

직경방향 자화된 영구자석 회전자를 갖는 초고속 전동기의 고온 감자 특성 해석

장석명, 조한욱, 권정기, 박지훈, 이성호*
 충남대학교 전기공학과, LG D/A 연구소*

High Temperature Demagnetization Characteristic Analysis of High-Speed Machine with Diametrically Magnetized Permanent Magnet Rotor

Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Jung-Ki Kwon, Ji-Hoon Park, Sung-Ho Lee*
 Chungnam National University, LG D/A Research Lab.*

Abstract - This paper deals with the analytical method to calculate the high temperature demagnetization characteristics of a high-speed machine with diametrically magnetized permanent magnet rotor. The equivalent magnetic circuit model is used to analyze the magnet operating point on high temperature condition. Agreements have been obtained between the results of the analytical model and finite-element analysis on prototype high-speed motors.

1. 서 론

일반적으로 전기기기는 자로 내에 설치된 공극에 축적되는 자기 에너지를 매개로 해서 에너지 변환이 이루어지며, 영구자석 기기의 경우 자기 에너지의 공급원은 영구자석이다. 특히, 초고속 전동기는 고주파 운전에 따른 기계적 스트레스에 강인하도록 회전자의 자기회로가 간단하고, 기계적 구조와 베어링의 성능이 초고속에 적합하도록 설계되어야 한다. 또한, 초고속 전동기의 설계에 있어서 고려되어야 하는 중요한 요소중 하나는 초고속 운전에 따른 온도상승의 최소화이다. 온도상승은 일반적으로 철손, 동손을 비롯하여, 회전자 와전류손 및 기계손 등에 의해 존재하게 되며, 특히 회전자 와전류손에 의한 온도 상승은 영구자석의 고온 불가역 감자에 영향을 미치게 된다[1][2].

따라서, 본 논문에서는 기계적 스트레스에 강인한 구조로 설계된 직경방향 자화된 영구자석 회전자를 갖는 초고속 전동기에 대하여, 영구자석의 동작점(퍼미언스 계수)을 산정하기 위한 등가 자기회로를 제시하고, 불가역 감자의 영향을 받지 않는 최소의 영구자석 두께를 산정하기 위한 영구자석의 감자특성해석을 수행 하고자 한다.

2. 회로류계 영구자석의 고온 감자 특성

2.1 초고속 전동기의 회전자 형상

초고속 전동기에서 영구자석을 갖는 회전자는 고속 회전력에 따른 매우 큰 기계적 스트레스를 받는다. 따라서, 초고속 회전기의 설계에 있어 영구자석 회전자의 설계는 전자기적인 부분과 기계적인 부분을 동시에 만족하도록 신중하게 설계하여야 한다.

2극을 갖는 표면부착형 영구자석 회전자는 비돌극 특성을 갖고, d축 q축 인덕턴스가 같으므로, 비교적 제어가 간단한 장점을 갖는다. 또한, 구조가 간단하여 초고속 전동기 회전자 형상에 매우 적합한 구조라 할 수 있다. 그러나, 초고속 회전에 따른 영구자석의 비산이나 이탈의 방지를 위해 구조적으로 단단한 금속성 캔이나 화이버글라스 등의 비자성 슬리브로 자석 표면을 감싸줘야 하

는 단점을 갖는다[1].

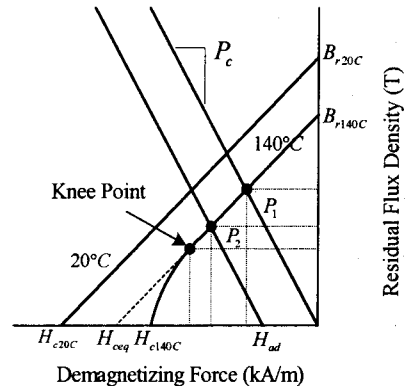


그림 1. 회로류계 영구자석의 고온감자 특성

2.2 회로류계 영구자석의 고온 감자 특성

영구자석 전동기의 고효율화와 소형·경량화 조건을 만족시키기 위해서는 에너지적이 높고 감자특성이 우수한 영구자석의 사용이 필수적이다. 그림 1은 기존의 페라이트계 영구자석에 비해 고에너지적 특성을 갖는 회로류계 영구자석의 고온 감자 특성곡선을 보여준다. 이러한 영구자석의 자기적 특성은 B-H 곡선의 2상한에서 표현되며, 이는 영구자석의 동작 특성 해석에 매우 중요한 의미를 갖는다. 그림 1에서 보여지는 바와같이 회로류계의 영구자석의 경우 온도가 높아지면 잔류자속밀도가 일정 비율로 감소하는 고온 감자 특성을 가지며 온도에 따른 잔류자속밀도의 감소율은 네오디움 계열의 자석에서 약 -0.1%/℃, 사마륨-코발트 계열의 자석에서 약 -0.035%/℃를 갖는다.

