

매입형 영구자석 동기 전동기의 코깅 토크 저감을 위한 노치 설계

한광규*, 강규홍**, 안영규*, 김규탁*
 *창원대학교 전기공학과, **모터넷

Design Notch to reduce Cogging Torque
 of Interior type Permanent Magnet Synchronous Motor

Han Kwang-Kyu*, Kang Gyu-Hong**, Ahn Young-Gyu*, Kim Gyu-Tak*
 *Changwon National University Electrical Engineering, **Motor-Net Int. CO, LTD

Abstract - This paper presents a design notch to reduce cogging torque of interior type permanent magnet motor. As design notch on rotor of IPM motor, magnetic field from between rotor and teeth of state is changed. By reason of variation magnetic field, cogging torque is generated. Through Fourier formulation of magnetic field on rotor, we found position of notch and manufactured armature that is designed by optimizing analysis. The validity of the proposed design is confirmed with experiments.

1. 서 론

산업현장의 자동화와 생산성 향상을 위하여 자동화 시스템의 핵심인 전동기의 고출력, 고효율화 및 제어 성능 향상이 요구 되고 있다. 기술 발달에 의한 영구자석의 개발이 활발하게 이루어지고 있어, 산업에서 요구하는 전동기 특성을 위하여 전동기의 주자속을 발생시키는 게자부를 영구자석으로 채용하는 경우가 많아지고 있다. 전동기 내에 영구자석 부착 형태에 따라 영구자석을 표면에 부착하는 표면부착자석형 전동기(Surface Permanent Magnet Motor: SPM)과 영구자석을 회전자 내에 삽입 하는 매입자석형 전동기(Interior Permanent Magnet Motor: IPMM)으로 나눌 수 있다. 최신 기술의 집약 되고 미래 산업의 중심에 위치하는 전기자동차와 같이 고출력 운전 특성에 적합한 매입자석형 전동기의 연구가 더욱 활발히 진행되어 지고 있다. 뿐만아니라 매입자석형 전동기는 고속 회전시 영구자석이 회전자 코어 내부에 있기 때문에 원심력에 의한 영구자석의 이탈 현상이 일어나지 않는다. 이러한 기계적인 이점과 더불어 d축과 q축사이의 인덕턴스 차를 가지는 돌극성에 의해 릴럭턴스 토크가 발생함으로 표면부착자석형 전동기에 비하여 발생토크와 고속 운전의 이점이 있다[1].

그러나 IPMM의 회전자 표면의 자속 분포가 균일하지 못한 구조상 단점으로 차로의 조건이 같은 다른 형태의 모터에 비해 코깅 토크가 비교적 많이 발생한다. 이러한 코깅 토크는 전동기 출력에 고조파 성분으로 작용하여 운전시 진동과 소음이 발생한다. 미래 지향적인 저소음화 기술 개발 동향으로 볼 때 코깅 토크 발생은 IPMM의 큰 단점이 된다.

게자부에 영구자석을 사용한 전동기에 발생하는 코깅 토크를 저감 하기위한 방법들로 많은 연구가 이루어져 왔다. 영구자석의 자화 영역을 조절하거나 영구자석 형상, 배치를 변화시키고 고정자 치의 형상을 변화 시키는 방법들이 발표 되어 왔다[2][3]. 그러나 IPMM과 같이 회전자 내부에 위치하는 매입자석형 전동기에서는 적용할 수 없는 방법이다.

본 논문에서는 IPMM에 발생하는 코깅 토크를 저감시키기 위해 회전자 표면의 형상을 조절하는 노치 설계

방법을 제안 하였다. 푸리에 급수 전개를 이용해 코깅 토크의 함수를 구하고 노치에 의한 토크 함수와 합성하여 노치 설계 변수를 결정 하였다. 유한요소법(Finite Element Analysis: FEA)으로 기본 모델과 노치 적용 모델을 비교하고 최적화 모델의 변수를 이끌어냈다. 최적 모델을 제작하여 이론치와 비교 하였다.

2. 본 론

2.1 코깅 토크

코깅 토크는 공극에서 퍼미언스 차이에 의해 발생함으로 공극의 자속 밀도 분포를 분석하여 코깅 토크의 함수를 구할 수 있다. IPMM은 영구자석을 회전자 내에 포함하는 구조상 표면부착자석형 전동기에 비하여 공극 자화 분포가 균일 하지 못하다.

그림 1은 IPMM 회전자의 한극분에 해당하는 등가 자화 분포도이다. 회전자 내의 영구자석 측면에서 발생하는 누설자속과 fringing effect는 배제하였다.

