

# 퍼지 이론을 이용한 고속 회전용 스위치드 리럭턴스 모터의 형상 최적 설계

論 文

49B-10-4

## Optimal Shape Design of a High Speed Switched Reluctance Motor Using Fuzzy Set Theory

崔昌煥\* · 柳載善\*\* · 朴起煥\*\*\*  
(Changhwan Choi · Jaesun Yoo · Kyihwan Park)

**Abstract** - This paper presents a new design method for improving the torque performance of a switched reluctance motor (SRM) for high speed applications. The drawback of the conventional design method based on the overall static average torque maximization is that the torque control performance is degraded at high speed. On the other hand, the proposed method optimizes the torque profile by dividing it into several regions so that it is suitable for high speed operation. This multi-objective optimization problem is solved by using a fuzzy optimization algorithm which incorporates a finite element method. The torque performance of the motor for various speed ranges is investigated and the optimally designed motor shows a better performance at high speed.

**Key Words** : optimal design, switched reluctance motor, fuzzy optimization, finite element method

### 1. 서 론

스위치드 리럭턴스 모터(SRM)는 반도체 기술의 발달과 더불어 현재 세계적으로 활발히 연구되고 있는 모터 중의 하나이다. 구조적으로 간단하여 제작이 용이하고 가격이 저렴하다. 단위 체적당 토크와 효율이 크며 광범위한 속도-토크 특성을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 이러한 특성으로 인해 SRM은 특히 고속 회전용에 적합한 모터라고 할 수 있다. 고속 회전할 경우에는 역기전력의 영향이 커지고 전류의 상승/하강 시간의 확보가 어려워 충분한 토크 성능을 내기가 어렵게 되고 토크 리플도 커지게 된다. 그러므로 설계 측면과 제어 측면에서 토크 성능을 향상시키기 위한 연구가 필요하다.

설계 측면에서는 SRM의 극과 상의 수, 극각의 크기와 극의 높이 등과 생성된 토크와의 관계를 살펴 최적의 형상을 결정하게 된다. Lawrenson등[1]은 극과 상의 수와 극각의 허용 범위를 제로 토크가 없고 스위칭 주파수를 줄이는 등의 조건을 이용하여 제시하였다. Arumugam등[2]과 Koibuchi등[3]은 유한 요소법을 이용하여 극각과 극피치와 정적 평균 토크의 관계를 통해 최적의 값의 범위를 제시하였다.

제어 측면에서 살펴보면 SRM의 토크는 전류의 제곱에 비례하는 특성이 있기 때문에 저속에서는 전류의 크기를 조절하면 모든 회전자 위치에서 일정한 토크가 생성되도록 할

수 있다. 그러나 고속 회전할 경우에는 전류의 상승/하강 시간을 고려하여 스위치 온/오프 각도 제어하여야 한다. Richard 등[4]은 전류의 최대 값과 변화량을 줄일 수 있는 balanced commutator 알고리즘을 제안하였다. Kjaer 등[5]은 스위치 온 각을 조절하여 전력 소모를 줄일 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

본 연구에서는 고속에서의 SRM의 토크 성능을 높이기 위한 방법을 설계 측면에서 제시한다. SRM의 형상을 최적화 하기 위해 유한요소법과 퍼지 최적화 알고리즘을 적용하였다. 기존의 토크 평균값을 이용한 설계 기법의 문제점을 제시하고 새로운 최적 설계 방법을 제시한다. SRM의 설계에 최적화 알고리즘을 적용하기 위해서는 목적 함수, 부등식 제한함수, 등식 제한 함수와 설계 변수들을 정의해야 한다. 일반적으로 많이 사용되는 방법인 SRM의 정적 평균 토크를 이용한 방법은 SRM의 정적 특성만을 고려한 것이므로 고속으로 회전하는 SRM의 토크 성능을 보장하기는 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 평균 토크 대신 토크 형태(torque

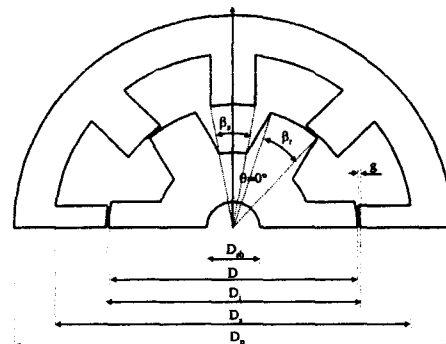


그림 1 8/6 SRM 모터의 구조  
Fig. 1 Schematics of a 8/6 SRM

\* 正 會 員 : 光州科學技術員 機電工學科 博士課程

\*\* 非 會 員 : 光州科學技術員 機電工學科 碩士課程

\*\*\* 正 會 員 : 光州科學技術員 機電工學科 教授

接受日字 : 2000年 10月 18日

最終完了 : 2000年 10月 23日

profile)를 목적 함수로 설정하고 SRM의 전기적 특성을 고려한 제한 함수를 포함하여 최적화 문제를 정의한다. 각 회전자 위치에서의 토크 형태를 모두 고려하는 것이 이상적이지만 그렇게 할 경우 최적화 문제가 복잡해지고 계산량이 많아지는 단점이 있기 때문에 토크 형태를 토크 특성을 결정시킬 수 있는 몇 개의 영역으로 나누어 그 영역에서의 평균 토크를 이용하여 목적 함수로 정의하도록 한다. 이러한 방법으로 최적화를 수행할 경우 SRM의 정적 토크 특성을 고려한 기존 방법에 비해 고속 회전시에도 토크 성능을 보장할 수 있다는 장점이 있다.

