

디텐트력의 저감을 위한 3상 9극 10슬롯 구조의 단1차형 영구자석 선형 동기전동기

연승환, 함승진, 이종진, 고창섭
충북대학교 전기공학과

A Short Primary Permanent Magnet Linear Synchronous Motor having 3 Phase 9 Pole 10 Slots for Detent Force Reduction

Sung Whan Youn, Seung Jin Ham, Jong Jin Lee, Chang Seop Koh
Dept. of Electrical Eng. Chungbuk National University

Abstract - 단 1차형 영구자석 선형 동기 전동기(PMLSM)는 디텐트력과 단부력에 의한 큰 토크 리플을 갖는 문제점이 있다. 본 논문에서는 영구자석 선형 동기 전동기의 디텐트력을 줄이기 위해 영구자석의 극수와 전기자의 슬롯수의 비를 변경한 새로운 구조의 단 1차형 영구자석 선형 동기 전동기를 제안하였으며, 단부력을 줄이기 위하여 고정자의 길이 조정 및 챔퍼링을 통하여 영구자석 선형 동기 전동기를 설계하였다.

1. 서 론

선형 전동기(Linear motor)는 회전운동을 직선운동으로 변환하기 위한 별도의 동력변환장치가 필요 없어 현재 많은 분야에서 사용되고 있다. 특히 단 1차형 영구자석 선형 동기전동기(Short primary PMLSM)는 계자원으로 영구자석을 사용하기 때문에 효율 및 추력/중량비가 높아 고속화 및 고추력화가 가능하다. 하지만 영구자석 채움 전동기의 특성상 디텐트력(Detent force)이 발생하는 문제점을 갖고 있다[1].

디텐트력은 추력 맥동(Thrust ripple)의 원인이 되어 전동기의 성능을 저감시키는 요소인데, 이는 두가지 원인에 의해 발생한다. 하나는 코깅력(Cogging force)으로 전기자의 치(teeth)와 영구자석 사이에서 작용하는 것으로, 회전기에서의 코깅토크(Cogging torque)에 대비되는 힘이며, 다른 하나는 단부력(End effect force)으로 전기자 양 단부와 영구자석 사이에 작용하는 인력에 의하여 발생한다. 디텐트력을 줄이기 위하여 전기자의 슬롯 개수 폭 및 치폭 조정[2], 전기자 치에 보조구 생성[3], 전기자의 길이 조정 및 챔퍼링(Chamfering)[4][5] 등의 많은 연구가 이루어져 왔으나 디텐트력 감소와 함께 추력 또한 감소하는 문제점을 갖고 있다.

본 논문에서는 코깅력을 줄이기 위한 방법으로 영구자석의 극수와 전기자의 슬롯 수의 비를 변경한 새로운 구조의 단 1차형 PMLSM을 제안하였으며, 제안된 PMLSM은 기존의 방법과는 다른 새로운 권선법을 사용하기 때문에, 기존의 PMLSM에 비하여 오히려 추력이 다소 증가하고, 전기자 내부의 디텐트력을 획기적으로 저감하였다. 또한 단부력을 저감하기 위하여 전기자 양 단부의 길이조정과 챔퍼링 법을 적용하여 영구자석 선형 동기 전동기를 설계하였다.

2. 기본모델

표 1과 그림 1에 기본모델의 제원 및 형상을 나타내었다. 단 1차형 영구자석 선형 동기 전동기(Short primary PMLSM)의 디텐트력은 전기자의 치와 영구자석에 의한 코깅력(Cogging force)과 전기자 양단과 영구자석에 의한 단부력(End effect force)의 합으로 표현되는데, 전기자의 치와 영구자석에 의한 코깅력은 회전기의 코깅토크에 대비되는 힘으로, 극 간격(pole pitch)의 2배를 영구자

석과 전기자의 슬롯비의 최소공배수로 나눈 값을 주기로 발생한다. 본 논문의 기본모델에서 영구자석과 전기자의 슬롯비는 2:3이므로 코깅력은 극 간격의 2배, 36mm를 최소공배수 6으로 나눈 값 6mm를 주기로 발생한다. 전기자 양단과 영구자석에 의한 단부력은 단 2차형 PMLSM에는 존재하지 않는 단 1차형 PMLSM 고유의 단부효과(End effect)에 의한 힘으로 극 간격의 주기로 발생한다. 그림 2에서는 전기자 치와 영구자석 사이에 발생하는 디텐트력과 단부효과에 의한 디텐트력 그리고 전체 디텐트력을 나타내었으며 디텐트력 저감 시 이러한 두 가지 디텐트력이 모두 고려하여 설계해야 한다.

