 감소하는 것이다. 이를 고려하기 위하여 일종의 단위시간 개념인 Q 함수를 도입하였다.

$$Q \equiv D \frac{R_r}{(L_m + L_r)v} \quad (7)$$

Q 함수는 그 자체로는 단위가 없는 값이지만 이동자의 유효 길이를 D라고 할 때 이동자가 D만큼 이동하는데 필요한 시간과 동일한 의미를 갖는다. 속도가 0인 경우 Q의 값은 무한대를 갖게 되며 속도가 증가할수록 Q값이 감소한다.

이때 진행방향의 2차 축에서 발생하는 와전류로 인하여 공극 자속이 감소하며 이러한 자속의 감소는 등가회로에서 등가 상호인덕턴스 L_m 의 감소로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_{(ea)} &= L_m I_m(ea) = L_m I_m \left\{ 1 - \frac{1-e^{-Q}}{Q} \right\} = I_m L_m \left\{ 1 - \frac{1-e^{-Q}}{Q} \right\} \quad (8) \\ &= I_m L_m(ea) \\ \therefore L_m(ea) &= L_m \left\{ 1 - \frac{1-e^{-Q}}{Q} \right\} \\ &= L_m \{1 - F(Q)\} \quad \left(F(Q) = \frac{1-e^{-Q}}{Q} \right) \end{aligned}$$

따라서 단부효과를 고려한 등가회로는 다음과 같다.

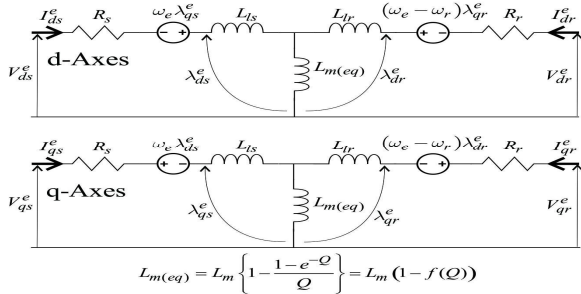


그림 1 유효 인덕턴스를 고려한 LIM의 dq 등가회로
Fig 1 Equivalent circuit considering effective inductance

2.3 MATLAB SIMULINK를 이용한 시뮬레이션

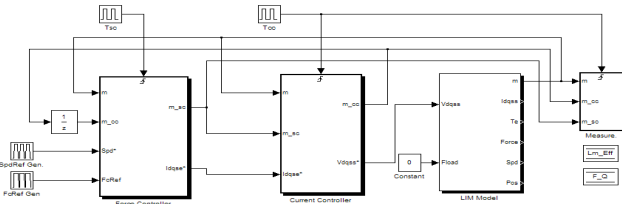


그림 2 LIM 벡터제어 모델 알고리즘 블록도
Fig 2 Algorithm block of LIM vector control model

LIM 벡터제어기를 구현하기 위해 회전자속 기준제어를 기반으로 슬립주파수 일정제어를 도입하여 55m/s(200km/h)급 제정수로 MATLAB 시뮬레이션을 수행하였다. 인버터의 DC전압은 375V를 사용하고, 스위칭 주파수는 2.5kHz, 빠른 시뮬레이션 진행을 위해 중량은 35.7kg으로 가정하였다. 차량이 부상하므로 별도의 마찰 손실은 고려하지 않았으며 풍손을 포함하여 무게이외의 부하를 0으로 가정하였다.

표 1 LIM 제정수
Table 1 Parameter of LIM

parameter	값 LIM
P	12
Pole pitch	0.1962 m
R_s	0.130 Ω
R_r	0.104 Ω
$L_{\sigma s}$	0.170 mH
$L_{\sigma r}$	0.374 mH
L_m	1.779 mH
$Speed_{max}$	55.6 m/s
$Force_{max}$	4000 N
$Power_{max}$	100 kW

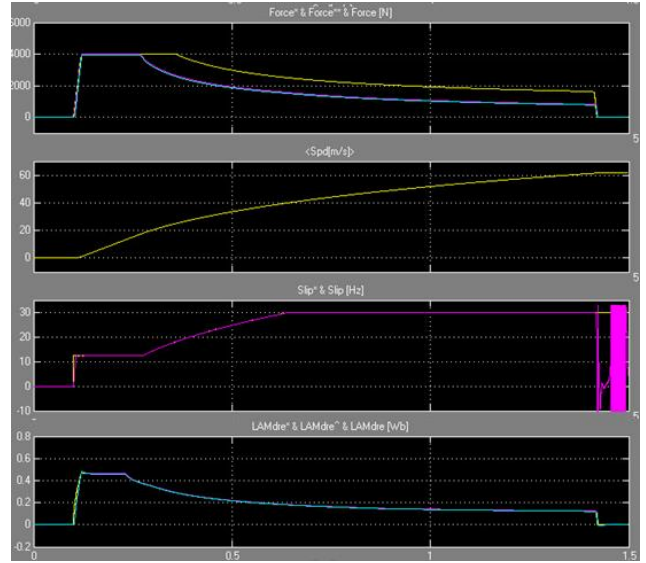


그림 3 LIM 벡터제어 시뮬레이션
Fig 3 LIM vector control simulation

그림3은 D=2.3m를 가정했을 때, 단부효과 보상알고리즘을 적용한 경우의 시뮬레이션 파형이다. 단부효과 보상의 보상원리는 매우 간단하며 제어알고리즘에서 사용된 L_m 값을 전동기와 마찬가지로 속도에 따라 변하는 시변함수로 가정하여 $L_m(1 - f(Q))$ 의 변수를 슬립계산 및 약계자제어, 자속추정기 등 사용된 모든 알고리즘에 적용하는 방법을 사용하였다.

3. 결론

LIM 제어에 따른 수직력을 고려하여 d축과 q축 전류를 제어함으로써, 필요로 하는 슬립주파수를 일정하게 유지하는 벡터제어기법을 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 단부효과 보상 알고리즘을 적용하면서 저속에서의 추력(Force)이 4000N 부근까지 이상 없이 나타나는 것을 볼 수 있다. 4000N의 값이 정확하게 나오지 않는 이유는 자속추정기의 오차로 인하여 실제 자속보다 약간 큰 자속을 추정하고 이를 이용하여 자속제어를 수행하기 때문이다.

본 논문에서는 단부효과를 고려한 회전자속 기준제어를 기반으로 슬립주파수 일정제어를 도입하여 시스템 모델링 및 시뮬레이션을 진행하면서 안정된 결과를 도출할 수 있었다.

본 논문은 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 2012년도 철도기술연구사업(06자기부상B01)의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] G. Kang and K. Nam, "Field oriented control scheme for linear induction motor with the end effect", IEE Proceedings online, Vol. 152, No. 6, pp. 1565-1572, 2005, November.
- [2] J. Duncan and C. Eng, "Linear induction motor equivalent circuit model", IEEE PROC, Vol. 130, No. 1, pp. 51-57, 1983, January