SRM은 토크/무게 성능을 높이기 위해서 자기 포화 영역 이상에서 동작시키는 것이 일반적이기 때문에 유한 요소 해석에서 자기 포화 현상을 고려하였다. 제어 시에 토크 성능 향상을 위해 여러 상의 동시 여자에 의한 제어 방법이 적용되고 있으나 여러 상의 여자까지 고려할 경우 설계 과정이 복잡해 질 수 있기 때문에 설계 단계에서는 한 상의 토크 형태만을 고려하고 성능 검증 단계에서는 여러 상의 여자까지 고려한 해석을 수행하였다. SRM의 전자기적 특성 해석을 통해 저속 회전과 고속 회전시의 SRM의 토크 성능의 변화를 살펴보고 제안한 최적 설계 기법의 유효성을 검증한다.

## 2. 토크 형태와 평균 토크

그림 1은 8/6 SRM의 형상을 결정하는 주요 설계 변수들을 보여 주고 있다. 각 치수의 명칭은 표 1에 나타나 있다. 회전자의 인접한 두 극의 중심이 고정자의 한 극과 일치할 때를 비정렬 위치(unaligned position)라고 정의하며 회전자의 한 극과 고정자의 한 극이 일치할 경우를 정렬 위치(aligned position)라고 정의한다.

그림 2는 Arumugam등[2]이 정적 평균 토크 값의 비교를 통해 제안한 최적의 극각의 범위에 해당하는 모터들의 토크와 인덕턴스 형태를 보여 주고 있다. 그림 2의 토크 형태는 전류가 최대로 가해진 상태에서 각 회전자 위치에서의 토크 특성을 나타낸다. 회전자가 고속 회전할 경우 전류의 상승/하강 시간이 중요한 영향을 미치게 된다. 비정렬 위치의 경우 정렬 위치 보다 인덕턴스의 크기가 작기 때문에 상대적으로 전류의 상승/하강 시간이 짧다. 그러므로 고속에서 토크 리플이 적으면서 토크 성능을 높이기 위해서는 음의 토크를 줄이기 위해 정렬 위치 부근에서의 토크의 크기를 줄이는 것과 전류의 상승/하강 시간을 줄이기 위해 전체적인 인덕턴스의 크기가 작은 것이 유리하다[6].

그림 2(a)는 정렬 위치에서 토크의 크기와 인덕턴스의 크기는 작으나 전체 평균 토크도 작으므로 저속에서의 토크 성능이 좋지 못하다. 그림 2(b)는 (a)에 비해 고정자의 극각이 커진 경우로 고정자 극각이 커지면 토크 형태가 비정렬 위치로 옮겨가는 경향이 있으므로 전체적인 토크 크기는 커졌으나 정렬 위치 부근의 토크도 커진 것을 볼 수 있다. 이 경우는 회전자의 극각이 고정자의 극각 보다 크기 때문에 제어용 모터로는 적합하지 못하다[1]. 그림 2(c)는 정렬 위치의 토크도 적으면서 전체 평균 토크의 크기도 큰 것을 알 수 있다. 그림 2(d)는 전체 평균 토크의 크기가 크기 때문에 저속에서의 토크 성능은 가장 우수하다. 그러나 정렬 위치에서의 토크와 인덕턴스의 값이 크기 때문에 고속 회전에서

