

초고속 영구자석 동기기의 기초자기회로설계

Initial Magnetic-Circuit Design of High Speed Permanent-Magnet Synchronous Machine

주 대 석* · 홍 도 관* · 우 병 철* · 우 경 일** · 박 한 석†

(Daesuk Joo · Do-Kwan Hong · Byung-Chul Woo · Kyung-Il Woo · Han-Seok Park)

Abstract - This paper presents mathematical models for high speed permanent-magnet synchronous machine. The mathematical method with two successive steps is used to estimate design parameter as well as the output power. At first, mathematical model for a linkage flux problem is employed to calculate the number of winding turns and stack length of armature core. The magnetic circuit model for an induced voltage and the electric circuit model for a current are modeled. The output powers of the electrical generator were evaluated by the mathematical techniques. The results of this mathematical methods predict the specifications of the machine and can be applied in the design stage of the electrical machine.

Key Words : Generator, High speed, Magnetic circuit, Micro gas turbine, Permanent-magnet, Synchronous machine

1. 서 론

무인항공기(UAV, Unmanned Air Vehicle)나 인간형 로봇(Humanoid Rotor) 등은 높은 에너지 밀도(Wh/kg)를 가지는 휴대용 전원공급 장치가 필요하다. 전지의 경우 출력밀도는 높으나 에너지 밀도가 낮아 연속사용 시간이 짧다[1]. 따라서 같은 무게의 전지보다 20배나 큰 용량을 가지는 마이크로 가스터빈 발전기에 대한 관심이 높아지고 있다. 일본 Tohoku 대학에서는 100 [W], 870,000 [rev/min] 가스터빈 발전기를, 미국 Stanford 대학에서는 420,000 [rev/min] 압축기와 터빈을, 벨기에 K.U. Leuven 대학에서는 44 [W], 160,000 [rev/min] 가스터빈 발전기를 연구하였다[2].

마이크로 가스 터빈 시스템은 수십만 [rev/min]의 고속 회전기로 압축기, 연소기, 터빈, 영구자석 동기발전기로 구성되어 있다[1]. 출력이 1 [kW] 이하인 마이크로 터빈은 소형화, 경량화를 위해서 높은 속도로 회전하는 터빈을 사용하고 있다. 발전용 마이크로 가스터빈은 일반적으로 발전기의 회전형 계자(Field)와 터빈 날개(Turbine blade)가 일체형으로 되어있어서 발전기 회전자는 터빈 날개와 같이 높은 속도로 회전하게 된다[3]. 발전기 회전자는 높은 회전속도에서 만나게 되는 전단 응력(shear stress)을 견뎌야 한다. 그리고 위

협속도(critical speeds)는 운전속도보다 아주 높아야 한다. 또 기동과 운전 시에 발생하는 온도 상승과 원심력으로 팽창과 이완 작용이 반복적으로 일어나 강성을 보장할 수 있는 설계가 무엇보다 중요하다. 그리고 고속회전 발전기는 단위 체적 당 출력이 크다는 장점이 있지만, 단위 체적 당 손실 또한 크다. 그래서 효율을 높이고 온도 상승을 억제하기 위해서 손실을 최소화하기 위한 설계가 필요하다.

본 논문에서는 마이크로 가스 터빈 시스템에서 사용하는 영구자석 동기발전기의 기초설계와 자기회로법으로 특성을 해석하였다. 먼저 복합-결합회로로 부하특성을 예측하였고, 예측결과를 실험결과와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 초고속 회전기기 개요

전기기기를 설계할 때 기기의 형태, 크기, 재료, 특징 등을 결정하게 되는데, 그중에서 고속 회전속도도 하나가 될 수 있다. 회전속도를 높이면 전체 치수를 작게 만들 수 있고 따라서 고회전밀도가 되고 별도의 냉각장치가 필요하게 된다. 게다가 원심력(centrifugal forces)으로 발생하는 기계적인 응력(mechanical stresses)으로 인해 기계적으로 안전하게 설계해야 한다. 따라서 주변 속도(peripheral speed) 또는 회전자의 표면 선 속도(surface line speed)로 고속 회전기기를 정의하는데 지금까지 최대 주변 속도는 367 [m/s]로 보고되고 있다[4]. 고속, 고회전력을 나타내는 방법으로 속도 [rev/min] - 출력 [W] 지표가 편리하다[4],[5]. 현재, 원통형 회전자(solid rotor)를 사용한 전기기기의 한계속도는 1×10^6 [rev/min· $\sqrt{\text{kW}}$]이고, 일반적으로 응용제품의 한계속도는 1×10^5 [rev/min· $\sqrt{\text{kW}}$] 근처에 위치한다. 1×10^5 [rev/min· $\sqrt{\text{kW}}$]는 100 [kW] × 10,000 [rev/min] 또는 1 [kW] × 100,000 [rev/min]과 같은 의미이다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea

