

환형권선 브러시리스 DC 모터의 전자기학적 최적 설계 Electromagnetic Optimal Design of Toroidally-Wound Brushless DC Motor

이학인¹, *#노명규²

H. I. Lee¹, *#M. D. Noh(mnoh@cnu.ac.kr)²

¹충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단, ²충남대학교 메카트로닉스공학과

Key words : Toroidally-Wound brushless DC motor, Brushless motor, Optimal design motor, Electromagnetic motor design

1. 서론

환형권선 브러시리스 DC 모터는 간결한 구조와 높은 효율을 가지고 있으며, 비교적 큰 공극에서 원활한 작동이 가능하다 [1].

환형권선 브러시리스 DC 모터의 최적 설계를 위해 모터의 파라미터들과 모터 출력의 관계를 나타내는 설계식이 필요하다. 본 논문에서는 전자기학 이론에 근거하여 설계식을 도출하고 유한요소 해석을 이용하여 설계식을 검증한 후, 환형권선 브러시리스 DC 모터의 최적 설계를 수행하였다.

2. 환형권선 BLDC 모터의 구성

환형권선 BLDC 모터는 고정자와 회전자로 구성되어 있다. Fig. 1은 모터의 개략도와 파라미터들을 나타내준다. 회전자는 R1과 R2 사이의 영역에 위치하고 있고 반경방향으로 자화되어 있다. 이 영역 안에서 나누어 지는 부분들의 수는 모터의 극 수를 결정한다. 아래에 Rr과 R1의 영역은 회전자 철심을 나타낸다. 모터 회전자의 질량을 줄이기 위해 회전자 철심이 제거되기도 하는데 본 논문에서는 회전자 철심이 있는 경우와 회전자 철심이 제거된 경우에 대해 최적 설계를 진행하였다. 고정자 철심은 R3과 R4 사이의 영역에 있으며 자성체로 구성되어 있고 환형권선의 코일로 감겨 있다. 코일의 수는 극의 수와 입력위상 수의 곱과 같다. 각각의 직렬로 연결된 코일 쌍은 180도의 전기적 위상 차이를 갖는다.

3. 환형권선 BLDC 모터의 자기장 방정식

본 논문에서는 환형권선 BLDC 모터의 축 방향 자기장이 균등하다고 가정하여 반경방향의 2차원 평면에 대해 전자기장 해석을 수행한다. 영구자석에 의한 자화벡터는

$$\mathbf{M} = H_c \cos \theta \hat{r} \quad (1)$$

이다. 식 (1)에서 H_c 는 영구자석의 세기를 나타낸다. 스칼라 포텐셜 ψ 를 $\mathbf{H} = -\nabla\psi$ 과 같이 정의하면 맥스웰 방정식은 다음과 같이 정리가 된다 [2].

$$\nabla^2 \psi = \nabla \cdot \mathbf{M} \quad (2)$$

3.1 회전자 철심과 고정자 철심을 갖는 모터

적절한 경계조건을 적용하여 식 (2)의 해를 구하면 모터 공극에서의 자속밀도 분포를 구할 수 있으며, 2-극 모터의 경우 이 자속 밀도는

$$B_r = \beta_0 \rho_1 \left[1 + \left(\frac{R_3}{r} \right)^2 \right] \cos \theta \quad (3)$$

와 같이 구해진다 [2]. 여기서 β_0 와 ρ_1 는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta_0 = \frac{\mu_0 M_0 R_3^{p-1}}{2(R_3^{2p} - R_1^{2p})} \quad (4)$$

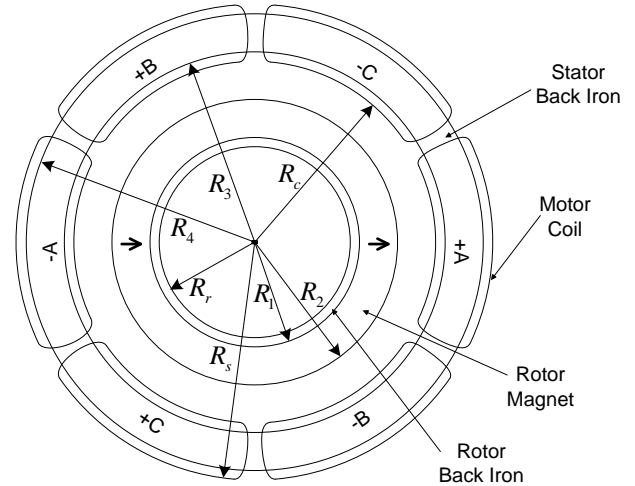


Fig. 1 Schematic of toroidally-wound two-pole brushless DC machine, The rotor back iron is optional

$$\rho_1 = \frac{1}{2} (R_2^2 - R_1^2) + R_1^2 \log \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (5)$$

