

리플 최소화 및 추력향상을 위한 PMLSM의 최적 설계

이동엽*, 주건배, 안영규, 황인철, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

Optimum Design of Thrust Ripple Minimization and Power Enhancement for PMLSM

Dong-yeup Lee*, Zhou Jianpei, Young-gyu An, In-cheol Hwang, Gyu-tak Kim
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - In this paper, an insertcore type PMLSM is proposed to improve the low thrust density of aslotless type PMLSM. Aneural network is applied to enhance thrust and to minimize the detent force caused by both the slot-teeth structure and end-effect. As the resultsof the optimal design, the thrust ripple rate is decreased conspicuously from 10.22[%] to 2.87[%] and the distortion factor of thrust form 5.82[%] to 1.65[%], respectively

1. 서 론

최근 영구 자석형 선형 동기 전동기(PMLSM)의 연구동향으로 큰 추력을 발생시키는 철심형 PMLSM의 장점인 고효율화는 물론 공심형 PMLSM의 장점인 추력 리플을 최소화시키고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있으며 그 중 공심형 PMLSM의 상 권선 사이에 강대를 삽입하는 철심 삽입형 PMLSM이 각광을 받고 있다.

Insert core type slotless PMLSM의 thrust ripple은 크게 슬롯-치 구조에 의한 detent force, end effect에 의한 thrust ripple, 영구자석의 고조파성분 자속에 의한 ripple로 나눌 수 있다. 그 중 Moving magnet type에서는 end effect에 의한 detent force와 슬롯-치 구조에 의한 detent force가 추력 ripple로 작용하여 위치 및 속도 제어에 나쁜 영향을 미치게 된다 [1,2].

따라서, 본 논문에서는 Insert core type slotless PMLSM의 치-슬롯 구조에 의한 detent force 및 end effect에 의해 발생하는 추력 리플을 최소화 시키고자 신경회로망을 적용하였다. 신경회로망의 학습 데이터는 유한요소법을 이용하여 취득하였다. 유한요소법을 이용한 특성해석은 해석모델의 치수변화에 따라 많은 모델링이 필요하며, 이러한 작업은 FEA의 단점이다. 따라서, 본 연구에서는 모델절점이동기법을 이용하여 유한요소법에 의한 특성해석 과정을 단순화시켰다. 치-슬롯 구조로 인한 detent force의 최소화를 위한 설계변수로는 영구자석의 폭, 삽입된 철심의 높이 및 폭, 코일 폭을, end effect에 의한 detent force 최소화에는 mover의 end부에 보조극을 설치하여 보조극의 폭 및 높이, 주극과의 이격거리 및 영구자석의 skew 각도를 설계변수로 설정하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 슬롯리스형 PMLSM의 단점인 추력을 증대시키기 위하여 기존의 슬롯리스 모델의 상권선 사이에 간단히 철심만을 삽입한 형태이며, 표 1에 해석 모델의 제원을 나타내었다.

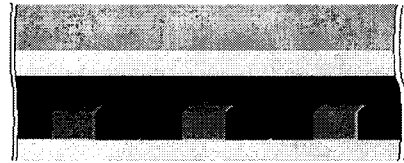


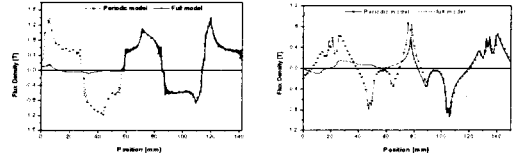
그림 1. 슬롯리스형 PMLSM

표 1. 철심 삽입형 PMLSM의 사양

항 목	값[단위]	항 목	값[단위]
극 수	12	코일당 턴수	650 [턴]
찬류자속밀도	1.2 [T]	코일 높이	11 [mm]
영구자석 높이	12 [mm]	코일 폭	12 [mm]
영구자석 길이	73.5 [mm]	코일 간격	12 [mm]
영구자석 폭	26 [mm]	상전류[최대]	2.66 [A]
극 피치	28.5 [mm]	공극 길이	2 [mm]

2.2 디텐트력

철심 삽입형 슬롯리스 PMLSM의 해석 모델의 특성 해석은 계변수를 자기 벡터 포텐셜로 하는 2D FEM을 이용하여 계산하였으며, 추력은 Maxwell stress tensor법을 이용하여 계산하였다.



(가) X방향 성분

(나) Y방향 성분

그림 2. 자속 밀도 분포도

그림 2는 end part부 3극분의 공극 자속밀도이다. 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 공극에서의 자속밀도는 단부를 제한 위치에서는 동일하므로 단부효과에 의한 디텐트력과 치-슬롯에 의한 디텐트력은 독립적으로 고려할 수 있다.

