

도심형 풍력 발전기용 방사 자속형 영구자석 동기 발전기의 출력특성에 관한 연구

배병덕\*, 윤승주, 정태욱\*\*  
경남대학교

A Study on Output Characteristic Design of Radial Field Permanent Magnet Synchronous Generator for Urban Wind Turbine

Byung-Duk Bae\*, Seung-Ju Yun, Tae-Uk Jung\*\*  
Kyungnam University

**Abstract** - Recently, issues regarding environment and the diversification of dependence in oil are watched with keen interest. Wind power attracts most interest because of its high-energy efficiency with eco friendly functions. In this paper, deal with design of radial field permanent magnet synchronous generator for a urban wind power system. Analyzed the RFPM generator by electromagnetic, and designed wind power generator with this. The output characteristic of machine and all of process is analyzed by 2D FEA due to geometrical structures of RFPM machine.

1. 서 론

현재 석유 및 석탄에너지의 고갈에 대비해 향후 지속 가능한 대체에너지원으로 세계 각국은 다양한 에너지원의 개발에 총력을 기울이고 있으며, 그 중 하나가 풍력발전시스템이다. 풍력발전은 바람이 가지는 운동에너지를 받아 전기적 또는 기계적 에너지 형태로 변환시키는 것으로 무공해 무한정의 바람을 이용하므로 환경에 미치는 영향이 적고, 연료비가 거의 없으며, 화석연료 대체효과가 커 단기적으로 화석연료와 대등한 가격 경쟁력을 확보할 수 있는 대체에너지이다. 우리나라는 지리적 환경적 제약을 많이 받는 풍력발전의 특성상 중·대형기 위주의 연구에 집중되어 있는 모습을 볼 수 있다. 하지만 유럽을 중심으로 미국, 일본에서는 에너지소비 및 이산화탄소배출이 집중되어있는 대도시에 경제적, 효율적 측면 및 공간적 측면을 고려한 소형 풍력발전기의 관심이 높아 이 부분에 대한 많은 투자와 기술 개발에 대한 연구가 진행되고 있다.[1].

그 중 풍력 발전에는 영구자석을 사용하는 발전기들이 주로 사용되어진다. 영구자석 발전기들은 계자자속이 자석으로 대체되어 회전자의 손실이 감소되어 결과적으로 더 효율적이다. 그러므로 발전 효율은 매우 개선되고 고위 측 전원 밀도는 달성될 수 있다. 이러한 특징 때문에, 영구자석 발전기는 일반적으로 소형 풍력 터빈에 대하여 적용된다. 소형 풍력 발전에 주로 사용되는 영구자석 발전기 RFPM과 AFPM이 있다[2]-[3].

본 논문에서는 두 종류의 발전기중 RFPM 발전기 출력특성에 대해 연구하였다. 그리고 2차원 유한 요소 해석을 통하여 RFPM 발전기의 모델링 및 출력특성을 해석 하였다.

2. 영구자석 풍력발전기 설계

2.1 영구자석 풍력발전기의 설계사양

본 논문에서 설계될 발전기는 대도시 주변에 설치되어 사용되어 질 것이므로, 너무 큰 출력을 가질 경우 풍량이 작은 곳에는 실제 가동률이 떨어지게 된다. 따라서 도심형 풍력발전기의 가동률을 증가시키기 위해 1.5kW 정도의 출력을 가지며 효율 90%를 가지는 영구자석 풍력발전기를 설계할 것이다.

회전자는 낮은 풍속에서 발전이 가능할 수 있도록 다극형의 구조로 설계함으로써 낮은 풍속에서도 일정 수준 이상의 출력전압을 확보할 수 있도록 할 것이다. 또한 발전기의 출력을 증가를 위하여 고에너지 밀도를 가진 Nd-Fe-B 영구자석을 사용하였으며, 표 1은 제안된 영구자석 발전기의 세부사항을 나타낸다.

