

가동 코일형 PMLSM의 단부효과에 의한 디텐트력 저감에 관한 연구

정수권*, 이승훈, 이동엽, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

A study on the reduction of detent force by end-effect
 in moving magnet type PMLSM

Su-Kwon Jeong*, Seung-Hoon Lee, Dong-Yeup Lee and Gyu-Tak Kim
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Univ.

Abstract - The detent force by end-effect has a bad influence on moving coil type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM). So, the reduction of detent force by end-effect is especially required for improvement of thrust characteristics. In this paper, in order to reduce detent force by end-effect the auxiliary teeth is installed at the end part of mover and it is optimized by using neural network.

1. 서 론

최근 PMLSM은 종래의 회전기를 이용하여 직선운동으로 변환하는 시스템보다 높은 효율성과 정밀 제어성 및 높은 에너지 밀도 등의 특성으로 전기 철도, 공장 자동화의 반송 시스템, 반도체 제조장비 등의 직선 운동을 요구하는 분야는 물론 사무 자동화에 이르기까지 널리 이용되고 있다.

그러나 PMLSM은 구조상 자기 저항 차이로 인해 필연적으로 디텐트력이 발생하게 되는데, 이러한 디텐트력은 전동기의 추력 맥동으로 작용하여 제어 성능을 저하시키고 기기의 소음과 진동을 발생시키는 등의 많은 악영향을 끼친다. 따라서 기기의 제반 특성을 향상시키기 위한 디텐트력 감소는 필수적이고 이를 위한 많은 연구가 수행되었다[1].

위에서 언급한 디텐트력은 영구자석과 전기자의 슬롯-치 구조에 의해 발생하는 디텐트력과 회전자와는 달리 PMLSM의 가동자의 길이가 유한하여 단부가 존재하는데, 이러한 단부효과에 의해 발생하는 디텐트력으로 크게 나눌 수 있다. 전자는 영구자석이나 슬롯에 스류를 주는 방법이나 반폐슬롯을 사용하는 방법 등으로 제거할 수 있다. 후자는 가동 영구자석형 PMLSM의 경우 가동자의 단부에 보조극을 설치하여 감소시킬 수 있지만, 가동 코일형 PMLSM의 경우에는 단부효과에 의한 디텐트력이 가동 영구자석형 PMLSM보다 더 크게 발생함에도 불구하고 이를 감소시키기 위한 연구가 아직까지 미비하다.

따라서 본 논문에서는 단부효과에 의한 디텐트력을 감소시키기 위해 가동자의 단부에 보조치를 설치하였으며, 보조치의 최적화를 위하여 신경회로망을 적용하였다. 디텐트력 최소화를 위한 설계 변수로는 보조치의 높이와 폭, 주치와의 이격거리를 선정하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

표 1은 본 논문의 해석 모델인 가동 코일형 PMLSM의 기본 설계치수와 전기적 사양을 나타낸 것이다.

표 1. 시작기의 설계 사양

	항목	기호	값(단위)
고정자 (영구자석)	극 수		16
	잔류자속밀도	B_r	1.33 (mm)
	영구자석 높이	h_{pm}	5.0 (mm)
	영구자석 길이	l_{pm}	49.0 (mm)
	영구자석 폭	w_{pm}	18.0 (mm)
	극 간격	τ	22.5 (mm)
가동자 (1차 측)	코일당 턴수		366
	코일 높이	h_c	24.1 (mm)
	코일 폭	w_c	8.2 (mm)
	슬롯 간격	τ_s	30.0 (mm)
	정격 전류	I	3.2 (A)
	공극 길이	l_g	1.0 (mm)

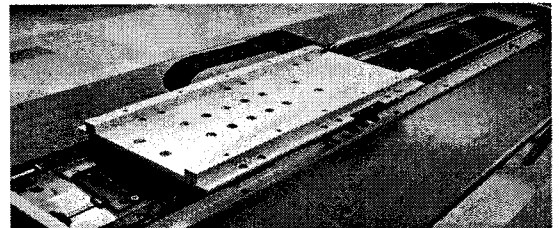


그림 1. 가동 코일형의 시작기

그림 1은 시작기인 가동 코일형 PMLSM을 나타낸다. PMLSM은 치-슬롯 구조와 길이의 유한성으로 인한 단부효과에 의해 필연적으로 디텐트력이 발생하게 된다. 이러한 디텐트력은 운전 시 추력의 맥동으로 작용하여 기기의 제반특성을 저하시키므로 이를 최소화 하는 것은 필수적이다.

