

소형 풍력발전용 AFPM 발전기의 설계와 특성해석

이승훈* 김철호* 공정식** 서영택*** 오철수*
 *경북대학교 전기공학과 ** 서라벌 대학 ***구미1대학

Characteristics Analysis and Design of AFPM Generator for small Wind Turbine

Seung-Hun Lee* Chul-Ho Kim* Jeong-Sik Kong** Young-Taek Seo*** Chul-Soo Oh*
 *Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Nat. Univ **Sorabol College ***Kumi College

Abstract - Permanent-magnet generators have been used for wind turbines for many years.

This paper deals with the AFPM(Axial-Flux Permanent Magnet) Generator with a high power-to-weight ratio, dedicated for small wind turbines. The designed and constructed generator as a prototype in this study is a slotless type AFPM Generator with Neodymium- Iron-Boron magnet rotor. Based on that construction, a magnetic circuit analysis of the generator is carried out. Some important equations covering its characteristics and construction are derived and its magnetic and electrical characteristics are investigated.

1. 서 론

대체에너지에 대한 세계적 관심이 증가함에 따라 다양한 개발방법들이 연구되고 있는데, 특히 풍력발전은 타 에너지원보다 그 증가속도가 빠르다.

영구자석 발전기는 풍력발전기의 한 종류로 풍력(Wind Power)을 전기로 변환하는데 오랫동안 사용되어져 왔으며, 최근에는 회전자와 고정자가 Disc형태로 되어 공극에서의 자속 방향이 발전기의 기계축과 평행하게 형성되는 AFPM(Axial-Flux Permanent Magnet) 발전기의 연구도 활발하게 진행되고 있다.[3]-[5]

AFPM 발전기는 단위무게당 출력이 크고 고에너지 밀도를 갖도록 설계가 가능하며, 발전기의 효율적인 냉각 및 Slim형으로 제작이 가능해 Multistator로 제작이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 영구자석 재료로 Nd-Fe-B와 같은 고에너지 영구자석이 보급됨에 따라 비교적 큰 공극을 형성할 수 있게되어 Slotless형으로도 제작이 가능하게 되었다.[2]

본 논문에서는 소형 풍력발전용 AFPM 발전기의 치수제한 및 특성계산에 필요한 설계식을 도출하고, 도출된 설계식으로부터 주어진 정격에 맞는 AFPM 발전기를 설계하고 그 특성해석을 통하여 소형 풍력발전용 AFPM 발전기의 응용가능성을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 풍력 발전 시스템

바람을 이용하는 풍력발전은 풍속에 의해 발생된 풍력 에너지를 1차적으로 풍력 터빈의 회전날개(Blade)에 의하여 기계적 에너지로 변환하고, 이 변환된 기계적 에너지를 이용하여 발전기의 회전자를 구동시켜 최종적으로 전기에너지를 출력시킨다.

풍력발전 시스템에서 단위 면적당 공기 역학적인 출력과 이로부터 회전자속에 얻어지는 이상적인 기계적 출력은 다음과 같다.

$$\frac{P}{A} = 0.59 \frac{1}{2} \rho v^3 \quad [kW/m^2] \quad (1)$$

$$\frac{P}{A} = C_p(\lambda) \frac{1}{2} \rho v^3 \quad [kW/m^2] \quad (2)$$

(1)식에서 공기밀도 ρ 는 (1.25 kg/m^3)의 실용값을 쓰는 것이 일반적이며, (2)식에서의 출력계수 $C_p(\lambda)$ 는 날개 단면의 형상에 의해 결정되며 그 최대값이 Betz 상수인 0.59를 넘지 못하며 주속비(λ)의 함수로 나타난다.[1]

본 논문에서는 미국 Southwest Windpower사의 Air 403 기종의 회전날개(D=1.17m)를 적용하였으며, 그 공기역학적 출력곡선과 이상적인 기계적 출력곡선으로부터 얻어진 출력계수는 아래와 같다.

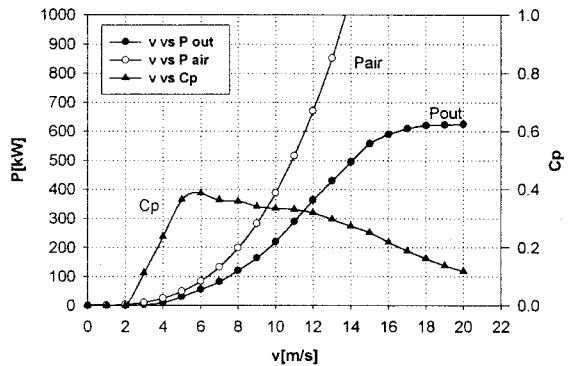


그림 1. 회전날개의 출력과 출력계수

2.2 소형풍력발전용 AFPM 발전기의 모델링

2.2.1 AFPM 발전기의 특성 방정식

AFPM 발전기의 특성은 일반적인 Brushless 직류기의 특성과 유사하다. 영구자석의 극 피치는 전기각 180°이며, 코일의 피치는 최소 120°에서 240° 사이에 있게 된다. 따라서 한상 권선에 나타나는 유기 기전력은 식(3)과 같다.

