

Magnet 형태에 따른 500W급 매입형 영구자석 동기전동기 특성 해석

김경수*, 이성호*, 차현록*, 이건수*, 박성준,**

한국생산기술연구원 호남권 기술지원본부*, 전남대학교 전기공학과**

The Characteristic analysis of 500W Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Shape of Magnet

Kyung-su Kim*, Sung-ho Lee*, Hyun-rok Cha*, Kyun-su Lee*, Sung-jun Park**

Korea Institute of Industrial Technology Honam Technology Service Division*, Chonnam National University**

Abstract - 본 논문은 전기자전거용으로 쓰이는 500W급 매입형 영구자석 동기전동기의 자석 형태에 따른 특성 변화에 대해 연구하였다. 전기자전거의 경우 낮은 코깅토크 특성을 필요로 하며, 부하의 변화 시에도 고회전력·고효율 특성을 지니는 정특성 운전이 요구된다. 이를 위해 높은 관성력을 얻을 수 있는 외전형 타입의 모터가 필요로 하며, 많은 부하가 요구되는 지점에서 고회전 토크를 위해서는 매입형 영구자석 동기전동기가 요구되고 있다.

본 논문에선 500W급 매입형 영구자석 동기전동기의 특성 향상을 위하여 자석 형태에 따른 모터 특성을 비교 분석하였으며, 실제 최적화 모델을 제작 및 성능실험을 통해 제안된 모델의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)은 고효율·고토크 특성 및 상대적으로 쉬운 제어특성을 지니고 있어서 많은 산업에서 응용되고 있다. 하지만 구조적으로 자석이 회전자에 내삽 되는 형태를 띠기 때문에 고정자 슬롯 간에 코깅 토크 및 토크 리플을 발생하게 된다. 이러한 코깅 토크와 토크 리플은 진동 및 소음을 발생하게 되어 정특성·정속 운전을 하는데 어려움을 겪게 된다. 특히 전기자전거용으로 활용할 경우 기동시의 낮은 코깅 토크 특성이 필요할 뿐만 아니라, 정속 운전이 될 수 있도록 낮은 토크 리플 특성이 요구된다.[1]

본 논문에서는 Magnet 형태의 변경을 통해 매입형 영구자석 동기전동기 특성해석을 통한 낮은 코깅토크와 토크리플 개선방안에 대해 연구하였다. 이를 위해 전기자전거용 500W급 매입형 영구자석 동기전동기 모델에 적용하여 전동기 특성을 비교 분석하였으며, 실제 최적화된 모델을 제작 및 테스트를 통해 설계 방법을 검증하고자 하였다.

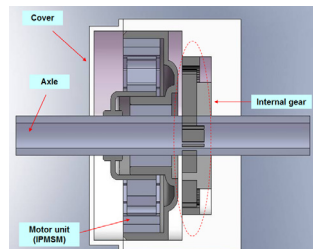
2. 본 론

2.1 전기자전거용 500W급 전동기 구조

그림. 1은 후류에 500W급 매입형 영구자석 동기전동기가 부착된 전기자전거의 구조를 나타내고 있다. 전기자전거 앞축에 부착될 경우 방향 전환 및 운전이 유리하기 때문에 보다 더 신뢰성 있는 구동이 가능하다. 그림. 2는 이러한 전기자전거에 적용될 전동기의 구조를 나타내고 있다. 축은 전기자전거에 고정되며, 내부 기어는 유성기어 형태로 전기자전거 구동 및 제어 시 기어를 통해 고 토크 출력이 나타날 수 있는 구조를 띠고 있다. 하지만 전기자전거 특성 상 정지 및 기동 시 운전자의 편안함과 쉬운 구동방식을 위해 모터의 낮은 코깅토크가 요구되고 있다. 또한 운전 시 운전자가 원하는 정속운전을 위해서는 낮은 토크리플 특성이 요구된다.



<그림 1> 전기자전거 구조



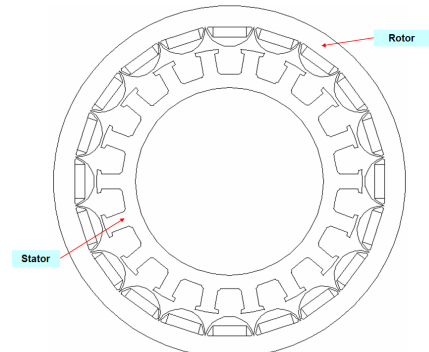
<그림 2> 전기자전거용 전동기 구조

2.2. 매입형 영구자석 동기 전동기 설계 사양

매입형 영구자석 동기전동기는 회전자에 영구자석을 삽입함으로써 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 모두 활용할 수 있어서 출력 밀도가

높아지는 장점이 있기 때문에 현재 많은 산업 분야에서 활용되고 있다. 또한 회전자에 영구자석이 삽입됨으로 기계적 안정성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 유효 공극이 작아짐에 따라 전기자 반작용 효과가 현저하게 나타날 수 있다. 따라서 전기자 전류 제어를 이용한 제자 자속의 제어가 용이함으로 최대토크/전류 제어를 이용한 저속 구간에서의 일정 토크 영역 영역과 약제자 제어를 이용하여 일정한 출력 영역 확보 및 제어가 용이한 장점이 있다.

