

장거리 운송시스템용 영구자석 선형 동기 전동기의 추진 제어 방법

김찬*, 이기창**, 박병건**, 문석환**, 송의호*
창원대학교*, 한국전기연구원**

Propulsion Control Method of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for Long Distance Transport System

Chan Kim*, Ki Chang Lee**, Byoung Gun Park**, Suk Hwan Moon**, Eui Ho Song*
*ChangWon University, **Korea Electrotechnology Research Institute

ABSTRACT

본 논문에서는 장거리 운송 시스템의 정밀 제어에 적합한 영구자석 선형 동기전동기의 추진 제어 방법을 제안하고자 한다. 적용 시스템은 코일이 고정되어 있고 영구자석이 이동자를 구성하는 형태로서 빠른 응답특성을 위해 아날로그 형태의 전류 제어기를 사용하였고, 섹션 전환을 통해 추진제어가 이루어진다. 제안한 추진 제어방법을 적용한 영구자석 선형 동기전동기의 구동에 대한 시뮬레이션을 통하여 제안한 방법의 구현 가능성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 공장 자동화 시스템 산업은 생산 규모가 커지고 생산 속도를 증가 시키기 위해 컨베이어와 같은 장거리 이송 시스템에 대한 수요가 증가하고 있다. 또한 평판 디스플레이, 반도체 집적과 같은 초정밀 공정에서는 장거리 이송이면서도 mm이하 단위의 서보제어를 필요로 한다. 장거리 이송 시스템에 적용 가능한 전동기 종류는 유도 전동기(Linear Induction Motor, LIM)와 영구자석 선형 동기 전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PMLSM)가 있다. 최근에는 영구자석 선형 동기 전동기를 많이 이용하고 있어 선형모터의 섹션 전환방식이나 DSP(Digital Signal Processor)제어기의 알고리즘 디자인과 같은 정밀 추진 제어를 위한 연구가 활발하게 진행 중에 있다^{[1][3]}. 그러나 장거리 이송 시스템에 영구자석 선형 동기 전동기를 적용할 경우 추진 제어를 위해서는 고정자 각각에 전원 공급을 위해 다량의 인버터를 필요로 하여 비용적인 문제가 발생 한다.

본 논문에서는 고정자와 제어기간의 릴레이 연결을 통해 제어기와 인버터의 수를 줄여 비용적인 문제를 해결하고, 또한 아날로그 PI전류기로 응답특성을 높이며 섹션 전환방식 통한 추진과 갭 센서를 통한 가이드를 총체적으로 하는 제어기법을 연구 하고자 한다. 본 논문의 제안한 추진제어 기법의 타당성을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증했다.

2. 제안한 추진제어 방법

2.1 영구자석 선형 동기전동기 시스템 구조

그림 1은 본 논문에서 연구한 영구 자석 선형 동기 전동기 시스템 구조를 나타낸다. 고정자인 코일에 위아래로 영구자석이

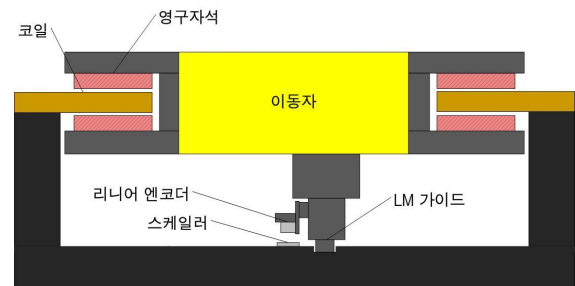


그림 1 영구자석 선형 동기전동기 시스템 구조
Fig. 1 System structure of PMLSM

배치되어 자속이 형성되어 추진력을 발생 시킨다. 발생된 추진력으로 이동자는 이동하게 되며, LM가이드에 의해서 가이드 제어가 이루어 진다. 이동자의 위치 정보는 리니어 스케일러 위에 장착된 리니어 엔코더를 통해 얻을 수 있다.

2.2 수학적 모델링

영구 자석 선형 동기 전동기를 d q축 좌표계로 나타내는 전압방정식은 다음 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_a & -vL_a \\ vL_a & R_a + pL_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + e \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

그리고, 전자기력을 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= \frac{3\pi}{2\tau_p} [\lambda_{PM}i_q + (L_a - L_q)i_d i_q] \\ &= \frac{3\pi}{2\tau_p} [\lambda_{PM}i_q + (L_a - L_q)i_d i_q] \end{aligned} \quad (2)$$

영구 자석 선형 동기 전동기에서 d q축 각각의 인덕턴스는 같고, 또한 벡터 제어에서 $i_d = 0$ 이므로 식(2)를 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{3\pi}{2\tau_p} \lambda_{PM} i_q = K_f i_q \quad (3)$$

식 (3)에서 i_q 를 제어하면 영구자석 선형 동기전동기의

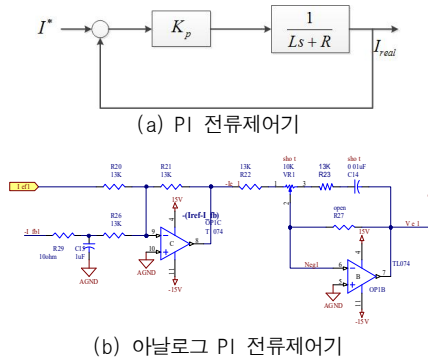


그림 2. 아날로그 P 전류 제어기
Fig. 2 Analog P Current Controller

추진력을 제어할 수 있다. 그러므로 선형전동기의 자속성분 전류 i_d 를 0으로 제어 하고, 토크성분 전류 i_q 를 일정한 크기로 제어 한다면 발생하는 전류는 고정좌표계로 나타내면 다음 식 (4)와 같이 상전류가 형성된다.

