

자석 형상 최적화를 통한 축방향 이상 횡자속형 전동기의 토크 특성 향상에 관한 연구

Improvement of Torque Characteristics of a Rotatory Two-Phase Transverse Flux Machine Optimizing the shape of Rotor Pole

안희태* · 장건희† · 장정환** · 정시욱** · 강도현**

Heetae Ahn, Gunhee Jang, Junghwan Chang, Shiuk Chung and Dohyun Kang

Key Words : Transverse Flux Machine(횡자속형 전동기), Average Torque(평균 토크), Torque Ripple(토크 리플)

ABSTRACT

Transverse flux machine (TFM) has been developed to drive a machine of large input power at low-speed. However, it has complicated structure and large torque ripple due to its inherent structure. In this paper the characteristics of torque of a rotatory two-phase TFM are analyzed by using the 3-dimensional finite element method and optimal design. This research shows that one of the effective design variables is the skew angle of permanent magnet. The skew angles of permanent magnet are optimized by using a Progressive Quadratic Response Surface Method (PQRSM). It also shows that the proposed optimal skew magnet not only increases average torque but also decreases torque ripple of a rotatory two-phase TFM.

1. 서론

전동기는 자속 방향에 따라 종축형 또는 횡축형으로 나눌 수 있는데, 자속의 이동방향과 전동기의 이동방향이 같은 경우 종축형 기기가라 하고 자속방향이 전동기의 이동방향과 횡방향인 경우 횡자속 기기가라 한다. Fig. 1 은 회전형 횡자속형 전동기 모델을 나타낸다. 고정자에 링 형태의 권선을 시행하여 공극에 homopolar 형태의 기자력 분포를 만들고 회전자에 영구자석을 삽입하여 heteropolar 형태의 자속 분포를 만들어서 이들의 상호 작용에 의해 추력 및 토크를 발생시키는 구조이다. 자속의 이동 방향과 전동기의 이동 방향이 횡방향이고 고정자를 극간격만큼 엇갈리게 배치함으로써 3 차원적인 자속 흐름을 가지게 된다[1]. 자속 ϕ 의 진행방향과 전동기의 이동 방향 v 는 서로 수직으로, 즉 횡방향(전류의 방향과 전동기의 진행방향이 같음)이 된다. 횡축형 전동기는 철심영역에서 자속의 통로를 위해 필요한 공간과 고정자의 전류를 흘릴 수 있도록 권선을 시행하는 공간이 분리되어 자기회로와 전기회로가 독립적으로 구성되기 때문에 단위 체적당 높은 출력과 높은 효율을 얻을 수 있는 장점이 있다[2]. 또한 이 전동기는 자속이 흐르는 iron core path가 짧고 극 간격이 작으며 영구 자석에 의해 공극에 자속을 집중할 수

있는 구조에 기인하여 다른 형태의 전동기에 비해 높은 추력 밀도 및 토크를 가지게 된다[3]. 그러나 횡자속형 전동기는 구조가 복잡하여 제작이 어려울 뿐만 아니라 릴럭턴스 형태의 구조로 인해 코깅 토크 및 디텐트력에 의한 토크 및 추력의 리플이 상대적으로 큰 편이다[4].

횡자속형 전동기 관련 이전 연구에서는 여러 연구자들이 토크 특성 향상에 관한 연구를 하였다. Maddison 등은 제작이 용이하고 높은 토크를 발생시키는 Claw pole 횡자속형 전동기를 제안하였고 [5] Masmoudi 등은 회전자에 스크류를 주어 토크 발생을 저해하는 코깅 토크를 감소시키는 연구를 하였다[6]. 그러나 자석 형상의 최적화를 통한 자속 밀도를 극대화에 의한 토크 특성 향상에 대한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다.

