

유전알고리즘을 이용한 BLDC전동기의 최적설계 및 특성해석

• 박영일, 윤선기, 조윤현,
동아대학교 전기공학과

Optimal Design and Characteristic Analysis of BLDC using GA

• Young-Il Park, Sun-Ky Youn, Yun-Hyun Cho
Dept. of Electrical Engineering, Dong-A Univ.

Abstract - This paper proposes that optimal design using GA of BLDC motor. To estimate this optimal design method, the performance characteristics of BLDC motor is computed by the equivalent magnetic circuit network method and FEM. To estimate especially the dynamic characteristics of BLDC, we compute the parameter of electrical circuit using FEM.

1. 서 론

BLDC전동기는 고 신뢰성, 소형 경량화, 고 효율화 그리고 고 토크회화가 가능하기 때문에 하드디스크, 프린터 등과 같은 정밀성을 요하는 기기, 에어컨용 팬, 자동차용 등과 같은 저소음을 요구하는 곳에 BLDC전동기가 사용되고 있다. 그러나 이런 BLDC전동기는 NdFeB 영구자석을 사용함으로 인해 가격이 비싸게 되는 단점으로 인해 특별한 기기에만 사용되어 왔다.

본 논문에서는 일반적으로 가격이 싸고 많이 사용되고 있는 페라이트 자석을 사용하여 외전형 BLDC전동기를 최적 설계 및 해석을 하였다.

최적설계 방법으로는 유전알고리즘을 이용하여 정해진 외경의 치수 범위내에 설계가 되도록 형상 최적 치수를 도출하고, 설계된 최적치수를 자기동가회로망법과 유한요소법을 적용하여 자속분포, 코깅토크와 전류에 따른 토크등을 해석하였다. 그리고 유한요소법을 적용하여 BLDC전동기의 정수를 산정하였다

2. 본 론

2.1 BLDC전동기 설계

2.1.1 속도,토크 특성식

공극의 무부하 자속밀도 파형은 구형파로 근사화 할 수 있으며, 2차원 자계 해석에 기초를 둔 해석적 모델법을 적용하여 얻어진 전기자 표면에서의 공극 자속밀도 B_g 는 식(1)으로 표현된다.

$$B_g = \frac{\sinh(\pi l_m / \tau_p)}{N_2 \cosh(\pi \delta_0 / \tau_p)} \cdot (1 + 2\delta / D_a) \cdot B_r \quad (1)$$

$$N_2 = \sinh(\pi l_m / \tau_p) + \mu_r \cosh(\pi l_m / \tau_p) \tanh(\pi \delta_0 / \tau_p)$$

단, $\delta_0 = \lambda k_c \delta$

구형파 여자일 경우에 도체에 유기된 역기전력은 식(2)과 같다.

$$e_f = 4pN_{ph}k_w\alpha_i\tau_pL_iB_{mg}n \quad (2)$$

전기자 권선이 Y결선일 경우에 두상이 동시에 도통되므로 역기전력은 식(3)으로 표현된다.

$$E_f = 2e_f = 8pN_{ph}k_w\alpha_i\tau_pL_iB_{mg}n \quad (3)$$

모터에 발생된 토오크는

$$T_d = \frac{E_f I_a}{2\pi n} = \frac{4}{\pi} pN_{ph}k_w\alpha_i\tau_pL_iB_{mg}I_a \quad (4)$$

2.1.2 목적함수

본 논문에서는 최적화 하고자하는 목적함수로서 전동기의 효율 극대화를 선정하였고, 목적함수의 극대화를 위해 10개의 변수를 사용하였다. 정격 출력을 P_0 , 동손을 W_{ca} , 철손을 W_F , 기타손실을 W_i 라 하면, 최대 효율화 하고자 하는 목적함수 $F(X)$ 는 식(5)으로 나타낼 수 있다.