2.2 영구자석 풍력발전기의 출력 특성식

영구자석 기기에서, 영구자석 1극에서 발생하는 자속밀도 곡선은 다음 식 (1)과 같다[4]-[5].

$$\Phi_{pole} = \alpha_i \pi \frac{1}{p} \frac{D_o^2(1-k_d^2)}{8} B_{mg} \quad (1)$$

여기서,  $\alpha_i$ 는 최대 자속밀도에 대한 평균치 자속밀도의 비율,  $p$ 는 영구자석의 극수,  $B_{mg}$ 는 공극의 자속밀도의 최대값,  $D_o$ 는 영구자석 외경,  $k_d$ 는 영구자석 외경에 대한 내경의 비율이다. 전자기 토크는 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_d = \frac{1}{4} \alpha_i m_1 I_a N_1 k_w B_g D_o^2 (1-k_d^2) I_a \quad (2)$$

여기서,  $m_1$ 은 상의 수,  $I_a$ 는 선전류,  $N_1$ 은 상당 턴수,  $k_w$ 는 와인딩계수,  $B_g$ 는 공극 자속밀도이다. 각상에서 발생한 기전력의 RMS값  $E_f$  는 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_f = \sqrt{2} \pi n_s N_1 k_w B_{mg} \frac{(D_o^2 - D_i^2)}{8} \quad (3)$$

여기서,  $n_s$ 는 모터의 초당 회전속도이다. 식 (1) 에서 (3) 으로부터, 출력은 다음 식 (4)와 같이 얻을 수 있다.

$$P_R = \eta \frac{m}{T} \int_0^T e(t) i(t) dt = \eta m K_P E_{PK} I_{PK} \quad (4)$$

여기서,  $\eta$  는 기기의 효율,  $E_{PK}$ 는 최고치 기자력,  $I_{PK}$ 는 입력전류이다.

<표 1> RFPM 발전기의 설계사양

Rate power [kW]	1.5
Rated speed [rpm]	500
Number of phase	3
Number of Poles	40
Number of slot	60
Phase connection	Y
Magnet Br[T]	1.02
Efficiency[%]	90

3. 유한 요소 해석

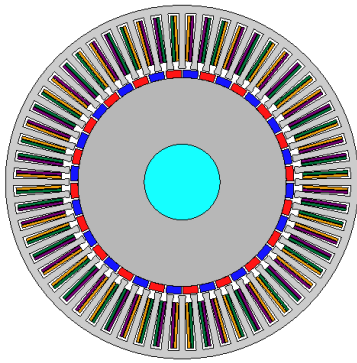
3.1 영구자석 풍력발전기의 모델링

영구자석 풍력발전기의 모델링은 그림 1과 같이 유한 요소 해석 프로그램을 사용하여 2D로 모델링 하였다. 내부에는 영구자석이 부착된 회전자가 존재하며, 외부에 고정자가 존재한다. 고정자코일 결선은 고풍력이 가능한 집중권 방식의 Y결선으로 이루어졌다.

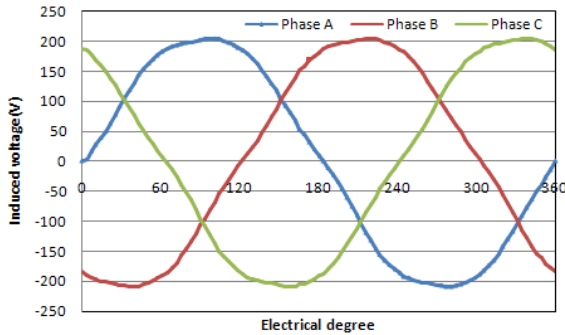
3.2 무부하시 유한 요소 해석결과

그림 2는 2차원 유한 요소 해석에서 코일에 유기되는 3상의 무부하 전압파형을 나타낸 것이다. 해석된 무부하 전압파형의 최대치와 실효치는 각각 201.7[V], 144.4[V]를 나타낸다.

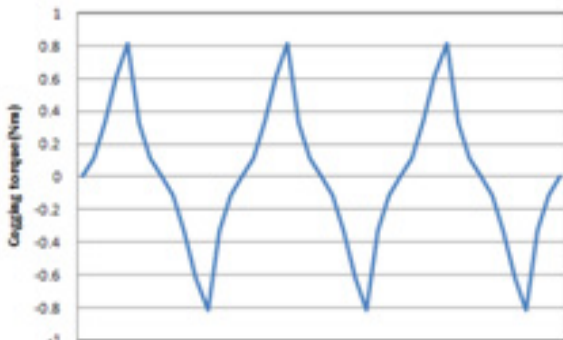
그림 3은 무부하 코깁토크의 파형을 보여준다. 출력 파형의 최대값은 1.634[Nm]이다.



