

고속 전동/발전기의 손실 특성

장석명 조한욱 이성호 조성국 정연호\* 이종호\*\*  
 충남대학교 한국전기연구원\* 한밭대학교\*\*

Characteristics of Rotor Losses in High-Speed Motor/Generator

S. M. Jang H. W. Cho S. H. Lee S. K. Cho Y. H. Jeong\* J. H. Lee\*\*\*  
 Chungnam Nat'l Univ. KERI\* Hanbat Nat'l Univ\*\*\*

**Abstract** - High-speed permanent magnet machines are currently being developed for a number of applications including gas-turbine generator sets and machine tools. Due to the high peripheral speed of the rotor and the relatively high conductivity of the magnets used, rotor eddy current loss can be substantial. On the basis of analytical and finite element method, this paper deals with an analytical method for calculating eddy current losses in the rotor with permanent magnet and retaining ring.

1. 서 론

초고속 모터는 동급의 출력에 대하여 소형, 경량화가 가능하나, 고에너지밀도의 기기가므로 부피가 작아 모터 내부의 발생열을 최소화 해야한다. 또한 초고속 운전에 따른 기계적 스트레스에 강인하도록, 회전자의 구조가 간단해야 하고, 고속 운전시의 진동을 고려하여 토르리플이 작아야 한다.

또한, 고속용 전동기의 설계에 있어서 고려되어야 하는 요소 중 중요한 것은 초고속 운전에 따른 발생손실에 의한 온도상승의 최소화이다. 즉, 온도상승은 일반적으로 철손, 동손, 기계손, 영구자석과 캔(슬리브)으로 구성된 회전자에서 공극 피어먼스 변화에 따른 자속 리플에 의해 발생하는데 캔과 영구자석에서 주로 발생한다. 특히, 도전율을 가진 철심이나 영구자석 구속용 캔에서 발생하는 철손은 히스테리시스손과 와전류 손으로 각각 주파수와 주파수의 제곱에 비례하여 초고속주파로 구동되는 고속 기기의 손실에서 고려되어야 할 매우 중요한 부분이 아닐 수 없다[1][4].

본 논문에서는 설계된 2극 24슬롯 마이크로 가스터빈용 고속 전동/발전기를 각 영역에서의 손실특성을 해석법에 의한 지배방정식과 해를 제시하고, 자속밀도 특성과 손실특성에 대한 해석결과를 제시하고자 한다.

2. 고속 전동/발전기

2.1 해석 모델

본 논문에서 제시된 모델은 고속 회전기이므로, 회전수의 자속에 비례하는 원심력이 회전체에 작용하여 상당한 기계적인 스트레스를 발생시킨다. 따라서, 회전자는 고속회전시 영구자석의 비산이나 이탈을 방지하고, 기계적인 스트레스를 견디도록 견고한 구조가 되도록 하기 위하여 영구자석에 원통형 캔(Hoop 영역)을 설치하였다[3].

그림 1은 영구자석과 캔(Hoop 영역)을 갖는 해석 모델이다.

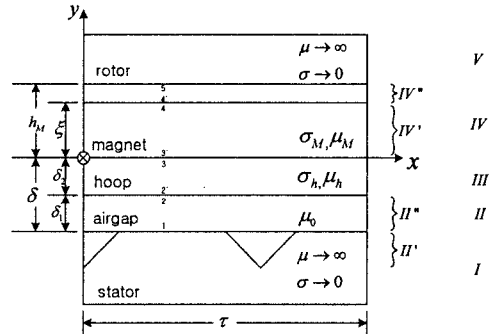


그림 1. 등가 해석 모델

2.2 지배방정식 및 경계조건

해석 모델에 대하여 Hoop영역(III)과 Magnet영역(IV, IV'')에서의 지배방정식을 Magnetic vector potential에 의한 2차원 편미분방정식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial y^2} = j\omega\sigma\mu \vec{A} \quad (1)$$

