

유한요소법을 이용한 브러시리스 DC 모터의 특성 해석에 관한 연구

정신영*, 송유석*, 이주*, 장석중**, 박건희**
 *한양대학교 전자전기컴퓨터공학부, **정심전자(주)

A Study on the Characteristic Analysis of Brushless DC Motor Using FEM

Shin-Young Cheong*, Yu-Seok Song*, Ju Lee*, Seok-Joong Jang** and Geon-Hee Park**
 *Dept. of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University, **Jungsim Electronics Co.,Ltd.

Abstract - This paper investigates the cogging torque reduction in a brushless DC (BLDC) motor having an inner-rotor with surface-mounted segment-type permanent magnets. The kind of magnets for the BLDC motor could have different waveforms of magnetization such as square, trapezoidal and sinusoidal form. This paper discusses the effect of the unsymmetrical magnetization distribution in the segment-type permanent magnet, which is able to obtain through a segment structure that the number of poles per segments is 2 ($N_p/N_s=2$), on the cogging torque and EMF waveform. Where the existing magnetizer fixture for the square-type magnetization is used to magnetize the magnets in two segment structures of $N_p/N_s = 1$ and 2. The effectiveness of the proposed designs had been confirmed by comparing cogging torque, and EMF waveform between conventional and new models which are analyzed by Finite Element Method(FEM).

1. 서 론

스위칭 제어기술의 발달과 회로류자석과 같은 고에너지 영구자석의 개발로 인하여 브러시리스 직류(이하 "BLDC") 전동기는 여러 산업분야의 구동원 및 제어원의 핵심부품으로 각광을 받고 있으며, 일반적으로 넓은 속도범위에 걸친 고효율성과 제어용이성으로 정밀기계의 구동용 회전기제로 널리 이용되고 있는 추세이다.[1] 특히 정밀제어계에서 이용되기 위해서는 토크맥동으로 인한 회전속도 변동을 극소화시키는 것이 요구되는데, 토크맥동을 일으키는 요인 중 코깅토크는 외부제어장치로 제어가 곤란하므로 모터 설계시 반드시 고려되어야 할 사항이다.[2] 코깅 토크를 줄이기 위하여 사용되는 방법으로는 돌극 양단을 둥글게 하는 방법, 자극의 스퀘, 공극의 길이 조절, 영구자석 착자조건 및 영구자석과 슬롯의 형상 최적화 방법 등이 있다.[3][6][7]

본 연구에서는 영구자석의 착자조건이나 형상의 최적화 변경 없이 고유한 자화특성을 통한 착자파형 변화만을 이용하여 소음 및 토크리플의 최소화에 가장 큰 영향을 미치는 코깅토크를 줄이는 방법을 제안한다. 즉, 이 방법은 영구자석 세그먼트당 하나의 극성을 가지는 기존의 방식이 아닌 하나의 세그먼트당 두 개의 극성을 갖도록 하는 방식이다. 그 일례로 16개 세그먼트 형태의 영구자석 회전자를 갖는 내전형 방식의 3상 16극 18슬롯 BLDC 전동기를 대상으로 16개의 세그먼트를 8개의 세그먼트 영구자석으로 대체한 후, 기존의 착자 방식으로 영구자석을 착자하여 하나의 영구자석 세그먼트에 서로 다른 두 개의 극을 갖도록 하였다. 각각의 영구자석의 표면 자속분포를 측정하고 그 측정 분포곡선을 간단히 근사화한 후, 2차원 유한요소법을 이용하여 각각의 코깅

토크를 해석하고 그 결과를 비교하여 코깅토크의 저감 효과를 검증한다.

2. 유한요소해석

2.1 코깅 토크의 의미

코깅 토크는 모터 내부에 작용하는 토크를 요소별로 분석하여 그 원인을 찾을 수 있다. 모터의 토크는 다음과 같이 표현된다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} - \frac{1}{2} \phi_m^2 \frac{dR}{d\theta} + Ni \frac{d\phi_m}{d\theta} \quad (1)$$

식 (1)의 두 번째 항은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$T_{cog} = -\frac{1}{2} \phi_s^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (2)$$

식 (2)는 마그네트와 전기자 철심의 상대적인 위치 변화에 따라 공극에 축적된 자기에너지의 차에 의해 발생하는 반작용 맥동분을 나타낸다. 즉 공극에 축적된 자기 에너지 $W(\theta)$ 가 최소가 되는 방향으로 토크가 발생함을 의미하는데, 이 때 발생하는 힘을 코깅 토크라 한다. 식 (2)를 에너지에 의해서 표현하면 식 (3)과 같다.

$$T_{cog}(\theta) = -\frac{\partial W(\theta)}{\partial \theta} \quad (3)$$

이러한 코깅 토크는 그 발생 원인이 되는 계자 기저력 및 공극 페르미언스에 대하여 다음과 같은 가정을 통하여 구할 수 있다.