본 논문은 자석 형상에 따라 발생하는 토크 특성을 3 차원 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 또한

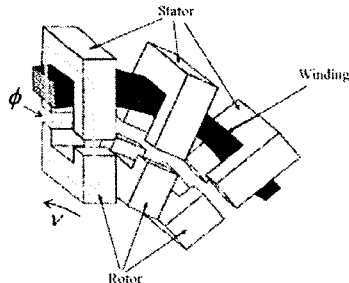


Fig. 1 A rotatory TFM

† 교신저자: 정희원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : ghjang@hanyang.ac.kr
Tel : (02)2220-0431, Fax : (02)2292-3406
* 정희원, 한양대학교 대학원 기계공학과
** 한국전기연구원 산업전기연구단

north Pole, SMC, south Pole 이 연속적으로 존재하는 횡자속형 전동기의 고유한 특징을 이용하여 자석의 형상을 변형함으로써 설계 변수에 따라 출력 토크가 증가하고 토크 리플이 감소할 수 있음을 확인하였다. 또한 목적 함수를 평균 토크와 토크 리플로 선정하여 이러한 설계 변수들의 최적화 과정을 수행하였다.

2. 해석 방법

2.1 축방향 이상 횡자속형 전동기

해석에 적용한 모델은 Fig. 2 에 나타난 정격 속도 300 rpm 의 축방향 이상 횡자속형 전동기로서 주요 설계 변수를 Table 1 에 나타내었다. 고정자는 철손을 감소시킬 수 있는 soft magnetic composite (SMC) 재질로 만들어졌고, A 상과 B 상에 각각 상하 코어에 이루어져 있다. 각 코어에는 원주 방향으로 32 개의 치가 존재하며 1/2 tooth pitch (전기각 180°, 기계각 5.625°)의 위상차가 존재하도록 배치되어 있다. 회전자는 SMC 재질에 반대방향으로 자화되어 있는 자석을 교대로 삽입하여 자속을 집중시킬 수 있는 구조로 되어 있으며 north pole, SMC, and south pole 로 이루어지는 극 쌍이 원주방향으로 32 개가 존재한다. 전류는 Table 2 에 나타난 바와 같이 A 상과 B 상에 전기각 90 도의 위상차가 존재하도록 스위칭하여 사각과 직류 전류를 기자력 1,250AT 으로 각 상의 코일에 인가하였다. 2τ 는 one tooth pitch 혹은 one pole pair 에 해당한다.(전기각 360 도, 기계각 11.25 도).

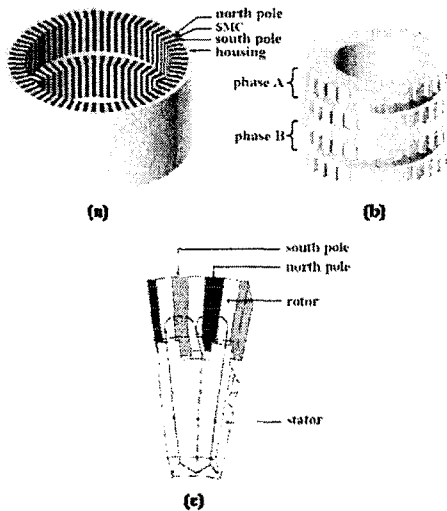


Fig. 2 A rotatory two-phase TFM (a) Rotor (b) Stator (c) 3D magnetic flux path

Table 1 major design variables

Design Parameters	Value
Rotor outer radius(mm)	88.5
Stator outer radius(mm)	72.5
Stator inner radius(mm)	41.4
Axial length(mm)	47
Air-gap length(mm)	0.5
Tooth pitch, 2τ (degree)	11.25
Number of pole pairs	32
Residual flux density of magnet(T)	0.4
MMF(AT)	1250
Rated speed(rpm)	300

Table 2 Energizing sequence of a TFM

Position	Phase A	Phase B
$0\tau - 0.5\tau$	+	-
$0.5\tau - 1.0\tau$	+	+
$1.0\tau - 1.5\tau$	-	+
$1.5\tau - 2.0\tau$	-	-

2.2 유한요소모델

Fig. 3 은 축방향 이상 횡자속형 전동기의 3 차원 유한요소모델을 나타낸다. 전체 모델은 8 절점 육면체 요소를 이용하여 전동기 전체를 모델링 하였으며 절점 수는 706,563 개, 요소 수는 647,681 개 이고 각 요소는 원주방향으로 0.28125 도 마다 나뉘어져

