

## Spoke type 모터의 코깅 토크 저감을 위한 노치설계

한광규\*, 강규홍\*\*, 안영규\*, 이동엽\*, 김규탁\*

\*창원대학교 전기공학과, \*\*모터넷

### Design Notch to reduce Cogging Torque of Spoke type Motor

Han Kwang-Kyu\*, Kang Gyu-Hong\*\*, Ahn Young-Gyu\*, Lee Dong-yeup\*, Kim Gyu-Tak\*

\*Changwon National University Electrical Engineering, \*\*Motor-Net Int. CO, LTD

**Abstract** - By reason of variation magnetic field, cogging torque is generated. Cogging torque of Spoke type motor is bigger than other type permanent magnet motor. So, this paper presents a design notch on stator and variation rotor shape to reduce cogging torque of Spoke Type motor. Through Fourier formulation of magnetic field on air gap, we found position of notch. The validity of the proposed design is confirmed with FEM analysis method.

### 1. 서 론

최근 각종 산업분야에서 모터의 구동환경이 매우 다양하고 저속, 고속의 넓은 범위에서 신뢰성과 내구성을 요구하고 있기 때문에 가변속 구동 시스템을 이용하여 고성능, 고효율을 지향하는 경향이 높아지고 있다. 현재까지 고속용 전동기에는 표면부착형 영구자석 전동기가 주로 이용되었으나 고속 운전영역에서 영구자석의 비산 또는 회전체의 기계적 강성에 대한 문제점과 전영역의 다양화를 위한 제어가 용이 하지 않은 단점으로 인해 기계적으로 문제점을 보완한 매입형 영구자석 전동기에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 매입형 영구자석 전동기는 회전자 철심 내에 영구 자석을 설계하여 제작함으로써 영구자석의 비산을 해결할 수 있어 크게 각광받고 있으며, 특히 d축, q축 인더턴스 차이에 의해 발생한 퀘릭턴스 토크가 마그네틱 토크와 결합하여 단위 체적당 출력력이 크다. 이러한 매입형 영구자석 전동기 중에서 Spoke type 모터는 d축과 q축의 인더턴스 차가 극대화되고 동일 면적의 영구자석의 자속이 집중되어 공극의 자속밀도가 크지만, Spoke type motor는 기계적 구조가 같은 다른 형태의 영구자석형 모터와 비교할 때 코깅 토크 또한 매우 크게 발생하여 진동과 소음을 발생시킴으로 코깅 토크 저감을 고려한 설계가 필수적이다[1][2].

일반적으로 영구자석 전동기의 코깅 토크를 저감시키기 위한 방법으로는 자석의 자화 영역을 조절하는 방법, 영구자석을 불균일하게 배치하는 방법, 영구자석의 스큐를 시행하는 방법이 있다. 이러한 방법들은 회전자 표면에 영구자석이 설계되어 있는 구조에서만 적용 할 수 있지만 Spoke type 모터와 같이 영구자석이 자성체의 회전자 내에 설계 되어 있는 경우는 해당되지 않는다. 회전자 내의 영구자석에 스큐를 적용하는 방법은 회전자 내에 영구자석을 삽입하는 공정이 매우 난해하여 Spoke type 모터의 생산 단가가 높아지게 된다. 회전자 내에 베리어를 설치하는 방법은 회전자의 기계적 강성을 떨어뜨리게 되어 다양한 환경에서의 신뢰성이 저하되게 된다.

따라서, 본 논문에서는 Spoke type 모터의 코깅 토크를 저감시키기 위한 방법으로 영구자석에 의한 공극의 누설 자속을 저감하기 위해 회전자의 자극면 가장자리 형상을 곡면처리하고, 고정자 치와 영구자석의 상호 작

용에 의해 발생하는 자기 에너지를 상쇄하기 위한 노치를 고정자 치 끝 부분에 설계하였다. 해석적 방법을 이용한 노치 설계 파라메타는 자기적 비선형 특성 등을 고려할 수 없으므로 유한요소해석을 통한 노치의 최적화를 시행하여 상세 설계함으로써 Spoke type 모터의 성능을 향상시켰다.

