

양측식 Halbach 자화 회전자를 갖는 영구자석 동기 전동발전기의 출력 및 손실 특성

장 석명¹, 유 대준¹, 최 상규²
 충남대학교¹, 기계연구원²

Power and loss characteristics of PMSM/G with double-sided Halbach magnetized rotor

Seok-Myeong Jang¹, Dae-Joon You¹, Sang-Kyou Choi²
 Chungnam National University¹, KIMM²

Abstract - The rotational loss is one of the most important problems for the practical applications of PM synchronous motor/generator. 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 required system without the rotational loss.

1. 서 론

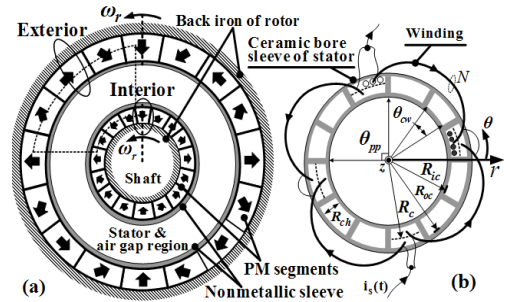
최근 산업계에서 생산성의 향상이나 에너지 절약, 자원 절약 등에 의한 요구가 높아지고 있으며, 공작기계용 스펀들, 압축기용 컴프레서, 진공 펌프, 터빈 발전기 등 고속을 요하는 산업용 기기 부분에서 저소음 및 유지보수 특성을 개선하기 위해 소음과 고장의 원인이 되고 있는 중속기어를 사용하지 않고 각종 시스템을 직접 구동 할 수 있는 고속 전동기의 수요가 갈수록 늘어나고 있다. 특히, 표면부착형 영구자석형 전동기의 경우 최근 잔류자속밀도가 1.0 T를 넘는 희토류계 영구자석의 발달 및 네오디움 계열(NdFeB)의 합금의 개발과 더불어 고속, 고효율 전동기의 개발에 많이 응용되고 있으며, 기계적 안정성과 출력 밀도 측면에서 고속 응용에 가장 적합한 전동발전기로 평가된다[1].

이러한 영구자석 전동발전기의 연구에 있어서 영구자석 회전자의 자화 배열에 따른 성능 평가는 Howe, Boldea, Gieras, Eastham 등에 의해 공작기계 및 자동화 시스템 분야에 걸쳐 이루어 졌으며, 각각의 성능 평가에 대해 제시한 바 있다[1],[2].

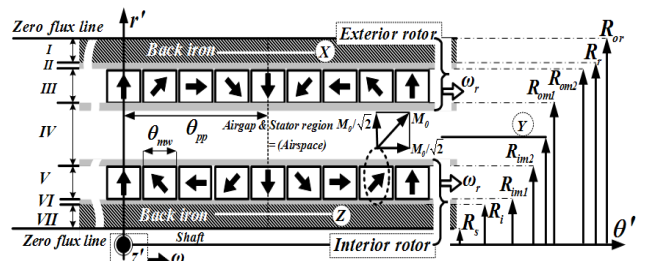
본 논문은 영구자석 회전자의 배열에 있어서 Halbach 자화 배열에 따른 전자기적 특성 및 성능 특성을 제시하고 있다. 특히, 영구자석 동기 전동/발전기를 사용하고 있는 다양한 시스템에서 출력 밀도를 높이고 회전 손실을 저감하기 위하여 양측식 영구자석 회전자와 코어리스 3상 권선 고정자의 출력 특성과 손실 특성을 실험에 의해 제시하고 있으며, 본 논문에서 사용된 양측식 동기/전동 발전기는 회전손실이 적고 고출력을 요하는 시스템에 사용할 수 있음을 제시하고 있다.