PMLSM의 디텐트력을 저감하기 위한 방법으로는 영구자석의 자극 폭 조절법, 자극 배치 조정법, 반폐슬롯 구조, 영구자석 및 전기자 슬롯의 스류 시행 등의 여러 방법들이 보고 되어있다[1].

따라서, 본 논문에서는 치-슬롯구조에 의한 디텐트력을 최소화하기 위해 영구자석에 스류를 적용하는 방법을 적용하였다. 그림 2는 1/3 극 간격만큼 영구자석에 스류를 시행한 시작기의 고정자 부분을 나타내었다.

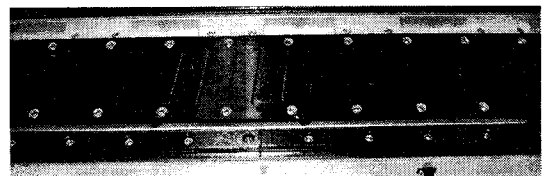


그림 2. 영구자석의 스류

스큐에 따른 디텐트력 특성을 그림 3에 나타내었다. 영구자석에 스큐를 시행한 모델에서 디텐트력이 대폭 감소한 것으로 나타났다. 그러나 여전히 디텐트력은 피크값이 약 7[N]정도 존재하고 있다. 이것은 단지 영구자석의 스큐 적용만으로는 단부 효과에 의한 디텐트력을 제거할 수 없다는 것을 입증한다.

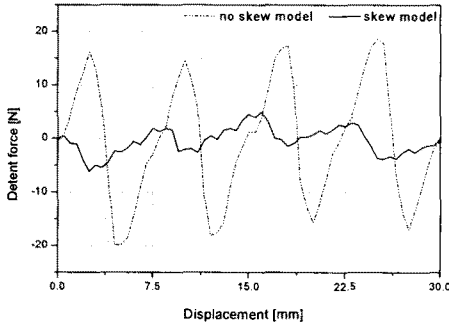
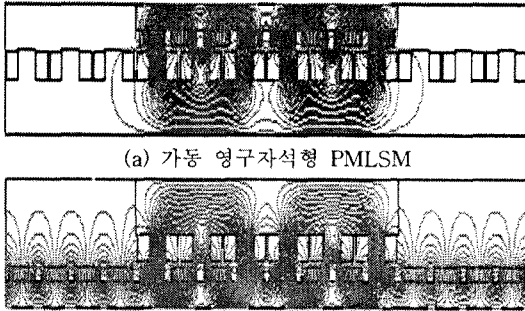


그림 3. 스큐에 따른 디텐트력 특성

그림 4은 PMLSM의 형태에 따른 자속 분포도를 나타내고 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이 가동 영구자석 형과 가동 코일형에 따라 자속의 분포는 크게 차이가 난다. 그림 4(a)의 가동 영구자석 형에서는 가동자가 영구자석이므로 가동자의 단부에서 누설자속이 많이 발생하지 않는다. 그러나 그림 4(b)의 가동 코일형은 고정자가 영구자석이므로 단부에서 누설자속이 많이 발생하게 된다. 이러한 누설 자속은 단부효과에 의한 디텐트력의 가장 큰 원인이 되며, 이로 인해 기기의 소음과 진동발생은 물론 운전 특성도 저하된다. 따라서 본 논문에서의 해석모델이 가동 코일형이므로 단부효과에 의한 디텐트력의 저감이 필수적이다.



(a) 가동 영구자석형 PMLSM
(b) 가동 코일형 PMLSM
그림 4. PMLSM의 형태에 따른 자속 분포도

그러나 가동 코일형 PMLSM의 경우 이러한 단부효과에 의한 디텐트력을 감소시키기 위한 연구가 아직까지 미비한 수준이다. 따라서 본 논문에서는 기기의 제반 특성에 악영향을 미치는 단부효과에 의한 디텐트력을 저하시키는 가동자의 코일도 보호할 수 있도록 가동자의 단부에 보조치를 설치하는 방안을 제안하고 2D FEM 해석을 통하여 기본모델과 제안모델의 디텐트력과 추력특성을 비교하였다.

2.2 보조치의 최적화

가동 코일형 PMLSM의 운전특성에 악영향을 미치는 단부 효과에 의한 디텐트력을 최소화 하기위해 가동자의 단부에 보조치를 설치하였고, 설치되는 보조치의 최적화

를 위해 신경회로망을 적용하였다[2].

