

1.5kW급 풍력발전용 축자속/반경자속 영구자석 발전기의 특성 비교

고경진\*, 장석명\*, 구민모\*, 이성호\*\*, 한상철\*\*\*, 박영태\*\*\*\*  
 충남대학교\*, 한국생산기술연구원\*\*, 전력연구원\*\*\*, 한국표준과학연구원\*\*\*\*

Characteristics Comparison of Axial and Radial Flux Permanent Magnet Generators for 1.5kW Class Wind Power Systems

Kyoung-Jin Ko\*, Seok-Myeong Jang\*, Min-Mo Koo\*, Sung-Ho Lee\*\*, Sang-Chul Han\*\*\*, Young-Tae Park\*\*\*\*  
 Chungnam National University\*, KITECH\*\*, KEPRI\*\*\*, KRISS\*\*\*\*

**Abstract** - This paper compares performance characteristics and mechanical design specifications of outer rotor radial flux type and double-sided axial flux type permanent magnet generator for 1.5-kW class small scale wind power applications to suggest most suitable type. In order to analyze electromagnetic performances of two different type generators, this paper performs generating performance and efficiency characteristic analysis from electrical parameters obtained by using nonlinear finite element analysis using commercial software, electromagnetic losses characteristics equations and d-q characteristics equation. Considering the derived electromagnetic performance, mechanical design specifications and manufacturing cost, the best suitable model for 1.5-kW class wind power system is determined, and its experiment was performed to validate the suggested analysis method.

1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈로 인한 전 세계적 에너지 안보의식 강화 및 지구온난화로 인해 신재생에너지의 개발에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다. [1] 특히, 소용량 풍력발전시스템의 경우 동일용량 태양광 발전에 비해 용량당 설치 단가 및 발전량당 생산비용이 저렴하여, 소용량 풍력발전시스템 개발에 대한 관심이 국내·외적으로 증가하고 있는 실정이다. 소용량 풍력발전시스템은 대용량 풍력발전시스템과 더불어 지리적/입지적 영향을 상대적으로 덜 받기 때문에 그 개발 및 응용에 대한 연구에 타당성이 있고, 게다가, 최근 정부에서 발표된 '그린홈 100만호 사업'으로 인해 소형풍력발전시스템에 대한 국내수요가 급증할 것으로 예상되는 바, 영구자석 발전기에 대한 설계/해석/제작/성능평가 기술 개발에 대한 연구가 매우 필요하다. 따라서 본 논문에서는 1.5kW급 풍력발전시스템에 적용하기 위한 외전형 반경자속과 양측식 축자속 영구자석 발전기를 설계하고 출력특성과 기구적 특성을 비교하여 1.5kW급의 소용량 풍력시스템에 적합한 모델을 제시하였다.

