

IPM type BLDC 전동기의 코깅토크 저감을 위한 Hybrid 최적설계

황규윤*, 이상봉**, 권병일*
*한양대학교, **성균관대학교

Hybrid method for design of IPM type BLDC Motor to reduce cogging torque

Kyu-yun Hwang*, Sang-bong Rhee**, Byung-il Kwon*
*Hanyang University, **Sungkyunkwan University

Abstract - A hybrid optimization method is proposed for cogging torque reducing in BLDC motor. The proposed hybrid optimization method comprises a response surface method (RSM) and a gradient search method (GSM). The RSM is effective and global method in optimization problem but having large approximation error. The GSM is accurate and fast search method for optimal solution but having local behavior. To reduce approximation error and computation time a hybrid method (RSM+GSM) is proposed method. To illustrate the effectiveness of the proposed method, a comparison between conventional RSM and the proposed hybrid method is made. A simulation results verify that the hybrid method can achieve favorable design performance.

1. 서 론

BLDC 전동기의 RSM을 이용한 최적설계기법은 잘 알려져 있는 방법 중 하나이다 [1-2]. 이 기법에서 고려해야 할 중요한 요소는 변수들의 공간을 mapping 하는 함수들을 이용해 시뮬레이션 데이터를 fitting 할 수 있는, 상대적인 정확도이다. RSM은 초기 시스템을 대신해 근사화된 함수들을 사용하며 매우 효과적이고 전역적인 탐색기법이라는 장점을 갖는다. 반면 반응값이 매우 복잡한 경우에는 비교적 큰 근사적인 에러를 갖는다. 이로 인해 RSM에서는 신뢰할 만한 최적화 기법을 위해 변수들의 영역들의 zoom-in 기법 또한 필요하다[3-4]. 또한 RSM의 최적화 문제 적용에 있어서는 다 목적 함수와 제약 조건들에 대한 처리가 미흡한 단점을 갖는다. 이러한 단점을 보완하기 위해 GSM을 적용하는데, 일반적으로 이는 최적화문제에서 보다 정확하고 빠른 최적해를 보장한다. GSM은 목적함수의 미분정보를 이용해 최적해를 검색하며, 수렴속도가 검색영역에서의 초기 점에 의존하는 단점을 갖는다[5]. 본 논문에서는 반응값이 매우 복잡한 RSM구성단계에서 근사적인 에러와 실험의 계산시간을 줄이고, 수렴속도를 감소 및 제한조건 또는 다목적 목적함수의 최적화를 수행하기 위해, RSM과 GSM을 이용한 효과적인 최적화 기법을 제안한다. 또한 제안한 최적설계기법을 자속집중형 spoke type BLDC 전동기의 코깅 토크 저감에 적용시킴으로써 제안한 방법의 타당성을 검증한다.

2. 회전자 극 형상 설계에 대한 hybrid 최적화설계

2.1 설계변수 설정

자속집중이라는 특징 및 고 출력 고 토크에 유리한 IPM type 전동기 중 영구자석이 회전자 내부에 세로로 매입된 형태의 spoke형 BLDC 전동기는 그림 1과 같다. 이 전동기의 사양은 표 1과 같다. 전동기를 최적설계하

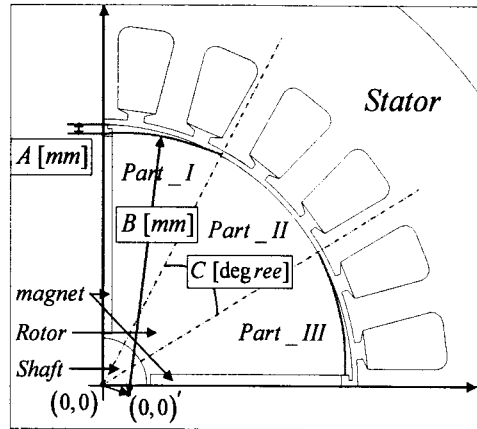


그림 1 회전자 극의 설계변수

표 1 IPM type BLDC 전동기의 설계사양

구분	사양
정격출력 [W]	120
정격속도 [rpm]	3000
극수/슬롯수 [pole/slots]	4/24
공극길이	0.7
권선형태	분포권
Br [T]	1.1

기 앞서 최적화하는 목적함수가 정해져야 하며, 본 논문에서는 spoke type BLDC 전동기의 효과적인 코깅 토크의 저감, 토크특성 및 기전력 특성의 개선에 초점을 둔다. 여기서 목적함수로 정한 코깅 토크는 1차측 여자원인 고정자와 2차측 여자원인 영구자석과의 상호작용에 의해서 발생하는 토크를 말하는데, 이는 전동기의 동작특성을 저해시키는 주 요인으로 작용한다[2]. 코깅 토크의 크기에 영향을 주는 설계변수들은 다음과 같다.