### 2. 본 론

#### 2.1 회전자의 영구자석 설계 및 형상 변화 표 1은 Spoke type 모터의 사양이다.

표 1 Spoke type 모터 사양

회전자 외경	80[mm]	공극	1[mm]
고정자 외경	144[mm]	극수	4
자속밀도	1.2[T]	슬롯수	6
전류밀도	2.89[A/mm <sup>2</sup> ]	슬롯개구폭	7°

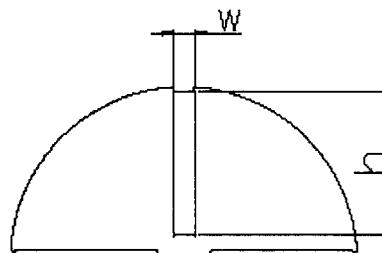


그림 1 회전자 형상

표 2 영구자석 크기

영구자석	w	h	단면적
기본모델	30[mm]	5.5[mm]	
PM 모델1	31[mm]	5.32[mm]	
PM 모델2	32[mm]	5.16[mm]	165[mm <sup>2</sup> ]
PM 모델3	33[mm]	5[mm]	

토크는 영구자석에 의한 공극의 자속밀도에 의해 발생함으로 동일 단면적 영구자석의 높이와 폭에 따른 회전자 자극면의 자속밀도를 비교하였다. Spoke type 모터는 인접한 영구자석의 자속이 합성되어 회전자의 자극면에 집중하고 회전자 표면의 비자화 영역에서 발생한 누설자

속으로 인하여 공극의 자속밀도 분포가 균일하지 않게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 영구자석의 단면적을 동일하게 하고 자석의 높이(w)와 폭(h)을 변화시켜 누설자속이 가장 적은 영구자석의 형상을 결정하였다. 영구자석형상에 따른 공극자속밀도를 해석하기 위하여 이때 고정자는 폐슬롯으로 가정 하였다. 그림 1에 회전자 형상과 표2에 영구자석 크기를 나타내었다.

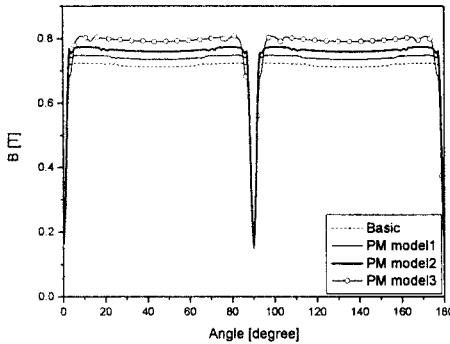


그림 2. 공극 자속 밀도

PM 모델3의 공극자속밀도는 0.79[T]으로 모델3의 공극자속밀도 0.76[T]보다 0.03[T]가 크지만 누설자속으로 인하여 공극자속밀도 분포에 고조파 성분이 나타난다. 따라서 본 논문에서는 PM 모델2의 영구자석 크기를 최적 모델로 선정하였다.

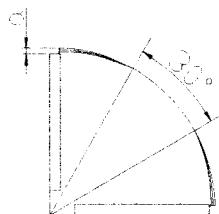


그림 3 회전자 자극면 형상 변화

Spoke type 모터의 코킹 토크를 저감 하기 위하여 회전자 표면의 형상을 변화 시켰다. 그림 3은 회전자 자극면의 가장자리의 형상을 변화시킨 것이다. 자극면 중심의 30°를 제외한 가장자리를 표 3과 같이 a의 길이에 따라서 원호 형상을 변화시켜 나타나는 코킹 토크를 그림 4에 비교하였다[4].

표 3 회전자 형상 변화 변수

영구자석	a
기본모델	2[mm]
회전자 모델1	1.5[mm]
회전자 모델2	1.0[mm]
회전자 모델3	0.5[mm]

기본모델의 코킹 토크 3.31[Nm]이 회전자 모델2에서 0.63[Nm]로 81[%]가 저감되었다. 회전자 모델2가 회전자 모델3의 코킹 토크 보다 0.11[Nm]이 크지만 회전자 형상 변화에 따른 코킹 토크 저감 비율이 다소 낮아지고 영구자석의 상위 배리어 부분이 0.5[mm]로 매우 얕아, 고속 회전시 영구자석을 고정 할 수 있는 기계적 강성이 떨어

질뿐 아니라 제작 공정에서도 어려움이 있기 때문에 저기 때문에 본 논문에서는 회전자 모델2를 최적 모델로 선정하였다.

