

RSM을 이용한 대용량 BLDC 전동기의 영구자석의 최적화 연구

김한돌¹, 신판석¹, 박관수², 김동석²
¹홍익대학교 전기공학과, ²부산대학교 전기공학과

A magnet pole shape Optimization of the Large scale BLDC Motor by using RSM

Han-Deul Kim¹, Pan-Seok Shin¹, GwanSoo Park², Dong-SoK Kim²
¹Hongik University, ²Pusan National University

Abstract - 대용량 BLDC 모터의 진동 및 소음의 원인은 영구자석과 슬롯 개구부 형상에 의한 코깅토크와 전류 파형에 의하여 발생하게 된다. 특히 대용량 BLDC의 경우 코깅토크에 의한 진동 및 소음의 영향이 상대적으로 큰 값을 가지게 된다. 따라서 코깅토크 발생원인 중 하나인 영구자석의 형상에 RSM(Response Surface Method) 최적화 이론을 적용하여 코깅토크 저감을 연구하였다. FEM과 RSM을 결합하여 영구자석의 형상을 최적화한 결과 코깅토크의 ripple이 25%이상 감소되었다.

1. 서 론

추진용 전동기의 진동 및 소음원으로는 기계적인 원인, 전자기적인 원인, 공기역학적인 원인이 있다. 그러나 추진용 전동기는 대부분 저속으로 구동되므로 추진용 BLDC 전동기 같은 경우 상대적으로 전자기적인 원인에 의한 진동 및 소음에 주원인이다. 전동기의 코깅 토크(Cogging torque)가 소음 및 진동의 주원인이므로 이러한 코깅 토크를 FEM을 이용하여 해석하고 이를 분석하여 전동기의 코깅 토크를 저감시킬 수 있도록 전동기의 설계변경에 관한 방법을 연구한다.

BLDC전동기 특성상 일반적으로 타 전동기에 비하여 전력밀도, 관성모멘트에 대한 토크 비, 단위전류 당 토크 비 등이 더 높은 고효율의 전동기임에도 불구하고 추진용 모터는 일반적으로 저속 구동됨에 따라 상대적으로 큰 코깅 토크가 발생된다.

이러한 문제점들을 보완하기 위하여 영구자석의 형상에 따라 발생하는 코깅토크의 저감을 위해 최적화 기법중 하나인 RSM(Response Surface Method)을 적용하여 연구하였다.

2. 관련 이론

설계 변수에 따른 설계의 응답함수 F는 알 수 없고, 복잡하다. RSM은 설계 변수와 응답관계를 통계학적인 방법으로 찾아내는 방법으로 근사화 하여 최적화를 하는 방법이다.

영구자석을 포함한 자계문제는 다음 식 (1)의 지배방정식에 따라 해석된다.

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J_s + \nu_0 \nabla \times B, \tag{1}$$

그리고 최적화에 따른 목적함수의 줄이는 것은 식 (2)에서와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } F([p]) = F([p], [A]) \\ & \text{subject to } [p]^L \leq [p] \leq [p]^U \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, [p]와 [A]는 형상의 최적화를 위한 디자인 변수와 상태 변수 벡터이다. 설계 변수에 관한 목적 함수의 비선형의 설계 감도는 유한 요소 공식화에 식 (3)과 같이 기초를 두어 얻을 수 있습니다.

$$\frac{dF}{d[p]^T} = \frac{\partial F}{\partial [p]^T} + \lambda^T \frac{\partial F}{\partial [p]^T} ([f] - [\bar{K}][A]) + \frac{\partial \nu}{\partial B^2} \frac{\partial B^2}{\partial [p]^T} [K][\bar{A}] \tag{3}$$

여기서, [λ]는 수반행렬변수이고, [Ā]는 식 (1)의 비선형 계산결과이다. 대리 목적 함수의 구축에서 설계 변수는 그러한 가능 영역의 점으로부터 몇개의 서브 섹션에 분할되고, 대응하는 목적 함수 값 및 설계 감도는 식 (2)와 (3)을 사용해 계산된다. 대리 목적 함수는 다음과 같이 CI의 연속화하여(Hermite의 다항식)을 구분 사용해 계산 된다.

$$F_s([p]) = \sum_{k=0}^n \left[f_k \alpha_k([p]) + \sum_{m=1}^{N_p} f^{k,m} \beta_{k,m}([p]) \right] \tag{4}$$

