

Halbach 자화 배열 회전자를 갖는 영구자석 동기 전동발전기의 전자기적 해석 및 성능 특성

장 석명¹, 유 대준¹, 고 경진¹, 최 상규²
 충남대학교¹, 기계연구원

Electromagnetic field analysis and performance characteristics of PMSM/G with Halbach magnetized array rotor

Seok- Myeong Jang¹, Dae-Joon You¹, and Kyoung-Jin Ko¹, and Sang-Kyu Choi²
 Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University¹

Abstract - The rotational loss is one of the most important problems for the practical use of the high power Flywheel Energy Storage System (FESS). This rotational loss is divided as the mechanical loss by windage and bearing and iron loss by hysteresis loop and eddy current in the part of the magnetic field. So, In this paper, a double-sided PMSM/G without the iron loss is designed by analytical method of the magnetic field and estimation of the back-EMF constant represented as the design parameter. This design model consists of the double-sided PM rotor with Halbach magnetized array and coreless 3-phase winding stator. The results show that the double-sided PMSM/G without iron loss can be applicable to the high power FESS.

1. 서 론

최근 산업계에서 생산성의 향상이나 에너지 절약, 자원 절약 등에 의한 요구가 높아지고 있으며, 공작기계용 스피들, 압축기용 컴프레서, 진공 펌프, 터빈 발전기 등 고속을 요하는 산업용 기기 부분에서 저소음 및 유지보수 특성을 개선하기 위해 소음과 고장의 원인이 되고 있는 중속기어를 사용하지 않고 각종 시스템을 직접 구동할 수 있는 고속 전동기의 수요가 갈수록 늘어나고 있다. 특히, 표면부착형 영구자석형 전동기의 경우 최근 잔류자속밀도가 1.0 T를 넘는 희토류계 영구자석의 발달 및 네오디움 계열(NdFeB)의 합금의 개발과 더불어 고속, 고효율 전동기의 개발에 많이 응용되고 있으며, 기계적 안정성과 출력 밀도 측면에서 고속 응용에 가장 적합한 전동발전기로 평가된다.

이러한 영구자석 전동발전기의 연구에 있어서 영구자석 회전자의 자화 배열에 따른 성능 평가는 Howe, Boldea, Gieras, Eastham 등에 의해 공작기계 및 자동차 시스템 분야에 걸쳐 이루어 졌으며, 각각의 성능 평가에 대해 제시한 바 있다.

본 논문은 영구자석 회전자의 배열에 있어서 Halbach 자화 배열에 따른 전자기적 특성 및 성능 특성을 제시하고 있다. Halbach 배열법은 스스로 폐자로를 이룰 수 있는 특징에 의해 별도의 철심이 없이 자기회로를 이루는 장점을 가지며, 2000년대에 들어 Howe, Tenkorang, Hull 등이 자기차폐 특성을 이용하여 회전형 서보 모터와 소형, 경량화 및 고효율화가 요구되는 flywheel 에너지 저장장치시스템 등에 이 Halbach 배열을 적용한 연구결과를 발표하였다[1][2].

본 논문에 사용된 Halbach 배열 회전자를 갖는 영구자석 동기 전동발전기는 대용량 flywheel 시스템의 전력 변환을 담당하며 영구자석 회전자 속도에 의한 철심을 제거하고 고효율을 위하여 그림.1과 같이 양측식 회전자로 구성되어 있다. 또한 자기차폐를 위하여 영구자석 회전자 끝단에 철심을 사용하였다. 그림.2는 4극을 갖는 양측식 Halbach 배열 회전자의 구성에 따른 자기회로 특성을 보여주고 있으며, 본 논문은 이러한 자기회

