

## RSM을 이용한 6MW BLDC용 영구자석의 형상 최적화 연구 (II)

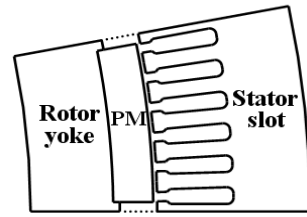
우성현, 정현구, **신판석**  
 홍익대학교 전기공학과

### A Permanent Magnet Pole Shape Optimization for a 6MW BLDC Motor by using Response Surface Method (II)

Sung Hyun Woo, Hyun koo Chung, Pan Seok Shin  
 Department of Electrical Engineering, Hongik University

**Abstract** - An adaptive response surface method with Latin Hypercube sampling strategy is employed to optimize a magnet pole shape of large scale BLDC motor to minimize the cogging torque. The proposed algorithm consists of the multi-objective Pareto optimization and  $(1+\lambda)$  evolution strategy to find the global optimal points with relatively fewer sampling data. In the adaptive RSM, an adaptive sampling point insertion method is developed utilizing the design sensitivities computed by using finite element method to get a reasonable response surface with a relatively small number of sampling points. The developed algorithm is applied to the shape optimization of PM poles for 6 MW BLDC motor, and the cogging torque is reduced to 19% of the initial one.

법으로 이루어진 최적화 algorithm 을 제안하고자 한다[5-7].



〈그림 1〉 최적설계를 위한 6MW BLDC 전동기 모델.  
 (1/32 Model)

#### 1. 서 론

BLDC 전동기는 소음이 적고, 사용하고자 하는 목적에 따라 토크나 속도 등을 제어하기 쉬운 이점이 있어서 다양한 분야에서 아주 광범위하게 사용되어지고 있다. 그러나 BLDC 전동기의 회전자에 사용되는 영구자석(PM)과 고정자의 개구부 슬롯 형상에 의해 코깅 토크가 발생하고, 이는 전동기내에서 예기치 않은 진동과 소음을 유발하며, 결과적으로 코깅 토크와 토크리플에 의해 전동기의 효율이 줄어드는 현상이 발생한다.

1990년대 이후부터, 서보 시스템을 중심으로 코깅 토크저감을 위한 기법이 다양하게 연구되어왔으며, 진화 전략 기법(evolution strategy)이나 유전 기법(genetic algorithm)[1],[2]과 같은 비(非) 결정론적 방법을 이용하여 좀 더 정확한 "global optimal solution" 을 얻어낼 수 있다. 최근에는 response surface method(RSM)을 이용하여 BLDC 전동기가 사양에 맞는 토크 profile을 가질 수 있는 최적화설계에 성공적으로 적용되고 있다[3],[4].

#### 2. 최적화 알고리즘

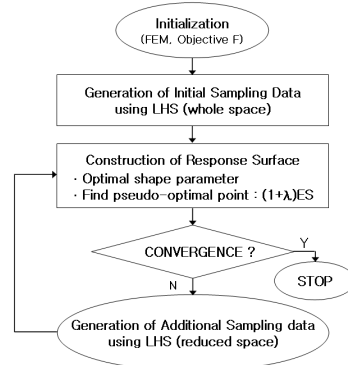
##### 2.1 Pareto Optimization을 이용한 Latin Hypercube Sampling strategy

Latin Hypercube sampling strategy(LHS)는 연속적으로 "zoomed-out"된 설계공간에 순응적으로 샘플링 포인트를 추가 하면서, 샘플링 포인트 분포의 "quality"를 향상 시키는 것이다[7]. 여기서 샘플링 포인트를 추가하는 것이 LHS를 의미하는 것과 같다. 1차 샘플링 포인트 추가 후, 반응평면은 다시 설정되고, 실제 global optimal point 찾아질 때 까지 이 과정을 반복하게 된다. RSM 또한 design parameter 영역에 목적함수를 삽입한 방사상 기저함수(multiquadric radial basis function)를 이용한다. 이 algorithm은 그림 2.에서 보는바와 같이 4 단계로 이루어진다.

