

직접 구동 AFPM 풍력발전기의 특성해석

서영택* 김형길** 공정식*** 김철호**** 오철수****
 구미1대학* (주)서영테크** 서라벌대학*** 경북대 전자전기공학부****

Characteristics Analysis of a Direct-Drive AFPM Generator

Young-Taek Seo* Hyoung-Gil Kim** Jeong-Sik Kong*** Chul-Ho Kim**** Chul-Soo Oh****
 *Kumi College **SeoYoung Tech ***Sorabol College ****Kyungpook National Univ.

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 environment friendly functions. The paper discusses the development of a coreless axial-flux permanent magnet (AFPM)generator for a wind power system. Analyzed the Coreless AFPM generator by electromagnetic, and designed wind power generator with this. The 3 phase output of stator is rectified and fed to a common dc link. The overall machine structure has high compactness and lightness, because of the lack of the iron core. The test results with a resistive load confirm the satisfactory operation of generator. Compared with conventional generator, the design has lower weight, lower power loss and improved efficiency.

특성해석을 통하여 풍력발전용 AFPM 발전기를 다양하게 적용 할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 코어리스 AFPM 발전기의 구조와 원리

AFPM 발전기는 공극면이 회전축과 직교하는 형태이며, 공극 내에는 축과 평행한 방향의 자속이 발생한다. 그림1에 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.

1. 서 론

21세기에 접어들면서 에너지 소비의 급증으로 인한 석탄, 석유등의 화석에너지 고갈에 대한 위기감이 미래 에너지 공급원으로서의 풍력자원 개발을 촉진시키는 계기가 되었다. 그 뿐만 아니라 화석에너지의 사용으로 인해 유발되는 대기 환경 오염문제도 또 하나의 지구생태계를 위협하는 새로운 문제점으로 등장하면서 대체에너지 개발에 대한 세계 각국의 관심은 더욱 고조되고 있다[1]. 외국의 사례에서 복합발전 시스템인 중, 소형 풍력 발전기와 태양광발전을 동시에 설치하여 효율적인 발전 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[2-4]. 영구자석형 발전기는 풍력을 전기로 변환하는데 오랫동안 사용되어져 왔으며, 최근에는 소형에서 대형까지 다양한 발전기가 제작되고 있다.[5]

AFPM(Axial Flux Permanent Magnet)발전기는 회전자와 고정자가 Disc형태로 되어 공극에서 자속 방향이 발전기의 기계축과 평행하게 형성되어 단위 무게당 출력력이 크고 고에너지 밀도를 갖도록 설계 할 수 있다. 발전기의 회전자가 아웃로터(outer-rotor)이므로 기어를 사용하지 않고 직접 날개를 부착하여 사용할 수 있다. AFPM 발전기는 효율적인 냉각 및 Slim형으로 제작 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 영구자석 재질로 Nd-Fe-B와 같은 고에너지 영구자석이 보급됨에 따라 비교적 큰 공극을 형성할 수 있게되어 코어리스(Coreless)형으로도 제작이 가능하게 되었다. 코어리스의 장점은 권선의 체적 밀도를 상대적으로 높게 설계 할 수 있으며, 코킹 토크(cogging torque)에 의해 발생되어지는 손실을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 풍력발전용 AFPM 발전기의 치수 및 특성계산에 필요한 설계식을 도출하고, 도출된 설계식으로 정격에 맞는 prototype AFPM 발전기를 제작하고

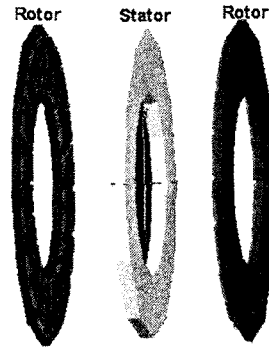


그림 1 코어리스 AFPM 발전기 구조

AFPM 발전기의 다른 장점은 구조적으로 큰 직경과 짧은 축방향 길이를 이용하여 다극기의 제작과 Multi stator의 제작이 가능한 점이다. 고정자에는 코어가 없기 때문에 권선 체적밀도를 높게 설계할 수 있다. 고정자에 쓰이는 에폭시는 코어와 같은 기계적인 특성을 갖추어야 하므로 고강도 이면서 열에 강한 것으로 설계하였다. 이것은 또한 소형 경량화를 가능하게 해 풍력발전 시스템에서 Tower의 상부에 놓여지는 발전기의 중량을 줄임으로 인한 비용절감의 효과를 준다.

