

유전알고리즘을 이용한 BLDC전동기 영구자석의 코깅 토크 최소화 최적설계

전 문 호, 김 창 업, 이 석 원
호서대학교

Optimum Design for Cogging Torque Minimization in BLDC Motor Magnet using Genetic Algorithm

Mun-Ho, Jeon, Chang-Eob, Kim, Suk-Won, Lee
Hoseo University

Abstract - 본 논문에서는 유전알고리즘과 유한요소법을 이용하여 BLDC 전동기의 코깅 토크를 최소화하기 위한 최적화 설계 방법을 제안하였다. 먼저 유전알고리즘을 이용하여 BLDC 전동기의 설계 변수를 추론하고, 유한요소법으로 코깅 토크를 구하였다. 유전알고리즘과 유한요소법을 사용함으로써 BLDC 전동기의 코깅 토크가 최소화 되는 영구자석의 형상을 전 영역에서 빠른 시간내에 구할 수 있었다.

1. 서 론

코깅 토크는 전동기내의 비균일 토크로서, 전동기 시스템의 자기 에너지가 최소인 위치로 이동하려는 접선 방향의 힘인데, 부하 전류와는 상관없이 회전자 영구자석과 고정자 슬롯의 상호 작용에 의해 발생한다. BLDC 전동기는 전기자 권선으로 구성되어 있는 고정자와 영구자석을 가지는 회전자로 구성되어 있는데 영구자석 재료로는 가격이 저렴한 페라이트 재질을 가장 많이 사용하고 있으며 다양한 형상의 제작이 가능한 플라스틱 영구자석의 사용도 증가하고 있다[1]. 또한 고효율, 고출력을 얻기 위해 에너지 밀도가 높은 희토류 재질의 영구자석의 사용도 최근 증가 추세이다. 이런 고 효율화를 목적으로 높은 에너지를 가진 영구자석을 사용하는 경우 에너지에 비례하여 코깅 토크의 크기가 커지고 있다. 이러한 코깅 토크는 전동기의 소음과 진동의 주요 원인이 되므로 전동기 설계시 반드시 고려해야 한다[2,3]. 본 논문에서는 코깅 토크의 크기를 줄이기 위해 4극 24슬롯의 내전형 BLDC 전동기의 영구자석의 형상을 유전알고리즘을 사용하여 구하였다. 또한 주어진 영구자석의 형상에 대하여 유한요소법을 이용하여 코깅 토크를 구하여 이 값이 최소로 되는 영구자석을 구할 수 있었다.

2. BLDC 전동기의 최적설계

2.1 BLDC 전동기

BLDC 전동기는 종래의 DC 전동기에서 회전자의 권선에 순차적으로 전압을 흘려주도록 하는 기계적인 정류자가 요구되어지지 않는 브러쉬(Brush)가 없는 DC 전동기이다. BLDC 전동기는 우수한 토크 특성을 가져야 할 뿐만 아니라 코깅 토크 저감을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 본 논문에서 적용 대상은 BLDC 전동기의 기본 설계 사양을 표 1에 나타내었다.

표1. 초기의 모델의 설계변수

설계변수	치수
자극각	80°
자석계자외경	90[mm]
전기자철심내경	92[mm]
슬롯개구폭	2.5[mm]
철심치폭	3.5[mm]
요크두께	5.5[mm]
철심외경	129[mm]
공극길이	0.5[mm]

2.2 BLDC 전동기의 코깅 토크 해석

코깅 토크는 영구자석이 부착된 회전자에 의하여 공극 중에 비교적 저차의 고조파 자속밀도와 고정자 철심 슬롯의 상호작용에 의하여 발생하는 것으로 식(1)과 같이 정의된다.

$$T(\alpha) = -\frac{\partial W(\alpha)}{\partial \alpha} \tag{1}$$

여기서 α 는 회전자의 회전각도 이고 W 는 에너지이다. 이러한 에너지의 변화량은 공극 부분을 제외하면 거의 발생하지 않으므로 공극에서의 에너지를 구하므로써 코깅 토크를 구할 수 있다. 자계의 에너지는 식(2)와 같다.

$$W_f = \int (H_c l_c + H_g l_g) A dB \tag{2}$$

여기서 H_c 는 철심에서 자계의 세기, H_g 는 공극에서 자계의 세기, l_c 는 철심의 길이, l_g 는 공극의 길이를 나타내며, A 는 자속경로의 단면적, B 는 일정치의 평균 자속밀도이다. 공극에서 자계의 세기는 식(3)과 같다.

$$H_g = \frac{B}{\mu_0} \tag{3}$$

식(2)와 (3)으로부터 에너지를 정리하면 식(4)와 같다.

$$W = \int (H_c dB A l_c + \frac{B}{\mu_0} dB l_g A) \tag{4}$$

공극을 제외한 부분의 에너지는 미소하기 때문에 무시될 수 있다. 따라서 전체 에너지 W 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2 dV \tag{5}$$

B 는 자속밀도, μ_0 는 공기의 투자율을 나타낸다.

