

마이크로터빈용 고속 영구자석 동기발전기 운전 특성

안중보, 정연호, 강도현
한국전기연구원, Mechatronics연구그룹

Operating Characteristics of High Speed PM Synchronous Generator for Microturbine

J.B. Ahn, Y.H. Jeong, D.H. Kang
Mechatronics Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute

ABSTRACT

Distributed generation(DG) using microturbine will be adopted widely because of its various usages and merits such as high heat efficiency, environmental-friendliness. Commercialized DG using microturbine that rotates up to 60,000~100,000[rpm] converts mechanical power to electricity by permanent magnet synchronous machine. This paper presents comparative test and simulation results of PMSM as generator. Test was done by diode rectifier and inverter. Parameters used in the simulation are driven from FEM analysis. Under various speed and load conditions, V-I characteristics matches well and it suggests the possibility of high speed PMSM as generator. DG operating at stand alone and grid connection mode will be developed.

1. 서 론

대표적인 분산전원 중의 하나인 마이크로터빈을 이용한 발전은 열효율, 친환경성, 첨두부하 삭감 등 다양한 적용 용도로 인하여 각광받고 있다^[1]. 상업화된 마이크로터빈은 수만 rpm의 고속 원동기로서 일반적으로 영구자석형 동기발전기를 채용하여 발전하며 기동시에는 동기전동기로 운전하여 터빈을 일정 속도에 도달할 때까지 가속하게 된다. 본 논문에서는 개발된 동기발전기의 운전 특성을 파악하기 위하여 전력변환장치를 접속하여 부하를 인가하면서 이때의 전압 및 전류 특성을 측정하고 이 결과를 모의시험한 결과와 비교하였다. 모의시험은 FEM에 의한 해석 결과 파라미터를 사용하였으며 Matlab을 사용하였다. 각 속도와 부하량에 따른 발

전기 단자전압 및 전류가 실험 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 이러한 검증 절차를 통하여 발전기-전력변환장치를 통합한 단독부하 및 계통연계형 분산전원시스템이 개발될 예정이다.

2. 본 론

2.1 영구자석 동기발전기의 수학적 모델

아래 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.

아래 그림 2는 철손을 고려하지 않은 동기발전기의 등가회로이며 회전자기준 프레임으로 표현된 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, q축 전류, v_d , v_q : 각각 d, q축 전압, ω_r : 회전자 각속도, λ : 고정자측에서 본 영구자석에 의한 유기자속 크기, p : 극수, T_e : 토오크

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

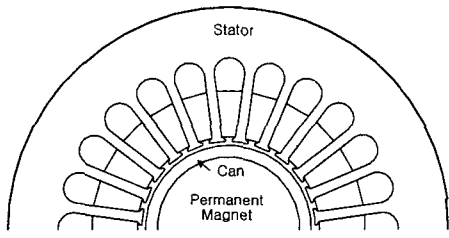
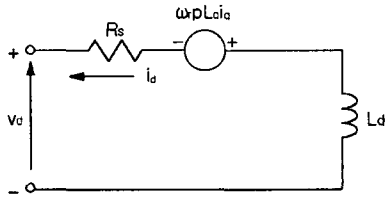
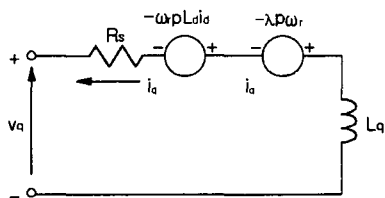


그림 1. 고속 영구자석 동기전동발전기의 구조
Fig. 1 Structure of high speed permanent magnet synchronous machine.



(a) d 축



(b) q 축

그림 2. PMSM의 동가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of PMSM

2.2 모의실험

설계된 PMSM의 특성을 모의하기 위하여 Matlab의 power system blockset 도구를 이용하였다^[4]. 전체적인 모의모델이 아래 그림 3에 나타나 있다. 간이 토크 제어기 모델을 이용하여 일정 속도로 PMSM을 구동하고 출력에 3상 다이오드 정류기, 직류단 필터, 저항부하로 모의하였다.