그림 3의 full 모델에 대한 디텐트력은 단부효과에 의한 디텐트력과 슬롯-치 구조로 인한 자기저항 차에 의한 디텐트력의 합이다. 한편, 단부효과를 무시한 주기모델의 디텐트력은 자기저항차에 의한 디텐트력이다. 따라서, full 모델의 디텐트력에서 주기 모델의 디텐트력을 뺀 것이 end effect에 의한 디텐트력이다. 그림 3에서 알 수 있는바와 같이 슬롯-치 구조에 의한 디텐트력은 슬롯 피치를 주기로, end effect에 의한 디텐트력의 주기는 슬롯 피치의 주기와 동일하게 나타났으며 직선기의 단부효과는 그림 3에서 알 수 있는바와 같이 전체 디텐트

트력의 크기 및 주기에 큰 영향을 미친다.

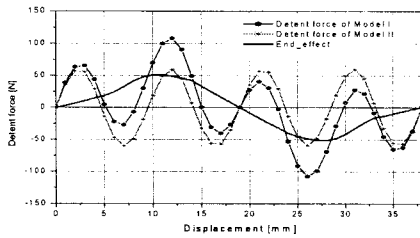


그림 3. 디텐트력

그림 4에서 보는바와 같이 철심 삽입형 슬롯리스 PMLSM은 상 권선 사이에 철심을 삽입하므로써, 추력은 증가하지만, 공극 자기저항 차 및 end effect에 의한 detent force로 인하여 추력에 왜형이 발생하여 슬롯리스 PMLSM의 장점이 사라지게 된다.

따라서, 본 논문에서는 추력 최대화와 디텐트력 최소화를 동시에 만족시키기 위해 유한요소법과 신경 회로망법을 이용하여 최적 설계를 진행하였다.

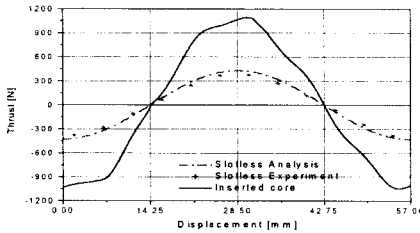
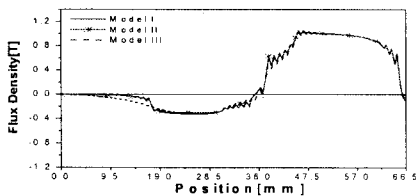


그림 4. 추력

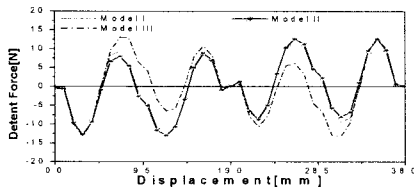
2.3 최적화 설계

2.3.1 end-effect 최소화를 위한 보조극

PMLSM의 경우 단부효과에 의한 detent force 저감을 위해 가동자의 양 단부에 주 자극의 영구자석과 반대극성을 가지는 영구자석 보조극이나 철심 보조극을 설치한다. 영구자석 보조극의 경우 주자극의 영구자석과 동일 자석을 사용하거나 다른 재질의 자석을 사용하게 된다.



(가) 보조극에 따른 단부 자속밀도 분포



(나) 보조극에 따른 detent force

그림 5. 보조극에 따른 특성

본 논문에서는 보조극의 재질에 따른 detent force

변화 특성을 고찰하였다. 그림 5에서 모델 I은 보조극의 재질은 ferrite 자석, model II는 보조극의 상부와 하부의 절반을 각각 철심과 페라이트로 구성한 모델, model III는 보조극의 재질로는 희토류 자석인 Nd자석이며 자석의 높이는 4.75[mm]이다.

단부에서의 자속밀도 분포는 그림 5의 (가)와 같이 보조극의 재질에 상관없이 유사한 크기 및 양상을 나타내었다. 그림 5의 (나)에서 알 수 있는바와 같이 단부에서의 자속이 동일할 경우(모델 I 과 II), 보조극의 재질에 관계없이 동일한 디텐트력이 발생하였다. 또한, model III는 모델 I, II와는 자속밀도분포 양상이 다르나 그 크기는 대동소이하여 디텐트력도 모델 I, II에 비해 다소 크게 나타났다. 즉, 보조극의 재질이나 형태에 상관없이 단부에서의 특정 자속 밀도만 확보되면 단부효과에 의한 디텐트력은 감소시킬 수 있어 본 논문에서는 보조극으로 ferrite 자석을 선택하였다.

