

반응표면법을 이용한 6/4극 구조를 갖는 스위치드 릴럭턴스 모터의 토크 리플 저감을 위한 형상 최적설계

論 文

55B-12-3

Shape Optimization of a Switched Reluctance Motor Having 6/4 Pole Structure for the Reduction of Torque Ripple Using Response Surface Methodology

催 容 權* · 尹 熙 盛** · 高 彰 燮†

(Yong Kwon · Hee Sung Yoon · Chang Seop Koh)

Abstract - Recently, a switched reluctance motor is widely used in various industries because it has many advantages such as a simple structure, robustness, less maintenance, high torque/weight ratio, and easy speed control over other types of motors. However, a switched reluctance motor inherently produces acoustic noise and vibration caused by torque ripple. Applications of these motors where silent operation is desirable have thus been limited. In this paper, a new stator pole face having a non-uniform air-gap and a pole shoe attached to the lateral face of the rotor pole are suggested in order to minimize torque ripple. The effects of each design parameter are validated using a time-stepping finite element method. The parameters are optimized by utilizing response surface method (RSM) combined with (1+1) evolution strategy. The result shows that the optimized shape gives higher average torque and drastically reduced torque ripple.

Key Words : Switched reluctance motor, torque ripple, response surface methodology

1. 서 론

최근 전동기의 다기능화, 고성능화 요구에 따라 회전자계를 이용한 전동기뿐만 아니라 릴럭턴스의 변화를 이용한 전동기의 개발과 활용이 증가하고 있다. 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor : SRM)는 구조가 간단하고 견고하여 유지 보수가 쉬우며, 효율과 경제성이 다른 전동기와 비교하여 비교적 높고, 광범위한 운전 영역과 고속 회전 능력 등으로 인하여 향후 산업용뿐만 아니라 사무용 및 가전용으로도 널리 채택될 전망이다[1], [2].

과거에는 물론 현재에도 SRM의 토크 리플을 저감하기 위한 많은 연구가 진행 중에 있으며, 이들은 크게 설계적인 측면에서 SRM의 형상 등을 최적화하는 것과 구동 측면에서 각종 인자들을 최적으로 하는 것으로 나뉜다. 설계적인 측면에서 SRM의 토크 리플을 저감하기 위한 것으로 문헌[3]에서는 설계 변수로 고정자와 회전자의 극호 각(pole arc)을 선택하여 토크 리플을 최소화 하는 최적의 극호 각의 조합을 찾는 방법을 제안하였으며, 문헌[4]에서는 회전자의 돌극에 notch를 설치하여 인덕턴스의 값이 선형적으로 변화하도록 하여 토크 리플을 저감하는 방법을 제안하였다. 또한, 문헌[5]에서는 회전자의 돌극에 자속 장벽(flux barrier)을 설치하여 토크가 하강하는 구간의 전류 값을 상승시킴으로써 토크 리플을 저감할 수 있음을 보였다. 한편, SRM의 구

동측면에서는 선행 각(advance angle)과 드웰 각(dwell angle)을 조절함으로써 토크 리플을 저감할 수 있음을 보였으며[6], 기자력의 급격한 변화를 방지하기 위하여 순차적으로 두 개의 상을 동시에 여자하는 새로운 구동 시스템도 제안되었다[7].

이와 같이 기존에 제안된 토크 리플을 저감하기 위한 방법들은 대부분의 경우 토크 리플의 저감에는 다소간 효과적이었지만, 정속한 구동이 요구되는 분야에 적용하기에는 토크 리플이 충분히 저감되지 못하였으며, 특히 기존에 제안된 대부분의 방법들은 평균 토크를 감소시키는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점과 함께 고속으로 구동되는 SRM의 경우에는 고정자와 회전자가 오버랩 되기 전에 여자 전류가 충분히 확립될 수 있도록 충분한 시간이 필요하기 때문에 선행 각과 드웰 각을 조절하여 토크 리플을 저감하는 것은 더욱 어려워진다.

본 논문의 이론적인 배경은, SRM의 설계적인 측면에서 볼 때, 각 상(phase)에 대한 여자 전압 파형과 권선의 저항, 그리고 구동을 위한 선행 각, 드웰 각 및 구동 회로가 결정되면, 각 상에 흐르는 여자전류의 파형은 물론 SRM에서 발생하는 토크의 파형도 각 상의 인덕턴스 파형에 의하여 결정된다는 사실에 기초하고 있다. 따라서 SRM에서 발생하는 토크의 파형을 변화시키기 위해서는, 각 상의 인덕턴스가 적절한 파형으로 조절되어야 한다. 이러한 관점에서 SRM의 토크 리플 저감을 위한 최적설계 과정에서 설계변수는 각 상의 인덕턴스 파형을 효과적으로 조절할 수 있는 것이라야 한다. 이러한 이유로 본 논문에서는 SRM의 토크 리플을 저감하기 위하여 고정자와 회전자 사이의 공극의 변화를 조절하였고, 공극을 조절하기 위한 설계 변수로 고정자 돌극의 형상과 회전자 돌극에 설치되는 Pole shoe의 형상으로 택하

* 正 會 員 : LS 産 電 研 究 員

** 學 生 會 員 : 忠 北 大 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程

† 교 신 저 자 , 正 會 員 : 忠 北 大 電 氣 電 子 컴 퓨터 工 學 部 教 授

E-mail : kohcs@chungbuk.ac.kr

接 受 日 字 : 2006年 8月 8日

最 終 完 了 : 2006年 10月 23日

었다. 한편 최적화 과정에서 목적함수는 SRM의 형상에 대응하는 토크 리플의 크기로 정의하였다.

