

반응표면법을 이용한 매입형 영구자석 동기전동기의 이층 영구자석 회전자 구조 다목적 최적 설계

(Multiobjective Optimal Double-Layer PM Rotor Structure Design of IPMSM by Response Surface Method and Finite Element Method)

최길선* · 한성진**

(Gil-Sun Choi · Sung-Chin Hahn)

요 약

일반적으로 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 초기설계는 자기등가회로법을 이용한다. IPMSM의 경우 회전자에 매입된 영구자석 배치의 자유도가 매우 높지만 자기등가회로법은 영구자석의 배치를 고려하기 어렵다. 따라서 설계변수와 응답에 대한 관측 자료로부터 해석적인 근사모형을 제시함으로써 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있는 반응표면법(RSM)을 활용하였으며 조건에 따른 관계를 예측하기 위해 필요한 실험 데이터는 유한요소법을 이용하였다. 본 논문에서는 IPMSM의 고 토크와 저 토크 리플을 위한 반응표면법을 이용한 매입형 영구자석 동기전동기의 이층 영구자석 회전자 구조 다목적 최적 설계를 제안한다.

Abstract

In general, a design method based on the equivalent magnetic circuit has been used for basic design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM). However, the equivalent magnetic circuit method has difficulty in considering the arrangement of PM. IPMSM has high degree of freedom for PM rotor design. In this paper, we proposed the multiobjective optimal design method considering the arrangement of PM for the double-layer PM rotor structure that minimizes the torque ripple as well as maximizes the torque of IPMSM. The design variables of double-layer PM rotor structure are obtained from the Response Surface Method. Torque and torque ripple were calculated by Finite Element Method.

Key Words : IPMSM, RSM, Torque Ripple, FEM

* 주저자 : 동아대학교 대학원 전기공학과 석사과정
** 교신저자 : 동아대학교 전기공학과 교수
Tel : 051-200-7737, Fax : 051-200-6947
E-mail : schahn@dau.ac.kr
접수일자 : 2010년 3월 16일
1차심사 : 2010년 3월 18일
심사완료 : 2010년 4월 21일

1. 서 론

최근 지구온난화, 기상이변, 오존층 파괴 등 환경문제와 석유 에너지 자원의 고갈위기에 따라 신재생에너지, 친환경 차량, 고효율 전기기기 등의 개발을 위한 노력이 계속되고 있다. 특히 전동기의 고효율화, 대용량화, 소형화, 경량화, 신뢰성 향상 등으로 친환경 차량에 적용되는 전동기의 개발이 활발히 진행되고 있다.

1990년도 초까지는 유도 전동기와 영구자석 전동기가 비슷한 비율로 이용되었으나 하이브리드 차량 개발이 본격화되면서 영구자석 전동기가 주류를 이루고, 2000년대 이후로는 전기자동차용 구동 모터로 영구자석 전동기만이 개발되고 있다[1]. 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)은 영구자석이 회전자 내부에 매입된 구조로 영구자석에 의한 토크성분(Magnetic torque)뿐만 아니라 d-q축 자기저항 차이에 의한 토크 성분(Reluctance torque)을 가지므로 단위체적당 큰 토크를 얻을 수 있는 장점을 지닌다. 또한, 자기적 성질이 공극과 유사한 회전자 내부의 자석으로 인해 d-q축 인덕턴스 분포의 차이가 현저하며, 이러한 돌극비(Saliency ratio)에 비례하여 약계자 제어를 통한 광범위한 가변속 운전 특성을 지니므로 IPMSM은 영구자석이 회전자의 내부에 다층으로 매입된 구조로 돌극성을 크게 설계한다[2].

전기자동차용 전동기는 높은 토크와 낮은 토크 리플이 요구된다. 그러나 IPMSM은 돌극비 때문에 토크 리플 감소의 어려움을 가지고 있다. 그러므로 IPMSM의 특성 향상을 위해 다목적 최적설계법이 필요하다.

