

영구자석형 풍력발전기 설계 및 정상상태 전자계 해석

황돈하* · 박도영* · 강도현* · 배성우** · 최경호** · 김동희**
 한국전기연구원 Mechatronics연구그룹*, 영남대학교 대학원 전기공학과**

Design and Steady-state Electromagnetic Analysis of a Wind Energy Generator with Permanent Magnet

Don-Ha HWANG* · Doh-Young PARK* · Do-Hyun KANG*
 Sung-Woo BAE** · Kyeong-Ho CHOI** · Dong-Hee KIM**

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

Abstract - This paper presents the design and finite-element(FE) analysis of an axial-flux permanent-magnet synchronous generator using neodymium-iron-boron (NdFeB) magnets for directly coupled wind turbines. For the high energy density and light weight, an axial-flux permanent-magnet(PM) generator type is used. The simple magnetic equivalent circuit approach is used for initial design iteration, and the finite-element method is applied to analyze the detailed characteristics.

1. 서 론

최근 전세계적으로 환경문제와 자원고갈에 대비하기 위한 태양열, 연료전지, 수력 및 풍력 등의 대체에너지 개발이 활발히 이루어지고 있다. 그 중에서도 풍력발전은 다른 대체에너지와 비교하여 유훈물질의 방출이 없으면서 비교적 경제성이 있다고 판단되기 때문에 가장 큰 비중을 차지하리라 예상된다. 풍력을 이용한 발전기로서 최근까지는 유도발전기, 외부 여자방식의 동기발전기, 스위치드 릴럭턴스 발전기와 영구자석을 이용한 발전기 등이 대표적으로 개발되어 왔다. 특히 영구자석을 이용한 발전기로는 외부 여자장치가 필요없고, 고효율의 장점을 이용하여 Radial-flux 동기발전기, Axial-flux 동기발전기, Transversal-flux 발전기 등으로 연구되거나 제작되어 왔다.

한편, 풍력 발전설비에 있어서 발전기는 풍차 타워 위에 설치되므로 구조물의 지지를 경감시키지 않으면서 고효율 발전기가 요구된다. 그러나, 기존 대부분의 발전기 형상은 기어를 이용한 프로펠러의 속도를 저감하여 풍력 에너지를 발전기에 전달하였다. 따라서 기어의 사용으로 인한 노이즈, 진동문제, 유지보수와 무게 등으로 인한 전체 시스템 비용의 증가를 가져왔다. 따라서 최근에는 기어가 없는 풍력-발전시스템에 대한 연구에 관심을 집중하고 있다[1-3].

본 연구에서는 프로펠러의 속도변환 장치인 기어로 인하여 발생하는 문제점을 없애고, 경제성이 있고 고효율의 풍력 발전시스템으로서 Gearless형 영구자석 여자 동기발전기를 새롭게 설계하였고, 그 해석결과를 제시한다. 제안된 풍력발전기에 사용된 영구자석은 에너지 밀도를 높이기 위하여 NdFeB를 사용하여 3상 24극 10 kVA급으로 설계하였다. 특히, 영구자석의 활용도를 높이기 위하여 2개의 고정자 사이에 회전자가 놓여진 횡자속형(Axial-flux Type)으로 설계하였다. 실제 제작에 앞서 설계검증과 성능확인을 위하여 정상상태에서 발전기 내부의 자속밀도 분포와 전기자 권선에 유기되는 유기기전력 등을 계산하기 위한 2차원 유한요소법을 이용한 전자계 해석결과를 제시하였다.

2. 영구자석 풍력발전기 설계

2.1 발전기 설계사양

본 연구에서 설계된 풍력발전기의 회전자는 코어없이 24-pole로서 극당 1개씩의 영구자석을 포함하고 있다. 영구자석은 NdFeB를 사용하였고, 영구자석의 감자를 고려하여 내열성이 뛰어난 재료를 사용하였다. 영구자석을 지지하는 회전자 구조는 비자성체인 스테인레스를 사용하여 누설되는 자속을 최대한 줄이는 구조를 채택하였다.