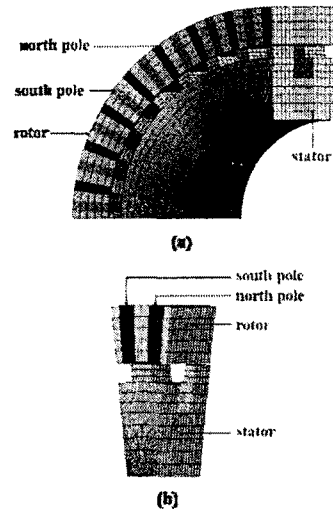


Fig. 3 Finite element model of TFM (a) A quarter of full model (b) Partial model

있다. 영구자석의 극 쌍이 11.25 도마다 반복되는 기하학적 구조를 가지므로 주기경계조건을 가진 부분 모델을 이용할 수 있다. 주기경계조건에서는 양 경계면에서의 자기 벡터 포텐셜이 동일하다. 부분모델은 전체모델의 1/32 에 해당하는 11.25 도에 대하여 모델링 하였으며 요소 수는 24,248 개이다. 상용 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 자계를 해석하였으며 우선 주어진 위치에서 자계가 해석되고 회전자의 이동을 고려하여 B-H 값을 다시 정의하게 된다. 토크와 자기력은 회전자가 한 극 쌍을 회전할 때 0.28125 도 간격으로 Virtual work method 를 이용하여 계산하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 토크 및 토크 리플

이상에서 언급한 설계 조건에 의해 Fig. 4 와 같은 축방향 이상 구조의 전동기를 제작하였으며 정토크 특성을 Fig. 5 와 같이 실험을 통하여 해석값과 비교하였다.

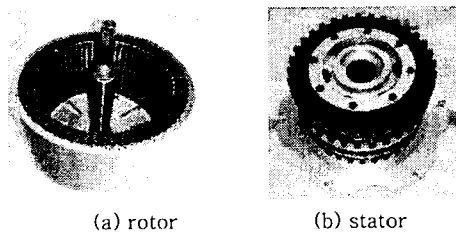


Fig. 4 A rotatory two-phase TFM

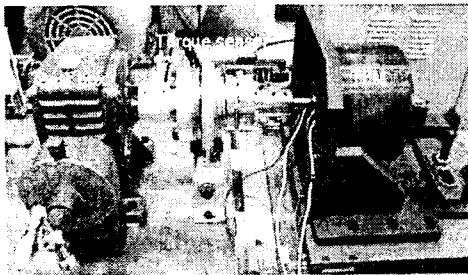


Fig. 5 Experiment setup to measure the torque of a TFM

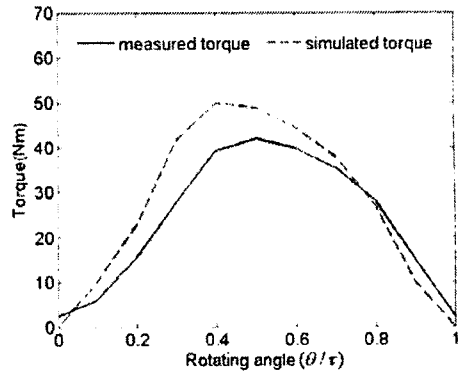


Fig. 6 The torque profile of a TFM

Fig. 6 은 전류를 A 상에만 인가할 때의 출력 토크 (output torque)를 나타낸다. 실험값과 해석값이 약 12%의 오차가 발생하는데 이는 영구자석의 잔류자속밀도 값 변화와 회전자의 64 개의 영구자석 중 2 개 극의 착자 오류 등으로 인한 영향으로 고려된다.