지배방정식에 대한 각 영역에서의 해는 슬롯 고조파를 고려하여 일반적으로 식(2)과 같다.

$$A_i = \sum_{\nu_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\nu_2=-\infty}^{\infty} \{A_i \sinh(\alpha_i y) + B_i \cosh(\alpha_i y)\} \cdot e^{j(\nu_1 \omega t - \nu_2 x)} \quad (2)$$

여기서,  $\alpha_i$  는 영역  $i = II', III, IV, IV'$ 에서 영구자석과 전기적 특성에 의존하는 상수이고, 공극의 변화영역인 II 때문에 발생하는 vector potential의 고조파 차수  $\nu_2 = k \pm 2mqn$  ( $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ )이며,  $\nu_1 = k$  인데 지름방향 착자된 경우 영구자석이 만드는 자속의 형태는 정현적이므로,  $\nu_1 = 1$  이고, 식(2)의  $\alpha_i$ 는 식(3)으로 나타낸다.

$$\alpha_i = \nu_2 a \sqrt{1 + j\mu_i \sigma_i \omega_0 (\nu_1 - \nu_2) / (\nu_2 a)^2} \quad (3)$$

여기서,  $a$ 는 위상정수,  $m$ 은 상수,  $q$ 는 매극대상당슬롯수를 나타낸다.

또한, 각 영역에서의 경계조건은 식(4)-식(7)과 같다.

i)  $y = h$   $B_{\xi} = 0$  (4)

ii)  $y = \zeta$   $H_{\xi} - H_{\xi'} = A_M B_{\mathcal{M}} = B_{\mathcal{M}}$  (5)

iii)  $y = 0$   $H_{\xi} = H_{\xi'}, B_{\mathcal{B}} = B_{\mathcal{B}'}$  (6)

iv)  $y = -\delta_2$   $H_{\xi} = H_{\xi'}, B_{\mathcal{B}} = B_{\mathcal{B}'}$  (7)

2.3 자속밀도 특성

식(1)과 식(4)-(5)에 주어진 지배방정식과 경계조건에 의한 각 영역에서의 자속밀도의 분포는 다음과 같다.

i) Air gap region (8)

$$B_{yH} = \sum_{\nu_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\nu_2=-\infty}^{\infty} j\nu_2 a C_1 [(C_4 + A'_{II} C_3) \cosh(\nu_2 a y) + C_2 A'_{II} \sinh(\nu_2 a y)] \cdot e^{j(\nu_1 \omega t - \nu_2 a x)}$$

ii) Hoop 영역 (9)

$$B_{yM} = \sum_{\nu_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\nu_2=-\infty}^{\infty} j\nu_2 a C_1 [C_4 \cosh(\nu_2 a \delta_2) \cosh(\alpha_h (y + \delta_2)) - \eta' \sinh(\nu_2 a \delta_2) \sinh(\alpha_h (y - \delta_2)) + A'_{II} \{ \sinh(\alpha_h y) - \eta \cosh(\alpha_h y) \}] \cdot e^{j(\nu_1 \omega t - \nu_2 a x)}$$

iii) 영구자석 영역 (10)

$$B_{yN} = \sum_{\nu_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\nu_2=-\infty}^{\infty} j\nu_2 a C_1 \{ \eta' C_2 - \eta (\eta' b + A'_{II}) \times \frac{\cosh(\alpha_M (h_M - y))}{\cosh(\alpha_M h_M)} \} \cdot e^{j(\nu_1 \omega t - \nu_2 a x)}$$

식(8)에서 식(10)으로 표현되는 자속밀도식의 계수는 식(11)과 같다.

