

IPMSM의 정토크 특성 향상 및 가진력 최소화를 위한 회전자 형상 최적화

지승훈*, 박경원*, 장기봉*, 김규택*
창원대*

The Optimization of Rotor Shape for Constant Torque Improvement and Radial Magnetic Force Minimization

Seung-Hun Ji*, Kyoung-won Park*, Ki-Bong Jang*, Gyu-Tak Kim*
Changwon National University*

Abstract - 본 논문에서는 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 단점인 치, 슬롯 구조에 의한 코깅 토크를 최소화시켜 정토크 특성을 향상시키기 위해 배리어(Barrier)와 노치(Notch)를 설치하였다. 실험계획법 및 유한요소해석을 통하여 최적 설계를 수행하고 그에 따른 제반 특성과 진동 및 소음의 원인이 되는 가진력 특성을 고찰 하였다.

1. 서 론

IPMSM은 영구자석을 회전자 철심에 매입한 구조로 d축, q축 인덕턴스 차이에 의해 발생한 릴럭턴스 토크가 마그네틱 토크와 결합하여 단위 체적 당 발생하는 토크가 타 전동기에 비해 큰 장점이 있다[1]. 그러나 회전자 내부의 영구자석으로 인해 회전자 일정 부위에 자속이 집중되어 포화가 발생하고 높은 자속 밀도로 인하여 코깅 토크가 SPMSM(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor) 보다 크다는 단점이 있다. 이로 인하여 전동기 운전 시 진동과 소음이 크게 발생하게 되고 전동기의 구동 특성에 심각한 악영향을 미치게 된다[2]. 따라서 본 논문에서는 회전자에 배리어와 노치의 설치하여 코깅 토크 및 구동 토크 리플의 저감을 통한 전반적인 구동 특성을 향상하였고 이에 따른 가진력 특성을 고찰하였다.

2. 가진력 계산

2.1 설계 모델 및 제한

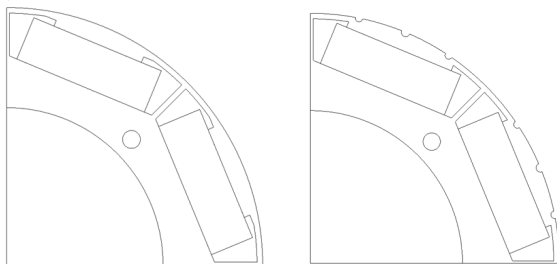
기본모델의 제한은 표 1에 요약하여 나타내었다. 정격 구동 시 토크를 유지하면서 코깅 토크를 저감 할 수 있는 회전자 형상 최적화를 수행하였다.

〈표 1〉 기본 모델 사양

Item	Specification
Rated Speed [rpm]	3000
Rated Torque [Nm]	2.035
Pole/Slot	8/12
Air-gap Length [mm]	1
Winding Type	Concentrated winding
Br [T]	1.3
Stack Length [mm]	45
Stator Diameter [mm]	83.6

2.2 형상 최적화

본 논문에서는 코깅 토크의 저감을 통한 정토크 특성의 향상을 위해 회전자에 실험계획법 및 유한요소해석을 통하여 배리어와 노치를 설치하였다.



(a) barrier Model (b) notch Model

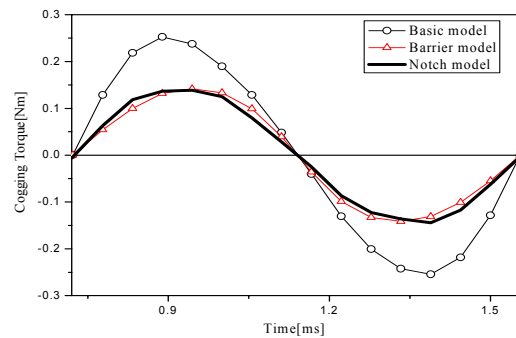
〈그림 1〉 해석 모델

그림 1은 배리어와 노치를 적용한 모델의 회전자 형상을 나타낸 것이다. 배리어 모델은 d축을 기준으로 q축의 영구자석 방향으로 갈수록 자속밀도가 작아지도록 만들어 줌으로써 영구자석에 의해 발생하는 자속량을 차등적으로 회전자 표면에 흐르게 하여 정현적인 분포를 유지시켜 코깅 토크를 저감하는 방법이다[3].

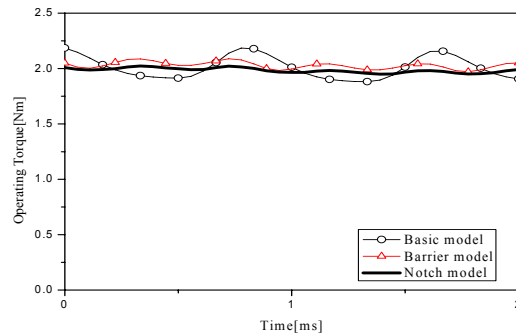
노치 모델은 공극의 자화분포에 의한 에너지 분포를 푸리에 급수 전개 방법으로 해석하여 코깅 토크를 상쇄할 수 있는 위치와 너비를 계산하여 적용되었다.