Fig. 7 은 A 상과 B 상에 전류를 인가하였을 경우 전체모델과 부분모델의 토크 해석 결과를 비교한 것이다. 주기경계조건을 적용하였을 경우 전체모델과 부분모델의 토크 값이 일치하게 된다. 토크 리플은 전류를 스위칭하는 주기와 일치하므로 그 크기는 전류 인가에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있다. 이 전동기의 한 극 쌍의 주기는 2τ 이지만 전류 스위칭에 의해 토크가 음이 되는 구간을 양이 되게 했기 때문에 A 상의 토크 T_A 와 B 상의 토크 T_B 의 주기는 τ 가 되고 T_A 와 T_B 의 합인 출력 토크의 주기는 $\tau/2$ 가 된다. 따라서 전동기가 1 회전할 때 토크 파형은 극 쌍수의 네 배만큼 반복된다.

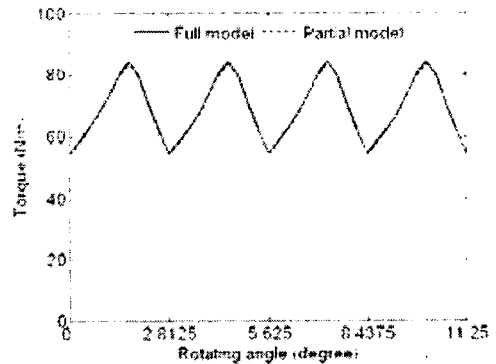


Fig. 7 Output torque

3.2 자석 형상 변형 모델

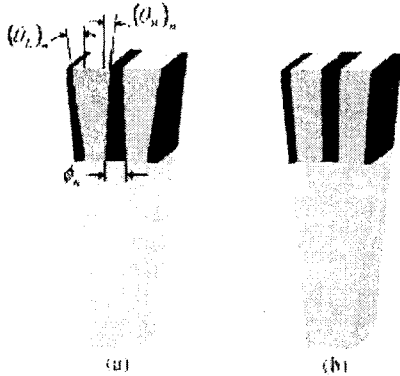


Fig. 8 (a) Case 1 (b) Case 2

횡자속형 전동기는 SMC 재질에 반대방향으로 자화되어 있는 자석이 교대로 삽입되어 있는 구조이므로 일반 전동기와는 달리 자석 형상 변형을 이용한 설계가 가능하다. Fig. 8 (a)의 Case 1은 본 논문에서 제안하는 새로운 형태의 자석 형상을 나타낸다. 공극과 접하는 부분의 North Pole, SMC, South Pole의 θ 방향 길이 비율은 동일하고 공극 부분에서 반경 방향으로 멀어질수록 영구자석의 비율이 증가하고 SMC의 비율이 감소한다. ϕ_n 은 공극 부분의 회전자 SMC의 θ 방향 각도이고 $(\theta_n)_0$ 은 영구자석의 좌측이 기울어진 각도, (θ_n) 은 영구자석의 우측이 기울어진 각도를 나타낸다. Fig. 8 (b)의 Case 2는 영구자석의 형상을 변형시킨 Case 1과 전체 영구자석의 양은 동일하나 그 형상은 기울어진 각이 존재하지 않는 기존의 모델과 같은 형태이다.

