

코깅토크 및 토크리플 저감을 고려한 IPM 전동기 형상설계

김형규*, 이선권*, 강규홍*, 허진**
한국조선해양기자재연구원*, 울산대학교**

IPM motor shape design considering cogging torque and torque ripple

Hyung-Kyu Kim*, Sun-Kwon Lee*, Gyu-Hong Kang*, Jin Hur**
Korea Marine Equipment Research Institute*, Ulsan University**

Abstract - This paper deal with the shape design of the rotor and stator to maximize the torque density in Interior Permanent Magnet(IPM) Motor. We make various motor models to analyze torque density. Using the two-dimensional finite element method, these motor models are discussed under the same condition. As a result, we have found the better shape of model.

1. 서론

최근 에너지 소비량이 증가하면서 여러 산업 분야에서 기계적인 동력원에서 전기적 동력원으로 전환이 이루어지고 있다. 이러한 전기적 동력원인 전동기는 산업 전반적인 분야에서 각광받고 있다. 특히 영구자석을 이용한 전동기의 수요는 급증하고 있다. 영구자석을 사용한 전동기의 최대 장점은 유동기에 비해 동일 출력 대비 소형화를 시킬 수 있다는 것이다. 그 중 IPM(Interior Permanent Magnet) 전동기의 장점으로는 SPM(Surface Permanent Magnet) 전동기에 비해 높은 인덕턴스 값을 가지므로 약계자 운전 시 속도 영역이 넓고 d-q축 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크가 추가적으로 발생하므로 고효율, 고품질, 기계적, 열적 환경뿐만 아니라 전자기적 영향에 강건한 특성을 가지므로 고회전 압축기, 수송기기의 추진 시스템의 구동원 등 많은 연구 개발이 이루어지고 있다[1]. 이러한 장점에도 불구하고 IPM 전동기는 SPM 전동기에 비해 매우 큰 코깅토크와 토크 리플을 발생하므로 IPM 전동기의 코깅토크 및 토크리플 저감이 중요한 요소가 된다. IPM 전동기의 전자기적 가진원으로는 회전자 편심에 의한 normal force의 불균일, 축방향 편심에 의한 축방향 추력 변동, 구동방식에 따른 commutation 토크리플과 코깅토크로 대별되어진다[2][3]. 특히 IPM 전동기는 기계적 공극과 자기적 공극의 길이가 동일하므로 높은 공극자속밀도를 확보할 수 있어 고회전화는 가능하지만 상대적으로 매우 높은 코깅토크를 발생하므로 진동저감을 위해서 코깅토크의 저감은 매우 중요한 연구과제이다. 코깅 토크를 저감하기 위해서는 다양한 방법으로 접근이 가능하며 그중 하나가 형상설계를 통한 방법이다. 전동기의 회전자 및 고정자에서 다양한 요소의 변화를 줌으로써 코깅토크 및 토크리플 저감을 이끌어 낼 수 있다.

따라서 본 논문에서는 8극 12슬롯 IPM 전동기의 코깅토크 및 토크리플을 최소화 하기 위하여 회전자 및 고정자의 형상설계를 수행하였다. 코깅토크 및 토크리플 해석은 유한요소법(FEM)을 통하여 결과를 비교 분석하였다.

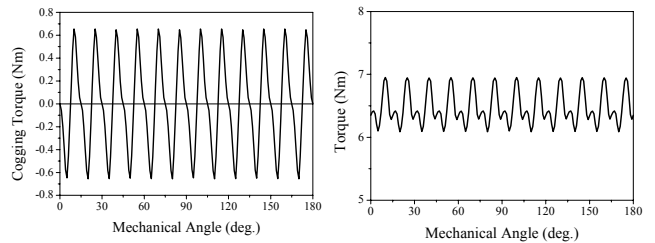
2. 코깅토크 및 토크리플 저감을 위한 회전자 및 고정자 형상설계

IPM전동기의 코깅토크 및 토크리플 저감하기 전 초기 모델에 대한 파라미터를 표1에서 나타내었다. 그리고 초기 모델에 대한 코깅토크 및 토크를 그림 1에서 나타내고 있다. 해석결과 초기모델의 코깅토크는 pk2pk 기준으로 1.31Nm이며 약 13.3%의 토크 리플이 발생함을 알 수 있다. 코깅토크는 기존 토크의 비례 약 20%이므로 가진력의 원인이 되는 코깅토크 및 토크리플의 저감에 대한 형상 설계가 요구되어진다. 회전자에는 공극자속밀도 및 유기전압의 정현화를 위해 아크형상 적용하였고, 고정자 내경은 치 중심 대비 slot open부위에서 공극이 증가하도록 설계하였다. 또한, slot open 치수를 코깅토크와 토크리플이 유사수준의 balancing이 될수 있도록 치수를 산정하였다.

