

## 반응표면법을 이용한 표면부착형 영구자석 동기발전기의 토크 리플 저감설계

손승완, 신영진, 윤명환, 홍정표  
한양대학교

### Torque Ripple Reduction of Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Generator(SPMSG) using Response Surface Method

Seung-Wan Son, Young-Jin Shin, Myung-Hwan Yoon, Jung-Pyo Hong  
Hanyang University

**Abstract** - 본 논문에서는 표면부착형 영구자석 동기발전기(SPMSG)의 소음과 진동의 원인이 되는 토크 리플을 저감하고자 하였다. 최적설계법의 하나인 반응표면법을 이용하여 토크 리플을 최소화하는 발전기 형상을 결정하였다. 반응표면법은 통계적인 근사방법으로써 여러 개의 독립변수 또는 설계변수가 복합적으로 작용하여 해석적 모형을 만드는 데 매우 유용한 방법이다. 또한 유한요소해석법을 통하여 기존모델과 최적설계모델의 토크 리플을 비교함으로써 성능 개선을 확인하였다.

#### 1. 서 론

표면부착형 영구자석 동기발전기는 높은 효율과 성능을 바탕으로 다양한 산업에 적용되어 사용하고 있다. 토크 리플은 발전기에서 발생하는 소음과 진동의 주요한 원인중 하나이며 이를 줄이기 위해 고정자 및 회전자 형상을 최적화하는 연구가 선행되었다. 특히 선행연구에서는 레벨셋법을 이용한 최적설계기법을 통해 고정자의 형상을 설계하여 토크 리플을 크게 감소시키는 방법을 제안했다. 그러나 복잡한 경계로 이루어진 고정자 형상은 실제 설계에 반영하기 어려우므로 단순한 형태의 형상을 도출하여 실제 발전기 설계에 사용가능한 방법이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 널리 사용되는 최적화방법 중 하나인 반응표면법을 사용하여 주어진 구속조건에서 토크 리플을 최소화하는 고정자 및 회전자의 형상을 도출했다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 반응표면법

반응표면법은 여러 개의 설계변수가 반응변수에 영향을 줄 때, 설계변수와 반응변수 사이의 인과관계를 규명하고 통계적 근사를 통하여 최적 응답을 찾아내는 방법이다. 설계변수에 대응되는 응답 또는 출력값은 컴퓨터 시뮬레이션이나 실제 실험을 통해 얻어지고 이때의 실제 응답  $\eta$ 는 다음과 같이 가정한다.

$$\eta = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \quad (1)$$

식 (1)에서 변수  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 는 자연변수라고 칭하며 실제 측정단위를 가진다. 실제 응답함수의 근사 함수가 되는  $y$ 는 Taylor 급수 전개를 기본으로 1차 또는 2차 다항식 모형으로 근사한다. 논문에서 선택한 반응표면은 곡면으로 표현되므로 근사함수를 Taylor 급수 전개로 부터의 2차 다항식 모형을 사용할 때 실제 응답  $\eta$ 의 함수  $f$ 와 근사함수  $y$ 와의 관계는 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

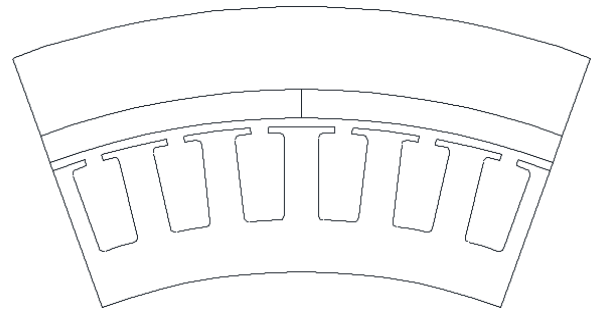
$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2)$$

$\epsilon$ 은 응답의 오차항, 변수  $x_1, x_2, \dots, x_k$ 는 자연 변수를 코드화 한 코드 변수,  $\beta_0, \beta_j, \beta_{jj}, \beta_{ij}$ 는 미지수인 회귀계수이다. 이때  $\epsilon$ 을 통계적인 오차로 다루고, 일반적으로 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 을 가지는 정규분포로 가정한다.  $n$ 개의 관측 자료로부터 추정된 응답  $y$ 는 행렬로써 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$y = X\beta + \epsilon \quad (3)$$

이때  $X$ 는 다항식의 모형의 항을 나타낸다. 식 (3)에 최소자승법을 적용하여 추정된 다항식 모형의 회귀변수  $\hat{\beta}$ 를 이용하여 추정된 응답함수  $\hat{y}$ 는 다음의 행렬 형태로 나타 낼 수 있다.

