

반응표면법을 이용한 집중권선 동기 릴럭턴스 전동기의 토크 리플 저감에 관한 최적설계

論 文

55B-2-2

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

朴聲準[†] · 李重浩^{*}

(Seong-June Park · Jung-Ho Lee)

Abstract - This paper deals with the optimum design solution on reduction of torque ripple for a Synchronous Reluctance Motor with concentrated winding using response surface methodology. The coupled Finite Elements Analysis (FEA) & Preisach model have been used to evaluate the nonlinear solution. Comparisons are given with characteristics of a SynRM according to the stator winding, slot number, open width of slot, slot depth, teeth width variation in concentrated winding SynRM, respectively. This paper presents an optimization procedure using Response Surface Methodology (RSM) to determine design parameters for reducing torque ripple. 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. Moreover, Sequential Quadratic Problem (SQP) method is used to solve the resulting of constrained nonlinear optimization problem.

Key Words : RSM, Concentrated Winding SynRM, Torque Ripple, Optimum Design, FEA

1. 서 론

오늘날 일반적으로 동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance Motor : SynRM)는 회전자에 권선이 없는 간단한 구조로 고장이 적고 신뢰도가 높으므로 장시간 운전이 필요한 곳에 적합하며, 유지 보수가 용이하다. 또한 유도기에 비해 효율이 높고, 제작상의 비용이 적게 드는 등 많은 이점들이 있지만 토크 리플에 의한 진동과 소음이 다른 기기에 비해 상대적으로 크다.

동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자 권선이 종래의 분포권선형이 아니라, 슬롯수 감소 및 집중권선형으로 했을 때는 공장 제조시 권선 작업이 단순해지며 동손이 저감되고 저가의 전동기를 확보할 수 있는 장점이 있다.

집중권선형 및 슬롯수 감소에 따라 나타나는 SynRM의 단점인 토크리플, 낮은 인덕턴스 비와 차, 효율 및 역률등의 단점을 고려하지 않는다면 좋은 특성을 얻기는 힘들 것이다. 따라서, SynRM 최적설계 시 토크 리플을 줄이기 위하여 설계 변수의 선택과 그 변수들의 적합한 조합은 매우 중요하다.

일반적인 최적설계기법들과는 달리 반응표면법(Response Surface Methodology : RSM)은 여러 개의 독립변수와 출력간의 인과관계를 규명해내는 통계적인 근사기법으로 최근

전기기기의 설계에 있어 효과적인 최적화 방법으로 많이 사용되고 있다.[1]-[2]

RSM을 이용한 전기기기 최적 설계의 예로서 SynRM의 토크 리플 최소화를 위한 최적설계를 수행하였다. 토크 리플의 크기에 영향을 주는 설계변수로서 슬롯 오픈폭, 치 폭, 슬롯 깊이, 회전자 전체 자속 장벽의 폭에 대한 전체 철심부분의 비(Kw), 공극 길이, 자속 장벽(flux barrier) 수 등을 들 수 있다.

SynRM의 토크리플을 줄이기 위해서는 많은 설계변수의 상호작용에 대한 영향을 고려해야하므로 실질적인 목적함수 형태를 구하기가 어려우며 유한요소법을 이용한 최적화를 수행한다 하더라도 많은 계산 시간이 요구된다. 그러므로, 설계변수와 응답(출력)에 대한 관측 자료로부터 해석적인 근사모형을 제시함으로써 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있는 RSM을 적용하였다.[3]

본 논문의 주 목적은 RSM을 사용하여 SynRM의 토크 성능을 향상시키고 생산 단가 문제를 해결하기 위한 최적화 방법을 다룬다. 일반 분포권선형 SynRM (24슬롯 모델)의 특징과 함께 각 고정자의 치 폭, 슬롯 오픈폭, 슬롯 깊이 등의 변화에 따른 집중권선형 SynRM (6슬롯 모델)의 특성을 비교하였다.

2. 해석대상모델

2.1 사 양

그림 1은 연구대상으로 선정된 집중권선형 SynRM의 초

[†] 교신저자, 學生會員 : 한밭대학교 電氣工學果 碩士課程

E-mail : ml12@naver.com

^{*} 正 會 員 : 한밭대학교 電氣工學果 助教授 · 工博

接受日字 : 2005年 8月 2日

最終完了 : 2005年 12月 2日

기 설계 모델이다. 표 1에 해석대상모델의 기본 사양을 나타내었다. 집중권선형 SynRM은 4극과 6슬롯의 모델이다. 그리고, 적층 길이는 77(mm)이고 회전자 직경은 30.1(mm), 고정자 직경은 87.9(mm)이다.

