

Phase Set Shift를 이용한 PMLSM의 코깅력 저감법 연구

임재원, 김민재, 정현교
서울대학교

Research on the cogging force reduction using Phase Set Shift

Jaewon Lim, Min-Jae Kim, Hyun-Kyo Jung
Seoul National University

Abstract - 본 논문에서는 Phase Set Shift (PSS)를 이용한 영구자석형 선형 전동기에서의 코깅력의 저감에 대해 기술한다. Phase Set Shift는 코깅력의 주기성을 이용하여 코깅력을 저감하는 방법으로 각 phase set이 갖는 코깅력을 위상차이를 주어 서로의 코깅력을 상쇄하여 총 코깅력을 저감하는 방법이다. 선형 전동기의 코깅력의 해석을 위해서 유한요소법을 이용하였으며 코깅력의 주기성에 대한 연구를 위해 푸리에 급수를 이용하였다.

1. 서 론

최근 고 정밀 이송장비 및 건인 전동기로서의 선형전동기의 가치가 높아지고 있다. 직선 운동은 회전형 전동기와 기어 시스템을 통해 구현하기도 하나, 선형전동기를 사용하였을 때에 보다 높은 정밀도와 우수한 동적 특성을 나타내게 된다.

영구 자석형 선형 전동기가 갖는 가장 큰 문제점중 하나는 추력에 비해 큰 값을 갖는 코깅력이다. 코깅력은 영구자석과 고정자 치, 요크동과의 인력에 의한 힘으로 추력 리플 등의 형태로 나타나며 기기의 운전 특성을 저해하는 성분이다. 일반적으로 코깅력은 치 코깅력과 코어 코깅력으로 나눌 수 있는데 코어 코깅력은 극치피를 주기로 갖는 함수로 나타낼 수 있으며 치 코깅력은 치 피치와 극피치의 최대공약수를 주기로 갖는 함수로 나타낼 수 있다. 선형 전동기의 코깅력을 저감하는 방법으로는 챔퍼링, 바이퍼케이팅, 스큐 등의 저감법 등이 있으며 때로는 극 피치 조정법이나 자석의 형상을 조정하여 코깅력 저감을 하기도 한다.

본 논문에서는 Phase Set Shift(PSS)를 이용한 코깅력의 저감효과에 대해 살펴보았다. PSS는 코깅력 저감을 위해 새로이 제안된 방법으로 코깅력이 주기성을 띄는 것을 이용한 방법이다. 일반적으로 코깅력은 영구자석과 고정자와의 인력에 기인하는 것이며 영구자석은 극 피치를 주기로 배열되어 있고 고정자 치의 경우 치 피치를 주기로 위치하고 있기 때문에 결과적으로 코깅력도 앞의 주기와의 관계를 가지고 나타내게 된다. 코깅력과 극 피치, 치 피치와의 관계를 알아보기 위하여 푸리에 급수를 이용하였다. 본 논문에서 다루고 있는 선형 전동기는 그림 1에 나타내었으며 그 제한 사양은 표 1과 같다.

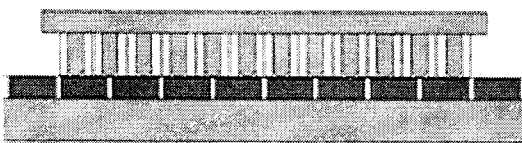


그림 1. Basic model

Table 1: PMLSM의 제원.

항목	값	항목	값
극 피치	45mm	극/상	2/3
치 피치	30mm	추력	1000N
속도	2m/s	Phase Set	4

2. 본 론

2.1 선형 전동기의 코깅력 해석

2.1.1 코깅력의 푸리에 급수 전개

코깅력은 앞에서 밝힌 바와 같이 주기성을 갖게 되며 그 주기는 치피치, 극피치와 밀접한 관련이 있다. 이와 같은 주기적 특성을 파악하기 위하여 코깅력에 대해 푸리에 급수 전개를 수행하였다. 2L의 주기를 갖는 푸리에 급수 전개를 위한 식은 다음과 같다.

$$F(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \frac{n\pi}{L} x + b_n \sin \frac{n\pi}{L} x) \quad (1)$$

기본모델의 코깅력 해석 결과와 그 코깅력 해석 결과의 푸리에 급수 전개는 각각 그림 2, 그림 3에 나타내었다. 극 피치의 두 배에 해당하는 길이만큼 해석을 수행하였다.

