

고속용 영구자석모터의 손실특성

장석명, 고종운\*, 윤인기, 이성호  
충남대학교

Rotor Loss in Permanent Magnet Brushless AC Machine

S.M.Jang, J.W.Go\*, I.K.Yoon, S.H.Lee  
Chung-Nam National Univ.

**Abstract** - Important category of brushless ac machine design is emerging in which the fundamental component of the stator MMF has fewer poles than the rotor, the torque being developed by a higher order MMF harmonic. The fundamental and lower order MMF harmonics can then give rise to significant rotor eddy currents. An analytical model is developed to predict rotor-induced eddy currents in such machines, and to quantify the effectiveness of circumferentially segmenting the permanent magnets in reducing the rotor loss.

1. 서 론

영구자석을 이용한 고속모터는 고효율, 고회력, 그리고 소형·경량이라는 장점을 갖고 있어 그 응용분야는 매우 넓다. 그러나 영구자석(NdFeB)은 온도에 매우 민감한 특성을 갖고 있어 모터의 설계시, 가장 중요한 것은 열발생의 최소화이다. 즉 온도상승의 원인인 철손, 동손, 그리고 기계손·고정자 기생손 등을 최소화해야 한다. BLDC 모터에서는 고정자 권선에 흐르는 전류가 연속적으로 정류됨에 따라 고정자 자체가 회전하게 된다. 특히 전인용 모터와 같은 고회력을 요하는 모터에서는 이로 인하여 코어와 영구자석에서 와전류가 발생하게 된다. 일반적으로 고정자의 극수와 회전자의 극수가 같은 영구자석형 모터의 경우, 고정자 슬롯에서 비롯되는 자속의 리플에 의해 영구자석에 와전류가 발생하여 손실이 야기된다. 영구자석에서의 손실을 줄이기 위해서는 공극을 크게 하고 슬롯 개구부를 줄여 손실을 작게 할 수 있으며, 또한 영구자석을 축방향 또는 반경방향으로 분할하여 손실을 줄일 수 있다[1]. 그러나 내고장성 brushless ac machine(이하: 내고장성 전동기)에 있어서는 회전자인 영구자석의 극수가 고정자의 극수 보다 많으며 고정자 권선 전류에 의한 기자력 중 고조파 기자력을 이용하여 토크를 발생시킨다. 내고장성 전동기는 각각의 차에 집중권으로 권선을 시행하기 때문에 end winding으로 인한 동의 사용을 줄일 수 있다는 장점과 더불어 각 상이 전기적, 자기적, 열적으로 insulation 되어있으며, 이로 인하여 각 상 상호간에 물리적, 자기적 간섭을 덜 받는다는 장점을 지닌다[2][3][4]. 내고장성 전동기의 경우 고정자 자계의 기본파 및 저차 고조파에 의하여 영구자석에서 와전류 손실이 야기된다. 이를 줄이기 위하여 영구자석을 반경방향으로 분할하여 구성할 수 있다.

본 논문에서는 고정자의 극수와 회전자의 극수가 다른 내고장성 전동기에서 임의의 회전자 극피치에 대하여 반경방향으로 영구자석을 분할 한 경우 영구자석에서 발생하는 와전류 손실에 미치는 영향에 대하여 고찰하고자 한다. 단, 고정자 슬롯에서 비롯되는 자속리플에 의한 영구자석에서의 손실은 고려하지 않는다.