3.2 고정자 철심만 갖는 모터

환형권선 BLDC 모터가 고정자 철심만 갖는 경우에는 회전자 철심 부분에서의 경계 조건이 달라지게 된다. 달라진 경계 조건을 3.1 절에서와 같은 방법으로 2-극 모터에서의 공극 자속밀도를 구하면 하면 다음과 같다 [2].

$$B_r = \frac{\mu_0 M_0}{2} \left[\left(\frac{R_2}{R_3} \right)^2 - \left(\frac{R_1}{R_3} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{R_3}{r} \right)^2 \right] \cos \theta \quad (6)$$

4. 환형권선 BLDC 모터의 설계

4.1 자기포화를 이용한 철심 설계

고정자와 회전자 철심은 자기포화상태를 넘어서지 않도록 설계되어야 한다. 고정자 철심에서의 자속밀도는 하나의 회전자 자석에서 고정자 철심으로 들어오는 자속으로부터 유도할 수 있고 이를 2-극 모터에 적용하면 다음과 같은 식으로 유도된다.

$$B_{sb} = \frac{\phi_{max}}{R_4 - R_3} \quad (7)$$

또한 회전자 철심에서의 자속밀도는 위와 같은 방식으로 R1-R2의 영역에서 구할 수 있다.

4.2 모터 토크 방정식

토크는 코일에서 발생하는 로렌츠 힘에 의해 생성된다. 고정자 코일에 의한 자기장 세기가 회전자 영구 자석에 의한 자기장의 세기에 비해 무시할 정도로 작다고 가정하면 코일에서 발생하는 로렌츠 힘은

$$T_a = \int_{R_c, \theta_a - \theta_c/2}^{R_s, \theta_a + \theta_c/2} \frac{2N_a I_a}{(R_3^2 - R_c^2) \theta_c} B_r r^2 d\theta dr \quad (8)$$

Table. 1 Optimal Design Result

Parameter	Symbol	Machine A	Machine B
Number of pole pair	P	1	3
Inner radius of rotor magnet	R1	6.4mm	181mm
Outer radius of rotor magnet	R2	22.1mm	192mm
Radius to the coil	Rc	23.1mm	193mm
Inner radius of stator iron	R3	27.6mm	199mm
Outer radius of stator iron	R4	40.4mm	219mm
Outer boundary of machine	Rs	45.0mm	225mm
Axial length	L	6.0mm	20mm
Motor constant	Km	0.047	5.67
Km mismatch		46%	5.1%

로 부터 구할 수 있고 이를 정리하면,

$$T = K_t N I_0 \tag{9}$$

와 같이 구할 수 있다 [3]. 식 (9)에 K_t 는 토크상수로서 모터 파라미터에 의해 결정된다.

5. 환형권선 BLDC 모터의 최적 설계

최적설계를 하기 위한 첫 단계는 목적함수를 결정하는 것이다. 본 논문에서는 자석 부피와 전력소비를 최소화하고 토크용량을 최대로 하는 식을 목적함수로 사용하였다. 이를 수식으로 나타내면 코일의 저항을 R 이라고 할 때

$$J = \frac{T}{I_0 \sqrt{R}} \tag{10}$$

이며, 식 (9)를 이용하면

$$J = \frac{K_t N I_0}{I_0 \sqrt{R}} = \frac{K_t N}{N \sqrt{R}} = \frac{K_t}{\sqrt{R}} = K_m \tag{11}$$

로 정리된다. 식(11)에서 K_m 은 모터상수로서 단위는 Nm/\sqrt{watt} 이다.

6. 설계결과 및 평가

식 (11)에서 정의된 목적함수를 사용하여 두 경우의 최적 설계를 하였다. 모터 A 는 2-극 환형권선 BLDC 모터에 회전자 철심이 없는 경우이고 모터 B 는 6-극 환형권선 BLDC 모터에 회전자 철심이 있는 경우이다. 모터 A 의 바깥쪽 반지름은 45mm, 모터 B 의 바깥쪽 반지름은 225mm 로 제한하였다. 공극은 가공 및 제작을 고려하여 1mm 로 고정하였다. 이러한 조건에 의한 최적설계 결과는 Table. 1 에 요약하였다.

