

IPM motor의 회전자 구조설계에 따른 토크리플 및 진동 특성 연구

이 승 훈*, 강 규 홍**, 장 기 봉*, 김 규 탁*
 *창원대학교 전기공학과, **젬텍

The study on the torque ripple and vibration characteristic
 of IPM motor according to rotor design

Lee Seung-Hoon*, Kang Gyu-Hong**, Jang Ki-Bong*, Kim Gyu-Tak*

*Department of Electrical Engineering, ChangwonNationalUniversity, **Gem Tech. CO, LTD

Abstract - This paper presents the torque ripple and vibration characteristic of interior type permanent magnet (IPM) motor according to rotor design. In the design methods, the optimal notchs are put on the rotor pole face, which have an effect on variation of permanent magnet (PM) shape or residual flux density of PM. Through the space harmonics field analysis, the positions of notch are found and the optimal shapes of notch are decided by using Finite Element Method (FEM). The validity of the proposed method is confirmed with experiments. Therefore, the vibration, starting current and efficiency of IPM is measured by experiment.

1. 서 론

전동기는 영구자석 부착 형태에 따라 영구자석을 표면에 부착하는 표면부착형 전동기(Surface Permanent magnet Motor; SPM)와 영구 자석을 회전자 내에 삽입하는 매입형 전동기 (Interior Permanent manet Motor; IPM)로 나눌 수 있다. 기술 집약적이며 미래 산업의 중심에 위치하는 전기자동차와 같이 고출력 운전 특성에 적합한 매입형 전동기의 연구가 더욱 활발히 진행되어지고 있다. 뿐만 아니라 매입형 전동기는 고속 회전시 영구자석이 회전자 코어 내부에 있기 때문에 원심력에 의한 영구자석의 비산 현상이 일어나지 않는다. 이러한 기계적인 이점과 더불어 d축과 q축사이의 인덕턴스 차를 가지는 돌극성에 의해 릴럭턴스 토크가 발생함으로 표면부착형 전동기에 비하여 발생토크가 크며, 고속 운전이 가능한 이점이 있다[1].

그러나 IPM의 회전자 표면의 자속 분포가 균일하지 못한 구조적인 단점으로 자로의 조건이 같은 다른 형태의 모터에 비해 코깁 토크가 비교적 많이 발생한다. 이러한 코깁 토크는 전동기 출력에 고조파 성분으로 작용하여 운전 시 진동과 소음이 발생한다. 미래 지향적인 저소음화 기술 개발 동향으로 볼 때 코깁 토크 발생은 IPM의 큰 단점이 된다.

계자부에 영구자석을 사용한 전동기에 발생하는 코깁 토크를 저감 하기위한 방법들로 많은 연구가 이루어져왔다. 영구자석의 자화 영역을 조절하거나 영구자석 형상, 배치를 변화시키고 고정자 치의 형상을 변화 시키는 방법들이 발표 되어 왔다[2][3]. 그러나 IPM과 같이 자석이 회전자 내부에 위치하는 매입형 전동기에서는 영구자석의 형상이나 배치를 변화시키는 방법을 적용하기 어렵다.

본 논문에서는 IPM에 발생하는 코깁 토크를 저감시키기 위하여 회전자 표면의 형상을 조절하는 노치 설계 방법을 적용하였다. 푸리에 급수 전개를 이용해 코깁 토크의 함수를 구하고 노치에 의한 토크 함수와 합성하여 노

치 설계 변수를 결정 하였다. 유한요소해석법(Finite Element Analysis; FEA)으로 기본 모델과 노치 적용 모델을 비교하고 최적화 모델의 변수를 이끌어냈다. 최적 모델을 제작하여 코깁 토크, 진동, 기동전류, 효율 실험을 수행하였고, 실험 결과를 기본 모델과 비교하여 회전자 형상에 따른 코깁 토크의 변화와 기동전류, 진동, 및 효율 변화를 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 노치를 적용한 회전자 설계

코깁 토크는 슬롯과 영구자석의 상호 작용에 의해 발생된다. 전동기의 운전시에 고조파 성분으로 나타나며 영구 자석 수와 슬롯 수의 최소 공배수를 극수로 나눈 값의 배수가 되는 고조파 성분으로 나타나게 된다. 코깁 토크의 주파수는 의 수식 (1)과 같다.

