

대용량 BLDC 전동기의 영구자석 형상에 대한 특성해석

우 성 현, 김 한 들, 정 희 준, 신 판 석
홍익대학교 전기공학과

A Characteristics Analysis of the Permanent Magnet Pole Shape for Large Scale BLDC Motor

Sung-Hyun Woo, Han-deul Kim, Hee-Jun Chung, Pan-Seok Shin
Electrical Engineering, Hong-ik University

Abstract -대용량 BLDC 모터의 진동 및 소음의 원인인은 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 arc각을 최적화한 결과 코깅토크의 ripple이 52%이상 감소되었다.

1. 서 론

추진용 대용량 전동기의 진동 및 소음원으로는 기계적인 원인, 전자기적인 원인, 공기역학적인 원인이 있다. 그러나 추진용 전동기는 대부분 저속으로 구동되므로 이러한 추진용 BLDC 전동기 같은 경우에는 기계적, 공기역학적 원인에 비해 상대적으로 전자기적인 원인이 진동 및 소음의 주원인이다.

전동기의 코깅 토크(Cogging torque)가 소음 및 진동의 주원인이므로 이러한 코깅 토크를 유한요소법(Finite Element Method)을 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. 본 론

2.1 RSM(Response Surface Method)

설계 변수에 따른 실제의 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.

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J_s + \nu_0 \nabla \times B_r \quad (1)$$

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

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

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 있다.

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

여기서, [λ]는 수반행렬변수이고, [A]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 C1의 연속화하여(Hermite의 다항식)를 구분 사용해 계산 된다.

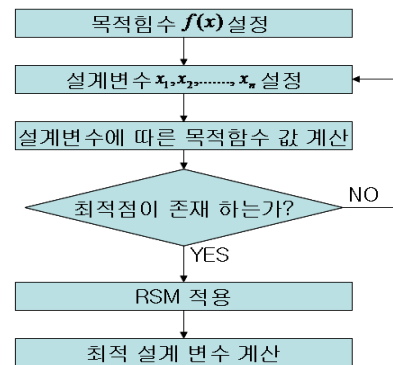
$$F_s([p]) = \sum_{k=0}^n \left[f_k \alpha_k([p]) + \sum_{m=1}^{N_p} f'^{k,m} \beta_{k,m}([p]) \right] \quad (4)$$

여기서, f_k 와 $f'^{k,m}$ 는 목적함수 값의 설계 민감도이고, n 은 subsection의 개수이고, α 와 β 는 허미트 보간법의 기본 함수이고, N_p 는 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 가치 및 설계 감도를 아래 식 (5)와 같이 이용하는 기저 함수의 점으로부터 표현할 수 있다.

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

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

2.2 전동기의 코깅토크(Cogging torque) 해석

다음 그림 2와 그림 3은 최적화를 위해 실제 적용된 대용량 BLDC 전동기이다. 전동기의 기본 사양은 표 1과 같다. 회전자 전체 형상은 컵의 형태로 안에 인버터가 들어가는 모델이다.

영구자석 최적화 대상인 대용량 추진용 BLDC 전동기는 12상 32극 150[rpm], 정격전압 600[V], 전류 9600[A] 이하이다. 모델의 사양은 고정자의 외경은 3900[mm], 회전자의 외경은 3600[mm], 고정자의 영구자석 길이는 50[mm], 공극은 6[mm] 이다.



<그림 2> 전동기 치수 (1/16 부분)

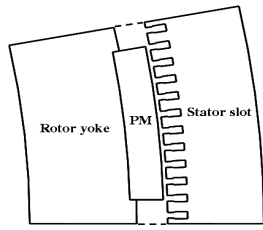


그림 3 전동기 재질 (1/32 부분)

표 1 대용량 BLDC 전동기의 기본사양

용량	극수	상수	슬롯수	RatedVoltage Range	전류	RatedSpeed
5[MW]	32[Pole]	12[상]	384[개]	550~830[V]	<9600[A]	150[rpm]

코깅 토크해석을 위한도면은 그림 2에서 보듯이 1/16 모델을 적용하였고 각각의 재질조건은 표 2의 조건을 부여하였다.

표 2 대용량 BLDC 전동기의 재질조건

재질	PM	rotor yoke	stator slot	coil
특성	Br = 0.9 T	비투자율 = 3500	Js = 1.8 T 비투자율 = 7500	copper

그림 4는 위의 조건을 적용한 BLDC 전동기의 코깅 토크를 나타낸 그래프 이다.

