

영구자석 동기발전기의 설계 및 시제품 특성 분석에 관한 연구

(A Study on Design and Performance Analysis of a Prototype Permanent Magnet Synchronous Generator)

오진훈*

(Jin-Hun Oh)

Abstract

The small wind turbines has the merits of setting up with low costs by individuals, and get the energy saving effects that, it has the secured, separate markets from the big range systems, and the developing of it is continuously proceeding.

The objective of this paper is to provide the design characteristics analysis of a permanent magnet synchronous generator(PMSG) skewed for magnet of rotor, the main advantage to be explored with the use of a split core design is the reduction in manufacturing costs and its simplicity in manufacture, compared to the manufacturing costs of a core skew PM machine. This thesis is aiming mainly analyzing the characteristics of the prototype to verify through Finite Element Method(FEM) and tests.

Key Words : Permanent Magnet Synchronous Generator, Skew, Split Core, Small Wind Turbine

1. 서 론

풍력발전은 에너지 위기와 환경문제 등을 겪으면서 그 이용의 필요성이 커져 세계 여러 나라들은 과거에 풍력을 이용했던 경험과 풍력관련 사업에 집중 투자하여 소형 발전 시스템에서부터 수 MW급 발전 시스템에 이르기 까지 많은 연구가 진행되고 있다. 특히

화석연료의 의존이 높은 나라는 풍력을 이용한 에너지 절약이 매우 중요하며 이와 관련된 기술의 발달로 안정된 운영이 가능할 뿐만 아니라 경제성도 과거 보다 향상되었다[1].

산업의 발달과 더불어 영구자석 기기에 대한 수요는 급속히 증대되고 있으며, 가변속시 효율 특성이 우수한 영구자석형 동기 발전기(PMSG: Permanent Magnet Synchronous Generator)는 풍력, 소수력 등에 사용되고 있다. 기계적인 강인성 및 내구성을 갖기 위해서 코어를 사용하며, 회전시 전자기적으로 토크 리플(Torque Ripple), 코킹 토크(Cogging Torque) 손실을 최소화할 수 있는 방법 등의 연구가 진행되고 있다[2].

고 에너지 밀도를 갖는 영구자석과 코어 슬롯에 의

* 주저자 : 구미대학교 전기에너지과 교수
* Main author : Associate Professor, Electrical Energy Department, Gumi University, Korea
Tel : 054-440-1202, Fax : 054-440-1209
E-mail : jhoh@gumi.ac.kr
접수일자 : 2014년 3월 20일
1차심사 : 2014년 3월 25일, 2차심사 : 2014년 4월 22일
심사완료 : 2014년 5월 10일

해서 공극 자속은 비정현파이며, 불균일한 토크가 발생 된다. 이로 인해 코깅토크(Cogging Torque) 및 리플은 기기의 소음과 진동의 원인이 되며, 이러한 코깅토크를 저감하기 위해서 영구자석 또는 고정자 슬롯에 스큐를 적용한다[3-4]. 일반적으로 고정자에 스큐를 적용할 경우 누설 인덕턴스가 증가하고 동손이 커지며, 발전기 체적에 따라서 제조비용이 높다.

본 논문에서는 코깅토크 및 고조파를 저감하기 위해서 영구자석에 스큐를 적용하여 설계하였으며, 코일 권선의 점적률을 높이기 위해서 분할 코어 적층방식을 사용하였다. 유한요소해석법(FEM)을 적용하여 PMSG의 공극 및 자로 해석을 수행하였으며, Prototype 영구자석형 발전기 제작 및 특성 실험을 통해 소형풍력시스템에 적용하고자 한다.

2. 풍력용 PMSG

2.1 PMSG의 구조와 특성

바람을 이용하는 풍력발전은 풍속에 의해 1차적으로 회전 블레이드(Blade)에 의해 기계적 에너지로 변환하고, 기계적 에너지를 이용하여 발전기의 회전자를 구동시켜 최종적으로 전기에너지로 변환된다. 발전기 선택과 방식에 따라서 전체 시스템과 전력 변환 장치가 다를 수 있다.