공극에서 퍼미언스 변화를 일으키는 변수인 고정자의 슬롯이 없는 경우, 구조적인 이유로 발생하는 자화분포에 따른 에너지의 함수는 수식 (1)과 같다.

코깅 토크는 슬롯과 영구자석의 상호 작용에 의해 발생된다. 전동의 운전시에 고조파 성분으로 나타나며 영구자석 수와 슬롯 수의 최소 공배수를 극수로 나눈 값의 배수가 되는 고조파 성분으로 나타나게 된다. 코깅 토크의 주파수는 의 수식 (2)와 같다.

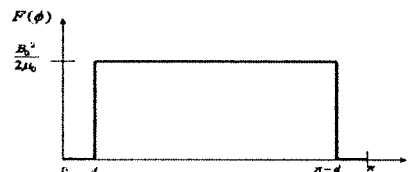


그림 1. IPMM 회전자의 등가 자화 분포도

$$f_{max(\theta)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_0^2}{2\mu_0} \frac{2}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{2n\pi\alpha}{T}\right) \cdot \cos\left(\frac{2n\pi\theta}{T}\right) \quad (1)$$

여기서 T는 영구자석의 한극에 해당하는 각도이다

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

함수화 된 코깅 토크를 제거하기 위해 한극에 해당하는 각도 내에서 에 위치하는 노치를 설계 하였을 때 자속 밀도 분포는 달라지게 되고 그림 3에 노치가 적용된 자속 밀도 분포를 나타내었다.

노치에 의해 발생하는 에너지 함수는 식 (3)과 같다.

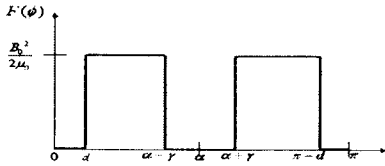


그림 2. 노치 설계 후 등가 자화 분포

$$f_{notch}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_0^2}{2\mu_0} \frac{2}{n\pi} \cdot \sin\left(\frac{2n\pi r}{T}\right) \cdot \cos\left(\frac{2n\pi}{T}(\theta + \alpha)\right) \quad (3)$$

두 함수를 합성하여 0이 되는 조건에서 노치의 위치와 폭을 결정할 수 있다. 식 (4)는 두 함수를 합성하여 자화 분포의 불균일에 의한 에너지 변화를 상쇄하는 수식이다.

$$\cos(f_{pn}\theta) + \frac{\sin(f_{pn}r)}{\sin(f_{pn}d)} \cdot \cos(f_{pn}(\theta + \alpha)) = 0 \quad (4)$$

해석 모델은 6극 9슬롯이고 코깅토크는 3n고조파 성분으로 나타나게 되어 수식(4)에 의해 노치의 설계 변수를 결정한다. 표 1은 특정 고조파에 해당하는 노치의 위치와 폭이다.

표 1. 노치 위치와 폭

고조파	노치위치	노치 폭
3	$\alpha_1 = \frac{n\pi}{2}$	$\gamma_1 = 4.1^\circ$
6	$\alpha_1 = \frac{n\pi}{4}$	$\gamma_2 = 1.8^\circ$
9	$\alpha_1 = \frac{n\pi}{8}$	$\gamma_3 = 1.2^\circ$

2.2 노치의 적용 및 특성 해석

3고조파와 6고조파 코깅 토크를 제거하기 위한 노치를 설계 한후 9고조파 노치까지 설계 하게 되면 회전자 표면의 굴곡이 너무 심하게 되고 이는 설계 조건에 맞게 설계된 공극의 평균 길이를 더 늘리게 되어 토크 특성이 저하되게 된다. 코깅 토크의 9고조파 성분의 경우 토크의 크기가 크지 않기 때문에 3고조파와 6고조파 성분의 코깅 토크를 제거하기 위한 노치만을 설계하였다.

그림 5는 회전자에 노치를 적용한 모델이다.

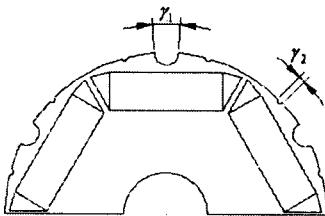


그림 3. 노치 적용 모델

그림 4은 기본 모델과 노치 적용 모델의 코깅 토크 비교이다. 유한요소해석 방법으로 코깅 토크의 한 주기를 해석하여 비교한 것으로 기본 모델 코깅 토크의 pk-pk 값이 5.84[kgCm]에 비해 노치를 적용한 모델의 경우 3.63[kgCm]로 37.8%가 감소되었다.