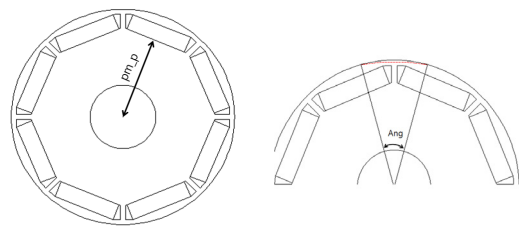
그림 2와 3에서는 코깅토크 및 토크리플 저감을 위한 회전자와 고정자의 형상 설계 변수를 나타내고 있다. 회전자의 형상 설계 변수는 자석의 위치를 나타내는 pm_p와 회전자 core부분에 아크형상을 주기 위해 나타내는 Ang로 나누었다. 고정자 모델에서는 고정자 shoe부분의 끝점의 x성분과 y성분을 나누어 P_x, P_y 정의하여 변수를 선정하였다. 회전자와 고정자의 각 변수에 따른 모델들의 수치를 표 2에 나타내고 있다.

〈표 1〉 초기모델의 파라미터

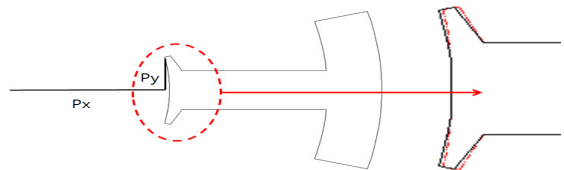
항목	값	항목	값
극수	8	고정자 외경	Φ140
슬롯 수	12	회전자 외경	Φ68
잔류자속밀도	1.28[T]	권선 수(상당)	164
자석 사이즈	5*19*54	도체직경	Φ1.4



〈그림 1〉 초기모델 코깅토크 및 토크



〈그림 2〉 회전자 형상 설계 변수



〈그림 3〉 고정자 형상 설계 변수

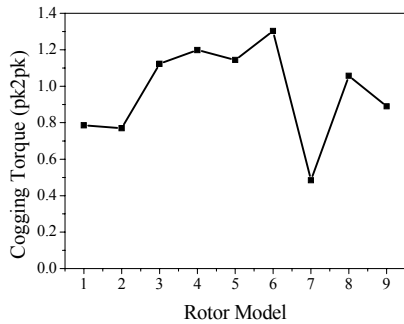
〈표 2〉 회전자 및 고정자 형상 모델

회전자 모델	변수		고정자 모델	변수	
	Ang	pm_p		P _x	P _y
1	31	26.2	1	31	26.2
2	21	26.2	2	21	26.2
3	31	26.4	3	31	26.4
4	21	26.4	4	21	26.4
5	33	26.3	5	33	26.3
6	19	26.3	6	19	26.3
7	26	26.1	7	26	26.1
8	26	26.4	8	26	26.4
9	26	26.3	9	26	26.3

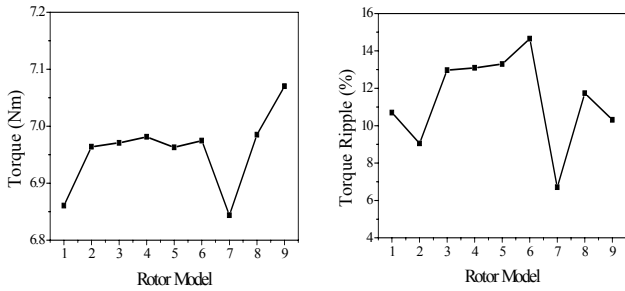
3. 시뮬레이션 해석 결과 및 분석

그림 4에서는 회전자 변수에 대한 각 모델의 코깅토크를 나타내고 있다. 코깅토크는 모델 7에서 가장 낮은 것을 확인할 수 있으며 초기모델의 코깅토크에 비해 70% 정도 감소하게 된다. 그림 5에서는 회전자 변수에 대한 각 모델의 토크 및 토크 리플을 나타내고 있다. 토크가 가장 증가하는 모델은 회전자 모델 9이지만 토크리플은 회전자 모델7에서 가장 낮게 나오는 것을 확인할 수 있다. 코깅토크, 토크 그리고 토크 리플을 모두 고려하면 회전자 모델 7이 코깅토크 및 토크리플 저감에 있어 좋은 모델이다. 고정자 모델의 시뮬레이션에서는 회전자 부분은 위의 결과를 적용한 회전자 모델 7을 적용하여 해석을 실시하였다.

그림 6과 7에서는 고정자 설계 변수에 대한 각 모델들의 코깅토크와 토크 및 토크리플을 나타내고 있다. 코깅토크는 고정자 모델 3에서 가장 낮게 나타나지만 토크 리플의 경우는 고정자 모델2에서 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 코깅토크의 경우는 초기모델의 코깅토크에 비해 모든 모델들이 많이 저감되기 때문에 토크리플이 가장 낮은 고정자 모델2를 선정하였다.