회전자 및 극형상에 관한 이전의 최적화 연구들은 전동기의 특성 중 평균 토크, 토크 리플 등과 같이 하나의 목적함수를 최적화시키는 것을 다루거나 전동기의 여러 특성 중 하나의 특성을 단일 목적으로 최적화를 실시하면서 다른 특성을 줄이는 연구가 많다. 즉, 각각의 단일 목적으로 최적화를 실시하였을 경우에 어느 하나의 목적에 맞는 최적화 값을 도출하고 나머지 특성은 고려하지 않는다. 따라서 토크를 최대화하고 토크 리플을 최소화시키기 위해서 많은 설계변수의 상호작용에 대한 영향을 고려해야 하고, 그에 따른 실질적인 목적함수 형태를 구해야 한다. 하지만 실질적인 목

적함수 형태를 구하기가 어려우며 유한요소법을 이용한 최적화를 수행한다 하더라도 많은 계산시간이 요구된다[3]. 그래서 설계변수와 출력에 대한 관측 자료로부터 해석적인 근사모형을 만듦으로써 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있는 RSM을 적용하였다.

2. 본 론

2.1 매입형 영구자석 동기전동기

2.1.1 매입형 영구자석 동기전동기 특성

전동기의 출력은 인버터 전류 정격과 최대전류 I_{max} , 최대 직류단 전압에 의해 결정되는데 최대 출력 전압 V_{max} 에 의해 제한된다. 이러한 전압 제한과 전류 제한은 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{ds}^2 + V_{qs}^2 &\leq V_{max}^2 \\ i_{ds}^2 + i_{qs}^2 &\leq I_{max}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, V_{ds} , V_{qs} 는 d-q축 단자 전압, i_{ds} 와 i_{qs} 는 d-q축 전류를 의미한다. d-q축 고정자 쇄교자속 ($\lambda_{ds} = L_{ds}i_{ds} + \lambda_f$, $\lambda_{qs} = L_{qs}i_{qs}$)을 대입한 전압방정식은 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s i_{ds} + L_{ds} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_{qs} i_{qs} \\ V_{qs} &= R_s i_{qs} + L_{qs} \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r (L_{ds} i_{ds} + \lambda_f) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ω_r 는 동기 전기 각속도, R_s 는 고정자 상저항, $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$ 는 d-q축 고정자 쇄교자속, L_{ds}, L_{qs} 는 d-q축 인덕턴스, λ_f 는 영구자석에 의한 쇄교자속을 의미한다.

전기적 입력 P_{in} 은 다음 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{3}{2} [R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \frac{d}{dt} (\lambda_{ds} i_{ds} + \lambda_{qs} i_{qs}) \\ &\quad + \omega_r (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds})] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 첫 번째 항은 동손, 두 번째 항은 자기 에너지의 시간에 대한 변화율, 그리고 마지막 항은 기계적 출력으로 표현할 수 있다. 따라서 발생 토크 T_e 는 다음 식 (4)와 같이 표현된다.

$$T_e = \frac{P_m}{\left(\frac{\omega_r}{P/2}\right)} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (4)$$

$$= \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_f i_{qs} + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs}]$$

여기서, 첫 번째 항은 영구자석에 의한 자속과 고정자 q축 전류의 상호 작용에 의해 발생하는 자석토크, 두 번째 항은 d-q축 인덕턴스 차이 즉, 돌극성으로 인해 발생하는 자기저항 토크로 표현할 수 있다. 또 d-q축 전류 조합별로 d-q축 쇠교자속 λ_{ds} , λ_{qs} 는 다른 값을 가지기 때문에 전류에 따른 함수 형태로 나타낼 수도 있다.

한편, d-q축 쇠교자속 계산은 다음 식 (5)와 같이 각 권선 단면적의 벡터포텐셜 A 평균값으로 가능하다.

$$\lambda = \left[\frac{\iint_{S_1} A_1 dS}{S_1} - \frac{\iint_{S_2} A_2 dS}{S_2} \right] l \quad (5)$$

여기서, l 은 축 방향 길이, S_1 과 S_2 는 전류방향별 N번 감긴 권선의 총 단면적을 의미한다.

