2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2003.7.21-23

다중목적함수 신경 회로망을 이용한 slotless PMLSM의 최적 설계

김미용*, 이동엽, 정춘길, 김규탁
창원대학교 전기 공학과

Optimum design of slotless PMLSM by using multiobjective function neural network

Mi-Yong Kim*, Dong-Yeup Lee, Chun-Gil Jung, Gyu-Tak Kim
Department of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - A slotless Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (PMLSM) has good control ability but thrust density is low. So, this paper proposes inserted core type of slotless PMLSM to improve its low thrust density. Inserting the core between windings of each phase, detent force is generated by the difference of magnetic resistance in an air gap. To minimize detent force and maxize thrust, this paper applies the neural network to inserted core type of slotless PMLSM.

1. 서 론

최근 PMLSM의 연구동향으로 큰 추력를 발생시키는 철심형 PMLSM의 장점인 고출력화는 물론 슬롯리스형 PMLSM의 최대 장점인 추력 리플을 최소화시키고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있으며 그 중 슬롯리스형 PMLSM의 상 권선 사이에 강대를 삽입하는 코어 삽입형 PMLSM이 각광을 받고 있다.

본 논문에서는 슬롯리스형 PMLSM의 낮은 추력밀도를 향상시키고자 코어 삽입형 모델을 제안하였으며 이때, 공극 자기저항의 차에 의해 발생하는 디텐트력을 최소화 시키는 동시에 추력을 최대화 시키기 위하여 신경회로망법을 적용하였다. 신경회로망의 학습을 위한 데이터는 2D-FEM으로부터 구하였다.

디텐트력 최소화를 위한 최적화과정에서 설계변수로는 영구자석의 폭, 삽입 되는 코어의 높이, 삽입 되는 코어의 폭, 코일 폭을 선정하였다. 신경회로망에 의한 최적화 모델의 특성을 단순 코어 삽입모델의 특성과 비교하였다.

신경 회로망을 사용함으로써 최적의 설계 값을 찾기 위한 계산시간이 대폭 감소하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델

그림 1은 철심 삽입형 슬롯리스 PMLSM의 해석모델을 나타내고 있다.

기존의 슬롯리스형 모델에 비해 철심 삽입으로 인한 자기적 공극의 감소로 인해 에너지 밀도가 대폭 증가하였다.

주요치수 및 제원은 표 1과 같다.

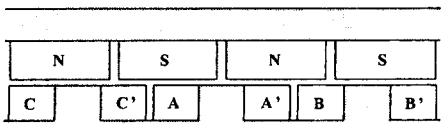


그림 1. 철심 삽입형 slotless PMLSM

표 1. Inserted Core type Slotless PMLSM의 사양

항 목	값[단위]	항 목	값[단위]
극 수	12	코일당 턴수	650 [턴]
잔류자속밀도	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 코어 삽입형 slotless PMLSM의 특성해석

추력은 맥스웰 응력법으로부터 구하였다[2].

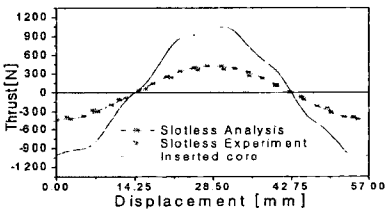


그림 2. 정추력

그림 2는 이동자 변위에 따른 각 해석 모델의 발생 추력을 나타낸 것이다. 슬롯리스형 모델에서는 최대치가 427.86[N], 코어삽입 모델에서는 1004.27[N]으로 슬롯리스형에 비해 코어 삽입모델에서는 최대 추력이 2.34배 이상 증가하였다.

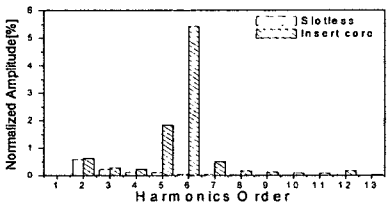


그림 3. 추력 고조파 분석

그러나, 그림 3에서 보는 바와 같이 코어 삽입형에서는 추력의 5, 6, 7 고조파 성분은 각각 1.84, 5.43, 0.51[%]로 나타났으며, 이중 6고조파 성분은 디텐트력에 해당되는데 그 피크치 가 56.02[N]으로 크게 나타났다.

