

Radial Flux Density를 고려한 매입형 영구자석 동기전동기 코깅토크 저감 방법

박경수*, 이진환*, 한원석*, 김용재**, 정상용*
 성균관대학교*, 조선대학교**

A Cogging Torque Reduction Method for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Radial Flux Density

Kyung-Soo Park*, Jin hwan Lee, Wonseok Han, Yong-Jae Kim**, Sang-Yong Jung*
 Sungkyunkwan University*, Chosun University**

Abstract - 본 논문에서는 Radial flux density(B_r)를 고려하여 매입형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)에서 진동, 소음 발생의 원인이 되는 코깅토크를 최적화하는 방법을 제시한다. Maxwell Stress Method에 의하면 토크는 B_r 에 비례한다. 따라서 B_r 과 토크의 상관관계를 이용하여 코깅토크를 저감시켰다. 코깅토크가 가장 큰 회전자 위치에서 회전자 표면의 B_r 을 확인한 후에 노치(Notch)를 적용할 위치를 선정하였다. 그리고 제안한 방법이 매입형 영구자석 동기 전동기 모델에서 효과적으로 코깅토크를 저감시키는 것을 유한요소법을 통해 검증하였다.

요소(element)에서 토크를 구하는 방법은 크게 Lorentz Force Law, Maxwell Stress Method, Virtual Work Method이 있으며 위 3가지 방법 모두다 물체의 total force를 구할 수 있다. 요소에서 Lorentz Force Law는 다음과 같이 정의된다.

$$d\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (N/m^2) \quad (2)$$

$d\vec{F}$ 는 요소에서 단위 면적당 힘의 크기, \vec{J} 는 전류 밀도, \vec{B} 는 자속밀도를 의미한다. Maxwell Stress Method는 Lorentz Force Law에서 얻을 수 있으며 요소에서 힘의 밀도는 아래와 같이 유도된다.[4]

$$\vec{p}_0 = \frac{B_r B_\theta}{\mu_0} \quad (N/m^3) \quad (3)$$

$$\vec{p}_r = \frac{B_r^2 - B_\theta^2}{2\mu_0} \quad (N/m^3) \quad (4)$$

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기는 구조적으로 영구자석을 회전자 철심에 매입하여 d축, q축 릴럭턴스 차이에 의해 릴럭턴스 토크가 발생한다. 따라서 전자기적 토크뿐만 아니라 회전자 릴럭턴스 토크를 이용할 수 있어 고휘력의 장점이 있다. 하지만 일반적으로 IPMSM은 d, q축 릴럭턴스 차이 때문에 표면부착형 영구자석 동기전동기(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM)와 비교하여 큰 코깅토크와 토크 리플이 발생한다.[1] 코깅토크는 영구자석 모터의 구조적인 특징에 의해 발생하는데 회전자의 자석과 고정자 슬롯의 릴럭턴스 차에 의한 코깅토크를 가진다. 코깅토크는 모터의 소음 및 진동의 원인으로 모터의 성능 향상 및 안전성을 위해 코깅토크 저감이 필수적이다.[2]

코깅토크를 저감하는 방법은 다방면으로 연구되어 왔는데 스큐(skew), 극/슬롯 비, 회전자 및 고정자 형상변화 등이 있다. 앞에서 2가지 방법은 코깅토크를 줄여주지만 설계와 제작과정에서 다양한 제약이 있다. 스큐를 적용하는 방법은 제작과정에서 비용이 상승하는 단점이 있고 극/슬롯 조합을 변경하는 방법은 설계상 제한적인 경우가 많다. 이에 반해 회전자 및 고정자의 형상변화는 비교적 제작이 용이하여 간단히 코깅토크를 저감할 수 있다. 회전자 및 고정자의 형상을 변형하면 공극이 변하여 공극자속밀도가 바뀐다. 이는 자계에너지의 변환을 의미하고 코깅토크를 감소시킬 수 있다.[2]