매입형 영구자석 동기전동기의 운전 영역은 정토크 영역(Constant Torque)과 정출력 영역(Constant Power)으로 나눌 수 있고, 매입형 영구자석 동기전동기는 돌극비에 비례하여 약계자 제어를 통한 광범위한 정출력 운전 특성을 가진다. 이러한 운전영역에 따라 전류 크기와 전류 위상각을 제어하는 방법이 적용된다.

2.1.2 매입형 영구자석 동기전동기 모델

매입형 영구자석 동기전동기에서 회전자의 영구자석 배치는 N, S극이 번갈아 가며 놓여 있다. 자석의 자속 방향을 고려하여 반경 방향 자석의 중심축을 d축

으로, d축으로부터 전기각으로 90도만큼 떨어져 있는 자석 사이의 중심을 q축으로 정의한다. 회전자 내부의 비자성체 층수가 증가하면 q축 자로의 확보가 용이하기 때문에 자기저항 토크를 증대할 수 있고 토크 리플도 저감할 수 있지만 제작성이 저하되는 단점이 있다. 또한 2층 이상에서는 돌극비의 증가가 그리 크지 않음을 알 수 있다[4].

매입형 영구자석 동기전동기는 약자속 제어성을 증대하기 위하여 영구자석이 회전자의 내부에 다층으로 매입된 구조를 많이 사용하는데, 영구자석의 정렬에 따라 달라지는 돌극비에 따른 특성을 구하기 위해 고정자, 회전자 형상 및 재질, 영구자석의 사용량 등을 동일하게 설계한다. 그림 1에서 IPMSM의 구조를 보여준다.

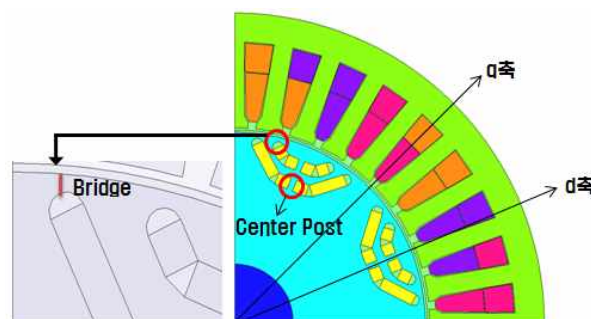


그림 1. IPMSM의 구조
Fig. 1. Structure of IPMSM

2.2 반응표면법(RSM)

2.2.1 반응표면법의 개념

반응표면법(Response Surface Method)은 설계변수(design variables)와 반응변수(response variables)의 실험적 관계를 수학적 식으로 표현하기 위해 실험이나 시뮬레이션으로부터 얻은 치수들로부터 근사적 반응표면모델을 만들어내는 통계적 기법들을 말한다. 많은 공학문제에서 설계변수와 반응변수간의 수학적 함수 관계를 찾아낸다는 것은 매우 어려우며 비록 반응함수가 부분적으로 알려져 있다 하더라도 복잡한 형태를 취하는 경우가 대부분이어서 실용성이 낮다. 따라서 반응표면분석법은 함수관계가 밝혀져 있지 않거

나 복잡한 형태를 갖는 최적화 문제를 해결할 경우 매우 유용한 최적화 방법이라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 설계변수에 대응하는 출력값은 유한요소해석을 통해 구한다.

그림 2에서 반응표면분석 흐름도를 보여준다[5]. 먼저 1차 예측 방정식을 결정한 후 설계의 근본적인 만족여부를 판단하고 만족 여부에 따라 다음 실험으로 진행된다. 마지막으로 최종 실험 목표 달성여부에 따라 설계를 마치거나 다음 단계의 실험을 고려한다. 그림에서 보듯이 반응표면식의 추정치 2차레 이상 이루어진다는 특징을 가진다.

