

슬롯리스형 BLDC 전동기의 설계 변수에 따른 자계 특성 해석

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

The Magnetic Field Analysis of Slotless BLDC Motors according to Design Parameters

Seok-Myeong Jang, Ji-Hoon Park, Jang-Young Choi, Dong-Wan Ryu*
Chungnam National Univ., Hyosung Co.*

Abstract-In this paper, we present two-dimensional (2-D) analytical model for predicting the magnetic field characteristic of slotless permanent magnet bushless motors. Results from the model are compared to those deduced from 2-D finite element analyses(FEA). It is shown that the radial magnetization and the parallel magnetization of permanent magnet can have flux density on coil, airgap and permanent magnet's surface.

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 동속성도 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 전기자료를 갖는 브러시리스 전동기에 대하여 반경방향 및 평행방향 자화 형태를 갖는 해석모델과 각 해석모델에 대한 자화특성을 제시하였다. 그리고 2-D 극 좌표계에서 맥스웰 방정식을 기본으로 하는 지배방정식을 도출하고, 각 영역에 대한 자계 특성식을 제시하였다. 또한 영구자석두께, 극수에 따른 공극자속밀도의 변화 추이를 검토함으로써 설계시 각 파라미터에 따른 해석결과를 도출하였다. 제시된 해석결과를 유한요소해석과 비교하여 타당성을 입증하였다.

2. 슬롯리스 BLDC 전동기의 자계 특성 해석

2.1 해석모델

그림 1은 반경방향 및 평행방향 자화된 영구자석의 회전자를 갖는 슬롯리스 BLDC 전동기의 구조와 자화 특성을 나타낸다.

그림 1(a)에서 M_{rr} 은 반경방향 자화에서의 수직성분

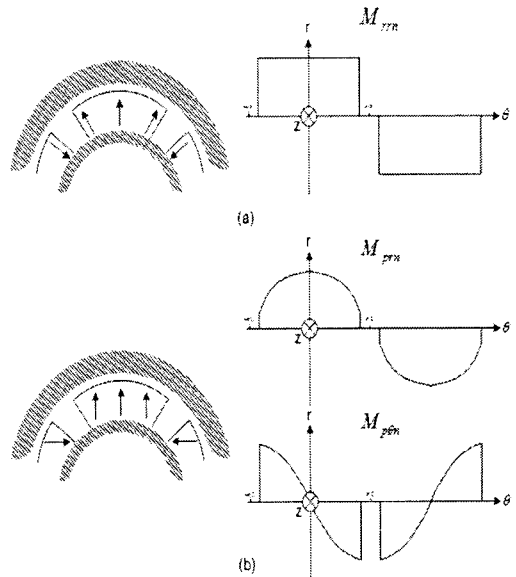


그림 1. 슬롯리스 BLDC 전동기의 구조 및 자화 특성 (a) 반경방향 (b) 평행방향

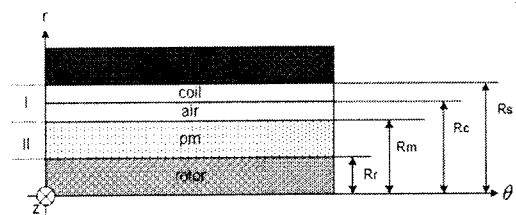


그림 2. 해석을 위한 단순화 모델

을 나타내며, 자화 특성상 θ 방향 성분이 존재하지 않는다. 그림 1(b)에서 M_{pr} , M_{pn} 은 각각 평행방향 자화에서 수직성분과 접선성분 자화 특성을 나타내며 합성자계는 M_{pr} , M_{pn} 의 벡터합으로 표시된다.[3][4]

2.2 영구자석에 의한 자계 특성식

해석결과에 큰 영향이 없는 범위에서 해석의 단순화를 위해 제시된 모델에 다음과 같은 가정을 적용한다.

- i) 1차측은 θ 방향으로 회전 운동한다.
- ii) 영구자석은 r 방향과 θ 방향 성분만을 갖는다.

- iii) 자기 벡터 퍼텐셜은 z 방향 성분만을 갖는다.
 iv) θ 방향 길이는 연속적이다.

1차축이 그림 1(a)와 같이 반경방향 자화 및 평행방향 자화된 회전자를 갖는 경우 공간적으로 분포하는 M_n 은 각각 식(1) 및 식(2)와 같다.

$$M_n = \sum_{n=\text{odd}}^{\infty} M_{rm} e^{-jq\theta} i_r \quad (1)$$

$$M_n = \sum_{n=\text{odd}}^{\infty} M_{prn} e^{-jq\theta} i_r + M_{p\theta n} e^{-jq\theta} i_\theta \quad (2)$$

여기서, M_{rm} 은 반경방향 자화에서의 수직성분이고, M_{prn} , $M_{p\theta n}$ 은 각각 평행방향 자화에서의 수직성분 및 수평성분을 나타낸다. 그리고 $q = n \cdot p$ 이고, n 은 고조파 차수, p 는 극 쌍수이다. 식(1) 및 식(2)와 맥스웰 방정식을 이용하여 식(3)의 지배 방정식이 유도된다.

$$\nabla^2 A_m = -\mu_0 (\nabla \times M_n)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} A_m + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} A_m - \frac{q^2}{r^2} A_m = \frac{jq\mu_0}{r} M_m \quad (3)$$

여기서 A_m 은 자기 벡터 퍼텐셜이고, M_m 은 M_{rm} 또는 $M_{p\theta n}$ 이다.

