2011년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2011. 7. 20 - 22

Module Phase Set Shift를 이용한 선형 동기 전동기의 추력 리플 저감 설계

유광현*, 이형우**, 조수연*, 오세영*, 함상환*, 임종빈*, 안한웅*, 이주*
한양대*, 한국철도기술연구원**

Design of Linear Synchronous Motor for Thrust Force Ripple Reduction using Module Phase Set Shift

Gwang-Hyeon Ryu*, Hyung-Woo Lee**, Su-Yeon Cho*, Se-Young Oh*, Sang-Hwan Ham*, Jong-Bin Im*, Han-Woong Ahn*, Ju Lee*
Hanyang University*, Korea Railroad Research Institute**

Abstract - Rotating machines are using gears to change the rotary motion into the linear motion, on the other hand, linear motors have a accurate position control and excellent dynamic characteristics because of generating a thrust force directly. But the important problem, one of the linear motor is a high thrust force ripple. Thrust force ripple has a bad effect on the position accuracy and the dynamic characteristics, so it is necessary to reduce the thrust force ripple. Cogging is one of the cause that affect thrust force ripple. Cogging has some connection with the GCD between pole pitch and teeth pitch

It is proposed method to reduce a thrust ripple of the linear motor that chamfering, skew, and so on. In this paper, the module phase set shift(MPSS) is used to reduce a thrust force ripple that has a similar effect to skew. And propose a method that reduce a thrust force ripple more by use of chamfering.

1. 서 론

LSM의 경우, 구동 시 추력 리플의 요인은 여러 가지일 수 있으나 코깅력은 추력리플의 주 성분으로 작용한다. 초고속 튜브철도의 경우, 추진과 자기부상을 동시에 수행해야 하는데 이러한 추력리플 성분은 자기부상 제어에 대해서 외란성분으로도 작용할 뿐 아니라, 승차감에도 큰 영향을 주기 때문에 추력리플의 저감에 대한 설계 및 제어는 필수적이다. 코깅력의 저감을 위한 방법은 회전형 동기전동기와 유사하다. 대표적인 방법으로 고정자 및 회전자에 스큐(Skew)를 주는 방법, 계자를 영구자석으로 할 경우, 착자를 정현적으로 하는 방법, 공극 길이를 크게 하는 방법, 슬롯수 대 극수 비를 증가시키는 방법, 치 표면에 보조슬롯을 추가하는 방법, 낮은 자속밀도의 영구자석을 이용하는 방법 등이 있다. LSM의 경우, 위의 방법들에 대한 적용이 용이하지 않다. 따라서 LSM에 적용 가능한 코깅토크 저감 설계법에 대한 연구와 논의가 따로 진행되어야 되며 그에 대한 유한요소해석법을 적용하여 설계법이 적합한지에 대한 검증이 수행되어야 한다. 또한 코깅력와 같은 LSM의 추진 특성에 대해서 각각의 설계 변수들이 미치는 영향을 분석하기 위하여 설계 파라미터들의 변화가 미치는 영향에 대해서 파라미터 분석을 수행할 필요가 있다.

2. 본 론

2.1 기본모델

2.1.1 LSM 설계

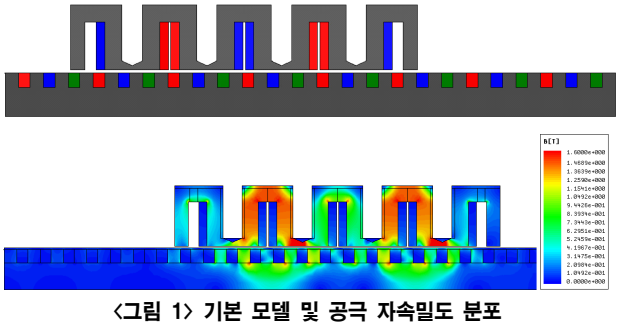
LSM의 설계 스펙은 아래의 표 1과 같다. 요구되는 기동 추력 및 정격시 추력은 81.7[kN]이며 정격 속도는 300[km/h]이다. 극 수는 10개 씩을 하나의 모듈로 20개의 모듈을 갖게 된다. 1개의 모듈에 대한 해석결과를 20개로 확장을 시키면 전체적인 특성을 알아볼 수 있다. 10극 전체를 디자인 하고 특성을 분석하게 되면 해석 시간이 오래 걸리게 되므로 여기에서는 4극만을 디자인하여 해석을 수행하였다.