$$F(X) = \frac{P_0}{P_0 + W_{ca} + W_F + W_i} \quad (5)$$

2.1.3 설계 제약 조건식

가. 공간 및 제작상의 제약

모터의 최대 크기를 제한함으로써 공간 또는 제작 및 경제적인 효과를 낼 수 있다.

$$D_0 \leq D_{o,max} \quad (6)$$

공극에 대한 제약조건은 기계적인 구조, 정밀성 및 조립성을 고려하여 결정한다.

$$\delta_{min} \leq \delta \leq \delta_{max} \quad (7)$$

나. 자기적 제약

전기자와 고정자의 자속밀도는 회전주파수, 공극 자속밀도 및 철심재질의 성능에 따라 좌우된다. 전기기자 철심 치 부분의 최대자속밀도 B_{tm} , 전기자요크 평균자속밀도 B_s , 회전자 요크의 자속밀도 B_y 은 다음식과 같다.

$$B_{tm} = \frac{P\phi_g}{k_t\alpha_i S_n tw L_a} \leq B_{t,max} \quad (8)$$

$$B_s = \frac{\phi_g}{2k_t d_c L_a} \leq B_{c,max} \quad (9)$$

$$B_y = \frac{\sigma\phi_g}{2L_s l_y} \leq B_{y,max} \quad (10)$$

다. 온도상승 제약

철손내에서 일어나는 손실 W_i , 방열 면적 O_a 및 전기자 권선에 일어나는 온도상승은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\theta_a = \frac{W_i}{k_r O_a (1 + 0.1v_a)} \quad (11)$$

$$O_a = \frac{3\pi}{4}(D_a^2 - D_i^2) + \pi D_a L_a \quad (12)$$

$$W_i = W_F + \frac{L_a}{L_a + L_{end}} W_{ca} \quad (13)$$

여기서, v_a : 주변속도 [m/s]

라. 저온 불가역 감자 제약

페라이트자석의 자성은 온도의 영향이 크다. 온도가 상승하면 자성이 저하해서 기기의 성능을 저하시킨다. 따라서, 기기가 동작하는 환경의 저온 온도조건에 따라 최대 전기자 반작용으로 인한 저온 불가역 감자가 일어나지 않도록 설계하여야 한다. 최대 전기자 반작용 감자계를 $H_{d,max}$, 온도에 따른 굴곡점 감자계를 $H_n(t)$ 라고 하면 식(14)을 만족하여야 한다.

$$H_{d,max} \leq H_n(t) \quad (14)$$

2.2 최적설계

2.2.1 설계요구사항

전동기를 설계할 시 가장 중요시되는 효율을 설계의 목적으로 선정하고 전동기의 기하학적인 형상과 다른 특성들을 이용하여 제약 조건을 선정하여 유전 알고리즘을 통하여 전동기를 최적 설계 파라미터를 찾는데 목표를 두었다. 아래의 표1은 샘플 전동기의 기본 설계 사양 조건과 그림 1의 속도-토크곡선의 허용범위안에 특성값들이 포함되도록 최적설계를 하고자 하였다.

표 1. 설계 요구 사양

항 목	Value	Unit
일 력 전 압	12	[V]
극 수	4	Pole
정 격 속 도	3200	[rpm]
무부하 속 도	4300	[rpm]
정 격 토크	4	[kg.cm]
무부하손실토크	0.2	[kg.cm]
자석축방향길이	20	[mm]
전기자계철의 내경	40	[mm]

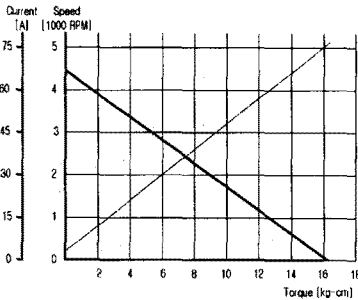


그림 1. 토크에 대한 속도-전류곡선

2.2.2 최적 설계 결과

그림 2는 주어진 제약조건에 맞추어 설계된 BLDC 전동기의 형상이다.