표1은 실험을 위해 제작된 prototype AFPM 발전기의 사양을 나타낸다.

표 1 Prototype AFPM 발전기의 사양

| | |
|-----------------|-------------|
| 상 수 | 3 |
| 극 수 | 20 |
| 코일 도체의 직경 | 0.8 mm×4 |
| 상 당 코일 수 | 20 |
| 코일 당 턴 수 | 26 |
| 상 당 인덕턴스 | 0.426 mH |
| 상 당 저항 | 0.312 Ω |
| 영구 자석 재료 | Nd-Fe-B |
| | Br : 1.25 T |
| 회전자 외경(R_o) | 245 mm |
| 회전자 내경(R_i) | 146 mm |
| 고정자 두께 | 11 mm |
| 영구 자석 두께 | 5 mm |
| 공극 길이 | 13 mm |
| 전체 축 방향 길이 | 38 mm |

2.2 AFPM 발전기의 특성 방정식

AFPM 발전기의 특성은 일반적인 동기발전기의 특성으로부터 알아낼 수 있다. 그림 2는 AFPM 발전기의 양쪽 회전자 영구자석 사이에 a 상의 권선 위치를 나타내고 있다.

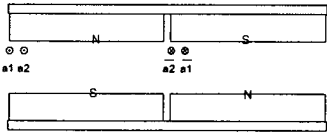


그림 2 영구자석과 코일의 위치

이때 영구자석의 극 피치는 전기각 180°이며, 코일의 피치는 최소 120°에서 최대 240° 사이에 있게 된다. 따라서 a상 권선에 나타나는 유기 기전력은 식(1)과 같다.

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

여기서 ω 는 기계적인 회전각속도이며, θ 는 기계적 회전각, 그리고 ψ 는 코일과의 쇄교 자속을 나타낸다. 영구자석의 자속밀도가 원주 방향에 관계없이 공극내에서 일정하다면, 즉 영구자석의 프린징 효과나 영구자석 자화 과정의 불 균일성을 무시할 수 있다면 AFPM 발전기의 권선당 유기기전력은 한 권선을 따라 공극 자속 밀도를 적분함에 의해 식(2)와 같이 구해진다.

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

e_{arm} 은 코일의 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. 그러므로 상당 유기기전력은 식 (3)과 같다.

$$e_a = \omega N_p \rho B_{ave} (R_o^2 - R_i^2) \quad (3)$$

여기서 N_p 는 상당 극당 권선수, ρ 는 극수, B_{ave} 는 공극의 평균자속 밀도를 나타낸다.

AFPM 발전기의 출력은 전기적 출력을 이용하여 계산할 수 있다. AFPM 발전기의 전기적 출력은 전기자 권선의 유기기전력과 권선에 흐르는 전류에 의하여 형성된다. 따라서 발전기 한 상의 출력은 사다리꼴 형상의 유기기전력과 구형파 전류에 의해 생성되게 된다. 즉, 발전기 한상의 기계적 출력 P_a 은 식 (4)과 같이 나타낸다.

$$P_a = E_a I_a = \omega T_a \quad (4)$$

따라서 발전기 한 상에서 발생하는 토크 T_a 은 식(5)과 같이 나타낸다.

$$T_a = \frac{e_a I_a}{\omega} \quad (5)$$

앞서 구한 AFPM 발전기의 유기기전력의 식(3)을 식(5)에 대입하면 AFPM 발전기의 한 상의 토크 식(6)을 구할 수 있다.

$$T_a = N_p \rho B_{ave} I_a (R_o^2 - R_i^2) \quad (6)$$

발전기에 부하 인가시 공극의 자속, 즉 유기기전력과 교차하는 전류 구간의 비에 따라 출력은 달라지게 된다. 그러므로 이 구간에 대한 작용비 k_p 를 적용하여 식(6)을 전체의 토크 값으로 바꾸어 식(7)으로 쓸 수 있다.

$$T = 2\pi J k_p B_{ave} R_i (R_o^2 - R_i^2) \quad (7)$$

발전기 출력은 고정자 권선에 의한 Electric loading 과 영구자석에서 나오는 자속에 의한 공극내의 자속 밀도에 의하여 결정되어진다. 고정자 내경에서의 Electric loading J 는 식 (8)과 같이 주어진다.

$$J = \frac{I_p \rho m N_p}{2\pi R_i} \quad (8)$$

여기서 m 은 상수, I_p 전류 최고치를 나타낸다.