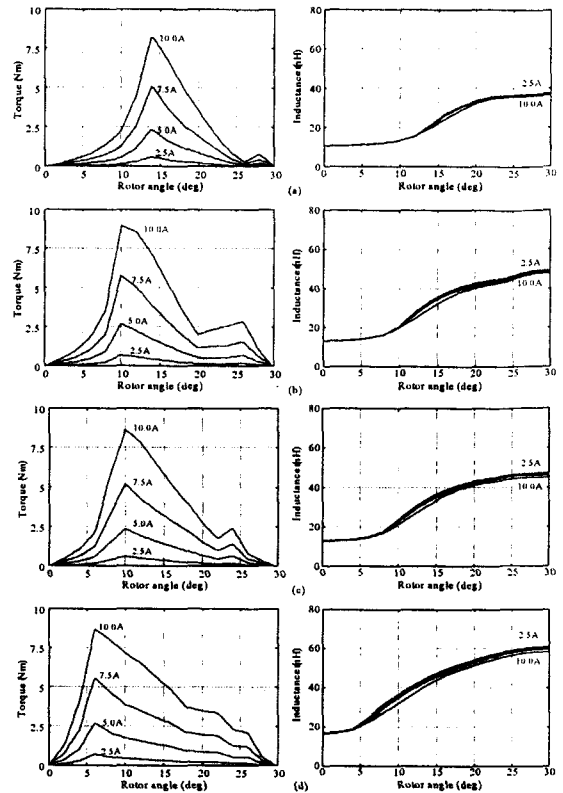


그림 2 평균 토크값을 최대로 하는 최적 토크 형태와 인덕턴스 형태 (a) Case I :  $\beta_s = 15.75^\circ, \beta_r = 18.0^\circ$  일 때 (b) Case II :  $\beta_s = 22.5^\circ, \beta_r = 18.0^\circ$  일 때 (c) Case III :  $\beta_s = 15.75^\circ, \beta_r = 27.0^\circ$  일 때 (d) Case IV :  $\beta_s = 22.5^\circ, \beta_r = 27.0^\circ$  일 때

Fig. 2 Torque and inductance profiles that maximizes average torque

전류 상승/하강 시간이 길어 음의 토크가 발생될 여지가 많기 때문에 속도가 높아질수록 토크 성능이 나쁘고 토크 리플이 크게 된다. 그러므로 단순한 정적 평균 토크의 비교만으로는 고속 회전용 모터 형상을 설계하는 것이 어렵다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 고속에서의 토크 특성까지 고려한 토크 형태 최적화 방법을 제안한다. 비정렬 위치부터  $15^\circ$ 까지의 영역(I),  $15^\circ$ 에서  $25^\circ$ 까지의 영역(II),  $25^\circ$ 에서 정렬 위치까지의 영역(III)로 그림 3과 같이 토크 형태를 구분하였다. 영역(I)의 경우 앞 상의 영역(III)과 접치는 구간이므로 앞 상의 토크 감소를 보충하기 위해서 토크 형태가 커져야 한다. 영역(II)의 경우 앞 상의 영역(I)와 접치는 구간이므로 앞 상의 토크 감소를 보충하기 위해서 토크 형태가 커져야 한다. 영역(III)의 경우 정렬 위치 부근이기 때문에 음의 토크의 영향을 줄이기 위해 이 영역에서는 평균 토크의 크기가 작은 것이 바람직하다. 이상과 같이 영역(I)과 영역(II)의 토크는 최대화하고 영역(III)의 평균 토크는 최소화하는 설계가 필요하다. 이상과 같은 설정은 모터의 회전 속도의 범위에 따라 달라 질 수 있다. 예를 들어 모터가 점점 더 고속화되면 비정렬 위치에서의 음의 토크의 영향도 커지기 때문에 영역(I)의 토크도 줄여야 한다.

### 3. 최적 설계 문제 정의

SRM의 설계에 최적화 알고리즘을 적용하기 위해서는 설계 변수, 목적 함수, 제한 함수들을 정의해야 한다. 설계 변수는 SRM의 토크 성능에 가장 큰 영향을 미치는 극각 ( $\beta_s, \beta_r$ )들과 코일 감은 영역과 관계된 ( $D_s$ )로 설정한다.

앞 절의 각 영역에서의 평균 토크를 목적 함수로 하여 최적화 문제를 정의하면 다음과 같이 다중 함수 최적화 문제로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{maximize } f_1(\beta_s, \beta_r, D_s) \\ &\text{maximize } f_2(\beta_s, \beta_r, D_s) \\ &\text{minimize } f_3(\beta_s, \beta_r, D_s) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서  $f_1(\beta_s, \beta_r, D_s), f_2(\beta_s, \beta_r, D_s), f_3(\beta_s, \beta_r, D_s)$ 는 각 영역(I), 영역(II), 영역(III)에서의 평균 토크를 나타낸다.

제한 함수는 Lawrenson등[1]이 제안한 제한 조건과 최적화 알고리즘이 설계 공간을 탐색할 때 구현 가능한 SRM의 형상만을 탐색하도록 하기 위한 기하학적 제한 조건이 있다.

$$g_0 \equiv D_s \sin \frac{\beta_r}{2} \leq D_r \sin \frac{\pi}{6} \quad (2)$$

$$g_1 \equiv \beta_s \leq \frac{2\pi}{N_s} \quad (3)$$

$$g_2 \equiv \beta_s \leq \beta_r \quad (4)$$

$$g_3 \equiv \beta_r \geq \frac{2\pi}{N_r N_s / 2} \quad (5)$$

$$g_4 \equiv \beta_s \geq \frac{2\pi}{N_r N_s / 2} \quad (6)$$

$$g_5 \equiv \beta_s + \beta_r \leq \frac{2\pi}{N_r} \quad (7)$$

주어진 코일의 감은 수에 대해 고정자의 공간에 조립될 수 있는지를 결정하는 제한 조건은 다음과 같다.

