

마이크로터빈용 고속 영구자석 동기발전기 개발

안중보, 정연호, 강도현
한국전기연구원 Mechatronics연구그룹

Development of High Speed Permanent Magnet Synchronous Generator for Microturbine

Jong Bo Ahn, Yeon Ho Jung, Do Hyun Kang
Mechatronics Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute

1. 서론

천연가스를 이용하는 마이크로터빈은 그 친환경성과 높은 에너지 효율로 인하여 대표적인 분산전원 중의 하나로 적용되고 있으며 열병합발전, 첨두부하 삭감, 원격지 전원 등 다양한 적용 용도로 인하여 향후 그 적용 범위가 더욱 확대될 것으로 전망하고 있다^[1]. 마이크로터빈은 수만 rpm의 고속 원동기로서 일반적으로는 영구자석 동기발전기를 채용하여 발전하게 되며 기동시에는 동기전동기로 운전하여 터빈을 일정 속도에 도달할 때까지 가속하는 역할도 하게 된다. 본 논문에서는 마이크로터빈을 이용한 분산발전용으로 개발된 동기발전기의 운전 특성을 파악하기 위하여 전력변환장치를 접속하여 부하를 인가하면서 이때의 전압 및 전류 특성을 측정하고 이 결과를 모의시험한 결과와 비교하였다. 모의시험은 FEM에 의한 해석치 파라미터를 사용하였으며 Matlab을 사용하였다. 각 속도와 부하량에 따른 발전기 단자 전압 및 전류가 실험 결과와 잘 일치함을 볼 수 있었다. 이러한 검증 절차를 통하여 발전기-전력변환장치를 통합한 단독부하 및 계통연계 분산전원시스템용으로 적용될 수 있음을 보여주었다.

2. 영구자석 동기발전기 모델

아래의 그림 1은 개발된 고속 영구자석 동기전동발전기의 구조로서 회전자는 다양한 형태로 구성할 수 있으나^[2,3], 본 전동발전기는 64,000 [rpm]급 마이크로터빈에 장착되는 것을 목표로 하였기 때문에 구조적으로 매우 단순하면서도 원심력에 견디도록 원형형태의 2극 영구자석에 원통형 비자성 금속 캔을 부착한 구조로 설계, 제작하였으며 비자성 금속 캔은 축과 영구자석을 고정하기 위한 기능도 갖도록 하였다. 시작품은 마이크로 터빈과 결합 없이 단독으로 성능시험을 수행하기 위해 고정자측에 수냉식 냉각프레임을 채용하고 있다.

아래의 그림 2는 철손을 고려하지 않은 동기발전기의 등가회로이다. 회전자 기준 프레임으로 표현되는 동기발전기의 전압방정식과 토오크 방정식은 아래의 식 (1)과 같다^[4].

$$\begin{aligned}
 v_d &= R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q p \omega_r i_q \\
 v_q &= R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d p \omega_r i_d + \lambda p \omega_r \\
 T_e &= \frac{3}{2} p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

L_d, L_q : 각각 d, q축 인덕턴스 R_s : 고정자 저항

i_d, i_q : 각각 d, q 축 전류 v_d, v_q : 각각 d, q 축 전압

ω_r : 회전자의 각속도

λ : 고정자측에서 본 영구자석에 의한 유기자속 크기

p : 극수

T_e : 토크

이다.

FEM 해석 결과에 따른 PMSM의 설계 상수 및 파라미터는 아래의 표 1과 같다.

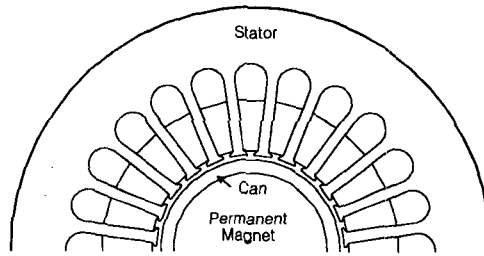


그림 1. 고속 영구자석 동기전동발전기의 구조

Fig. 1 Structure of high speed permanent magnet synchronous machine.

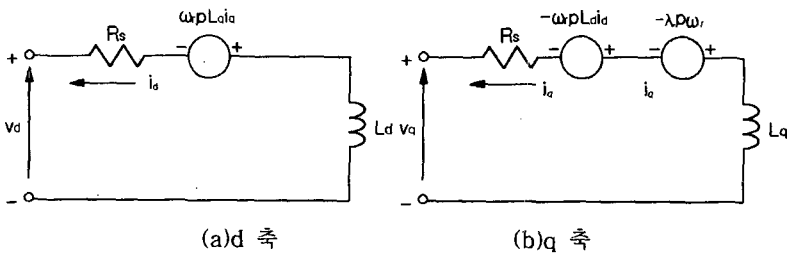


그림 2. PMSM의 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit of PMSM

표 1. PMSM 파라미터
Table 1 PMSM parameters

파라미터	값
정격출력[kW]	60.0
정격전압[Vrms]	550.0
정격전류[Arms]	63.0
정격주파수[Hz]	1066.67
정격회전수[rpm]	64,000
극수	2
고정자 저항[Ω]	0.0201 @27°C
d축 인덕턴스[μH]	258.2
q축 인덕턴스[μH]	258.2
고정자자속[Wb]	0.077685 @30°C
관성모멘트[kg-m ²]	0.848595×10 ³