여기서, f_k와 f^{k,m}는 목적함수 값의 설계 민감도이고, n은 subsection의 개수이고, α와 β는 허미트 보간법의 기본 함수이고, N_p는 설계변수의 개수이다. 단지 1개의 설계 변수를 가지고 있으면, 대리 목적 함수는 k-th번째 서브 섹션으로, 시료 채취 장소(x_k 및 x_{k+1})에서 목적 함수 값 및 설계 감도를 아래 식 (5)와 같이 이용하는 기저 함수의 점으로부터 표현할 수 있다.

$$F_{s,k}(x) = f_k \alpha_k + f_{k+1} \alpha_{k+1} + f'_k \alpha_k + f'_{k+1} \alpha_{k+1}, x \in (x_k, x_{k+1}) \tag{5}$$

설계 변수의 수가 증가하는 경우, 대리 목적 함수는 샘플링 안의 목적 함수 값과 설계 감도의 구분적으로

patch해서 해석한다.

다음 그림 1은 RSM 최적화 흐름도이다. 다음과 같은 흐름으로 최적 지점을 계산한다.

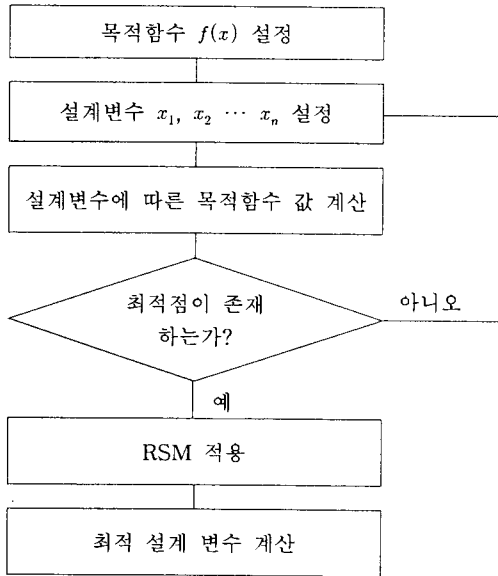


그림 1. RSM 최적 설계 흐름도

3. 해석 결과

그림 2는 영구자석 외각에 5 설계변수의 RSM을 적용한 그림이다. 본 연구에서는 2변수를 지정하였고, 변수의 변화방향은 축 방향으로 줄어들고, 각 변수의 변화량은 1.25[mm]씩 총 5스텝으로 5[mm] 변한다. 목적 함수는 코깅토크 최대값을 줄이는 것으로 설정하였다.

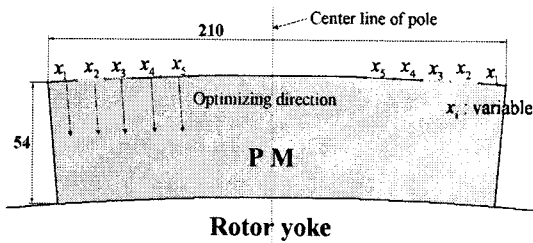
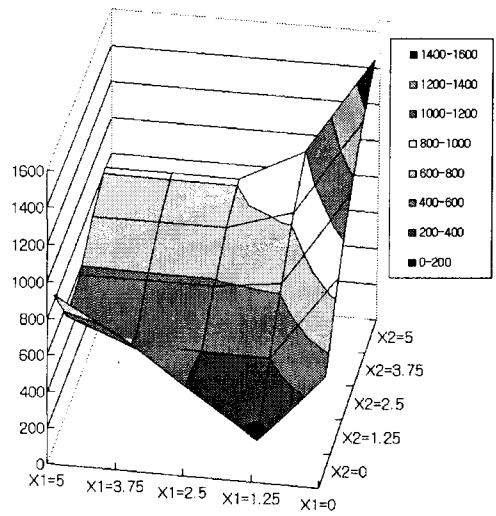


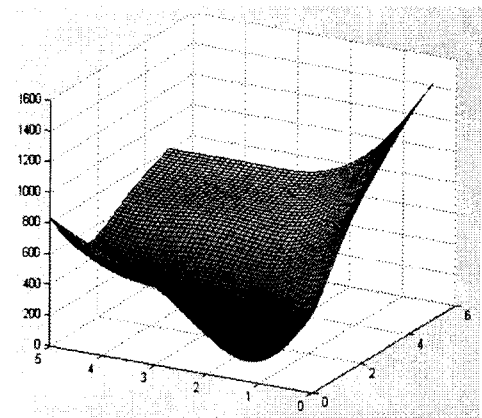
그림 2. BLDC 영구자석의 최적화 모델

그림 3의 (a)는 2변수의 해석 결과에 따른 각 모델의 코깅토크 최대치 5²개를 도식화 한 것이다. 각 변수에 따라 목적함수가 비선형임을 쉽게 확인할 수 있으며, 설계변수 변화에 따른 코깅토크 저감을 확인할 수 있었다.