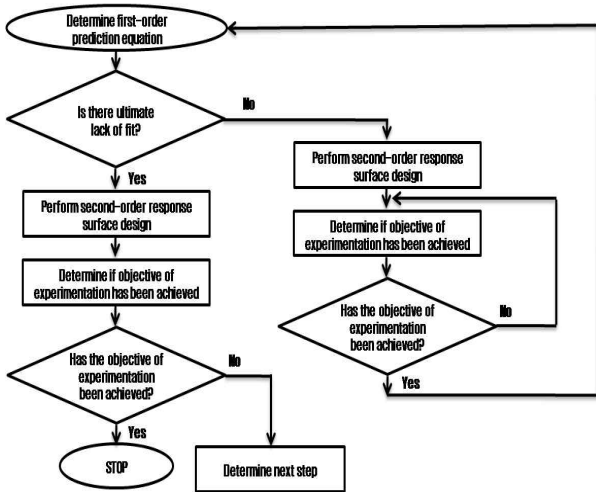


그림 2. 반응표면분석 흐름도
Fig. 2. Response Surface studies Flow Diagram

RSM에서 k개의 설계변수에 대한 실제 응답 y는 다음 식 (6)과 같이 가정한다.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (6)$$

식 (6)에서 변수 (x_1, x_2, \dots, x_k) 는 자연변수 (Natural variables)이며, 실제의 측정 단위를 가진다. 실제 응답함수 f는 근사함수인 y의 Taylor 급수전개를 기본으로 하여 1차 또는 2차 다항 모형으로 근사하게 된다.

본 논문에서는 선택한 연구대상의 반응표면이 곡면으로 표현될 것이라고 예측할 수 있으므로 근사함수

를 2차 모형으로 사용하였다. 따라서, 실제 응답함수 f와 근사함수 y와의 관계식은 다음 식 (7)과 같이 표현된다.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (7)$$

여기서, ϵ 은 응답의 오차항이고, 변수 (x_1, x_2, \dots, x_k) 는 코드변수이다. 여기서, ϵ 을 통계적인 오차로 다루고, 일반적으로 평균이 0이고 분산 σ^2 을 가지는 정규분포로 가정한다. 따라서 근사함수로부터 n개의 샘플 자료에서 추정된 출력값 y는 행렬의 형태로서 다음 식 (8)과 같이 표현된다.

$$y = X\beta + \epsilon \quad (8)$$

여기서, X는 설계변수 레벨의 행렬, β 는 회귀계수의 벡터, ϵ 은 임의의 오차의 벡터이다. 그리고 식 (8)에서 추정된 함수 \hat{y} 는 다음 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\hat{y} = Xb \quad (9)$$

2.2.2 반응표면 모델링

RSM에는 많은 실험적인 설계방법이 있다. 본 논문에서는 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻기 위하여 어떻게 실험을 행하고 데이터를 분석하면 되는가 하는 것을 계획하는 실험계획법으로 중심합성계획법(Central composite design: CCD)을 이용하였으며 반응표면 설계에서 가장 일반적으로 사용되어지는 방법이다. 그림 3은 설계변수의 개수가 2일 때 실험 점들을 나타내고 있다[6].

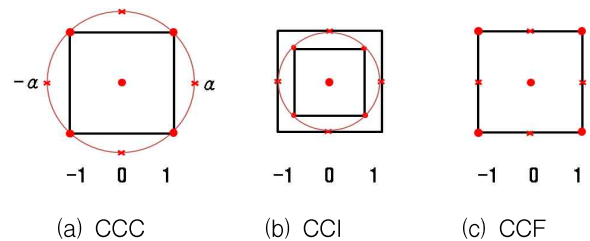


그림 3. 2²중심합성계획
Fig. 3. 2²Central Composite Design

CCC(Central Composite Circumscribed)는 요인배치 실험점의 범위를 명시할 수 있고, CCI(Central Composite Inscribed)는 축점의 범위를 명시할 수 있다. CCC와 CCI는 실험영역이 다를 뿐 통계적 성질은 같다. CCF(Central Composite Face-Centered)는 요인배치 실험점의 면위에 축점을 잡는 것을 말하며, 각 인자별로 3개의 수준만 필요하다. 하지만 회전성을 갖지 않는다.

