

BLDC 전동기의 정현파 공극 자속밀도 구현에 의한 코깅토크 저감

김사무엘*, 정승호*, 권병일*, 이철규**
*한양대학교, **(주)에스피지

Reduction of Cogging Torque of BLDC Motors
by Realizing Sinusoidal Air-Gap Flux Density Distribution

Samuel Kim*, Seung Ho Jeong*, Byung Il Kwon*, Chul Kyu Lee**
*Hanyang University, **SPG Co., Ltd.

Abstract - Cogging torque is often a principal source of vibration, noise and difficulty of control in permanent-magnet brushless DC motors. Cogging torque can be minimized by sinusoidal air-gap flux density waveform because it is produced by the interaction of the rotor magnetic flux and angular variation in the stator magnetic reluctance. Therefore, this paper will present a design method of magnetization system of bonded isotropic neodymium-iron-boron(Nd-Fe-B) magnets in ring type with sinusoidal air-gap flux density distribution and low manufacturing cost. An analytical technique of magnetization makes use of two-dimensional finite element method(2D FEM) and Preisach model that expresses the hysteresis phenomenon of magnetic materials in order for accurate calculation.

1. 서 론

BLDC 전동기는 회전자의 영구자석과 고정자의 슬롯 간 상호적 자기저항차로 인하여 진동·소음의 주요 원인이 되는 코깅토크가 발생한다. 또한, 고에너지 자석 물질인 희토류 자석은 기존의 자석보다 높은 잔류 자속 밀도를 가진다. 그러므로 코깅토크는 자속밀도의 제곱에 비례하므로 '배'의 증가를 가져오는데, 이는 출력 토크 중에서 비 균일 토크맥동(torque pulsation)으로 작용하여, 특히 저속, 저 부하 조건의 정밀 모터 구동에 대해 진동, 소음 및 제어의 어려움을 야기 시킨다[1]. 코깅토크 저감을 위한 여러 가지 방법 중 공극자속밀도 분포를 정현파에 가깝게 되도록 영구자석의 기하학적인 형상을 arc형으로 가공하는 방법이 있으나 제조비용이 증가하는 단점이 발생한다.

따라서 본 논문에서는 코깅토크 저감과 제조비용 절감을 위해 6슬롯 8극 구조를 가지는 영구자석 표면 부착형 BLDC 전동기의 모델에서 영구자석의 자화분포에 따른 코깅토크 분석을 통해 영구자석의 자화분포 설계값을 결정 후 유한요소법과 프라이자흐 모델을 이용하여 영구자석의 착자 시스템을 설계하며, 이를 이용하여 착자 시킨 자석을 모터에 장착 후 2차원 유한요소법으로 공극자속밀도를 구하고, 맥스웰 용력 방법으로 코깅토크를 계산하였다[2-4].

2. 영구자석의 자화분포 설계 값 결정

2.1 BLDC 전동기

그림 1은 본 논문에서 연구대상 모델인 6슬롯 8극 Surface mounted PM BLDC 전동기를 나타내고 있다. 영구자석은 링형 본드 등방성 네오디뮴 자석을 사용하고, 고정자는 집중권 3상 Y결선이며, 인버터는 3상 2역자 120° 구형파 통전방식이다. 표 1은 시험대상의 전기

적 및 기계적 제원을 나타낸다.

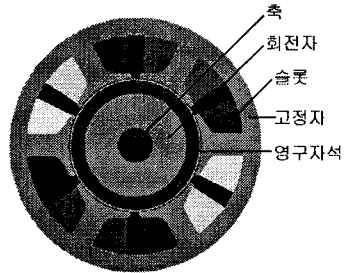


그림 1 SPM BLDC 전동기

표 1 해석모델 사양

항목	내용[단위]
출력	60 [W]
구동 전압	220 [V]
부하	2 [Kg·cm]
정격 속도	3000 [rpm]
고정자 외경	57 [mm]
고정자 적층	28 [mm]
영구자석 종류	Nd-Fe-B

