

진화전략을 이용한 BLDC 전동기 회전자 자극의 최적설계

이현국, 배병현, 김규태, 김상균, 권영안
부산대학교

Optimal Design of Rotor Pole of BLDC Motor Using Evolution Strategy

H K Yi, B H Bae, K T Kim, S K Kim and Y A Kwon
Pusan National University

Abstract - This paper presents the optimal design of a brushless DC motor(BLDC) keeping the average torque and cogging torque of the initial model while minimizing the volume of magnet pole by FEM and evolution strategy. Experimental tests are performed by the finite element method(FEM), and the random based evolution strategy is applied for the shape optimization. The optimal result shows a largely reduced volume of magnet pole.

최적 모델을 비교하여 그 타당성을 검증한다.

2. FEM을 이용한 BLDC 전동기의 토크계산

본 연구에서 제시한 최적설계의 설계사례로서 사용하는 상용 BLDC 모델의 제원 및 단면도는 각각 표 1 및 그림 1과 같다.

1. 서 론

Brushless DC(BLDC)전동기는 브러쉬가 없으므로 유지 보수가 간단하고, 회로류 자석과 같은 고에너지 밀도를 가지는 영구자석을 사용하여 고효율과 고�출력비 특성을 가지므로 여러 분야에서 사용이 증대되고 있다 [1],[2].

표 1. 해석모델의 제원

출 력	150 w	상 수	3상
경 력 전압	24 V	결 선	Y
회 전 수	1800 rpm	토크 상수	0.095 Nm/A
철 심 길이	40 mm	영구자석두께	5 mm
자 극 각	120 edeg	산류자속밀도	1.12 T
고정자 상저항	0.162 Ohm	선간인덕턴스	0.303 mH

본 연구는 BLDC 전동기에서 자석체적의 최소화를 위한 회전자 자극의 최적설계를 수행하는 연구이다.

제약조건을 가지는 비선형 문제의 최적화에 관한 연구로는 결정론적인 방법에서 제약조건을 페널티함수 및 배리어함수로 처리하여 무제약 비선형 문제로 변환하게 되며 최적화법으로 다차원 탐색법, 목적함수의 미분치를 요구하는 경사법 및 공액경사법, 그리고 목적함수 값에 의한 직접적인 방법으로 공액방향법 등이 있다. 목적함수의 미분치를 요구하는 경사법 및 공액경사법은 수렴이 빠른 속용성이 있으나 국지 최적화에 도달하는 취약성이 있으며 특히 FEM을 활용하는 최적설계에 있어서 목적함수의 경사를 구하는데 어려움이 따른다. 공액방향법은 보다 강인성을 가지나 수렴이 늦어 많은 FEM 반복계산을 요구한다[3],[4]. 확률론적인 방법으로서 최근에 신경회로망, 유전알고리즘, 진화알고리즘 등이 활용되고 있다. 이러한 방법들은 국지가 아닌 전체의 최적화에 수렴하는 확률이 높으나 수렴에 비교적 많은 평가가 수행된다 [5]-[8].

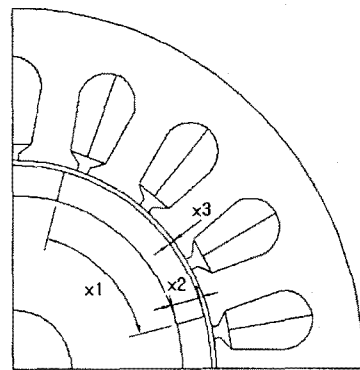


그림 1. 해석모델의 단면도

본 연구에서는 (1+1) 진화전략을 이용하여 국부탐색이 아닌 전역탐색에 의해 최적해를 구한다. 진화전략을 이용한 최적 설계는 속도도와 경험이 부족하더라도 최적의 해에 비교적 용이하게 접근할 수 있고, 복잡하고 다양한 시스템에 적용이 보다 용이하여 여러 분야에서 활용되고 있다.