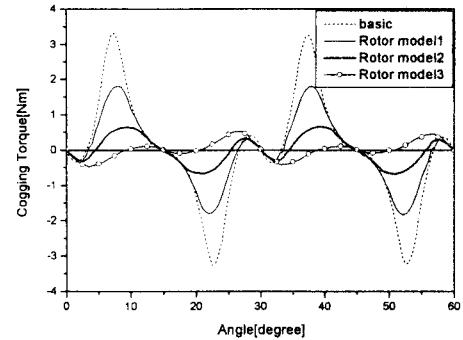


그림 4 코킹 토크

## 2.2 고정자의 노치 설계

본 연구에서는 보조슬롯(notch:노치)를 설치하여 이를 저감시키고자 하였다. 고정자 치에 노치에 의해 공극 자속밀도 분포 형상을 변화시킴으로써 코킹 토크와 반대로 작용하는 토크를 발생 시켜 코킹 토크를 상쇄시키고자 한다. 노치에 의한 코킹 토크 저감법은 기존에 발표된 코킹 토크 저감 기술들과는 달리 Spoke type 모터에 보다 효과적으로 적용 할 수 있고, 고속으로 회전하는 회전자에 기계적 강성에 전혀 영향을 미치지 않으며, 철심의 형상이 복잡하지 않아 모터 운전 특성을 향상시키는데 필요한 비용을 절감하는 이점이 있다.

치와 영구자석의 상호 작용에 의해 발생하는 코킹 토크는 전동기의 운전 시에 고조파 성분 토크로, 영구자석 수(P)와 슬롯 수(S)의 최소 공배수를 극수로 나눈 값의 배수가 되는 고조파 성분으로 나타나게 된다. 전동기에서 코킹 토크 고조파는 다음 식 (1)과 같다.

$$f_{Pn} = \frac{nG}{P} = \frac{nLCM(S, P)}{P}, \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

여기서, G는 최소공배수이다.

그림 5에 고정자의 슬롯이 2b이고 노치의 위치가 a, 폭이 2c일 때의 슬롯 형상을 나타내었다. 슬롯에 의한 공극의 에너지와 노치에 의한 공극의 에너지는 수식 (2)와 (3)과 같이 계산된다. 토크는 공극에너지의 변화분 임으로 슬롯에 의한 에너지 변화와 노치에 의한 에너지 변화분을 합성하여 0이 되는 노치의 설계 파라메타는 수식 (4)와 같이 계산 할 수 있다. 수식 (4)로부터 특정 고조파의 코킹 토크를 제거시키는 노치의 위치와 폭을 표 4에 나타내었다[4].

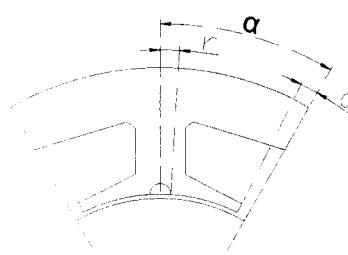


그림 5 고정자 치

$$F_m(\theta) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} S \cdot \sin(na) \cdot \sin(6n\theta + \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

$$F_s(\theta) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} S \cdot \sin(n\gamma) \cdot \sin(6n(\theta - \alpha) + \frac{\pi}{2}) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{(2k-1)\pi}{6n}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (4)$$

$$\gamma = \left\{ 2k\pi + \frac{\pi}{2} \pm \left( \frac{\pi}{2} - 6na \right) \right\} \frac{1}{6n}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

표 4 노치의 위치와 폭

고조파	보조슬롯 위치 $\alpha$	보조슬롯 폭 $\gamma$
$3(\pi=1)$	$\frac{(h-1)\pi}{18}$	$h=2, 5, 8, 11, \dots$
$6(\pi=2)$	$\frac{(h-1)\pi}{36}$	$h=3, 5, 9, 11, \dots$
$9(\pi=3)$	$\frac{(h-1)\pi}{54}$	$h=3, 4, 5, 6, \dots$

본 연구의 해석 모델은 그림 9에서 알 수 있는 바와 같이 6고조파 성분의 코킹 토크가 가장 크게 발생 한다. 따라서 6고조파 성분의 코킹 토크를 저감 하기 위한 노치를 상세설계한다. 해석적 방법을 이용한 노치의 설계 파라메타는 철심의 포화현상 등을 고려하지 못하였기 때문에 FEM을 통하여 노치의 위치를 고정하고 폭을 변화시켜 노치의 최적화 하였다. 그림 6은 노치 폭의 변화에 따른 코킹 토크 비교이다. 노치의 폭이  $2.5^\circ$ 일 때 코킹 토크가  $0.49[Nm]$ 로 가장 효과적으로 저감하는 결과를 나타낸다.

