

유한요소법과 반응표면법을 이용한 250 kW급 견인 유도전동기 최적설계

이중호* · 윤태원

한밭대학교 전기공학부, 대전시 유성구 덕명동 16-1, 305-719

(2010년 8월 2일 받음, 2010년 11월 24일 최종수정본 받음, 2010년 12월 10일 게재확정)

본 논문은 반응표면법(Response Surface Methodology)과 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 250 kW급 견인 유도전동기의 효율 향상을 위한 최적설계기준에 대해서 다루었다. 본 논문의 주 관점은 첫째, 회전자 형상 및 치수변화에 따른 토크 비교를 통해 설계 해를 찾는 것이다. 둘째, 중심합성법(Central Composite Design)과 결합된 해석방법이 도입되었고, 추정된 회귀모델의 적합성을 결정하기 위해 분산분석(Analysis Of Variance)이 수행되었다. 이렇게 제안된 실험 절차는 기존의 초기 모델로부터 시작하여 회전자 형상 및 치수를 최적설계 하였다.

주제어 : 유한요소법, 반응표면법, 견인 유도전동기

I. 서 론

최근 에너지 절약은 세계적인 중요한 과제이다. 이처럼, 고효율의 전기 기계와 기계장치 개발은 매우 중요하다. 유도기는 공업 분야에 매우 중요한 한 부분을 차지하고 있다. 여러 해 동안, 3상 유도전동기의 동작 시 효율의 손실을 최소화함으로써 효율을 증가 시키는 것을 목표로 많은 연구가 이루어졌다. 유도기의 설계 원리는 여러 해 동안 변하지 않은 것에 비해 기술자의 기술과 지식은 상당히 발전되었다.

체계적으로 손실의 근본적 원인과 개선에 대한 가능성을 분석하고, 전기적 영역 뿐 만 아니라 기계적인 영역으로써 냉각 장치, 온도 레벨, 외부 직경 대 길이 비율 등 새로운 접근이 요구된다.

이 논문에서는, 250 kW급 견인유도전동기에 대한 체계적이고 최적화된 새로운 설계 방식을 적용했다.

효율성 향상을 위한 전자 요소는 다음과 같습니다.

- 1) 활성재료의 양 증가
- 2) 고성능 적층재료 사용
- 3) Rotor의 기하학적 최적화
- 4) 공극의 크기 최적화

많은 최적화 방법 중 반응표면법(RSM)은 여러 개의 독립적인 설계변수가 출력 함수에 복합적인 작용을 하고 있을 때, 설계 변수의 변화에 대한 출력 함수의 변화를 추정하는 통계적인 분석방법이다.

또한, RSM을 이용하면 최적 설계에 소용되는 시간을 줄일

수 있다는 게 큰 장점이다.

본 논문에서는 최적설계에 따른 적합한 조건을 찾아내기 위하여 RSM이 사용되었으며 조건에 따른 토크와의 관계를 예측하기 위해 필요한 실험 데이터는 유한요소법을 이용하였다 [1-3].

본 논문의 주 관점은 첫째, 회전자 형상 및 치수변화에 따른 토크 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.

II. 설계 모델과 알고리즘

1. 설계 모델

기존의 250 kW급 견인용 농형 유도전동기를 장하분배법 및 형상치수법을 이용하여 고효율 농형 유도전동기를 설계하고, 등가회로법을 이용한 특성 분석을 하여 설계를 하는 방식으로 연구를 진행하였다. 설계의 타당성을 보다 정확히 하기 위해 2차원 유한요소법을 이용한 특성 해석을 하고 결과값과 등가회로 특성 분석값과 비교하여 검토하였다.

Table I은 T회사 모델의 초기 모델 사양이고, 최적 설계를

Table I. Initial design

Phase	Number of poles	Output power	Current	Input voltage
3	4	250 kW	130 A	1350V
RPM	Frequency	Efficiency	Power factor	Slip
2950 min ⁻¹	100 Hz	93.5 %	88 %	1.7%

*Tel: (042) 821-1626, E-mail: limotor@hanbat.ac.kr

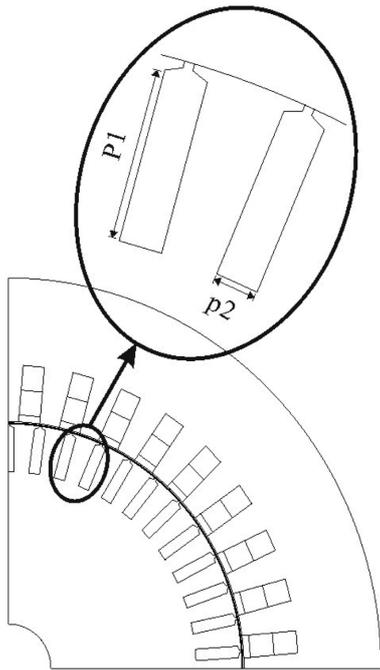


Fig. 1. The initial model, design variables and variation direction of 250 kW traction induction motor.

