

2차원 FEM과 3차원 등가자기회로방법을 이용한 SRM의 최적 설계

정성인* 김윤현* 이주* 김학련**
 한양대학교 전기공학과 에너지변환연구실*
 서울산업대학교 전기공학과**

Optimal design of switched reluctance motor
 using 2D FEM and 3D equivalent magnetic circuit network method

S. I. JUNG* Y. H. KIM* J. LEE* H. L. KIM**
 Dept. of Electrical Eng., Hanyang University*
 Dept. of Electrical Eng., SEOUL National Polytechnic University**

Abstract - Switched reluctance motor (SRM) has some advantages such as low cost, high torque density etc. However SRM has inevitably high torque ripple due to the double salient structure. To apply SRM to industrial field, we have to minimize torque ripple, which is the weak-point of SRM. This paper presents optimal design process of SRM using numerical method such as 2D finite element method (FEM) and 3D equivalent magnetic circuit network method (EMCNM). The electrical and geometrical design parameters have been adopted as 2D design variables. The overhang structure of rotor has been also adopted as 3D design variable. From this work, we can obtain the optimal design, which minimize the torque ripple and maximize energy conversion loop.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기는 구조가 간단하고 견고하며, 높은 효율과 낮은 제작비용의 장점을 가지고 있으며, 최근 전력전자 기술의 급속한 발달에 따라 가전분야 및 산업 분야에서의 구동원으로 크게 주목받고 있다.[1] 그러나 SRM은 근본적으로 토오크 맥동이 크고 소음 진동이 심하다는 단점이 있다. 따라서, SRM을 산업분야에 확대, 적용하기 위해서는 토오크 맥동을 감소시켜야 한다. 이러한 토오크 맥동은 기하학적이고 전기적인 설계 파라미터에 크게 의존한다. 기하학적인 설계 파라미터는 고정자 극호각(β_s)과 회전자 극호각(β_r)과 같은 모터 형상과 관련이 있고, 전기적인 설계 파라미터로서 턴 온 각(θ_{on})과 턴 오프 각(θ_{off})에 영향을 받는다.

토오크 맥동을 줄이기 위한 최적의 기하학적 파라미터 설계 형상에 관한 논문이 발표된 바 있으나, 이는 전기적인 파라미터들의 영향을 고려한 기하학적인 설계를 제시하지 못하였다.[2] 본 논문에서는, 토오크 맥동 최소화라는 목적을 만족시키기 위하여 기하학적이고 전기적인 설계 파라미터로서 최적의 설계를 제시하였다. 또한 3차원 최적 설계에서, 에너지 변환루프를 최대화하기 위하여 회전자의 축 길이에 따른 최적의 오버행 길이를 고려하였다.[3]

최적화 알고리즘으로서 PQRSM(Progressive Quadratic Response Surface Method)을 이용하였고, 구동회로를 고려한 시간차분 유한요소법을 이용하여 목적함수를 계산하였다. 그리고 최적의 오버행 길이를 결정하기 위해서 3차원 등가자기회로방법을 이용하였다.

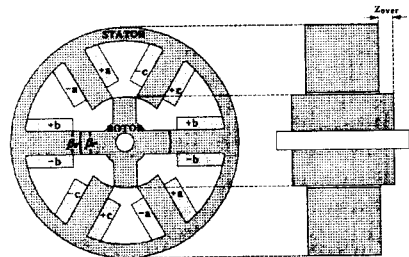
2. 본 론

2.1 해석 모델

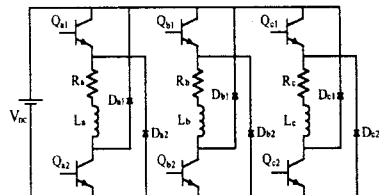
그림 1은 6/4 SRM 모델의 단면과 구동회로를 나타내고 있다. 이 그림에서 β_s , β_r , a, b, c는 각각 고정자 극호각, 회전자 극호각, 3상을 나타내고 있다. SRM 드라이브는 비대칭 브리지 컨버터로 구성되어 있고, 모터 구동에서 각 상은 연속적으로 동작된다. 턴 오프의 경우 고정자의 인덕턴스에 저장된 에너지는 환류 다이오드를 통하여 전원에 반환된다.

