

소형 풍력용 슬롯리스 영구자석형 발전기에 관한 연구

김형길*, 공정식**, 오진훈***
(주)셀텍*, 서라벌대학**, 구미1대학***

A Study of Slotless Permanent Magnet Generator for Small Wind Turbine

Hyung-Gil Kim*, Jeong-Sik Kong**, Jin-Hun Oh***
SeolTech Co., Ltd*, Sorabol College**, Gumi College***

Abstract - This paper discusses design aspects of slotless permanent magnet generator for high performance and low speed applications. The airgap flux density in was obtained from finite element analysis and the design of a PM generator. The relatively large diameter stator laminations of such machines tend, therefore, to have a very thin back of core and narrow teeth, which make them expensive and difficult to manufacture. this thesis proposes an alternative PM generator topology featuring a slotless stator whose laminations are manufactured from a split core. The test results with a resistive load confirm the satisfactory operation of generator.

1. 서 론

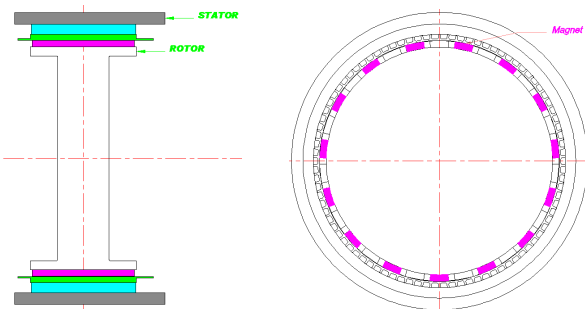
신·재생에너지 산업이 급속히 성장하면서, 가변속시 효율 특성이 우수한 영구자석형 발전기(Permanent Magnet Generator)가 풍력, 소수력 등에 사용되고 있다. 기계적인 강인성 및 내구성을 갖기 위해서 코어를 사용하여 공극 밀도를 갖는 회로류 자석 사용으로 영구자석을 적용한 기기들의 고효율, 경량화 등의 연구가 진행되고 있다[1].

본 논문에서는 코깅토크(Cogging Torque)를 최소화 하기 위해서 슬롯리스로 설계하였으며, 권선의 제조 비용을 줄이고 코일 권선의 점적율을 높이기 위해서 분할형 코어 적층방식을 적용했다. 유한요소해석법을 이용하여 공극에서의 자속 해석을 수행하였고, 이 설계에 따라 전기자 슬롯이 없는 구조로 코깅토크를 최소화 하였으며, Prototype 슬롯리스 PM 발전기를 제작하고 특성 실험을 하였다.

2. 본 론

2.1 슬롯리스 영구자석형 발전기 구조

본 논문의 직접구동형 발전기는 전기자 코어에 슬롯이 없는 구조이며, 코일 권선은 코어 안쪽으로 로터의 영구자석과 일정 공극 길이를 유지하며 배열된다. 일반적인 슬롯형은 회전자 자석과 고정자의 슬롯으로 인하여 공극 자속이 균일하지 못하며, 이러한 불균일한 공극 자속으로 인하여 코깅토크가 발생한다. 슬롯리스 코어는 회전자 자석과 고정자 철심에 의한 코깅토크를 최소로 설계 가능하며, 고조파 성분을 제거 할 수 있다[2]. 그림 1은 슬롯리스형 PM 발전기의 구조와 회전자에 부착된 영구자석의 배치에 대한 형상이다.

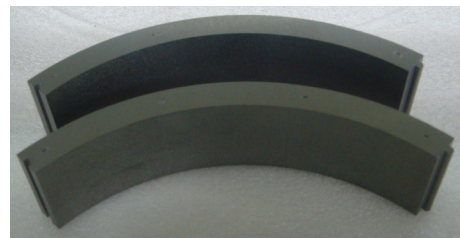


〈그림 1〉 슬롯리스 발전기 구조

슬롯리스 발전기는 고정자 적층 코어가 고정자 코일 보빈 외측에 배열되어 하우징 내측에 조립되는 구조이다. 분할 코어를 사용함으로써 코일 권선의 점적율을 높이고, 발전기 제조공정을 단축하는 효과가 있다.

