

반응표면법을 이용한 집중권선 동기 릴럭턴스 전동기의 토크 리플 저감에 관한 회전자 설계

* 박종민¹, 김성일², 홍정표², 이중호¹
¹대전시 유성구 한밭대학교 전기공학과
²경남 창원시 창원대학교 전기공학과

Rotor Design on Torque Ripple Reduction for a Synchronous Reluctance Motor with Concentrated Winding using Response Surface Methodology

* Jung-Min Park¹, Sung-Il Kim², Jung-Pyo Hong², Jung-Ho Lee¹

¹ Department of Electrical Engineering, Hanbat National University #16-1, Yuseong-gu, Daejeon, 305-719, KOREA
² Department of Electrical Engineering, Changwon National University Changwon, Gyeongnam 641-773, KOREA

Abstract - This paper deals with the optimum rotor design solution on torque ripple reduction for a SynRM with concentrated winding using response surface methodology (RSM). The RSM has been achieved to use the experimental design method in combination with finite element method (FEM) and well adapted to make analytical model for a complex problem considering a lot of interaction of design variables. Comparisons are given with characteristics of a SynRM according to flux barrier number, flux barrier width variation, respectively.

$$L_k = L_{r-1}, L_{k-1} = L_{r-2}, \dots, L_{k-(n-1)} = L_{r-n} \quad (n=2, \dots, r) \quad (1)$$

여기서, flux barrier 수(r) (r = 3, 4, 5) k=r-1

2.2 RSM의 개념

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 y는 기대값 또는 평균값이다. 따라서 본 논문에서는 설계변수와 출력값의 대응관계를 컴퓨터 시뮬레이션인 유한요소해석을 통해서 관측 자료를 확보하였다. RSM에서 k개의 설계변수에 대한 실제 응답 y는 다음과 같이 가정한다.

$$y = f(X, \theta) \quad (2)$$

식(2)에서 변수 x_1, x_2, \dots, x_k 자연변수이며, 실제의 측정 단위를 가진다. 실제 응답함수 f의 근사함수인 y는 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 f와 근사함수 y와의 관계는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j x_j + \epsilon \quad (3)$$

ϵ 은 응답의 오차항이고, 변수 x_1, x_2, \dots, x_k 코드 변수이다. 여기서, ϵ 을 통계적인 오차로 다루고, 일반적으로 평균이 0이고 분산 σ^2 을 가지는 정규분포로 가정한다. 따라서 근사함수로부터 n개의 샘플 자료에서 추정된 출력값 u는 행렬의 형태로서 식(4)과 같이 정리된다.

$$y = X\beta + \epsilon \quad (4)$$

여기서 X는 설계변수 레벨의 행렬, β 는 회귀계수의 벡터, ϵ 은 임의의 오차의 벡터이다. 그리고 식(4)에서 추정된 함수 \hat{y} 는 식(5)과 같다.

$$\hat{y} = X\hat{\beta} \quad (5)$$

여기서 행렬 X는 행렬 X의 전치행렬이다.

RSM에는 많은 실험적인 설계방법이 있다. 본 논문에서 추정된 근사함수의 정도를 확인하기 위해 중심합성계획법(Central composite design : CCD)을 이용하였으며 반응표면 설계에서 가장 일반적으로 사용되는 방법은, 2^k요인실험은 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^k요인실험에 추가시킨 실험계획을 중심합성계획법이라고 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 n은 실험의 총계이고 k는 적합한 모델에 대한 설계 변수의 수를 나타내었다.[4]

<표 1> 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}		

1. 서 론

일반적으로 동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)는 유도기에 비해 효율이 높고, 제작상의 비용이 적게 드는 등 많은 이점들이 있다.

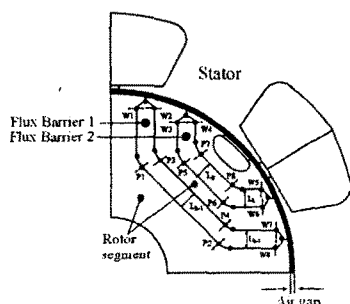
만약 동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자 권선이 종래의 분포권선형이 아니라 집중권선형으로 했을 때는 공장 제조시 권선 작업이 단순해지며 동손이 저감되고 저가의 전동기를 확보할 수 있는 장점이 있다. 일반적인 최적설계기법들과는 달리 RSM은 여러 개의 독립변수와 출력간의 인과관계를 규명해내는 통계적인 근사기법으로 최근 전기기기의 설계에 있어 효과적인 최적화 방법으로 많이 사용되고 있다. 따라서 SynRM의 토크리플을 줄이기 위해서는 많은 설계변수의 상호작용에 대한 영향을 고려해야하므로 실질적인 목적함수 형태를 구하기가 어려우며 유한요소법을 이용한 최적화를 수행한다 하더라도 많은 계산 시간이 요구된다. 그래서 설계변수와 응답(출력)에 대한 관측 자료로부터 해석적인 근사모형을 만듦으로써 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있는 RSM을 적용하였다.[1]-[2]