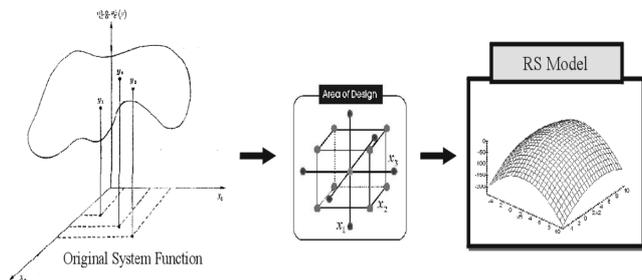


Fig. 2. RSM.

위한 변수들은 Fig. 1에서 나타내었다. Fig. 1에서와 같이 회전자 슬롯의 P1(슬롯 깊이) 그리고 P2(슬롯 폭)를 설계 변수로 하고 250 kW급 견인 유도전동기의 가동토크항상이 목적함수이다.

2. RSM의 개념

RSM은 설계변수와 응답간의 관계를 찾아 구하고, 관측된 자료를 사용하여 통계적인 근사방법을 통해 최적 시스템 응답을 찾아낸다. 여기서, 설계변수에 대응되는 응답 또는 출력 값은 일반적으로 실제 실험이나 컴퓨터에 의한 시뮬레이션을 통해 얻어지고 이 실제 응답 y는 기대 값 또는 평균값이다. 따라서 본 논문에서는 설계변수와 출력 값의 대응관계를 컴퓨터 시뮬레이션인 유한요소해석을 통해서 관측 자료를 확보하였다.

RSM에서 k개의 설계변수에 대한 실제 응답 y은 다음과 같이 가정한다.

$$y = f(X, \theta) \tag{1}$$

식 (1)에서 변수(X_1, X_2, \dots, X_k)는 자연변수(natural variables)이며, 실제의 측정 단위를 가진다. 실제 응답함수 f의 근사함수인 y는 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 f와 근사함수 y와의 관계는 식 (2)과 같이 표현할 수 있다.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{j \neq l}^k \beta_{jl} x_j x_l + \epsilon \tag{2}$$

ϵ 은 응답의 오차항이고, 변수(X_1, X_2, \dots, X_k)는 코드변수이다. 여기서, ϵ 을 통계적인 오차로 다루고, 일반적으로 평균이 0이고 분산 σ^2 을 가지고 정규분포로 가정한다. 따라서 근사함수로부터 n개의 샘플자료에서 추정된 출력 값 μ 는 행렬의 형태로서 식 (3)과 같이 정리된다.

$$y = X\beta + \epsilon \tag{3}$$

여기서 X는 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.

$$\hat{y} = Xb \tag{4}$$

RSM에는 많은 실험적인 설계방법이 있다.

본 논문에서 추정된 근사함수의 정도를 확인하기 위해 중심합성계획법(Central Composite Design: CCD)을 이용하였으며 반응표면 설계에서 가장 일반적으로 사용되는 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 위하여 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 Table I에서 n은 실험의 총계이고, k는 적합한 모델에 대한

Table II. Analysis of variance

Source of variation	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F_0
Regression	k	SS_R	$SS_R/k = MS_R$	MS_R/MS_E
Residual	$n - k - 1$	SS_E	$SS_E/(n - k - 1) = MS_E$	
Total	$n - 1$	S_{yy}		

설계 변수의 수를 나타내었다.

결정계수 R^2 은 S_{yy} 와 SS_R 로 식 (5)과 같다.

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

결정계수는 총 변동 중에서 회귀선에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율을 말한다.

R^2 을 수정하기 위한 결정계수는

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

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

- 잔차제곱합(Sum of squared error: SS_E)
- 총 편차의 제곱합(Sum of squared total: S_{yy})
- 회귀제곱합(Sum of squared regression: SS_R)
- 결정계수(The coefficient of multiple determination: R^2)
- 평균제곱(Mean of squares due to regression: MS_R)
- 잔차로 인한 평균제곱(Mean of squares due to residual errors: MS_E)

III. 최적화 과정

Fig. 3은 전체 설계흐름을 보여준다.