회전자에 노치를 설계하는 방법과 같은 방법으로 고정

자에 노치를 설계하여 해석한 결과에서 노치의 큰 효과가 나타나지 않았다. 노치 설계를 위한 수식 전개 과정에서 고정자에 노치를 설계할 때 회전자의 경우와 같이 공극의 자화분포가 균일하다는 가정에서 영구자석이 만드는 자화분포의 영향이 IPMM의 코깅 토크에 가장 크게 영향을 작용하기 때문에 슬롯이 의한 에너지 변화는 코깅 토크에 크게 작용하지 않는다.

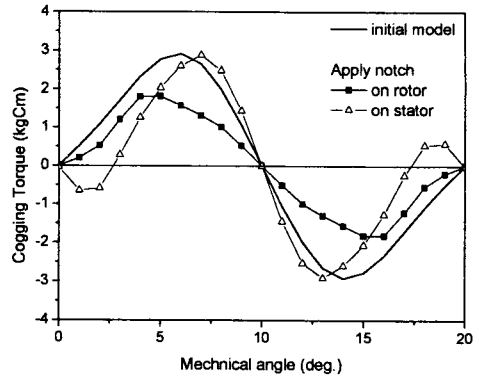
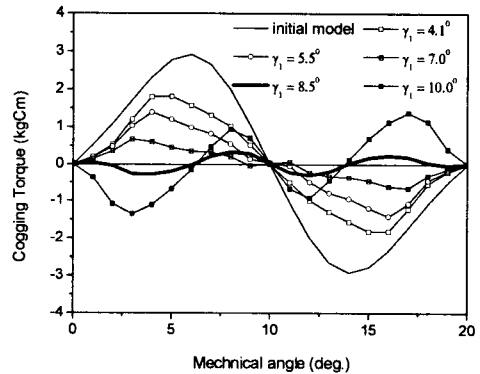
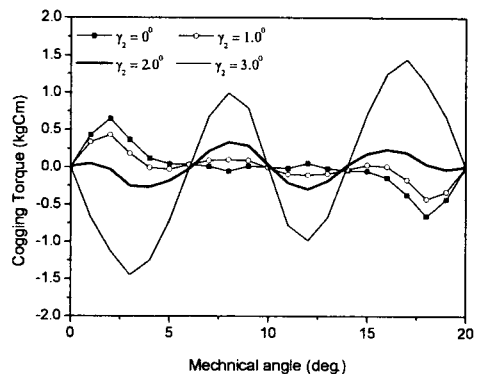


그림 4. 노치 적용 비교



(a) γ_1 의 변화에 따른 코깅토크



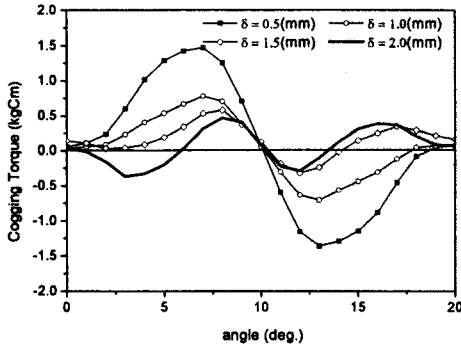
(b) γ_2 의 변화에 따른 코깅토크

그림 5. 변수에 따른 코깅 토크

계산에서 고려할 수 없었던 철심의 포화현상과 슬롯 개

구폭이 자화에 미치는 현상 등을 고려하기 위하여 노치의 위치는 고정시키고 노치의 폭과 길이를 변화시키면서 유전요소해석을 행하였다. 이를 그림 5에 나타내었다.

$\gamma_1 = 8.5^\circ, \gamma_2 = 2.0^\circ$ 에서 최적화 하였고, 깊이에 코깅 토크 변화를 그림 6에 나타내었다.



(c) 노치의 깊이 변화에 따른 코깅 토크
그림 6. 변수에 따른 코깅 토크

2.3 최적화 모델 제작 및 실험

FEA 결과에서 최적화한 노치 설계 변수를 결정 하고 기본 모델과 최적화 모델을 제작하였다. 그림 7은 제작 한 회전자 모델과 고정자이다.