$$\begin{aligned} i_a &= I_q \sin(\theta) \\ i_b &= I_q \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ i_c &= I_q \sin(\theta + \frac{4}{3}\pi) \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 아날로그 P 제어기

선형 추진 제어의 정밀도와 빠른 응답특성을 얻기 위해 본 논문에서는 아날로그 P 제어기를 이용하여 전류제어기를 구성 하였다. 그림 2는 아날로그 P 전류 제어기를 보여준다. 그림 2(a)는 전류제어기의 블록도를 나타낸 것이며 그림 2(b)는 실제 사용된 아날로그 전류제어기의 구성을 나타낸 것이다. 아날로그 전류제어기의 구성은 그림 2(a)와 같이 비례 제어기만으로 구성하였다. 비례 제어기만 이용한 이유는 추진제어시스템의 전체 제어구성은 위치제어기와 전류제어기로 구성이 되는데 위치제어기와 전류 제어기 둘 다 적분 제어기를 이용하면 적분 Limit Cycle에 걸려 정상상태에서 외란이 없어도 서로간의 간섭에 의해 출력이 불안정해지기 때문이다.

2.4 섹션 절환 방법

장거리 이동을 위해서는 고정자 권선이 매우 많이 위치하게 된다. 이러한 고정자 권선의 제어를 각각 제어하기 위해서는 전력변환시스템 역시 많이 필요로 하기 때문에 본 논문에서는 각 권선을 릴레이를 이용하여 연결하고 제어기를 최소화 하는 형태로 구성하였다. 섹션 절환 방법은 이동자의 위치에 따라 제어기와 연결되는 고정자 권선의 릴레이를 켜주고 그에 맞는 전류를 제어하도록 구성하였다. 절환 시의 리플을 최소한으로 줄이기 위해 절환 시점은 전류가 0인 지점에서 다음 권선으로 전류를 흘려주도록 하였다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 영구자석 선형 동기전동기의 추진 제어를 위해 아날로그 P 제어기와 섹션절환 방법을 제안하였다. 시뮬레이션은 이러한 아날로그 P제어기의 구성과 섹션절환 방법에 대한 타당성을 검증하였다.

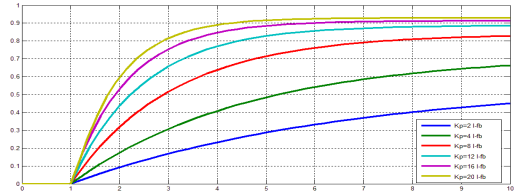


그림 3. 아날로그 전류 제어기 시뮬레이션 결과.
Fig. 3 Simulation result for Analog P Current Controller.

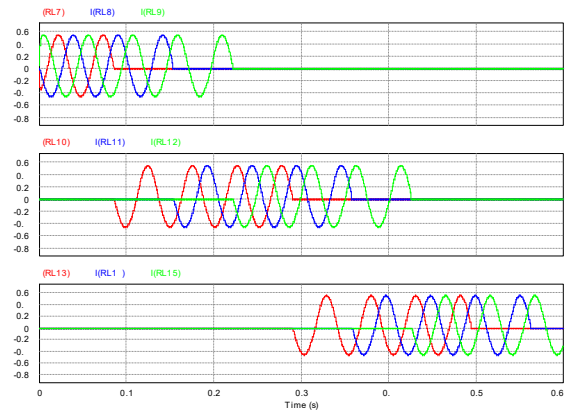


그림 4. 제안한 섹션절환 시뮬레이션 결과.
Fig. 4 Simulation result for Section transition.

그림 3은 아날로그 전류제어기 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션결과 P제어기의 특성상 오차가 나타나지만, 제어기 이득에 대한 응답특성을 통해 적절한 이득을 얻을 수 있다. 그림 4는 제안한 섹션 절환의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 각 권선의 제어가 이동자의 위치에 따라서 제어가 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 장거리 운송 시스템의 정밀 제어에 적합한 영구자석 선형 동기전동기의 추진 제어 방법을 제안하였다. 빠른 응답특성을 위해 아날로그 형태의 전류제어기와 고정자 권선간의 섹션절환 방법을 적용하였다. 제안한 추진 제어방법을 적용한 영구자석 선형 동기전동기의 구동에 대한 시뮬레이션을 통하여 제안한 방법의 구현 가능성을 검증하였다.

이 논문은 한국전기연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] Kenji Suzuki, "Driving Method of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with the Stationary Discontinuous Armature for Long Distance Transportation System," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 5, May 2012.
- [2] Ying Shieh Kung, "Design and Implementation of a High Performance PMLSM Drives Using DSP Chip," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.55, No.3, Mar. 2008.
- [3] L. Shi and J. Xie, "Propulsion Control for Controlled PM LSM Levitation System with Gap Length Fluctuation," *Proc. IEEE Conf. ICEMS2007*, pp. 1694-1697, SMP 29, 2007.