

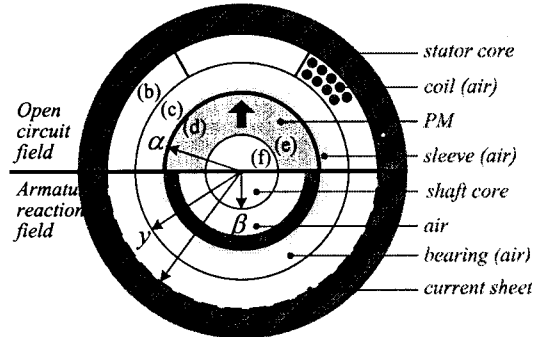
## 최대 출력을 위한 초소형/초고속 영구자석 동기기의 설계

장석명, 고경진, 최장영, 박지훈, 김현규  
충남대학교

### Design of Ultra High-Speed Micro-Scale Permanent Magnet Machine for Maximum Output Power Generation

Seok-Myeong Jang, Kyoung-Jin Ko, Jang-Young Choi, Ji-Hoon Park, Hyun-Kyu Kim  
Chungnam National University

**Abstract** - This paper deals with the design of an 870 krpm class high-speed permanent magnet synchronous generator (PMSG) applied to micro turbine system. Since space where the high-speed PMSG coupled with the micro turbine occupies in the system is strictly limited, the work described in this paper is motivated by the desire to make maximum output power of the generator considering the rotor and stator structures, winding methods and bearing system under restricted space.



## 1. 서 론

영구자석 동기발전기를 적용한 발전시스템은 기어박스 와 같은 기계적인 커플링을 갖지 않기 때문에 고효율, 고밀도, 간단한 기계구조, 높은 신뢰성 등의 이점을 갖는다. 그래서 최근 가스터빈에 의해 구동되는 초고속 영구자석형 동기발전기의 개발에 많은 관심이 집중되고 있다. 이 시스템은 비상 전력공급장치, 재생에너지를 이용한 발전시스템, 전기자동차 및 항공기 등의 주발전기 시스템으로 그 응용분야가 확대되고 있다. 따라서 정확한 발전특성 예측을 토대로한 기기의 설계가 필수적이다. 본 논문에서는 870 krpm급 영구자석형 동기발전기의 설계를 다루었다. 이 초고속 영구자석 발전기는 [1]에서 설계되어진 바 있으나 본 연구에서는 설계변수의 제약으로 인해 구조적으로 많은 제약을 가지며 이로 인해 최대출력을 갖는 설계목표를 갖는다. 전자기 전달관계법과 등가회로법 등의 해석기법을 사용하여 각각의 설계변수에 따른 출력특성해석을 바탕으로 최대출력이 발생되도록 발전기의 설계를 수행하였다. 본 논문에서 제시된 해석방법에 의한 설계결과를 유한요소해석 결과와 비교되어 그 타당성이 입증되었다.

## 2. 자계특성해석

그림 1은 영구자석형 동기발전기의 2-D 극좌표 모델을 도시한 것이며 상단 부는 영구자석에 의한 자계특성 예측을 그리고 하단 부는 전기자반작용에 의한 자계특성 예측을 위한 부분모델이다.

### 2.1 영구자석에 의한 자계특성해석

그림 1의 극좌표 해석 모델에서, 영구자석영역에서는 전류원이 존재하지 않으므로 ‘ $\nabla \times \mathbf{H} = 0$ ’가 성립하고 자기벡터포텐셜  $\mathbf{A}$ 는 ‘ $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$ ’로 정의된다. 이로부터 식 (1)의 지배방정식을 도출할 수 있다[2][3].

$$\nabla^2 \mathbf{A}_n = -\mu_0 (\nabla \times \mathbf{M}) \quad (1)$$

그림 1. 영구자석형 동기발전기의 2-D 극좌표 모델

여기서  $\mu_0$ 는 진공에서의 투자율이며, 극좌표모델에서 자화  $\mathbf{M}$ 을 정의하면 식 (2)와 같다.

