

스위치드 릴럭턴스 전동기의 토오크 리플 저감을 위한 기하학적인 파라미터와 전기적인 파라미터의 최적화

정성인\* 최재학\* 김윤현\* 김 술\* 이 주\* 주민식\*\* 최동훈\*\*  
 \*한양대학교 전기공학과 \*\*한양대학교 기계공학부

Optimum Geometric and Electrical Parameter for minimization Torque Ripple of Switched Reluctance Motor

S.I.JUNG\* J.H.CHOI\* Y.H.KIM\* S.KIM\* J.LEE\* M.S.JU\*\* D.H.CHOI\*\*

\*Dept. of Electrical Eng., Hanyang University \*\*Dept. of Mechanical Eng., Hanyang University

**Abstract** - In this paper, 6/4 Switched Reluctance Motor(SRM) which has simple structure and little switching element is selected basic analysis model. In order to reduce torque ripple causing noise and vibration, we execute optimization of geometric parameters (stator and rotor pole arc) and electrical parameters (turn-on angle and turn-off angle) by means of combining Fletcher-Reeves's Conjugate Directions and Finite Element Method (FEM) considering driving circuits. When considering the switching condition according to inductance profile, torque characteristics is influenced by geometric and electrical parameters importantly. The pole arc and switching angle of the optimum can also obtain the low torque ripple without high currents.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor)는 구조가 간단하고 견고하며, 높은 효율과 낮은 제작비용의 장점으로 인해 최근에 많은 관심의 대상이 되고 있다. SRM은 고정자와 회전자가 이중 돌극으로 구성된 구조로써 고정자에 여자에너지를 인가할 때 자기적 구조에 의존하여 발생하는 릴럭턴스 토오크로서, 여자에너지를 인가한 상의 릴럭턴스가 최소화되려는 특성에 기인한다. 그러나, 토오크 발생이 회전자계에 의한 연속적인 방식이 아니라 릴럭턴스 토오크를 이용하므로 높은 토오크 맥동이 발생하고 소음과 진동이 심하다는 단점이 있다. 따라서 SRM을 산업분야에 적용하기 위해서는 저 토오크 리플이 요구되며 이를 위한 전동기 설계와 구동 방법에 대한 연구가 필연 시 되고 있다.

스위치드 릴럭턴스 전동기의 설계 원리는 Byrne와 Lawrenson등에 의해 기본 틀이 마련되었고, Miller 등에 의해 정리되었으며, 현재에도 다양한 설계와 구동 방법에 대한 연구가 여러 문헌을 통해 보고되고 있다[1][2]. 또한 최근에는 토오크 리플을 줄이기 위해 신경망 이론(Neural Network Algorithm)에 의한 최적의 기하학적 형상을 찾는 방법이 소개되기도 하였다[3]. 이들은 주로 기하학적 파라미터인 고정자 극호( $\beta_s$ )와 회전자 극호( $\beta_r$ )를, 토오크 리플을 줄이기 위한 설계 변수로서 정의한 설계 방법을 제안하였다. 그러나 기존 방법들은 토오크 리플에 대하여 전기적 파라미터인 턴온 각( $\theta_{on}$ )과 턴오프 각( $\theta_{off}$ )에 의한 영향을 고려한 기하학적인 최적 설계방법을 제시하지 못하였다[4].

따라서, 본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성을 높이기 위하여 구동회로를 고려한 유한요소법과 최적화 알고리즘을 결합하여 토오크 리플 최소화를 목적으로 하는 최적 설계 방법을 연구한다. 이러한 목적을 만족시키는 설계 변수로 고정자 극호( $\beta_s$ )와 회전자 극호( $\beta_r$ )의 최적의 조합뿐만 아니라 턴온 각( $\theta_{on}$ )과 턴오프 각( $\theta_{off}$ )을 함께 제시한다. 즉, 토오크 리플을 최소화하기

위한 최적의 기하학적 파라미터  $\beta_s$ 와  $\beta_r$ 을 설계하는 동안  $\theta_{on}$ 과  $\theta_{off}$ 는 고정된 값이 아닌 각각의  $\beta_s$ 와  $\beta_r$ 에 대해 최적 설계 변수로 주어진다. 본 논문에서의 설계 목적인 저 토오크 리플의 특성 평가는 비선형과 과도 특성을 고려한 유한요소 해석에 의해 검토한다.

