

IPM type 전동기의 진동 저감 방안에 대한 연구 (II)

이경득, 이원식, 김규탁
창원대학교

The Study of Vibration Reduction for IPM Type Motor (II)

Gyeong-Deuk Lee, Won-Sik Lee, Gyu-Tak Kim
ChangWon National University

Abstract - 본 논문에서는 IPM type BLDC 전동기의 진동 저감 방안에 대해서 연구하였다. 전자기적 진동 발생원 중 주된 요인이 되는 코깅 토크와 반경방향 힘의 불평형에 대해서 노치를 설치하여 코깅토크를 최소화한 모델과 반경방향의 힘인 가진력을 평형화한 모델의 설계를 수행하였다. 각 모델에 대한 주파수별 진동원을 분석하고 진동 실험의 결과와 비교하여 분석하여 그 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

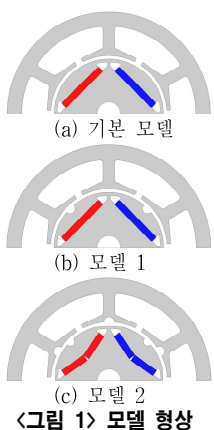
Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM)은 영구자석을 회전자 철심에 매입하여 기계적으로 강인한 회전자 구조이지만 회전자 철심에 국부적인 자속 포화 현상이 발생하고 유효 공극이 작아 큰 자속 밀도로 인하여 코깅 토크가 SPMSM보다 크다는 단점이 있다. 이로 인하여 전동기 운전 시 진동이 크게 발생한다[1]. 전동기의 진동원은 전동기의 고정자 또는 회전자에 작용하는 반경방향의 힘인 가진력의 불평형과 코깅토크이다. 특히, 가진력 및 코깅토크의 주파수가 전동기의 고유 진동수(natural frequency)와 동일 영역에 있으면 공진(resonance)하게 되어 부품의 마모와 전동기의 구동 성능의 저하뿐만 아니라 다른 시스템에 영향을 미치게 된다[2].

본 논문에서는 진동의 발생원에 대한 연구를 수행하였다. 기본 모델 회전자의 노치를 설치하여 코깅토크를 저감한 모델 1과 BLDC 구동시에 크게 나타나는 불평형한 가진력에 의한 진동을 저감시키기 위하여 노치 설치 및 회전자 표면의 반경을 변화시켜 가진력이 평형화 되는 모델 2를 설계하였다. 회전자 반경 변화에 따른 공극 증가로 인한 자속밀도의 감소분을 보상하기 위하여 영구자석을 분할하여 배치하였다. 각 모델에 대해서 진동원이 되는 요인을 분석하고, 진동 실험을 통해 가진력이 코깅 토크보다 진동에 더 큰 영향을 미칠 수 있었으며, 코깅 토크 저감보다는 가진력의 저감 및 평형화가 진동 저감에 더 효율적인 방법임을 알 수 있다.

2. 본 론

2.1 모델 및 제원

그림 1은 각 모델별 형상을 나타내었고, 제원은 표 1에 요약하여 나타내었다. 각 모델에 대한 진동원에 대해서 비교 및 분석하고자 한다.



<그림 1> 모델 형상

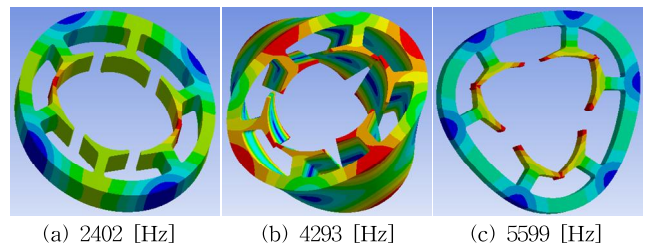
<표 1> 모델 제원

| Item | Specification | |
|----------------------|----------------------|-------|
| Rated speed [RPM] | 3200 | |
| Rated torque [Nm] | 0.4 | |
| Pole/Slot | 4/6 | |
| Air-gap length [mm] | 1.2 | |
| Winding type | Concentrated winding | |
| Br [T] | 1.02 | |
| Stack length [mm] | 41 | |
| Stator diameter [mm] | 71 | |
| Torque ripple [%] | Basic model | 17.53 |
| | Model 1 | 16.84 |
| | Model 2 | 51.88 |

