

횡자속형 영구자석 풍력발전기의 운전특성 해석

황돈하¹, 강도현¹, 김용주¹, 최경호², 배성우³, 김동희³

*한국전기연구원 산업전기연구단, **경북전문대학, ***영남대학교

Performance Analysis of Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for Wind Power Applications

Don-Ha Hwang¹, Do-Hyun Kang¹, Yong-Joo Kim¹, Kyeong-Ho Choi², Sung-Woo Bae³, Dong-Hee Kim³
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)¹, Kyungbuk College², Yeungnam University³

Abstract - In this paper, wind power system with direct-driven axial-flux type permanent-magnet (PM) synchronous generator, 10 [kVA], 300 [rpm], is presented. In order to analyze the performance of axial PM generator, finite-element (FE) analysis is used, and the 2-dimensional equivalent model is developed. The steady-state and transient-state characteristics are respectively analyzed at no-load and resistive-inductive loads. The test results of driving characteristics are presented as well. The results are very similar to predicted performance of design. Proposed generator is feasible for use with a small-class wind power applications.

1. 서 론

환경문제와 자원고갈에 대비하여 대체에너지지원의 하나로 각광을 받고 있는 풍력발전 시스템에 농형 유도발전기, 권선형 유도발전기, 동기발전기 등이 활용되어 왔으나, 최근 기존 발전기들의 단점을 보완한 새로운 형태의 발전기가 개발되고 있다. 그중에서 대표적인 것으로 영구자석 발전기, 스위치드 리缐턴스 발전기 등이 있다. 특히, 영구자석 소재의 특성향상에 따라 최근에는 수 kW에서 수 MW급 용량까지의 영구자석 발전기가 Radial-flux, Axial-flux 및 Transversal-flux 등의 형태로 활발히 연구되거나 적용되고 있다[1-5].

한편, 종래의 영구자석 동기발전기에는 에너지 밀도가 낮은 페라이트 영구자석이 많이 사용되어 부피가 커지는 단점이 있었으나, 최근에는 온도특성이 향상되고 에너지 밀도가 크게 높아진 NdFeB가 대부분의 영구자석 여자동기발전기에 적용됨으로써 부피 및 중량을 감소시키면서도 고성능의 발전기 개발이 가능하게 되었다[4-8].

본 연구에서는 영구자석 발전기의 이점을 극대화 시킨 NdFeB 영구자석을 사용한 횡자속(Axial-flux) Gearless 형 영구자석 풍력발전기를 제안한다. Axial-flux 영구자석 풍력발전기는 영구자석이 부착된 회전자를 사이에 두고 2개의 공극과 고정자가 있어 축방향 길이가 줄어지는 효과를 가지므로 향후 풍량의 변화에 따른 가변용량에 적합한 모듈형으로 적용이 가능하다. 또한, Gearless 형으로 제작되어 중량 및 소음을 감소시킬 수 있는 장점이 있기 때문에 종래의 농형 유도발전기나 권선형 유도발전기를 대신하여 풍력 발전 시스템에 많이 채용될 것으로 기대된다[7-9].

제안한 횡자속형 영구자석 여자 풍력발전기의 주요사항은 3상, 10 [kVA], 300 [rpm]급이고, 특성실험에 앞서 풍력발전기의 부하가변에 따른 운전특성 분석을 위하여 2차원 등가모델을 활용한 유한요소 해석을 통하여 무부하 및 가변부하 조건하에서 동특성을 구하였다. 무부하 시 해석에서는 회전자 속도에 따라 유기기전력 및 전압

파형을 분석하였고, 저항(R) 및 인더턴스(L) 부하를 변화시켜 수행한 운전특성 해석에서는 속도변화에 따른 전압 및 전류 파형을 구하였다. 또한, 실제 발전기의 운전상태에서 저항부하를 연결하여 무부하 및 정격부하에서의 특성실험을 수행하여 설계 및 해석치와 비교 검토한 결과를 제시하였다.

2. 발전기 설계 및 해석

2.1 발전기 설계

본 연구에서 설계 및 제작한 3상 60 [Hz] 10 [kVA] 영구자석 풍력발전기의 주요사양을 표 1에 나타내었다. 발전기의 구조는 고정자 2개 사이에 회전자가 위치한 Axial-flux 형태의 구조로 되어 있고, 풍량과 부하에 따라 발전기의 최대 발전용량이 조절되어 모듈화가 가능하도록 설계·제작되었다. 특히, 고정자의 구조는 일반적인 전기기기에서 사용되는 일반 적층구조가 아니고, 와전류 손실을 줄이기 위해 코어를 Roll 형식으로 채택하였다. 고정자의 권선은 방사형의 구조를 가지고 있다. 고정자 코어의 재질은 S-18, 두께 0.5 [mm]의 규소강판을 사용하였고, 총 슬롯수를 72개로 하여 매상 매극당도체수를 1로 하였다.

