1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1999. 7.19-21

영구자석 선형동기전동기의 파라메터 산정 및 특성해석

임 기 채 · 우 준 근 · 홍 정 표 · 김 규 탁
창원대학교 전기공학과

Parameter Estimation and Performance Analysis of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

Ki-Chae Lim · Joon-Keun Woo · Jung-Pyo Hong · Gyu-Tak Kim
Dept. of Electrical Engineering. Chang-won Univ.

Abstract—This paper deals with characteristic analysis of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM). Parameters and characteristic variations are evaluated by using Finite Element Method(FEM) and Equivalent Magnetizing Current Method. PMLSM can be classified into the short primary type PMLSM and the short secondary type PMLSM according to their structural features. Especially, the short secondary type PMLSM is focused on because of good control characteristics. And this paper presents the difference of analysis results between the short primary type PMLSM and short secondary type PMLSM and investigates the end effect of two PMLSM's.

1. 서 론

본 논문은 효율, 속응성 및 에너지밀도 등에서 선형유도전동기와 비교하여 우위에 있으며 최근의 에너지 밀도가 높은 자석 재료의 개발로 인하여 직접적인 직선 추진력을 필요로 하는 정밀제어 시스템에 널리 응용되고 있는 영구자석 선형동기전동기(PMLSM)에 대한 정밀한 파라메터 추출 및 설계시의 제어성능에 영향을 미치는 요소들을 고려하여 개선된 특성을 가지는 PMLSM의 설계 및 특성해석법을 제시하고자 한다. 먼저, 제어성능의 향상을 위해서 PMLSM의 설계시 반드시 검토되어야 하는 것은 영구자석과 슬롯형상에 의해 발생하는 detent force로 슬롯의 개구폭과 영구자석의 폭에 의존하여 크게 변하며 정밀한 위치제어를 저해하는 요인이 되므로 이를 줄일 수 있는 구조가 요구된다. 또한, 일반적으로 PMLSM과 같은 직선기의 해석시 계산시간이나 해석상의 편의를 위해서 1극만을 취하여 주기모델로 해석하는 경우가 대부분이나 PMLSM의 가동부의 구조에 따른 제약이 따르며 가동부의 끝단에서 발생하는 단부효과를 고려할 수 없기 때문에 정밀한 파라메터 값을 얻기 위해서는 전체 모델을 고려한 해석이 요구된다.

따라서, 본 논문은 가동부의 구조가 PMLSM의 특성에 미치는 영향을 고찰하고 제어성능이 우수한 단 2차형 PMLSM의 파라메터 산정 및 특성해석을 행한다.

2. 해석이론

본 논문은 PMLSM의 특성해석을 위해서 재질의 비선형성과 복잡한 형상을 고려할 수 있는 유한요소법[1]과 설계변수의 변화에 따른 해석대상의 모델링 과정이 필요치 않고 빠른 수치 계산이 가능한 개선된 등가자화전류법을 사용한다[2-3].

2.1 등가자화전류법

등가자화전류법은 FEM과는 달리 해석 모델의 설계변수 변화에 따라 전처리, 수치 계산 및 후처리 작업을 반복 해야하는 번거러움이 없기 때문에 PMLSM과 같은 구조가 간단한 전기기기의 초기 설계시의 특성변화를 관찰하는데 매우 유용하다. 등가자화전류법은 독립적으로 존재하는 자계의 소스를 등가자화전류의 공간분포로 보고 식 (1)과 같이 푸리에 급수 전개를 이용하여 나타낸 후 식 (2)의 지배방정식에 경계조건을 적용하여 직접 해를 구하는 공간고조파 해석법이다[1-2].

$$J(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n \cos(\frac{n\pi}{\tau}x) + b_n \sin(\frac{n\pi}{\tau}x)\right) \quad (1)$$

단, a_0, a_n과 b_n은 등가자화전류의 분포에 의해 결정되는 계수이고, τ는 등가자화전류의 반주기를 나타낸다.

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

또한, 기존의 공간고조파해석법에 슬롯에서의 가상 등가자화전류 개념을 도입하여 슬롯 효과의 고려가 가능하기 때문에 슬롯과 영구자석의 상대적 위치에 따라 발생하는 detent force의 신속한 평가가 가능하다.

2.2 유한요소법

자기벡터포텐셜 $\vec{A}$를 계변수로 하며 재질이 등방성일 경우 2차원 유한요소해석을 위한 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial y}) = -(J_0 + J_m) \quad (3)$$

여기서 μ는 투자율, J_0는 입력전류밀도이고 J_m은 영구자석에 의한 등가자화전류밀도를 나타낸다.