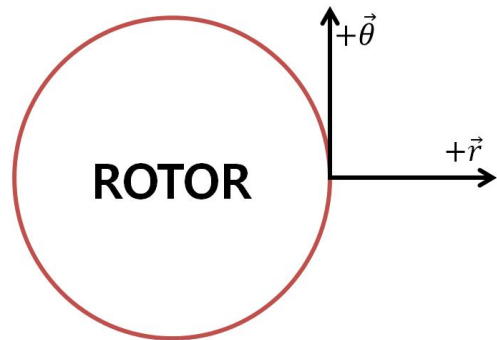
본 논문에서는 공극에서 radial flux density(B_r)를 저감시켜 IPMSM의 코깅토크를 최적화하는 방법을 제시한다. Maxwell Stress Method에 의하면 토크는 radial flux density(B_r)에 비례한다. 따라서 코깅토크와 B_r 의 상관관계를 이용하여 최적설계를 진행한다. 코깅토크가 가장 큰 지점에서 B_r 을 감소시켜야 할 회전자 부분에 자석의 중심축을 대칭으로 노치를 적용하여 공극의 B_r 을 감소시켰다. 이 방법이 일반적으로 IPMSM 모델에 효과가 있음을 검증하기 위해서 2개의 다른 IPMSM 모델에 이 방법을 적용하였다. 용량, 극/슬롯, 크기, 재질 등이 다른 모델에서 기본모델과 노치를 적용한 모델의 B_r 변화를 확인하였으며 코깅토크의 저감여부를 유한요소법을 통해 유효성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 코깅토크 산정법

영구자석 전동기는 무부하시 회전자의 자석과 고정자 슬롯 구조간의 자기저항 차에 의해 에너지가 변화한다. 코깅토크는 자석의 중심축이 치의 중심축 및 슬롯의 중심축과 일치할 때는 발생하지 않지만, 그 외의 경우에는 자석이 불균형을 이룰 때 발생한다. 이와 같이 코깅토크는 자석과 슬롯 간의 관계에 의해 결정되므로 다음과 같은 주기성을 지닌다.[3]

$$K = \frac{360^\circ}{LCM(\text{pole}, \text{slot})} \quad [\text{Mechanical Angle}] \quad (1)$$



<그림 1> 원통좌표계에서 힘의 방향

공극에 위치한 요소에서 \vec{p}_0 는 회전 방향(θ), \vec{p}_r 은 방사 방향(r)으로 힘의 밀도를 의미한다. 마찬가지로 B_θ 는 회전방향으로 자속 밀도, B_r 은 방사방향으로 자속 밀도이고 μ_0 는 공기에서 투자율이다.

마지막으로 Virtual Work Method는 에너지의 변화를 이용한다. 모터 내의 에너지 변화 중 철심의 에너지는 높은 자기 투자율로 무시할 수 있다.[4] 또한 영구자석에서 에너지 변화율도 공극에 비하면 무시할 만하다. 따라서 요소에서 토크는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{T}(\theta) = - \frac{\partial W_g(\theta)}{\partial \theta} \quad (Nm) \quad (5)$$

여기서 θ 는 철심에 관한 영구자석의 변위이고 $W_g(\theta)$ 는 공극에 저장된 자계에너지이다.[5]

2.2 코깅토크 저감 매커니즘

Maxwell Stress Method에서 (3)을 살펴보면 회전 방향(θ)으로 힘의 밀도는 공극의 radial flux density(B_r)에 비례한다. 따라서 토크는 B_r 에 비례하고 $\pm\theta$ 방향으로 코깅토크의 최대지점에서 공극의 B_r 을 줄이면 코깅토크를 줄일 수 있다. $+\theta$ 방향으로 코깅토크가 가장 큰 회전자 위치에서 전기각 한 주기 만큼 공극의 B_r 을 살펴본다. 그 다음에 $+\theta$ 방향으로

로 B_r 이 최대인 지점과 맞닿은 회전자 부분에 자석의 중심축을 대칭으로 노치를 적용하여 공극의 B_r 을 감소시킨다. 노치를 대칭적으로 적용하는 이유는 비대칭 구조의 노치는 오히려 톨렉턴스를 증가시켜 코깅토크가 노치를 적용하기 전보다 커지기 때문이다. 반대로 $-\theta$ 방향으로 코깅토크가 최대인 회전자 위치에서 동일한 방법으로 $-r$ 방향의 B_r 최대치를 감소시키는 위치에 노치를 적용한다.