본 논문의 이론적인 배경은, SRM의 설계적인 측면에서 볼 때, 각 상(phase)에 대한 여자 전압 파형과 권선의 저항, 그리고 구동을 위한 선형 각, 드웰 각 및 구동 회로가 결정되면, 각 상에 흐르는 여자전류의 파형은 물론 SRM에서 발생하는 토크의 파형도 각 상의 인덕턴스 파형에 의하여 결정된다는 사실에 기초하고 있다. 따라서 SRM에서 발생하는 토크의 파형을 변화시키기 위해서는, 각 상의 인덕턴스가 적절한 파형으로 조절되어야 한다. 이러한 관점에서 SRM의 토크 리플 저감을 위한 최적설계 과정에서 설계변수는 각 상의 인덕턴스 파형을 효과적으로 조절할 수 있는 것이라야 한다. 이러한 이유로 본 논문에서는 SRM의 토크 리플을 저감하기 위하여 고정자와 회전자 사이의 공극의 변화를 조절하였고, 공극을 조절하기 위한 설계 변수로 고정자 돌극의 형상과 회전자 돌극에 설치되는 Pole shoe의 형상으로 택하였다. 한편 최적화 과정에서 목적함수는 SRM의 형상에 대응하는 토크 리플의 크기로 정의하였다.

2. 본 론

2.1 Radial Basis Function을 이용한 Response Surface Methodology

반응 표면법(response surface method)은 제한된 설계 변수의 공간에서 제한된 개수의 표본점(sampling point)에서의 함수 값을 이용하여 미지의 함수를 보간(Interpolation)하는 방법이다. 함수의 보간에 이용되는 기저함수(basis function)에는 다항식을 비롯한 여러 가지 형태의 함수가 있으나, 최근에 Radial basis 함수에 대한 연구가 널리 이루어지고 있다[8]. Radial basis 함수를 이용한 반응 표면법 또는 함수의 근사화는 복잡한 전처리 과정(preprocessing)을 수행해야 하는 다른 방법과 비교할 때 매우 효과적이어서, 지구 물리학, 신호 처리, 화학 등의 다양한 분야에 광범위하게 적용되고 있다[8]. Radial basis 함수에는 표 1과 같이 Multi-quadric, Inverse multi-quadric, Gaussian 함수 등이 있으며 본 논문에서는 Multi-quadric radial basis 함수를 이용한 반응 표면법을 사용하였다.

Multi-quadric radial basis 함수를 사용한 반응 표면법에 따르면, 최소 또는 최대화하고자 하는 목적함수(objective function)에 대한 표본점(Sampling point)에서의 함수 값으로부터 반응 표면 S 는 다음과 같이 정의 된다[9].

$$S(x) = \sum_{i=1}^N c_i g(x - x_i) \tag{1}$$

$$g(x) = \sqrt{|x|^2 + h^2} \tag{2}$$

$$X = \{ (x_i, f(x_i)), i = 1, 2, \dots, N \} \tag{3}$$

여기서 x 는 설계 변수 벡터, c_i 는 i 번째 표본점(sampling point) x_i 에 대응하는 계수, $g(\cdot)$ 는 Multi-quadric radial basis 함수, 그리고 h 는 형상 파라미터(shape parameter)이고, X 는 크기가 N 인 표본 데이터의 집합이다. N 개의 표본

표 1 Radial basis 함수

Table 1 Radial basis functions

| Name | Function |
|-----------------------|-------------------------------|
| Multi-quadric | $(t^2 + c^2)^{1/2}, c \geq 0$ |
| Inverse multi-quadric | $(t^2 + c^2)^{-1/2}, c > 0$ |
| Gaussian | $e^{-t^2/c^2}, c > 0$ |

점들을 식 (1)에 대입하면, 다음 식으로부터 계수 c_i 가 구해진다.

$$f(x_k) = \sum_{i=1}^N c_i g(x_k - x_i), k = 1, 2, \dots, N \tag{4}$$

식 (4)으로부터 계수 c_i 가 구해지면, 식 (1)으로부터 N 개의 표본점을 이용한 반응 표면을 구성할 수 있다. 그러나 이때 구성된 반응 표면은 식 (2)에 포함된 형상 파라미터의 함수가 되고, 따라서 반응표면의 보간 오차는 형상 파라미터에 따라 달라진다. 따라서 구성된 반응표면의 보간 오차를 최소화 하는 적절한 형상 파라미터를 찾는 방법에 관한 많은 연구가 이루어졌다. 예를 들면, R. L. Hardy는 다음과 같은 식을 제안하였고[10],

$$h = 0.815d \tag{5}$$

여기서 d 는 각각의 표본점과 그 표본점에서 가장 가까운 표본점 간의 거리의 평균이다. 또한 R. Franke는 다음 식으로 주어지는 형상 파라미터의 값을 제안하였다[11].

$$h = 1.25D/\sqrt{N} \tag{6}$$

여기서 D 는 2차원 문제의 경우 모든 표본점을 포함하는 가장 작은 원의 지름이다. 그러나 이러한 방법들은 주로 2차원 문제에 대하여 연구된 것이고, 따라서 일반적으로 적용하기에는 문제가 있는 것으로 지적되고 있다[12]. 따라서 본 논문에서는 설계변수의 개수에 상관없이 일반적으로 적용할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

특정한 형상 파라미터 h 에 대하여 보간 오차 $E(h)$ 는 연속적인 Leave One Out법을 사용하여 다음과 같이 근사적으로 정의 할 수 있다[8].

$$E(h) = \sum_{k=1}^N \sqrt{E_k(h)^2} / N \tag{7-a}$$

$$E_k(h) = f(x_k) - S^{(k)}(x_k), k = 1, 2, \dots, N \tag{7-b}$$

$$S^{(k)}(x_k) = \sum_{i=1, i \neq k}^N c_i g(x_k - x_i) \tag{7-c}$$

여기서 $S^{(k)}(x)$ 는 식 (3)에 정의된 표본 데이터 집합에서 k 번째 표본 데이터를 제거한 축소된 표본 데이터 집합(reduced sampling data set) $X_k = \{(x_i, f(x_i)), i = 1, 2, \dots, (k-1), (k+1), \dots, N\}$ 을 이용하여 구성된 반응 표면이다. 따라서 표본점 $(x_k, f(x_k))$ 을 제외한 나머지 데이터로부터 구성된 반응표면 $S^{(k)}(x)$ 상에서 점 x_k 에서의 보간 오차를 의미한다. 특정한 형상 파라미터 $E_k(h)$ 에 대하여 반응 표면의 보간 오차가 식 (7)과 같이 정의되면,