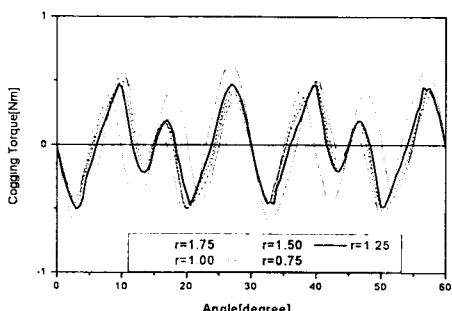


그림 6 노치 폭 변화에 따른 코킹 토크

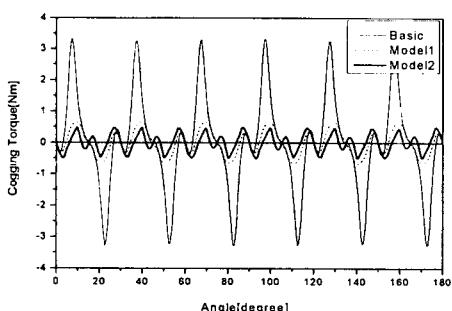


그림 7 코킹 토크

그림 7은 기본모델(basic)과 회전자 표면의 형상변화만 수행한 모델(모델1), 회전자 표면 형상 변화 및 노치를 동시에 적용한 모델(모델2)의 코킹 토크 비교이다. 기본모델의 코킹 토크가 3.31[Nm]에서 모델1에서 0.63[Nm]로 저감하였고, 최적 모델인 모델2는 코킹 토크가 가장 많이 저감된 0.49[Nm]의 결과를 나타내었다.

그림 8은 모델에 따른 토크 특성 비교이다. 기본 모델에 비하여 최적화모델인 회전자 표면 형상 변화 및 노치 설계 모델이 4.54[Nm]감소 하였지만 터출토크의 고조파 분석을 나타낸 그림 9에서 알 수 있듯이 6고조파 성분의 코킹 토크가 크게 감소하여 기본 모델의 왜형율이 26.2[%]에 반해 최적화 모델은 9.2[%]로 크게 저감 되었다.

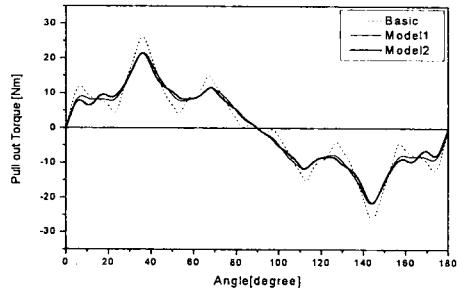


그림 8 터출 토크

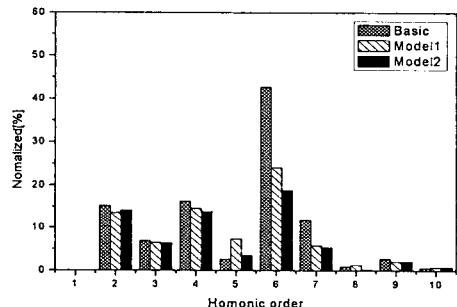


그림 9 고조파 분석

### 3. 결 론

본 논문에서는 고속, 고출력에 적합한 Spoke type 모터의 코킹 토크 저감을 위하여 회전자 자극면의 형상을 변화시키고 노치를 설계 하였다. 그 결과 기본모델 코킹 토크의 85[%]를 저감 하고 터출 토크의 왜형율이 크게 감소하여 Spoke type 모터의 단점이었던 소음과 진동을 크게 저감 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motor, Clarendon Press, Oxford,1994.
- [2] Hong-Seok Ko, and Kwang-Joon Kim, "Characterization of Noise and Vibration Source in Interior Permanent-Magnet Brushless DC motors", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 40, no. 6, pp. 3482 ~ 3489, 2004.
- [3] Kyu-Yun Hwang1, "Rotor Pole Design in Spoke-Type Brushless DC Motor by Response Surface Method" IEEE Tans. on Magnetics, vol. 43, on. 4, pp. 1833~1836, 2007
- [4] Chang Seop Koh, and Jin Soo Seol, "New Cogging-Torque Reduction Method for Brushless Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 39, no. 6, pp. 3503 ~ 3506, 2003.