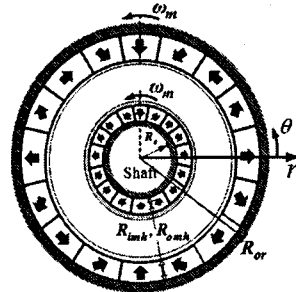


그림 1. 양측식 4극 Halbach 배열을 갖는 회전자 구조

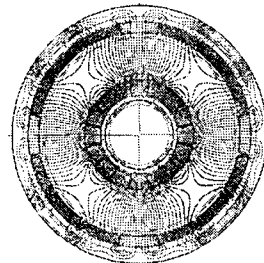


그림 2. Halbach 배열 자화에 의한 자기회로

로 구성에 대해 각 물질의 전자기 특성을 고려하여 벡터 퍼텐셜 및 자속밀도 특성식에 대해 다루고 있다. 또한 전자기 해석에 의한 제작된 영구자석 동기발전기의 역기전력 및 토크 특성에 대한 성능 특성을 제시하고 있다. 전자기 해석은 2차원 원통좌표 모델을 기반으로 하며 유한 요소법을 통하여 타당성을 제시한다.

2. Halbach 배열을 갖는 회전자의 전자기적 해석

2.1 Halbach 자화 모델링

그림.3은 양측식 Halbach 자화 배열을 갖는 회전자의 전자기 해석모델로서 각각의 영구자석 바깥쪽은 철심으로 구성되어 있으며 영구자석 회전자의 속도에 따른 원심력을 위한 sleeve는 비 자성체로 구성되어 있다. 따라서 각각의 물질의 구성에 따른 영역은 I, II, VII로 나뉘어져 있다. 여기서 Halbach 배열은 수직, 수평성분에 대해 Fourier 급수에 의해 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\vec{M}_n = \text{Real} \left[\sum_{n=1}^{\infty} M_{rn} e^{-j\theta} i_r + M_{\theta n} e^{-j\theta} i_{\theta} \right] \quad (1)$$

$$M_{rn} = \frac{2}{T} \int_0^T M_0 e^{j\theta} d\theta \quad \text{and} \quad M_{\theta n} = \frac{2}{T} \int_0^T M_0 e^{j\theta} d\theta$$

여기서 q 는 공간 고조파로서 $q = np_s$ 가 되며, M_0 는 영구자석이 갖는 잔류자속과 투자율을 의미한다.

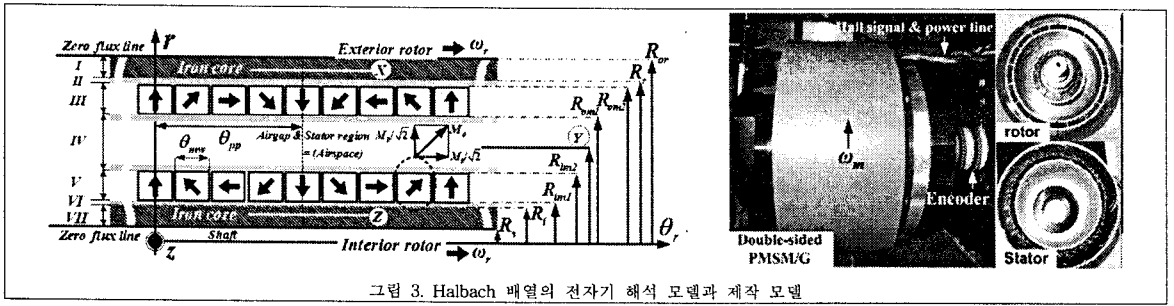


그림 3. Halbach 배열의 전기 해석 모델과 제작 모델

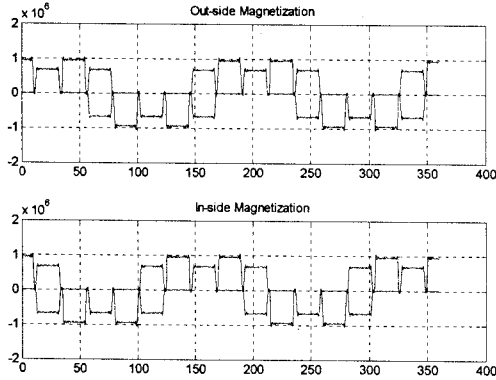


그림 4. Halbach 배열의 자화 모델링

본 논문에 사용된 잔류자속 밀도는 1.23(T)이며, 투자율은 공기와 같다.

