

슬롯리스형 BLDC 전동기의 자화패턴에 따른 특성 해석

장석명, 박지훈, 최장영, 류동완*
 충남대학교 전기공학과, (주)효성*

Analysis on Slotless BLDC Motors according to Magnetization pattern

Seok-Myeong Jang, Ji-hoon Park, Jang-Young Choi, Dong-Wan Ryu*
 Dept. of Electrical Engineering Chungnam National Univ., Hyosung co.*

Abstract - In this paper, the characteristic of slotless permanent magnet brushless motors analyze and compare parallel with radial array. This paper derive magnetic field solutions due to the PM. Torque, flux linkage and back emf are then derived. The results are shown in good conformity with those obtained from the commonly used finite element analysis.

1. 서 론

슬롯리스 영구자석 브러시리스 전동기(BLDC)는 구조적인 특징에 의하여 공극자속밀도의 리플이 작으므로 코깅 토크에 의한 진동 및 회전자의 도전성 슬리브나 영구자석에서의 와전류 손실이 매우 작은 장점을 갖는다. 또한 철심 슬롯의 제거로 인한 공극 자기 저항이 균일하게 되므로 기계적으로 부드러운 회전이 가능할 뿐만 아니라 등속성도 향상된다.[1]

슬롯리스 영구자석 브러시리스 전동기에서는 슬롯이 없는 고정자 성층 철심의 안쪽에 권선을 직접 부착하거나 환상형으로 시행하기 때문에 고정자 제작 및 권선 작업이 비교적 쉽고 경제적인 면에서도 큰 이점을 갖는다. 또한 슬롯리스 형태의 권선 구조는 효과적인 방열 구조가 될 뿐만 아니라 출력밀도의 향상을 가져오며, 고정자 치가 없으므로 전기적인 시정수의 직접적인 영향을 미치는 인덕턴스가 작아져서 시스템의 응답속도가 빨라지는 장점을 갖는다. 그러나 고정자 성층 철심의 안쪽에 직접 권선을 시행하기 때문에 자기적 공극이 증가하여 일반 슬롯형 기기에 비해 공극자속밀도가 감소하는 단점이 있다.[2]

본 논문에서는 4 극의 슬롯리스 전기자를 갖는 브러시리스 전동기에 대하여 반경방향 및 평행방향 자화 형태를 갖는 해석모델과 각 해석모델에 대한 자체특성으로부터 제시한 자체 특성식을 이용하여 회전자의 자화패턴에 따른 쇠교자속 그리고 역기전력 특성식을 유도하고, 해석결과를 도출하였다. 그리고 토크특성을 해석하여 자화패턴에 따른 해석모델에 대하여 비교하였다. 제시된 해석결과는 유한요소해석과 비교하여 타당성을 입증하였다.

2. 해석 모델의 특성식

2.1 해석 모델

그림 1은 본 논문에서 해석하고자 하는 평행방향 자화와 반경방향 자화를 갖는 영구자석 회전자, 3상 4극의 코일을 갖는 고정자로 구성된 구조를 보여준다. 그림 2는 그림 1에서 제시된 슬롯리스형 BLDC 전동기의 자화를 고려한 해석 모델을 보여주고 있으며, 해석의 단순화를 위해 다음과 같은 가정을 적용한다.

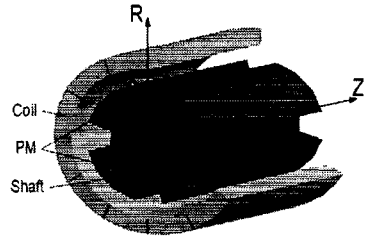


그림 1 슬롯리스 BLDC 전동기의 구조

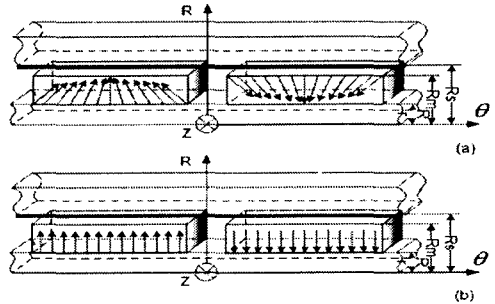


그림 2 회전자의 자화가 (a) 평행방향과 (b) 반경방향인 해석모델

- 1) 회전자는 θ 방향으로 회전 운동한다.
- 2) 영구자석은 r 방향과 θ 방향 성분만을 갖는다.
- 3) 자기 벡터 퍼텐셜은 z 방향 성분만을 갖는다.
- 4) θ 방향 길이는 연속이다.

