

## 저속, 고토크 직접 구동 영구자석 풍력 발전기의 개발

김병국, 손동혁, 김도선, 이종갑, 이길호\*, 조윤희  
 동아대학교 전기공학과, \*금풍에너지

### Development of Direct Drive Permanent magnet Wind Generator with Low speed and High torque

Byong-Kuk Kim, Dong-Hyuk Son, Do-Sun Kim, Jong-Gab Lee, Gil-Ho Lee\*, Yun-Hyun Cho  
 Dept. of Electrical Engineering of Dong-a University, \*Gold-Wind Energy Inc.

**Abstract** - 원격 전력 시스템의 요구 증가로 인해 작고 효율적이며 경제성도 우수한 풍력 발전기의 시장이 확대되고 있다. 이러한 응용 분야를 위해서 최근 들어 직접 구동 영구자석 발전기에 많은 관심을 가지게 되었다. 본 논문에서는 유한요소해석을 이용한 저속, 고토크의 외전형 직접 구동 영구자석 풍력발전기 개발을 위한 설계 모델을 제안하였다. 여기서 발전기의 코깅 토크의 분석을 통하여 기동 토크를 최소화하는데 대한 연구를 수행하였다. 또한 역기전력과 동기리액턴스, 효율을 계산하였다. 설계 모델을 토대로 3kVA, 90rpm의 풍력발전기 시제품을 제작하였다. 마지막으로 시제품의 성능 시험 결과를 통하여 해석모델의 정확성을 증명하였다.

#### 1. 서 론

풍력 발전은 자연 상태의 무공해 에너지원으로 현재 기술로 대체에너지원 중 가장 경제성이 높은 에너지원으로써 바람의 힘을 회전력으로 전환시켜 발생하는 전력을 전력계통이나 수요자에게 직접 공급하는 기술이다.

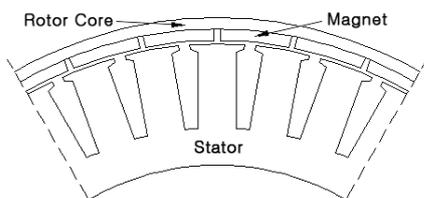
일반적으로 사용되는 풍력 발전기는 다양한 풍속 상태에서도 일정한 고속 상태에서 발전이 가능하도록 하기 위해서 기어박스과 피치 제어기를 사용한다. 최근 들어 고효율과 고신뢰성, 그리고 저비용의 전력전자 기술의 발달로 인하여 가변속 직접 구동 발전기에서 발생한 전력 주파수를 시스템 주파수와 일치시키기 위한 기능 구현이 가능해 졌다. 또한 산간이나 해안오지와 같은 독립 풍력 터빈에서 사용하기 위한 직접 구동 발전기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1-2] 기존의 기어 박스가 결합된 풍력 터빈 발전기와 비교하여 직접 구동 발전기는 시스템의 전체적인 크기가 감소하고 설치 및 유지보수비용의 절감, 에너지 변환 효율의 상승, 그리고 안정적인 제어 특성, 부하 변동과 풍력의 변화에 대한 빠른 응답성을 가진다.

본 논문에서는 3[kVA], 90[rpm]급의 저속, 고토크형 직접 구동 영구자석 풍력 발전기의 설계 모델을 제안하고 운전 특성 분석 결과를 제시하였다. 먼저 낮은 풍속에서의 기동 문제를 고려하여 기동 토크를 최소화 하기 위한 코깅 토크에 대해 고려하였다. 또한 역기전력과 동기리액턴스, 효율을 계산하였다. 해석 결과를 토대로 한 제안 모델의 시제품을 제작하였다. 마지막으로 최적화 모델의 성능 시험 결과를 해석 결과와 비교함으로써 설계의 타당성을 검증하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 풍력 발전기 구조