$$C_1 = \frac{\tanh(\nu_2 a h_M)}{C_2 \cdot \nu_2 a h_M} \quad C_2 = b + \eta d$$

$$C_3 = e + \eta f \quad C_4 = \eta' k \quad (11)$$

$$b = k \cosh(\nu_2 a \delta_2) \sinh(\alpha_h \delta_2) - \sinh(\nu_2 a \delta_2) \cosh(\alpha_h \delta_2)$$

$$d = k \cosh(\nu_2 a \delta_2) \cosh(\alpha_h \delta_2) - \sinh(\nu_2 a \delta_2) \sinh(\alpha_h \delta_2)$$

$$e = k \sinh(\nu_2 a \delta_2) \cosh(\alpha_h \delta_2) - \cosh(\nu_2 a \delta_2) \sinh(\alpha_h \delta_2)$$

$$f = k \sinh(\nu_2 a \delta_2) \sinh(\alpha_h \delta_2) - \cosh(\nu_2 a \delta_2) \cosh(\alpha_h \delta_2) \quad (12)$$

$$k = \frac{\alpha_h}{\nu_2 a} \frac{\mu_0}{\mu_h} \quad \eta = \frac{\mu_M}{\mu_h} \frac{\alpha_h}{\alpha_M} \cdot \coth(\alpha_M h_M) \quad (13)$$

$$\eta' = \begin{cases} \eta \frac{\mu_h}{\alpha_h} \cdot \hat{A}_M & \text{for } \nu_2 = \nu_1 \\ 0 & \text{for } \nu_2 \neq \nu_1 \end{cases} \quad (14)$$

여기서,  $\hat{A}_M$  은 영구자석의 기자력을 등가 전류로 환산한 양이다.

한편, 고정자의 슬롯팅은 해석모델에서 슬롯과 공극사이의 퍼미언스 변화의 원인이 되고, 이는 그림 1에서  $y = \delta$  에서의 경계조건의 설정을 어렵게 한다. 즉, 일반적인 경계조건에 의한 자속분포의 예측은 불가능하다. 따라서, 앙페르의 법칙을 이용한 슬롯팅 영역에서의 자속 분포는 식(15)와 같다[1].

$$y = \delta : H_x - H_y \frac{dy_s}{dx} - y_s \frac{\partial H_y}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

$$\text{여기서, } y_s = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \cdot e^{j n a x} \quad (16)$$

그리고,

$$y_n = \frac{1}{4} \frac{b_s^2}{\tau_s} \tan(51) \left[ \frac{\sin(n b_s \pi / 2 \tau_s)}{n b_s \pi / 2 \tau_s} \right]^2 \quad (17)$$

$H_x, H_y, y_s$  를 식(15)에 대입하여 식(18)과 같은 형태를 갖는 Linear Eq.를 유도할 수 있다.

$$L \cdot A'_{II} = R \quad (18)$$

여기서,

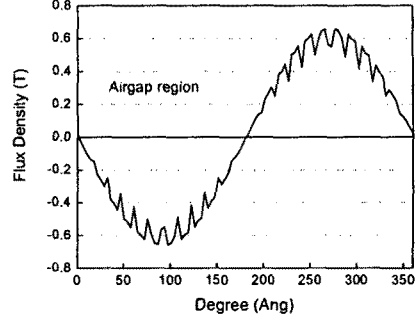
$$L = [ \cosh(a \delta) - C_1 / C_2 \cdot \sinh(a \delta) ] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n a \nu_2 \eta' \cdot [ \sinh(\nu_2 a \delta) - C_1 / C_2 \cdot \cosh(\nu_2 a \delta) ]$$

$$R = \eta_2 \cdot \sinh(a \delta) / C_2 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n a \nu_2 \eta' \cosh(\nu_2 a \delta) / C_2 \quad (20)$$

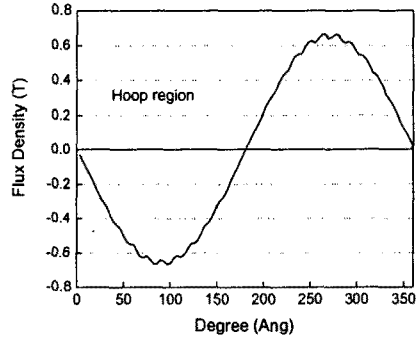
따라서, 식(18)을 연산하여  $A'_{II}$  를 구할 수 있다.

