

위상최적설계를 이용한 BLDC 모터의 자석 설계

박승규*, 강제남*, 왕세명*, 노정채**

*광주과학기술원 기전공학과, **캐리어 (주) 압축기그룹

Magnet Design of BLDC Motor using Topology Optimization

Seungkyu Park*, Jenam Kang*, Semyung Wang*, Jungchae Noh**

*Dept. of Mechatronics, K-JIST, **Comp. Group, Carrier Co.

Abstract - BLDC (Blush-Less Direct Current) motors are widely used for machine tools and ODD (Optic Disc Drive). Topology Optimization is applied to the rotor of a BLDC motor to improve in efficiency and save money. Density method and design sensitivity are derived. The result of topology optimization shows better performance.

방정식은 두 가지 형태로 표현할 수 있다. 하나는 연속체 방정식을 적용한 적분을 이용한 방정식이다 [3-4].

1. 서론

위상최적설계는 초기 개념 설계에 매우 유용한 개념이다. 구조최적설계에서 시작한 위상최적설계는 그 개념을 전자기시스템에도 적용할 수 있고, 향상된 결과를 찾는데 이용되었다[1]. 밀도함수를 이용한 위상최적설계는 이미 적용되고 있다[2-3]. 하지만 기존의 논문이 하나의 물질에 대해서 위상최적설계를 수행하였지만, 이 논문에서는 전자기 시스템의 중요한 구성 요소인 철과 자석, 두 가지 물질에 대해 위상최적설계가 이루어졌다.

$$a_u(A, \bar{A}) = I_u(\bar{A}) \quad \text{for all } \bar{A} \in A \quad (2)$$

$$\begin{cases} a_u(A, \bar{A}) = \iiint_{\Omega} (\nabla \times A) \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{A}\right) d\Omega \\ I_u(\bar{A}) = \iiint_{\Omega} [J_s \cdot \bar{A} + H_c \cdot (\nabla \times \bar{A})] d\Omega \end{cases} \quad (3)$$

BLDC (Blush-Less Direct Current) 모터는 전동기구나 최근 활용이 많은 ODD (Optic Disc Drive) 까지 범위가 늘어나고 있다. 때문에 BLDC 모터를 구성하고 있는 회전자나 고정자를 최적화하여 효율을 증가 시키는 것은 중요한 문제이다. 특히 회전자 자석의 형상 및 배치는 많은 특허에 묶여있기 때문에 이에 대한 위상최적설계가 필요하다.

여기서 \bar{A} 는 가상 벡터 포텐셜이다. 다른 하나는 FEM에서 이용되는 행렬을 이용하는 방정식이다.

$$KA=Q \quad (4)$$

여기서 K는 투자율의 함수인 강성 행렬이고, Q는 외력의 함수, 즉, 밀도함수와 보자력의 함수인 힘행렬이다. 이를 함수형태의 행렬로 나타내면 다음과 같다.

본 논문에서는 먼저 BLDC 모터의 자석 최적설계에 필요한 밀도법을 유도하고, 해석적 방법과 보조 변수법[3]을 이용하여 민감도 식을 유도하여 사용 해석기인 ANSYS를 이용한 FEM 방법으로 민감도 값을 찾았다. 최적설계는 DOT의 SLP 방법을 이용하였다 [3].

$$K(\mu)A = Q_1(J_s) + Q_2(H_c) \quad (5)$$

이 시스템에서는 전류는 설계 변수가 아니므로, 이 문제에서 설계 변수(b)는 투자율(μ), 보자력(H_c)이다.

$$b = f(\mu, H_c) \quad (6)$$

식 (6)이 나타내는 변수이지만, 위상최적설계에 적용하기 위해서는 밀도함수를 이용 변수를 그림 1처럼 바꾸어야 한다. 여기에 이용하는 밀도 함수 식은 다음 식 (7), (8)과 같다.

