

## BLDC 전동기의 코깅 토크 저감설계

김 석 기\*, 정 태 경  
중앙대학교 공과대학 전기공학과

### Reduction of Cogging Torque in BLDC Motors

Suk Ki Kim, Tae-Kyung Chung  
Department of Electrical Engineering, Chung Ang University

*Abstract* - In a permanent magnet motor, cogging torque arises from the intersection of the rotor magnets with the steel teeth on the stator. This paper describes design measures which can be taken to reduce the cogging torque. In this paper for the optimal shape design of brushless DC motor, evolution strategy is investigated to find the dimension of stator of BLDC motor that minimizes the cogging torque. The corresponding field analysis is performed by two-dimensional finite element method.

#### 1. 서론

일반 유도전동기나 DC 전동기보다 운전특성이 좋고 효율이 높은 BrushLess Direct Current (BLDC) 전동기의 사용이 점점 증가하고 있다. 한 예로, 가정용, 사무용 분리형 에어컨에서는 찬공기를 넣어 주는 데 BLDC 전동기를 사용하고 있다. 이때 BLDC 전동기를 사용하면 발생하는 코깅 토크에 의해 약간(50 dB)의 소음이 발생된다.

본 논문에서는 이러한 BLDC 전동기의 코깅 토크를 줄이도록 설계 하였다. 이러한 코깅 토크를 줄이기 위한 방법으로서 민감도에 의한 코깅 토크 저감법이 발표된바 있고[1], [1]의 경우 설계 결과는 좋지만 실제로 설계 결과대로 고정자를 가공하는 데는 문제가 있다.

본 논문에서는 이러한 가공성을 고려하여 미리 고정자 부분에 가공할 형상을 결정하고 가공할 부분의 폭과 길이를 설계변수로 정하였다. 해석기법으로는

유한요소법을 사용하였고, evolution strategy를 사용하여 가공할 부분의 크기를 결정하였다. 대상으로 하는 BLDC 전동기는 자기 저항법을 이용하여 설계하였고[2], evolution strategy를 이용하여 최대 토크가 발생되도록 설계 되었다[3][4].

#### 2. 유한 요소법의 해석

영구자석이 부착된 2차원 해석을 위한 기본식은 다음과 같다: 영구 자석의 감자곡선(Demagnetization Curves)은 직선으로 생각한다.

$$B = \mu_0 H + B_r \tag{1}$$

여기서, B는 자속 밀도, B<sub>r</sub>은 잔류자속밀도,  $\mu_r$ 은 투자율(recoil permeability)이며 H는 자계의 세기이다.

그리고, 기타 자성체 중의 자속밀도는 다음 식으로 표현된다.

$$B = \mu H \tag{2}$$

또한, 해석영역에 일반자성체와 영구자석이 혼합되어 있는 경우는 이들을 개별적으로 취급하여 위의 각 식들을 적용한다.

맥스웰 방정식

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \tag{3}$$

식(1)을 식(2)에 적용하면 다음 식으로 된다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_r} (B - B_r) = J \quad (4)$$

B를 자기 벡터전위 A로 표현하면  $B = \nabla \times A$  인 관계가 있다. 식(4)에  $B = \nabla \times A$  를 대입하면 분석을 위한 기본식이 만들어 진다.

$$\nabla \times (\nabla \times \frac{A}{\mu_r}) = J + \frac{1}{\mu_r} (\nabla \times B_r) \quad (5)$$

이 식의 우변 제 2항은 자화에 의하여 생기는 항이며 전류와 동일한 역할을 한다. 이러한 이유로  $J_m$ 을 등가 자화 전류밀도라 부르며 다음과 같다.

$$J_m = \nabla \times \frac{B_r}{\mu_r} \quad (6)$$

따라서, 식(5)을 정리하면 다음과 같다.

$$\nabla \times (\nabla \times \frac{A}{\mu_r}) = J + J_m \quad (7)$$

2차원의 해석영역에서 식(7)는 다음과 같이 표시 될 수 있다.

$$\frac{-1}{\mu_r} \left( \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) = J + J_m \quad (8)$$

위의 식에서 알 수 있듯이, 영구자석내의 자계에 대해서는 Poisson 방정식에 등가 자화 전류밀도  $J_m$ 을 부가시켜서 그 지배방정식을 표현할 수 있다. 일반자성체 중의 자화특성도 식(2) 대신에 식(1)을 사용하여 표현할 수 있으며, 이 방법에 의한 경우도 식(8)이 일반자성체 영역에 적용된다.

### 3. 최적설계 알고리즘

본 논문에서는 코깁 토크를 줄이기 위한 형상 설계를 위해 evolution strategy를 이용하였고, 최적화는 regeneration, mutation, annealing process를 반복하면서 수행한다. 코깁 토크를 계산하기 위해서 구조상 15° 마다 코깁 토크 profile이 반

복되므로 자석을 1° 씩 회전시켜 15번 계산하였다. 목적함수는 15번 계산된 토크 값이 최소가 되는 것으로 하였다.