표 2는 BLDC전동기의 효율 최대화 설계 결과를 샘플 전동기와 비교한 결과를 나타내고 있다. 최적설계된 전동기의 회전자외경은 95.92[mm]이고 샘플전동기의 회전자 외경은 97.4[mm]이므로 소형화가 가능하다. 그리고 자석두께, 치높이, 자극각도 등이 감소하고, 요크두께가 증가하였다. 그리고 전동기의 효율은 79[%]로서 샘플전동기의 69[%]에 비해 약 12[%] 증가하였다. 이상의 결과로부터 샘플전동기보다 효율, 경제성

그리고 공간적인 제약조건에서 더 좋기 때문에 BLDC 전동기 설계치수가 최적화 된 것임을 알 수 있다.

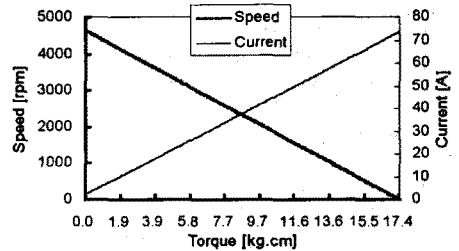
표 2. 기존전동기와 최적화 전동기의 비교

	기존 전동기	최적화 전동기	단위
회전자 외경	97.4	95.92	[mm]
회전자 내경	81.4	77.3	[mm]
고정자 외경	80	75.9	[mm]
자석두께	6	4.08	[mm]
요크두께	2	5.23	[mm]
치 높이	14	8.52	[mm]
자극각도	70	76	[Deg]
효 율	69	79	[%]

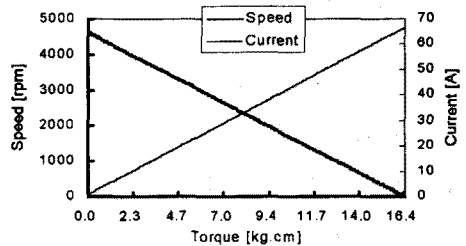
2.3 해석

2.3.1 정특성 해석

기존전동기와 최적화 전동기의 토크에 대한도-전류 곡선이다. 최적화 전동기의 토크에 대한 특성곡선이 기존전동기의 특성곡선보다 설계자의 요구조건에 더 부합된다.



(a) 기존 전동기



(b) 최적화 전동기

그림 2. 토크에 대한 속도, 전류 곡선

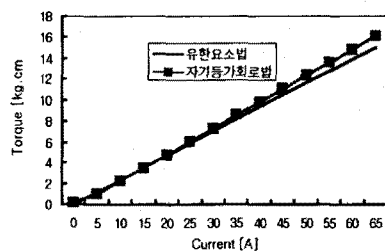


그림 3. 전류에 대한 토크

그림 4는 최적화 전동기를 유한요소법으로 해석한 자속 밀도 분포도이다.

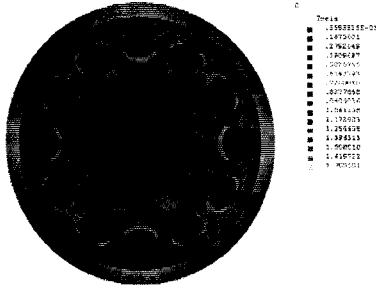


그림 4. 최적화 전동기의 자속밀도 분포

2.3.2 동특성 해석

BLDC전동기의 주요 파라메터들은 유한요소법을 이용하여 파라메터를 구했다.