추력의 고조파 성분은 운전 시 추력 리플을 발생시켜 제어 성능을 저하시키므로 고조파 성분의 최소화 설계가 이루어져야 한다.

2.3 디텐트력 최소화, 추력 최대화를 위한 설계

2.3.1 최적 설계를 위한 신경 회로망의 적용

추력 밀도를 증가 시키기 위한 코어 삽입형 모델은 추력은 크게 증가하나 큰 추력 리플이 발생하므로 제어 성능이 크게 떨어지게 된다. 따라서, 본 논문에서는 신경회로망을 이용하여 고 추력화와 동시에 추력 리플 최소화를 위한 최적설계를 진행하였다. 목적 함수로는 추력 리플의 주원인인 디텐트력 최소화, 발생 추력 최대화, 그리고 디텐트력 최소화와 발생 추력 최대화를 동시에 만족 시키는 다중 목적함수를 선정하였다.

설계변수로는 영구자석의 폭(W_m), 삽입되는 코어 높이(h_{core}), 삽입 되는 코어의 폭(W_{core}), 코일 폭(W_c)을 선정하였고 그림5에 나타내었다.

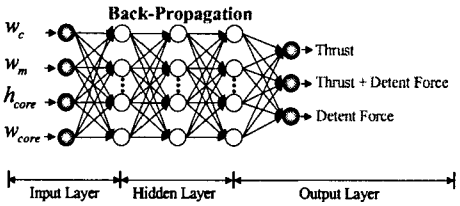
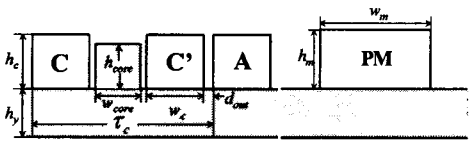


그림 4. 신경 회로망의 구조

신경회로망의 구성은 그림 4에서와 같이 은닉층을 3층, 또한 각 은닉층의 뉴런 수는 50개로 한 multi-layer perceptron형 신경회로망을 사용하였다. 즉, 신경회로망은 5층 4-50-50-50-3으로 구성하였으며 feed forward error back propagation algorithm을 사용하였다.



(a) 가동자 (b) 고정자

그림 5. 설계 변수

표 2. 설계변수 및 제약조건

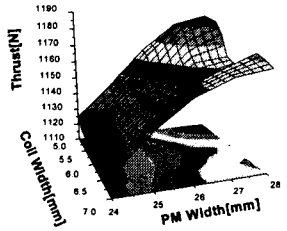
설계 변수	설계 변수 변화 범위
W_c	$5[mm] \le W_c \le 7[mm]$
W_m	$24[mm] \le W_m \le 28[mm]$
h_{core}	$0mm] \le h_{core} \le 26.4[mm]$
W_{core}	$22[mm] \le W_{core} \le 26[mm]$
제약 조건	추력≥1000[N] 디텐트력≤50[N]

목적함수에 대한 제약 조건 및 각 설계변수의 변화 범위는 표 2와 같다. 제약 조건의 선정 기준은 초기 코어 삽입모델 이상의 추력, 즉 1000[N] 이상의 추력으로 설정하였고 디텐트력은 발생 추력의 5[%] 미만으로 설정하였다.

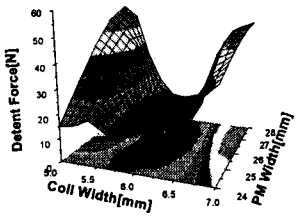
2.3.2 신경 회로망에 의한 해석결과

그림 6는 코일 폭과 영구자석 폭의 변화에 따른 추력 및 디텐트력의 신경회로망에 의한 해석 결과이다. 제약조건을 만족하는 추력 최대화 모델은 코일 폭 5.2[mm], 영구자석 폭 28[mm]인 모델이고, 디텐트력 최소화 모델은 코일 폭 6.2[mm], 영구자석 폭 26[mm]인 모델이다.

