

횡자속형 영구자석 풍력발전기의 정상 및 과도상태 특성해석

황돈하* · 강도현* · 김용주* · 최경호** · 배성우*** · 김동희***

한국전기연구원 산업전기연구단*, 경북전문대학**, 영남대학교 전기전자공학부***

Analysis of Steady and Transient-State Characteristics of Axial-Flux Permanent-Magnet Wind-Turbine Generator

D.H. Hwang*, D.H. Kang*, Y.J. Kim*, K.H. Choi**, S.W. Bae***, D.H. Kim***
Korea Electrotechnology Research Institute*, Kyungbuk College**, Yeungnam Univ.***

ABSTRACT

The paper discusses characteristics of an axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system which aims to be satisfied with variable operating conditions.

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 at variable load. The results of FE analysis show this generator is feasible for use with a wind turbine.

1. 서 론

풍력을 이용한 발전기는 농형 유도발전기, 권선형 유도발전기, 권선형 동기발전기가 대부분 주류를 이루어 왔으나, 구조 및 중량의 제약이 존재하였다. 최근 영구자석 재료와 설계기술의 발달로 높은 출력밀도를 가지는 영구자석 여자 동기발전기가 산업의 전반에 적용되고 있다. 이를 풍력발전기에 적용하여 외부 여자장치가 필요없고, 터빈을 발전기 축에 직접 연결한 Gearless형으로 중량과 소음을 줄이고, 또한 고효율의 장점을 이용하여 Radial-flux 및 Axial-flux 동기발전기, Transversal-flux 발전기 등에 관한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다[1-3].

동기형 발전기의 회전자 구조는 대부분 표면부착 영구자석형으로 되어있으나 최근에는 영구자석의 활용도를 높이고, 중량을 줄이기 위하여 다양한 회전자 구조의 영구자석 풍력발전기가 연구되어지고 있다. 또한, 영구자석의 소재도 점차 성능이 향상되

어 기존의 풍력발전기에 비해 에너지 밀도가 높으면서 상대적으로 부피가 적은 풍력발전기도 개발되고 있다. 또한 풍량에 따라 적절히 대응되도록 설계된 모듈형 발전기도 연구되고 있다[2-6].

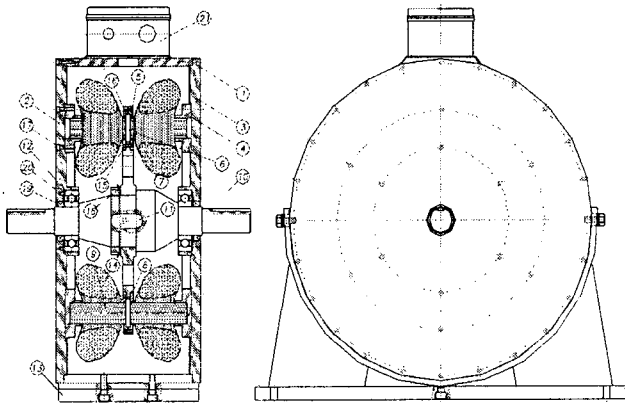
본 논문에서는 3상 10 [kVA], 300 [rpm]급의 영구자석여자 Gearless형 풍력발전기를 제안하고 설계 및 운전특성 분석 결과를 제시한다. 프로펠러의 속도변환 장치인 기어로 인하여 발생하는 소음과 중량으로 인한 문제점을 감소시킬 수 있고, 향후 용량 및 풍량 변화에 적절하게 대응이 가능한 모듈형 풍력발전기를 제안하였다. 영구자석 여자 동기발전기의 구조는 모듈화를 고려하여 Axial-flux type으로 설계하였으며, 영구자석은 에너지 밀도가 높은 NdFeB를 사용하여 부피를 줄였으며, 온도에 따른 감자영향을 고려하여 설계하였다.

실험에 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. 해석은 무부하 및 부하에서 각각 수행하였다. 무부하시 해석에서는 회전자 속도에 따라 유기기전력 및 전압파형을 얻었고, 부하해석에서는 속도 변화에 따라 전류, 전압 파형을 구하였다. 또한, 운전특성 해석은 저항(R) 부하와 인덕턴스(L) 부하의 변화에 따라 특성을 분석하였다.

2. 영구자석 풍력발전기 설계 및 제작

본 연구에서 설계한 영구자석 풍력발전기는 하나의 용량이 10 [kVA]급으로 3대를 모듈화 할 경우 30 [kVA]까지 가능하도록 하였다.

