

영구자석 브러시리스 AC 모터의 와전류 손실 특성해석

장석명, 조한욱, 이성호, 정연호*
 충남대학교, 한국전기연구원*

Eddy Current Loss Analysis of the Permanent Magnet Brushless AC Motor

S.M. Jang, H.W. Cho, S.H. Lee, Y.H. Jeong*
 Chung-Nam National Univ., KRISS*

Abstract - High-speed brushless permanent magnet machines are good for compressor and aerospace applications, etc, since they are conductive to high efficiency, high power density, small size and low weight. This paper presents 3-phase permanent magnet brushless AC Motor designed for the high-speed drives. Especially, we predicted the inverter high frequency pulse width modulation(PWM) switching caused eddy current losses in a permanent magnet brushless dc motor.

1. 서 론

초고속용 브러시리스 영구자석 모터는 고효율, 고출력 밀도, 그리고 소형 경량성이기 때문에 항공기, 잠수함, 선박, 자동차, 인공위성과 같은 우주항공분야 등에 고속용 영구자석 모터의 응용이 적합하여 최근 국내외적으로 연구개발이 활발하다.

그런데 초고속 모터는 동급의 출력에 대하여 소형, 경량화가 가능하나 고에너지밀도 기기이므로 부피가 작아 모터 내부의 발생열을 최소화 해야한다. 또한 초고속 운전에 따른 강한 스트레스를 견디도록 기계적으로 강해 야 하기 때문에 회전자와 구조가 간단해야 하고, 고속 운전시의 진동을 고려하여 토크리플이 작게 하기 위해 공간 고조파를 최소화 하여야 한다.

초고속 구동용에 있어서 농형 유도전동기는 동손 및 철손 등으로 인해 회전자에 열이 많이 발생되어 낮은 효율을 갖게 되므로 적합하지 않다. 따라서 회전자의 구조로 볼 때 영구자석형 브러시리스 모터가 가장 적합하다고 할 수 있다.

또한 고속 영구자석형 브러시리스 모터는 고속회전에 의한 원심력이 매우 크기 때문에 회전자에 많은 스트레스가 가해져 표면에 부착되어있는 영구자석이 이탈할 가능성이 있다. 이를 방지하기 위해 비자성체의 금속 슬리브로 영구자석을 구속 하게 된다. 이때 고정자 슬로팅에 의한 공극 자속밀도의 고조파 성분에 의해 금속 슬리브에 와전류 손실이 발생하게 되며, 이는 영구자석의 감자특성을 현저히 저하시켜 모터의 성능을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 와전류 손실이나 스트레스를 줄일 수 있는 구조의 전동기를 연구해야 하며, 또한 영구자석에 의해 만들어지는 공극자속밀도의 고조파에 의한 손실에 발생하게 되므로, 이런 손실을 줄이기 위한 설계를 해야 만 한다.

본 논문에서는 내전형 브러시리스 모터의 고정자의 고주파수 기자력에 의하여 자속이 발생한 속에서 회전자에 놓여진 영구자석이 회전하므로 영구자석의 표면에 와전류가 유도된다. 이 와전류에 의하여 열이 발생하는 와전류 손실특성을 해석하였다. 이 와전류는 고주파수전원에 의하여 매우 크게 발생하므로 방열 및 냉각문제는 물론 효율화를 위해서는 반드시 정밀해석을 바탕으로 한 저감설계가 이루어져야 만 한다. 그래서 본 논문에서는 고정자 여자전류가 시간적으로 정현적인 경우와 PWM

인버터 구동시의 스위칭주파수에 따른 영향으로 발생하는 와전류 손실에 대하여 Deng과 Atallah의 이론을 바탕으로 하여 해석하였다.

2. 특성방정식 및 해석

2.1 해석 모델

그림 1(a)와 (b)는 영구자석형 브러시리스 모터의 내전형, 외전형이다. 즉 중심축에서 회전자반경 R_r , 영구자석까지의 거리 R_m , 고정자의 내측반경은 R_s 이며 영구자석 한 개의 각도는 α 이며, 고정자 표면에는 면전류밀도가 분포된 것으로 한다. 또 고정자 및 회전자 철심의 투자율은 무한히 큰 것으로 한다.

따라서 전자기현상을 적용한 해석적인 방법을 통하여 영구자석에서 발생하는 와전류 손실을 구한다.

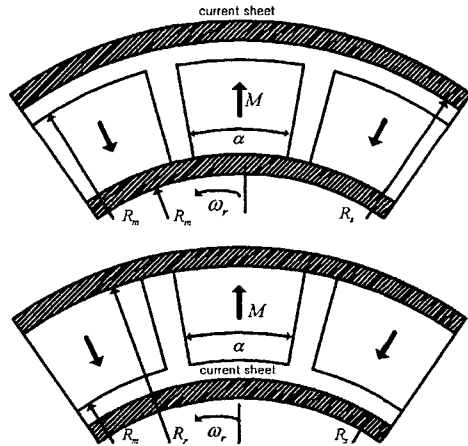


그림 1 해석모델 (a) 내전형 (b) 외전형

표 1은 해석모델의 사양이다.