적절한 형상 파라미터의 값을 구하는 문제는 결국 식 (7-a)을 최소로 하는 형상 파라미터의 값을 구하는 일종의 최적화 문제로 귀착되며, 본 논문에서는 (1+1) Evolution Strategy를 적용하여 식 (7-a)을 최소로 하는 형상 파라미터의 값을 구하고 이 값을 형상 파라미터의 값으로 하였다.

2.2 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 Genetic algorithm, Evolution strategy 등의 최적화 기법을 이용하여 목적함수를 최소로 하는 설계 변수를 찾을 수 있다. 이때 구해진 최적설계 결과는, 일반적으로 표본점의 개수가 충분히 많은 경우에는 설계변수 전체 공간에서 목적함수가 적절히 보간되어지기 때문에 설계변수 공간 전역에서의 최적해로 간주할 수 있다. 그러나 실제 문제에서는 충분히 많은 표본 데이터를 확보하는 것이 어렵기 때문에 설계 변수 공간 전역에서의 최적해로 간주할 수 없다. 따라서 최소의 표본 데이터를 이용하면서도 설계변수 공간 전역에서의 최적해를 구할 수 있는 최적화 전략이 필요하다.

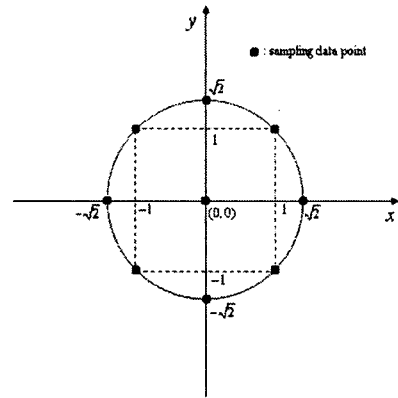
본 논문에서는 초기 표본 데이터에서 시작하여 준최적 설계를 구하고, 이후 연속적으로 표본점을 추가하고 준최적 설계를 구해가는 과정을 반복함으로써 최종적인 최적 설계를 구할 수 있는 알고리즘을 제시한다.

그림 1은 초기 상태에서 표본점을 선정하기 위하여 사용한 중심 합성 계획법(central composite design method, CCD method)을 나타낸다. 이 방법은 실험 계획법(design of experiment)의 한 방법으로 표본점의 개수는 설계변수의 개수를 K 라고 할 때 다음과 같이 주어진다[13].

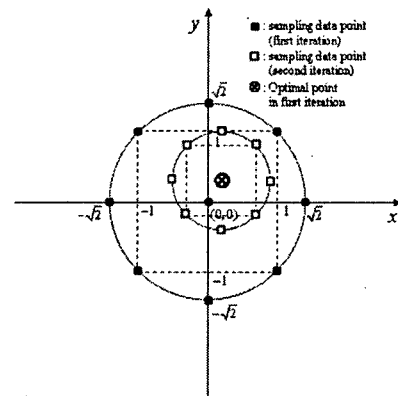
$$N_s = 2^K + 2K + 1 \tag{8}$$

표본점이 정의되면, 유한요소법을 이용하여 각각의 표본점에 해당하는 목적함수를 계산하여 표본 데이터를 구성하고, 적절한 형상파라미터를 이용하여 반응 표면을 구성한다. 구성된 반응 표면에 대하여 (1+1) Evolution strategy법을 적용하면 목적함수를 최소로 하는 설계 변수를 구한다. 충분히 많은 표본점을 이용하여 반응표면이 구성된 경우라면, 이때 구해진 설계변수를 최적설계로 간주할 수 있으나, 표본점의 개수가 충분치 않기 때문에 이 단계에서 구한 설계변수는 설계변수 공간 전역에서의 최적설계가 아닐 수 있으며, 본 논문에서는 준최적 설계(pseudo-optimal design)라고 칭한다.

본 논문에서는 설계변수 공간 전역에서의 최적설계를 구하기 위하여, 전 단계에서 구한 준 최적설계를 중심으로 하여 1/2로 축소된 설계 변수 공간에서 새로운 표본점 N_s 개를 중심 합성 계획법을 이용하여 추가하여 전체 $2N_s$ 개의 표본점을 확보하고, 이로부터 새로운 반응 표면을 구하고, 다시 목적 함수를 최소로 하는 설계 변수를 구하였다. 이러한 과정을 각 단계에서 구한 준최적 설계 결과가 수렴할 때까지 반복하였으며, 반복과정에서 최종적으로 수렴된 결과를



(a) first iteration



(b) second iteration

그림 1 중심 합성 계획법을 이용한 표본점 추출 과정

Fig. 1 The method for retrieving the sampling data points using central composite design

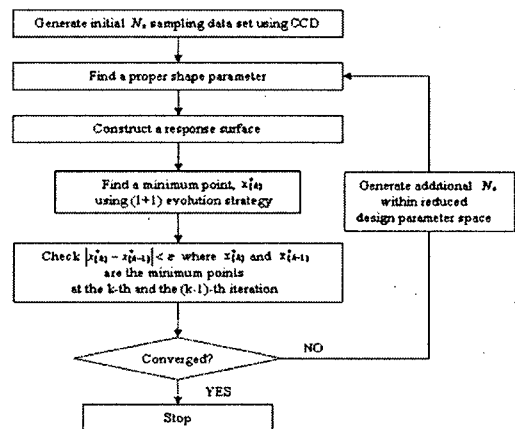


그림 2 최적화 알고리즘의 흐름도

Fig. 2 Flow chart of optimization algorithm

최적 설계로 판단하였다. 그림 2는 반응 표면법과 (1+1) evolution strategy를 이용한 최적화 알고리즘의 흐름을 나타낸다.

