

영구자석 풍력발전기의 특성해석 기법 연구

김재광\*, 정윤미\*, 김기찬\*, 이대동\*\*, 김영달\*  
 한밭대학교\*, 한양대학교\*\*

A Study on Technique for Characteristic Analysis of PM Wind Generator

Jae-Kwang Kim\*, Yun-Mi Jeong\*, Ki-Chan Kim\*, Dae-Dong Lee\*\*, Young-Dal Kim\*  
 Hanbat University\*, Hanyang University\*\*

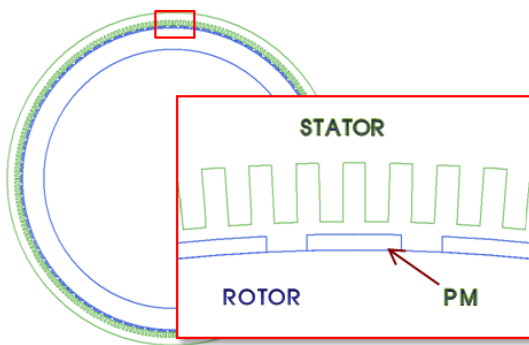
**Abstract** - 본 논문은 영구자석을 사용한 풍력발전기의 특성해석 기법에 관한 기초적인 연구로 시뮬레이션 해석기법을 적용하였다. 해석을 위한 발전기 모델은 SPMSG(Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Generator; 표면 부착형 영구자석 동기발전기)로 선정하였으며 정격출력은 750 [kW], 정격회전속도는 25[rpm]의 사양을 가지는 발전기의 특성에 관하여 해석을 수행하였다. 설계 및 해석 과정에서 영구자석의 형상을 주요 변수로 설정하고 자속밀도의 균일한 분포와 풍력발전기의 정속운전 상태에서 발생하는 전기자 권선의 역기전력 파형을 확인하여 고조파 성분을 저감하는 것에 중점을 두고 특성해석을 수행하였다.

1. 서 론

전 세계적으로 화석연료를 대체하기 위한 신·재생에너지의 개발은 국가적인 사업으로 많은 발전과 성과를 이루고 있다. 이러한 추세에서 한 국가의 신·재생에너지 기술력은 향후 미래 산업발전의 매우 중요한 인자로 작용할 것이다. 에너지 산업에서 풍력을 이용한 재생에너지는 친환경성과 타 에너지원에 비하여 가격 및 기술적 경쟁력이 뛰어나다고 볼 수 있다.

풍력발전의 형식에는 크게 증속기(Gear box)를 사용하는 간접구동방식(Geared type)과 증속기를 사용하지 않고 블레이드의 회전에 의한 회전력으로 직접 발전기 로터를 회전시키는 직접구동방식(Gearless type)의 두 가지 방식이 있다. 증속기를 사용하지 않는 직접구동방식의 풍력발전기는 증속기의 부재로 인한 유지보수 비용의 절감과 시스템 전반의 신뢰도를 높이는 장점을 가지고 있다[1].

본 논문은 직접구동방식의 동기발전기를 시뮬레이션 해석하는 연구로서 SPMSG는 그림 1과 같이 Rotor 표면에 부착된 영구자석이 회전에 의한 자속을 발생하여 Stator 권선이 여자되는 방식으로 전력을 생산하는 발전기이다.



<그림 1> SPMSG의 개략도

특성해석에 사용된 SPMSG의 성능 및 효율을 높이기 위해서 발전기 Rotor에 부착된 영구자석의 형상에 변화를 주면서 자속밀도를 균일하게 분포시키는 설계를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 풍력발전시스템의 특성

풍력발전의 특성에서 중요시 되는 인자는 풍속이라고 할 수 있다. 바람의 유동에너지를 블레이드에 의해서 기계적 회전력으로 변환하고 이 회전력으로 발전기를 구동시킴으로써 전력을 생산하게 되는 것이다. 바람

의 속도에 관한 운동에너지는 식(1)과 같다[2].

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \tag{1}$$

위의 식(1)을 바탕으로 에너지의 출력과 공기입자의 유동 속도와와의 관계를 나타내면 다음의 식(2)로 나타낼 수 있다[2].

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \tag{2}$$

여기에서  $P$  : 출력 [W],  $\rho$  : 공기밀도 [ $\text{kg/m}^3$ ],  $A$  : 블레이드 회전면적 [ $\text{m}^2$ ],  $v$  : 풍속 [m/s]이다. 이러한 수학적 이론을 이용하여 유출할 수 있는 출력계수  $C_p$  (power coefficient)는 바람으로부터 변환 가능한 출력의 비율을 나타내며 다음의 식(3)과 같다[2].

$$C_p = \frac{P}{P_o} = \frac{\frac{1}{4}\rho A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{\frac{1}{2}\rho Av_1^3} \tag{3}$$

출력계수  $C_p$ 의 값은 0.593으로 바람의 유동에너지가 출력으로 변환되는 효율이 59.3 [%]가 된다는 의미를 가지고 있다. 위 식을 바탕으로 설계 및 해석에 적용하는 풍력발전기용 SPMSG의 정격 회전속도를 25[rpm]으로 적용하여 특성을 분석하였다.

