

스위치드 릴럭턴스 전동기의 다중목적함수의 최적화 방법 연구

최재학¹, 신현훈², 임진재³, 이주¹, 이종호², 백수현³

¹한양대학교 전기공학과, ²한밭대학교 전기공학과, ³동국대학교 전기공학과

The Multi-objective Optimization of Switched Reluctance Motor

Jae-Hak Choi¹, Hyun-Hun Shin², Jin-Jae Lim³, Ju Lee¹, Jung-Ho Lee², Soo-Hyun Baek³

¹Electrical Eng. at Hanyang Univ., ²Electrical Eng. at Hanbat National Univ., ³Electrical Eng. at Dongguk Univ.

Abstract - In this paper, a multi-object optimization based on a progressive quadratic response surface method (PQRSM) and a time stepping finite element method (FEM) is proposed. The new PQRSM and FEM are able to decide optimal geometric and electric variables of the switched reluctance motor (SRM) with two objective functions: torque ripple minimization and average torque maximization. The result of the optimum design for SRM show an improved performance of motor and a relationship between torque ripple and average torque.

1. 서 론

SRM은 간단한 돌극 구조로 높은 신뢰성 그리고 저렴한 가격과 같은 많은 장점을 가지고 있기 때문에 많은 산업 분야에서의 SRM의 사용이 지난 10여년 동안 빠르게 증가하였다[1]. 그러나 SRM은 고유의 구조 때문에 발생하는 몇 가지 문제들을 가지고 있다. 가장 큰 문제들 중의 하나는 부적당한 소리의 잠음과 높은 진동을 일으키는 토크 리플이다. 이 토크 리플은 근본적으로 고정자 극호와 회전자 극호에 관계된 기하학적인 변수들에 의존한다. SRM의 토크 리플을 줄이기 위한 기하학적 변수를 결정하는 최적화 설계 방법들은 몇몇 논문들에서 보고되었다[1][2]. 그러나, 이러한 제안들은 토크 리플을 최소화하기 위해 하나의 목적함수에서 기하학적인 설계 최적화를 달성할 때 전기적인 변수들의 영향을 고려하지 않았다. SRM의 적용분야는 매우 다양하므로 실용적인 사용에서 요구되는 토크 성능과 토크 리플의 허용범위는 다르게 된다. 본 논문에서는 토크 리플 최소화와 평균 토크 최대화를 둘 다 만족하는 최적의 설계 변수들을 결정할 수 있는 다중 목적 최적화를 보였다. 최적 설계는 시간 차분 유한요소법(FEM)[3]과 점진적 이차반응표면방법(PQRSM)[4]에 기초를 두고 수행되었다. 근래에 들어와서 반응표면을 이용하여 근사모델을 생성하여 최적설계를 수행하는 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 이는 설계 문제가 다양화됨에 따라서 해석데이터를 직접 이용해야 되는 경우, 해석 모델링의 특성상 노이즈(noise) 또는 비평활성(nonsmoothness)이 존재하는 경우가 빈번히 발생되기 때문이다. 특히 해석 데이터를 직접 이용해야 되는 경우 노이즈 및 비평활성이 존재하는 경우에는 기존의 도함수에 기반한 최적화 방법으로는 최적설계를 수행할 수 없게 된다. 이 연구에서 이러한 어려움을 극복하기 위해 최적화 알고리즘으로 써 PQRSM을 사용하였다. 이 방법은 적당한 설계 공간에서 이차 함수로 목적함수와 제약함수를 근사하고 순차적으로 신뢰 영역 모델 관리법의 상황에서 근사적으로 최적화 문제들을 최적화한다. 이 최적화의 가능성 연구를 행하기 위해 다중 목적함수에서 최적 설계 변수들과 SRM의 성능은 조사되었다.

2. 스위치드 릴럭턴스 전동기

2.1 연구 모델

그림 1은 6/4 SRM의 단면과 구동 회로를 보여준다. β_s 와 β_r 은 각각 고정자 극호와 회전자 극호를 나타낸다. 이 모터의 드라이브는 비대칭 브리지 컨버터로 구성되었다. SRM의 구동을 위해 각상은 순차적으로 동작된다.

