

소형풍력발전 시스템용 축방향 자속형 영구자석 동기발전기의 특성해석과 실험

유용민, 권병일
한양대학교

Characteristic analysis and experiment of axial flux type permanent magnet synchronous generator for small wind turbine

Yong-Min You, Byung-Il Kwon
Hanyang University

Abstract - This paper presents a axial flux permanent magnet synchronous generator(AFPMSG), which is suitable for both vertical-axis and horizontal-axis wind turbine generation system. The design and construction features of the AFPMSG are reviewed. The characteristic analysis is performed such as cogging torque and e.m.f waveform, with the aid of a 3D finite element method. The experimental results confirm the characteristic analysis developed.

1. 서 론

최근 들어 자원 고갈과 환경오염의 심각성으로 인하여 신재생 에너지에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이중에서도 풍력 에너지를 활용하기 위한 연구가 급속도로 증가하고 있다. 우리나라의 경우 풍속이 높은 육상 지역의 경우 대형 풍력 시스템이 기설치 및 설치 예정이며, 해상 풍력 개발시 육상에 비해 비용이 많이 증가하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 국내의 저속의 풍속을 활용한 소형 풍력 시스템 개발이 필요한 실정이다. 하지만 국내의 소형 풍력 발전 시스템의 경우 대부분 수입에 의존하고 있기 때문에, 자체 기술 개발을 통하여 원천 기술 확보, 수입 대체 및 수출이 필요한 실정이다.

국내의 저풍속 환경에서 사용하기 위한 1kW급 풍력발전 시스템용 발전기로는 코깅 토크가 적은 축방향 자속형 영구자석 동기 발전기가 적합하다. 국외에서는 이러한 축방향 자속형 영구자석 동기 발전기의 특성 해석 및 최적 설계에 대한 연구가 활발히 진행중이다[1]-[2].

축방향 자속형 영구자석 동기 발전기의 구조적인 특성으로 인하여, 정확한 해석을 위해서는 3차원 유한요소 해석이 필요하다. 또한 영구자석의 극과 코일 상의 매칭 시, 기존 형태의 코일 권선 구조로는 영구자석을 제약적으로 사용할 수 밖에 없다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해, 새로운 형태로 연구되고 있는 코일 권선 구조에 대한 특성 해석을 수행하였으며, 이를 위해 3차원 유한요소 해석을 실시하였다. 또한 유한요소 해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여, 실험 결과와 비교하였다.

2. 축방향 자속형 영구자석 동기발전기의 특성해석과 실험

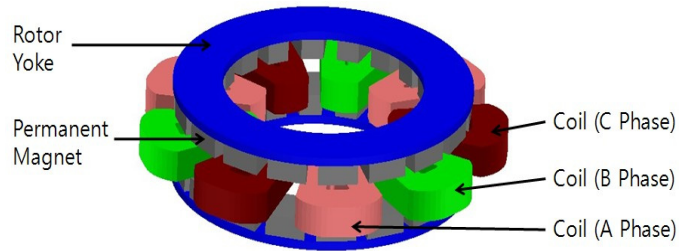
2.1 해석 모델의 구조 및 특성 해석

축방향 자속형 영구자석 동기발전기는 원주방향 자속형에 비해 코깅 토크가 적은 장점이 있으나, 효율이 비교적 낮은 단점을 가지고 있다. 이러한 축방향 자속형 영구자석 동기발전기의 효율 향상을 위한 방법으로 영구자석의 사용량을 극대화하기 위해 새롭게 연구되고 있는 발전기의 구조를 본 논문의 해석 모델로 설정하였으며, 코깅 및 역기전력 등의 특성 해석을 위해 3차원 유한요소 해석을 수행하였다.

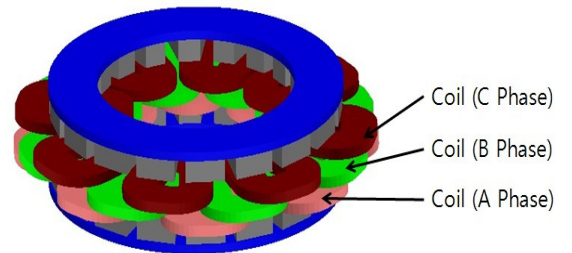
2.1.1 해석 모델의 사양

그림 1은 축방향 자속형 영구자석 동기 발전기의 구조를 나타내고 있다. 회전자는 영구자석과 영구자석을 고정하기 위한 회전자 요크로 구성되어 있으며, 고정자는 각 상의 코일과 코일을 고정하기 위한 플라스틱 수지물로 구성되어 있는 코어리스의 형태이다.

