

반응표면방법론을 이용한 BLDC 전동기의 자기회로 설계

임양수, 김영균, 홍정표
 창원대학교 전기공학과

Magnetic Circuit Design of BLDC Motor Using Response Surface Methodology

Yang-soo Lim, Young-kyoun Kim, Jung-Pyo Hong
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l Univ.

Abstract - This paper presents a magnetic circuit design procedure by using Response Surface Methodology(RSM) to determine initial and detail design parameters for reducing torque ripple in BLDC motor of Electric Power Steering (EPS). RSM is achieved through using the experiment design method in combination with Finite Element Method and well adapted to make analytical model for a complex problem considering a lot of interaction of design variable. Moreover, Sequential Quadratic Problem (SQP) method is used to solve the resulting of constrained nonlinear optimization problem.

표 2.1 BLDC 전동기의 기본 사양

선간전압 (기본파)	8.4[V]	상 수	3
정격 회전속도	850 [rpm]	정격토크	36.0 [kgf-cm]
토크 상수	0.98 [kgf-cm/A]	효율	90[%]
선간 권선 저항	50.0 [mΩ] 이하	선간 인덕턴스	260.0 [μH] 이하

저야 한다. 본 논문에서 적용 대상은 BLDC 전동기이고 표 2.1에서 전동기의 기본적인 설계 사양을 나타내었다.

1. 서 론

일반적으로 BLDC 전동기를 초기설계할 때, 극수, 슬롯수, 자극비, 장하비, 형상비, 자속계수 등 설계자의 경험적 요인에 의하여 결정해야 하는 설계변수들이 많이 존재한다[1]. 여러 가지 설계변수의 조합에 의하여 나오는 설계 결과를 모두 검토하여 설계사양에 적합한 전동기를 설계하기가 어려우며, 설계 결과에 지배적인 영향을 미치는 설계변수들을 판별하는 것도 쉽지 않다.

본 논문에서는 반응표면방법론(Response Surface Methodology : 이하 RSM)을 이용하여 초기설계단계에서 고려해야 하는 많은 설계변수에 대해서 응답 표면을 분석하여 설계사양에 지배적으로 영향을 미치는 몇 개의 설계변수만을 추출하고 설계사양에 부합하도록 초기설계를 수행한 후 상세 설계단계에서 최적설계 방법으로 RSM을 적용하였다.

일반적인 최적설계기법들과는 달리 RSM은 설계변수와 응답(출력)에 대한 관측 자료로부터 해석적인 근사모형을 만들며, 이렇게 근사화된 모형을 통하여 제약조건을 가지는 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있을 뿐만 아니라 계산시간도 많이 단축할 수 있으며, 설계공간내의 전반적인 현상을 예측 가능하도록 한다[2,3].

따라서, 본 논문은 초기설계시 많은 설계변수를 고려해야 하는 어려운 점을 통계적 근사방법인 RSM을 적용하여 여러 가지 설계변수들의 복합적인 영향을 분석하여 조금 더 효과적인 초기설계를 수행하였으며, 유한요소법을 이용하여 전동기의 토크 특성을 분석하여 토크 리플을 계산하고 RSM을 이용하여 토크 리플이 최소가 되도록 BLDC 전동기의 자기회로를 설계하였다.

2. 특성해석

2.1 BLDC 전동기

조향장치로서의 요구되는 BLDC 전동기는 우수한 토크 특성을 가져야 할 뿐만 아니라 조타시에 부드러움을 확보해야 하므로 토크 리플 저감을 고려한 설계가 이리

2.2 해석 이론

영구자석을 포함하는 해석대상의 자기벡터 포텐셜 \vec{A} 를 계변수로 하는 지배 방정식은 맥스웰 방정식으로부터 식(1)과 같이 유도된다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 + \vec{J}_m \quad (1)$$

여기서, μ 는 투자율, μ_r 은 영구자석 비투자율, \vec{J}_0 는 외부인가 전류, \vec{J}_m 은 영구자석의 등가화전류이다.