〈표 1〉 6MW BLDC 전동기의 사양

Parameters	Value	Unit
Maximum output	6000	kW
Rated voltage/current	750/ 500	V/A
Rated speed	150	rpm
Number of phase	24/12	phase
Outer diameter (stator/rotor)	1750/1500	mm
Air-gap length	10.0	mm
Stator core length	2600	mm
stator slots/Rotor PM poles	192/32	

크기가 큰 영구자석이 전기철도나 선박 추진용으로 쓰이는 대용량 BLDC 전동기에도 적용되면서부터, 코깅 토크는 속도가 일정하지 않거나, 시스템 내에서 진동 또는 소음을 일으키는 것과 같은 매우 큰 문제의 원인이 되고 있다. 그림 1은 본 논문에서 연구하게 될 BLDC 전동기를 나타낸 것이며, 전동기의 사양은 표 1에 자세하게 설명되어 있다. 전동기는 12개의 인버터 모듈에 의해 운전되어지며, 코어의 포화 자속밀도는 1.95[T] 이다. 그림 1에서 보는바와 같이, 영구자석(PM)의 형상이 매우 넓고 두꺼우며, 유효 공극의 길이는 길어지고 공극의 자속 밀도가 다른 작은 것들에 비해 편차가 컸다. 이러한 이유로 코깅토크의 저감을 위해 영구자석의 형상 최적화 설계를 하게 되었고, multi-objective Pareto optimization 에 근거한 Latin Hypercube Sampling(LHS), response surface method(RSM)과 함께  $(1+\lambda)$  진화기



〈그림 2〉 Flow chart of LHS algorithm with ES

##### 2.2 RSM with Multiquadric Radial Basis Function

목적함수의 보편적인 보간법인, 방사상 기저함수를 이용한 RSM은 설계영역 샘플링 포인트의 제한된 조건에도 최적점을 찾아낸다는 강력한 이점이 있다. 샘플링 데이터가 주어지면, 반응평면은 아래와 같이 형성된다.

$$S(x) = \sum_{i=1}^N \beta_i \left( \|x-x_i\|^2 + h^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

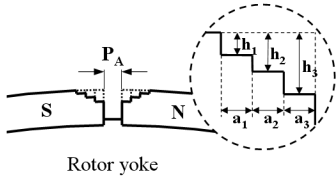
$$X = \{(x_i, f(x_i)), i = 1, 2, \dots, N\} \quad (2)$$

여기서  $\| \cdot \|$ 는 Euclidean distance,  $x$  는 design parameter vector,  $\beta$

는  $i$  번째 샘플링 포인트  $x_i$ 에 대응하는 계수,  $x$ 는 샘플링 포인트,  $N$ , 그리고  $h$ 는 형상 파라미터이다. 형상파라미터  $h$ 는 보간함수의 평탄한 정도와 정확도에 영향을 미친다. 본 연구에서,  $(1+\lambda)$  진화 기법을 이용하여, 반응평면의 보간여러를 최소화하는 최적  $h$ 를 찾고자 한다.

### 3. 최적화 결과

6MW BLDC 전동기의 코깅 토크 저감을 위해, 4개의 설계변수( $P_A$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ )를 설정하여 최적화를 시행하였다(여기서  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ 는  $0.6^\circ$ 의 고정된 값으로 제한한다). 회전자는 총 32개의 극을 가지며, 영구자석의 크기는  $260\text{mm} \times 60\text{mm}$ 이다. 고정자는 총 192개의 슬롯으로 이루어져 있다.



**<그림 3> Arc length optimization model of PM**

자극 간격의 설계변수  $P_A$ 를 이용한 최적화는 이미 선행 되어진 연구에 의해 크기가  $2.67(\text{degree})$ 에서 수렴함을 알 수 있으며[8], 이 값을 적용하여 두 번째 최적화의 초기형상을 설정하고, 설계변수  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ 에 대해 총 3번의 최적화를 시행하였다. 이때의 목적함수  $F_{obj}$ 는 다음과 같다.

$$\text{Minimize } F_{obj} = \sum_{i=1}^{N_h} (W_i - W_0)^2, \quad (3)$$

*subject to*  $0 \leq h_1 \leq 2, 0 \leq h_2 \leq 5, 0 \leq h_3 \leq 10$  [mm]

여기서,  $N_h$ 는 계산되는 코깅 토크 샘플링 포인트의 개수이고  $W_i$ 는 각  $i$ 번째 회전자 위치에서의 자계에너지,  $W_0$ 는  $W_i$ 들의 평균값이다.

그림 4는 2단계 최적화를 3번 반복 하였을 때 샘플링 포인트 데이터와 그에 대응하는 반응 평면이다. FEM을 통해 각각의 샘플링 포인트에 해당하는 목적함수 값을 구하고 그때의 코깅 토크를 비교한 결과, 그림 5의 그래프에서 볼 수 있듯이, 3번째 iteration에서 수렴하는 것을 알 수 있으며, 이 때 수렴하는 값이 최적점이라 할 수 있다.