여기서 T는 영구자석의 한극에 해당하는 각도이다

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

함수화 된 코깁 토크를 제거하기 위해 한극에 해당하는 각도 내에서 에 위치하는 노치를 설계 하였을 때 자속 밀도 분포는 달라지게 되고 그림 1에 노치가 적용된 자속 밀도 분포를 나타내었다.

노치에 의해 발생하는 에너지 함수는 식 (2)과 같다.

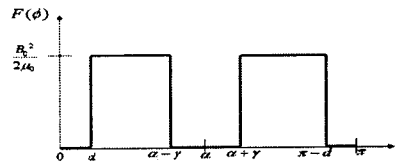


그림 1. 노치 설계 후 등가 자화 분포

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

두 함수를 합성하여 0이 되는 조건에서 노치의 위치와 폭을 결정 할 수 있다. 식 (3)은 두 함수를 합성하여 자속 분포의 불균일에 의한 에너지 변화를 상쇄하는 수식이다.

$$\cos(f_{pn}\theta) + \frac{\sin(f_{pn}r)}{\sin(f_{pn}d)} \cdot \cos(f_{pn}(\theta + \alpha)) = 0 \quad (3)$$

해석 모델은 6극 9슬롯이고 코깁토크는 3n고조파 성분

으로 나타나게 되어 수식(3)에 의해 노치의 설계 변수를 결정한다. 표 1은 특정 고조파에 해당하는 노치의 위치와 폭을 나타낸다.

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	$\alpha_1 = \frac{n\pi}{8}$	$\gamma_3 = 1.2^\circ$

3고조파와 6고조파 코깅 토크를 제거하기 위한 노치를 설계한 후 9고조파 노치까지 설계 할 경우 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 2는 회전자에 노치를 적용한 모델을 나타낸다.

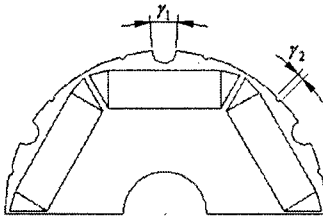
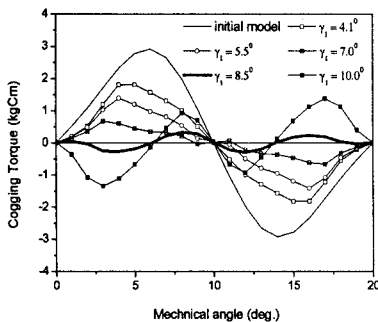
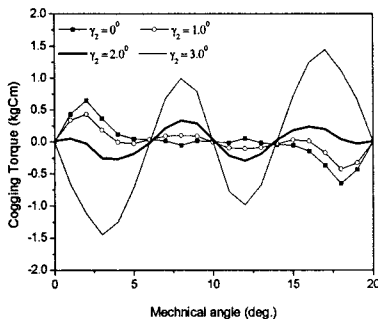


그림 2. 노치 적용 모델



(a) γ_1 의 변화에 따른 코깅토크



(b) γ_2 의 변화에 따른 코깅토크

그림 3. 변수에 따른 코깅 토크 계산에서 고려할 수 없었던 철심의 포화현상과 슬롯 개

구폭이 자화에 미치는 현상 등을 고려하기 위하여 노치의 위치는 고정시키고 노치의 폭과 깊이를 변화시키면서 유한요소해석을 행하였다. 각각의 변수에 따른 결과를 그림 3에 나타내었다.

$\gamma_1 = 8.5^\circ, \gamma_2 = 2.0^\circ$ 의 값을 최적화 모델의 변수 값으로 설정하였다.

그림 4는 노치의 깊이에 따른 코깅토크의 변화를 나타낸다. 최적화 모델의 변수값은 $\delta = 2.0[\text{mm}]$ 으로 설정하였다.

