

E-Mobility 용 보조 영구자석 권선 계자 동기전동기 설계

Design of Permanent Magnet Assisted Wound Field Synchronous Motor for E-Mobility

서한수*, 박찬배**, Gang Lei***, Youguang Guo***, 이형우†

Han-soo Seo*, Chan-Bae Park**, Gang Lei**, Youguang Guo**, Hyung-woo Lee†

초 록 최근 환경문제가 대두되면서 E-Mobility 산업에서 동에너지 대비 고효율 전동기 개발이 활발히 이루어져지고 있다. 권선형 동기전동기(Wound Field Synchronous Motor, WFSM)는 계자 전류(Field Current) 제어가 가능하며, 그에 따라 고속 운전영역에서 높은 효율과 넓은 운전범위에서 구동이 가능한 특징이 있다. 하지만 다른 전동기에 비해 많은 권선을 사용하여 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)보다 동특성 대비 좋지 않은 효율과 토크밀도를 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 기존 WFSM의 토크밀도향상을 위하여 회전자에 영구자석(NdFeB)를 삽입하여 d축 자속을 강화하는 새로운 모델을 제안하며, 전자계 특성을 자기등가회로 및 유한요소해석법(FEM)을 통하여 검증하였다.

주요어 : WFSM, 영구자석, 자기등가회로, FEM

1. 서론

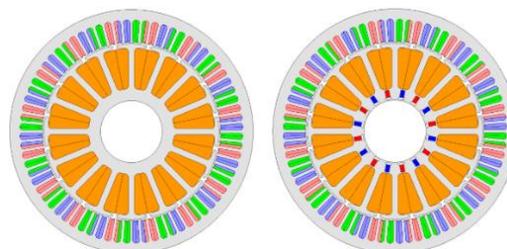
최근의 환경 문제에 대한 우려로 인해 특히 E-Mobility 산업 분야에서 고효율 가능한 대표적 전동기인 PMSM이 많이 사용되고 있다[1]. 하지만 회로류의 공급 불안정 및 약계자 영역에서 제어의 어려움이 있어, 이를 대체하기 위하여 WFSM에 대한 연구가 증가하고 있다. WFSM은 넓은 운전 범위와 고속에서 높은 효율을 가지는 특징이 있다[2]. 하지만 회로류계 자석의 높은 보자력 및 높은 잔류자속에 의해 WFSM은 PMSM에 비해 동일한 사이즈 대비 동출력특성을 가지기는 쉽지 않은 것이 사실이다.

본 논문에서 영구자석을 회전자 요크에 삽입하여 d축 자속을 강화시키는 Assisted Permanent Magnet (PMA) WFMS를 제안한다.

2. 설계 및 해석

2.1 PMA-WFSM 소개

Fig. 1 (a)는 일반적인 WFSM의 구조를 나타내고 있으며, d축 인덕턴스(L_d)와 q축 인덕턴스(L_q)차이 따른 돌극비(L_q/L_d)를 지니게 된다. 돌극비로 인해 릴럭턴스 토크가 생성되며, 전동기의 총 토크는 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크의 합으로 생성된다. **Fig. 2 (b)**는 PM을 삽입하여 마그네틱 토크를 증가시킨 제안하는 WFSM의 형상을 나타내고 있다. 하지만 PM 삽입에 따른 d,q 축 자기저항의 변화에 의해 인덕턴스가 변동되지만, 돌극비 변화를 최소화하여 마그네틱 토크만을 강화한 모델을 제시한다.



(a) Basic WFSM (b)PMA-WFSM

Fig. 1 Structure of machine.

† 교신저자: 한국교통대학교 철도공학부
(krhlee@ut.ac.kr)

* 한국교통대학교 철도차량운전시스템공학과

** 한국교통대학교 철도운전시스템공학부

*** 시드니공과대학교 전기&데이터 공학부

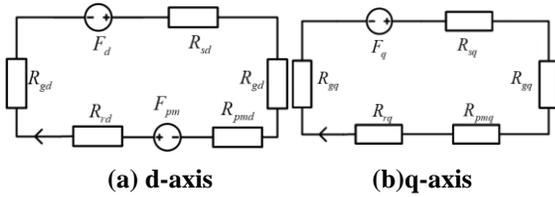


Fig. 2 Magnetic equivalent circuit of PMa-WFSM.