표 1 해석모델 사양

파라미터	3-상 전동기	6-상 전동기
R_r 회전자 반경	112.0 [mm]	28.43 [mm]
R_s 고정자 반경	106.1 [mm]	39.0 [mm]
R_m 영구자석까지의 반경	107.0 [mm]	37.5 [mm]
R_i 고정자치까지의 반경	85.1 [mm]	43 [mm]
R_y	122 [mm]	61 [mm]
R_o	78.1 [mm]	55 [mm]

2.2 와전류 손실 해석

고정자의 고정자의 기자력에 의하여 발생한 자계속에서 도체인 회전자에 표면에 위치한 영구자석이 ω_r 의 속도로 회전하게 되면 회전하게 되면 영구자석에 와전류가 유기된다. 이 와전류가 회전자의 회전을 방해하는 Drag 력을 발생시키는 것은 물론 영구자석 내에 옴의 법칙에 의한 줄열을 발생시켜 회전자를 과열되게 한다. 따라서 회전자의 냉각을 위하여 방열 및 냉각장치를 별도로 설치해야 하는 등 여러 가지 어려운 문제를 야기시킨다. 더구나 고속기기는 체적이 동급의 일반 모터보다 체적이 매우 작으므로 더욱 심각하다.

2.2.1 시간적으로 정현적 여자인 경우의 와전류 모델

고정자의 표면에 1차축 전류 $J_s(\theta, t)$ 는 시간적으로 정현적이며 주기적으로 배치된 도체의 전류밀도로 가상하며 q상일 경우 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

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

여기서 ρ 는 영구자석의 전기저항을 나타내며, A 는 자기 벡터 포텐셜로서 식 (3)의 라플라스 방정식에 의하여 구할 수 있다.

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

이때 경계조건은 식 (4)와 같다.

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

식 (4)에서 B_θ 와 H_θ 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.

2.2.2 PWM 스위칭 전원의 와전류 모델

고정자의 합성기자력 공간고조파 진폭을 푸리에 급수로 표현을 한 식은 식(6)과 같다.

$$F_n(t) = \frac{4N_s}{p\pi} \Delta I \cos(2\pi f_{pwm} t) \sum_{j=1}^q \sin \frac{n\pi}{2} \cdot \frac{\sin \frac{n(q_p - 2j + 1)\pi}{2q_p}}{n} \quad (6)$$

$$= F_n \cos(2\pi f_{pwm} t)$$

식(7), 식(8)은 각각 고정자와 회전자 기준좌표계에서의 벡터포텐셜이다.

$$A_n = \frac{A_n}{\sqrt{2}} \cos(n \frac{p}{2} \beta) \quad (7)$$

$$A_n = \frac{A_n}{\sqrt{2}} \left[\cos(n \left(\frac{p}{2} \psi - \frac{2\pi}{3} \right)) \right] \quad (8)$$

여기서 $A_n = \frac{\pi}{2} F_n \frac{2}{\tau_{pn}}$, $\tau_{pn} = \frac{2\pi R_m}{pn}$

R_m 은 회전자 외경, $n=1, 2, 3, \dots, \infty$

식(9)는 PWM 스위칭에 의해 회전자의 영구자석에 유도되는 와전류의 지배방정식이다.

$$\frac{\partial^2 J_{zn}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial J_{zn}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 J_{zn}}{\partial \psi^2} = \tau^2 J_{zn} \quad (9)$$

여기서 $\tau^2 = j 2\pi f_{pwm} \mu \sigma$, f_{pwm} 은 스위칭 주파수 식(9)의 지배방정식에 의해 구한 회전자의 철심부분에 유도되는 와전류 특성식은 식(10)과 같다.

$$J_{s1} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sigma_1}{\sigma_2 \cdot C} \cdot \frac{A_n}{2\sqrt{2}} \cos \left[n \left(\frac{p}{2} \psi - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (10)$$

마찬가지로 회전자의 영구자석 부분에서의 와전류 특성식은

$$J_{s2} = \sum_{n=1}^{\infty} C_2 \cdot \frac{A_n}{2\sqrt{2}} \cos \left[n \left(\frac{p}{2} \psi - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (11)$$

여기서 C 와 C_2 는 각각 상수로 식 (11), 식(12)와 같다.

$$C = \left[\frac{1}{\tau_2} \{ I_{n(p/2)}(\tau_2 R_m) K'_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) - I_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) \cdot K'_{n(p/2)}(\tau_2 R_m) \} + \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \frac{C_1}{\tau_1} \{ -I_{n(p/2)}(\tau_2 R_m) \cdot K'_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) + I_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) \cdot K'_{n(p/2)}(\tau_2 R_m) \} \right] / [I_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) K'_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) - I_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) K_{n(p/2)}(\tau_2 R_r)] \quad (12)$$