- 고정자 치의 형상
- 슬롯 개구폭
- 공극길이
- 영구자석의 pole-arc to pole-pitch의 비
- 영구자석 형상
- 자화분포
- 고정자 teeth나 영구자석의 skew

여기서, 영구자석이나 고정자 치에 스큐를 이용한 방법은 다른 방법에 비해 동작토크의 큰 보상없이 코깅 토크를 줄이는 효과적인 방법 중 하나이다. 그러나 이는

축방향 진동을 야기시키는 축방향 자기력을 발생시킨다. 본 논문에서는 spoke type BLDC 전동기의 효과적인 코깅 토오크의 저감을 위해 회전자 d-축의 arc형상을 최적화한다. 공극에서 정현적으로 분포된 자속밀도 파형을 갖는 경우 영구자석위에서의 자기적 포화를 효과적으로 줄이고 자속을 집중 시킬 수 있는 장점을 갖는다. 이러한 사실로부터 효과적으로 코깅 토오크를 줄이고, 역기전력의 왜형률을 줄이는 것이 가능하다. 좀 더 정현적인 공극자속밀도를 얻기 위해 회전자의 극 형상을 설계 변수로 정하고 최적화를 실시한다. 그림1에서는 3개의 설계변수 A, B, C를 보여준다. 여기서, 설계변수 A는 자석의 끝단에서 회전자 바깥까지의 길이이고, 설계변수 B는 원의 중심(0,0)에서 불균일한 공극을 갖는 표면(part_I,III)까지의 반경, 설계변수 C는 일정한 공극길이를 갖는 부분(part_II)에서의 각도이다. 설계변수를 결정한 후, 최적설계를 위해 비선형 수치해석(2D FEM)과 RSM, GSM을 이용한다.

2.2 반응표면법 (RSM)

RSM은 일반적으로 2nd의 다항식을 근사함수로서 사용한다. 중심합성계획법(CCD: Central Composite Design)를 이용하며, 근사화 함수는 다음과 같이 주어진다 [4].

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^3 b_j x_j + \sum_{j=1}^3 b_{jj} x_j^2 + \sum_{j=1}^3 b_{jj} x_j^2 + error \quad (1)$$

본 논문에서 사용된 y 는 코깅 토오크의 크기를 나타내며, x_1, x_2, x_3 는 설계변수 A, B, C를 각각 decode한 변수들이다. 근사적인 함수의 정확성을 증명하기 위해, 결정계수 R^2 은 다음과 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST}$$

$$SST = \sum_{u=1}^N (Y_u - \bar{Y})^2 \quad SSR = \sum_{u=1}^N (\hat{Y}_u - \bar{Y})^2 \quad (2)$$

N 은 CCD의 전체실험수이며, Y 는 FEM을 통해 얻은 실제 반응값, \bar{Y} 는 평균값, \hat{Y} 는 근사화한 식에 의한 반응값이다.

2.3 기물기경사법 (GSM)

GSM은 최적해 탐색의 단계에서 목적함수 감소의 최대효과를 얻기 위해 step size를 미분정보를 이용해 결정하며 미분정보를 이용하기 때문에 지역적 최적해의 탐색에 장점을 갖고 있는 알고리즘이다. 그러나 지역적 최적해로 수렴해 버리는 단점을 갖고 있으며 이를 해결하기 위해 적절한 초기해를 선택하여 적용해야 한다.

2.4 Hybrid 최적설계 (GSM+RSM)

RSM을 적용하는 과정에서 변수들의 영역 크기와 이 영역에서의 결정계수 R^2 의 정도는 매우 중요하다. 만약 R^2 이 허용할 수 없는 단계라면, 보다 적은 범위를 갖는 다른 CCD들이 필요하다. 그러나 새로운 CCD와 변수들의 범위를 좁히는 과정에서 보다 많은 시간을 소요하게 된다. 이를 저감시키기 위해, RSM과 GSM을 이용한 하이브리드 최적설계기법을 제안한다. GSM은 지역적 검색기법이고 search 알고리즘에 대한 미분정보를 사용한다. 이는 최적화 문제에서 매우 빠르고 정확한 해를 제공하지만 최적해의 수렴은 초기 값에 의존한다는 단점을 갖는다. Hybrid 최적화 기법은 2개의 단계로 구성되어지며, 첫 번째 단계는 전형적인 RSM을 통해 회귀함수를 근사화하는 것이고, 두 번째 단계는 RSM 결과로부터 얻어진 초기변수들의 최적해를 GSM을 이용하

여 찾는다. 만약 R^2 가 허용가능한 정도가 아니라면 RSM의 초기 검색 영역은 GSM에 의해서 줄어(cut-off)든다. 이 반복과정은 R^2 가 허용가능한 단계에 도달하였을 때까지 수행되어진다.

