

부분여자된 영구자석형 선형동기전동기의 단부효과 해석

정상용, 천장성, 정현교
 서울대학교 전기역학연구소, 미래산업(주)

Analysis of the End-Effect of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Energized by Partially Excited Primary Current

Sang-Yong Jung, Jang-Sung Chun, Hyun-Kyo Jung
 Electromechanics Lab. Seoul National University, Mirae corporation

Abstract - 부분여자된 영구자석형 선형동기전동기(PMLSM)의 단부효과를 고려한 특성을 나타낸다. 선형동기전동기의 고효율 운전을 위하여 전기자 권선을 가동자의 위치별 부분여자하였으며, 이와 더불어 양단부의 제한된 자석길이에 의한 단부효과를 나타낸다.

1. 서 론

선형전동기는 구조적으로 제한된 길이를 지니고 있어 회전기와 다른 특징적인 단부효과 특성을 가진다. 선형 유도전동기(LIM)의 경우, 단부효과 해석이 여러 방면으로 이루어졌으나 PMLSM의 경우엔 아직 미비한 실정이다. LIM에서 단부효과 특성은 이동 도체의 속도에 밀접한 영향을 받는 반면 선형동기전동기의 경우 양단부의 자석에 의한 자속의 프런징 효과와 연관된다. 실제 이러한 단부효과를 제거하고자 끝단에 부가자석을 장착시킨 모델도 현재 존재한다. 본 논문에서는 이러한 단부효과로 인한 여러 가지 특성, 즉 불균일한 자속 파형, 비정현적 역기전력, 추력 리플등을 고려한다. PMLSM는 흔히 고추력, 높은 위치 정밀도, 경량화, 비접촉 운전을 요하는 시스템에 적용되는데 본 기기는 반도체 장비인 X-Y Gantry에 응용된다. 특히 가동자의 위치에 따라 전기자 권선을 여자 시키는 부분 여자 특성을 나타내는데, 단부효과와 더불어 이로 인한 특성을 나타낸다.

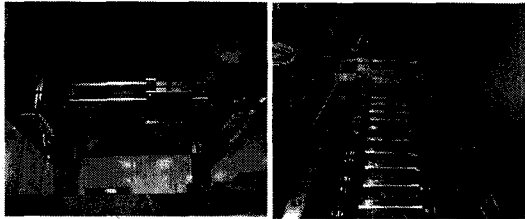


그림 1. X-Y Gantry 및 PMLSM

2. PMLSM 구조 및 특성 해석

2.1 PMLSM 구조

본 논문에 응용된 PMLSM은 가동 자석형 편측식 형태를 지니며 이는 가동 코일형에 비해 단부효과 특성이 더욱 현저하다. 전기자 권선은 그림 1., 2.에서 보듯이 1 슬롯 피치, 집중권으로 이루어졌으며, 슬롯이 없는 구조이다. 자석 4개와 코일 3개로 한 개의 모듈을 이루며 전체 시스템은 이러한 여러개의 체결된 모듈들로 이루어지며, 이러한 구조는 제작상의 용이함으로 인하여 많이 사용되는 있다.

2.2 PMLSM 특성 해석

2차원 벡터포텐셜을 이용한 공간조파 해석을 통하여 PMLSM의 해석적 특성을 나타내었다. 특히 공간조파 해석시, 푸리에 급수 전개가 필수적인데, 제한된

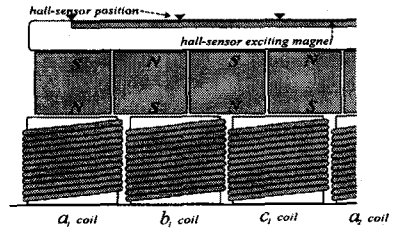


그림 2. PMLSM의 자석 및 코일 배치

자석 길이 표현을 위하여 변형된 전개가 적용되었다.

$$\frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial y^2} = -\mu_0 J(x) \quad (1)$$

