

부하가변에 따른 영구자석형 풍력발전기의 운전특성 해석

황 돈하\*, 강도현\*, 김용주\*, 최경호\*\*, 배성우\*\*\*, 김동희\*\*\*

\*한국전기연구원 산업전기연구단, \*\*경북전문대학, \*\*\*영남대학교

Characteristics Analysis of Permanent-Magnet Type Wind Generator with Variable Load

Don-Ha Hwang\*, Do-Hyun Kang\*, Yong-Joo Kim\*, Kyeong-Ho Choi\*\*, Sung-Woo Bae\*\*\*, Dong-Hee Kim\*\*\*  
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), Kyungbuk College\*\*, Yeungnam University\*\*\*

**Abstract** - This paper presents the finite-element (FE) analysis results of a permanent-magnet (PM) generator for wind-power applications under different operating conditions. Finite-element method is applied to analyze generator performance at no-load and load with variable resistance and inductance. The results of FE analysis show that proposed PM generator is a useful solution for small-scale wind-turbine systems.

1. 서론

영구자석 여자형 발전기는 중량 및 소음을 감소시킬 수 있는 장점이 있기 때문에 종래의 농형 유도발전기나 권선형 유도발전기를 대신하여 풍력 발전 시스템에 많이 채용되고 있다. 일반적으로 영구자석 발전기의 사용 주파수는 0~100 [Hz]에서 동작되므로 풍력에 의해 직접 구동되는 구조를 가지고 있다[1-3]. 대부분의 회전자 구조는 표면부착 영구자석 형태의 동기형 발전기로 되어 있으나, 최근에는 영구자석의 활용도를 높이고, 중량을 줄이기 위하여 다양한 회전자 구조의 영구자석 풍력발전기가 연구되고 있다. 또한, 영구자석 소재의 성능이 점차 향상되어 기존 발전기에 비해 에너지 밀도가 높으면서 상대적으로 부피가 적은 풍력발전기도 개발되고 있고, 풍량에 따라 적절히 대응되도록 설계된 모듈형 발전기도 활발히 연구되고 있다[2-6].

영구자석 풍력발전기는 회전자에 부착된 영구자석의 자속 방향이나 고정자의 권선구조에 따라 분류할 수 있다. 특히, 최근에는 Axial-flux형이나 Transverse-flux형이 제안되어 발전기의 에너지 밀도가 크게 높아져 기존의 유도발전기에 비해 중량, 효율 등을 크게 향상시킬 수 있다[3-6].

한편, 풍력발전기에 사용되는 영구자석은 종래에는 페라이트 영구자석이 많이 사용되어 왔으나 에너지 밀도가 낮기 때문에 발전기의 부피가 커지는 단점을 가지고 있다. 최근에는 페라이트 영구자석 보다 에너지 밀도가 크게 높고 온도특성이 개선된 NdFeB가 대부분의 영구자석형 발전기에 적용되어 부피나 중량을 줄이면서도 고성능의 발전기가 가능하게 되었다[3-8].

본 연구에서는 영구자석형 발전기의 이점을 극대화시킨 NdFeB 영구자석을 사용한 Axial-flux, Gearless형 영구자석 풍력발전기를 설계, 제작하였다. 주요 사양은 3상, 10 [kVA], 300 [rpm]급이고, 특성실험에 앞서 풍력발전기의 부하가변에 따른 운전특성의 정확한 분석을 위하여 무부하 및 가변부하 조건하에서 수행한 유한요소 해석결과를 제시한다. 무부하시 해석에서는 회전자 속도에 따라 유기전력 및 전압파형을 분석하였고, 저항(R) 및 인덕턴스(L) 부하를 변화시켜 수행한 운전특성 해석에서는 속도변화에 따른 전압 및 전류 파형을 구하였다.

