

# 리니어펄스모터 추진 제어 알고리즘 연구

최재혁, 김기현, 목형수  
건국대학교

## Development of the Propulsion Control Algorithm of the Linear Pulse Motor

Jae Hyuk Choi, Ki Hyeon Kim, Hyung Soo Mok  
Konkuk University

### ABSTRACT

본 논문에서는 새로운 형태의 철도 차량용 추진 시스템인 리니어펄스모터의 구조적 특징을 분석하고 그 구조적 특징으로 발생하는 문제점의 해결방안을 제시한다. 따라서 지상에 포설되는 2상의 고정자 상권선 중 A상 권선 상부에 B상 권선이 적층되어 포설되는 특징으로 인하여 발생하는 일종의 토크 리플 성분을 저감하기 위한 기법을 제시하며 모의실험 및 실제 실험을 통하여 제시한 토크 리플 저감 기법의 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

리니어펄스모터(Linear Pulse Motor)는 기존 방식에서 탈피한 새로운 형태의 철도차량 추진 시스템으로 각각 동일한 직류 전원에 병렬로 연결된 풀 브릿지 인버터를 통하여 전원을 공급받는 2상 구조의 상권선으로 이루어진 고정자와 회전자인 대차로 구성되며 대차 하부에는 영구자석이 장착된다.

리니어펄스모터의 역기전력 파형은 근사 사다리꼴 형태로 발생하며 45도 간격으로 부착된 홀센서를 사용하여 BLDC 전동기와 유사하게 제어된다.

리니어펄스모터의 고정자 상권선은 지상에 포설되는 형태이며 하부에 A상 권선 포설 후 상부에 B상 권선이 적층되어 포설되는 적층 구조를 가진다. 이러한 적층 구조는 영구자석에서 발생한 자속이 대차 이동 속도가 동일하고 고정자와 회전자 사이의 공극이 일정한 상황에서도 각 상권선에 쇄교하는 쇄교자속량 최대치의 차이를 야기한다. 이것은 발생 역기전력의 차이로 나타나며 이러한 역기전력의 차이는 상권선 별 발생 토크의 차이를 발생시킨다. 이것은 일종의 토크 리플 성분으로 작용하며 이러한 토크 리플 성분의 영향으로 철도 차량 운행 중 소음 및 진동 증가, 승차감 저하, 손실 증가가 발생함으로 토크 리플 저감 기법의 적용이 요구된다.

### 2. 고정자 상권선 적층 구조로 인한 발생 토크 리플 저감 기법

리니어펄스모터의 구조적 특징인 고정자 상권선의 적층으로 발생하는 일종의 토크 리플 성분을 보상하기 위하여 MKS 단위계에서 역기전력 상수와 토크 상수의 값이 같음을 이용한다. 따라서 리니어펄스모터의 역기전력 상수를 정의하고 그에 따른

토크 상수 정의 및 정의된 토크 상수를 사용하여 입력된 토크 지령을 만족하는 전류 지령 값을 생성한다. 생성되어진 전류 지령 값을 사용하여 각 상권선의 상전류를 상이하게 제어함으로써 발생 토크 리플을 저감한다.

일반적인 BLDC 전동기의 역기전력 상수는 가변된다.<sup>[1]</sup> 하지만 병렬로 연결된 풀 브릿지 인버터 2대 중 언제나 1대만이 발생 토크에 기여하는 리니어펄스모터는 이러한 구조적 특징으로 발생 토크에 기여하고 있는 역기전력은 회전자 위치에 따라 2가지 직류 값을 갖는 형태로 나타난다. 따라서 역기전력 상수 또한 하나의 고정값을 갖는 형태가 아닌 회전자 위치에 따라 2가지 값을 갖는 형태로 표현된다. 따라서 쇄교자속의 미분형태로 표현되는 발생 역기전력을 역기전력 상수를 사용하여 간단하게 표현하면 식 (1)와 같다.