그림 3.은 본 논문에서 적용할 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 모델을 나타내고 있다. 적용된 모델은 회전 시 나타나는 역기전력의 THD(Total Harmonic Distribution) 저감 및 모터 효율 상승 및 토크 리플 저감을 위해 형상설계를 진행하였다. 또한 전기자전거용으로 활용하기 위해 입력전원은 배터리 전원 기준 48V DC로 설정하였으며, 전체 모델 사이즈 및 특성을 <표 1>과 같이 정리하였다.



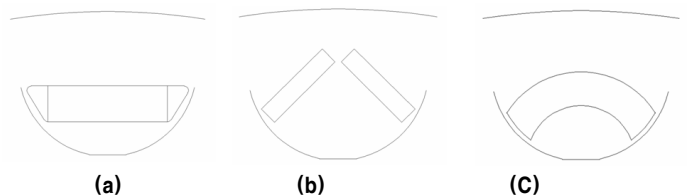
<그림 3> 제안된 매입형 영구자석 동기전동기 모델

<표 1> 제안된 매입형 영구자석 동기전동기 특성

항목	값	항목	내용
입력 전압	48V	철심 재질	S08
전체 외경	140mm	정격속도	3,000rpm
적층 높이	15mm	슬롯 극수	18/20
정격출력	500W	턴 수	170T

2.2.1 Magnet 형태에 따른 모터 설계 모델

그림. 4는 실제 모델에 적용한 Magnet 형태를 나타내고 있다. magnet의 형태는 1-layer형태, V자형태, U자형태 3가지의 모델을 적용하였다. 또한 정격출력범위에서 magnet형태에 따른 코깅토크와 토크리플을 비교하여 최적화된 모델을 구하고자 하였다. 최적 설계를 위해 FEA기법을 이용하였으며, 이를 통한 설계 결과 값을 바탕으로 그 특성을 비교 분석하였다.



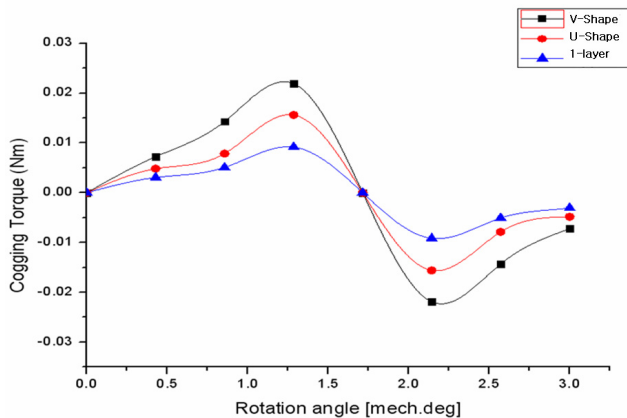
<그림 4> Magnet 형태 변경 파라미터 (a) 1-layer형태 (b) V자 형태 (c) U자 형태

2.3 모터 설계 결과분석

표 2는 magnet 형태에 따른 모터 특성 결과를 나타낸 결과이다. 해석 결과 초기 설계하고자 하는 목표에 근접하는 성능을 얻을 수 있었으며, 입력전원 48V를 통해 구동되는 전기자전거용 영구자석 동기전동기의 설계 값을 얻을 수 있었다. 또한 magnet 형태에 따라 모터의 특성변화에 대해 비교하고자 하였다. 비교 결과 동일출력 상에서 V자 형태의 magnet을 적용할 경우, 가장 큰 토크를 얻을 수 있었지만, 코깅토크와 토크리플을 비교 시 1-layer 형태가 가장 유리함을 알 수 있었다. 그림. 5는 모터 설계 결과 코깅토크 값을 비교한 결과이다. 비교 결과 V자 형태의 magnet의 코깅토크 값이 가장 크게 나타났으며, 1-layer 형태의 magnet 코깅토크 값이 가장 작게 나타났다. 설계 값을 비교분석한 결과 큰 토크가 필요한 분야에서는 V자 형태의 magnet이 유리하지만, 전기자전거의 경우 코깅토크 저감과 낮은 토크리플이 요구되기 때문에 1-layer 형태의 magnet이 가장 최적화 구조임을 알 수 있었다.