지배방정식 (1)에서 $J(x)$ 는 영구자석 모델의 경우엔 등가자화 전류 성분, $J_m(x)$, 이 되며 식 (2)에 나타나 있다.

$$J_m(x) = -\frac{n\pi}{\tau_e} (\pm) H_{ch} \sum_n a_n \cos \frac{n\pi}{\tau_e} x \quad (2)$$

여기서, $a_n = \frac{2}{\tau_e} \int_{-\frac{\tau_e}{2}}^{\frac{\tau_e}{2}} (\pm) H_c h_m \sin \frac{n\pi}{\tau_e} x dx$

식 (2)에서 τ_e 는 변형된 반과장으로서, 주기적인 특징이 있는 푸리에 급수전개에서 자석의 제한 길이를 표현하기 위하여 도입되었으며, 그 크기는 전동기 전체 길이 보다 무척 커야한다. 식 (2)를 이용하여 식 (1)에 대한 해는 다음과 같다.

$$A_m(x) = \mu \sum_n (A_n e^{nK_e y} + B_n e^{-nK_e y} + \frac{j_m}{n^2 K_e^2}) \cos nK_e y \quad (2)$$

여기서, $K_e = \frac{n\pi}{\tau_e}$, j_m : $J_m(x)$ 의 크기

전기자 모델에서도 위에서와 마찬가지로 전개될 수가 있는데, 여기서 사용된 푸리에 급수전개는 지금까지와는 다소 다른 점이 있는데, 지금까지는 전기자 전류를 등가적인 기자력으로 표현하여 사용하였지만, 본 연구에서는 직접적으로 전기자 전류, 코일 형상 및 배치를 표현할 수 있다. 한쌍당 전류 밀도는 아래와 같이 표현할 수가 있으며, 자속 밀도 표현식도 식 (2)와 유사하다.

$$J_a(x) = \sum_n b_n \sin \frac{n\pi}{\tau_e} x \quad (3)$$

여기서, $b_n = \frac{2}{\tau_e} \int_{-\frac{\tau_e}{2}}^{\frac{\tau_e}{2}} \left(\frac{NI_a}{S_w S_d} \right) \sin \frac{n\pi}{\tau_e} x$

S_w : 슬롯 폭, S_d : 슬롯 깊이
 I_a : 상당 최대 전류

2.3 자속 밀도 특성

식 (2)를 바탕으로 자속 밀도를 구할 수가 있다. 본 해석에서는 공간고조파법을 이용한 자속 밀도와 유한요소법에 의한 결과를 비교하여 해석법의 엄정성을 규명할 수가 있다.

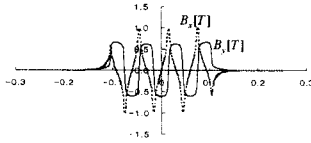


그림 3. 자속에 의한 자속 밀도(공간고조파법)

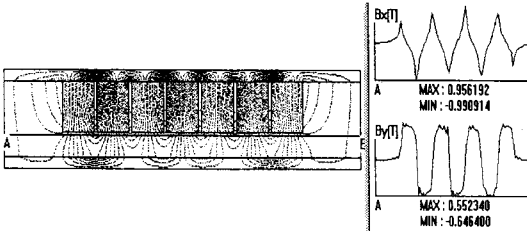


그림 4. 자속에 의한 자속 밀도(유한요소법)

그림 3. 과 4.는 7극에 대한 자속 밀도 결과를 공간고조파법과 유한요소법에 대하여 각각 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 파형은 매우 일치하며, 특히 양단부에서 자속이 누설이 생겨 왜곡됨을 확인할 수가 있었다.

3. 부분여자 및 추력 특성

3.1 부분여자 회로 및 특성

본 PMLSM은 가동자석형 모델로서 자석의 위치에 대하여 자석 아래 단에 위치한 코일에만 전류가 인가되는 부분여자 회로로 구동되고 있다. 불필요한 전체 여자가 아닌 부분여자를 통하여 전동기의 효율을 증대시킬 수 있는데, 이동자(자석)의 위치를 파악할 수 있는 센싱용 자석 및 높은 위치 정밀도가 요구된다.

