

횡자속형 영구자석 풍력발전기 설계 및 특성해석

황 돈 하*, 강 도 현*, 김 용 주*, 배 성 우**, 최 경 호**, 김 동 희**

*한국전기연구원 산업전기연구단, **영남대학교 전기전자공학부

Design and Performance Analysis of Axial-Flux Permanent-Magnet Generator for Wind Energy System Applications

Don-Ha HWANG*, Do-Hyun KANG*, Yong-Joo KIM*

Sung-Woo BAE**, Kyeong-Ho CHOI**, Dong-Hee KIM**

*Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), **Yeungnam University

Abstract - Permanent-magnet (PM) synchronous generator is feasible for use with a wind turbine, because the generator for wind power requires variable-speed generation, light weight, and high torque. In this paper, basic design and construction of an axial-flux permanent-magnet generator with power output at 60 [Hz], 300 [r/min] for wind energy system is introduced. Finite-element method (FEM) is applied to analyze generator performance. In order to save time, equivalent analysis model is developed. The performance of the proposed generator at no-load and resistive load are compared, and power output and voltage at various speed and loads are compared as well. The results of FE analysis show that this PM generator is a useful solution for small-scale wind-turbine applications.

1. 서 론

최근까지 풍력을 이용한 발전기는 농형 유도발전기, 권선형 유도발전기, 권선형 동기발전기가 대부분 주류를 이루어 왔다. 농형 유도발전기는 구조는 간단하나, 출력 특성상 운전폭이 좁은 단점이 있으며, 권선형 유도발전기는 가변속 정주파수 운전이 가능하고, 회전자 회로를 통한 여자제어로 운전영역의 확장은 가능하나, 발전기 자체의 한정된 출력비[kW/kg] 때문에 부피가 크고, Gear를 필요로 함으로 발전기 지지대 등 튼튼한 하부구조를 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 한편, 권선형 동기발전기는 가변속 정전압 운전이 가능하고, 전력변환 장치에 의한 정전압 정주파수 변환이 가능하므로 프로펠러 선택의 폭이 넓다. 또한, 다극기 제작에 의한 Gearless 풍력발전기가 가능하므로, 유도기에 비해 무게 및 크기를 약 70 [%]까지 줄일 수 있고, 유지보수가 간편하다는 장점을 가지고 있다.

최근에는 영구자석 재료와 설계기술의 발달로 높은 출력밀도를 가지는 영구자석 여자 동기가 산업의 전반에 적용되고 있다. 이를 풍력발전에 적용하여 외부 여자장치가 필요없는, 터빈을 발전기축에 직접 연결한 Gearless형으로 중량과 소음을 줄이고, 또한 고효율의 장점을 이용하여 Radial-flux 동기발전기, Axial-flux 동기발전기, Transversal-flux 발전기 등에 관한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다[1-4].

본 논문에서는 3상 10 [kW], 300 [rpm]급의 영구자석 여자 Gearless형 풍력발전기를 제안하고 설계 및 운전특성 분석결과를 제시한다. 프로펠러의 속도변환 장치인 기어로 인하여 발생되는 소음과 중량으로 인한 문제점을 감소시킬 수 있고, 향후 용량 및 풍량 변화에 적절하게 대응이 가능한 모듈형 풍력발전기를 제안하였다. 영구자석 여자 동기발전기의 구조는 모듈화를 고려하여

Axial-flux type으로 설계하였으며, 영구자석은 에너지 밀도가 높은 NdFeB를 사용하여 부피를 줄였으며, 온도에 따른 감자영향을 고려하여 설계하였다.

실제 제작에 앞서, 제안된 Axial-flux modular 영구자석 풍력발전기의 특성해석을 위하여 유한요소 해석을 이용하여 동특성을 분석하였다. 모델의 구조상 3차원의 과도상태 동특성 해석이 필요하지만, 과도한 시간이 소요되므로 2차원적 등가모델을 개발하여 해석하였다. 발전기 운전특성을 여러 가지 조건에서 분석하기 위하여 부하 및 속도 변화에 따른 전압특성을 확인하였고, 해석 결과치가 실제 계산치와 거의 일치함을 확인하였다.

