

유전 알고리즘을 이용한 Slotless type PMLSM의 최적화

이동엽, 문재윤, 윤강준, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

Optimization of Slotless type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor using Genetic Algorithms

Dong-yeup Lee, Jae-youn Moon, Kang-jun Yoon, Gyu-tak Kim
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Univ.

Abstract - This paper is deal with the method of design for optimum thrust model using genetic algorithms in slotless Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (PMLSM). Characteristic analysis method is used 3D space harmonic analysis method. Design parameters are PM width and coil width.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 슬롯리스형 PMLSM의 해석 모델을 나타낸 것이다. 전기자의 구조는 공심(air-core)구조의 코일을 직접 백아이언(back iron)에 부착시킨 형태로 만들어져 있다.

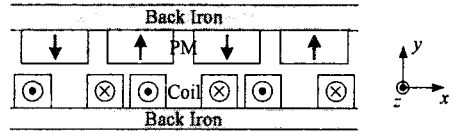


그림 1 해석 모델

공간고조파법으로부터 자계해석을 위하여 다음과 같은 가정을 두었으며 공극 자속밀도 특성은 영구자석만 존재할때의 공극 자속과 전기자 전류만 여자하였을 때의 공극 자속을 각각 계산하여 중첩하여 해석하였다.

- ① 해석 영역은 x, z 방향으로 무한히 길다.
- ② 영구자석 및 전기자 전류에 의한 자화 분포는 y 방향으로 자화되어 있으며, x, z 방향으로 주기적으로 분포해 있다.
- ③ 철심의 투자율은 무한대이다.
- ④ 해석 영역의 재질 분포는 x, z 방향으로 변화가 없다.

표 1은 기존 모델의 사양을 나타낸다

표 1 슬롯리스형 PMLSM의 사양

	항 목	기 호	값 [단위]
가동자 (영구자석)	극 수	$2p$	12
	전류자속밀도	B_r	1.2 [T]
	영구자석 높이	h_p	12 [mm]
	영구자석 축방향길이	l_p	73.5 [mm]
	영구자석 폭	ω_p	26 [mm]
고정자 (전기자철심)	극 피치	τ	28.5 [mm]
	코일당 턴수	N	650 [턴]
	코일 높이	h_c	11 [mm]
	코일 폭	ω_c	12 [mm]
	코일 사이 간격	d_c	12 [mm]
	상전류(최대치)	I	2.66 [A]
공극의 길이		l_g	2 [mm]

1. 서 론

영구자석 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : PMLSM)는 직접 전 추력을 발생하므로 제어 성능이 우수하며, 고속, 고효율이 가능하다는 장점이 있으나, 전기자에 치, 슬롯 구조를 가지므로 공극에서의 슬롯 고조파에 의해 디텐트력이 발생하게 된다. 이러한 디텐트력은 전동기의 추력 맥동으로 작용하여 기기의 소음 및 진동을 유발할 뿐만 아니라 기기의 제어성능을 악화시킨다. 이러한 디텐트력을 근본적으로 제거하기 위해서는 전기자의 구조를 치, 슬롯이 없는 슬롯리스형(Slotless type)으로 가져가는 것이 타당하다. 이러한 구조의 채택은 큰 자기적 공극으로 인하여 출력밀도가 떨어지는 단점이 있지만, 디텐트력이 제거되고 수직력이 작기 때문에 추력 리플은 거의 발생하지 않아서, 정확한 제어 특성이 요구되는 정밀한 시스템에 적용하기 알맞다.

전기기기를 해석하는 방법에는 유한 요소법과 같은 수치해석적 방법과 공간고조파법과 같은 해석적 방법이 있다. 수치해석적 방법의 경우, 복잡한 형상을 그대로 모델링 할 수 있으며, 재질의 비선형성에 대한 고려가 가능하나, 해석 모델의 치수 변화에 따라 전처리, 수치 계산 및 후처리 작업을 반복해야 하는 번거로움이 있다. 이에 반해 해석적 방법의 경우, 복잡한 형상과 재질의 비선형성을 고려하기가 어렵다는 단점이 있으나, 수치해석적 방법에 비해 해석시간이 빠르며, 설계변수의 변화에 따른 특성 파악이 매우 용이하다는 장점이 있다. 특히, 슬롯리스형 PMLSM에서는, 전기자의 형상이 간단하고, 철심의 포화 현상도 거의 나타나지 않으므로 공간고조파법을 이용하더라도 유한요소 해석 결과와 큰 차이가 없는 정확한 결과를 얻을 수 있다.

