

# 루프형 LSM 구동 시스템의 모델링 및 섹션전환 알고리즘 개발

이나리, 양두영, 목형수

건국대 전기공학과 전력전자연구실(KOPEL)

## Modeling and Algorithm of Section Change for Loop Type LSM Drive System

Na-Ri Lee, Doo-Young Yang, HyungSoo Mok

Dept. of Electrical Engineering, Konkuk Univ.

1 Hwayang-dong Gwangin-gu Seoul 143-701, KOREA

### Abstract

3대의 인버터를 이용한 루프형 LSM 소형 시험장치의 섹션전환 기법의 모델링 방법에 대한 연구를 수행하였다. 원통형 동기 전동기를 선형 전동기로 변환하여 모델링을 하였다. 3대의 인버터가 교차되어 있는 형태이므로 Section Change시 변하는 역기전력에 따른 Force변화와 Jerk에 대해 시뮬레이션을 통하여 결과를 도출하였다.

### 1. Introduction

LSM은 회전형 전동기와 마찬가지로 전기자와 계자로 구성된다. LSM에서 계자를 차량에 설치하고 전기자를 궤도에 설치한다. 전 궤도에 걸쳐 설치되어 있는 전기자 권선은 임의의 순간 차량이 위치해있는 부분만 전력이 공급된다. 자기부상열차에 적용되는 LSM의 길이는 무한하지 않으므로 장거리 운행을 위해서는 여러 개의 고정자를 연결하여 구성한다. 이런 구조 때문에 각각의 고정자, 즉 각 섹션(Section) 별로 분리되는 형태로 LSM을 구성한다. 긴 선로 전체에 전력을 공급하는 것은 너무 큰 손실이 발생하게 되므로 섹션을 나누어서 전력을 공급하는 방식을 사용함으로써 운행의 효율성을 높일 수 있다. 각 섹션 별로 개별적인 제어 및 섹션 전환 시 인접한 섹션간의 동기를 맞춘 정확한 제어가 요구된다. 섹션 전환 시 제어가 되지 않는 경우 불필요한 Force가 발생되어 진동 및 소음이 발생할 수 있다.

### 2. 루프형 LSM 시험장치

#### 2.1 모델링

본 논문에서 사용된 LSM은 6개의 섹션을 가지고 있으며, 한 인버터가 외부와 내부의 3개의 섹션을 제어하게 되어있다. 한 개 섹션의 레일 안에는 6개의 전자석이 있어 궤도의 고정자에는 총 36개의 전자석이 배치 되어있다

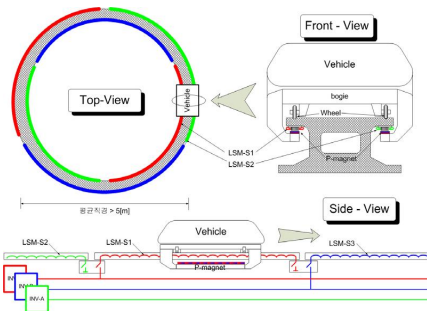


Fig. 1 Consist of Loop type LSM

#### 2.2 원운동을 선형으로 변환

힘의 단위는 원운동에서는 Torque이며, 선형운동에서는 Force로 나타낸다. 원형의 자석을 선형으로 만들었을 때, Fig.2와 같이 구조적으로  $\pi(\pi)=\tau(\tau)$ 로 된다. 식(1)은 이 원형전동기의 토크 식을 선형 전동기의 추력으로 변환하는데 사용한다.

$$F = T_e \times \frac{2}{P} \times \frac{2}{3} \times \frac{\pi}{\tau} \quad (1)$$

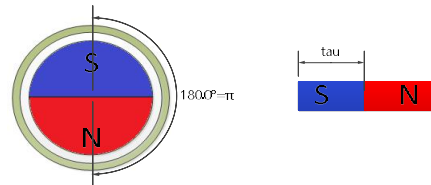


Fig.2 Transformation from Circle Force to Linear Force

#### 2.3 속도에 따른 최대 전류

차량의 Jerk가 기준치 이하가 되어야 하므로 속도와 전류에 따라 어떤 변화가 있는지 알기 위하여 속도에 따른 최대 전류 값을 알아야 한다.