2. 영구자석 발전기 설계

2.1 발전기 구조

본 연구에서 설계한 영구자석 발전기는 하나의 용량이 10 [kW]급으로 3대를 모듈화 할 경우 30 [kW]까지 가능하도록 하였다. 전체적인 구조는 그림 1에서 나타낸 것처럼 회전자(Magnet)를 사이로 양쪽에 고정자가 2개 부착된 구조로서 Axial-flux 형태로 설계하였다. 화살표는 자속의 방향을 나타내고, 고정자의 코어는 풀 형식으로 되어 있고, 재질은 S-18, 두께 0.5 [mm]의 규소강판을 사용하였고, 와전류 손실을 줄이기 위해 코어를 적층하여 사용하였다. 총 슬롯수는 72개로 하여 매상 매극당 도체수를 1로 하였다. 회전자는 코어없이 24-pole로 극당 1개씩의 영구자석을 포함하고 있다. 영구자석을 지지하는 회전자 구조는 비자성체인 스테인레스를 사용하여 누설되는 자속을 최대한 줄이는 구조를 하였다.

표 1은 발전기에 사용된 영구자석의 사양을 나타낸 것으로서, 외부 형상은 누설자속을 줄이기 위하여 부채꼴 모양으로 설계하였다. 유기전압 파형을 Sin파 형상으로 만들기 위하여 극과 극 사이에 약간의 간격을 두어 설계하였다. 권선방식은 End-winding의 부피를 줄이기 위하여 Single-layer Lap Winding으로 하였다.

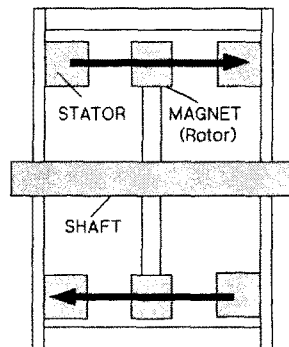


그림 1. 영구자석 풍력발전기의 단면도

표 1. 영구자석의 사양

Magnet thickness	9 [mm]
Br	1.2 [T]
Hic	700 [kA/m]
Recoil permeability	1.05
Demagnetization	-0.05 [%/ °C]
Enable temperature	120 [°C]

2.2 발전기 설계결과

발전기의 초기 형상추정은 기기의 전통적인 설계방식에 의해 결정하였으며, 세부적인 치수결정은 영구자석의 특성과 공극 등을 고려한 쇠교자속으로 결정하였다. 고정자의 턴 수 결정은 정격 회전자속에서 발생하는 Back-EMF와 정격전류를 고려하여 결정하였다. 표 2는 영구자석 풍력발전기의 설계결과를 간략하게 보여준다.

표 2. 영구자석 발전기 설계 결과치

No. of turns	56
EMF	226 [V]
Phase current	15.53 [A]
Max. current density	6 [A/mm ²]
Conductor packing factor	0.65
Conductor diameter	3.5 [mm]
No. of slots/pole/phase	1
No. of slots/pole	3

3. Finite-Element Method (FEM) 해석

3.1 등가 해석모델

본 연구에서 제시한 풍력발전기의 구조는 Axial-flux type으로 2개의 고정자 사이에 1개의 회전자로 구성되어 있으므로 정확한 해석을 위해서는 3차원 과도상태(transient) 해석이 필요하지만, 시간의 절약을 위하여 그림 2와 같이 2차원으로 등가모델을 개발하여 해석을 수행하였다. 등가모델의 치수는 평균값을 구하여 산정되었고, 해석모델의 간략화를 위해 24 pole 중에서 2극을 모델화하여 상하 24개의 Slot 사이를 움직이게 하여 동특성을 분석하였다.

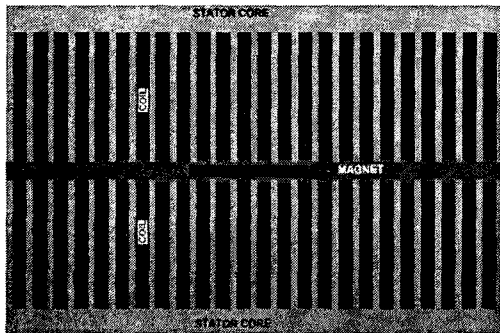


그림 2. PM 발전기의 특성해석을 위한 등가모델

해석모델에 적용한 마그네트의 Radial 방향 길이는 평균하여 계산하였으며, 해석은 상용 전자계 해석 프로그램인 Maxwell을 사용하였다. 고정자 코일에 유겨되는 역기전력을 구하기 위해서 무부하시와 부하시 외부회

로를 구성하여 각각의 전압을 구하였다. FEM 해석을 위한 계의 지배방정식은 Axial-flux type 영구자석 발전기의 경우 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[5-7].

