

반응표면법을 이용한 단상유도모터의 최적설계

심호경*, 강제남*, 김좌일*, 왕세명*, 김종봉**
 광주과학기술원 기전공학과*, LG 전자**

Design optimization of Single-Phase induction motor Using Response Surface Method

Hokyoung Shim*, Jenam Kang*, Chwail Kim*, Semyung Wang* and Jongbong Kim**
 K-JIST(Kwangju Institute of Science & Technology)*, LG Electronics**

Abstract - The response surface method (RSM) became a popular meta modeling technique, but it always contains the approximation error. Instead of the conventional RSM, the moving least squares method (MLSM) was used to get more accurate models. The characteristics of a single-phase induction motor for the reciprocal compressor are analyzed by using the lumped method program (LMP). The proposed method is applied to a single-phase induction motor for increasing the efficiency.

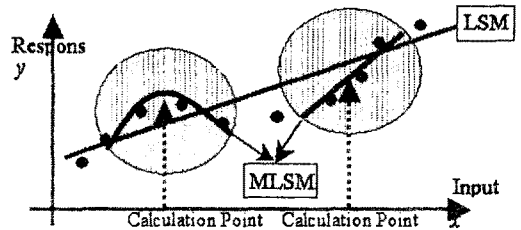


그림 1. LSM과 MLSM의 개념

1. 서 론

전자기 시스템에 사용되는 대부분의 최적설계 방법은 구조적인 최적화기법으로부터 유래한다. 여러 공학분야에 적용되고 있는 근사화 기법들 중 하나인 RSM(Response Surface Methodology, 반응 표면법)은 입력 변수에 대한 각 응답을 회귀 분석을 통하여 근사화하고, 반응 표면 모델로부터 원하는 응답에 대한 입력 변수값들을 추정하여 최적화하는데 사용되는 방법이다.

많은 연구가 활발히 진행되고 있는 반응표면법(RSM)은, 일반적으로, 반응표면 모델을 구성할 때 LMS(Least Squares Method, 최소자승법)를 이용하고 시스템의 전 영역의 출력 값으로써 모델을 구성하기 때문에 근사 오차로 인해 정확한 해를 줄 수 없다는 것이 가장 큰 단점이다. 이에 대해 효율적이고 정확한 반응표면 모델을 구성하는 MLSM(Moving Least Squares Method, 이동최소자승법) 방법이 연구되었다 [1]-[3]. MLSM은 국부적인 접근을 통하여 근사 오차를 줄여 더욱 더 정확한 방법이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 RSM을 이용하여 가전기에 사용되는 단상유도모터의 Rotor Bar의 형상과 고정자의 외곽 치수, 모터의 적층 두께 및 skew 각도 등에 대한 최적화 정도를 파악하고, 이를 통해 모터의 효율을 극대화하는 최적설계를 수행하였다.

2. Response Surface Methodology

2.1 MLSM(Moving Least Squares Method)의 개념

회귀 분석의 더욱 진보된 방법인 이동최소자승법(MLSM)은 근사화 위치에 따라 가중 함수(Weighting Function)를 부여하여 정확도를 높이는 장점을 가지고 있다. 그리하여 그림 1과 같이, 반응 표면 모델(RS Model)은 위치의 함수로 이뤄져 있으며 국부적인 근사화를 하게된다[3]. 하지만 전 영역의 출력으로 모델을 구성하는 최소자승법(LSM)보다 전체적 근사에 대한 오차가 더 많이 발생할 수 있다.

2.2 MLSM의 수칙식

여러 독립 변수(x_{ij})의 변화에 따른 결과로써 n 개의 응답 값(y_i)의 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = X\beta + \epsilon_y \tag{1}$$

여기서 y 는 $n \times 1$ 벡터이고 X 는 $n \times p$ 의 독립변수 행렬이며 β 는 $p \times 1$ 회귀 계수의 벡터이며, ϵ_y 는 $n \times 1$ 임의의 오차 벡터이다.