본 논문의 PM 발전기는 코어형이며, 회전자에 스큐 영구자석이 배치된 인너로터(Inner rotor)형태로 되어 공극에서 자속 방향이 발전기의 기계축과 수직으로 형성되어 단위 무게당 출력이 크고 고에너지 밀도를 갖도록 설계할 수 있다. PMSG는 계자를 위해서 권선을 이용하지 않고 영구자석을 이용함으로써 기기의 부피가 감소되며 계자에 전원 공급이 필요하지 않는다. 전기자 코일 권선은 코어 슬롯에 3상 권선이 일정 간격으로 교번되게 슬롯에 권선이 되어 있으며 로터의 영구자석과 일정 공극을 유지하며 배열된다.

일반적인 슬롯(Slot)형은 회전자 자석과 고정자의 슬롯으로 인하여 공극 자속이 균일하지 못하며, 이러한 불균일한 공극 자속으로 인하여 코깅토크가 발생한다. 회전자 자석에 스큐 방식을 적용함으로써 고정

자 철심에 의한 코깅 토크를 최소화 설계 가능하며, 고조파 성분을 제거할 수 있다[5-6].

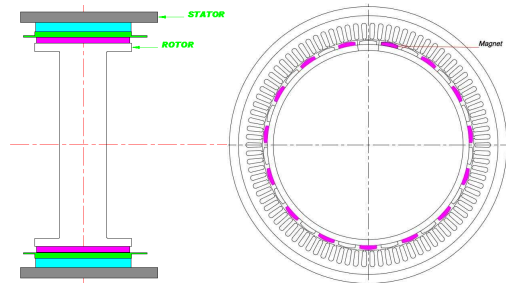


그림 1. PMSG 단면도
Fig. 1. Cross sectional drawing of PMSG

그림 1은 코어 슬롯형 PM 발전기의 구조와 회전자에 부착된 영구자석의 배치에 대한 형상이다. 고정자 분할 적층 코어가 3상 코일 권선과 결합되어 하우징 내측에 조립되는 구조이다.

2.2 FEM을 이용한 자기회로해석

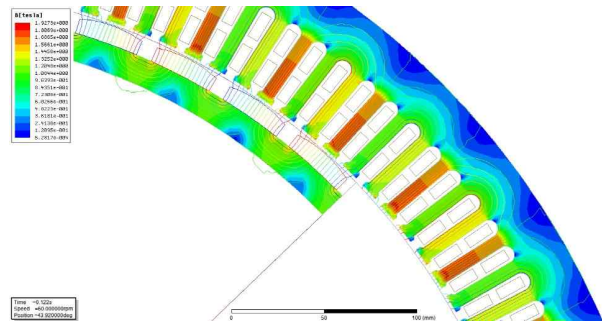


그림 2. 자속 밀도 분포-FEM
Fig. 2. Flux density distribution by FEM

본 연구에서는 유한요소해석법(FEM 2D) 프로그램을 사용하여 다양한 형태의 자로 해석을 수행하였다. 영구 자석형 발전기 설계에서 공극 길이와 자속 밀도가 밀접한 관계가 있으므로, 공극에 대한 자속 밀도 값을 2차원 유한요소법으로 시뮬레이션을 통해 해석한 값을 그림 2에 나타내었다. 발전기 공극자속 해석에서 모든 공극 부분에서 자로의 형성은 동일함을 알 수 있다. 이 과정에서 공극에서 도체와 쇄교하지 못하고 인