2.2 고유 진동수 해석

고정자의 고유 진동 주파수가 진동 및 공진에 지배적인 역할을 하므로 고정자의 모달 해석을 수행하였다. 그림 2에 모달 해석 결과를 나타내었다. 그림 2의 (a)와 (b)는 다른 모드에 비하여 진동 및 소음을 일으

키는 주요 모드가 되므로 이 모드에서의 공진을 피해야 한다.



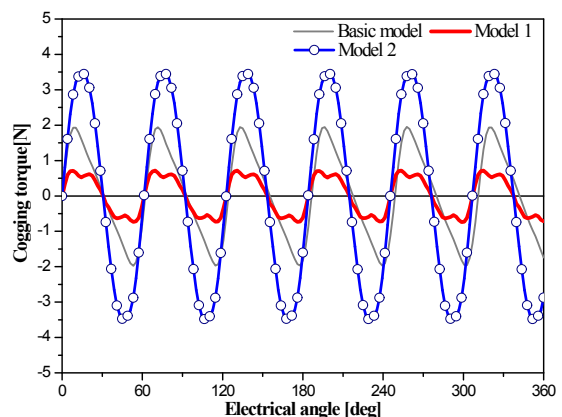
<그림 2> 고유 진동수에 대한 모드 형상

2.3 코깅 토크에 의한 진동 분석

그림 2는 각 모델의 코깅 토크를 힘으로 환산하여 계산한 결과이다. 가진력과 힘의 방향은 다르지만 크기를 비교하기 위해서 코깅 토크를 힘으로 환산하였다. 각 모델의 peak-peak치를 계산한 결과, 기본 모델은 3.92[N], 모델 1은 1.47[N], 모델 2는 6.93[N]이다. 코깅 토크의 주파수는 수식 (1)과 같다.

$$f_{cogging} = L_{cm} \cdot n \cdot \frac{f_e}{P} \quad (1)$$

여기서 L_{cm} 은 극 수와 슬롯 수에 따른 최소 공배수, f_e 는 구동 주파수, P 는 쌍극수이다. 따라서 코깅토크가 저감된다면 640[Hz]대의 진동이 저감될 것으로 사료된다.



<그림 2> 각 모델에 대한 코깅 토크 비교

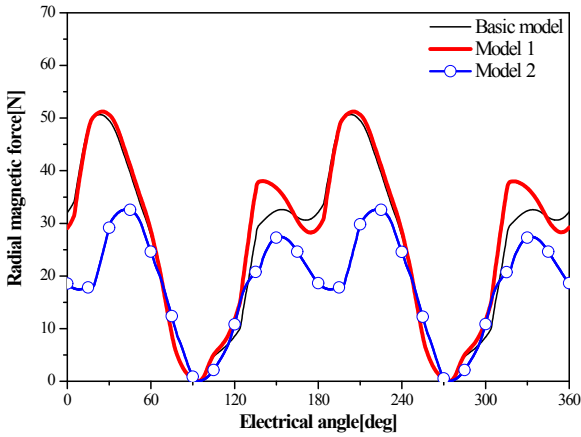
2.4 가진력에 의한 진동 분석

고유 진동수 해석에서는 회전자의 영향을 고려하지 않았기 때문에 회전자의 변화에 따른 진동의 영향을 비교하기 어렵다. 그러므로 각 모델의 공극자속 변화로 생기는 진동을 분석하기 위하여 가진력의 분포 및 양상을 비교하였다. 전자기적 가진력은 기계적인 요인과 전자기적 현상의 상호 유기적 관계로부터 발생한다. 이 전자기적 가진력의 진동수가 전동기 구조물의 고유진동수와 비슷한 영역에 있으면 공진하게 되어 부품의 마모와 전동기 구동성능의 저하뿐만 아니라 다른 시스템에 영향을 미치게 된다. 무부하시(Open-circuit)나 부하시(On-load)에 공극 자계로부터의 고정자 표면 반경방향 힘 밀도(radial force density) 분포는 전자기적 진동·소음의 주된 발생원이며, 수식 (2)와 같이 Maxwell's stress

method로 계산할 수 있다[3].

