

반응표면법과 유한요소법을 이용한 250kW급 건인 유도전동기의 고효율을 위한 최적 설계

조용현*, 임황빈** 이중호**
대전시 유성구 한밭대학교 전기공학과*

Optimum Design For Premium Efficiency of 250kW Traction Induction Motor Using Response Surface Methodology & FEM

Yong Hyun Cho*, Hwang Bin Lim**, Jung Ho Lee**
Dept. of Electrical Eng., Hanbat Nat'l Univ., Dukmyung-Dong Yuseong-Gu, Daejeon*

Abstract - This paper deals with optimum design criteria for premium efficiency of 250kW traction induction motor using response surface methodology (RSM) & finite element method (FEM).

The RSM has been achieved to use the experimental design method in combination with Finite Element Method and well adapted to make analytical model for a complex problem considering a lot of interaction of design variables.

The proposed procedure allows to define the rotor copper bar shape, stator slot and stator, rotor dimensions starting from an existing motor or a preliminary design.

1. 서 론

최근에 에너지를 절약하는 것은 세계에서 가장 중요한 과제이다. 이처럼, 높은 효율의 전기 기계와 기계 장치를 얻는 것은 매우 중요한 과제이다.

유도기는 공업에 매우 중요한 한 부분을 차지하고 있다. 여러 해 동안, 3상 유도전동기의 작동 시 효율은 손실을 최소화 함으로써 효율을 증가시키는 것을 목표로 많은 연구가 이루어졌다.

유도기의 설계원리는 여러 해 동안 변하지 않았는데 반해 기술자들의 기술과 지식은 상당히 발전되었다. 더 잘 아는 것은 전동기의 손실을 최소화하는 것에 대하여 끊임없는 개선들로 이끌었다.

체계적으로 손실의 근본원인과 개선에 대한 가능성을 분해하는 것은 완전하고 새로운 접근을 요구하고 냉각, 온도, 그리고 길이 비율, 바깥지름(OD) 등과 같은 전기에 관한 영역뿐만 아니라 기계 영역들도 조사한다.

본 논문에는 250kW 건인 유도기에 체계적이고 새로운 최적설계 한다.

효율을 개선하는 것에 대하여 전자기의 요소들은 다음과 같다:

- 1) 활성물질의 양을 증가시킨다.
- 2) 고성능 전동자용 연철판 재료들을 이용한다.
- 3) 고정자 또는 회전자 형상을 최적화 한다.
- 4) 공극의 치수를 최적화 한다.

모든 요인은 그들의 대부분이 서로에게서 독자적이지 않고 부정적으로 한 가지 케이스에 효율 이득에게 영향을 미칠지도 모르기 때문에 신중하게 보고 연구해야한다.

많은 최적화 방법 중 반응표면법(RSM)은 여러 개의 독립적인 설계변수가 출력 함수에 복합적인 작용을 하고 있을 때, 설계변수의 변화에 대한 출력 함수의 변화를 추정하는 통계적인 분석방법으로 많이 사용하고 있다.

또한, RSM을 이용하면 최적 설계에 소요되는 시간을 줄일 수 있다는 게 큰 장점이다. [1] - [2]

본 논문에서는 최적설계에 따른 적합한 조건을 찾아내기 위하여 RSM이 사용되었으며 조건에 따른 토크와의 관계를 예측하기 위해 필요한 실험 데이터는 유한요소법을 이용하였다. [3] - [5]

본 논문의 주 관점은 첫째, 회전자 동 바 형상과 고정자 및 회전자 치수 변화에 따른 토크와 손실의 비교를 통해 설계 해를 찾는 것이다.

둘째, 중심합성법(CCD(Central Composite Design))과 결합된 해석방법이 도입되었고, 추정된 회귀모델의 적합성을 결정하기 위해 분산분석(ANOVA(Analysis Of Variance))이 수행되었다.