그림 4는 외륜과 내륜의 Halbach 영구자석 자화 모델링을 보여주고 있다. 원활한 자기회로 구성을 위해 외륜과 내륜의 수평성분은 반대로 구성되어야 하며, 수직성분은 일치함을 보여주고 있다.

2.2 자속밀도 특성식의 예측

그림 3의 영구자석 동기전동발전기의 회전자는 양측식 Halbach 배열로 구성되어 있는바 공극의 자속밀도 특성식은 내륜과 외륜의 자기회로 구성에 따라 중첩에 의해 얻어진다. 또한 영구자석 회전자 원통형 모델의 geometry에 의해 벡터 퍼텐셜은 θ 방향의 분포를 가지면서, z 방향의 성분을 가지므로 식(2)와 같이 표현된다.

$$A_n = A_{zn} e^{-j\theta} i_z \quad (2)$$

전자장 해석법의 지배 방정식은 맥스웰 방정식으로부터 철심 내부 및 공기 영역 그리고 자석 영역에 있어서 식(3)과 같이 표현된다.

$$\nabla \times A_n^2 = 0 \quad (\text{공극 및 철심 내부}) \quad (3)$$

$$\nabla^2 A_n = -\mu_0 (\nabla \times M_n) \quad (\text{영구자석 내부})$$

식(3)에 대해 원통좌표계의 지배 방정식은 식(4)와 같다[1][2].

$$\begin{aligned} \nabla^2 A &= \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_n}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 A_n}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial^2 A_n}{\partial z^2} \right] \\ &= \left[\frac{d^2 A_{zn}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dA_{zn}}{dr} - q^2 \frac{A_{zn}}{r^2} \right] e^{-j\theta} i_z \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 원통좌표계의 자속밀도 특성식은 각각의 영역에 있어서 식(5)~(7)과 같이 얻어진다.

$$B_{rn}^{I, VII} = -\frac{jq}{r} [A^{I, VII} r^q + B^{I, VII} r^{-q}] \quad (5)$$

$$B_{\theta n}^{I, VII} = -q [A^{I, VII} r^{q-1} - B^{I, VII} r^{-(q+1)}] \quad (\text{철심})$$

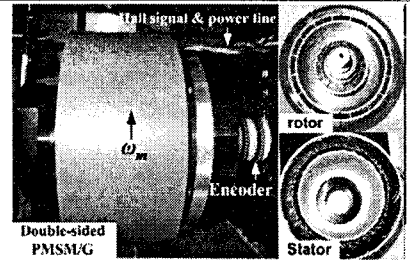


그림 5. Halbach 배열의회전자의 성능 특성을 위한 고정자 권선

$$B_{rn}^{III, V} = -\frac{jq}{r} [A^{III, V} r^q + B^{III, V} r^{-q} + \frac{j\mu_0 r q M_n}{q^2 - 1}] \quad (6)$$

$$B_{\theta n}^{III, V} = -q [A^{III, V} r^{q-1} - B^{III, V} r^{-(q+1)} + \frac{j\mu_0 M_n}{q^2 - 1}]$$

$$B_{rn}^{II, IV, VI} = -\frac{jq}{r} [A^{II, IV, VI} r^q + B^{II, IV, VI} r^{-q}] \quad (7)$$

식(5)~(7)에 대한 계수는 식(8)의 경계조건에 의해 얻어지며, 경계조건은 자속밀도 특성식의 연속, 불연속 조건에 의해 제시된다. 외륜형 Halbach 자화에 의한 경계조건은 그림 3에 있어서 다음과 같이 얻어진다.