<그림 1> RFPM 발전기의 2차원 유한요소 해석 모델



<그림 2> 무부하 역기전력 파형

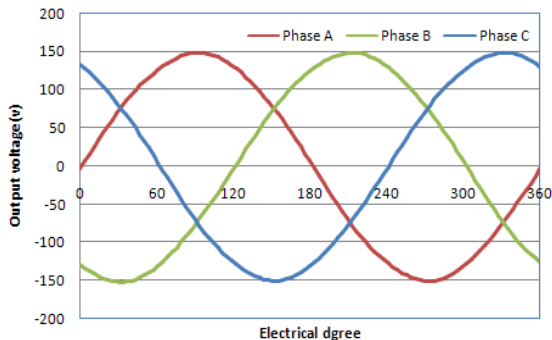


<그림 3> 무부하 코깅토크 파형

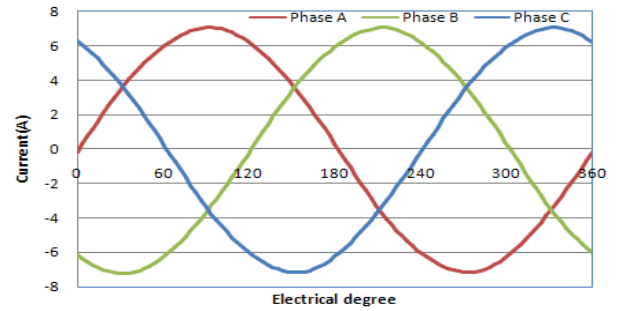
### 3.3 부하시 유한 요소 해석결과

그림 4는 한주기동안의 출력전압 해석파형을 나타낸다. 부하시 출력 전압의 최대치, 실효치 값은 각각 145.8[V], 102.6[V]를 나타낸다.

그림 5는 한주기동안의 출력전류 파형을 나타내며, 출력전류의 최대치, 실효치 값은 각각 6.9[A], 4.86[A]를 나타낸다.



<그림 4> 부하시 출력전압 파형



<그림 5> 부하시 출력전류 파형

<표 2> 최종 설계사양

Rate power [kW]	1.5
Rated speed [rpm]	500
Output voltage[V]	102.6
Output current[A]	4.86
Cogging torque	1.634
Efficiency[%]	87

## 4. 결 론

본 논문에서는 2차원 유한 요소 해석을 통해 도심형 풍력 발전 터빈용 영구자석 동기 발전기를 설계하였다. 2차원 유한 요소 해석을 통해 약 1.5[kW]급의 목표 출력을 확보할 수 있었다. 그리고 다극형의 구조로 인한 높은 출력 전압을 확보 하였다. 하지만 출력 효율은 90%에 미치지 못하였으며, 풍력발전기의 초기 발전에 영향을 미치는 코깅토크가 다소 크게 측정 되었다. 최종 설계사양은 표 2와 같이 나타내었다.

향후계획으로 당초에 계획된 효율 90%에 도달하기위해 전자기 구조 개선을 통한 효율개선을 해야 할 것이며, 또한 저풍속 발전에 영향을 미치는 코깅토크 감소에 대한 연구가 필요할 것이다. 마지막으로 시작 기 제작을 통한 성능 평가 및 검증을 실시할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부에서 시행한 「경남 창원과학연구단지육성사업」 기초·원천 R&D 과제 지원사업으로 수행되었음

### [참 고 문 헌]

- [1] 신재생 에너지 전력시장 활성화 방안연구, 2007, 에너지 경제연구원
- [2] Deok-Je Bang, Polinder.H, Shrestha. G, Ferreira. J.A, "Comparative design of radial and transverse flux PM generators for direct-drive wind turbines", Proceedings of 2008 International Conference on Electrical Machines, sept, 2008
- [3] Yanto. H. A, Chun-Ta Lin, Jonq-Chin Hwang, Sheam-Chyun Lin, "Modeling and control of household-size vertical axis wind turbine and electric power generation system", in Proceedings of PEDS 2009 Conference, Taipei, Nov. 2009.
- [4] Surong Hwang, Jian Luo, "A General Approach to Sizing and Power Density Equations for Comparison of Electrical Machines", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 34, No. 1, pp.92~7, 1998.
- [5] Duane Hanselman, "Brushless permanent Magnet Motor Design", Second Edition, 2003.