

직접 구동용 5kW AFPM 풍력 발전기 특성 해석

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

Characteristics Analysis of a Direct-Drive AFPM Generator for 5kW Wind Turbine

Hyoung-Gil Kim* Chul-Ho Kim* Young-Taek Seo** Chul-Soo Oh***
*SEOYOUNG TECH **Kumi College ***Kyungpook National Univ.

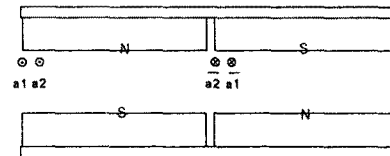
Abstract - Nowadays, the global interests are concentrated on the preserving of the clean environment, and the diminishing of the dependence on the fossil energy. and among the possible alternative energies, the wind turbine generating system is considered to be the best suited to produce high efficiency energy, without affecting the natural environment.

The permanent magnet generators were been used for the wind power generating, for long time, with continuous efforts to improve the generating efficiency. And the latest trend on it is to develop an AFPM(Axial Flux Permanent Magnet)type, which is composed in the structure of rotor and stator shaped in the disc forms, and the direction of the flux at the air gap runs in parallel to the shaft. This thesis is on the study concerning with the analysis of the characteristics of the 5 kW at 300rpm direct drive AFPM generator which is suitable for the small scale wind turbine generating system. In it, the Electro-magnetically Coreless AFPM was been analyzed, the prototype generators been made, concentrated on interpreting the characteristics of the power output, and verifying it through the theoretical study and practical tests.

회전자는 디스크형의 원판에 영구자석(Nd-Fe-B)이 부착된 형태로, 고정자 양쪽 측면의 두 개의 회전자로 구성되어 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. 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. 발전기의 회전자가 아웃로터(outer-rotor)이므로 기어를 사용하지 않고 직접 날개를 부착하여 사용할 수 있다. AFPM 발전기는 효율적인 냉각 및 Slim형으로 제작할 수 있는 장점을 가지고 있다.

2.2 AFPM 발전기의 특성 방정식

Fig. 2는 AFPM 발전기의 양쪽 회전자 영구자석 사이에 a 상의 권선 위치를 나타내고 있다.



<Fig 2> Permanent magnet and coil position

영구자석의 자속밀도가 원주 방향에 관계없이 공극 내에서 일정하다면, 즉 영구자석의 프링징 효과나 영구자석 자화 과정의 불 균일성을 무시할 수 있다면 AFPM 발전기의 상당 유기기전력은 식 (1)과 같다.

$$e_a = \omega N_p \rho B_{ave} (R_o^2 - R_i^2) \tag{1}$$

여기서 ω 는 기계적인 회전각속도 N_p 는 상당극당 권선수, ρ 는 극수, B_{ave} 는 공극의 평균자속 밀도를 나타내며, R_i 와 R_o 는 축의 중심에서 자석이 형성하는 회전자의 내경과 외경을 의미하며, B 는 공극의 자속밀도를 나타낸다.

AFPM 발전기의 전기적 출력은 전기자 권선의 유기기전력과 권선에 흐르는 전류에 의하여 형성된다. 따라서 발전기 한 상의 출력은 사다리꼴 형상의 유기기전력과 구형과 전류에 의해 생성되게 된다. 발전기 출력은 고정자 권선에 의한 Electric loading J 와 영구자석에서 나오는 자속에 의한 공극내의 자속 밀도에 의하여 결정되어진다. 발전기의 회전속도가 n 일때 출력 P_{out} 식(2)로 나타낼 수 있다.

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

2.3 FEM을 이용한 자기 회로 해석

본 논문에서는 유한요소해석법(FEM 3D)을 적용하여 다양한 형태의 자로 해석을 수행하였다. 코어리스는 중앙에 철심이 없기 때문에 마주보는 영구자석의 극이 서로 다른 극(N-S)이 되도록 구성한다. 이와 같은 구조의 자극 배치와 Fig. 2에 나타나 있다. 영구 자석형 발전기 설계에서 공극 길이와 자속 밀도와 밀접한 관계가 있으므로, 공극에 대한 자속 밀도 값을 3차원 유한요소법(FEM)으로 시뮬레이션을 통해 해석한 값을 Fig. 3, Fig. 4에 나타내었다. 양쪽 회전자 자석 사이의 공극길이는 15mm이며 공극 자속 밀도는 Max 0.65 T이다. 3차원 해석법을 적용한 발전기 자속 해석에서 모든 공극 부분에서 자로의 형상은 동일함을 알 수 있다. 이 과정에서 공극에서 도체와 채교하지 못하고 인접한 영구자석 사이에서 생성되는 누설자속과, 회전자 disc 간의 누설이 생성됨을 확인하였다.