그림 5는 설치되는 보조치의 설계 변수를 나타내었다. 설계 변수로는 주치와 보조치의 이격 거리(d), 보조치의 높이(h), 보조치의 폭(w)이 디텐트력 최소화를 위해 선정 되었다.

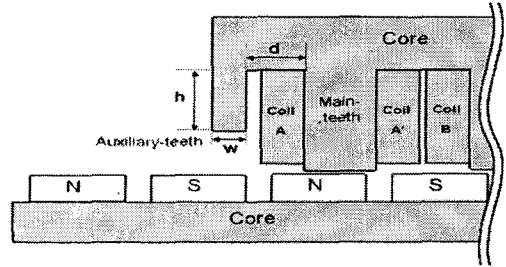


그림 5. 보조치의 설계변수

표 2는 목적함수에 대한 설계변수의 변화 범위와 제약 조건을 나타낸 것이다. 설계변수의 범위는 기본모델 주치의 폭과 높이, 슬롯폭등 여러 가지 변수들을 고려하여 최소의 디텐트력을 가지는 보조치를 설계하기 위해 선정되었고, 제약 조건의 선정 기준은 기본모델 이상의 추력, 즉400[N] 이상으로 설정하였고 디텐트력은 발생추력의 5[%]미만으로 설정하였다.

표 2. 설계 변수의 변화 범위와 제약 조건

설계 변수	설계 변수 변화 범위
이격 거리 (d)	$9[\text{mm}] \leq d \leq 13[\text{mm}]$
보조치 높이 (h)	$18[\text{mm}] \leq h \leq 25[\text{mm}]$
보조치 폭 (w)	$1[\text{mm}] \leq w \leq 6[\text{mm}]$
제약 조건	추력 $\geq 400[\text{N}]$
	디텐트력 $\leq 10[\text{N}]$

최적 설계를 위한 신경회로망의 학습 데이터는 2D FEM을 이용하여 구하였고, 그림 6은 본 논문에서 적용된 신경회로망을 도식적으로 나타내었다. 신경회로망의 구성은 그림 6에서와 같이 은닉층을 3층, 또한 각 은닉층의 뉴런 수는 60개로 한 multi-layer perceptron형신경회로망을 사용하였다. 다시 말하면, 신경회로망은 5층 3-60-60-60-2으로 구성하였으며 feed-forward error back-propagation algorithm을 학습을 위해 사용하였다. 또한 두 개의 학습된 목적함수는 디텐트력 피크치와 디텐트력 적분의 절대값으로 선정하였다. 왜냐하면, 피크치만 최소화 할 경우 전체적인 디텐트력 합인 적분값이 더 커질 수 있고, 이로 인해 제어능력이 저하될 수 있기 때문이다. 따라서 디텐트력 피크치와 적분의 절대값을 동시에 최소화 해야만 보조치 최적화를 통한 본래의 결과를 얻을 수 있다.

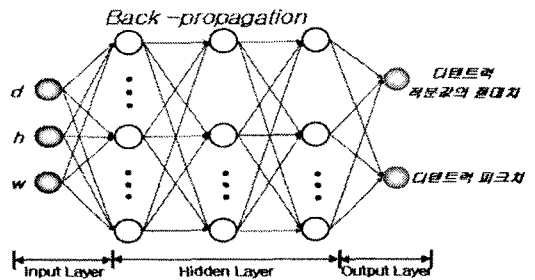
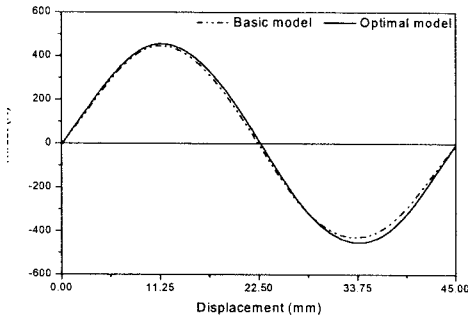


그림 6. 신경회로망

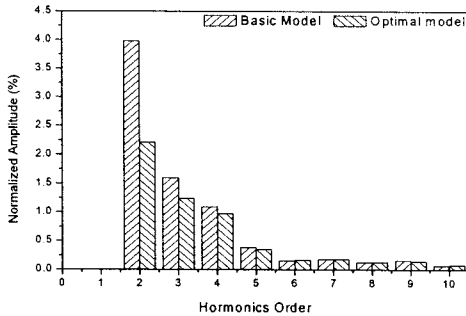
2D FEM 특성해석을 통한 학습데이터를 이용하여 신경회로망을 적용한 결과 최소의 디텐트력을 가지는 보조치의 치수는 이격거리 (d)가 11.0[mm], 보조치의 높이 (h)가 22.0[mm], 보조치의 폭(w)이 4.9[mm]로 선정되었다.