$$g_6 \equiv \frac{(D_s - D_i)}{2} \cdot \frac{D_i}{2d_c^2} \cdot \left( \sin \frac{\pi}{8} - \sin \frac{\beta_s}{2} \right) \geq N_{turn} \quad (8)$$

SRM의 속도-토크 성능은 토크 제어기의 성능에 따라 좌우되며 토크 제어기는 전류 제어 성능에 의해 결정된다. 그러나 설계 단계에서는 전류와 토크 사이의 관계를 모르기 때문에 정렬 위치에서의 쇄교 자속의 크기로부터 토크 제어기의 최대 시간 지연  $t_{max} = \psi_{max} / V_{dc}$ 을 추정할 수 있다[7]. 여기에서  $\psi_{max}, V_{dc}$ 는 각각 자속 쇄교의 최대값과 인가 전압을 나타낸다. 모터가 정격 속도까지 균일한 토크 성능을 내기 위해서는 각 상에서 충분한 토크가 생성되어야 하기 때문에 정격 속도에서 각 상의 스위칭 시간 간격보다  $t_{max}$ 가 충분히 작아야 한다. 모터가 한바퀴 회전할 때의 걸리는 시간을 상의 스위칭 횟수(stroke)로 나누면 스위칭 시간 간격을 구할 수 있다. 이 조건을 만족하기 위한 제한 조건은 다음과 같다.

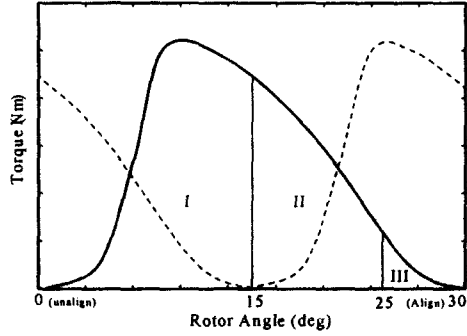


그림 3 토크 형태 최적화를 위한 평균 토크 영역 정의 (실선 : 현재 상의 토크, 점선 : 앞상과 뒤 상의 토크)

Fig 3 Definition of the torque region for optimizing the torque profile

$$g_7 \equiv t_{max} \leq \frac{1}{N_s N_r / 2} \cdot \frac{60}{rpm} \quad (9)$$

여기에서 rpm은 모터의 정격 속도이다. 결과적으로 SRM의 토크 형태 최적화 문제는 3개의 목적함수와 8개의 부등 조건을 갖는 다중 목적 최적화 문제로 표현된다.

### 4. 퍼지 최적화 기법

다중 목적 최적화 문제의 경우 단일 최적화 문제로 바꾼 후 푸는 것이 일반적인 해법이며 가중치법이나 제한법 등이 사용되어 진다. 이러한 방법의 경우 가중치나 제한값을 결정하기가 어렵다는 단점이 있다 그러므로 본 연구에서는 퍼지 최적화 기법을 적용해 보았다. 퍼지 최적화의 경우 단일 목적함수를 정의하는데 있어 설계자의 의도를 반영하기가 쉽다. 본 연구에서는 퍼지 최적화에서 많이 사용하고 있는 minimum 추론 함수를 이용하여 단일 함수를 정의한다.

$$\mu_D(x) = \min(\mu_G(x), \mu_C(x)) \quad (10)$$

여기에서  $x$ 는 설계 변수 벡터이며 2절에서 정의한 설계 변수를 나타내고 있으며  $x = [\beta_s, \beta_r, D_s]^T$ 로 정의된다.

$\mu_G(x): X \rightarrow [0, 1]$ 와  $\mu_C(x): X \rightarrow [0, 1]$ 는 각각 목적 함수와 제한 함수의 소속 함수를 나타내며 소속함수의 특성에 따라 그림 4와 같이 정의된다. 결과적으로 집합  $X$ 를 식(10)을 최대화하는 임의의 해집합이라고 하면 식(1)-(9)의 제한(constrained) 최적화 문제는 다음의 비제한(unconstrained) 퍼지 최적화 문제가 된다.

$$\max_{x \in X} \mu_D(x) = \max_{x \in X} \min(\mu_G(x), \mu_C(x)) \quad (11)$$

퍼지 최적화 문제에서는 식(11)과 같이 목적함수와 제한 함수가 동일한 수학적 형태로 표현이 되어지며 각각의 만족도가 최대가 되도록 최적화를 수행하는 것이다. 그러므로 제한 함수의 경우 허용할 수 있는 제한 함수 오차(Constraint violation)를 특정 숫자가 아닌 어떤 범위 내에서 만족도 함수를 정의하여 만족도의 높고 낮음을 비교하여 모든 제한 함수를 어느 정도 이상의 만족도를 만족하는 범

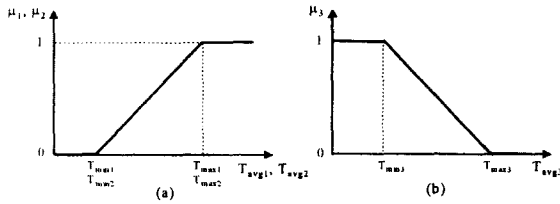


그림 4 목적 함수의 소속 함수 정의.  
Fig. 4 Membership functions of the cost functions

위 내에서 최적 해를 찾아가게 되며 마찬가지로 목적함수도 전체 단일 목적함수의 만족도가 최대가 되도록 최적 해를 찾는 것이다. 이와 같이 퍼지 기법을 최적화 문제 해법에 적용함으로써 설계자의 경험을 반영할 수 있는 수학적 인 기법을 제공하게 된다.