표3은 각 목적함수에 따른 최적 모델의 해석 결과 이다. 추력 최대화 모델에서는 코어 삽입 모델에 비해 추력의 최대치가 1004.27[N]에서 1183..64[N]으로 17.86[%]로 증가하였으나 디텐트력이 46.69[N]으로 매우 크고, 디텐트 최소화 모델에서는 추력이 1141.66[N], 디텐트력이 4.836[N]로 나타 났으며, 둘을 동시에 만족하는 다중 목적 함수모델의 경우 디텐트력은 4.838[N]로 다소 증가하나 추력이 1144.83[N]으로 증가한다. 따라서 추력 최대화와 디텐트력 최소화를 동시에 만족하는 모델을 최적 모델로 선정하였다. 표3의 결과로부터 신경회로망에 의한 학습이 올바르게 진행되었음을 알 수 있다.



(a) 추력



(b) 디텐트력

그림 6. 신경 회로망에 의한 해석결과

표 3. 신경회로망에 의한 최적 모델

목적 함수		추력 최대화	디텐트력 최소화	다중 목적함수
설계 변수 [mm]	W_c	5.2	6.2	6
	W_m	28	26	26
	h_{core}	25.38	21.3	22
	W_{core}	25.6	23.6	24
추력 [N]	신경회로망	1183.92	1141.85	1144.99
	유한요소법	1183.64	1141.66	1144.84
디텐트력 [N]	신경회로망	49.95	4.947	4.949
	유한요소법	49.69	4.836	4.838

2.4 최적 모델의 특성 해석

표3의 추력 최대화와 디텐트력 최소화를 동시에 만족시키는 다중 목적 함수 모델에 대해 2차원 유한 요소해석을 통해 특성해석을 하여 슬롯리스 모델과 코어삽입 모델의 결과를 각각 비교하였다.

2.4.1 역기전력 및 인덕턴스

역기전력은 코일과 쇄교하는 영구자석에 의한 자속 밀도 중 수직 성분만을 적분하여 쇄교 자속량을 구한 후, 이 자속의 시간에 대한 변화량과 턴 수로부터 계산하였다.

그림 7은 각 해석모델의 역기전력을 나타내고 있다. 각 모델의 실효치는 49.03[V], 117.19[V]와 132.7[V]이다.

결과로부터 알 수 있듯이 슬롯리스 모델에 비해 코어 삽입 모델의 역기전력이 2배 이상 증가 하였다. 역기전력의 증가는 출력의 증가를 의미하므로 코어 삽입 모델에서 출력이 크게 향상 되었음을 알 수 있다.

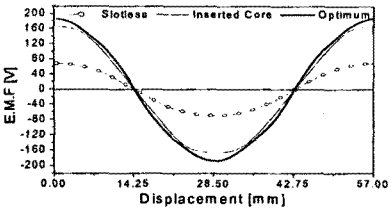


그림 7. 역기전력(v = 2m/s)

본 논문에서는 자기저장 에너지와 여자전류로부터 인덕턴스를 산정하였다.

표 4는 각 모델의 인덕턴스 계산 결과이다. 슬롯리스형의 경우 계산 치와 실험치가 잘 일치하는 만족스러운 결과를 얻었다. 자기 인덕턴스 측정은 상용주파수의 정현파 전압을 인가 했을때의 측정된 역률각과 전류로부터 계산하였으며, 상호 인덕턴스는 전류를 인가하지 않은 상에 유기된 전압을 측정하여 계산하였다.

표 4. 각 모델의 인덕턴스

인덕턴스		자기 인덕턴스[mH]	상호 인덕턴스 [mH]
실험치	slotless	29.38	9.07
해석치	slotless	30.86	9.08
	코어 삽입형	69.45	24.42
	최적 모델	119.89	54.76

인덕턴스 계산결과 최적 모델에서 119.89[mH]로 증가하였으나 정상상태 운전(v=2m/s)시 리액턴스 값으로 환산할 경우 저항에 비해 크기가 작으므로 역율 및 속응성 저하에 크게 영향을 미치지 않는다.