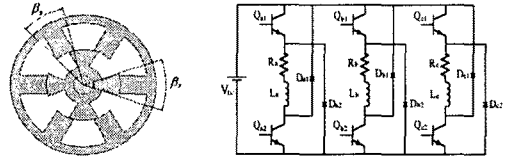


그림 1. 스위치드 릴럭턴스 전동기의 단면과 구동회로

2.2 기하학적인 설계변수와 전기적인 설계변수

순시 전동기 토크는 회전자의 위치 함수인 인덕턴스의 도함수에 의해 계산된다.

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

식 (1)에서 전기적인 시정수 때문에 인덕턴스의 도함수가 일정하더라도 일정한 토크는 얻을 수 없다. 그러므로, 토크리플과 평균 토크를 향상시키기 위해 인덕턴스의 변화에 따른 턴온과 턴오프는 고려되어야 한다. 본 논문에서는 회전자 치가 고정자 치와 비정렬 위치에 있을 때를 0°로 설정하였으며, 회전자 치와 고정자 치가 정렬 위치에 있을 때를 45°로 설정하였다. 그림 2는 기하학적인 파라미터인 β_s 와 β_r 이 조합에 따라, 토크 발생 원리를 설명하기 위해 도식화한 그림이다. 최소의 토크 리플과 최대 평균 토크에 대해 고정자와 회전자의 극호는 기본적으로 30°이상이어야 만 한다. 만약 회전자와 고정자의 극호가 30°보다 작다면 큰 토크 리플이 주기적으로 발생할 것이다. 상전류를 이상적으로 흐르게 하여 토크 리플을 줄이는 것 또한 불가능하다.

그림 2는 β_s 이 β_r 보다 클 경우만을 고려하여, $\beta_s = 30^\circ$ 이고 $\beta_r > 30^\circ$ 인 경우 인덕턴스 프로파일 및 토크 리플을 줄이기 위한 스위칭 조건을 명시하고 있다. 최소 토크 리플을 위해서는 기본적으로 고정자와 회전자 극호가 30°이상이어야 한다. 그림 2에서 보여진 것처럼 평균 토크가 증가하는 동안 토크 리플은 이상적으로 0이 될 수 있다. 결과적으로 전기적이고 기하학적인 변수들 중에 회전자와 고정자의 극호, 턴온 각 그리고 턴오프 각은 최적화를 위한 설계 변수들로서 선택되었다.

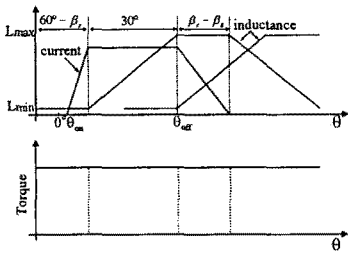


그림 2. $\beta_s=80^\circ$, $\beta_r>30^\circ$ 인 경우, 토오크 발생 원리 설명

3. 최적설계 정식화 및 PQSRM

그림 3은 자동화된 최적화 설계 과정을 보여준다. 그림 3에서 보여진 것처럼 $\beta_s, \beta_r, \theta_{on}, \theta_{off}$ 최적의 결과를 얻기 위한 설계 변수들로 채택되었다. 목적함수를 계산하기 β_s 와 β_r 의 형상변화를 위해 자동요소분할을 하였으며, 구동 회로를 고려한 2차원 시간 차분 유한요소법을 이용하였다. 다중 목적 함수, 제약조건들과 설계 변수들은 (2)에 표현하였다.

다중 목적 함수: 평균 토크를 최대화하고 토크 리플을 최소화하라

$$T_{\text{minimize}} = -w_1 \left(\frac{T_a}{T_a} \right) + w_2 \left(\frac{T_r}{T_r} \right)$$

제약 조건: 최대 상전류

$$I_{\text{max}} \leq 6[A]$$

설계 변수들:

$$\begin{aligned} \beta_s &= 30^\circ, \quad 30^\circ \leq \beta_r < 60^\circ, \\ -15^\circ \leq \theta_{on} \leq 15^\circ, \quad 30^\circ \leq \theta_{off} < 45^\circ \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, w_1 와 w_2 는 가중치이고 (T_a/T_a) 는 일정비율의 평균 토크이며 (T_r/T_r) 는 일정비율의 토크 리플이다.