식(2)-(9)의 제한 조건까지 모두 퍼지 제한 조건으로 변환할 경우 각각의 소속함수를 정하는 데 있어서 변수가 많아지기 때문에 복잡해질 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 목적 함수만을 퍼지 목적 함수로 정의하고 제한 함수는 그대로 사용하도록 한다. 그러면 다음과 같이 제한 퍼지 최적화 문제로 표시할 수 있다.

$$\text{maximize } \min(\mu_1(x), \mu_2(x), \mu_3(x)) \quad (12)$$

$$G = [g_0, g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7]^T$$

여기에서  $\mu_1(x), \mu_2(x)$ 는 각각 영역(I)과 (II),  $\mu_3(x)$ 는 영역(III)의 토크의 만족도를 나타내는 소속 함수이며 그림 4와 같이 정의된다.  $G$ 는 제한 함수를 나타낸다. 그러면 최적화 알고리즘은 제한 조건 내의 설계 조건을 탐색하면서 식(10)의 단일 퍼지 목적 함수가 최대의 소속도, 즉 1에 가까운 수를 가지도록 설계 변수 값들을 결정하게 된다. 퍼지 목적 함수의 소속 함수의 모양을 결정하는 파라미터인  $T_{min}$ 과  $T_{max}$ 는 각 영역에서의 평균 토크를 목적 함수로 한 상태에서 단일 목적 최적화 문제를 풀어서 결정할 수 있다.

표 1 최적설계 결과  
Table 1 Optimization results

명칭	설계값
고정자의 바깥 지름 ( $D_o$ )	189.4 mm
고정자 요크의 안쪽 지름 ( $D_s$ )	147.0 mm
회전자의 바깥 지름 ( $D$ )	89.57 mm
회전자 요크의 바깥 지름 ( $D_r$ )	52.89 mm
축의 지름 ( $D_{sh}$ )	30.0 mm
스택 길이 ( $l$ )	89.92 mm
공극의 길이 ( $g$ )	0.4 mm
회전자 극각 ( $\beta_r$ )	27.44°
고정자 극각 ( $\beta_s$ )	17.30°
최대 입력 전압 ( $V_{max}$ )	180 V
최대 입력 전류 ( $I_{max}$ )	10.0 A
상당 코일의 감은 수 ( $N_D$ )	260 turn

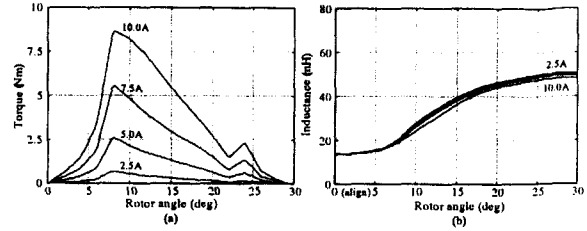


그림 5 최적 설계된 8/6 SRM의 (a) 토크 형상 (b) 인덕턴스 형상  
Fig. 5 (a) Torque profile and (b) inductance profile for the optimally designed SRM.

### 5. 최적 설계와 동특성 평가

최적 설계를 위한 유한 요소 해석 프로그램은 Flux2D를 사용하였고 최적화 알고리즘은 IDESIGN에 구현되어 있는 SQP(Sequential Quadratic Programming) 방법을 사용하였다.

표 1은 최적 설계된 SRM의 주요 치수 값을 보여 주고 있으며 그림 5는 토크와 인덕턴스의 형태를 보여 주고 있다. 최적 설계의 경우 영역(III)의 평균 토크의 크기가 줄어든 것을 볼 수 있고 정렬 위치에서의 인덕턴스의 크기와 인덕턴스의 변화량이 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 전류의 상승/하강 시간이 빠르고 역기전력의 크기가 작다는 것을 뜻하기 때문에 다른 네 가지 경우에 비해 고속 회전 시에 토크의 성능이 향상되었음을 짐작할 수 있다. 영역(I)과 (II)에서의 토크 형태는 대체로 비정렬 위치 부근으로 옮겨져 전체 평균 토크의 크기를 크게 하는 설계가 되었다. 최적 설계 결과는 그림 2에서 네 경우 중 최적의 형상인 (c)의 경우와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

이상의 결과를 증명하기 위해 모터가 저속 회전할 경우와 고속 회전할 경우 토크 성능이 어떻게 달라지는지를 살펴보고자 한다. 동특성 해석을 위해 각 상에서 생성되는 토크가 동일하다는 가정 하에 SRM의 한 상만을 고려하여 해석을 하도록 한다. 한 상만 고려할 경우 전기적 운동 방정식과 토크 방정식은 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$V = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (13)$$

$$T = \frac{1}{2} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} i^2 \quad (14)$$

여기에서  $L(\theta, i)$ 는 회전자 위치와 전류의 크기에 따른 인덕턴스의 변화를 나타내고 유한 요소 해석으로부터 구할 수 있다.