2. 양측식 영구자석 회전자의 자계 특성식

그림.1은 양측식 영구자석 동기전동발전기 모델로서 가동자는 양측식 Halbach 자화 배열로 구성되어 있으며, 고정자는 코어리스 3상 권선으로 구성되어 있다. 여기서, 회전자의 경우 Halbach 자화 배열이 자기회로 구성에 의한 자기차폐 특성이 있을지라도 공극의 자속밀도를 높이고, 외부적인 자기차폐 특성을 향상시키기 위하여 회전자의 외부와 내부에 back iron이 사용되었으며, 고정자의 경우 3상 권선은 4극에 대해 병렬 회로수 2로 설정하여 비급속 프레임에 분포권으로 설계되어졌다. 해석을 위한 2-차원 모델에 있어서 회전자는 (r',θ',z')의 원통 회전 프레임을 갖으며 고정자의 경우 (r,θ,z)의 원통 고정 프레임을 갖는다. 그림.2는 회전자의 영구자석 배열에 의한 자계 특성을 위한 해석 모델로서 고정자 프레임과 영구자석 회전자는 같은 속도로 회전한다고 가정하였을 때, 자계 특성은 항상 일정한 지점을 나타내므로 회전자가 회전한다 할지라도 정자계 해석에 의한 자계 특성을 갖는다.



〈그림 1〉 양측식 영구자석 회전자를 갖는 동기 전동발전기 모델: (a) 4극 Halbach 자화를 갖는 회전자 (b) 3상 권선을 갖는 코어리스 고정자



〈그림 2〉 회전자의 자계 특성을 위한 해석 모델

따라서, 그림.2의 Halbach 자화 배열은 공간상에 p_s의 극쌍수와 n차 고조파를 갖는 자화량 분포에 대해 지수함수 푸리에 급수에 의해 식 (1)과 같이 표현된다 [1],[2].

$$\vec{M}_n = \text{Real} \left[\sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} M_{rn}^{III, V} e^{jn p_s \theta} i_r + M_{\theta n}^{III, V} e^{jn p_s \theta} i_\theta \right] \quad (1)$$

여기서, M_{rn} 과 $M_{\theta n}$ 은 영구자석의 잔류자속 밀도에 의한 자화량의 수직, 수평 성분을 각각 의미한다.

일반적으로, 영구자석 동기전동발전기의 자계 특성을 위한 해석은 자계 \mathbf{H} , 자속밀도 \mathbf{B} , 그리고 전류밀도 \mathbf{J} 를 갖는 Maxwell 방정식으로부터 얻어지며, 슬롯리스 또는 코어리스 고정자의 경우 $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$ 의 자기 벡터 퍼텐셜 \mathbf{A} 로부터 간편하게 얻어진다. 식 (2)는 그림.2의 각각의 매질(I, II, III, IV, V, VI, VII)에 대한 자기 벡터 포텐셜에 의한 지배방정식으로, 영구자석 부분은 자화량을 갖는다. 즉 [2],

$$\begin{aligned} \nabla^2 \times A_n^{I, II, IV, VI, VII} &= 0 \\ \nabla^2 A_n^{III, V} &= -\mu_0 (\nabla \times M_n^{III, V}) \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)의 지배방정식에 대한 해로서 2차원 원통 좌표계에서 식(3)과 식(4)로부터 각각의 매질에 대한 특성식은 얻어진다.

$$\frac{d^2 A_{zn}^{I, II, IV, VI, VII}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dA_{zn}^{I, II, IV, VI, VII}}{dr} - (np_s)^2 \frac{A_{zn}^{I, II, IV, VI, VII}}{r^2} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 A_{zn}^{III, V}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dA_{zn}^{III, V}}{dr} - (np_s)^2 \frac{A_{zn}^{III, V}}{r^2} &= \mu_0 \frac{jn p_s}{r} \left(-M_{rn}^{III, V} + \frac{M_{\theta n}^{III, V}}{jq} \right) \\ \nabla \times M_n^{III, V} &= \frac{jn p_s}{r} \left(-M_{rn}^{III, V} + \frac{M_{\theta n}^{III, V}}{jq} \right) e^{jn p_s \theta} i_z \end{aligned} \quad (4)$$

본 논문의 양축식 회전자에 의한 자계 특성식은 그림. 2의 내륜 (interior)과 외륜(exterior)에 의한 자기회로 구성으로 나누어지며, 2개의 자기회로로부터 중첩에 의해 얻어진다. 자기회로를 예측하기 위한 경계조건으로 자기 벡터 퍼텐셜과 자계는 각각의 매질에 연속적이거나, 회전자 코어의 외반경은 자기차폐에 의해 자기벡터 퍼텐셜이 0이 되며, Halbach 자화 배열을 갖는 영구자석 경계면은 불연속성을 갖는다. 식 (5)는 회전자 코어와 영구자석 경계면의 경계 조건에 대해 제시하고 있다..