발전기의 전체적인 구조는 그림 1에서 나타난 것처럼 회전자 사이로 양쪽에 고정자 2개가 부착된 형식의 Axial-flux 형태로 이루어져있고, 권선은 2개의 고정자에 직렬로 연결되어 유기전압이 합쳐지는 형식으로 설계되었다. 권선방법은 End-Winding의 부피를 줄이기 위해 Single-layer Lap Winding으로 하였다. 설계된 영구자석 풍력발전기의 주요 사양을 표 1에 나타내었고, 표 2는 영구자석 발전기의 권선사양 및 계수를 나타낸다.



ITEM NO	DESCRIPTION	ITEM NO	DESCRIPTION	ITEM NO	DESCRIPTION
1	FRAME	8	ROTOR3	15	접시작은나사
2	L-BRACKET	9	CORE	16	육각구멍볼이볼트
3	R-BRACKET	10	SHAFT	17	육각구멍볼이볼트
4	STATOR	11	KEY	18	BERING NUT,WASHER
5	ROTOR1	12	BEARING	19	OIL SEAL
6	Permanent Magnet	13	BASE	20	SPRING
7	ROTOR2	14	COIL	21	TERMINAL

그림 1. 영구자석 풍력발전기의 단면도
Fig. 1. Cross section of an permanent-magnet wind-generator

표 1. 풍력발전기의 기본 사양

Table 1. Basic specification of wind generator

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

표 2. 권선 사양 및 계수

Table 2. Conductor spec. and coefficient

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

그림 2는 실제 제작된 회전자의 형상을 보여주는 것으로서, 회전자는 코어없이 24-pole로 극당 1개씩의 영구자석을 포함하고 있다. 영구자석을 지지하는 회전자 구조는 비자성체인 스테인레스를 사용하여 누설되는 자속을 최대한 줄이는 구조를 채택하였다.

그림 3에 나타난 고정자는 일반적인 전기기기에서 사용되는 일반 적층구조가 아닌 Roll 형식의 구조로 되어 있으며, 고정자의 권선은 방사형의 구조를 가지고 있다. 고정자의 코어의 재질은 S-18, 두께 0.5 [mm]의 규소강판을 사용하였고, 와전류 손실을 줄이기 위해 코어를 Roll 형식으로 적층하였다. 총 슬롯수는 72개로 하여 매상 매극당 도체수를 1로 하였다.



그림 2. 영구자석 풍력발전기의 회전자 사진
Fig. 2. A picture of rotor for an permanent-magnet wind-generator

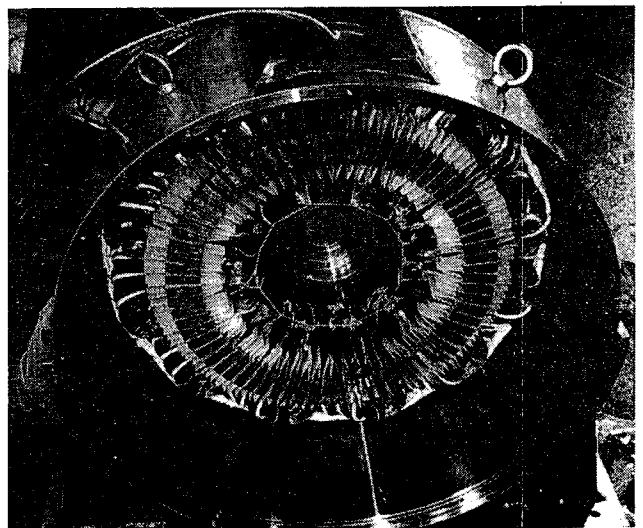


그림 3. 영구자석 풍력발전기의 고정자 사진
Fig. 3. A picture of stator for an permanent-magnet wind-generator

3. Finite-Element Method (FEM) 해석

3.1 등가 해석모델

본 연구에서 제시한 영구자석 풍력발전기의 구조는 Axial-flux type으로 2개의 고정자 사이에 1개의 회전자 위치하고 있으므로 정확한 해석을 위해서는 3차원 과도상태 해석이 필요하지만, 시간의 절약을 위하여 그림 4와 같이 2차원으로 등가모델을 개발하여 유한요소해석을 수행하였다. 등가모델의 치수는 평균값을 구하여 산정되었고, 해석모델의 간략화를 위해 24 pole 중에서 2극을 모델화하여 상하 24개의 Slot 사이를 움직이게 하여 동특성을 분석하였다.

해석모델에 적용한 마그네트의 Radial 방향 길이는 평균하여 계산하였으며, 해석은 상용 전자계 해석 프로그램인 Maxwell을 사용하였다. 고정자 코일에 유기되는 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[5-6].