3. 모의실험

설계된 PMSM의 발전기 특성을 모의실험하기 위하여 Matlab의 power system blockset 도구를 이용하였다. 전체적인 모의실험 모델이 아래의 그림 3에 나타나 있다. 간이 토오크 제어기 모델을 이용하여 일정 속도로 PMSM을 구동하고 출력에 3상 다이오드 정류기 및 직류단 필터 및 저항부하로 모의하였다.

아래 그림 4는 위의 그림 3에서 서브시스템으로 표기된 PMSM과 속도제어기 모델이 나타나 있으며 속도의 궤환을 이용하여 비례-적분제어기의 출력을 전동기의 토오크 입력으로 하였으며 정상상태의 운전 특성만을 고려했기 때문에 터빈 자체의 기계적인 모델과 제어밸브 모델은 적용하지 않았다.

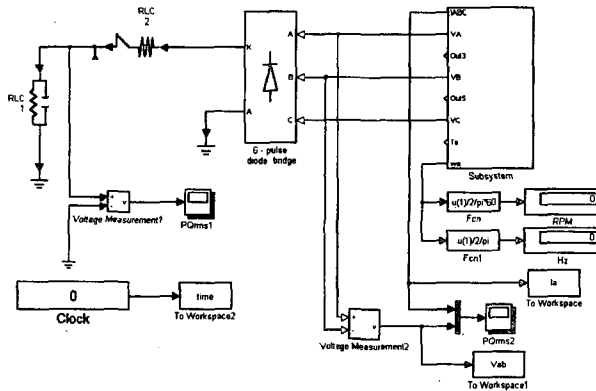


그림 3 전체 모의실험 모델
Fig. 3 Overall simulation model

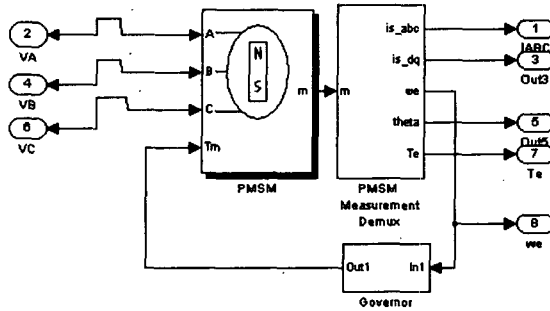


그림 4 PMSM 및 속도제어기 모델
 Fig. 4 Model of PMSM and speed controller

4. 부하인가 실험 및 결과 비교

제작된 PMSM은 직류전동기와 증속기어로 구성된 구동기에 의해 속도제어하면서 부하인가 시험을 실시하였다. 시험장치의 구성은 아래의 그림 5와 같다. 그림에서 보는 것처럼 운전 특성을 측정하기 위하여 온도 및 진동 센서 등이 설치되었으며 공기베어링 및 발전기 본체의 냉각을 위하여 공기 및 냉각수가 공급되고 있다. 전력변환장치는 3상 다이오드 정류기로 정류한 후에 직류단 커패시터를 달고 IGBT 초퍼를 이용하여 저항-리액터 부하에 연결하였다. 이 초퍼의 PWM 폭을 제어함으로써 발전기의 부하를 조절하였다.

아래의 그림 6은 50,000[rpm] 운전속도에서의 PMSM의 무부하 전압파형을 나타내고 있다. 이때의 출력 주파수는 833.33[Hz]이며 상전압은 실효치 268.7[V], 피크치 380[V]를 나타내고 있으며 거의 완전한 정현파 형태를 띠고 있음을 볼 수 있다.



그림 5 시험장치의 구성
 Fig. 5 Configuration of load test equipment

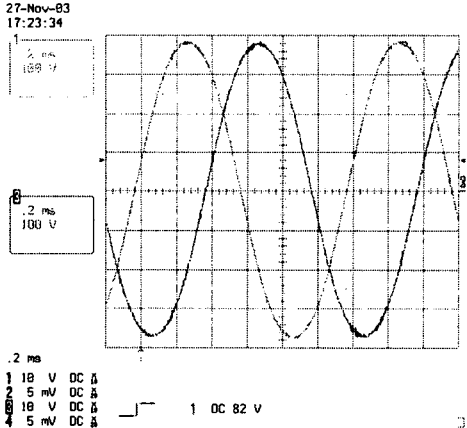


그림 6 50,000rpm에서의 무부하 유기기전력 파형
 Fig. 6 No load phase voltage waveform at 50,000rpm