2. 본 론

2.1 최적설계 모델 제안

SRM은 릴럭턴스가 적어지는 방향 또는 인덕턴스가 커지는 방향으로 고정자의 권선에 전류가 흘러서 생기는 자속에 회전자가 일치하려는 데서 토오크가 발생한다. 따라서, 발생 토오크는 전류의 제곱에 비례하고, 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며 여기서  $\theta$ 는 회전자의 위치이고,  $i$ 는 상 전류를 나타낸다.

그림 1은 최적설계를 위한 초기 설계 모델의 단면이고, 표 1은 주요사양을 나타내고 있다.

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

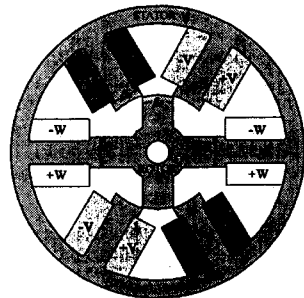


그림 1. 초기 설계 모델의 단면  
 Fig. 1. Cross section of the initial analysis model

표 1. 초기 설계 모델의 주요사양  
 Table I. Specifications of the initial design model

항 목	값	단 위	항 목	값	단 위
정격 출력	22	W	회전자 지름	40	mm
정격 전압	12	V	고정자 요크 두께	6	mm
동작 속도	2000	rpm	회전자 요크 두께	6	mm
정격 전류	4	A	Shaft 지름	8	mm
상 수	3	Phase	고정자 지름	100	mm
고정자 극수	6	Poles	공극 길이	0.3	mm
회전자 극수	4	Poles	적층폭	40	mm
코어 재질	S18		접착율	12	%

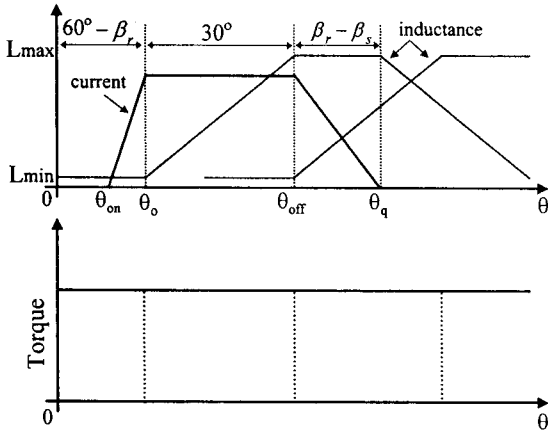


그림 2.  $\beta_s=30, \beta_r>30^\circ$  인 경우 토오크 발생원리  
 Fig. 2. Torque generation principles in case of  $\beta_s=30, \beta_r>30^\circ$

SRM은 인덕턴스의 기울기에 따라서 토오크의 부호가 달라지므로 회전방향에 대하여 역방향의 토오크인 부토오크가 발생하는 회전자의 위치각도가 존재한다. 그러므로 SRM은 부토오크의 억제를 위해서는 반드시 회전자의 위치각에 따라 턴온과 턴오프(전기적인 파라미터)를 해야한다.