풍력 터빈을 위한 3kVA, 90rpm의 저속, 고토크인 직접 구동 영구자석 풍력발전기를 개발하기 위하여 그림 1에서 보여지는 바와 같이 경방향의 외전형 회전자를 가지는 발전기 형태를 선정하였다. 영구자석의 재료는 NdFeB계의 N38SH를 사용하였고 표면부착형의 형태를 가진다. 또한 3상 권선을 가지는 고정자 주위를 회전하는 금속 드럼의 내측면에 자석이 고정되어 있다. 이러한 구조의 장점은 회전하는 자석의 원심력이 접착된 자석에 힘을 공급하여 접착제로 연결된 곳의 안정성을 증가시킬 수 있다. 또한 풍력 터빈의 블레이드가 외전형 드럼의 앞 표면에 직접 부착되기 때문에 간단한 구조설계가 가능하게 된다.



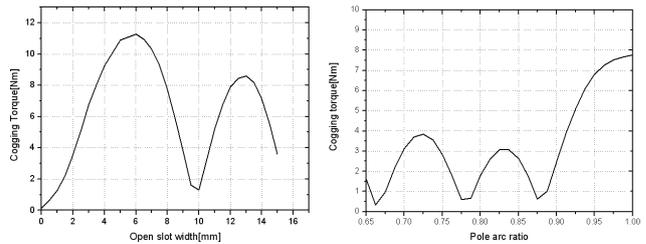
〈그림 1〉 외전형 풍력 발전기 구조

##### 2.2 기동 토크

영구자석 발전기의 기동 토크는 코깅 토크와 히스테리시스 토크, 발전기의 베어링과 실링의 마찰력에 의한 토크가 모두 더해진 값이다. 코깅 토크는 본질적으로 자석과 고정자 치의 상호작용에 의해 공극에서의 불연속적인 자계가 발생하게 되고 이로 인해서 발생하는 중요 성분이다. 히스테리시스 토크는 발전기의 히스테리시스 손실로부터 발생하는 토크이다.

직접 구동 풍력 발전기에서 높은 기동 토크는 적은 풍속에서의 구동을 제한하기 때문에 중요한 설계상의 문제로 볼 수 있다. 따라서 만족할 만한 값으로 기동토크를 줄이는 것이 필요하다.

본 논문에서는 극호비와 슬롯 개방폭의 변화에 따른 코깅 토크의 영향을 분석하였다. 그림 2는 극호비와 슬롯 개방폭에 따른 코깅 토크를 나타낸다.



〈그림 2〉 슬롯 개방폭과 극호비에 따른 코깅 토크

##### 2.3 발전기 특성 해석

발전기의 구동 특성은 자계의 유한 요소 해석을 수행함으로써 구할 수 있다. 발전기의 특성은 평형 저항 부하의 조건에서 가변 또는 고정 속도에서 해석을 수행한다.

##### 2.3.1 역기전력과 동기리액턴스

역기전력은 회전자에 회전하는 동안 고정자 코일에 쇄고 하는 자속의 변화로부터 구해진다. 기전력은 기본파 성분과 기수 고조파 급수를 포함한 푸리에 급수로 풀 수 있으며 식 (1)로 주어진다.

$$e_{ph} = \sum_{j=1,3,5} k_{sj} E_j \sin(j \frac{p}{2} \omega t) \quad (1)$$

여기서  $p$ 는 극수이며  $\omega$ 는 회전자에 회전 각속도 rad/s,  $E_j$ 는 스쿠된 슬롯이 없는 기전력의  $j$ 번째 고조파의 최대 진폭이다.  $k_{sj}$ 는  $j$ 번째 고조파에서의 스쿠 계수이다.

동기 리액턴스  $X_s$ 는 전기자 리액턴스와 누설 리액턴스로 구성된다. 전기자 리액턴스는 증분 유한 요소 해석[3]으로 찾을 수 있으며 누설 리액턴스는 실험적 수식에 의하여 계산되어 진다.