E-mail : phanseok@pknu.ac.kr

* Electric Motor Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute(KERI), Korea

** Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea

접수일자 : 2014년 11월 20일

수정일자 : 2015년 2월 3일

최종완료 : 2015년 2월 11일

이와 같은 고속, 고풍력 전기기기는 신소재(novel materials)를 사용해야 한다. 전통적인 재료와 비교했을 때 신소재에서 두드러지게 나타나는 특징은 다음과 같다. 연자성 합금(soft magnetic alloys)의 경우 인장 강도(tensile strengths)가 605 [MPa]까지는 손실이 5.7 [W/kg](400 [Hz], 1 [T])보다 작지만 더 높은 인장 강도(최대 800 [MPa], 2.2 [T])에서는 손실이 커진다는 연구결과가 있다. 높은 온도에서 동작하면서 에너지가 높은 강자성 재료(hard magnetic materials)인 RecomaHT520은 최대 550 [°C]에서도 안정하게 동작하고 최대 에너지(BHmax)는 230 [kJ/m³]이다. 권선 재료로 개발된 가벼운 알루미늄 리츠 와이어(lightweight aluminum-based Litz wire)는 고강도(high-strength), 고전도성 구리합금(high-conduction copper alloys)으로 0.3 [%]의 Al2O3이 포함되어 있고, 국제 구리 표준(international annealed copper standard)의 92 [%]에 도달했다는 보고가 있었다. 냉각성능을 높이기 위해서 높은 열전도성(high thermal conduction, 3.49 [W/m×K])을 가진 실리콘계 수지(silicon-based resins)를 사용할 수 있다. 이 수지는 최대 220 [°C]에서 사용 가능한 도체의 절연물로 사용한다. 영구자석으로 만들어지는 고속 회전자는 원심력에서 보호하기 위해서 Inconel 718과 탄소 유리 섬유(carbon fiber composites)와 같은 항복강도(high yield strength)가 큰 재료를 보호관(sleeve)으로 사용한다. 탄소 유리 섬유는 항복강도가 3.4 [GPa]이지만 무게는 Inconel 보다 10배 작다. 실리콘 질화물(silicon nitride-based)을 사용하면 가벼운 접촉식 고속 베어링(high-speed contact-type bearing)을 만들 수 있다. 지능형 제어 능동 자기 베어링(active magnetic bearings)을 사용하면 유지 보수(maintenance)가 거의 필요 없고 가혹한 환경(harsher environments)에서 사용 가능하다. 에어 포일 베어링(air foil bearings) 또한 성공적으로 사용되어왔다.

항공 우주 분야에서 사용하는 고속 회전기기는 영구자석형(permanent magnet, PM type)과 릴럭턴스형(synchronous reluctance, SR type)으로 성능은 22,000 [rev/min], 250 [kVA]에 이르렀다. 자동차 부문에서는 전기엔진을 사용한 전기 자동차가 인기를 얻고 있다. 전기 자동차에는 영구자석형, 릴럭턴스형, 유도기형(induction machine, IM type)을 고려하고 있다. 60 [kW], 100,000 [rev/min] 제품들이 보고되고 있다. 해양 분야에는 고풍력(2-5 [MW]) 영구자석 기기가 발전기에 직접 연결된 형태로 만들어지고 있다. 육상에서는 분산발전용으로 200 [kW], 53,000 [rev/min] 마이크로 터빈 발전기가 사용되고 있다. 플라이-휠 기반 전력계통 주파수 조정시스템으로 300 [kW], 최대 속도 36,000 [rev/min] 고속 발전기가 상용화되었다.

고속으로 운전이 가능한 전기기기들(IM, PM, SR)은 각각 장단점이 있다. 유도기와 영구자석기기는 고속회전에서 회전자 형태를 유지해야 하고 회전자 와전류손실을 고려해야 한다. 릴럭턴스형 기기의 회전자는 고속회전에서도 특별한 문제가 없다. 하지만 토크 리플, 역률, 무게를 줄이기 위한 전자기적인 최적 설계가 필요하다. 고속 회전을 하는 전기기기를 설계하기 위해서는 전자기적인 설계뿐만 아니라, 전력 전자 회로 설계, 냉각 설계, 기계적인 설계를 포함하는 종합적인 접근방법이 필요하다[4],[5].

