

영구자석의 자화분포 불균일이 BLDC 전동기의 특성에 미치는 영향

박승찬^a, 윤태호^b, 권병일^b, 윤희수^c, 원성홍^c
^a한양대 공학기술연구소, ^b한양대 전기공학과, ^c삼성전기(주) 종합연구소

The Effect of Nonuniform Magnetization in Permanent Magnet BLDC Motor

S.C.Park^a, T.H.Yoon^b, B.I.Kwon^b, H.S.Yoon^c, S.H.Won^c
^aRIET, ^bDept. of Elec. Engr., Hanyang University, ^cSamsung Electro-mechanics

Abstract - Magnetization distribution in the ring magnet for BLDC motor is generally nonuniform because the structure of multipole magnetizer is not symmetry and the air gap is not uniform. In this paper, the effect of the nonuniform magnetization on characteristics of the motor such as torque ripple, unbalanced force and current is examined. Time stepped finite element method is used for electromagnetic field analysis.

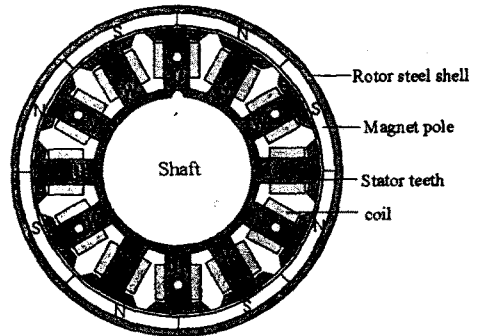


그림 1. 해석 모델

1. 서 론

하드디스크 구동용 BLDC 전동기에 사용되는 링형태의 영구자석을 다극착자하는 경우, 착자요오크와 마그네트 표면사이의 공극 불균형이나, 요오크 및 권선의 비대칭성등의 원인으로 인하여, 착자후 각극에서의 자화의 분포가 균일하게 되지 않는 문제점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 이와 같이 착자후 매극마다 불균일하게 분포하는 자화의 세기를 고려하여 BLDC 전동기의 제반 특성을 해석한다. 특성 해석 방법은 전압원의 시간차분 유한요소해석을 이용하며 [1][2], 불균일 자화분포를 고려하기 위하여 전동기의 해석 영역 전체를 이산화한다.

해석 결과로서는 각상의 권선전류, 토크 리플, 진동에 영향을 미치는 회전자에 작용하는 불평형력(unbalanced magnetic force)을 제시하고, 균일한 자화의 분포의 경우 대한 특성 해석 결과와 비교하므로써, 불균일한 자화의 분포가 전동기의 특성에 미치는 영향을 고찰한다.