$$r = R_{or} \quad B_{rn}^I = 0 \quad (\text{Outside iron surface}) \quad (8)$$

$$r = R_{mo2} \quad B_{rn}^{II} = B_{rn}^{III}$$

$$B_{\theta n}^{II} - B_{\theta n}^{III} = -\mu_0 M_{\theta n}$$

$$r = R_{mo1} \quad B_{rn}^{III} = B_{rn}^{IV}$$

$$B_{\theta n}^{III} - B_{\theta n}^{IV} = \mu_0 M_{\theta n}$$

$$r = R_o \quad B_{rn}^{VI, VII} = 0 \quad (\text{Inside iron surface}).$$

왜냐하면 외륜과 내륜의 Halbach 자화에 의한 자속밀도는 중첩되므로 공극에서의 전체 자속밀도는 식(9)와 같이 표현된다.

$$A_{zn}^{(air)} = [(A_o^{IV} + A_i^{IV}) r^q + (B_o^{IV} + B_i^{IV}) r^{-q}]$$

$$B_{rn}^{(air)} = -\frac{jq}{r} [(A_o^{IV} + A_i^{IV}) r^{q-1} + (B_o^{IV} + B_i^{IV}) r^{-q}] \quad (9)$$

3. 역기전력과 토크 산출에 따른 성능 특성

영구자석 동기 전동발전기는 영구자석 회전자의 자계와 회전속도에 의해 3상 고정자 권선에 역기전력을 유도시키며, 전동 모드 시 입력 교류 전압과 역기전력의 전위차만큼 3상 권선에 전력을 공급하게 된다. 따라서 그림 3의 표면 부착형 영구자석 회전자와 그림 5의 고정자 권선의 동특성 전압 방정식은 식(10)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_s(t) &= \frac{r_s}{2} i_s(t) + \frac{L_{self}}{2} \frac{di_s(t)}{dt} + e_s(t) \quad \text{and} \\ i_s(t) &= i_{s1}(t) + i_{s2}(t) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, V_s , i_s 는 인버터로부터 공급되고 입력되는 상 전압 및 상 전류를 의미하며, $e_s(t)$ 는 역기전력을 의미한다. 그림. 5는 코어리스 고정자로서 3상 권선이 분포권을 이루고 있는 바 벡터퍼텐셜의 선적분에 의해 11과 같이 쇠교자속은 얻어진다.

$$\lambda = N\Phi = N \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = N \int (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{s} = N \int \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad (11)$$

쇠교자속 λ 는 영구자석 회전자에 의한 권선 내부의 자속량 Φ 에 있어서 코일 턴수 N 에 유도되는 물리량을 의미하며, 권선 표면의 자속밀도 면적적분 또는 권선 내부의 자기 벡터 퍼텐셜의 선적분에 의해 식 (12)와 같이 얻어진다[1][2].

$$\lambda_{(pm)} = w \frac{N(R_{oc} + R_{ic})}{\theta_{cw}(R_{oc}^2 - R_{ic}^2)} \times \int_{\frac{\theta_{pp}}{3p_s} - \frac{\theta_{cw}}{2}}^{\frac{\theta_{pp}}{3p_s} + \frac{\theta_{cw}}{2}} e^{-jnp_s(\theta - \theta_0)} d\theta \int_{R_{ic}}^{R_{oc}} A_{zn}^{(air)}(r) dr \quad (12)$$

여기서, 한 권선 당 면적밀도 n_b 는 등가 코일 높이에 있어서 $\frac{N}{\pi(R_{oc}^2 - R_{ic}^2)} \frac{2\pi}{\theta_c}$ 으로 얻어진다. 따라서, 영구자석 가동자가 θ 방향으로 회전 운동함에 따라 공극자속이 권선을 쇠교하여 유도되는 역기전력은 쇠교자속의 시간적 변화율에 따라 식 (13)와 같이 얻어진다.

$$e_s = - \frac{d\lambda_{(pm)}}{dt} = j\omega_r \lambda_{(pm)} \quad (13)$$

여기서 ω_r 은 영구자석 회전자에 의한 각속도(rad/sec)이며, 역기전력 상수 k_e 는 상당 역기전력의 최대값으로 식 (14)와 같이 표현된다.