Fig. 9는 초기 모델의 토크 특성과 Case 1, Case 2의 토크 특성을 비교한 그래프이다. Case 1은

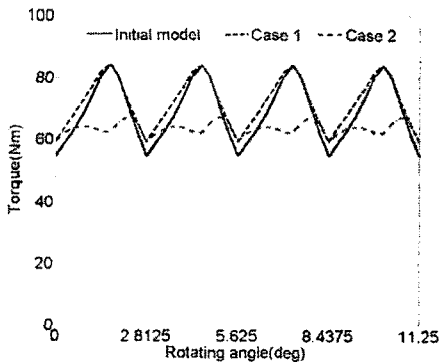


Fig. 9 Comparison of torque profile

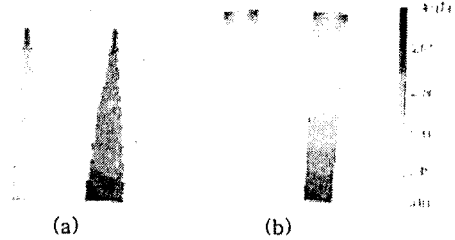


Fig. 10 Flux density of a rotor
(a) Case 1 (b) Case 2

SMC에 집중되는 자속의 양이 증가하고 공극에서의 자속밀도 값도 증가할 뿐만 아니라 SMC에서 회전자 외부로의 자속 누설도 방지할 수 있어 초기 모델에 비해 평균 토크가 증가하고 토크 리플이 감소하여 토크 특성이 향상하게 된다. 그러나 Case 2에서는 초기 모델에 비해 평균 토크가 크게 감소한다. SMC에 집중되는 자속에 의해 토크가 발생하므로 자석과 SMC의 적절한 비율이 중요하며 공극에 가까운 부분의 SMC의 비율이 먼 부분에 비해 공극에서의 자속밀도에 더 큰 영향을 미치기 때문이다.

Fig. 10은 회전자의 이동을 고려하여 가장 큰 토크가 발생하는 시간에서의 Case 1과 Case 2의 회전자에서의 자속밀도를 나타낸다. Case 1의 SMC에서 더 높은 자속밀도를 가지는 것을 알 수 있다.

3.3 ϕ_n 과 θ_n 의 변화에 따른 토크 특성

Fig. 11은 ϕ_n 과 θ_n 의 변화에 따른 평균 토크와 토크 리플을 나타내고 Table 3, 4은 그 수치를 나타낸다. 자석의 좌우 방향의 기울어진 각도는 각 경우에서 동일하다. 초기 모델은 ϕ_n 이 2.8125° , θ_n 이 0° 이고 이를 기준으로 하여 토크 특성이 향상될 수 있는 범위를 고려하여 다음과 같은 범위로 기하학적 변수를 제한하였다. 회전자의 최외곽에서 North pole과 South pole이 서로 맞닿게 되는 7.77° 가 최대값이 된다.

$$2.53125^\circ \leq \phi_n \leq 3.09375^\circ$$

$$0^\circ \leq \theta_n \leq 7.77^\circ$$

ϕ_n 이 변화함에 따라 대체적으로 θ_n 이 약 3.91° 일 때 평균 토크는 최대가 된다. θ_n 이 증가하면서 SMC의 양의 변화하여 영구자석에 의해 집중되는 자속량이 일정각도에서 최대값을 가지기 때문이다.

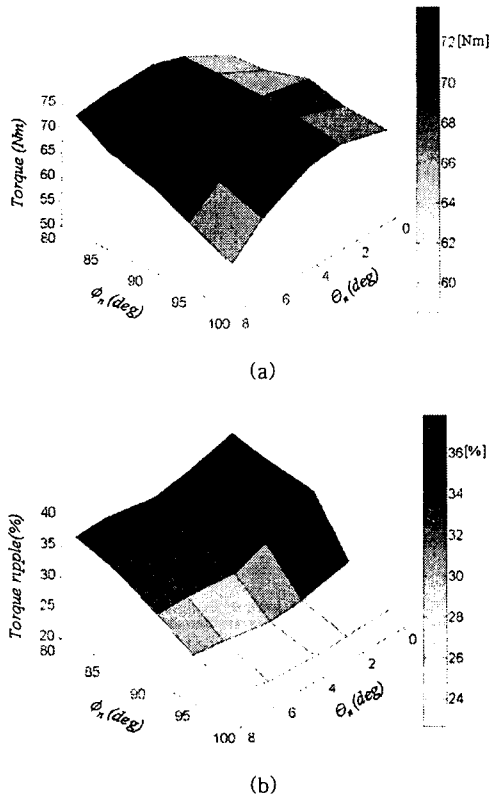


Fig. 11 (a) Average torque due to ϕ_n and θ_n
 (b) Torque ripple due to ϕ_n and θ_n

Table 3 Average torque

$\phi_n \backslash \theta_n$	0	2.35	3.91	6.23	7.77
2.53125	66.26	71.66	73.88	73.55	71.25
2.671875	66.76	71.68	73.08	71.69	68.81
2.8125	69.41	71.62	72.26	69.80	66.09
2.953125	67.45	70.93	70.88	67.26	62.41
3.09375	66.95	69.81	68.89	64.02	58.41