2.2 최적 설계

그림 2는 본 논문에서 제시한 최적설계 과정을 보여주고 있다. 그림 2에서 β_r , θ_{on} , θ_{off} 는 2차원 최적 설계를 위하여 적용된 설계 파라미터이다. 목적함수를 구하기 위하여 구동회로를 고려한 2차원 시간차분 유한요소법을 적용하였다. 최적의 오버행 길이는 3차원 등가자기회로방법에 기반한 2차원 최적설계 값을 통해 도출하였다. 목적함수와 구속조건을 나타내면 식 (1)와 같다.



(a) 초기모델



(b) 구동회로

그림 1. 초기 설계 모델의 단면과 구동회로

목적 함수 : 토오크 리플 최소화 (T_{ripple})

$$\begin{aligned} \text{구속 조건 : } & 16^\circ \leq \theta_{on} \leq 26^\circ \\ & 32^\circ \leq \theta_{om} \leq 60^\circ \\ & 30^\circ \leq \beta_r \leq 55^\circ \end{aligned} \quad (1)$$

본 연구에서, 기존의 민감도에 기반한 비선형 최적화 알고리즘은 모든 파라미터들이 이산적인 변수로 설정되어 사용될 수가 없었다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 최적화 알고리즘으로서 PQRSM을 사용하였다. 이 방법은 적절한 설계공간 안에서 목적함수와 구속조건을 2차 함수로 근사화하고, 연속적인 신뢰영역에 기반한 모델 관리기법과 관련하여 근사의 최적 문제로 도출해낸다. PQRSM은 기존의 반응표면법과 비교하여 볼 때, 두 가지의 장점을 가지고 있다. 첫번째는, 2차 근사함수를 구성하기 위해 $2n+1$ (n :설계 파라미터의 수)만큼의 샘플링 포인트가 요구된다는 것이다. 두번째는, 회귀 계수를 결정하기 위해서 최소자승법을 이용하지 않기 때문에 근사함수를 명백히 구성하기 위한 추가적인 CPU시간을 요구하지 않는다는 것이다.

2.3 특성 분석 방법

2.3.1 2차원 유한요소법

자기 벡터 포텐셜과 전류밀도가 z 축 성분만 존재한다 면, SRM의 지배방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\partial/\partial x(\nu \partial A/\partial x) + \partial/\partial y(\nu \partial A/\partial y) + J_0 = 0 \quad (2)$$

여기서, ν 는 투자율의 역수이고, A 는 자기 벡터 포텐셜 이며, J_0 는 입력전류밀도이다. 전압원 해석을 위한 전압 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = R_m I + L_m \left(\frac{dI_m}{dt} \right) + E_m \quad (3)$$

여기서, V 는 전압, R_m 은 상 저항, L_m 은 코일 단부의 누설 리액턴스, E_m 은 권선에 유기된 역기전력이다.

식 (2)에 Galerkin 방법을 적용한 후, 전압 방정식 (3)를 결합하고 시간차분법을 이용하면 식 (4)와 같은 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

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

동특성 해석을 수행하기 위해 이동라인 기법이 도입되었고, 쇄교 자속은 식 (5)에 의해 계산된다.

$$\lambda = \int_{\theta_0}^{\theta_c} (V - Ri) d\theta / \omega \quad (5)$$

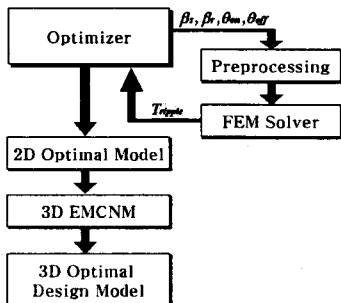


그림 2. 최적 설계 과정

여기서, λ 는 쇄교 자속, θ_c 는 턴 온 각, θ_0 는 턴 오프 각, V 는 입력 전압, R 은 상 저항, ω 는 순간 각속도, i 는 순시전류이다.

