

Consequent Pole SPM의 출력특성에 대한 연구

민영근*, 강준호*, 김정원*, 김승주**, 김솔***, 이주*
 한양대학교*, 유한대학교***, 한국기계전기전자시험연구원**

A Study on Performance Characteristics of Consequent Pole SPM

Young-Geun Min*, Jun-Ho Kang*, Jung-Won Kim*, Seung-Joo Kim**, Sol Kim***, Ju Lee*
 Hanyang University*, Yuhan University***, Korea Testing Certification**

Abstract - 본 논문에서는 유한요소해석법(FEA)을 이용하여 표면부착형 영구자석 전동기 (Surface Permanent Magnet Synchronous Motor, SPM)와 SPMSM에 Consequent Pole(CP)를 적용한 Consequent Pole Permanent Magnet Synchronous Machine(CPMSM)의 출력특성을 비교하였다. 또한, CPMSM의 영구자석 두께를 주 설계변수로 하여 출력특성을 분석하였고, 동일 출력 대비 영구자석 사용량을 최소화하는 영구자석 두께를 도출하였다.

1. 서 론

에너지밀도가 높은 회토티계 영구자석이 개발됨에 따라 높은 출력밀도를 가지는 PMSM이 개발되고 있다. 하지만 회토티계 영구자석은 고가격의 문제와 원료 정제 과정에서 발생하는 심각한 환경오염 문제가 있다. 또한 회토티 시장은 2000년대 이후, 전 세계 사용량의 90% 이상을 중국에 의존하고 있으며, 중국의 입장에 따른 회토티 가격 폭등 및 공급 불안정 등 PMSM이 갖는 문제점으로 인한 회토티류 사용 저감의 필요성이 대두되고 있다.

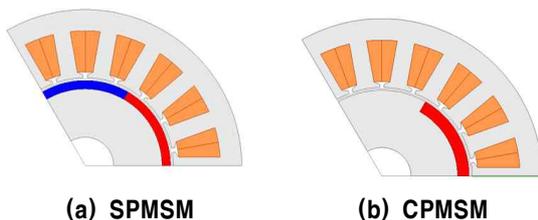
본 논문에서는 SPMSM에 CP를 적용하여 영구자석 사용량을 저감한 전동기를 제안하였다. CPMSM의 자석 두께가 출력을 결정하는 주요 설계변수이며, 영구자석 사용량 대비 출력밀도를 향상시킬 수 있다. 따라서 FEA를 사용하여 영구자석 사용량 대비 출력밀도를 향상시킬 수 있는 최적의 영구자석 두께를 도출하였다.

2. 본 론

2.1 CP가 적용된 SPMSM

CPMSM은 한 극의 영구자석을 철심으로 대체한 전동기이다. SPMSM의 경우 회전자 표면에 자석이 부착되어 d축과 q축의 인덕턴스 차이가 없어 킬터턴스 토크를 이용 할수 없지만, CPMSM는 회전자 형상으로 인한 d축 q축 인덕턴스 차이가 존재하여 킬터턴스 토크를 이용할 수 있다[1].

본 논문에서는 기존 SPMSM과 동일한 회전자/고정자 외경과 적층길이를 가지는 CPMSM의 특성을 분석하였다. CPMSM은 기존 SPMSM 대비 공극자속 밀도가 감소하기 때문에 출력이 감소하게 된다. 따라서 동일한 출력을 만족하기 위해 출력에 영향을 주는 영구자석 두께를 설계변수로 CPMSM의 특성을 분석하였다. 또한, 기존 SPMSM 대비 자석사용량을 감소하면서 동일한 출력을 만족할 수 있는 영구자석 두께를 도출하였다.



