

내전형 BLDC 전동기의 코깅 토크 저감을 위한 영구자석의 형상 설계

김성철, 주수원
 동아대학교 전기공학과

Permanent Magnet Design for Reduction of Cogging Torque
 in Inner Rotor Brushless DC Motor

S.C.Kim, S.W.Joo
 Dept. of Elec. Eng. Dong-A Univ.

Abstract - In the slotted motor, cogging torque is generated due to the interaction between the rotor magnets and the slots on the stator. It is well known that cogging torque produces vibration and noise which may be detrimental to the performance of position and speed control system. Hence, the prediction of cogging torque is very important at the design stage of BLDC motor. In this paper, permanent magnets with different arc angle of inner and outer radius is proposed. The cogging torque of proposed model and conventional one is analyzed by 2-D FEM and compared.

1. 서 론

BLDC 전동기는 각종 소형드라이브에 사용하는 대표적인 전동기로 기존의 DC전동기의 브러쉬에 의한 기계적 정류구조를 전자화한 것으로 회전자에 영구자석을 사용하고 브러쉬와 정류자 대신 반도체(hall 소자)로 전기자 전류를 제어한다. 따라서 기계 및 전기적 잡음이 발생하지 않을 뿐만 아니라 마찰손실이 없기 때문에 장시간 사용이 가능하여 광학기기, 사무기기, 컴퓨터 하드디스크, 의료기기, VCR 및 camcorder 등에 걸쳐 폭넓게 사용하고 있다.

BLDC 전동기는 전기자 권선으로 구성되어 있는 고정자와 영구자석을 가지는 회전자로 구성되어 있는데 영구자석 재료로는 가격이 저렴한 페라이트(ferrite) 재질을 가장 많이 사용하고 있으며 다양한 형상의 제작이 가능한 플라스틱 (plastic bonded) 영구자석도 그 사용이 증가하고 있다. 또한 고효율, 고풍력을 얻기 위하여 에너지 밀도가 높은 희토류 재질(Nd-Fe-B, Sm-Co)의 영구자석 사용도 최근에 증가하고 있다. 이러한 BLDC 전동기를 정밀, 소형 제어계에 사용하기 위해서는 토크 변동률을 극소화하여야한다. 토크 변동을 일으키는 요인중 외부 제어장치로서 제어가 불가능한 코깅 토크는 전동기의 소음과 진동의 주요 원인이 되기 때문에 전동기 설계시 반드시 고려해야 한다[1][2].

본 논문에서는 계자자극의 outer magnet arc angle 및 inner magnet arc angle을 고려하여 영구자석을 설계하였으며 설계된 형상의 계자자극을 갖는 BLDC 전동기의 특성은 2차원 유한요소 해석방법과 Maxwell stress tensor법을 이용하여 해석하였다.

2. BLDC 전동기의 유한요소 해석

2.1 해석 이론 및 지배 방정식

자기장에서 토크를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} \quad [N/m^3] \quad (1)$$

여기서 \vec{j} 는 자기력 밀도, \vec{j} 는 전류밀도, \vec{B} 는 자속밀도이다. 맥스웰 방정식을 이용하면 식(1)은 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{f} &= (\nabla \times \vec{H}) \times \vec{B} \\ &= \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 자기장에서 체적 V인 물체에 작용하는 토크 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{T} &= \int_V (\vec{r} \times \vec{f}) dv \\ &= \int_V \frac{1}{\mu_0} \vec{r} \times [(\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B}] dv \end{aligned} \quad (3)$$

다음과 같이 정의되는 맥스웰 스트레스 텐스(stress tensor) \vec{P} 에 의해서 토크 식의 체적 적분은 물체를 포함하고 있는 임의의 표면에 대한 면적분으로 변환되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{P} = \frac{1}{\mu_0} [(\vec{B} \cdot \hat{n}) \vec{B} - \frac{1}{2} B^2 \hat{n}] dv \quad (4)$$

$$\vec{T} = \int_V (\vec{r} \times \vec{j}) dv = \oint_S (\vec{r} \times \vec{P}) ds \quad (5)$$

여기서 \hat{n} 은 표면에 대한 단위 수직벡터를 나타낸다.

2.2 해석모델

표1은 본 연구에서 사용한 BLDC 전동기의 해석모델 제원이다. BLDC 전동기의 영구자석은 페라이트 자석으로 경방향(parallel magnetization)으로 착자되었다.