그림 4는 그림 3에서 서브시스템으로 표기된 PMSM과 속도제어기 모델이며 속도 궤환을 이용하여 비례-적분제어기 출력을 전동기의 토크 입력으로 하였으며 정상상태 운전 특성만을 고려했기 때문에 터빈 자체의 기계적인 모델과 제어밸브 모델은 적용하지 않았다.

2.3 부하인가 실험 및 결과 비교

제작된 PMSM은 직류전동기와 증속기어로 구성된 구동기로 속도제어하여 부하인가시험을 실시하였다. 시험장치의 구성은 아래의 그림 5와 같으며 운전특성을 측정하기 위하여 온도 및 진동 센서 등이 설치되었으며 공기배어링 및 발전기 본체의 냉각을 위하여 공기와 냉각수가 공급되고 있다. 전력변환장치는 3상 다이오드 정류기와 IGBT 쇼퍼를 이용하여 저항-리액터 부하에 연결하

표 1. PMSM 파라미터
Table 1 PMSM parameters

정격출력[kW]	60.0	고정자 저항[Ω]	0.0201@27℃
정격전압[V]	550.0	d축인덕턴스[μH]	258.2
정격전류[A]	63.0	q축인덕턴스[μH]	258.2
주파수[Hz]	1066.67	고정자자속[Wb]	0.077685@30℃
회전수[rpm]	64,000	관성모멘트	0.848595×10 ⁻³
극수	2	[kg·m ²]	

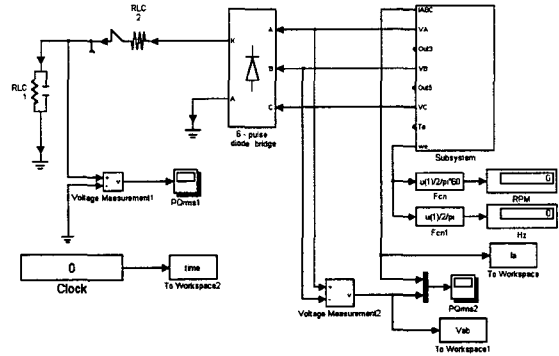


그림 3 전체 모의실험 모델
Fig. 3 Overall simulation model

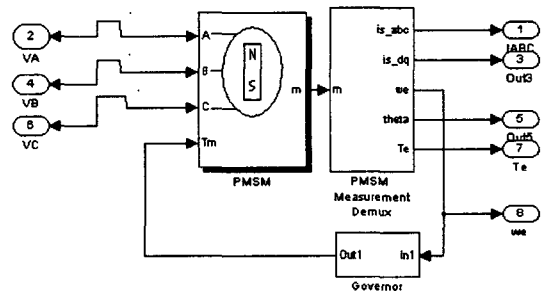


그림 4 PMSM 및 속도제어기 모델
Fig. 4 Model of PMSM and speed controller

였다. 이 초퍼의 PWM 폭을 제어함으로써 발전기의 부하를 조절하였다.

그림 6은 50,000[rpm] 속도에서 PMSM의 무부하 전압 파형이 나타나 있다. 이때 출력 주파수는 833.33[Hz]이며 상전압은 실효치 268.7[V], 피크치 380[V]를 나타내고 있으며 거의 정현파 형태를 띠고 있음을 볼 수 있다.

그림 7은 속도를 증가해 가면서 측정된 무부하시 발전기 유기전력의 크기가 표시되어 있다. 해석치와 실험치가 잘 일치함을 볼 수 있으며 속도에 대해 선형적인 특성을 보임을 볼 수 있다. 그림 8은 61,000[rpm] 속도에서 정류기와 전력변환장치를 결합하여 100[%] 부하인 60[kW]를 인가했을 때 발전기단 전압 및 전류 측정파형이며 그림 9는 동일한 조건에서의 모의실험 파형으로서 전류와 전압의 파형이 잘 일치함을 볼 수 있다.