2.2 설계 및 분석

Fig.2의 PM-a WFSM의 자기등가회로를 통해 토크방정식을 수식(1)과 같이 도출할 수 있다.

$$T = 1.5p\{(\Psi_f + \Psi_m)i_a \cos\beta + 0.5(L_q - L_d)i_a^2 \sin 2\beta\} \quad (1)$$

이때 마그네틱 토크항에 PMa에 의한 자속이 추가되었다. 기존 WFSM과 동일한 전류 조건일 때 회전자 치가 포화가 되어 토크가 비선형적으로 나타나게 된다. 따라서 기존에 비해 계자 전류의 감소가 요구된다. 최종적으로 인덕턴스 변화에 따른 돌극비 변동을 최소화하면서 코어는 포화하지 않으며, 기존 WFSM의 목표 출력과 동일하게 5kW로 선정하여 설계를 수행하였다.

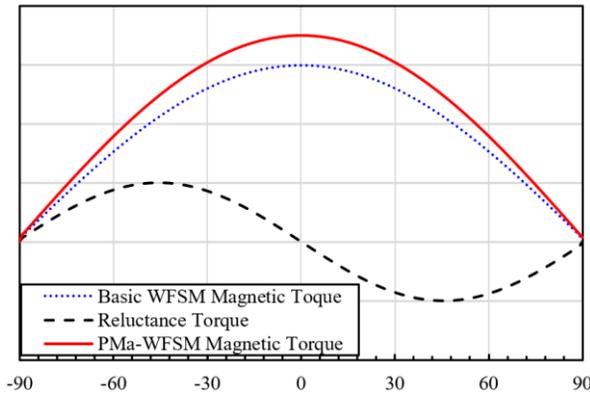


Fig. 3 Torque components.

2.3 WFSM과 PMa-WFSM 성능비교

비교를 위하여 목표 토크를 동일하게 하여 회전속도가 1500rpm 일 때 32Nm으로 선정하였으며, 영구자석을 제외한 설계 변수는 동일하게 설정하였다. 기존 WFSM과 PMa-WFSM의 2D FEM

	WFSM	PMa-WFSM
Copper loss	286.76 W	223.66 W
Core loss	37.40 W	36.43 W
Torque	32.33 Nm	32.21
Torque Ripple	11.15 %	5.74 %
Efficiency	93.99 %	95.11 %

해석을 통해 Table 1과 같이 성능 비교를 수행하였다.

Table 1 Comparison WFSM and PMa-WFSM.

PMa-WFSM의 계자 전류 감소에 따른 copper loss가 기존 WFSM 대비 63.08W 감소하였으며, 전류밀도 또한 42% 감소하였다. 토크 리플은 5.41% 개선되었다. 최종적으로 효율은 1.12% 향상되었다.

3. 결론

본 논문에서는 기존 WFSM의 단점을 보완하고자 PM을 삽입한 WFSM 모델을 설계 및 해석을 수행하였다. 먼저 영구자석에 의한 영향을 자기등가회로를 통해 계산하였으며 이를 통해 d,q 축 인덕턴스와 토크를 구하였다. 또한 FEM 기반 프로그램 MAXWELL을 사용하여 전자계 해석을 수행하였다. 결과적으로 기존 WFSM과 PMa-WFSM의 성능을 비교하였을 때 돌극비의 변화는 없으며, 토크 리플 및 효율 등이 향상되는 것을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 모델을 통해 E-Mobility 용 견인 전동기의 고효율/고효율에 이점이 될 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.RS-2023-00243214)

참고문헌

- [1] C. Wenping (2018) Design and Optimization of a Novel Wound Field Synchronous Machine for Torque Performance Enhancement, *Energies*. 11(8), pp. 2111-2125

- [2] 홍정표. (2013). 권선계자 동기전동기의 개발동향. *오토저널*, 35(10), pp. 31-37.