2.3 BLDC 전동기의 영구자석 형상설계

2.3.1 유한요소법을 이용한 영구자석 형상설계

코깅 토크를 줄이기 위해서 BLDC 전동기의 영구자석의 외경과 내경을 변화하면서 유한요소법으로 해석하였다. 그림 1은 4극 24슬롯 110[V], 400[W]용량의 BLDC 전동기의 해석 모델이다.

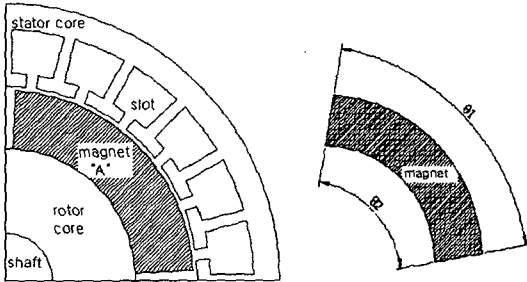


그림 1. 4극 24슬롯 BLDC 전동기의 해석모델

영구자석의 외경과 내경을 초기에 각각 80° 로 주어주고 영구자석의 외경과 내경을 $75^\circ \sim 85^\circ$ 사이에서 1° 씩 변화를 주어 해석모델들을 만들고, flux 2d를 사용하여 계산하였다. 그림 2는 초기 영구자석의 모형을 계산한 코깅 토크 값을 나타낸다.



그림 2. BLDC 전동기의 영구자석 초기 모델의 코깅토크

2.3.2 유전알고리즘

일정한 환경에 무리를 지어 살고 있는 생명체들은 그 환경에 적합한 형질을 가진 개체가 생존할 확률을 크게 가지며, 교배와 돌연변이의 과정을 통해 보다 좋은 방향으로 진화해 나가고 부적합한 형질의 개체들은 진화의 과정에서 점차 도태 되어 간다[4]. 본 논문은 초기에 적절한 설계점의 수를 결정하고 설계점들이 적합한지 판명 한 후, 교배와 돌연변이를 거쳐 초기의 설계점 수와 같은 새로운 세대를 만들어 이를 반복하여 원하는 값을 찾아 나가는 것을 프로그래밍 하였다. 그림 3은 유전알고리즘의 구조도를 나타낸다.

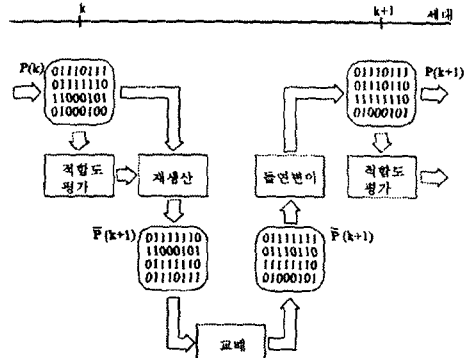


그림 3. 유전알고리즘의 구조

2.3.3 유한요소법과 유전알고리즘을 이용한 영구자석 형상설계

자극 각도만을 설계 변수로 하여 BLDC전동기의 영구자석 형상 설계를 하였다.

자극각 θ_1, θ_2 을 $75^\circ \sim 85^\circ$ 사이의 121개 값 중 무작위로 10개의 θ_1, θ_2 의 값을 선택 하여서 선택된 10개의 θ_1, θ_2 의 값을 적합도 계산을 통하여 재생산 하였다.

재생산한 값들 중 40[%]를 교배, 5[%]를 돌연변이 시켜 새로운 θ_1, θ_2 의 값을 생성하여 새로운 세대를 만들어 반복수행 후 마지막으로 얻은 값들의 최적해가 어느 정도 진화 후에는 더 이상의 진화가 발견되지 않고 같은 값이 관찰되어질 때 정지하였다. 그림 4는 최적설계 흐름도를 나타낸다.

그림 5는 최적설계 모델의 자속분포를, 그림 6에서는 초기 모델과 최적설계 모델의 코깅 토크를 비교해서 나타냈다.