2.3 인덕턴스의 계산

PMLSM의 이동자의 위치나 각 상의 전류에 따른 인덕턴스의 변화 및 포화시의 특성 변화를 고찰하기 위하여 본 논문에서는 3상의 자기 및 상호인덕턴스의 계산이 가능한 에너지 섭동법을 사용한다[4].

에너지 섭동법은 미소전류의 증감에 의한 전체 에너지 w의 변동분을 계산하고 식 (4), (5)의 자기 및 인덕턴스 계산식에 대입하여 권선 i, j의 인덕턴스를 구한다.

$$L_{ij} = \frac{\partial^2 w}{\partial(\Delta i_j)^2} \cong \frac{w(i_j - \Delta i_j) - 2w + w(i_j + \Delta i_j)}{(\Delta i_j)^2} \quad (4)$$

$$L_{jk} = \frac{\partial^2 w}{\partial(\Delta i_j)\partial(\Delta i_k)} \cong \frac{1}{(4\cdot \Delta i_j \Delta i_k)} \cdot [w(i_j + \Delta i_j, i_k + \Delta i_k) - w(i_j - \Delta i_j, i_k + \Delta i_k) - w(i_j + \Delta i_j, i_k - \Delta i_k) + w(i_j - \Delta i_j, i_k - \Delta i_k)] \quad (5)$$

에너지 섭동법을 이용한 인덕턴스의 계산은 최대 4번의 비선형 자계 해석이 이루어져야 하나, 전류의 변화가 아주 작다고 보면 미소 전류변화에 대한 해석영역의 투

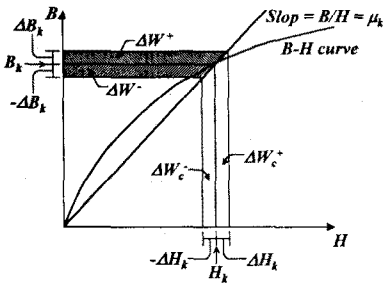


그림 1. 에너지 섭동법에 의한 저장 에너지

자율이 일정하다고 할 수 있다. 따라서, 그림 1과 같이 한 번의 비선형 해석 후 그 투자율을 이용하여 선형해석에 의한 에너지의 변화량을 구하면 계산 시간을 단축할 수 있다[4].

3. PMLSM의 특성해석 및 인덕턴스 계산

PMLSM은 고정자와 가동자의 구조에 따라 단 1차형(short primary type)과 단 2차형(short secondary type)으로 나누어진다. 단 1차형은 가동자가 철심과 코어로 구성되고 고정자는 영구자석 계자로 구성된 형태이다. 이와는 반대로 단 2차형은 영구자석 계자가 가동자의 형태가 되고 철심과 코어가 고정자가 되는 구조를 갖추고 있다.

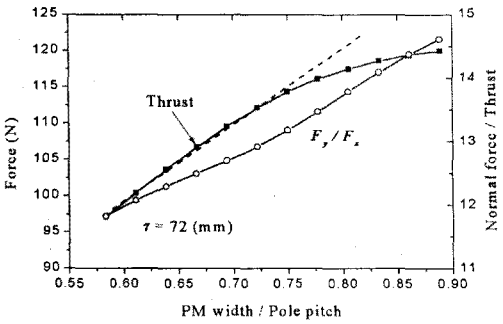


그림 2. 자극폭에 따른 추력 및 흡인력 특성

먼저, PMLSM의 기본적 재원의 변화에 따른 특성 변화를 살펴보기 위해 단부효과를 포함하지 않는 등가자화 전류법을 이용한 특성해석을 행하였고 특성해석시 1차측의 매극매상당 슬롯수는 2, 코일피치는 5이다.

편측식 PMLSM인 경우 가동자 측에 작용하는 흡인력은 운전특성에 큰 영향을 줄 수 있으며 이동구조의 선정시 이러한 흡인력이 고려되어야 한다. 그림 2는 자극폭에 따른 추력 및 흡인력 특성을 나타낸 것으로 흡인력과 추력의 비가 약 13배 정도로 나타나고 있으며 자극폭의 증가에 따른 누설의 증가로 인해 추력이 포화되고 있음을 볼 수 있다.

그림 3은 자극폭 따른 detent force의 크기를 나타내고 있다. PMLSM의 설계시 위치제어의 정밀도는 영구자석과 1차측 슬롯의 상대적인 위치에 따라 발생하는 detent force의 영향을 크게 받아 detent force가 크면 특정위치로의 제어에 큰 장애를 일으키며 정상상태에서 추력의 리플로 작용한다. 따라서 이러한 detent force의 특성을 검토하기 위해서 자극폭에 따른 특성변화를 해석하였다. 결과로부터 detent force가 가장 작고 적절한 자극폭은 극간격의 약 73%정도이다.