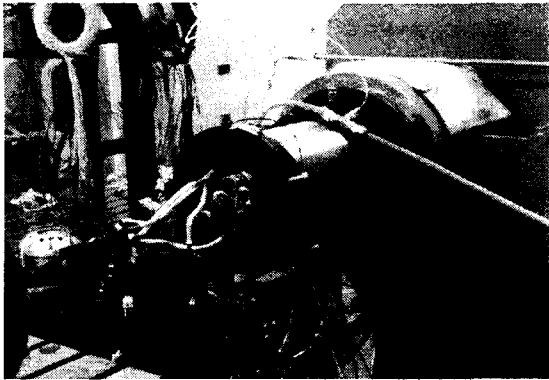


그림 5 시험장치의 구성
Fig. 5 Configuration of load test equipment

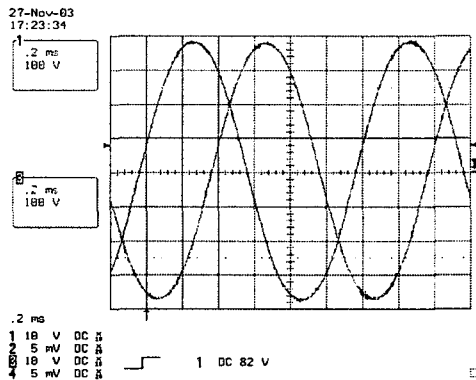


그림 6 50,000rpm에서의 무부하 유기기전력 파형
Fig. 6 No load phase voltage waveform at 50,000rpm

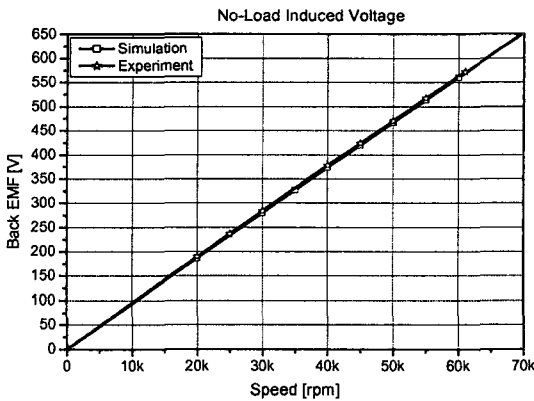


그림 7 속도의 변화에 따른 무부하 유기기전력의 변화
Fig. 7 Relation between no load back EMF and speed

3. 결 론

본 논문에서는 64,000[rpm]급 마이크로터빈용 고속 영구자석 동기발전기를 정격속도로 구동하고 전력변환장치를 이용하여 100[%] 부하를 인가하여 발전기전압과 전류 파형을 관측하였으며 이는 모의 실험 결과와 잘 일치함을 보였다. 따라서 고속 영

구자석 동기발전기의 설계와 제작에 있어 전자기적인 설계상에 문제점이 없는 것으로 판단될 수 있었다. 그러나 고속 마이크로터빈을 이용한 분산발전용으로 적용하기 위해서는 영구자석을 고정하는 캔(can)의 기계적인 강도와 공간고조파 손실에 의한 열손실의 해석, 고속용 공기 혹은 자기베어링의 적용, PWM 컨버터방식으로 발전기의 고조파 손실저감 등의 문제가 해결되어야 할 것이다.

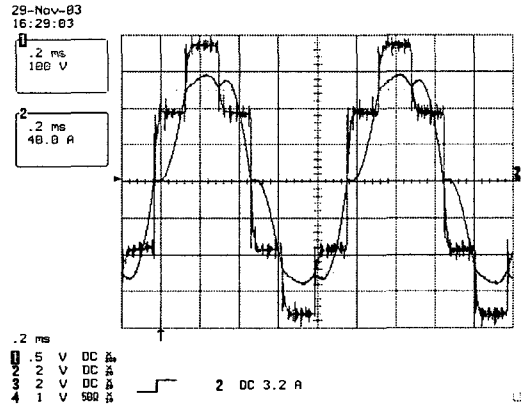


그림 8 발전기단 전압, 전류 측정 파형
Fig. 8 Voltage and current waveform at generator terminal(measured)

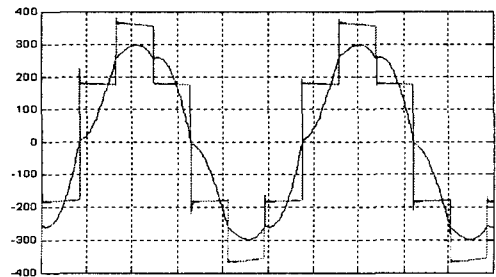


그림 9 발전기단 전압, 전류 모의파형
Fig. 9 Voltage and current waveform at generator terminal(simulation)

참 고 문 헌

- [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