Table 4 Torque ripple

$\phi_n \backslash \theta_n$	0	2.35	3.91	6.23	7.77
2.53125	37.93	36.08	35.24	34.57	34.56
2.671875	36.36	35.84	34.27	33.74	34.77
2.8125	35.01	31.25	29.59	30.52	30.71
2.953125	26.49	24.86	24.53	26.12	26.93
3.09375	22.67	22.57	22.54	23.16	24.25

$$\left(\text{Torque ripple} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} \times 100 \right)$$

ϕ_n 이 2.53125° 이고 θ_n 이 3.91° 인 경우 평균 토크가 최대이고 그 값은 $73.88(Nm)$ 로 ϕ_n 이 2.8125° 이고 θ_n 이 0° 인 초기 모델에 비해 약 6.4%가 증가한 수치이다. 이 때 토크 리플은 초기 모델에 비해 0.3% 증가하므로 큰 차이가 없다. ϕ_n 과 θ_n 의 변화에 따라 토크 리플도 차이를 보인다. ϕ_n 이 3.09375° 이고 θ_n 이 3.91° 일 때의 토크 리플은 22.54(%)로 최소값을 가지지만 이 때의 평균 토크는 $68.89(Nm)$ 로 초기 모델에 비해 감소하므로 평균 토크가 초기 모델에 비해 큰 경우만 고려한다면 ϕ_n 이 2.953125° 이고 θ_n 이 2.35° 인 경우로 초기 모델에 비해 약 29.0% 감소한다.

Fig. 12 는 $(\theta_L)_n$ 과 $(\theta_R)_n$ 의 변화에 따른 평균 토크와 토크 리플을 나타내고 Table 5, 6 은 그 수치를 나타낸다. 이 때 ϕ_n 은 90° 로 일정하다. $(\theta_L)_n$ 이 일

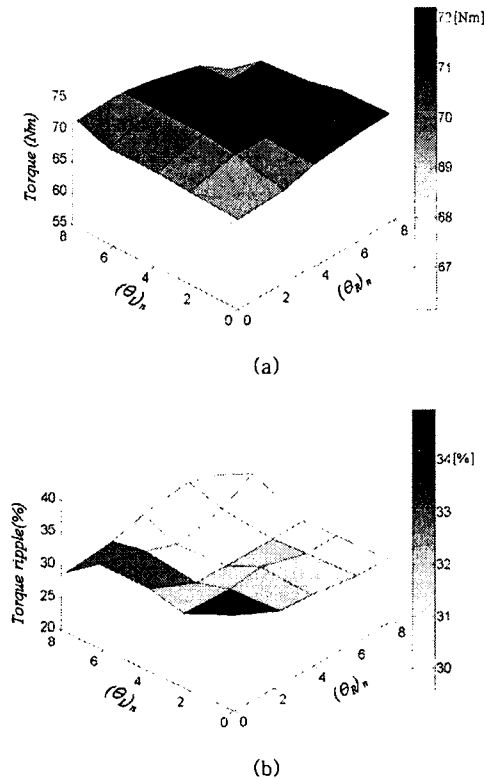


Fig. 12 (a) Average torque and (b) Torque ripple due to $(\theta_L)_n$ and $(\theta_R)_n$

Table 4 Average torque

(ω)	0	2.35	3.91	6.23	7.77
0	69.41	69.82	71.12	71.94	72.20
2.35	69.79	71.62	72.18	72.24	71.93
3.91	71.13	72.19	72.26	71.50	70.59
6.23	71.33	72.27	71.52	69.80	68.15
7.77	72.24	71.96	70.74	68.15	66.09

Table 5 Torque ripple

(ω)	0	2.35	3.91	6.23	7.77
0	35.01	31.59	31.38	30.18	30.08
2.35	31.51	31.25	30.05	29.94	29.92
3.91	31.00	29.75	29.59	29.67	29.72
6.23	31.00	29.10	29.13	30.52	30.61
7.77	29.12	29.04	30.28	30.57	30.71

$$\left(\text{Torque ripple} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} \times 100 \right)$$

정한 경우 $(\theta_R)_n$ 에 따라 나타나는 평균 토크의 최대 값은 약 72.2(Nm)로 비슷하고 자석 형상이 기울어진 각을 가지는, 즉 θ_n 이 0 이 아닌 모든 경우에서 초기 모델에 비해 토크 리플이 감소한다.