회전자는 코어없이 24극으로 극당 1개씩의 영구자석을 포함하고 있다. 영구자석을 지지하는 회전자 구조는 비자성체인 스테인레스를 사용하여 누설되는 자속을 최대한 줄이는 구조로 설계하였다. 영구자석의 외부 형상은 누설자속을 줄이기 위해 부채꼴 모양으로 하였고, 150 [°C]까지 탈자현상이 발생하지 않는 NdFeB 계열의 자석을 사용하였다. 유기전압 파형이 정현파 형상으로 되도록 극과 극 사이에 약간의 간격을 두어 설계하였다. 권선방식은 End-winding의 부피를 줄이기 위하여 Single-layer Lap Winding으로 하였다. 표 2는 영구자석 발전기의 설계치를 나타내고 있다.

표 1. 풍력발전기의 주요사양

정격용량	10 [kVA]
정격전압	380 [V]
정격회전수	300 [rpm]
극수	24
Type	Y

표 2. 풍력발전기의 설계치

No. of turns	56
EMF	226 [V]
Phase current	15.53 [A]
Max. current density	6 [A/mm ²]
Conductor diameter	3.5 [mm]
No. of slots	72

2.2 발전기 해석

본 연구에서는 해석모델의 간략화를 위하여 2차원적인 등가모델을 개발하여 유한요소 해석을 수행하였다. 전체 발전기의 24극 중에서 2극만 모델링하여 회전자가 상하 24개 슬롯 사이를 이동할 때 유기되는 전압 및 전류를 부하에 따라 해석하였다. 해석모델에 적용한 영구자석의 Radial 방향 길이는 평균하여 계산하였으며, 해석은 상용 전자계 해석 프로그램인 Maxwell을 사용하였다.

그림 1은 유한요소 해석 영역으로 6개의 슬롯에 삽입된 코일에 유기되는 전압을 구하기 위하여 전체 발전기를 간략화시킨 모델과 등가 자속선을 나타내고 있다. 고정자 코일에 유기되는 역기전력을 구하기 위해서 무부하시와 부하시 외부회로를 구성하여 각각의 전압을 구하였다. 유한요소 해석을 위한 계의 지배방정식은 Axial-flux type 영구자석 발전기의 경우 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[9-10].

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

여기서,

\mathbf{A} : Magnetic vector potential

ν : Magnetic reluctivity

\mathbf{B}_r : Permanent magnetic flux density

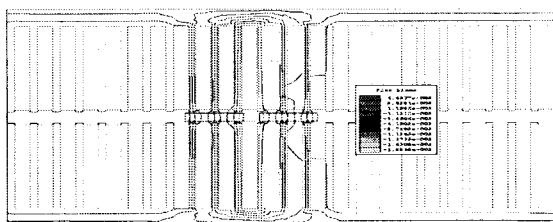


그림 1. 영구자석 발전기의 등가모델

그림 2는 해석모델에서 구한 3상 무부하 전압과 R 및 R-L 부하에서 얻은 속도에 따른 전압을 나타내고 있다. 그림 3은 R 및 R-L 부하 연결시 부하증가에 따른 전압 특성을 나타낸 것으로서, R-L 부하에서는 저출력에서 유기기전력이 많이 나타났으며, 정격부하가 인가됨에 따라 설계치 전압과 유사하게 나타남을 알 수 있다.

그림 4는 R 및 R-L 부하 증가에 따른 발전기의 출력 특성을 나타내고 있다. 외부회로의 저항부하를 증가시켜 저항에 흐르는 전류의 변화로 출력을 구한 것으로서, 부하전류의 변화에 따른 발전기의 출력특성을 의미하고, 정격전류 15 [A]에서 정격출력 10 [kVA]가 됨을 확인할 수 있다.