$$E = \begin{cases} K_{eb}\omega_m & (-45^\circ < \theta_r \leq 45^\circ) \\ K_{ea}\omega_m & (45^\circ < \theta_r \leq 135^\circ) \\ K_{eb}\omega_m & (135^\circ < \theta_r \leq 225^\circ) \\ K_{ea}\omega_m & (225^\circ < \theta_r \leq 315^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

MKS 단위계에서 역기전력 상수와 토크 상수는 동일하다. 따라서 토크 상수 또한 2가지 값을 갖는 형태로 표현 가능하며 발생 토크를 토크 상수를 사용하여 표현하면 식 (2)과 같다.

$$T_c = \begin{cases} K_{tb}I & (-45^\circ < \theta_r \leq 45^\circ) \\ K_{ta}I & (45^\circ < \theta_r \leq 135^\circ) \\ K_{tb}I & (135^\circ < \theta_r \leq 225^\circ) \\ K_{ta}I & (225^\circ < \theta_r \leq 315^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)로부터 지령 토크를 만족하는 전류 값의 연산이 가능하다. 따라서 연산되어진 전류 지령 값을 전류 제어기 입력으로 사용하여 각 고정자 상권선 입력 전류를 상이하게 제어하면 리니어펄스모터의 고정자 상권선 적층에 따른 발생 토크 리플 저감이 가능하다. 지령 토크를 만족하는 전류 지령 값은 식 (3)과 같다.

$$I_{ref} = \begin{cases} \frac{T_{ref}}{K_{ta}} & (step1, step3) \\ \frac{T_{ref}}{K_{tb}} & (step2, step4) \end{cases} \quad (3)$$

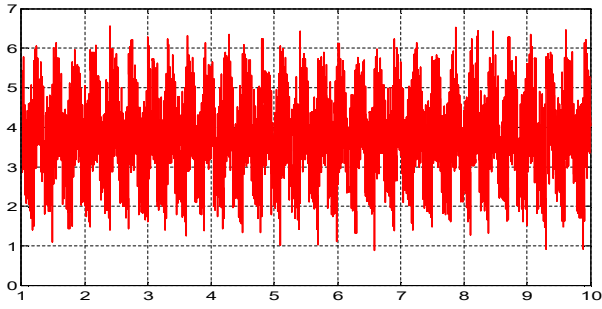


그림 1 보상 기법 미적용 추력 (모의실험)  
Fig 1 Thrust without compensation technique (simulation)

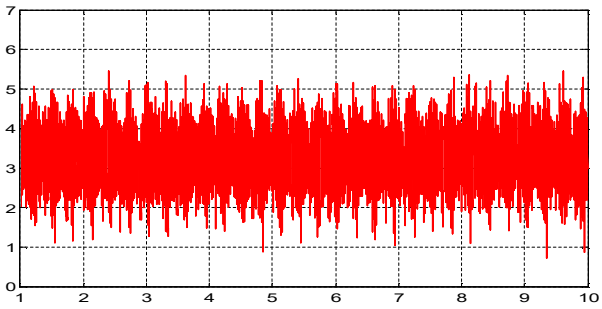


그림 2 보상 기법 적용 추력 (모의실험)  
Fig 2 Thrust with compensation technique (simulation)

#### 4. 모의실험

그림 1은 보상 기법 미적용 시 정격 전류인  $150[A]$ 에서 발생 추력이다. 회전자인 대차가 이동함에 따라 추력에 기여하는 상권선이 교번하여 변화하며 그에 따라 발생 추력 또한 가변됨이 확인된다. 이때 평균 추력은 약  $3.64[N]$ 이며 추력에 포함되는 리플율은 약  $155.8[\%]$ 로 크게 발생한다.

그림 2는 보상 기법 적용 시 발생 추력이며 모의실험 조건은 미적용 시와 동일하다. 이때 입력된 지령 추력 값은  $3.142[N]$ 이며 평균 발생 추력은  $3.11[N]$ 으로 정확히 추종함을 확인하였으며 추력에 기여하는 상과 무관하게 일정한 추력이 발생함을 확인하였다..