3.4 PQSRM 을 이용한 최적화

최적설계 알고리즘으로 점진적 이차 반응표면 모델링 방법(Progressive Quadratic Response Surface Method)을 이용하여 평균 토크 최대화뿐만 아니라 토크 리플 최소화를 위한 최적설계를 실행하였다. 반응표면법이란 관심있는 반응이 여러가지 변수들에 의해 영향을 받고, 이 반응을 최적화하는 것이 목적인 문제를 모델링하고 해석하기 위해 유용한 수학적, 통계적 기술들의 집합을 말한다. 즉 여러 개의 변수 x_1, x_2, \dots, x_k 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응치 y 에 영향을 주고 있을 때, 반응치 y 가 이루는 반응표면을 통계적 모형으로 만들어 y 와 설계변수 x_1, x_2, \dots, x_k 값의 방정식을 만드는 것이다. 이 반응표면법은 주어진 영역 내에서 표면을 근사하고자 할 때, 원하는 특성을 얻기 위한 작동 조건을 선택하고자 할 때, 최적의 조건을 탐색하고자 할 때와 같은 경우에 응용될 수 있으나 많은 설계 변수를 가지는 문제에 대해서는 적용하기 어려운 단점이 있다. 본 논문에서는 기존의 반응표면 모델링 방법에 비하여 실험점의 개수를 상당히 감소시킬 수 있는 효율적인 반응표면 모델링 방법인 점진적 이차 반응표면 모델링 방법(Progressive Quadratic Response Surface Method)을 최적화 알고리즘으로 사용하였다. PQSRM 방법은 단지 $2n+1$

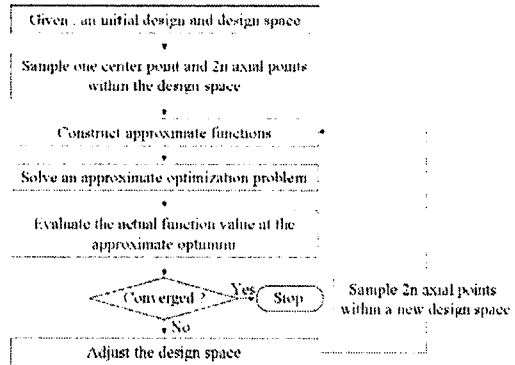


Fig. 13 PQSRM algorithm

Table 6 Formulation of the PQSRM

▶ 목적함수 (Object function) :
평균 토크 최대화 (Maximize average torque) 토크 리플 최소화 (Minimize average torque)
▶ 설계변수 (Design variables) :
$2.53125^\circ \leq \phi_n \leq 3.09375^\circ$ $0^\circ \leq (\theta_L)_n \leq 7.77^\circ$ $0^\circ \leq (\theta_R)_n \leq 7.77^\circ$
▶ 구속조건 (Constraints condition) :
각 상의 최대전류 : I=1250[AT]

Table 7 The result of initial and optimum design

설계변수	초기설계	평균토크 최적설계	토크리플 최적설계
ϕ_n (°)	90	81	99
$(\theta_L)_n$ (°)	0	4.27	7.77
$(\theta_R)_n$ (°)	0	5.36	0
평균 토크 (Nm)	69.41	74.08	68.96
토크 리플 (%)	35.01	35.04	21.59

개의 실험적으로 이차 반응표면 모델을 생성할 수 있고 기존의 반응표면 모델링 방법과는 달리 근사 모델을 생성하기 위한 최소사승법을 사용하지 않고 명시적으로 근사화 모델이 생성되므로 추가적인 계산 시간이 필요하지 않는 특징을 가지고 있다. Fig. 13 은 PQSRM 의 알고리즘을 나타낸다.

