

공간고조파 해석을 이용한 brushless 전동기의 공극자속 분포 산정

권 순 오, Fang Liang, Sun Tao, 강 규 홍, 홍 정 표
창원대학교

Estimation of the flux distribution
in the brushless motors using space harmonic analysis

Soon-O Kwon, Fang Liang, Sun Tao, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong
Changwon National University.

Abstract - The space harmonic analysis, as an analytical method, is used to estimate the flux distribution in the air gap of the brushless motors in this paper. With the flux distribution, back-emf and torque characteristics can be estimated.[1-7] Therefore, the air gap flux distribution of surface type permanent magnet motor according to the motor specifications are studied to estimate the torque characteristics in this paper. To validate the analysis result of this method, 2-dimensional finite element analysis is performed and the air gap flux density is compared to that from space harmonic analysis.

1. 서 론

영구 자석형 기기에서 발생하는 전자기력은 공극의 자속 밀도 파형과 밀접한 관계를 갖는다. 구동 방식, 공극의 길이, 영구자석의 형상, 극수, 영구자석의 자화 방향 등은 이러한 자속의 파형에 영향을 주고 결과적으로 출력 토크에 영향을 준다. 따라서 본 논문에서는 이러한 인자들에 의한 공극 자속 밀도를 공간 고조파법을 이용하여 산정하였다. 공극 자속 밀도를 이용하여 Brushless 전동기의 토크, 역기전력의 개략적인 예측이 가능하다. 일반적으로 유한요소 해석이 전기기기의 특성해석에 많이 사용되지만, 전처리, 해석, 후처리 과정등에 많은 시간과 노력이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 해석적인 방법을 통하여 신속하고 정확한 Brushless 전동기의 특성을 산정하여, Brushless 전동기의 설계에 적용하고자 한다. 해석의 타당성 검토를 위하여 2차원 유한요소 해석 또한 수행 되고 공극 자속 밀도가 비교 되었다.

2. 본 론

2.1 해석대상과 가정

본 논문에서 다루어지는 전동기는 일반적인 형상의 표면부착형 영구자석 형 전동기로서 그림 1에 나타 내었다.

그림 1에서 해석 모델의 변수화, 즉 다양한 형상 치수에 대한 해석을 위해서 로터의 외반경과 스테이터의 내측 반경을 각각 b, a로, 영구자석의 반경을 각각 c1과 c2로 나타내었다. 문제의 크기를 줄이고 해석을 가능하게 하기 위해 다음과 같은 가정을 둔다.[1-3]

- 1) 단부효과는 무시한다.
- 2) 로터와 스테이터의 철심의 투자율은 무한하다.
- 3) 슬롯에 의한 영향은 카터 계수로 보정한다.
- 4) 스테이터 전류는 current sheet 형태로 공극의 표면에 분포한다.

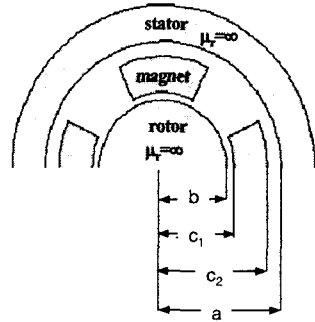


그림 1 해석 모델의 구조

2.2 영구자석의 모델링

영구자석에 의한 자계를 표현하기 위해서 식 (1)과 같이 등가 자화 전류(K_m)를 영구자석의 표면을 따라 분포 시킨다.

$$K_m = M \times n \tag{1}$$

여기서, n 은 영구자석의 표면에 수직한 단위 벡터, M 은 자화 벡터이며 본 논문에서는 $M = M_0$ 로 가정한다. 그림 2에 반경방향으로 자화된 영구자석의 등가 자화 전류 모델을 나타내었다. 그림 2에서 자화 벡터 M 의 방향은 영구자석의 arc 표면에서 항상 수직이므로 등가 자화 전류는 0이 되고 영구자석의 양쪽 edge 부분의 등가 자화 전류의 크기는 식 (2)과 같다. parallel 방향 영구자석의 등가 자화 전류도 식(1)을 사용하여 산정한다. 그러나 parallel magnetized 영구자석의 경우 영구자석의 모든 표면에 등가 자화 전류가 분포한다.

$$di = K_{ml} \cdot dr = \frac{B_r}{\mu_0} dr \tag{2}$$

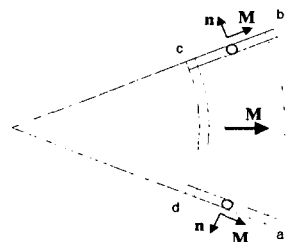


그림 2 radial magnetization

가. 자속 밀도 산정

자기 스칼라 포텐셜을 이용한 지배 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \theta^2} = 0 \quad (3)$$

해석영역은, 영구자석영역과 공극으로 나누어지며, 경계조건을 적용하여 일반해의 미지수를 구한다. 식 (2)를 이용하여 산정된 등가 자화 전류 i 를 고려하여, radial방향으로 자화된 영구자석과 parallel 방향으로 자화된 영구자석의 자속 밀도를 각각 구할 수 있다.

