

# 복수 가동자를 가지는 가동 자석형 선형 동기 전동기의 구현

곽무신, 설승기  
서울대학교 전력전자연구실

## Implementation of Multi-Mover Moving Magnet Type Linear Synchronous Motor

Mu-Shin Kwak and Seung-Ki Sul  
Power Electronics Laboratory, Seoul National University

### ABSTRACT

This paper presents a new partial excitation method of the moving magnet type linear synchronous motor(MMLSM) and proposes a new way of implementation for multi-mover MMLSM. Originally, partial excitation circuit which excites the coils only under the magnet is necessary for proper operation of MMLSM. In conventional partial excitation method there is inevitably impedance unbalance situation. So a new partial excitation method is proposed to solve this impedance unbalance problem. Based on this partial excitation method, a novel control method for multi-mover MMLSM is proposed. The validity and performance of the proposed partial excitation method and multi-mover MMLSM is verified by experimental results.

### 1. 서 론

최근 여러 산업 분야에서 전기 기계를 이용한 직선 운동 구동 시스템의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 직선 운동을 가능하게 하는 선형 전동기(Linear Motor : LM) 중에서도 효율이 좋은 선형 동기 전동기(Linear Synchronous Motor : LSM)가 많이 이용되고 있다<sup>[1]</sup>.

선형 동기 전동기는 가동자가 코일인가 자석인가에 따라 두 가지 종류로 대별된다. 가동자가 코일이고 고정부인 레일이 자석으로 배치되는 형식의 전동기를 가동 코일형 선형 동기 전동기(Moving Coil type Linear Synchronous Motor : MCLSM)라 하고 가동자가 자석이고 레일이 코일로 구성되는 형식의 전동기를 가동 자석형 선형 동기 전동기(Moving Magnet type Linear Synchronous Motor

: MMLSM)라 한다. MCLSM과 비교해 볼 때 MMLSM은 가동자를 따라 3상 전원 라인이 움직여야 할 필요가 없고 고정부인 레일이 자석보다 가격이 저렴한 코일로 배치되기 때문에 전동기의 가격이 더 저가라는 장점이 있다.

MMLSM의 경우에는 가동자의 위치에 따라 해당 위치에 있는 코일만 여자시켜 주는 부분 여자 회로가 부가적으로 필요한데 기존의 부분 여자 회로는 동작의 특성상 전동기의 임피던스 불평형을 초래하므로 제어기의 성능향상에 제한 조건이 된다.

MMLSM은 가동자가 자석이므로 복수 가동자를 가지는 선형 동기 전동기의 구현이 용이하지 않다. 복수 가동자를 가능하게 하기 위해서는 각각의 가동자의 위치에 따라 해당 위치의 코일을 ABC 3상과 UVW 3상으로 분리하여 여자 시킬 수 있는 부분 여자 회로가 필요하다.

본 논문에서는 기존의 부분 여자 회로의 임피던스 불평형 문제를 밝힌 후 이를 해결할 수 있는 새로운 부분 여자 방법을 제안하고 이를 바탕으로 복수 가동자를 가지는 선형 동기 전동기를 구현할 수 있는 부분 여자 회로를 제안한다. 그리고 제안된 부분 여자 회로의 성능을 실험으로 입증한다.

### 2. 복수 가동자를 가지는 선형 동기 전동기 구현을 위한 부분 여자 회로 제안

#### 2.1 기존의 부분 여자 회로의 문제점

기존의 부분 여자 회로는 그림 1에서 보이는 것과 같이 홀센서(Hall sensor)를 이용해서 가동자의 위치를 감지한 후 TRIAC를 켜 주는 방법으로 해당 코일을 여자시켜 준다<sup>[2]</sup>. 하지만 부분 여자를 위해 사용한 TRIAC은 턴오프의 제어가 불가능한 소자이기 때문에 그림 2에서 볼 수 있는 것과 같이

한 코일을 꺼 주고 다른 코일을 켜 주는 절환이 동시에 일어날 수 없다.