$$\mathbf{M} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \{ M_{rn} e^{-j\theta} \mathbf{i}_r + M_{\theta n} e^{-j\theta} \mathbf{i}_\theta \} \quad (2)$$

여기서  $M_{rn}$ 과  $M_{\theta n}$ 은 각각 반경방향과 원주방향의 자화성분이다. 식 (1)의 일반해로부터 자기벡터포텐셜과 원주방향 자속밀도의 전달관계는 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} B_{\theta n}^r \\ B_{\theta n}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0(\beta, \alpha) & G_0(\alpha, \beta) \\ G_0(\beta, \alpha) & F_0(\alpha, \beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n^r \\ A_n^s \end{bmatrix} + \frac{j\mu_0 M_n}{2} \begin{bmatrix} \alpha \ln \alpha F_0(\beta, \alpha) + \beta \ln \beta G_0(\alpha, \beta) + \ln \alpha + 1 \\ \alpha \ln \alpha G_0(\beta, \alpha) + \beta \ln \beta F_0(\alpha, \beta) + \ln \beta + 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $F_0(x, y)$ 와  $G_0(x, y)$ 는 식 (4)와 같다.

$$F_0(x, y) = \frac{1(x/y) + (y/x)}{y(x/y) - (y/x)}, G_0(x, y) = \frac{2}{x(x/y) - (y/x)} \quad (4)$$

영구자석 영역에서의 전달관계와 같이 공극영역에서의 전달관계는 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} B_{\theta n}^r \\ B_{\theta n}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0(\alpha, Y) & G_0(Y, \alpha) \\ G_0(\alpha, Y) & F_0(Y, \alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n^r \\ A_n^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$B_{\theta n}^r = 0, A_n^s = A_n^r, B_{\theta n}^s = B_{\theta n}^r - \mu_0 M_{\theta n}, B_{\theta n}^r = \mu_0 M_{\theta n} \quad (6)$$

식 (6)의 공극영역에서의 경계조건으로부터 식 (5)의 전달관계는 식 (7)과 같이 임의의 공극면( $r=Y$ )에서의 원주방향 및 반경방향의 자속밀도 해를 구할 수 있다.

$$B_n^r = -\frac{j}{Y} A_n^r, B_n^s = -\frac{\partial}{\partial r} A_n^r \quad (7)$$

### 2.2 전기자반작용에 의한 자계특성해석

그림 1의 극좌표 해석 모델에서 전류의 분포는 고정자

내표면에서의 얇은 sheet로, 영구자석의 비투자율은 1로 가정했다. 식 (5)와 같이 공극영역에서의 전달관계는 식 (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} B_{\theta n, w}^* \\ B_{r n, w}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0(\beta, Y) & G_0(\beta, Y) \\ G_0(\beta, Y) & F_0(\beta, Y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{z n, w}^* \\ A_{r n, w}^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B_{\theta n, w}^b = \mu_0 J, \quad B_{r n, w}^* = 0 \quad (9)$$

식 (9)의 공극영역에서의 경계조건으로부터 식 (8)의 전달관계는 식 (10)과 같이 임의의 공극면( $r=Y$ )에서의 원주 방향 및 반경방향의 자속밀도 해를 구할 수 있다.

$$B_{r n, w}^* = -\frac{J}{Y} A_{z n, w}^* \quad (10)$$

$$B_{\theta n, w}^* = \frac{F_0(\beta, Y)}{G_0(\beta, Y)} B_{r n, w}^*$$

$$-\frac{G_0(\beta, Y)G_0(Y, \beta) - F_0(\beta, Y)F_0(Y, \beta)}{G_0(\beta, Y)} A_{z n, w}^*$$