2.2 자화분포 설계 값 결정

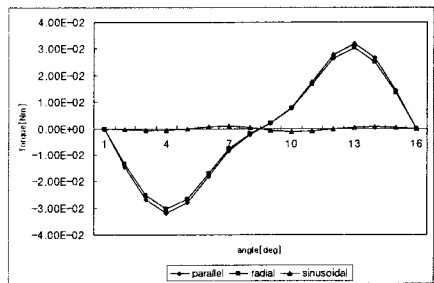


그림 2 자화패턴에 따른 코깅토크 비교

그림 1의 해석모델에서 영구자석의 자화분포에 따른 코깅토크 분석을 위해 상용프로그램인 Maxwell 2D를 사용하여 해석한 결과 그림 2에서 보는 바와 같이 자화분포가 정현적인 경우 parallel인 경우와 radial일 경우의 자화패턴에 비해 코깅토크가 현저히 감소함을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서는 영구자석의 자화분포 설계값을 정현적 자화분포로 결정 하였다.

3. 착자 해석 방법 및 착자 시스템 설계

3.1 착자 해석 방법

그림 3은 펄스마그네토미터기로 major loop를 측정 후, 1차전이곡선으로 근사화한 것으로 이 데이터는 프라이자호 모델의 분포함수를 계산하기 위하여 사용 된다.

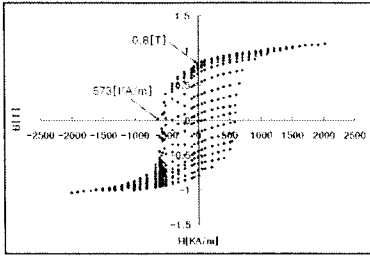
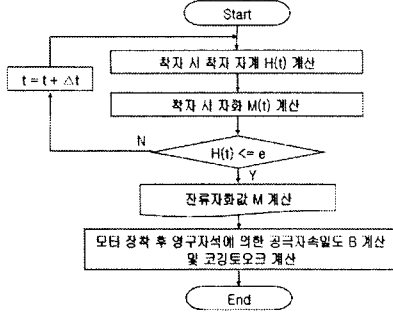


그림 3 등방성 Nd-Fe-B 자석의 1차전이곡선 data

시간 차분 유한요소법과 영구자석의 히스테리시스를 해석하는 프라이자호 모델을 이용하여 영구자석의 잔류 자화값을 구하고, 착자된 영구자석을 모터에 장착 후 2차원 유한요소법과 맥스웰 응력 방법을 이용하여 공극자속 밀도 및 코깅토크를 해석하였다. 아래의 그림 4는 착자 해석 순서도를 나타낸다.



(t=time, e=0)

그림 4 착자 해석 순서도

지배방정식[식(1)]과 전압방정식[식(2)] 및 커패시터 방정식[식(3)]을 통하여 착자시 자계의 세기(H)를 구할 수 있다.

$$\nabla \times \nu(\nabla \times \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s + \nabla \times \nu \vec{B}_0 \quad (1)$$

$$\frac{NI}{S_f} \int_{s_f} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot d\vec{s} + R_f I_f + L \frac{dI_f}{dt} + V_c = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} V_c - \frac{1}{C} I_f = 0 \quad (3)$$

ν 는 자기저항률, \vec{A} 는 자기벡터 포텐셜, σ 는 도전율, \vec{J}_s 는 전류밀도, \vec{B}_0 는 잔류 자속밀도, N 는 턴수, l 는 축 방향 길이, S_f 는 권선 단면적, R_f 는 저항, I_f 는 전류, L 는 인덕턴스, V_c 는 콘덴서 전압, C 는 정전용량을 나타낸다 [2].

영구자석의 1차전이곡선으로부터 프라이자호 모델의 분포함수를 구하고, 식(4)에 착자 시 자계의 세기(H)와 분포함수를 대입함으로 자화값을 구할 수 있다.

$$M(t) = \iint_{h_a \geq h_b} P(h_a, h_b) r(h_a, h_b) H(t) dh_a dh_b \quad (4)$$

M 은 자화값, $P(h_a, h_b)$ 는 분포함수, $r(h_a, h_b)H(t)$ 는 히스

테론, h_a 는 상승때의 스위칭 자계값, h_b 는 하강때의 스위칭 자계값을 나타낸다[3].