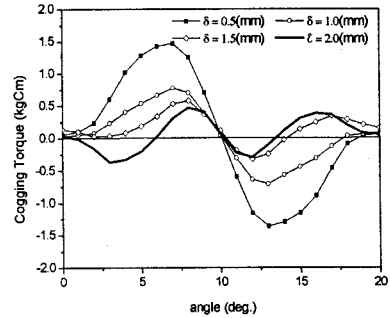


그림 4. 노치의 깊이 변화에 따른 코깅 토크

2.2 최적화 모델 제작 및 특성 실험

2.2.1 최적화 모델 제작

FEA 결과에서 최적화한 노치 설계 변수를 결정 하고 기본 모델과 최적화 모델을 제작하였다.

그림 5는 제작한 회전자 모델과 고정자이다.

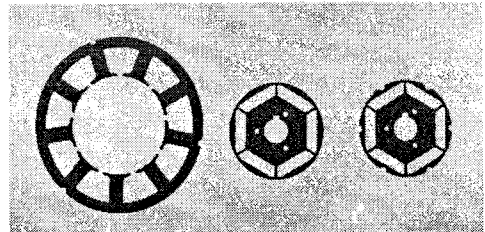


그림 5. 해석 모델 IPMM 제작

2.2.2 코깅 토크 실험

회전자에 노치를 설계한 최적화 모델의 코깅 토크를 확인하기 위하여 기본 모델과 최적화 모델의 코깅 토크를 각각 측정하였다.

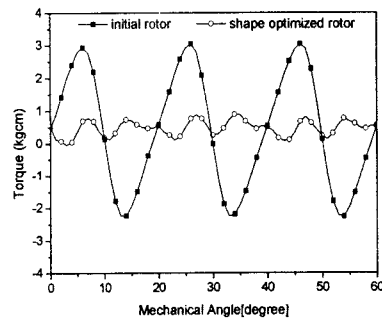


그림 6. 코깅 토크

그림 6은 기본모델과 최적화 모델의 코깅 토크 실험 결과이다. 이론치에서 최적화 모델이 기본 모델에 비하여 코깅 토크가 87[%] 저감되었으나 실험치 결과에서는 코깅 토크가 84.5[%] 저감되는 차이를 나타내었다. 그

원인은 공극에서의 부분적인 포화 현상과 철심 재료특성의 불균일에 의한 결과라 사료된다. 그러나 수치해석 방법으로 노치의 설계 변수를 이끌어 내고 FEA를 이용해 노치를 최적화하는 본 논문의 연구 결과의 타당성을 입증 할 수 있을 만큼 충분한 결과이다.

2.2.3 기동전류 실험

코깅토크 저감에 따른 기동전류의 변화를 확인하기 위하여 각각의 모델에 대하여 기동 전류를 측정하였다. 그림 7은 기동전류 측정 실험 결과이다. 기본모델의 기동시 최대 전류는 2.74[A]이며 최적화 모델의 경우 기동시 최대 전류는 1.16[A]이다. 실험을 통하여 코깅토크가 감소됨에 따라 기동시 요구되는 전류 또한 줄어든 것을 확인 할 수 있다.

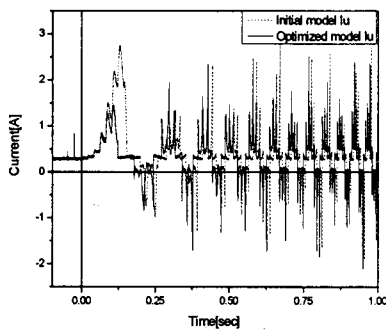


그림 7. 기동전류

2.2.4 진동 실험

토크 리플의 원인이 되는 코깅 토크의 저감에 따라 운전시 발생하는 진동 또한 저감된다. 코깅 토크 저감에 의한 진동저감 특성을 확인하기 위하여 본 논문에서는 기본 모델과 회전자에 노치를 설계한 최적화 모델을 다양한 속도에서 운전시켜 속도에 따른 진동을 측정하였다.

표 2는 속도에 따른 진동을 측정한 결과이다.