2.3.2 3차원 등가자기회로방법

3차원 등가자기회로법은 분포정수로 퍼미언스를 사용하고, 각 요소 중심점의 연결로 구성되어 있다. 중심의 제변수인 자기 스칼라 포텐셜은 기자력과 퍼미언스의 곱에 의해 결정된다. 절점 (i, j, k) 와 $(i, j-1, k)$ 사이에서 방사방향의 자속과 자속밀도는 식 (7)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Phi_{r_{i,j-1,k}} &= P_{r_{i,j-1,k}} (U_{i,j,k} - U_{i,j-1,k} + E_{i,j-1,k}) \\ B_{r_{i,j-1,k}} &= \Phi_{r_{i,j-1,k}} / S_{r_{i,j-1,k}} \end{aligned} \quad (6)$$

절점 (i, j, k) 에서 자속의 연속 조건을 적용하면, 대수방정식은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[P]\{U\} = \{F\} \quad (7)$$

여기서, $[P]$ 는 퍼미언스 계수행렬이고, $\{U\}$ 는 자기 스칼라 포텐셜의 절점행렬이며, $\{F\}$ (=Permeance \times MMF)는 구동 벡터행렬이다.

2.3.3 토오크 및 토오크 리플 계산

Maxwell stress tensor를 이용한 토오크 계산식은 다음과 같다.

$$T_{ij} = \frac{1}{\mu_0} (B_i B_j - \frac{1}{2} B^2 \delta_{ij}) \quad (8)$$

여기서, δ_{ij} 는 Kronecker delta 함수이다. 그리고 토오크 리플 계산을 위한 방정식을 백분율로 나타내면 아래와 같다.

$$T_{rip} (\%) = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{ave}} \times 100 \quad (9)$$

여기서, T_{rip} 는 토오크 맥동, T_{max} 는 최대 토오크, T_{min} 는 최소 토오크, T_{ave} 는 평균 토오크이다.

3. 최적설계 결과

표 1은 초기설계와 최적설계의 결과 비교를 나타내고 있다. 턴 온 각과 턴 오프 각은 0° 를 기준으로 나타내었다.

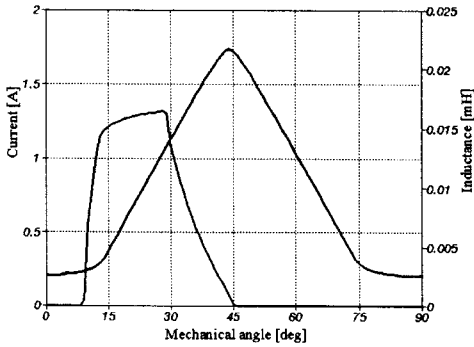
그림 3은 초기모델과 최적설계모델의 전류와 인덕턴스 비교를 나타내고 있다. 그림 3. (a)는 초기모델의 해석 결과로서 $\beta_r = 30^\circ$, $\theta_{on} = 24.8^\circ$, $\theta_{off} = 45^\circ$ 일 때의 인덕턴스와 전류 파형을 나타내고 있다. 턴 온 각은 인덕턴스가 상승하는 구간에서 평활한 전류가 흐르도록 결정하였으며, 턴 오프 각은 부토오크가 발생하지 않도록 하기 위해 인덕턴스 하강구간 직전에 전류가 0이 되도록 결정하였다. 그림 3. (b)는 최적설계 모델의 결과로서 $\beta_r = 47.1^\circ$, $\theta_{on} = 15.8^\circ$, $\theta_{off} = 49.2^\circ$ 일 때의 인덕턴스와 전류 파형이다.

그림 4는 초기모델과 최적설계 모델의 토오크의 파형 비교를 나타내고 있다. 그림 4. (a)는 초기모델의 해석 결과로서 $\beta_r = 30^\circ$, $\theta_{on} = 24.8^\circ$, $\theta_{off} = 45^\circ$ 일 때의 토오크 리플은 약 93.58%로 매우 크다는 것을 알 수 있었다. 그림 4. (b)는 최적설계의 모델 결과로서 $\beta_r = 47.1^\circ$, $\theta_{on} = 15.8^\circ$, $\theta_{off} = 49.2^\circ$ 일 때의 토오크 리플 파형을 보여주고 있다. 최적설계 모델의 전기적이고 기하학적인 설계변수는 최적화 알고리즘을 적용하여 도출하였으며, 토오크 리플은 약 7.1%로 매우 향상됨을 보여주었다.