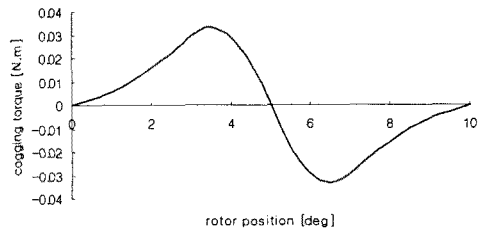


그림 2. 해석모델의 코깅토크 곡선

본 연구의 최적설계는 회로류계 영구자석을 이용한 상용 BLDC 전동기의 생산비용에 큰 영향을 미치는 회전자 자극의 형상에 중점을 두어 BLDC 전동기의 토크 출력 특성을 유지하면서 자극의 체적을 최소화하는 최적해를 진화전략과 FEM에 의해서 구하고, 최초 모델과

유한요소해석 프로그램인 FLUX2D를 이용하여 그림 1과 같은 BLDC 전동기에서 속도 1800rpm, 무부하의 조건으로 계산한 코깁 토크와 출력토크의 결과는 각각 그림 2 및 그림3과 같다. 여기서 코깁 토크의 첨두치는 0.0332 Nm, 평균 토크는 0.68059 Nm이고, 자극당 체적은 2375.05 mm³이다.

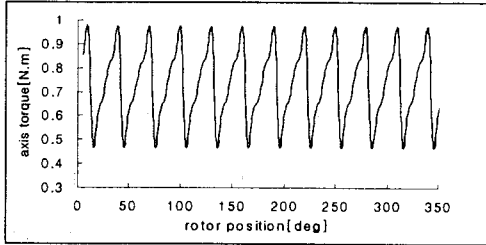


그림 3. 해석모델의 토크 곡선

3. 회전자 자극의 최적 설계

회전류 자석은 페라이트계 자석 또는 알니코계 자석에 비해 잔류 자속 밀도가 높고 보자력 또한 크므로 고효율 영구자석 전동기에 쓰여지나 다른 계열의 자석에 비해서 고가이므로 전체 생산 단가를 증가시키게 된다. 본 연구에서는 기존 모델을 이용하여 성능을 유지하면서 회전자 자극의 치수를 변화시켜 체적을 최소화 하는 최적설계를 수행한다.

그림 1에서 자석의 체적을 결정하는 요소에는 자극각 (x_1), 자극의 두께(x_2), 공극의 길이(x_3)가 있고 극당 체적은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{mag} = \frac{\pi l x_1}{360} [(R_i - x_3)^2 - (R_i - x_3 - x_2)^2] \quad (1)$$

여기서 R_i , x_3 , l 은 각각 고정자의 내부 반지름, 공극의 길이 그리고 자극의 축방향 길이이다.

식(1)의 자석체적을 최소화하는 제약조건으로서 설계치수의 제한과 함께 출력토크 및 코깁토크의 제한치를 기존모델의 토크 값으로 설정하였다.

본 연구에서는 진화전략에 의해 최적화를 수행하며, 진화전략의 구조로서 (1+1)_ES를 이용한다. (1+1)_ES는 1개의 부모 개체를 이용하여 부모 개체의 각 변수 값에 난수를 발생하여 돌연변이시킨 자손 개체를 만들고 이 중 더 나은 개체가 생존하여 다음 세대의 부모 개체가 되는 방식으로 알고리즘은 그림 4와 같다. 여기서 돌연변이 연산은 평균적으로 돌연변이가 1/5의 성공률을 보일 경우, 목적함수가 최적의 수렴률을 보이는 1/5 success rule을 수식화 하였다.

$$x' = x + \alpha(t)N(0,1) \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

$$\alpha(t) = \begin{cases} \alpha(t-n)/c & \text{if } P_m > 1/5 \\ \alpha(t-n)/c & \text{if } P_m < 1/5 \\ \alpha(t-n) & \text{if } P_m = 1/5 \end{cases} \quad (3)$$

본 연구에서 최적화를 위한 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

$$\text{Minimize } V_{mag} [mm^3]$$

$$\begin{aligned} \text{Subject to } & T_{ave} \geq 0.68059 [Nm] \\ & T_{cog(peak)} \leq 0.0332 [Nm] \\ & 40 < x_1 < 80 [\text{deg}] \\ & 2 < x_2 < 4 [mm] \\ & 0.4 < x_3 < 0.6 [mm] \end{aligned}$$

여기서, V_{mag} , T_{ave} , $T_{cog(peak)}$ 는 각각 자극의 체적, 평균 토크, 코깁 토크의 첨두치이다.