설계과정은 설계 흐름도에 따라 진행하였다.

Step1: 초기값을 정한다. 그리고 초기 모델은 회전자 slot = 46, 고정자 slot = 36으로 선택하였다.

Step2: 회전자 슬롯의 폭과 깊이는 250 kW급 견인 유도전동기에서 토크밀도와 관련된 설계변수를 적용한다.

Step3: 설계 변수의 범위는 중심 합성 계획법(CCD)에서 Table I과 Table II를 참고하여 설정했다.

Step4: 유한 요소 해석(FEA)을 실행하여 토크 값을 계산하였다.

Table III. The level of design variables

P1 (Slot depth)	P2 (Slot width)	기동 토크
24 mm	7.5 mm	1466.9799 Nm
25 mm	6.5 mm	1481.8471 Nm
25 mm	7 mm	1465.7733 Nm
25 mm	7.5 mm	1449.2824 Nm
26 mm	6.5 mm	1467.6776 Nm
26 mm	7 mm	1452.3487 Nm
26 mm	7.5 mm	1436.6436 Nm
27 mm	6.5 mm	1458.0206 Nm
27 mm	7 mm	1443.5208 Nm
•	•	•
•	•	•
•	•	•
27 mm	7.5 mm	1428.3505 Nm
28 mm	6.5 mm	1452.3854 Nm
28 mm	7 mm	1438.0754 Nm
28 mm	7.5 mm	1423.8325 Nm

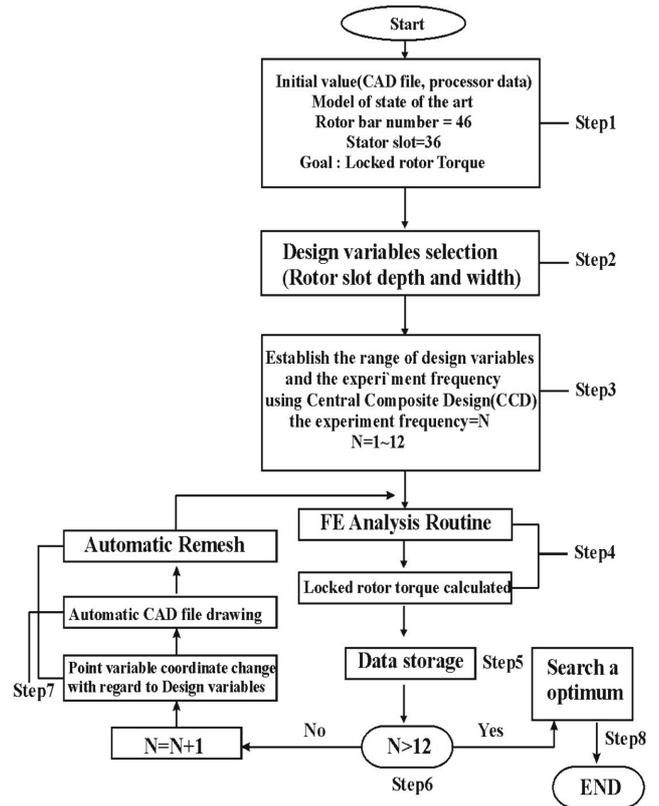


Fig. 3. Flow chart of design procedure.

Step5: 유한 요소 해석(FEA)으로부터 얻어진 토크 값을 저장한다.

Step6: 실험횟수(N)가 13되면 최적 토크 밀도(Step8)를 찾고, 실험횟수(N)이 12보다 작을 경우에는 실험횟수(N)를 하나를 증가시켜 step7로 넘어간다.

Step7: 회전자 변화방향과 포인트변수는 Fig. 1에서 보여준다.

변수에 따라 회전자와 고정자가 변화 될 때, FEA를 통한 많은 전처리기를 수행하는 것은 어려움을 가지고 있다.

이 이유로 인해, 새로운 CAD 파일은 자동적으로 설계 변수의 변화에 따라서 다시 그립니다.

자동 mesh 발생의 과정은 다음과 같다.

mesh 발생시, mesh 데이터는 노드 수, 요소 수, 영역, 경계 조건, 기타 등등이 변화하지 않지만, 오직 설계 변수의 x, y 좌표값만이 변화한다.