최적화 기법으로는 신경회로망과 유전 알고리즘이 많이 사용되어진다. 특히, 유전알고리즘은 다봉의 특징을 가지는 탐색공간에서도 원만히 동작하며, 어떤 형태의 함수도 목적함수로 쉽게 이용할 수 있기 때문에 최적화 문제, 스케줄링, 순회판매인 문제, 시스템 제어 및 식별 등 다양한 분야에서 광범위하게 응용되고 있다[3].

따라서, 본 논문에서는 3차원 공간고조파법을 이용하여 슬롯리스형 PMLSM의 특성해석을 수행하였고, 최적화 기법으로 유전 알고리즘을 사용하였다. 설계 변수로는 영구자석의 폭, 코일의 폭을 두어 각각의 변수 변화에 따른 추력 특성을 해석하여 최적의 추력 조건을 만족하는 전동기의 설계 치수를 제시하였다.

2.2 3차원 공간고조파 해석

공간고조파법으로부터 자계해석을 위하여 해석 모델의 재질이나 소스(source)의 존재 여부에 따른 세부 영역을 나눈 후 각 영역에서의 지배방정식과 경계조건으로부터 지배방정식의 해를 구하여 자계해석을 하였다. 자계해석은 영구자석에 의한 자계와 전기자 전류에 의한 자계를 각각 독립적으로 계산한 후 이를 중첩시킴으로써 해석 모델의 합성자계를 계산하는 방법을 적용하였다.

지배방정식의 계변수로 자기벡터포텐셜을 적용하는 경우 영구자석이나 전기자 전류의 분포를 등가자화전류로 치환해야 한다. 그러나 영구자석과 전기자 전류의 분포가 복잡한 경우 정확한 등가자화전류 분포를 고려하기가 어렵다. 한편, 계변수를 자기스칼라포텐셜로 가져갈 경우 영구자석과 전기자 전류에 의한 자화분포를 그대로 고려할 수 있기 때문에 자화분포의 복잡한 형상이나 3차원 분포를 묘사하기 쉬운 장점을 가지게 된다. 따라서, 본 논문에서는 자기스칼라포텐셜을 계변수로 하는 지배방정식으로부터 공간고조파법을 적용하였다.

그림 1의 해석 모델에서 각 영역에서의 자속밀도 \vec{B} 와 자계의 세기 \vec{H} 와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{B}_I = \mu_0 \vec{H}_I \quad (\text{공극}) \quad (1)$$

$$\vec{B}_{II} = \mu_m \vec{H}_{II} + \mu_0 \vec{M} \quad (\text{영구자석 또는 코일}) \quad (2)$$

여기서, $\mu_m = \mu_0 \mu_r$ 은 재질의 투자율, μ_0 는 공극의 투자율, μ_r 은 재질의 비투자율이며, \vec{M} 은 자화 벡터이다. 한편, 자기스칼라포텐셜 φ 를 도입하면 각각의 영역에서 지배방정식은 식 (3), (4)와 같이 구성된다.

$$\nabla^2 \varphi_I(x, y, z) = 0 \quad (\text{공극}) \quad (3)$$

$$\nabla^2 \varphi_{II}(x, y, z) = \frac{\nabla \cdot \vec{M}}{\mu_r} \quad (\text{영구자석 또는 코일}) \quad (4)$$

위의 지배방정식에 경계조건을 적용하여 구한 자기스칼라포텐셜의 일반해로부터 $\vec{H} = -\nabla \varphi$ 의 관계와 식 (1), (2)를 이용하여 공극에서의 자속밀도를 계산하였다.

2.2.1 영구자석에 의한 자계

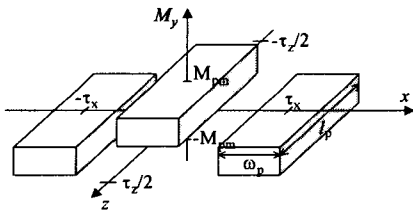


그림 2 영구자석의 3차원 자화 분포

3차원 공간고조파법을 적용하기 위해서는 z축 방향으로의 자화 분포를 고려하였다. 영구자석에 의한 자화 분포는 M_y 성분만 존재하고 그림 2와 같이 x, z에 관한 함수의 형태로 나타낼 수 있다. 그림 2의 자화 분포를 푸리에 급수로 표현하면 다음과 같다.