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla \times (\nu \mathbf{B}_r) = 0$$

여기서,

\mathbf{A} : Magnetic vector potential

ν : Magnetic reluctivity

\mathbf{B}_r : Permanent magnetic flux density

3.2 유한요소 해석결과 검토

FEM 해석에 의하여 코일에 유겨되는 전압을 구하기 위해서 가상부하를 외부에 삽입하였다. 본 논문에서 해석된 회로는 무부하 전압을 구하기 위하여 초기 저항치를 크게 하여 저항 양단에 걸리는 전압을 구하였으며, 부하전류의 가변은 외부에 연결된 부하 저항값을 변화시킴으로서 부하전류를 증가시키는 방법으로 하였다.

그림 3은 해석모델에서 구한 3상 무부하 전압파형으로서, 6개의 슬롯에 삽입된 코일에 유겨되는 전압 파형을 나타낸 것이다. 해석된 결과를 실효치로 환산하면 21 [V]로서 설계시 계산한 값을 동일 조건으로 환산했을 때의 19.5 [V] 보다 적게 나타났다. 또한, 전압 파형이 정격속도에서 (+)→(-)로 적절하게 변환되므로 극 간격이 적당함을 알 수 있다.

그림 4는 외부에 정격 저항부하가 연결될 때의 3상 전류 파형으로서, 대체적으로 양호한 sin파가 나타남을 볼 수 있다. 해석모델에서 구해진 전압, 전류 특성을 설계시 계산된 결과와 비교 검토하기 위해서 각각의 데이터를 실효값으로 변환하여 파형을 비교하였다.

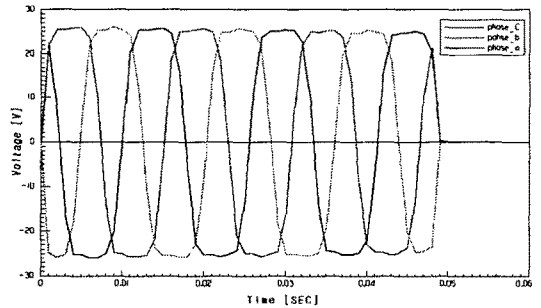


그림 3. 무부하시 6개 코일에 유겨되는 전압

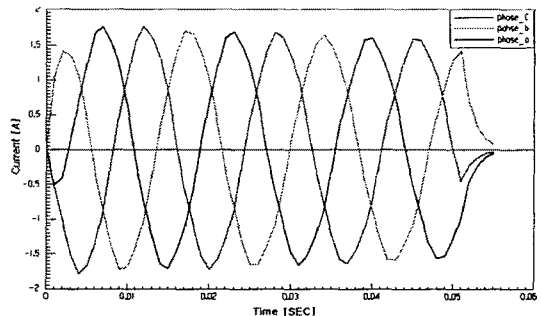


그림 4. 저항부하시 6개 코일에서 인가된 전류

그림 5는 무부하시 회전자속도에 따른 유겨전압을 나타낸 것으로서, 속도변화에 따라 전압은 비례하여 증가함을 볼 수 있고, 정격속도에서 한 상에 유겨된 전압의 실효값은 254 [V]로서 계산된 값을 기준으로 9 [%] 정도 높게 나타났다.

그림 6은 발전기의 전압 변동률을 알아보기 위하여 무부하에서 정격부하로 뒀에 따른 해석결과를 나타낸 것으로서, 전압 변동률이 12 [%] 정도로 나타났다. 이 결과는 계산에 의해 구해진 전압 변동률과 비교하면 6 [%] 정도 높게 나타난 것이다. 이러한 결과는 3차원 모델을 2차원 등가모델로 변환시 발생된 오차로 추정된다.

그림 7은 부하전류의 변화에 따른 발전기의 출력 특성으로서 외부회로의 저항부하를 증가시켜 저항에 흐르는 전류의 변화로 출력을 구한 것으로서, 정격전류 15 [A]에서 정격출력 10 [kVA]가 됨을 알 수 있다.