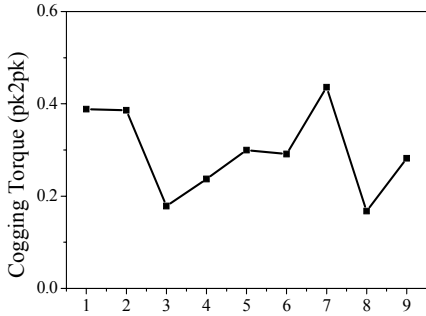


〈그림 4〉 회전자 형상 설계 변수에 따른 코깅토크

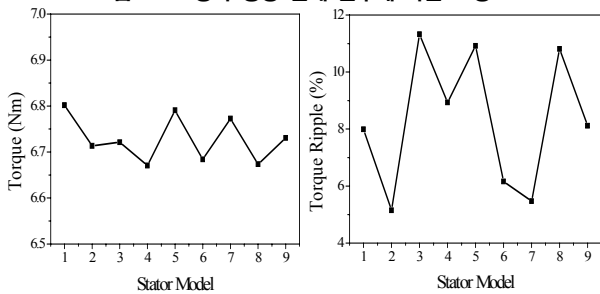


(a) 평균 토크 (b) 토크 리플

〈그림 5〉 회전자 형상 설계 변수에 따른 평균 토크 및 토크 리플



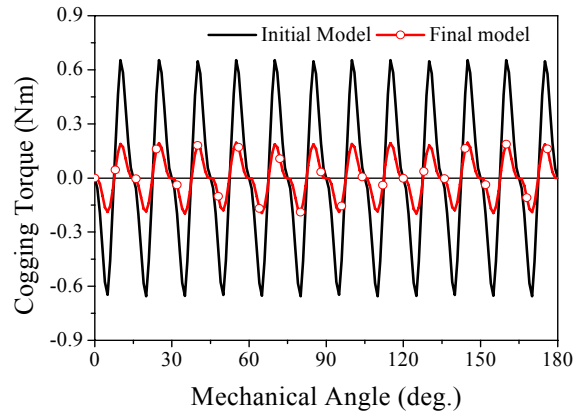
〈그림 6〉 고정자 형상 설계 변수에 따른 코깅토크



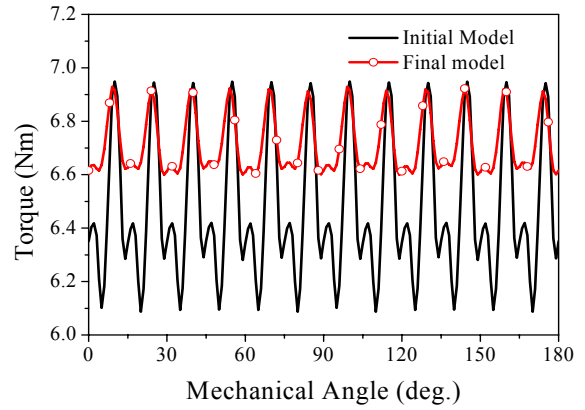
(a) 평균 토크 (b) 토크 리플

〈그림 7〉 고정자 형상 설계 변수에 따른 평균 토크 및 토크 리플

그림 8에서는 초기모델과 회전자와 고정자 형상설계에서 찾은 최종 모델의 코깅토크 및 토크를 나타내고 있다. 최종모델은 초기모델에 비해 코깅토크가 71%가 저감되었고 토크리플은 약 60% 저감되었다. 이러한 이유는 회전자와 고정자 형상변화에 의해 비대칭 공극의 형상이 발생되어 치 끝단부분의 자속밀도를 낮춰주는 효과로 인해 코깅토크 및 토크 리플 저감을 얻을 수 있다.



(a) 코깅토크



(b) 토크

〈그림 8〉 초기모델과 최종모델의 코깅토크 및 토크 비교

3. 결 론

본 논문은 IPM전동기의 코깅토크 및 토크리플 저감을 위한 회전자 및 고정자 형상설계를 수행하였다. 회전자에는 공극자속밀도 및 유기전압의 정현화를 위해 아크 형상적용하였고, 고정자 내경은 치 중심 대비 slot open부위에서 공극이 증가하도록 설계하였다. 또한, slot open 치수를 코깅토크와 토크리플이 유사수준의 balancing이 될수 있도록 치수를 산정하였다. 결론적으로 형상설계를 통하여 IPM전동기의 코깅토크 및 토크리플이 초기모델에 비해 매우 향상된 특성을 이끌어 낼 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jin Hur, "Characteristic Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor in Electro-Hydraulic Power Steering System", IEEE Trans. on. IE, vol. 55, No 6, pp 2316~2322, 2008
- [2] Gyu-Hong Kang, Young-Dae Song, Gyu-Tak Kim and Jin-Hur, "The Novel Cogging Torque Reduction Method for Interior Typ Permanent Magnet Motor", IEEE Trans. on. AE, vol. 45, No 1, pp 161~167, 2009
- [3] A. Kisoumarsi, M. Moalle, and B. Fashimi, "Midigation of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motors by Optical Shape Design", IEEE Trans. on magnetics, vol. 42, NO. 11, pp. 3706~3711, 2005.