$$\begin{aligned}
 r = R_{or} \quad A_{zn}^I &= 0 & (5) \\
 r = R_{om2} \quad A_{zn}^{III} &= A_{zn}^{II}, \quad H_{\theta n}^{III} - D_{\theta n}^{II} = M_{\theta n} \\
 r = R_{om1} \quad A_{zn}^{IV} &= A_{zn}^{III}, \quad H_{\theta n}^{IV} - H_{\theta n}^{III} = -M_{\theta n} \\
 r = R_{im2} \quad A_{zn}^{IV} &= A_{zn}^V, \quad H_{\theta n}^{IV} - H_{\theta n}^V = -M_{\theta n} \\
 r = R_{im1} \quad A_{zn}^V &= A_{zn}^{VI}, \quad H_{\theta n}^V - H_{\theta n}^{VI} = M_{\theta n} \\
 r = R_s \quad A_{zn}^{VII} &= 0
 \end{aligned}$$

식(4)의 각각의 매질에 대해 왜륜의 Halbach자화를 고려한 공극의 자기 벡터 퍼텐셜은 $(C_{ex}^{IV}, D_{ex}^{IV})$ 의 계수의 예측과 내륜의 Halbach자화를 고려한 $(C_{in}^{IV}, D_{in}^{IV})$ 로부터 식 (6)으로 표현된다.

$$A_{zn}^{(air)}|_{r=Y} = (C_{ex}^{IV} + C_{in}^{IV})Y^{np_s} + (D_{ex}^{IV} + D_{in}^{IV})Y^{-np_s} \quad (6)$$

3. 제작된 양축식 동기전동기의 출력과 손실 특성

그림. 1 (b)는 코어리스 고정자로서 3상 권선이 분포권을 이루고 있는바 벡터퍼텐셜의 선적분에 의해 식 (7)과 같이 쇄교자속은 얻어진다.

$$\lambda = N\Phi = N \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = N \int_s (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{s} = N \int_c \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad (7)$$

쇄교자속 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 (8)와 같이 얻어진다[1][2].

$$\lambda_{(pm)} = \sum_{n=1, odd}^{\infty} \left\{ \frac{wN(R_{oc} + R_{ic})}{\theta_{cw}(R_{oc}^2 - R_{ic}^2)} \times \int_{\frac{\pi}{6p_s} - \frac{\theta_{cw}}{2}}^{\frac{\pi}{6p_s} + \frac{\theta_{cw}}{2}} e^{-jnp_s(\theta - \omega_r t)} d\theta \int_{R_{ic}}^{R_{oc}} A_{zn}^{(air)}(X) dX \right\} \quad (8)$$

여기서, R_{oc}, R_{ic} 는 고정자 권선의 내반경과 외반경을 의미하며, θ_{cw} 는 도체바의 각넓이를 의미한다. 따라서, 영구자석 가동자가 θ 방향으로 회전 운동함에 따라 공극자속이 권선을 쇄교하여 유도되는 역기전력은 쇄교자속의 시간적 변화율에 따라 식 (9)와 같이 얻어진다.

$$e_s(t) = -\frac{d\lambda_{(pm)}}{dt} = \omega_r \sum_{n=1, odd}^{\infty} \lambda_{fn} e^{jnp_s \omega_r t} \quad (9)$$

여기서, ω_r 은 회전자의 각속도(rad/sec)이며, 역기전력 상수 k_e 는 상당 역기전력의 최대값으로 식 (10)와 같이 표현된다.

$$k_{en} = \max(e_s) / \omega_r \quad (10)$$

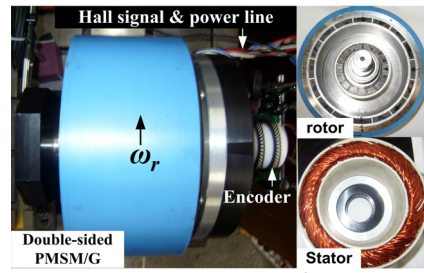
3상 슬롯리스 또는 코어리스 동기 전동발전기의 경우 토크 상수는 기계적 속도에 대한 전기적 반작용으로 계산되어지는 바 3상에 대한 $d-q$ 변환에 대해 역기전력 상수의 1.5배의 크기를 식 (11)와 같이 갖는다.