$$M_y = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} M_{mn} \cos(mk_x x) \cos(nk_z z) \quad (5)$$

$$M_{mn} = \frac{16M_{pm}}{mn\pi^2} \sin(m\alpha_x \frac{\pi}{2}) \sin(n\alpha_z \frac{\pi}{2}) \quad (6)$$

$$m, n = 1, 3, 5, \dots$$

여기서, 계수 k_x, k_z 는 식 (7)과 같고, α_x 는 x방향 자극비, α_y 는 y방향 자극비를 의미하며 식 (8)과 같이 표현할 수 있다. 식 (8)에서 ω_p 는 영구자석의 폭, l_p 는 영구자석의 축방향길이, τ_x 는 x방향 자극피치, τ_z 는 z방향 자극피치를 의미한다. 한편, 그림 2의 자화 분포에서 z방향으로 배열된 영구자석간의 상호작용을 무시할 수 있도록 τ_z 를 충분히 크게 설정하였다.

$$k_x = \frac{\pi}{\tau_x}, \quad k_z = \frac{\pi}{\tau_z} \quad (7)$$

$$\alpha_x = \frac{\omega_p}{\tau_x}, \quad \alpha_z = \frac{l_p}{\tau_z} \quad (8)$$

여기서, 계수 k_{mn} 은 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$k_{mn}^2 = m^2 k_x^2 + n^2 k_z^2 \quad (9)$$

지배방정식을 풀어 일반해를 구하고, 경계 조건으로부터 일반해의 미정계수를 결정하여 영구자석에 의한 자속밀도를 계산하였다. 영구자석에 의한 공극의 자속밀도는 다음의 식 (10) ~ (12)와 같다.

$$B_{zI}^{pm} = - \sum_{m=1,3}^{\infty} \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{m k_x}{k_{mn}} \beta_{m3} \cdot \sinh(k_{mn} y) \sin(mk_x x) \cos(nk_z z) \quad (10)$$

$$B_{yI}^{pm} = \sum_{m=1,3}^{\infty} \sum_{n=1,3}^{\infty} \beta_{m3} \cdot \cosh(k_{mn} y) \cos(mk_x x) \cos(nk_z z) \quad (11)$$

$$B_{zII}^{pm} = - \sum_{m=1,3}^{\infty} \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{n k_z}{k_{mn}} \beta_{m3} \cdot \sinh(k_{mn} y) \cos(mk_x x) \sin(nk_z z) \quad (12)$$

여기서, 계수 β_{m3} 는 다음과 같다.

$$\beta_{m3} = \frac{\mu_0 M_{mn} \sinh(k_{mn}(y_m - y_s))}{\xi_{m3}}$$

$$\xi_{m3} = \mu_r \cosh(k_{mn} y_m) \sinh(k_{mn}(y_m - y_s)) - \cosh(k_{mn}(y_m - y_s)) \sinh(k_{mn} y_m) \quad (13)$$

2.2.2 전기자 전류에 의한 자계

전기자 전류에 의한 3차원 자계 분포를 해석하기 위하여 엔트링부분을 직사각형으로 등가화하였다.

그림 3은 등가화 된 코일 형상에서 전기자 전류에 의한 자화 분포를 나타낸 것이다.

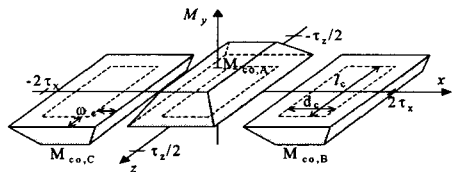


그림 3 전기자 전류에 의한 3차원 자화 분포

영구자석에 의한 자계 해석과 같은 방법으로 전기자 전류에 의한 자계도 구할 수 있다.

2.2.3 전자력

전자력 \vec{F} 는 맥스웰 응력법(Maxwell stress tensor)으로부터 산정하였다. 공극 자속밀도 분포가 주어질 때 x, y, z 방향에 대한 발생력은 각각 다음과 주어진다.

$$F_x = \frac{1}{\mu_0} \iint B_x B_z dx dz \quad (14)$$

$$F_y = \frac{1}{2\mu_0} \iint (B_y^2 - B_x^2 - B_z^2) dx dz \quad (15)$$

$$F_z = \frac{1}{\mu_0} \iint B_y B_x dx dz \quad (16)$$

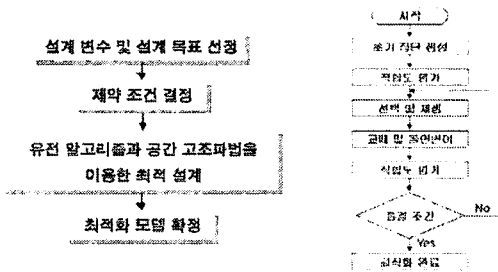
여기서, F_x 는 추력, F_y 는 수직력이고 F_z 을 횡방향으로 발생하는 힘이다.