3. 직경방향 자화된 영구자석 전동기의 등가 자기회로 해석

3.1 직경 방향 자화된 영구자석의 특성

그림 2(a)는 직경방향 자화된 영구자석의 자화 분포를 나타낸다. 이를 이산화하여 그림 2(b)와 같다고 가정하면 직경방향 영구자석의 자화 분포는 미소 직사각형 영구자석의 조합으로 간이화 할 수 있다. 즉, 그림 3(a)에서 보여지는 반경방향 자화에서 영구자석의 표면을 수직으로 빠져나가는 성분은 유효자속이라 할때, 그림 3(b)에서 보여지는 직경방향 자화에서의 유효자속은 미소 길이로 표

현되는 $d\theta$ 를 통과하는 자속량의 적분과 같고 식(1),(2)처럼 표현된다[3].

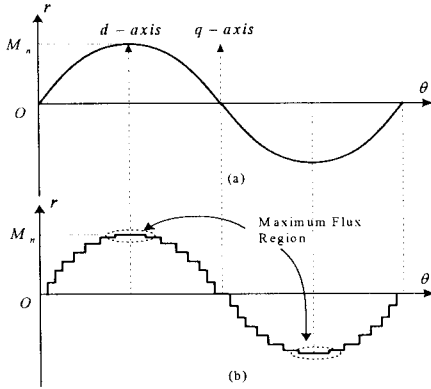


그림 2. 직경방향 자화된 영구자석의 자계 특성

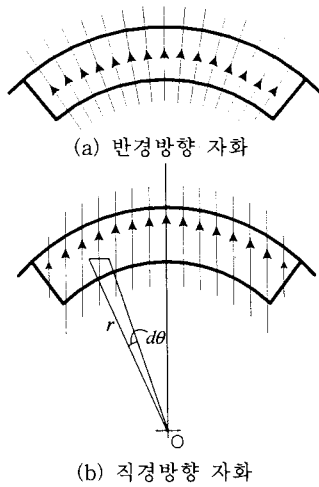


그림 3. 반경·직경 방향 자화의 자속 비교

$$\Phi_{radial} = B \int_{-\frac{\psi}{2}}^{\frac{\psi}{2}} L_m r d\theta \quad (1)$$

$$\Phi_{diametric} = B \int_{-\frac{\psi}{2}}^{\frac{\psi}{2}} L_m r \cos\theta d\theta \quad (2)$$

여기서, L_m 은 영구자석의 축방향길이 Φ_{radial} 과 $\Phi_{diametric}$ 은 각각 반경방향 및 직경방향 자화된 영구자석을 갖는 회전자에서 극당 유효자속을 나타낸다.

따라서, 두 자화 방법에 대한 유효자속의 비는 식(3)과 같다.

$$\frac{\Phi_{diametric}}{\Phi_{radial}} = \frac{\sin(\Psi/2)}{\Psi/2} \quad (3)$$

3.2 등가 자기회로 해석

그림 4는 직경 방향 자화된 영구자석 회전자의 등가(자기회로)모델이다. 자속의 발생이 최대 자속 영역(d-축)에서는 자속밀도의 수직성분이 반경방향 자화된 영구자석의 특성과 동일하므로, 동일 자계를 2개를 모델링하여 자기회로를 구성하였다. 그림 5(a)는 해석 모델에 대한 등가 자기회로이고, 노튼 등가 회로를 적용하면 그림 5(b)와 같이 간이화하여 표현할 수 있다[2].