이렇게 하여, 제안된 전처리기 실험 절차는 단 시간 안에 처리가 가능하며 이 실험 절차는 실험횟수(N)가 13이 될 때까지 반복 수행한다.

Step8: 반응 표면 모델은 변수의 배열에 따라 FEA에서 얻어진 자료에 의해 만들어진다. 그리하여 최적 토크 밀도를 얻는 것이 가능하다.

RSM은 통계적 근사 방법을 통하여 설계 변수와 반응과의 관계를 찾고, 시스템으로부터 얻어진 데이터를 기초로 사용한다.

이런 반응값은 일반적으로 컴퓨터 시뮬레이션과 실제실험에 의해서 얻어진다.

그러므로, 유한 요소 해석(FEA)은 본 논문에서는 250 kW 급 견인 유도 전동기의 데이터를 얻어서 수행한다. 반응 응답의 생성을 위한 많은 실험적인 설계 변수들이 있다.

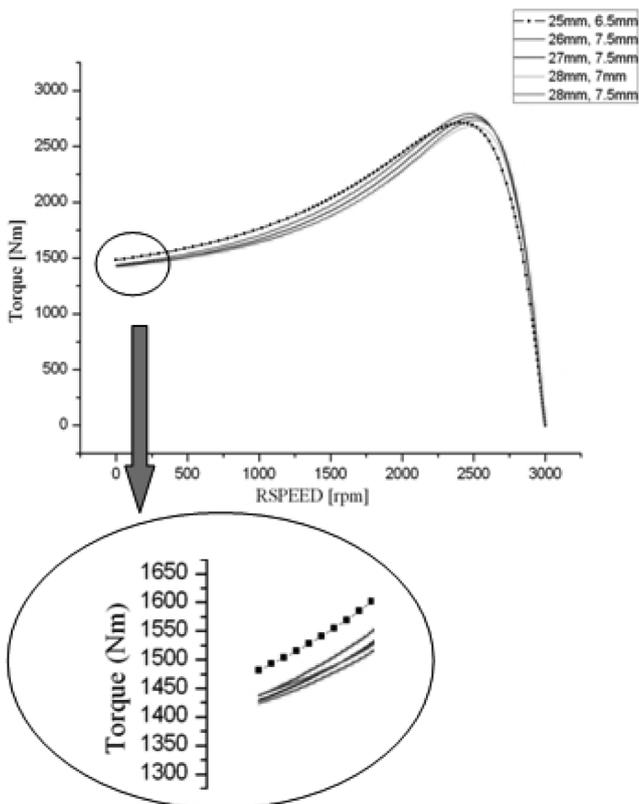


Fig. 4. Torque-speed curve of optimization procedure.

중심합성계획법(CCD)은 두 번째 순서에 알맞게 반응 표면을 하기 위해서 사용된다[4, 5].

IV. 결과 및 분석

Fig. 4는 모델 별 기동토크 및 최대 토크특성 분석을 위해 각각의 설계변수의 수준별 토크특성을 나타낸 그래프이다. 최적모델(25 mm, 6.5 mm)로 선정된 모델의 경우 기타 다른 모델보다 기동토크 및 최대토크가 높음을 확인 할 수 있었다. 분석 결과 최적모델과 기타 모델들의 차이는 다음과 같다.

최적모델(슬롯 깊이: 25 mm, 슬롯 폭: 6.5 mm)은 기동토크 및 최대 토크가 가장 높게 나타났다. 견인 유도전동기의 가장 중요한 요소인 기동토크는 초기 모델(슬롯 깊이: 28 mm

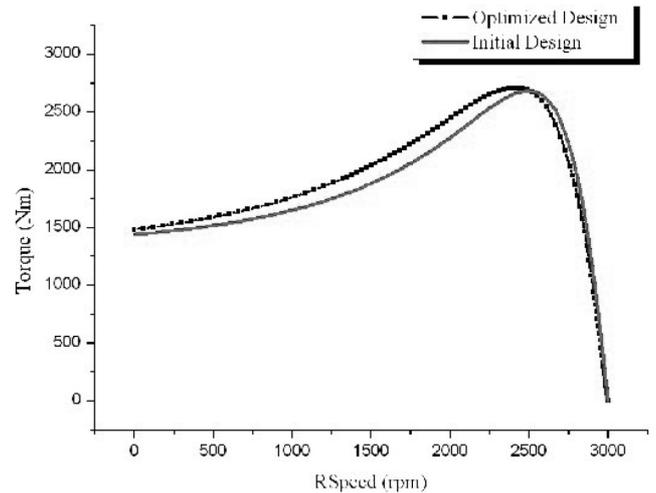


Fig. 5. Torque-speed curve comparisons of optimized and T company model.

