

초고속 전동발전기의 치/슬롯에 의한 자속밀도 및 코깅토크 해석

장석명, 조한욱, 이성호, 류동완, 양현섭*, 정연호**
충남대학교, (주)효성*, (주)삼성테크원**, 한국전기연구원***

Analysis of Flux Density and Cogging Torque according to Teeth/slot for High Speed Motor/Generator

S. M. Jang, H. W. Cho, S. H. Lee, D. W. Ryu, H. S. Yang*, Y. H. Jeong**
Chungnam Nat'l Univ., Hyosung Co., Samsung Techwin**, KERI***

Abstract - This paper deals with the magnetic field analysis and computation of cogging torque using an analytical method in high speed brushless motor/generator. The magnetic field is analyzed by solving space harmonics field analysis due to magnetizing distribution and the cogging torque is analyzed by combining field analysis with relative permeance.

1. 서 론

고속용 브러시리스 영구자석 모터는 고효율, 고출력 밀도, 그리고 소형·경량성 때문에 많은 응용범위에 이용되고 있다. 즉, 항공기, 잠수함, 선박, 자동차, 우주분야(인공위성)등에 고속용 영구자석 모터를 이용하고 있다. 이러한 고속용 브러시리스 영구자석 모터중 슬롯형 영구자석 브러시리스 기기에서는 초고속 운전시 슬롯 리플에 의해 영구자석과 도전성 슬리브에서의 와전류 손실, 코킹 토크가 발생하여 기기의 성능저하의 주요소가 된다. 즉, 온도상승의 원인이 되는 손실과 진동 및 소음의 원인이 되는 코킹토크의 최소화가 필요하다[1][2].

본 논문에서는 40,000 rpm, 5kW급 고속용 전동/발전기를 설계하여 치/슬롯 형상을 고려한 영구자석에 의한 자계특성을 해석하고, 비퍼미언스를 이용한 코킹토크를 해석법과 유한요소 해석에 의해 비교 검토하였다.

2. 치/슬롯에 의한 자계특성 및 코킹토크

2.1 해석모델

해석모델은 초고속 전동/발전기용으로 초기 설계된 4극 24슬롯의 기기이며 영구자석은 $NdFeB$, 고정자와 회전자축의 재질은 고주파수에서 작은 비철손을 갖는 ARNON5를 사용하였다. 표 1은 특성해석 과정에 사용된 해석모델의 사양이다.

표 1 해석모델의 사양

| 항 목 | 사 양 |
|----------|-----------|
| 고정자 외반경 | 60 (mm) |
| 고정자 내반경 | 37.5 (mm) |
| 회전자축 외반경 | 36.5 (mm) |
| 축 반경 | 33 (mm) |
| 공극의 길이 | 1 (mm) |
| 영구자석의 높이 | 3.5 (mm) |
| 슬롯 수 | 24 (개) |
| 스택길이 | 65 (mm) |
| 슬롯오프닝 | 2.5 (mm) |

2.2 비퍼미언스의 적용

해석법에 의한 공극자속밀도와 코킹토크의 계산을 위해 다음과 같은 가정을 한다[3].

- i) 치/슬롯의 형상은 직각사각형의 모양을 갖는다.
- ii) 자속밀도의 분포는 영구자석이 만들어내는 자속과 비퍼미언스에 의해 결정된다.
- iii) 치와 슬롯을 갖는 고정자 모델에서 영구자석과 치가 만나는 영역에서는 자속 경로는 직선으로 공극을 쇄교한다. 그러나, 영구자석과 슬롯이 만나는 영역에서는 치의 길이까지는 직선으로 쇄교하되 슬롯영역에서는 원을 그리며 가까운 쪽 치의 옆면으로 자속이 쇄교한다.

그림 1은 공극에서의 비퍼미언스를 계산하기 위한 영구자석을 포함한 회전자와 치/슬롯 형상을 갖는 고정자의 개념적 모델이다.

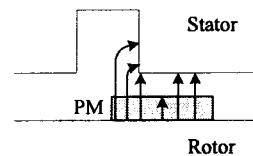


그림 1. 공극 퍼미언스의 계산을 위한 개념도

공극의 퍼미언스 전동/발전기의 자기회로에서 영구자석, 공극, 슬롯영역으로 구성된 퍼미언스 P 에 의해 비퍼미언스 \hat{P} 가 식(1),(2)에 의하여 계산되어진다.

$$P = \frac{\mu_0}{g + \frac{h_m}{\mu_r} + \frac{2\pi r_s}{4}} \quad (1)$$

$$\hat{P} = \frac{\lambda}{g + h_m/\mu_r} \quad (2)$$

여기서, x 의 범위는 식(3)과 같다.

$$(k-1)\tau_i - b_0/2 \leq x \leq (k-1)\tau_i + b_0/2 \quad (3)$$

여기서, $k=1, 2, \dots, Q_s$, $(\pi/\tau_p)x = p\theta$, τ_p 는 pole pitch, τ_i 는 slot pitch, g 공극의 길이, h_m 영구자석 높이, Q_s 는 슬롯수이다.