회전자 표면에서 작용하는 전자력은 Maxwell 응력법을 이용하여 구할 수 있다. 회전자 표면의 미소 경로를 통과하는 자속밀도 B 의 법선성분과 접선성분의 평균치를 각각 $\overline{B_n}$ 과 $\overline{B_t}$ 라 할 때, 회전자 표면에 작용하는 토크는 식(2)로 표현된다.

$$T = r \sum_{i=1}^n \frac{1}{\mu} [\overline{B_n^{(i)}} \overline{B_t^{(i)}}] \cdot L \quad (2)$$

여기서, r 은 회전자의 반지름, u 는 미소 적분 경로의 수, L 는 철심의 적층폭이다.

3. RSM를 이용한 자기회로 설계

3.1 RSM의 기본개념

RSM은 임의의 시스템으로부터 관측된 자료를 근거로 하여 실제 응답과 k 개의 설계변수들 사이에 인과 관계를 규명한다[1,2]. 설계변수에 대응되는 응답 또는 출력값은 일반적으로 실제 실험이나 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻어지며, 본 논문에서는 설계변수와 출력값의 대응관계를 유한요소법을 이용하여 자료를 확보하였다.

많은 경우에 있어서, 실제적인 응답함수는 Taylor 급

수 전개로부터 식(3)과 같이, 2차의 다항식 모델의 형태로 나타낼 수 있다[3].

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

ε 는 응답의 오차항이고, 변수 x_1, x_2, \dots, x_k 는 코드 변수이다. 여기서는 ε 을 통계적인 오차로 다루고, 일반적으로 평균이 0이고 분산 σ^2 을 가지는 정규분포로 가정한다. 따라서 근사함수로부터 n 개의 샘플 자료에서 추정된 출력값 \hat{y} 는 행렬의 형태로서 식(4)와 같이 정리된다.

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

여기서, 기호 \wedge 는 추정값을 나타낸다. 식(4)에서 X 는 다항식 모형의 항을 나타내는 행렬이고, 벡터 $\hat{\beta}$ 는 2차 다항식 모형의 회귀계수이다. 회귀계수는 식(4)에 최소자승법을 적용하여 식(5)와 같이 구할 수 있으며, 식(5)를 일반식이라 한다.

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (5)$$

3.2 자기회로 설계과정

일반적으로 영구자석형 전동기를 초기설계 하는 방법 중에 강하분배법을 이용하는 경우가 많다. 하지만 이 방법은 설계자의 경험적 요인에 의하여 결정해야 하는 설계변수들이 많이 존재하여 적절한 설계의 결과를 얻기가 어렵다. 본 논문에서 제시하고 있는 RSM을 이용한 자기회로 설계 과정은 그림 3.1에 나타나 있다.

3.3 RSM를 이용한 초기설계

BLDC 전동기의 초기설계시 RSM의 통계적 근사법을 이용하여 많은 설계변수에 대한 응답함수를 결정한 후 전동기의 외각 치수(응답)에 영향을 크게 미치는 변수를 선별한다. 본 논문에서 많은 설계변수 중에서 전동기의 외각 치수가 최소화하기 위해서 5개의 설계변수를 선정하였다.

각각의 설계변수 x_1 은 극수(6, 8극), x_2 는 매극 매상당 슬롯수(1, 1.5개), x_3 는 자극비(162°, 180°), x_4 는 장하비(100, 200), x_5 는 공극(0.5, 0.8)으로 결정하였다. RSM의 응답함수는 변수레벨을 2로 설정하고 출력변수는 전동기 외각 치수($D: y_1, L: y_2$)와 전동기 토크 상수($K_r: y_3$)로 정의하였다. 그리고 설계변수와 출력변수사이의 상관관계를 나타내는 응답함수는 1차 다항회귀 모형을 이용하여 설계 양상을 판단하였다.