최소 자승 함수(L_y)은 가중치를 고려하여 식 (2)와 같이 정의된다.

$$L_y(x) = \sum_{i=1}^n W_i \epsilon_i^2 = \epsilon^T W(x)\epsilon = (y - X\beta)^T W(x)(y - X\beta) \tag{2}$$

이동최소자승법에서 대각 가중 행렬 $W(x)$ 는 상수 행렬이 아니라 가중 보간 함수에 의해 계산되는 위치의 함수이다.

행렬 연산을 통해 최소 자승 함수(L_y)를 최소화함으로써 반응 표면 모델(RS Model)의 계수 $b(x)$ 는 식 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$b(x) = (X^T W(x) X)^{-1} X^T W(x) y \tag{3}$$

$b(x)$ 를 연산하는 절차는 국부적 근사(Local approximation)이며 Moving Process를 통해 전체적 근사(Global approximation)를 수행한다.

2.3 수치 예제

2.3.1 최적 설계 문제 설정

본 논문에서는 RSM(반응표면법)을 수행하는 과정에서 실험 계획법(Design Of Experiment)은 D-optimal을 사용하였으며, 왕복동식 컴프레서에 사용되는 단상 유도모터를 실험값에 근거하여 LG 전자에서 개발한 프로그램을 이용하여 각 경우의 실험값을 대체하여 구하였다.

220(V) 입력 전압과 60[Hz]에서 동작하는 모터의 단면 형상은 그림 2와 3에서 보이는 바와 같이, 고정자는 3개의 변수를 가지고 있으며 회전자를 결정하는 중요한 요소인 동바는 4개의 변수로 이뤄져 있다. 또한 모터의 효율 향상에 중요한 인자인 모터의 높이와 회전자 Skew도 고려하였다.

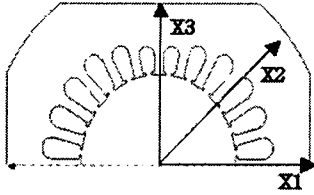


그림 2. 고정자 형상

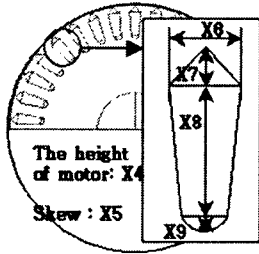


그림 3. 회전자 형상

최적 설계를 수행하기 위해 식 4와 같이 목적 함수는 정격속도로 회전자 효율을 극대화하는 것이고, 구속조건은 3가지이다. 첫 번째로 기동토크(T_{st})가 초기 기동토크(T_{int})의 95%이상되도록 하여 기동상태를 유지하였다. 두 번째로 외부 부하에 따라 정격 속도 부근에서 변화하는 전기적인 특성을 고려하여 75% 부하와 115% 부하가 걸릴 때의 효율 변동률(Δeff)이 초기형상보다 작게 함으로써 안정된 시스템을 유지하도록 하였다. 마지막으로 회전자의 전체부피(Vol_t)가 초기모델에 비해 크지 않도록 하였다. 설계 변수는 표 1과 같이 제작성을 고려하여 각 각의 범위를 제한하였다.

Obj. efficiency at rated speed

Subject to

$$g_1 = T_{st} \geq T_{int} \times 0.95 \quad (4)$$

$$g_2 = \Delta eff \leq \Delta eff_{int} \text{ at } 75 \sim 110\% \text{ load}$$

$$g_3 = Vol_t \leq Vol_{int}$$

표 1. 설계 변수의 범위

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
Upper limit	65	60	70	60	7	3	2	7	1.2
Lower limit	55	50	65	48	6	2	1	5	0.6

최적 설계 수행하기 위해 다음과 같이 3가지 경우를 고려하였다. A의 경우는 생산비용을 전혀 고려하지 않으면서 단지 정격속도에서만 최대 효율을 갖도록 모든 구속조건을 배제하였으며, B의 경우는 기동토크(g_1)와 부하에 따른 효율 변동률(g_2)만을 고려하여 전반적인 효율분포가 향상되도록 하였으며, C의 경우는 유도모터의

전반적인 효율 특성 향상(g_1, g_2)과 생산비용(g_3)을 고려한 형상을 가지도록 설정하였다(4).

