

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

* 최윤철¹, 김홍석¹, 이민명¹, 이중호¹
¹대전시 유성구 한밭대학교 전기공학과

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

* Yun-Chul Choi¹, Hong-Seok Kim¹, Min-Myung Lee¹, Jung-Ho Lee¹

¹ Department of Electrical Engineering, Hanbat National University #16-1, Yuseong-gu, Daejeon, 305-719, KOREA

Abstract - This paper deals with optimum design criteria to minimize torque ripple of concentrated winding Synchronous Reluctance Motor (SynRM) using Response Surface Methodology (RSM). The feasibility of using RSM with the finite element method(FEM) in practical engineering problem is investigated with computational examples and comparison between the fitted response and the results obtained from an analytical solution according to the design variables of stator and rotor in concentrated winding SynRM (6slot).

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 분포 권선형이 아니라 집중권선형으로 했을 때는 공장 제조시 권선 작업이 단순해지며 동손이 저감되고 저가의 전동기를 확보할 수 있는 장점이 있다. 하지만 토크리플에 의해 발생하는 진동과 소음이 상대적으로 다른 기기들에 비해 크기 때문에 토크리플을 줄이기 위해 설계변수의 적절한 조합이 이루어져야 한다.

반응표면법(RSM)은 물리적 시스템의 응답연구 중에서 “최적값”을 찾는 데 유용한 통계 및 수학적 방법이다. [1]

일반적으로 반응표면법(RSM) 내에서 설계변수와 출력간의 관계를 나타내기 위해 다항식 모델이 만들어지기 때문에 이 모델은 출력을 예상하는데 사용될 수 있고, 설계 최적화는 보다 더 쉽게 수행될 수 있다. 적합한 모델의 특성은 실험 데이터를 기초로 한 통계표를 확인함으로써 평가된다. [2]

이미 집중권선 SynRM에 관한 두 가지 논문이 발표 되었다.

첫째, 24슬롯 SynRM의 회전자 최적설계 모델을 기초로 토크 리플 저감을 위해 고정자의 치 폭, 슬롯 오픈 폭, 슬롯 깊이를 설계변수로 한 고정자 설계가 있다. [3]

둘째, [3]의 고정자 최적설계를 기초로 자속장벽 수, 자속장벽 폭을 설계변수로 한 회전자 설계가 있다. [4]

하지만, 집중권선 SynRM의 물리적 특성으로 인해 이러한 개별적인 설계에 의해서는 정확하게 예측되거나 개선 될 수 없다.

본 논문은 SynRM의 생산비 절감과 성능 향상을 위해 회전자와 고정자의 설계변수를 기초로 토크리플을 저감하기 위한 최적 설계를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

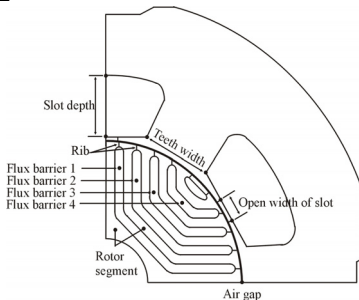


그림 1 SynRM의 설계 변수

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 림(rib) 폭과 자속 장벽수이다.

그림 1은 각각의 설계변수를 나타내고 있다. SynRM에서 토크 리플과 관련된 설계 변수는 고정자의 슬롯, 공극(Air gap), 회전자의 림(rib) 폭과 자속 장벽수이다. 최적 설계는 슬롯 오픈 폭, 슬롯 깊이, 치 폭, 자속장벽 폭을 변수로 고려했다.

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 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 는 다음과 같이 가정한다.

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

식(1)에서 변수 x_1, x_2, \dots, x_k 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.

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

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 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.

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

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. 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.[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_y		

2.3 최적화

표 2. 설계변수의 범위(5 flux barrier 수)

설계 변수	설계 변수의 범위				
	-2	-1	0	1	2
X1[mm]	1.318	2.000	3.000	4.000	4.682
X2[mm]	12.659	13.000	13.500	14.000	14.341
X3[mm]	13.659	14.000	14.500	15.000	15.341
L1[mm]	3.451	3.480	3.522	3.564	3.592
L2[mm]	1.448	1.653	1.953	2.253	2.457
L3[mm]	1.448	1.653	1.953	2.253	2.457
L4[mm]	3.006	3.033	3.072	3.111	3.137

표 3. 중심합성계획법을 이용한 실험 결과

	X1	X2	X3	L1	L2	L3	L4	T _{peak} / T _{ave}
1	3.000	13.5	14.5	3.522	1.953	1.953	3.137	61.79
2	3.000	13.5	14.5	3.592	1.953	1.953	3.072	62.34
3	3.000	13.5	14.5	3.522	1.953	1.448	3.072	60.91
!	!	!	!	!	!	!	!	!
20	3.000	13.5	14.5	3.522	1.953	1.953	3.072	67.95
21	4.000	14.0	14.0	3.564	2.253	2.253	3.033	78.83
22	2.000	14.0	14.0	3.564	1.653	2.253	3.033	56.31
!	!	!	!	!	!	!	!	!
88	2.000	14.0	14.0	3.564	2.253	2.253	3.111	60.79
89	2.000	13.0	15.0	3.480	2.253	1.653	3.033	67.08
90	4.000	13.0	15.0	3.564	2.253	2.253	3.033	78.14