<표 1> LSM 설계 Spec

정격 용량 / LSM 1열	6.81	MW
기동 추력(정격 출력) (300km/h / 700km/h)	81.7	kN
주파수 (300km/h / 700km/h)	161.50 /376.80	Hz
입력 선간 전압 (300km/h / 700km/h)	7794.23	V_rms
입력 상 전압 (300km/h / 700km/h)	4857.00	V
입력 전류 (300km/h / 700km/h)	1583 / 758	A
공극	10.00	mm
극 간격	258.00	mm
섹션 길이	1200.00	m
극 수	200.00	
티스 폭	100.00	mm
요크 폭	100.00	mm
코어 적층폭	220.00	mm
슬롯 깊이	100.00	mm
코일 턴수 (설계값 / 특성계산값)	200	turns
코일 전류	25.00	A
매극매상 슬롯수	1.00	
상당 직렬 턴수	100.00	turns
요크 두께	100.00	mm
치 폭	46.00	mm
슬롯 깊이	50.00	mm
슬롯 폭	50.00	mm

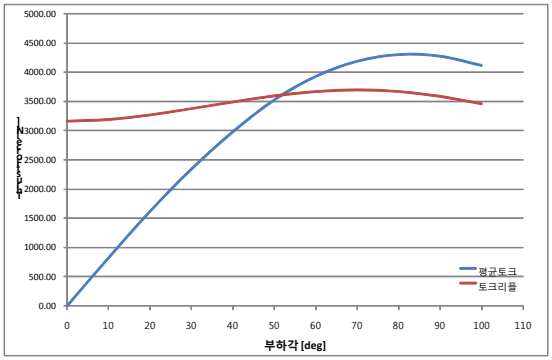
2.2 FEM을 이용한 기본 모델 특성 해석

FEM을 이용하여 기본 모델에 대하여 부하각에 따른 추력 및 추력 리플해석을 수행하였다. 해석 모델 및 공극 자속밀도의 분포를 다음의 그림 1에 나타내었고 그림 2에서 특성을 보이고 있다.



<그림 1> 기본 모델 및 공극 자속밀도 분포

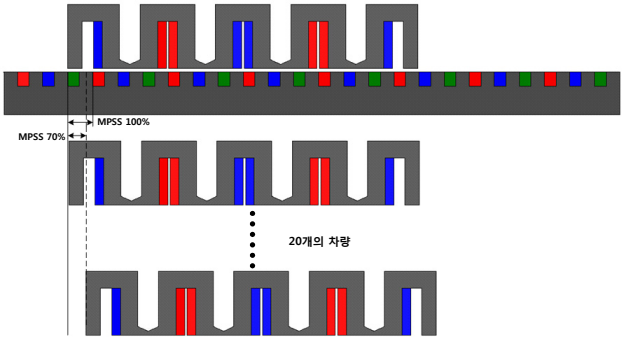
정격에서 부하각 70°에서 동작시킬 경우, 평균추력은 4191.7[N]이며 이때의 추력 리플의 peak to peak 값은 3650.7[N]이다. 이것은 하나의 모듈에 대한 해석 결과이며 이를 20대의 모듈로 환산할 시 평균추력은 83.75[kN], 추력 리플의 peak to peak 값은 73.92[kN]이다. 평균 추력 대비 추력 리플의 크기가 약 88% 정도로 매우 크다. 따라서 동적 특성 및 위치 정밀도에 있어 매우 좋지 않은 특성을 보이게 되기 때문에 개선이 필요하다.