2.4.2 디텐트력 및 추력

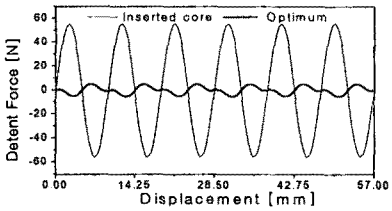


그림 8. 디텐트력

그림 8은 최적 모델의 디텐트력이 코어 삽입형에 비하여 최대치가 56.02[N]에서 4.838[N]으로 대폭 감소한 것을 보여주고 있다.

추력 특성은 그림 9에서 보는 바와 같이 최적모델에서는 최대치가 1004.27[N]에서 1144.84[N]으로 13.99[%] 증가하였다.

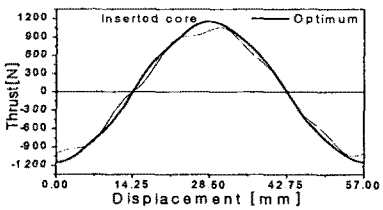


그림 9. 정추력

이때의 고조파 성분 분석은 그림 10과 같다. 즉, 최대 추력은 13.99[%] 증가하였으나 디텐트력을 최소화 시킴으로써 발생추력의 고조파 중 최대로 나타나는 6고조파 성분은 기본파 대비 5.43[%]에서 0.36[%]로 크게 낮아졌고 추력 리플이 거의 발생하지 않는 양호한 설계가 이루어졌다.

그림 11은 정상상태 운전 시 추력 특성을 나타낸다. 추력 리플율은 코어 삽입 시 11.4[%]에서 3.9[%]로 대폭 낮아졌다.

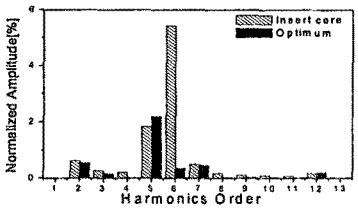


그림 10. 추력 고조파 분석

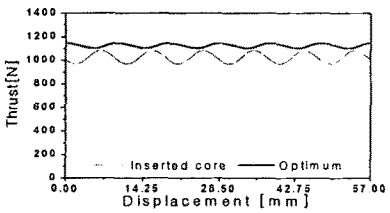


그림 11. 정상상태 운전 시 추력 특성

2.4.3 사용 철심 중량 당 추력

추력밀도는 이동자와 고정자의 중량 당 발생추력의 비로 정의된다.

해석모델의 철심 재질은 무방향성 규소강판으로 밀도는 7.85[g/cm3]로써 단순 코어 삽입모델보다는 최적화 모델이 코일 사이의 안 간격이 넓어져 중량은 40.97[kg]에서 45.167[kg]로 10[%]가량 증가하였으나 추력 증가로 인하여 추력 밀도는 24.51[N/kg]에서 25.4[N/kg]로 최적화 모델에서 다소 크게 나타났다.

3. 결 론

본 논문에서는 제어성능이 우수한 슬롯리스 PMLSM의 낮은 추력밀도를 향상시키고자 코어삽입모델을 제안하였고, 코어삽입에 따라 발생되는 고조파 성분 중 디텐트력에 의한 6고조파 성분을 제거하기 위해 신경 회로망법을 이용하여 최적 설계를 진행하였다.

단순 코어 삽입모델과 비교하여 최적화 모델은 추력 리플에 영향을 미치는 디텐트력을 최소화 시킴으로써 추력 리플을 대폭 감소시키는 양호한 결과를 얻었다.

[참 고 문 헌]

[1] I. Boldea, S. A. Nasar, Linear Motion Electromagnetic Systems, John Wiley and Sons, 1985.

[2] 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.

[3] 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