2.3.2 최적 설계를 위한 신경회로망의 적용

상 권선 사이에 단순히 철심만을 삽입한 철심 삽입형 PMLSM은 추력은 증가하나 추력 리플이 크게 발생하므로 제어 성능이 떨어지게 되므로 디텐트력 저감을 위한설계가 필요하다.

디텐트력을 저감시키는 방법으로는 영구자석의 자극 폭 조절법, 자극배치 조정법, 영구자석 및 전전자 슬롯의 스큐(skew) 구조의 채택, 반폐슬롯(semi-closed slot) 구조 등의 여러 방법들이 보고 되었으나 본 논문에서는 디텐트력의 최소화와 추력의 최대화를 동시에 만족하는 최적 설계를 위해 신경회로망을 적용하였다.

목적 함수로는 추력 리플의 주원인인 디텐트력의 최소화, 발생 추력의 최대화, 그리고 디텐트력 최소화와 발생 추력 최대화를 동시에 만족 시키는 다중 목적함수를 선정하였다.

그림 6에 철심 삽입형 슬롯리스 PMLSM의 최적 설계를 위한 파라미터를 나타내었다. 코어 삽입으로 인한 detent force을 최소화시키기 위한 파라미터로는 영구자석의 폭(W_m), 삽입되는 철심 높이(h_{core}) 및 폭(W_{cor}), 코일 폭(W_c)을 선정하였으며, end effect에 의한 detent force을 최소화 시키기 위하여 보조극의 폭(x_1), 높이(x_2), 이격거리(x_3) 및 영구자석의 skew각(δ)을 선정하였다.

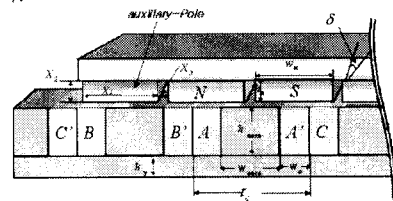


그림 6. 설계 변수

표 2. 설계 변수 범위 및 제약조건

설계 변수	설계 변수 변화 범위
W_c	$5 \leq W_c \leq 7$ [mm]
W_m	$24 \leq W_m \leq 28$ [mm]
h_{core}	$0 \leq h_{core} \leq 26.4$ [mm]
W_{core}	$22 \leq W_{core} \leq 26$ [mm]
x_1	$6.5 \leq x_1 \leq 26$ [mm]
x_2	$4.5 \leq x_2 \leq 12$ [mm]
x_3	$2.5 \leq x_3 \leq 22$ [mm]
δ	$\delta < 1/2$ Pole pitch
제약 조건	추력 > 1000[N] 디텐트력 < 30[N]

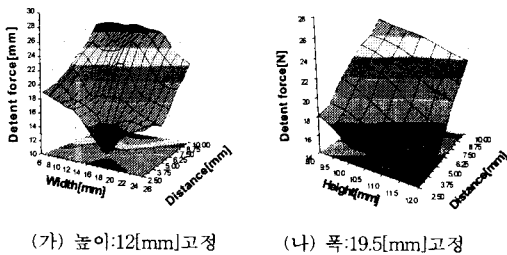
그림 6의 코일에서의 전류 밀도는 항상 동일하게 하기 위해 코일의 단면적 $w_c \times h_c$ 은 항상 일정하게 유지하고 코일 간격 d_{coil} 도 2[mm]로 고정시켰으며 고정자의 요크 두께 h_c 및 영구자석의 두께 h_m 은 일정하게 두었다. 이

는 영구자석의 두께 증가에 따른 퍼미언스 계수의 변화가 적기 때문에 영구자석 사용량의 증가에 따라 자속 밀도의 증가는 크지 않으므로 설계 변수에서 제외시켰다. 목적함수에 대한 제약 조건 및 각 설계변수의 변화 범위는 표 2과 같다. 제약 조건의 선정 기준은 초기 코어 삽입모델 이상의 추력, 즉 1000[N] 이상의 추력으로 설정하였고 디텐트력은 발생 추력의 1.5[%] 미만으로 설정하였다.

신경회로망의 구성은 은닉층을 3층, 각 은닉층의 뉴런 수는 50개로 한 multi-layer perceptron형 신경회로망을 사용하였다.

신경회로망의 학습 데이터는 FEM을 통하여 구하였으며, 모델링 및 전처리를 위한 노력 및 시간을 단축시키기 위하여 모델절점이동기법을 적용하였다.

그림 7은 페라이트 보조극에 대한 신경회로망에 의한 학습결과이다. 디텐트력이 최소로 된 모델은 보조극 폭이 19.5[mm], 높이 12[mm], 인접 주극과의 간격이 2.5[mm], 스류는 1/4 슬롯 피치인 모델로 나타났다.