기존에 일반적으로 사용하고 있는 축방향 자속형 영구자석 동기발전기의 코일 권선 구조는 그림 1(a)와 같이 A상, B상, C상의 코일이 원주방향으로 순차적으로 배치되어 있다. 본 논문에서 연구하고자 하는 모델의 코일 권선 구조는 그림 1(b)와 같이 A상, B상, C상의 코일이 축방향으로 각각의 층을 이루며 순차적으로 배치되어 있다. 축방향 배치형 코일 권선 구조는 기존의 원주방향형 코일 권선 구조에 비교하여, 영구자석 극과 코일 상의 조합을 맞추지 않아도 되며, 영구자석의 사용량을 극대화 할 수 있어 그에 따른 효율 향상을 기대 할 수 있다.



(a) 기존의 코일 권선 구조 (원주방향 배치형)



(b) 해석 모델의 코일 권선 구조 (축방향 배치형)

〈그림 1〉 축방향 자속형 영구자석 동기발전기의 코일 권선 구조

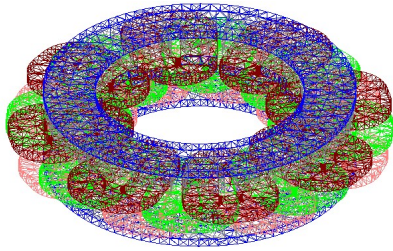
〈표 1〉 해석 모델의 사양

항 목	단 위	사 양	
정격 출력	kW	1.0	
공 극	mm	1.5	
회전자 요크	외 경	mm	Ø163.5
	재 질	-	SUS410
영구자석	잔류자속밀도	T	1.353
	보자력	kA/m	1,063
코 일	도체 외경	mm	Ø0.45
	선간 저항	Ω	5.0

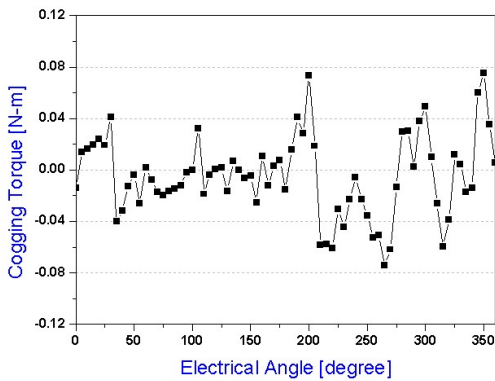
2.1.2 코깅 토크 특성

축방향 자속형 영구자석 동기발전기는 자기회로구조가 3차원의 형태이기 때문에, 2차원 해석으로는 특성 해석을 수행하기 어려우며 신뢰성 있는 결과를 얻기도 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 적용하여 특성 해석을 수행하였다. 해석방법으로는 직접 수렴법을 사용하였으며, 비선형 해석시 수렴 오차는 0.5%로 설정하였다.

그림 2는 해석 모델(그림 1(b))의 특성해석을 위한 3차원 유한요소 해석의 Mesh형상을 나타내고 있다. 전기각 한 주기 동안 회전자를 회전시키면서, 3차원 유한요소 해석을 적용한 코깅 토크 해석을 수행하였으며, 해석 결과 코깅 토크의 최대값은 0.075[N·m]임을 그림 3을 통해 알 수 있다.



〈그림 2〉 3차원 유한요소 해석(Mesh)



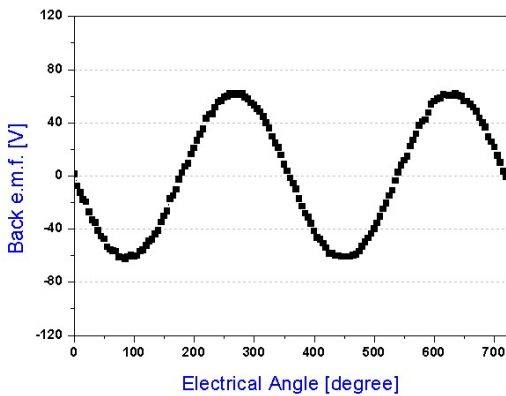
〈그림 3〉 코깅 토크 해석 결과

2.1.3 역기전력 특성

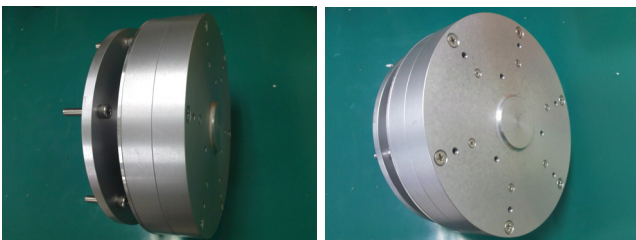
3차원 유한요소해석을 통한 역기전력 해석 결과는 그림 4와 같다. 정격 속도 1,100[rpm]으로 회전자를 회전시켜가며, 상간 역기전력 특성을 전기각 2주기 동안 살펴보았으며, 특성해석결과 역기전력 값의 실효치는 43.32 [Vrms]임을 알 수 있다.

