

전자기력의 기본과 성분 진동저감을 위한 IPMSM의 극 수 슬롯 수 조합에 대한 연구

신창욱, 손형수, 윤명환, 홍정표
한양대학교

Study on the Combination of the Number of Pole and Slot of IPMSM for Vibration Reduction of Electromagnetic Force Fundamental Harmonic Component

Chang-Wook Shin, Hyung-Soo Son, Myung-Hwan Yoon, Jung-Pyo Hong
Hanyang University

Abstract - 본 논문은 IPMSM(Interior Permanent Magnetic Synchronous Motor) 구동 시에 나타나는 전자기력의 기본과 성분의 진동을 분석하였다. 대상 전동기로는 크기가 같고 동일 출력을 내는 14극 12슬롯, 14극 18슬롯 IPMSM을 선정하였다. 두 전동기의 Vibration Order를 수식적으로 검토한 결과 14극 12슬롯 전동기가 14극 18슬롯 전동기에 비해 전자기력의 기본과 성분이 진동에 취약함을 확인하였고, 이를 유한요소해석(FEA)을 통해 검증하였다. 검토결과를 바탕으로 전자기력의 기본과 성분 진동저감을 위한 극 수 슬롯 수 조합에 대해서 분석하였다.

1. 서 론

전동기는 대부분의 실생활 전기제품을 비롯해서 최근 전 세계적으로 많은 연구가 진행 중인 친환경자동차의 동력원 등 다방면에 걸쳐 널리 사용되고 있다. 하지만 전동기가 인간의 삶과 매우 밀접해진 만큼, 전동기에서 발생하는 진동은 인간에게 불안함과 스트레스를 유발시키기도 한다.

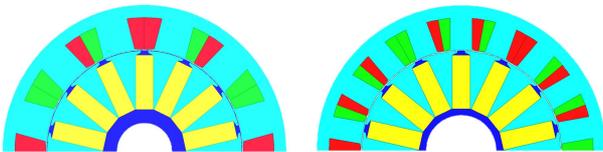
전동기의 고출력화 및 소형화를 위해서는 높은 출력 밀도가 요구되며, 이를 만족하기 위해 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) 전동기가 각광을 받게 되었다. 이 IPMSM은 SPMSM(Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor) 전동기와 비교해서 마그네틱 토크뿐만 아니라 릴럭턴스 토크(Reluctance Torque)를 이용할 수 있어서 높은 출력밀도를 가질 수 있으나, 더 많은 진동소음이 발생한다는 단점이 있다.

전원주파수의 2배인 성분을 전자기력 기본파라고 칭하는데, 본 논문에서는 14극 12슬롯, 14극 18슬롯 IPMSM 두 모델을 비교하여 각각의 모델에서 극 수 슬롯 수가 전자기력 기본파에 어떠한 영향을 끼치는지 분석하고 진동에 대한 영향도 검토하고자 한다.

2. 본 론

2.1 대상 전동기 모델

대상 전동기 모델로는 동일한 크기, 출력을 내는 14극 12슬롯, 14극 18슬롯 IPMSM을 선정하였다. 두 모델 모두 동일한 279rpm으로 구동된다. <그림 1>은 대상 전동기 모델의 형상이다. <표 1>은 각각 IPMSM 모델의 사양을 나타내었다.



<그림 1> 14극 12슬롯 & 14극 18슬롯 IPMSM

<표 1> 전동기 모델 사양

	모델 1	모델 2
극 수 슬롯 수	14극 12슬롯	14극 18슬롯
권선법	치 집중권	
구동방식	정현파 구동	

2.2 배경 이론

2.2.1 공간 고조파 기자력

고정자와 회전자의 공간 고조파는 식 (1), (2)를 통해 구할 수 있다.

$$\nu = 2mk \pm 1 = k \frac{s}{p} \pm 1 \quad (k=1,2,3,\dots) \quad (1)$$

$$\mu = 2k - 1 \quad (k=1,2,3,\dots) \quad (2)$$

여기서 ν 는 고정자 공간 고조파, μ 는 회전자 공간 고조파, m 은 상수, p 는 극 쌍수, s 는 슬롯 수이다.