유한요소해석을 통해 설계식을 검증하였다. Fig. 2 는 모터 A 에서 회전자 자석에 영향을 미치는 R2를 변화 시킴에 따라 K_m 의 변화를 나타내준다. Table. 1 을 보게 되면 최적화를 통해 R2=22.1mm 일때 최적이라는 결과 값이 나오게 된다. 그러나 실제로 R2 에 의한 최고점은 R2=24mm 일 때이지만 고정자 철심의 자기포화 상태에 의한 제약에 의해서 더 이상의 R2 증가는 의미가 없음을 나타낸다. Fig. 2 를 보면 유도된 식을 이용한 해석적 방법과 유한요소법의 값이 매우 유사한 그래프의 경향을 보이며 약 4.6%의 차이를 보인다. Fig. 3 를 보면 모터 B 에서 R2 값의 영향을 나타내주는데 모터 B 에서는 유한 요소법과 해석적인 방법의 오차가 약 5.1%이다. 모터 B 의 경우 모터 A 에 비해 유한요소 해석 결과와의 오차가 크게 나왔는데 이는 회전자 철심에 의해 공극의 자속밀도 분포가 정현파 보다는 사다리꼴 형태에 가까워지기 때문이다.

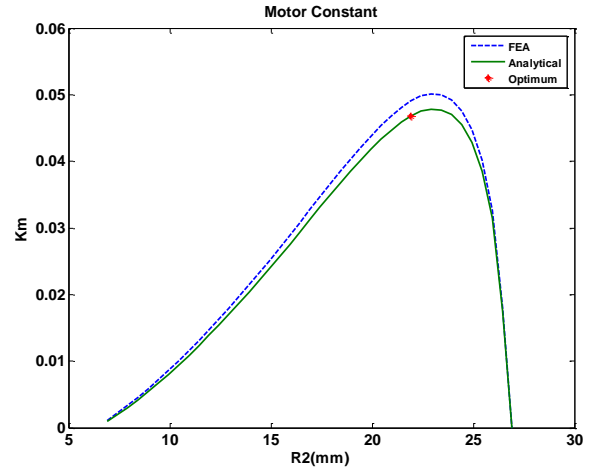


Fig. 2 The variation in K_m with respect to the magnet size change for the two-pole machine without rotor iron (Machine A)

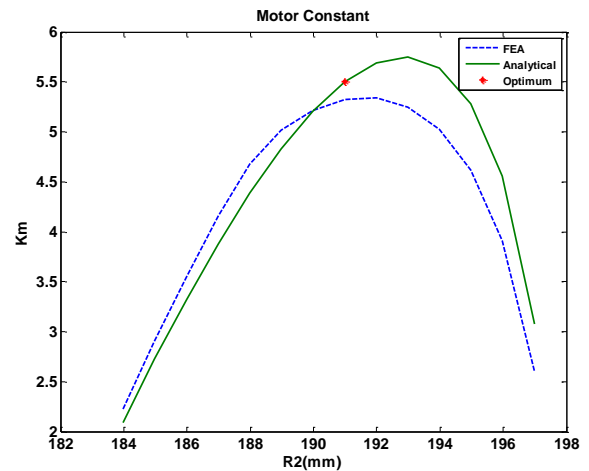


Fig. 3 The variation in K_m with respect to the magnet size change for the two-pole machine without rotor iron(Machine B)

7. 결론

본 논문에서는 반경방향 공극을 갖는 환형권선 브러시리스 DC 모터의 해석적인 설계방법을 제시 하였다. 또한 전력소비에 따른 모터의 토크상수 K_m 값을 최적화하기 위한 목적함수로 사용을 제안하였고 최적설계 결과는 유한요소해석을 통해 검증하였다.

참고문헌

1. L.W. Langley and R.L. Fisher, "Toroidally Wound Brushless DC Motor," US Patent 4,547,713, 1985
2. 이현주, 유승열, 노명규, "환형권선 BLDC 전동기의 강성계수 모델링," 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계 학술대회 논문집 235-238,2008
3. 이학인, 유승열, 노명규, "영구자석을 이용한 소형 플라이휠 시스템의 설계 및 검증," 한국 정밀공학회 추계 학술대회 논문집,523-524,2008