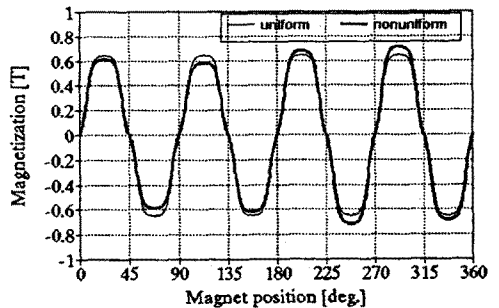


그림 2. 자화의 분포

2. 영구자석 자화의 세기 분포

그림 1은 본 논문에서 해석하고자 하는 모델로서, 8극 12슬롯을 가진 하드디스크 구동용 BLDC 전동기이다. 이 모델의 영구자석 표면에서의 자속밀도 분포를 가우스미터를 이용하여 측정한 결과, 각극마다 최대 10% 정도의 편차가 발생함을 알 수 있었다. 이러한 현상이 발생하는 원인은 착자 요오크의 비대칭 또는 착자시 공극의 불균일등이 있다. 따라서, 착자후 영구자석의 자화분포를 얻기 위해서는 이러한 착자기의 조건들을 고려하여야 착자 과정 해석을 하여야 하지만, 일반적으로 구조적인 대칭을 가정하여 1극 모델을 해석하고있다 [3],[4]. 본 논문에서는 정확한 착자과정 해석을 하기 어려워, 시행착오법에 의한 역문제 해석을 통하여 구한 균일한 자화의 분포와 자속밀도 분포 실측치를 근거로하여 매극마다 비대칭이 되는 불균일한 자화의 분포를 가정하였다. 그림 2는 본 논문에서 사용한 균일한 자화의 분포와 불균일한 자화의 분포를 보여준다. 불균일한 자화의 분포는 실제 모델의 정확한 자화의 분포는 아니지만, 불균일의 정도는 유사하다고 판단된다.

3. 유한 요소법에 의한 특성 해석

3.1 유한요소 정식화

자기 벡터 포텐셜을 계변수로 하여 해석모델의 지배방정식을 표현하면, 식 (1) 과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\frac{N}{S} I_u - \frac{N}{S} I_v - \frac{N}{S} I_w - \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (1)$$

여기서, A 는 자기벡터 포텐셜의 Z축방향 성분값이다. 또한, I_u, I_v, I_w 는 각 상권선의 전류, M_x, M_y 는 각각 x, y 축 방향으로의 자화의 세기를 나타내며, σ'는 회전자 철심의 등가도전율이다.

Galerkin 법을 이용하여 식 (1)을 유한요소 정식화 하고, 전압방정식과 결합하면 식(2)와 같이 해석영역내의 각 절점 포텐셜, 각 상권선의 전류, 회전자 철심에서의 $\nabla\phi$ 를 미지값으로 하는 시스템 행렬 방정식을 얻게 된다.

$$\begin{bmatrix} K+C/\Delta t & M & G \\ Q/\Delta t & Z & 0 \\ S/\Delta t & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \\ \nabla\phi \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} C/\Delta t & 0 & 0 \\ Q/\Delta t & L/\Delta t & 0 \\ S/\Delta t & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \\ \nabla\phi \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} P \\ V \\ 0 \end{bmatrix}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

3.2 회전자 표면에 작용하는 전자력 계산

그림 3에서 면적 A 의 평면을 통과하는 자속밀도 B 의 법선성분과 접선성분을 각각 B_n 및 B_s 라 할 때, 이 평면에 작용하는 응력의 법선성분 t_n 과 접선성분 t_s 는 각각 식 (3)과 식 (4)로 표현된다[5].

$$t_n = \frac{1}{2\mu}(B_n^2 - B_s^2) \quad [N/m^2] \quad (3)$$

$$t_s = \frac{B_n B_s}{\mu} \quad [N/m^2] \quad (4)$$

따라서, 회전자 표면에 작용하는 불평형력(축에 수직으로 작용하는 힘)은 영구자석의 표면에 작용하는 전자력을 합하면 되므로, 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$f_b = \sum_{i=1}^n t_n^{(i)}(l_i D) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\mu} [(\overline{B_n^{(i)}})^2 - (\overline{B_s^{(i)}})^2](l_i D) \quad [N] \quad (5)$$

여기서, u : 영구자석 표면의 적분 경로수,
 l : 적분 경로의 길이,
 D : 고정자 철심의 적층 폭,
 $\overline{B_n}$: 적분경로상의 자속밀도 평균값의 수직성분
 $\overline{B_s}$: 적분경로상의 자속밀도 평균값의 접선성분