PQSRM은 타당한 설계 공간 내에서 2차 함수들로 목적 함수와 제약 함수를 근사하고 순차적으로 신뢰 영역 모델 관리법의 상황에서 유사한 최적화 문제들을 최적화한다. 신뢰 영역 모델 관리법들은 근사함수가 오차에 대한 허용 오차 내에서 실험수와 일치하는 정보를 산출하는 신뢰 영역 내에서 설계 방법들을 적절하게 제한한다. 왜냐하면 PQSRM은 근사함수들을 만들기 위해 목적과 제약의 함수 정보만을 이용하고 다른 종래의 반응 표면법들과 같은 기율기 정보를 사용하지 않았기 때문이다. 이것은 기율기 정보를 얻을 수 없는 문제들에 대해서 유용한 방법이다. PQSRM은 종래의 반응 표면 방법들과 비교해서 다음과 같은 두 가지 장점들을 가지고 있다.

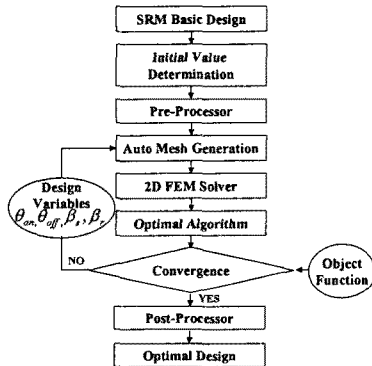


그림 3. 최적설계 자동화과정

첫번째, PQSRM은 유사한 방법에 기초한 아주 능률적인 함수이다. 이 방법은 2차 함수를 구성하기 위해 단지 $2n+1$ (n 은 설계 변수들의 수)의 샘플링 점들만을 요구한다. 반면에 종래의 반응 표면 방법들은 2차 반응 표면 함수를 구성하기 위해 적어도 $(n+1)(n+2)/2$ 의 샘플링 점들이 필요하다. 두번째, PQSRM은 유일하게 회귀 계수를 결정하지만 종래의 반응 표면 방법들은 회귀 계수를 결정하기 위해 최소 제곱근법을 사용한다. 그러므로 PQSRM은 명백히 근사함수를 구성하는 추가적인 CPU 시간이 필요 없다.

그림 4는 PQSRM의 알고리즘 흐름도이다. PQSRM의 계산 절차는 아래와 같다. 단계 0: 초기치 설계와 설계 공간을 선정하라. 초기치 설계 공간은 초기치 설계를 포함하는 전체 설계 공간의 50~100%로 가정한다. 단계 1: 설계 공간에서 $2n+1$ 의 샘플링 점들을 선정하라. 정해진 샘플링 점들은 설계 변수 축을 따라 새롭게 선택된 $2n$ 의 설계 점들과 초기치 설계 점으로 구성된다. 단계 2: 목적함수와 제약 함수를 2차 다항식 함수로 근사하라. 단계 3: 근사 목적함수와 근사 제약 함수를 이용하여 근사 최적화를 구하라. 단계 4: 실제 해석에 의한 근사 최적화에서의 실제 목적함수와 제약함수를 계산하라. 단계 5: 실제 목적 함수값과 제약 함수 값을 이용한 근사 최적화에서 수렴을 확인하라. 만약 근사 최적화 문제가 수렴한다면 최적화를 끝내라. 그렇지 않으면 신뢰 영역 관념에 의한 설계 공간을 조정하라. 단계 6: 새로운 설계 공간에서의 $2n+1$ 의 설계점들을 선택하라. 정해진 샘플링 점들은 하나의 전에 계산된 점과 새롭게 선택된 $2n$ 의 설계 점들로 구성된다. 단계 2로 간다.