새로운 설계 변수는 다음식과 같이 된다.

$$x_i^{new} = x_i^{old} + \alpha_i \cdot R_i$$

여기서,  $x_i$ 는 설계 변수이고,  $\alpha_i$ 는 스텝 간격,  $R_i$ 는 random number이다. 스텝간격은 0.85 rule에 의해 annealing된다[3].

### 4. 설계 예

BLDC 전동기는 그림 1과 같고 계산된 자속분포는 0° 에서 그림 2와 같다.

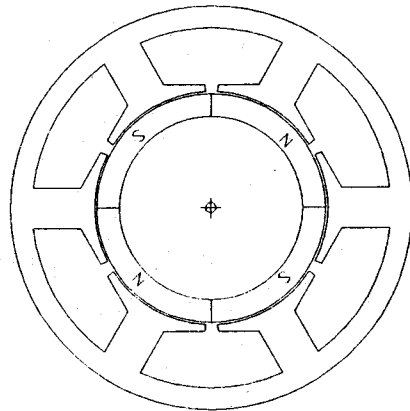


그림 1. BLDC 전동기의 단면도

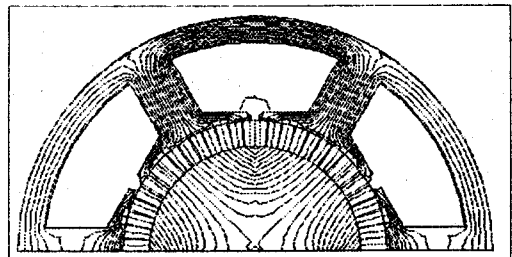


그림 2. 계산된 자속분포( 0°)

설계 변수는 그림 3과 같이 3개로 하였다.

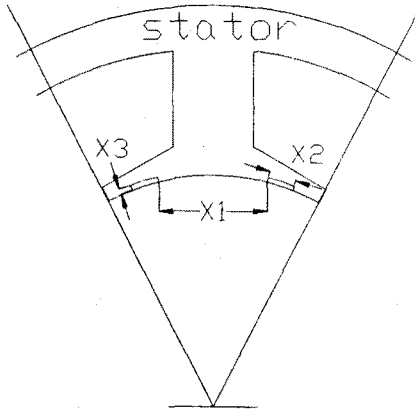


그림 3. 설계변수의 분포

BLDC 전동기의 계산에 사용된 제원은 표 1과 같다.

표 1. BLDC 전동기의 제원

고 정 자		회 전 자	
외경	88.0 mm	외경	50.0 mm
내경	51.0 mm	축방향 길이	20.0 mm
축방향 길이	12.0 mm	자석의 두께	5.0 mm
슬롯 수	6	잔류 자속	4000 G
슬롯 개구폭	2.5 mm	비루자율	1.05
자극의 두께	9.0 mm	공극	0.5 mm

설계 변수를 표 2에 나타난 범위내에서 제시된 방법에 따라 계산한 결과를 표 3에 나타내었고 철의 자기력 특성에 따라 설계 결과가 약간 달라지는 것을 알 수 있다.

표 2. 설계변수의 범위

	최대범위	최소범위
$x_1$	2°	2°
$x_2$	2°	15°
$x_3$	0.1 mm	0.45 mm

표 3. BLDC 전동기의 설계 결과

	$\mu_r = 1500$	$\mu_r = 3000$
$x_1 =$	9.90°	9.8°
$x_2 =$	14.2°	13.9°
$x_3 =$	0.24 mm	0.17 mm

## 5. 결론

본 논문에서는 BLDC 전동기의 코깅 토오크를 줄이기 위한 방법을 제시하고 최적화 알고리즘으로 evolution strategy를 사용하였다. 설계 결과에 나타나듯이, 미리 형상을 결정하고 크기를 설계 변수로 주면 실제 대량 생산에서 가공성을 부여할 수 있다. Evolution strategy는 global minimum을 찾는 좋은 방법이며 저소음 고효율 BLDC 전동기의 설계에 도움을 줄것으로 사료된다.

## 6. 참고 문헌

- [1] 박일한, 이범택, 정현고, 한송엽, "영구자석전동기의 코깅 토오크저감을 위한 민감도에 의한 형상 최적화," *Trans. KIEE*, Vol. 39, No. 12, Dec 1990.
- [2] 大川光吉, 永久磁石 磁氣回路의 設計. 特性計算法, 綜合電子リサーチ, 1985.
- [3] S.-y. Hahn Editor, *Advanced Computational and Design Techniques in Applied Electromagnetic Systems*, Elsevier 1995.
- [4] A. Gottvald et al., *IEEE Trans., Magn.*, Vol. 28, No. 2, March(1992) 1537.