〈표 2〉 Magnet 형태 변경에 따른 모터 설계 결과

설계결과	1-layer	V Shape	U Shape
정격속도 (RPM)	3,00rpm		
토크 (Nm)	1.6162[Nm]	1.653[Nm]	1.5836[Nm]
효율.(%)	90.296[%]	88.323[%]	87.495[%]
출력(W)	504.38W	537.71W	509.75W
Cogging Torque(Nm)	0.04872[Nm]	0.25376[Nm]	0.13753[Nm]
Torque ripple (%)	1.81413[%]	5.464[%]	3.827[%]

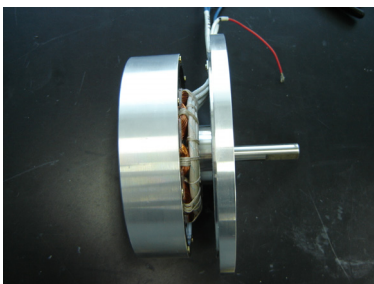


〈그림 5〉 Magnet 형태에 따른 코깅토크 결과 값 비교

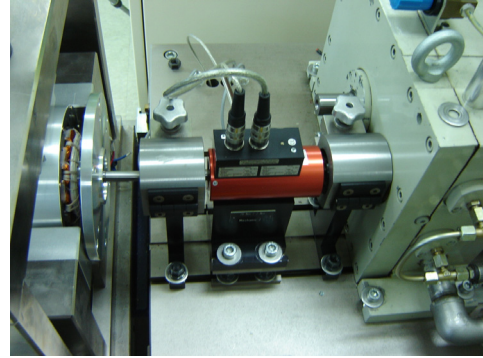
2.4 실험 및 측정 결과

그림. 6은 제안된 1-layer magnet 형태를 가지는 전기자전거용 매입형 영구자석 동기전동기의 Prototype 모델이다. 모터 측정 장비를 이용하여 정격 출력상태에서의 효율 및 모터 특성을 실험하였으며, 코깅토크 측정 장비를 통해 실제 제작된 모델의 설계 값과 비교 분석하였다.

비교 결과, 설계 값과 측정값이 매우 유사하게 나타났으며, 정격출력에도 도달하여 우리가 원하고자 하는 전기자전거용 매입형 동기전동기 설계 값의 타당성을 얻을 수 있었다. 또한 부하특성을 통해 전기자전거에 적용 가능한 모델을 확인 할 수 있었다.



〈그림 5〉 전기자전거용 영구자석 동기전동기 prototype 모델



〈그림 7〉 모터 측정 시스템을 이용한 측정 결과

〈표 3〉Prototype 모델 실제 측정 결과

항목	측정결과
출력	501.59 W
속도	3000 rpm
토크	1.6055 Nm
효율	90.42 %
토크 리플	2.14 %
코깅토크	0.05877 Nm

3. 결 론

본 논문에서는 전기자전거용으로 쓰이는 500W급 매입형 영구자석 동기전동기의 자석 형태에 따른 특성 변화에 대해 연구하였다. 전기자전거에서 용구되는 정격 출력에서의 낮은 코깅토크 및 부하의 변화 시에도 정특성 운전이 가능한 낮은 토크리플 특성이 요구된다. 이를 위해 높은 관성력을 얻을 수 있는 외전형 타입의 모터가 필요로 하며, 많은 부하가 요구되는 지점에서 고회전 토크를 위해서는 매입형 영구자석 동기전동기의 최적 설계가 필요하다.

우리는 최적 설계를 통한 500W급 매입형 영구자석 동기전동기의 특성 향상을 위하여 세 가지 자석 형태에 따른 모터 특성을 비교 분석하였다. 설계 결과 V자 형태를 가지는 모델이 고 토크에 유리하지만, 낮은 토크리플 및 코깅토크 저감을 위해서는 1-layer 형태 magnet을 가지는 모델이 가장 유리함을 알 수 있었다. 또한 prototype 모델을 제작하여 모터 성능 측정 장비를 통해 설계 값과 실측값을 비교 분석하여 설계의 타당성을 검증하였다. 향후 본 논문에서 제안된 모델을 전기자전거에 적용 시 성능 향상 및 다른 다양한 분야에도 활용 가능하리라 예상된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Yoshio Tomigashi, Tetsuji Ueta, Kazunobu Yokotani and Kazuo Ikegami, "Reducing Cogging Torque of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Bicycle" EPE 2005, ISBN: 90-75815-08-5, Page(s):1- 5
- [2] A. Yamada, H. Kawano, I. Miki and M. Nakamura, "A Method of Reducing Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor", Power Conversion Conference - Nagoya 2007, PCC'07 Digital Object Identifier 10.1109/PCCON, pp.322-325, April 2007.