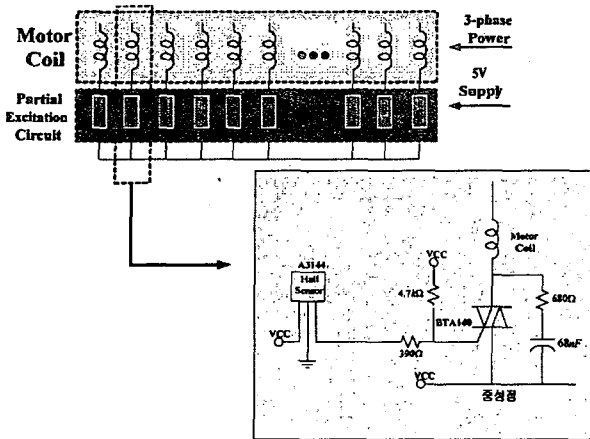


그림 1 홀센서를 이용한 기존의 부분 여자 회로  
Fig. 1 Conventional partial excitation circuit

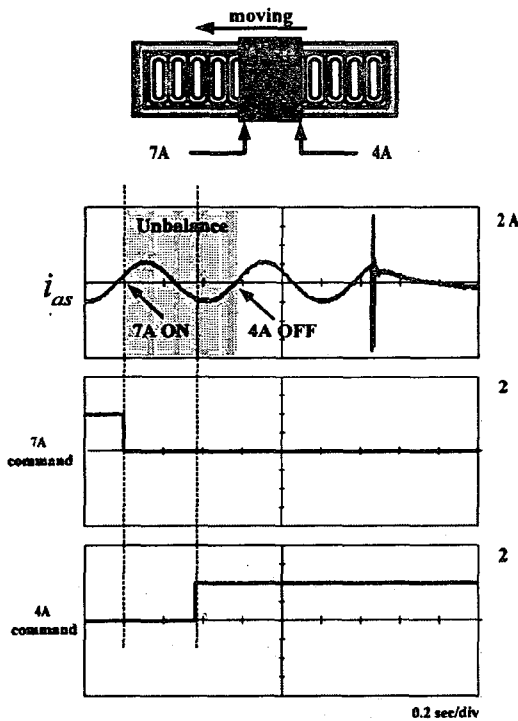


그림 2 기존의 부분 여자 방법에서 발생하는 임피던스 불평형  
Fig. 2 Impedance unbalance in conventional partial excitation circuit

그림 2에서 4A는 가동자가 이동함에 따라 꺼져야 할 코일의 이름이고 7A는 이와 동시에 켜지길 바라는 코일의 이름을 나타낸다. 그리고 4A command는 코일 4A에 인가되는 홀센서 출력 지령이고 7A는 코일 7A에 인가되는 홀센서 출력 지령이다. command가 0일 때 TRIAC이 ON이 되는

데 그림에서와 같이 홀센서의 ON, OFF 지령이 발생할 때 음영으로 표시된 구간동안은 A상의 코일이 하나 더 켜져 있는 것으로서 이 구간동안 전동기는 임피던스가 불평형인 상태로 운전된다. 전동기의 임피던스가 불평형이 되면 등가모델이 유효하지 않게 될 뿐만 아니라 공간벡터 PWM의 기본 가정에도 어긋나게 되어 전류, 속도, 위치 제어의 대역폭 저하 등의 악영향을 미친다.

## 2.2 제안된 부분 여자 방법

앞서 설명한 것과 같이 기존의 부분 여자 방법으로는 임피던스 평형을 유지할 수 없다. 본 연구에서 제안하는 새로운 부분 여자 방법은 여자되는 코일을 동시에 절환하여 항상 임피던스 평형 상태를 유지할 수 있게 한다. 이를 위해서 그림 3에 나타난 것과 같이 트라이악의 턴오프 지령을 전류 0인 시점에서 인가하고 같은 상의 턴온 지령을 이보다 전기각 90° 앞선 시점에서 인가하여 전류 0인 시점에서 코일이 동시에 절환되도록 한다. 그림 3은 가동자가 양의 방향(q축 전류가 양의 부호)으로 이동할 때의 상 전류의 파형이다. 이와 같은 지령을 부분 여자 회로에 인가하면 A상의 코일은 ②번으로 표시된 시점에 동시에 절환된다.