2.2.1 (1+1) Evolution strategy

Evolution strategy는 생물의 진화과정(biological evolution)을 수치적으로 모사함으로, 주어진 환경에 가장 잘 적응하는 객체(object)가 선택되어 후손을 퍼뜨리며 최종적으로 생존하는 것과 같이 최적화 과정에서도 목적함수를 최소로 하는 설계가 생물의 진화과정에서 자연환경에 가장 잘 적응하는 객체가 선택되는 것과 같이 선택되도록 하는 것으로, (1+1) Evolution strategy, $(\mu, 1)$ Evolution strategy, $(\mu/\rho, \lambda)$ Evolution strategy 등이 있다[14]. (1+1) evolution strategy는 그 중에서 수렴속도가 가장 빠른 특성을 나타내나, 경우에 따라서는 국부적인 최적설계(local optimum design)가 이루어진다는 단점이 있다. 반면에 $(\mu, 1)$ Evolution strategy나, $(\mu/\rho, \lambda)$ Evolution strategy는 수렴속도는 떨어지나, 많은 경우에 상대적으로 전역적인 최적설계(global optimum design)가 가능하다는 장점을 갖는다.

(1+1) Evolution strategy는 다른 비결정론적 최적화 알고리즘들과 같이 재생산(reproduction), Annealing, 변이(mutation)의 3개 과정으로 구성된다. 재생산은 부모세대(parent generation)의 객체(object)로부터 자식 세대(child generation)의 객체를 재생산하는 것으로 다음 식으로 수치 모사된다.

$$X(\text{child}) = X(\text{parent}) + R(0, \sigma) \tag{9}$$

여기서, X는 설계변수 벡터이고 child와 parent는 각각 자식세대와 부모세대를 나타내며, $R(0, \sigma)$ 는 평균 값 영과 분산 σ 을 갖는 난수(random number)이다. 식 (9)에서 알 수 있듯이 재생산과정은 $X(\text{parent})$ 을 중심으로 하여 분산 σ 의 범위 내에서 다음 세대에 해당하는 설계변수들을 발생시키는 과정이다.

변이 과정은 식 (9)의 재생산 과정에서 그 중심점 $X(\text{parent})$ 이 갑자기 바뀌는 것으로, $X(\text{children})$ 과 $X(\text{parent})$ 에 해당하는 목적함수를 각각 F_c 와 F_p 라고 할 때 다음과 같이 수치 모사된다.

If $(F_c < F_p)$ then
 $X(\text{parent}) = X(\text{children})$ (10-a)

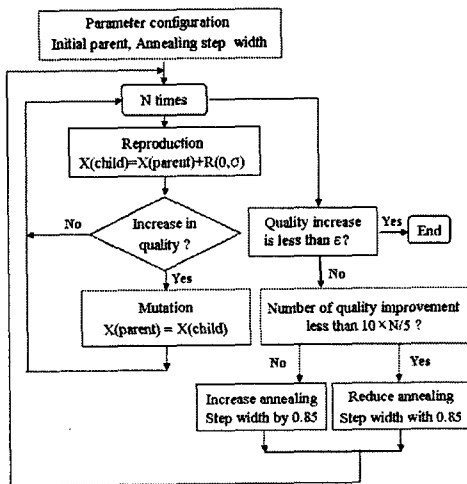


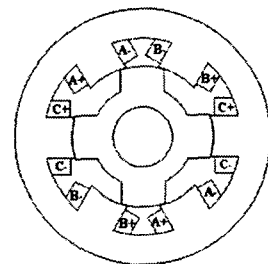
그림 3 (1+1) Evolution strategy의 흐름도
 Fig. 3 Flow chart of (1+1) Evolution strategy

Else
 $X(\text{parent}) = C(\text{parent})$ (10-b)
 Endif

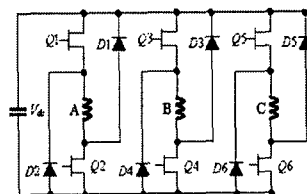
또한 Annealing 과정은 변이가 일어나지 않은 상태에서 점진적인 진화가 이루어지는 과정을 수치 모사하는 것으로, $X(\text{parent})$ 을 중심으로 일정한 범위에서 더 우수한 설계를 찾아가는 과정으로 식 (9)에서 난수를 발생시키는 구간 $R(0, \sigma)$ 을 증가 시키거나 또는 감소시킴으로써 묘사된다. 이때 Annealing의 정도는 통상 20% 규칙과 0.85규칙을 이용한다 [15]. 즉, 새로운 설계를 반복함에 따라 이전 보다 더 좋은 설계, 즉 목적함수의 값이 작아지는 설계가 이루어지는 확률이 20%를 넘는 경우에는 난수의 발생 범위를 0.85배 만큼 늘려 더 좋은 설계를 찾을 수 있는 확률을 증가시키고, 반대로 더 좋은 설계가 이루어지는 확률이 20%이하인 경우에는 난수의 발생범위를 0.85배 만큼 줄여가는 과정이다. 그림 3은 (1+1) Evolution strategy의 전체적인 흐름도를 나타낸다.