저속 회전의 경우에는 전류의 상승 시간은 그다지 큰 문제가 되지 않기 때문에 회전자의 각 위치에서의 정적 토크의 크기가 중요하게 된다. 그러나 고속 회전의 경우에는 역기전력과 전류의 상승/하강 시간이 중요하기 때문에 전류의 온-오프 각도가 토크 성능에 중요한 영향을 미치게 된다.  $\theta_{on}, \theta_{off}, \theta_c, \theta_u, \theta_a, \theta_e$ 를 스위치 온각, 오프각, 여자각, 비정렬 위치, 정렬 위치, 전류가 0인 위치라고 그림 6(c)와 같이 정의한다.

표 2 최적의  $\theta_{on}$ 과  $\theta_c$ , 영역 A에서의 평균 토크 ( $T_{avg\_A}$ ), 영역 B에서의 평균 토크 ( $T_{avg\_B}$ ), 영역 C에서의 평균 토크 ( $T_{avg\_C}$ ), 전체 평균 토크 ( $T_{avg}$ )

Table 2 Optimal  $\theta_{on}$  and  $\theta_c$ , and corresponding average torque  $T_{avg\_A}$ ,  $T_{avg\_B}$ ,  $T_{avg\_C}$  and  $T_{avg}$

(a) 0 (rpm)	최적 설계	Case I	Case II	Case III	Case IV
$\theta_{on}/\theta_c$ (deg)	0.0/30.0	0.0/30.0	0.0/30.0	0.0/30.0	<b>0.0/30.0</b>
$T_{avg}$ (Nm)	6.8835	4.9662	6.7763	6.5522	<b>8.1704</b>

(b) 2000rpm	최적 설계	Case I	Case II	Case III	Case IV
$\theta_{on}/\theta_c$	7.6/30.3	10.0/33.4	7.9/31.3	7.8/30.7	<b>9.6/36.6</b>
$T_{avg\_A}$	-0.1216	-0.1361	-0.094	-0.1092	<b>-0.3912</b>
$T_{avg\_B}$	2.4980	1.9765	2.5120	2.3989	<b>2.8213</b>
$T_{avg\_C}$	-0.1530	-0.099	-0.2554	-0.1525	<b>-0.2224</b>
$T_{avg}$	4.8714	3.8618	4.8454	4.6809	<b>5.2657</b>

(c) 4000rpm	최적 설계	Case I	Case II	Case III	Case IV
$\theta_{on}/\theta_c$	<b>16.9/34.9</b>	14.9/35.7	15.2/35.1	15.0/35.0	23.0/41.6
$T_{avg\_A}$	<b>-0.3811</b>	-0.1421	-0.2134	-0.2471	-0.7438
$T_{avg\_B}$	<b>1.6788</b>	1.4264	1.7025	1.6222	1.8883
$T_{avg\_C}$	<b>-0.0473</b>	-0.075	-0.1213	-0.0908	-0.1304
$T_{avg}$	<b>3.1124</b>	2.7376	3.2100	<b>3.0558</b>	<b>3.0953</b>

(d) 6000rpm	최적 설계	Case I	Case II	Case III	Case IV
$\theta_{on}/\theta_c$	<b>27.3/43.8</b>	17.9/37.7	25.4/42.4	24.8/39.9	37.4/52.9
$T_{avg\_A}$	<b>-0.4946</b>	-0.1181	-0.3761	-0.3957	-0.7557
$T_{avg\_B}$	<b>1.4279</b>	1.2071	1.4190	1.3142	1.5747
$T_{avg\_C}$	<b>-0.0779</b>	-0.1310	-0.1012	-0.033	-0.1223
$T_{avg}$	<b>2.3393</b>	2.2406	2.4359	2.2789	2.0845

그림 6(a)는 모터의 회전속도 4000 rpm에서  $\theta_{on}$  과  $\theta_c$  의 변화에 대한 평균 토크의 값을 그린 그림이다.  $\theta_{on}$ 이 너무 작을 경우 양의 토크 영역에서 전류가 충분히 상승하지 못해 평균 토크의 크기가 작아지며  $\theta_{on}$ 이 너무 클 경우 비정렬 위치 부근에서 음의 토크가 커져 평균 토크의 크기가 작아지게 된다.  $\theta_c$ 가 너무 작을 경우 전류가 일찍 감소되어 평균 토크의 크기가 작아지며  $\theta_c$ 가 너무 클 경우 정렬 위치 부근에서 음의 토크가 커져 평균 토크의 크기가 작아지게 된다. 그러므로 적절한  $\theta_{on}$  과  $\theta_c$ 의 값을 화살표(16.89°, 34.94°)와 같이 구할 수 있다. 그림 6(b)와 (c)는 최적 값에서의 토크 형태와 전류 파형을 보여 주고 있다.