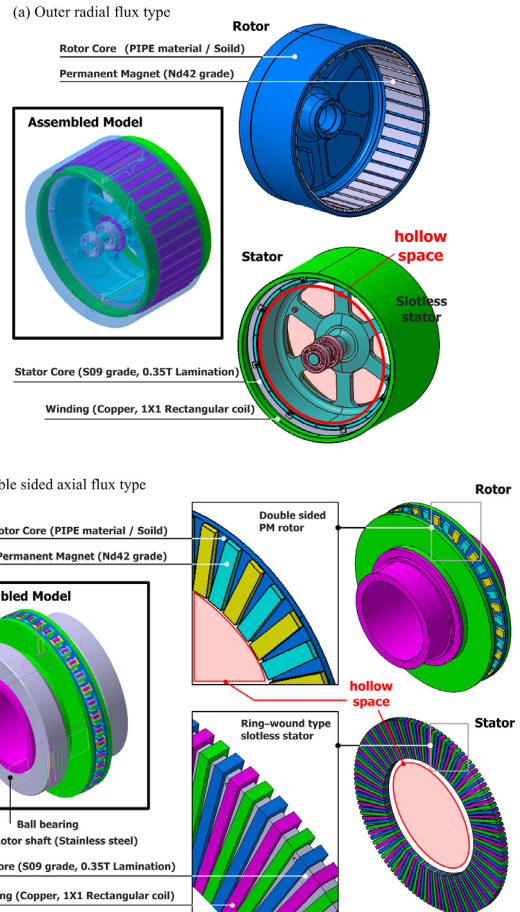
2. 해석모델

그림 1은 외전형 반경자속과 양측식 축자속 영구자석 발전기의 구조와 각 영역별 재질을 보인다. 그림 1 (a)에 보이는 외전형 반경자속 영구자석 발전기는 역기전력 및 출력전압의 고조파 저감을 위한 0.7의 극호비를 갖는 외전형 영구자석 회전자와 코깅토크의 제거를 통한 소음·진동을 저감시키기 위해 슬롯리스 고정자를 갖는다. 그림 1 (b)의 양측식 축자속 영구자석 발전기는 링-와운드 권선을 갖는 슬롯리스 고정자와 양측식 영구자석 회전자를 갖는다. 그림에서 hollow space는 전자기 구조를 제외한 기계적 구조 부분과 공기 영역을 나타낸다. 이 두 타입 발전기의 설계 사양은 표 1과 같다.

표 2는 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 회로정수 해석결과와 제작된 반경자속 풍력발전기의 계측결과를 비교한 것이다. 역기전력 상수의 경우 유한요소해석결과와 계측결과가 약 5% 차이를 보이는데 이는 제작된 영구자석의 착자율이 설계시 예상된 결과보다 5% 정도 낮아져서 발생한 제작 오차로 사료된다.

<표 1> 풍력발전기의 설계 사양

사양	반경자속 타입	축자속 타입
정격출력 [kW]	1.5	
정격속도 [rpm]	300	
발전기 외반경 [mm]	314	442
발전기 축방향길이 [mm]	101	44
극수	40	
코일 타입	사각코일(1.2 X 1.2)	
권선 타입	3상 분포권	3상 링-와운드



<그림 1> 외전형 반경자속과 양측식 축자속 타입 영구자석 풍력발전기의 구조 및 재질

<표 2> 풍력발전기의 회로 정수

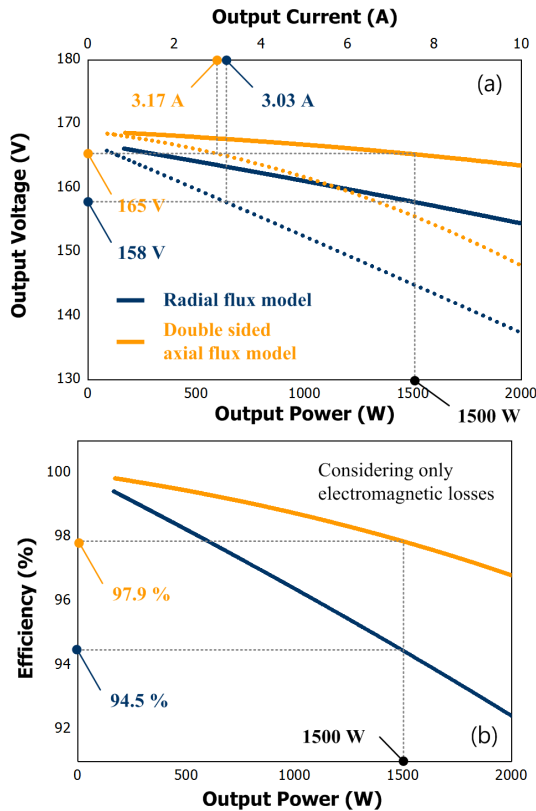
사양	반경자속 타입		축자속 타입
	FEM	계측결과	FEM
역기전력 상수 [V/(rad/s)]	7.52	7.12	7.6
동기 인덕턴스 [mH]	2.7	2.5	10.3
단자 저항 [ohm]	5.4	5.6	0.814