2.3 최적화 모델

본 논문에서는 3상 전원에 의하여 구동되고 고정자와 회전자가 6극과 4극 구조를 갖는 3상 6/4 SRM을 기본 모델로 선정하였으며 구조는 그림 4(a)와 같다. 각각의 고정자 돌극에 집중권 방식의 권선이 감겨있으며 마주보는 고정자 돌극의 권선이 직렬로 연결되어 한 상을 이룬다. 그림 4(b)는 기본 모델을 구동하기 위한 3상 비대칭 브리지 컨버터를 나타낸다. 고정자 돌극이 회전자 돌극과 오버랩 되기 -7° 위치에서 스위치가 온 되어 해당 상에 전류가 흐르며 스위칭 온 후에 34° 동안 여자를 하였으며 스위칭 오프 시에 코일에 저장된 에너지를 전원 측으로 즉시 환원시키기 위하여 스위칭 소자를 동시에 오프하는 방식으로 구동시킨다. 선행 각(advance angle)을 크게 설정한 이유는 기본 모델의 정격속도가 6000 [rpm]이므로 전류의 확립을 위한 충분한 시간이 필요하기 때문이다. 표 2는 기본 모델의 사양을 나타낸다.



(a) 3 phase 6/4 Switched Reluctance Motor



(b) asymmetric bridge converter

그림 4 기본 모델 및 구동 회로
 Fig. 4 Initial model and its driving circuit

표 2 기본 모델의 사양

Table 2 Specification of the initial model

| | |
|----------------------------|----------------|
| Rated power | 3.5 [kW] |
| Rated voltage | 72 [V] |
| Rated speed | 6,000 [rpm] |
| Air-gap length | 0.25 [mm] |
| Stator winding turns/phase | 18 [turns] |
| Advance excitation angle | 7 [degree] |
| Dwell angle | 34 [degree] |
| Stator/Rotor poles | 6/4 |
| Stator/Rotor pole arcs | 34/36 [degree] |
| Outer radius of stator | 69 [mm] |
| Outer radius of rotor pole | 38[mm] |

2.4.1 Air-gap profile

인덕턴스의 과형을 변화시키기 위한 가장 효과적인 설계 변수는 고정자와 회전자 사이의 Air-gap profile이라고 할 수 있다. 그림 5는 회전자가 반시계 방향으로 회전할 때, Air-gap profile을 변화시키기 위한 설계 변수 θ 을 나타낸다. 그림에서 설계 변수 θ 는 고정자와 회전자의 돌극이 많이 겹칠수록 air-gap이 점점 줄어들게 함을 알 수 있다.

최적의 Air-gap profile 즉, 최적의 설계변수 θ 을 찾기 위하여 목적 함수와 설계 변수의 범위를 다음과 같이 정의 하였다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & F_{obj} = T_{max} - T_{min} \\ \text{Subject to} \quad & 0^\circ \leq \theta \leq 1^\circ \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, T_{max} , T_{min} 은 각각 전기자 한 상에서 발생하는 최대 토크와 최소 토크를 나타낸다. 최적화 과정의 첫 단계에서는 중심 합성 계획법을 사용하여 그림 6(a)과 같이 다섯 개의 표본점을 추출하였다. 이들 표본점으로부터 반응 표면을 생성하여 준최적 설계를 찾고 그 결과가 수렴할 때까지 그림 2에서 제시한 최적화 전략을 이용하여 반복적으로 최적화를 수행하였다. 최적화의 반복 수행과정에서 새롭게 추가되는 표본점들은 최적화전략에서 설명한 바와 같이 준최적점을 중심으로 1/2로 축소된 설계변수 공간에서 중심합성법을 이용하여 발생되었다. 그러나 전 단계에서 구한 준최적점의 위치가 설계변수 공간에서 경계부근으로 치우쳐 준최적점의 위치를 기준으로 중심합성법을 적용하기 어려운

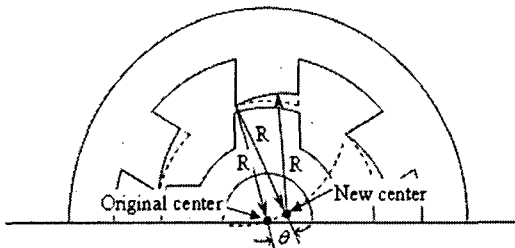
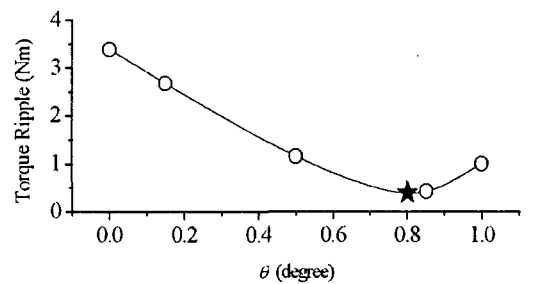


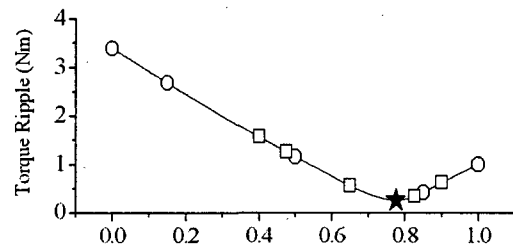
그림 5 공극 프로파일을 위한 설계 변수
Fig. 5 Design parameter for the air-gap profile

경우에는 축소된 설계변수 공간의 중심을 기준으로 중심합성법을 적용하여 새로운 표본점을 구하였다. 이와 같은 과정으로 각 단계에서 추가로 추출된 표본점을 그림 6에 나타내었으며 최적설계는 세 번째 단계에서 $\theta = 0.76^\circ$ 로 수렴되었다. 표 3은 반응 표면으로부터 보간된 목적 함수의 값과 유한요소법을 이용한 해석 결과를 비교하고 있으며 그 차이가 크지 않음을 확인할 수 있다.