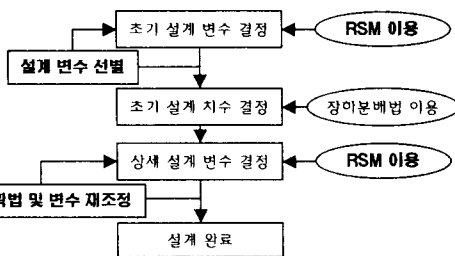


그림 3.1 RSM을 이용한 자기회로 설계과정

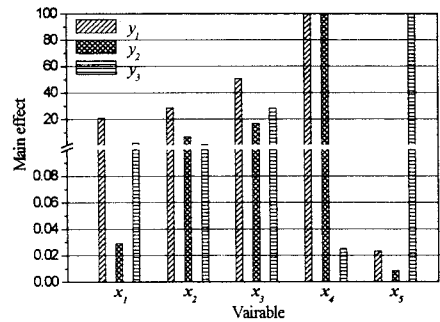


그림 3.2 초기설계 변수의 효과

표 3.1 RSM을 이용하여 결정한 초기설계 변수

극 수 (x_1)	설계변수		
	매극 매상당 슬롯수 (x_2)	자극비 (x_3)	장하비 (x_4)
6 극	1.5 개	162(°)	200

전동기의 취부 구조상에 초기설계시 전동기의 외각 치수를 먼저 고려해야 한다. 따라서, 5개의 변수 중에서 응답(y_1, y_2)에 크게 영향을 미치지 않는 변수는 식(6)에 의하여 구할 수 있으며 그림 3.2에서 볼 수 있듯이 공극(x_5)이 된다.

$$SS_{x_i} = \hat{\beta}^T X' Y' \quad (6)$$

응답에 영향을 주지 못하는 변수를 선별하는 과정을 통하여 설계변수의 범위를 축소시켜 적은 실험횟수를 통하여 좀 빠른 설계를 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 설계변수 중에서 공극(x_5)를 제외한 나머지 4개의 변수에 의하여 실험계획법을 시행하였다.

1차 다항회귀 모형에 대하여 일반적으로 적용하는 2^k factorial 실험계획법을 이용하여 16개의 컴퓨터 시뮬레이션 데이터로부터 설계변수와 출력변수사이의 관계를 나타내는 2개의 응답함수를 식(7)와 같이 1차 다항회귀 모형으로 정의하였다[3]. 그리고 16개의 실험 데이터로부터 다항식의 계수를 추정하였으며 추정된 값을 표 3.1에 나타내었으며, 초기설계 된 전동기로 상세설계하기 위한 해석 모델은 그림 3.3과 같다.

$$y_u = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_{iu} + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_{iu} x_{ju} + \varepsilon_u \quad (7)$$

3.4 RSM를 이용한 상세설계

초기설계된 BLDC 전동기의 토크 리플의 저감을 위해서 고려할 설계변수로서 영구자석의 Dead Zone, 슬

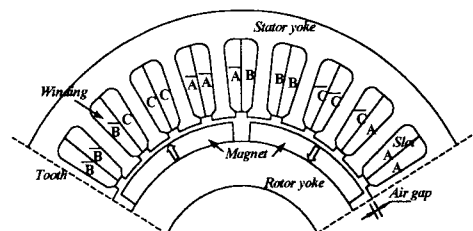


그림 3.3 초기설계된 해석 모델

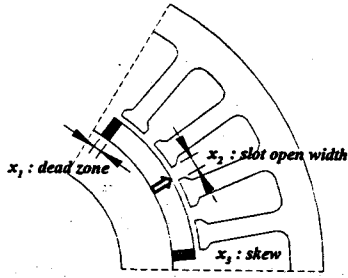


그림 3.4 설계변수

표 3.2 상세설계 변수의 범위

구분	변수레벨		
	1	2	3
Dead Zone (x_1)	6	12	18
슬롯 오픈폭 (x_2)	1.5	1.75	2.0
스큐 (x_3)	5	7.5	10

롯 개구폭, 스큐를 각각 선정하였으며, 그림 3.4에 나타내었다[1].

설계변수와 출력변수사이의 관계를 나타내는 응답함수는 중심합성계획법(CCD)을 이용하여, 15번의 유한요소해석을 통해서 구하였다. 따라서 각 변수들의 총 레벨은 5가 되는데 본 논문에서는 $\alpha=1$ 라고 설정하여 변수들의 총 레벨은 3이 되며, 표 3.2에 변수들의 범위를 레벨에 따라 정리하여 나타내었다.