2.2 시작품 제작 및 실험

특성 해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 1kW급 축방향 자속형 영구자석 동기발전기의 시작품을 제작하였으며, 실험을 진행하여 해석 결과와 비교하였다. 그림 5는 제작된 1kW급 축방향 자속형 영구자석 동기발전기의 외관을 나타내고 있다.



〈그림 4〉 상간 역기전력 해석 결과 (1,100[rpm])

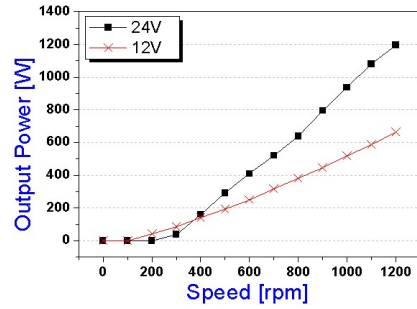


〈그림 5〉 제작된 1kW급 축방향 자속형 영구자석 동기발전기

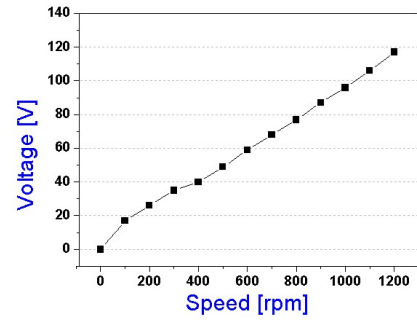
2.2.1 실험 결과

그림 6은 제작된 시작품의 실험 결과를 나타내고 있다. 실험 결과를 통해 부하 전압 24[V] 인가 시, 회전 속도가 1,100[rpm]일때 출력은 1,080[W]로써 정격 출력 1[kW]를 만족하며, 개방전압은 DC 106[V]임을 알 수 있다. 이 때 코일은 Y결선이며 3상 전파 정류기를 사용하였으므로, 상전압의 실효치는 45.32[Vrms]임을 계산을 통해 구할 수 있다.

또한 1,110[rpm]일때 출력이 1,080[W]이므로 정격 토크는 9.37[N-m]이다. 결과적으로 3차원 유한 요소 해석을 통해 얻은 코깅 토크의 최대값은 0.075[N-m]이므로, 최대 코깅 토크는 정격 토크의 약 0.8[%] 수준임을 알 수 있다.



(a) 발전전력



(b) 개방전압

〈그림 6〉 시작품 실험 결과

2.2.2 해석과 실험 결과 비교

표 2는 3차원 유한요소 해석을 통한 해석 결과와 시작품 실험 결과를 나타내고 있으며, 비교 결과 해석과 실험 결과는 약 4.4%의 오차를 가짐을 알 수 있다.

〈표 2〉 해석 결과와 실험 결과 비교

항 목	단 위	상간 역기전력	비 고
해석 결과	Vrms	43.32	1,100[rpm]
실험 결과	Vrms	45.32	

3. 결 론

본 논문에서는 1kW급 풍력발전 시스템용 축방향 자속형 영구자석 동기발전기의 성능 개선을 위한 축방향 배치형 코일 권선 구조를 연구 모델로 설정하여, 3차원 유한요소 해석을 통해 특성해석을 수행하였다. 특성 해석을 통해 코깅 토크, 역기전력 등을 살펴보았으며, 이를 검증하기 위해 시작품 제작 후 시험 결과와 비교하였다.

연구 결과로써 3차원 유한요소 해석 결과와 실험 결과가 비교적 유사함을 알 수 있었으며, 향후 축방향 자속형 영구자석 동기발전기 개발 시 유용한 자료로 활용 될 수 있을것이라 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. F. Chan, and L. L. Lai, "An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System", IEEE Trans. on Energy Conversion. Vol. 22, No. 1, pp. 86-94, MARCH. 2007.
- [2] Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper, Kobus Van der Westhuizen, and Jacek F. Gieras, "Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent-Magnet Generator", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 41, No. 1, pp. 55-64, JANUARY. 2005.