그림 2는 해석모델 각 영역에서의 자속밀도 특성을 나

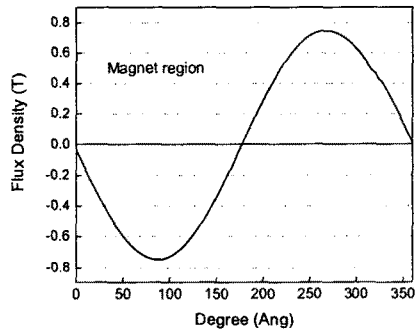
타내고 있으며, 공극과 Hoop영역, 그리고 영구자석영역에서의 슬롯 고조파에 의한 자속 리플을 보여준다. 특히 공극과 Hoop 영역에서 공극자속밀도의 변화를 볼 수 있는데 이와 같은 자속의 리플현상은 기기의 와전류 손실에 주된 원인이 된다.



(a) 공극 자속밀도 분포



(b) Hoop 영역에서의 자속밀도 분포



(c) 영구자석 영역에서의 자속밀도 분포  
그림 2. 각 영역에서의 자속밀도 분포 특성

## 2.4 와전류 특성식

식(8)-(10)으로부터 전류밀도의 분포는 식(21)에 의하여 구할 수 있다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (21)$$

그런데, 대부분의 와전류가 발생하는 영역은 도전율을 가진 Hoop 영역과 영구자석 영역이므로 이들 영역에서의 와전류 특성식은 식(22)와 식(23)으로 표현된다.

i) Hoop 영역

$$\vec{J}_{II} = \sum_{\nu_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\nu_2=-\infty}^{\infty} j(\nu_1 - \nu_2) \omega_0 \sigma_h C_1 A'_{II} \times \{ \sinh(\alpha_h y) - \eta \cosh(\alpha_h y) \} \cdot e^{j(\omega_0 (\nu_1 - \nu_2) - \nu_2 a x)}$$

ii) 영구자석 영역

$$\vec{J}_{IV} = \sum_{\nu_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\nu_2=-\infty}^{\infty} j(\nu_1 - \nu_2) \omega_0 \sigma_M C_1 \eta A'_{II} \times \frac{\cosh[\alpha_M(h_M - y)]}{\cosh(\alpha_M h_M)} e^{j(\omega_0(\nu_1 - \nu_2) - \nu_2 \omega t)} \quad (23)$$

그림 3 은 그림 2 (a)의 공극자속밀도에 대한 고조파 분석 결과이다. 그림 3 에서의 고조파 성분들은 영구자석과 캔(슬리브)에 와전류를 발생시키는 주요인이다.

### 2.5 와전류 손실 특성식

슬롯형 동기기의 경우 공극자속 밀도의 슬롯 리플에 의하여 영구자석이나 캔(슬리브)-Hoop 영역-에 와전류 손실을 발생시킨다. 이러한 회전자와 와전류 손실은 고속 운전시 매우 심각하며, 회전자의 열손실은 주로 복사에 의해서만 냉각되므로 이를 예측하고 최소화 하는 것은 매우 중요하다[3].