전기기기는 속도와 출력으로 고속 회전기와 초고속 회전기로 분류할 수 있다. 1995년에 Maeda, Tomita, Miyashita는 속도와 출력으로 고속기와 초고속기를 분류하였다[6]. 이들은 속도와 출력의 관계식을 아래 식(1)과 같이 제안하였다.

$$N^{3.3} \times P = 6.2 \times 10^6 \quad (1)$$

여기서 N 은 회전속도 [k.rev/min], P 는 출력 [kW]을 나타낸다. 이 수식은 1995년 당시 조사된 유도기 정보로 얻은 결과이다. 수식 (1)을 그래프로 나타내면 그림 1의 점선과 같다. 그래프의 가로축은 회전 속도를 나타내고 세로축은 출력을 나타낸다. 속도-출력 그래프에서 가로축은 상용대수(log)로 나타내는 것이 적합하다. 속도-출력 특성 그래프는 회전기의 출력과 속도의 한계를 나타내는 데 유용하게 쓰인다. 1985년 이전에 만들어진 유도기들의 특성은 대부분 점선의 왼쪽에 위치하였다. 따라서 1980년대 유도기의 속도와 출력의 한계는 수식 (1)과 같았다. 명확하게 규정할 수는 없지만, 점선의 왼쪽 영역은 고속기, 오른쪽 영역은 초고속기로 분류하였다. 2007년에 Binder와 Schneider는 1995년부터 2006년까지 공개된 유도기와 영구자석 동기기 자료로 수식 (2)와 같은 속도-출력 관계식을 밝혔다[7].

$$\log n = 4.27 - 0.275 \times \log p \quad (2)$$

여기서 n 은 회전속도 [rev/sec], p 는 출력 [W]을 나타낸다. 수식 (2)를 그림 1에서 실선으로 나타내었다. 출력과 속도의 한계가 1995년보다 오른쪽으로 이동한 것을 알 수 있다.

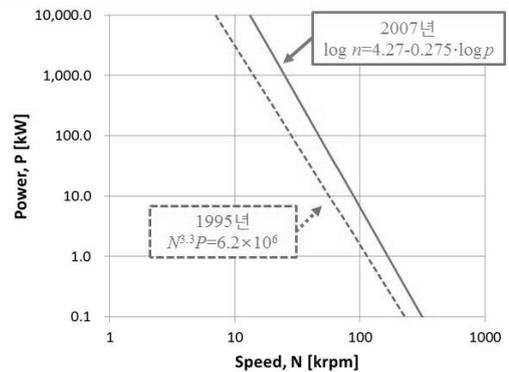


그림 1 속도(N)와 출력(P)의 관계
Fig. 1 Speed(N) - Power(P) Line

2.2 초고속 회전기기 기초설계

초고속 영구자석 동기기의 설계에 앞서 동기기의 특성을 아래와 같이 가정하였다. 이러한 가정들은 저자들의 경험을 바탕으로 산정한 수치이다.

- 동기기 정격출력 $P_e = 800$ [W]
- 동기기 정격속도 $n_{rated} = 400,000$ [rev/min]
- 동기기 정격선간전압 $V_l = 110$ [V]
- 동기기의 효율 $\eta = 85$ [%]

- 역률 $\cos\phi = 0.95$
- 전압 파형의 왜형률 $\cos\phi_L = 0.95$
- 권선계수 $k_w = 0.95$
- 전압 강하율 $\epsilon = 0.85$
- 선간전류밀도 $A_m = 85,000$ [A/m]
- 극 수 2극
- 공극 $g = 0.5$ [mm]

전기자 권선의 턴 수와 고정자 철심의 적층 길이를 설계하기 위해서 동기기의 정격 선간전압과 전압 파형의 왜형률(distortion factor)로 정격전류를 계산하면 아래와 같다.

$$i_a = \frac{P_e}{\sqrt{3} V_L \cos\phi_L} = \frac{800}{\sqrt{3} \times 110 \times 0.95} \approx 4.42 \text{ [A]} \quad (13)$$

전압 강하율을 적용해서 상전압을 구하면 다음과 같다.

$$E_f = \frac{V_L}{\sqrt{3} \epsilon} = \frac{110}{\sqrt{3} \times 0.85} = 74.72 \text{ [V]} \quad (14)$$

상전압과 회전 각속도로 쇠교자속의 변화량을 구할 수 있다.

