

마이크로 가스터빈용 고속 전동/발전기 설계에 관한 연구

정 연호*, 강 도현*, 안 중보*, 장 석명**
*한국전기연구원, **충남대학교

A Study on Design of the High-speed Motor/Generator for Micro-Gas Turbine

YH Jeong*, DH Kang*, JB Ahn*, SM Jang*
*KERI, **Chungnam Nat'l Univ.

Abstract - In this paper, The basic design and the steady-state performances of a high-speed permanent magnet synchronous motor/generator (PMSMG) for gas-turbine are presented. For deveoping a high-speed machine, it must be taken account into the mechanical view as well as the electrical because of high centrifugal force of a rotor. Based on considering those, this paper deals with the characteristics of generating mode and motoring mode from a electrical point of view.

영구자석 동기 전동기와 발전기의 정상상태 d, q축 출력 및 입력 전압은 식(1)과 식(2)와 같으며, 발전기 인 경우는 식(2)에서 (-)부호를 나타낸다.

$$V_{ds} = X_{qs}I_{qs} - R_s I_{ds} \quad (1)$$

$$V_{qs} = E_o \pm X_{ds}I_{ds} \pm R_s I_{qs} \quad (2)$$

여기서, E_o : 무부하 역기전력

R_s : 상 저항

X_{ds}, X_{qs} : d, q축 동기 리액턴스

I_{ds}, I_{qs} : d, q축 전류

1. 서 론

최근, 분산 에너지 공급에 대한 요구가 높아짐에 따라 마이크로 가스터빈을 이용한 소형 발전시스템이 개발되고 있다. 그러나, 기존의 가스터빈 발전시스템은 가스터빈과 감속기, 그리고 발전기로 구성되어 있어 소음과 고장의 원인이 되는 감속기여로 인해 저소음 및 유지보수 특성의 개선이 필요하여 감속 기어없이 시스템을 직접 구동할 수 있는 마이크로 가스터빈용 고속 전동/발전기가 요구되고 있다. 고속 전동/발전기를 마이크로 가스터빈 발전시스템에 적용할 경우 시스템을 간단히 할 수 있기 때문에 소형·경량화, 고효율화, 무보수화 할 수 있는 장점을 지니고 있다. 영구자석 여자 동기 발전기는 기존의 동기 발전기에 비해 많은 장점을 가지고 있으나 한정된 분야에 응용되어 왔다.^{1,2)} 하지만 최근에 전력 전자와 제어기법이 발전함에 따라 많은 관심과 개발이 이루어지고 있다.

본 논문에서는 마이크로 가스터빈용 고속 전동/발전기의 기본 설계를 수행하고, 발전모드 특성과 전동모드 특성을 해석하여 마이크로 가스터빈 발전시스템용 전동/발전기의 개발에 적용하고자 한다. 고속 전동/발전기의 발전모드에서는 60kW, 7500rpm이 정격이고, 전동모드는 마이크로 가스터빈을 기동하기 위해 사용되며 출력은 발전모드의 약 20~30%, 회전수는 약 60~70%가 요구조건으로 설정되었다.

2. 고속 전동/발전기 설계

2.1 기본 설계 및 사양

고속 회전기에서는 회전수의 자중에 비례하는 원심력이 회전체에 작용하여 상당한 기계적인 스트레스를 발생시킨다. 따라서, 회전자는 고속회전시 영구자석의 비산이나 이탈을 방지하고, 기계적인 스트레스를 견디도록 견고한 구조가 되어야 한다. 고속회전에서 영구자석 회전자의 기계적인 강도를 높이기 위해 자성체 또는 비자성의 원통형 슬리브를 부착하기도 하며^{3,4)}, 영구자석 동기기의 회전자는 다양한 형태로 구성할 수 있다.⁵⁻⁶⁾ 본 설계에서는 기계적인 스트레스를 고려하여 원형(solid)의 영구자석에 원통형 슬리브를 부착한 형태를 선정하였다.