X1: 슬롯 오픈 폭, X2: 슬롯 깊이, X3: 치 폭, 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
회귀	35	3994.57	114.1305	20.01
잔차	53	302.25	5.7029	
블록	1	182.20	1.0051	
총	89	4479.02		

R² = 0.892과 R_A² = 0.887

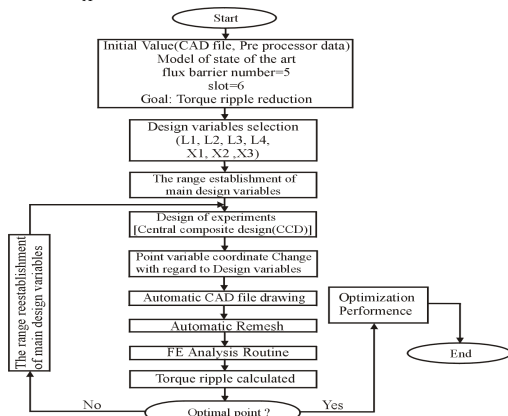


그림 2. 설계 흐름도

그림 2는 설계 흐름도를 보여준다. 회전자와 회상 좌표는 설계 변수의 조건에서 그려진다. 그리고 CAD파일은 자동적으로 자속 장벽 폭의 변화에 대하여 다시 그려진다. 여기서 동일한 자속 장벽 수에서 회전자와 회상 좌표의 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, 토크리플이 최소화 될 때까지 실행된다. 표2는 중심합성계획법에 의한 설계변수의 범위를 나타내며, 표3은 표2의 설계 변수를 바탕으로 유한요소해석을 수행한 반응값을 나타낸다. 표3에서 나타난 토크리플은 유한요소법으로 구하였다. 이러한 실험

적인 결과를 이용하면 적합한 2차 다항식은

$$\hat{y} = 3307.08 - 53.99X_1 - 17.04X_2 + 21.71X_3 - 1401.44L_1 + \dots - 31.46L_2L_4 - 48.90L_3L_4 \quad (5)$$

이고 표 4에서 분산분석이 수행되었다. F₀ = 20.01은 (F_(35,53,0.05) = 0.1561)을 초과했기 때문에 모든 계수 β가 0을 나타내는 무효의 가설은 기각된다. R² = 0.892과 R_A² = 0.887은 총 변동 88.7%는 적합한 모델인 식 (5)이 설명되어 질 수 있다는 것을 나타내고, 잔차 평균제곱에 의해 제공된 잔차 변동의 추정치는 총 평균제곱을 이용한 잔차 변동 추정의 11.3%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 고정자 설계모델(109.8%)과 회전자 설계모델(63.8%)의 것보다는 더 작다.

자속 장벽 수가 5개이고 X1이 2.00[mm], X2가 14.00[mm], X3이 14.00[mm], L1이 3.564[mm], L2가 1.653[mm], L3이 2.253[mm], L4가 3.033[mm]일 때 그림 4와 표 3에서 보여준 것처럼 집중권선 SynRM의 토크리플은 최소가 된다(56.3%).

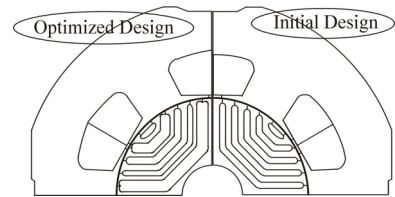


그림 3. 6슬롯 SynRM에 대한 초기 모델과 최적 모델

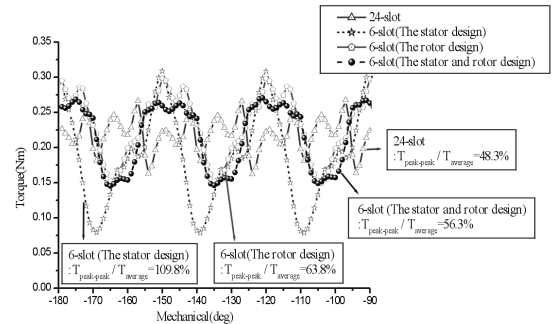


그림 4. 토크리플의 해석 결과

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 고려되어질 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] R. P. Tomas, *Statistical methods for Quality Improvement*. New York: Wiley, 2000.
 [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, No 2, 2004, pp.1176-1179.
 [3] S. J. Park, S. J. Jeon, J. H. Lee, "Optimum design criteria for a synchronous reluctance motor with concentrated winding using response surface methodology", *The 15th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields CH_B_20*, 2006.
 [4] 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.