2.3 최적모델의 특성해석

신경회로망을 통한 최적화 수행결과 선정된 보조치의 최적모델을 2D FEM 을 적용하여 특성해석을 수행하였다.



(a) 추력 특성



(b) 고조파 분석

그림 7. 추력과 고조파 분석

그림 7은 기본모델과 영구자석의 스큐와 최적화된 보조치를 적용한 최적모델의 추력 특성 해석결과와 추력의 고조파 분석 결과를 비교한 것이다. 최적 모델의 경우 추력의 피크값이 455.4[N]으로 기본모델의 피크값 445.9[N]보다 9.5[N] 정도 증가하였고, 추력의 고조파 분석결과도 왜형률이 2.77[%]로 기본모델의 4.46[%]보다 고조파의 영향이 대폭 줄어든 거의 정현파에 가까운 결과를 얻었다.

그림 8은 기본모델과 최적모델의 디텐트력 특성을 비교한 것이다. 기본 모델의 디텐트력 피크값이 9.95[N]에서 최적화를 수행한 결과 4.08[N]으로 대폭 감소하였다. 이는 최적화된 보조치로 인하여 단부효과가 크게 줄어든 결과이다.

그림 9는 부하각 90°에서 정상상태 운전 특성을 비교한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 기본모델의 경우 리플율이 9.23[%]로 정상상태 운전 시에 추력 리플이 크게 나타나고 있다. 반면에 최적 모델의 경우 리플율이 3.83[%]로 거의 리플이 없는 운전특성을 나타내고 있다. 영구자석의 스큐 시행과 보조치의 설치로 디텐트력이 대폭 제거되어 정속 운전 시에는 리플이 거의 발생하지 않는 추력특성 결과를 도출하였다.

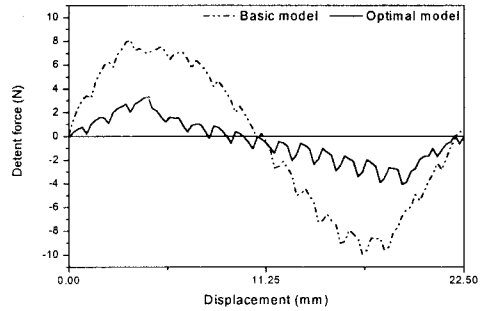


그림 8. 디텐트력 특성

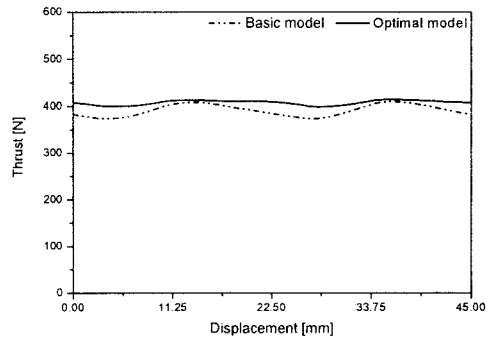


그림 9. 정상상태 운전특성

3. 결 론

본 논문에서는 가동 코일형 PMLSM의 운전 특성을 향상시키기 위해 추력의 리플로 작용하는 디텐트력을 영구자석의 스큐와 가동자의 단부에 보조치를 설치하는 새로운 방안을 통하여 효과적으로 저감 하였다. 또한 설치되는 보조치의 최적화 설계를 위해 신경회로망을 도입하였고, 2D-FEM을 통하여 기본모델과 최적모델의 특성을 해석하고 비교함으로써 본 논문에서 제안한 방법의 우수성을 입증하였다. 비교 결과 보조치 최적화 모델의 경우 디텐트력이 영구자석에 단순히 스큐만 적용한 기본 모델에 비하여 41.5[%]정도 감소한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04 01 03) 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ki-Chae Lim, Joon-keun Woo, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, "Detent force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 38, No. 2, pp. 1157-160, 2002
- [2] 박승찬, "유한요소법과 신경회로망을 이용한 직선형 유도전동기의 설계 및 동특성 해석에 관한 연구", 한양대학교 박사논문, 1995.