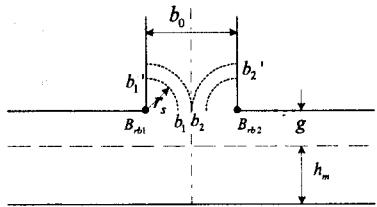


그림 2. 비페미언스 계산을 위한 공극의 표현

그림 2는 2.2절에서 제시된 가정과 그림 1에 의해 비페미언스를 계산하기 위한 영구자석, 공극, 그리고 슬롯 영역에서의 자속경로를 나타내는 그림이다.

여기서, b_0 은 슬롯 개방영역의 폭, B_{rb1} , B_{rb2} 는 각각 치의 왼쪽과 오른쪽 모서리 부분에서의 자속밀도를 나타낸다. 그리고, r_s 는 점선으로 표시된 슬롯 영역에서 원을 그리며 쇄교하는 영구자석에 의한 이상적 자속경로의 반지름이다.

따라서, 치/슬롯 형상을 고려한 영구자석에 의한 공극 자속밀도의 계산은 식(4)에 의해 수행된다.

$$\hat{B} = \hat{P} \cdot B_{magnet} \quad (4)$$

여기서, B_{magnet} 는 슬롯의 영향을 무시했을 때의 자속밀도이다.

2.3 슬롯팅에 의한 자계의 계산

반경방향 칵자형 영구자석 회전자 모델의 경우, 고정자 내측 표면에서의 자속밀도는 $np=1$ 인 경우 식(5)과 같이 주어지며 $np=1$ 인 경우 식(6)으로 주어진다.

$$B_{magnet} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} 4 \frac{M_n}{\mu_r} \frac{np}{(np)^2 - 1} \left(\frac{R_i}{R_o} \right)^{np-1} \cos np\theta \quad (5)$$

$$\cdot \left[\frac{(np-1)R_o^{2np} + 2R_m^{np+1}R_o^{np-1} - (np+1)R_m^{2np}}{\mu_r + 1} \left\{ R_i^{2np} - R_m^{2np} \right\} - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \left\{ R_o^{2np} - R_i^{2np} (R_m/R_o)^{2np} \right\} \right]$$

$$B_{magnet} = 2M_1 \cos np\theta \quad (6)$$

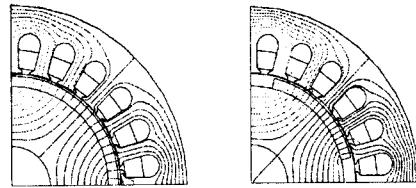
$$\cdot \left[\frac{R_o^2 - R_m^2 + R_m^2 \ln(R_o/R_m)^2}{\mu_r + 1} \left\{ R_i^2 - R_m^2 \right\} - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \left\{ R_o^2 - R_i^2 (R_m/R_o)^2 \right\} \right]$$

여기서, n 은 공간고조파 차수, p 는 극쌍수, μ_r 은 영구자석의 리코일 투자율이며 M 은 식(7)로 정의되며, R_o , R_i , R_m 은 각각 회전자 외반경, 고정자 내반경, 영구자석 내반경을 나타낸다.

$$M = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} 2M_n \cos np\theta \quad (7)$$

식(7)에서 M_n 은 식(8)과 같이 주어진다.

$$M_n = B_{r,a} \frac{\sin \frac{n\alpha_p \pi}{2}}{\frac{n\alpha_p \pi}{2}} \quad (8)$$



(a) Full pole arc (b) 0.7 pole arc
그림 3. 회전자 폴 아크에 따른 자속 분포

그림 3은 회전자 영구자석에 의한 등자속선 분포를 나타낸다. (a)와 (b)는 각각 Full pole arc, 0.7 pole arc에 따른 자속분포를 나타낸다.

그림 4와 5는 Full pole arc 모델과 0.7 pole arc 모델의 치/슬롯 형상을 고려한 자속밀도 분포곡선을 해석법과 유한요소법에 의해 비교한 것이다.

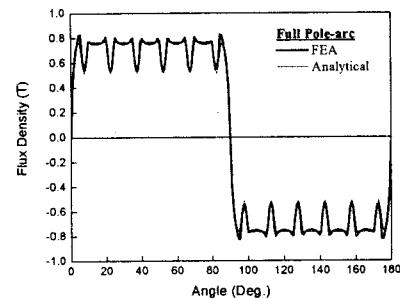


그림 4. Full pole-arc 모델의 자속 밀도 분포

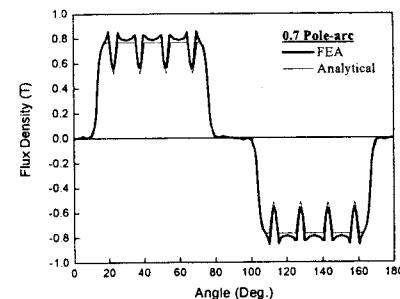


그림 5. 0.7 Pole-arc 모델의 자속 밀도 분포

2.4 영구자석의 이동

그림 6은 치/슬롯 형상을 고려한 영구자석에 의한 자속밀도를 계산한 후 영구자석을 이동시켜 자속밀도를 재계산하기 위한 개념도이며 (a)는 고정자 치/슬롯을 형상화 한 부분이고, (b)와 (c)는 영구자석의 초기위치와 마지막 위치를 각각 나타낸다. 그리고, (b)와 (c)사이에는 수십 또는 수백개의 작은 이동 변위를 두어 보다 정확한 힘의 계산이 가능하도록 하였다. 그림 6과 같은 영구자석의 이동은 식(9)로 표현할 수 있다.