2. 영구자석 풍력발전기 사양

본 연구에서 설계·제작된 영구자석 풍력발전기는 그림 1에 나타난 설계도와 같이 고정자 2개 사이에 회전자가 위치한 Axial-flux 형태의 구조로 되어 있다. 풍량과 부하에 따라 발전기의 최대 발전용량이 조절되는 모듈화가 가능하도록 설계·제작되었다. 특히, 고정자의 구조는 일반적인 전기기기에서 사용되는 일반 적층구조가 아닌 Roll 형식으로서 고정자의 권선은 방사형의 구조를 가지고 있다. 고정자 코어의 재질은 S-18, 두께 0.5 [mm]의 규소강판을 사용하였고, 와전류 손실을 줄이기 위해 코어를 Roll 형태로 적층하였다. 총 슬롯수를 72개로 하여 매상 매극당 도체수를 1로 하였다. 회전자는 코어없이 24극으로 극당 1개씩의 영구자석을 포함하고 있다. 영구자석을 지지하는 회전자 구조는 비자성체인 스테인레스를 사용하여 누설되는 자속을 최대한 줄이는 구조를 하였다. 표 1은 영구자석 풍력발전기의 주요 사양을 나타내고 있다[3][6].

영구자석의 외부 형상은 누설자속을 줄이기 위하여 부채꼴 모양으로 설계하였으며, 150 [°C]까지 탈자현상이 발생하지 않는 니오디움(NdFeB) 계열의 자석을 사용하였다. 유기전압 파형을 정현파 형상으로 만들기 위하여 극과 극 사이에 약간의 간격을 두어 설계하였다. 권선방식은 End-winding의 부피를 줄이기 위하여 Single-layer Lap Winding으로 하였다.

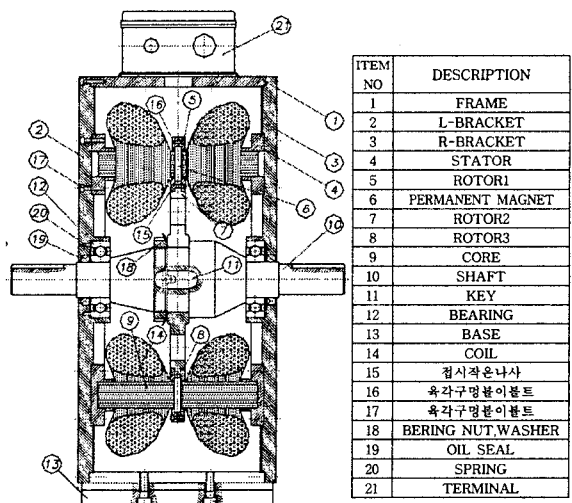


그림 1. 영구자석 풍력발전기의 설계단면

표 1. 영구자석 풍력발전기의 사양

No. of poles	24
No. of phases	3
Phase EMF	226
Peak air-gap flux density	1.2 [T]
Phase currents	15.53
No. of turns	56
Max. current density	6 [A/mm <sup>2</sup> ]
No. of slots/pole/phase	1
No. of slots/pole	3

### 3. 운전특성 해석

#### 3.1 유한요소 해석모델

본 연구에서 제작한 풍력발전기의 구조는 2개의 고정자 사이에 1개의 회전자로 이루어져 있고, 해석모델의 간략화를 위하여 2차원적인 등가모델을 개발하여 유한요소 해석에 적용하였다. 전체 발전기의 24극 중에서 2극만 모델링하여 회전자가 상하 24개 슬롯 사이를 이동시키면서 유가되는 전압 및 전류를 부하에 따라 해석하였다. 해석모델에 적용한 영구자석의 Radial 방향 길이는 평균하여 계산하였으며, 해석은 상용 전자계 해석 프로그램인 Maxwell을 사용하였다. 고정자 코일에 유가되는 역기전력을 구하기 위해서 무부하시와 부하시 외부회로를 구성하여 각각의 전압을 구하였다. FEM 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

$\nu$  : Magnetic reluctivity

$\mathbf{B}_r$  : Permanent magnetic flux density

그림 2는 유한요소 해석영역으로 6개의 슬롯에 삽입된 코일에 유가되는 전압을 구하기 위하여 전체 발전기를 간략화시킨 모델과 등가 자속선을 나타내고 있다. 그림 3은 발전기 운전특성의 FEM 해석을 위해 연결한 외부회로를 나타낸다.

