

반응표면론법을 이용한 Interior Permanent Magnet Motor의 회전자 최적설계

반지형, 김성일, 이지영, 홍정표
 창원대학교 전기공학과

Optimal Rotor Design of Interior Permanent Magnet Motor for High Torque
 Using Response Surface Methodology

Ji-Hyoung Ban, Sung-Il Kim, Ji-Young Lee, Jung-Pyo Hong
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - The purpose of this paper is to optimize rotor shape of interior permanent magnet (IPM) motor for high torque. V-shaped permanent magnet arrangement is applied to obtain more torque than prototype IPM. The performance, based on finite element method, is evaluated as torque per rotor volume (TRV). In this paper, response surface methodology (RSM) is used to search optimal shape of the rotor. The usefulness of RSM in optimal design of IPM motor is verified by comparing TRV between prototype and optimized V-type.

1. 서 론

Interior permanent magnet (IPM) 전동기는 compact system에 적용하는데 있어 가장 매력적인 전동기 중의 하나이다. 왜냐하면, 그것은 마그네틱 토크 뿐만 아니라 릴럭턴스 토크를 이용할 수 있어 표면 부착형 영구자석 기기에 비해 비교적 높은 출력을 얻을 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 prototype IPM과 동일한 체적의 회전자를 사용하면서 더 높은 토크를 얻기 위해 최적설계를 수행하였다. Prototype IPM 전동기의 단위 체적당 토크 (TRV)는 73 [kNm/m^3]으로 비교적 높은 편이지만 좀더 compact한 시스템에 적용하기 위해서는 더 큰 TRV가 요구된다 [1]. 따라서 80 [kNm/m^3]이상의 토크를 얻기 위해 회전자 내의 영구자석 배치를 V자 형상으로 가져가 공간적인 이용률을 높였다.

반응표면론법 (RSM)은 여러 개의 독립변수와 출력간의 인과관계를 규명해내는 통계적인 근사기법으로 최근 전기기기의 설계에 있어 효과적인 최적화 방법으로 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 영구자석의 최적 위치를 찾아내기 위하여 RSM이 사용되었으며 영구자석의 위치에 따른 토크와의 관계를 예측하기 위해 필요한 실험 데이터는 유한요소법을 이용하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

Fig. 1은 prototype type과 V-type을 보여주고 있다. Prototype은 기본 모델이고 V-type은 TRV를 개선하기 위한 목표 모델이다. Prototype IPM은 4극 24 슬롯 구조이며, 영구자석은 NdFeB 재질이다. 전기자 권선은 분포권이며 sinewave 구동이다. 영구자석의 길이와 두께는 각각 27[mm], 4[mm]이다. V-type IPM은 회전자 내의 영구자석 부피와 배열만 다를 뿐 모든 해석조건은 prototype과 동일하다. 그림 1. (b)는 최적설계를 수행하기 위한 설계변수를 나타낸다.

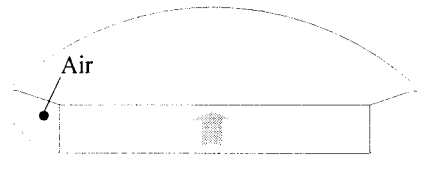
2.2 RSM의 개념

RSM은 어떤 공정이나 시스템으로부터 관측된 자료를 근거로 실제 응답 η 와 k 개의 설계변수들 사이의 관계를 통계적인 근사방법으로 근사하게 된다. 여기서, 설계변수에 대응되는 응답 또는 출력값은 일반적으로 실제 실험이나 컴퓨터에 의한 시뮬레이션을 통해 얻어지고, 이 실제 응답 η 는 기댓값 또는 평균값이다. 본 논문에서는 설계변수와 출력값의 대응관계를 컴퓨터 시뮬레이션인 유한요소해석을 통해서 관측 자료를 확보하였으며, 실제 응답 η 는 다음과 같이 가정한다.