중심합성계획법의 실험횟수는 다음 식 (10)과 같이 표현된다.

$$n = 2^k + 2k + n_c \tag{10}$$

여기서, 2^k 는 요인 배치법에 의한 설계를 위한 실험 수이고 $2k$ 는 축 점의 수, n_c 는 중심점에 대한 반복실험 횟수이다. 이와 같은 실험점들을 가지고 유한요소해석을 수행하여 얻어진 반응값 y 를 토대로 n 개의 변수와 실제 응답 사이의 관계를 통계적으로 근사하였다.

2.3 최적화

2.3.1 최적화 전략

반응표면을 구성하기 위한 적절한 형상 파라미터의 값이 구해지면, 표본 데이터로부터 반응 표면이 구성되고, 즉, 설계변수 공간에서 목적 함수의 분포가 보간되고, 보간된 목적 함수의 분포로부터 최적화 기법을 이용하여 목적함수를 최소로 하는 설계변수를 찾을 수 있다.

표본점이 정의되면, 유한요소법을 이용하여 각각의 표본점에 해당하는 목적함수를 계산하여 표본 데이터를 구성하고, 적절한 형상파라미터를 이용하여 반응 표면을 구성한다.

2.3.2 최적화 모델[7]

3상 전원에 의하여 구동되고 8극 36슬롯 구조를 갖는 IPMSM을 초기 모델로 선정하였으며 그림 4는 초기모델을 보여주고, 표 1에서 적용된 IPMSM의 사양을 보여준다.

본 논문에서는 d-q축 자기저항 차이에 의한 토크성

분(Reluctance torque)에 영향을 미치는 영구자석의 위치를 변화시켜 돌극비 조절을 통한 IPMSM의 특성을 향상시키고자 한다. 따라서 목적함수를 출력토크와 토크리플로 두고 다목적 최적설계를 수행한다. 설계변수로는 그림 5와 같이 자석 각도, 극호 당 극피치 비율, 자석사이 거리로 선정하였다.

최적의 설계변수를 찾기 위하여 목적함수와 설계 변수의 범위를 표 2와 같이 정의하였다.

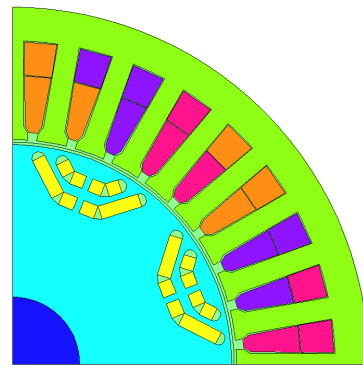


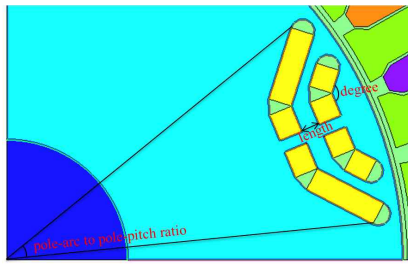
그림 4. IPMSM의 초기 모델
Fig. 4. Prototype model of IPMSM

표 1. 매입형 영구자석 동기전동기 사양
Table 1. Main dimensions of IPMSM

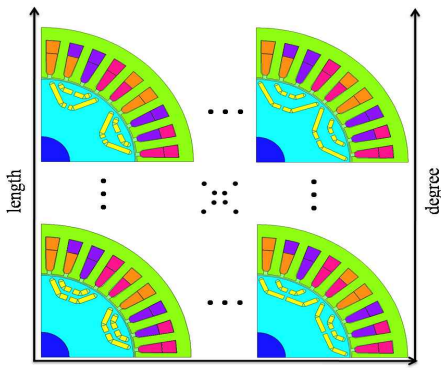
전동기 항목	전동기 사양
극 수	8
공극 길이	1.5[mm]
회전자 외경	131[mm]
고정자 외경	213[mm]
고정자 내경	134[mm]
적층길이	150[mm]
슬롯 수	36

표 2. 목적함수와 설계변수 범위
Table 2. Object function and design variable region

Objective function	Minimize	Torque ripple
	Maximize	Torque
Subject	$135 \leq \text{자석 각도}[\text{deg}] \leq 140$	
	$75 \leq \text{극호 당 극피치 비율}[\%] \leq 95$	
	$3 \leq \text{자석사이 거리}[\text{mm}] \leq 8$	