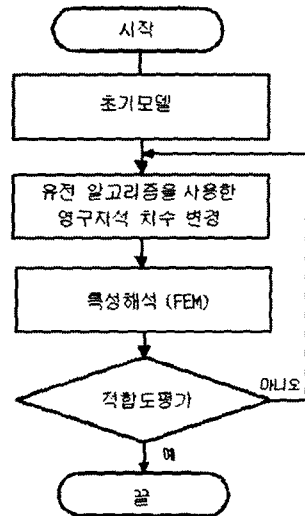


그림 4. 최적설계 흐름도

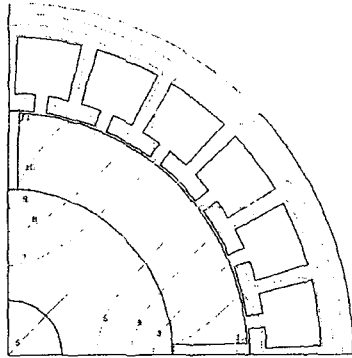


그림 5. 최적설계 모델의 자속분포

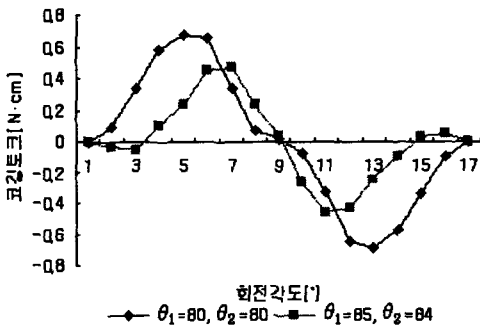


그림 6. 초기모델과 최적모델의 코깅 토크

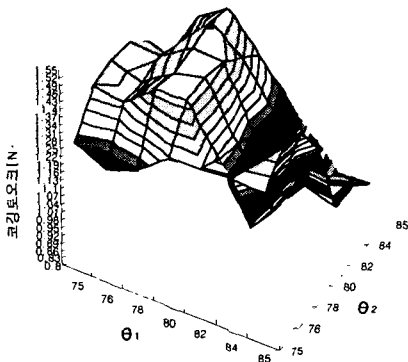


그림 7. 영구자석 자극각에 대한 코깅 토크

그림 7은 영구자석의 형상에 대한 외경과 내경이 10°씩 변한 121개의 형상설계의 코깅 토크 분포도를 나타낸 것이다. 초기 모델인 θ_1, θ_2 가 각각 80°일 때 보다 θ_1 이 85°, θ_2 가 84°일 때 코깅 토크가 약 32[%]감소함을 보인다. 이 값은 전체 영역에서의 해석결과인 그림 7과 비교할 때 약 2[%]의 오차내로 수렴함을 보여준다. 그림 8은 유전알고리즘에 의한 최적 설계 과정으로 20세대 이후에서 수렴해 나가는 모습을 보여주고 있고, 그림 9는 세대의 변화에 따른 자극각 값을 나타내며, 표2는 초기모델과 최적설계시 코깅 토크 값을 나타낸 것이다.

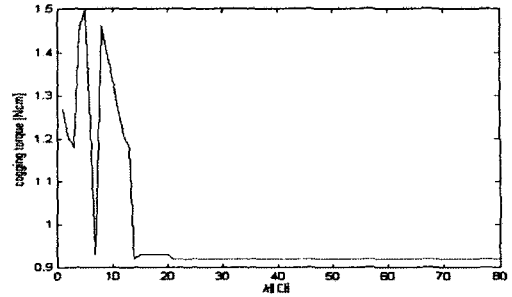


그림 8. 목적함수

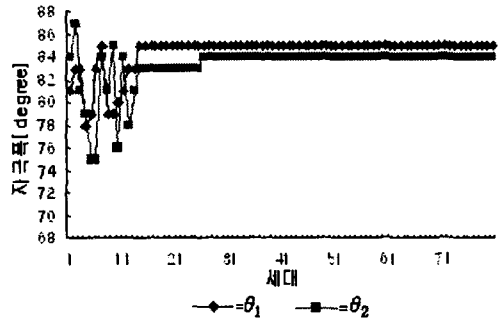


그림 9. 설계변수

표 2. 초기 모델과 최적 설계시 코깅 토크

설계변수	초기모델	최적설계
자극각	$\theta_1=80^\circ, \theta_2=80^\circ$	$\theta_1=85^\circ, \theta_2=84^\circ$
코깅 토크	1.36[N·cm]	0.93[N·cm]

3. 결 론

본 논문에서는 유전알고리즘과 유한요소법을 이용하여 BLDC 전동기의 코깅 토크 최소화를 위한 최적화 설계 방법을 제안하였다. 먼저 유전 알고리즘을 이용하여 BLDC 전동기의 설계변수를 추론한 후 이를 유한요소법으로 코깅 토크를 구하였다. 최적화 알고리즘을 사용하지 않았을 때는 자극폭 θ_1, θ_2 가 75~85° 사이에서 121번의 2차원 유한요소 해석을 하는데 약 180시간이 소요되거나 유전알고리즘을 사용한 결과 계산 시간을 1/4로 줄일 수 있었다. 또한 초기 모델에서의 코깅 토크 보다 크게 감소하는 결과를 얻었다. 유전알고리즘과 유한요소법을 사용함으로써 BLDC 전동기의 코깅 토크가 최소화 되는 영구자석의 형상을 전 영역에서 모든 값을 계산하지 않고 고도 빠른 시간내에 최적 형상을 구할 수 있음을 보여주고 있다.

[참 고 문 헌]

- 1) 大川光吉, 페라이트 磁石回轉機의 設計, 동일출판사, pp.79-182, 1995.
- 2) 大川光吉, 永久磁石磁氣回路의 設計・特性計算法Ⅱ, 종학 전자 출판사, pp.175-355, 1987.
- 3) 김성철, 주수원 "내전형 BLDC 전동기의 코깅토크 저감을 위한 영구자석의 형상설계," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.864-866, 2000.
- 4) 진장규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000.