2.2.2. Maxwell stress tensor

공극자속밀도로 Maxwell Stress Tensor를 이용하여 전자기 가진력(Normal Force)을 산정할 수 있다.

$$F_n = \frac{h}{2\mu_0} \int (B_n^2 - B_t^2) dl \quad (3)$$

여기서, F_n 은 Normal Force, B_n 은 Normal 방향 공극자속밀도, B_t 는 Tangential 방향 공극자속밀도, h 는 축 방향 길이, μ_0 는 자유공간에서의 투자율, dl 은 호의 미소길이이다.

2.2.3. 전자기력 성분의 Vibration Order(r)

Vibration Order는 진동과 소음 특성 고려 시 변형량과 관계되는 전자기력의 공간적인 힘의 분포를 나타내는 공간 고조파의 차수이다.

1) 계자 기자력과 전기자 기자력의 합성 전자기력 주파수와 Vibration Order

$$r = p(\nu \pm \mu) \quad (4)$$

$$f_r = f_\nu \pm f_\mu \quad (5)$$

여기서 f_r 은 r차 Vibration Order의 주파수, f_ν 는 고정자 자속 공간 고조파 주파수, f_μ 는 회전자 자속 공간 고조파 주파수이다.

2) 계자 기자력의 전기자 슬롯 형상에 의한 Vibration Order

$$\mu = \frac{|0.5r_\lambda \pm s|}{p} \quad (6)$$

$$f_{r_\lambda} = 2\mu f \quad (7)$$

여기서 r_λ 는 회전자의 공간고조파를 정수로 만드는 최소한의 Vibration Order, f 는 전원 주파수이다.

3) 계자 기자력의 Self Vibration Order

$$r = 2p\mu \quad (8)$$

$$f_r = 2\mu f \quad (9)$$

전자기력 기본파(전원주파수 2배)의 Vibration Order는 μ 가 1일 때 적용하여 구할 수 있다. Vibration Order는 <표 2>에 제시되어 있다.

<표 2> Vibration Order(r)

Vibration Order(r)	14극 12슬롯	14극 18슬롯
①	2	4
②	10	22
③	14	14

- ① : 계자 기자력과 전기자 기자력의 합성 전자기력 Vibration Order
- ② : 계자 기자력의 전기자 슬롯 형상에 의한 Vibration Order
- ③ : 계자 기자력의 Self Vibration Order

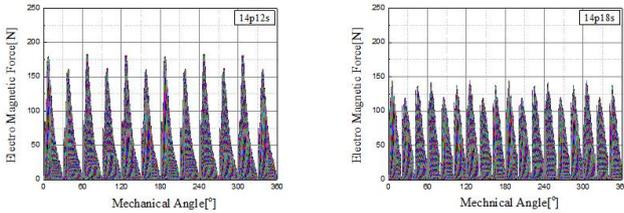
2.2.2. Vibration Order에 따른 변형량

고정자 코어의 변형량(deformation)과 Vibration Order(r)와의 관계는 식(10)과 같다.

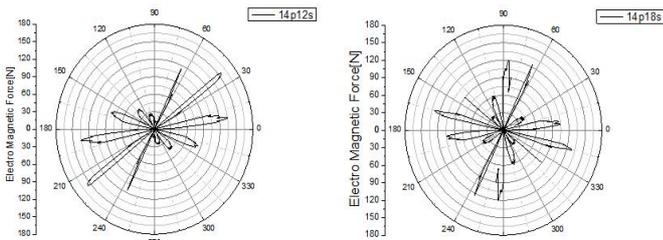
$$def \propto \frac{1}{r^4} \quad (10)$$

식(10)에 따라 두 전동기의 Vibration Order(r)를 비교할 때는 가장 작은 r값이 진동에 더 지배적인 영향을 끼친다. 14극 12슬롯은 가장 작은 r이 2, 14극 18슬롯은 r이 4이므로 14극 12슬롯이 14극 18슬롯에 비해 전자기력 기본파 성분의 진동이 더 취약하다.