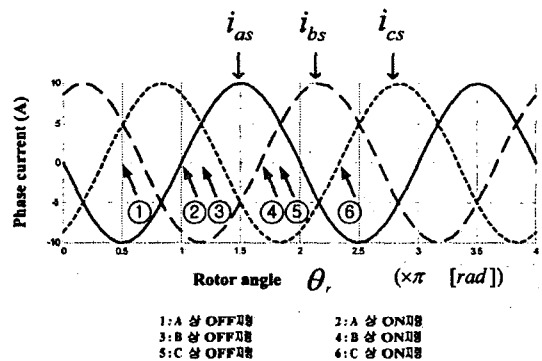


그림 3 전기각 진행에 따른 트라이악 구동 신호 인가시점

Fig. 3 TRIAC gating signal vs. electrical angle

제안된 트라이악 구동 알고리즘은 주 제어 보드에 입력되는 전기각 정보를 이용하여 신호 인가 시점을 판별한 후 부분 여자 제어 회로에 인가하는 방법이다. 주 제어 보드에서 트라이악 게이팅 시점을 판별하는 알고리즘을 수식화 하면 표 1과 같이 된다. 음의 방향으로 진행할 때(q축 전류가 음의 부호)는 OFF 시점을 나타내는 수식의 '-π/2'가 '+π/2'로 바뀐다.

표 1 양의 방향으로 진행할 때  
부분 여자 제어 알고리즘의 수식화  
(N : 정수)

Table 1 Formulation for partial excitation  
when moving positive direction  
(N : integer number)

	ON	OFF
A phase	$4\pi N + \pi$	$4\pi N + \pi - \pi/2$
B phase	$4\pi N + \pi + 2\pi/3$	$4\pi N + \pi + 2\pi/3 - \pi/2$
C phase	$4\pi N + \pi + 4\pi/3$	$4\pi N + \pi + 4\pi/3 - \pi/2$

그림 4는 위에서 제안된 부분 여자 알고리즘을 적용하여 구현한 TRIAC 게이팅 신호를 보여 준다. 앞의 그림 2와 비교해 볼 때 4A의 턴오프 지령이 7A의 턴온 지령보다 전기각  $90^\circ$  만큼 앞서게 됨으로써 여자 코일이 동시에 절환될 수 있음을 확인할 수 있다.

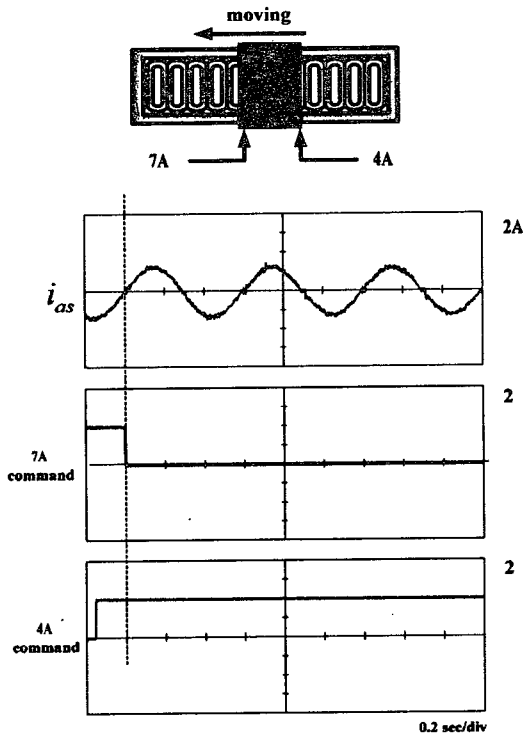


그림 4 제안된 부분 여자 방법으로 인가하는  
트라이악 구동 지령  
Fig. 4 TRIAC gating signal using proposed partial  
excitation method