$$\lambda_m = \frac{\sqrt{2} E_f}{2\pi f} = \frac{\sqrt{2} \times 74.72}{2\pi(400000/60)} = 0.002523 \text{ [Vs/rad]} \quad (15)$$

B 를 회전자 표면의 평균 자속밀도라고 정의하면, 극당 자속은 다음과 같다.

$$\Phi_1 = B \times \frac{\pi D L_{stk}}{2P_p} \text{ [Wb]} \quad (16)$$

여기서, P_p 는 극 쌍수, L_{stk} 는 스택 길이, D 는 공극의 지름이다. 공극자속밀도의 최대값은 $B_{mg} = \tau B_t$ 이고, 여기서 τ 는 치너비(tooth width)와 슬롯 피치(slot-pitch)의 비이고 B_t 는 슬롯의 포화자속밀도이다. 일반적인 치너비 대 슬롯 피치는 0.5이다. 따라서 공극에서 자속이 정현파(sine wave) 형태로 분포되어 있고, 슬롯의 포화자속밀도가 1.6 [T]일 때, 자속의 평균값은 아래와 같다.

$$B = \frac{2}{\pi} B_{mg} = \frac{2\tau}{\pi} B_t = 2 \times 0.5 \times 1.6 / \pi \approx 0.509 \text{ [T]} \quad (17)$$

위의 극당 자속식을 아래와 같이 변형하고, 평균 자속값을 대입하면 단위길이당 자속을 얻을 수 있다.

$$\Delta\phi_m = \frac{\Phi_1}{L_{stk}} = B \times \frac{\pi D}{2p} = 0.0045 \text{ [Wb/m]} \quad (18)$$

쇠교자속은 권선의 턴 수(N_t)와 권선을 통과하는 자속의 곱 $\Psi = N_t \times \Phi_1$ 으로 나타낸다. 따라서 쇠교자속의 변화량과 권선 계수, 단위길이당 자속으로 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$N_t \times L_{stk} = \frac{\lambda_m}{\Delta\phi_m \times k_w} = \frac{0.002523}{0.0045 \times 0.95} = 0.59 \quad (19)$$

예를 들어 고정자의 적층 길이를 15 [mm]로 가정하면 턴 수는 약 40턴이 된다. 고정자 적층 길이를 13.5 [mm]로 바꾸면 턴 수는 약 44턴으로 바뀐다.

초고속 동기기는 별도의 냉각 장치를 부착하는 것이 어려우므로 기기에서 발생하는 열을 배출시키는 것이 어렵다. 따라서 기기의 열원이 되는 동손을 줄이기 위해서 전류밀도를 5 [A/mm²]이하, 점적율을 40 [%] 이내로 제한하고 고정자 구조를 설계하였다. 전류밀도가 낮아서 상대적으로 높은 전류를 흘리기 위해서 병렬 권선을 선택하였다.

일반적인 치너비와 슬롯 피치의 비율(0.5)로 치너비를 결정하였다. 고정자 권선으로 사용할 리츠-와이어는 0.1 [mm]×60가닥 제품으로 단면적이 약 0.471[mm²]가 된다. 전기자 권선은 병렬 권선이므로 한 슬롯에 총 80턴의 권선이 삽입된다. 기본설계에서 계산된 정격전류와 권선의 단면적으로 계산된 전류밀도는 약 4.7 [A/mm²]로 설계조건을 만족하였다.

동기기의 출력 주파수는 회전속도와 극 수에 비례한다. 일반적으로 초고속 기기에는 2극 또는 4극 기기가 선호된다. 2극 기기는 권선단부(end-windings)의 부피가 커지는 경향이 있고, 자기 불평형이 극대하게 발생해서 베어링에 유도전류를 일으킨다. 이런 이유로 철손이 제한적이라면 비록 자기적 주파수가 높더라도 4극 기기가 선호된다. 하지만 4극 기기는 회전속도가 30,000 [rev/min] 이상이 되면 동기 주파수가 1 [kHz]가 되고 200,000 [rev/min]에서 약 6.6 [kHz] 이상, 400,000 [rev/min]에서 약 13.3 [kHz]가 넘어가게 된다. 따라서 마이크로 터빈 동기기는 기동 모터 역할을 겸해야 하고 철손도 적어야 하므로 동기 주파수가 낮은 2극 기기를 선택하였다.