3. 전자기 성능 해석 및 시험

풍력발전기의 전자기 성능 해석은 유한요소해석법으로 얻어진 표 2의 결과를 기반으로 d-q축 전압방정식과 입·출력 특성식 그리고 전자기 손실 해석으로부터 식 (1), 식 (2)와 같이 손실이 고려된 발전 입·출력 특성식을 도출하여 수행되었다. 자세한 해석과정은 기 발표된 [2]에 자세히 설명되었다.

$$P_0 = 3(V_d^e i_d^e + V_q^e i_q^e) / 2 \tag{1}$$

$$= -3R_s(i_d^e + i_q^e) / 2 - 3L_s P(i_d^e + i_q^e) / 4 + 3\omega_e \phi_f i_q^e / 2$$



〈그림 2〉 전자기 손실을 고려한 각 타입 발전기의 정격속도에서의 (a)전압, 전류, (b)효율 특성

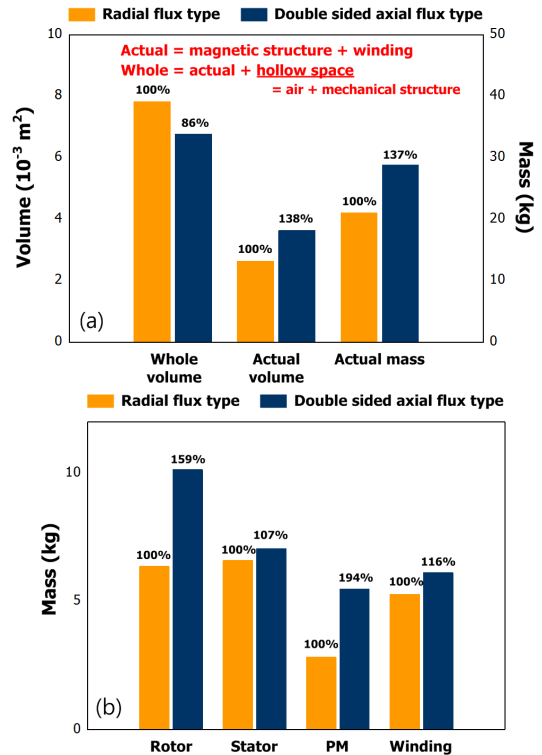
$$P_{im} = 3(V_d^e i_d^e + V_q^e i_q^e) / 2 + 3R_s(i_d^e + i_q^e) / 2 + \sum_{l=1, odd}^{\infty} Q_l (k_{hl} f_l B_l^n + k_{el} f_l^2 B_l^2 + k_{al} f_l^{1.5} B_l^{1.5}) \quad (2)$$

그림 2는 전자기 손실을 고려한 외전형 반경자속과 양측식 축자속 타입 영구자석 발전기의 정격속도에서의 출력전압, 출력전류, 효율 특성을 나타낸다. 그림 3은 각 모델의 기계적 체적과 무게를 비교한 결과이다. 그림 2와 그림 3으로부터 1.5kW급 풍력발전시스템에서는 양측식 축자속 타입의 발전기가 외전형 반경자속 타입보다 정격 효율이 3%이상 높고, 발전기의 전체 사이즈가 14%이상 작은 것을 확인할 수 있다. 그러나 실제 체적 즉, hollow space를 제외한 영역의 체적은 반경자속 타입이 38%이상 작고, 무게도 37%이상 작다. 발전기의 무게는 직접적으로 풍력시스템의 타워와 같은 기계적 구조에 영향을 주고 전체 시스템의 부피를 증가시킨다. 게다가 그림 3 (b)의 각 영역별 무게에서 영구자석의 사용량이 반경자속 타입에 비해 축자속 타입이 약 2배 정도인데 이는 발전기 제작 단가에 매우 지배적인 영향을 주어 예상컨대 전체 발전기 가격을 1.5배 정도 상승시키게 될 것으로 사료된다. 또한 양측식 축자속 타입의 고정자 구조상 제작성이 현저히 낮아 제작공정에 많은 어려움을 줄 것이다. 이러한 이유로 본 논문에서는 발전 효율과 시스템 사이즈면에서 단점을 갖지만 1.5kW급 풍력발전기에 적용하기 위한 모델로 외전형 반경자속 타입 영구자석 발전기를 적합모델로 선정하였다.