고정자 코어는 Roll 형식으로 구성하고, 와전류 손실을 줄이기 위해 코어를 적층하여 사용하였다. 또한 회전자 사이를 두고 양쪽에 2개가 부착된 구조인 Axial-flux Type으로 설계하였고, 권선은 2개의 고정자에 직렬로 연결되어 유기전압이 합쳐지는 형식으로 설계되었다. 권선방법은 Endwinding의 부피를 줄이기 위하여 Double-layer Lap Winding으로 하였고, 코어재질은 두께 0.5 (mm)의 S-18을 사용하였다. 표 1과 표 2에서는 본 연구에서 설계한 영구자석 풍력발전기의 전기적 인 사양과 사용된 영구자석의 사양을 나타내고 있다.

표 1. 발전기의 설계사양

Rated power	10000 [VA]
Rated speed	300 [rpm]
Rated voltage	380 [V]
No. of poles	24
No. of phases	3
Type	Axial
Phase connection	Y

표 2. 영구자석의 사양

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

2.2 발전기의 구조

영구자석 풍력발전기의 초기 형상추정은 전기기기의 전통적인 설계방식에 의해 결정하였으며, 세부적인 치수결정은 영구자석의 특성과 공극 등을 고려한 쇠교자속으로 결정하였다. 고정자의 턴수 결정은 정격 회전수에서 발생

되는 EMF와 정격전류를 고려하여 결정하였다.

그림 1에서는 설계된 발전기의 구조를 나타내고 있으며, 고정자 2개 사이에 회전자 위치하고 있다. 영구자석 1개에 대한 자속의 방향은 화살표와 같이 나타남을 보여주고 있다.

표 3은 설계된 발전기의 권선 치수와 계수를 보여주고 있으며, 표 4에서는 영구자석의 상세 형상을 나타내었다.

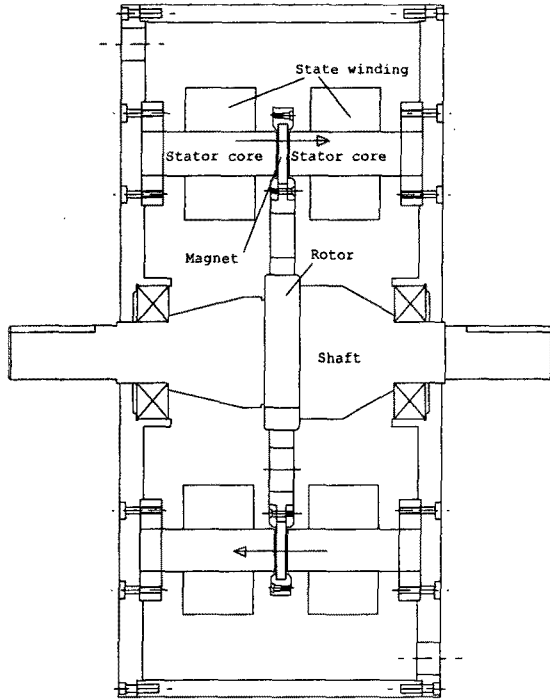


그림 1. 풍력발전기의 단면도

표 3. 권선 사양 및 계수

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

표 4. 영구자석의 형상

Magnet thickness	9 [mm]
Magnet outer arc length	44.19 [mm]
Magnet inner arc length	30.05 [mm]

3. 정상상태 전자계 해석

3.1 유한요소 해석

본 논문에서 제안한 발전기의 구조는 2개의 고정자와 1개의 회전자, 즉 공극(Air-gap)이 2개로 된 복잡한 구조로서 정확한 유한요소(FE) 해석을 위해서는 3차원 과도상태(transient) 해석이 필요하지만, 시간절약을 위하여 2차원적으로 등가모델을 개발하여 FE 해석을 수행하였다. 발전기의 형상 변형은 표 4에 나타낸 영구자석의 Radial 방향 길이의 평균에서 계산하였으며, 해석은 상용프로그램인 Flux 2D를 사용하였다. 정격속도에서 외부회로를 연결하여 무부하시 유기되는 역기전력을 구하였다. Axial-type의 영구자석 발전기의 Magnetic Field 방정식은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[3-5].