<그림 1> SPMSM 및 CPMSM 전동기의 비교

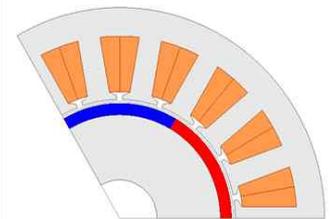
2.2 기본모델과 CPMSM의 토크특성

2.2.1 기본모델의 제원과 토크특성

<표 1>은 기본모델의 설계 제원을 나타내며, <그림 2>는 기본모델을 나타낸다. <표 2>는 유한요소해석을 이용하여 기본모델의 특성을 나타 낸 것이다.

<표 1> 기본 모델의 제원

항목	사양	단위
극수 / 슬롯수	6p / 18s	
회전자 / 고정자 외경	150 / 300	[mm]
적층길이	25	[mm]
정격속도	1300	[rpm]
전류	2.8	[Arms]
공극	1	[mm]
자석두께	5	[mm]



<그림 2> 기본모델

<표 2> 기본 모델의 해석 결과

항목	사양	단위
토크	6.69	[Nm]
토크리플	16.2	[%]
출력	910.77	[W]
효율	93.62	[%]
사용영구자석 부피	18980.5	[mm ³]

2.2.2 CPMSM의 출력특성

<표 3>은 SPMSM의 한 극의 영구자석을 철심으로 대체한 CPMSM의 특성을 나타낸다. 기본모델 대비 영구자석 사용량은 50% 저감되었으나, 토크가 17.2% 감소됨을 확인하였다. 또한, 토크리플은 기본모델 대비 16.2%에서 28.6%로 증가하였다.

<표 3> CPMSM 해석결과

항목	사양	단위
토크	5.53	[Nm]
토크리플	28.67	[%]
출력	753.64	[W]
효율	92.88	[%]
사용영구자석 부피	9490.23	[mm ³]
기본모델 대비 토크 감소율	17.25	[%]

기본모델에 CP를 적용한 결과, 기본모델 대비 영구자석 사용량은 50% 저감 되었으며, 이에 따른 토크감소율은 17.25%임을 확인했다. 하지만 토크리플 16.2%에서 28.6%로 증가함을 확인했다.

2.2.3 자석두께에 따른 특성 분석

<표 4>는 영구자석 두께에 따른 SPMSM과 CPMSM의 출력 특성을 나타낸다. 영구자석 두께가 증가함에 따라 토크 감소율이 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 기존 모델과 동일한 출력 밀도를 가지면서 영구자석 사용량을 감소할 수 있다. <표 5>는 자석두께에 따른 CPMSM의 토크리플을 나타낸다. 토크리플은 자석두께에 따라 증가되는 것을 알 수 있다. 따라서 진동소음을 고려하게 된다면 토크리플을 줄일 수 있는 적절한 자석 두께를 선정해야 한다.

<표 4> 자석두께에 따른 토크특성 분석

공극대비 자석두께	SPMSM 토크[Nm]	CPMSM 토크[Nm]	토크 감소율[%]
5	6.69	5.53	17.25
6	7.00	5.93	15.27
7	7.21	6.25	13.33
8	7.36	6.51	11.49
9	7.50	6.73	10.30

<표 5> 토크리플

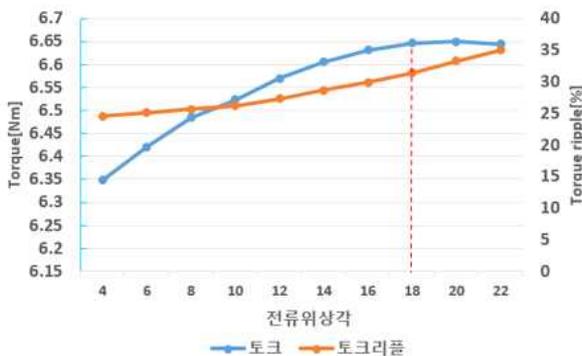
CPMSM	공극대비 자석두께	토크리플[%]
	5	27.90
	6	28.07
	7	28.35
	8	30.04
	9	31.51

2.3 제안된 CPMSM 모델

영구자석 두께에 따른 토크 특성을 분석한 결과 기본모델 대비 영구자석량을 최소화하면서 동일한 출력을 만족할 수 있는 영구자석 두께를 도출하였다. 제안한 CPMSM의 영구자석 두께는 8.5mm로 선정하였다.