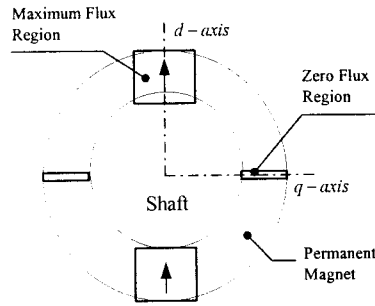


그림 4. 직경방향 영구자석 회전자의 등가 모델

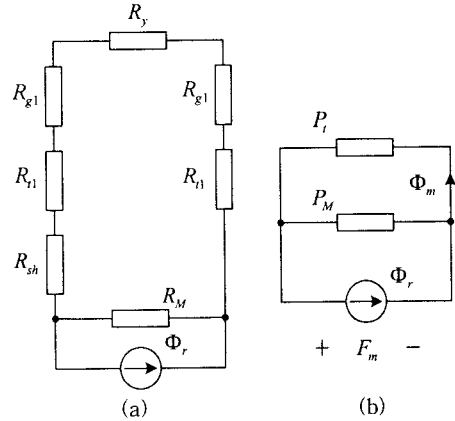


그림 5. 등가 자기 회로

여기서, $R_M, R_{sh}, R_{r1}, R_{g1}, R_y$ 는 각각 영구자석 내부, 축, 치, 공극, 고정자 요크에서의 자기저항을 나타낸다. 특히, 원주면의 공극을 갖는 회전형 전기기기에서 공극 자기 저항 R_{g1} 은 식(4)로 계산할 수 있다.

$$R_{g1} = \frac{\ln(1+k_c \frac{r}{r_p})}{\mu_r \mu_0 L \theta_p} \quad (4)$$

여기서, L 은 적층길이, r 은 영구자석 외반경, 그리고, k_c 는 카타계수로써 식(5)로 정의된다.

$$k_c = \frac{t}{t - \gamma_1 g} \quad (5)$$

$$\gamma_1 = \frac{4}{\pi} \left[\frac{b_0}{2g} \tan^{-1} \left(\frac{b_0}{2g} \right) - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_0}{2g} \right)^2} \right]$$

여기서, t 는 영구자석의 두께, b_0 는 슬롯 개방 영역이고 g 는 자기적 공극의 길이이다.

따라서, 영구자석 내부의 퍼미언스 P_M 을 제외한 자기회로 전체 퍼미언스 P_t 는 식(6)과 같다.

$$P_t = \frac{1}{2R_{r1} + 2R_{g1} + R_y + R_{sh}} \quad (6)$$

그림 5의 자기회로에서 영구자석의 동작점 자속 및 기자력은 식(7)과 식(8)로 계산할 수 있다.

$$\Phi_m = \Phi_r \frac{P_t}{P_M + P_t} \quad (7)$$

$$F_m = -\frac{\Phi_m}{P_t} \quad (8)$$

따라서, 영구자석의 동작점을 나타내는 퍼미언스 계수 P_c 는 식(9)와 같다.

$$P_c = \frac{B_m}{H_m} \quad (9)$$

여기서, B_m 과 H_m 은 영구자석의 동작점 자속밀도와 동작점 감자계의 세기이다.

영구자석의 동작점 자속밀도는 누설 계수 σ 를 고려하여 식(10)과 같이 계산 할 수 있다.

$$B_m = \frac{\sigma P_c B_r}{\mu_r + \sigma P_c} \quad (10)$$

여기서, μ_r 은 영구자석의 리코일 투자율, B_r 은 영구자석을 포함하는 시스템의 동작 온도가 고려된 잔류자속 밀도이며, 식(11)과 같다.

$$B_r(T) = B_r(T_s) \left[1 + \frac{(T - T_s)}{100} a_{B_r} \right] \quad (11)$$

여기서, T_s 는 상온(20℃), a_{B_r} 은 영구자석의 온도 감소 계수이다.

4. 특성 해석 결과 및 검토

표 1은 해석모델에 대한 제원을 나타낸다. 해석대상인 초고속 전동기는 정격 출력 5kW, 정격 속도 40000 rpm을 가지며, 정격 운전시 영구자석 회전자에서 발생하는 최고 온도는 냉각을 고려하여 약 140 ℃이다. 사용된 영구자석은 상온에서 잔류자속 밀도 1.23 T, 온도 감소 계수 -0.1%/℃를 갖는 Sintered NdFeB 계열의 N35H를 사용하였다.