2.3.2 최적 설계 결과

각 경우의 최적설계를 수행한 결과, 표 2와 같이 효율은 기존의 값을 100으로 두었을 때, RSM을 이용하여 최적설계를 수행한 결과 대략 1~3.5%의 상대적 효율 향상이 나타났다. 효율 향상의 결정적인 인자는 고정자 측보다 회전자의 동바를 구성하는 설계 변수임을 알 수 있었으며, 모터의 길이도 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 즉, 모터 전체 부피를 유지하기 위해 고정자의 크기를 다소 줄이면서 모터 길이를 증가시키고, 회전자의 동바의 길이(X_8)를 늘리는 것이 효과적인 방법으로 여겨진다.

표 3은 최소자승법(LSM)과 이동최소자승법(MLSM)을 이용한 최적설계 응답을 프로그램의 재해석 결과와 비교한 것이다. 재해석 결과에서 알 수 있듯이, MLSM이 더 낮은 오차를 제공함을 알 수 있다.

표 2. 최적 설계 결과

Initial	LSM			Moving LSM		
	A	B	C	A	B	C
Obj. 100	103.426	103.246	101.519	103.016	103.246	101.55
X_1 59	65	65	58	65	65	58
X_2 66.5	65	65	66.5	65	65	66.5
X_3 54	56.98	55	54.85	56.25	55	54.85
X_4 48	60	60	56.37	60	60	56.37
X_5 6.5	7	6	6.4	6.45	6	6.3
X_6 2.775	3	2.867	2.695	3	2.85	2.695
X_7 1.465	2	2	1.326	2	2	1.3
X_8 5.47	6.63	6.73	6.39	6.87	7	6.39
X_9 0.8988	0.896	0.94	1.02	0.889	0.94	1.02

표 3. LSM과 MLSM의 비교

Efficiency [%]	CASE	Opt.	Re-analysis	Error [%]
LSM	Case A	103.426	102.42	0.985
	Case B	103.246	102.38	0.843
	Case C	101.519	101.72	0.192
Moving LSM	Case A	103.016	102.47	0.527
	Case B	103.246	102.45	0.775
	Case C	101.55	101.68	0.124

3. 결 론

본 논문에서는 효율을 향상시키기 위해 왕복동식 컴프레서에 사용되는 단상 유도모터를 최소자승법과 이동최소자승법을 이용하여 최적 설계를 수행하였다. 고정자의 외곽 치수, 회전자 동바의 치수, 높이, 회전자의 Skew를 독립변수로 설정하였으며, 토크 특성, 부하 변화에 따른 효율 변동률 그리고 모터의 부피를 고려한 결과, 회전자 동바와 모터 높이가 효율에 많은 영향을 주는 인자로 나타났다. 또한 수치예제에서 보듯이, MLSM이 더 정확한 값을 제공함을 알 수 있었다.

4. 후 기

이 연구는 한국과학기술연구원 지정 한양대학교 최적설계 신기술연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Lancaster, P. and Salkauskas, K. "Surface Generated by Moving Least Squares Methods", Mathematics of Computation, Vol.37, No. 155, July 1981, pp. 141-158.
- [2] Viana, S.A. and Mesquita, R. C. "Moving Least Square Reproducing Kernel Method for electromagnetic Field Computation", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 3, 1999, pp.1372-1375.
- [3] C. Kim, S. Wang, and K. Choi, "Efficient Response Surface Modeling using MLSM and Sensitivity", WCSMO4, June 2001.
- [4] Jasbir s. Arora, Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill Book Company,1989.