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

여기서,

\mathbf{A} : Magnetic vector potential

ν : Magnetic reluctivity

\mathbf{B}_r : Permanent magnetic flux density

그림 5는 공극에서의 자속밀도를 나타내고 있다. 공극에서 실효치로 0.51T(설계치 0.446T)로 나타남을 확인하였다.

그림 6은 발전기 동특성 해석을 위해 연결한 외부회로를 나타낸 것이다. 부하측의 전동기 역률을 0.7로 보았을 때, 저항값과 인덕턴스 값을 산출하여 정격 전류 및 전압을 산출하였다.

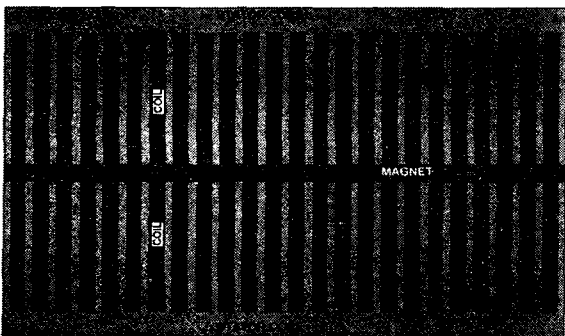


그림 4. 특성해석을 위한 등가모델
Fig. 4. Equivalent model for characteristics analysis

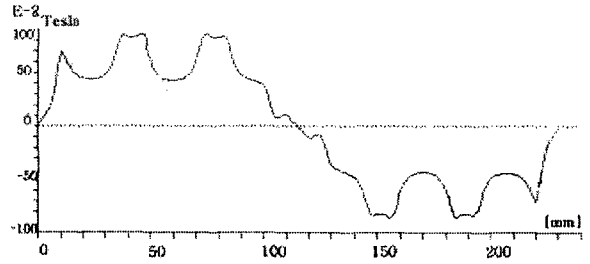


그림 5. 공극 자속밀도
Fig. 5. Air-gap magnetic flux density

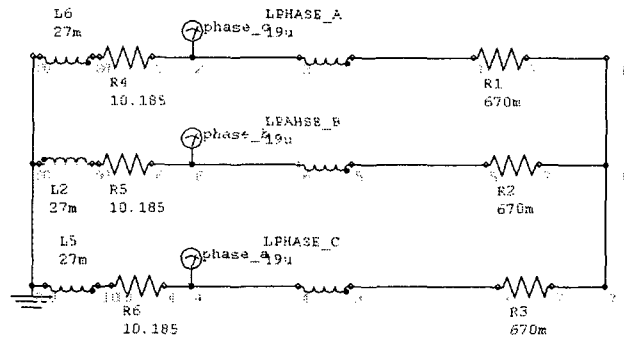


그림 6. 발전기 특성해석을 위한 외부회로
Fig. 6. External circuit for characteristics analysis

3.2 유한요소 해석결과

회전속도에 따른 유기전압을 확인하기 위하여 무부하시와 부하시 모두 구하였다. 무부하시 유기되는 전압을 구하기 위하여 외부회로에 초기저항을 크게 하여 양단에 걸리는 전압을 구하였다. 부하특성 해석은 각각 R과 R-L 부하를 인가하여 해석을 수행하였다. 그림 7은 해석모델에서 구한 3상 무부하 전압과 R 부하, R-L 부하에서 얻은 속도에 따른 전압을 나타내고 있고, 속도변화에 따라 전압이 비례하여 증가함을 볼 수 있다.

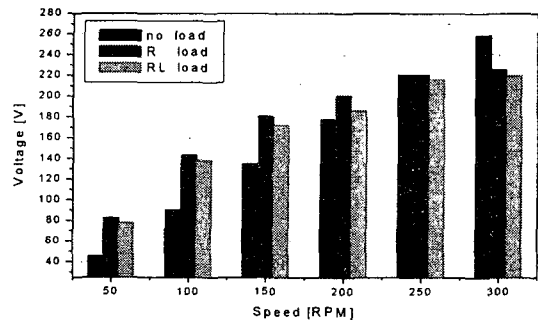


그림 7. 무부하, R, R-L 부하에서의 속도에 따른 전압
Fig. 7. Voltage as variable speed

그림 8은 부하증가에 따른 발전기의 출력특성을 나타낸 것으로서, 정격전류 15 [A]에서 정격출력 10 [kVA]가 됨을 확인할 수 있다.