그림 2는 집중권선형 SynRM의 토크리플에 영향을 주는 설계변수들을 나타낸다. 이중 공극(Air gap), 릿(rib) 폭과 자속 장벽(Flux barrier) 수는 24슬롯 SynRM과 같은 조건을 가지며, 6슬롯 SynRM의 토크 리플 저감을 위한 최적 설계변수는 슬롯 오픈 폭, 슬롯 깊이, 치 폭이다.

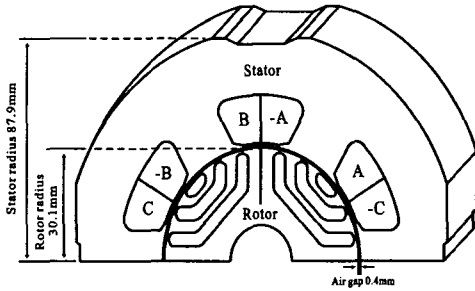


그림 1 6슬롯 SynRM의 초기 설계 모델
Fig. 1 The initial design model of 6 slot SynRM

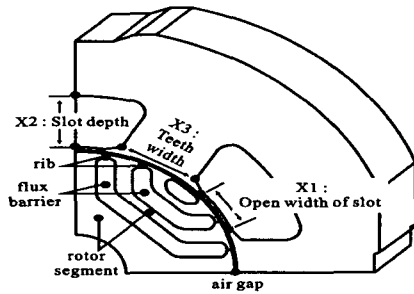


그림 2 6슬롯 SynRM의 설계 변수
Fig. 2 The design variables of 6 slot SynRM

표 1 해석 모델의 사양

Table 1 Specification of the analysis model

집중권선 동기형 릴럭턴스 전동기	
상수	3
극수	4
입력 전류 (A)	id=2 (A), iq=2.5 (A)
출력 (W)	340 (W)
속도 (rpm)	3600 (rpm)
1차 저항 (Ω)	0.784 (Ω)
권선 및 턴 수	집중권선형 (6슬롯 : 72턴/상)
슬롯	6개
회전자 적층 길이 (mm)	77 (mm)
공극 (mm)	0.4 (mm)
자속 장벽 수	3개

2.2 SynRM의 지배방정식

2차원 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} v_0 \left(-\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} v_0 \left(-\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z - J \quad (1)$$

$$J_m = v_0 \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (2)$$

2.3 정상 상태 시스템 행렬

요소 시스템 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[K^{(e)}]\{A^{(e)}\} + \{F^{(e)}\} + \{M^{(e)}\} = 0 \quad (3)$$

$$K_{ij}^{(e)} = \frac{v_0^{(e)}}{4\Delta^{(e)}} (c_{ie}c_{je} + d_{ie}d_{je}), F_i^{(e)} = -\Delta^{(e)} \frac{N_i}{3S}$$

$$M_i^{(e)} = v_0^{(e)} (M_x^{(e)}d_{ie} + M_y^{(e)}c_{ie})$$

전체 모델의 시스템 행렬은 식(4)와 같은 행렬로서 표현된다.

$$[K]\{A\} + \{F\} + \{M\} = 0 \quad (4)$$

2.4 해석 모델 및 프라이자흐 모델의 응용

프라이자흐 모델은 M-H관계를 사용하여 모든 히스테리시스 현상에 있어 인가자계와 자화량 사이에는 위상차가 있기 때문에 벡터적 해석을 필요로 한다.

그러나 벡터 해석은 복잡하며 오차를 피할 수 없다. 그러므로 회전기기의 해석에 대한 새로운 알고리즘 개발이 필요하다. 회전자는 입력자계 각을 따라 동기적으로 회전한다.

따라서 고정자의 영역은 x축 축에 대해서 교번자계로 가정할 수 있으며 회전자의 B와 H는 상수이며 x축과 축에 대해서 또한 교번자계이다. 인가자계와 자화 사이의 각은 x축에 위에서는 0 혹은 π이다.

