

매입형 영구자석 동기전동기의 Torque performance 향상을 위한 반응표면론법의 효과적인 적용

김성일, 이지영, 홍정표, 김영균*
창원대학교 전기공학과, 삼성전자*

Efficient Application of Response Surface Methodology for Improving Torque Performance

Sung-II Kim, Ji-Young Lee, Jung-Pyo Hong, Young-Kyoun Kim*
Changwon National University, Samsung Electronics*

Abstract - This paper presents a method for more efficient application of response surface methodology, one of the optimization methods, in optimal design of electrical devices. The proposed method is applied for improving torque performance of a prototype interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM). In the end, the performance between the prototype and the optimized IPMSM is compared to verify usefulness of the method based on finite element analysis.

1. 서 론

여러 가지 공학적 설계 문제 중에서도, 특히 전기기기의 설계는 많은 설계 변수들과 그 설계 변수들의 상호작용 그리고 자기적인 비선형성 때문에 매우 복잡한 문제라고 할 수 있다. 따라서 이러한 점들을 고려하지 않은 채 최적화를 수행한다면 많은 해석 시간과 노력을 필요로 할 것이다.

최근 전기기기 설계에 있어 효과적인 최적화 방법으로 주목을 받고 있는 반응표면론법(Response Surface Methodology : RSM)은 통계적인 근사 기법으로서 여러 설계변수가 복합적인 작용을 하여 어떤 시스템의 응답을 생성할 때, 이들의 관계를 근사 다항식의 형태로 만든 뒤 이를 이용하여 최적화를 수행하는 방법이다. 또한 이 근사 다항식은 설계변수의 함수로서 설계 공간내의 시스템 응답을 쉽게 예측할 수 있게 해줄 뿐만 아니라 제약 조건을 가지는 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있어 최적화 수행에 필요한 계산 시간도 많이 단축할 수 있게 해준다. 하지만 전기기기의 설계에 있어서 설계 영역에 따라 최적화의 정도(精度) 및 실험의 반복 횟수가 달라지는 단점이 있다 [1], [2].

따라서 본 논문에서는 위와 같은 문제점을 해결하면서 보다 효과적인 RSM의 적용을 위해 완전요인실험(Full Factorial Design : FFD)을 이용하였고 그 결과를 바탕으로 영구자석 매입형 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor : IPMSM)의 torque performance를 향상시키는 최적설계를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델

IPMSM은 원하는 출력을 얻으면서 전동기의 크기를 줄이기 위해 선택할 수 있는 가장 매력적인 전동기 중의 하나이다. 거기다 전동기 효율까지 비교적 높아 산업 전반에 걸쳐 널리 적용되고 있으며, 특히 하이브리드 자동차와 같은 공간적인 제약이 있는 곳에서 많이 사용되고 있다 [3].

이와 같이 IPMSM이 단위 체적 당 높은 출력을 낼 수 있는 이유는 영구자석에 의한 마그네틱 토크뿐만 아니라

자기 저항차에 의한 릴럭턴스 토크까지 이용할 수 있기 때문이다. 그러나 릴럭턴스 토크의 발생으로 인하여 표면 부착형 영구자석 전동기에 비해 토크 리플이 크며, 이것은 진동 및 소음의 원인이 되고 있다. 따라서 IPMSM의 torque performance를 향상시키기 위해서는 릴럭턴스 토크 발생에 많은 영향을 주는 회전자 형상의 최적설계가 요구되어 진다 [4].

그림 1은 두 가지 타입의 전동기 해석모델을 보여 주고 있다. 그 중에서 (a)는 자동차 에어컨 컴프레서용으로 설계된 prototype이며, (b)는 최적화의 대상으로서 prototype에 비해 더 좋은 성능을 얻기 위해 제안된 V-type의 IPMSM이다.

2.2 설계변수 및 해석조건

V-type IPMSM의 회전자 최적설계를 위해 고려해 할 설계변수들을 그림 1. (b)에 나타내었으며 다음과 같다. “A”, 두 영구자석 사이의 각, “B”, 영구자석 두께, “C”, 축으로부터 높이, “D”, link 폭. 이 중 설계변수 D는 누설 자속 및 기계적 강성 등을 고려하여 0.4[mm]로 고정시켰다. 또한 두 모델의 해석조건은 표 1에서 알 수 있듯이 영구자석의 크기를 제외하고는 모두 동일하며, 모든 해석결과는 유한요소해석(FEA)을 근거로 하였다.