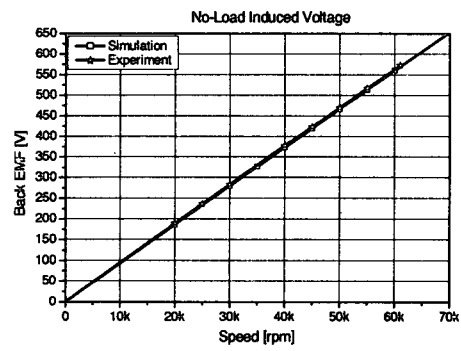


그림 7 속도의 변화에 따른 무부하 유기기전력의 변화
 Fig. 7 Relation between no load back EMF and speed

그림 7은 속도를 증가해 가면서 측정된 무부하시 발전기의 유기기전력의 크기가 표시되어 있다. 해석치와 실험치가 잘 일치함을 볼 수 있으며 속도에 대해 선형적인 특성을 보임을 볼 수 있다.

아래의 그림 8은 61,000[rpm] 속도에서 정류기와 전력변환장치를 결합하여 100[%] 부하인 60[kW]를 인가했을 때의 발전기단 전압 및 전류의 측정파형이며 그림 9는 동일한 조건에서의 모의실험 파형으로서 전류와 전압의 파형이 잘 일치함을 볼 수 있다.

5. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 64,000[rpm]급 마이크로터빈용 고속 영구자석 동기발전기의 운전 특성을 파악하기 위하여 100[%]의 속도 운전조건에서 전력변환장치를 이용하여 100[%] 부하를 인가하여 발전기의 전압 및 전류 파형을 관측하였으며 이는 모의실험 결과와 잘 일치함을 보였다. 이는 고속용 영구자석 동기발전기의 설계와 제작에 있어 전자기적인 설계상에 문제점이 없는 것으로 판단될 수 있다. 그러나 고속 마이크로터빈을 이용한 분산발전용으로 적용하기 위해서는 다음과 같은 기술적인 과제들이 해결되어야 한다.

- 영구자석을 고정하고 있는 캔(can)의 기계적인 강도 및 공간고조파 손실에 의한 열손실의 해석
 - 고속 발전기용 에어베어링 혹은 자기 베어링의 적용에 의한 베어링 문제
 - AFE(active front end)를 이용한 제어정류기방식으로 발전기의 고조파 손실 저감
- 등이며 개발될 예정인 마이크로터빈과 결합하여 분산전원용 적용될 것이므로 이에 필요한 전동모드의 운전, 단독부하 및 계통연계 운전 등이 계속 연구될 예정이다.

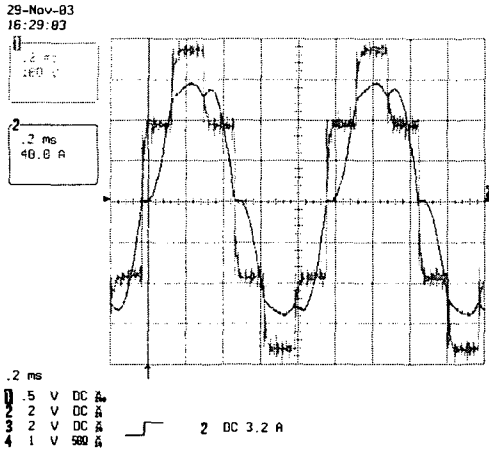


그림 8 발전기단 전압, 전류 측정 파형
Fig. 8 Voltage and current waveform at generator terminal(measured)

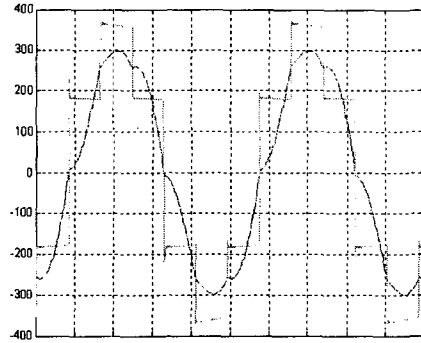


그림 9 발전기단 전압, 전류 모의파형
Fig. 8 Voltage and current waveform at generator terminal(simulation)

6. 참고 문헌

1. Capstone Microturbine Manual, Capstone(2002).
2. K. J. Binns, et 2 : "A Canned Solid Rotor Permanent Magnet Machine with Skewed-Radial Neodyum-Iron-Boron Magnets", 4th Int. Conf. on Electrical Machines & Drives, pp.57-60(1989).
3. K. J. Binns, et 2: "The Use of Canned Rotors in High Speed Permanent Magnet Machines", 5th Int. Conf. on Electrical Machines & Drives, pp.21-25(1991)
4. Power System Blockset Manual, mathworks