

회전자 편심과 ICF을 통한 IPMSM의 토크리플 저감 설계

조민복, 정영훈, 손동균, 홍정표
한양대학교 미래자동차공학과

Design of IPMSM to Reduce Torque Ripple through Rotor Eccentricity and ICF

Min-Bok Cho, Young-Hoon Jung, Dong-Kyun Son, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - 최근 여러 분야에서 많이 사용되는 IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)은 마그네틱 토크뿐만 아니라 d축과 q축의 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크를 이용하기에 출력 밀도가 높지만 릴럭턴스 토크로 인해 다른 모터에 비해 토크리플이 크다는 단점이 있다. 토크리플은 모터의 진동, 소음에 영향을 미치기에 저감할 필요가 있다. 본 논문에서는 8극 48슬롯 IPMSM 모델의 회전자에 편심과 ICF(Inverse Cosine Function)를 적용하고, 각각의 토크리플을 유한요소해석법을 통해 비교, 분석하였다.

1. 서 론

영구자석이 회전자에 매입되어 있는 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)은 SPMSM(Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous motor)보다 구조적으로 강건하며 등가 공극길이가 작다는 장점이 있다. 또한 d축과 q축의 인덕턴스가 달라 마그네틱 토크뿐만 아니라 릴럭턴스 토크도 이용할 수 있어 출력 밀도가 SPMSM에 비해 크다. 하지만 이러한 릴럭턴스 토크로 인해 토크리플이 커지게 되는데 이러한 토크리플은 모터의 진동, 소음에 영향을 미치기 때문에 저감할 필요가 있다.

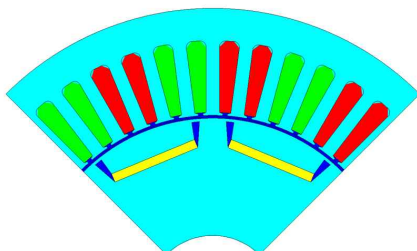
본 논문은 IPMSM의 회전자 형상 변화를 통해 토크리플을 저감하는 방법을 제시한다. 대상 8극 48슬롯 IPMSM 모델, 회전자 편심(Eccentricity)과 ICF(Inverse Cosine Function)를 적용한 모델 각각의 토크리플을 비교, 분석한다.

2. 본 론

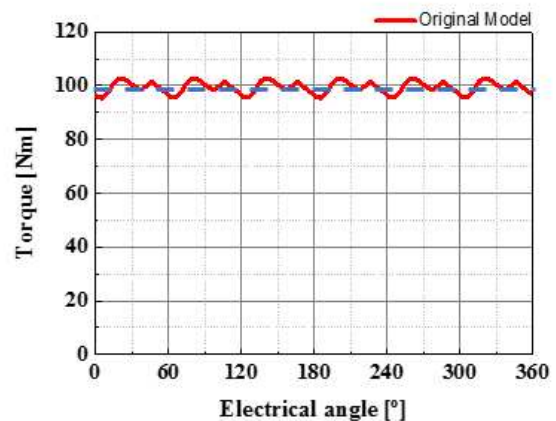
2.1 대상 모델

본 논문의 대상 모델은 <그림 1>의 8극 48슬롯 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motors)이다.

대상 모델은 유한요소해석 결과 <그림 2>와 같이 평균 토크 100[Nm], 토크리플 6.93[%]로 나타났다.



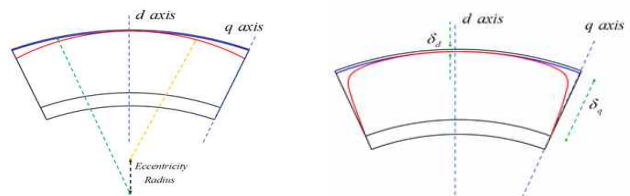
<그림 1> 대상 모델



<그림 2> 대상 모델의 토크

2.2 토크리플 저감 설계

<그림 3>과 같이 회전자 편심(Eccentricity)과 ICF(Inverse Cosine Function)를 적용하면 공극 자속밀도를 정현적으로 만들어 토크리플을 저감할 수 있다.



<그림 3> 회전자 편심(좌), ICF(우)

2.2.1 회전자 편심

회전자 편심이란 무부하시 공극 자속밀도를 정현적으로 만들기 위해 <그림 3>의 왼쪽 그림과 같이 d축 공극길이(δ_d)와 q축 공극길이(δ_q)를 다르게 하는 방법이다. 그러기 위해 회전자 외경의 원점과 고정자 외경의 원점을 다르게 한다.

2.2.2 ICF (Inverse Cosine Function)

ICF란 무부하시 공극 자속밀도를 정현적으로 만들기 위한 공극길이의 산정 방법이다. 이때 철심의 투자율은 무한하며 고정자, 회전자의 치·슬롯 구조가 없는 평활 철심이라 가정한다.