(a) design variable



(b) design variable model

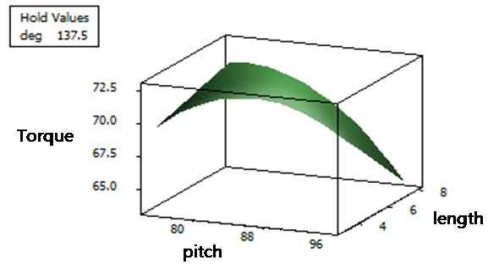
그림 5. IPMSM의 설계변수 및 모델
Fig. 5. IPMSM model according to design variable

표 3. 중심합성계획법을 이용한 2³요인배치실험 결과
Table 3. 2³factorial design results using the Central Composite Design

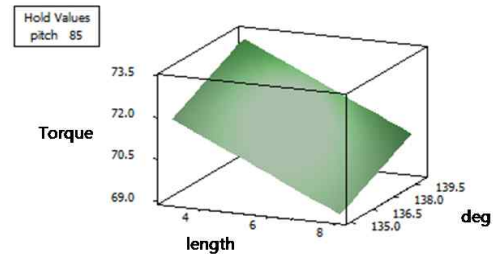
실험 횟수	설계변수			결 과	
	pitch	length	deg	T	T.R
1	75(-1)	3(-1)	135(-1)	64.39	3.40
2	95(1)	3(-1)	135(-1)	72.40	2.91
3	75(-1)	8(1)	135(-1)	67.61	3.19
4	95(1)	8(1)	135(-1)	64.39	3.40
5	75(-1)	3(-1)	140(1)	72.40	2.91
6	95(1)	3(-1)	140(1)	67.61	3.19
7	75(-1)	8(1)	140(1)	75.51	2.81
8	95(1)	8(1)	140(1)	63.91	2.92
9	75(-1)	5.5(0)	137.5(0)	72.71	2.93
10	95(1)	5.5(0)	137.5(0)	68.03	3.24
11	85(0)	3(-1)	137.5(0)	75.11	3.01
12	85(0)	8(1)	137.5(0)	66.65	2.97
13	85(0)	5.5(0)	135(-1)	72.46	3.02
14	85(0)	5.5(0)	140(1)	68.69	2.25
15	85(0)	5.5(0)	137.5(0)	72.49	2.03

2.3.3 최적화 결과

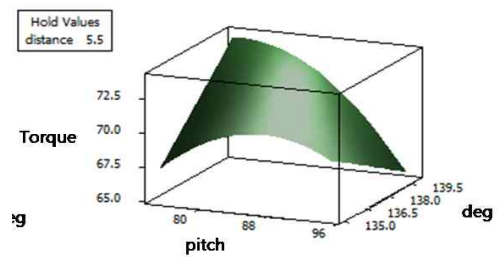
중심합성계획법을 이용한 2³요인배치실험을 수행한 결과를 표 3에서 나타내고 있다. 실험 9-14는 축점에서의 실험결과이고 실험 15는 중심점에서의 실험 결과이다.



(a) pole-arc to pole-pitch and magnet length



(b) magnet length and magnet degree



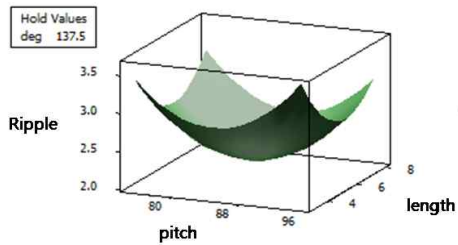
(c) pole-arc to pole-pitch and magnet length

그림 6. 토크와의 관계
Fig. 6. Relation of torque

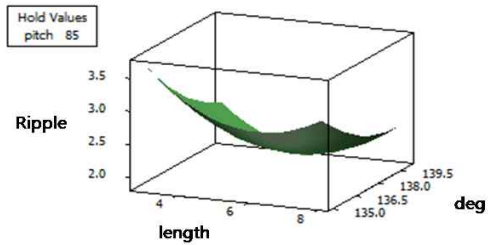
그림 6은 각 변수가 토크에 미치는 영향을 나타내었다. 토크는 자석사이의 거리와 자석 각도에 영향을 많이 받음을 확인할 수 있다.