위에서 주어진 식(7)을 발전기의 회전속도가 n 일때 출력 P_{out} 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$P_{out} = 4\pi^2 J k_p n B_{ave} R_i (R_o^2 - R_i^2) \quad (9)$$

2.3 FEM을 이용한 자기 회로 해석

본 논문에서는 유한요소해석법(FEM)을 적용하여 다양한 형태의 자로 해석을 수행하였다. AFPM 발전기의 경우 원주 방향으로 회전자 영구자석 및 고정자 권선이 대칭적 구조를 가지므로 2차원 유한요소해석법(Finite Element Method)을 적용할 수 있다. 본 논문에서는 AFPM 발전기의 원주방향 대칭성을 이용하여 2차원, 3차원 해석법을 적용하여 발전기 자속 해석을 수행하였다. 본 논문에서 사용한 유한 요소법 소프트웨어는 Ansoft사의 Maxwell 2D, 3D 프로그램이다.

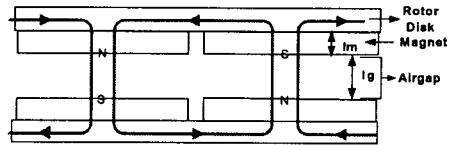


그림 3 자로의 경로

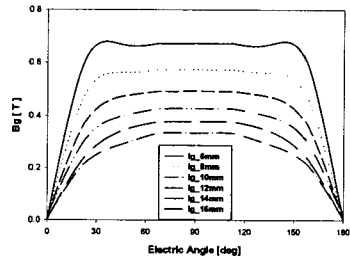


그림 4 공극 거리 변화에 대한 자속밀도

코어리스는 중앙에 철심이 없기 때문에 마주보는 영구자석의 극을 같은극(N-N, S-S)으로 구성하게 되면, 누설자속이 매우 커져 사용할 수 없고, 따라서 마주보는 영구자석의 극이 서로 다른 극(N-S)이 되도록 구성한다. 이와 같은 구조의 자속 배치가 그림 3에 나타나 있다. 발전기 설계에서 공극 거리가 자속 밀도와 밀접한 관계가 있으므로, 공극 길이(l_g) 변환에 대한 자속 밀도 값을 2차원 유한요소법(FEM)으로 시뮬레이션 등을 통해 해석한 값을 그림 4에 나타내었다. 3차원 해석법을 적용한 발전기 자속 해석에서 모든 공극 부분에서 자로의 형성은 동일함을 알 수 있다. 이 과정에서 공극에서 도체와 쇄

교하지 못하고 인접한 영구자석 사이에서 생성되는 누설자속과, 회전자 disc 간의 누설이 생성됨을 확인하였다.

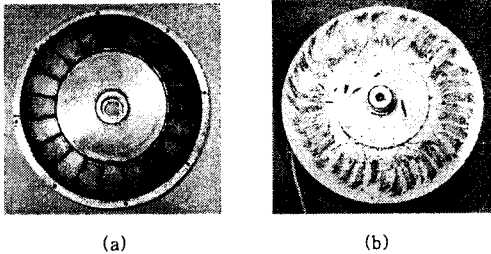


그림 5 AFPM 발전기의 회전자 (a) 회전자, (b) 고정자

2.4 실험 및 결과

발전기의 특성실험을 위하여 prototype AFPM 발전기를 설계하고, 설계된 데이터를 이용하여 prototype 발전기를 제작하였다. 본 논문에서는 축 방향 공극형 발전기를 선택하였으며, 고정자의 형태는 코어가 없는 코어리스형이다.

그림 5는 Prototype AFPM 발전기 회전자(a)와 고정자(b)를 나타내고 있다. 고정자에 쓰이는 에폭시는 열에 강하고 고강도의 기계적인 특성을 가지고 있다. 그림 6은 발전기 실험 구성도를 나타내고 있으며, 입력에는 풍력 대신 전동기를 사용하였다. 발전기의 3상 출력을 AC/DC 컨버터를 통하여 부하단에 연결하였다. 입력의 전동기의 속도를 가변하여 무부하 특성 실험과 부하 실험을 통하여 발전기의 전기적 특성을 측정하였다.

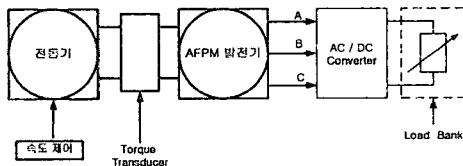


그림 6 AFPM 발전기의 실험 장치 구성도

무부하시 속도와 유효기전력은 그림 7에 나타내었으며, 발전기 회전속도를 800rpm까지 변화시켜 가면서 출력 전압을 측정하였다. 유효기전력은 속도에 비례한다는 것을 알 수 있었다.