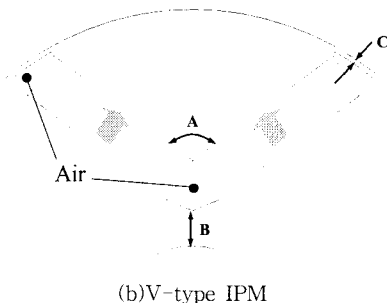
$$\eta = F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \tag{1}$$

식 (1)에서 변수 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 는 자연변수로 불리며 실제의 측정 단위를 가진다. 유한요소해석으로부터 얻어지는 관측응답 Y 는 임의의 근사 오차로 인해 기대값 η 와 다르다. 따라서 실제적인 응답 함수 F 는 미지의 값이고, 경우에 따라 매우 복잡해 질 수 있기 때문에 그것을 가정해야만 한다. 따라서 관측값 Y 와 기대값 η 사이의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_k) + \epsilon \tag{2}$$



(a)Prototype IPM



(b)V-type IPM

그림 1. 해석 모델

ϵ 은 응답에 대한 오차항이고, 변수 x_1, x_2, \dots, x_k 는 자연변수들을 코드화 시킨 코드 변수이다. 여기서는 ϵ 을 통계적인 오차로 다루고, 일반적으로 평균이 0이고 분산 σ^2 을 가지는 정규분포로 가정한다. 실제 응답 η 의 함수 F 는 테일러 급수 전개로부터 1차 또는 2차 다항식 모델의 형태로 나타낼 수 있다. 일반적으로 1차 다항식의 모델은

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (3)$$

2차 다항식의 모델은

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k \beta_{ij} x_j x_i \quad (4)$$

와 같다. 식 (4)를 식 (2)에 대입하여 정리하면 관측값 Y 에 대한 2차의 다항식 모델은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k \beta_{ij} x_j x_i + \epsilon \quad (5)$$

여기서, $\beta_0, \beta_j, \beta_{jj}, \beta_{ij}$ 는 미지수로서 회귀계수이다. 따라서 m 개의 관측자료에 대한 응답 Y 는 다음 식 (6)과 같이 행렬로 표현할 수 있다.

$$Y = X\beta + \epsilon \quad (6)$$

회귀계수행렬 β 는 식 (6)에 최소자승법을 적용하여 식 (7)과 같이 구할 수 있으며, 식 (7)을 일반식이라 한다.

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (7)$$

여기서 β 는 다항식 모형의 추정된 회귀변수 행렬, X 는 다항식 모형의 항을 나타내는 행렬, X^T 는 X 의 전치행렬을 각각 나타낸다. 따라서 근사된 2차 다항식 모형은 다음 식 (8)과 같이 행렬 형태로 나타낼 수 있다.

$$\hat{Y} = X\hat{\beta} \quad (8)$$

여기서 \hat{Y} 은 추정된 응답을 나타낸다 [2].

2.3 실험계획법

회귀계수 및 2차 근사 다항식을 추정하기 위해 본 논문에서는 중심합성계획법을 이용하였다. 그것은 설계변수가 3개 이상일 때, 3^k 요인 실험보다 적은 횟수의 실험으로 설계영역 안의 반응곡면을 추정할 수 있는 이점이 있다. 표 1은 설계영역을 나타내며 표 2는 행렬의 계산을 간단하게 하기 위해 설계변수 값을 코드화 시킨 중심합성계획을 나타낸다 [3].

표 1. 설계영역

Coded values		-1.682	-1.0	0	1.0	1.682
Real values	A [°]	99.91	104	110	116	120.05
	B [mm]	2.359	2.7	3.2	3.7	4.041
	C [mm]	0.316	0.35	0.4	0.45	0.484

표 2. 중심합성계획

실험순서	설계변수		
	A [°]	B [mm]	C [mm]
1	-1.0	-1.0	-1.0
2	1.0	-1.0	-1.0
3	-1.0	1.0	-1.0
4	1.0	1.0	-1.0
5	-1.0	-1.0	1.0
6	1.0	-1.0	1.0
7	-1.0	1.0	1.0
8	1.0	1.0	1.0
9	-1.682	0.0	0.0
10	1.682	0.0	0.0
11	0.0	-1.682	0.0
12	0.0	1.682	0.0
13	0.0	0.0	-1.682
14	0.0	0.0	1.682
15	0.0	0.0	0.0

2.4 최적화 수행 결과

중심합성계획을 통해 얻은 실험 데이터를 바탕으로 회귀계수를 추정하였으며, 그 결과는 표 3에 나타내었다. 표 4에서는 중심합성계획을 통해 추정된 근사 다항식에 의한 평균토크와 실제 유한요소해석을 통해 얻은 평균토크 사이에 차이가 거의 없음을 보여주고 있다. 따라서 주어진 설계영역 안에서 추정된 근사 다항식을 이용하여 최적화를 수행하였다.