그림 7은 각 변수가 토크 리플에 미치는 영향을 나타내었다. 토크 리플은 극호 당 극피치 비율과

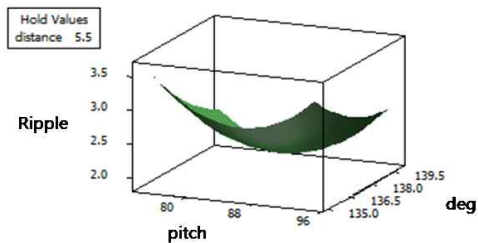
자석사이의 거리에 영향을 많이 받음을 확인할 수 있다.



(a) pole-arc to pole-pitch and magnet length



(b) magnet length and magnet degree



(c) pole-arc to pole-pitch and magnet length

그림 7. 토크 리플과의 관계
Fig. 7. Relation of torque ripple

그림 8은 설계변수를 고려한 목적함수의 최적화에 따른 RSM을 적용한 최적모델을 보여주고, 그림 9은 초기 모델과 최적 모델의 전류 위상각 변화에 따른 d-q축 인덕턴스의 변화를 나타내었다. 결과를 보고 알 수 있듯 초기 모델보다 최적 모델의 돌극비 증가를 확인할 수 있다. 즉, 초기 모델보다 최적 모델의 경우 자기저항 토크(Reluctance torque)를 더 크게 사용함으로써 출력 토크를 높일 수 있음을 알 수 있다.

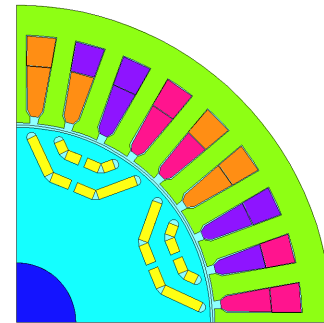
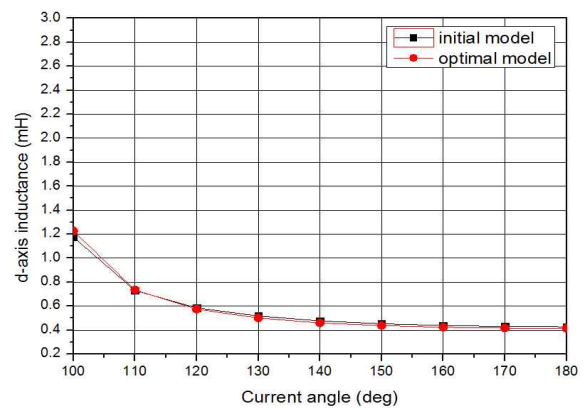
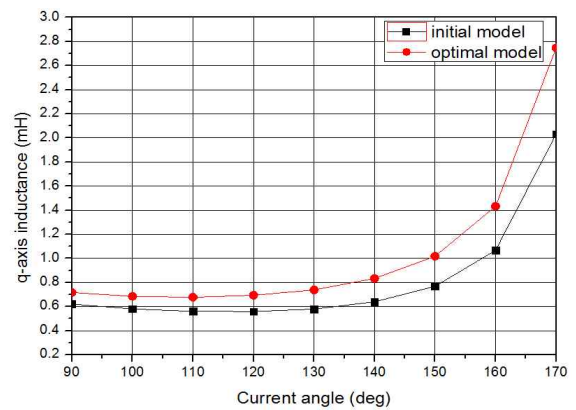