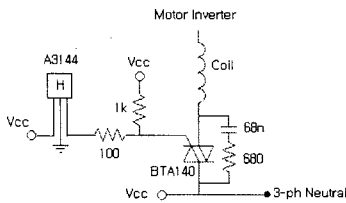


그림 5. 부분여자 회로

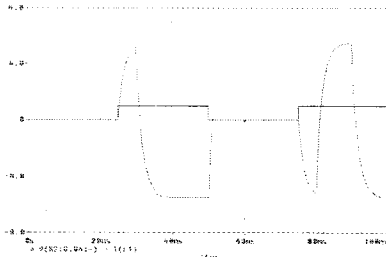


그림 6. 부분여자 회로 동작 특성 결과

그림 5.는 부분여자 회로를 나타내었는데, 홀 센서(A3114, Allegro Micro Systems, Inc.)와 트라이액

(BTA140, Philips Semiconductors)이 사용되었다. 그림 6.에서는 위의 부분여자회로의 동작 특성 결과를 나타내었다. 그림에서 나타나듯이 게이트 신호가 on(high)이면, 교류 $\pm 5[A]$ 의 전류가 흘러야 하며, 만약 off(low)이면, 전류는 0이 되어야한다. 그래프에서 보듯이 이러한 동작이 원활하게 이루어지고 있다.

3.2 코일에 의한 자속 밀도 및 추력 특성

비록 효율 최대화를 위하여 부분 여자 회로가 도입되었지만, 센싱된 자석 아래 단의 코일 전부가 여자 되는 것은 아니다. 페이지의 3상 대칭 밸런스를 맞추기 위하여 언제나 3상의 전류만 여자가 된다. 즉, 한쪽 단의 자속이 이탈할 때 그 아랫단의 전류가 꺼지면, 새롭게 인입되는 자석의 아랫단에 있는 같은 상의 코일이 여자가 되는 것이다. 이러한 특성은 전체 여자 방식에 비해 매우 큰 추력 리플을 발생시키는데, 이에 대한 결과를 아래에 나타내었다.

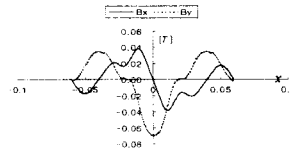


그림 7. 전기자 전류에 의한 자속 밀도

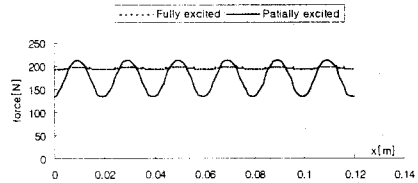


그림 8. 여자방식에 따른 추력 특성

그림 7.은 전기자 전류에 의한 3상 자속 밀도 파형을 나타낸 것이다. 이 또한 전기자를 3상(3코일)만을 여자시킨 결과로서 이에 대한 프린트는 미비하게 나타난다. 그림 8.은 전체 여자를 하는 방식과 부분여자를 하는 방식에 따른 추력 특성을 나타내었다. 추력은 맥스웰 용력을 이용하여 구하였으며, 그림 7.에 나타난 전기자 전류에 의해 여자된 결과이다. 그림에서 나타나듯이, 부분 여자 방식에서 더욱 뚜렷하게 추력 리플이 나타나는데, 이는 위에서 설명했듯이 코일 여자 스위칭에 기인한다. 또한 평균 추력 또한 부분여자 방식이 작는데, 이는 전체 여자 방식에서는 부분여자된 코일만큼 외에도 그 근접한 코일에 의하여 더욱 많은 성분들이 추력에 기여를 하기 때문이다.

4. 쇄교자속 및 역기전력

본 PMLSM에서 전기자 권선은 단절(1슬롯 피치), 집중권으로 형성되어, 쇄교자속 및 역기전력이 정현적이지는 않다. 특히 역기전력은 과도 해석 및 제어적인 측면에서 매우 중요한데, 상당 역기전력은 양단부의 단부 효과와 연관성이 있다. 그림 9. 와 10.은 PMLSM의 이동자(자석)를 동기속도 2[m/sec]로 이동시키면서, 전기자 권선에 쇄교하는 자속과 역기전력 성분을 나타낸다.