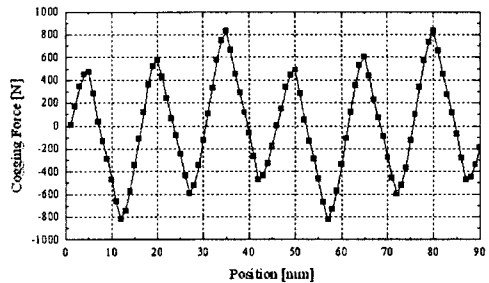


그림 2. 기본 모델의 코깅력

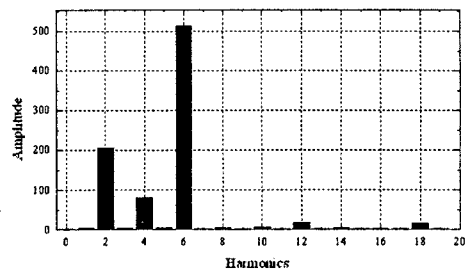


그림 3. 코깅력의 푸리에 급수 전개

그림 3에 표시한 푸리에 급수의 상수들 중 2고조파와

6고조파가 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이 고조파들로부터 코깅력의 특성을 알 수 있는데 2고조파의 경우 2고조파의 파장이 극 피치와 일치한다. 6고조파의 파장은 극 피치와 치 피치의 최대공약수와 일치한다. 이는 곧 2고조파가 나타내는 코깅력은 요크부와 영구자석간의 인력에 의한 코어 코깅력이며 6고조파가 나타내는 것은 영구자석과 치 사이의 인력에 의한 코깅력으로 분석할 수 있다. 그중에서도 특히 치에 의한 코깅력이 크게 나타나게 되며 결과적으로 총 코깅력 중 치 코깅력에 의한 성분이 지배적임을 알 수 있다.

2.1.2 Phase Set Shift

Phase Set Shift(PSS)의 개념도는 그림 4에 나타내었다. 앞에서 언급한 것처럼 코깅력은 주기성을 갖는 함수로 표현될 수 있다. 또한 3상 1세트가 하나의 Phase Set을 구성한다고 할 때 각각의 Phase Set의 치 코깅력은 동일하다고 할 수 있다. 따라서 총 치 코깅력은 각 Phase Set의 치 코깅력의 합과 같을 것이다. 이때 각각의 Phase Set의 위치를 변화시킨다고 한다면 주기적인 성질을 갖는 코깅력은 서로 상쇄될 것이며 이 효과에 의해 총 코깅력의 크기도 저감될 것이다. PSS의 길이에 따른 코깅력의 푸리에 급수 상수의 변화는 그림 5에 나타내었다. 이때 PSS의 작은 극 피치와 치 피치의 최대공약수를 기준으로 각으로 환산한 값이다. 그림에서처럼 PSS의 각이 증가함에 따라 6고조파, 즉 치 코깅력의 성분이 급격히 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 각각의 Phase Set이 갖는 치 코깅력의 파형이 서로 상쇄되어 없어진 것으로 이해할 수 있다. 하지만 상대적으로 요크에 의한 코깅력 성분이 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 치 코깅력의 저감에 비해서는 미미한 값이라 할 수 있다. PSS각이 180도 일 때의 코깅력과 기본 모델의 코깅력의 비교 파형은 그림 6에 나타내었다. 그림 6에 나타나는 것처럼 기본 모델의 코깅력에서 보이는 치 코깅력에 의한 리플들이 상쇄되어 사라진 것을 알 수 있고 결국 요크에 의한 코깅력만 남아 있는 것을 확인할 수 있다.