자기 벡터 퍼텐셜의 정의 $\nabla \times A = B$ 에 식(3)의 A_m 을 이용하여, 영구자석 영역과 공극 영역에 대해 r 방향 및 θ 방향에 대한 자계특성식이 식(4)으로 주어진다.

$$B_{rm}^I = -\frac{jq}{r} (a^I r^q + b^I r^{-q}) e^{-jq\theta}$$

$$B_{rm}^{II} = -\frac{jq}{r} (a^{II} r^q + a^{II} r^{-q} + \frac{jq\mu_0 r M_m}{q^2 - 1}) e^{-jq\theta}$$

$$B_{\theta n}^I = -(qa^I r^{q-1} - qb^I r^{-q-1}) e^{-jq\theta} \quad (4)$$

$$B_{\theta n}^{II} = -(qa^{II} r^{q-1} - qb^{II} r^{-q-1} + \frac{jq\mu_0 M_m}{q^2 - 1}) e^{-jq\theta}$$

식(4)의 계수 a^I , a^{II} , b^I , b^{II} 는 각 영역에 대한 값을 가지며, 경계조건을 대입함으로 구할 수 있다. 그러나 반경방향 자화와 달리 평행방향 자화는 그림 1(b)에 나타나 있듯이 $M_{\theta n}$ 의 성분이 경계에서 연속적이지 않기 때문에 자계특성식에 대입하는 경계조건은 반경방향 자화와 평행방향 자화가 다르게 대입되어야 하며, 이것은 식(5)와 식(6)으로 표현된다.

영구자석이 반경방향 자화인 경우

$$r = R_r \quad B_{\theta n}^{II} = 0$$

$$r = R_m \quad B_{rm}^I = B_{rm}^{II}, B_{\theta n}^I = B_{\theta n}^{II} \quad (5)$$

$$r = R_s \quad B_{\theta n}^I = 0$$

영구자석이 평행방향 자화인 경우

$$r = R_r \quad B_{\theta n}^{II} = -\mu_0 M_\theta$$

$$r = R_m \quad B_{rm}^I = B_{rm}^{II}, B_{\theta n}^I - B_{\theta n}^{II} = -\mu_0 M_\theta \quad (6)$$

$$r = R_s \quad B_{\theta n}^I = 0$$

3. 특성 해석 결과 및 설계 변수에 따른 특성

표 1은 동일한 영구자석의 체적을 갖는 슬롯리스 BLDC 전동기의 설계 사양을 나타낸다.

그림 3은 그림 1에 제시된 두 가지 영구자석 회전자 형태의 자화방법에 따른 정자계 분포 특성을 보여준다. 그리고 그림 4와 그림 5는 두 가지 형태의 자화방법을 갖는 해석 모델에 대한 해석법과 유한요소해석에 의한 공극자속밀도의 분포 특성을 각각 비교하여 나타낸 것이며, 해석결과를 비교해 볼 때 해석치와 유한요소해석 결과가 잘 부합됨을 알 수 있다. 또한 영구자석의 체적이 동일할 때 평행방향 자화 모델이 반경방향 모델보다 우수한 자속밀도 특성을 갖고 있음을 보여준다.