발전 전압의 품질을 위해서 3상 동기기를 선택하였고, 3상 2극에 맞는 슬롯 수로 3 슬롯, 6 슬롯, 9 슬롯 등이 있다. 영구자석을 사용하는 동기기에서는 일반적으로 슬롯 수/극 수 비율이 낮은 쪽으로 설계를 진행한다. 2극 3 슬롯의 슬롯 수/극 수 비율이 가장 낮지만, 이 경우에는 자기 불평형이 크게 발생하기 때문에 제외하였다. 따라서 고정자는 슬롯 수/극 수 비율이 3인 6 슬롯을 선택하였다. 전형적으로 분포권을 사용하는 교류기기는 슬롯 수/극 수 비가 3이상이다.

발전기의 주요 치수와 사양을 표 1에 나타내었다.

표 1 영구자석 발전기 주요치수와 사양

Table 1 Specifications

상 수	3	공극 길이	1.3 [mm]
극 수	2	회전자 지름	6.4 [mm]
슬롯 수	6	적층길이	15 [mm]
정격속도	400,000 [rev/min]	영구자석 잔류자속밀도	1 [T]
정격출력	800 [W]	영구자석 비투자율	1.06
턴 수	40/coil	병렬회로 수	2

2.2 초고속 회전기기 기초설계

영구자석 동기기의 단면도는 그림 2와 같고 이를 자기회로로 나타내면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 고정자 슬롯과 권선을 빼고 간단한 형태로 구성하였다. 그리고 슬롯효과와 포화 효과를 무시하였다. 자속은 N 극에서 나와 공극과 고정자를 지나 S 극으로 들어간다. 그림 3에서 R_s 는 고정자의 릴럭턴스, R_l 은 누설 릴럭턴스, R_g 는 공극의 릴럭턴스, R_m 은 자석의 릴럭턴스를 나타낸다. 그리고, ϕ_r 은 자석의 자속, ϕ_g 는 공극 자속, ϕ_l 은 누설 자속이다. 그림 3의 자기회로 모델을 등가화 시켜 그림 4에 나타내었다. 여기서 누설자속은 매우 작다고 가정하여 무시하였고, 고정자 릴럭턴스도 공극에 비해 매우 작기 때문에 무시하였다. 회전자는 2극으로 그림 5의 왼쪽 그림과 같이 평행차자를 시켰다. 이 모델에서 영구자석의 최대 잔류자속밀도는 1.06 [T] 이고, 분포는 그림 5의 오른쪽 그림과 같다. 그림 4의 등가 자기회로 모델을 이용하여 자속을 계산하면 다음과 같다.

$$\phi = \frac{2R_m}{2R_m + 2R_g} \phi_r \quad (10)$$

여기서 자석의 자기저항은 식 (11), 공극의 자기저항은 식 (12)와 같다.

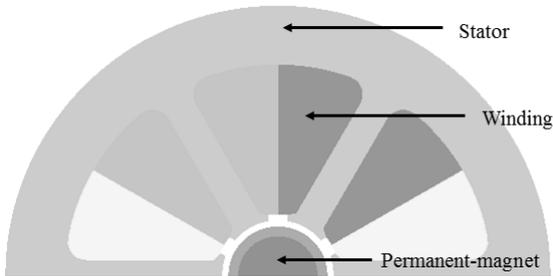


그림 2 영구자석 동기기 단면도
Fig. 2 Cross section of permanent-magnet synchronous machine

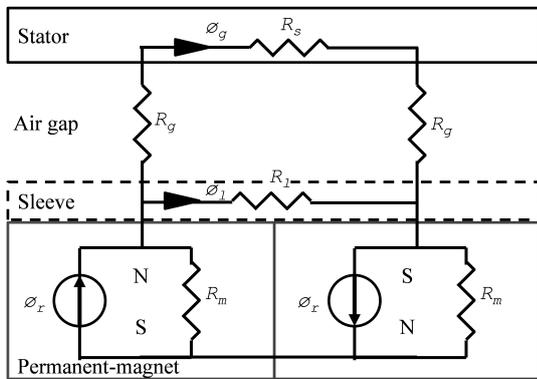


그림 3 영구자석 동기기 자기회로 모델
Fig. 3 Magnetic circuit of permanent-magnet synchronous machine

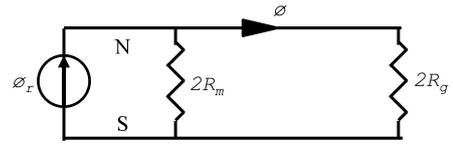


그림 4 등가 자기회로 모델
Fig. 4 Equivalent magnetic circuit model

$$R_m = \frac{\ell_m}{\mu_m \cdot A_m} \cdot \mu_m = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (11)$$

$$R_g = \frac{\ell_g}{\mu_0 \cdot A_g} \quad (12)$$

여기서, ℓ_m 은 자석두께, μ_r 은 영구자석 비투자율, ℓ_g 는 공극 길이, A_g 는 공극 단면적을 나타낸다.