$$k_e = \lambda_f = \max(e_s) / \omega_r \quad (14)$$

3상 슬롯리스 또는 코어리스 동기 전동발전기의 경우 토크 상수는 기계적 속도에 대한 전기적 반작용으로 계산되어지는 바 3상에 대한 d-q 변환에 대해 역기전력 상수의 1.5배의 크기를 식 (15)와 같이 갖는다.

$$T_e = \frac{3}{2} \lambda_f i_{qe} = k_t i_{qe} \quad (15)$$

표1는 전자기 해석에 대한 검증용 위한 제작된 영구자석 동기 전동발전기의 설계변수로서 고정자 권선의 경우 병렬 도체수 2를 갖으며, 상당 턴수 30(turns)이다.

표1. 검증용 위한 제작된 전동발전기의 설계변수

항목	기호	크기(단위)
외륜 철심코어의 외반경	R_{or}	119(mm)
외륜 영구자석의 크기	$R_{om2} - R_{om1}$	10(mm)
내륜 영구자석의 크기	$R_{im2} - R_{im1}$	15(mm)
내륜 철심코어의 내반경	R_i	32(mm)
Shaft의 반경	R_s	28(mm)
상당 턴수	N	30

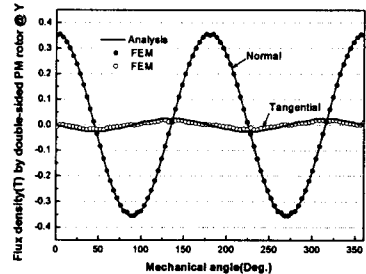


그림 6. 공극 내부의 자속밀도 특성식

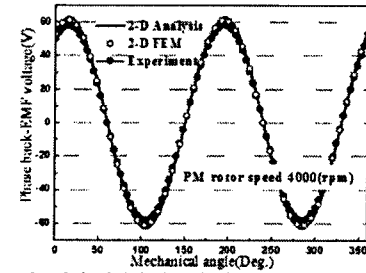


그림 7. 영구자석 회전자 속도에 의한 권선의 상 역기전력

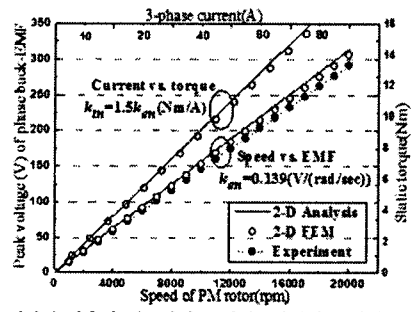


그림 8. 제작된 양축식 영구자석 동기전동발전기의 역기전력과 토크 특성

그림.7은 전자기 해석에 의한 자속밀도 특성식의 유한 요소법 검증용을 보여주고 있으며, 그림.7과 8은 권선의 구성에 따른 역기전력 특성과 토크 특성의 실험 검증용을 보여 주고 있다. 유한 요소법과 실험에 의한 검증은 전자기 해석에 대한 타당성을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 논문은 양축식 Halbach 배열을 갖는 회전자로 구성된 영구자석 동기 전동 발전기의 전자기적 해석에 대해 다루고 있다. 각각의 자기회로 구성에 따른 전자기적 해석은 영구자석 회전자에 대한 설계와 최적화를 위한 목적 함수로 사용될 수 있다. 또한 권선을 고려한 성능 특성은 영구자석 동기전동발전기의 시스템 적용에 있어서 Halbach 배열을 갖는 회전자의 적용가능성에 대해 제시하고 있다.

[참 고 문 헌]

[1] John R. Hull and Larry R. Turner, "Magnetomechanics of Internal-Dipole, Halbach-Array Motor/Generators," IEE E Trans. Magn, vol. 36. No.4, pp. 2004-2011, July. 2000.
 [2] Jiabin Wang, Geraint W. Jewell, and David Howe, "A general framework for the analysis and design tubular linear permanent magnet machine," IEEE Trans. Magn, vol. 35. No.3, pp. 1986-1989, May. 1999.