최종적으로 얻어진 설계변수의 최적점 ( $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ )는 (0.6, 2.1, 6.2)이며, 이때의 단위는 [mm]이다. 그리고 코깅 토크는, 초기형상이 2158[Nm], 3번째 iteration에서 399[Nm]로 약 19%까지 감소하였다.

### 4. 결 론

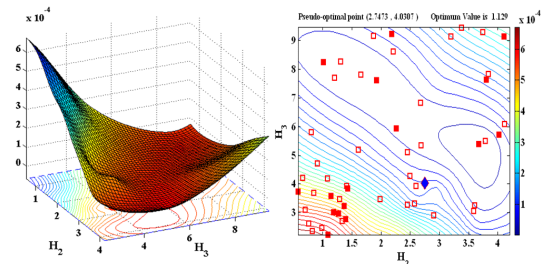
본 논문에서는 영구자석 형상 최적화를 위해 Latin Hypercube Sampling을 이용하여 설계변수에 대한 샘플링 포인트를 추출하고, 이를 response surface method에 적용하였다. 또한 multi-objective Pareto optimization와  $(1+\lambda)$  진화 기법으로 이루어진 LHS algorithm을 제안 하였다. 그리고 이를 6MW BLDC 전동기에 실제 적용하여 영구자석 형상이 변함에 따라 코깅 토크가 변화하는 것을 알 수 있었다. 총 3번의 최적화 결과, 자극사이의 각도인 설계변수  $P_A$ 의 크기가  $2.67(\text{degree})$ 에서 수렴하였고, 자극 형상의 설계변수 ( $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ )는 (0.6, 2.8, 4.0)에서 수렴 하였으며, 코깅 토크는 third iteration에서 19%까지 감소하였다.

### [참 고 문 헌]

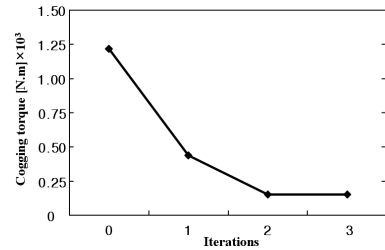
[1] J.S.Ryu, Y.Yao, C. S. Koh, S. N. Yoon, and D. S. Kim, "Optimal shape design of 3-D nonlinear electromagnetic devices using parameterized design sensitivity analysis," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 41, No. 5, pp.1792-1795, May 2005  
 [2] K. J. Han, H. S. Cho, D. H. Cho and H. K. Jung, "Optimal core shape design for cogging torque reduction of brushless DC motor using genetic algorithm," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 36, no. 4, pp. 1927-1931, July 2000  
 [3] C. A. Borghi, D. Casadei, A. Cristofolini, M. Fabbri, and G. Serra, "Application of a multiobjective minimization technique for reducing the torque ripple in permanent magnet motors," IEEE Trans. on Magnetics, vol.35, no.5, pp.4238-4246, September 1999  
 [4] D. Tsao, and J. P. Webb, "Construction of device performance models using adaptive interpolation and sensitivities," IEEE Trans. on

Magnetics, vol.41, No.5, pp.1768-1771, May 2005  
 [5] P. Alotto, and M.A. Nervi, "An efficient hybrid algorithm for the optimization of problems with several local minima," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.50, pp. 847-868, 2001  
 [6] Koehler J.R. and Owen A.B., Computer Experiments, Handbook of Statistics, Elsevier Science, New York, pp.261-308, 1996  
 [7] Yanli Zhang, H.S. Yoon and C.S. Koh, "Study on a Robust Optimization Algorithm Using Latin Hypercube Sampling Experiment and Multiquadric Radial Basis Function," Proceeding of KIEE EMECS Annual Spring Conference, pp.162-164, April 2007  
 [8] 우성현, 정현구, 신판석 "RSM을 이용한 6MW BLDC용 영구자석의 형상 최적화 연구 (I)" 2008년도 대한전기학회 EMESC 춘계학술대회 논문집, pp.65-67, 2008.

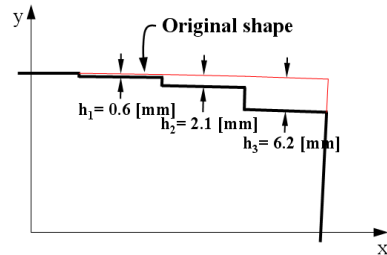
본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 수중운동체 특화연구센터의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다. (계약번호 UD030000AD)



**<그림 4> 반응평면과 대응하는 샘플링포인트 Third iteration(48 sampling points)**



**<그림 5> Average cogging torque of the optimized model**



**<그림 6> 영구자석형상의 최적화**