정상상태 d, q축 전류는 지상역률에서 식(3)과 식(4)와 같으며, 전동기인 경우 (-)부호를 갖는다.

$$I_{ds} = I_a \sin(\phi \pm \delta) \quad (3)$$

$$I_{qs} = I_a \cos(\phi \pm \delta) \quad (4)$$

여기서, ϕ : 역률각

δ : 부하각

발전기의 출력전압은 식(1)-(4)에 의해 식(5)로 표현된다.

$$V_g = \frac{E_o}{(1 + X_{ds}K_x + R_s K_r + K_d)} \cos \delta \quad (5)$$

여기서, $K_r = R_L / Z_L^2$

$K_x = X_L / Z_L^2$

$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2}$

$K_d = (X_{ds}K_r - R_s K_x) \tan \delta_g$

R_L, X_L : 부하 저항 및 리액턴스

전동/발전기의 기본 설계사양은 영구자석의 감자조건, 장하분배법과 퍼미언스법^{7,8)}을 이용하여 표1의 설계조건을 만족하는 기본 치수를 결정하고, 전압방정식에 의해 특성을 분석·검토하여 결정되었다.

표 1. 설계 조건

항 목	Generatoring	Motoring
출 력[kW]	60	20
선간 전압 [V]	500	500
회전수 [rpm]	75,000	50,000

영구자석의 비산과 기계적인 스트레스를 감소시키기 위해 링형태의 Inconel 비자성 합금(Can)을 영구자석 돌레에 설치하였으며, Can두께는 회전자의 회전에 따른 원심력을 고려한 후우프 응력(Hoop-stress) 계산⁹⁾에 의해 7 [mm]로 결정하였다. 영구자석의 재질은 고온(250℃)에서 사용할 수 있는 SmCo계열을 채용하였다.

표 2. 기본 설계사양

항목	기호	값
상수	m	3
극수	$2p$	2
매극매상 슬롯	q	3
공극 [mm]	g	1
회전자 외경 [mm]	D_r	56
Can 두께 [mm]	t_{can}	7
고정자 외경 [mm]	D_o	138
전류 밀도 [A/mm^2]	J	5.2
영구자석 잔류자속밀도 [T]	Sm_2Co_{17}	1.04
상 저항(120℃기준) [$m\Omega$]	R_s	22.667
동기 인덕턴스 [mH]	L_s	0.29
상당 자속쇄효수 [Wb]	λ_m	0.04322

2.2 유한요소 해석모델 및 조건

기본 설계치수에 의한 유한요소 해석모델은 그림1과 같다. 고정자의 재질은 고주파수에서 작은 비철손을 갖는 Group Arnold의 ARNON5(비손실:400Hz, 1T에서 10.58 W/kg)를 채용하였으며, 영구자석의 잔류자속밀도는 자연감자와 열에 의한 감자효과를 고려하였고, 자화방향은 직경방향이다.

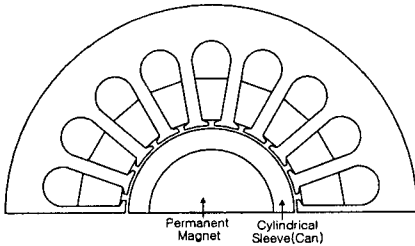


그림 1. 전동/발전기의 단면

특성해석은 발전모드와 전동모드로 분리하여 수행하였으며, 발전모드에서는 회전속도와 저항부하를 변화시키며 단자 전압과 전류를 계산하였다. 전동모드의 특성계산은 해석적인 방법을 이용하였으며, 정격일 때의 자속밀도분포를 유한요소법으로 해석하였다.

2.3 발전모드 특성

발전모드 해석에서는 정속도 특성(그림 2)과 정부하 특성(그림 3), 즉 단자전압에 대한 전류와 출력, 회전속도에 따른 단자전압을 계산하였다. 해석결과, 정격속도에서 무부하 전압은 약 588[V], 정격 전압은 503[V], 정격출력은 63[kW]로 계산되었으며, 전압 변동률은 약 16.7 %로 나타났다.

