

Taguchi 방법과 FEM을 이용한 BLDC 전동기 회전자 자극의 최적설계

김지현, 이현국, 권영안
부산대학교

Optimal Design of Rotor Pole of BLDC Motor Using Taguchi Method and FEM

J. H. Kim, H. K. Lee and Y. A. Kwon
Pusan National University

Abstract - This paper presents the optimal design of BLDC motor keeping the average torque and cogging torque of the initial model while minimizing the volume of magnet pole by FEM and Taguchi method.

Experimental tests are performed by Finite element method, and the second order polynomial equations are obtained from FEM results due to design parameter variation referred to orthogonal arrays by Taguchi. The presented optimization shows a big reduction of computation time and a largely reduced volume of magnet pole.

산업현장에 널리 쓰이는 통계학적, 수학적 방법으로서는 본 연구에서는 응답표면을 기술하는 해석적인 근사함수로서 2차의 다항식 함수를 설정하였으며 실험회수를 크게 감소하는 Taguchi 방법에 의한 직교배열 조합을 이용해 설계변수의 변화에 따른 응답을 구하여 응답 표면 근사함수를 결정하였다.

본 연구에서는 상기한 최적화법을 적용하여 BLDC 전동기의 토크출력 및 맥동 특성은 유지하면서 자극의 체적을 최소화하는 최적해를 구하고 최초모델과 최적화된 모델을 비교하여 그 타당성을 입증한다.

1. 서론

Brushless DC(BLDC)전동기는 브러시가 없으므로 유지 보수가 간단하고 회로류 자석과 같은 고에너지 밀도를 가지는 영구자석을 사용하여 고효율과 고회전비 특성을 가지게 된다. 그러나 영구자석은 가격이 높아 전동기의 생산 비용을 증가시킨다. BLDC 전동기의 설계에서 많이 활용되는 FEM은 비교적 고정도의 설계치수 산정이 가능하나 많은 계산 시간을 필요로 한다. 따라서 전동기의 최적 설계에 있어서 FEM 반복계산의 회수를 감소하는 문제는 시뮬레이션의 비용 감소 및 시간 단축을 위한 문제가 된다.

본 연구는 BLDC 전동기에서 자석체적의 최소화를 위한 회전자 자극의 최적설계를 저비용으로 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. 확률론적인 방법으로서 최근에 신경회로망, 유전알고리즘, 진화알고리즘 등이 활용되고 있다. 이러한 방법들은 국지가 아닌 전체의 최적화에 수렴하는 확률이 높으나 수렴에 많은 평가가 수행된다.

상기한 최적화 방법을 전동기 설계에 적용하는 여러 연구가 수행되었으나 많은 반복 계산으로 설계과정에 어려움이 따른다. 최근에 이러한 어려움을 극복하는 연구가 관심을 가지게 되었으며 방법으로서 목적함수를 해석적인 근사로서 단순화하고 이로부터 최적해를 구하는 연구가 수행되었다.[1],[2] 본 연구에서는 이와 같은 방법으로 연구된 Taguchi 표에 의한 응답표면법을 활용하여 BLDC 전동기의 회전자 자극의 최적설계를 저비용으로 수행한다.

응답표면법(Response Surface Methodology, RSM)은

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.

표 1 해석모델의 제원

출 력	150[w]	상 수	3[상]
정 격 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]	잔류자속밀도	1.12[T]
고정자 상저항	0.162[Ohm]	선간인덕턴스	0.303[mH]

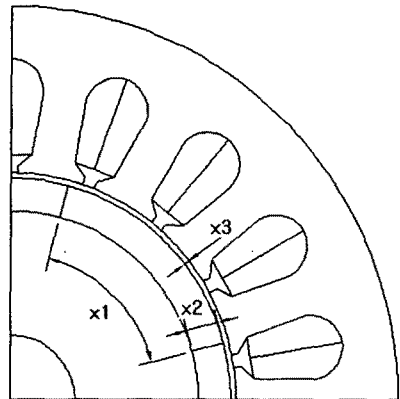


그림 1. 해석모델의 단면도

유한요소해석 프로그램인 FLUX2D를 이용하여 그림 1

과 같은 BLDC 전동기에서 속도 1800rpm, 무부하의 조건으로 계산한 코깅 토크와 출력토크의 결과는 각각 그림 2 및 그림3과 같다.