자석의 자속은 다음과 같이 계산한다.

$$\phi_r = B_r A_m \sin \theta \quad (13)$$

여기서, B_r 은 잔류자속밀도, A_m 은 자석의 표면 단면적이고, θ 는 그림 5에 나타낸 것과 같이 자석의 원주방향 각도이다.

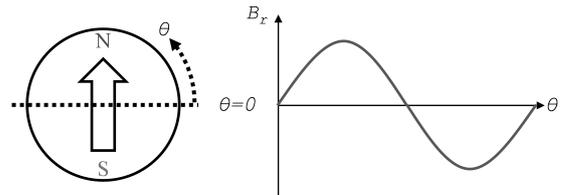


그림 5 회전자 영구자석 착자방향과 잔류자속밀도 분포
Fig. 5 Magnetization of permanent-magnet and distribution of remanence

전류와 자속의 공간적인 분포를 매우 단순화하였다. 자기회로의 공극 자속 분포 $\phi_g(\theta)$ 와 권선 기자력의 분포를 나타내는 turns function $N_t(\theta)$ 를 이용하여 권선에 채교하는 총 채교자속 λ 를 구할 수 있다[8].

$$\lambda_i = \int_0^{2\pi} N_{ti}(\theta) \cdot \phi_g(\theta) d\theta = N_{ti} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \phi_g(\theta) d\theta \quad (14)$$

상 권선의 turns function $N_{ti}(\theta)$ 는 그림 6과 같고, 턴 수를 N_t 로 표시하였다. 페러데이 법칙으로 아래의 식 (15)와 같이 유도하여 역기전력을 계산할 수 있다.

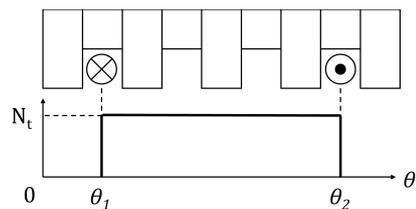


그림 6 권선의 turns function
Fig. 6 Turns function of winding

$$e_i = \frac{d\lambda_i}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \omega_m \frac{d\lambda_i}{d\theta} \quad (15)$$

여기서, ω_m 은 각속도를 나타낸다.

영구자석 동기기의 전기회로 모델을 그림 7과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

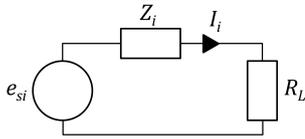


그림 7 전기회로 모델
Fig. 7 Electric-circuit model

전기회로에 흐르는 전류는 아래 수식으로 구할 수 있다.

$$I_i = \frac{e_i}{\sqrt{Z_i^2 + R_L^2}} \quad (16)$$

$$Z_i = \sqrt{R_i^2 + (\omega L_i)^2} \quad (17)$$

여기서, e_i 는 i 상의 기전력, Z_i 는 i 상 권선 내부 임피던스, R_L 은 부하저항, R_i 는 발전기 권선 저항, L_i 는 발전기 권선 인덕턴스를 나타낸다.

전기회로 모델 해석에 필요한 저항과 인덕턴스도 주어진 사양으로 계산하였다. 권선의 턴 수와 단면적, 구리의 도전율을 가지고 전통적인 방법으로 상저항을 계산하였다.

$$R_{winding} = N_t \frac{\rho L_{coil}}{A} \quad (18)$$

여기서, L_{coil} 은 권선 1턴의 평균 길이, A 는 도체 단면적을 나타낸다. 그리고 권선의 turns function으로 권선의 인덕턴스를 계산하였다[9],[10].

$$L_{BA} = \frac{\mu_0 r \ell_{st}}{\ell_g} \int_0^{2\pi} N_{LB}(\theta) n_{LA}(\theta) d\theta \quad (19)$$

$$n_{LA}(\theta) = N_{LA}(\theta) - \langle N_{LA}(\theta) \rangle \quad (20)$$

여기서, r 은 유효공극 반지름, ℓ_{st} 은 적층길이, $\langle N_{LA}(\theta) \rangle$ 는 turns function $N_{LA}(\theta)$ 의 평균값을 나타낸다. 인덕턴스 계산식에서 아래첨자가 같으면($B=A$) 자기 인덕턴스를, 다르면($B \neq A$) 상호 인덕턴스를 나타낸다.