2. 초기해석 모델 및 최적화 알고리즘

2.1 초기 해석모델

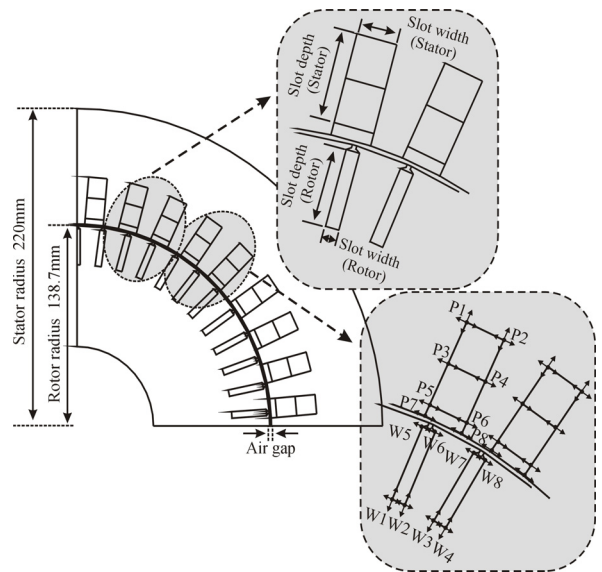
최적설계위한 설계변수들은 그림.1에서 나타난 것과 같다.

250kW 건인유도전동기의 토크 성능을 개선하기 위하여 고정자 및 회전자의 슬롯의 깊이와 폭 그리고 공극의 폭이 설계변수로 결정되었다. 기기는 표1에서 나타난 것과 같이 정격상태에서 역율이 88%, 효율이 93.5%, 3상 100Hz, 1350V로 작동하는 것으로 가정한다.

또한, 그림. 1은 고정자 그리고 회전자의 슬롯 깊이와 폭에 따른 형상 변화를 위한 변화점 변수와 변화방향을 보여준다. W1-W8과 P1-P8의 점들은 슬롯의 깊이와 폭의 조건에 따라 변화한다.

<표 1> 초기모델의 정격사양

연속정격		
출력	(kW)	250
입력전압	(V)	1350
상전류	(A)	130
정격속도	(rpm)	2950
주파수	(Hz)	100
효율	(%)	93.5
역률	(%)	88
슬립	(%)	1.7



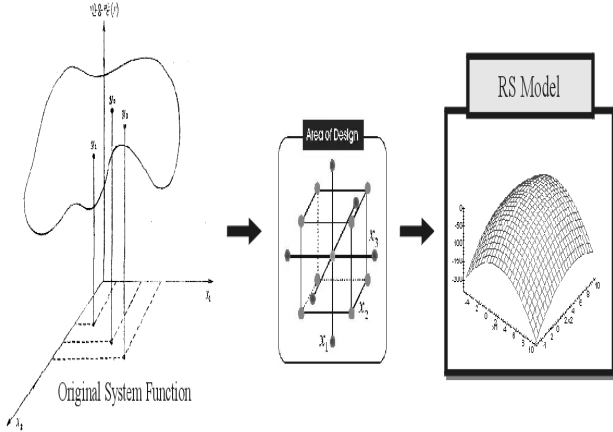
<그림 1> 초기 모형, 250kW 건인 유도 전동기의 설계 변수들과 변화 방향.

2.2 RSM의 개념

그림 2에 RSM의 기본 개념도를 나타내었다.

RSM은 설계변수와 응답간의 관계를 찾아 구하고, 관측된 자료를 사용하여 통계적인 근사방법을 통해 최적 시스템 응답을 찾아낸다. 여기서, 설계변수에 대응되는 응답 또는 출력값은 일반적으로 실제 실험이나 컴퓨터에 의한 시뮬레이션을 통해 얻어지고 이 실제 응답 y 는 기대값 또는 평균값이다. 따라서 본 논문에서는 설계변수와 출력값의 대응관계를 컴퓨터 시뮬레이션인 유한요소해석을 통해서 관측 자료를 확보하였다.

RSM에서 k 개의 설계변수에 대한 실제 응답 y 은 다음과 같이 가정한다.



<그림 2> RSM의 기본 개념

$$y = f(X, \theta) \quad (1)$$

식(1)에서 변수 (x_1, x_2, \dots, x_k) 는 자연변수(natural variables)이며, 실제 측정 단위를 가진다. 실제 응답함수 f 의 근사함수인 y 는 Taylor 급수전개를 기본으로 하여 1차 또는 2차 다항 모형으로 근사하게 된다.

본 논문에서 선택한 연구대상의 반응표면이 곡면으로 표현될 것이라고 예측할 수 있으므로 근사함수를 2차 모형으로 사용하였다.

따라서, 실제 응답함수 f 와 근사함수 y 와의 관계는 식(2)과 같이 표현할 수 있다.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2)$$

ϵ 은 응답의 오차항이고, 변수 (x_1, x_2, \dots, x_k) 는 코드 변수이다.