$$T_e = \frac{3}{2} \lambda_{fi} i_{qe} = k_{tm} i_{qe} \quad (11)$$

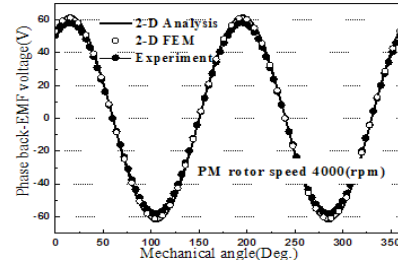
해석적 모델에 대한 검증은 위하여 본 논문은 30kW급 영구자석 동기 전동발전기에 대한 실험적 검증은 제시한다. 제작된 양축식 동기 전동/발전기에 대한 설계 파라미터는 표.1 과 같으며 그림.3은 양축식 회전자와 코어리스 3상 권선 고정자를 보여준다.

〈표 1〉 검증을 위한 제작된 전동발전기의 설계변수

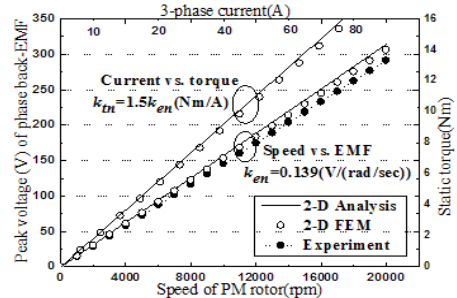
항목	기호	크기 (단위)
왜륜 철심코어의 외반경	R_{or}	119(mm)
왜륜 영구자석의 크기	$R_{om2} - R_{om1}$	10(mm)
내륜 영구자석의 크기	$R_{im2} - R_{im1}$	15(mm)
내륜 철심코어의 내반경	R_i	32(mm)
극당 턴수	N	30



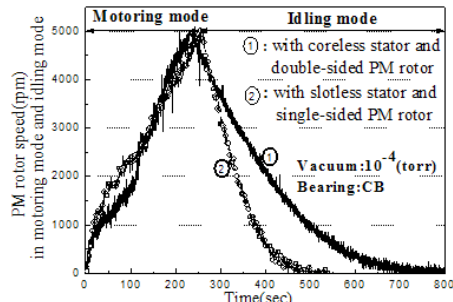
〈그림 3〉 제작된 양축식 영구자석 동기 전동/발전기



〈그림 4〉 영구자석 회전자의 속도에 의한 역기전력 특성



〈그림 5〉 토크와 역기전력에 의한 동기전동/발전기의 출력특성



〈그림 6〉 일반적인 동기전동발전기와의 비교에 의한 손실특성

그림. 4는 제작된 설계 모델에 대한 역기전력 특성으로 회전자 속도 4000(rpm)에 있어서 부부하 특성이며, 그림.5는 역기전력 특성을 기반으로 한 토크로부터 제작된 전동/발전기의 출력 특성을 보여주고 있다. 본 연구에 사용된 동기/발전기는 일반적인 동기 전동/발전기가 갖는 철손에 의한 회전손실을 제거한 모델로서 그림.6은 제작된 모델의 손실 특성을 위하여 슬롯리스 모델과의 비교를 보여주고 있다. 발전을 하지 않는 대기 모드(idling mode)에 있어서 손실 특성이 향상됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 양축식 Halbach 배열을 갖는 회전자로 구성된 영구자석 동기 전동 발전기의 출력과 손실 특성에 대해 다루고 있다. 제작된 모델에 대한 출력 특성 및 손실 특성으로부터 양축식 영구자석 동기/전동발전기는 손실을 최소화하고 출력을 최대화 하기 위한 시스템에 적용가능 함을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] John R. Hull and Larry R. Turner, "Magnetomechanics of Internal-Dipole, Halbach-Array Motor/Generators," IEEE Trans. Magn, vol. 36. No.4, pp. 2004-2011, July. 2000.
- [2] D.L. Trumper and M. E. Williams, "Halbach arrays in precision motor control," Art Sci. Magnet Design, vol.1, Feb. 1995.