기초설계를 바탕으로 시제품을 제작하여 back-to-back 실험장치를 그림 8과 같이 구성하였다. 동일한 시제품 두 대를 커플링으로 결합시키고 한쪽은 전동기로 다른 한쪽은 발전기로 동작시켰다. 기초설계에서 동기기의 정격속도를 400,000 [rev/min]으로 설정 하였지만 back-to-back 실험 특성상 회전자의 위험속도가 낮아지는 문제가 발생하기 때문에 시제품의 안정성을 위해서 100,000 [rev/min]까지 실험을 진행하였다.

100,000 [rev/min]의 역기전력을 수식 (15)로 계산한 결과를 그림 9의 그래프에서 네모 기호로 표시하였고, back-to-back



그림 8 역기전력 측정을 위한 실험
Fig. 8 Measurement of back-electromotive force

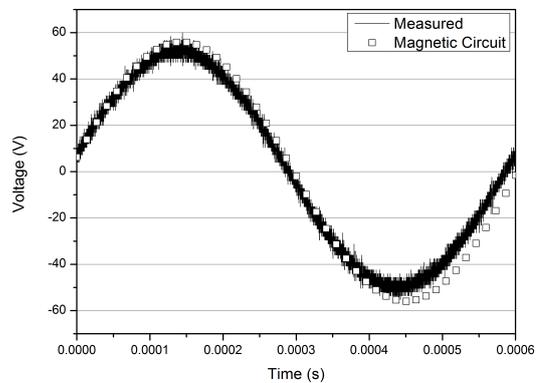


그림 9 발전기 역기전력 (100,000 [rev/min])
Fig. 9 Back-electromotive force at 100,000 [rev/min]

실험으로 측정된 결과를 그림 9의 그래프에서 실선으로 표시하여 비교하였다. 그림 9의 선간역기전력파형 그래프는 가로는 시간 축, 세로는 전압 축으로 나타내었으며 전기적으로 한 주기 동안의 전압파형을 나타내었다. 자기회로 모델로 계산한 선간전압파형이 오실로스코프로 측정된 선간전압파형과 비슷한 형태와 크기인 것을 확인할 수 있었다.

그림 10의 그래프에는 수식 (15)와 (16)으로 계산한 결과를 속도에 따른 발전기의 전류(실선)와 출력(점선)으로 나타

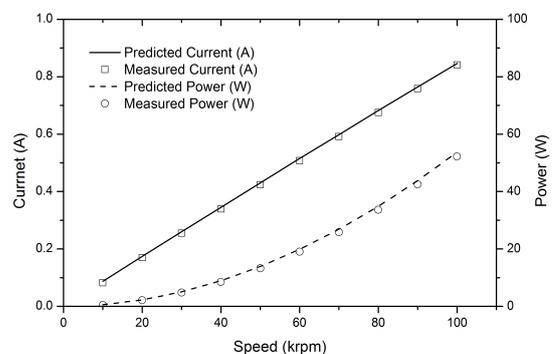


그림 10 발전기 특성 곡선
Fig. 10 Characteristic curve

내었다. 그림 10의 특성곡선 그래프는 가로축은 속도를 왼쪽 세로축은 단자전류, 오른쪽 세로축은 출력을 나타낸다. 그리고 정격속도 100,000 [rev/min]에서 정격출력 50 [W]를 만족하는 저항부하를 발전기 출력 단자에 직접 연결하여 back-to-back 실험으로 AC 부하 전류와 출력을 측정하였다. 그림 10의 그래프에서 발전기의 회전속도별로 측정된 단자전류(네모)와 3상 출력(동그라미)을 기호로 나타내었다. 그림 10의 특성곡선과 같이 복합-결합회로 모델링으로 예측한 발전기 특성과 back-to-back 실험으로 측정된 발전기 특성이 거의가 일치하였다. 특히 100,000 [rev/min]에서 예측값과 측정값의 오차는 3 [%] 미만이었다.

3. 결 론

초고속 동기기는 소형화할 수 있는 장점이 있어 이에 대한 연구가 증가하고 있다. 마이크로 터빈에 사용하는 전기 기기는 터빈의 시동 모터 역할을 하고 터빈이 정상운전을 할 때에는 발전기 역할을 해야 한다. 따라서 전동기와 발전기로 사용할 수 있는 영구자석형 동기기가 주로 사용된다. 그리고 초고속 회전기기를 조사하고 설계할 때 참고해야 할 사항을 정리하였다.