### 2.3 제안된 복수 가동자 MMLSM의 구현 방법

그림 5는 복수 가동자를 가지는 가동 자석형 선형 동기 전동기의 구현을 가능하게 하기 위해 제안된 부분 여자 회로의 구성도이다. 각각의 가동자가 이동함에 따라 주 제어 보드에서 가동자의 위치를 파악하여 해당 코일을 이것에 해당하는 인버터 출

력에 별도로 여자시켜 주는 방법이다. 이 때 각각의 가동자에 적용되는 부분 여자 방법은 앞서 제안된 부분 여자 방법이다. 제안된 부분 여자 방법에 이용되는 트라이악 게이팅 신호는 주 제어 보드에서 발생되어 시리얼 통신 방식인 SPI(Serial Peripheral Interface) 방식으로 제안된 부분 여자 회로에 전달된다.

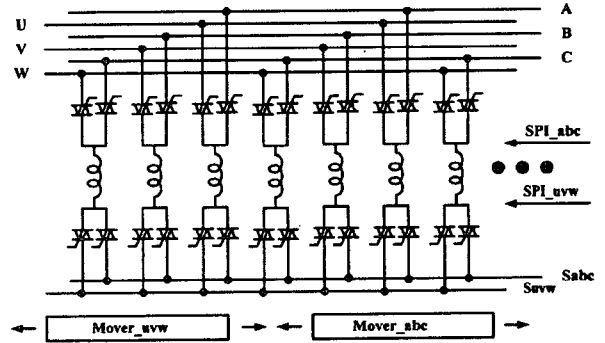


그림 5 복수 가동자를 가지는 가동 자석형 선형 동기  
전동기 구현 방법

Fig. 5 Implementation of Multi-Mover MMLSM

### 2.4 실험 결과

앞에서 제안된 복수 가동자 MMLSM 구현 방법의 성능을 실험을 통해 입증하였다. 실험에 사용된 전동기는 그림 6에서 보이는 것과 같이 동일한 가동자를 레일 하나에 두 개 탑재하여 구성하였다. 그리고 제안된 부분 여자 방법을 적용한 부분 여자 회로를 그림 7과 같이 제작하고 TMS320VC33을 이용한 DSP 제어 보드를 이용하여 S-curve를 적용한 위치 제어 실험을 수행하였다. 가동자 Mover\_uvw는 30cm, Mover\_abc는 40cm를 이동하도록 제어 했다. 그림 8은 두 개의 가동자를 동시에 구동하였을 때의 동기 좌표계상의 q축 전류 지령치와 측정된 전류 값을 보여 준다. 그림에서  $i_{qs\_uvw}^*$ 와  $i_{qs\_abc}^*$ 는 각각 두 가동자에 해당하는 q 축 전류 지령이고  $i_{qs\_uvw}^r$ 와  $i_{qs\_abc}^r$ 은 측정된 전류이다. 그림 9에서 Flag\_moving\_uvw는 가동자 Mover\_uvw의 위치제어 패턴이 끝나는 시점을 표시하는 플래그(flag)이고 Flag\_moving\_abc는 Mover\_abc의 패턴이 끝나는 시점을 나타내는 플래그이다. 그리고 Err\_Posi\_uvw와 Err\_Posi\_abc는 각각의 가동자의 위치 오차를 보여준다. 그림에서 보는 것과 같이 위치 지령의 패턴이 끝나는 시점으로부터 10ms 이내에 위치 오차가  $10\mu\text{m}$  이하로 제어된다. 위치 제어기는 비례 적분 제어기로 구성된 속도 제어기와 비례 적분기로 구성된 벡터 제어기로 이루어져 있다.