표 1. IPMSM의 해석조건

항 목	Prototype	V-type
극수/슬롯수	4극/24슬롯	
공극 길이	0.3[mm]	
권선 방식	분포권	
영구자석	1.2[T]	
정격 출력	3.5[kW]	
정격 전압	42[V]	
정격 전류	100[A]	
정격 속도	3500[rpm]	
영구자석 길이/개수	27[mm]/4개	15[mm]/8개

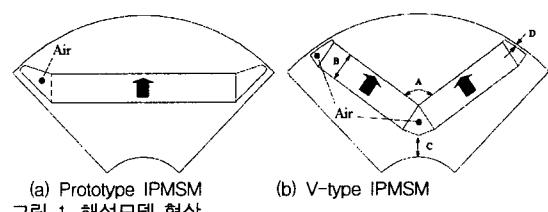


그림 1. 해석모델 형상

2.3 완전요인실험

RSM을 비롯한 대부분의 최적화 방법들은 설계변수의

영역을 설정하는데 있어 이전의 실험 데이터나 설계자의 경험에 의한 경우가 많은데 이는 매우 제한적이며 주관적인 설계로 빠질 가능성이 많다. 또한 설계변수 하나하나를 개별적으로 변화시켜 그 반응을 살피 후 영역을 설정할 경우에는 많은 모델링과 해석이 필요하게 되며 설계변수간의 상호작용을 정확하게 예측하기 어려워진다. 따라서 본 논문에서는 위와 같은 불합리한 상황을 피하면서도 객관적인 데이터를 얻기 위해 실험계획법 중의 하나인 2^3 FFD를 수행하였으며 그 결과를 바탕으로 RSM에 적용하기 위한 설계영역을 설정하였다. FFD의 이점은 설계변수들의 모든 조합을 조사할 수 있고 각 설계변수의 주효과 및 교호작용을 평가할 수 있으나 설계변수가 많아지면 실험의 횟수가 기하급수적으로 많아지게 단점이 있다 [5].

표 2는 각 설계변수의 변화에 따른 평균 토크와 토크리플의 비(Ratio)를 조사하기 위한 2^3 FFD의 실험계획표 및 결과를 나타낸다. 그리고 9번 째 실험이 추가되었는데, 이는 2^3 FFD가 각 설계변수의 2수준에서만 실험되므로 변수의 수준 변화에 따라 발생되는 반응값의 곡면적인 변화를 감지할 수 없어 이를 주정하기 위해 각 설계영역의 중간 지점에서 한 번 더 실험을 하게 되었다.

그림 2와 그림 3은 각 설계변수의 주효과 및 교호작용을 각각 나타내고 있다. 여기서 주효과와 교호작용에 대해 간단히 설명하면, 주효과는 각 설계변수 (+1)수준에서의 반응값들의 평균과 (-1)수준에서의 반응값들의 평균의 차이를 나타내는 것이며, 교호작용은 어떤 설계변수의 낮은 수준에서 다른 설계변수의 낮은 수준과 높은 수준의 평균 변화가 어떤 설계변수의 높은 수준에서도 동일하면 두 설계변수 사이에 교호작용이 없는 것이며 그 외 반대일 때 교호작용이 존재한다고 볼 수 있다.

끝으로 2^3 FFD를 수행한 결과, 각 설계변수 사이의 교호작용 및 곡면적인 변화가 크게 없으므로 평균토크와 토크 리플의 비를 개선하기 위한 설계영역은 주효과 그 그래프에 나타난 변화에 의해 결정되었다.

2.4 최적설계

RSM에서 2차의 다항식 모델은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

위의 식을 Y에 대한 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

여기서, β 는 미지수로서 회귀계수행렬, ε 은 오차항을 나타낸다. 회귀계수행렬은 최소제곱법을 적용하여 식 (3)과 같이 구할 수 있으며, 일반식은 다음과 같다.

$$\hat{\beta} = (X'Y)^{-1}X'Y \quad (3)$$

여기서, $\hat{\beta}$ 은 추정된 회귀계수행렬, X' 는 X 의 전치행렬을 각각 나타낸다. 따라서 근사된 2차 다항식 모형은 다음과 같이 행렬의 형태로 나타낼 수 있다.