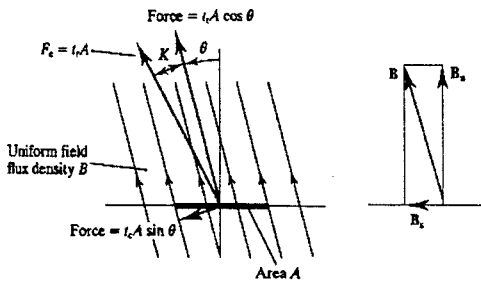
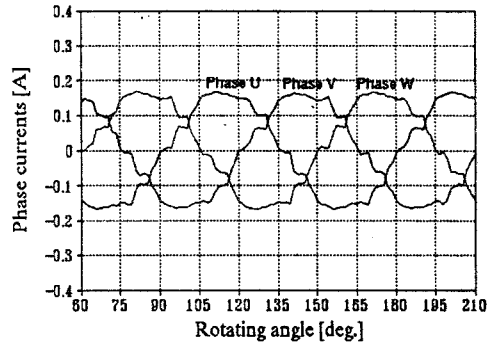


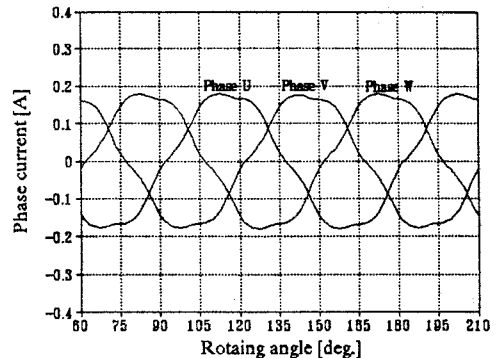
그림 3. 균일 자계내의 평면에 작용하는 힘

4. 해석 결과

그림 2에서와 같이 영구자석의 자화의 분포가 균일할 때와 불균일할때의 전동기 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다.그림 4는 각상의 권선에 흐르는 전류의 특성으로서, 자화의 분포가 불균일 할때에는 전류 파형의 왜곡이 부분적으로 나타남을 알 수 있다. 그림 5는 토오크 리플 특성으로서, 불균일 자화의 분포가 토오크 리플에는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그림 6은 회전자의 영구자석 표면에서의 수직력 분포로서, 불균일 자화의 분포에 의하여 분포가 대칭이 되지 않음을 알 수 있다. 이것은 결국 회전자에 작용하는 불평형력의 원인이 되며, 그림 7에서와 같이 균일한 자화의 분포의 경우보다 약 38배 가량의 불평형력이 발생하여, 회전자의 진동을 유발한다. 또한, 그림 8에서 불평형력 벡터의 각도를 서로 비교하면, 균일한 자화 분포의 경우는 불평형력의 속도가 회전자의 속도보다 약 24배 정도 빨리 회전하고, 본 논문에서 가정한 불균일 자화 분포의 경우에는 불평형력의 속도가 회전자의 속도와 거의 일치함을 알 수 있다.



(a) 불균일한 자화 분포일 경우



(b) 균일한 자화분포의 경우

그림 4. 전류 특성(5400 rpm)

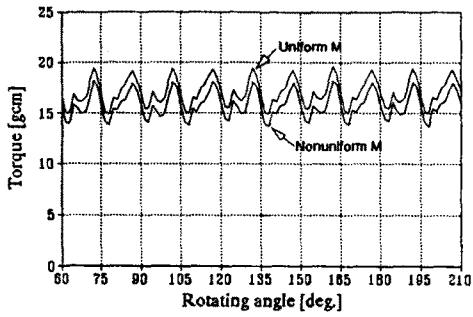


그림 5. 토크 리플 특성 (5400 rpm)