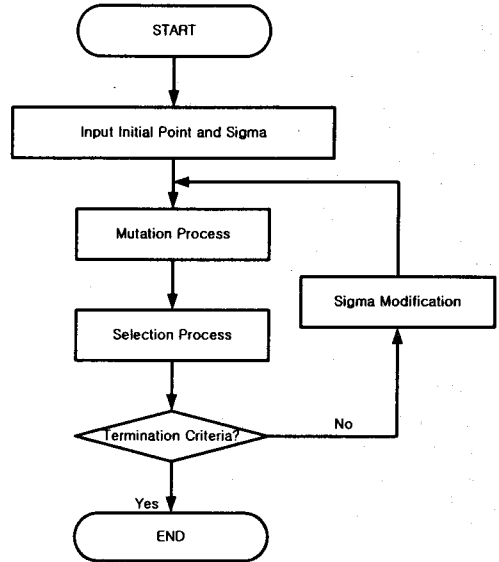


그림 4 (1+1)-ES 알고리즘

4. 설계사례 및 검토

본 연구에서 제시한 최적설계의 설계사례로서 사용하는 상용 BLDC 모델의 설계변수는 표 2와 같다.

표 2. 초기모델의 설계 변수

자극각(x1)	자극두께(x2)	공극의길이(x3)	자극체적
60 deg	3 mm	0.5 mm	2375 mm ³

본 연구에서 (1+1)_진화 전략을 이용하여 100세대 까지 설계 변수들을 변화시킨 뒤 그에 따른 응답을 FEM 해석에 의해 평균 토크와 코깁 토크를 구하고 식 (1)에 의해 극당 자석의 체적을 계산한 뒤 설계 변수의 변화에 따른 FEM 해석을 통해 구하고자하는 목적함수와 제약조건을 비교하여 가능해를 구하였다. 그림5는 본 연구에서 진화전략에 의한 최적화를 수행하여 얻어진 자극의 체적에 대한 100세대까지의 수렴도를 나타낸다. 100세대까지의 진화전략을 이용하여 얻어진 최적화 모델의 설계 변수는 표3과 같고, 초기모델과 최적모델에서의 회전자의 형상은 그림 6과 같다. 여기서 점선으로 된 형상이 초기모델이고 회색영역이 최적화된 자극의 영역이다. 자극의 체적은 1778.76 mm³ 으로서 초기 모델에 비해 25.1%가 감소하였다.

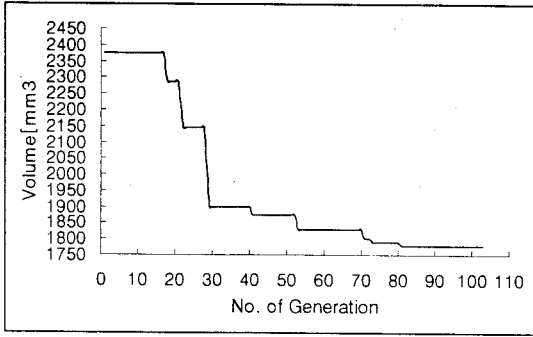


그림 5 진화 전략을 이용한 수렴도 파악

표 3. 최적화 모델의 설계 변수

자극각(x1)	자극두께(x2)	공극의 길이(x3)	자극체적
64.47[deg]	2.038[mm]	0.495[mm]	1778.76[mm³]