따라서 회전기기에 대한 프라이자흐 모델은 식(5)에서 볼 수 있는 바와 같이 스칼라 모델로서 표현 되어질 수 있다.

$$M(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (5)$$

$$= \iint_{S(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta - \iint_{S(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta$$

보다 편리한 계산을 위하여 식(6)과 같이 에버렛 평면으로 대체하여 해석을 수행하였다.

$$E(\alpha, \beta) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) \quad (6)$$

3. 반응표면법을 이용한 최적화 방법

3.1 RSM의 개념

RSM은 설계변수와 응답간의 관계를 찾아 구하고, 관측된 자료를 사용하여 통계적인 근사방법을 통해 최적 시스템 응답을 찾아낸다. RSM은 어떤 공정이나 시스템으로부터 관측된 자료를 근거로 실제 응답 와 k 개의 설계 변수들 사이의 인과 관계를 통계적인 방법으로 근사하게 된다. 여기서, 설계변수에 대응되는 응답 또는 출력값은 일반적으로 실제 실험이나 컴퓨터에 의한 시뮬레이션을 통해 얻어지고, 이 실제 응답 는 기대값 또는 평균값이다. 따라서 본 논문에서는 설계변수와 출력값의 대응관계를 컴퓨터 시뮬레이션인 유한 요소해석을 통해서 관측 자료를 확보하였으며, k 개의 설계변수에 대한 실제 응답 은 다음과 같이 가정한다.

$$\eta = F(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k) \quad (7)$$

식(7)에서 변수 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$ 는 자연변수(natural variables)이며, 실제의 측정 단위를 가진다. 실제 응답함수 F 의 근사함수인 U 는 Taylor 급수전개를 기본으로 하여 1차 또는 2차 다항 모형으로 근사하게 된다. 본 논문에서 선택한 연구 대상의 반응표면이 곡면으로 표현될 것이라고 예측할 수 있으므로 근사함수를 2차 모형으로 사용하였다.

따라서, 실제 응답함수 F 와 근사함수 U 와의 관계는 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$U = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (8)$$

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 추정한 출력값 u 는 행렬의 형태로서 식(9)와 같이 정리된다.

$$U = X\beta + \epsilon \quad (9)$$

여기서 X 는 설계변수 레벨의 행렬, β 는 회귀계수의 벡터, ϵ 은 임의의 오차의 벡터이다.

한편 식(9)에서 회귀계수의 벡터는 임의의 오차의 제곱합을 최소로 하는 최소자승법을 이용하여 추정한다. 최소자승함수는 식(10)과 같다.

$$L = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \epsilon' \epsilon = (U - X\beta)'(U - X\beta) \quad (10)$$

여기서, 기호 $\hat{\cdot}$ 는 추정값을 나타낸다. 추정된 벡터 β 는 2차 다항식 모형의 회귀계수는 식(11)을 만족해야 하며, 그 값은 식(12)와 같이 표현한다. 또한 추정된 벡터 $\hat{\beta}$ 에 의하여 근사함수로 추정된 함수 \hat{U} 는 식(13)과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} \Big|_{\hat{\beta}} = -2 X' U + 2 X' X \hat{\beta} = 0 \quad (11)$$

$$\hat{\beta} = (X' X)^{-1} X' U \quad (12)$$

$$\hat{U} = X \hat{\beta} \quad (13)$$

여기서 행렬 X 는 행렬 X 의 전치행렬(Transpose matrix)이다.

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 2에서 M 은 실험의 총계이고 a 는 적합한 모델에 대한 설계 변수의 수를 나타낸 것이다.[4]

여기서, 자유도(Degree of freedom : df)는 주어진 조건하에서 자유롭게 변화할 수 있는 점의 수를 나타낸다. 기호로는 df 라고 표시한다.

표 2 분산분석 (ANOVA)
Table 2 Analysis of variance

요인 Source of Variation	자유도 Degree of Freedom (df)	제곱합 Sum of Squares (SS)	평균제곱 Mean Square (MS)
회귀	a-1	SSR	SSR/(a-1)
잔차	M-a	SSE	SSE/(M-a)
총	M-1	SST	

총 편차의 제곱합(Sum of squared total : SST)을 총변동이라 부르고, 총변동(SST)은 식(14)와 같이 나타낸다.

$$SST = \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (14)$$

여기서, 하나의 측정값 Y_i 과 Y_i 들의 평균 \bar{Y} 와의 차이를 총편차라 하면 다음과 같이 두 개의 편차의 합으로 식(15)와 같다.

