

반응표면법과 유한요소법을 이용한 플럭스 스위칭 전동기의 최대토크밀도와 최저토크리플을 위한 최적설계

김영현*, 윤대원*, 이종호*
국립한밭대학교*

Optimum Design Criteria for Maximum Torque Density & Minimum Torque Ripple of Flux Switching Motor using RSM & FEM

Young Hyun Kim*, Tae Won Yun*, Jung Ho Lee*
Hanbat National University*

Abstract - This paper deals with optimum design criteria for maximum torque density & minimum torque ripple of Flux Switching Motor (FSM) using RSM & FEM.

The focus of this paper is to find a design solution through the comparison of torque density and torque ripple according to rotor shape variations. And then, a central composite design(CCD) mixed resolution is introduced, and analysis of variance (ANOVA) is conducted to determine the significance of the fitted regression model.

1. 서 론

플럭스 스위칭 모터(Flux Switching Motor : FSM)는 스위치드 릴럭턴스 모터(Switched Reluctance Motor : SRM)과 Inductor Alternator가 결합된 새로운 형태의 전동기이다[1].

FSM의 구조는 돌극형 회전자와 돌극 또는 비돌극 형태의 고정자이다.

고정자 권선은 계자 권선과 아마추어 권선으로 구성되어 있다.

FSM의 계자 권선에는 일정한 DC전류를 가하며, 전기자 권선에는 전자적 제어를 통하여 duty ratio에 따라 두 전기자 권선중 하나의 권선에만 DC전류를 흘린다는 특징이 있다[2].

FSM의 장점 중 매우 저 비용으로 대량 생산할 수 있는 장점이 있다.

또한, 전기적인 무정류 제어가 가능하며, 고수명, 매우 다양한 분야의 이용, 정밀한 토크, 속도, 위치 제어 등에 추가적인 비용이 들지 않는 장점이 있다.

효율과 토크 리플 등의 문제는 FSM의 성능 평가에 매우 중요하다.

이러한 특성들은 기기의 고정자와 회전자 형상에 의해 결정되므로 수치적인 평가와 설계가 요구된다.

본 논문은 반응표면법(Response Surface Method : RSM)과 유한요소법(Finite Element Method : FEM)을 이용한 FSM의 최대 토크밀도와 최저 토크리플을 위한 최적설계를 다루고 있다.

이 논문의 주 관점은 토크밀도의 비교를 통한 설계 해법을 찾고 토크리플에 따른 회전자의 형상변화이다.

2. 본 론

2.1 설계 알고리즘과 기본 모델링

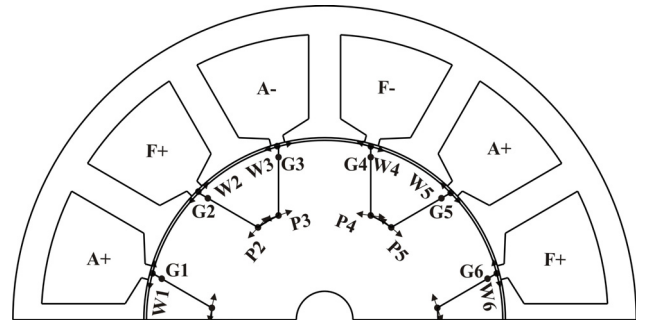
최적 설계를 위한 기본 모델링은 그림 1에서 보여준다.

돌극 에지와 돌극 폭의 변화에 따른 회전자 형상 변화 방향을 나타낸다.

FSM의 회전자 설계 변형은 최대 토크밀도와 최소 토크리플에 따라 결정된다.

그리고 분석 데이터는 유한요소해석에 따른 중심합성법에 의해 결정되며, 최적 포인트는 데이터의 분석에 의해 결정된다.

W1에서 W6과 P1과 P6 포인트의 이동조건은 돌극 폭 변환을, G1에서 G6의 포인트는 고정되어 있으며 포인트 W1에서 W6은 arc를 따라 이동되어 돌극 에지의 형상변환을 시킨다.