4. 유한요소 정식화

자기벡터 포텐셜과 전류밀도가 Z축 성분만 존재한다면 SRM의 지배방정식은 자기벡터 포텐셜로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) \right] + J_z = 0 \quad (2)$$

여기서, μ 는 투자율, A는 자기벡터 포텐셜, J_z 는 입력 전류밀도이다. 전압원 해석을 위한 전압방정식은 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$V = R_m I + E_m \quad (3)$$

여기서, V는 전압, R_m 은 상 저항, E_m 은 권선에 유기된 역기전력이다. 식 (2)에 Galerkin 방법을 적용한 후, 전압 방정식 (3)을 결합하고 시간 차분법을 이용하면 식 (4)와 같은 계 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S] & [Q] \\ \frac{1}{\Delta t}[F] & [R_m] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (A)^{t+\Delta t} \\ (I)^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ \frac{1}{\Delta t}[F] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (A)^t \\ (I)^t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (V)^{t+\Delta t} \end{bmatrix} \quad (4)$$

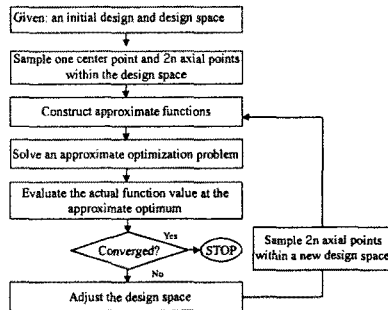


그림 4. 순차적 이차 반응표면법

5. 최적설계 결과 및 검토

표 1은 초기모델에서 높은 토크 리플과 낮은 평균 토크가 발생하는 것을 보여준다. 표 2는 무게 w_1 와 w_2 의 변화에 따른 두 목적 함수들에서 최적화 모델의 개선된 토크 특성을 보여준다. 표 2에서 보여진 것처럼 무게 w_1 이 1.0이고 무게 w_2 가 0.0이면 최적화 모델의 평균 토크는 초기 모델에 비해 2배 증가한다. 무게 w_1 이 0.0이고 w_2 가 1.0이면 토크 리플은 초기 모델에 비해 15배 감소한다.

그림 5는 초기 모델의 인덕턴스와 전류 특성을 보여준다. 상전류가 하강 인덕턴스 구간에서 0이 되기 때문에 초기 모델에서 부토오크가 발생한다. 그림 6은 최적 모델의 인덕턴스와 전류 특성을 보여준다. 최적화 모델에서 상전류는 인덕턴스 감소 전에서 0이 되기 때문에 부토오크는 발생하지 않는다. 그림 7은 초기모델과 최적화 모델의 에너지 변환 루프를 보여준다. 평균 토크에 대한 계산은 에너지 변환 루프에서 면적과 함께 조명될 수 있다. 최적 설계의 평균 토크는 초기 모델의 평균 토크보다 모든 점에서 훨씬 더 높다. 그림 8은 초기 모델과 최적화 모델의 전체 토크의 특성 비교를 보여준다. 표 1에서 보여진 것처럼 초기 모델의 토크 리플은 약 95.4%정도로 매우 크다. 그림 8은 또한 토크 리플을 최소로 하기 위해 최적화 모델의 토크 리플을 보여준다. 표 3에서 보여진 것처럼 w_1 이 0.0이고 w_2 가 1.0일 때 최적화 모델의 토크 리플은 과감하게 6.2%까지 향상된다. 토크 리플과 평균 토크는 제약 조건을 만족하고 토크 리플과 평균 토크 사이에 상반 관계가 있을 알 수 있다.