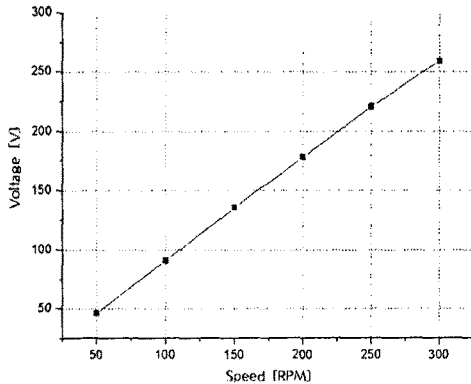


그림 5. 무부하시 회전자 속도에 따른 유기전압

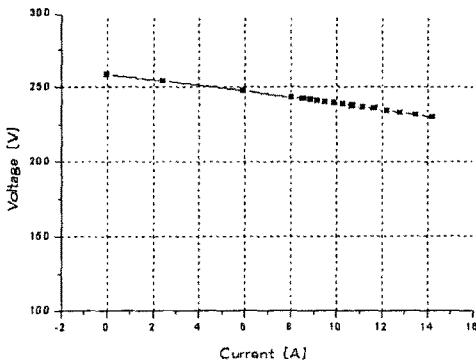


그림 6. 300 RPM에서의 전류변화에 따른 전압변화

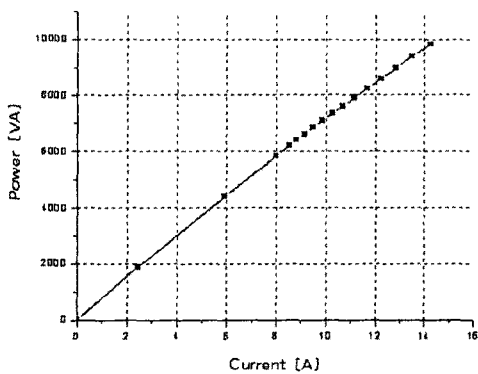


그림 7. 부하 전류에 따른 출력 특성

4. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 풍력발전 시스템에 일반적으로 사용되는 기존의 농형 유도발전기, 권선형 유도발전기 등에 비하여 고효율, 넓은 운전범위, 고효율, Gearless형 구조 등의 장점을 가진 Axial-flux type 영구자석 여자 풍력발전기를 제안하였다. 제시된 풍력발전기는 3상 24극 300 [rpm], 10 [kVA]급으로 설계하였다. 또한, 풍량 가변에 따라 용량을 10~30 [kVA]로 적절히 대응될 수 있도록 모듈형으로 설계하였다. 영구자석은 극당 1개의 구조를 가지며, 에너지 밀도가 높은 NdFeB를 사용하여 발전기의 체적을 줄였다.

실제 제작에 앞서 설계검증과 발전기의 특성을 확인하기 위하여 2차원의 등가 해석모델을 개발하여 FEM에 의해 발전기의 운전특성을 해석하였다. 해석은 각각 무부하와 부하에서 수행하였으며, 무부하시 해석에서는 속도에 따른 권선의 유기전압을 구하기 위하여 외부회로에 높은 저항을 인가하여 저항 양단에 유기되는 전압을 구하였다. 또한, 부하시 특성을 얻기 위해서 외부저항을 가변시켜 정격전류가 흐를 때의 정격전압과, 전류에 따른 발전기 출력을 구하였다. 해석결과 전압 변동률은 12 [%]로서, 계산 및 해석결과에 따른 정격 실효치 전압의 차가 3 [%]로 이내로 양호하게 나타남을 알 수 있었다. 향후 실험을 통하여 얻은 결과와, 계산, 해석된 결과를 비교 검토하여 소용량, 경량의 풍력발전기 형태에 유용하게 사용할 수 있으리라 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. Chen, C.V. Nayar, and L. Xu, "Design and Finite-Element Analysis of an Outer-Rotor Permanent-Magnet Generator for Directly Coupled Wind Turbines", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 36, No. 5, pp. 3802-3809, Sep. 2000
- [2] G. Tsekouras, S. Kiartzis, A.G. Kladas, and J.A. Tegopoulos, "Neural Network Approach Compared to Sensitivity Analysis Based on Finite Element Technique for Optimization of Permanent Magnet Generators", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 37, No. 5, pp. 3618-3621, Sep. 2001
- [3] E. Muljadi, C.P. Butterfield, and Y.H. Wan, "Axial-Flux Modular Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind-Turbine Applications", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 35, No. 2, pp. 831-836, July/Aug. 1999
- [4] B.J. Chalmers, W. Wu, and E. Spooner, "An Axial-Flux Permanent-Magnet Generator for a Gearless Wind Energy System", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, pp. 251-257, June 1999
- [5] T.M. Jahns, "Motion Control with Permanent Magnet AC Machines", Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 8, pp. 1241-1252, Aug. 1994
- [6] F. Caricchi, F. Crecimbin, O. Honorati, G.L. Bianco, and E. Santini, "Performance of Coreless-Winding Axial-Flux Permanent-Magnet Generator with Power Output at 400 Hz, 3000 r/min", IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 34, No. 6, pp. 1263-1269, Nov. 1998
- [7] V. Cingoski, M. Mikami and H. Yamashita, "Computer Simulation of a Three-phase Brushless Self-Excited Synchronous Generator", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 3, pp. 1251-1254, May 1999