- 1) 마그네트의 자극수는 우수이며 N극과 S극이 대칭적으로 자화되어 있다.
- 2) 전기자 철심은 고투자율재료이며 자기 포화가 없다. 또한 코일 슬롯은 등간격이며 폭은 작지 않다.
- 3) 공극폭은 작지 않으며 자기에너지 $E(\theta)$ 의 변동분은 공극에 축적된 자기에너지 E_g 의 변동분과 같다.

2.2 유한요소법의 정식화

해석 대상인 내전형 BLDC 전동기에 대해서 영구자석을 포함하는 2차원 정자계 문제로 생각하고 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 해석 영역에서 전류와 자기벡터포텐셜은 적층 방향인 z축 성분으로만 존재한다.
- 2) 상용주파수 범위의 운전이므로 변위전류를 무시한 준 정상상태이다.
- 3) 영구자석의 자화 M 은 잔류자속밀도 B_r 과 같다.
- 4) 철심의 투자율은 등방성이다.

5) 히스테리시스 손실과 와류손은 무시한다.

해석 모델에 대한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times H = J_o \quad (4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

$$B = \mu H + M \quad (6)$$

H : 자계의 세기 [A/m]
 J_o : 입력전류밀도 [A/m²]
 B : 자속밀도 [Wb/m²]
 μ : 철심의 투자율
 M : 자성체의 자화의 세기

자기벡터포텐셜 A 는 식 (7)과 같으므로 정리하면 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$B = \nabla \times A \quad (7)$$

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times (\nabla \times A) = J_o + J_m \quad (8)$$

이제 해석 영역을 1차 삼각형요소로 분할하고 각각의 삼각요소 내에서의 자기벡터포텐셜이 선형적으로 변한다고 가정하면, 요소 내에서의 근사값 A^e 는 식 (9)와 같다.

$$A^e = \sum_{i=1}^3 N_{ie} A_{ie} \quad (9)$$

여기서 N_{ie} 는 요소형상함수이며 2차원 평면에 대해서 x 축 성분과 y 축 성분으로 나타내어진다. 가중잔차법을 이용하여 식 (10)과 같이 전개한다. 요소잔차에 가중함수 W_i^e 를 곱하여 전체 요소에 대해 적분한 값을 영이 되게하면 한 요소 내에서의 잔차 R^e 를 최소로 하는 A^e 를 구할 수 있다.

$$I_{je} = \int_{s^e} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu^e} \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu^e} \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] A^e + J_o^e + J_m^e W_i^e dx dy = 0 \quad (10)$$

가중함수 W_i^e 는 형상함수 N_{ie} 로 하는 Galerkin 법을 사용하고, 자연경계조건을 고려하여 Green 공식에 의해 전개하면 식 (11)을 얻는다.

$$\sum_{e=1}^N \int_{D^e} \left[\frac{1}{\mu^e} \left\{ \frac{\partial A^e}{\partial x} \frac{\partial N_{ie}}{\partial x} + \frac{\partial A^e}{\partial y} \frac{\partial N_{ie}}{\partial y} \right\} - [N_{ie} J_o^e] - [N_{ie} J_m^e] \right] dx dy = 0, \quad (i=1, 2, 3) \quad (11)$$

이로부터 한 요소에 대한 잔차의 식을 도출해내고 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I_{je} = [K_{ij}^e] \{A_{ie}\} - \{F_j^e\} - \{G_j^e\} \quad (12)$$

$[K_{ij}^e]$: 요소(e)에서의 계수 Matrix
 $\{F_j^e\}$: 입력 구동항(입력전류밀도)
 $\{G_j^e\}$: 입력 구동항(등가자화전류밀도)

그러므로 식 (12)에서 각 요소의 잔차식 I_{je} 이 영이 되는 방정식을 조합하여 각 요소절점에서의 계변수 A 의 값을 구할 수 있다.