표 3 최적화 BLDC전동기의 파라메터

Parameter	Value
P	4
r_s	0.083 [Ω]
L_s	0.0766 [mH]
λ_m'	7.6576 [$mV \cdot s$]
V_{dc}	12 [V]
J	$10^{-4} N \cdot m^2$
B	$10^{-4} N \cdot m \cdot s$

BLDC전동기에 대하여 상태방정식을 구하면 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ \omega_r \end{bmatrix}} &= \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L_s} & 0 & -\frac{1-B(\phi)}{L_s} \lambda_m' \\ 0 & -\frac{r_s}{L_s} & \frac{D(\phi)}{L_s} \lambda_m' \\ \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2}\right)^2 \frac{\lambda_m'}{J} & 0 & -\frac{B_m}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ \omega_r \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} -\omega_r i_{ds} \\ \omega_r i_{qs} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{A(\phi)}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C(\phi)}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{P}{2} \frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dc} \\ V_{dc} \\ T_L \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (15)$$

그림 6과 7은 0.1초후에 부하 5(kg.cm)를 인가할 경우의 속도, 토크 곡선이다. 그림 8은 자기등가회로망법과 유한요소법을 적용하여 구한 최적화 전동기의 코깁토크 곡선이다.

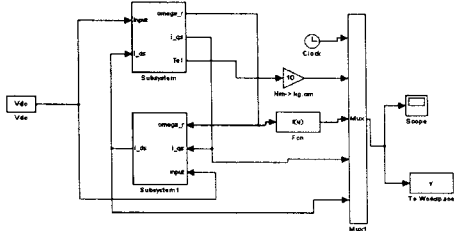


그림 5. Matlab/Simulink의 Block Diagram

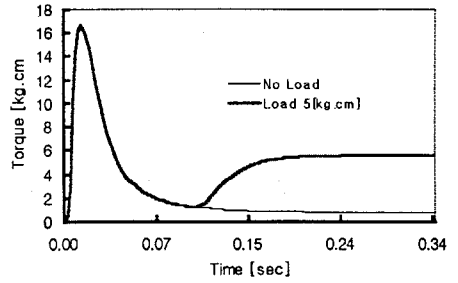


그림 6. 시간에 대한 토크 곡선

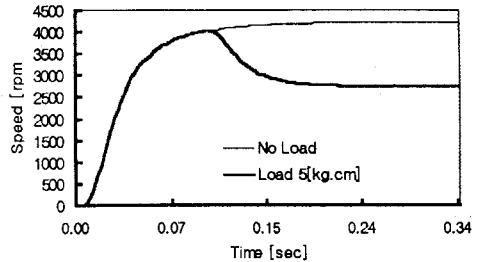


그림 7. 시간에 대한 속도곡선

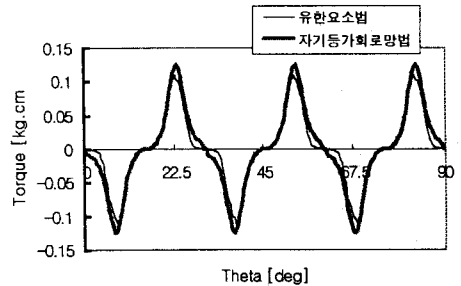


그림 8. 코깁토크 곡선

3. 결 론

본 논문에서는 BLDC전동기를 대상으로 효율 최적화를 이루었다. 최적 설계의 방법으로 유전알고리즘을 이용하였고 주어진 속도-토크 곡선의 허용범위 안에 들어오도록 제약 조건을 줌으로써 설계자의 요구조건에 맞게 설계하였다.

최적설계된 전동기를 해석에 있어서 특성곡선이 사용자의 요구조건에 부합됨을 검증하였고 기존의 전동기와 최적 설계된 전동기의 특성곡선을 제시하였다.

유한요소법을 이용하여 BLDC전동기의 정수들을 산정하였다. 산정된 정수 값들을 가지고 동특성 해석을 함으로써 BLDC 전동기의 특성곡선이 설계자의 요구사항에 맞음을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Nady Bous, "Design Optimization of Permanent Magnet DC Motors", IEEE Trans. on IA, pp. 786~792,1990
- [2] S.D. Sudhoff, P.C. Krause, "Operating Modes of The Brushless DC Motor With A 120° Inverter", IEEE Trans. On EC, pp. 558~564,1990
- [3] Mitsuo Gen, Runwei Cheng, "Genetic Algorithms and Engineering Design", John Wiley & Sons,1997