2.2 SPMSG의 기본 설계

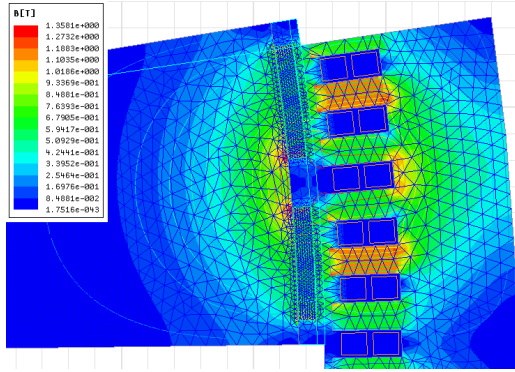
SPMSG의 설계는 시뮬레이션 기법을 적용하여 발전기 설계 및 특성 분석을 수행하였다.

<표 1> SPMSG의 주요 Parameter

Parameter of SPMSG	
Rated Output Power	805 kW
Number of Poles	84
Number of stator slots	252
Slot depth	52 mm
Slot width	20.7 mm
Outer Diameter of Stator	3600 mm
Inner Diameter of Stator	3320 mm
Length of Stator Core	705 mm
Minimum Air Gap	11.5 mm
Inner Diameter of Rotor	2800 mm
Pole Embrace	0.7
Pole Offset	0
Thickness of Magnet	14 mm
Rated rpm	25 rpm
Frequency	17.5 Hz

SPMSG를 적용한 풍력 발전시스템의 주요 사양은 직접구동방식의 수평축 터빈으로 Blade 회전면의 직경이 50 [m], Tower의 높이 50 [m], Rated wind speed : 12.5 [m/s], Cut-in wind speed : 3.0 [m/s], Cut-out wind speed : 25 [m/s] 의 설계 사양으로 제작된 풍력 발전시스템이다. 이와 같은 사양으로 제작된 풍력발전시스템에 적용되는 SPMSG의 주요 Parameter는 표 1에 정리하였다[3].

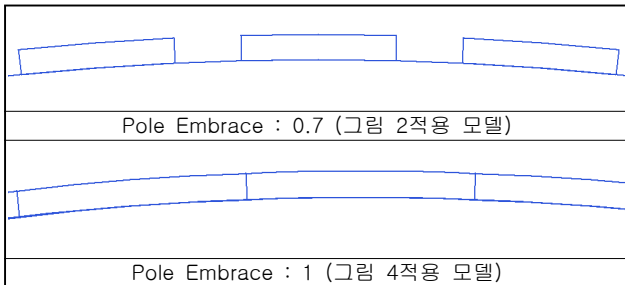
본 논문에서 다루는 풍력발전기 시뮬레이션 설계는 새로운 발전기의 연구 및 개발이 아닌 기존에 개발된 750 [kW]제품에 대한 특성을 파악하고 자속분포 및 성능향상에 대하여 관찰하기 위한 방향으로 진행되었다. 영구자석에 의한 자속분포 및 밀도를 확인하기 위하여 유한 요소법(Finite element Method)을 사용하였으며 그림 2에서 유한요소 mesh 상태를 나타내었다. 또한 mesh 상태에서 자속밀도 분포를 확인하였다.



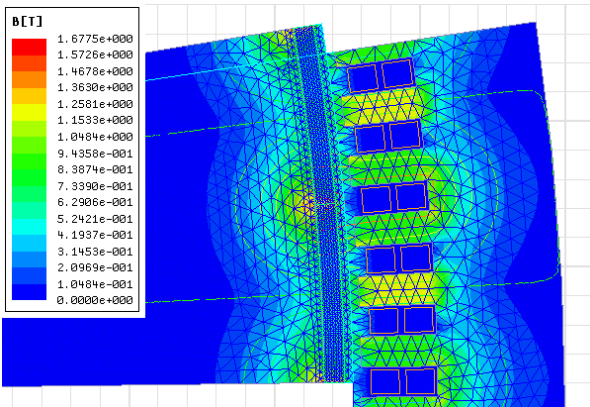
<그림 2> SPMSG의 자속밀도 분포

### 2.2.1 자속분포 향상 기법

SPMSG의 자속분포를 기존의 모델보다 향상시키기 위해서 영구자석의 형상을 변형하여 해석하는 작업을 수행하였다. 자석의 두께는 기존의 값을 취하면서 Pole Embrace, Pole Offset 두 가지 Parameter를 변형하여 기존모델보다 향상된 자속밀도 분포를 나타낼 수 있는 설계 작업을 수행하였다. Pole Embrace 값이 커지게 되면서 자극사이의 간격이 좁아지게 되고 그 값이 1이 되면 N극과 S극이 접촉하게 된다. 그림 3에서는 영구자석의 형상 Parameter가 변형되는 예를 보여주고 있다.