$$(Y_i - \bar{Y}) = (Y_i - \hat{Y}_i) + (\hat{Y}_i - \bar{Y}) \quad (15)$$

그러므로 회귀선에 의하여 설명되지 않는 잔차제곱합(Sum of squared error : SSE)와 설명이 되는 회귀제곱합(SSR)으로 나눌 수 있다. 그리고 회귀제곱합(Sum of squared regression : SSR)은 식(16)과 같다.

$$SSR = \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (16)$$

또한 잔차제곱합(SSE)은 식(17)과 같이 나타낸다.

$$SSE = \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (17)$$

결정계수 R^2 은 SST와 SSR로 식(18)과 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (18)$$

결정계수는 총변동중에서 회귀선에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율을 말한다.

R^2 을 수정하기 위한 결정계수는

$$R_A^2 = 1 - \frac{SSE/(M-a)}{SST/(M-1)} \quad (19)$$

표 2에서 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.[5]

3.2 실험 계획법 (Design of experiments)

중심합성계획법(Central composite design : CCD)은 반응 표면 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 다항회귀 모형에서 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. 일반적으로 다항식 모델에서는 중심합성계획법을 많이 사용한다.[6]

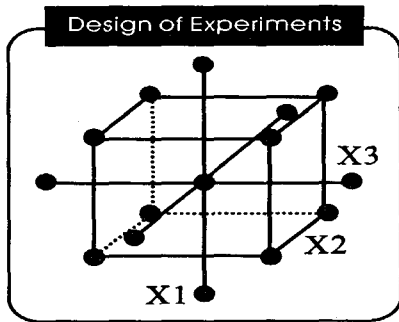


그림 3 설계변수 수가 3개일 때 중심합성계획법
Fig. 3 Central Composite Design for the number of three design variables

중심합성계획에서는 중심점의 수는 제한이 없이 하나 이상이면 되며, 축점의 수는 $2k$ 개가 되고, a 의 값은 0이 아닌 양수($a > 0$)이면 된다. 그림 3에서 2^3 요인 실험점으로 8개의 점 $(-1, -1, -1)$, $(1, -1, -1)$, $(-1, 1, -1)$, $(-1, -1, 1)$, $(1, 1, -1)$, $(1, -1, 1)$, $(-1, 1, 1)$, $(1, 1, 1)$ 이 있고, $2k=6$ 개의 축점으로 $(-a, 0, 0)$, $(a, 0, 0)$, $(0, -a, 0)$, $(0, a, 0)$, $(0, 0, a)$, $(0, 0, -a)$ 가 있으며, 중심점으로 $(0, 0, 0)$ 이 하나 이상 있다.

따라서, 그림 3은 설계변수 개수가 3일 때 실험 점들을 나타내고 있다. 중심합성계획의 실험횟수는 다음 식(20)와 같이 계산할 수 있다.

$$N = 2^k + 2k + n_0 \tag{20}$$

여기서 2^k 는 2^k 인수 설계를 위한 실험 수, $2k$ 는 축점의 수이고, n_0 는 중심점에 대한 반복실험 횟수이다.

그리고, 표 3은 세 개의 설계변수 범위를 나타낸 것이고, 표 4은 곡면적인 변화를 고려한 2차 반응표면 모델을 얻기 위해 쓰이는 중심합성계획을 나타냈으며 그 계획에 의해 유한요소해석을 사용하여 얻은 결과로 각각의 평균 토크와 토크 리플을 나타낸 것이다.

표 3 설계 변수의 범위

Table 3 The Level of design variable

Coded values		설계 변수의 범위				
		-1.682	-1	0	1	1.682
Real values	X1 : 슬롯 오픈폭 (mm)	1.318	2	3	4	4.681
	X2 : 슬롯 깊이 (mm)	12.659	13	13.5	14	14.34
	X3 : 치 폭 (mm)	13.659	14	14.5	15	15.34

본 논문에서는 집중권선형 SynRM의 토크 리플을 저감하기 위하여 목적함수로서 설계변수와 토크 리플의 관계를 2차 다항식으로 근사한 $T_{ripple}(\%)$ 로 정의하고, 제약조건으로서 평균 토크값에 대한 근사함수 $T_{average}(Nm)$ 를 이용하여, 평균 토크값이 0.1941(Nm) 이상이 되도록 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Objective function : } F(x) = T_{ripple}(x) \tag{21}$$

$$\text{Subject to : } G(x) = T_{average}(x) \geq 0.1941 \tag{22}$$

여기서, $1.318 \leq X1 \leq 4.681, 12.659 \leq X2 \leq 14.34, 13.659 \leq X3 \leq 15.34$

여기서, $T_{average}(Nm)$ 는 토크의 평균값, $T_{ripple}(\%)$ 은 토크 리플을 각각 나타낸다.

