

LHS를 이용한 6MW BLDC 전동기의 코깅토크 최소화 연구

우성현, 신판석
홍익대학교 전기공학과

A Study of Cogging Torque Minimization
for a 6MW BLDC Motor by using Latin Hypercube Sampling strategy

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

Abstract - Latin Hypercube sampling strategy(LHS)는 출력변수에 의한 목적함수들의 기댓값의 추정을 위한 입력변수를 생성하는데 사용할 수 있는 샘플링 포인트 추출 방법으로, 샘플링 포인트의 “quality”를 향상시켜준다. multi-objective Pareto optimization 에 근거한 LHS 와 (1+λ) 진화기법으로 이루어진 최적화 algorithm 을 제안하였고, 이를 이용하여 6MW BLDC 전동기의 코깅토크를 최소화 하였다. 총 2단계의 최적 설계를 통해 초기 형상의 코깅토크에 비해 19%로 감소하였다.

1. 서 론

BLDC 전동기는 브러시가 없어서, 마찰에 의한 소음이 없고, DC전동기에서 발생하는 브러시 마모에 의한 유지·보수가 필요 없다. 또한 보상권선이나 보극이 필요 없고, 영구자석을 이용하기 때문에 내부 구조가 간단하며, 사용하고자 하는 목적에 따라 전동기의 크기나 토크, 속도 등을 제어하기 쉬운 이점이 있어서 서보시스템에서부터 전기철도나 선박추진용에 이르기까지 다양한 분야에서 매우 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].

전기철도나 선박추진용으로 대용량 BLDC전동기가 적용되고, 영구자석의 크기가 커지면서, 코깅토크로 인한 진동에 의해 속도가 일정하지 않다거나, 소음을 일으키는 것과 같은 매우 큰 문제의 원인이 되고 있다.

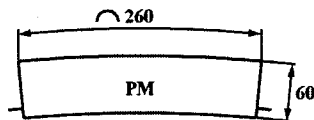


그림 1. 6MW BLDC전동기의 영구자석 형상

그림 1은 본 논문에서 연구하게 될 BLDC 전동기의 영구자석 형상을 나타낸 것이다. 그림 1에서 보는바와 같이, 영구자석의 형상이 매우 넓고 두꺼우며, 유효 공극의 길이는 길어지고 공극의 자속밀도가 다른 작은 것들

에 비해 편차가 커졌다. 이러한 이유로 코깅토크를 최소화하기 위해 영구자석의 형상 최적화 설계를 하게 되었고, multi-objective Pareto optimization 에 근거한 Latin Hypercube Sampling strategy(LHS), response surface method(RSM)과 함께 (1+λ) 진화기법으로 이루어진 최적화 algorithm 을 제안하고자 한다[5-7].

2. 코깅토크 저감을 위한 최적화 알고리즘

Latin Hypercube sampling strategy(LHS)는 “공간을 채우는” 형식의 설계방법으로, 연속적으로 “zoomed-out” 된 설계공간에 순응적으로 샘플링 포인트를 추가 하면서, 샘플링 포인트 분포의 “quality”를 향상 시키며[8], 이를 통해 출력변수에 의한 목적함수들의 기댓값의 추정을 위한 입력변수를 생성하는데 사용할 수 있는 샘플링 포인트 추출 방법이다[9].

이 algorithm은 그림 2.에서 보는바와 같이 4 단계로 이루어진다.

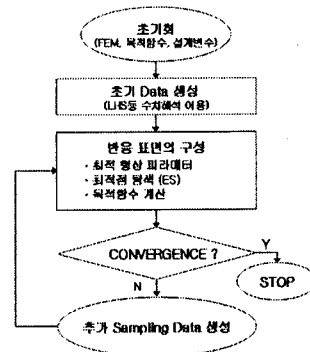


그림 2. LHS 알고리즘의 흐름도

2.1 Pareto Optimization을 이용한 Latin Hypercube Sampling strategy

LHS는 $n \times k$ 행렬이다. 여기서 n 은 샘플링 포인트 데이터의 개수 이고, k 는 설계 변수의 개수 이다. 각각의 변수는 동일한 확률에 근거하여 n 간격으로 나누어지고 각각의 k 열은 가능한 변수들의 실제 범위에 근거하여 $\{1, \dots, n\}$ 으로 임의 배열한다. 실제로, LHS는 임의적인 생성이 가능하다. 하지만 임의적으로 선택된 LHS는 좋지 않은 결과를 가져오고, 엉뚱한 결과를 예측, 판단할 수도 있다.