또한, 설계시 코어가 포화되지 않고 많은 자속량이 회전자 코어를 통해 흐르도록 하여 최대 인덕턴스 값을 크게 하고, 슬롯의 점적율을 높이기 위해서는  $\beta_r$ 이  $\beta_s$ (기하학적인 파라미터)보다 크게 설계하는 것이 유리하다. 그림 2는  $\beta_r$ 이  $\beta_s$ 보다 클 경우만을 고려하여,  $\beta_s=30, \beta_r>30^\circ$ 인 경우 인덕턴스 프로파일 및 토오크 리플을 줄이기 위한 스위칭 조건을 명시하고 있다. 최소 토오크 리플을 위해서는 기본적으로 고정자와 회전자 극호가  $30^\circ$  이상이 되어야 한다( $\beta_s$ 와  $\beta_r \geq 30^\circ$ ). 만약  $\beta_s$ 와  $\beta_r$ 이  $30^\circ$ 보다 작을 경우, 시정수를 무시하고 이상적으로 전류를 흘려도 토오크 덩이 발생하여 토오크 리플을 줄일 수 없다. 그림 2의  $\beta_s=30, \beta_r>30^\circ$ 일 때 스위칭 조건을 보면 최소 인덕턴스 평활 구간( $L_{min}: 60^\circ - \beta_r$ )은 인덕턴스가 증가하는 구간( $30^\circ$ )에서 평활한 전류가 흐르도록 전류를 확립하는데 필요한 구간이며, 최대 인덕턴스 평활 구간( $L_{max}: \beta_r - \beta_s$ )은 전류를 소호 시키는데 필요한 구간이다. 따라서, 최소 인덕턴스 평활 구간( $L_{min}: 60^\circ - \beta_r$ )과 최대 인덕턴스 평활 구간( $L_{max}: \beta_r - \beta_s$ )은 식 (1)에 의해 토오크를 발생시키지 못하는 구간이므로, 인덕턴스가 증가하는 구간( $\beta_s=30^\circ$ )에서만 평활한 전류가 흐르면 리플이 작은 토오크가 발생될 것으로 예상된다.

따라서, 고정자 극호( $\beta_s$ )를  $30^\circ$ 로 고정하고, 회전자 극호( $\beta_r$ )를 변화시키며 턴온 각( $\theta_{on}$ )과 턴오프 각( $\theta_{off}$ )을 찾는 최적설계 방법을 설정하였다.

## 2.2 최적설계방법

비구속 조건의 최적화 문제에서 토오크 리플을 줄이기 위해 그림 2와 같은 스위칭 여자 방식을 고려하여 최적 설계 변수를 설정하였다.

그림 3은 목적함수와 세 가지 설계변수를 나타내며, 식 (2)는 세 가지 설계 변수의 범위를 나타낸다.

$$0 < \theta_{on} < \theta_o, \theta_o < \theta_{off} < \theta_q, 0 < \beta_r \leq 60 \quad (2)$$

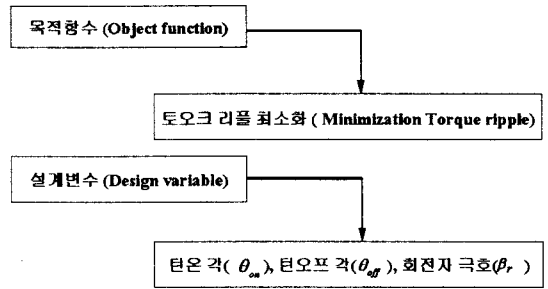


그림 3. 목적함수와 설계변수  
 Fig. 3. Object function and design variable

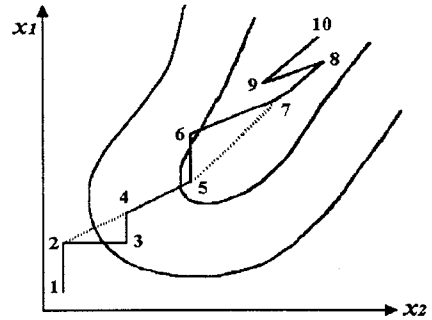


그림 4. 공액경사도법  
 Fig. 4. Conjugate gradient method

## 2.2.1 최적화 알고리즘

모든 파라미터는 연속적인 변화를 가지기 때문에, 본 문제를 해결하기 위해 비선형 최적화알고리즘을 채택하였다. 비선형최적화는 목적함수나 제약조건함수들이 적어도 일부가 비선형이다. 최적화문제의 수치적 해석방법을 비선형 계획(nonlinear programming : NLP)이라 하며, 비선형 계획은 해석적 방법이 너무 어렵거나 적용할 수가 없을 때 필요하다[5].