표 1. 기본모델의 제원

Table 1. Specification of based model

구분	제원	
	상수	3
1차축(전기자)	슬롯폭	8(mm)
	슬롯간격	12(mm)
	적층폭	100(mm)
	극간격(τ_p)	18(mm)
2차축(영구자석)	두께	3(mm)
	폭	12(mm)
	재질	NdFeB
	전류자속밀도	1.23(T)
공극	기계적 공극	1.0(mm)

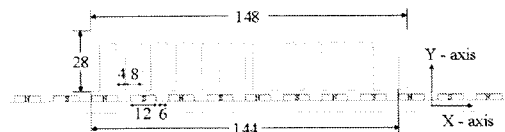


그림 1. 기본모델
Fig. 1. Based model

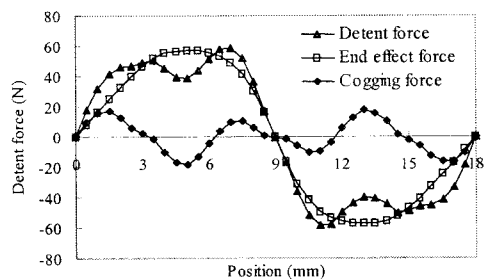


그림 2. 기본모델의 디텐트력 특성
Fig. 2. Detent force characteristics of based model

3. 전기자 내부의 디텐트력

기본 모델은 8극 12슬롯으로서 2극 3슬롯 구조의 전 동기 4개를 붙여놓은 형상으로 기존의 PMLSM에서 계자 영구자석의 수를 2P, 전기자의 슬롯 수를 T, 여자권선의 상수를 Q라고 할 때, 식 (1)이 성립하며, 기본 모델에서는 P=4, Q=3인 경우이다.

$$T=PQ \quad (1)$$

이때 영구자석과 슬롯 수의 최대공약수가 1이 되지 않고 항상 P가 되기 때문에 합성 디텐트력이 증폭되어 2극 3슬롯 모델 디텐트력의 P(4)배가 되어 나타난다.

4. 전기자 내부의 디텐트력 저감

4.1 슬롯비 조정에 의한 디텐트력 저감

전기자 내부의 디텐트력은 영구자석과 슬롯수의 최대공약수에 의해서 합성 디텐트력이 증폭되므로 계자 영구자석의 수를 (2P+1), 슬롯 수를 T, 여자권선의 상수를 Q라고 할 때 (P-n)Q > 2P 인 관계를 만족하는 n에 대하여, 식 (2)의 관계가 성립하는 새로운 구조를 갖는 영구자석 선형 전동기를 제안한다.

$$T=(P-n)Q+1 \quad (2)$$

이는 영구자석과 슬롯수의 최대공약수가 1이 되고, 최소공배수가 크게 되어 코깅력이 작아진다. 선형 전동기와 회전 전동기의 구조를 비교하면 선형전동기에는 그 특성상 슬롯보다 돌극치가 하나 더 많은 구조를 하고 있으며, 특히 집중권을 시행하는 경우에는 단부력을 저감하기 위하여 전기자의 길이를 조절해야 하기 때문에 양 단부의 두개의 치에는 권선을 할 수 없는데, 새로운 구조의 전동기에서 전기자의 돌극치 수가 권선 상수 Q의 정수배보다 두 개 많게 되므로 전기자의 길이를 조절할 수 있게 된다. 본 논문에서는 P=4, Q=3, n=1, T=10 일 때의 9극 10슬롯 구조의 모터를 예로 하였고, 이는 영구자석과 슬롯수의 최소공배수가 90이 되어 코깅력이 현저히 줄어들 것으로 예상된다. 그림 3에서는 제안된 9극 10슬롯 PMLSM의 형상을 나타내었다.

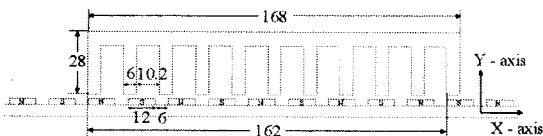


그림 3. 제안된 9극 10슬롯 모델
Fig. 3. Proposed model

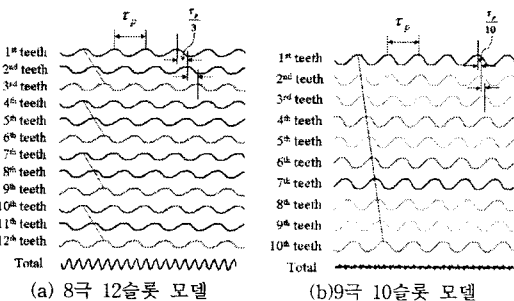


그림 4. 기본 모델과 제안된 모델의 코깅력 발생 원리
Fig. 4. Cogging force of based model and proposed model

개념적으로 2극 3슬롯 PMLSM에서는 그림 4에서와 같이 디텐트력이 증폭되어 발생하는데 반해, 9극 10슬롯

PMLSM에서는 각각의 teeth에서 발생하는 디텐트력이 증폭되지 않아 디텐트력이 저감될 것이다.