3. 최적화 과정

RSM에서 코깅 토오크는 목적함수로서 사용되어진다. 토오크 리플, 평균 토오크, 효율들은 제약함수로서 쓰인다. RSM의 최적값은 GSM의 초기값으로써 적용되어진다. CCD는 설계변수가 3개일때 cube형태로 전체적으로 15실험을 하며, cube의 모서리에서는 8개, 축점은 6번, cubic의 중심점은 한번 실행한다[2]. 회전성으로 고려해서, α 는 1.682로 정하였다. 표 2는 설계변수와 decode된 변수들을 보여준다. 그림 2는 RSM과 GSM을 이용하였을 때의 순서도를 보여준다. GSM은 RSM의 정확도를 만족시키기 위해 설계변수 범위를 재결정하는 반복구간과 RSM을 이용한 최적해를 구하는 단계에서 GSM을 적용하며, 전체적으로 목표 정확도를 만족하는 RSM의 구성을 하는 소요시간(part A)과 RSM의 최적해를 구하는 부분(part B)에 적용시킨다.

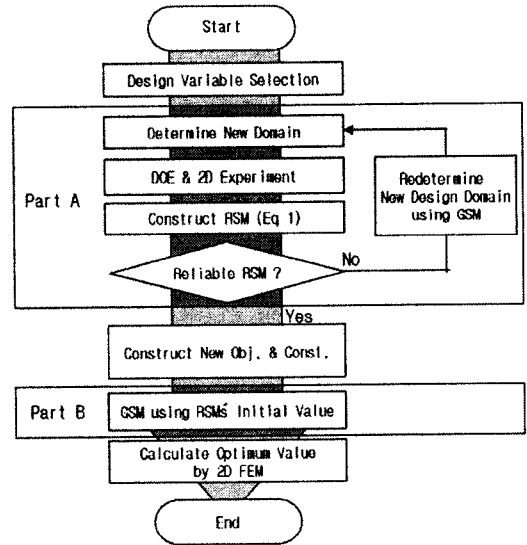


그림 2 Hybrid 최적화 기법의 순서도

표 2 설계 변수

설계변수	CCD의 설계변수의 레벨				
	- α	-1	0	1	α
A 자석끝단길이	1.73	1.68	1.63	1.58	1.53
B part I, III_R	28.3	32.3	36.3	40.3	44.3
C part II_각도	27	36	45	54	63

RSM과 GSM을 적용한 최적설계기법은 다음과 같이 2가지 경우(Case 1, Case 2)로 나누어 비교한다. 첫 번째 경우는 코깅 토오크만을 고려하였고(Case 1), 두 번째는 목적함수(코깅 토오크)와 제한조건(평균 토오크, 토오크 리플, 효율)을 고려하여 최적설계를 시행하였다(Case 2).

Case 1:

Min : $Y(x)_{avg}$

$X_{iL} \leq x_i \leq X_{iU}$, X_{iL} : lower bound, X_{iU} : upper bound

Case 2:

Min : $Y(x)_{cogg}$

S.t: $Y(x)_{ripple} \leq 0.18$, $Y(x)_{average} \leq 0.365$, $Y(x)_{eff} \leq 87$

4. 결과 및 해석

표 3에서는 Case 1의 결과를 보여준다. Hybrid 최적화 기법에 의한 코깅 토오크 저감은 초기모델에 비해 약 91.65%, RSM에서는 88.92% 각각 저감되었다. 또한, Hybrid 최적화기법에서는 CCD가 단지 2번만 필요한 반면 비슷한 결과를 갖는 RSM은 많은 CCD가 필요하였다. Case 1에서는 GSM을 적용한 RSM이 최적해를 찾는 과정에서 여러 장점을 갖는다는 것을 확인할 수 있었고, 이 결과를 통해 GSM을 이용해 제한조건을 새로 구성하여 최적화를 실행하였으며, 이 결과는 표 4에서 보여주고 있다. Hybrid 최적화기법에 의한 코깅 토오크 저감은 대략 90.96%이며, 모든 제한조건들을 만족한다. 반대로 RSM은 제한조건를 만족하지 못한다. 처음 구성된 RSM은 어느 정도 만족할 만한 정확도를 갖기까지 반복 수행하였으며, 식 (4)와 그림 3은 최종으로 얻은 2차 회귀방정식 과 반응표면을 각각 보여준다. 이때의 2차 회귀방정식의 결정계수 R^2 는 0.951을 갖으며, 이는 여기서 구성된 2차 회귀방정식이 어느 정도 높은 정확도를 갖는다는 알 수 있다. 그림 4에서는 코깅 토오크만을 고려하였을 때, 일반적인 RSM기법을 이용해 얻은 결과와 hybrid 최적화 기법을 이용해 얻은 결과를 2D FEM 해석결과로써 각각 보여준다. 이 그림으로부터 hybrid 최적화 기법이 최적점을 찾는 데 보다 높은 정확성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