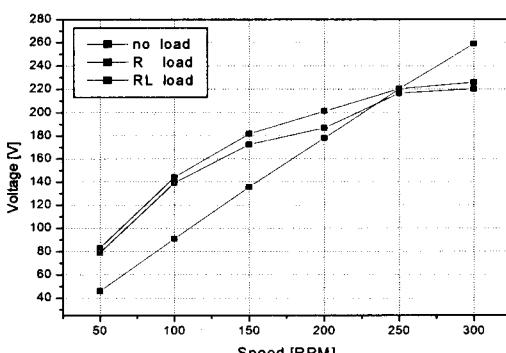


그림 2. 무부하, R 및 R-L 부하시 속도에 따른 상전압

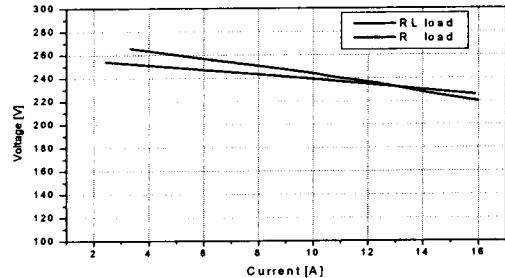


그림 3. R 및 R-L 부하가변에 따른 전압특성

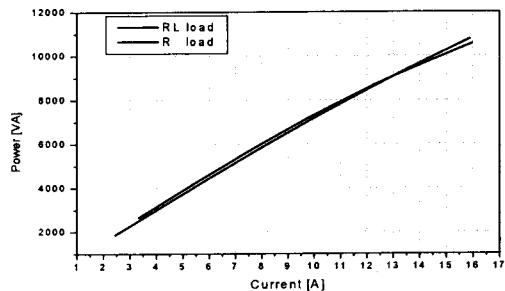


그림 4. R 및 R-L 부하가변에 따른 출력특성

3. 발전기 제작 및 특성실험

3.1 발전기 제작

본 연구에서 실제 제작한 10 kVA급 횡자속형 영구자석 풍력발전기의 고정자 및 회전자의 형상을 그림 5에 나타내었다. 고정자 권선은 Roll 형태의 적층코어에 방사형으로 감겨져 있고, 회전자는 비자성체에 흠을 내어 영구자석을 삽입하였으며, 회전시 영구자석의 이탈을 방지하기 위하여 링을 외부에 설치하였다.

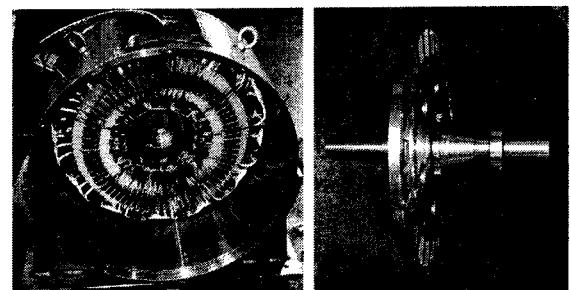


그림 5. 고정자 및 회전자 형상

3.2 발전기 특성실험

그림 6은 발전기의 운전특성 실험을 위한 장치를 보여주는 사진으로서, 가변속 인버터-유도전동기 시스템을 사용하여 속도변화에 따른 특성을 측정하였고, 저항가변이 가능한 부하를 연결하여 부하가변에 따른 발전기의 특성을 분석하였다. 특성실험 결과 및 파형은 Power Analyzer와 Oscilloscope를 사용하여 취득하였다.

그림 7은 무부하시의 정격속도에서 각상의 전압파형을 나타내는 것으로서, 대체적으로 양호한 정현파형임을 확인할 수 있다.

그림 8은 무부하시의 속도-전압 특성, 그림 9는 R부하 연결시의 전압-전류 측정값, 그림 10은 R부하에서 전류가변에 따른 출력특성을 나타내고 있고, 실험 결과치가 대체적으로 해석결과와 유사하게 나타남을 알 수 있다.