표 1. 초기 설계변수와 목적함수

평균토크(T_a)	1.9(kgcm)	토크리플(T_r)	95.4(%)
고정자 극호(β_s)	30°	턴온 각(θ_{on})	10.8°
회전자 극호(β_r)	30°	턴오프 각(θ_{off})	32.9°
한상 최대전류(I_{max})	5.9(A)		

표 2. 최적 설계변수와 목적함수의 결과

w_1	w_2	β_s	β_r	θ_{on}	θ_{off}	I_{max} (A)	T_a (kgcm)	T_r (%)
1.0	0.0	30°	48.8°	-4.9°	35.6°	5.99	3.94	51.6
0.9	0.1	30°	50.3°	-0.5°	36.3°	4.60	2.84	6.93
0.7	0.3	30°	50.6°	-0.7°	36.4°	4.60	2.82	6.31
0.5	0.5	30°	50.6°	-0.5°	36.4°	4.61	2.81	6.24
0.3	0.7	30°	50.7°	-0.7°	36.1°	4.61	2.80	6.29
0.1	0.9	30°	50.6°	-0.5°	35.8°	4.50	2.80	6.25
0.0	1.0	30°	50.6°	-0.5°	36.4°	4.61	2.79	6.19

6. 결 론

이 논문은 SRM 적용에 따라 특정 지어진 평균 토크를 최대화하고 토크 리플을 최소화하기 위한 최적화 설계의 결과를 보였다. 본 연구에서 시간 차분 유한요소법은 구동 회로와 스위칭 상태를 고려하는데 효과적으로 이용되었다. SRM의 연구법에 따라 최적화 설계 변수들과 성능은 상세하게 조사되었다. 평균 토크와 토크 리플 사이의 상반관계 특성 또한 조사되었으며, 논문에서 제안된 최적 설계 절차는 다양한 전기 기계들에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 전력산업연구개발사업(기초전력)에 의한 지원으로 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] Y. Ohdachi and Y. Kawase, "Optimum Design of Switched Reluctance Motors using Dynamic Finite Element Analysis," IEEE Trans. on Magn., vol. 33, pp. 2033-2036, March 1997.
- [2] Funda Sahin, H. Bülent Ertan, and Kemal Leblebicioğlu, "Optimum Geometry for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motors," IEEE Trans. on Energy conversion, vol. 15, no. 1, pp. 30-39, March 2000.
- [3] Y. H. Kim, J. -H. Choi, S. I. Jung, Y. D. Chun, J. Lee, M. S. Chu, K. J. Hong, and D. -H. Choi, "Optimal design of switched reluctance motor using two-dimensional finite element method," Journal of Applied Physics, vol. 91, no. 10, pp. 6967, May 2002.
- [4] K. -J. Hong, M. -S. Kim, and D. -H. Choi, "Efficient Approximation Method for Constructing Quadratic Response Surface Model," KSME International Journal, vol. 15, no. 7, pp. 876, 2001.

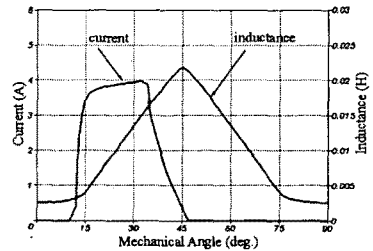


그림 5. 초기 모델의 한상 전류와 인덕턴스

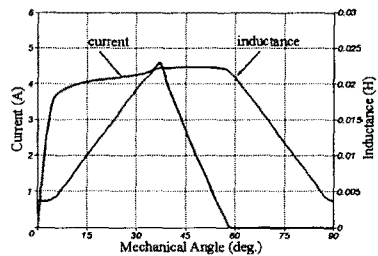


그림 6. 최적 모델의 한상 전류와 인덕턴스

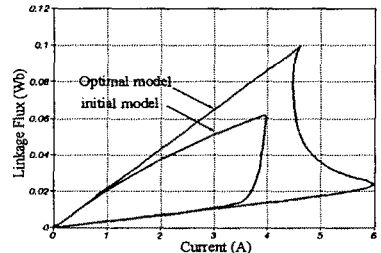


그림 7. 평균 토크: 에너지변환루프

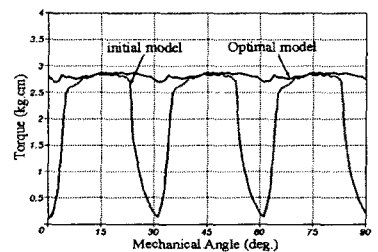


그림 8. 토크 리플: 순시 토크 특성