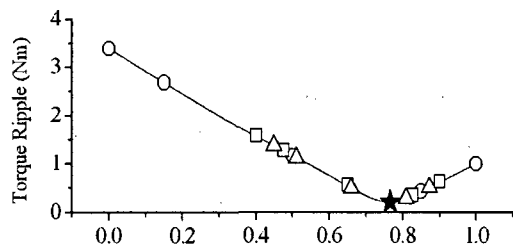
그림 7은 기본 모델과 최적화 모델의 Air-gap profile, 인덕턴스, 여자 전류 및 토크 과형을 비교하고 있다. 그림 7(d)에서 알 수 있듯이, Air-gap profile을 최적으로 설계한 결과 각 상에서 발생하는 토크의 과형이 거의 일정하게 됨을 알 수 있다. 또한 Air-gap profile을 변화시킴으로써 토크가 상승 또는 하강하게 할 수 있음을 알 수 있다.



(a) first iteration



(b) second iteration



(c) third iteration

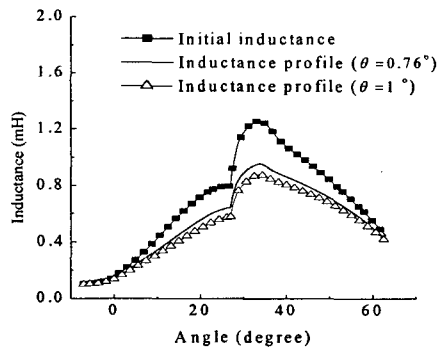
그림 6 반응 표면과 최소 점의 위치

Fig. 6 Response surfaces and movement of the minimal point

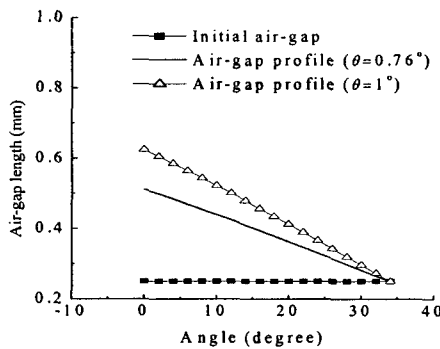
표 3 최적설계의 토크 리플 비교

Table 3 Comparison of torque ripples

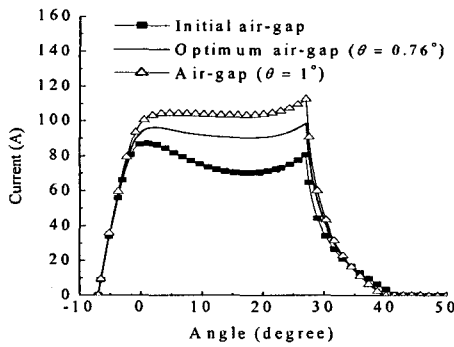
| Model | Objective function | |
|--|--------------------|----------|
| | FEA | RSM |
| Optimized Model ($\theta = 0.766^\circ$) | 0.18 | 0.20 |
| Initial Model ($\theta = 0^\circ$) | 3.38691 | 3.386909 |



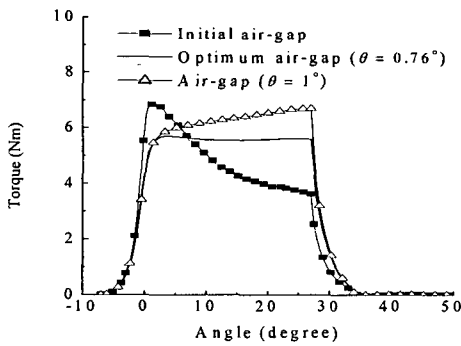
(a) air-gap profiles



(b) inductance profiles



(c) current profiles



(d) torque profiles

그림 7 공극 프로파일에 대한 최적화 결과
Fig. 7 Optimization results for the air-gap profile

2.4.2 Air-gap profile 및 Pole Shoe

각 상에서 발생하는 토크 리플은 Air-gap profile을 최적으로 설계함으로써 충분히 저감되었지만, SRM은 스위칭 구간에서 발생하는 토크 딥(torque dip)으로 인하여 토크 리플을 발생시킨다. 이 구간에서 발생하는 토크 리플은 Switching off 시간 및 환류 다이오드를 통한 에너지 회생 회로와 연관되어 있으며 한 상에서 발생하는 하강하는 토크와 다음 상에서 발생하는 상승하는 토크의 함으로부터 발생한다.

본 논문에서는 상승하는 토크의 파형을 변화시키기 위하여 그림 8에서와 같이 회전자 돌극의 측면에 Pole shoe을 설치하였다. 이는 Pole shoe는 그림 9와 같이 고정자와 회전자가 겹치기 전의 인덕턴스 파형을 주로 변화시키기 때문이다.

Air-gap profile과 Pole shoe의 형상을 동시에 최적화하기 위하여 목적 함수를 다음과 같이 정의하였다

$$F_{obj} = \int_0^{2T} (T - T_{obj})^2 dt \quad (14)$$

여기서, 2T는 전기자의 두 상이 동시에 여자되는 시간이다. 그림 10은 최적화 과정에서 선택된 표본점들의 위치와 이로부터 생성된 반응 표면을 비교하고 있다. 초기 단계에서, 9개의 표본점으로 구성된 반응 표면과 이로부터 구해진 준최적점은 그림 10(a)에 나타난 것과 같이 (θ, α) = (0.67, 1.30)이며, 2번째 반복과정에서는 초기 단계에서 구한 준최적점을 중심으로 1/2로 축소된 설계변수 공간에서 중심 합성 계획법을 사용하여 25개의 새로운 표본점을 추가하였으며, 이 때 구해진 준 최적점은 (θ, α) = (0.67°, 1.17°)이었다. 3번째 반복과정에서의 준최적점은