그림 8. IPMSM의 최적 모델
Fig. 8. Optimal model of IPMSM



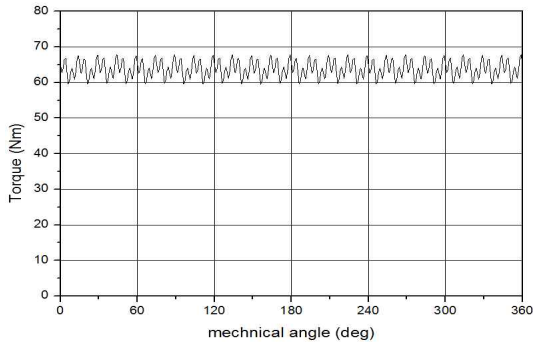
(a) d-axis inductance



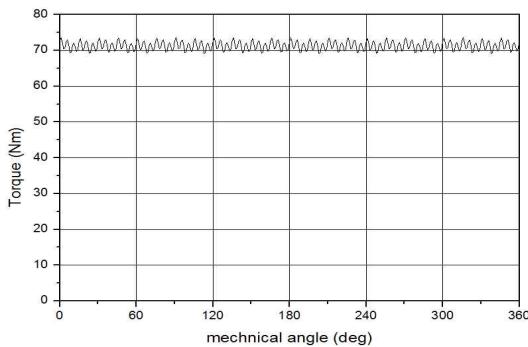
(b) q-axis inductance

그림 9. d-q축 인덕턴스
Fig. 9. d-q axis inductance

그림 10에서 초기 모델과 최적 모델의 토크 리플과 형을 보여준다.



(a) Prototype model



(b) Optimal model

그림 10. 토크 리플 해석 결과
Fig. 10. Results of torque ripple analysis

4. 결 론

본 논문에서는 d-q축 자기저항 차이에 의한 토크성분(Reluctance torque)에 영향을 미치는 영구자석의 위치를 변화시켜 돌극비 조절을 통한 IPMSM의 특성을 향상시키고자 한다. IPMSM의 매입된 영구자석의 위치에 따라 발생하는 토크를 최대화하고 토크 리플의 최소화하기 위해, 본 논문에서는 다 특성 목적을 위한 최적화 문제 해결을 표면반응법(RSM)을 활용하였으며 조건에 따른 관계를 예측하기 위해 필요한 실험 데이터는 유한요소법을 이용하였다. 동일한 조건에서 RSM적용결과 각각의 변수 자석 각도, 극호 당 극피치 비율, 자석사이의 거리에 따라 초기 모델과 비교하여 최적 모델(변수 자석 각도 137.5°, 극호 당 극피치 비율 85[%], 자석사이 거리 5.5[mm])이 토크는 8.1[Nm] 증가하고, 토크 리플은 1.4[Nm] 감소하였다.

설계변수와 출력에 대한 관측 자료로부터 해석적인 근사모형을 만듦으로써 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있는 RSM을 적용한 설계법을 사용함으로써 보다 빠르고 정확하게 최적점을 찾을 수 있었다.

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역 혁신인력양성사업과 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 자원인력양성사업의 연구결과입니다.

References

- [1] 과상엽, “차량 구동용 다층 매입형 영구자석 전동기의 특성 해석 및 설계”, 서울대학교, 박사학위논문, 2008.
- [2] T.J.E.Miller, J.R. Hendershot Jr., “Design of Brushless Permanent Magnet Motors”, Oxford, 1994.
- [3] 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, Vol.41, No. 1 PP.39~47, 2001.
- [4] G.S Choi, J.Y Lee, KN Park, S.C Hahn, “Characteristic Analysis of High-Speed Interior Permanent Magnet Synchronous Motor.”, ICEMS2009.
- [5] Box, G, E, P., Hunter, W. G. and Hunter, J. S., “Statistics for Experimenters” Wiley, New York, 2005.
- [6] Box, G, E, P. and Draper, N. R., “Empirical Model Building and Response Surfaces”, wiley, New York, 2002.
- [7] Wen L. Soong, Mesimi Ertugrul, “Field-Weakening Performance of Interior Permanent-Magnet Motors” IEEE Trans. on IA, Vol.38, No.5, September 2002.

◇ 저자소개 ◇



최길선(崔吉善)

1985년 12월 31일생. 2008년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : (051)200-6946
Fax : (051)200-6947
E-mail : kschoi@donga.ac.kr



한성진(韓聲鎭)

1955년 6월 27일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983년 3월~현재 동아대 전기공학과 교수.
Tel : (051)200-7737
Fax : (051)200-6947
E-mail : schahn@dau.ac.kr