그림 9.는 전기자 권선에 쇄교하는 자속을 나타내며, 실선으로 그려진 두 그래프는 두 코일에서 쇄교하는 자속 성분을 각각 나타내는데, 같은 상으로 전체 이동자의 길이만큼 떨어져 있는 코일에서의 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 양끝단 파형이 비선형적으로 왜곡됨을 알 수가 있는데, 특히 자석이 이탈하는 순간에서 감소되는

해교자속은 같은 양만큼 인입되는 자속에 의해 보상됨을 알 수가 있다. 따라서, 이러한 그래프의 각 상당 코일별 합을 살펴보면 점선에서와 같이 근사적으로 정현적인 값이 된다. 이와 더불어 그림 10.에서 나타난 역기전력 파형도 이와 유사한 결과를 나타내는데, 감소되는 역기전력은 같은 상의 다른 끝단 역기전력에 의해 명확하게 보상됨을 알 수가 있다. 허나, 비록 전체적으로는 정현적인 역기전력으로 간주할 수 있으나, 부분여자시 스위칭은 순간적으로 이루어지므로 그렇게 연속적인 역기전력은 기대하기 어렵다.

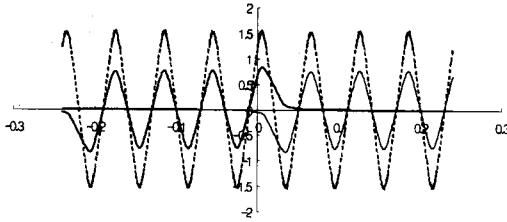


그림 9. 코일 쇠교 자속(이동자 속도 : 2(m/sec))

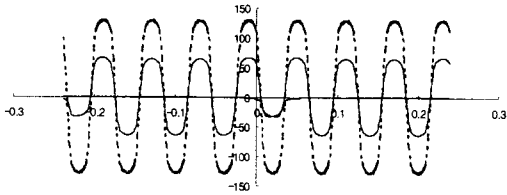


그림 10. 역기전력(이동자 속도 : 2(m/sec))

5. 인버터 제한치를 고려한 실제 발생 추력

PMLSM은 고응답성, 급가감속등에 사용되는데, 실제 운전이 대부분 과도 상태에서 이루어진다. 따라서, 특성 해석 및 설계에서 동적 특성이 매우 중요한데, 본 절에서는 실제 운전(과도상태)시 PMLSM이 발생시킬 수 있는 추력(Capability of Thrust Force)을 나타낸다. 이는 인버터의 전압, 전류 제한치에 의해 나타나는 현상으로 설계시 PMLSM이 동작할 수 있는 실제 추력이라는 측면에서 의미가 있다.

실제 발생하는 추력은 가동자의 동적 상태에서의 속도에 매우 관련이 있는데, 이에 따라 속도별 발생 추력을 나타낼 수가 있다. 인버터 출력 전압 및 전류 제한치와 이동자의 기계 방정식을 결합하여 실제 발생 추력을 나타낼 수가 있는데 아래와 같이 요약된다.

$$F_{\max} = \frac{3}{2} K_e \min \left\{ \frac{-R_s K_e v + \sqrt{C_1 - C_2}}{R_s^2 + v^2 L_s^2 (2\pi/\tau)^2}, I_{\max} \right\} \quad (4)$$