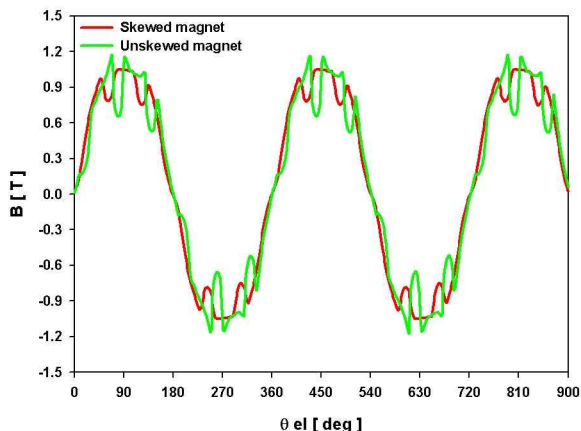


그림 3. 공극 자속 밀도 비교
Fig. 3. Comparison of flux density in airgap

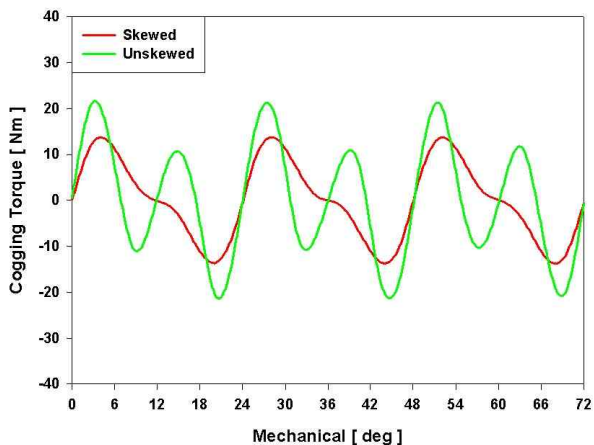


그림 4. 코킹 토크 파형
Fig. 4. Cogging torque waveforms

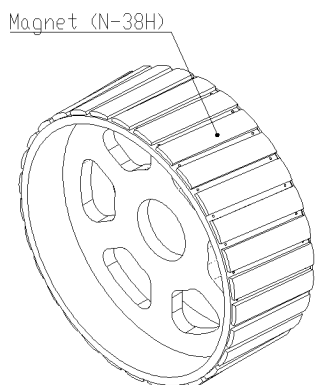


그림 5. 스큐 영구 자석
Fig. 5. Skew permanent magnet

접한 영구자석 사이에서 생성되는 누설자속과, 회전자 간의 누설이 생성됨을 확인하였다.

PMSG의 특성에서 공극의 자기적 특성에 대하여 살펴보는 것이 필요하며, 슬롯 코어형인 경우 공극 자속이 비대칭 정현파에 의해서 코킹, 토크 리플이 발생한다. 이를 제거하는 방법으로써, 고정자 슬롯 또는 영구자석에 스큐를 주어 저감하는 방법이다. 그림 3은 공극의 자속 밀도 파형으로써 스큐된 영구자석은 한 슬롯 피치만큼의 길이이며, 스큐를 하지 않는 영구자석과의 자속 밀도를 비교하였다. 그림 4에서 영구자석 스큐 변화에 따른 코킹 토크의 파형을 분석하면 스큐 방식이 코킹토크 최대치가 42% 정도 낮아지는 결과를 확인할 수 있었다. PMSG의 FEM 특성 분석을 통해서 공극 길이는 2mm이고 고조파를 낮추기 위해서 공극자속 밀도 파형이 정현파에 유리한 다극기의 Pole Arc Offset 형상으로 설계된 영구자석 회전자를 그림 5에 나타내었다.

2.3 분할형 적층코어

무방향성 전기 강판은 결정립의 범위가 불규칙하여 자화 방향에 따른 자성의 차이가 작은 강판이기 때문에 발전기, 전동기 등 회전기기의 철심에 주로 사용된다. 무방향성 전기 강판은 자성을 결정하는 Si 함량에 의하여 등급이 결정되지만 사용자들이 요구하는 품질 특성은 제품 종류에 따라 다르다. 회전기기에서는 대량생산이 가능해야 함으로 강판의 가공성이 매우 중요하게 되어 타발성, 자동적층성 및 용접성등이 뛰어난 재료가 요구된다[7].

그림 6은 분할 전기 강판 (S30-0.5t)을 적층해서 154mm 길이로 조립된 코어를 나타내고 있다. 영구자석 기기의 고정자 슬롯 방식의 경우 기기의 체적이 커짐으로써 스큐 적용시 전기 강판의 프레스 공정에서 재료 손실이 높고, 제조 단가가 증가한다.