2.3 구동 특성 분석

그림 2는 기본모델과 배리어모델, 노치모델의 코깅 토크 및 발생 토크 특성을 나타내었다.



(a) cogging Torque



(b) operating Torque

〈그림 2〉 기본 구동 특성

〈표 2〉 성능 특성비교

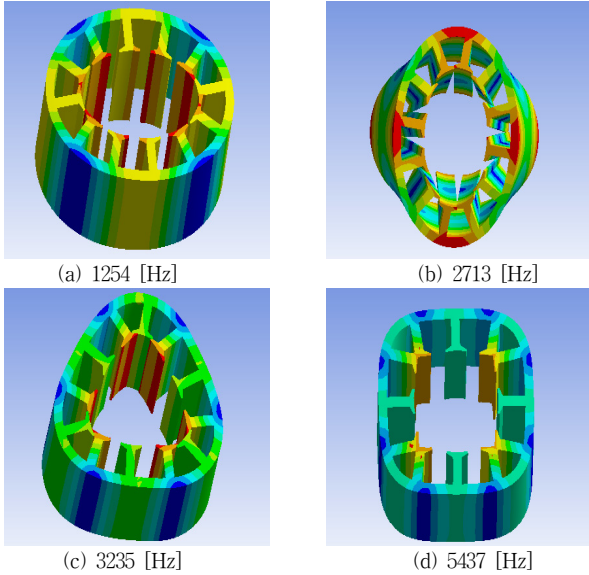
Item	기본모델	배리어 모델	노치 모델
Cogging torque[Nm]	0.25	0.142	0.139
THD[%]	15.4	10.9	11.6
Torque ripple[%]	18.1	5.6	3.7
Operating torque[Nm]	2.035	2.030	1.987

배리어를 적용한 결과 기본모델에 비해 코깅토크는 43.2%, 토크 리플은 69%, 구동 토크는 0.2% 저감 되었으며 노치를 적용한 결과 코깅 토크는 기본모델에 비해 44.4%, 토크 리플은 79.8%, 구동 토크는 2.4% 저감 되었다. 구동토크가 감소하였지만 코깅 토크와 토크 리플을 비교해 보았을 때 전동기의 전반적인 성능이 크게 향상되었음을 알 수 있다. 배리어와 노치를 같이 적용 할 경우에는 주 자속의 경로를 노치가 영향을

미처 구동 특성이 오히려 악화되는 것을 확인하였다.

2.4 고정자 고유진동수와 가진력 계산

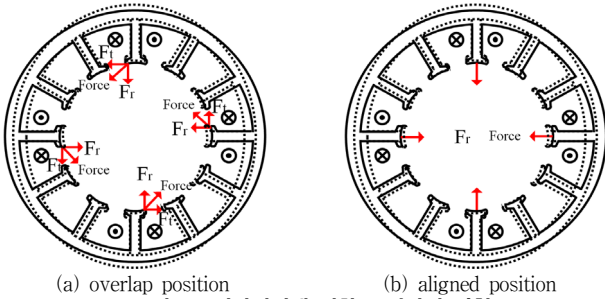
고정자의 고유 진동 주파수가 진동 및 공진에 지배적인 역할을 하므로 고정자의 모달 해석을 수행하였다. 고정자의 재질은 규소강판 (S60-50PN1650)로 mass density는 7850(kg/m³), Young's modulus은 200(Gpa), Poisson ratio는 0.24 로 각각 입력하였다.



〈그림 3〉 고유진동수에 대한 모드형상

그림 3은 모달 해석 결과를 나타낸다. 그림 3의 (a)와 (b)는 타원운동을 하는 모드로 다른 주파수의 모드에 비하여 진동 및 소음을 일으키는 주요 모드가 되므로 이 모드에서의 공진을 피해야 한다.

그림 4의 (a)는 한 상 여자 시 회전자 극이 고정자 극과 만나기 시작하는 위치에서 접선 성분과 반경방향 성분의 가진력으로 변형된 고정자를 나타내고 (b)는 두 극이 일치했을 때 반경방향 성분의 힘에 의한 변형 전후의 그림을 비교한 것이다. 그림 4의 (a)와 같이 회전자 극이 고정자 치의 끝단을 밀고 당기는 과정에서 그림 3의 (b)와 같은 뒤틀리는 모드가 발생한다. 그리고 그림 4의 (b)와 같은 힘이 고정자에 적용되어지면 그림 3의 (a), (c) 및 (d)와 같은 반경방향의 모드들이 발생한다.



〈그림 4〉 전자기력에 의한 고정자의 변형

2.5 가진력 분석

앞선 고유진동수 해석에서는 회전자의 영향을 고려하지 않았기 때문에 회전자의 변화에 따른 진동의 영향을 비교하기 어렵다. 그러므로 기본모델과 배리어모델, 노치모델이 공극 자속의 변화로 생기는 진동을 분석하기 위하여 가진력의 분포 및 양상을 비교하였다.