2.2 분할형 적층코어

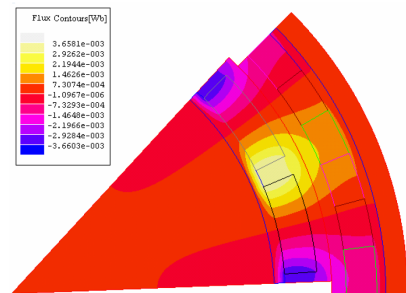
무방향성 전기 강판은 결정립의 범위가 불규칙하여 자화 방향에 따른 자성의 차이가 작은 강판이기 때문에 발전기, 전동기 등 회전기기의 철심에 주로 사용된다. 무방향성 전기강판은 자성을 결정하는 Si 함량에 의하여 등급이 결정되지만 사용자들이 요구하는 품질 특성은 제품 종류에 따라 다르다. 소형기기에서는 대량생산이 가능해야 함으로 강판의 가공성이 매우 중요하게 되어 타발성, 자동적층성 및 용접성등이 뛰어난 재료가 요구된다[3]. 철심이 교번되는 유도자기장을 형성시 발전기 고정자 코어에 와전류손 및 히스테리시스손 등과 같이 철심에서 발생하는 철손은 발전기내에서 열로 발생되게 된다. 이 열이 권선의 절연체를 통하여 공극으로 전달되어 발전기의 내부 온도를 상승시키게 된다. 그림 2는 설계대상 발전기의 경우 철손을 줄이기 위해서 전기 강판 (S18-0.35t)을 적층해서 164mm 길이로 분할 설계 하였다.



〈그림 2〉 슬롯리스 적층코어 형상

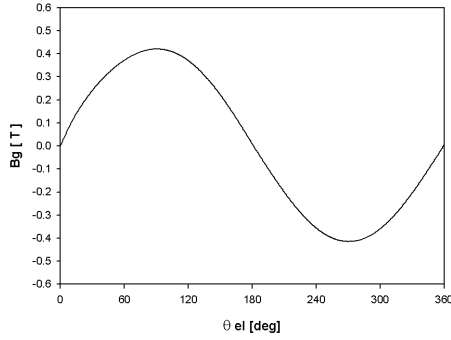
2.3 FEM을 이용한 자기 회로 해석

PM 발전기의 특성을 알기 위하여 자기적 특성에 대하여 살펴보는 것이 필요하며, 슬롯리스의 자기적 특성은 발전기 각 부분에 의하여 형성되는 자기회로를 해석하여 공극내의 자속과 자속밀도를 계산한다. 회전기 설계와 특성 시뮬레이션에 이용되는 유한요소법(FEM)은 다양한 형태의 자료 해석에 장점을 가지고 있다.



〈그림 3〉 자속 밀도 분포-FEM

FEM 해석법을 적용한 슬롯리스 발전기 자속해석에서 모든 공극 부분에서 자료의 형성은 동일함을 알 수 있었다. 그림 3에서 자석 모서리 및 주위에 자속이 집중 되어 있고, 공극에서 도체와 쇠교하지 못하고 인접한 영구자석 사이에서 생성되는 자속누설이 생성됨을 확인하였다. 영구 자석형 발전기 설계에서 공극 길이와 자속 밀도가 밀접한 관계가 있으므로, 공극에 대한 자속 밀도 값을 2차원 FEM으로 시뮬레이션을 통해 해석한 값을 그림 4에 나타내었다.



〈그림 4〉 공극에서의 자속 밀도- B_g

2.4 실험 및 결과

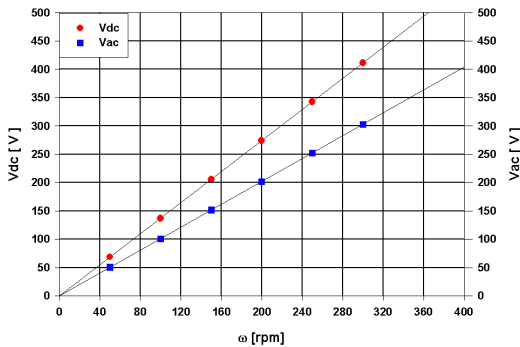
영구자석형 발전기의 특성실험을 위하여 표 1와 같은 사양으로 Prototype 슬롯리스 PM 발전기를 제작하였다. 그림 5는 실험을 위해 제작된 영구자석형 발전기 실제형상을 보여준다.