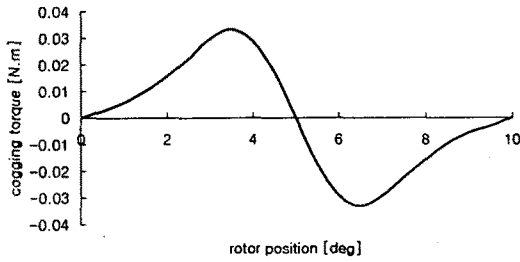


그림 2. 해석모델의 코깅토크 곡선

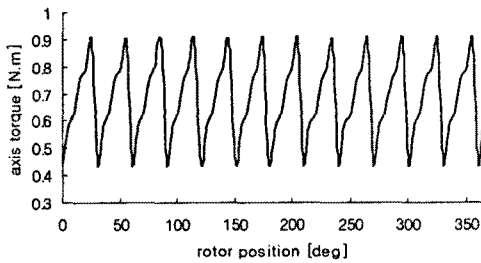


그림 3. 해석 모델의 출력토크 곡선

여기서 코깅 토크의 첨두치는 0.0332 Nm, 평균 토크는 0.68059 Nm이고, 자극당 체적은 2375.05 mm³이다.

3. 회전자 자극의 최적 설계

회로류 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 변화 시켜 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 코깅토크의 제한치를 기존모델의 토크 값으로 설정하였다.

본 연구에서 BLDC 전동기의 토크출력 및 맥동특성을 유지하면서 식(1)의 자석체적을 최소화하기 위하여 출력토크 및 코깅토크의 제약함수를 해석적인 근사로서 단순화하고 간단화된 최적화 문제로부터 최적해를 구하게 된다. 이러한 최적화 기법을 사용함으로써 FEM 반복계산의 회수를 크게 감소하여 시뮬레이션의 비용감소 및 시간단축을 달성하며 FEM에 의해 야기되는 미분의 어려움을 해소하게 된다.

첫 단계로서 제약함수를 해석적인 근사로서 단순화하기 위하여 Taguchi 표에 의한 응답표면법을 활용하여

근사함수를 결정한다. 응답표면법은 성능 또는 제품의 특성에 큰 영향을 미치는 다수의 입력 변수를 가지는 시스템에서 품질 향상을 위한 기법으로 유용성이 입증된 방법이다. 본 연구에서는 다음과 같은 2차의 다항식 함수로서 응답표면을 근사화한다.

$$y = f(x_1, x_2, x_3) = a_0 + \sum_{i=1,2,3} a_i x_i + \sum_{i,j=1,2,3} a_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

식(2)와 같은 응답표면을 형성하기 위한 실험회수는 예를 들어 3개 변수, 3개 레벨에서 $3^3 = 27$ 번이 된다. 이러한 종류의 설계는 전계승설계가 되며 설계변수가 증가하면 매우 큰 실험회수가 요구되고 FEM에 의한 반복계산에 많은 시간이 소요된다. 따라서 실험회수의 감소를 위한 부분계승설계로서 Taguchi 방법에 의한 직교계승설계가 많이 활용되고 있다. 본 연구에서 사용하는 3개 변수, 3개 레벨에서 실험회수가 9번이 되는 Taguchi의 L9 직교배열은 다음과 같다.

표 2. L9 직교 배열표

	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

다음 단계로서 간단화한 제약조건 아래에서 식(1)과 같은 목적함수가 자석체적이 되는 최적해를 구한다.

4. 설계사례 및 검토

본 연구에서 제시한 최적설계의 설계사례로서 사용하는 상용 BLDC 모델의 설계변수는 표 3과 같다.

표 3. 초기모델의 설계 변수

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

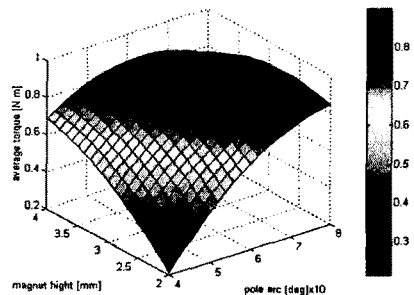


그림 4. 토크 응답표면 ($x_3 = 0.5\text{mm}$ 인 경우)

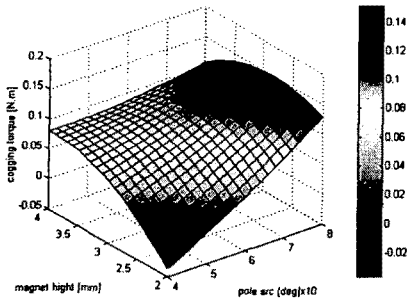


그림 5. 코깅토크 응답표면 ($x_3 = 0.5\text{mm}$ 인 경우)

Taguchi L9 직교배열을 적용하여 설계 변수들을 변화시킨 뒤 그에 따른 응답을 FEM 해석에 의해 평균 토크와 코깅 토크를 구하는 총 9번의 FEM 해석으로부터 얻어진 응답표면이 그림 4 및 그림 5와 같다.