본 논문에서는 BLDC 전동기의 토크 리플을 저감하기 위하여 목적함수로서 설계변수와 토크 리플의 관계를 2차 다항식으로 근사한 f_{ripple} 로 정의하고, 제약조건으로서 토크의 평균값에 대한 근사함수 f_{mean} 를 이용하여, 토크의 평균값이 36 [kgf-cm] 이상이 되도록 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Objective function : } f(x) = f_{ripple}(x) \quad (8)$$

$$\text{Subject to : } g_1(x) = f_{mean}(x) \geq 36 \quad (9)$$

$$6 \leq x_1 \leq 18, 1.5 \leq x_2 \leq 2.0,$$

$$5.0 \leq x_3 \leq 10.0$$

여기서, f_{mean} 는 토크의 평균값, f_{ripple} 는 토크의 리플을 각각 나타낸다.

그리고, 제약 조건을 가진 최적화 문제의 해를 구하기 위해서 순차 이차계획법(SQP)을 사용하였다.

4. 최적화 수행 결과

RSM을 이용하여 설계변수와 평균 토크 및 토크 리플에 대한 근사 다항식을 구하고, 식 (8)와 식(9)에 정의한 목적함수와 제약함수로부터 최적화를 수행한 결과를 표 4.1에 나타내었다. 결과적으로 토크 리플 피크값은 0.825 [kgf-cm]이고 토크 값은 36.0 [kgf-cm]를 가진다. 그리고 그림 4.1에서 RSM으로부터 구한 설계변수를 사용하였을 때, 전동기의 토크 리플과 초기설계시의 토크 리플을 비교하였다. 그림 4.2는 Dead Zone이 18° 일 때, 토크 리플 피크값에 대한 응답표면을 나타내고 있다. 이러한 응답표면은 설계변수의 변화에 대한 출력값의 변화를 쉽게 예측할 수 있다.

그리고 설계자가 관심을 두고 있는 영역내에서 설계변수의 범위를 재결정할 수 있도록 도와준다. 이렇게 관심 영역을 좁혀 나감으로써 설계변수와 출력변수 사이의 근

표 4.1 최적화 수행결과

설계변수	최적해	평균 토크	토크리플
Dead Zone (x_1)	18°	36.0 [kgf-cm]	0.83 [kgf-cm]
슬롯 오픈 폭 (x_2)	1.7mm		
스큐 (x_3)	10°		

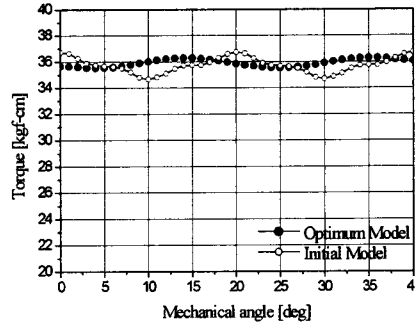


그림 4.1 토크 특성

사함수의 오차를 줄일 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 RSM을 적용하여 장하분배법으로부터 BLDC 전동기의 초기설계를 수행한 후 상세설계에서 RSM과 유한요소법을 이용하여 토크리플을 저감시키는 최적 설계방안을 제시하였다. BLDC 전동기의 자기회로 설계시 RSM의 적용하면 설계 공간내에서 전반적인 설계 양상을 예측할 수 있도록 하므로 좀 더 효율적인 자기회로 설계를 할 수 있을 것이라고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부, 과학 기술부의 지원에 의하여 이루어진 G7(차세대 자동차 기술개발사업)과제 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 홍정표, 김영균, "반응표면방법론에 의한 BLDC 전동기의 코깅토크 저감을 위한 최적설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 647-649, 7, 2000.
- [2] 홍정표 외 4명, "영구자석 계자형 동기발전기의 고조파 저감을 위한 자기회로 최적설계", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.57-59, 4, 2001.
- [3] Myers의 1명, *Response Surface Methodology*, WILEY INTER SCIENCE, 1995.

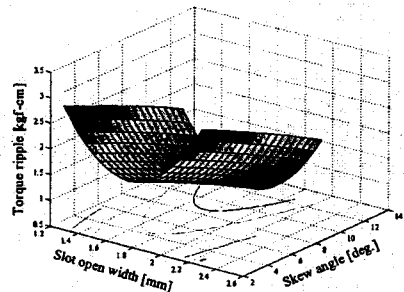


그림 4.2 토크 리플에 대한 응답표면