여기서, $C_1 = (R_s^2 + v^2 L_s^2 (2\pi/\tau)^2) V_{\max}^2$

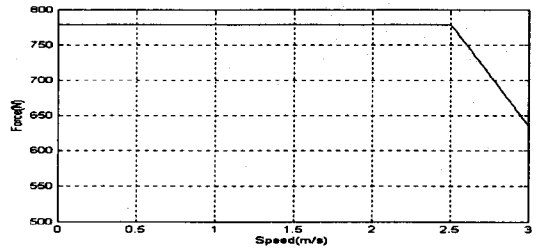
$$C_2 = K_e L_s v^2 (2\pi/\tau)$$

$$L_s = L_d = L_q = L_k + \frac{3}{2} L_{ms}$$

$$L_k : \text{누설자속}, L_{ms} : \text{자화 인덕턴스} \approx \frac{N^2}{R_s}$$

식 (4)는 인버터의 출력 전압, 전류 제한치(V_{\max} , I_{\max})를 고려한 속도별 최대 추력이 된다. 즉, 인버터의 전류, 전압 제한치에 의한 최대 추력과 전동기의 특성 해석에서 나온 결과의 최소값에 해당한다.

그림 11.은 식 (4)를 바탕으로 나타낸 결과로서 그림에서 평활한 최대치는 실제 PMLSM이 낼수 있는 최대 추력에 해당하게 된다.



$$R_s = 6.2 \Omega, L_s = 11.1 \text{ mH}, K_e = 35 \text{ V/(m/s)}$$

$$I_{\max} = 15 \text{ A}, V_{dc} = 220\sqrt{2} \text{ V}, V_{\max} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{dc} \approx 180 \text{ V}$$

그림 11. 속도별 최대 추력 특성

저속의 경우 전류대 최대추력은 대부분 발생 가능한데, 이는 인버터 전압 용량이 전류를 여자 시키기에 충분하기 때문이다. 허나 속도가 증가함에 따라 급격히 역기전력은 증가하며 발생하는 최대 추력은 속도에 반하여 감소하게 된다. 고속의 경우엔 인버터 전압은 더 이상 전류제어의 요구에 부합하지 않으며, 추력에 직결되는 q축 전류도 급격히 격감하여 더 이상 추력을 보장할 수가 없게 된다. 이와 같은 특성은 PMLSM에서 허용 가능한 설계 집합(admissible design set)으로, 최적 설계시 제한 조건으로 인가함으로써, 실제 동작 특성과 가까운 설계를 이룰 수 있음으로 그 의미가 있다고 여겨진다.

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석형 선형동기전동기(PMLSM)의 단부효과에 따른 여러 가지 제특성에 대하여 살펴보았다. PMLSM의 특성해석은 2차원 공간고조파법을 사용하였으며, 이에 대한 검증용 유한요소법 결과와의 비교를 통하여 나타내었다. 양끝단에 위치한 자석의 프린팅되는 자속 발생으로 인하여, 왜곡된 자속, 추력 리플, 비정현적인 역기전력등을 확인 할 수가 있었으며, 부분 여자 방식에 대한 특성 해석 결과 및 여자 방식에 대한 추력 특성도 나타내었다. 특히 인버터의 전압, 전류 제한치에 의한 PMLSM이 실제 발생하는 속도별 최대 추력에 대해서도 살펴보았다.

앞으로, 여러 가지 요구되는 동작 패턴에 대한 동적인 특성과 이와 더불어 효율적인 제어적 기술 연구가 필요하겠으며, 고정밀성을 확보하는 운전 방식에 대한 연구도 이어지리라 여겨진다.

(참 고 문 헌)

- [1] David L. Trumpher, Won-Jong Kim, Mark E. Williams, "Design and analysis frame work for linear permanent-magnet machines," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 32, No. 2, pp371-379, 1996
- [2] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Analytical prediction of dynamic performance characteristics of brushless DC drives," *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 20, pp. 661-678, 1992.
- [3] T. Onuki, Y. Kamiya, J. Enomoto, T. Kashiwagi, T. Kuwahara, "Secondary constructions of linear synchronous motor with divided permanent magnets," *T. IEE Japan*, Vol. 116-D, No. 1, pp. 53-63, 1988.
- [4] Z. Deng, I. Boldea, S. A. Nasar, "Fields in permanent magnet linear synchronous machines," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 22, No. 2, pp.107-112, 1986.