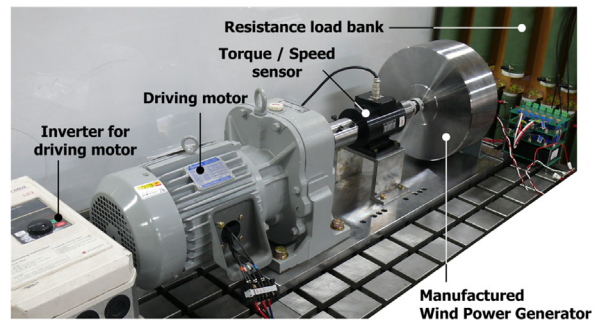
그림 4는 제작된 외전형 반경자속 영구자석 발전기의 성능 평가를 위한 시험 장치이다. 제작된 발전기의 시험에 의해 얻어진 정격속도에서의 부하 특성은 그림 5에서 보이는 바와 같이 유한요소해석 결과와 5%정도 차이를 갖는다. 이 역시 앞서 해석값과 시험값에서 차이를 보였던 역기전력 상수의 예러 결과와 마찬가지로 영구자석의 착자에서 비롯된 차이로 사료된다.

#### 4. 결 론

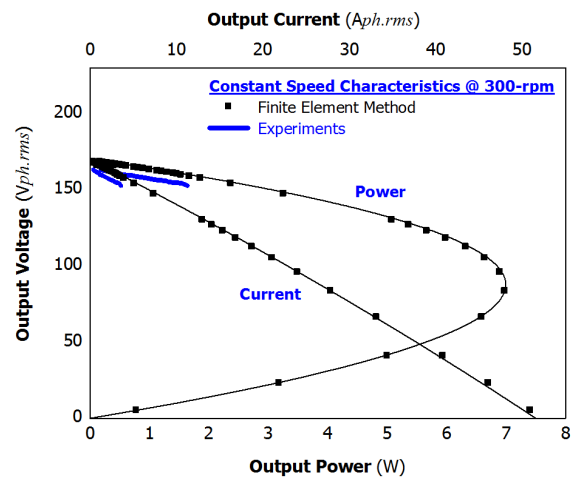
본 논문은 소용량 풍력발전시스템을 위한 외전형 반경방향 자속타입과 양측식 축자속 타입 영구자석 발전기의 성능 및 기계 설계 사양을 비교하고 1.5kW급 시스템에 적합한 모델을 제안하였다. 전체 시스템 사이즈는 10% 증가하나 hollow space를 제외한 실제 체적 및 무게 그리고 영구자석 사용량이 절반에 가까워 제작단가를 대폭 저감할 수 있을 것으로 예상되는 외전형 반경자속 타입 발전기가 소용량 시스템에 더 적합한 것으로 예상된다. 향후 실제 풍속에 따른 터빈 특성을 고려하여 여러 영구자석 발전기를 타입별로 비교하여 소용량 시스템에 가장 적합한 발전기 타입을 제안하고자 한다.



〈그림 3〉 각 타입발전기의 체적과 무게 비교 결과



〈그림 4〉 풍력발전기 시험 장치



〈그림 5〉 정격속도에서의 부하 특성 시험 결과

#### [참 고 문 헌]

- [1] A. J. G. Westlake, J.R. Bumpy and E. Spooner, IEE Proc.-Electr. Power. Appl., vol. 143, pp.269-280, May. 1996.
- [2] 고경진, 장석명, 최장영, "전자기 손실을 고려한 소형 외전형 영구자석 풍력발전기의 성능 평가 (2) - 전자기 손실 해석 및 성능 평가 -," 대한전기학회 논문지, Vol. 60, No. 1, pp. 50~62, 2011.