표 3 Case 1의 결과

	A	B	C	Tcogg(FEM)	Total CCD
Initial	0.70	33.30	87.60	0.26	-
RSM	0.57	35.48	30.95	0.0288	5
Hybrid	0.54	38.00	30.78	0.0210	2

표 4 Case 2의 결과

설계변수	Initial	Hybrid
A-B-C	0.7-33.3-87.6	0.54-36.55-31.11
T_cogg	0.26	0.0235
T_ripple	0.3382	0.1799
T_average	0.3946	0.3668
Efficiency	84.48	87.0

$$y_{cogg} = 0.0259 + 0.0028A - 0.0028B - 0.0073C + 0.0004A^2 + 0.0007B^2 - 0.0100C^2 - 0.0001A*B + 0.0000A*C - 0.0009B*C \quad (4)$$

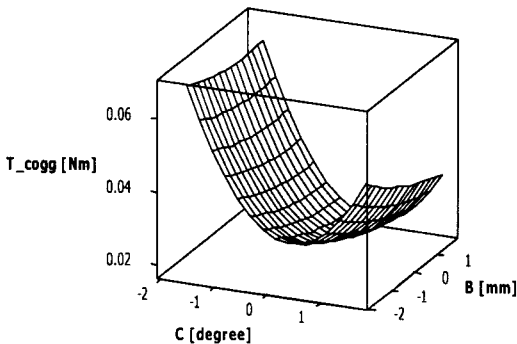


그림 3 변수 B, C에 대한 코깅 토오크 반응값 (A=-1)

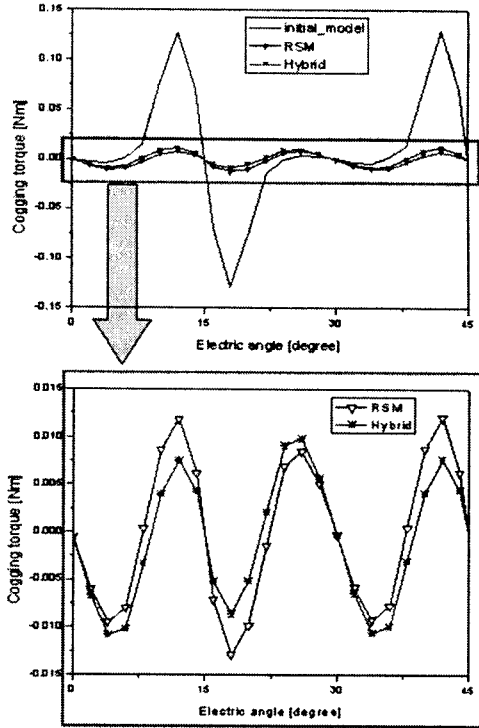


그림 4 코깅 토오크 파형 비교

5. 결론

본 논문에서는 IPM type BLDC 전동기 중 자속집중이라는 특징을 갖는 spoke type BLDC 전동기의 효과적인 코깅 토오크 저감을 위해 RSM과 GSM의 하이브리드 최적화 기법을 제안하였다. 제안한 hybrid 최적화 기법의 유효성은 2D FEM 시뮬레이션 결과로부터 검증하였다. 일반적인 RSM 기법과 비교하여, 제안한 하이브리드 최적화 기법이 보다 정확성과 수렴속도에서 장점을 갖는다는 것을 보였다. 2D FEM 해석결과로써 hybrid 최적화기법이 실험 및 계산시간 면에서 매우 효과적일 것으로 사료된다.

[참고 문헌]

- [1] J. T. Li, Z. J. Liu, M. A. Jabbar, and X. K. Gao, "Design Optimization for Cogging Torque Minimization Using Response Surface Methodology", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 40, No. 2, pp.1176-1179, March, 2004.
- [2] A. I. Khuri and J. A. Cornell, "Response surface: Design and Analyses", New York, NY: Marcel Dekker, Inc., 1996.
- [3] X. K. Gao, T. S. Low, Z. J. Liu, S. X. Chen, "Robust Design for Torque Optimization Using Response Surface Methodology", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 38, No.2, pp.1141-1144, March, 2002.
- [4] Z. Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, N. Schofield, D. Howe, "Reducing of Cogging Torque in Interior-Magnet Brushless Machines", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.39, No.5, September, 2003.
- [5] E. K. P. Chong, S. H. Zak, "An Introduction to Optimization", John Wiley & Sons, Inc., 1995.