〈표 1〉 Prototype PM 발전기의 사양

상 수	3
극 수	30
코일 도체의 직경	0.75 mm×8
코일 당 턴 수	15
상 당 인덕턴스	1.52 mH
상 당 저항	0.95 Ω
영구 자석 재료	Nd-Fe-B Br : 1.25 T
고정자 내경	422 mm
회전자 외경	370 mm
영구 자석 두께	10 mm
공극 길이	10 mm
전체 축 방향 길이	284 mm



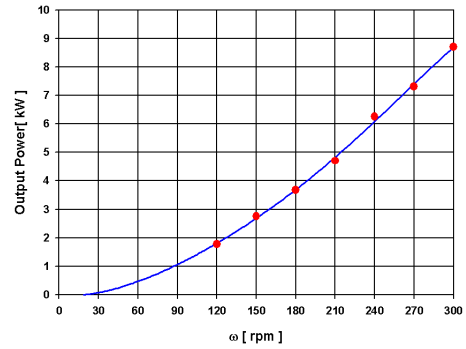
〈그림 5〉 슬롯리스 PM 발전기



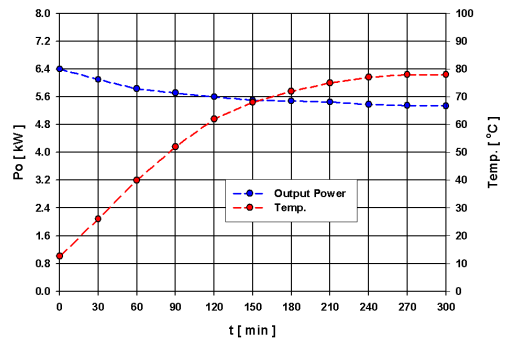
〈그림 6〉 무부하 시험

발전기의 특성실험을 위하여 입력에는 유도 전동기를 사용하였으며, 발전기의 3상 출력을 AC/DC 컨버터를 통하여 가변 저항 부하단에 연결해서 실험하였다. 입력 전동기의 속도를 가변하여 무-부하시 속도와 유효기전력은 그림 6에 나타내었으며, 발전기 회전속도를 400rpm까지 변화시켜 가면서 출력 선간AC, 정류 DC전압을 측정하였다. 회전수에 대한 속도 상수는 1.37(Vdc/rpm)이다.

가변 속도에 대한 부하 실험을 통하여 발전기의 출력 특성을 측정하였다. 영구자석형 발전기의 회전 속도가 120-300rpm에서 출력은 1.8-8.8kW로 측정되었다. 또한 연속 정격 출력 실험을 통하여 발전기의 내부 온도 특성을 알 수 있었다. 그림 7은 실내에서 발전기 6kW-240rpm시 연속 정격 실험으로써 고정자 코일 온도는 최대 80 °C로 측정 되었다. 저항 부하시 Prototype 슬롯리스 PM 발전기는 240rpm에서 6kW 출력시 효율이 92%로 측정되었다.



〈그림 3〉 가변속-출력 시험



〈그림 3〉 온도 특성 시험

3. 결 론

본 논문에서는 소형풍력, 소수력용에 적합한 슬롯리스 영구자석형 발전기를 설계하고 이를 유한요소법을 적용하여 자석의 크기 및 공극 자속 분포 해석을 수행하였다. Prototype 발전기를 제작하였고, 특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고에너지 밀도를 가지는 영구자석을 적용하여 소형화, 경량화된 직접 구동형 PM 발전기를 제작 하였다.
- 2) 고정자 슬롯이 없는 구조이므로 코깅(cogging)토크를 최소화 하였다.
- 3) 저항 부하 실험 결과 prototype 슬롯리스 PM 발전기는 240rpm에서 6kW 출력시 효율이 92%로 양호한 특성을 확인하였다.

앞으로 본 연구 결과를 보완하여 신재생에너지 관련 소형풍력, 피코수력 시스템에 적용하고자 한다.

【참 고 문 헌】

- [1] Y.Chen, J.Shen, and Z. Fang, "Topology and Preliminary Design of Slotless Brushless DC Motor", IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, 1997, pp. 7.1-7.3
- [2] Y. S. Chen, Z. Q. Zhu, and D. Howe, "Slotless brushless permanent magnet machines: Influence of design parameters," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 14, no. 3, pp. 686 --691, Mar. 1999.
- [3] 포스코, "무방향성 전기강판의 자동적응성 향상방안", 1995

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 신재생에너지 실증연구사업의 연구 결과입니다.