수치적으로 좋은 샘플링 포인트 데이터를 찾기 위해, LHS에서는 minimax 와 maximin 조건을 재검토 할 것을 요구한다.

minimax조건과 maximin 조건 은 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} \text{Minimax} &= \text{Max}_{x \in D} \left\{ \text{Min}_{x_i \in X} d(x, x_i) \right\} \\ \text{Maximin} &= \text{Min}_{x_i, x_j \in X} d(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 D 는 설계영역, X 는 샘플링 데이터, $d(\cdot, \cdot)$ 는 설계영역 내에서 임의의 두 포인트 사이의 거리이다. 모든 샘플링 포인트 사이의 거리가 충분히 멀지 않아야 하고, maximin 조건은 각각의 포인트의 간격이 너무 붙어있지 않아야 한다.

minimax 조건설계에서, 두 샘플링 포인트 사이의 거리가 두드러지게 가까운 경우가 종종 발생한다. 이에 반하여 maximin 조건 설계에서는 항상 두 샘플링 포인트 사이의 거리가 증가하여 샘플링 포인트 중 일부가 설계 영역의 범위 밖에 위치하는 경우가 있다. 동시에 두 설계조건을 고려하기 위한 multi-objective Pareto optimization은 완벽한 minimax 나 maximin 보다는 Pareto 쪽을 선택하는 것이 더 좋은 LHS design 이다. 여기서, 최종 Pareto curve 는 minimax 조건과 maximin 조건을 고려하는 것을 의미한다. Pareto-optimization point는 좀 더 균일한 분포 특성을 가진 LHS design 이다.

Pareto-optimization에서 두 샘플링 포인트 사이의 거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d(x_i, x_j) = d(x_i, x_j) / d((x_i + x_j) / 2, x_p) \quad (2)$$

여기서 x_p 는 pseudo-optimal point 이다.

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.

$$\begin{aligned} S(x) &= \sum_{i=1}^N \beta_i \left(\|x - x_i\|^2 + h^2 \right)^{\lambda} \\ X &= \{ \{x_i, f(x_i)\}, i=1, 2, \dots, N \} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\|\cdot\|$ 는 Euclidean distance, x 는 design parameter vector, β_i 는 i 번째 샘플링 포인트 x_i 에 대응하는 계수, X 는 샘플링 포인트, N , 그리고 h 는 형상 파라미터 이다. 형상파라미터 h 는 보간함수의 평탄한 정도와 정확도에 영향을 미친다. 본 연구에서, $(1+\lambda)$ 진화 기법을 이용하여, 반응평면의 보간에러를 최소화하는 최적 h 를 찾고자 한다.

3. 최적설계 결과

3.1 최적설계를 통한 코깁토크의 최소화

그림 3은 본 논문에서 연구하게 될 6MW BLDC 전동기의 회전자와 고정자 그리고 영구자석의 형상을 나타낸 것이며, 전동기의 사양은 표 1에 자세하게 설명 되어 있다. 전동기는 12개의 인버터 모듈에 의해 운전되어지며, 코어의 포화 자속밀도는 1.95[T] 이다.

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	

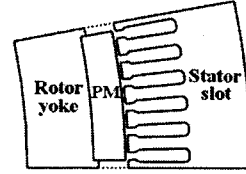


그림 3. 최적설계를 위한 6MW BLDC 전동기 모델. (1/32 Model)

6MW BLDC 전동기의 코깁 토크 저감을 위해, 4개의 설계변수(P_A, h_1, h_2, h_3)를 설정하였고, 1단계 극 간격 최적화와 2단계 영구자석 형상최적화를 시행하였다(여기서 a_1, a_2, a_3 는 0.6° 의 고정된 값으로 제한한다). 회전자는 총 32개의 극을 가지며, 영구자석의 크기는 260mm × 60mm 이다. 고정자는 총 192개의 슬롯으로 이루어져 있다.