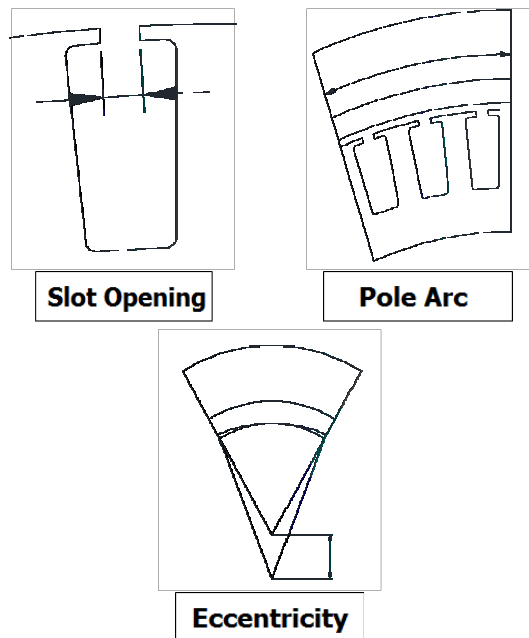
$$\hat{y} = X\hat{\beta} \quad (4)$$



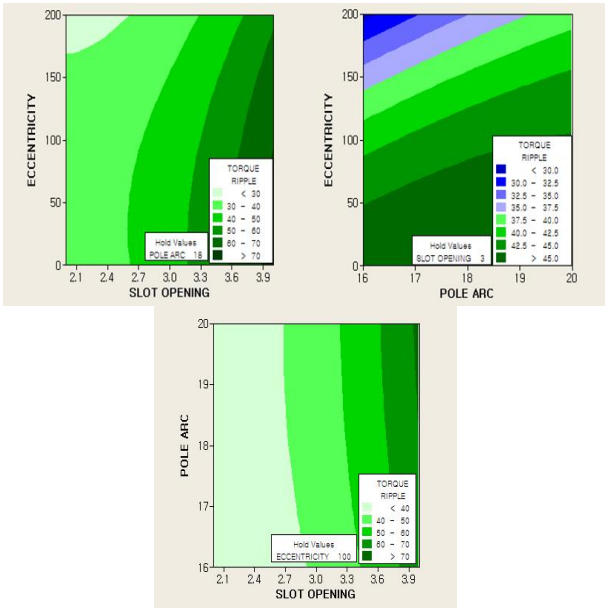
<그림 1> SPMSG 기존모델

##### 2.2 최적화 절차

기존모델에 반응표면법을 적용하여 최적설계를 진행하였다. 최적설계 대상인 기존 모델은 18극 54슬롯의 표면부착형 영구자석 동기발전기이다. <그림 1>은 기존모델을 나타낸다. 기존모델에서 목적함수로 토크 리플을 선정하였고 58.7%인 기존모델의 토크 리플을 15% 내외로 개선하는 것을 목표로 하였다. <그림 2>와 같이 세 가지 설계변수 Pole Arc, Slot Opening, Eccentricity를 설정하여 목적함수를 만족시키도록 반응표면법을 수행하였다. 또한 설계요구사항을 만족시키기 위하여 출력이 12.5kW 이상을 유지하게 하였다. 반응표면법을 통하여 원하는 목적함수 값을 얻을 수 있는 최적점에서의 구체적인 설계변수 값을 선택하였다.