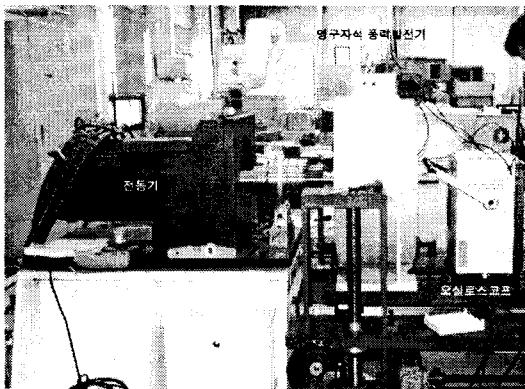


그림 6. 발전기 특성실험 장치

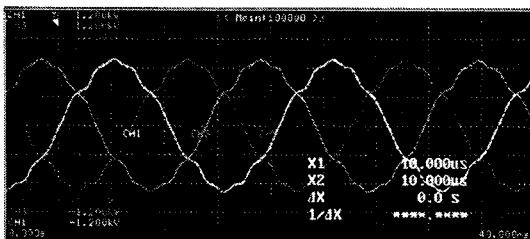


그림 7. 무부하시 속도에 따른 전압파형

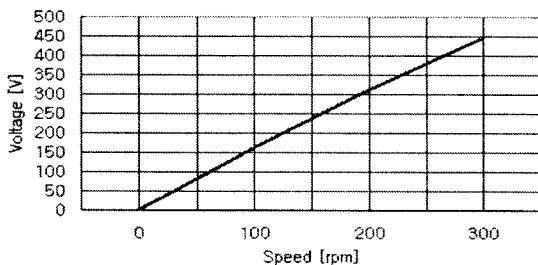


그림 8. 무부하시 속도에 따른 전압특성

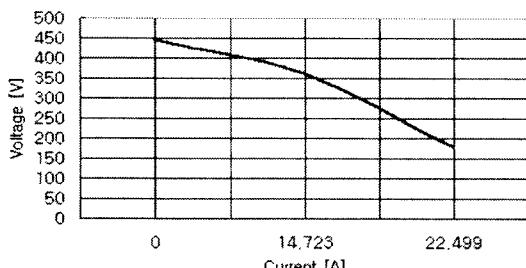


그림 9. R부하시의 전류에 따른 전압특성

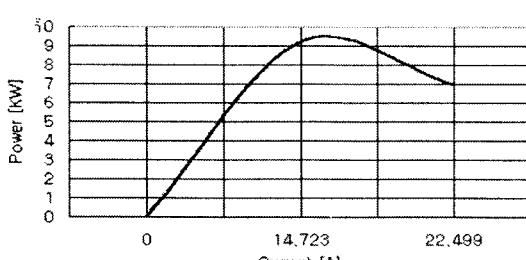


그림 10. R부하시의 출력특성

4. 결 론

본 논문에서는 Gearless형 풍력발전 시스템에 적용이 가능한 10 kVA급 횡자속형 영구자석 여자 동기발전기를 설계, 제작하였고, 해석 및 실험을 통한 운전특성을 고찰하였다. 설계에 따른 특성변화를 분석하기 위하여 유한 요소법을 이용하여 무부하, 전부하, R 및 R-L 부하에서의 운전특성을 해석하였다. R 및 R-L 부하에서의 전압, 전류 및 출력 특성이 설계치와 유사함을 확인하였고, 속도에 따른 전압 변동률은 12 [%]로서 계산 및 해석결과에 따른 정격 실효치 전압의 차이가 3 [%] 이내로 양호하게 나타남을 알 수 있엇다. 또한, 실제 운전상태에서 무부하 및 저항부하 인가시의 특성실험을 통하여 운전특성이 설계치 및 해석결과와 유사함을 확인하였다. 무부하에서 최대 전압오차는 해석결과에 비하여 실험결과가 1~2 %의 오차가 발생하였고, 부하시험시의 출력변화는 해석결과와 1~2 %의 차이으로 Power Analyzer의 순간 출력측정에 기인한 오차범위 이내로 나타났다.

본 연구에서 수행한 해석 및 실험결과로부터 횡자속 영구자석 풍력 발전기의 설계, 제작 및 운전의 전반적인 특성을 알 수 있었고, 향후 풍량 변화가 심한 국내 여건을 고려할 때, 제안한 횡자속 영구자석 동기발전기가 모듈형 직축 구동 소형 풍력발전 시스템에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] P. Campbell, D.J. Rosenberg, and D.P. Stanton, "The Computer Design and Optimization of Axial-Field Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-100, pp. 1490-1497, Apr. 1981.
- [2] W. S. Leung, and J.C.C. Chan, "A New Design Approach for Axial-Field Electrical Machines", IEEE Trans. on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-99, pp. 1679-1685, July/Aug. 1980.
- [3] E. Spooner and A. Williamson, "Modular, Permanent-Magnet Wind-Turbine Generators", Conference Record of IEEE IAS Annual Meeting, San Diego, CA, Vol. 1, pp. 497-502, Oct. 6-10, 1996.
- [4] 황돈하, 박도영, 강도현, 배성우, 최경호, 김동희, "영구자석 형 풍력발전기 설계 및 정상상태 전자계 해석", 2002년도 대한전기학회 (전기기기 및 에너지변환시스템학회) 춘계학술대회 논문집, pp. 6~8, 2002. 4. 26.
- [5] 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.
- [6] A. E. Fitzgerald, C. Kingley, and S. Umans, *Electric Machinery*. New York: McGraw-Hill, pp. 523-524, 1990.
- [7] 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.
- [8] 황돈하, 강도현, 김용주, 배성우, 최경호, 김동희, "횡자속 영구자석 풍력발전기 설계 및 특성해석", 2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp. 949~951, 2002. 7. 10-12.
- [9] 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.
- [10] F. Caricchi, F. Crecimbini, 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 Applications, Vol. 34, No. 6, pp. 1263-1269, Nov. 1998.