

회전자 인버터 내장형 Brushless 동기 전동기 설계

도상화*, 이병화*, 채승희*, 홍정표*, 정은수**, 설승기**
한양대*, 서울대**

Design of Brushless Synchronous Motor with an Inverter Integrated Rotor

Sang-Hwa Do*, Byung-Hwa Lee*, Seung-Hee Chae*, Jung-Pyo Hong*, Eun-Soo Jung**, Seung-Ki Sul**
Hanyang University*, Seoul University**

Abstract - This paper deals with the design of a brushless synchronous motor with an inverter integrated rotor instead of a brush and a slip ring. It is designed for 80kW output power and compared with an induction motor and a permanent magnet synchronous motor of the same specifications. Brushless synchronous motor, induction motor and permanent magnet synchronous motor have the same amount of magnet flux density at an air gap. As a result, the brushless synchronous motor can be reduced volume of motor and power losses comparing to the induction motor.

1. 서 론

회도류 자석을 사용한 영구자석형 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM)는 성능이 우수하고, 고속영역에서의 안전성이 높으며, 단위 무게 당 토크가 크기 때문에 소형 경량화에 유리하여 많은 분야에서 사용되고 있다. 하지만 회도류 자석의 경우 자원의 희소성 때문에 가격이 날로 급등하고 있으며, 매장되어 있는 국가가 한정되어 있어 국내 수급이 불안정한 실정이다. 이에 따라 회도류 영구자석을 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 중에는 기존 매입형 영구자석 동기전동기 등의 효율을 개선하여 영구자석 사용을 지양하는 방법, 페라이트(ferrite)와 같은 저가의 영구자석으로 회도류를 대체하려는 연구가 있다. 그러나 회도류 자석과 비교해 보았을 때, 전자석이나 다른 일반 재료를 사용한 영구자석은 자력이 약하거나 높은 출력을 내기 어렵다는 한계가 있다. 또한 유도 전동기는 영구자석을 사용하지 않는다는 장점이 있지만 일반적으로 무게 당 토크 효율이 좋지 않아 소형 경량화가 어려운 단점이 있다 [1]-[3].

본 논문에서는 이러한 추세를 반영하여 PMSM과 유도 전동기의 단점을 보완한 형태인 Brushless 동기 전동기를 제안하고 이를 PMSM의 특성과 비교해 봄으로써 유용성 및 사용한계를 검토해 보고자 한다 [4]-[6].

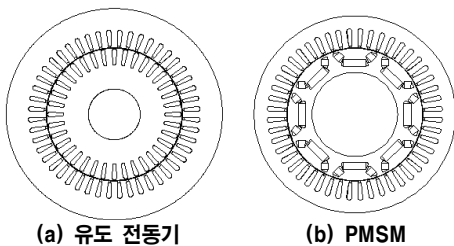
2. 본 론

2.1 전동기의 구동 원리

2.1.1 유도 전동기와 PMSM의 구동 원리

유도 전동기는 비교적 구조가 단순하고 기계적인 견고함이 크기 때문에 가장 널리 사용되는 전동기이다. 구동 원리는 3상 고정자 권선에 교류가 흐를 때 발생하는 회전자기장에 의해서 회전자 도체에 기전력이 발생하면 이에 따라 전류가 흐르게 되어 플레밍의 왼손 법칙에 따라 힘이 발생하여 전동기가 회전하게 되는 방식이다.

PMSM는 비교적 낮은 토크와 효율적인 공간의 사용이 요구되는 응용에 일반적으로 사용된다. PMSM의 구동 원리는 유도 전동기와 유사하지만 고정자의 자기장이 자성 재료에 의해 발생되기 때문에 별도의 계자 여자를 제공할 필요가 없다는 차이점이 있다. 그림 1은 유도 전동기와 PMSM의 단면이다.

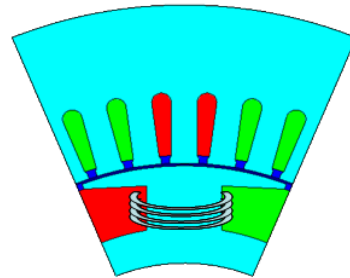


〈그림 1〉 전동기 단면

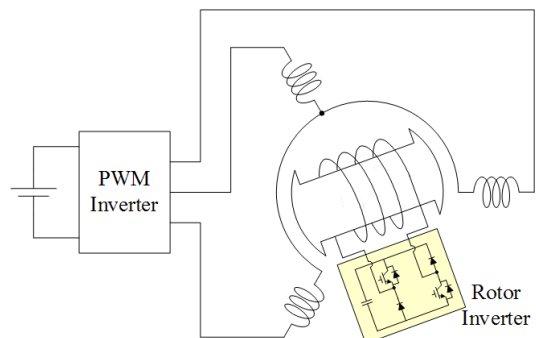
2.1.2 Brushless 동기 전동기의 구동 원리

본 논문에서 제안하는 Brushless 동기 전동기는 PMSM의 회전자 영구자석을 계자 권선으로 대체하여 기자력을 발생시켜 회전하는 원리로서 영구자석을 사용하지 않고도 영구자석형 동기 전동기와 같은 출력을 내면서 유도 전동기보다 소형 경량화 시키기 위한 목적으로 설계하였다. 그림 1은 Brushless 동기 전동기의 1/8 모델 개략도이다.