자화값으로부터 식(5), (6)를 통해 공극자속밀도와 코깅토크를 2차원 유한요소법과 맥스웰 응력 방법으로 구하였다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \nabla \times (\nu \mu_0 M) \quad (5)$$

\vec{A} 는 자기벡터 포텐셜, ν 는 자기저항률, μ_0 는 공기 중에서의 자기 투자율을 나타낸다.

$$F_t = \int f_t t dc = \mu_0 t c H_t H_n \quad (6)$$

F_t 는 접선방향의 힘, f_t 는 접선방향의 힘의 밀도, t 는 축 방향 길이, c 는 적분 경로, H_t 는 접선 방향의 자계세기, H_n 은 법선 방향 자속밀도를 나타낸다[4].

3.2 착자 시스템 설계

회로류 자석의 경우는 페라이트 자석과는 달리 인가자계에 비례하여 B가 증가하는것이 아니라 인가자계가 어느 임계점에 도달하였을때 B가 증가하게 된다.

따라서 자속밀도를 예측하기 어려우므로 본 연구에서는 시행착오를 통한 2차원 유한요소 시뮬레이션을 통해 착자 회로와 착자 요오크 형상을 설계하였다.

3.2.1 착자기 회로 설계

그림 5은 착자 시스템 등가회로를 나타내고 있다. 콘덴서 뱅크에 축적된 에너지를 방전시켜 임펄스 전류를 인가하게 된다.

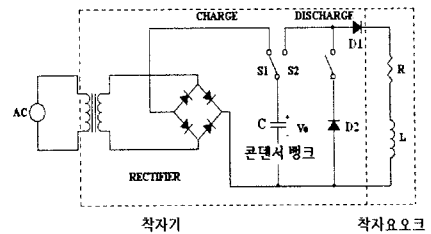


그림 5 콘덴서 방전형 펄스 착자 시스템 등가회로

자계의 세기에 따라 영구자석의 자화값이 변하므로 적정한 착자 전류의 선정이 요구된다. 식(7)은 착자 전류의 크기를 나타내며 저항, 인덕턴스, 커패시턴스의 값에 따라 전류의 양상은 과소제동, 임계제동, 과제동으로 나타낸다.

$$i(t) = \frac{V_0}{\omega L} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \omega t, \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (7)$$

$(R < 2\sqrt{L/C})$

$$i(t) = \frac{V_0}{\omega L} e^{-\frac{R}{2L}t}, (R = 2\sqrt{L/C})$$

$$i(t) = \frac{V_0}{\omega L} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \omega t, \omega = \sqrt{-\frac{1}{LC} + \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

$(R > 2\sqrt{L/C})$

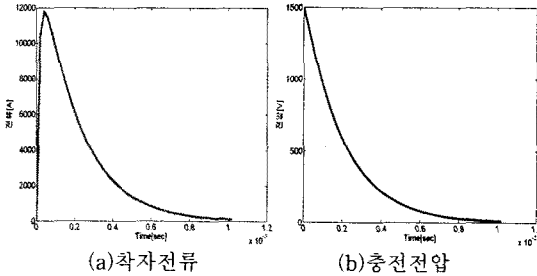
i 는 권선전류, V_0 는 충전전압, ω 는 각주파수, R 는 권선 저항, L 은 인덕턴스, C 는 정전용량을 나타낸다.

식(7)을 통해 기자력을 증가시키기 위해서 권선의 턴수를 작게 하고, 단면적을 크게 결정 하므로, 저항과 인덕턴스가 작아지므로 전류가 크게 발생하고, 따라서 착자 자속을 위한 기자력을 크게 발생하도록 결정하였다.

또한, 충전전압과 정전용량은 착자기가 공급하는 총 에너지량을 구한 뒤 식(8)를 통해 결정 하였다.

$$E_t = \frac{1}{2} CV^2 \quad (8)$$

따라서 결정된 착자기 회로 설계값은 충전전압(V_0) 1500[V], 정전용량(C) 2000[μF]로 결정 하였다.



(a)착자전류 (b)충전전압

그림 6 착자전류 및 충전전압

그림 6은 착자기 회로의 설계 된 값들에 의해 얻어진 착자 전류와 충전 전압을 나타내고 있다. 이때 착자 전류의 피크치는 약 12000[A]를 나타내고 있다[5].

3.2.2 착자 요오크 설계

기존의 착자시스템을 설계시 착자 자속에 가장 많은 영향을 미치는 요인은 착자기 용량과 권선 턴수였다. 그러나 정현적인 착자 자속을 갖는 착자 시스템을 설계시에는 기존과 같이 착자 자계의 세기뿐만 아니라 착자 요오크 철심의 형상이 많은 영향을 미치게 된다.