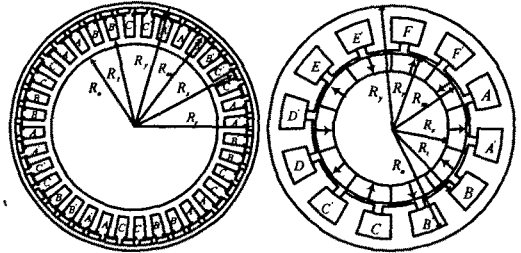


그림. 1 영구자석형 브러시리스 AC 전동기  
(a) 외전형 3상 전동기 (b) 내전형 6상 전동기

2. 해석 이론

2.1 해석 모델

그림. 1(a)(b)은 각각 3상 외전형 전동기로서 36슬롯을 갖는 6극 고정자 및 42극의 영구자석과 6상 내전형 12슬롯 2극 및 10극의 영구자석으로 구성되어 있다. 그림. 1(a)의 전동기는 전기자 전류에 의하여 발생하는 기자력 중 7차 고조파가 영구자석과 상호작용하여 토크를 발생시키며, 그림. 1(b)의 내전형 전동기는 고정자 기자력 중 5차 고조파에 의하여 토크를 발생시킨다. 이들 내고장성 전동기는 고정자 권선의 단절권에 의하여 토크를 발생시키는 고조파 기자력을 발생시킨다. 그러나 고정자에 의한 기자력 중에는 토크에 관여하지 못하는 기본파를 포함한 낮은 차수의 고조파 기자력이 존재하게 된다. 이러한 낮은 차수의 고조파에 의하여 회전자인 영구자석에 와전류를 발생시켜 이로 인하여 열이 발생하게 된다. 따라서 해석적인 방법을 통하여 영구자석에서 발생하는 와전류 손실을 예측하며, 또한 와전류 손실을 줄이기 위한 방법으로 극 당 영구자석을 여러 개의 분할된 자석으로 구성할 경우 회전자인 영구자석의 와전류 손실에 미치는 영향을 예측할 수 있다.

2.2 와전류 손실 해석

그림. 2는 내고장성 전동기의 해석모델을 나타내고 있다. 표 1은 해석 모델의 사상을 나타내고 있다. 회전자 코어와 고정자 요크는 무한대의 투자율을 갖으며, 회전자인 영구자석은 임의의 극호  $\alpha$ 를 갖는다고 가정한다. 1차속 전류  $J_s(\theta, t)$ 는 주기적으로 배치된 도체의 전류밀도로서 m-상일 경우 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_s(\theta, t) = \begin{cases} \frac{a}{2} \sum_n \cos(np, \theta - p, \omega, t), & \text{for } n = qk + m \\ -\frac{a}{2} \sum_n \cos(np, \theta + p, \omega, t), & \text{for } n = qk + m \\ 0, & \text{for } n \neq qk + m \end{cases} \quad (1)$$

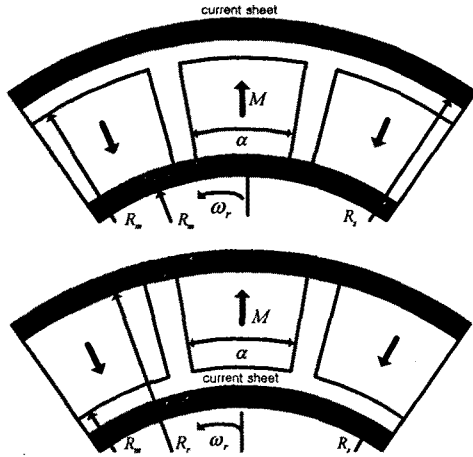


그림. 2 해석모델 (a) 내전형 전동기 (b) 외전형 전동기

표 1 해석모델 사양

파라미터	3-상 전동기	6-상 전동기
$R_r$	112.0 [mm]	28.43 [mm]
$R_s$	106.1 [mm]	39.0 [mm]
$R_m$	107.0 [mm]	37.5 [mm]
$R_i$	85.1 [mm]	43 [mm]
$R_v$	122 [mm]	61 [mm]
$R_o$	78.1 [mm]	55 [mm]

여기서  $m = \pm 1$ ,  $n$ 은 고조파 차수이며  $p_s$ 와  $p_r$ 은 각각 고정자 및 회전자 극쌍수,  $\omega_r$ 은 회전자 각속도이고,  $J_n = (2N_s I_m / \pi R_s) k_{un}$ 이다. 여기서  $N_s$ 와  $I_m$ 은 각각 상당 직렬 턴수 및 최대 상전류를  $k_{un}$ 은 권선계수를 나타낸다. 영구자석에 발생하는 와전류 밀도는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_m(r, \theta_r, t) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial A(r, \theta_r, t)}{\partial t} + C(t) \quad (2)$$

$$C(t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n(t)$$

여기서  $\rho$ 는 영구자석의 전기저항을 나타내며,  $A$ 는 자기벡터 포텐셜로서 식 (3)의 라플라스 방정식에 의하여 구할 수 있다.