##### 2.3.1 모터 전압 제한 조건과 전압 방정식

전압의 최대치와 SPMSM(Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor)의 전압방정식을 이용하여 속도에 따른 전류 값을 구하게 된다.

$$V_{ds}^{r*2} + V_{qs}^{r*2} \leq V_{smax}^2 \quad (2)$$

$$V_{ds}^r = R_s i_{ds}^r + L_{ds} \frac{di_{ds}^r}{dt} + \phi_f - \omega_r L_{qs} i_{qs}^r \quad (3)$$

$$V_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + L_{qs} \frac{di_{qs}^r}{dt} + \omega_r (L_{ds} i_{ds}^r + \phi_f) \quad (4)$$

$V_{smax}$  는 상전압의 최대값,  $V_{ds}^r$  는 동기 d축 전압,  $V_{qs}^r$  는 동기 q축 전압을 뜻하며,  $\phi_f$  는 자속,  $\omega_r$  전기자 회전 속도를 뜻한다. 위 (3), (4)번 식에서  $i_{ds}^r = 0$ , 전류의 변화는 없다고 가정한다.

$$V_{ds}^r = \phi_f - \omega_r L_{qs} i_{qs}^r \quad (5)$$

$$V_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + \omega_r \phi_f \quad (6)$$

위 식에서 앞 항은 저속에, 뒤 항은 고속에 많은 영향을 미치므로, 저속과 고속을 분류하여 계산을 한다.

### 2.3.2 저속영역

$$\phi_f^2 + (R_s i_{qs}^r)^2 \leq V_{s \max}^2 \quad (7)$$

$$i_{qs}^r \leq \frac{1}{R_s} \sqrt{V_{s \max}^2 - \phi_f^2} \quad (8)$$

식(7),(8)과 같이 저속영역에서는 인덕턴스 값에 대한 영향이 저항 값에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다.

### 2.3.3 고속영역

$$(-\omega_r L_{qs} i_{qs}^r)^2 + (\omega_r \phi_f)^2 \leq V_{s \max}^2 \quad (9)$$

$$i_{qs}^r \leq \frac{1}{L_{qs}} \sqrt{\frac{V_{s \max}^2}{\omega_r^2} - \phi_f^2} \quad (10)$$

식 (9),(10)을 통해 고속 영역에서는 저항 값이 인덕턴스 값에 비해 무시할 정도로 작다는 것을 알 수 있다.

### 2.3.4 결과

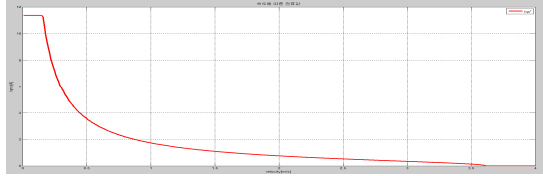


Fig. 3 Maximum Current according to speed graph

Fig.3을 통하여 그래프 곡선의 아래 부분이 속도에 따른 전류의 영역임을 알 수 있다.

### 2.4 LSM 위치에 따른 역기전력의 변화 분석

Fig.4는 LSM 모델의 12시 방향을 차량 출발의 기준점으로 잡고 대차가 360도, 한 바퀴 도는 동안 각도의 변화에 따라 인버터에 발생하는 역기전력의 변화 값을 그래프로 나타내었다.

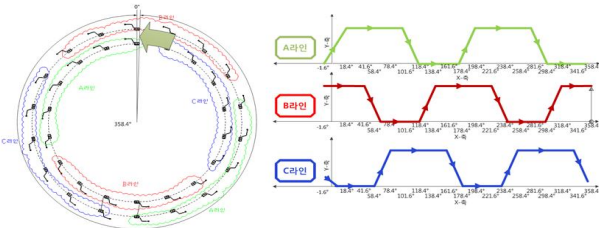


Fig. 4 Angle Change and Variation of Back Emf

### 3. 섹션전환 알고리즘

역기전력 변화에 의해서 Section Change 되는 부분에 힘은 감소하게 된다.

$$T_e = \frac{P}{2} \times \frac{3}{2} \times \phi_f \times i_{qs}^r \quad (11)$$

SPMSM 토크 식에 의해  $i_{qs}^r$  이 일정할 때,  $\phi_f$  가 감소하면 토크가 감소하게 됨을 알 수 있다. 이 식을 검증하기 위해 LSM 시스템을 모델링하여 Section Change하는 부분에서 토크 리플이 발생하게 되는지 알기 위한 시뮬레이션을 하였다.