$$e_a = \omega \sum_{p=1}^m \frac{d\psi_p}{d\theta} \quad (3)$$

여기서 ω 는 기계적인 회전각속도이며, θ 는 기계적 회전각, 그리고 ψ 는 코일과의 쇄교자속을 나타낸다.

영구자석의 자속밀도가 원주 방향에 관계없이 공극내에서 일정하다면, 즉 영구자석의 프런징 효과나 영구자석 자화 과정의 불균일성을 무시할 수 있다면 AFPM 발전기의 권선당 유기기전력은 한 권선에 대해 공극 자속밀도를 적분하여 한 턴당 유기기전력 e_{turn} 은 식(4)와 같이 구해진다.

$$e_{turn} = 2 \omega \int_{R_i}^{R_o} B r dr \quad (4)$$

e_{turn} 은 코일의 한 턴당 유기기전력이며, R_i 와 R_o 는 축의 중심에서 자석이 형성하는 회전자의 내경과 외경을 의미하며, B 는 공극의 자속밀도, r 은 도체의 회전반경을 나타낸다. 그러나 고정자의 권선 형태가 전철 분포권으로 구성되어 있으므로 실제의 유기기전력 E_{rms} 는 권선계수(k_w)를 고려하여 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$E_{rms} = 0.353 k_w \omega N_p p B_{ave} (R_o^2 - R_i^2) \quad (5)$$

여기서 k_w 는 권선계수이며, N_p 는 상당극당 권선수, p 는 극수, B_{ave} 는 공극의 평균자속 밀도를 나타낸다.

식(5)에서 어떠한 전압강하도 없다고 가정하면 출력은 아래와 같이 나타낸다.

$$P_{out} = 3 \times [0.353 k_w \omega N_p p B_{ave} (R_o^2 - R_i^2)] I_a \quad (6)$$

발전기 출력은 고정자 권선에 의한 Electric loading과 전 영구자석에서 나오는 자속에 의한 공극내의 자속 밀도에 의하여 결정되어진다. 고정자 내경에서의 Electric loading J 는 식 (7)과 같이 주어진다.

$$J = \frac{3 I_a p N_p}{2 \pi R_i} \quad (7)$$

위에서 주어진 식(7)을 식(6)에 대입하여 정리하면 식(8)과 같고 여기에서 $dP_{out} / dk_r = 0$ 이 되는 최대값 P_{out} 은 $k_r = 0.577$ 이 된다. 따라서 회전자의 내경과 외경의 비는 0.577이 이상적임을 알 수 있다.

$$P_{out} = 0.707 \pi J \omega B_{ave} R_o^3 k_r (1 - k_r^2) \quad (8)$$

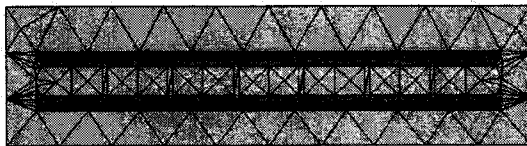
$(k_r = R_i / R_o)$

2.2.2 FEM을 이용한 자기 회로 해석

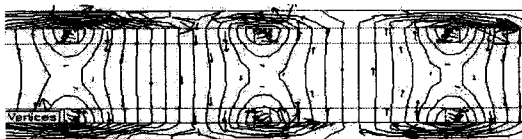
회전기 설계와 특성해석 시뮬레이션에 이용되는 프로그램은 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 유한요소 해석법을 사용하였다. 발전기의 자속 해석에는 2차원 해석을 적용하였다. 시뮬레이션 결과 최적의 극간 거리는 2mm로 나타났으며, 회전자 철심의 축방향 두께는 3mm가 적합함을 알 수 있었다.

그림 2 (a)는 2차원 해석을 위한 삼각요소 분할의 형상이며 (b)는 두 극에 해당하는 부분을 확대하여 발전기의 자로를 나타낸 그림이다.

그림 3는 그림 2 (b)의 모델에 대하여 해석한 결과를 이용하여 공극의 자속 분포 파형을 나타낸다. 이 결과는 MAGNET-PHYSIK사의 Fluxmeter를 사용하여 측정 한 결과(약 0.44 T,max) 시뮬레이션 값보다 약간 낮게 나타났다.