$$\nabla^2 A = 0 \quad (3)$$

이때 경계조건은 식 (4)와 같다.

$$B_\theta |_{r=R_s} = 0 \quad H_\theta |_{R_i} - H_\theta |_{R_o} = J_s \quad (4)$$

식 (4)에서  $B_\theta$ 와  $H_\theta$ 는 각각 원주방향 자속밀도 성분과 자계강도를 나타내고 있다. 식 (1)에서 구한 영구자석에서 발생하는 와전류에 대한 해석치를 식 (5)에 대입하여 1개의 영구자석 편에서 발생하는 와전류 손실을 구할 수 있다.

$$P = \frac{Q}{2\pi} \int_0^{2\pi/\alpha} \int_{R_m}^{R_s} \int_{\alpha/2}^{3\alpha/2} \rho J_m^2 r dr d\theta dt \quad (W/m) \quad (5)$$

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} (P_{cn} + P_{an})$$

$P_{cn}$ 은 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{cn} = \frac{q^2 \mu_0^2 \alpha}{8\rho} \frac{J_n^2}{n^2 p_s^2} (np_s \mp p_r)^2 \omega^2 \times \left[ \left( \frac{R_s}{R_m} \right)^{2np_s} R_s^2 R_m^2 F_n + \left( \frac{R_s}{R_r} \right)^{2np_s} \frac{R_s^2 R_r^2}{(2np_s + 2)} \times \left( 1 - \left( \frac{R_m}{R_r} \right)^{2np_s + 2} \right) + \left( \frac{R_s}{R_r} \right)^{2np_s} R_s^2 (R_r^2 - R_m^2) \right] / \left[ 1 - \left( \frac{R_s}{R_r} \right)^{2np_s} \right]^2 \quad (6)$$

여기서  $F_n$ 은 식 (7)으로 나타낼 수 있다.

$$F_n = \begin{cases} \frac{\left[ \left( \frac{R_r}{R_m} \right)^{-2np_s + 2} - 1 \right]}{(-2np_s + 2)} & \text{for } np_s \neq 1 \\ \ln \left( \frac{R_r}{R_m} \right) & \text{for } np_s = 1 \end{cases} \quad (7)$$

$P_{an}$ 은 식 (8)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{an} = -\frac{q^2 \mu_0^2}{a\rho} \frac{J_n^2}{n^2 p_s^2} (np_s \mp p_r)^2 \Omega^2 \times \left[ \left( \frac{R_m}{R_s} \right)^{np_s} \frac{R_s R_m^2}{(np_s + 2)} \left( 1 - \left( \frac{R_r}{R_m} \right)^{np_s + 2} \right) + \left( \frac{R_r}{R_s} \right)^{np_s} R_s R_m^2 G_n \right] \times \frac{\sin^2 \left( np_s \frac{\alpha}{2} \right)}{(R_m^2 - R_r^2) \left[ 1 - \left( \frac{R_r}{R_s} \right)^{2np_s + 2} \right]} \quad (8)$$

$G_n$ 은 식 (9)으로 나타낼 수 있다.

$$G_n = \begin{cases} \frac{\left[ \left( \frac{R_m}{R_r} \right)^{-np_s + 2} - 1 \right]}{(-np_s + 2)} & \text{for } np_s \neq 2 \\ \ln \left( \frac{R_m}{R_r} \right) & \text{for } np_s = 2 \end{cases} \quad (9)$$

### 2.3 영구자석 분할에 따른 와전류 손실

그림. 3은 3상 내고장형 3상 전동기의 극당 영구자석 분할수에 따른 와전류 손실을 나타내고 있다. 그림. 3에서 알 수 있듯이 영구자석의 분할 수가 증가함에 따라 와전류 손실이 급격히 감소함을 알 수 있다.

그림. 4는 6상 전동기에서의 극당 영구자석 분할수에 따른 와전류 손실을 나타내고 있다. 3상 전동기와 마찬가지로 극당 영구자석 분할 수가 증가함에 따라 영구자석에서 발생하는 와전류 손실이 감소함을 알 수 있다.