시뮬레이션은 섹션전환 하는 부분에 스탭형식으로 전류를 인가하는 방식으로 하였으며, 속도는 0.8m/s로 일정하게 유지하였다.

### 4. Conclusion

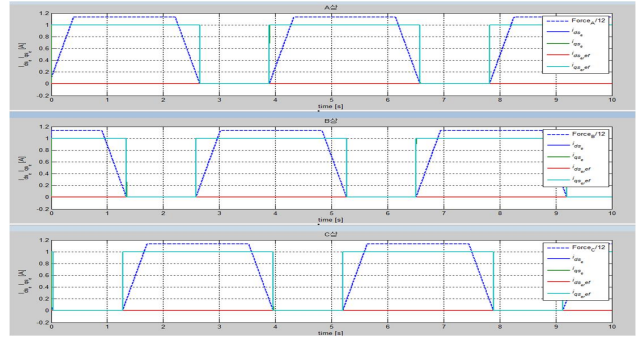


Fig. 5 Current and Force graph with Section Change

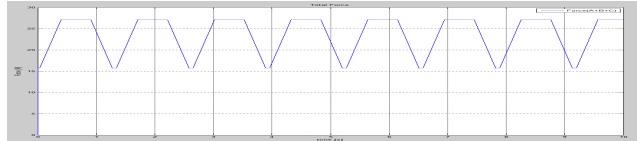


Fig. 6 The Sum of the 3 Inverter Force

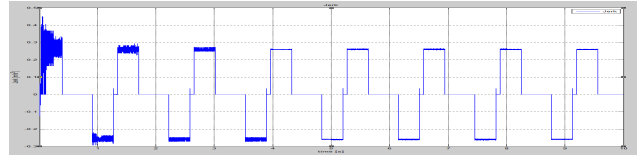


Fig. 7 Jerk graph with Section Change

위의 그래프와 같이 시뮬레이션 결과 값을 얻을 수 있었다. 대차가 완전히 빠져나간 섹션에는 인버터를 OFF시키고 차량이 선로에 들어오는 시점에서 ON하는 ON/OFF 방식의 섹션전환을 하였다. Fig.5의 그래프는 구간별 전류의 입력 값에 따른 Force값의 변화를 나타내었다. 여기서 전류는 Step형식으로 입력되는데 비해 Force의 값은 사다리꼴 모양의 위에서 본 역기전력 형태와 유사함을 알 수 있었다. Fig.6는 각 인버터에서 출력된 Force값의 합을 보았다. 섹션 전환 시 마다 Force값의 변동이 규칙적으로 있음을 알 수 있다. Force값의 변화량이 승차감에 미치는 영향을 알아보기 위하여 단위시간당 가속도의 변화율인 Jerk 그래프를 보았다. 그 결과인 Fig.7의 Jerk 값이 “도시철도 차량 성능시험에 관한 기준”의 기준치인 0.8m/s<sup>3</sup> 이하 안에 있음을 확인할 수 있다

### Acknowledgment

본 연구는 국토해양부에서 시행하는 기술료 사업의 “루프형 LSM 소형 시험장치 및 차량 궤도 시스템 간의 인터페이스 기술개발” 과제로부터 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.

### Reference

- [1] Jeong-Min Jo, "Design of Test Equipment for LSM Section Switching Test", Spring Conference of The Korean Society for Railway, 2011
- [2] Jin-Ho Lee, "Development of Loop Type LSM Testbed for Section Control", Spring Conference of the Korean Society for Railway, 2012
- [3] Kenji Suzuki, "Modeling about the Discontinuous Armature Arrangement Interval of the Permanent Magnet Type Linear Synchronous Motor", Darmstadt, 2008