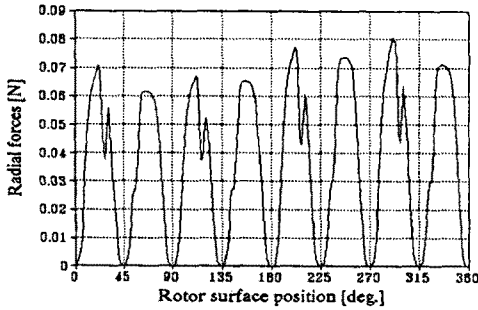
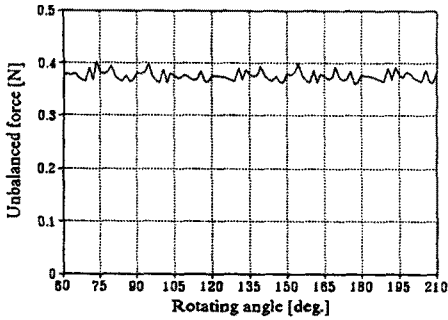
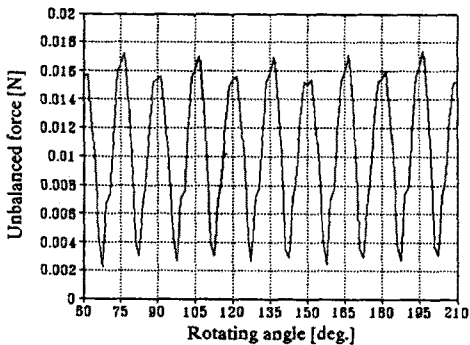


그림 6. 회전자 표면에 작용하는 수직력의 분포

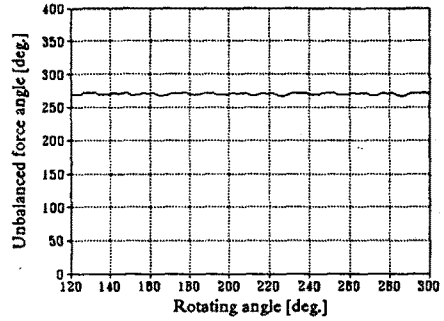


(a) 불균일한 자화 분포의 경우

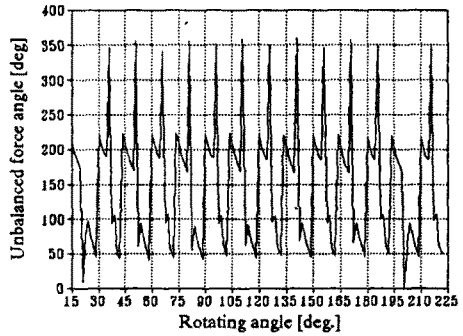


(b) 균일한 자화 분포의 경우

그림 7. 회전자에 작용하는 불평형력 특성



(a) 불균일한 자화 분포의 경우



(b) 균일한 자화 분포의 경우

그림 8. 불평형력의 각도

5. 결 론

링 마그네트의 다극 착자시에는 착자 요오크의 실제 조건에 따라서, 영구자석의 자화 분포가 불균일하게 되므로, 본 논문에서는 이러한 불균일 자화의 분포를 가정하여, BLDC 전동기의 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 특히, 회전자에 작용하는 불평형력은, 불균일한 자화의 분포를 갖는 경우가 균일한 자화 분포의 경우보다 약 38배 증가하여 회전자 진동 발생의 원인이 됨을 알 수 있었다.

[참고문헌]

- (1) 박승찬, 윤태호, 권병일, 윤희수, 원성홍, "BLDC 전동기의 회전자 철심의 와전류를 고려한 유한요소해석", '98년도 대한전기학회 전기기기연구회 추계학술대회 논문집, pp.74-78., 1998.
- (2) 박승찬, 윤태호, 권병일, 윤희수, 원성홍, "하드디스크 구동용 BLDC 전동기의 전자력 해석에 관한 연구", '98년도 대한전기학회 전기기기연구회 추계학술대회 논문집, 1998.10.
- (3) T. Nakata, N. Takahashi, "Numerical analysis of transient magnetic field in a capacitor-discharge impulse magnetizer", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.22, No.5, pp.526-528, 1986.
- (4) 고창섭, 윤희수, 한송영, "프라이자호 모델을 이용한 커패시터 방전 펄스 착자기의 특성해석", 대한전기학회 논문지, 제47권, 10호, pp.1627-1634, 1998.
- (5) Denis O'Kelly, Performance and control of electrical Machines, McGraw-Hill, 1992.