1. 서 론

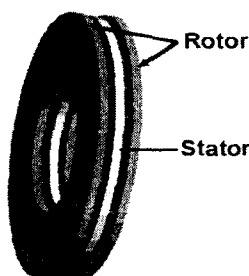
21세기에 접어들면서 에너지 소비의 급증으로 인한 석탄, 석유 등의 화석에너지 고갈에 대한 위기감이 신·재생에너지 개발을 촉진시키는 계기가 되었다. 화석에너지의 사용으로 인해 유발되는 대기 환경 오염문제는 또 하나의 지구생태계를 위협하는 새로운 문제점으로 등장하면서 대체에너지 개발에 대한 세계 각국의 관심은 더욱 고조되고 있다[1]. 영구 자석형 발전기는 풍력을 전기로 변환하는데 오랫동안 사용되어져 왔으며, 최근에는 소형에서 대형까지 다양한 발전기가 제작되고 있다[2].

본 논문에서는 풍력발전용 AFPM(Axial Flux Permanent Magnet) 발전기의 치수 및 특성계산에 필요한 설계식을 도출하고, 도출된 설계식으로 정격에 맞는 prototype AFPM 발전기를 제작하고 특성 실험을 통하여 5 kW 풍력용 발전기에 적용할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

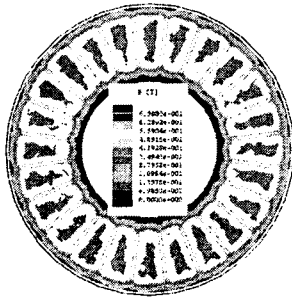
2. 본 론

2.1 코어리스 AFPM 발전기의 구조와 원리

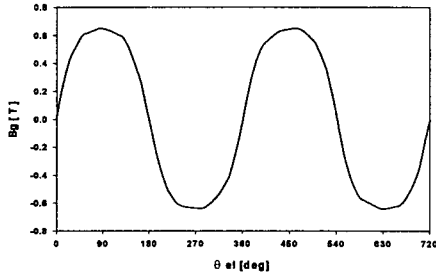
AFPM발전기는 회전자와 고정자가 Disc형태로 되어 공극에서 자속 방향이 발전기의 기계축과 평행하게 형성되어 단위 무게당 출력이 크고 고에너지 밀도를 갖도록 설계 할 수 있다. 코어리스(Coreless)의 장점은 권선의 체적 밀도를 상대적으로 높게 설계 할 수 있으며, 코깅 토크(cogging torque)에 의해 발생되어지는 손실을 줄일 수 있다. AFPM 발전기는 공극면이 회전축과 직교하는 형태이며, 공극 내에는 축과 평행한 방향의 자속이 발생한다. Fig. 1에 AFPM 발전기의 개략적인 구조를 나타내었다.



<Fig 1> Construction of Coreless AFPM Machine



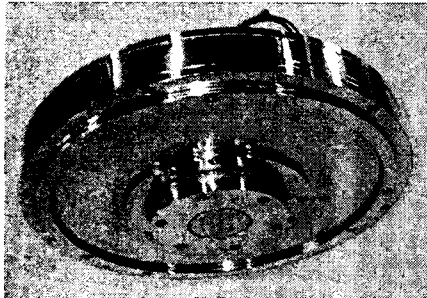
<Fig 3> Flux density distribution at stator



<Fig 4> Flux density distribution at airgap- B_g

2.4 실험 및 결과

본 논문의 소형 풍력용 영구자석형 발전기는 직접 구동방식으로 24극의 다극기이며 저속용으로 제작 되었으며, 발전기 회전자로 이어지는 중간 동력변환 장치가 없기 때문에 에너지변환 효율이 상대적으로 높게 설계 되었다. 고정자의 형태는 코어리스형으로 고정자에 쓰이는 에폭시는 열에 강하고 고강도의 기계적인 특성을 가지고 있다. Fig.5는 Prototype AFPM 발전기를 나타내고 있다. Table 1은 실험을 위해 제작된 AFPM 발전기의 사양을 나타낸다.