본 논문에서는 회전자 영구자석에 스큐를 적용함으로써 고정자 분할코어 적층방식에 의해서 제조 공정 및 재료 원가를 줄일 수 있다. 분할 적층방식을 적용함으로써 기존의 강판 재료 손실을 35% 정도 절감하였다.



그림 6. 분할 적층 코어 조립
Fig. 6. Completed split core assembly

2.4 PMSG 제작 및 실험

표 1. 시제품 PMSG의 특성
Table 1. Characteristics of Prototype PMSG

Output power	12kW
Rated speed	120rpm
Output Voltage	3Φ, 380(Line-Line)
Max. Efficiency	92%
Permanent magnet	NdFeB-N38H
Number of Pole	30
Speed Constant	4.6Vdc/rpm
Resistance at 20 °C	1.79Ω
Inductance	24.9 mH
Rotor Inertia	1.47Kg-m ²
Starting Torque	< 9Nm
Gen. Weight	210Kg

본 연구의 PMSG를 적용할 10kW 풍력 발전기의 블레이드는 로터 회전직경이 8.5m이며, 날개끝단 속도비(TSR-Tip Speed Ratio)가 6~6.5, 정격 풍속이 9m/s인 터빈 사양에 적합하게 PMSG를 설계하였다. Prototype PMSG는 직접 구동방식으로 극수 30이며

정격 속도 120rpm으로 설계되었으며, 발전기 회전자 축으로 이어지는 중간 동력변환 장치가 없기 때문에 에너지변환 효율이 상대적으로 높게 설계되었다. 표 1은 시제품 발전기의 사양을 나타내었다. 그림 7은 특성실험을 위해 제작된 영구자석형 발전기 실제형상을 보여주고 있다.