그리고, 제약 조건을 가진 최적화 문제의 해를 구하기 위해서 순차 이차계획법(Sequential Quadratic Problem : SQP)을 사용하였다.[7]

표 4 중심합성계획표

Table 4 Central composite design table

실험 횟수	설계 변수						
	X1 (mm)	X2 (mm)	X3 (mm)	$T_{peak-peak}$ (Nm)	$T_{average}$ (Nm)	T_{ripple} (%)	
집중권선형	1	3.0	13.5	14.5	0.2168	0.1951	111.09
	2	4.681	13.5	14.5	0.2217	0.1992	111.31
	3	3.0	13.5	15.341	0.2211	0.2013	109.80
슬롯	4	3.0	13.5	13.659	0.2237	0.1889	118.42
	5	4.0	13.0	14.0	0.2186	0.1933	113.05
	6	2.0	13.0	15.0	0.2197	0.1940	113.23
S	7	2.0	14.0	14.0	0.2313	0.1868	123.82
	8	3.0	14.341	14.5	0.2164	0.1951	110.91
	9	3.0	12.659	14.5	0.2169	0.1952	111.10
y	10	4.0	14.0	15.0	0.2232	0.2013	110.87
	11	1.318	13.5	14.5	0.2388	0.1864	128.11
	12	4.0	13.0	15.0	0.2231	0.2007	111.16
R	13	2.0	13.0	14.0	0.2305	0.1862	123.78
	14	2.0	14.0	15.0	0.2208	0.1947	113.45
	15	4.0	14.0	14.0	0.2197	0.1939	113.28
24 slot	2.3	13.699	3.77	0.105	0.218	48.17	

◆ X1 : 슬롯 오픈폭, X2 : 슬롯 깊이, X3 : 치 폭, $T_{peak-peak}$: peak-peak torque, $T_{average}$: average torque, T_{ripple} : Tpeak-peak/Taverage (%)

4. 최적화

본 논문의 목적은 RSM을 이용한 6슬롯 SynRM의 평균 토크와 토크 리플을 최소화하는 것이다. 6슬롯 SynRM에 적합한 2차 다항식은

$$\hat{U} = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (23)$$

여기서, 토크리플을 2차항으로 한 이유는 입력변수와 출력변수에 대한 RSM의 추정에 있어서 1차 회귀모형 또는 2차 회귀모형이 일반적으로 사용된다. 또한 1차 회귀모형에는 2수준 입력변수에 대하여 2^k 요인배치법, 2수준계의 일부 실시법, 심플렉스 계획법(Simplex design)이 사용되며, 2차 회귀모형을 완성하기 위해서는 3수준 입력변수 수준에 대하여 3^k 요인배치법, 3수준계의 일부 실시법, 중심합성계획, 회전계획(rotatable design), 회전중심계획(rotatable central composite design), Box-Behnken 계획법등을 사용하고 있다.

위 식(23)에 의해 구해진 평균 토크와 토크 리플에 대한 추정된 회귀 계수들을 표 5에 나타낸다.

$$T_{ripple} = T_{peak-peak} / T_{average} \times 100\% \quad (24)$$

6슬롯 SynRM에 적합한 2차 다항식에서 R^2 은 97.8(%)이고 R_A^2 은 95.9(%)로 나타내었다. 따라서, RSM에 의하여 얻어진 평균 토크와 토크 리플은 6슬롯 모델의 최적점에서 FEA의 결과를 비교한 것이다. 추가적으로 6슬롯 SynRM의 최적점은 오픈폭이 3.0(mm), 슬롯 깊이는 13.5(mm)와 치 폭은 15.34(mm)일 때이며, RSM과 FEA에 의하여 얻어진 토크리플은 111(%)와 109.8(%)의 값을 나타내었다. 그리고, 그림 4는 최적 설계된 6슬롯 SynRM에 대한 반응표면을 나타내었다. 그림 5는 본 논문에서의 설계 과정에 대한 흐름도를 나타낸다:

표 5 해석 모델의 추정된 회귀 계수

Table 5 Estimated coefficient of the analysis model

회귀 계수	추정된 회귀계수		
	$\hat{T}_{peak-peak}$ (Nm)	$\hat{T}_{average}$ (Nm)	\hat{T}_{ripple} (%)
β_0	2.3045	1.0359	13.2851
β_1	-0.1409E+01	0.0127E+02	-0.8138E+01
β_2	0.0088E+03	0.0573E+02	0.0083E+03
β_3	-0.2644E+01	-0.1774E+01	-1.4521
β_{11}	0.0047E+03	-0.0014E+03	0.0309E+02
β_{22}	-1.6283E-05	-0.0024E+03	0.0008E+04
β_{33}	0.0084E+03	0.006E+03	0.0447E+02
β_{12}	-0.0002E+04	0.0002E+04	-0.0001E+04
β_{13}	0.0077E+03	-0.0002E+04	0.0415E+02
β_{23}	-0.0005E+04	0.0005E+04	-0.002E+03

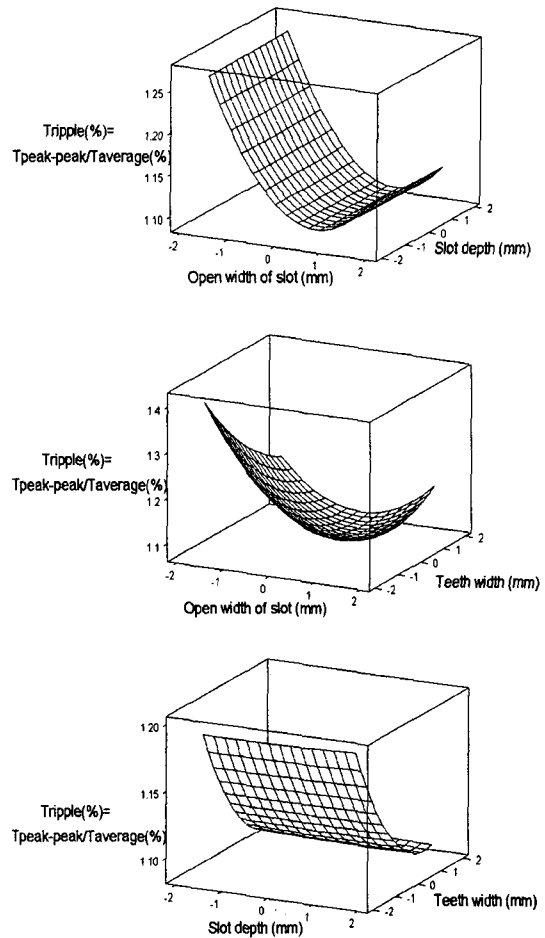


그림 4 6슬롯 SynRM의 토크 리플에 대한 반응표면
Fig. 4 Response Surface for the torque ripple of 6 slot SynRM

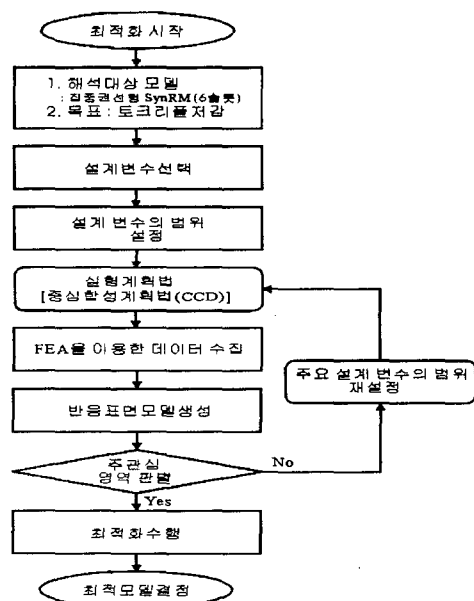


그림 5 설계 과정에 대한 흐름도
Fig. 5 The flow chart of design procedure

그림 5은 설계 흐름도를 보여준다. 본 논문의 최적설계 대상은 집중권선형 SynRM의 6슬롯모델로서 주 목적은 집중권선형 SynRM에 대한 토크 리플 저감에 있다. 설계변수는 토크 리플에 영향을 주는 슬롯 오픈폭, 슬롯 깊이, 치 폭을 주설계변수로 채택하였다. 주설계변수 범위 설정은 선택한 설계 변수에 대해 적절한 설계영역을 설정하되 되도록 크게 잡아야 설계 변수 변화에 대한 시스템 반응특성 파악이 쉽다.