a. radial magnetization

그림 1의 공극영역에서, 반경이 각각 a 와 b 인 위치에서의 반경방향 자속 밀도 성분은 각각 식(4), (5)으로 계산된다.

$$[B_a]_R = \int_{c_1}^{c_2} B_{ra}' dr = \sum_{m=0}^{\infty} F_{anR} \cos(n\theta) \quad (4)$$

$$[B_b]_R = \int_{c_1}^{c_2} B_{rb}' dr = \sum_{m=0}^{\infty} F_{bnR} \cos(n\theta) \quad (5)$$

$$F_{anR} = F_{3n} \sin\left(\frac{n\alpha}{2}\right) a^{(n-1)} (F_{4n} + b^{2n} F_{5n})$$

$$F_{bnR} = F_{3n} \sin\left(\frac{n\alpha}{2}\right) b^{(n-1)} (F_{4n} + a^{2n} F_{5n})$$

$$F_{3n} = \frac{4pk_m B_r}{\pi(a^{2n} - b^{2n})},$$

$$F_{4n} = \frac{c_2^{(n+1)} - c_1^{(1+n)}}{(1+n)}$$

$$F_{5n} = \ln(c_2 - c_1), \quad \text{for } n=1$$

$$F_{5n} = \frac{c_2^{(1-n)} - c_1^{(1-n)}}{(1-n)}, \quad n \neq 1$$

$$n = (2m + 1)p$$

b. parallel magnetization

영구자석이 parallel로 자화된 경우 등가 자화 전류는 영구자석의 모든 표면(외부 arc, 내부 arc, 두개의 edge 부분)에 분포 하고, 각 등가 자화 전류에 의한 자계를 구한 후 선형적으로 중첩함으로써 식 (11), (12)와 같이 합성 자계를 구할 수 있다. [1],[2]

$$[B_a]_P = [B_a]_L + [B_a]_{c1} + [B_a]_{c2} \quad (6)$$

$$[B_b]_P = [B_b]_L + [B_b]_{c1} + [B_b]_{c2} \quad (7)$$

1) edge 부분

$$[B_b]_L = \sum_{m=0}^{\infty} F_{bnL} \cos(n\theta) \quad (8)$$

$$[B_a]_L = \sum_{m=0}^{\infty} F_{anL} \cos(n\theta)$$

(9)

여기서,

$$F_{anL} = F_{anR} \cos\left(\frac{a}{2}\right), \quad F_{bnL} = F_{bnR} \cos\left(\frac{a}{2}\right)$$

2) $r=c_1$ 인 arc 부분

$$[B_a]_L = \int_0^{\pi/2} \sum_{m=0}^{\infty} F_{6n} \cos(n\theta) \sin(n\eta) \sin \eta d\eta \quad (10)$$

$$= \sum_{m=0}^{\infty} F_{an,c1} \cos(n\theta)$$

$$[B_a]_L = \int_0^{\pi/2} \sum_{m=0}^{\infty} F_{7n} \cos(n\theta) \sin(n\eta) \sin \eta d\eta \quad (11)$$

$$= \sum_{m=0}^{\infty} F_{bn,c1} \cos(n\theta)$$

여기서,

$$F_{6n} = -F_{3n} a^{n-1} \frac{c_1^{2n} + b^{2n}}{c_1^{n-1}},$$

$$F_{7n} = -F_{3n} b^{n-1} \frac{c_1^{2n} + a^{2n}}{c_1^{n-1}}$$

$$F_{an,c1} = \frac{1}{2} F_{6n} F_{8n}, \quad F_{bn,c1} = \frac{1}{2} F_{7n} F_{8n}$$

$$F_{8n} = \frac{a \sin a}{2} \frac{a}{2}, \quad \text{for } n=1$$

$$= \frac{\sin[(n-1)a/2]}{(n-1)} - \frac{\sin[(n+1)a/2]}{(n+1)}, \quad n \neq 1$$

c. $r=c_2$ 인 arc 부분

$$[B_a]_{c2} = \sum_{m=0}^{\infty} F_{an,c2} \cos(n\theta) \quad (12)$$

$$[B_b]_{c2} = \sum_{m=0}^{\infty} F_{bn,c2} \cos(n\theta) \quad (13)$$

여기서,

$$F_{an,c2} = F_{9n} \mathcal{G} F_{8n}, \quad F_{bn,c2} = F_{10n} \mathcal{G} F_{8n}$$