### 3. 회로파라미터 도출

#### 3.1 역기전력상수

역기전력은 위치에 따른 쇄교자속의 변화율과 회전속도  $\omega$ 의 곱으로 정의된다. 영구자석에 의한 공극에서의 자속밀도  $B_m^r$ 과 공극면의 면적  $S$ 에 의해 쇄교자속은  $d\phi = B_m^r \cdot S \cdot d\theta$ 로 표현된다. 여기서 1-코일피치에 쇄교하는 자속량  $\phi$ 는 식 (11)과 같다[3].

$$\phi = \frac{2}{Y} \gamma L_{stk} A_{z n}^* \left( e^{-jnp(\frac{\theta}{2} - \omega t)} - e^{jnp\omega t} \right) \quad (11)$$

여기서,  $\theta$ ,  $\gamma$ ,  $L_{stk}$ 는 각각 1-코일피치, 고정자내측면반경, 축방향길이를 나타낸다. 이로부터 역기전력은 식 (12)와 같다.

$$V_{emf} = -\frac{d\lambda_f}{dt} = -jnp\omega N_{app} N_{ipa} \phi \quad (12)$$

여기서,  $\lambda_f$ ,  $V_{app}$ ,  $N_{ipa}$ 는 각각 쇄교자속, 매극매상당 슬롯수, 슬롯당턴수이다. 이로부터 역기전력 상수는 식 (13)에 의해 얻어진다.

$$K_E = \max(V_{emf} / \omega) \quad (13)$$

#### 3.2 인덕턴스

자기인덕턴스  $L_{mf}$ 는  $L_{mf} = \phi_s / I_s$ 에 의해 구해진다. 여기서  $\phi_s$ 는 전기자반작용에 의한 쇄교자속이고, 이는 식 (14)로부터 얻어진다[3].

$$\phi_s = N_{ph} \int B_{rn, w} \cdot \gamma \cdot L_{stk} \cdot d\theta \quad (14)$$

여기서  $B_{rn, w}$ 은 전기자 반작용에 의한 공극에서의 자속밀도이다. 이를 다시 쓰면 식 (15)와 같다.

$$L_{mf} = N_{ph} 2\gamma L_{stk} \mu_0 I_n / np(1 - \cos(np\pi/2)) \quad (15)$$

#### 3.3 저항

한 상에서의 저항은  $R_{ph} = \rho_c l_w / A_c$ 에 의해 주어진다. 여기서  $\rho_c$ ,  $l_w$ ,  $A_c$ 는 각각 구리의 저항, 한 상 권선의 길이, 한 턴의 면적이다. 한 상 권선의 전체 길이는 식 (16)에 의해서 구해진다.

$$l_w = N_m \cdot N_{coil} \cdot (2L_{stk} + 4O_h + 4A_h + 2\beta_\alpha) \quad (16)$$

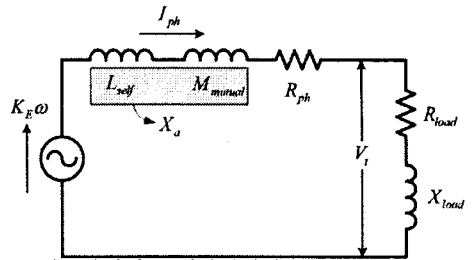


그림 3. 영구자석형 동기발전기의 1-상 등가회로

표 1. 설계요구사항

설계사항	값
정격속도 (krpm)	870
정격파워 (W)	For maximum
무부하전압 (Vdc)	6(V)이상

표 2. 설계제약조건

설계제약조건	값
회전자 외경	5 이하
축외경	1 이상
슬리브 두께	0.7이상
공극(=Air-foil 베어링)	0.4이상
고정자의경	20이하
축방향길이	5이하 (엔드턴고려)

여기서,  $N_m$ ,  $N_{coil}$ ,  $O_h$ ,  $A_h$ ,  $\beta_\alpha$ 는 각각 코일의 수, 코일당 턴수, 오버행의 길이, Angled section의 높이, 엔드턴의 등가길이를 나타낸다.