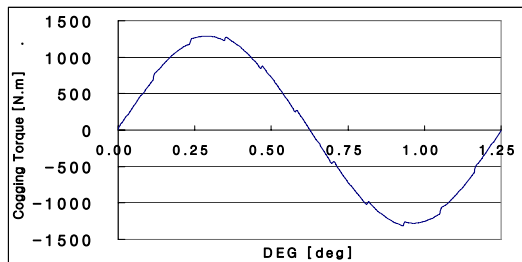


그림 4 Cogging Torque

2.3 영구자석 자극각의 최적화

코깅 토크 저감을 위하여 그림 5에서 보는바와 같이 영구자석사이의 값을 설계변수로 지정하여 다음 식(5)의 목적함수를 설정 하였다.RSM의 근사화에 필요한 샘플링 데이터 포인트를 FEM 해석을 통하여 계산하였다.

$$\text{Minimize } F = \sum_{i=1}^{N_p} \left(\frac{W_i - W_0}{W_0} \right)^2 \quad (5)$$

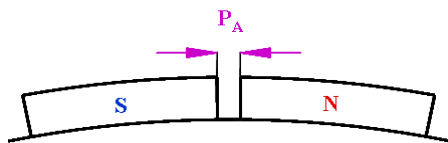


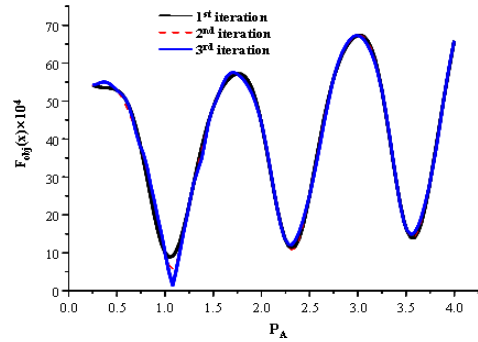
그림 5 영구자석 최적화를 위한 설계변수 (P_A)

여기서, N_p 는 계산되는 코깅 토크 샘플링 데이터 포인트의개수이고, W_i 는 각 i 번째 회전자 위치에서의 자계에너지, W_0 는 W_i 들의 평균값이다.

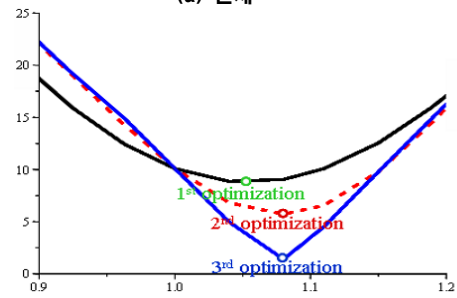
2.4 최적화 결과

앞에서 언급한 RSM 최적화에서 총 세 번의 피드백 과정을 거쳐 최적화 한 결과 설계변수의 목적함수의 그래프는 다음 그림6의 (a)와 같이 근사화 되었고 함수의 최소분을 찾은 결과가 (b)와같다. RSM 근사함수에서 최적점이라 계산된 목적함수와 FEM 해석을 통한 결과를 비교한 결과 3번째 반복 계산셋 수렴하였다.

그림 7에서 볼 수 있듯이 최적화 전·후의 코깅 토크가 약 1317.79[N.m]에서 629.17[N.m]로 약 52%가 감소하였음을 알 수 있다.



(a) 전체



(b) 최적지점 부분

그림 6 최적화에 따른 RSM 근사 목적함수 변화

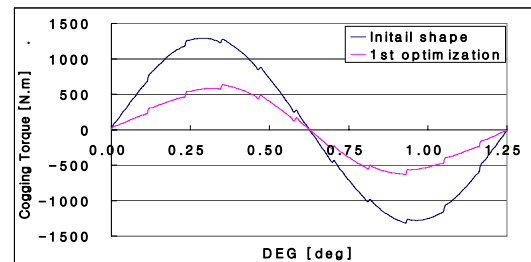


그림 7 최적화에 따른 코깅 토크 변화

3. 결 론

본 논문에서는 추진용 대용량 BLDC 전동기의 영구자석 형상의 변화에 따른 특성해석하기 위해 영구 자석에 RSM 기법 및 민감도 기법을 적용한 최적화를 연구하였고 이를 코깅 토크의 변화를 통해 확인하였다. 최적화 결과 최적화 전·후의 코깅 토크가 약 1317.79[N.m]에서 629.17[N.m]로 약 52%가 감소하였음을 알 수 있다.

영구자석의 자극각 변화만큼이나 자석의 Shape를 고려한 최적화 과정이 필요할 것으로 사료된다. 따라서 추후 Shape까지 고려한 영구자석의 최적화를 통한 코깅 토크가 더 저감된 최적화를 연구할 예정이다.

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사를 드립니다. (계약번호 UD03000AD)

[참 고 문 헌]

- [1] 김한들, "Response Surface Method를 이용한 대용량 BLDC 전동기의 영구자석 형상 최적화 연구", 홍익대학교 석사학위논문, 2006년
- [2] C. S. Koh, H. S. Yoo, K.W Nam, and H.S. Choi, "Magnetic Pole Shape Optimization of Permanent Magnet Motor for Reduction of Cogging Torque," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 33, no. 2, pp.1822-1827, March 1997
- [3] T. K. Chung, S.K.Kim, and S.Y Hahn, "optimal Pole Shape Design for the Reduction of Cogging Torque of Brushless DC Motor Using Evolution Strategy," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 33, no. 2, pp.1908-1911, March 1997
- [4] S. Rippa, "An algorithm for selecting a good value for the parameter c in radial basis function interpolation," Advances in Computational Mathematics, vol. 11, pp.193-210, 1999