<그림 1.> FSM의 초기 모델의 설계 변수와 변수 방향

2.2 반응표면법

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 논문에서 설계변수와 출력값의 대응관계를 컴퓨터 시뮬레이션인 유한요소해석을 통해서 관측 자료를 확보하였다.

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

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

식(1)에서 변수 x_1, x_2, \dots, x_k 는 자연변수이며, 실제의 측정 단위를 가진다. 실제 응답함수 f 의 근사함수인 y 는 Taylor 급수 전개를 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.

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

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 형태로써 식(3)과 같이 정리된다.

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

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.

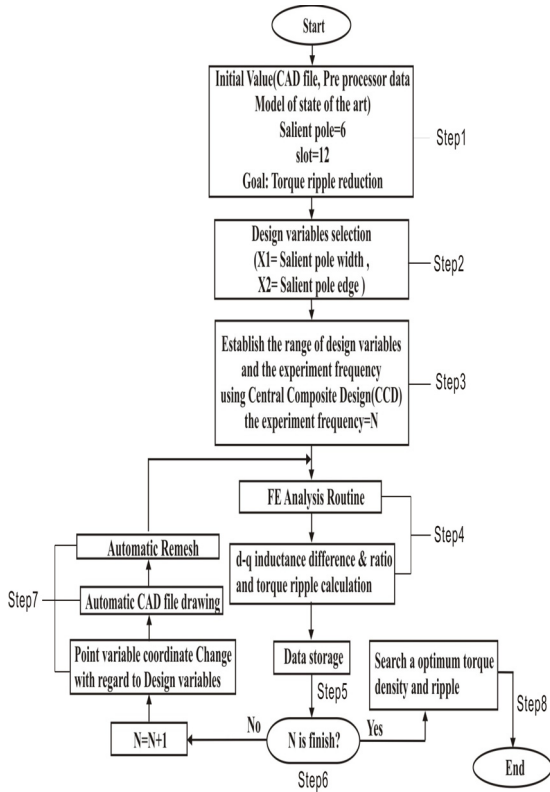
$$\hat{y} = X\hat{\beta} \tag{4}$$

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. 통계적인 근사방법인 RSM은 항상 오차를 포함하고 있으므로 추정된 근사함수의 정도

를 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[3]-[5].

<표1>분산분석(ANOVA)

요인	자유도	제곱합	평균제곱	F_0
회귀	k	SS_R	$SS_R/k=MS_R$	MS_R/MS_E
잔차	$n-k-1$	SS_E	$SS_E/(n-k-1)=MS_E$	
총	$n-1$	S_{yy}		