4.2 제안된 모델의 권선법

8극 12슬롯의 기본 모델을 9극 10슬롯의 모델로 형상을 바꿈으로서 코깅력은 줄었지만 기본 모델에 시행된 권선방법을 그대로 제안된 모델에 적용할 수 없으므로 새로운 권선방법을 찾아야 한다.

그림 5는 제안된 모델의 각 돌극치의 전기각을 표현하기 위한 그림이며, 제안된 모델은 기존 모델과 같이 이상적인 전기각에 전기자 치를 일치시킬 수 없으므로 각각의 돌극치에 이상적인 전기각에 가장 가까운 상의 전기자 권선을 시행하였다. 표 2에 각 돌극치에 대한 전기각과 전기자 권선 및 돌극치의 전기각과 전기자 권선의 위상차를 나타내었고, 그림 6은 제안된 모델에 새로운 권선이 시행된 모습을 나타낸다.

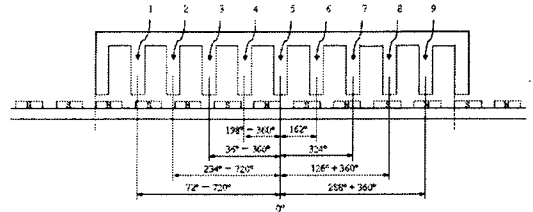


그림 5. 제안된 모델의 각 돌극치의 전기각
Fig. 5 Electric angle of proposed model's each tooth

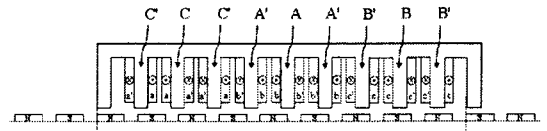


그림 6. 제안된 모델의 돌극치에 시행된 전기자 권선
Fig. 6. Armature winding of proposed model's each tooth

표 4. 제안된 모델의 각 돌극치의 전기각 및 권선
Table 2. Electric angle of proposed model's each tooth and winding

돌극치번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9
전기각(각도)	72	234	36	198	0	162	324	126	288
위상차이(각도)	12	-6	-24	18	0	-18	24	6	-12
상	-C	C	-C	-A	A	-A	-B	B	-B

4.3 제안된 모델의 추력

기본 모델과 제안된 모델에서 각 돌극치에 시행되는 권선수가 동일하다는 가정 하에 기본모델에 대한 제안된 모델의 자속의 비를 q라하고 기본 모델과 제안된 모델의 전기자 권선의 비를 r로 표현하면 제안된 모델의 효율은 식(3)과 같다.

$$n = qr \quad (3)$$

하지만 기본 모델에서 각 돌극치에 시행된 권선은 이상적인 전기각과 일치하는 반면, 제안된 모델에서 각 돌극치에 시행된 권선은 이상적인 전기각에 대하여 약간씩 벗어나고 있다. 따라서 식(4)에서 구한 효율n이 그대로 제안된 모델에서의 효율이라고 말할 수 없다. 따라서 이상적인 전기각에 대하여 벗어나는 각을 고려한 효율은 식(4)과 같고, 이는 기본 모델에 비하여 10% 크다.

$$n = 1.524 \{ \cos(12) + \cos(-6) + \cos(-24) + \cos(18) + \cos(0) + \cos(-18) + \cos(24) + \cos(6) + \cos(-12) \} + 12 = 1.102 \quad (4)$$

그림 7은 기본 모델과 제안된 모델의 추력 벡터 도면을 나타내었고, 그림 8은 유한 요소법에 의해 해석된 기본 모델과 제안된 모델의 코깅력 비교를 나타내었다. 최대 코깅력을 코깅력의 최고점과 최저점의 차이로 정의하면, 제안된 모델의 최대 코깅력은 7 (N)으로 기본모델의 최대 코깅력 36 (N)의 20%로 저감되었다. 그림 9는 유한 요소법에 의해 해석된 기본 모델과 새로운 권선이 시행된 제안된 모델의 추력 비교를 나타낸다. 추력의 최고치는 기본모델 178 (N)에서 207 (N)으로 16% 증가하였다.