회전자에 브러시와 정류자를 사용하는 경우 회전할 때 기계적 접촉으로 인해 마찰이 생기고 이로 인한 기계적 마모와 손실이 심한데 Brushless 동기 전동기는 브러시와 정류자를 없애고 회전자 안에 인버터를 삽입해서 기자력을 제어하여 구동하는 원리이다. 그림 2는 회전자 인버터 내장형 Brushless 동기 전동기의 구조를 나타낸 것이다. 전동기의 고정자와 이와 연결된 인버터 회로는 기존의 교류 전동기의 형태와 동일하지만 회전자 내부에 별도의 인버터를 내장하였다. 전동기 구동을 위해 고정자 인버터에서 고주파 전압을 인가하면 회전자 인버터에서는 적절한 제어를 통해 회전자 인버터 직류단 전압을 유지하기 위한 전력을 전달받게 된다.



〈그림 1〉 Brushless 동기 전동기의 개략도



〈그림 2〉 brushless 동기 전동기의 구조

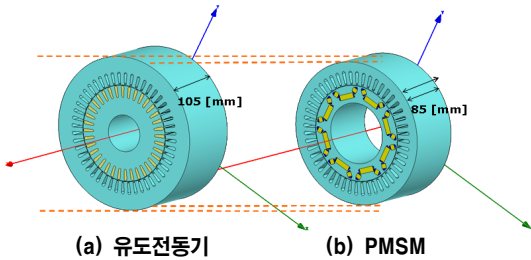
2.2 유도 전동기와 PMSM의 설계 및 특성해석

Brushless 동기 전동기의 유용성을 검토하기 위해 먼저 유도 전동기와 PMSM을 설계하고 이를 토대로 동일 특성을 만족하는 Brushless 동기 전동기를 설계하였다. 80kW의 출력을 가지는 유도 전동기와 PMSM을 유한요소해석 프로그램을 이용하여 설계하였다.

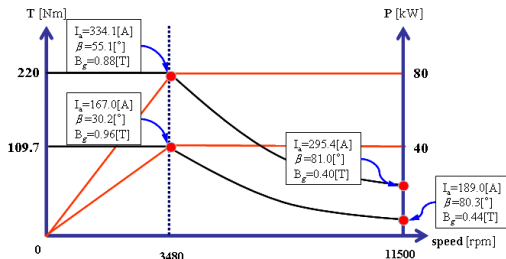
표 1은 설계된 유도 전동기와 PMSM의 사양을 나타낸 것이다. 영구자석을 사용하지 않는 유도 전동기가 PMSM에 비해 회전자 부피당 토크(Torque per Rotor Volume: TRV)가 24.2%가 작고 모터 전체의 부피는 29.7%가 크다는 것을 알 수 있다. 그림 3은 유도 전동기와 PMSM의 3차원 형상이다.

<표 1> 전동기 사양

항 목	유도 전동기	PMSM
극 수 / 슬롯 수	4 / 48	8 / 48
출 력[kW]	80(최대) / 40(연속)	
적층 길이[mm]	105	85
고정자 외경[mm]	250	233
TRV[kNm/m ³]	109.0	135.4
부 피[m ³]	5.15×10 ⁻³	3.62×10 ⁻³



<그림 3> 전동기 형상



<그림 4> PMSM의 토크-속도 곡선

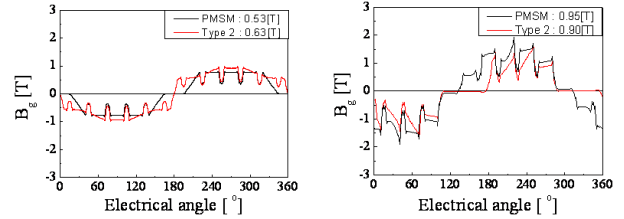
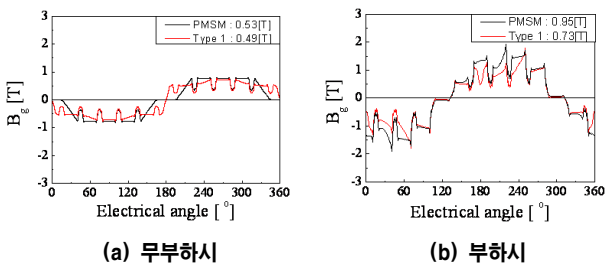
설계한 PMSM의 특성 해석을 수행하여 기자력을 산정하였다. 그림 4는 PMSM의 토크-속도 곡선이다. 특성 해석 결과 공극 자속 밀도가 가장 높은 연속정격, 기저속도를 기준으로 Brushless 동기 전동기의 기자력을 산정하였다. 이 때 기자력은 아래 식 (1)로부터 구할 수 있다.