### 4. 발전특성해석

그림 3은 영구자석형 동기발전기 한 상의 등가회로도 델이다. 그림에서  $K_E$ 와  $\omega$ 는 역기전력상수와 회전속도이고,  $V_t$ ,  $I_{ph}$ 는 각각 출력단자전압과 출력상전류이며,  $R_{ph}$ 와  $X_a$ 는 전기자권선의 저항, 동기리액턴스를 나타낸다. 그림 3의 등가회로로부터 발전기의 출력전압과 출력전류를 식 (17)에 의해서 얻을 수 있다.

$$V_t = K_E \omega \frac{R_{load}^2}{\sqrt{(R_{ph} + R_{load})^2 + X_a^2}} \quad (17.a)$$

$$I_{ph} = \frac{K_E \omega}{\sqrt{(R_{ph} + R_{load})^2 + X_a^2}} \quad (17.b)$$

### 5. 제약조건을 고려한 설계

표 1과 2는 각각 설계요구사항과 설계제약조건을 보여준다. 우선 2.1절의 해석방법을 이용하여 영구자석의 내경을 축외경의 한계치로 고정하고 영구자석의 두께에 따른 무부하 특성해석을 수행하였다. 그림 4 (a)에서 보여지는 바와 같이 영구자석 외반경과 축 외반경의 비 beta/alpha가 0일때 무부하 유도기전력의 값을 최대값을 갖는다. 그림 4 (b),(c)에서 보여지는 것처럼 전기자권선 면적과 영구자석의 외반경에 따른 출력특성을 해석함으로써 최대출력이 발생하도록 그리고 축과 회전자 외반경의 제약조건을 고려하여 영구자석의 외반경을 1.75(mm)로 결정하였다.