상 기전력  $e_{ph}$ , 동기 리액턴스  $X_s$ , 그리고 상 저항  $R_a$ 에 의해서 발전기는 상당 등가회로로 표현될 수 있다. 따라서 성형 결선된 3상 대칭 저항 부하에서 부하전류  $i_{ph}$ 는 (2)으로 유도된다.

$$i_{ph} = \sum_{j=1,5,7,11...} \frac{k_{sj} E_j}{Z_j} \sin(j \frac{p}{2} \omega t - \alpha_j) \quad (2)$$

여기서

$$Z_j = \sqrt{(R_t + R_a)^2 + (jX_s)^2} \quad (3)$$

$$\alpha_t = \tan^{-1} \left( \frac{jX_s}{R_t + R_a} \right)$$

$R_t$ 는 상당 부하 저항이다.

### 2.3.2 발전기 손실

발전기의 효율에 영향을 끼치는 손실로는 권선에서의 동손, 고정자에서의 코어 손, 베어링과 실링 마찰에서의 기계적 손실, 권선과 자석에서의 와류로 인해 발생하는 표류손 등이 있다.

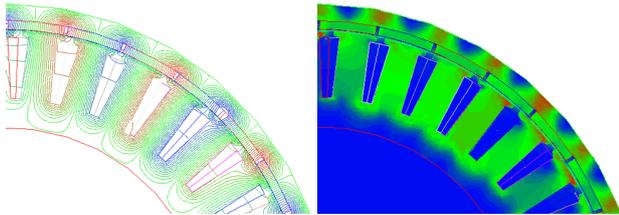
발전기의 효율  $\eta$ 는 식 (5)로 얻어진다.

$$\eta = \frac{p_o}{p_o + p_{cu} + p_{mec} + p_{stray}} \times 100 \quad (5)$$

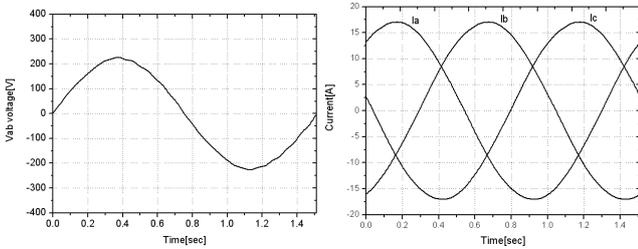
여기서  $p_{cu}$ 는 동손,  $p_{fe}$ 는 코어손,  $p_{mec}$ 는 기계손,  $p_{stray}$ 는 표류손이다.

### 2.3.3 유한요소해석

발전기 특성 해석을 위하여 전자장 상용 소프트웨어를 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 그림 3은 정격부하에서의 자속선도 및 자속밀도를 나타낸다. 설계 모델의 정격 부하시 유한요소해석의 결과 얻어진 역기전력과 전류를 그림 4에 나타내었다.



〈그림 3〉 정격 부하에서의 자속선도 및 자속밀도



〈그림 4〉 정격 출력에서의 전압 및 전류 파형 해석 결과

### 2.3.4 시제품 모델의 설계

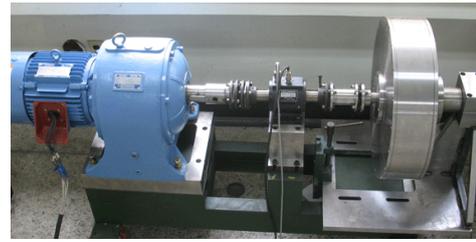
본 논문에서 제안된 외전형 직접 구동 영구자석 발전기의 최종 설계 사양을 표 1에 나타내었다.

〈표 1〉 시제품 모델의 설계 사양

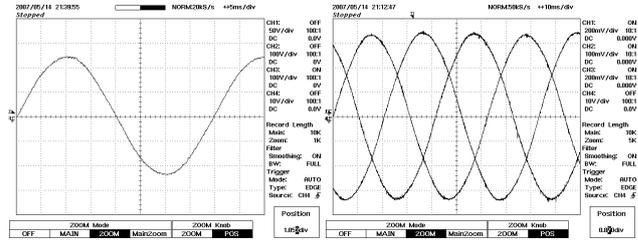
정격 출력	3 KVA
정격 속도	90 rpm
극 수	32
외 경	600 mm
적층 길이	40 mm
공 극	1.5 mm
코어 재질	S20
영구자석 재질	N38SH
자석 두께	8 mm
상당 저항	1.2 Ω
정격 전압(선간)	160 V
정격 전류	11.8 A
효율	85 %