따라서, 설계변수 범위설정은 실험계획법인 중심합성계획(CCD)에 적용하여 최적설계에 대한 범위를 설정한다. 설정된 범위에 따라 FEA를 이용하여 얻어진 데이터를 수집하고 이것을 통해서 반응표면모델을 생성한다. 따라서, 설계영역에서 요구하는 토크 리플 저감에 대한 최적해가 있는지 판별하여 ; YES일 경우에는 최적화 완료, NO일 경우에 주설계영역을 재설정한다.

5. 해석결과 및 분석

RSM과 FEA를 이용하여 설계변수와 평균 토크 및 토크 리플에 대한 근사 다항식을 구하고, 식(21)과 식(22)에 정의한 목적함수와 제약조건으로부터 최적화를 수행한 결과를 표 6에 나타내었다.

그림 6은 6슬롯 모델에 대한 초기 모델과 최적 설계된 모델의 형상이다. 그림 7은 설계변수 설정에 따라 최적 설계된 모델의 토크 리플과 평균 토크를 보여준다.

최적 설계된 6슬롯 모델의 토크 리플은 109.8(%)로 초기 6슬롯 모델의 토크 리플인 203.8(%)보다 작은 값을 나타내고 최적 모델은 분포권선형 24슬롯 모델의 토크 리플인 48.2(%)보다 큰 값을 확인할 수 있다. 그 이유는 집중권선형의 구조에 따라 인덕턴스의 변화가 크기 때문에 최적 설계된 집중권선형 SynRM은 기존의 24슬롯 모델보다 더 큰 토크 리플을 나타낸다.

고정자 권선을 기존의 분포권선형이 아니라 집중권선형으로 했을 경우 공장 제조시 권선 작업이 단순해지며 동손이 저감되고 생산 단가가 낮아지므로 저가의 고성능 전동기를 확보할 수 있다. 그림 8은 초기 모델과 최적 모델에 대한 d,q축 자속선도를 나타내었다.

표 6 최적설계 결과

Table 6 Results of optimum design

설계변수에 대한 최적해			관측값 (FEA)	관측값 (FEA)	최적값 (RSM)
			평균토크	토크리플	토크리플
최적 모델	X1	3.0(mm)	0.2013	109.8(%)	111(%)
	X2	13.5(mm)			
	X3	15.341(mm)			
초기 모델	X1	10.9046(mm)	0.157	203.8(%)	-
	X2	12.7605(mm)			
	X3	16.3435(mm)			

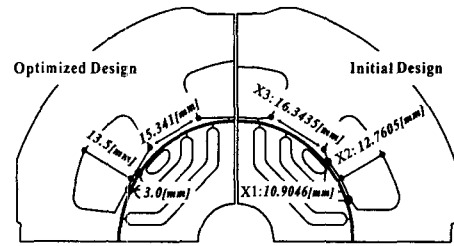


그림 6 6슬롯 SynRM에 대한 초기 모델과 최적 모델
Fig. 6 Configurations of optimized and initial design for 6-slots SynRM

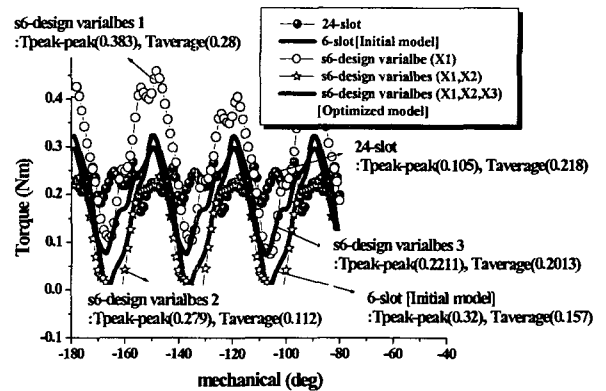
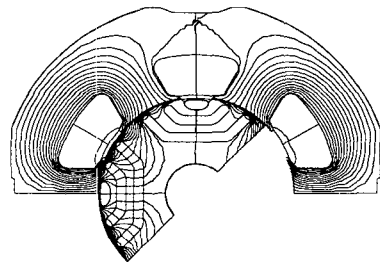
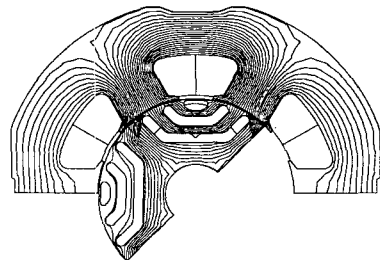
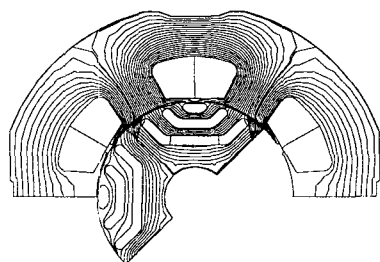
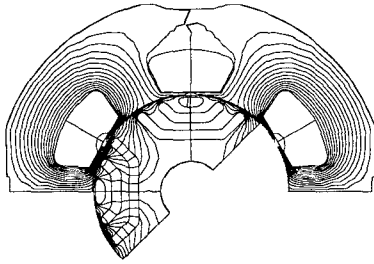