2.2 영구자석에 의한 자속밀도

본 논문의 해석모델인 평행방향 자화와 반경방향 자화를 갖는 영구자석 회전자는 식(1)의 형태로 주어진다.[3]

$$M_n = M_r e^{-j\alpha\theta} i_r + M_\theta e^{-j\alpha\theta} i_\theta \tag{1}$$

식(1)에서 반경방향 자화에 대하여 M_r 과 M_θ 는 식(2)로 주어진다.

$$M_r = \frac{B_r}{\mu_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \frac{\sin(n\alpha_m \pi/2)}{n\alpha_m \pi/2} e^{j\alpha\theta} \tag{2.a}$$

$$M_\theta = 0 \tag{2.b}$$

또한, 평행방향 자화에 대한 M_r 과 M_θ 는 식(3)으로 주어진다. 여기서, α_m 은 영구자석 피치, $q = n \cdot p$ 이고, n 은 고조파 차수, p 는 극 쌍수이며, M_p 는 식(4)로 나타낸다.

$$M_p = \frac{2p}{\pi[1 - (n \cdot p)^2]} \quad (4)$$

식(2), (3)의 푸리에 급수와 맥스웰 방정식을 이용하여 식(5)의 지배방정식이 유도된다.

$$\nabla^2 A_{zn} = -\mu_0(\nabla \times M_n) \quad (5)$$

식(5)의 지배방정식과 $\text{curl } A = B$ 를 이용하여 식(6)의 자속밀도 특성식이 유도된다.

$$B_{rn} = -\frac{jq}{r} A_{zn} e^{jq\theta} i_r \quad (6.a)$$

$$B_{\theta n} = -\frac{\partial}{\partial r} A_{zn} e^{-jq\theta} i_\theta \quad (6.b)$$

자속밀도를 구하기 위한 평행방향과 반경방향 자화를 갖는 해석모델의 경계조건은 주어져 있다.[4]

2.3 토크 및 역기전력 특성식

슬롯리스형 BLDC 전동기의 토크는 식(7)로 부터 얻을 수 있다.[5]

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} k_w B_p R_s^2 l_s Q \quad (7)$$

여기서, B_p 는 공극 자속 밀도의 최대값이고, 식(6)으로부터 구할 수 있다. l_s 는 전동기의 축 방향 유효 스택길이, Q 는 전기 장하, $k_w = k_d \cdot k_p$ 는 권선 계수이고, 식(8)로 표현된다.[3]

$$k_d = \frac{\sin(N_{spp} \theta_{se}/2)}{N_{spp} \sin(\theta_{se}/2)} \quad (8.a)$$

$$k_p = \sin(\theta_{se}/2) \quad (8.b)$$

여기서, N_{spp} 는 상당 극당 슬롯수이고, θ_{se} 는 슬롯 피치이다. 한편, 영구자석이 θ 방향으로 회전함에 따라 코일을 쇠교하는 쇠교자속은 식(9)로 주어진다.

$$\lambda_f = N_c \Phi = N_c B S \quad (9)$$

$$V_{emf} = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \frac{d\lambda}{d\theta} = \omega \frac{d\lambda}{d\theta} \quad (10)$$

식(9)의 쇠교자속을 미분하여, ω 와 곱한 값이 식(10)의 역기전력이 된다. 여기서 ω 는 회전자 각속도이고, S 는 단면적, B 는 자속밀도이다.

3. 특성 해석 결과

그림 3과 그림 4는 평행방향과 반경방향 자화 모델의 토크 특성 곡선 그래프이며, 표 1에 제시된 설계 사양의 코일 단에 전류를 인가하였을 때의 해석 결과와 유한요소해석을 비교한 것이고, 부하각 90° 일 때 가장 큰 토크가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 평행방향과 반경방향의 자속밀도 특성으로부터 알 수 있듯이 토크특성도 평행방향 자화가 우수함을 알 수 있다.[4]

표 1 해석 모델의 사양

사 양	치 수
고정자 내반경 R_s (mm)	24.5
권선 두께 $R_s - R_c$ (mm)	4.5
권선 반경 R_c (mm)	20.0
영구자석 외반경 R_m (mm)	16.0
자기적 공극 $R_s - R_m$ (mm)	8.5
회전자 축 반경 R_r (mm)	10.0
유효 스택 길이 l_s (mm)	40.0
상 수 N_{ph}	3
극 수 p	4
매극 매상당 권선수 N_c	38

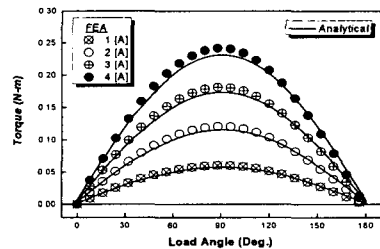


그림 3 평행방향 자화 모델의 부하각에 따른 토크 특성

$$M_r = \frac{B_r}{\mu_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} M_p \left[\sin\left(\frac{\alpha_m \pi}{2p}\right) \cos\left(\frac{\alpha_m n \pi}{2p}\right) - n p \cos\left(\frac{\alpha_m \pi}{2p}\right) \sin\left(\frac{\alpha_m n \pi}{2p}\right) \right] e^{jq\theta} \quad (3.a)$$

$$M_\theta = \frac{B_r}{\mu_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} -j M_p \left[\cos\left(\frac{\alpha_m \pi}{2p}\right) \sin\left(\frac{\alpha_m n \pi}{2p}\right) - n p \sin\left(\frac{\alpha_m \pi}{2p}\right) \cos\left(\frac{\alpha_m n \pi}{2p}\right) \right] e^{jq\theta} \quad (3.b)$$