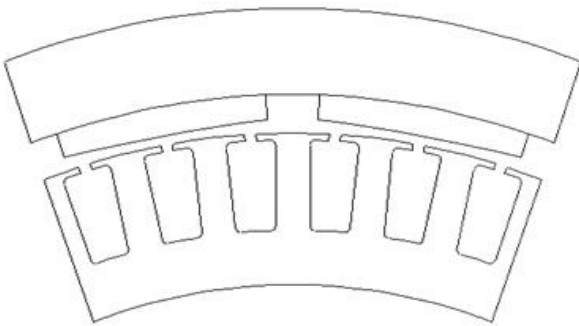
<그림 2> 반응표면법에서 고려한 설계변수



〈그림 3〉 설계변수 3개를 적용한 반응표면

### 2.3 최적화결과 분석

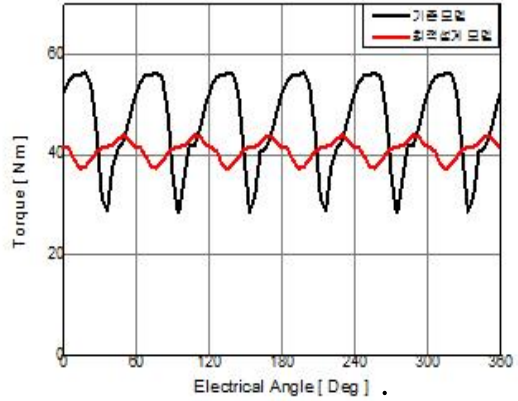
반응표면법을 통하여 〈그림 3〉의 2차원 반응표면을 도출했다. 도출한 2차원 반응표면을 통해 설계요구사항을 만족하는 최적화모형을 선정하여 〈그림 4〉의 고정자와 회전자 형상을 결정하였다. 전기적 특성을 분석하기 위하여 유한요소해석법을 이용하였다. 〈표 1〉에 최적화과정을 통한 주요성능 및 형상의 변화를 비교하였다. 〈그림 5〉에 기존모델과 최적설계모델의 평균토크를 비교하여 나타내었다. 최적화설계를 진행한 결과 개선모델은 필요한 출력 12.5kW를 충족시키면서 토크 리플은 58.7%에서 16.4%로 크게 감소하는 것을 확인하였다. 또한 〈그림 6〉에서 역기전력 파형이 정현적으로 개선되는 것을 볼 수 있다. THD(Total Harmonic Distortion) 또한 20%에서 4%로 감소하였다.



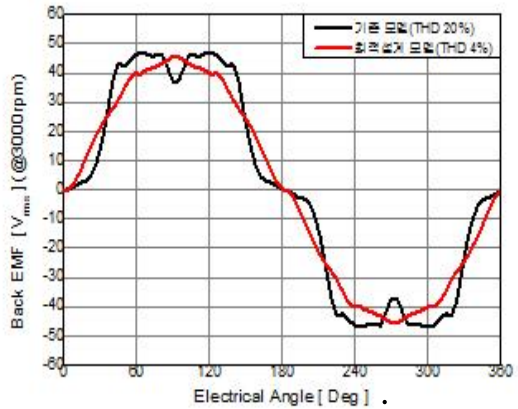
〈그림 4〉 반응표면법을 통해 최적화된 모델

〈표 1〉 기존모델과 최적화모델의 주요성능 및 형상 변화

	기존모델	최적화모델
영구 자석	N38UH	
적층 길이	42mm	
Slot Opening	3mm	2mm
Pole Arc	20°	16°
Eccentricity	0mm	200mm
역기전력	34 $V_{rms}$	32 $V_{rms}$
토크 리플	58.7%	16.4%
THD	20%	4%
출력	14.8kW(@3000rpm)	12.8kW(@3000rpm)
평균 토크	48.9Nm	41.5Nm



〈그림 5〉 기존모델과 최적설계모델의 토크 파형 비교



〈그림 6〉 기존모델과 최적설계모델의 역기전력 파형 비

### 3. 결 론

본 논문은 SPMSG의 토크 리플을 저감하기 위하여 반응표면법을 이용한 발전기 고정자 및 회전자 최적설계를 진행하였다. 고정자 및 회전자 형상을 결정하는 요소 중 세 가지 설계변수를 지정하여 주어진 설계조건에 맞게 최적화 하였다. 최적화를 통해 선정된 설계변수로 결정된 SPMSG모델은 주어진 출력조건을 만족하면서 토크 리플은 크게 감소하였고 THD 또한 감소하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Jeonghu Kwack, Seungjae Min and Jung-Pyo Hong, "Optimal Stator Design of Interior Permanent Magnet Motor to Reduce Torque Ripple Using the Level Set Method", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, pp. 2108-2111, 2010
- [2] 박중민, 김성일, 홍정표, 이중호, "반응표면법을 이용한 집중권선 동기 릴럭턴스 전동기의 토크 리플 저감에 관한 회전자 설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 669-670, 2006
- [3] 김영관, 이근호, 홍정표, "반응표면방법론을 이용한 BLDC전동기의 코깅토크 저감에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 제51B권 제2호, pp. 55-60, 2002
- [4] 이정웅, 심재한, 홍정표, "반응표면법과 유한요소해석을 이용한 In-Wheel 구동용 IPMSM의 토크리플 저감 최적설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 906-907, 2014