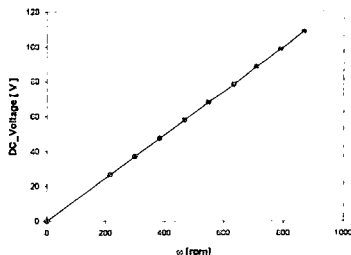


그림 7 발전기의 무-부하시 속도, 전압

입력 전동기의 속도 가변시 발전기의 출력은 AC/DC 컨버터와 연결된 저항 부하에 연결하였다. 그림 8은 발전기의 선간 전압과 전류가 500rpm에서 출력 파형을 보여 주고 있다. 그림 9는 속도에 따른 부하 증가시 DC 전압을 나타내고 있다. 발전기의 부하가 증가할수록 전압강하가 증가한다는 것을 알 수 있다. AFPM 발전기의 속도가 200-600rpm에서 정격 출력은 0.4-1.3kW로 측정되었다. 발전기의 손실은 전기적 손실과 기계적 손실로 나누어진다. 전기적 손실에는 동손

과 철손이 대부분인데, 본 논문의 발전기는 코어리스형이므로 대부분의 손실이 동손이다. 또한 AC/DC 컨버터에 의한 정류기 손실을 포함하고 있다. 저항 부하시 prototype 코어리스 발전기는 500rpm에서 1kw 출력시 효율이 83%로 측정되었다.

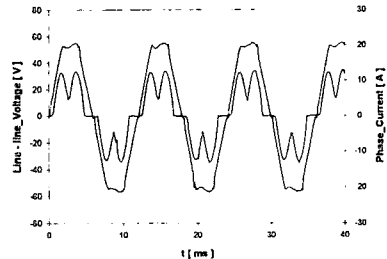


그림 8 발전기의 선간 전압, 전류 파형(500rpm)

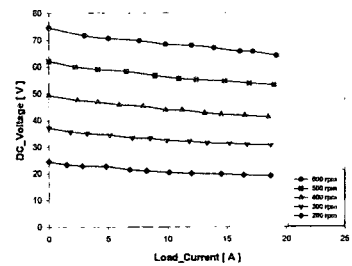


그림 9 발전기의 부하시 전압, 전류

3. 결 론

본 논문에서 직접 구동형(Gearless) AFPM 발전기를 설계하고 특성식을 유도하였다. 유한요소법(FEA)을 이용하여 공극의 자속 밀도를 계산하였고 실험을 통해서 공극 거리(1g)에 따른 값과 비교하였다. 특성 해석을 바탕으로 prototype 발전기를 제작하였으며, 실험을 통해서 검증하였다. AFPM 발전기의 저항 부하 실험 결과 양호한 특성을 확인하였다. 또한 발전기의 무계당 토크비가 증가하였고, 고정자 코어가 없는 구조이므로 코깅(cogging)토크에 의한 손실을 제거하였다.

앞으로 본 연구 결과를 보완하여 국내의 소형 풍력발전 시스템에 적용하여 대체에너지의 활성화에 기여하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. David Richardson, Gerald M. Mcnerney, "Wind Energy Systems," Proceedings of the IEEE, Vol. 81, No. 3, pp.378~388, March 1993.
- [2] Muljadi, E.; McKenna, H.E.; "Power quality issues in a hybrid power system", Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: 38 Issue: 3 , pp. 803 -809 May/June 2002.
- [3] Chalmers, B.J.; Spooner, E.; "An axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system", Energy Conversion, IEEE Transactions on , Volume: 14 Issue: 2 , pp. 251 -257 Jun 1999.
- [4] Crescimbin, F.; Carricchi, F.; Solero, L.; Chalmers, B.J.; Spooner, E.; Wu Wei; "Electrical equipment for a combined wind/PV isolated generating system", Opportunities and Advances in International Electric Power Generation, International Conference on (Conf. Publ. No. 419) , pp. 59 -64. 18-20 Mar 1996.
- [5] Lampola, P.; Perho, J.; "Electromagnetic analysis of a low-speed permanent-magnet wind generator", Opportunities and Advances in International Electric Power Generation, International Conference on (Conf. Publ. No. 419) , pp. 55 -58. 18-20 Mar 1996.