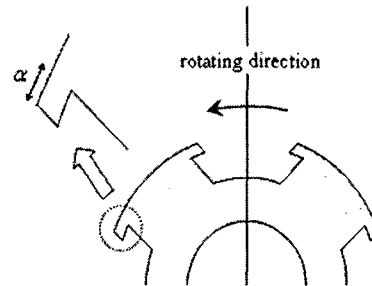


그림 8 Pole shoe 설계 변수
Fig. 8 Design parameter for the pole shoe

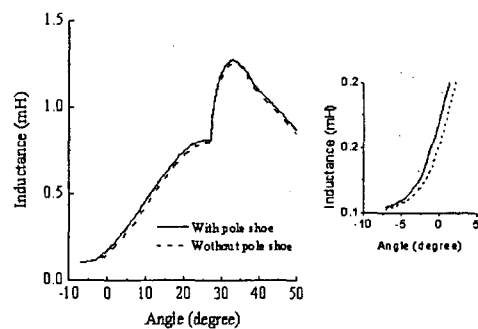


그림 9 Pole shoe에 따른 인덕턴스 파형의 변화
Fig. 9 Variation of inductance profile due to a pole shoe

$(\theta, \alpha) = (0.68^\circ, 1.29^\circ)$ 이었으며, 4번째 반복결과 준최적점은 그림 10(d)에 나타난 것과 같이 $(\theta, \alpha) = (0.67^\circ, 1.35^\circ)$ 로 수렴 하였으며, 이 것을 최적점으로 하였다. 표 4는 최적화 과정에서 반응 표면법으로부터 보간된 목적 함수의 값과 유한요소법을 이용하여 해석한 결과를 비교하고 있으며, 최종 최적점의 경우 반응 표면법과 유한요소법으로 구한 목적함수의 값이 잘 일치함을 알 수 있다.

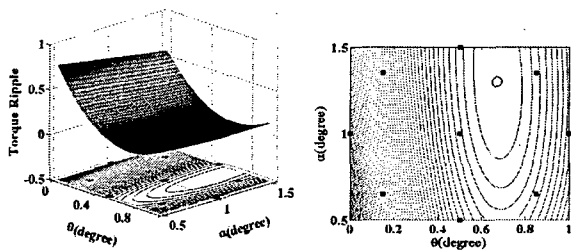
그림 11은 초기 모델과 최적 설계된 모델에서 계산한 토크의 파형을 비교하고 있으며, 최적 설계된 모델의 토크 리플은 초기 모델의 토크 리플 4.32[Nm] 과 비교하여 약

23%까지 감소하여 0.99[Nm] 이 되었음을 알 수 있다. 또한 평균 토크는 초기 모델과 비교하여 대략 10%정도 증가 되었음을 알 수 있다. 그림 12는 기본 모델과 최적화된 모델의 형상을 비교한 것이다.

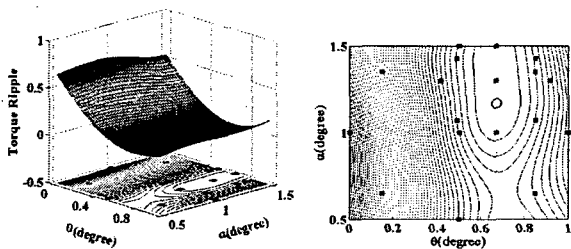
표 4 초기설계와 최적설계에서의 목적함수 비교

Table 4 Objective function values at the initial and optimized designs

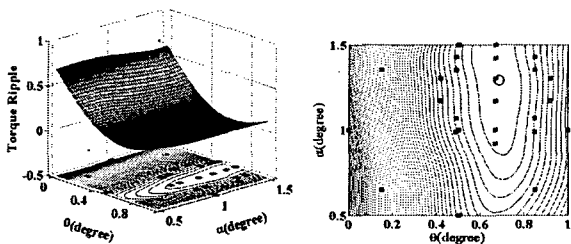
| Model | Parameters | F_{obj} | |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------|---------|
| | | FEA | RSM |
| Initial | $(0^\circ, 0^\circ)$ | 0.879 | — |
| Optimized (Sampling points) | 9 $(0.67^\circ, 1.30^\circ)$ | 0.01667 | 0.01665 |
| | 18 $(0.67^\circ, 1.17^\circ)$ | 0.01847 | 0.0153 |
| | 27 $(0.68^\circ, 1.29^\circ)$ | 0.0169 | 0.0164 |
| | 36 $(0.67^\circ, 1.35^\circ)$ | 0.0164 | 0.0163 |



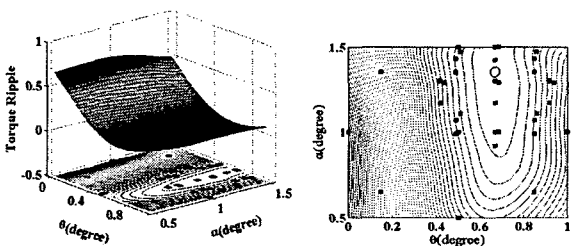
(a) initial response surface with 9 sampling data points



(b) response surface with 18 sampling data points



(c) response surface with 27 sampling data points



(d) response surface with 36 sampling data points

그림 10 반응 표면과 최소 점의 이동

Fig. 10 Response surfaces and movement of the minimal point

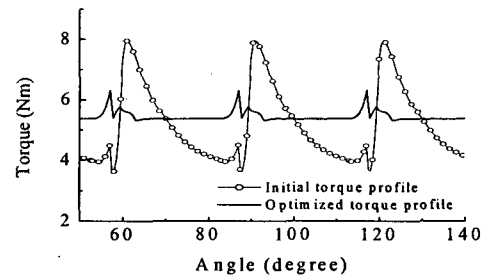
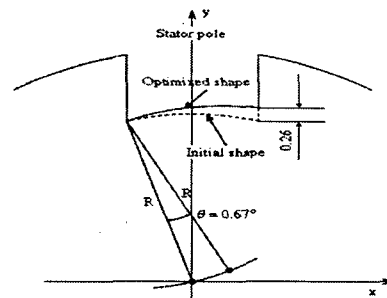
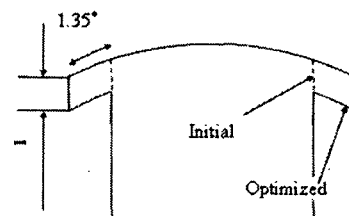