그림 4는 공액경사도법을 나타내고 있다. 본 논문은 비구속조건을 풀기 위해 최속강하법의 변형으로 생각할 수 있는 공액경사도법을 이용하였다. 공액경사도법은 목적함수의 경사도를 이용하는 최속강하법을 가장 간단하고 효과적으로 수정한 방법으로 최속강하법의 수렴률을 상당히 향상시킨 방법이다.

따라서, 본 연구에서는 최적화 모듈로서 G. N. Vanderplaats가 개발한 ADS 모듈내의 Fletcher-Reeves's algorithm for unconstrained minimization을 이용하였다[6].

## 2.2.2 유한요소 정식화

SRM의 토오크 특성을 분석을 위하여 수치해석적 기법인 2차원 유한요소법(FEM)을 이용하였다. 자기 벡터 포텐셜과 전류밀도가 Z축 성분만 존재한다면 SRM의 지배방정식은 자기 벡터 포텐셜로 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right) \right] + J_z = 0 \quad (3)$$

여기서,  $\mu$ 는 투자율, A는 자기 벡터 포텐셜,  $J_z$ 는 입력 전류밀도이다. 전압원 해석을 위한 전압방정식은 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$V = R_m I + L_m \left( \frac{dI_m}{dt} \right) + E_m \quad (4)$$

여기서,  $V$ 는 전압,  $R_m$ 는 상 저항,  $L_m$ 는 코일 단부의 누설 리액턴스,  $E_m$ 는 권선에 유기된 역기전력이다. 식 (3)에 Galerkin 방법을 적용한 후, 전압 방정식 (4)를 결합하고 시간 차분법을 이용하면 식 (5)와 같은 계행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S] & [Q] \\ \frac{1}{\Delta t}[F] & [R_m] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (A)^{t+\Delta t} \\ (D)^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ \frac{1}{\Delta t}[F] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (A)^t \\ (D)^t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (V)^{t+\Delta t} \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 2.3 최적화 설계 결과

세 가지 설계변수의 최적설계 정밀도는 소수점 첫째 자리(0.1 Deg.)까지 유효하며, 속도 2000[rpm]의 정상상태에서 토오크 리플을 계산하였다. 유한요소 해석은 이동메쉬기법(Moving Mesh Method)을 이용하여 동 특성 해석을 하였으며, 실제 전기적인 스위칭 회로를 고려한 전압원 비선형 해석을 수행하였다.

그림 5는 초기설계  $\beta_s=30$ ,  $\beta_r=30$ 의 토오크 특성을 나타낸다. 턴은 작은 인덕턴스 상승구간에서 평활한 전류가 흐르도록 결정하였으며, 턴오프 각은 부토오크가 발생하지 않도록 하기 위해 인덕턴스 하강구간 직전에 전류가 영(零)이 되도록 결정하였다. 초기설계 모델은 약 93.57[%]정도의 토오크 리플을 나타내고 있으며, 기하학적 구조상 전류의 시정수를 무시하고 이상적으로 스위칭을 할 경우에 토오크 리플을 줄일 수 있다.

그림 6은 최적설계  $\beta_s=30$ ,  $\beta_r=38.3$ 의 토오크 특성을 나타낸다. 이 최적설계 모델의 세 가지(턴은 각, 턴오프 각, 회전자 극호) 설계변수는 최적화 알고리즘을 적용하여 도출하였으며, 토오크 리플은 약 18.81[%]정도이다. 표 2는 초기설계와 최적설계의 결과 비교를 나타내고 있다. 턴은 각과 턴오프 각은 그림 2의  $0^\circ$ 를 기준으로 나타내었다.