2.2.1 해석모델

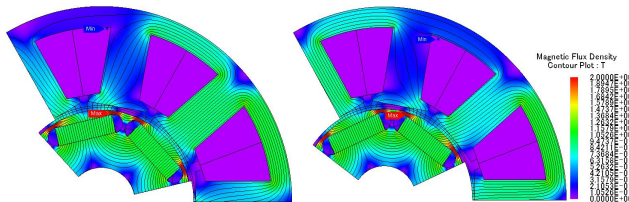
본 논문에서 제시한 방법이 일반적으로 IPMSM 모델에서 효과가 있음을 검증하기 위하여 2개의 다른 IPMSM 모델에 위 방법을 적용하였다. 아래 표1은 용량, 극/슬롯, 크기, 재질 등이 다른 2개의 모델제원을 나타낸다.

〈표 1〉 500W, 1.2KW급 IPMSM 모델제원

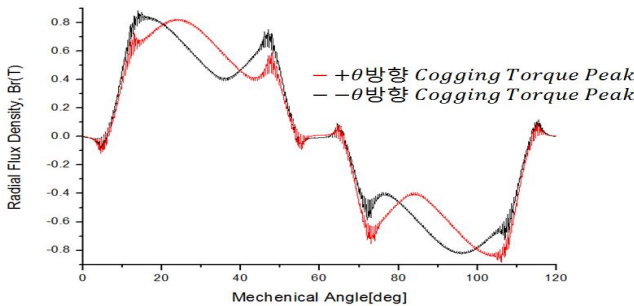
항목		사양	
모터 형상	용량	500W	800W
	분류	IPMSM	
	극/슬롯	6극/9슬롯	8극/12슬롯
	외경	85mm	180mm
	내경	15mm	60mm
재질	Magnet	NEOMAX-35H	N39UH
	속도	1300rpm	2000rpm
운전점	토크	3.67Nm	3.82Nm
	속도	1300rpm	2000rpm

2.2.2 코깅토크 최적화

500W급 모델, 6극 9슬롯의 경우, (1)에 의하면 코깅토크는 기계각 20°, 전기각 60° 마다 주기를 갖는다. 그림2은 한 주기 동안 코깅토크가 $\pm\theta$ 방향으로 최고지점에서 회전자의 위치와 B_r 의 분포를 보여준다.