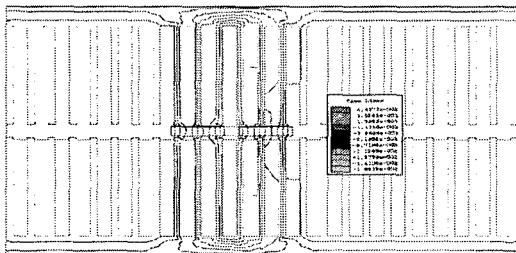


그림 2. 영구자석 발전기의 등가모델

#### 3.2 유한요소 해석결과

무부하시 유가되는 전압을 구하기 위해 외부회로에 초기저항을 크게 하여 양단에 걸리는 전압을 구하였다. 부하특성은 각각 R과 R-L 부하를 인가하여 해석을 수행하였다. 그림 4는 해석모델에서 구한 3상 무부하 전압과 R 부하, R-L 부하에서 얻은 속도에 따른 전압을 나타내고 있다. 그림 5는 각각 R, R-L 부하에서 부하증가에 따른

전압특성을 나타낸 것으로서, R-L 부하에서는 저출력에서 유가전력이 많이 나타났으며, 정격부하가 인가됨에 따라 설계치 전압과 거의 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

그림 6은 R, R-L 부하에 대하여 부하증가에 따른 출력특성을 나타낸 것이다. 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 7은 외부에 정격 저항부하가 연결될 때의 3상 전류 파형으로서, 대체적으로 양호한 정현파가 나타남을 볼 수 있다. 그림 8은 외부에 R-L 부하 연결시 3상 전류 파형을 나타낸 것으로서, 저항부하와 거의 유사함을 알 수 있었다. R 부하인 그림 7과 R-L 부하인 그림 8은 발전기의 총 72개 슬롯중 6개의 슬롯에 삽입된 코일에 흐르는 전류로서, 적절 연결된 총 슬롯을 고려하여 실효치로 환산하였을 경우 정격전류인 15.5 [A]에 근접하는 것으로 나타났다.