표 2. 속도에 따른 진동

Model	Total vibration(m/s ²)(×10 ⁻³)					
	1000 [rpm]	1500 [rpm]	2000 [rpm]	2500 [rpm]	3000 [rpm]	Mean
Innitial (A)	0.037	0.060	0.060	0.079	0.077	0.063
Optimized (B)	0.007	0.009	0.011	0.011	0.013	0.010
Ratio (b)/(A)*100[%]	18.74	14.97	19.38	14.91	17.55	16.88

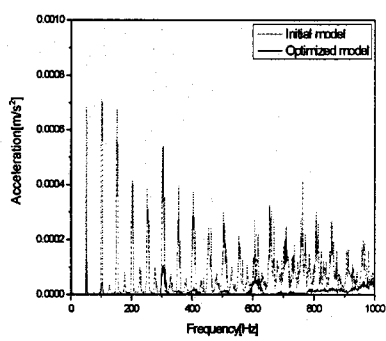


그림 8. 진동실험

각각의 속도에서 운전시 발생하는 진동의 양을 비교하기 위하여 1~1000[Hz]까지의 진동을 적분하여 전체 발생 진동을 비교하였다. 그 결과 정격속도인 3000[rpm]에서 최적화 모델의 진동은 기본모델의 17.55[%]로써 82.45[%]저감된 것을 확인 할 수 있다. 속도에 따라 발생하는 진동의 평균값은 최적화 모델의 진동이 기본모델에서 발생하는 진동의 16.88[%]로 83.12[%]줄어든 것을 알 수 있다. 그림 8은 3000[rpm]에서 발생하는 진동 측정 그래프이다. 최적화 모델에서 발생하는 진동이 기본 모델의 진동 보다 확연히 줄어든 것을 그림 8의 그래프에서 확인 할 수 있다.

2.2.5 효율 실험

토크리플 저감에 따른 효율 변화를 확인하기 위하여 기본 모델과 최적화 모델을 정격 속도인 3000[rpm]에서 정격부하 2.4[N·m]를 인가하고 입력과 출력을 측정하여 효율을 계산하였다. 모터의 입력은 PWM입력을 측정할 수 있는 Power analyzer를 사용하였고, 출력은 Dynamometer를 사용하여 측정하였다. 표 3은 입출력 실험 결과 및 효율을 나타낸다.

표 3. 입력, 출력 실험 결과 및 효율

Model	Speed [rpm]	Torque [N·m]	Input [W]	Output [W]	Efficiency [%]
Innitial	3025.3	2.4	842.8	760.5	90.23
Optimized	3013.9	2.4	827.40	757.65	91.57

실험 결과 최적화 모델의 효율이 기본 모델보다 1.34[%]크게 나타났다. 코깅 토크 및 진동의 감소율에 비하여 효율의 증가율이 적게 나타난 것은 로터에 노치를 설계함으로써 공극의 자속밀도가 낮아졌기 때문이다.

3. 결 론

본 논문에서는 수치해석 방법으로 IPM 모터의 회전자에 코깅 토크의 함수와 코깅토크를 상쇄하기 위한 노치 설계변수를 결정하고, 유한요소 해석을 이용하여 최적화 모델을 선정하였다. 그리고 실험을 통하여 코깅토크 저감 및 기동전류, 진동 그리고 효율 특성을 확인하였다. 실험결과 코깅토크 및 기동전류 그리고 진동이 현저하게 줄어들었으며 효율이 1[%]이상 증가 한 것을 확인하였다. 본 연구의 결과로 회전자에 노치를 설계한 최적화 모델은 코깅토크 및 진동이 저감되어 기기의 전반적인 운전 특성이 향상되었으므로 더욱 안정된 운전 및 적용이 가능함을 확인 할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, and Jung-Woo Park, "Improved Paramater Modeling of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Finitie Element Analysis", *IEEE Trans.onMagnetics*,vol.36.No.4,p.p.1867~1870,July,2000.
- [2] Chang Seop Koh, and Jin-Soo Seol, "New Cogging-Torque Reduction Method for Brushless Permanent-Magnet Motors", *IEEETrans.onMagnetics*,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", *IEE Trans. on Magnetics*, vol.42.No.11,pp.3706~3711,Nov. 2005.