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

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



〈그림 3〉 각 모델별 하나의 치가 받는 가진력

그림 3은 한 개의 치가 받는 가진력을 시간에 따라 계산한 결과이다. 가진력의 최대값을 비교할 경우 기본 모델은 50.65[N], 모델 1은 51.25[N], 모델 2는 32.67[N]이다. 가진력의 주파수는 다음 수식 (3)과 같다.

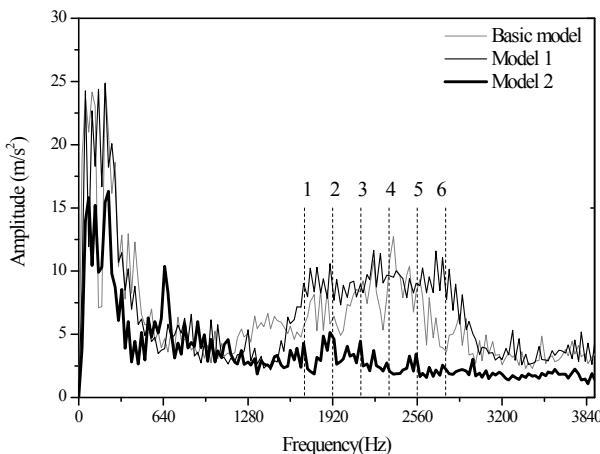
$$f_{rad} = 2 \cdot n \cdot f_e \quad (3)$$

따라서 가진력 주파수인 213.33[Hz]영역에서 모델 2의 진동이 가장 낮을 것으로 예상된다.

2.5 진동 실험

그림 4는 진동 실험 결과 스펙트럼이다. 진동 실험 결과 가진력 주파수인 213.33[Hz]영역에서 모델 2가 나머지 모델에 비해 진동의 크기가 감소한 것을 알 수가 있다. 이는 가진력의 크기가 32.67[N]으로 타 모델에 비해 약 40[%]이상 감소하였기 때문이다.

반면에 코깅 토크 주파수인 640[Hz]영역에서는 모델 1의 경우 기본 모델에 비해 코깅 토크 힘의 크기가 62.5[%]저감 되었지만 토크 리플이 저감되지 않아 진동이 크게 저감되지 않았음을 알 수 있다. 모델 2의 경우 나머지 모델에 비해 진동이 크게 발생함을 알 수가 있는데 이는 두 모델에 비해 코깅 토크와 토크 리플이 증가하였기 때문에 진동이 크게 발생하였다.