〈그림 2〉 부하각에 따른 추력 및 추력 리플 특성

2.2.1 MPSS 적용 모델

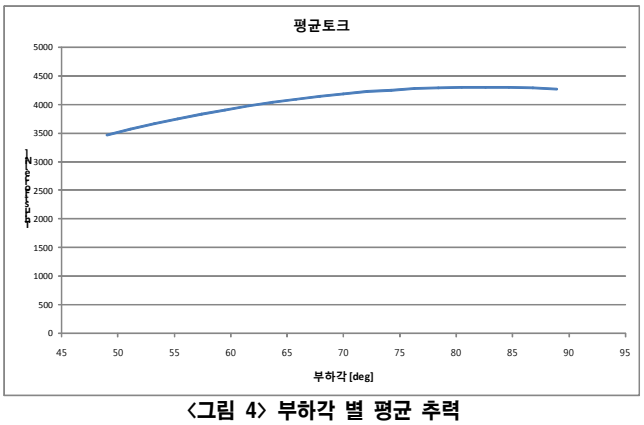
앞서서 보았듯이 LSM 기본 설계 모델에 있어서 추력 리플이 평균 추력에 대비하여 약 88% 정도를 차지하고 있으므로 이를 효과적으로 줄이는 방안이 요구된다. 이에 대해 본 논문에서 제안하는 방식이 바로 MPSS이다. 회전기기에서는 코깅 토크, 토크 리플을 저감하기 위한 방안으로 스큐를 준다. 고정자의 철심이 적층되는 방향으로 비틀림을 주는 것으로 맨 윗단의 철심과 맨 아랫단의 철심이 어긋나도록 하여 철심 각각에서의 리플 성분들의 총 합이 서로 상쇄되도록 하여 리플을 줄이는 방법이다. 선형기에서도 이와 같은 원리로 적층 방향으로의 스큐를 줄 수 있다. 하지만 이와 같은 스큐 방식은 제작 상에 난점이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 적층 방향이 아닌 진행 방향, 길이 방향으로 위치를 어긋나게 하여 리플의 총 합을 줄일 수 있도록 하는 방식을 제안하였다. MPSS 방법의 적용방안을 아래의 그림 3에 나타내었다.



〈그림 3〉 설계 모델의 MPSS 적용방안

영구자석에 의한 코깅력을 계산할 경우 전기자 권선에 전류를 흘려주지 않고 영구자석만을 회전시키면서 계산을 수행할 수 있으나, 계자권선을 이용하는 경우에는 전기자 권선에 전류를 흘려주어야 하며 계자의 상대적인 위치 변화에 따른 부하각의 변화를 고려하여 추력을 계산하여야 한다.

초기 부하각 0°의 위치를 선정하고 난 후, 설계 모델에 MPSS를 적용시키기 위하여 부하각을 변화시켜가면서 평균추력의 변화를 다음의 그림 4에 보이고 있다.



〈그림 4〉 부하각 별 평균 추력

하나의 슬롯 피치의 간격을 MPSS 100%라 하였을 때 100% 그대로 적용할 경우 리플은 줄어들지만 추력도 같이 줄어들게 든다. 이에 대해서 MPSS를 0%에서 100%까지 적용해 보았다. MPSS 70% 정도에서의 평균추력이 MPSS 0% 에 비해 약 3% 정도 감소하여 81.24[kN] 이며, 추력 리플의 경우 약 63%가량 감소하여 pk2pk 기준으로 27.13[kN]으로 나타났다. 처음 목표하였던 30% 이하로 감소시키기 위한 선택으로 적절하며 평균 추력의 저감이 크지 않아 추력을 유지하기에도 좋은 선택이다.

3. 결 론

MPSS를 적용하지 않은 초기 모델과 MPSS 70%를 적용한 모델에 대한 특성을 정리하여보면 표 2와 같다. 결과에서 알 수 있듯이, 기본 모델에 대하여 MPSS를 70% 적용할 경우 기본 모델에 대하여 추력 리플을 약 36.7% 까지 줄일 수 있었다.

〈표 2〉 기본모델과 MPSS 적용 모델의 추력 특성 비교

	평균 추력 [kN]	추력 리플 [kN]	적용모델 /기본모델 [%] (평균추력)	적용모델 /기본모델 [%] (추력리플)
기본모델	83.75	73.92	100	100
MPSS 70%모델	81.24	27.14	97.0	36.7

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 20104010100050)

[참 고 문 헌]

[1] H. W. Lee, K. C. Kim, and J. Lee, "Review of maglev train technologies," IEEE Trans. on Magn., vol. 42, no. 7, pp. 1917-1925, Jul. 2006.

[2] JR. Janssen, C. P. Riley, R. C. F. McLatchie, C. Glasgow, T. Gutierrez, J. Simkin, P. Brochet, C. Furmaniak, F. Gillon, G. Molinari, P. Alotto, J.F. Lemoine, and G. Drago, "An environment for the optimization of electromagnetic design," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, no. 4, pp. 1640-1644, July 2000.

[3] Jaewon Lim, Hyun-Kyo Jung, "Cogging Force Reduction in Permanent magnet Linear Motor using Phase Set Shift", Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, 2008