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

여기서,

\mathbf{A} : Magnetic vector potential

ν : Magnetic reluctivity

\mathbf{B}_r : Remanent magnetic flux density

그림 2는 에너지 변환이 발생하는 공극에서의 자속밀도를 알기 위하여 외부 입력원으로는 영구자석만 인가하여 자속의 분포를 나타낸 것이다. 또한 3차원적인 형상을 2차원적으로 나타내기 위하여, x축 방향의 영구자석 길이의 상부와 하부의 평균길이에서 나타내었다. 그림 2의 해석결과로부터 그림 3과 같이 공극에서의 자속밀도를 알 수 있다. 그림 3은 공극 자속밀도를 나타낸 것으로서, 공극에서 실효치 0.51 T(설계치 : 0.446 T)의 자속밀도가 나타남을 볼 수 있다. 그림 4는 공극 자속밀도를 고주파 스펙트럼 분석한 것을 보여주고 있다. 발전기의 슬롯 설계에서는 고정자의 슬롯에 의한 공극 자속의 고조파가 존재하므로 이를 고려해야만 한다. 본 논문 에 적용된 형상의 경우, 기본파를 기준으로 하였을 때 3,5,7고조파가 각각 22, 11, 18 [%]로 나타남을 보여주고 있다.

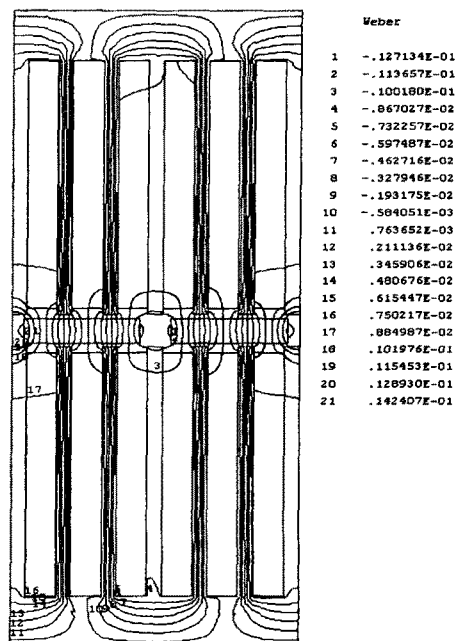


그림 2. 무부하시 자속 분포도

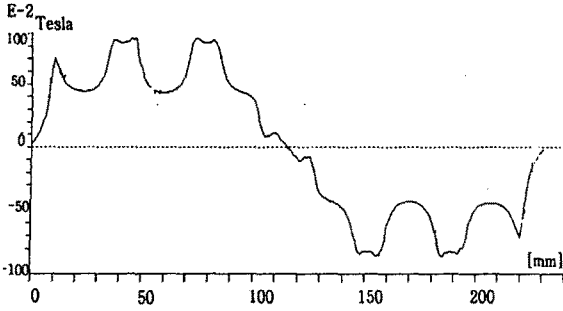


그림 3. 공극에서의 자속밀도

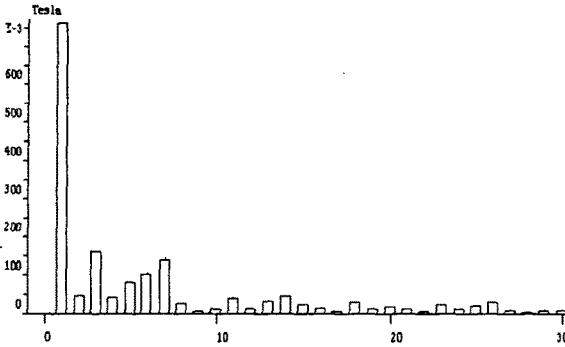


그림 4. 공극 자속밀도의 고조파 스펙트럼

3.2 해석결과 검토

발전기의 전자계 해석에서 유기기전력은 동적인 상태에서만 구해질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 2차원적 모델의 시간간격을 줌으로서 자속의 변화를 유도하였고, 이때 고정자에서 유기되는 전압을 구하는 Transient 해석방법으로 계산하였다.

그림 5는 정격속도에서의 무부하시 유기되는 기전력을 구하기 위한 해석모델 영역을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 상하의 고정자 슬롯을 고정시키고 회전자의 영구자석을 정격속도로 좌측에서 우측으로 이동시킬 때 고정자에 유기되는 전압을 해석하기 위한 것이다.