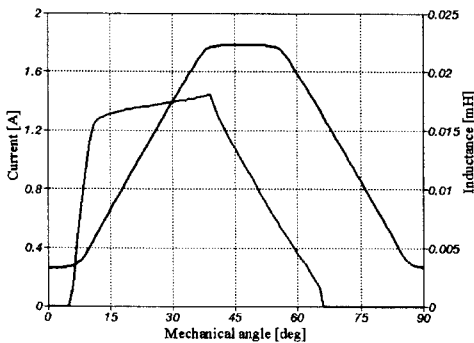
그림 5는 에너지 변환 루프를 나타내고 있다. 이 그림에서 오버행 구조가 +3% 또는 -3%일 때 0%보다 더 효율이 높다는 것을 알 수 있었다. 따라서 최적설계는 에너지 변환 곡선에서의 면적을 최대화함으로써 효율 면에서 우수하다는 것을 알 수 있었다.

Deg.	극호		턴온	턴오프	토평크 리플 [%]
	β_s	β_r	(θ_{on})	(θ_{off})	
초기설계 모델	30	30	24.8	45.0	93.58
최적설계 모델	30	47.1	15.8	49.2	7.1

표 1. 초기설계와 최적설계의 결과

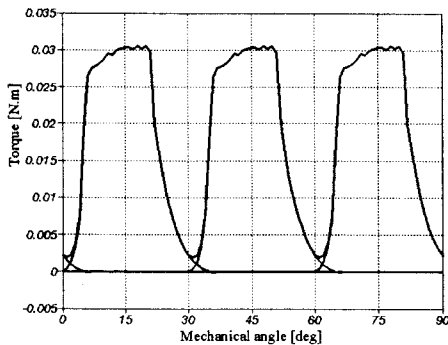


(a) 초기모델

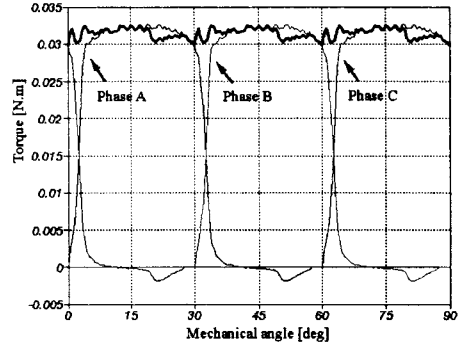


(b) 최적설계 모델

그림 3. 초기모델과 최적설계 모델의 전류와 인덕턴스 특성 비교



(a) 초기 모델



(b) 최적설계 모델

그림 4. 초기모델과 최적설계 모델의 토평크 특성 비교

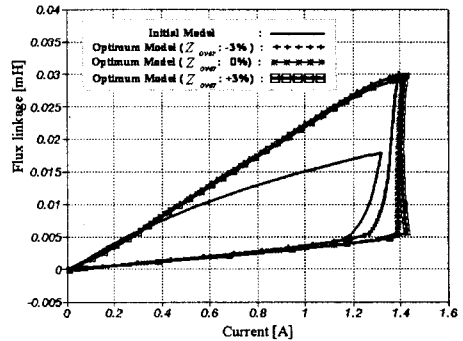


그림 5. 오버행 변화에 따른 에너지변환 곡선의 비교

4. 결 론

본 논문은 SRM의 토평크 리플을 줄이고, 효율을 높이기 위해서 2차원 유한요소법과 3차원 등가자기회로방법을 이용한 최적설계 결과를 나타내었다. 2차원 설계변수로는 전기적 파라미터인 θ_{on} , θ_{off} 가 선정되었고, 기계적 파라미터로서 회전자 극호각(β_r)이 선정되었다. 3차원 설계변수로는 회전자의 오버행 길이가 선정되었다. 토평크 리플 최소화라는 목적함수를 만족시키기 위해 최적화 알고리즘을 적용한 결과, 토평크 리플을 10% 이내로 최소화 할 수 있었다.

본 논문에서 제안된 최적설계 결과는 SRM과 같은 전기기기의 설계에 유용할 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] T. J. E. Miller, Switched Reluctance Motors and t control, Hillsboro, OH : Magna Physics Publishing London : Oxford University Press, 1993.
- [2] Funda Sahin, H. Bulent Ertan and Kemal Leble "Optimum Geometry for Torque Ripple Minimizat Switched Reluctance Motors," IEEE Transaction Energy conversion, vol. 15, no. 1, pp. 30-39, Marc
- [3] Jasbir S. Arora, "Introducton To Optimum D Mcgraw-Hill International Editions, 1994.