$$NI = \frac{B_g l_g}{\mu_0} \quad (1)$$

2.3 Brushless 동기 전동기 설계

앞에서 설계한 PMSM을 토대로 Brushless 동기 전동기를 설계하였다. 먼저 전동기를 PMSM과 동일한 사이즈로 설계해 보았다. 특성 해석 결과 자속 포화 현상이 일어났으며 공극 자속 밀도가 낮아서 토크 특성을 만족하지 못하였다. 이를 개선하기 위하여 전동기의 회전자 사이지를 증가시키고 코일의 턴 수와 입력 전류를 변경하였다. 유한요소해석 결과 기자력이 1000[AT]일 때 토크 특성을 만족하였다.

그림 5는 전기각으로 360° 만큼의 공극 자속 밀도를 나타낸 것이다. Type 1은 초기 모델이고 Type 2는 전동기의 공극 자속 밀도를 PMSM 만큼 증가시키기 위해서 회전자의 사이지를 증가시킨 모델이다. (a)와 (c)는 무부하시, (b)와 (d)는 부하시 해석 결과인데 Type 1에 비해서 Type 2의 공극 자속 밀도가 더 크다는 것을 알 수 있다. 표 2는 설계한 Brushless 동기 전동기의 사양이다.



(c) 무부하시 (d) 부하시

<그림 5> 공극 자속 밀도

<표 2> Brushless 동기 전동기 사양

항 목	Type 1	Type 2
적층 길이[mm]	85	85
고정자 외경[mm]	250	250
회전자 외경[mm]	156	176
턴 수[turns]	611	240
입력 전류[A]	1	3.75
극 당 회전자 저항[Ohm]	24	2.5
극 당 동손[W]	24	34.5
회전자 총 동손[W]	192	276

<표 3> 사이즈 및 손실 비교

항 목	유도 전동기	PMSM	Brushless
적층 길이[mm]	105	85	85
고정자 외경[mm]	250	233	250
회전자 외경[mm]	156	156	176
부 피[m ³]	5.15×10 ⁻³	3.62×10 ⁻³	4.17×10 ⁻³
2차측 손실[W]	631	230	276

2.4 특성 비교

표 3을 보면 Brushless 동기 전동기의 부피가 PMSM에 비해서 15% 증가하지만 유도 전동기에 비해서 23.5% 감소하고 2차측 손실은 56%가 감소함을 알 수 있다.

3. 결 론

Brushless 동기 전동기와 PMSM의 특성을 비교해 본 결과 Brushless 동기 전동기가 80kW급 PMSM과 동일 토크를 내기 위해서는 부피가 15% 증가해야 함을 알 수 있다. 그러나 유도 전동기에 비해서는 부피가 23.5% 감소하고 2차측 손실 또한 56%가 감소한다는 이점과 영구자석을 사용하지 않는다는 경제적인 측면에서 볼 때 충분히 유용성이 있다고 볼 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] 이병화, 남혁, 이정중, 방량, 홍정표, 이승형, “단상 유도형 동기 전동기의 Cost 저감 설계”, 전기학회논문지, 제57권 제12호, pp. 2208-2212, 2008.
 [2] 정계우, 이태근, 이정중, 이근호, 홍정표, 김기남, “영구자석 사용량 저감과 최대출력 확보를 위한 HEV 구동용 IPMSM의 형상설계”, 2009 대한전기학회 제40회 하계학술대회, pp. 607-608, 2009.
 [3] T. K. Chung, “A Study on the Design of BLDC Motor Replacing Ferrite Magnet with Rare Earth Magnet”, Journal of Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol 4, No.4, pp. 121-129, 2008.
 [4] S. Nonaka, “Brushless Self-Excited Three-Phase Synchronous Motor Driven by Voltage Source Inverter”, Electrical Engineering in Japan, Vol. 103, No. 4, pp. 81-89, 1983.
 [5] J. Oyama, S. Toba, T. Higuchi, and E. Yamada, “The Characteristics of Half-Wave Rectified Brushless Synchronous Motor”, Proc. of BICEM, 1987.
 [6] S. Nonaka and T. Kawaguchi, “A New Variable-Speed AC Generator System using a Brushless Self-excited Type Synchronous machine”, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, pp. 490-495, 1992.