마이크로 가스터빈 동기기에 대해서 자기회로법으로 출력을 계산하였다. 간단한 계산을 위해서 많은 가정을 포함하였지만, 페리데이 법칙으로 계산한 역기전력과 back-to-back 실험으로 측정된 역기전력의 파형과 크기가 매우 유사한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 역기전력 계산방법을 활용한다면 본 논문의 시제품과 비슷하고 영구자석을 이용한 동기기에서 역기전력을 계산하는데 많은 도움이 될 것으로 생각된다. 또한 간단한 형태의 자기회로이기 때문에 영구자석 동기기의 초기설계에 매우 유용할 것으로 기대한다.

개선된 소재 개발과 설계 기술의 발달로 전기기기의 속도와 출력이 향상되고 있다. 하지만, 전기기기의 속도-출력 한계를 극복하고 속도와 출력의 한계를 높이기 위해서는 베어링기술, 열역학, 회전체 동역학, 가공 및 조립기술에 대한 기술개발이 함께 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

References

[1] Cheol Hoon Park, Sang Kyu Choi, Sang Yong Ham, "Prediction of Power and Efficiency Requirement of Motor/generator for 500W Class Micro Gas Turbine Generator Considering Losses", Journal of Fluid Machinery, vol. 14, no. 5, pp. 24-30, Oct. 2011.
 [2] C. Zwyszig, J.W. Kolar, W. Thaler, M. Vohrer, "Design of a 100 W, 500000 rpm permanent-magnet generator for mesoscale gas turbines", Industry

Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005, vol. 1, pp. 253-260, Oct. 2005.

[3] J. Peirs, et al, "Micropower generation with micro gasturbines: a challenge," Proc. IMechE Vol. 221 Part C: J. Mechanical Engineering Science, pp. 489-500, 2007.
 [4] A. Boglietti, A. M. El-refaie, O. Drubel, A. M. Omekanda, N. Bianchi, E. B. Agamloh, M. Popescu, A. Di Gerlando, and J. B. Bartolo, "Electrical Machine Topologies : Hottest Topics in the Electrical Machine Research Community," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 8, no. 2, pp. 18-30, June 2014.
 [5] Daesuk Joo, Do-Kwan Hong, Byung-Chul Woo, Kyung-Il Woo, Han-Seok Park, "Survey on High-Speed Machines with rated output power up to 1kW", Proceeding of the KIEEP Summer Conference 2014 Workshop, pp. 87-88, July 2014.
 [6] Akeshi Maeda, Hideo Tomita, and Osamu Miyashita, "Power and Speed Limitations in High Speed Electrical Machines," in Proc. IPEC-Yokohama, pp. 1321-1326, 1995.
 [7] A. Binder and T. Schneider, "High-Speed Inverter-Fed AC Drives," in Proc. ACEMP, 9-16, 2007.
 [8] Daesuk Joo, Do-Kwan Hong, Yeon-Ho Jeong, Ji-Young Lee, Byung-Chul Woo, "Magnetic Circuit Analysis of Permanent-Magnet Synchronous Generator in Micro Gas Turbine", Proceeding of the KIEE Summer Conference 2012, pp. 552-553, July 2012.
 [9] Z. Wu and O. Ojo, "Coupled-circuit-model simulation and airgap-field calculation of a dual-stator-winding induction machine," Electric Power Application, IEE Proceedings, vol. 153, no. 3, pp. 387-400, May 2006.
 [10] Daesuk Joo, Kyungil Woo, and Dae-kyong Kim, "Calculation of Winding Inductances for a Single-Phase Brushless DC Machine," Journal of Magnetism, vo. 17 no. 3, pp. 196-199, Sep. 2012.

저 자 소 개



주 대 석 (朱 大 石)

2008년 부경대 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전기연구원 전동력연구센터 위촉선임연구원.



홍도관 (洪到琯)

1998년 동아대 기계공학과 졸업. 2004년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사). 2004년~현재 한국전기연구원 전동력연구센터 선임연구원.



우병철 (禹炳哲)

1989년 영남대 기계공학과 졸업. 2000년 경북대학교 기계공학과 졸업(박사). 1991년~현재 한국전기연구원 전동력연구센터장.



우경일 (禹景一)

1969년 9월 6일생. 1995년 한양대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년~현재 부경대학교 전기공학과 교수.



박한식 (朴瀚錫)

1955년 3월 23일생. 1981년 중앙대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1996년 한국해양대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년~현재 부경대학교 전기공학과 교수.