여기서, ϵ 을 통계적인 오차로 다루고, 일반적으로 평균이 0이고 분산 σ^2 을 가지는 정규분포로 가정한다. 따라서 근사함수로부터 n 개의 샘플 자료에서 추정된 출력값 u 는 행렬의 형태로서 식(3)과 같이 정리된다.

$$y = X\beta + \epsilon \quad (3)$$

여기서 X 는 설계변수 레벨의 행렬, β 는 회귀계수의 벡터, ϵ 은 임의의 오차의 벡터이다. 그리고 식(3)에서 추정된 함수 \hat{y} 는 식(4)과 같다.

$$\hat{y} = X\beta \quad (4)$$

RSM에는 많은 실험적인 설계방법이 있다.

본 논문에서 추정된 근사함수의 정도를 확인하기 위해 중심합성계획법(Central composite design : CCD)을 이용하였으며 반응표면 설계에서 가장 일반적으로 사용되어지는 방법이다.

2^k 요인실험(2^k factorial experiments)은 각 변수의 두 수준에서만 실험이 되므로 변수의 수준변화에 따라서 발생하는 반응량의 곡면적인 변화를 감지할 수 없으며 이차 다항회귀모형에서 제곱항 x_j^2 의 계수 β_{jj} 등을 추정할 수 없다.

이런 단점을 보완하고 적은 횟수의 실험으로 반응곡면을 추정하기 위

하여 다음과 같이 중심점과 축점을 2^k 요인실험에 추가시킨 실험계획을 중심합성계획이라고 부른다.

통계적인 근사방법인 RSM은 항상 오차를 포함하고 있으므로 추정된 근사함수의 정도를 확인해야만 한다.

본 논문에서 추정된 근사함수의 정도를 확인하기 위해 분산분석(Analysis of variance : ANOVA)을 이용하였으며 표 1에서 n 은 실험의 총계이고 k 는 적합한 모델에 대한 설계 변수의 수를 나타내었다. 결정계수 R^2 은 S_{yy} 와 SSR 로 식(5)과 같다.

$$R^2 = \frac{SS_R}{S_{yy}} \quad (5)$$

결정계수는 총변동중에서 회귀선에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율을 말한다.

R^2 을 수정하기 위한 결정계수는

$$R_A^2 = 1 - \frac{SS_E/n - k - 1}{S_{yy}/n - 1} \quad (6)$$

표 2에서 보는 것과 같이 평균제곱은 제곱합을 자유도로 나눈 것이다. 총 평균 제곱에 이용되는 오차분산 추정된 값의 잔차 평균제곱에 의하여 제곱된 오차분산 추정된 값의 측도 비율을 말한다. 그러므로 회귀선의 타당성은 R^2 과 R_A^2 에 의하여 결정된다.

<표 2> 분산분석 (ANOVA)

요인 Source of Variation	자유도 Degree of Freedom (DF)	제곱합 Sum of Squares (SS)	평균제곱 Mean Square (MS)	F_0
회귀	k	SSR	SSR/ k =MSR	MSR/MSE
잔차	$n - k - 1$	SSE	SSE/ $n - k - 1$ =MSE	
총	$n - 1$	S_{yy}		

◎ 잔차제곱합(Sum of squared error : SSE)

◎ 총 편차의 제곱합(Sum of squared total : S_{yy})

◎ 회귀제곱합(Sum of squared regression : SSR)

◎ 결정계수(The coefficient of multiple deternation: R^2)

◎ 평균제곱(Mean of squares due to regression: MSR)

◎ 잔차로 인한 평균제곱(Mean of squares due to residual errors: MSE)

[참고 문헌]

[1] Y.K. Kim, Y.S. Jo, T.P. Hong : Approach to the shape optimization of racetrack type high temperature superconducting magnet using response surface methodology, Cryogenics, Vol 41, No 1, 2001, PP.39-47.

[2] J.T. LI, Z.J. Liu, M.A. Jabbar, X.K. Gao : Design optimization for cogging torque minimization using response surface methodology, IEEE Transactions on Magnetics, Vol 40, No2, 2004, pp.1176-1179

[3] J. M. Park, S. I. Kim, J. P. Hong, J. H. Lee, "Rotor design on Torque Ripple Reduction for a synchronous reluctance motor with concentrated winding using response surface methodology", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, No.10, pp.3479-3481, Oct. 2006.

[4] F.Gillon and P. Brochet, "Shape optimization of a permanent magnet motor using the experimental design method," IEEE Trans. Magn, Vol. 35, no. 3, pp. 1278-1281,1999

[5] A. I. Khuri and J. A. Cornell, Response Surface: Designs and Analysis. New York, NY:Marcel Dekker, Inc., 1996