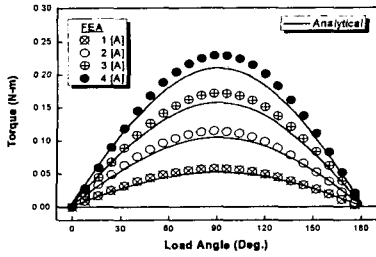


그림 4 반경방향 자화 모델의 부하각에 따른 토크 특성

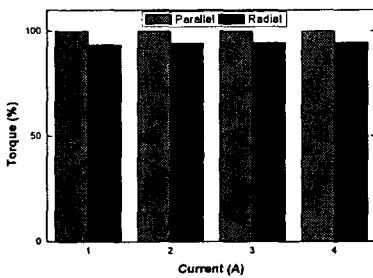


그림 5 평행방향 자화에 대한 반경방향 자화의 토크 비교

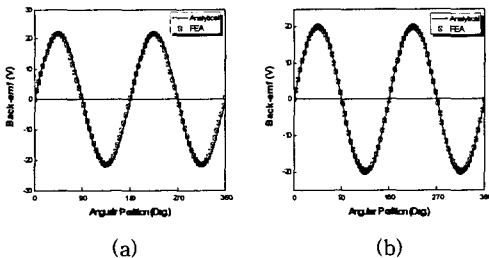


그림 6 회전자의 자화가 (a)평행방향과 (b)반경방향인 모델의 역기전력

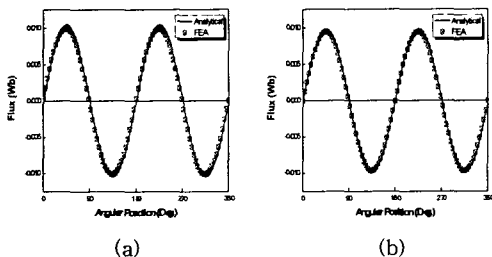


그림 7 회전자의 자화가 (a)평행방향과 (b)반경방향인 모델의 쇄교자속

그림 5는 전류 변화량에 따른 평행방향과 반경방향 자화를 갖는 해석 모델의 토크를 비교한 것으로 평행방

향 자화를 갖는 해석 모델을 기준으로 하여 반경방향 자화를 갖는 해석 모델을 비교한 것이며 부하각 90° 인 지점이다. 동일한 설계 사양에 대하여 일정한 수치로 평행방향 자화가 반경방향 자화보다 우수한 특성을 보이고 있는 것을 확인 할 수 있다.

그림 6은 전동기의 역기전력을 회전자의 자화패턴에 대해 해석하여 유한요소해석과 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 해석 결과가 잘 부합되는 것을 알 수 있으며 평행방향 자화 모델이 반경방향 자화 모델에 비해 우수한 것을 알 수 있다.

그림 7은 해석모델의 쇄교자속을 나타내는 그래프로 같은 양의 전류에 대해 해석결과와 유한요소해석이 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

전동기 회전자의 자화패턴에 의해 지배방정식으로부터 자계 특성식을 도출하고, 토크, 역기전력 그리고 쇄교자속을 해석하여 유한요소와 비교하였으며, 평행방향 자화에서 우수함을 보이는 것을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 슬롯리스형 BLDC 전동기의 회전자 자화 패턴에 따른 자계특성식을 이용하여 논문에서 제시된 사양을 갖는 전동기의 토크, 역기전력 그리고 쇄교자속을 해석하여 결과를 도출하였다. 본 연구를 통해 동일한 설계사양을 갖는 전동기가 자화 형태에 따라 토크특성 등이 달라짐을 알 수 있고, 평행방향 자화된 영구자석 회전자를 갖는 슬롯리스 BLDC 전동기가 반경방향 자화된 모델에 비해 우수한 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 해석 결과들은 유한요소 결과와 비교하여 제시된 해석의 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 홍선기, 천장성, "슬롯리스형 BLDC 전동기 특성해석", 춘계학술대회논문집, p131 p133, 2003년 10월.
- [2] 류동완, "EMB용 초고속 슬롯리스 브러시리스 영구자석 기기의 특성 해석", 충남대 석사학위 논문, 2001년 2월.
- [3] D. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, Mc-Graw Hill, 2003.
- [4] 장석명, 박지훈, 최장영, 류동완, "슬롯리스형 BLDC 전동기의 설계 변수에 따른 자계 특성 해석", 춘계학술대회 논문집, p65-p66, 2004년 4월
- [5] K. Atallah and D. Howe, "The application of halbach cylinders to brushless ac servo motors", IEEE Trans, vol.34, p.2060-2062, July 1998.
- [6] K. Ng, Z. Q. Zhu and D. Howe, "Open circuit field distribution in a brushless motor with diametrically magnetised pm rotor, accounting for slotting and eddy current effects", IEEE Trans, vol 32, Sept. 1996.
- [7] T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Oxford, 1994.
- [8] Z. Q. Zhu, D. Howe and C. C. Chan, "Improved analytical model for predicting the magnetic field distribution in brushless permanent magnet machines". IEEE Trans. vol 38, no 1, Jan. 2002.