그림 6은 FE 해석결과로서 6개의 슬롯과 2극의 회전자에서 나타난 1상 전원을 구한 후, 실제 설계시 계산된 유기기전력과 FE 해석을 통해서 구해진 값을 비교하여 나타내었다. 6개 슬롯에 유기되는 기전력은 전체 발전기의 권선과 직렬로 되어 있으므로 실제 슬롯 수 만큼 배수하여 구해진 결과이다.

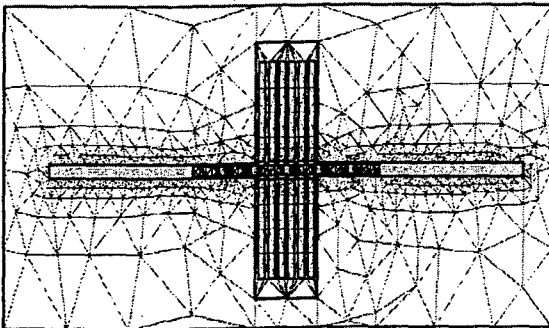


그림 5. 유기기전력 해석모델

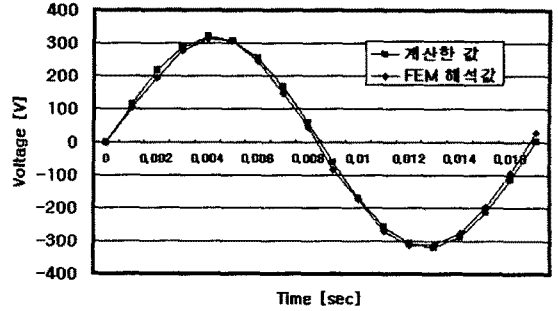


그림 6. 계산 및 FE 해석시의 전압파형

4. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 풍력 발전시스템에 적합한 Gearless형 영구자석 여자 동기발전기를 새롭게 제안하여 설계 및 해석결과를 제시하였다. 제안한 발전기는 3상 24극 10 kVA급으로 설계되었다. 특히 영구자석의 활용도를 높이기 위하여 2개의 고정자 사이에 회전자가 놓여진 Axial-flux Type으로 설계하였다.

실제 제작에 앞서 설계검증과 성능확인을 위하여 정상 상태에서 발전기 내부의 자속밀도 분포와 전기자 권선에 유기되는 유기기전력 등을 계산하기 위한 2차원 유한요소(FE) 기법을 이용한 전자계 해석을 수행하였다. FE 해석결과, 발전기의 유기기전압이 설계치와 유사한 값으로 나타남을 확인하였다.

향후 3차원 과도상태 해석 등을 통한 성능해석이 추가적으로 수행되어야 하고, 제작 및 실험을 통하여 풍력발전 시스템에 적용이 가능함을 증명할 예정이다.

(참고 문헌)

- [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. 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 Ind. Appl., Vol. 35, No. 2, pp. 831-836, July/Aug. 1999
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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