표1 해석모델의 세원 [단위:mm]

극 수	4	슬롯수	24
공극	0.503	치폭	1.38
치고	12.074	슬롯 개방부	0.902
고정자 외경	50.308	회전자 내경	18.167
산류자속 밀도	0.4T	보자력(Oe)	3300
자석밀도(g/cm ³)	2	skew	0
입력전압(V)	24	회전수(rpm)	2,000

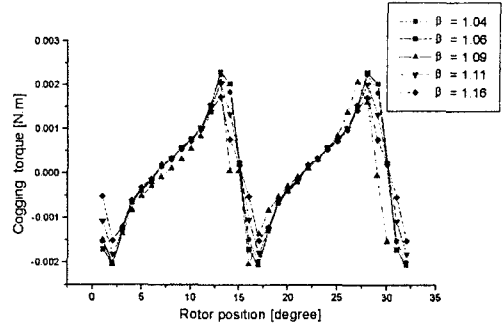


그림2. β 의 변화에 따른 코깅 토크 곡선

2.3 시뮬레이션 및 해석 결과

경방향 이방성 계자자석은 이론적으로는 자석 측면에서의 누설자속은 존재하지 않으나 실제로는 자석 단부의 불완전성때문에 누설 자속이 존재한다. 출력 토크뿐만 아니라 코깅 토크도 자석 단부에서 발생하는 누설 자속의 존재 때문에 큰 영향을 받는다[3]. 영구자석을 완전히 ring-type으로 하는 경우 자석 측면에서의 누설 성분은 줄지만 cogging torque가 크게 증가하는 단점이 있다. 본 연구에서는 자석 단부에서 발생하는 누설 성분을 줄이기 위하여 영구 자석의 inner magnet arc angle을 고려하여 영구자석의 형상을 설계하였다.

$$f(\theta_1, \theta_2, \beta) = \Gamma_{cogging} \quad (6)$$

(θ_1 =inner magnet arc angle, θ_2 =out magnet arc angle, $\beta = \frac{\theta_2}{\theta_1}$ 이다. 단, $70 \leq \theta_1, \theta_2 \leq 90$)

식(6)의 적용과정에서 공극의 길이, 공극의 자속밀도, teeth, slot의 치수는 일정하다고 가정하고 $\theta_1, \theta_2, \beta$ 를 변수로 두어 코깅 토크를 계산하였다.

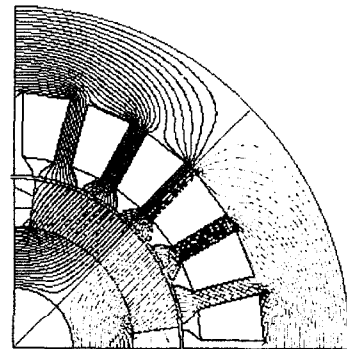


그림3. 무부하시 자속분포도(Conventional model)

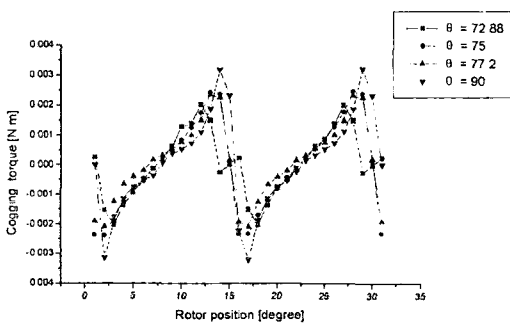


그림1. θ 변화에 따른 코깅토크 곡선

그림1, 그림2에서 보는 바와 마찬가지로 코깅 토크는 θ ($\theta_1 = \theta_2$)와 β 값에 따라 peak치 뿐만 아니라 파형 자체도 큰 변화를 보인다[4][5]. 따라서 β 값도 영구 자석형상을 결정하는데 반영하였다. Conventional model에서는 $\theta_1 = \theta_2 = 75^\circ$ 이지만 본 연구에서는 사다리꼴($\theta_1 = 77.2^\circ, \theta_2 = 90^\circ$)모양의 영구자석 형상을 제안하였다.

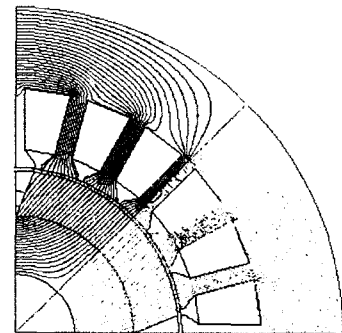


그림4. 무부하시 자속분포도(Proposed model)

그림3과 그림4, 그림5와 그림6은 각각 무부하시 자속 분포도와 공극에서의 자속밀도 분포를 나타내는 그림으로 그림4, 그림6에서 보는바와 마찬가지로 자석 측면에서의 누설 자속 성분은 감소하였지만 자석체의 누설 자속 성분을 완전히 제거하지는 못한다. 이를 위하여 영구 자석과 영구자석 사이의 공기영역 부분에 flux barrier를 설치하는 방법이 제안되기도 하였지만 이는 전동기의 회전자 부분의 형상이 너무 복잡해지고 제조 단가가 증가하는 등 제작상의 어려움이 많다[6].