(가) 높이:12[mm]고정 (나) 폭:19.5[mm]고정

그림 7. 신경 회로망에 의한 해석 결과

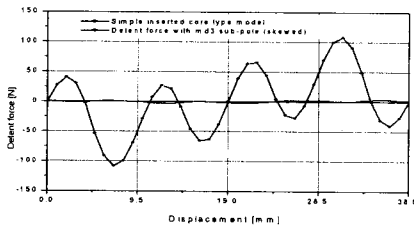
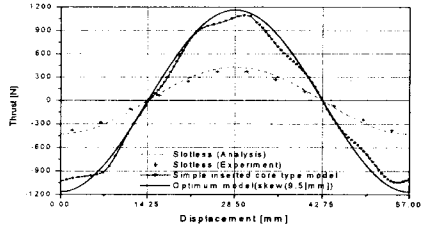


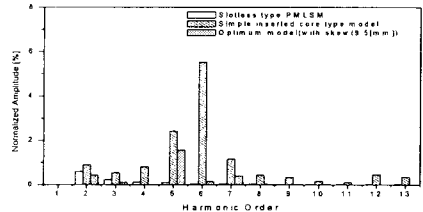
그림 8. 디텐트력 특성비교

그림 8은 최적화 모델과 단순 코어 삽입 모델의 디텐트력 특성곡선이다. 두 모델 모두 9.5[mm]의 영구자석 skew를 준 모델이다. 해석 결과 최적화 모델은 디텐트력의 최대치가 4.1[N]으로 슬롯 - 치 구조에 의한 디텐트력 및 end effect에 의한 디텐트력이 제거되어 본 연구의 타당성을 입증할 수 있었다.

그림 9는 최적 모델과 단순 코어 삽입 모델의 정추력 및 추력의 FFT 분석 결과이다. 그림 9에서 알 수 있는 바와 같이 단순 코어 삽입 모델에서는 단부효과에 의한 디텐트력의 주기와 치 - 슬롯 구조로 인한 자기저항 차에 의한 디텐트력의 주기가 서로 상이하여 저차고조파 성분은 물론 고차 고조파 성분까지도 크게 나타났다. 하지만, 최적화 모델의 경우, 보조극의 설치로 인하여 추력은 1046.2[N]에서 1164.7[N]으로 상승하였으며, 추력의 왜형률은 5.82[%]에서 1.65[%]로 크게 감소하였다. 그러나, 영구자석의 단방향 착자로 인하여 발생하는 고조파 성분인 5, 7 고조파 성분은 다른 고조파 성분보다는 상대적으로 크게 나타났으며, 전체 고조파 성분 중 가장 큰 비율을 차지하였다. 자기 저항차와 end-effect에 의한 디텐트력은 영구자석에 스류를 적용함으로써 완전하게 제거할 수 있었다.



(가) 추력 특성



(나) FFT 분석 결과

그림 9. 추력 특성비교

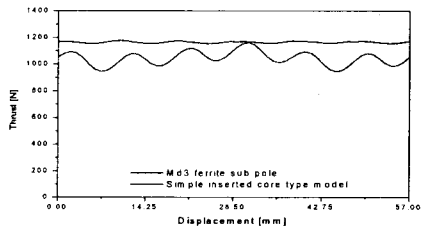


그림 10. 정상상태 운전 특성

그림 10은 정상상태 운전 특성을 나타낸다. 리플율이 10.22[%]에서 2.87[%]로 크게 감소하였다. 그 이유는 추력 리플의 주원인인 영구자석의 고조파 성분 자속이 크게 감소하였기 때문이다.

3. 결 론

본 논문에서는 슬롯리스형 PMLSM의 낮은 추력밀도를 향상시키고자 철심 삽입형 모델을 제안하였으며 철심 삽입으로 인한 치 - 슬롯 구조 및 end effect에 의한 디텐트력 최소화화 추력 최대화를 위하여 신경 회로망법을 적용하였다. 신경회로망 학습을 위한 데이터는 2D-FEM을 통해 구하였으며 모델 절점 이동 기법을 사용함으로써 해석 시간 및 노력을 대폭 감소 시켰다. 무버의 단부에 보조극을 설치하여 최적 설계를 시행한 결과 추력 향상을 물론 추력 리플도 거의 제거되었다. 앞으로, 영구자석에 의한 고조파 저감 설계가 이루어져야 할 것이며 이는 차후의 과제로 삼겠다.

[참고 문헌]

- [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] Ki-Chae Lim, Jung-Pyo Hong, Gyu Tak Kim, "The Novel Technique Considering Slot Effect by Equivalent Magnetizing Current", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp. 3691-3693, 1999