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

본 논문에서는 회귀계수 및 근사 2차 다항식을 구하기 위해 중심합성계획을 이용하였으며 표 3과 같다. 이 때 각 설계변수의 영역은 2^3 FFD에서 나온 결과를 바탕으로 정해졌으며, 표 4에 이를 나타내었다.

중심합성계획을 통해 추정된 2차 다항식이 얼마나 잘 근사화 되었는지를 측정하기 위해 결정계수(R^2) 및

수정결정계수(R_A^2)를 이용하였고, 식 (5)와 식 (6)에 각각 나타내었다 [6].

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (4)$$

$$R_A^2 = 1 - \frac{SSE/(N-k)}{SST/(N-1)} \quad (5)$$

여기서, N 은 중심합성계획의 총 실험 횟수, k 는 설계변수의 개수를 나타내며, SST와 SSR 그리고 SSE는 다음과 같다.

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

(Y : 실제 반응값, \bar{Y} : 실제 반응값의 평균, \hat{Y} : 추정된 반응값)

2.5 해석결과

V-type IPMSM의 평균토크와 토크리플의 비를 나타낸 2차 근사 다항식은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & 3152.5 - 41.9A - 281.2B - 36.9C + 0.1A^2 + 9.5B^2 + 0.9C^2 \\ & + 1.7AB + 0.2AC + 1.8BC \end{aligned} \quad (6)$$

표 5는 평균토크와 토크 리플의 비가 최소가 되는 각 설계변수의 최적조건을 보여주고 있으며, FEA와 근사모델에 의한 결과가 거의 같은 것을 확인할 수 있다. 더욱이 R^2 와 R_A^2 가 각각 0.994 및 0.99로 주어진 설계영역 내에서 FEA에 의한 실제 반응들을 근사 다항식이 잘 반영한다고 할 수 있다.

비록 영구자석의 전체 부피가 17.5[%] 증가되었지만, 토크 리플이 14.5[%], 평균토크는 12[%]가 개선되었다. 또한 평균토크와 토크리플의 비는 prototype에 비해 8.2[%] 감소되었다. 최종적인 결과에서 알 수 있듯이 2^3 FFD에 의한 영역 설정으로 손쉽게 최적조건을 찾을 수 있었으며, 설계영역 재설정에 따른 설계의 반복을 피할 수 있었다. 그럼 4는 prototype과 최적화된 V-type IPMSM의 성능 비교를 나타내며, 그림 5는 설계변수의 변화에 따른 반응표면을 보여주고 있다.

표 2. 2^3 FFD의 실험계획표

실험 순서	A [°]	B [mm]	C [mm]	Ratio[%] by FEA
1	100(-1)	3.5(-1)	1.0(-1)	70.09
2	120(+1)	3.5(-1)	1.0(-1)	32.17
3	100(-1)	4.5(+1)	1.0(-1)	55.29
4	120(+1)	4.5(+1)	1.0(-1)	32.32
5	100(-1)	3.5(-1)	3.5(+1)	72.72
6	120(+1)	3.5(-1)	3.5(+1)	33.89
7	100(-1)	4.5(+1)	3.5(+1)	72.31
8	120(+1)	4.5(+1)	3.5(+1)	27.55
9	110(0)	4.0(0)	2.25(0)	52.83

표 3. 중심합성계획

실험	A[°]	B[mm]	C[mm]	Ratio[%]

순서				by FEA
1	-1.0	-1.0	-1.0	33.07
2	1.0	-1.0	-1.0	31.64
3	-1.0	1.0	-1.0	32.61
4	1.0	1.0	-1.0	32.32
5	-1.0	-1.0	1.0	26.17
6	1.0	-1.0	1.0	26.11
7	-1.0	1.0	1.0	26.23
8	1.0	1.0	1.0	27.69
9	-1.682	0.0	0.0	29.15
10	1.682	0.0	0.0	29.77
11	0.0	-1.682	0.0	27.62
12	0.0	1.682	0.0	28.55
13	0.0	0.0	-1.682	34.56
14	0.0	0.0	1.682	25.93
15	0.0	0.0	0.0	27.89

표 4. 설계영역

설계 변수	설계변수의 수준				
	-1.682	-1.0	0.0	1.0	1.682
A [°]	114.64	116	118	120	121.36
B [mm]	4.23	4.3	4.4	4.5	4.57
C [mm]	0.32	1.0	2.0	3.0	3.68