여기서 $\tau_1 = (j 2\pi f_{pwm} \mu_1 \sigma_1)^{\frac{1}{2}}$, j 는 복소수

$I_{n(p/2)}$, $K_{n(p/2)}$ $n(p/2)$ 차 Bessel 제1종, 2종함수

$$C_2 = \left[\{ I_{n(p/2)}(\tau_2 R_m) K_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) - I_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) \cdot K'_{n(p/2)}(\tau_2 R_m) \} + \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \frac{C_1 \tau_2}{\tau_1} \{ -I_{n(p/2)}(\tau_2 R_m) \cdot K'_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) + I_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) \cdot K'_{n(p/2)}(\tau_2 R_m) \} \right] / \left[\frac{1}{\tau_2} \{ I_{n(p/2)}(\tau_2 R_m) K'_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) - I_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) K'_{n(p/2)}(\tau_2 R_m) \} - I_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) K_{n(p/2)}(\tau_2 R_m) \right] + \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \frac{C_1}{\tau_1} \{ -I_{n(p/2)}(\tau_2 R_m) K_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) + I_{n(p/2)}(\tau_2 R_r) K'_{n(p/2)}(\tau_2 R_m) \} \quad (13)$$

$$\text{단 } C_1' = I'_{K(p/2)}(\tau_1 R_r) / I_{K(p/2)}(\tau_1 R_r)$$

(참고 문헌)

2.3 와전류 손실특성식

외전형 브러시리스 모터의 회전자 영구자석 1개에서 발생하는 와전류 손실은 식(14)와 같다.

$$P = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \int_{R_m}^{R_r} \int_{\alpha/2}^{-\alpha/2} \rho J_m^2 r dr d\theta dt \quad (W/m)$$

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} (P_{cn} + P_{an}) \quad (14)$$

그런데 식(14)에서의 P_{cn} 는 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$P_{cn} = \frac{q^2 \mu_0^2 \alpha}{8\rho} \frac{J_n^2}{n^2 p_s^2} (np_s \mp p_r)^2 \omega^2 \times \left[\left(\frac{R_s}{R_m} \right)^{2np_s} R_s^2 R_m^2 F_n + \left(\frac{R_s}{R_r} \right)^{2np_s} \frac{R_s^2 R_r^2}{(2np_s + 2)} \times \left(1 - \left(\frac{R_m}{R_r} \right)^{2np_s + 2} \right) + \left(\frac{R_s}{R_r} \right)^{2np_s} R_s^2 (R_r^2 - R_m^2) \right] / \left[1 - \left(\frac{R_s}{R_r} \right)^{2np_s + 2} \right]^2 \quad (15)$$

여기서 F_n 은 식 (16)으로 나타낼 수 있다.

$$F_n = \frac{\left[\left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{-2np_s + 2} - 1 \right]}{(-2np_s + 2)} \quad \text{for } np_s \neq 1 \quad (16)$$

$$\ln \left(\frac{R_r}{R_m} \right) \quad \text{for } np_s = 1$$

또 식(14)에서의 P_{an} 는 식 (17)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{an} = -\frac{q^2 \mu_0^2}{\alpha \rho} \frac{J_n^2}{n^4 p_s^4} (np_s \mp p_r)^2 \Omega^2 \times \left[\left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{np_s} \frac{R_s R_m^2}{(np_s + 2)} \left(1 - \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{np_s + 2} \right) + \left(\frac{R_r}{R_s} \right)^{np_s} R_s R_m^2 G_n \right] \quad (17)$$

$$G_n = \begin{cases} \times \frac{\sin^2 \left(np_s \frac{\alpha}{2} \right)}{(R_m^2 - R_r^2) \left[1 - \left(\frac{R_r}{R_s} \right)^{2np_s + 2} \right]} \end{cases}$$

G_n 은 식 (18)로 나타낼 수 있다.

$$G_n = \begin{cases} \left[\frac{\left(\frac{R_m}{R_r} \right)^{-np_s + 2} - 1}{(-np_s + 2)} \right] & \text{for } np_s \neq 2 \\ \ln \left(\frac{R_m}{R_r} \right) & \text{for } np_s = 2 \end{cases} \quad (18)$$

3. 결 론

본 논문에서는 고주파수로 회전하는 고속 영구자석형 브러시리스 모터의 회전자에 놓여진 영구자석의 표면에 유기되는 와전류와 와전류 손실에 대한 특성을 전자기적인 특성방정식에 의하여 해석적으로 해석하고자 하였다. 고정자의 표면에 시간적으로 정현적인 기자력이 분포하는 경우와 PWM 인버터로 운전되는 경우의 스위칭 주파수를 고려한 특성을 각각 구분하여 특성식을 세우고 특성을 해석하여 결과를 도출하여 제시하고자 하였다.

- [1] 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
- [2] F. Deng, Thomas W. Nehl. "Analytical Modeling of Eddy-Current Losses Caused by Pulse - Width - Modulation Switching in Permanent-Magnet Brushless Direct-Current Motors", IEEE trans. on magnetics. vol.34, no5, september 1998
- [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