그림 6 실험에 사용된 복수 가동자 가동 자석형 선형 동기 전동기  
Fig. 6 Multi-Mover MMLSM

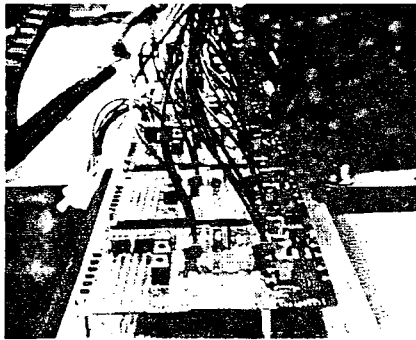


그림 7 제안된 부분 여자 회로 보드  
Fig. 7 Proposed partial excitation circuit board

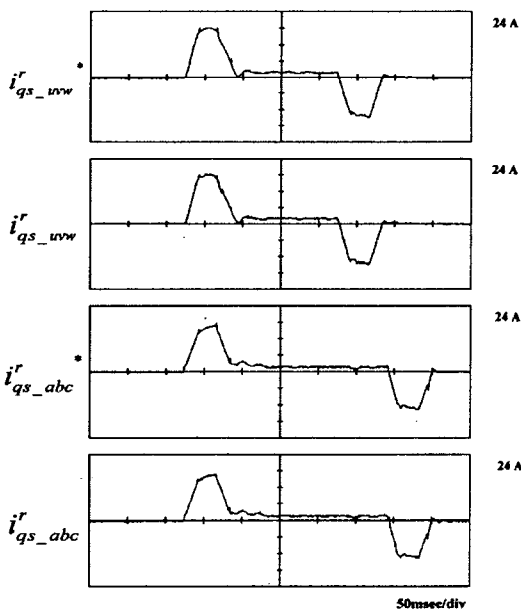


그림 8 두 개의 가동자를 동시에 위치 제어 했을 때의 q 축 전류 지령과 측정된 전류  
Fig. 8 q-axis current command measured current when both mover position controlled

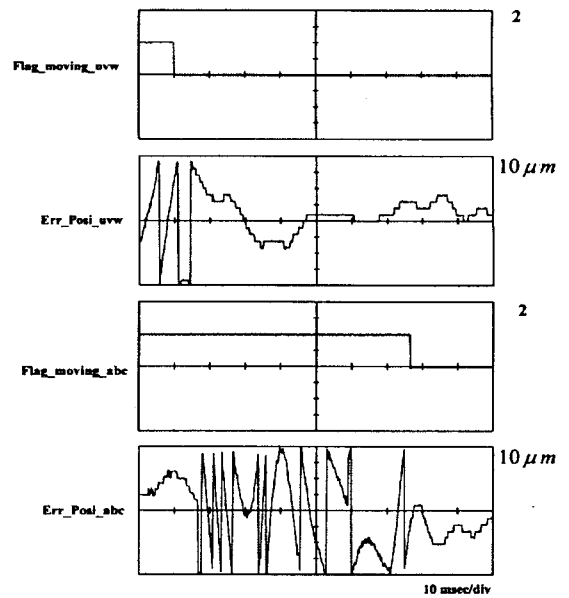


그림 9 두 개의 가동자를 동시에 구동했을 때의 위치 제어 성능  
Fig. 9 Performance of position control

### 3. 결 론

본 연구에서는 가동 자석형 선형 동기 전동기의 임피던스 평형을 유지하는 새로운 부분 여자 방법을 제안하고 이를 바탕으로 복수 가동자를 가지는 가동 자석형 선형 동기 전동기를 구현할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 부분 여자 방법과 복수 가동자 선형 동기 전동기의 동작 및 그 성능을 실험을 통하여 입증하였다.

이 논문은 미래산업의 실험 장치 지원에 의하여 연구되었음

### 참 고 문 헌

- [1] 류형민, "자속 및 속도 검출기가 없는 선형 유도 전동기의 추력 제어," 서울대학교 공과대학 석사 학위 논문, 2000.
- [2] Sang-Yong Jung, Jang-Sung Chun, Hyun-Kyo Jung, "Performance evaluation of slotless permanent magnet linear synchronous motor energized by partially excited primary current," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 37, no. 5, part 1, pp. 3757~3761, 2001.