그림 11 기본 모델과 최적화 모델의 토크 파형

Fig. 11 Comparison of the torque profiles



(a) air-gap profile



Rotor pole

(b) rotor pole shoe

그림 12 기본 모델과 최적화 모델의 세부 형상

Fig. 12 Detailed view of the initial and optimized shapes

3. 결 론

본 논문에서는 SRM에서 발생하는 토크 리플을 저감하기 위하여 균일하지 않은 공극을 갖는 고정자의 돌극 형상과 회전자 돌극의 측면에 Pole shoe을 삽입한 새로운 형태의 SRM을 제안하였다. SRM의 설계과정에서 구동회로의 여자 전압파형, Switching on, Switching off 시간, 구동 회로 등이 결정되면 SRM에서 발생하는 토크의 파형은 인덕턴스의 파형에 따라 달라지며, 인덕턴스의 파형을 변화시키기 위한 설계변수로 본 논문에서 제시한 두 개의 새로운 설계 변수가 기존의 연구에서 제시된 설계변수들과 비교할 때 더욱 타당함을 보였다. 각각의 설계 변수의 유효성은 유한요소법을 이용하여 토크 리플을 계산함으로써 확인하였으며 반응 표면법과 (1+1) Evolution Strategy를 사용하여 형상 최적화를 수행하였다. Air-gap profile 및 Pole shoe를 최적으로 설계함으로써 초기모델에서의 토크 리플 $4.32[Nm]$ 는 $0.99[Nm]$ 로 대략 23%까지 저감되었으며, 평균 토크는 기본 모델과 비교하여 약 10% 증가하여 기존의 토크 리플 저감법이 가지고 있는 평균 토크 감소의 문제점도 해결하였다.

향후 스위칭 구간에서의 토크 리플을 더욱 저감할 수 있는 효과적인 설계 변수의 설정과 최적화에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성 사업의 연구결과로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] T. J. Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Oxford, U.K.: Magna/Clarendon, 1993.
- [2] 안전우, "스위치드 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, 2001.
- [3] N. K. Sheth, and K. R. Rajagopal, "Optimum pole arcs for a switched reluctance motor for higher torque with reduced ripple", IEEE Trans. on Magnetics, vol.39, No.5, pp.3214-3216, September 2003.
- [4] J. W. Lee, H. S. Kim, B. I. Kwon, and B. T. Kim, "New rotor shape design for minimum torque ripple of SRM using FEM", IEEE Trans. on Magnetics, vol.40, No.2, pp.754-757, March 2004.
- [5] J. Hur, G. H. Kang, J. Y. Lee, and J. P. Hong, "Design and optimization of high torque, low ripple switched reluctance motor with flux barrier for direct driving", 39-th IAS Annual Meeting, pp.401-408, 2004.
- [6] Y. Ohdachi, Y. Kawase, Y. Miura and Y. Hayashi, "Optimum design of switched reluctance motors using dynamic finite element analysis", IEEE Trans. on Magnetics, vol.41, No.2, pp.2033-2036, March 1997.
- [7] J. W. Ahn, S. G. Oh, J. W. Moon, Y. M. Hwang, "A Three-Phase Switched Reluctance Motor with Two-phase Excitation", IEEE Trans. on Industry Applications, vol.35, No.5, pp.1067-1075, September/October, 1999.
- [8] Shmuel Rippa, "An algorithm for selecting a good value for the parameter c in radial basis function interpolation", Advances in Computational Mathematics, pp.193-210, 1999.
- [9] D. Tsao, and J. P. Webb, "Construction of device performance models using adaptive interpolation and sensitivities", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 41, No.5, pp.1768-1771, May 2005.
- [10] R. L. Hardy, Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces, J. Geophys. Res. 76(1971) 1905-1915.
- [11] R. Franke, Scattered data interpolation: tests of some methods, Math. Comp. 38 (1982) 181-200.
- [12] R. E. Carlson and T. A. Foley, The parameter R^2 in multiquadric interpolation, Comput. Math. Appl. 21 (1991) 29-42.
- [13] 박성현, "현대실형계획법", 민영사, 2001.
- [14] K.Preis, C.Magele and O.Biro: "FEM and Evolution Strategies in the Optimal Design of Electromagnetic Devices", IEEE Trans. Magn., vol. 26, No.5, pp.2181-2183 (1990).
- [15] 고창섭, 김준오, 한송엽, 정현교, 이기식, "경계요소법을 이용한 보이스코일 모터의 형상 최적 설계", 대한전기학회 논문지, vol.44, No.3, pp. 274-278, March, 1995.

저 자 소 개



최 용 권 (崔容權)

2003년 2월 명지대학교 정보통신공학부 졸업. 2006년 8월 충북대학교 전기전자공학부 졸업(석사). 현재 LG 산전 근무

Tel : 043-274-2426

E-mail : ykchoi@chungbuk.ac.kr



윤 희 성 (尹熙盛)

1982년 1월 17일생. 2005년 충북대학교 전기전자공학부 졸업(학사). 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 043-274-2426

E-mail : hsyoon@chungbuk.ac.kr



고 창 섭 (高彰燮)

1986년 서울대학교 전기공학과 졸업 (학사). 1988년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1993~1994년 미국 Florida International University 전기및컴퓨터 공학과 박사 후 연구원. 1994~1996년 삼성전기(주) 종합연구소 선임 연구원. 2003년 2월 - 2004년 1월 미국 Texas A&M University, 전기및컴퓨터 공학과 객원 교수, 1996~현재 충북대학교 전기전자컴퓨터 공학부 교수.

Tel : 043-261-2426

Fax : 043-274-2426

E-mail : Kohcs@chungbuk.ac.kr