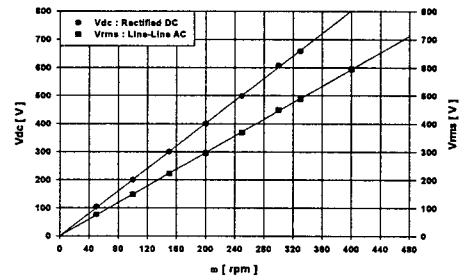


<Fig 5> Prototype AFPM Generator

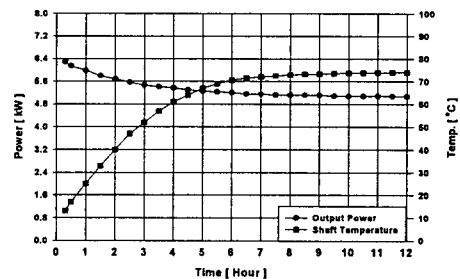
<Table 1> Specification of a prototype AFPM machine

Power	5 kW
Speed	300 rpm
Number of phase	3
Number of pole	24
Number of coil/phase	12
Number of turn/coil	106
Magnet type	NdFeB
Resistance/phase	2.83 Ω
Inductance/line-line	49.66 mH
Outer diameter	420 mm
Inner diameter	230 mm
Stator thickness	12 mm
Magnet thickness	10 mm
Air gap	15 mm
Total weight	62 kg

독립형, 계통 연계형으로 사용되는 영구자석형 풍력 발전기는 AC에서 DC로 전력 변환을 한다. 발전기의 특성실험을 위하여 입력에는 풍력 대신 전동기를 사용하였으며 발전기의 3상 출력을 AC/DC 컨버터를 통하여 저항 부하단에 연결하였다. 입력의 전동기의 속도를 가변하여 무부하시 속도와 유기기전력은 Fig. 6에 나타내었으며, 발전기 회전속도를 500rpm까지 변화시켜 가면서 출력 선간AC, 정류 DC전압을 측정하였다. 유기기전력은 속도에 비례한다는 것을 알 수 있다. 가변 속도에 대한 부하 실험을 통하여 발전기의 출력 특성을 측정하였다. AFPM 발전기의 회전 속도가 100-500rpm에서 출력은 1.5-8.4 kW로 측정되었다. 또한 연속 정격 출력 실험을 통하여 발전기의 내부 온도 특성을 알 수 있었다. Fig. 7은 실 내에서 발전기 5kW-300rpm시 연속 정격 실험으로써 축(Shaft) 온도는 74. C측정 되었으며 풍력 적용시 풍속에 대해서 열 방출 환경이 측정 온도 보다 낮을 것으로 예상된다. 발전기의 손실은 전기적 손실과 기계적 손실로 나누어진다. 전기적 손실에는 동손과 철손이 대부분인데, 본 논문의 발전기는 코어리스형이므로 대부분의 손실이 동손이다. 또한 AC/DC 컨버터에 의한 정류기 손실을 포함하고 있다. 저항 부하시 prototype 코어리스 AFPM 발전기는 300rpm에서 5kW 출력시 효율이 86%로 측정되었다.



<Fig 6> No-load Voltage vs. rpm



<Fig 7> Temperature rise at 300rpm and output power

3. 결 론

본 논문은 5kW 직접 구동형(Gearless) AFPM 발전기를 해석하고 특성식을 유도하였다. 유한요소법(FEM-3D)을 이용하여 공극의 자속 밀도를 계산하였고 특성 해석을 바탕으로 prototype 발전기를 제작하였으며, 실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) AFPM 발전기의 정격 회전속도를 저속으로 설계함으로써 풍력용으로 구조를 간략화 할 수 있었다.
- 2) 고정자 코어가 없는 구조이므로 코킹(cogging)토크에 의한 손실을 제거 하였고 전체적인 효율을 높일 수 있었다
- 3) 저항 부하 실험 결과 prototype AFPM 발전기는 300rpm에서 5kW 출력시 효율이 86%로 양호한 특성을 확인하였다.

앞으로 본 연구 결과를 보완하여 5kW 소형 풍력발전 시스템에 적용하고자 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] 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.