80[kNm/m²]이상의 TRV를 얻기 위해서는 적어도 13.75[Nm]의 평균토크가 발생되어야 하며 이러한 조건을 만족하는 최적설계 결과를 표 5에 나타내었다. 표에서도 알 수 있듯이 최적 조건에서의 RSM에 의한 평균토크는 유한요소해석 결과와 큰 차이가 없었다. 그림 2는 설계변수의 변화에 따른 평균토크의 반응표면을 나타내었으며, 그림 3은 prototype과 최적화된 V-type IPM의 유한요소해석을 통해 얻은 토크를 나타낸다.

표 3. 회귀계수

회귀계수	추정된 값
β_0	13.7454
β_1	0.0236
β_2	0.0318
β_3	-0.0032
β_{11}	0.0085
β_{22}	-0.0170
β_{33}	0.0009
β_{12}	-0.0113
β_{13}	0.0001
β_{23}	-0.0005

표 4. 근사 다항식과 유한요소해석에 의한 평균토크의 비교

실험순서	근사 다항식 [Nm]	유한요소해석 [Nm]	잔차 [Nm]
1	13.6725	13.6695	0.003
2	13.7431	13.7423	0.0008
3	13.7607	13.7532	0.0075
4	13.7859	13.7810	0.0049
5	13.6670	13.6710	-0.004
6	13.7377	13.7443	-0.0066
7	13.7534	13.7532	0.0002
8	13.7788	13.7809	-0.0021
9	13.7287	13.7344	-0.0057
10	13.8088	13.8065	0.0023
11	13.6441	13.6409	0.0032
12	13.7508	13.7559	-0.0051
13	13.7530	13.7630	-0.01
14	13.7424	13.7353	0.0071
15	13.7450	13.7453	-0.0004

표 5. 최적설계 결과

최적 조건		RSM T_{ave}	유한요소해석 T_{ave}	TRV
A [°]	120.09	13.82 [Nm]	13.83 [Nm]	80.05 [kNm/m ²]
B [mm]	3.4			
C [mm]	0.316			

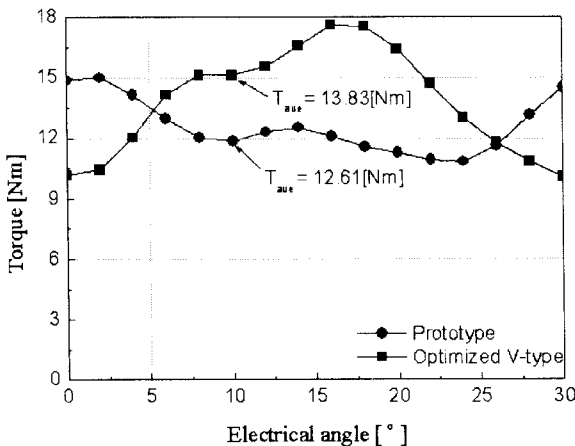


그림 4. Prototype와 최적화된 V-type의 토크

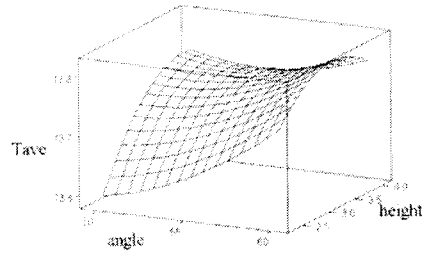
3. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석을 바탕으로 한 RSM을 적용하여 prototype IPM 전동기보다 큰 TRV를 얻기 위해 V-type IPM 전동기의 최적설계를 수행하였다. 그 결과 prototype에 비해 더 큰 평균 토크를 얻을 수 있었으며 RSM의 유용성을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 평균토크만을 증가시키는 최적설계를 수행하여 토

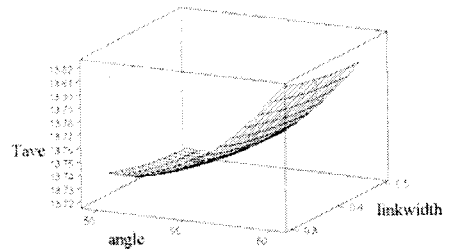
크리플이 커지는 문제점이 생겼다. 따라서 토크리플까지 고려한 최적설계가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] TJE Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Magna Physics Publishing, 1993
- [2] 김영균, 이근호, 홍정표, "반응표면방법론을 이용한 BLDC전동기의 코깅토크 저감에 관한 연구", 대한전기학회논문지, Vol. 51B, No. 2, pp. 55-60, 2002
- [3] 박성현, "현대설계계획법", 민영사, 2001



(a) 설계변수 C : 0.4[mm]일 때



(b) 설계변수 B : 3.2[mm]일 때

그림. 5 V-type IMP의 평균토크 반응표면