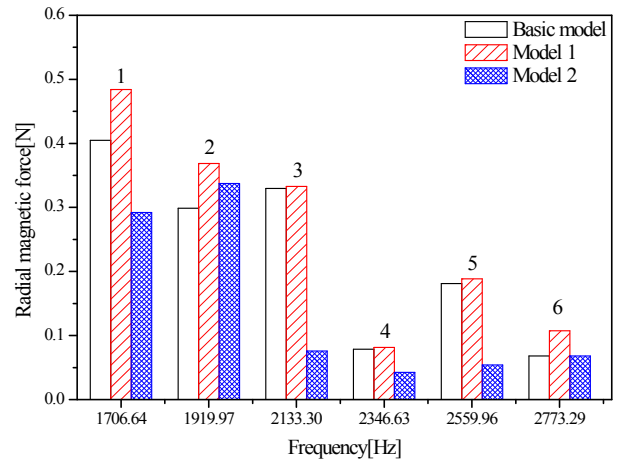


〈그림 4〉 각 모델별 진동 실험 스펙트럼

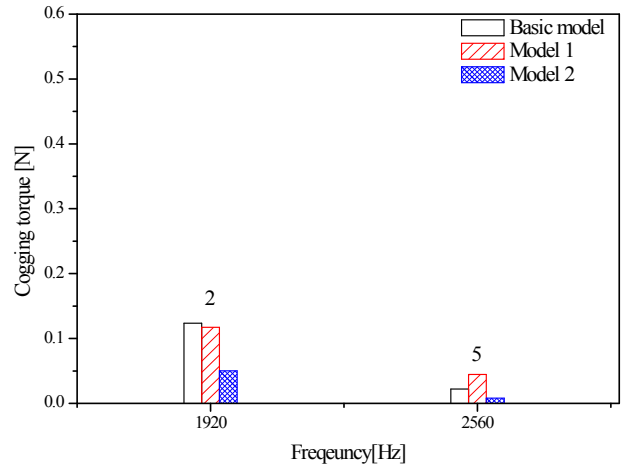
2.6 고유 진동주파수 영역에서 진동원 분석

고유 진동수 대역에서 진동원을 분석하기 위해 그림 5와 그림 6에 각

진동원에 대한 고조파 성분을 나타내었다. 1차 고유 진동수 영역인 2400[Hz]와 가장 근접한 지점인 4번 지점에서 크기를 비교를 해야 한다. 다른 지점에 비해 크기는 작지만 공진 영역이므로 각 모델별 크기를 비교하는 것이 중점이 되어야 하며, 그 결과 모델 2의 가진력 크기가 감소하였기 때문에 공진영역에서 진동원이 감소하여 진동이 감소하였다는 것을 입증하였다. 동시에 주변 영역인 3번과 5번 지점에서 가진력이 감소하였기 때문에 진동이 저감되었다는 것을 볼 수 있다. 또한 2번 지점과 5번 지점의 경우 방향은 다르지만 가진력과 코깅 토크가 동시에 발생하므로 두 힘의 상호작용으로 인한 진동이 발생한 것으로 사료된다.



〈그림 5〉 고유 진동수 대역에서의 가진력 고조파 성분



〈그림 6〉 고유 진동수 대역에서의 코깅 토크 고조파 성분

3. 결 론

본 논문에서는 IPM type BLDC 전동기에서 진동의 발생 원인이 되는 코깅토크와 불평형한 가진력에 대한 연구를 수행하였다. 유한요소법과 실험계획법을 이용하여 설계하고 시작기를 제작해 진동실험을 통해 검증하였다. 기본 모델에 비해 모델 1은 코깅 토크가 62[%]저감되었고, 모델 2는 가진력이 51.25[N]에서 32.67[N]으로 36.3[%] 저감되었다.

진동 실험 결과, 모델 1의 경우 기본모델과 유사한 진동이 발생한다. 모델 2의 경우 코깅토크 주파수인 640[Hz]영역에서 진동이 증가하였지만 가진력 주파수인 213.33[Hz]와 고유진동수 영역인 2400[Hz]대에서 진동 저감의 효과가 큰 것을 알 수 있었다. 이는 코깅 토크보다 가진력 저감 및 평형화 설계가 진동 저감에 더 효율적임을 확인하였다

[참 고 문 헌]

- [1] J. P. Hong et al., "Analysis of radial force as a source of vibration in an induction motor with skewed slots," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 33, No. 2, pp. 1650-1653, 1997.
- [2] R. S. Colby, F. M. Mottier and T. J. E. Miller, "Vibration modes and acoustic noise in a four-phase switched reluctance motor," IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 32, No. 6, pp. 1357-1363, 1996.
- [3] Gieras, J. F.; Wang, C.; Lai, J. C.: "Noise of Polyphase Electrical Motors", Taylor & Francis Group, 2006.