### 2.4 시제품 제작 및 시험

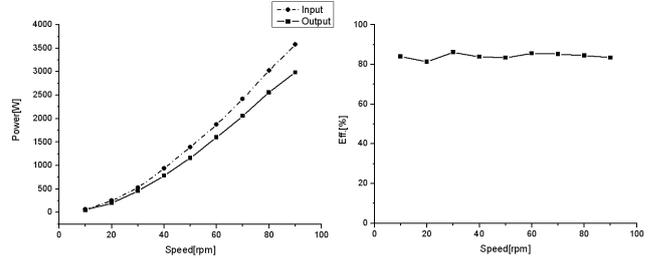
그림 3은 시제품 모델의 성능 시험을 위한 시험 장치 구성을 보여준다. 저속, 고토크의 발전기 성능 시험을 위해 감속기 일체형 유도전동기를 사용하였으며 정확한 발전기 특성을 측정하기 위하여 구동 전동기와 발전기 사이에 고정밀 토크미터와 속도 센서를 장착하였다. 그림 6은 정격 부하시의 발전기 출력 측정 전압 및 전류 파형으로 그림 4의 해석 파형과 대체적으로 일치한다. 성능 측정을 위해서 각 속도에 따라 대칭 3상 저항 부하에 따른 발전기의 전압, 전류, 출력을 측정하였다. 그림 7은 각각의 속도에 따라서 측정된 발전기의 출력과 효율을 나타내고 있다. 표 2는 제안 모델의 해석 결과와 시험 결과를 비교한 것이다. 출력 및 효율은 대체적으로 유사하였으나 기동 토크에서는 발전기 자중에 대한 영향으로 다소 차이를 보임을 알 수 있다.



〈그림 5〉 발전기 성능 시험 장치 구성



〈그림 6〉 정격 출력에서의 발전기 전압 및 전류 파형 측정 결과



〈그림 7〉 출력 특성 및 효율 곡선

〈표 2〉 시제품의 시험 결과 비교

Items	Predicted	Measured
코깅 토크[Nm]	4	
기동 토크[Nm]	10	16
전압[V]	160	158
전류[A]	11.8	12
출력[W]	3000	3000
효율[%]	85	84.3

### 3. 결론

본 논문에서는 3kVA, 90rpm의 저속, 고토크 외전형 직접구동 영구자석 풍력 발전기의 개발 모델을 제안하였다. 기동 토크를 줄이기 위해서 영구자석형 발전기의 기본적 특성인 코깅 토크를 최소화하는 설계 모델을 제안하고 역기전력, 동기리액턴스와 동손을 계산하였다. 또한 기본 모델에 대한 최적화 과정을 통하여 시제품 제작 후 성능 시험을 실시하였으며, 설계 결과와 비교·검토하였다.

검토 결과 발전기의 성능은 해석 결과와 실험 결과가 유사하였으나 기동 토크는 제작된 시제품의 자중에 대한 영향으로 설계 사양과 다소 차이가 발생하였다.

본 논문은 한국전력공사 전력기반조성사업센터에서 지원한 전력변환시스템 신기술 연구센터 (과제번호 2006-0273)의 사업으로 수행되었습니다.

### 〈참고 문헌〉

[1] E. Spooner and A. C. Williamson, "Direct coupled, permanent magnet generators for wind turbine applications," *proc. IEE-Electr. Power Appl.*, vol. 143, no. 1, pp. 1-8, Jan. 1996.

[2] B.J. Chalmers, W. Wu, E. Spooner, "An axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system," *IEEE trans. on Energy Conversion*, Vol.14, No.2, June 1999, pp251-257.

[3] M. Gyimesi, D. Ostergaard, "Inductance computation by incremental finite element analysis," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 35, No. 3, May 1999, pp1119-1122.