표 5. 최적조건

설계 변수	최적조건	Ratio by RSM	Ratio by FEA
A [°]	117.75		
B [mm]	4.23	24.98[%]	25.23[%]
C [mm]	3.68		

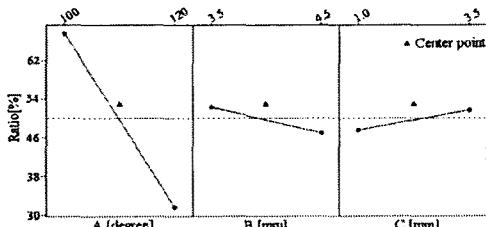


그림 2. 각 설계변수의 주효과

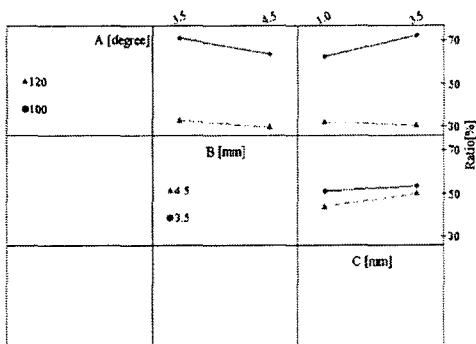


그림 3. 각 설계변수의 교호작용 효과

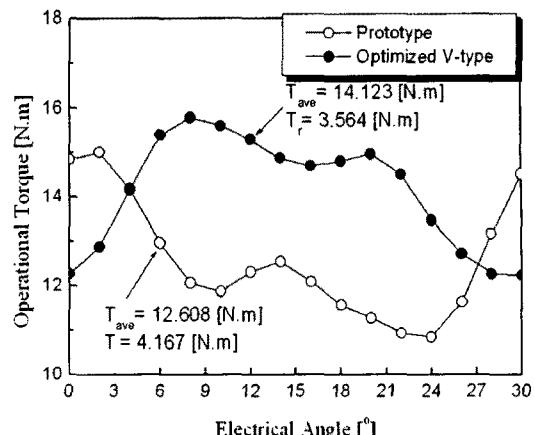


그림 4. Prototype과 optimized V-type IPMSM 발생 토크 비교

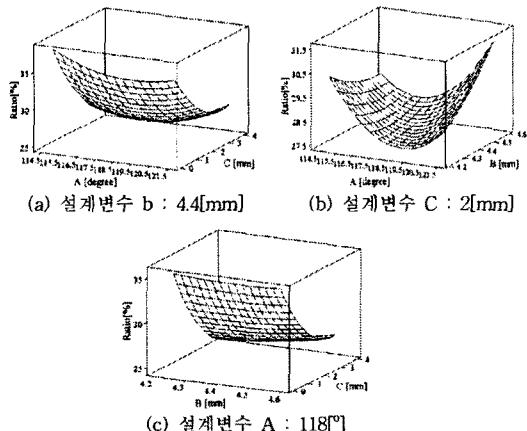


그림 5. 평균토크와 토크 리플 비(Ratio)의 반응표면

3. 결 론

본 논문에서는 RSM을 이용한 보다 효과적인 최적설계를 위해 완전요인실험을 이용하였으며, prototype IPMSM의 torque performance를 개선시키는데 적용하였다. 그 결과 제안된 방법의 유용성을 확인할 수 있었으며, IPMSM은 물론 다른 전기기기의 최적화 방법으로도 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- J. T. Li, Z. J. Liu, M. A. Jabbar, and X. K. Gao, "Design optimization for cogging torque minimization using response surface methodology," *IEEE Trans.Magn.*, Vol 40, No. 2, pp. 1176-1179, March 2004.
- 김영균, 이근호, 홍정표, "반응표면방법론을 이용한 BLDC 전동기의 코깅토크 저감에 관한 연구," *대한전기학회논문지*, Vol. 52, No. 2, pp. 55-60, 2002.
- John M. Miller, *Propulsion systems for hybrid vehicles*, The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 2004
- T. Ohnishi, and N. Takahashi, "Optimal design of efficient IPM motor using finite element method," *IEEE Trans.Magn.*, Vol 36, No. 5, pp. 3537-3539, March 2004.
- 박성현, 협대실험계획법, 민영사, 2001.
- 박성현, 회귀분석, 민영사, 2001.