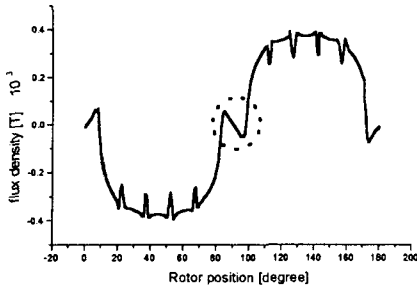


그림5. 공극자속밀도(Conventional model)

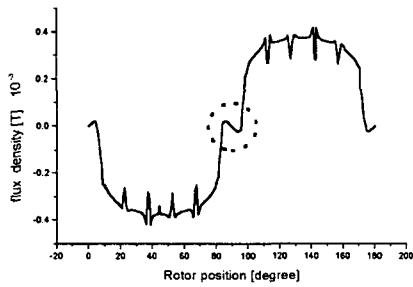


그림6. 공극자속밀도(Proposed model)

그림7은 본 연구에서 설계한 BLDC 전동기와 기존 model의 코깅 토크 변화를 비교한 그래프로 개선전 코깅토크의 peak치는 $2.4 \times 10^{-3} [N \cdot m]$ 이고 개선후 코깅토크의 peak치는 $1.75 \times 10^{-3} [N \cdot m]$ 로서 27%의 개선 효과가 있었다. 이를 통해서 본 논문에서 제안 한 β 를 고려한 영구자석 설계 방법의 타당성을 입증하였고 표2와 그림8에서는 개선전과 개선후 코깅 토크 파형의 harmonics 성분을 분석하였다.

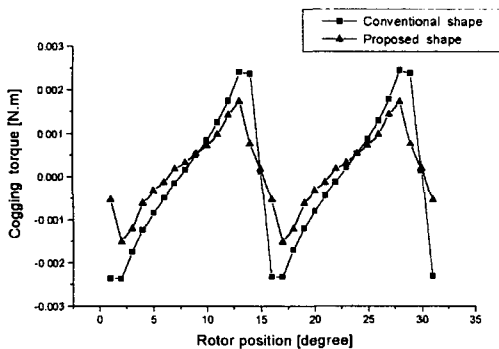


그림7. 개선전과 개선후의 코깅 토크

표2. 개선전후의 harmonic 성분

[단위 : N·m]

Harmonic number	개선전	개선후
1	1.75E-03	1.09E-03
2	0.82E-03	0.49E-03
3	0.376E-03	0.0947E-03

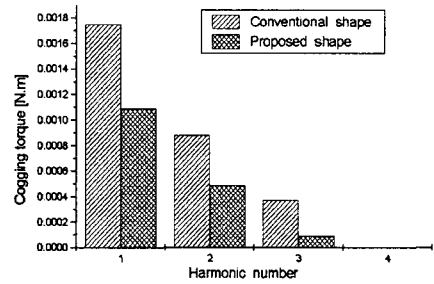


그림8. 코깅 토크의 Harmonic 성분 분석

3. 결 론

본 논문에서는 코깅 토크를 감소시키기 위한 방법으로 기존의 고정자 slot에 skew를 두거나 teeth에 보조 slot을 두었을 때 나타나는 누설 인덕턴스 증가와 출력 토크 감소, 기기의 형상의 복잡해지는 단점을 보완하기 위해 영구자석의 outer magnet arc angle(width) 뿐만 아니라 inner magnet arc angle(width)도 고려하여 영구자석을 설계하였다. 그리고 이 방법을 통해서 cogging torque가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 대한전기학회, "소형모우터 기술현황", 대한전기학회 기술 보고 제4호, pp31-153, 1992.7
- [2] C. C. Hwang, S. B. John, S. S. Wu, "Reduction of Cogging in Spindle Motors for CD-ROM Drive", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.34, No.2, pp468-470, March 1998
- [3] 大川光吉, "페라이트 자석회전기의 설계", 동일출판사, 1995
- [4] Takeo Ishikawa, Gordon R. Slemon, "A Method of Reducing Ripple Torque in Permanent Magnet Motors Without Skewing", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.29, No.2, pp2028-2031, March 1993
- [5] C. C. Hwang, S. B. John, S. S. Wu, "Reduction of Cogging in Spindle Motors for CD-ROM Drive", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.34, No.2, pp468-470, March 1998
- [6] Longya Xu, "A New Concept of Permanent Magnet Machine for Flux Weaking Operation", IEEE Trans on Industry Application Vol.31, No.2, pp373-378, March/April 1995