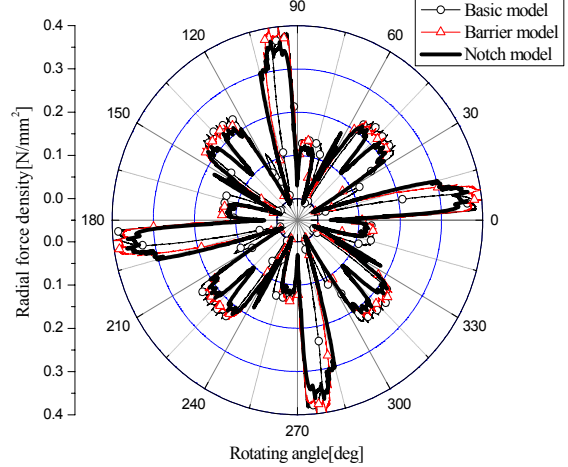
무부하시(Open-circuit)나 부하시(On-load)에 공극 자체로부터의 고정자 표면 반경방향 힘 밀도 분포는 전자기적 진동·소음의 주된 발생원이며, 수식 1과 같이 Maxwell's stress method로 계산 될 수 있다.

$$F_{rad}(\theta_s, t) = \frac{1}{2\mu_0} [B_r^2(\theta_s, t) - B_\theta^2(\theta_s, t)] \quad (1)$$

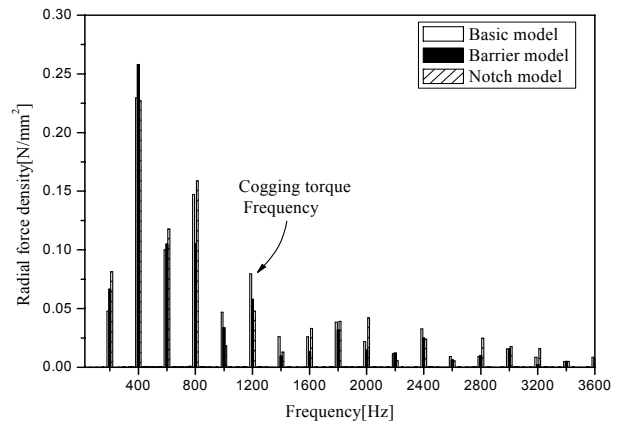
여기서, F_{rad} 는 힘 밀도의 반경방향 성분, B_r 과 B_θ 는 공극 자속 밀도의 반경방향과 접선방향 성분, μ_0 는 자유공간(free space)에서의 투자율, θ_s 는 각도에 따른 위치, t 는 시간이다.

그림 5는 각 모델의 가진력을 비교한 결과이다. 가진력의 크기는 공극 자속이 다소 감소하였으므로 노치 모델이 가장 작음을 알 수 있다.

그림 6은 가진력의 고조파 분석을 나타낸다. 결과와 같이 코깅 토크 주파수인 1200[Hz]에서 그 크기가 감소되고 있으며 이는 모달해석의 결과와 같이 고정자의 고유 진동수 1200[Hz]에서 코깅 토크와 공진할 것으로 예상 되므로 공진시 진동의 크기가 감소될 것으로 판단된다.



〈그림 5〉 Radial Magnetic Force



〈그림 6〉 Radial Magnetic Force의 고조파 분석

3. 결 론

본 논문에서는 IPMSM의 단점인 치, 슬롯 구조에 의한 코깅 토크를 최소화시키고 정토크 특성을 향상시키기 위해 실험계획법 및 유한요소 해석을 통하여 배리어 와 노치의 설계를 수행하고 그에 따른 제반 특성과 가진력 특성을 고찰 하였다. 배리어와 노치에 의한 코깅 토크 저감으로 토크 리플 역시 크게 저감 되었고 공진 모드의 기본파에 해당되는 1,200[Hz]대의 가진력 또한 감소 됨 으로 공진에 의한 진동도 저감 되리라 사료된다. 향후에는 본 논문에서 제시한 배리어 모델과 노치 모델의 영구자석 전동기를 제작하고 실험을 통해서 그 타당성을 확인하고자 한다.

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임

[참 고 문 헌]

[1]Gyu-Hong, Young-Dae Song, Gyu-Tak Kim and Jin-Hur, "The Novel Cogging Torque Reduction Method for Interior Type Permanent Magnet Motor", IEEE Trans. on AE, vol. 45, No 1, pp 161~167, 2009.
 [2]Jason D. Ede, Z. Q. Zhu, and D. Howe, "Rotor Resonances of High-Speed Permanent-Magnet Brushless Machine" IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 38, no. 6, Dec. 2002, pp. 967 - 972.
 [3]J.-Y. Lee, S.-H. Lee, G.-H. Lee, J.-P. Hong, and J. Hur, "Determination of arameters considering magnetic nonlinearity in an interior permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans. Magn., vol. 402, no. 4, Apr. 2006.