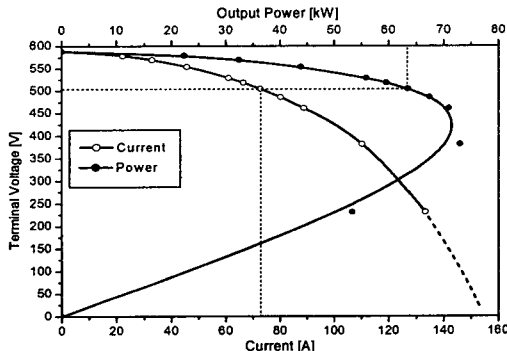


그림 2. 정속도 특성

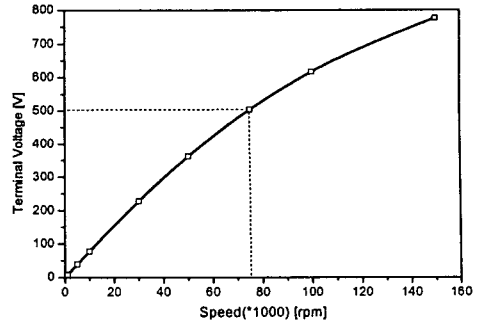


그림 3. 정부하 특성

정격 출력에서 발생하는 단자 전압과 전류 파형은 그림 4에 나타난 것처럼 정현적인 분포를 나타내고 있다. 그림 5와 그림 6은 정격에서 등자속선 분포와 자속밀도 분포를 나타낸다. 고정자 철심에서 분포된 자속밀도는 크지 않은 것으로 나타나 최적설계를 통해 전동/발전기의 크기를 줄일 수 있을 것으로 사려된다.

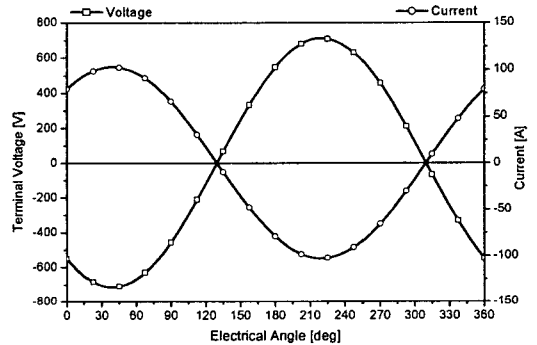


그림 4. 단자 전압 및 상전류 출력파형

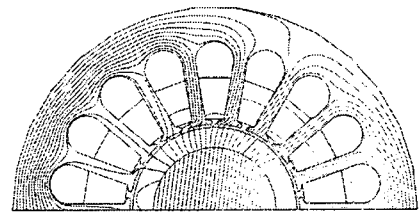


그림 5. 등자속선 분포



그림 6. 자속밀도 분포(generating)

전동/발전기의 손실은 해석적인 방법과 유한요소법을 병행하여 계산하고 그림 7에 나타내었다. 영구자석 비산

방지용 Can에서 발생하는 와전류 손실이 전체 손실에서 큰 비중을 차지하고 있다. 따라서, Fiber종류의 비전도성 재질을 사용한다면 손실을 1/2배 이하로 감소시킬 수 있을 것으로 분석된다.

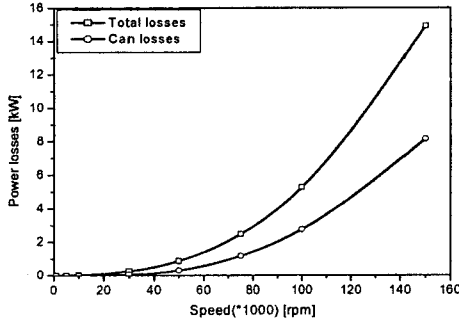


그림 7. 속도에 따른 손실 변화

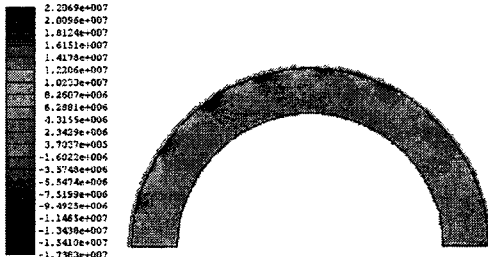


그림 8. Can에서 와전류 밀도분포

2.4 전동모드 특성

전동/발전기의 전동모드는 마이크로 가스터빈을 기동할 때 일시적으로 이용하는 특성이다. 전동모드에서는 입력되는 선간전압이 500[V]일 때 회전속도 50,000 [rpm]에서 부하각에 따른 출력을 계산하였다. 계산결과, 부하각이 9[deg]일 때 출력이 20 [kW]로 계산되었으며, 이때 전류는 48.6[A]로 계산되었다.

