

창의 전기기술을 선도하는
대한전기학회



www.kiee.or.kr

KIEE Summer Conference 2015

2015년도 제46회 대한전기학회 하계학술대회

일시: 2015년 7월 15일(수) ~ 17일(금)

장소: 무주 덕유산 리조트(전북 무주군)

◆ 주 최 : 대한전기학회

◆ 후 원 : 미래창조과학부, 산업통상자원부, 한국전력공사, 한국전기공사협회,
한국과학기술단체총연합회

- BP 17 PWM을 고려한 소형 컴프레서 모터의 성능 해석에 관한 연구
서 강*, 김지현, 심호경(포스코)
- BP 18 자속 집중형 모터를 이용한 팬 모터의 성능개선 설계
정재웅*, 이 주(한양대), 이성구(삼성전자)
- BP 19 서비스 로봇관절용 외전형 BLDC 모터 특성해석 연구
김영균, 안준선, 손석금, 박종찬, 유세현(오산대학), 정인성(전자부품연구원)
- BP 20 IPMSM 표면 전자기력 발생 매커니즘에 관한 연구
박경재*, 이동수, 정상용(성균관대), 김용재(조선대)
- BP 21 전자기력의 기본파 성분 진동저감을 위한 IPMSM의 극 수 슬롯 수 조합에 대한 연구
신창욱*, 손형수, 윤명환, 홍정표(한양대)
- BP 22 회전자 형상에 따른 매입형 영구자석 동기전동기의 토크 특성 비교 및 분석
이승재*, 이재길, 정현교(서울대)
- BP 23 선형 유도전동기의 2차측 리액션 플레이트에 따른 추력특성 연구
정재훈*, 최장영(충남대), 임재원(한국기계연구원), 성소영(선박해양플랜트연구소)
- BP 24 고 토크밀도를 위한 다양한 회전자 형상의 외전형 영구자석 동기전동기에 관한 연구
차진욱*, 권병일(한양대)
- BP 25 비균일 공극형 단상 4/4극 하이브리드 SRM의 성능분석
정광일*, 안진우(경성대), 안영주(부경대)
- BP 26 단상 하이브리드 SRM의 위치 추정 방법
YingTang*, Fengge Zhang(심양공업대), 이동희, 안진우(경성대)

▶ 전기기기 (7)

7월 16일(목) / 발표시간 : 10:50-12:10 / 만선하우스

좌장 : 박관수(부산대)

- BP 27 표면부착형 가변 자속 전동기의 설계 및 동특성 해석
김정만*, 최장영(충남대), 이규석, 이성호(한국생산기술연구원)
- BP 28 해석적 방법을 이용한 수직방향으로 자화된 영구자석 선형커플링의 힘 특성 해석
이재현*, 최장영(충남대)
- BP 29 해석적 방법을 이용한 축 방향 자속 영구자석 커플링의 과부하 자계특성해석
장강현*, 구민모, 최장영(충남대)
- BP 30 영구자석 커플링의 비틀림 강성에 의한 토크 특성
신현재*, 최장영(충남대)
- BP 31 고정자 권선 사양에 따른 10kW급 고속 유도전동기의 전자기적 특성 및 가진력 분석
이지영*, 장대규, 장정환(동아대)
- BP 32 공간고조파법을 이용한 동축 마그네틱 기어 자계 해석
신호민*, 장정환(동아대)
- BP 33 고정자 극수-회전자 배리어의 조합에 의한 매입형 영구자석 동기전동기의 특성 해석
손병관*, 전경원, 서명기, 정상용(성균관대), 김용재(조선대)
- BP 34 해석적인 방법을 이용한 페라이트 영구자석을 갖는 초고속 전동기의 특성 해석
김관호*, 최장영(충남대) 최지환(현대 모비스), 장석명(센스하이테크에지니어링)
- BP 35 고정자의 상분할에 따른 표면부착형 영구자석 동기전동기 특성 해석
이승한*, 조영택, 조한욱(충남대)
- BP 36 직류 전자기 펌프의 특성 해석에 관한 연구
이재영*, 장중근, 김창엽(호서대)
- BP 37 마그네틱 기어의 회전자 극수조합에 따른 전달토크 및 출력밀도 특성분석
박규상*, 김용재(조선대), 정상용(성균관대)

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.

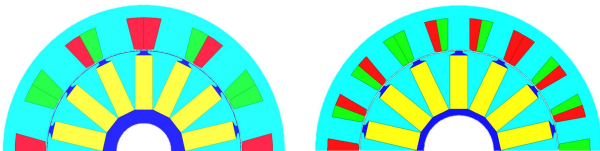
전동기의 고출력화 및 소형화를 위해서는 높은 출력 밀도가 요구되며, 이를 만족하기 위해 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) 전동기가 각광을 받게 되었다. 이 IPMSM은 SPMSM(Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor) 전동기와 비교해서 마그네틱 토크뿐만 아니라 릴럭턴스 토크(Reluctance Torque)를 이용할 수 있어서 높은 출력밀도를 가질 수 있으나, 더 많은 진동소음이 발생한다는 단점이 있다.

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 r 차 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

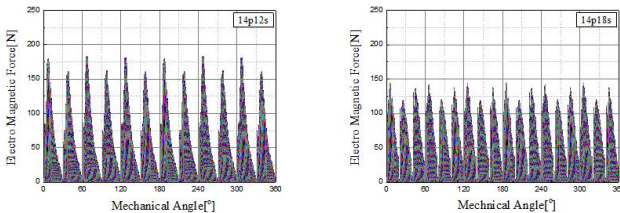
2.2.2. Vibration Order에 따른 변형량

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

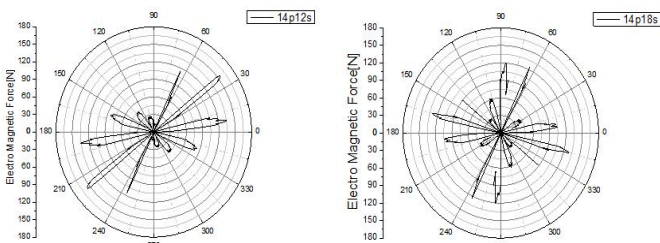
$$\text{def} \propto \frac{1}{r^4} \quad (10)$$

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.

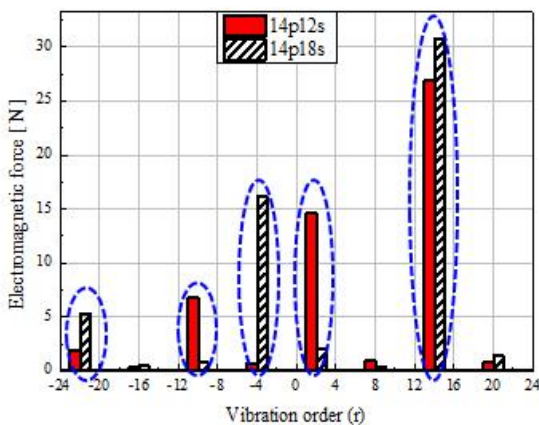
2.3 유한요소해석 결과



〈그림 2〉 Normal Force(기계각 기준)



〈그림 3〉 Normal Force(ωt=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 ωt 중에서 $\omega t = 1\text{rad}$ 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 $\text{def} \propto 1/16$ 임을 알 수 있고, 14극 18슬롯은 4차 공간 고조파가 변형량을 일으키는데 지배적이므로 $\text{def} \propto 1/256$ 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-Kyun 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 Vehicler", 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