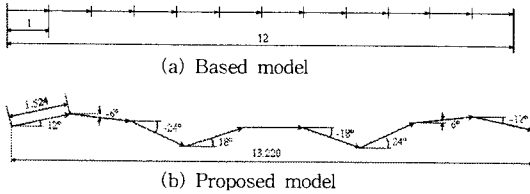


그림 7. 추력 벡터 도면
Fig. 7. Thrust vector

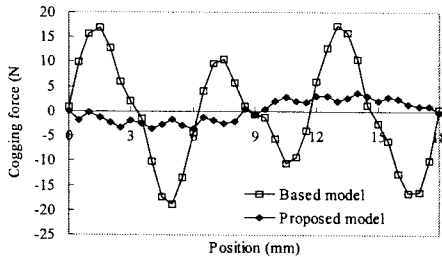


그림 8. 기본 모델과 제안된 모델의 디텐트력 비교
Fig. 8. Detent force comparison between based model and proposed model

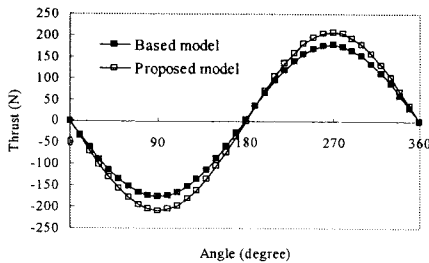


그림 9. 기본 모델과 제안된 모델의 추력 비교
Fig. 9. Static thrust comparison between based model and proposed model

5. 최적화 모델

단부력 저감을 위하여 영구자석 선형 동기 전동기의 전기자 양 단부의 길이를 조절한 후 챔퍼링을 하여 PMLSM을 설계하였다. 그림 10은 제안된 모델의 전기자 길이조정 후 형상과 챔퍼링 후의 형상이며 그림 11은 제안된 모델의 전기자 길이 조정과 챔퍼링 법 적용 후의 단부력의 변화를 비교한 것이다. 이러한 방법을 통하여 제안된 모델의 단부력은 PMLSM의 전기자 길이를 조절한 후 104.1 (N)에서 20.7 (N)으로 처음 값의 20%로 저감하였으며 PMLSM에 챔퍼링 법을 적용한 후에는 20.7 (N)에서 9.7(N)으로 47%로 저감하였다. 따라서 최적 설계 후 단부력은 9.7 (N)으로 총 9%까지 저감하였다.

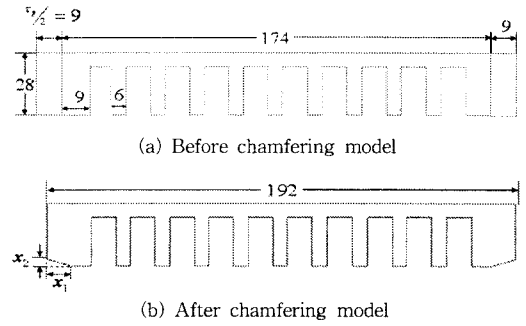


그림 10. 전기자 길이 조정 및 챔퍼링 후 모델
Fig. 10. Stator length and chamfering optimization model

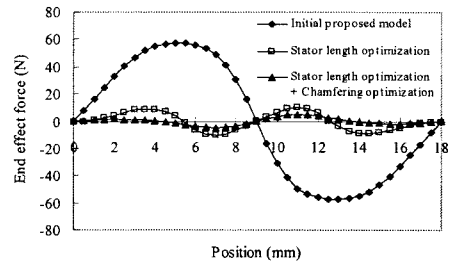


그림 10. 전기자 길이 조정 및 챔퍼링 후의 디텐트력 비교
Fig. 10. Detent force comparison between Stator length and chamfering optimization model

6. 결 론

본 논문에서는 단 1차형 선형 동기 전동기에 대하여 디텐트력을 해석하고, 영구자석의 극수와 전기자의 슬롯 수 비를 조절하여 전기자 치 내부에서 발생하는 디텐트력을 저감하였다. 초기 기본모델 전기자 치 내부의 최대 디텐트력을 제안된 방법에 의해 20%로 저감하였으며, 새로운 구조에 맞는 권선법을 적용하여 추력의 최고치를 16%상승시켰다. 또한 전기자 양 단부의 길이 조절한 후 챔퍼링 법을 적용하여 단부력을 9%로 저감하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정인성, "개선된 수치 해석 기법을 이용한 영구자석형 선형 동기전동기의 특성해석", 한양대학교 박사학위논문, 1999. 12
- [2] 임기재, "영구자석 선형동기전동기의 디텐트력 저감법", 대한전기학회논문지, Vol.49B, no.11, pp.749 - 756, 2000. 11
- [3] 이동엽, "PMLSM의 디텐트력 최소화를 위한 Notch의 적용에 관한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.40 - 42, 2005. 4
- [4] 가와시마진지, "돌극치를 가지는 전기자와 계자자석을 가지는 모터", 대한민국특허청, 제2290호, pp.95 - 116, 1991. 5
- [5] Masaya Inoue, "An Approach to a Suitable Stator Length for Minimizing the Detent Force of Permanent Magnet Linear Synchronous Motors", IEEE Transactions On Magnetics, vol.36, no. 4, pp. 1890 - 1893, 2000. 7