이에 5²개의 해석 결과에 RSM을 적용한 결과가 그림 3의 (b) 이다.



(a) 최초 결과



(b) RSM 적용 결과

그림 3. 목적함수의 최적화 결과

그림 4는 최적화 적용 전후의 코깅토크의 비교 그래프이다. 최적화 적용 전의 코깅토크 최대값은 518[N.m]이었으며 최적화 적용 후의 코깅토크 최대값은 130[N.m]이다.

최적화 적용 전후의 코깅토크 최대값을 비교하면, 약 25%로 감소하였다.

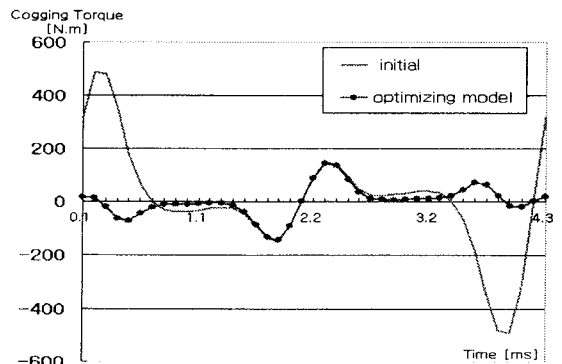


그림 4. 시뮬레이션 모델의 코깅토크

4. 결 론

2변수 RSM의 최적화 결과 코깅토크 최대값은 약 25%로 감소하였다. 그러나 그림 4에서의 코깅토크 한 주기만을 놓고 봤을 때 최대값 감소는 한 주기 상에서 좌우 끝단만 감소하였음을 확인할 수 있다. 이는 설계 변수를 영구자석의 양가에만 주었기 때문이다. 그래서 설계 변수를 영구자석의 양단에만 설정하였을 때 코깅토크의 최대값 감소는 코깅토크 한 주기에서의 가운데 부분이하로는 더 이상 감소하지 않는다. 코깅토크 그래프에서 가운데 부분의 값은 영구 자석의 가운데 부분에 슬롯 개구부가 지나 갈 때 발생하는 것으로 알려져 있다.

따라서 코깅토크의 최대값을 더 줄이기 위해서는 영구자석의 가운데에도 설계변수를 주고 최적화 한다면 코깅토크가 더 감소된 BLDC를 설계할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 2006년도 국방과학 연구소의
수중운동체 특화연구센터의 지원으로 이루어졌음

[참 고 문 헌]

- [1] J.S. Ryu , Y. Yao and C. S. Koh, "Utilizing Design Sensitivity Analysis for the Global Optimization of Electromagnetic Devices with C^1 Piecewise Response Surface Patches", IEEE Trans on Magn, vol. 41, no 5, pp. 1792-1795, May 2005.
- [2] Y. Yao, J. S. Ryu, C. S. Koh, and D. Xie, "A Novel Mesh Regeneration Using Structural Deformation Analysis for 3-D Shape Optimization of Electromagnetic Devices". IEEE Trans on Magn, vol. 40, no. 2, pp. 1009-1012, March 2004.
- [3] Piergiorgio Alotto, Marina Gaggero, Giorgio Molinari and Mario Nervi, "A "Design of Experiment" and Statistical Approach to Enhance the "Generalised Response Surface" Method in the Optimisation of of Multiminima Problems", IEEE Trans on Magn, vol 33, no 2, pp. 1896-1899, March 1997.
- [4] P. Alotto, A. Bertonni, G. Molinari and M. Nervi, "A Combined Approach for the Stochastic Optimisation of Multiminima Problems Using Adaptive Fuzzy Sets and Radial Basis Functions", IEEE Trans on Magn, vol. 34, no. 5, pp. 2837-2840, September 1998.
- [5] D. Tsao and J. P. Webb, "Construction of Device Performance Models Using Adaptive Interpolation and Sensitivities", IEEE Trans on Magn, vol. 41, no 5, pp. 1768-1771, May 2005.