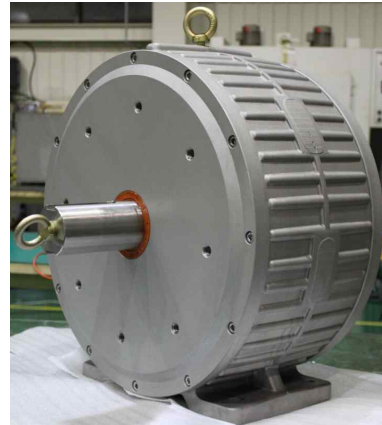


그림 7. 시제품 PMSG
Fig. 7. Prototype PMSG

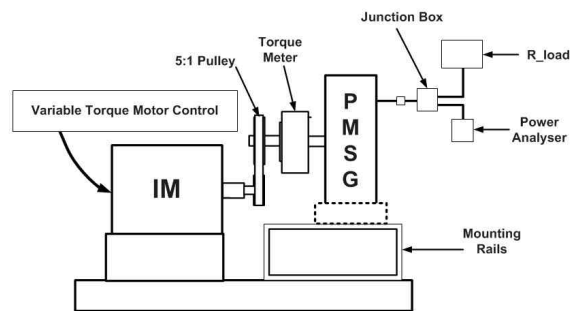


그림 8. PMSG 시험 장치 구성도
Fig. 8. Schematic Diagram of the PMSG Test Rig

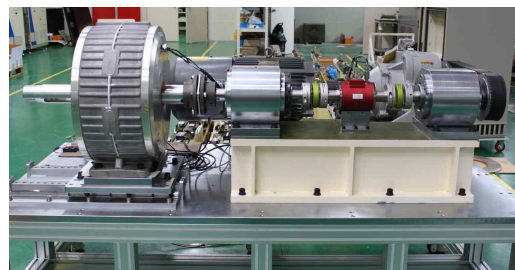


그림 9. PMSG 시험 장비
Fig. 9. M&G SET

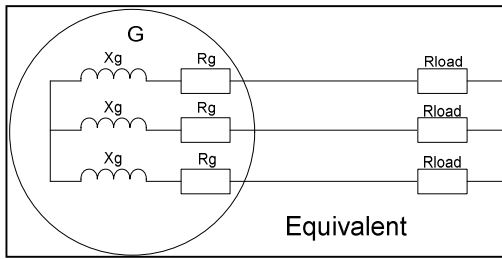


그림 10. 등가 회로
Fig. 10. Equivalent circuit

발전기의 특성 실험을 위하여 M&G SET을 구성하였으며, 유도 전동기를 기계적인 입력으로 사용하였다. 그림 8은 실험 장치의 다이어그램을 나타내고 있다. 가변속 전동기는 회전속도와 토크를 통해서 다이내모메타에 연결되어 있으며 5:1 감속기를 사용하였다. 발전기 출력측에 3상 부하기를 연결하여 가변 부하 실험을 하였고, 발전기 출력을 Inverter로 연결해서 계통연계 실험을 수행하였다. 그림 9와 같이 M&G SET에 시제품 발전기를 장착하고 입력측 토크 및 출력측 전력 분석 장치를 통해서 발전기의 출력과 역율, 효율 등을 측정하였다.

그림 10은 발전기 특성을 분석하기 위해서 내부 등가 회로에서 순수 저항 부하시 출력 및 토크를 이론적으로 계산하여 특성 실험에 반영하였다. 그림 11은 영구자석 스쿠 방식과 두께의 폭 변화(Pole Arc