$$F_{9n} = F_{3n} a^{n-1} (c_2^{2n} + b^{2n}) / c_2^{n-1}$$

$$F_{10n} = F_{3n} b^{n-1} (c_2^{2n} + a^{2n}) / c_2^{n-1}$$

나. 해석 결과 비교

해석 방법의 타당성 검증을 위해 2차원 유한요소 해석이 수행되었다. 그림 3-6까지 영구자석의 자화 방향 자극 폭 등에 따른 공극 자속 밀도를 비교 하였다. 각 그래프에서, SHA는 공간고조파 해석을 나타낸다. 그림3에서, radial 방향 영구자석의 pole arc 길이에 따른 공극 자속 밀도 분포를 나타내었다. 그림 4에서는 parallel magnetized 영구자석의 공극 자속 분포를 나타냈다. 그림 5에서는 외전형 타입의 radial 방향영구자석에 의한 공극 자속 밀도를 하였다. 그림 6에서는 외전형의 parallel 방향영구자석의 공극 자속 분포를 나타내었다. 따라서 유한요소해석에 의한 결과 비교로부터 공간고조파 해석을 통한 결과는 신뢰성을 확보하였다.

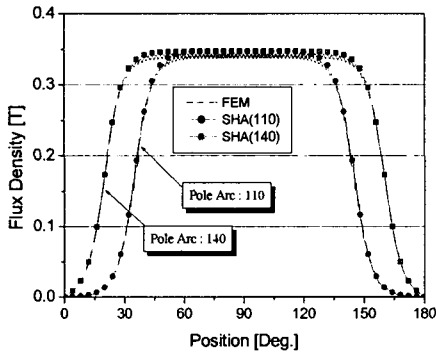


그림 3 pole arc에 따른 공극 자속 밀도 (radial magnetization)

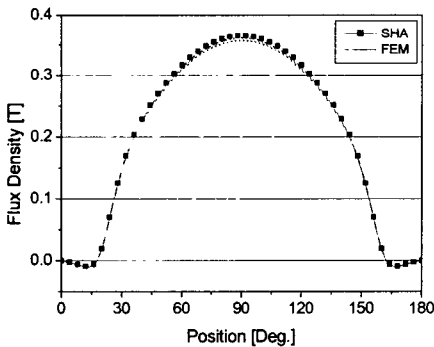


그림 4 parallel magnetization의 공극자속 밀도

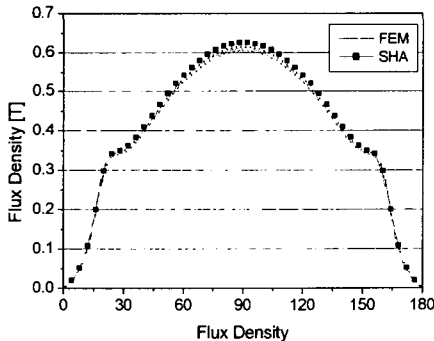


그림 5 외전형 전동기의 공극자속 밀도 (radial magnetization)

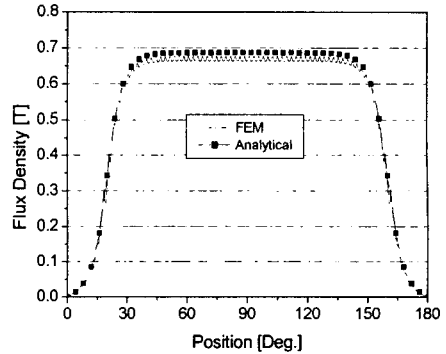


그림 6 외전형의 공극 자속 밀도

3. 결론

본 논문에서는 공간 고조파법을 이용하여 표면 부착형 brushless 전동기에서, 전동기의 형태, 영구자석의 자화 방향과 pole arc의 형상에 따른 공극의 자계 분포를 산정 하였다. 2차원 유한요소 해석 결과와의 비교에서 알 수 있듯이, 공간고조파해석법을 이용한 유한요소 해석에 근접하는 결과를 얻었다. 산정된 공극 자속 밀도를 바탕으로 향후 brushless 전동기의 토크 특성과 역기전력특성 계산을 연구할 계획이다. 따라서, 토크와 역기전력 특성 까지 고려가 된다면, brushless 전동기의 초기 설계에 유용할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1]Vineeta Gangla, Jaime De La Ree, " ELECTROMECHANICAL FORCES AND TORQUE IN BRUSHLESS PERMANENT MAGNET MACHINES", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, No. 3, Sep. 1991
- [2]NACY BOULES, "Prediction of NO-Load Flux Density Distribution in Permanent Magnet Machines", IEEE Trans. on Industry applications, Vol. IA-21, NO. 4, May/JUNE 1985
- [3] Hague , "The Principles of Electromagnetism", 1995
- [4]G.Hemmeberger.Ph, K.Satter.D.Shen, "Nature of the equivalent magnetizing current for the force calculation", IEEE Trans. on MAG.,Vol. 28, No.2, pp.106 8-1072, 1992
- [5]S. J. Salon, Finite element analysis of electrical machines, Kluwer academic, London,UK,1995,
- [6]T.Kabashima et al."Force calculation using magnetizing current", IEEE Trans. MAG-24, No.1, pp.451-454, Jan.1988
- [7]Singiresu S.Rao, Mechanical vibrations, Addison-Wesley, New York, USA, Chap 8, pp.523-528