그림 6(b)에서 영역 A에서의 평균 토크, 영역 B에서의 평균 토크, 영역 C에서의 평균 토크, 전체 평균 토크를 각각  $T_{avg\_A}$ ,  $T_{avg\_B}$ ,  $T_{avg\_C}$ ,  $T_{avg}$ 라고 정의한다. 여기에서  $T_{avg}$ 는 앞 상과 뒤 상의 평균토크를 합한 값이다. 표 2는 최적 설계된 경우와 그림 2의 Case I, II, III, IV의  $T_{avg\_A}$ ,  $T_{avg\_B}$ ,  $T_{avg\_C}$ ,  $T_{avg}$ 를 회전 속도 0, 2000, 4000, 6000 rpm에서 그림 6(a)와 같은 방법으로 구한 값을 도표로 나타낸 것이다. 그림 7은 표 2의 각 값을 그림으로 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 정적 평균 토크를 나타내며 그림 7(b)(c)(d)의 각 경우 별로 네 개의 막대그래프는 순서대로  $T_{avg\_A}$ ,  $T_{avg\_B}$ ,  $T_{avg\_C}$ ,  $T_{avg}$ 를 나타낸다. 저속 회전일 경우(0rpm, 2000rpm)

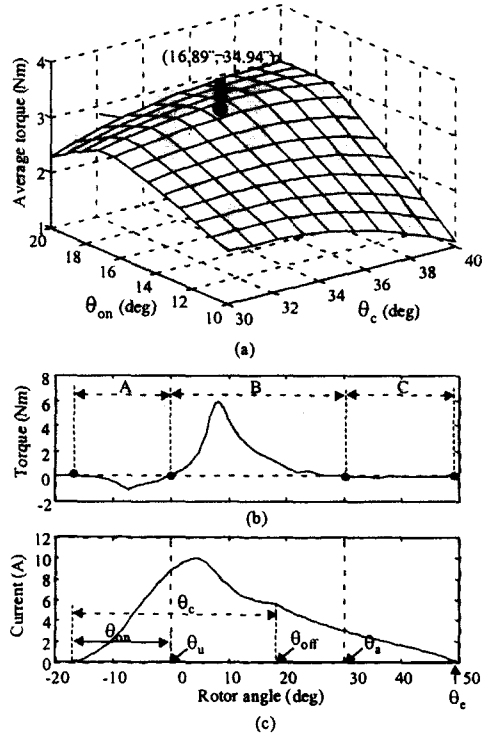


그림 6 모터의 회전속도 4000 rpm에서 (a)  $\theta_{on}$  과  $\theta_c$ 의 변화에 대한 평균 토크와 최적 값 (화살표), (b) 최적의  $\theta_{on}$ 과  $\theta_c$ 에서의 토크, (c) 전류

Fig. 6 (a) The average torque for the changes of  $\theta_{on}$  and  $\theta_c$ , (b) torque profile (c) current profile for the optimal  $\theta_{on}$  and  $\theta_c$

에는 Case IV의 경우가 토크 성능이 가장 좋은 것을 알 수 있다. 그러나 고속 회전일 경우(4000rpm, 6000rpm)에는 제어용으로 적합하지 않은 Case II를 제외하면 최적 설계된 모터가 가장 성능이 우수한 것을 알 수 있다. 음의 토크가 클 경우 토크 리플과 소음 발생이 심하게 되는데 Case IV의 경우는 모든 회전 속도에서 음의 토크가 가장 크게 나타나고 Case I의 경우는 음의 토크가 가장 적게 생성되고 있다. Case I의 경우 정적 평균 토크는 가장 작지만 6000 rpm에서는 평균 토크가 Case IV보다 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 고속화 될수록 음의 토크의 영향이 커짐을 의미한다.

### 6. 결론

유한 요소해석법과 퍼지 최적화 알고리즘을 적용하여 고속 회전용 SRM의 토크 성능을 높이기 위한 형상 최적 설계 방법을 제시하였다. 회전자의 각도에 따른 토크 형태를 영역 별로 구분하여 각 영역에서 요구되는 토크 성능을 목적 함수로 하여 최적화 문제를 정의하였다. 단순한 평균 토크 특성이 아니라 토크의 형태와 SRM의 전자기적 특성까지 고려한 설계 기법을 제안하였다. 저속 및 고속 회전시의 생성된 평균 토크의 비교를 통해서 제안한 설계 기법이 넓은 토크-속도 특성을 요하는 고속 회전용 SRM 설계에 적합한 방법인 것을 증명하였다.