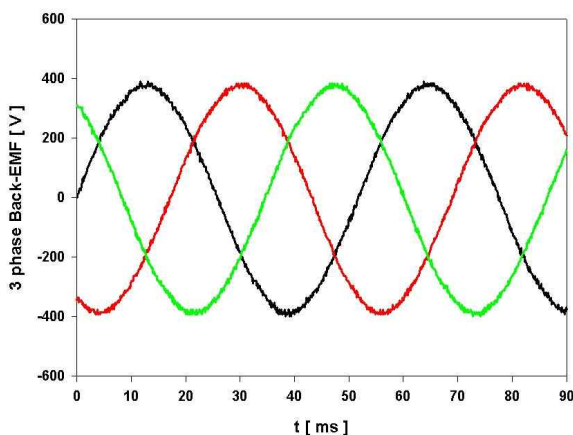


그림 11. 3상 역기전력
Fig. 11. 3상 Back-EMF

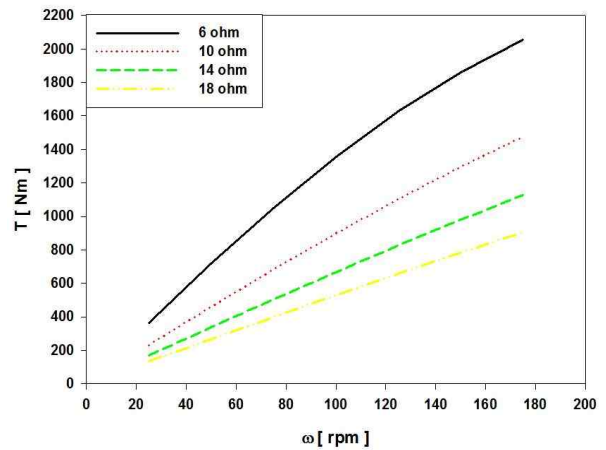


그림 12. 부하 시험-토크 vs. 회전수
Fig. 12. Load Test-Torque vs. rpm

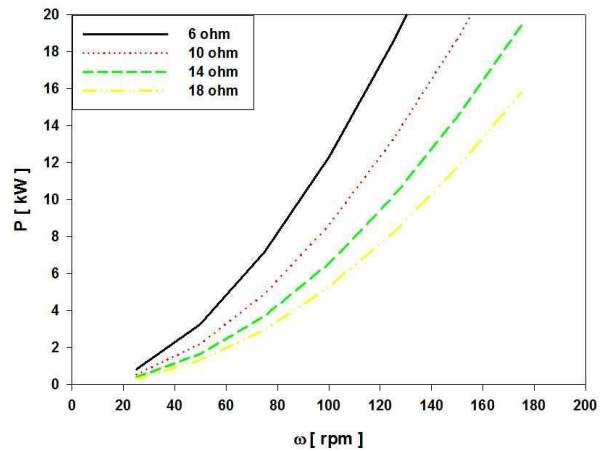


그림 13. 부하 시험-출력 vs. 회전수
Fig. 13. Load Test-Output Power vs. rpm

Offset)설계에 의한 Prototype 발전기의 3상 유기기 전력 파형을 나타내고 있다. 공극의 전자장 해석과 같이 시제품의 실험을 통해서 유기기전력의 파형이 정현파라는 것을 확인하였고, 기동 토크는 9Nm 이하로 측정되었다.

무부하 실험을 통해서 회전수에 대한 속도 상수는 4.6Vdc/rpm으로 측정되었으며, 발전기 부하실험으로 가변부하는 6~18Ω에서 각각의 고정 부하에 대한 가변 속도시 토크 및 출력 실험을 회전속도 175rpm까지 변화시켜 가면서 출력을 측정하였다. 그림 12는 부하

시 가변 속도에 대한 토크를 나타내고 있다. 그림 13은 가변 속도에 대한 발전기 출력을 나타내며 회전수 120rpm에서 저항 부하 10Ω에서 출력은 12kW이고 효율은 1,038Nm에서 92%로 측정되었다.



그림 14. 10kW 풍력시스템
Fig. 14. 10kW Wind Turbine

그림 14는 본 논문에서 설계된 직접 구동형 PMSG를 적용한 소형 풍력발전 시스템이며, 현재 실증 시험 중이다.

3. 결 론

본 논문에서는 소형풍력에 적합한 직접 구동형 발전기로써 영구자석에 스큐를 적용하여 전자기적 손실, 코킹 토크를 최소화하며, 제조 공정 및 비용을 줄이고자 분할 전기 강판을 적용해서 설계하였다. 유한요소법(FEM)을 이용하여 공극의 자속 밀도를 계산하였고, Prototype 발전기를 제작하여, 특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) PMSG의 고정자에 분할 적용방식을 적용함으로써 전기강판 재료 손실을 35% 정도 절감하였다.

- 2) PMSG의 회전자 영구자석에 스큐를 적용하여 코킹 토크 최대치가 42%가 저감됨을 알 수 있었다.
 - 3) 회전자 영구자석에 Pole Arc Offset과 스큐 방식을 적용하여 정현파의 유기기전력 파형을 확인하였다.
 - 4) 부하 특성 실험에서 발전기 출력 12kW, 회전수 120rpm에서 효율 92%로 분석되었다.
- 향후 연구로 10kW 풍력발전시스템 실증에 대한 성능 해석이다.

References

- [1] Anders Grauers(1996), "Design of Direct-driven Permanent magnet Generators for Wind Turbines", Chalmers University of Technology, Sweden.
- [2] R. P. Deodhar, D. A. Staton, T. M. Jahns, and T. J. E. Miller, "Prediction of cogging torque using the flux-MMF diagram technique," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 32, no.3, pp. 569-576, 1996.
- [3] Rizk, J., Nagrial, M., 2000. "Design of permanent-magnet generators for wind turbines", Power Electronics and Motion Control Conference, Proceedings, IPEMC 2000, The Third International, 1, pp. 208-212.
- [4] J. D. L. Ree, and N. Boules, "Torque production in permanent magnet synchronous motors," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 25, no. 1, pp. 107-112, 1989.
- [5] Z.Q. Zhu, and D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines," IEEE Trans. Energy Conversion, vol.15, no.4, pp.407-412, 2000.
- [6] P.Lampola, J. Perho, "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.
- [7] POSCO, "Improvement of the Core Interlocking Characteristics of Non-Oriented Silicon Steels", 1995.

◇ 저자소개 ◇



오진훈(吳振勳)

1959년 12월 15일생. 1982년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1985년 니혼대학교 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동대학원 졸업(박사). 1992년~현재 구미대학교 전기에너지과 교수.