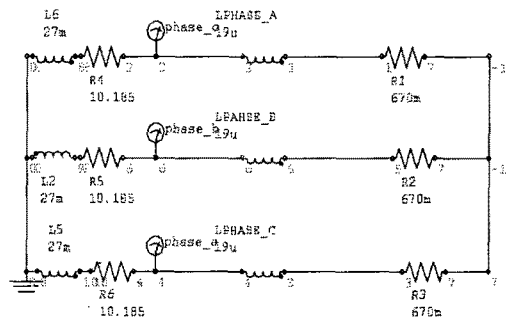


그림 3. 운전특성 해석을 위한 외부회로

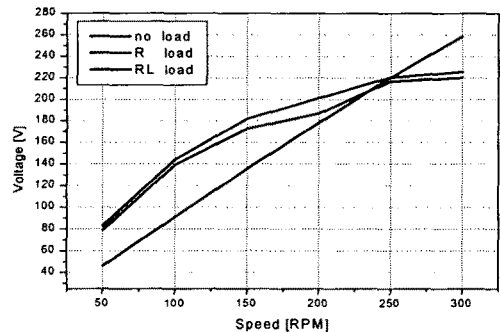


그림 4. 무부하, R 및 R-L 부하시 속도에 따른 전압

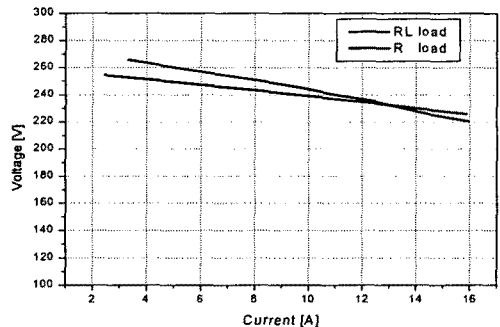


그림 5. R 및 R-L 부하증가에 따른 전압특성

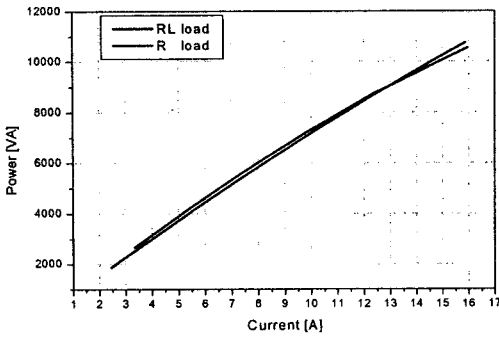


그림 6. R 및 R-L 부하가변에 따른 출력특성

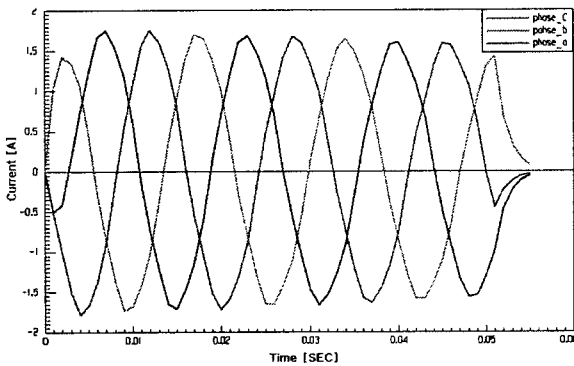


그림 7. 저항(R) 부하시 6개 코일에서 인가된 전류파형

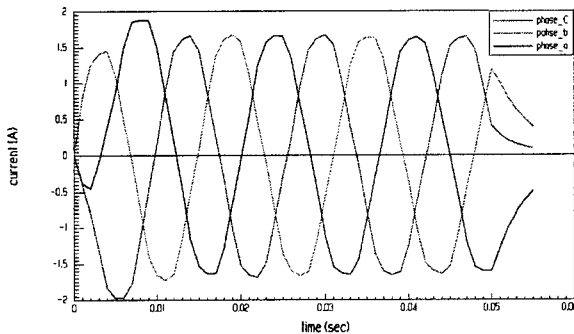


그림 8. R-L 부하시 6개 코일에서 인가된 전류파형

#### 4. 결론

본 논문에서는 특성실험에 앞서 자체적으로 설계·제작된 3상 10 [kVA]급 영구자석형 풍력발전기의 부하 가변에 따른 운전특성을 분석하기 위하여 유한요소법을 이용한 해석결과를 제시하였다. 먼저 무부하 해석을 통하여 속도에 따른 전압특성을 분석하였고, R 및 R-L 부하 가변시의 특성변화를 고찰하였다. R 및 R-L 부하에서의 전압특성은 모두 유사하게 나타남을 알 수 있었으나, R-L 부하에서는 R 부하보다 파형의 일그러짐 현상이 나타났다. 발전기의 출력은 R 및 R-L 부하 모두에서 설계치와 유사하게 나타남을 확인하였다. 전압 변동률은 12 [%]로서, 계산 및 해석결과에 따른 정격 실효치 전압의 차이가 3 [%] 이내로 양호하게 나타나므로 소용량, 경량

의 풍력발전기 형태에 유용하게 사용할 수 있으리라 기대된다. 본 연구에서의 운전특성 해석결과는 향후 실험시 부하변화에 따른 발전기의 특성변화 예측과 실제 다양한 부하 적용시 발전기의 특성을 분석할 수 있음을 확인하였다. 향후 모델 변화와 형상 변화시 영구자석 풍력발전기의 설계 및 특성해석 시에 유용하게 적용될 것으로 기대된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 황돈하, 박도영, 강도현, 배성우, 최경호, 김동희, "영구자석형 풍력발전기 설계 및 정상상태 전자기 해석", 2002년도 대한전기학회 (전기기기 및 에너지변환시스템학회) 춘계 학술대회 논문집, pp. 6-8, 2002. 4. 26.
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 황돈하, 강도현, 김용주, 배성우, 최경호, 김동희, "횡자속형 영구자석 풍력발전기 설계 및 특성해석", 2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp. 949-951, 2002. 7. 10-12
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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