그림. 5는 극당 영구자석 수를 1개로 놓았을 때 발생하는 와전류 손실을 기준으로 영구자석 분할수의 증가에 따른 와전류 손실 저감율을 나타내고 있다. 그림. 5에서 알 수 있듯이 3상 전동기에 있어서의 영구자석 분할에 따른 와전류 손실의 저감 효과가 6상 전동기보다 우수하다는 것을 알 수 있다. 또한 영구자석을 극당 2개에서 4개까지 분할하였을 때 와전류 손실의 저감 효과가 가장 크다는 것을 예측할 수 있다.

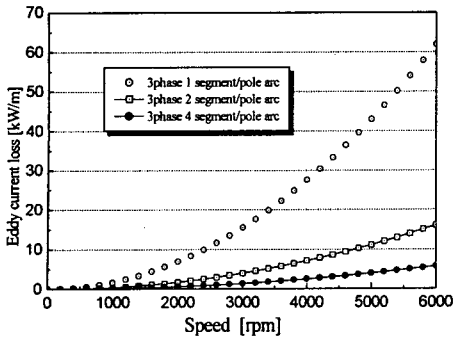


그림. 3 3상 전동기의 극당 영구자석 분할수에 따른 와전류 손실

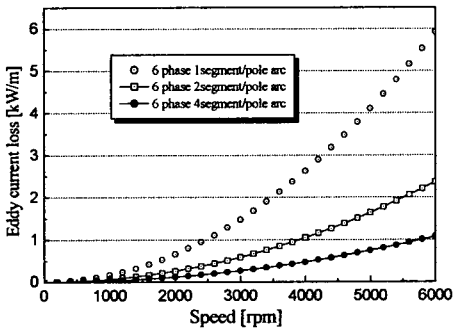


그림. 4 6상 전동기의 극당 영구자석 분할수에 따른 와전류 손실

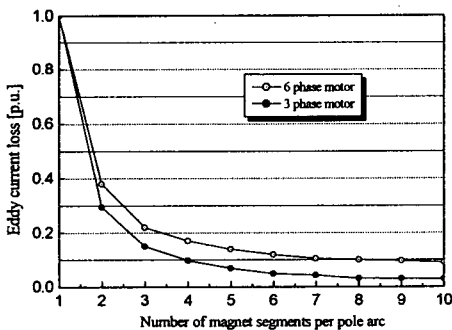


그림. 5 영구자석 분할수에 따른 와전류 손실의 영향

## 1. 결 론

영구자석형 내고장성 ac 전동기는 회전자의 극수가 전 기자의 극수 보다 많다. 토크는 고정자 권선에 의하여 발생하는 고조파 기자력과 영구자석의 상호작용에 의하여 발생한다. 본 논문에서는 해석적 방법을 통하여 내고 장성 영구자석형 ac 전동기에서 기본파를 포함한 저차 고조파에 의하여 영구자석에서 발생하는 와전류 손실을 예측하였다.

회전자인 영구자석의 극수가 고정자의 극수보다 많을 경우 회전자인 영구자석을 반경방향으로 분할하여 구성 할 경우 와전류에 의한 손실을 줄일 수 있다.

## (참 고 문 헌)

- [1] 장석명 외, "고속용 영구자석 모터의 손실 특성" 1999년도 대한 전기학회 정기총회 및 추계학술대회 논문집, pp64-66
- [2] K. Atallah, D. Howe, P.H. Melloor and D.A. Stone "Rotor Loss in Permanent Magnet Brushless AC Machines" IEEE trans. on industry application, vol.31, no.6, pp.60-62, 1999
- [3] K. Atallah, Zi Qiang Zhu, D. Howe, Terry S. Birch "Armature Reaction Field and Winding Inductances of Slotless Permanent-Magnet Brushless Machines" IEEE trans on magnetics, vol.34, no.5 pp3737-3744, 1998
- [4] B.C.Mecrow, A.G.Jack, J.A.Haylock, J.Coles "Fault-toler-ant" IEE Proc.-Electr. Pwer Appl, Vol. 143, No.6, November 1996