2.3.1 전류위상각에 따른 제안모델의 토크특성

CPMSM은 마그네틱 토크와 킬러턴스 토크를 이용하므로 최대토크가 발생하는 전류위상각이 존재한다. 따라서 SPMSM와 달리 최대토크가 발생하는 전류위상각이 존재한다. <그림 3>은 제안모델의 전류위상각에 따른 토크와 토크리플을 FEM를 통해 분석한 결과이다. 분석결과 킬러턴스토크에 의해 전류위상각이 18[deg]에서 최대토크가 발생하였으며, 기본모델인 SPMSM의 토크와 동등한 6.61[Nm]임을 확인하였고, 토크리플은 31.39[%]임을 확인하였다.



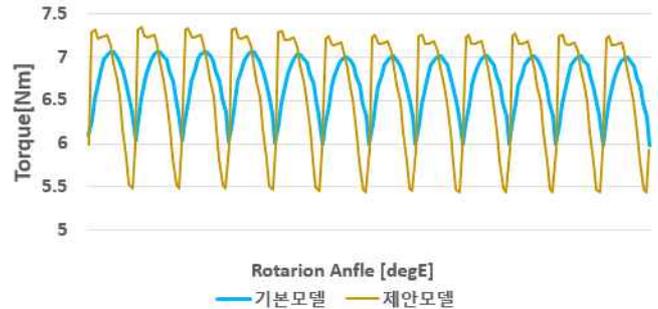
<그림 3> 전류위상각에 따른 토크 및 토크리플

2.3.2 모델선정

기본모델과 동일 기구조건에서 CP를 적용하였으며, 영구자석 두께를 8.5mm 선정하여 동등한 토크대비 영구자석 사용량을 17% 저감하였다.

2.4 기본모델과 제안모델에 대한 결과 비교

<그림 4>는 기본모델과 제안모델의 토크 파형을 나타낸다. 기본모델과 제안모델의 평균토크는 동일하나 제안모델의 토크리플이 증가함을 알 수 있다. <표 6>은 기본모델과 제안모델의 특성을 분석한 것을 나타낸다. 기본모델 대비 제안모델은 동일한 출력밀도를 만족하면서 영구자석 사용량을 약 17% 저감한 것을 알 수 있다.



<그림 4> 기본모델과 제안모델 토크파형

<표 6>는 기본 모델과 제안 모델의 효율과 출력 그리고 영구자석 사용량을 비교하였다. 제안모델은 기본모델과 거의 동일한 출력을 유지하는 수준에서 영구자석 사용량을 약 17% 저감하였다.

<표 6> 기본모델과 제안모델 해석 결과 비교

항목	사양		단위
	기본모델	제안모델	
토크	6.69	6.61	[Nm]
토크리플	16.15	31.39	[%]
효율	93.62	92.9	[%]
영구자석 두께	5	8.5	[mm]
영구자석 감소량	17		[%]

3. 결 론

본 논문은 유한요소해석을 이용하여 SPMSM과 CPMSM의 토크 특성을 분석하여 영구자석 사용량 대비 출력을 향상시켰다. 유한요소해석 결과 제안모델의 출력은 동일하나 영구자석 사용량은 약 17% 감소함을 알 수 있다. 따라서 CP를 PMSM에 적용하게 된다면 가격저감 설계를 할 수 있다. 하지만, 토크리플이 증가되는 단점이 존재하며 이에 대한 연구가 추가적으로 진행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20174030201750)

이 논문은 국토부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업임. (19TBIP-C14 3153-02)

[참 고 문 헌]

- [1] 고상준, 이강석, 채수황, 김승주, 이주, "200W SPMSM의 슬롯형 및 슬롯리스형 출력밀도 비교에 관한 연구", 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 11~13, 2018