영구자석영역과 Hoop 영역에서의 손실은 각 영역의 총 면적에 대하여 체적 적분을 하여 식(24)에 의해 구할 수 있다.

$$P_i = \frac{1}{2\sigma} \sum_{\nu_1=0}^{\infty} \sum_{\nu_2=-\infty}^{\infty} |J_{i1}|^2 \quad (24)$$

식(24)를 이용하여 Hoop 영역 및 영구자석 영역에서의 와전류 손실은 식(25)와 식(26)으로 각각 표현된다.

$$P_h = 2p \int_0^L \int_0^{-b_1} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} P_{II} dx dy dz = \sum_{\nu_1=0}^{\infty} \sum_{\nu_2=-\infty}^{\infty} 2pL\tau\omega_0(\nu_1 - \nu_2)/\mu_h |C_1 A'_{II}|^2 \cdot \text{Im} \{ \alpha_h^* \cdot [(\cosh(\alpha_h \delta_2) + \eta \cdot (\sinh(\alpha_h \delta_2)))^* \times \sinh(\alpha_h \delta_2) + \eta \cosh(\alpha_h \delta_2) - \eta] \} \quad (25)$$

$$P_M = 2p \int_0^L \int_0^{h_M} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} P_{IV} dx dy dz = \sum_{\nu_1=0}^{\infty} \sum_{\nu_2=-\infty}^{\infty} 2pL\tau\omega_0(\nu_1 - \nu_2)/\mu_h \times g |C_1 \eta \tanh(\alpha_M h_M) \cdot A'_{II}|^2 \cdot \text{Im} \{ \alpha_M \coth(\alpha^* h_M) \} \quad (26)$$

### 3. 결 론

본 논문에서는 마이크로 가스터빈용으로 설계된 고속 전동/발전기의 손실해석을 위한 등가 해석 모델을 제시하였고, 영구자석 동기기에서 고정자의 슬롯 개방영역 때문에 발생하는 공극자속밀도의 리플 현상을 분석하여 슬롯팅 고조파 성분을 확인하였다. 또한, 각 영역에서의 자속 밀도 분포를 비교하였고, 와전류 밀도 특성과 와전류 손실 특성에 대한 결과를 해석적 방법 및 유한요소법에 의해 제시하였다.

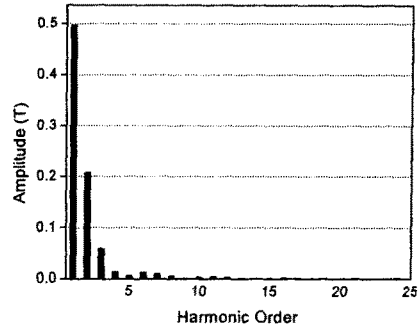


그림 3. 공극자속밀도의 슬롯 고조파 분석

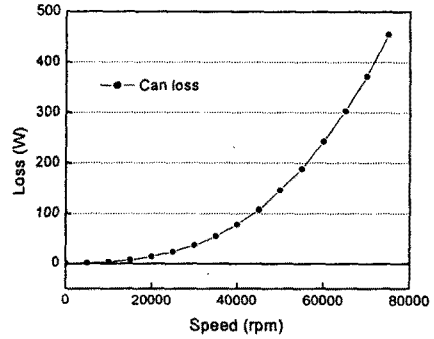


그림 4. 회전수에 따른 캔에서의 와전류 손실

#### [참 고 문 헌]

- [1] N. Boules, "Impact of slot harmonics on losses of high-speed permanent magnet machines with a magnet retaining ring", *Electric Machines and Electromechanics*, 6, 527-539, 1981
- [2] K.Ng, Z.Q.Zhu, D.Howe, "Open-Circuit Field Distribution in a Brushless Motor with Diametrically Magnetised PM Rotor, Accounting for Slotting and Eddy Current Effects", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.32, No.5, September 1996
- [3] 정연호, 강도현, 안중보, 장석명, "마이크로 가스터빈용 고속 전동/발전기 설계에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회, B권, 723-725, 2002
- [4] 장석명, 정상섭, 류동완, 최상규, "EMB용 전동발전기 선정을 위한 슬롯형과 슬롯리스 Ring-wound형 영구자석 브러시리스기기의 특성 비교", *Trans. KIEE*, Vol.50B, No3, Mar 2001
- [5] 양현섭, "초고속용 영구자석 동기모터의 특성해석", 석사학위논문, 충남대학교, 2000