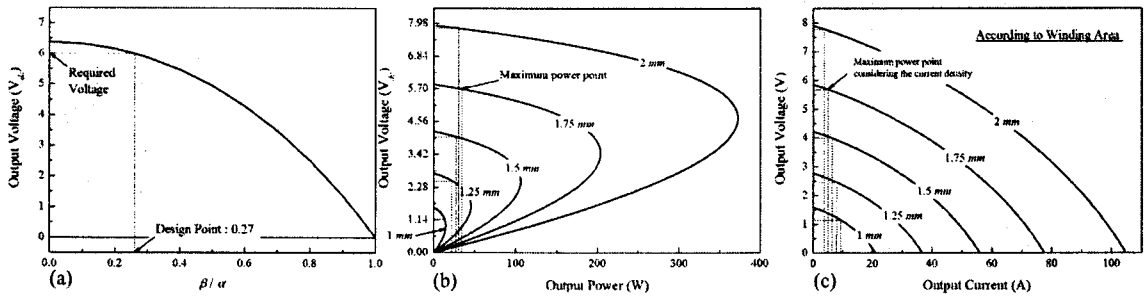


그림 4. 영구자석 외경에 따른 (a)역기전력 최대값, (b),(c)전류밀도를 고려한 정속도특성

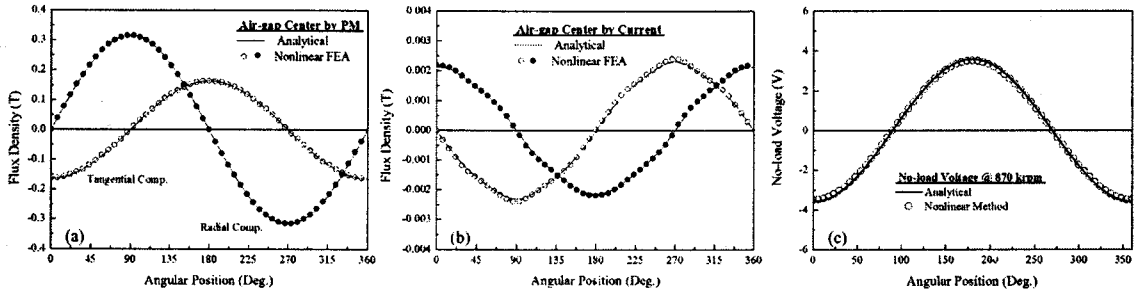


그림 5. (a)영구자석과 (b)전기자반작용에 의한 공극에서의 자속밀도, (c) 870-krpm 회전시의 역기전력

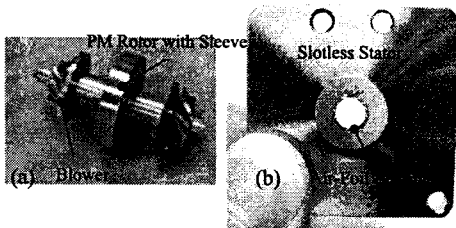


그림 6. 제작된 영구자석형 동기발전기의 (a) 회전자, (b) 고정자

표 3. 회로정수

변수명		값	
역기전력상수		FEA	TRT
		0.0394	0.0385
인덕턴스	self	0.32	0.31
	mutual	0.16	0.155
저항		13.79	

## 6. 설계 결과 및 검토

그림 6 (a)와 (b)는 제작된 영구자석형 동기발전기의 블로워를 갖는 회전자와 air-foil 베어링을 갖는 고정자의 사진이다. 설계된 영구자석형 동기발전기는 축방향길이 매우 제약적이기 때문에 ring-wound 타입의 권선 방법을 사용하였고 공극자체에 air-foil 베어링을 적용하였다. 그림 7 (a), (b), (c)는 각각 영구자석과 전기자반작용에 의한 자계분포 해석결과와 설계된 발전기가 870-krpm 회전시의 역기전력을 유한요소해석에 의한 결과와 비교하여 도시하고 있다. 그리고 표 3은 회로정수의 해석결과를 보여준다. 마지막으로 그림 7은 설계된 발전기의 정속도특성 즉 부하에 따른 출력특성을 나타내며 최대출력은 36W이다.

## 7. 결 론

본 논문은 초소형 터빈시스템에 적용되는 870krpm급 영구자석형 동기발전기의 설계에 대해 다루었다. 설

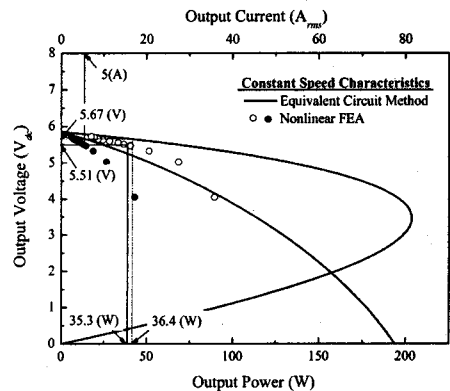


그림 7. 정속도 특성곡선 (@870-krpm)

계변수에 대한 많은 제약조건하에 전자기전달관계법, 등가회로법등의 해석기법을 바탕으로 발전기가 최대출력을 갖도록 설계를 수행하였다. 설계된 발전기의 특성해석결과와 유한요소해석결과와 비교되어 그 타당성이 입증되었으며 향후 제작된 발전기의 특성 시험을 수행할 것이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] C.Zwysig, J.W.Kolar, W.Thaler, M. Vohrer, "Design of a 100W, 50000rpm Permanent-Magnet Generator for Mesoscale Gas Turbines," Industry Applications Conference, 2005. Fortieth IAS Annual Meeting, vol. 1, pp. 253-260, 2005.
- [2] X. Wang, Q. Li, S. Wang, Q. Li, "Analytical calculation of air-gap magnetic field distribution and instantaneous characteristics of brushless DC Motors," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 18, pp. 424-432, Sept. 2003.
- [3] Seok-Myeong Jang, Kyoung-Jin Ko, Han-Wook Cho and Jang-Young Choi, "Electromechanical Parameters Calculation of Permanent Magnet Synchronous Motor using the Transfer Relations Theorem," IEEE Transaction on Magnetics, vol. 43, pp. 2495-2497, June 2007.