2.3 맥스웰 응력법에 의한 토크 계산

맥스웰 응력법을 이용하여 물체에 작용하는 힘을 구하면 다음과 같다.

$$F = \frac{1}{\mu_0} \oint_S P \cdot ds = \frac{1}{\mu_0} \oint_l (P \cdot n) dl \quad (13)$$

여기서 l 은 삼각요소에서의 적분 경로이고 n 은 적분 경로상의 단위법선벡터이다. 그리고 P 는 Maxwell Stress Tensor로서 식 (14)와 같다.

$$P = \begin{bmatrix} (B_x^2 - \frac{1}{2}|B|^2) & B_x B_y \\ B_y B_x & (B_y^2 - \frac{1}{2}|B|^2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

요소의 무게중심을 연결하여 미소경로를 구성하고 이를 통과하는 자속밀도 B 의 법선성분과 접선성분의 평균치를 각각 B_n 과 B_s 라 할 때, 회전자 표면에 작용하는 토크는 식 (15)이다.

$$T = r \sum_{i=1}^r \frac{1}{\mu_0} [B_n^{(i)} B_s^{(i)}] (l_i D) \quad (15)$$

r : 회전자의 반지름 u : 미소 적분경로의 수
 l : 미소 적분경로의 길이 D : 철심의 적층 폭

3. 해석 결과

3.1 해석 모델

해석에 사용한 모델은 내전형 전동기로서 구체적인 사양은 표 1과 같으며 그 단면은 그림 1에 나타내었다.

표 1. BLDC 해석 모델의 사양

극수	16	회전자 외경	120 mm
슬롯수	18	회전자 내경	71 mm
상수	3	고정자 외경	70 mm
잔류자속밀도	0.415 T	고정자 외경	56.3 mm

그림 2.(a)는 하나의 세그먼트에 하나의 극을 갖는, 즉 세그먼트당 극수(N_p/N_s)가 1인 모델에 대한 실제 표면 자속분포와 해석에 적용된 근사화된 자속분포 파형을 나타낸다. 또한 그림 2.(b)는 하나의 세그먼트에 두 개의 극을 갖는, 즉 세그먼트당 극수(N_p/N_s)가 2인 모델에 대한 실제 자속분포와 근사화된 자속분포 파형을 나타낸다. 실제적으로 구형과 형태의 착자 방식을 적용하였지만, $N_p/N_s=2$ 인 경우에는 영구자석의 자화특성으로 인하여 인접 N-S극에서 완만한 자속분포 특성을 보인다.

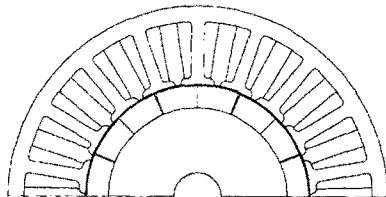


그림 1. 해석 모델의 단면

세그먼트 구조에 따른 코깅토크를 비교하기 위하여 그림 2.(a)와 (b)의 근사화된 착자파형에 대한 역기전력 및 코깅토크를 해석하였다.

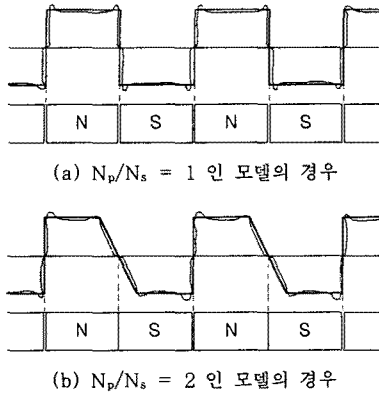


그림 2. 실제 착자파형 및 해석 착자파형

그림 3은 각 해석모델의 요소 분할도이다. 그림 3.(a)는 16개의 세그먼트가 분할되어 있는데 반하여 그림 3.(b)는 8개의 세그먼트로 자극이 서로 접해있음을 볼 수 있다.