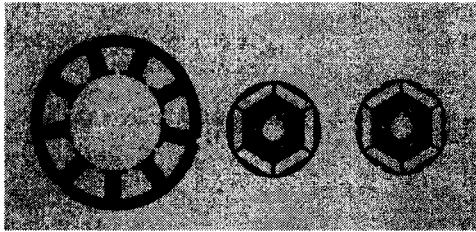


그림 7. 해석 모델 IPMM 제작

그림 8은 기본모델과 최적화 모델의 실험 결과이다. 그 결과, 이론치에서는 최적화 모델이 기본 모델에 비하여 코깅 토크가 87% 저감되었지만, 실험치 결과에서는 두 모델의 코깅 토크가 84.5% 저감되는 차이를 나타내었다. 그 원인은 공극에서의 부분적인 포화 현상과 철심 재료특성의 불균일성으로 판단된다. 하지만 수치해석 방법으로 노치의 설계 변수를 이끌어 내고 FEA을 이용해 노치를 최적화하는 본 논문의 연구 결과의 타당성을 입증 할 수 있을 만큼 충분한 결과 이다.

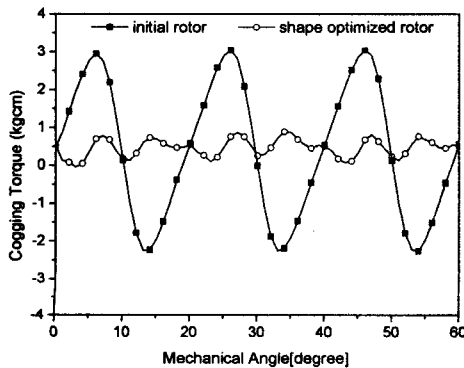
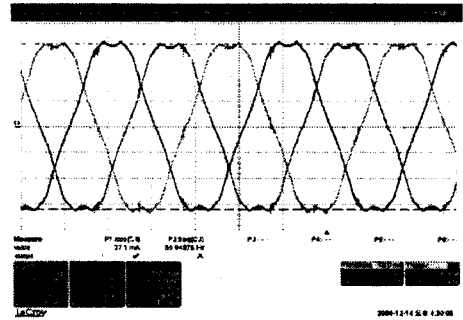
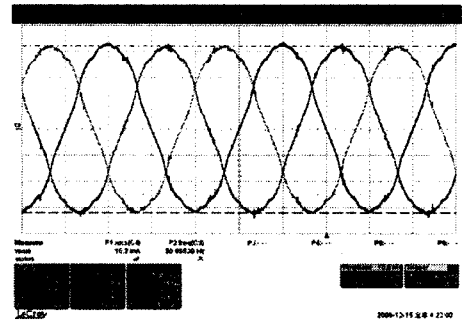


그림 8. 코깅 토크

그림 9은 기본모델과 최적화 모델의 1000rpm일때 역기전력 파형이다. 최적화된 모델이 기존 모델에 비하여 정현파에 가까운 역기전력 파형이 실측된다. 역기전력 파형의 정현성은 운전, 제어특성과 밀접하게 관련되어 최적화 모델의 우수성을 실험 결과로 입증한다.



(a) 기본모델



(b) 최적화 모델

그림 9. 역기전력 (1000rpm)

3. 결 론

본 논문에서는 IPMM의 회전자 표면에 노치를 설계하여 자화 분포 영역을 조정 함으로써 전동기 특성에 악 영향을 미치는 코깅 토크를 저감 하는 방법을 제안 하였다. 수치해석 방법으로 자화 분포를 분석하여 코깅 토크의 함수를 표현 하고 그 함수를 상해 할 수 있는 노치의 함수에서 노치 설계 변수들을 결정 하였다. 노치가 적용된 모델을 유한요소해석 방법으로 비선형 해석하여 코깅 토크 저감 효과를 시뮬레이션 하였으며 추론 할 수 있는 파라메타 내의 해석 결과에서 최적화 모델을 결정 하였다. 논문에서 연구 결과는 실험을 통해 타당성을 입증하고 실제 기기에서 코깅 토크가 84%저감 하는 성과를 이루었다. 공극에 분포하는 자속밀도를 정확하게 전개 하는 연구를 진행하면 본 논문에서 수치적으로 계산하지 못했던 노치의 깊이에 대한 최적화를 명확히 결정지을 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Gyu-Hong Kang, el. "Improved Paramater Modeling of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Basedon Finitit Element Analysis", IEEETrans. on Magnetics, vol. 36.No.4,pp.1867~1870, July.2000.
- [2] Chang Seop Koh, and Jin-Soo Seol, "New Cogging-Torque Reduction Method for Brushless Permanent-Magnet Motors", IEEETrans. on Magnetics, vol.39.No.6,pp.3503~3506, Nov.2003.
- [3] A. Kioumars, el. "Mitigation of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motors by Optimal Shape Design", IEEE Trans. on Magnetics, vol.42.No.11,pp.3706~3711,Nov.2005.