총 코깅력의 저감을 위해서는 치 코깅력과 코어 코깅력을 동시에 고려해 주어야 하지만, 이 선형 전동기의 경우 치 코깅력이 지배적이기 때문에 치 코깅력을 저감하기 위해서는 다음과 같은 식으로 τ_{PS} 를 정해 줄 수 있다.

$$\tau_{PS} = \frac{GCD(\text{teeth pitch, pole pitch})}{\text{Number of Phase set}} \quad (2)$$

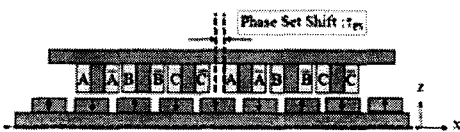


그림 4. Phase set shift의 개념

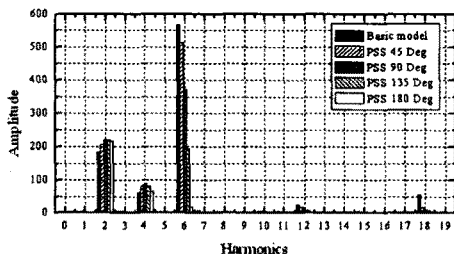


그림 5. PSS각에 따른 코깅력의 푸리에 급수 전개

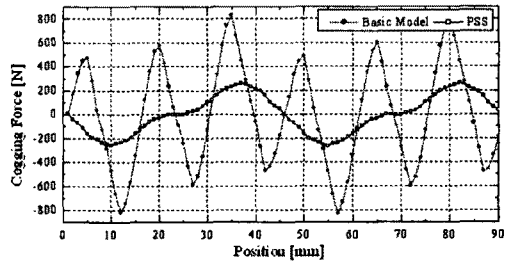


그림 6 기본 모델과 PSS모델의 코깅력 비교

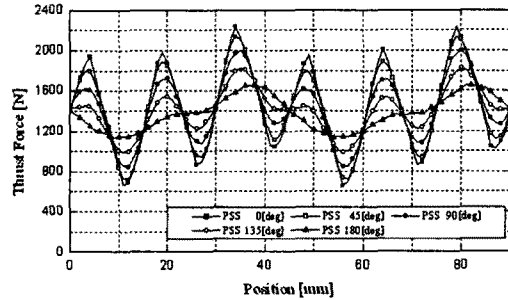


그림 7. 기본 모델과 PSS모델의 추력 비교

2.2 선형 전동기의 추력 해석

코깅력의 최대값은 832N에서 262N으로 약 68%가 저감되었다. 하지만 PSS는 영구자석의 피치는 변화가 없는 가운데 고정자의 Phase Set의 위치가 변하게 되는 것으로 기존의 고정자가 위치해야 할 곳과 약간의 차이가 발생하게 된다. 따라서 위와 같은 위치 차이에 의한 추력의 손실이 발생하게 되는데 이는 각 Phase Set에 위상차를 갖는 전류가 흐르게 되는 것과 같은 효과를 갖는다. 따라서 PSS 각이 커지면 커질수록 추력의 손실이 크게 발생하게 된다. 그림 7에서 보이는 것처럼 PSS 각이 180도 일 때 평균 추력은 약 5%의 손실을 갖게 되며 68%가 저감된 코깅력의 저감의 폭에 비추어 볼 때 추력의 손실은 크지 않은 것으로 생각된다.

3. 결론

본 논문에서는 Phase Set Shift(PSS)를 이용한 선형 전동기에서의 코깅력의 저감에 관하여 기술하였다. PSS는 코깅력의 주기성을 이용하여 효과적으로 코깅력을 저감하는 방법이며 추력저감을 동반하게 된다. 하지만 코깅력 저감의 효과는 추력의 손실에 비해 우수함을 보여 주고 있으며 이 방법을 통해 저비용으로 선형 전동기에서 코깅력의 저감을 달성할 수 있을 것으로 생각된다.

[참고 문헌]

- [1] I. Boldea, S.A. Nasar, "Linear Electric Actuators and Generators". IEEE Trans. on Energy conversion, Vol. 14, pp712-717, September 1999
- [2] Bianchi N., Bolognani S., Cappello A.D.F., "Reduction of Cogging Force in PM Linear Motors by Pole-Shifting," IEE Proceedings- Electric Power Applications, Vol. 152, Issue 3, May 2005.
- [3] Zhu Z. Q., Hor P. J., Howe D., and Rees-Jones J., "Calculation of Cogging Force in a Novel Slotted Linear Tubular Brushless Permanent Magnet Motor," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 5, September 1997.