본 논문은 반응표면법(RSM)을 이용하여 자속 장벽(flux barrier) 수, 자속 장벽(flux barrier) 폭을 설계변수로 하여 토크 리플을 감소시키기 위해 집중권선 SynRM의 회전자 최적 설계를 수행하였다. 일반 분포권선형 SynRM(24슬롯 모델)의 특성과 각 자속 장벽 수, 자속 장벽 폭등의 변화에 따른 집중권선형 SynRM (6슬롯 모델)의 특성을 비교하여 최적치를 구하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

집중권선형 SynRM은 4극과 6슬롯의 모델이다. 적층 길이는 77(mm)이며 회전자 직경은 30.1(mm)이고 공극은 0.4(mm), 고정자 직경은 87.9(mm)이다. SynRM에서 토크 리플과 관련된 설계 변수는 고정자의 슬롯, 공극(Air gap), 회전자의 릿(rib) 폭과 자속 장벽 수이다. 최적 설계는 자속 장벽 수(3,4,5)와 자속 장벽 폭을 변수로 고려했다. 그림 1은 3개의 자속 장벽에서 자속 장벽 폭에 따른 형상 변화를 위한 변화점 변수와 변화방향을 보여준다. 각각 한 쌍이 되는 (W1,W8), (W2,W7), (W3,W6)···은 q축을 기준으로 하여 대칭적으로 움직인다. 그리고 P1-P8점들은 식(1)에서 자속 장벽 수(r)에 따른 변수인 자속 장벽 폭에 따라 변화하는 상태로 움직인다.[3]



<그림 1> SynRM의 설계 변수와 변화 방향

2.3 최적화

〈표 2〉 설계변수의 범위(5 flux barrier 수)

설계 변수	설계 변수의 범위				
	-2	-1	0	1	2
L1	2.586	2.633	2.677	2.718	2.757
L2	1.534	1.653	1.87	2.253	2.382
L3	1.534	1.653	1.87	2.253	2.382
L4	2.553	2.596	2.633	2.674	2.711

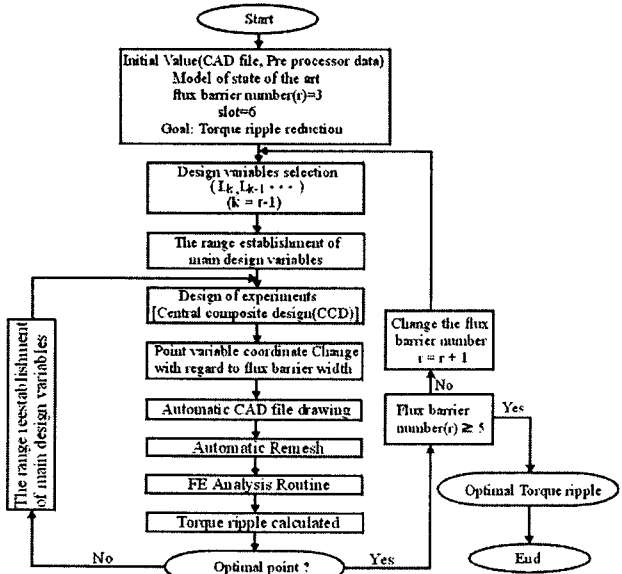
〈표 3〉 중심합성계획법을 이용한 실험 결과

	L1[mm]	L2[mm]	L3[mm]	L4[mm]	T _{peak} /T _{ave}
1	2.633	2.253	2.253	2.674	83.2
2	2.677	1.87	1.87	2.633	72.3
3	2.677	1.87	1.87	2.633	72.3
4	2.718	1.653	1.653	2.674	68.5
5	2.757	1.87	1.87	2.633	63.8
6	2.718	2.253	2.253	2.674	71.0
7	2.633	1.653	1.653	2.674	79.5
8	2.677	1.534	1.87	2.633	69.7
.....
26	2.677	1.87	1.87	2.633	72.3
27	2.718	1.653	1.653	2.596	69.1
28	2.633	2.253	1.653	2.674	81.8
29	2.677	1.87	1.87	2.711	80.4
30	2.677	1.87	1.87	2.553	75.1
31	2.718	2.253	2.253	2.596	74.4

L1: 자속 장벽1, L2: 자속 장벽2, L3: 자속 장벽3, L4: 자속 장벽4
 T_{peak}: peak-peak Torque (Nm), T_{ave}: average Torque (Nm)
 T_{ripple}: T_{peak} / T_{ave} (%)

〈표 4〉 분산분석 (ANOVA)

요인	자유도	제곱합	평균제곱	F ₀
Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	
회귀	14	0.072406	0.005172	49.73
잔차	16	0.001666	0.000104	
총	30	0.07407		