그림 6은 유한요소 해석에 의한 내부 감자계 해석 결과이고, 그림 7은 제시된 등가 자기회로 법과 유한요소 해석에 의해 계산되어진 영구자석의 동작점을 N35H의 감자곡선 상에 작도하여 비교한 것이다. 표 2에 나타내어진 바와 같이 제시된 해석 방법은 유한요소 해석에 대하여 약 12 % 정도의 오차를 갖는다.

표 1. 해석모델의 제원

항 목	사 양
고정자 내반경 (R_s)	17 (mm)
고정자 외반경 (R_{so})	44 (mm)
고정자 슬롯수 (N_s)	18 개
슬롯 개방 영역 (b_0)	1.2 (mm)
영구자석 두께 (l_m)	4.5 (mm)
자기적 공극 길이 (g)	2 (mm)
고정자 적층 길이 (L)	55 (mm)
영구자석 종류	N35H
잔류자속밀도(B_r) : 140 ℃	1.03 T

5. 결 론

본 논문에서는 직경방향 화환 영구자석 회전자를 갖는 초고속 전동기에서, 영구자석의 고온 감자특성을 해석하였다. 등가자기회로법을 이용하여 운전온도에서 영구자석의 동작 자속밀도 및 감자계, 동작점(퍼미언스계수)을 계산하였으며, 해석 결과는 유한요소해석에 의한 결과와 비교적 잘 부합하므로, 초고속 전동기의 초기설계 프로그램 개발에 적용하고자 한다.

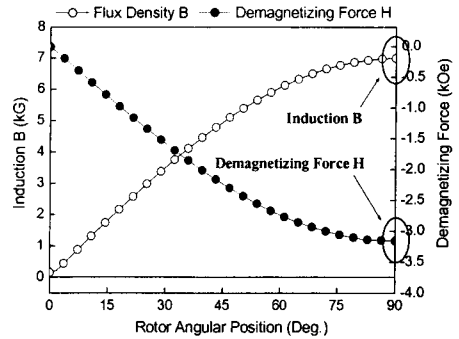


그림 6. 유한요소법에 의한 감자계 해석

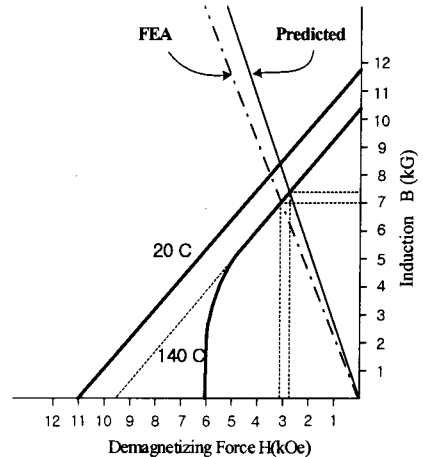


그림 7. N35H 영구자석의 감자곡선과 동작특성

표 2. 해석 결과

항 목	Predicted	FEA	Error(%)
동작점 자속밀도(kG)	0.73	0.69	5.79
동작점 감자계 (kOe)	2.91	3.15	7.61
퍼미언스 계수 (P_c)	2.21	2.51	11.95

[참 고 문 헌]

- [1] W.Fengxiang, Z.Wenpeng, Z.Ming, W.Baoguo, "Design consideration of high-speed PMgenerator for micro turbines," PowerCon 2002. International Conference on , vol.1, pp.158-162, Oct. 2002
- [2] C.Mi, M.Filippa, W.Liu, R.Ma, "Analytical method for predicting the air-gap flux of interiou-type permanent magnet machines," *IEEE Trans. Magn.* vol.40, pp.50-57 Jan. 2004.
- [3] 大川光吉, 페라이트 磁石回轉機의 設計, 동일출판사
- [4] 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 Magn.*, vol.32, Sept. 1996.
- [5] J.F.Gieras and M.Wing, Permanent Magnet Motor Technology:Design and Applications, 2nd ed. New York:Marcel Dekker, 2002.
- [6] G.H.Kang, J.Hur, H.Nam, J.P.Hong, G.T.Kim, "Analysis of irreversible magnet demagnetization in line-start motors based on the finite-element method," *IEEE Trans. Magn.* vol.39, pp.1488-1491, May. 2003.