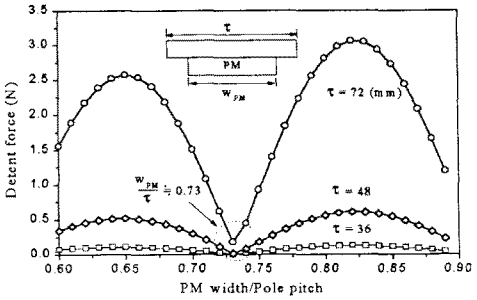


그림 3. 자극폭에 따른 detent force (1극분)

그림 4는 FEM 해석을 위한 가동자 구조에 따른 PMLSM의 특성해석을 위한 개략적인 재원을 나타내었다. 입력전류는 3(A)이고 슬롯당 턴수는 84로 하였다.

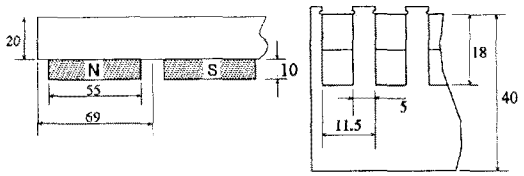


그림 4. 해석 모델의 개략적인 재원

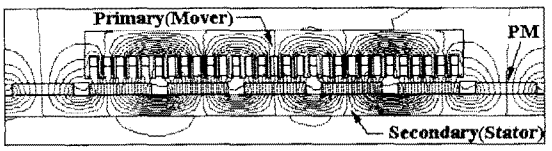
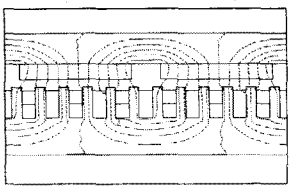
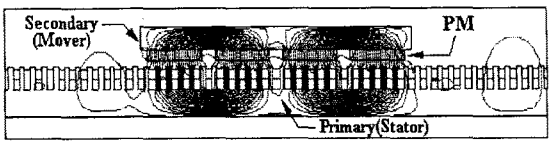


그림 5. 단 1차형 PMLSM의 자속 분포



(a) 주기 모델



(b) 전체 모델

그림 6. 단 2차 구조 PMLSM의 자속 분포

그림 5, 6은 가동자 구조에 따른 PMLSM의 해석 모델 및 자속 분포를 나타낸 것으로 단 2차의 경우는 단부효과의 영향을 검토하기 위해 주기 모델과 전체 모델로 해석 모델을 세분화하였다.

그림 5와 6-(a)은 영구자석이 주기적으로 무한히 반복되는 구조로 볼 수 있기 때문에 영구자석에 의한 자속은 1, 2차측 요크의 양쪽으로 나누어져 흐른다. 그림 6-(b)의 단 2차 전체 모델의 경우 가동부의 끝단에서 큰 자기저항이 존재하므로 영구자석에 의한 자속은 요크의 양쪽으로 분포하지 않고 그림 6-(b)와 같이 한 쪽으

로 집중되어 요크에서의 자속밀도는 주기 모델이나 단 1차형 PMLSM의 2배 이상이 된다.

그림 7은 단 1차형 PMLSM의 변위에 따른 추력특성을 나타낸 것으로 단 1차형 PMLSM의 추력은 1차측 슬롯과 영구자석사이의 detent force 뿐만 아니라 변위에 따른 1차측 단부와 영구자석 사이에 작용하는 힘(단부효과에 의한 힘이라 정의)이 존재하여 실제 힘의 분포는 회전형 돌극기의 릴럭턴스 토크와 같은 양상을 가지지만 동기속도 운전 시에는 detent force보다 큰 추력의 리플로 작용하며 PMLSM의 위치정밀도에 커다란 장애가 되므로 위치 제어용으로는 부적합하다.

그림 8은 단 2차형 PMLSM의 변위에 따른 추력특성으로 변위에 따른 추력은 magnetic force와 detent force에 의해 나타난다. 그림 7, 8의 detent force는 극간격에 대한 자극폭을 적절히 조정함으로써 크게 줄일 수 있으며 해석에 사용된 자극폭 대 극간격의 비는 0.8로 큰 detent force를 가진다.

그림 9는 단 2차형 PMLSM의 단부효과에 의한 힘의 영향을 판단하기 위해 1차측 전류의 위상 변화에 따른 가동자에 발생하는 힘을 계산한 것으로 단부효과에 의한 힘은 고정자 측이 만드는 자속의 양에 비례한다. 그러나, 그 값은 추력의 0.1%이하로 무시될 수 있어 단 2차 방식의 경우 주기모델 해석에 의한 해석 시간과 계산의 정밀도를 높일 수 있다. 그림 10은 단 1, 2차형 PMLSM의 흡인력 특성을 나타내고 있으며 흡인력은 단부효과가 크고 영구자석과 철심이 접하는 부분이 많은 단 1차형 PMLSM에서 크게 나타난다.