각 설계변수의 레벨 변화에 따른 코깅토크의 변화, 평균토크의 변화, 자극체적의 변화는 각각 그림 6, 7, 8과 같다.

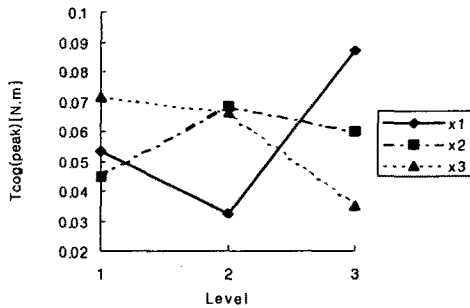


그림 6. 설계변수 변화에 따른 코깅토크의 변화

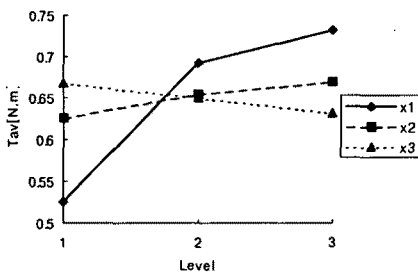


그림 7. 설계변수 변화에 따른 평균토크변화

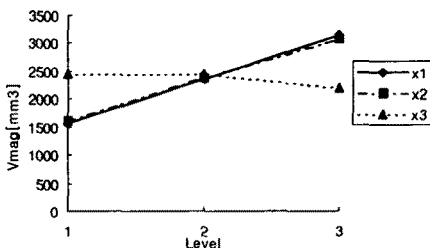


그림 8. 설계변수 변화에 따른 자극체적의 변화

다음으로 최적해를 구하기 위하여 목적함수와 제약조건을 다음과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} \text{Object function: } & \text{minimize } V_{mag} [mm^3] \\ \text{subject to } & : T_{average} \geq 0.68059 [Nm] \\ & T_{cog(peak)} \leq 0.0332 [Nm] \\ & 40 < x_1 < 80 [\text{deg}] \\ & 2 < x_2 < 4 [mm] \\ & 0.4 < x_3 < 0.6 [mm] \end{aligned}$$

여기서, V_{mag} , $T_{average}$, $T_{cog(peak)}$ 는 각각 자극의 체적, 전동기의 평균토크, 전동기 코깅토크의 첨두치이다.

제약조건이 있는 최적해를 구하기 위해 통계 소프트웨어인 MS-Excel의 macro 기능을 이용하였으며 그 결과는 표 4와 같다. 최적모델에서 자극의 체적은 1792.33mm^3 로 초기 모델에 비해 24.5%가 감소하였다.

표 4. 최적화 모델의 설계 변수

자극각(x1)	자극두께(x2)	공극의길이(x3)	자극체적
66.28[deg]	2[mm]	0.533[mm]	1792.33[mm ³]

그림 9는 상기에서 얻어진 최적모델에서 FEM에 의해 구한 토크 곡선을 나타내며 기존모델의 토크제약조건이 잘 만족됨을 보인다. 그리고 최적모델에서 평균 토크 및 코깅 토크는 각각 0.0319Nm, 0.6701Nm로서 2차 다항식으로 근사된 제약함수와 각각 3.92%, 1.54%의 미소한 오차를 나타내었다.

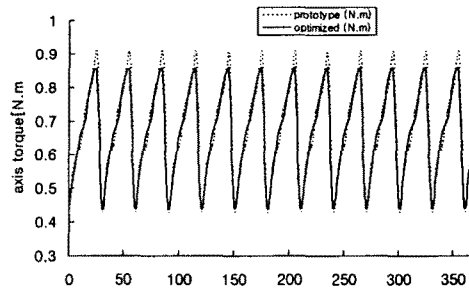


그림 9. 최적모델과 기존모델에서의 출력 토크

5. 결 론

본 논문은 BLDC 전동기의 회전자 자극의 최적설계에 관한 연구이다.

Taguchi 표에 의한 응답표면법을 이용하여 최적화를 위한 FEM 반복계산의 시간을 현저하게 감소시킬 수 있었으며 최적해 또한 정밀도에 크게 영향을 미치지 않는 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서 제시한 최적화에서 자극의 체적이 초기 모델에 비해 24.5%가 감소하는 결과를 나타내었다.

(참 고 문 헌)

- [1] R. H. Myers, D. C. Montgomery, *Response Surface Methodology*, Wiley, 1995.
- [2] Edwin B. Dean, "Taguchi approach to design optimization for quality and cost: an overview", *International Society of Parametric Analysis, Annual Conference*, 1991.