<그림 2.> 설계 흐름도

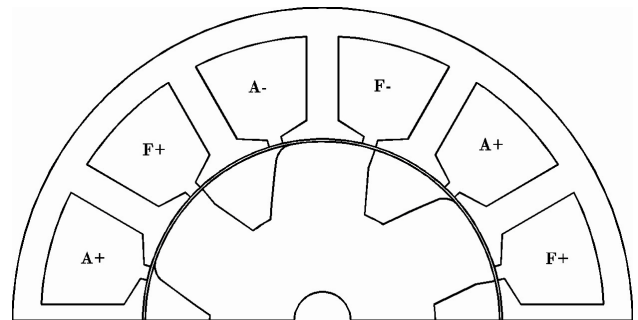
2.3 최적설계

그림 2는 최적설계 과정을 보여준다. 회전자의 형상 좌표는 돌극 폭과 돌극 에지의 변화에 따라서 그려졌다. 흐름도에 의한 디자인 절차는 다음과 같다
 Step 1: 초기값(CAD 파일, 상태 모형의 사전 처리 데이터)을 설정 하시오.
 Step 2: 회전자에 돌극 폭(X1)과 돌극 에지(X2)는 FSM에서 토크밀도와 관련된 디자인 변수들로 채택된다. 그러나 rib들은 내재하는 생산의 한계로 인한 고정 값을 가지고 있다.
 Step 3: 디자인 변수들과 실험 주파수의 범위는 중심합성법(CCD)을 사용함으로써 설립되었다. 실험 주파수 = N
 Step 4: 유한요소해석(FEA)은 수행되며 d, q 인덕턴스 차와 비율 그리고 토크리플은 계산된다.
 Step 5: FEA로부터 얻은 d-q는 저장된다.
 Step 6: 실험 주파수 = N
 예 : 최적 조건 토크밀도와 리플을 찾아라.
 아니오: N=N+1
 Step 7: 점 변수들의 보기와 돌극 폭의 변화 방향 그리고 돌극 에지 변수들(X1), (X2) 에 의한 회전자 모형이 다양할 때 그것들은 FEA를 위한 많은 사전처리를 수행하는 것에 어려움을 가진다.
 이런 이유로, 새로운 CAD 파일은 자동적으로 디자인

변수들의 변화에 맞춰서 다시 그려진다.
 그다음에 자동 mesh 처리과정이 뒤따른다. mesh과정은, mesh 데이터 즉, 노드 번호, 소자 수, 부분경계 조건, 등등이 변하는게 아니라 단지 디자인 변수들의 x, y좌표를 조정하는 것이다.
 이 방법은 제안된 사전처리장치 절차는 시간의 단주기에 수행될 수 있다.
 이 과정은 N까지 계속 된다.
 Step 8: 반응표면모델은 설립된 범위에 의한 FEA로부터 획득된 데이터에 의해서 생성된다.
 그러므로 최적 토크밀도를 얻는 것은 가능하다.

2.4 설계 결과

그림 3은 그림 1의 초기 모델을 RSM과 FEM 해석을 통하여 계산되어진 토크밀도 및 토크리플 최적조건을 찾아 설계된 회전자 형상 모델 이다.



<그림 3.> RSM과 FEM을 이용한 FSM의 로터 형상 최적 설계

3. 결 론

본 논문에서는 앞서 이야기한 바와 같이 RSM과 FEM 해석을 통하여 최대 토크 밀도와 토크 리플 저감을 위한 최적 설계를 행하였다. 회전자 형상변환 뿐만 아니라 고정자 슬롯 및 치의 형상변환 그리고, 권선의 직경과 점적률에 따른 턴수 변화등의 수치 해석수행을 통하여 설계를 하였으며 초기 기동에 따른 문제점에 대한 인덕턴스의 계산을 통한 접근을 하고 있어 높은 성능과 효율을 가지는 전동기를 설계하고 있으므로 추후 최종 논문을 통하여 더 많은 정보를 제공할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

[1]C. Pollock and M. Wallace, "The Flux Switching Motor, A DC Motor without Magnets or Brushes", IEEE IAS Annual Meeting, October 1999.
 [2]K.F. Raby, "Inductor alternators for 10 KC/S", Technical Monograph, Engineering Department, The British Thomson-Houston Company Ltd., 27th April 1950.
 [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", *IEEETransactionsonMagnetics*, vol.42, No.10, pp.3479-3481, Oct.2006.
 [4]Y. C. Choi, J. H. Lee, J. P. Hong, "The Torque Ripple Reduction of A Concentrated Winding Synchronous Reluctance Motor according to Stator & Rotor structure variations using RSM", *Journal of Applied Physics*, Volume 103, issue 7, pp. 07F133-07F133-3 (2008).
 [5]Y. C. Choi, H. S. Kim, J. H. Lee, "Design Criteria for Maximum Torque Density & Minimum Torque Ripple of SynRM according to the Rated Wattage using Response Surface Methodology", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol, 44, No. 11, pp.4135-4138. Nov 2008.