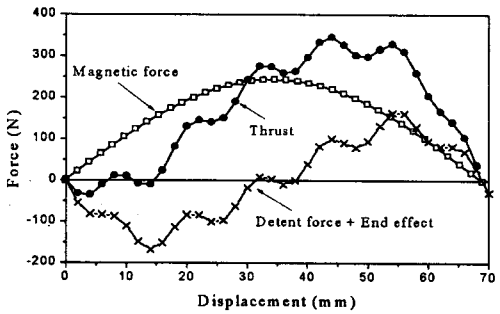


그림 7. 단 1차형 PMLSM의 변위에 따른 추력

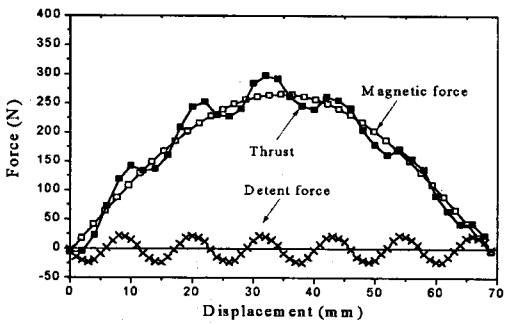


그림 8. 단 2차형 PMLSM의 추력

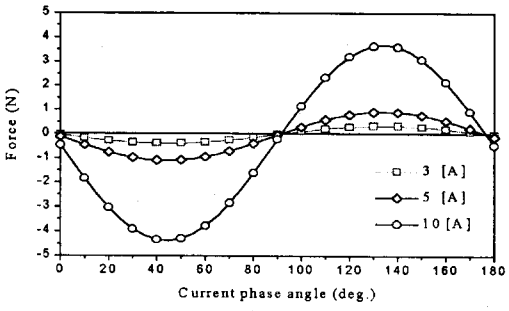


그림 9. 단 2차형 PMLSM의 단부효과

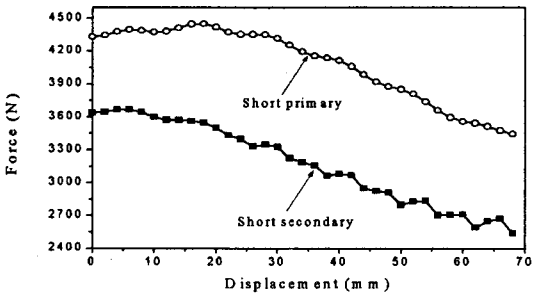


그림 10. PMLSM의 흡인력 특성

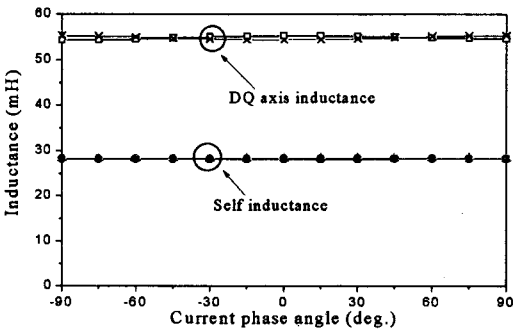


그림 11. 단 2차형 PMLSM의 인덕턴스

그림 11은 정현적인 3상의 정전류원 인가시 에너지 섭동법에 의한 단 2차형 PMLSM의 3상 자기인덕턴스와 D-Q축 인덕턴스를 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 PMLSM의 구조적인 재원의 변화에 따른 특성 변화와 해석모델에 따른 해석결과의 차이를 살펴보았다. 결과로부터 단 1차형 PMLSM의 경우 동일 추력하에서 단부효과에 의한 추력리플 및 흡인력이 커 제어용도로는 부적합하다. 또한, PMLSM 설계시 detent force 저감을 위한 적절한 자극폭의 선정이 중요하다. 그리고, 에너지 섭동법에 의한 인덕턴스를 계산하였고 앞으로 이를 이용한 단 2차 PMLSM의 제어특성 해석이 이루어 질 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] S. J. SALON, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Kluwer Academic Publishers. 1995.

[2] Dal-Ho Im, Jung-Pyo Hong, et al, "The Optimum Design of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", Int'l Conference of IEEE CEFC '96, pp.166, 1996.

[3] 임기채, 홍정표, 김규탁 "공간고조파법을 이용한 영구자석 선형 동기전동기의 슬롯을 고려한 정특성해석", 전기학회 논문지 제48권 4호, pp.145-151, 1999.

[4] Nehl, T. A., Fouad, F. A. and Demerdash, N. A., "Determination of Saturated Values of Rotating Machinery Incremental and Apparent Inductances by a Perturbation Method", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, pp.4441-4451, 1982.