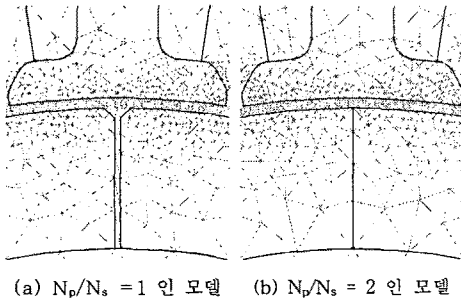


그림 3. 해석 모델의 요소 분할도

3.2 출력 특성

2차원 유한요소법과 맥스웰 응력법을 이용하여 역기전력과 코깅토크를 산출하고 그 결과를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 가로축은 기계각을 나타내며 해석 범위는 0도에서 90도까지이다. 그림 4로부터 $N_p/N_s=2$ 인 모델의 경우, 역기전력 파형이 훨씬 정현파에 가깝고 그 실효치가 $N_p/N_s=1$ 인 모델과 거의 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 그림 5는 코깅토크를 해석한 결과로서 $N_p/N_s=2$ 인 모델에서는 45도 부근의 파형이 $N_p/N_s=1$ 인 모델에 비하여 완만하게 나타나고 최대값도 감소하였다. 이는 영구자석의 착자조건이나 형상의 변경 없이 단지 세그먼트의 통합과 영구자석의 고유한 자화특성만을 이용하여 코깅토크를 저감할 수 있음을 보여준다.

3. 결 론

본 논문에서는 BLDC 전동기에서 영구자석 회전자 세그먼트 구조에 따른 착자파형 변화에 의한 코깅 토크의 변화를 2차원 유한요소법을 이용하여 해석하였다. $N_p/N_s=1$ 인 구조와 $N_p/N_s=2$ 인 구조에 대하여 기존의 구형과 착자요크를 이용하여 영구자석을 착자한 결과, $N_p/N_s=2$ 인 구조에서 서로 다른 극이 접한 부분의 착자파형이 $N_p/N_s=1$ 인 구조와는 달린 완만한 사다리

꼴 형태의 기율기를 갖는 것을 확인할 수 있었는데 이는 영구자석의 고유한 자화특성으로 인한 것이다. 본 연구에서는 각각의 실제 착자파형을 간단한 형태로 가정하고 근사화하여 두 가지 회전자 구조에 대해서 해석을 수행하였다. 그 결과 $N_p/N_s=1$ 인 기존 모델에 비해 $N_p/N_s=2$ 인 모델에서 역기전력의 감소 없이 코깅토크의 양이 줄어들었음을 확인할 수 있었으며, 더욱 정현파에 가까운 역기전력 파형을 얻을 수 있었다.

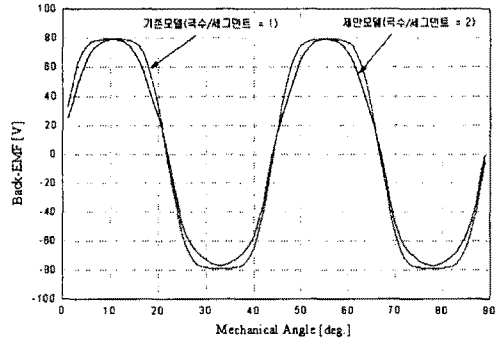


그림 4. 해석 모델의 역기전력

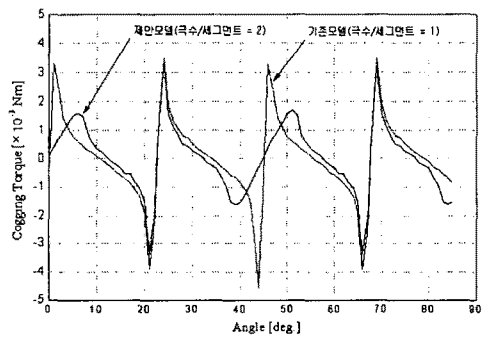


그림 5. 해석 모델의 코깅토크

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 국제공동연구(과제번호: M1-0011-0021)지원으로 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 전연도, "브러시리스 직류전동기의 와전류 손실과 오버행 효과 해석", 박사학위논문, 한양대학교, 전기공학과, 2001.
- [2] 임달호, 김생수, "브러시리스 DC모터의 코깅토크 저감에 관한 연구", KIEE, Vol. 37, No. 5, pp.772-9, 1988.
- [3] Duane C. Hanselman "Brushless Permanent-Magnet Motor Design", McGraw-Hill, 1994.
- [4] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1987.
- [5] 박승찬 외, "하드디스크 구동용 BLDC 전동기의 전자기 해석에 관한 연구", Trans. KIEE, Vol. 48B, No. 9, pp.476-483, SEP, 1999.
- [6] 양병렬 외, "단상 BLDC 전동기의 토크 리플 저감을 위한 공극 설계", KIEE, pp.49-54, 2002.
- [7] 박찬 외, "브러시리스 DC 모터의 영구자석 형상에 따른 특성 연구", KIEE, pp.840-842, 2001.