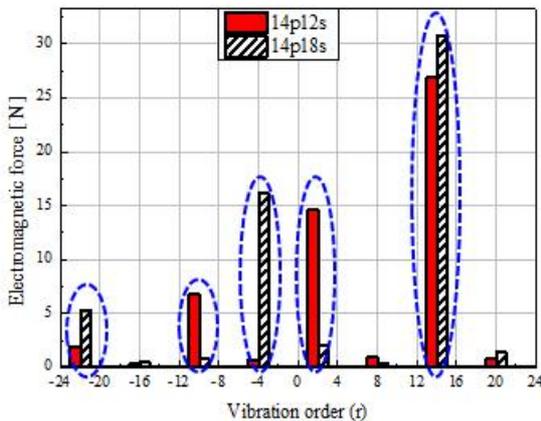
2.3 유한요소해석 결과



<그림 2> Normal Force(기계각 기준)



<그림 3> Normal Force(omega*t=1rad)



<그림 4> 스펙트럼 비교 결과

2.3.1. 가진력(Normal 방향)

<그림 2>는 유한요소해석을 통해 기계각에 대한 Normal방향의 가진력을 분석한 결과이다. 전반적으로 14극 12슬롯의 가진력의 최대치가 14극 18슬롯의 가진력의 최대치 보다 큼을 확인 할 수 있다.

<그림 3>은 <그림 2>에서 최대치가 존재하는 $\omega t = 1rad$ 일 때, 기계각에 따라 분포하는 가진력을 분석한 결과이다. 14극 12슬롯에서의 가진력의 최대치가 14극 18슬롯에서의 가진력의 최대치보다 큰 것을 다시 한 번 확인할 수 있다. 또한, 14극 12슬롯과 14극 18슬롯에서의 가진력의 공간적인 분포를 볼 때, 14극 12슬롯의 가진력은 주로 2모드로 분포하는 반면에 14극 18슬롯은 가진력이 주로 4모드로 분포하는 것을 볼 수 있다. 즉, 14극 12슬롯이 14극 18슬롯보다 진동에 취약함을 확인할 수 있다.

2.3.2. 스펙트럼 분석

<그림 4>는 14극 12슬롯과 14극 18슬롯의 스펙트럼 결과치를 비교한 그래프이다. 여기서 Vibration Order가 양수인 경우에는 (+) 방향으로 파가 진행함을 의미하고 음수인 경우에는 (-) 방향으로 파가 진행함을 의미한다.

<표 2>의 14극 12슬롯과 14극 18슬롯의 Vibration Order값들이 <그림 4> 스펙트럼 비교 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다. <표 2>에서 14극 12슬롯인 경우에는 2차 공간 고조파가 진동에 지배적인 영향을 끼치고 14극 18슬롯은 4차 공간 고조파가 진동에 지배적인 영향을 끼치는 것을 <그림 4>에서 확인할 수 있다.

스펙트럼 결과값을 가지고 식(10)을 이용하여 Vibration Order에 따른 변형량을 구해보았다. 14극 12슬롯에서는 2차 공간 고조파가 변형량을 일으키는데 지배적이므로 $def \propto 1/16$ 임을 알 수 있고, 14극 18슬롯은 4차 공간 고조파가 변형량을 일으키는데 지배적이므로 $def \propto 1/256$ 임을 알 수 있다.

이를 통해, 수식을 통하여 Vibration Order에 따른 진동영향이 실제 유한요소해석으로 얻은 결과와 일치함을 알 수 있었고, 14극 12슬롯이 14극 18슬롯에 비해 전자기력 기본파 성분의 진동이 더 취약하다는 것을 알 수 있었다.

3. 결 론

회전자의 공간 고조파가 기본파일 때, 전자기력의 기본파가 IPMSM의 진동에 어떠한 영향을 끼치는지 14극 12슬롯과 14극 18슬롯 전동기에 적용하였다. 수식을 통하여 Vibration Order가 작을수록 전자기력의 기본파 성분의 진동에 지배적으로 영향을 끼치는 것을 확인하였고, 스펙트럼 비교 결과와 일치한다는 것을 알 수 있었다.

검토결과 IPMSM 설계 시, 전자기력의 기본파 성분의 진동저감을 위해 Vibration Order(r)가 크게 극 수 슬롯 수 조합을 선정해야 함을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Sang-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Sang-Moon Hwang, Ji-Young Lee, and Young-Kyoun Kim, "Optimal Design for Noise Reduction in Interior Permanent Magnet Motor", Industry Applications Society 40th Annual meeting, 2006
- [2] Jae-Yeon Kim, Doo-Young Kim, Myung-Hwan Yoon, and Jung-Pyo Hong, "Noise Source Analysis and Reduction of Induction Motor for Electric Vehicle", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 904-905, 2014
- [3] Sang-Ho Lee, Ji-Min Kim, Do-Jin Kim, and Jung-Pyo Hong, "Study on Noise and Vibration in the Interior Permanent Magnet Motor", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 853-854, 2009