〈그림 2〉 설계 흐름도

그림 2 는 설계 흐름도를 보여준다. 회전자의 형상 좌표는 설계 변수의 조건에서 그려진다. 회전자의 립(rib)은 기계적인 문제 때문에 고정된 값을 가진다. 그리고 그림 1에 나타난 것처럼 새로운 CAD 파일은 자동적으로 자속 장벽 폭의 변화에 대하여 다시 그려진다. 여기서 동일한 자속 장벽 수에서 회전자의 x, y좌표만이 변하고 마디번호(node number), 요소 번호(element number), 경계 조건(boundary condition) 등은 변화하지 않는다. 제안된 선처리(pre-processor)는 각각의 설계 변수에 대해 기기의 한계치까지 실행하고, 이때 자속 장벽 수는 증가하여 다시 반복수행하며, 토크리

플이 최소화 될 때까지 실행된다. 표2는 5개의 자속장벽을 대상으로 중심합성계획법에 의한 설계변수의 범위를 나타내며, 표3은 표2의 설계변수를 바탕으로 유한요소해석을 수행한 반응값을 나타낸다. 표3에서 나타난 토크리플은 유한요소법으로 구하였다. 이러한 실험적인 결과를 이용하면 적합한 2차 다항식은

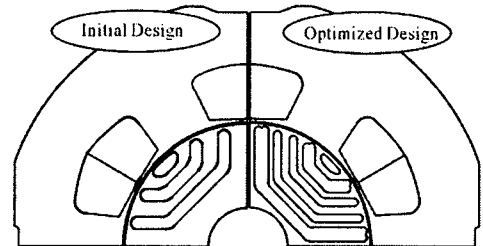
$$\hat{y} = 0.72254 - 0.04715L1 + 0.01261L2 + 0.01362L3 + 0.00533L4 + \dots + 0.00189L2L4 - 0.00681L3L4 \quad (6)$$

이고 표 4에서 분산분석이 수행되었다. F₀ = 49.73은 (F_(14,16,0.05) = 2.3722)을 초과했기 때문에 모든 계수 β가 0을 나타내는 무효의 가설은 기각된다. R² = 0.978과 R_A² = 0.958은 총 변동 95.8%는 적합한 모델인 식 (6)이 설명되어 질 수 있다는 것을 나타내고, 잔차 평균 제곱에 의해 제공된 잔차 변동의 추정치는 총 평균제곱을 이용한 잔차 변동 추정치의 4.2%이다.

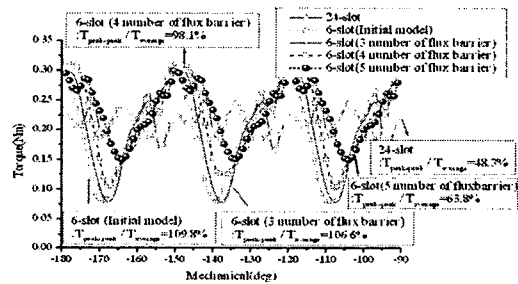
2.4 해석결과 및 분석

그림 3은 6슬롯 모델에 대한 초기 모델과 최적 설계된 모델의 형상이다. 그림 4에서 보여준 것처럼 최적 설계된 집중 권선 SynRM의 토크리플은 기존의 24슬롯 모델보다는 더 크지만 초기 모델(109.8%)의 것보다는 더 작다.

자속 장벽 수가 5개이고 L1이 2.757[mm], L2가 1.87[mm], L3이 1.87[mm], L4가 2.633[mm]일 때 그림 4와 표 3에서 보여준 것처럼 집중권선 SynRM의 토크리플은 최소가 된다(63.8%).



〈그림 3〉 6슬롯 SynRM에 대한 초기 모델과 최적 모델



〈그림 4〉 토크리플의 해석 결과

3. 결 론

본 논문은 집중 권선 SynRM의 토크 리플을 감소시키기 위해 RSM을 이용한 최적 설계 방법을 제시하였다. 빠른 설계를 위해서 자동으로 형상변화에 따르는 CAD파일을 작성하고 선처리 작업을 하는 프로그램을 설계 프로그램에 포함하여 설계시간을 단축하였다. 초기설계로부터 시작하여 최적의 설계값이 선택되었다. RSM은 SynRM과 다른 기기의 최적 설계를 위해 좋은 수단으로 고려되어 질 수 있다.

〔참 고 문 헌〕

[1] Y.K.Kim, Y.S.Jo, J.P.Hong "Approach to the shape optimization of racetrack type high temperature superconducting magnet using response surface methodology", *Cryogenics*, Vol.41, No. 1, pp39~47, 2001
 [2] S. J. Park, S. J. Jeon, J. H. Lee, "Optimum design criteria for a synchronous reluctance motor with concentrated winding using response surface methodology", *Journal of Applied Physics*, in press. 2006.
 [3] S. B. Kwon, S. J. Park, J. H. Lee, "Optimum design criteria based on the rated watt of a synchronous reluctance motor using a coupled FEM & SUMT", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41, No. 10, pp. 3970~3972, 10. 2005.
 [4] Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery, "Response Surface Methodology", Process and Product and Optimization Using Design Experiments, JOHN WILEY & SONS, 1995.