#### 5. 실험

그림 3은 실제 실험에서 보상 기법 미적용 시 발생한 추력을 로드셀을 사용하여 측정된 결과값이며 모의실험과 동일하게 추력에 기여하는 상이 변화함에 따라 발생 추력 또한 변화하는 것이 확인된다. 이때 발생 추력의 평균은 약  $3.89[N]$ 이며 추력 리플은 약  $77[\%]$ 이다. 동일 조건 모의실험 시 발생 추력은 약  $3.665[N]$ 으로  $6[\%]$ 의 오차율은 보인다.

그림 4는 보상 기법 적용 시 발생하는 추력이며 모의실험과 동일하게 추력에 기여하는 상과 무관하게 일정한 추력이 발생함을 확인하였다. 이때 발생하는 추력은  $3.142[N]$ 의 추력 지령에서  $3.11[N]$ 이며 추력 리플은 약  $48[\%]$ 이다. 동일 조건 모의실험 시 발생 추력은 약  $3.14[N]$ 으로 오차율은  $1[\%]$ 다.

실험 결과 보상 기법 미적용 대비 보상 기법 적용 시 발생 추력에 함유되는 리플은 약  $37.66[\%]$  감소된다. 따라서 제한된 상권선 적층에 따른 토크 리플 보상 기법이 효과적임을 확인하였다.

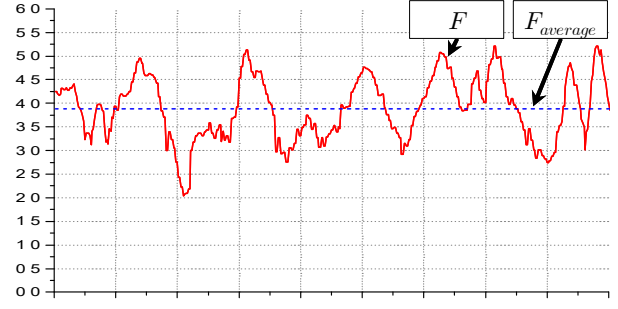


그림 3 보상 기법 미적용 추력 (실험)  
Fig 3 Thrust without compensation technique (experiment)

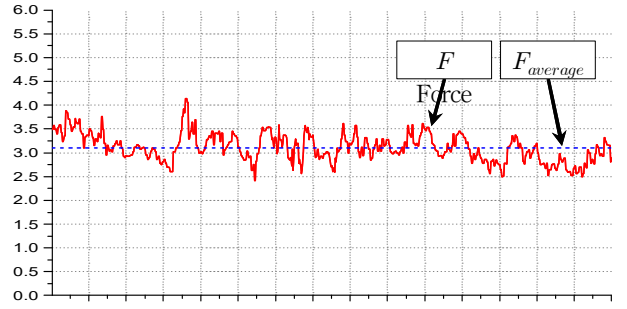


그림 4 보상 기법 적용 추력 (실험)  
Fig 4 Thrust with compensation technique (experiment)

표 1 전동기 파라미터

Table 1 Value of motor parameters

저항	$26 [m\Omega]$	인덕턴스	$28 [\mu H]$
극 수	$2 [pole]$	무게	$7.9 [kgf]$
직류전압	$20 [V]$	정격 전류	$150 [A]$

#### 6. 결론

새로운 형태의 철도차량 추진 시스템인 리니어펄스모터는 구조적 특징인 고정자 상권선 적층 구조로 인하여 발생 토크가 토크에 기여하는 상에 따라 변화한다. 이는 일종의 토크 리플 성분으로 나타난다. 따라서 이러한 리플 성분을 저감하는 기법이 요구되며 본 논문에서 토크 상수를 사용한 저감 기법을 제시 하였다. 또한 제시된 저감 기법을 모의실험과 실제 실험을 통하여 리플 저감에 효과적임을 검증하였다.

본 논문은 국토교통과학기술진흥원에서 시행하는 리니어 펄스모터 기반 철도차량 추진시스템 원천기술 개발(과제번호 : 14ENGF C067865 02)의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- [1] D. Lin, P. Zhou, and Z.J. Cendes, "In Depth Study of The Torque Constant for Permanent Magnet Machines", IEEE Trans. Magn., Vol. 45, No. 12, pp. 5383-5387, 2009, December.