2. 본론

2.1 위상최적설계 이론

맥스웰 방정식과 벡터포텐셜, $B = \nabla \times A$, 을 이용하여 주어진 시스템의 지배방정식을 유도할 수 있다.

$$H_c = H_{c0} \rho^p \quad (7)$$

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \rho^p (\mu_{rm} - \mu_r) + \mu_r \quad (8)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A\right) = J_s + \nabla \times H_c \quad (1)$$

여기서 ρ , H_{c0} , μ_{rm} , μ_r 는 각각 밀도함수, 초기 보자력, 자석의 비투자율, 철의 비투자율이다.

여기서 J_s , H_c , μ 는 각각 전류 밀도함수 [A/m^2], 보자력 [A/m], 투자율이다. 이 지배

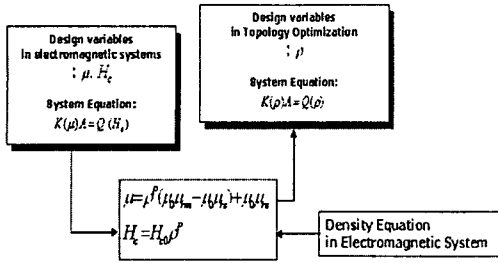
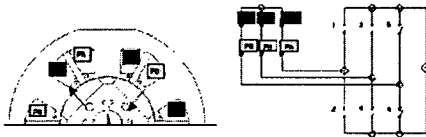


그림 1. 설계 변수 함수

2.2 수치 예제

그림 2(가)는 BLDC 모터의 2차원 단면도를 보여주고 있고, (나)는 3상 전류가 슬롯에 어떻게 들어가는지를 보여주고 있다. 그리고 표 1은 BLDC 모터의 물성치와 입력전류를 나타낸다.



(가) 모터단면도 (나) 전기회로
그림 2. BLDC 모터 형상 및 전기회로

표 1. 물성치 및 입력전류

Stator	$\mu_r=1000$	6 slot		
Rotor	$\mu_{rs}=1000$	4 pole		
Coil	$\mu_r=0.95$	10 A	112Turn	3 상
Magnet	$\mu_{rm}=1.02$	$B_r=1.22T$		

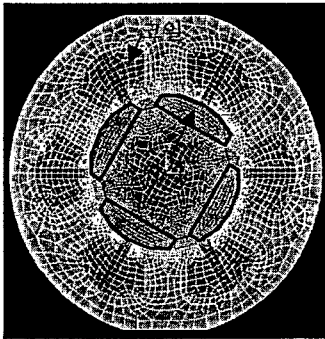


그림 3. 유한요소모델

BLDC 모터를 유한요소법을 이용하여 해석하는데 ANSYS PLANE13요소를 이용하여 해석하고 검증하였다. 그림 3은 유한요소 해석 모델을 보여주고 있다.

위상최적설계는 BLDC 모터의 회전자에 대하여 이루어졌다. 실제적인 목적함수는 회전자의 토크 최대화이다. 하지만 식을 간단히 하기 위해 토크와 비례 관계가 있는 공극의 에너지를 최적설계 목적함수로 하였다. 그리고 제약함수는 자석의 체적으로, 초기 회전자에 사용된 자석의 체적을 40% ($V_{magnet}=0.4$)로 낮추는 것이다. 다시 말하면, 기존에 사용한 자석의 양을 40%로 줄이면서도 토크를 최소한으로 최대화하는 회전자를 설계하는 것이 목적이다.

이를 위상최적설계에 맞추어 공식화 하면 다음과 같다.

$$\text{Objective: Max. } \Psi = \sum \left(\frac{1}{2} A^T K A \right) \quad (9)$$

$$\text{Constraint: } g_1 = \frac{\sum_k \rho_k V}{V_{magnet}} - 1 \leq 0 \quad (0 \leq \rho_k \leq 1) \quad (10)$$

$$g_2 = 1 - \frac{\sum_k (\rho_k - 0.5)^2}{NDV \cdot GI_d} \leq 0 \quad (0 < GI_d \leq 0.25) \quad (11)$$

여기서 식(11)은 위상최적설계 시 문제가 되는 희색영역, 즉, 철과 자석의 중간적 물질이 나오지 않게 하기 위한 수학적 제약 함수이다.