그림 9와 그림 10에 각각 부하각에 따른 출력변화와 전류변화를 나타내었다. 전동모드의 손실에서도 영구자석 보호용 Can에서 발생하는 손실이 크게 포함되어 비전도성 Can 재질을 사용하면 효율상승이 예상된다.

그림 11은 정격 출력에서 자속밀도 분포를 나타낸다. 전체적으로 발전모드일 때보다 상대적으로 높은 자속밀도를 나타내고 있다.

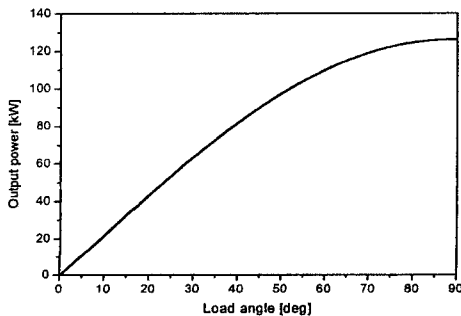


그림 9. 부하각에 따른 출력변화

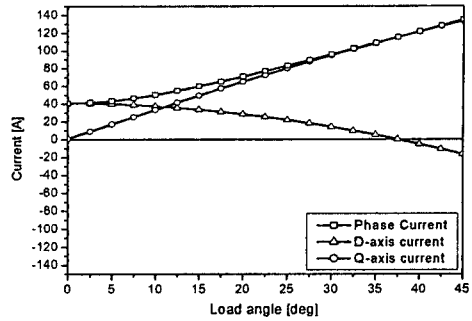


그림 10. 부하각에 따른 전류변화

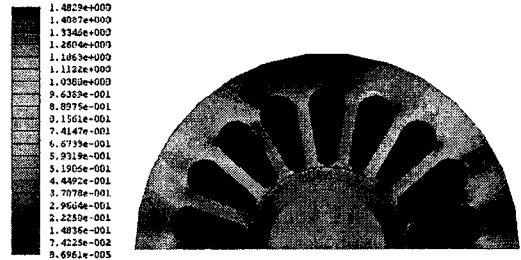


그림 11. 자속밀도 분포(부하각=9(deg))

3. 결 론

본 논문에서는 60kW, 75000rpm급 마이크로 가스터빈 발전시스템용 고속 전동/발전기를 기본 설계하고, 발전모드 특성과 전동모드 특성을 계산하여 나타내었다. 발전모드에서는 정격출력에서 전압변동률이 16.7%를 나타내었으며, 전동모드 특성은 마이크로 가스터빈의 기동에 충분한 회전력을 제공할 것으로 예상된다.

향후, 기본 설계결과를 이용하여 전동/발전기의 열해석을 통해 크기를 줄이는 최적화 설계와 보다 신뢰성 있는 손실해석이 진행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] M.A.Rahman, A.M.Osheiba, "Modelling of P.M. Synchronous Generators", Proceeding of the ICEM'88, Pisa, Italy, pp.45-51, 12-14 Sept. 1988.
- [2] K.J.Binns, el1, "Permanent magnet AC generators", Proc. IEE, Vol.126, No.7, pp.690-696, July 1979.
- [3] K.J.Binns, el 2, "A Canned Solid Rotor Permanent Magnet Machine with Skewed-Radial Neodymium-Iron-Boron Magnets", 4th Int. Conf. on Electrical Machines & Drives, pp.57-60, 1989
- [4] K.J.Binns, el 2, "The Use of Canned Rotors in High Speed Permanent Magnet Machines", 5th Int. Conf. on Electrical Machines & Drives, pp.21-25, 1991
- [5] T.Alasuvanto, el1, "Comparison of Four Different Permanent Magnet Rotor Constructions", Int. Conf. on Electrical Machines, pp.1034-1039, 1990
- [6] S.Russenschuch, E.Andresen, "Comparison of Different Magnet Configurations in the Rotor of Synchronous Machine Using Numerical Field Calculation and Vector-Optimization Methods", Int. Conf. on Electrical Machines, pp.1027-1033, 1990
- [7] J.F.Gieras, M.Wing, "Permanent Magnet Motor Technology", Marcel Dekker, Inc., 1997
- [8] 大川 光吉, "永久磁石磁氣回路の設計・特性計算法", 綜合電子出版社, 1987
- [9] J.M Gere, S.P. Timoshenko, "Mechanics of materials", Brooks/Cole Engineering Division, 1984.