그림 7 토크 리플의 해석결과
Fig. 7 Analysis results of Torque ripple



(a) 초기 모델에 대한 d축, q축 자속선도
(a) d,q flux distribution of initial model





(b) 최적 모델의 d축, q축 자속선도
 (b) d,q flux distribution of optimum model

그림 8 초기 모델과 최적 모델의 d,q축 자속선도
 Fig. 8 d,q flux distribution of initial and optimum model

6. 결 론

본 논문은 집중권선형 SynRM에 대해 통계적 근사 방법인 RSM을 이용하여 집중권선형 SynRM의 토크 리플 저감을 위해 최적설계를 수행하였다.

본 논문에서 제안한 방법으로부터, 최적 설계된 모델은 초기 모델에 비해서 토크 리플은 53.9(%)의 감소를 가져왔다. 집중권선형 SynRM의 토크 리플 저감을 위한 최적설계에 있어서 RSM방법의 적용은 설계변수와 응답에 대한 관측 자료로부터 해석적인 근사모형을 제시함으로써, 제약조건을 가지는 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있었으며, 최적해를 찾기 위한 계산시간도 많이 단축할 수 있다.

설계변수에 따른 집중권선형 SynRM의 토크 응답특성을 본 논문을 통하여 확인할 수 있다. 최적 설계된 6슬롯 모델의 토크 리플은 기존 24슬롯 모델보다 61.6(%)가 크지만, 분포권선형 SynRM을 사용했을 때보다 집중권선형 SynRM으로 했을 때 공장 제조 시 권선 작업이 보다 단순해지면서 제조단가가 저감되므로 저가의 고성능 전동기를 확보할 수 있고 높은 산업 경쟁력을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 신전력기기연구센터(FEMRC)의 지원 및 한밭대학교 교내학술연구비의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 김영균, 이근호, 홍정표, “반응표면방법론을 이용한 BLDC전동기의 코깅토크 저감에 관한 연구”, 전기학회 논문지, Vol 51B, No 2, pp.55~60, February, 2002.
 [2] 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, Vol41, No 1, pp.39~47, 2001.
 [3] 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, pp.1176~1179, 2004

[4] Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery, “Response Surface Methodology”, Process and Product and Optimization Using Design Experiments, JOHN WILEY & SONS, 1995.
 [5] A.I.Khuri and J.A.Cornell, Response Surface: Design and Analyzes, New York: Marcel Dekker, 1996.
 [6] S.H.Park, Modern Design of Experiments, Minyoungsa, 2001.
 [7] 임양수, 김영균, 홍정표, “반응표면방법론을 이용한 BLDC 전동기의 자기회로 설계”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.904~906, 7. 2001.

저 자 소 개



박성준 (朴聲準)

1979년 7월 2일생. 2004년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
 Tel : 042-821-1626
 E-mail : mll2@naver.com



이중호 (李重浩)

1968년 8월 21일생. 1993년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1999년 9월 ~ 2000년 2월 한양대학교 부설 산업과학연구소 선임 연구원. 2000년 3월 ~2월 독립충북과학대학 전기과 전임강사. 2002년 3월 ~현재 국립한밭대학교 전기공학과 조교수
 Tel : 042-821-1098,
 Fax : 042-821-1088
 E-mail : limotor@hanbat.ac.kr