(a)



(b)

그림 2. 삼각요소 분할(a) 및 자로 해석(b)

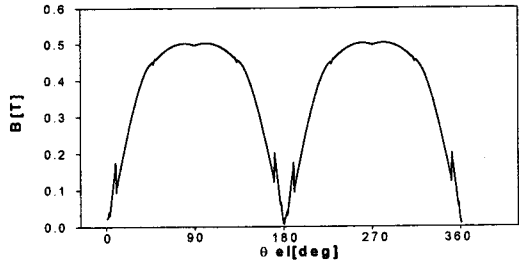


그림 3. 공극 12mm에서의 자속밀도 분포

2.2.3 AFPM 발전기의 구조

AFPM 발전기는 공극면이 회전축과 직교하는 형태이며, 공극 내에는 축과 평행한 방향의 자속이 발생한다. 그림 4에 AFPM 발전기의 개략적인 구조를 나타내었다. 회전자는 디스크형의 원판에 영구자석(Nd-Fe-B)이 부착된 형태로서, 고정자 양쪽 측면의 두 개의 회전자로 구성되어 있다. 고정자 코일의 양 측면을 이용하면 두 개의 회전자로 인하여 영구자석의 수는 증가되나 도체의 양쪽 측면을 동시에 이용할 수 있어 보다 고 효율의 발전기를 설계할 수 있다. 또한 영구자석이 부착된 두 개의 회전자 Disc는 팬의 역할을 하므로 고정자의 권선에서 발생하는 열의 방출을 용이하게 하여 같은 용량의 권선에 비하여 더 많은 전류를 흘릴 수가 있다.

AFPM 발전기의 다른 장점은 구조적으로 큰 직경과 짧은 축방향 길이를 이용하여 다극기의 제작과 Multi-stator의 제작이 가능한 점이다. 이것은 또한 소형 경량화를 가능하게 해 풍력발전 시스템에서 Tower의 상부에 놓여지는 발전기의 중량을 줄임으로 인한 비용절감의 효과를 준다.

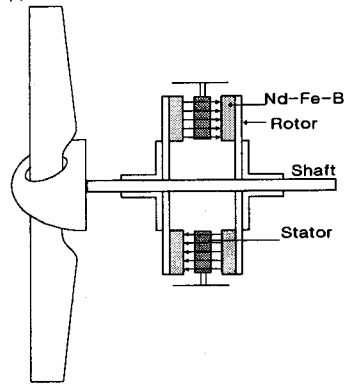


그림 4. 소형풍력발전용 AFPM 발전기의 개략적인 구조

표 1. Prototype AFPM 발전기의 사양

상	수	3
극	수	14
코일 도체의 직경		0.8 mm
상 당 코일 수		14 EA
코일 당 턴 수		18 turn
한상의 인덕턴스		0.1 mH
한 상의 저항		1 Ω
회전자 외경 (R_o)		154 mm
회전자 내경 (R_i)		88 mm
고정자의 두께		10 mm
회전자 철심의 두께		3 mm
전체 축방향 길이		25 mm

표1은 실험을 위해 제작된 prototype AFPM Slotless 발전기의 사상을 나타낸다.

그림 5 (a)는 육각형 고정자 권선 형상을 나타내고 있다. 육각형 권선의 형상을 이용함으로써 End-winding을 줄이고, Active side의 도체 길이를 길게 하였으며 각 권선은 Twist를 주어 배열을 용이하게 함과 동시에 고정자의 축방향 길이를 줄일 수 있게 하였다. 그림 5 (b)는 실제작된 고정자의 Epoxy molding된 형상을 (c)는 회전자 Disc를 나타내는 그림이다.

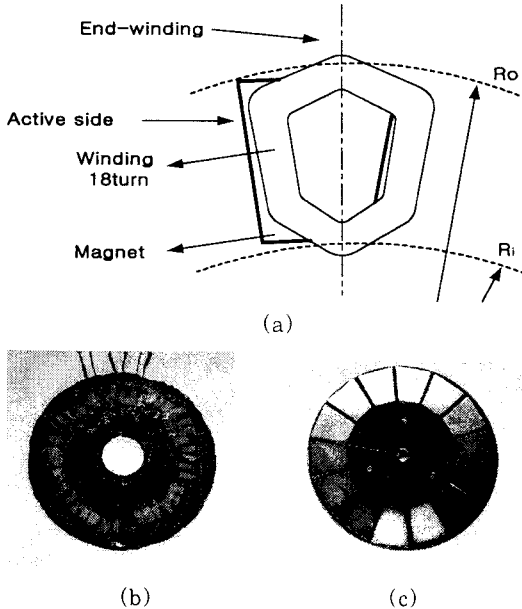


그림 5. 육각형 고정자 권선 형상(a), 고정자(b) 회전자 Disc(c)

2.3 실험 및 결과

발전기의 무부하 특성 실험을 통하여 발전기 유기기전력 특성 특성을 측정하였다. AFPM 발전기의 유기기전력은 공극 자속밀도 및 회전자의 속도 그리고 기계적 상수에 의하여 구해진다.