최적설계를 진행하기 위해서는 각 요소에 대한 민감도 값이 필요하다. 다음 식은 전자기 시스템에 대한 일반적 민감도 식이다.

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi}{d\rho} &= \frac{\partial\Psi}{\partial\rho} + A^T \left(\frac{\partial Q_1}{\partial\rho} + \frac{\partial Q_2}{\partial\rho} - \frac{\partial K}{\partial\rho} A \right) \\ &= \frac{\partial\Psi}{\partial\rho} + A^T \left(\frac{\partial Q_1}{\partial J_z} \frac{\partial J_z}{\partial\rho} + \frac{\partial Q_2}{\partial H_c} \frac{\partial H_c}{\partial\rho} - \frac{\partial K}{\partial\mu} \frac{\partial\mu}{\partial\rho} A \right) \end{aligned} \quad (12)$$

유한요소를 이용하여 최적설계하기 위해서는 주어진 도면 그대로 이용하는 것이 아니라 검증을 통해서 실제 시스템과 같게 변화가 필요하다.

그림 4는 위상최적설계 설계 영역을 나타낸다. 여기서 고정영역을 3가지의 경우로 나누어서 사용하였는데 이는 위상최적설계 과정 중에 자속선이 공극쪽으로 흐르지 않고 회전자 쪽으로 역류하는 것을 막기 위해 만든 것이다. 다시 말해서 고정영역을 사용함으로써 자석에서 발생하는 자속이 공극을 지나 고정자쪽으로 잘 흐르도록 할 수 있다. 여기서 사용한 고정영역은 설계 영역 중 가장 안쪽(가), 가장 바깥쪽(나), 중간(다)을 선택하였다.

그림 5는 세가지 경우에 대한 위상최적설계 결과를 보여주고 있다. 세 경우 모두 비슷한 결과를 보여준다. 최적화된 자석의 형태가 설계 영역의 양 바깥으로 몰려있음을 알 수가 있다. 표 2는 최적설계결과

를 재해석하여 수치적으로 비교 한 것이다. 각 경우 중 Case C 가 가장 바람직한 결과를 나타냈다. 본 연구를 통해 BLDC모터의 새로운 자석의 형태를 제안할 수 있다.

화하여, 최대 토크를 만드는 것을 설계 목적으로 하였다. 위상최적설계 결과는 체적을 40%로 줄이면서 토크는 92%로 유지하였다. 이는 사용될 자석의 단가를 떨어뜨림으로써 시장 경쟁력을 가지는 모터의 설계가 가능하다는 것을 보여준다.



(가)Case A (나)Case B (다)Case C

그림 4. 위상최적설계 설계 영역



(가)Case A (나)Case B (다)CaseC

그림 5. 위상최적설계 결과

3. 결론

본 논문에서는 사용이 증대되고 있는 BLDC 모터의 중요한 부분인 회전자를 위상최적설계에 적용하겠다. 먼저 최적설계에 필요한 밀도 함수와 민감도식이 유도 되었다. 자석의 체적을 초기의 40%로 줄이면서 토크 감소를 최소화

4. 후기

이 연구는 한국과학재단 지정 전남대학교 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음

[참고문헌]

- [1] M. P. Bendsoe and N. Kikuchi, "Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method", *Computer Method in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 71, pp. 197-224, 1988
- [2] D. N. Dyck and D. A. Lowther, "Automated Design of Magnetic Devices by Optimizing Material Distribution", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, no. 3, May 1996
- [3] S. Wang and J. Kang, "Topology Optimization of Nonlinear magnetostatics", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 2, pp. 1029-1032, 2002.
- [4] S. Wang and J. Kang, "Topology Optimization of Electromagnetic Systems with Two Materials", *IEEE CEFC 2002*, pp. 47, 2002.

표 2. 위상최적설계 및 재해석 결과

	초기모델	Case A	Case B	Case C
형상				
Iso-Flux line				
자석부피	1	0.4	0.4	0.4
토크	10.6 Nm	9.74 Nm	8.55 Nm	9.79 Nm
토크변화치		- 8.1 %	- 19.3 %	- 7.6 %