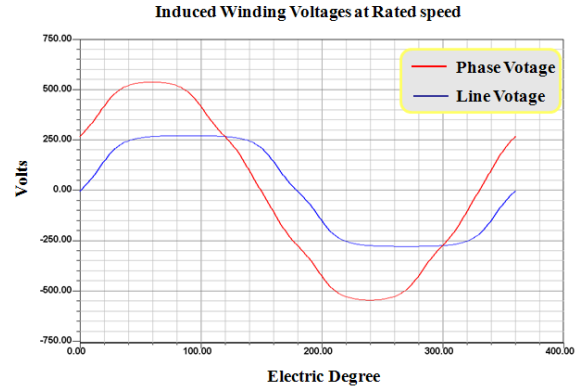


<그림 3> Pole Embrace 변형



<그림 4> Pole Embraced가 10핀 SPMSG의 자속 밀도 분포

그 결과 Pole Embrace 즉, 자석의 너비가 늘어남에 따라 자속 밀도가 고르게 분포되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 4에서는 확인할 수 있듯이 Rotor 표면에 부착된 영구자석에 의한 자속이 Stator 슬롯 영역 전반에 비교적 균일하게 분포되고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 풍력발전기 정속으로 운전되는 상태에서 전기자 권선에 유도되는 역기전력은 Pole Embrace: 0.8인 모델이 안정적으로 나타났다. 4가지 모델 중에서 그림 5와 같이 Pole Embrace: 0.8의 모델이 가장 정현파에 근사한 파형을 나타내어 고조파에 의한 파형 왜곡이 적은 현상을 나타내고 있다.



<그림 5> 정속운전에서 발생한 역기전력

영구자석의 형상을 변형하는 과정에서 Pole Offset의 설정은 0.3 mm로 자속 밀도에 큰 영향을 주지는 못하는 것으로 판단된다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 풍력발전시스템에 적용되는 SPMSG의 시뮬레이션 설계 및 특성해석을 통하여 영구자석의 형상이 발전기 Stator와 Rotor에 미치는 영향과 권선에 을 분석하였다. 발전기의 자속 밀도와 분포에 영향을 미치는 Parameter에는 여러 가지가 있으나 본 해석에서는 Pole Embrace와 Pole Offset의 두 가지 Parameter를 변형하며 해석하였다. 그 결과 영구자석의 너비가 늘어남에 따라 Stator와 Rotor 내부의 자속 밀도가 균형있게 분포됨을 확인할 수 있었다. 하지만 풍력발전기가 25 [rpm]으로 정속운전하는 조건에서 발생하는 역기전력의 고조파성분은 증가하게 되어 실제의 풍력발전기 모델로는 적합성이 떨어지게 된다. 그러므로 자속분포와 역기전력을 동시에 고려하였을 경우 Pole Embrace: 0.8의 모델이 가장 적합하다고 판단된다.

실제 표면 부착형 영구자석 동기발전기를 제작함에 있어서 영구자석의 비율이 늘어나게 되면 기계적 안정성이 떨어지고 영구자석 비용에 따른 경제성을 고려해야 함으로 영구자석 풍력발전기에 접목시키기 위해서는 발전기 특성에 맞는 자성재료와 형상 및 배치를 고려해서 설계에 응용해야 할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 박지성, 안영준, 이철균, 김종욱, 정상용, “MADS를 이용한 직접구동형 풍력발전기 최적설계”, Journal of Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.23, No.12, 48-57, 2009
- [2] 황병선, 최신 풍력터빈의 이해, 도서출판 아진, 2009
- [3] 김동연, 김태훈, 이상우, 정진화, 박현철, “Unson U50 직접구동 영구자석 발전기의 최적화”, 한국신·재생에너지학회 2009년도 춘계학술대논문집, 2009 June 25, 476-479, 2009
- [4] 유대일, “직접구동용 영구자석 풍력발전기 설계 파라미터에 관한 연구”, 한양대학교 석사학위논문, pp48, 2007
- [5] 김기찬, 이주, “영구자석 전동기의 부하각에 따른 토크 및 토크리플 분석을 위한 해석법 연구”, 2009년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2009 July 14, 621-622, 2009