2.3 유전 알고리즘을 이용한 최적화

유전 알고리즘은 확률적인 방법과 개체간의 체계적인 정보교환을 통해 탐색공간을 조사해 나감으로써 주위환경에 알맞은 가장 적절한 해를 얻고자 하는 방법이다. 유전 알고리즘은 여러 점을 동시에 탐색하는 전역적 탐색을 하기 때문에 다극점 문제에 있어서 극복수렴 할 가능성이 적고, 확률적인 방법에 의한 의사결정으로 최적점 탐색을 위한 어떠한 가능성도 배제하지 않는 점이 장점 중의 하나이다.

본 논문에서는 설계 파라미터를 영구자석의 폭과 코일 폭으로 선정하였고 목적함수로는 추력의 최대화를 설정하였다.

그림 4와 5는 각각 유전 알고리즘을 이용한 최적화 과정과 최적 및 흐름도와 시뮬레이션 결과를 나타내었다.



a) 최적화 과정 b) 유전 알고리즘의 흐름도

그림 4 최적화 과정 및 유전 알고리즘 흐름도

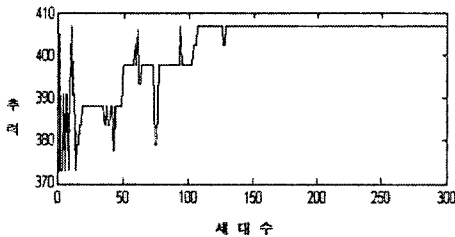


그림 5 유전 알고리즘의 최적화 결과

유전 알고리즘의 결과 최적화 모델의 사양은 영구자석의 폭 28(mm), 코일 폭 16(mm)일때 이때의 추력 값은 부하각 60(deg.)로 정상운전시에 406.450(N)이었다.

2.4 특성 비교

가동자 변위에 따른 추력은 그림 6와 같고, 추력의 최대값은 428.471[N]에서 475.398[N]로 증가하였다.

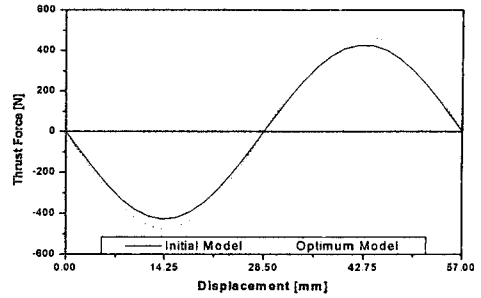


그림 6 추력

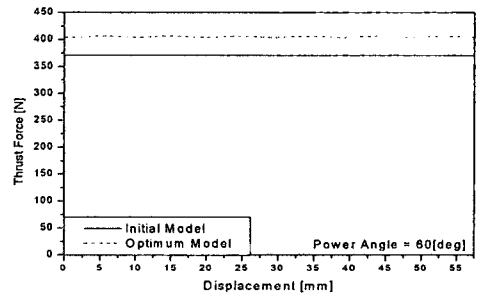


그림 7 정상상태 운전시 추력(부하각 60°)

그림 7은 초기 모델과 최적설계 모델에서, 영구자석을 이동하면서 부하각이 60 [deg.]가 되도록 1차측 전류의 위상을 동기시켜 계산한 정상상태 운전시의 추력을 나타낸 것이다. 추력이 큰 최적 설계 모델의 경우, 형상의 변화로 인해 추력의 리플성분이 증가되었지만 추력 리플의 peak to peak값은 약 2.5 [N]으로 전체 추력의 0.6 [%]에 지나지 않는 매우 작은 값이므로 전동기의 제어 특성의 변화에는 별다른 영향을 미치지 못하리라 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 슬롯리스형 PMLSM의 자계 및 특성 해석을 공간 고조파법으로 수행하였고 최적화 기법으로 유전 알고리즘을 사용하여 타당성을 입증하였다. 공간고조파법은 유한요소법의 특성 해석결과와 거의 일치하였고 유전 알고리즘의 적용으로 최적화 시간을 줄일 수 있었다. 그리고 재설계되어진 모델의 추력리플은 전체추력에서 0.6[%]정도에 지나지 않아 전동기의 제어특성의 변화에는 별 영향을 미치지 못할 것이라 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이주민, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "3차원 공간고조파법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형 동기전동기의 자계 및 추력특성 해석", 전기학회논문지, 제50권 6호, 255-262, 2001.
- [2] 안호진, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "해석적 방법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형전동기의 특성해석", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 2001.
- [3] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교유사, 2002