그림 6 (a)는 회전날개의 운전영역에 해당하는 회전수에 대한 무부하 Y결선의 상전압과 선간전압을 측정된 그래프이고 (b)는 2000 rpm에서의 유기기전력의 파형을 나타내는데 선간전압의 위상이 상전압보다 30° 앞서 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 코일 저항 5Ω을 평형 Y부하로 연결하여 선간 전압과 전류를 측정하여 나타내었다.

부하 조건에서는 전기자 전류의 영향을 고려하여 회전수를 1200 rpm 까지만 측정하였다.

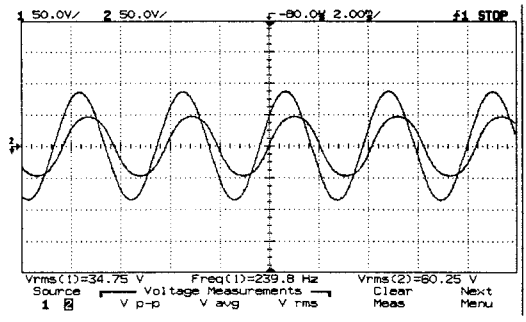
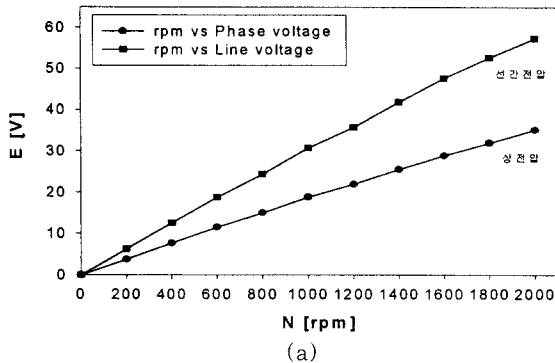


그림 6. 무부하 특성 (a) 유기기전력 파형 (b)

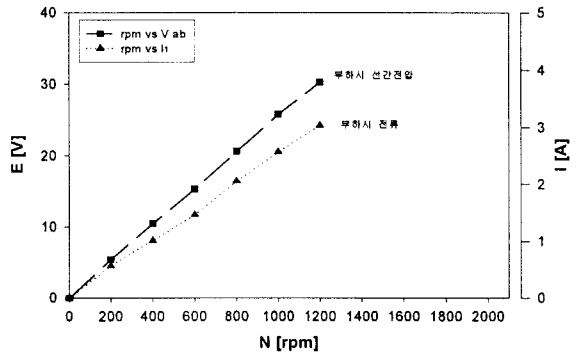


그림 7. 부하시 전압 전류

3. 결 론

본 논문에서는 소형 풍력발전용 AFPM 발전기를 설계하고 특성해석을 위하여 자기회로를 해석하고 특성식들을 유도하였다. 이를 통하여 실제작, 특성실험 등을 수행함으로써 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 회전 반경에 비해 축방향 길이가 짧은 Slim type의 소형 풍력발전에 적합한 AFPM 발전기를 제작할 수 있었다.

둘째, Axial Flux 형태의 발전기에 대한 특성식을 도출하였고 최대 출력 조건에서의 회전자 내·외경 비가 0.577임을 알 수 있었다.

셋째, AFPM 발전기의 고정자 권선형상을 육각형으로 설계함으로써 End-winding이 줄었고, Active side의 도체 길이가 길어져 발전기의 효율 및 출력 특성을 향상 시켰다.

(참 고 문 헌)

- [1] 김철호, 공정식, 오철수, "가변속과 일정속 풍력발전시스템의 출력제어", 한국에너지공학회지, 제9권, 2호, 2000, 9.
- [2] 이정열, 공정식, 서영택, 오철수, "Slotless Axial Flux BLDC 전동기 설계", 경북대학교 전자기술연구지, pp. 50-58, 1997.
- [3] E. Muljadi, C. P. Butterfield, Yih-huie Wan, "Axial-flux modular permanent magnet generator with a toroidal winding for wind-turbine application", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35 No. 4, pp. 831-836, 1999.
- [4] B. J. Chalmers, W. Wu, E. Spooner, "An axial-flux permanent magnet generator for a gearless wind energy system", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14 No. 2, pp. 251-257, 1999.
- [5] S. El-Hasan, C. K. Luk, F. S. Bhinder, M. S. Ebaid, "Modular Design of High-Speed Permanent Magnet Axial-Flux Generators", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36 No. 5, 2000