$$M = \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} M_n \left\{ \cos n \frac{\pi}{\tau_p} x \right. \\ \left. + (-1)^{n+1} \cos n \frac{\pi}{\tau_p} (x - dx_m) \right\} \quad (9)$$

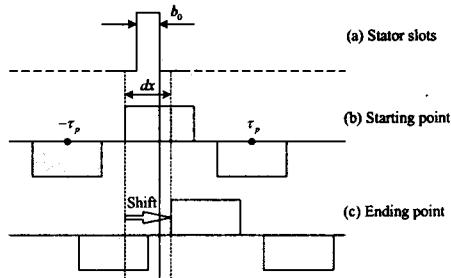


그림 6. 코깅토크 계산을 위한 영구자석의 이동

그리고, 영구자석이 이동하여 재계산 되는 공극자속밀도는 식(5)과 식(6)에서 $2M_n \cos np\theta$ 가 식(10)으로 치환되어 구해질 수 있다.

$$M_n \left\{ \cos n \frac{\pi}{r_p} x + (-1)^{n+1} \cos n \frac{\pi}{r_p} (x - dx_m) \right\} \quad (10)$$

여기서, dx_m 은 영구자석의 변위이다.

2.5 코깅토크의 계산

그림 6에서 코깅토크는 치-슬롯 모서리 부분에서의 자속밀도 B_{rb1} , B_{rb2} 의 크기 차에 의해 구해지며, 식(11)로 표현된다.

$$T_c = \sum_{k=0}^Q I_a \int_0^{b_0/2} \left(\frac{B_{rb1}^2 - B_{rb2}^2}{2\mu_0} \right) r_s dr_s \quad (11)$$

여기서, b_0 는 슬롯 개방영역의 폭, I_a 는 기기의 유효스택길이, Q_s 는 슬롯 수, $r_t = R_s + r_s$ 이며 이는 내전형 기기의 경우에 해당한다. 그러므로, 해석모델에 대한 코깅토크 결과식은 식(12)와 같다.

$$T_c = \frac{b_0}{8} (4R_s + b_0) I_a \left(\frac{B_{rb1}^2 - B_{rb2}^2}{2\mu_0} \right) \quad (12)$$

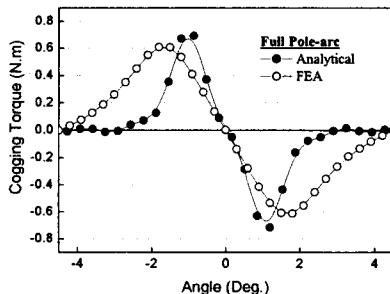


그림 7. Surfaced mounted pole-arc $\alpha_p = 1$ (Analytical)

그림 7은 Full pole arc ($\alpha_p = 1$)인 경우의 해석법과 유한요소해석에 의한 코깅토크를 도시한 그래프이며, 그림 8은 Pole arc의 변화에 따른 코깅토크의 변화추이를 해석법에 의해 나타낸 결과이다.

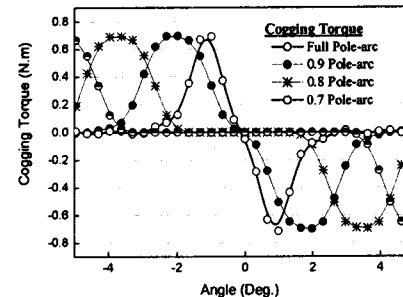


그림 8. Pole-arc 변화에 따른 코깅토크

3. 결 론

본 논문에서는 고속용 영구자석 전동/발전기를 설계하여, 치/슬롯 형상이 갖는 슬롯팅 현상을 고려한 영구자석에 의한 공극 자계를 해석하였고, 그에 따른 코깅토크를 해석법과 유한요소법에 의해 계산하여 비교하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 장석명, 양현섭, 정상섭, 류동완, 최상규, 임기순, “초고속 용영구자석형 브러시리스 AC 모터의 자계 및 유기전압 특성”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp40-41, 1999
- [2] 장석명, 정상섭, 류동완, 차상도, 최상규, “회전자의 영구자석 배열에 따른 초고속 슬롯리스 브러시리스 기기의 특성비교”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp650-652, 2000
- [3] Z.Q.Zhu, D.Howe, "Analytical prediction of the cogging torque in radial-field", IEEE Trans. Magn., vol.28, no.2, pp.1371-1374, March 1992
- [4] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, "Analysis of cogging torque in interior permanent magnet motor by analytical method", Journal of KIEE., 11B, 1-8 (2001), pp.1-8
- [5] Z.Q.Zhu, D.Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machine", IEEE Trans. Energy Conv., vol.15, no.4, pp.407-412, December 2000