표 2. 초기설계와 최적설계의 결과  
Table 2. The Result of Initial and optimum design

Deg.	극호		턴은 ( $\theta_{on}$ )	턴오프 ( $\theta_{off}$ )	토오크 리플 (%)
	$\beta_s$	$\beta_r$			
초기설계 모델	30	30	25.2	45.1	93.57
최적설계 모델	30	38.3	20.7	52.4	18.81

### 3. 결 론

본 연구에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor)의 토오크 리플을 최소화하기 위해 유한요소 해석과 최적화 알고리즘을 결합하여 최적의 설계 모델을 제시하였다. SRM에 있어서 고정자와 회전자 극호에 따른 기하학적 파라미터와 턴은 및 턴오프 각에 따른 전기적인 파라미터는 토오크 리플의 주요한 영향을 미치기 때문에 이를 최적설계 관점에서 검토하였다.

그 결과 고정자 극호와 회전자 극호가  $30^\circ$ 보다 작은 경우는 기하학적 구조상 큰 토오크 딥(Torque Dip)이 발생하여 토오크 리플을 줄일수 없었다. 그러나, 최적화 알고리즘과 유한요소법에 의해 도출한 최적 설계 모델 ( $\beta_s=30$ ,

$\beta_r=38.3$ )과 턴은 및 턴오프 각은 토오크 리플 20[%]이내로 최소화 할 수 있었다.

이 연구는 한국과학재단 지정 국제공동연구(과제번호 I-00-047)와 최적설계신기술연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] T. J. E. Miller, *Switched Reluctance Motors and their control*, Hillsboro, OH : Magna Physics Publishing and London : Oxford University Press, 1993.
- [2] W. F. Ray, P. J. Lawrenson, R. M. Davis, J. M. Stephenson, N. N. Fulton, and R. J. Blake, "High performance switched reluctance brushless drives," *IEEE Transactions on Industrial Application*, vol. IA-22, no. 4, pp. 722-730, 1986.
- [3] Funda Sahin, H. Bulent Ertan and Kemal Leblebicioglu, "Optimum Geometry for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motors," *IEEE Transactions on Energy conversion*, vol. 15, no. 1, pp. 30-39, March 2000.
- [4] S. Brisset and P. Brochet, "Optimization of Switched Reluctance Motors using Deterministic Methods with Static and Dynamic Finite Element Simulation," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, pp. 2853-2856, September 1998.
- [5] G. N. Vanderplaats, "Ads-A Fortran Program For Automated Design Synthesis", *Engineering Design Optimization*, Inc., 1987.
- [6] Jasbir S. Arora, "Introduction To Optimum Design", McGraw-Hill International Editions, 1994.

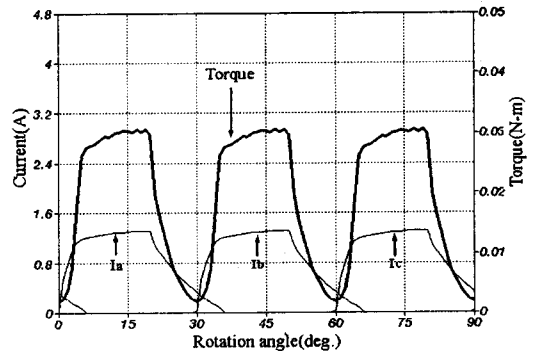


그림 5. 초기 설계  $\beta_s=30$ ,  $\beta_r=30$ 의 토오크 특성  
Fig. 5. Initial design model  $\beta_s=30$ ,  $\beta_r=30$

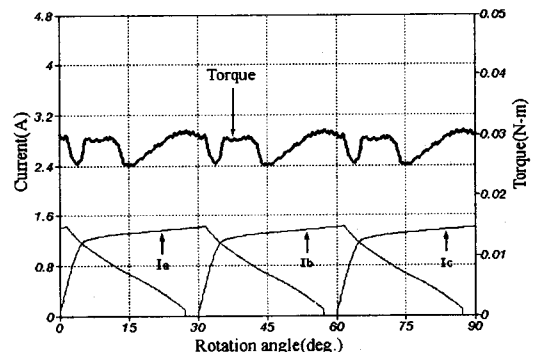


그림 6. 최적설계  $\beta_s=30$ ,  $\beta_r=38.3$ 의 토오크 특성  
Fig. 6. Optimum design model  $\beta_s=30$ ,  $\beta_r=38.3$