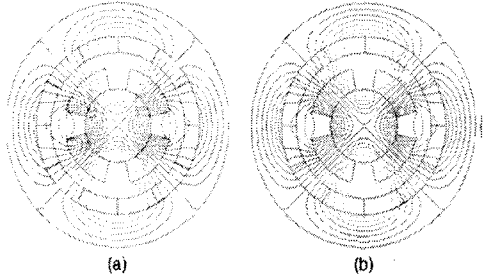


그림 3. 영구자석의 자화방법에 따른 정자계 분포 특성 (a) 반경방향 (b) 평행방향

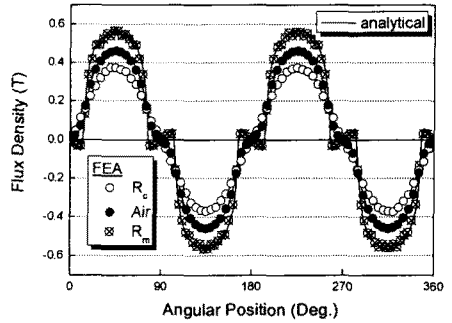


그림 4. 평행방향 자화의 자속밀도 분포 특성

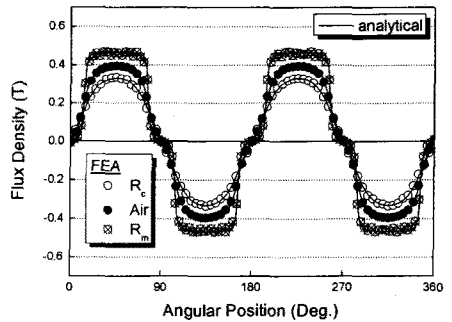


그림 5. 반경방향 자화의 자속밀도 분포 특성

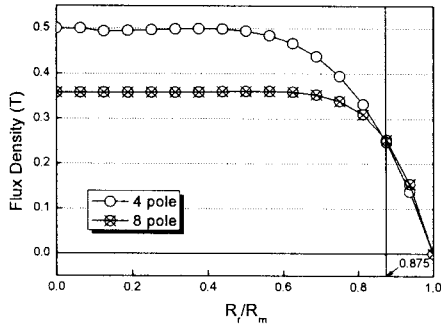


그림 6. 평행방향 자화된 영구자석의 두께에 따른 자속밀도 특성

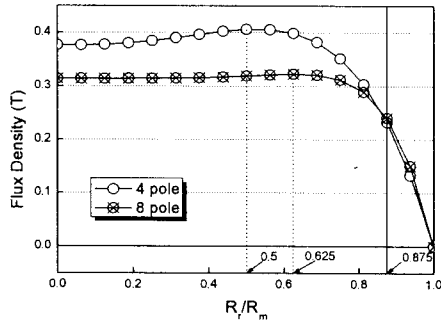


그림 7. 반경방향 자화된 영구자석의 두께에 따른 자속밀도 특성

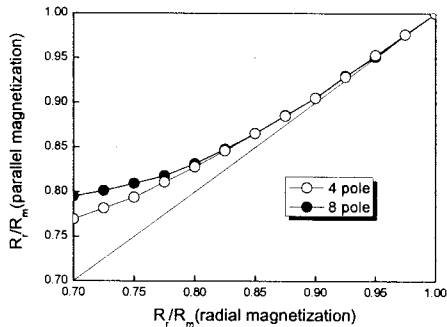


그림 8. 반경방향 자화된 R_r/R_m 변화에 따른 평행방향 자화된 R_r/R_m 변화

그림 6과 그림 7은 각각 반경방향 자화모델과 평행방향 자화모델에 대한 영구자석 두께 및 극수에 따른 공극 자속밀도 특성을 보여준다. 그림 6의 평행방향 자화모델의 두께에 따른 특성에서 $R_r/R_m < 0.875$ 인 구간에서 4극 회전자 구조가 8극 회전자 구조의 공극자속밀도 특성보다 우수함을 알 수 있다. 반면에, 그림 7의 반경방향 자화 모델에서는 4극 및 8극에서 각각 $R_r/R_m = 0.5$, $R_r/R_m = 0.625$ 인 최대 공극자속밀도 영역이 존재하므로 설계시 이에 대한 특성 고찰이 요구된다.

그림 8은 4극과 8극의 영구자석 회전자를 갖는 슬롯리스 BLDC 전동기에 대하여 반경방향 자화된 R_r/R_m 변화에 따른 평행방향 자화된 R_r/R_m 변화를 보여주며, 동일한 공극자속밀도를 내는데 필요한 자석 체적 요구량이 있어 평행방향 자화 방법이 반경방향보다 영구자석 이용률이 우수함을 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 반경방향 및 평행방향 자화된 영구자석 회전자를 갖는 슬롯리스 BLDC 전동기의 해석모델을 제시하였으며, 맥스웰 방정식에 의한 지배방정식을 세우고 각 영역에서의 자체특성식을 도출하였다. 그리고 두 가지 자화방법에 대하여 동일 자속을 얻기 위해 요구되는 자석 체적 등을 각각 비교하여 제시하였다. 본 연구를 통해 동일한 영구자석 체적에 대해 평행방향 자화된 영구자석 회전자를 갖는 슬롯리스 BLDC 전동기가 반경방향 자화된 모델에 비해 자체의 특성이 우수함을 확인하였다. 해석 결과들은 유한요소 결과와 비교하여 제시된 해석의 타당성을 검증하였다.

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_e (mm)	40.0
매극 매상당 권선수 N_c	38

[참 고 문 헌]

- [1] 홍선기, 천장성, "슬롯리스형 BLDC 전동기 특성해석," 추계학술대회논문집, p131-p133, 2003년 10월.
- [2] 류동완, "EMB용 초고속 슬롯리스 브러시리스 영구자석 기기의 특성 해석" 충남대 석사학위 논문, 2001년 2월.
- [3] 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.
- [4] D. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, Mc-Graw Hill, 2003.
- [5] Z. Q. Zhu, David Howe, Ekkehard Bolte and Bernd Ackermann, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, part I: open-circuit field," IEEE Trans. vol 29, Jan. 1993.
- [6] T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Oxford, 1994.