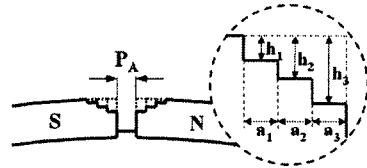


그림 4. 영구자석 최적설계모델

3.1.1 1단계 최적화 : 극 간격 최적설계

1단계 최적화를 위해, 그림 4에서 볼 수 있듯이, 자극 사이간격을 P_A 로 설정하여 최적화를 시행하였다. 이때 설계변수 P_A 의 단위는 각도의 단위인 degree 이다. 목적함수, F_{1st} 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F_{1st} &= \sum_{i=1}^{N_p} \left(\frac{W_i - W_0}{W_0} \right)^2 \\ \text{subject to } &0.4 \leq P_A \leq 4.5 \text{ deg} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, N_p 는 계산되는 코깁토크 샘플링 포인트의 개수 이고 W_i 는 각 i 번째 회전자 위치에서의 자계에너지, W_0 는 W_i 들의 평균값이다.

총 세 번에 걸친 반복계산을 통해 LHS algorithm의 수렴을 하였고, 극 간격 P_A 를 이용한 최적화 결과, P_A 의 크기는 2.67(degree)에서 수렴하였다.

3.1.2 2단계 최적화 : 영구자석 형상 최적설계

1단계 최적화 결과 $P_A=2.67^\circ$ 를 적용하여 2단계 최적화의 초기 형상을 설정하고 영구자석 형상 최적설계를 수행하였다. 설계변수 h_1, h_2, h_3 에 대해 총 3번의 최적화를 시행하였고, 이때의 목적함수 F_{2nd} 는 다음과 같다.

$$\text{Minimize } F_{\text{std}} = \sum_{i=1}^{N_h} (W_i - W_0)^2$$

subject to $0 \leq h_1 \leq 2, 0 \leq h_2 \leq 5, 0 \leq h_3 \leq 10 [\text{mm}]$ (5)

여기서, N_h 는 계산되는 코깅토크 샘플링 포인트의 개수이다.

그림 5는 2단계 최적화를 3번 반복 하였을 때 샘플링 포인트 데이터와 그에 대응하는 반응 평면이다. FEM을 통해 각각의 샘플링 포인트에 해당하는 목적함수 값을 구하고 그때의 코깅토크를 비교한 결과, 그림 6의 그래프에서 볼 수 있듯이, 3번째 iteration에서 수렴하는 것을 알 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 6MW BLDC 전동기의 코깅토크 저감을 위해, 영구자석의 극 간격과 형상 최적화를 Pareto optimization과 Latin Hypercube Sampling을 이용하여 설계변수에 대한 샘플링 포인트를 추출하고, 이를 response surface method 에 적용하였다. 또한 multi-objective Pareto optimization과 (1+) 진화 기법으로 이루어진 LHS algorithm 을 제안 하였다. 그리고 이를 6MW BLDC 전동기에 실제 적용하여 영구자석 형상의 변함을 통해 코깅 토크가 저감된 것을 알 수 있었다. 총 2번의 최적화 결과, 자극사이의 각도인 설계변수 PA의 크기가 2.67(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] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] Koehler J.R. and Owen A.B., Computer Experiments, Handbook of Statistics, Elsevier Science, New York, pp.261-308, 1996
- [8] 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

[9] Stein, M. "Large Sample Properties of Simulations Using Latin Hypercube Sampling," Technometrics Vol.29, pp.143-151, May 1987

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

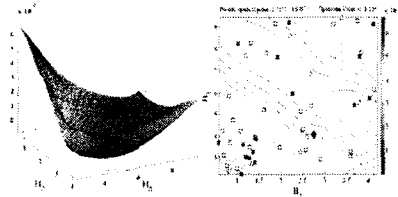


그림 5. 반응평면과 대응하는 샘플링포인트
Third iteration(48 sampling points)

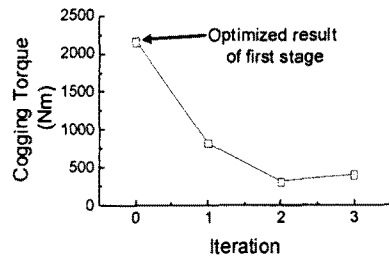


그림 6. 최적설계모델의 평균 코깅토크 변화