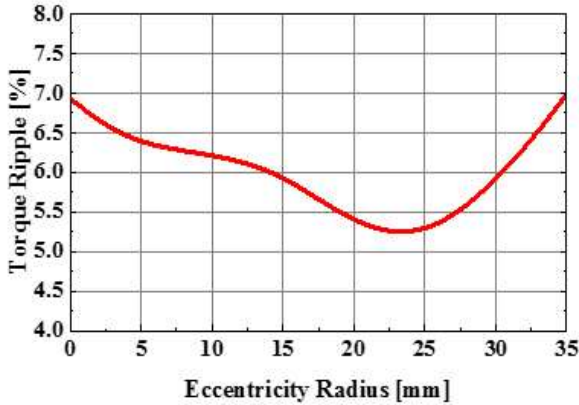
영구자석과 공극에 가우스 법칙을 적용하면 수식 (1)에서 볼 수 있듯이 θ 에 따른 공극길이는 d축 공극길이와 Inverse Cosine의 곱으로 표현된다. 이 때, θ 는 d축을 기준으로 해 q축에서는 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 이다.

$$\delta(\theta) = \frac{\mu_0 F_m}{B_{max} \cos \theta} = \frac{\delta_d}{\cos \theta} \quad (\delta_d = \frac{\mu_0 F_m}{B_{max}}) \quad (1)$$

2.3 회전자 편심과 ICF에 따른 토크리플 비교

2.3.1 회전자 편심 적용 모델

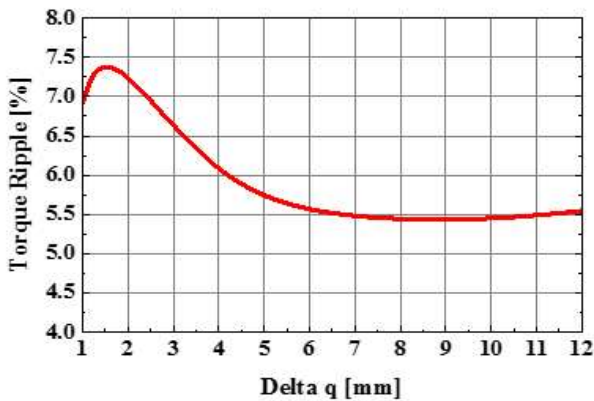
편심량을 기존 모델에서부터 회전자 반경의 약 30[%]까지 늘려가며 토크리플을 분석했다. <그림 4>에서 볼 수 있듯이 편심량이 커질수록 토크리플이 감소하다가 25[mm]의 편심량에서부터 다시 증가하기 시작한다.



<그림 4> 편심량에 따른 토크리플

2.3.2 ICF 적용 모델

이상적인 ICF는 수식 (1)에서 볼 수 있듯이 q 축 공극길이(δ_q)가 무한대가 되어야 하지만, 실제 전동기에서 δ_q 를 무한히 키우기엔 설계상의 제약이 있다. δ_q 에 따른 유한요소해석 결과 <그림 5>의 경향성을 확인할 수 있다.

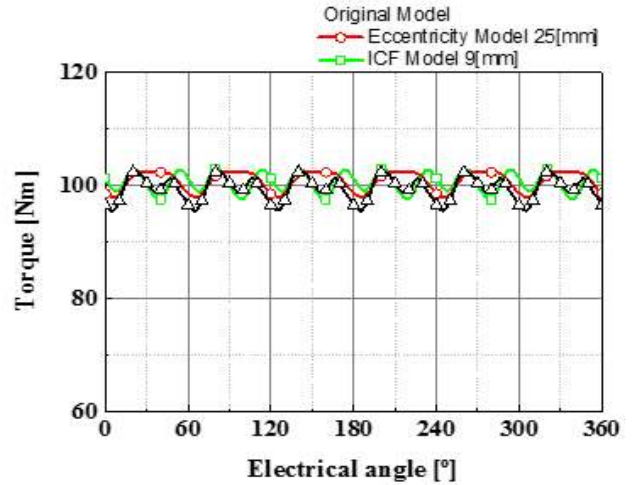


<그림 5> q 축 공극길이에 따른 토크리플

2.3.3 유한요소해석 결과 분석

토크리플을 가장 많이 저감할 수 있는 모델은 각각 편심량 25[mm], q 축 공극 길이(δ_q) 9[mm]의 ICF 모델이다. <그림 6>에서 볼 수 있듯이 IPMSM의 경우 편심이 ICF보다 더 큰 토크리플 저감 효과를 지닌다.

하지만 <표 1>에서 알 수 있듯이 토크리플을 줄이게 되면 평균토크 100 [Nm]를 만족하기 위해 필요한 전류가 늘어나 설계시 전류 제한에 맞춰 적절한 편심량 또는 ICF를 적용해야 한다.



<그림 6> 각 모델의 토크 특성

<표 1> 각 모델의 토크리플과 전류

	토크 [Nm]	토크리플 [%]	전류 [A_{rms}]
기존 대상 모델	100	6.93	77.48
편심 25[mm] 모델		4.41	105.74
ICF 9[mm] 모델		5.42	101.3

3. 결 론

본 논문에서 기존의 8극 48슬롯 IPMSM 전동기의 토크리플을 저감하기 위해 회전자에 편심, ICF를 적용해 분석하였다. 회전자 편심의 경우 편심량을 25[mm]로, ICF의 경우 q 축 공극길이(δ_q)를 9[mm]로 설계했을 때 토크리플이 가장 작음을 확인하였다. 편심량 25[mm] 모델의 경우 토크리플 4.41[%], 공극길이 9[mm]의 ICF 모델의 경우 5.42[%]로 기존의 6.93[%]보다 저감할 수 있었다. 또한 위의 결과로 확인해볼 때, 대상 모델의 경우 편심이 ICF보다 토크리플 저감에 더 효과적임을 확인하였다.

하지만 토크리플을 저감할수록 평균토크를 만족시키기 위해 필요한 전류가 커져 대상 모델의 전류 제한을 고려한 설계가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] Y. H. Jung, M. S. Lim, M. H. Yoon, J. S. Jeong, and J. P. Hong, "Torque Ripple Reduction of IPMSM Applying Asymmetric Rotor Shape under Certain Load Condition," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 33, no. 1, pp. 333 - 340, 2018.
- [2] S. A. Evans, "Salient pole shoe shapes of interior permanent magnet synchronous machines," 19th Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2010, no. 1, pp. 1 - 6, 2010.