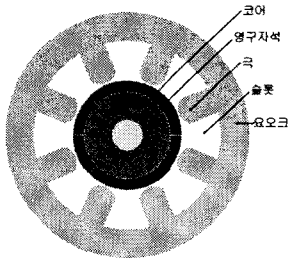


그림 7 착자요오크 철심 형상

그림 7은 정현적 자화분포를 위하여 설계한 착자 요오크 철심 형상을 나타내고 있다. 표 2는 설계된 착자 요오크 제원을 나타내고 있다[6].

표 2 설계된 착자 요오크 제원

공극	0.4 [mm]
극 폭	7 [mm]
극 길이	8 [mm]
극 표면의 반경	8.5 [mm]
요오크 폭	7.5 [mm]
축 방향 길이	32 [mm]
턴 수	5 [turn]
권선 직경	2 [mm]

3.2.3 시뮬레이션 결과

그림 8은 앞에서 설계한 정현적 공극자속밀도 분포를 가지는 착자 시스템으로 착자 시킨 자석을 모터에 장착 후 슬롯이 없다고 가정 하였을 때의 공극자속밀도를 나타내고 있다. 공극자속밀도의 FFT 분석 결과 기본과 성분 이 약 70%인 것을 확인했다. 그림 9는 코깅토포크 해석

결과를 나타내고 있다. 설계한 착자시스템으로 착자시킨 자석을 모터에 장착 후 코깅토포크를 해석한 결과 정현적일 경우에 피크치는 0.056[Nm], parallel일 경우는 0.29[Nm], radial 일 경우는 0.24[Nm]의 피크치를 나타내고 있다. 설계된 착자시스템을 이용하여 착자하였을 경우 코깅토포크가 감소함을 시뮬레이션을 통해 확인했다.

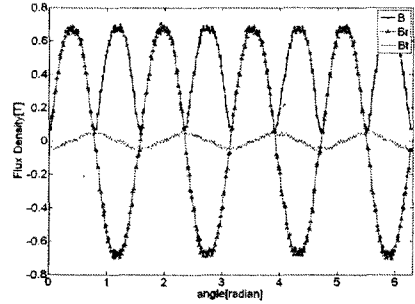


그림 8 공극자속밀도

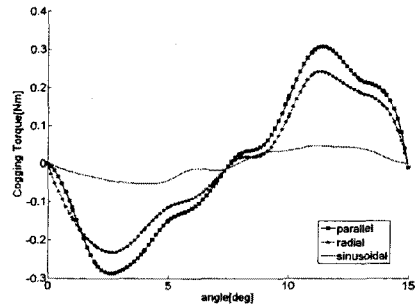


그림 9 코깅토포크

4. 결 론

본 논문에서는 2차원 유한요소법과 프라이자흐 모델을 이용하여 정현적 자화분포를 만드는 착자 시스템을 설계 하였다. 또한, 맥스웰 응력 방법을 사용하여 코깅토포크를 계산하였다.

영구자석의 자화분포는 특히 착자요오크의 형상과 공극 길이에 따라 방향과 크기가 달라진다. 기존에는 반복적인 시행착오를 통해 착자 요오크 철심 형상을 설계하는 문제점이 있다. 따라서 최적화 기법을 적용하여 최적 설계에 대해 고려해볼 필요가 있다고 본다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. M. Hwang and D. K. Lieu, "Design Techniques for Reduction of Reluctance Torque in Brushless Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. on Magnetics. Vol. 30, NO. 6, pp. 4287-4289, November 1994
- [2] Nelson Sadowski, "Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods", 2003
- [3] Chang Seop Koh, "Finite Element Analysis of Magnetizer using Preisach Model", IEEE Trans. on Magnetics. Vol. 35, NO. 3, pp1277-1230, MAY 1999
- [4] S. J. Salon, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", 1995
- [5] 이철규, "영구자석 매입형 3상 유도동기전동기의 착자시스템 설계와 자화 분포 해석", 한양대학교 박사학위논문, 2004
- [6] 정승호, 류세현, 권병일 "정현적 자화분포를 갖는 위치 검출용 마그네틱 센서 개발", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, p107~109, 2005