Table 6 은 평균 토크를 최대화하고 토크 리플을 최소화하기 위한 정식화이다. 각 상의 전류를 구속 조건으로 주었으며, 회전자 설계변수의 상, 하한치를 내재 제약조건으로 하여 최적의 TFM 특성을 살펴

참 고 문 헌

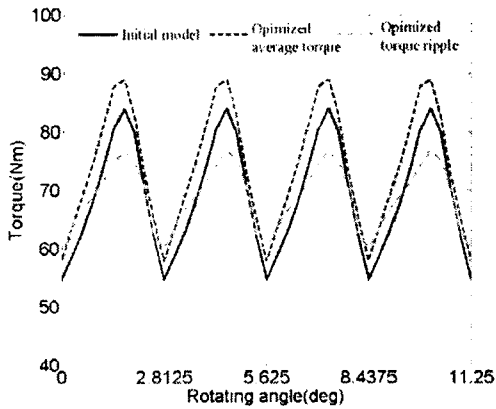


Fig. 14 Optimized average torque and optimized torque ripple

보도록 하였다. Table 7 은 PQRSM 을 이용하여 목적함수를 각각 평균 토크와 토크 리플로 선정하여 $\phi_n, (\theta_L)_n, (\theta_R)_n$ 등의 변수에 대해 최적화를 수행한 결과를 나타낸다. 토크 리플 최소화를 위한 최적설계는 평균 토크 최대화를 위한 최적설계 값보다 토크 밀도 면에서 다소 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 14 는 최적설계를 수행하여 얻은 설계변수를 고려하여 유한요소모델링을 통해 회전각에 따른 토크 해석 결과를 초기 모델과 비교한 것이다. 평균 토크 최대값은 $74.25[Nm]$, 토크 리플 최소값은 $21.82[\%]$ 로 최적설계에 의한 결과와 거의 동일하다. 따라서 최적 설계를 위해서 변수로 주어진 기하학적 파라미터와 전기적 파라미터는 TFM 의 토크 특성에 영향을 미치는 것을 해석 결과로부터 검증할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 축방향 이상 횡자속형 전동기를 대상으로 회전자의 기하학적 구조를 고려하여 토크와 토크 리플을 실험과 3 차원 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 또한 출력 토크를 증가시킬 뿐만 아니라 토크 리플을 저감할 수 있는 자석 형상을 제안하였으며 이를 위한 변수들의 최적화 과정을 수행하였다. 이 연구는 횡자속형 전동기가 가지는 고효율, 고출력의 장점을 극대화시킬 수 있고 토크 리플로부터 자기적으로 유도되는 진동과 소음을 감소시킴으로써 TFM 의 동적 특성 향상에 기여할 수 있다.

(1) H.T. Ahn, G.H. Jang, J.H. Chang, S.W. Jeong, and D.H. Kang, 2008, "Reduction of the Torque Tipple and Magnetic Force of a Rotatory two-phase Transverse Flux Machine Using Herringbone Teeth" *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 44, No. 11.

(2) D.H. Kang and Y.H. Jeong, 2001, "A study on the Design of Transverse Flux Linear Motor with High Power Density," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Vol. 2, pp. 707~711.

(3) G.H. Jang, N.K. Park, C.I. Lee, J.H. Chang, S.W. Jeong, and D.H. Kang, 2008, "Reduction of the Unbalanced Magnetic Force of a Transverse Flux Machine by Using Symmetric Multi-pair Cores" *Journal of Applied Physics*, Vol. 103.

(4) Erich Schmit, 2005, "3D Finite Element Analysis of the Cogging Torque of a Transverse Flux Machine," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 41, No. 5, pp. 1836~1839.

(5) Maddison CP, Mecrow BC, Jack AG, 1998, "Claw Pole Geometries for High Performance Transverse Flux Machines" *Proceedings of International Conference on Electrical Machines*, Vol. 1, pp. 340~345.

(6) A. Masmoudi, A. Njeh and A. Elantably, 2005, "On the Analysis and Reduction of the Cogging Torque of a Claw Pole Transverse Flux Permanent Magnet Machine," *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 15, pp. 513~526.