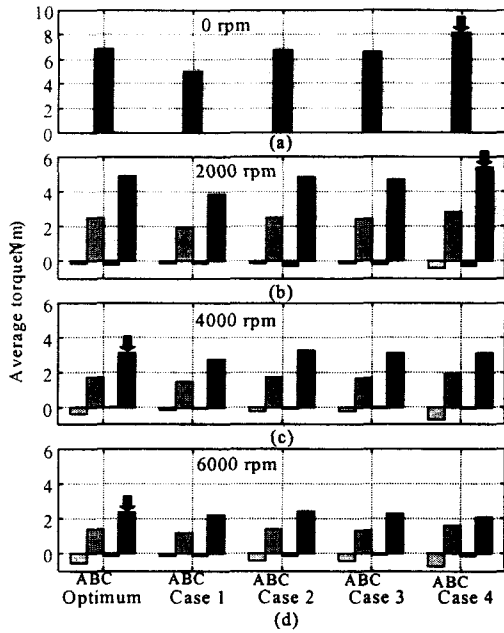


그림 7 최적 설계된 경우와 Case I, II, III, IV의  $T_{avg\_A}$ ,  $T_{avg\_B}$ ,  $T_{avg\_C}$ ,  $T_{avg}$  (a) 저속 회전일 때 (b) 2000 rpm일 때 (c) 4000 rpm일 때 (d) 6000 rpm일 때. (화살표 = 최대값)  
**Fig. 7**  $T_{avg\_A}$ ,  $T_{avg\_B}$ ,  $T_{avg\_C}$ ,  $T_{avg}$  of Case I, II, III, IV (a) at low speed (b) at 2000 rpm (c) at 4000 rpm (d) at 6000 rpm

**감사의 글**

본 연구는 국방과학연구소의 지원을 받아 수행하였습니다 (ADD-98-2-1).

**참고 문헌**

[1] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, P. T. Blenkinsop and N. N. Fulton, "Variable speed switched reluctance motors," IEE Proc. Vol. 127, Pt. B, No. 4, pp. 253-265, 1980

[2] R. Arumugam, J. F. Lindsay, and R. Krishnan, "Sensitivity of pole arc/pole pitch ration on switched reluctance motor performance," IEEE IAS Annual meeting, pp. 50-54, 1988

[3] K. Koibuchi, T. Ohno and K. Sawa, "A basic study for optimal ddesign of switched reluctance motor by finite element method," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33, No. 2, pp. 2077-2080, 1997

[4] Richard S. Wallace and David G. Taylor, "A balanced commutator for switched reluctance motors to reduce torque ripple," IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 7, No. 4, pp. 617-626, 1992

[5] P. C. Kajer, P. Nielsen, L. Andersen, F. Blaabjerg, "A

new energy optimizing control strategy for switched reluctance motors," IEEE Trans. in Industry Applications, Vol. 31, No. 5, pp. 1088-1095, 1995

[6] M. Moallem, C. M. Ong, and L. E. Unnewehr, "Effect of Rotor Profiles on he Torque of a Switched Reluctance Motor," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, pp. 364-369, 1992.

[7] P. C. Kjaer, J. J. Gribble, T. J. E. Miller, "Dynamic testing of switched reluctance motor for high-bandwidth actuator applications," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 2 No. 2, pp. 123-134, 1997.

**저 자 소 개**



**최 창 환 (崔昌煥)**

1973년 2월 10일생. 1995년 한양대 정밀기계공학과 졸업. 1997년 광주과학기술원 기계공학과(석사). 1997년-현재 동대학원 박사과정. 관심 분야는 전기 기계 시스템 제어, 스위치드 리럭턴스 모터의 설계 및 제어, 정밀 센서 및 액추에이터

Tel : +82-62-970-2408, Fax : +82-62-970-2384  
 E-mail : cch@kjist.ac.kr



**유 재 선 (柳載善)**

1975년 1월 20일생. 1997년 한양대 전기공학과 졸업. 2000년 광주과학기술원 기계공학과(석사). 2000년-현재 (주) 덕인 연구소 연구원 관심 분야는 전기 기기 설계 및 제어

Tel : +82-42-823-8501,  
 Fax : +82-42-823-8504  
 E-mail : yoojs@dukin.co.kr



**박 기 환 (朴起煥)**

1961년 1월 14일생. 1985년 서울대 기계공학과 졸업. 1987년 동대학원(석사). 1993년 University of Texas at Austin (Ph.D.-Mechanical Engineering). 1995년-현재 광주과학기술원 기계공학과 교수. 관심 분야는 자기력을 이용한 운동 및 진동 제어, 전력 전자, 광메카트로닉스, 차량 제어용 센서 및 액추에이터, 정밀 의료용 액추에이터

Tel : +82-62-970-2391, Fax : +82-62-970-2384  
 E-mail : khpark@kjist.ac.kr