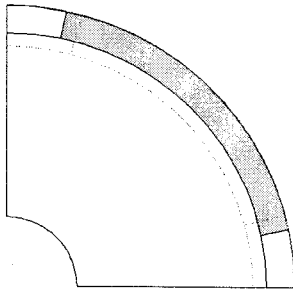


그림 6. 초기모델과 최적모델에서의 회전자 형상

그림 7은 상에서 얻어진 최적모델에서 무부하의 조건아래 FEM에 의해 구한 코깅토크 곡선을 나타내며 기존모델의 코깅토크 제약조건이 잘 만족됨을 보인다. 그림 8은 상에서 얻어진 최적모델에서 FEM에 의해 구한 출력 토크 곡선을 나타내며 기존모델의 토크제약조건이 잘 만족됨을 보인다.

최적화된 모델의 평균토크는 0.74338Nm로서 9% 증가하였고, 코깅토크는 0.0235Nm로서 초기 모델의 코깅 토크에 비해 29.2% 감소하였다.

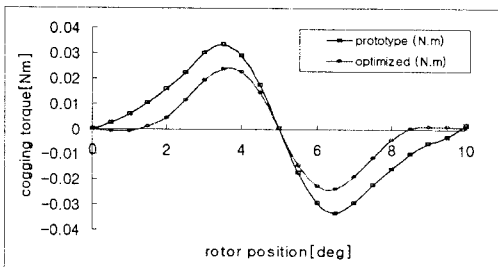


그림 7 해석모델과 최적화모델의 코깅토크 곡선

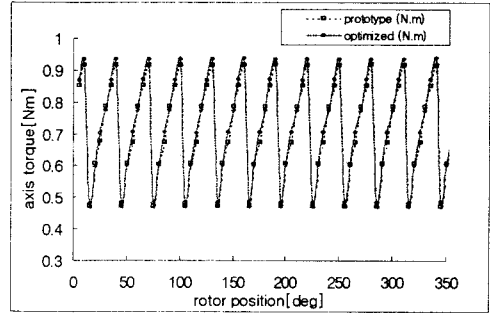


그림 8 해석모델과 최적화모델의 토크 곡선

5. 결 론

본 연구는 BLDC 전동기에서 자석체적의 최소화를 위한 회전자 자극의 최적설계를 수행하는 연구이다. 본 연구에서 BLDC 전동기의 회전자 자극에 대하여 회전자 자극각, 자극의 두께, 공극으로 설계변수를 설정하였다. 전동기 설계모델에서 코깅토크 및 출력토크 계산은 유한요소법을 이용하여 수행하였다.

최적화 기법으로서 (1+1)_ES를 이용하여 100세대까지 설계 변수를 변화시켜 제약 조건을 만족시키는 최적해를 구하였으며 진화 전략에 의한 최적화의 수렴속도를 증가시키기 위해 success rule을 적절히 적용하였다.

본 연구에서 수행한 최적화에서 자극의 체적이 초기 모델에 비해 25.1%가 감소하는 결과를 나타내었으며 최적해 또한 정밀도에 영향을 미치지 않는 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] J F Gieras and M Wing, *Permanent Magnet Motor Technology*, Marcel Dekker Inc. 1997.
- [2] T J E Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, Oxford Univ. Press, 1994.
- [3] M S Bazaraa, H D Sherali, and C M Shetty, *Nonlinear Programming : Theory and Algorithms*, 2nd Ed, Wiley, 1993.
- [4] E K P Chong and S H Zak, *An Introduction to Optimization*, Wiley, 2nd Ed, 2001
- [5] Hideo Yamashita, Norio Kowata, "Direct Solution Method for Finite Element Analysis Using Hopfield Neural Network", IEEE Trans on Magnetics vol.31, no.3, pp.1964-1967, 1995.
- [6] N Ansari and E Hou, *Computational Intelligence for Optimization*, Kluwer Academic, 1997.
- [7] M Gen and R Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, Wiley, 1997.
- [8] K Preis, C Magele, and O Biro, "FEM and Evolution Strategies in the Optimal Design of Electromagnetic Devices," IEEE Trans on Magnetics, vol.26, no.5, pp.2181-2183, 1990.