그림 9와 그림 10은 각각 외부에 정격 저항부하와 R-L 부하 연결시의 3상 전류파형을 나타낸 것으로서, 대체적으로 양호한 sin파가 나타남을 볼 수 있다.

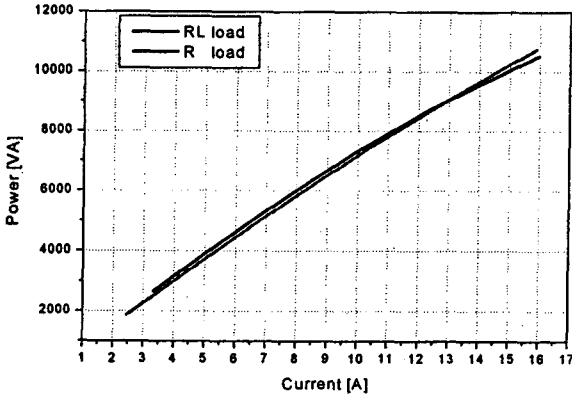


그림 8. 부하가변에 따른 출력특성

Fig. 8. Output characteristics for variable load

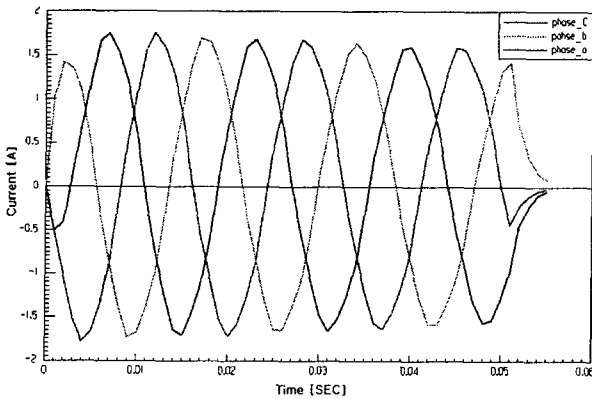


그림 9. 저항부하시의 전류파형

Fig. 9. Current waveform for resistance load

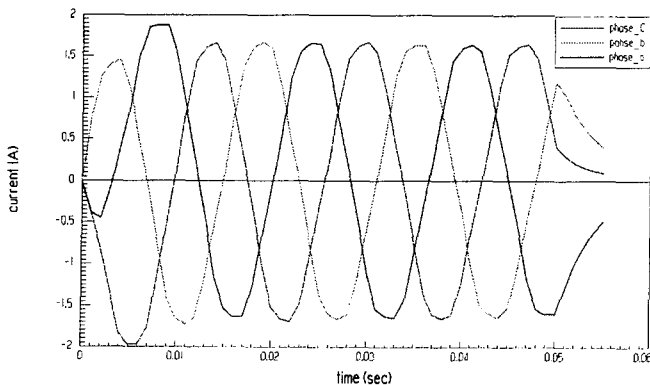


그림 10. R-L 부하시의 전류파형

Fig. 10. Current waveform for R-L load

4. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 대체 에너지원의 하나로 각광받고 있는 풍력 발전 시스템에 적용이 가능한 새로운 형태의 모듈형 동기발전기를 제안하였다. 용량의 가변이 용이하도록 발전기의 구조를 모듈형에 적합한 Axial-flux type으로 채택하였고, 중량 및 소음의 감소를 위하여 Gearless형이 가능한 영구자석 여자 동기발전기로 설계 및 제작하였다.

특성시험에 앞서 설계된 3상 10 [kVA]급 영구자석 풍력발전기의 부하 가변에 따른 운전특성을 유한요소법을 이용하여 분석한 결과, 속도변화에 따라 전압이 비례해서 증가하였고, 발전기의 출력이 설계값과 유사하게 나타남을 확인하였다. 또한, R 및 R-L 부하 인가시 모두 양호한 3상 정현파형을 얻을 수 있었다. 본 연구에서의 운전특성 해석결과는 실험시 부하변화에 따른 발전기의 특성예측과 모델 변화시 영구자석 풍력발전기의 설계 및 특성 해석시에 유용하게 적용될 것으로 기대된다.

향후 3차원 과도상태 해석이 추가적으로 수행되어야 하고, 특성시험을 통한 실험결과와 해석결과를 비교 분석하여 소용량 풍력 발전시스템에 적용이 가능함을 증명할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [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, 강도현, 김용주, 배성우, 최경호, 김동희, "횡자속형 영구자석 풍력발전기 설계 및 특성해석", 2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp. 949~951, 2002. 7. 10-12.
- [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] 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] 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.