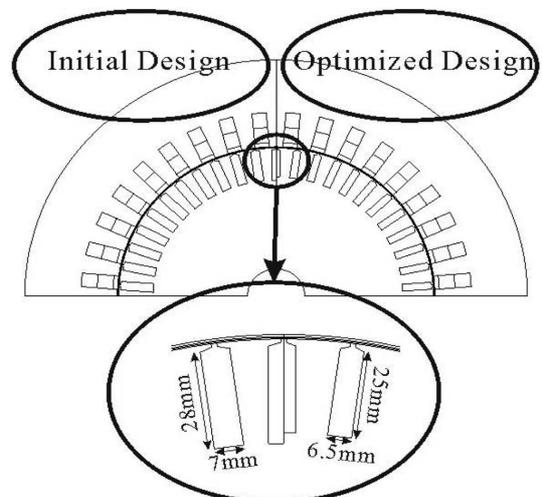


Fig. 6. Optimized design solution and initial model.

슬롯 폭: 7 mm)보다 대략 50 Nm 향상되었다.

초기 모델과 최적 모델의 속도 및 토크를 비교 하기 위해 Fig. 5를 통해 나타내었다. 최적 모델은 초기 모델에 비해 기동토크 및 평균토크가 높다는 것을 확인 할 수가 있다.

실험 설계에 의해서 얻어진 최적모델과 초기모델의 치수를 Fig. 6을 통해서 나타내었다. 최적모델은 초기모델에 비해 슬롯 깊이 및 폭이 감소하기 때문에 최적모델은 제조 과정에서 회전자 bar의 제작비용까지 감소되어 경제적인 것이다.

V. 결 론

본 논문은 견인유도전동기의 국산화 기술개발을 위해 일본의 T사의 제품을 형상 치수법 및 장하 분배법을 이용하여 설계의 기초모델을 설계 하였고 최적화 과정은 다음과 같다.

첫 번째 고정자 슬롯, 공극 길이, 회전자 직경에 따라 250 kW급 견인 유도 전동기의 토크밀도와 관련 있는 최적 설계법이 제시 되었다.

두 번째 본 논문에서의 성공적인 설계는 회전자 모양(크기)

에 따라 토크 밀도의 비교를 통해서 알 수 있음을 제시 했다.

세 번째는 빠른 설계를 위해 자동으로 ACAD파일을 구성 하고, 자동 mesh를 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

기존의 초기모델로부터 시작하여 최적 설계치(25 mm, 6.5 mm)가 선정되었고, 최적화기법 RSM은 250 kW급 견인 유도 전동기의 최적설계의 하나의 해결책으로써 입증 되었다.

참고문헌

- [1] J. M. Park, S. I. Kim, J. P. Hong, and J. H. Lee, IEEE Trans. Magn. **42**, 3479 (2006).
- [2] F. Gillon and P. Brochet, IEEE Trans. Magn. **35**, 1278 (1999).
- [3] A. I. Khuri and J. A. Cornell, Response Surface: Designs and Analysis, Marcel Dekker, New York (1996).
- [4] Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery, Response Surface Methodology Process and Product and Optimization Using Design Experiments, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey (1995).
- [5] Y. C. Choi, H. S. Kim, and J. H. Lee, IEEE Trans. Magn. **44**, 4135 (2008).

Optimum Design Criteria of 250 kW Premium Efficiency Traction Induction Motor Using RSM & FEM

Jung Ho Lee* and Tae Won Yun

Dept. of Electrical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

(Received 2 August 2010, Received in final form 24 November 2010, Accepted 10 December 2010)

This paper deals with the optimum design criteria for the premium efficiency of 250 kW traction induction motor, using response surface methodology (RSM) and finite element method (FEM). The focus of this paper is found firstly a design solution through the comparison of torque according to rotor bar shape, rotor dimensions variations. And secondly a mixed resolution with central composite design (CCD) is introduced and analysis of variance (ANOVA) is conducted to determine the significance of the fitted regression model. The proposed procedure allows to be optimized the rotor copper bar shape, rotor slot, rotor dimensions starting from an existing motor or a preliminary design.

Keywords: FEM, RSM, traction induction motor