〈그림 2〉 500W급 모델형상, 회전자 위치 및 B_r 분포

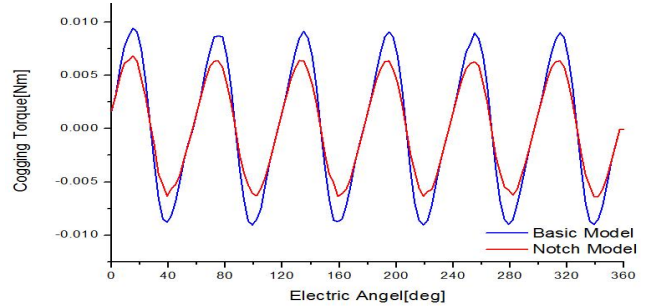


〈그림 3〉 500W급 모델, $\pm\theta$ 방향 코깅토크 최대지에서 공극의 B_r 분포

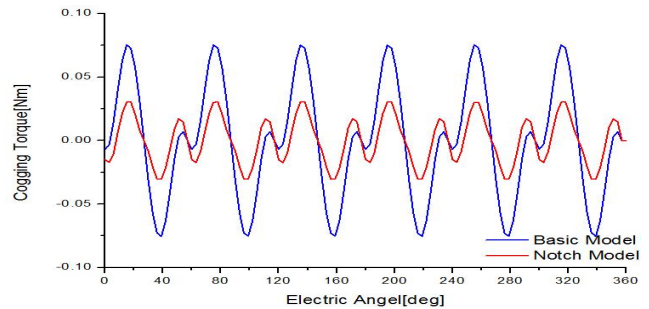
그림2의 회전자 위치에서 전기각 한 주기 동안 공극의 B_r 의 분포를 그래프로 나타내면 그림3과 같다. 코깅토크가 $+\theta$ 방향으로 최대지에서 공극의 B_r 이 $+r$ 방향으로 최대치인 회전자의 위치는 24°, 코깅토크가 $-\theta$ 방향으로 최대지에서 공극의 B_r 이 $-r$ 방향으로 최대치인 회전자의 위치는 96°이다. 따라서 자석의 중심(30°, 90°, ... 330°)을 대칭으로 적용하던 자석의 중심축에서 6°떨어진 부분에 직경 1mm의 노치를 적용하였다. 마찬가지로 800W에서도 동일한 방식으로 최적화를 진행하였다. 그 결과, 자석의 중심축에서 4.5°떨어진 부분에 직경 2mm의 노치를 적용하였다.

2.3 유한요소 해석 결과

유한요소 해석을 통해서 B_r 및 코깅토크 도출하였다. 500W급 IPMSM 기본모델과 노치를 적용한 모델의 코깅토크를 비교하여 그림4에 나타내었다. 마찬가지로 800W급 모델에서도 동일한 방법으로 검증하였고 그림5에서 효과가 있음을 확인할 수 있다.



〈그림 4〉 500W급 모델, 기본모델과 노치모델의 코깅토크



〈그림 5〉 800W급 모델, 기본모델과 노치모델의 코깅토크

〈표 2〉 모델별 B_r 및 코깅토크 저감율

구분	사양			
	500W		800W	
	기본 모델	노치 모델	기본 모델	노치 모델
코깅토크(mNm_{pk-pk})	18.19	12.61	150.50	60.60
저감율	31%		60%	

500W급, 800W급 2개의 모델에서 모두 효과가 나타난 것을 표2을 통해 확인할 수 있다. 500W급에서 코깅토크는 기준보다 31% 저감되었고 800W급에서 코깅토크는 기본모델보다 60% 감소하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 IPMSM의 공극에서 radial flux density(B_r)를 저감시켜 코깅토크를 최적화하는 방법을 소개했다. Maxwell Stress Method에서 토크는 공극에서 B_r 에 비례한다. B_r 과 토크의 상관관계를 이용하여 코깅토크를 저감하였고 이를 2가지 IPMSM 모델에서 증명하였다. 코깅토크가 $\pm\theta$ 방향으로 최대값을 갖는 회전자의 위치에서 전기각 한 주기 동안 공극에서 B_r 을 살펴보았다. 그 다음에 B_r 이 가장 큰 요소와 맞닿은 회전자코어에 자석의 중심축을 대칭으로 노치를 적용하였다. 그 결과, 기본모델보다 공극에서 B_r 이 감소하였고 코깅토크가 저감되는 것을 확인하였다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] 이광현, 류진욱, 허진, “공극 자속밀도의 공간 고조파 유입 방법을 통한 IPM type BLDC Motor의 성능개선”, 전기학회논문지, vol. 50, no. 4 pp. 739-745, 2011
- [2] 김희운, 배종준, 장재덕, 주인식, “전기자동차 냉각 장치용 Compressor 모터의 코깅토크 저감 방안”, 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회, pp. 1367-1370, 2012
- [3] 김창기, 이상근, 정상용, “코깅토크를 고려한 자동차 EPS용 전동기 설계”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 9-11, 2009
- [4] S.J.Salon, “Finite element analysis of electrical machines”, pp. 97-123, 1995
- [5] Chang Seop Koh, Jin-Soo Seol “New Cogging-Torque Reduction Method for Brushless Permanent-Magnet Motor”, IEEE Trans. Magn., vol. 39, no. 6, 2003