

스위치드 릴럭턴스 전동기의 토오크 리플 저감 설계

김윤현*, 최재학*, 이주*, 성하경**, 임태빈**
 *한양대학교 전기공학과, **전자부품연구원

Design of Switched Reluctance Motor for Minimizing Torque Ripple

*Kim YounHyun, *Choi JaeHack, *Lee Ju, **Sung HaKyung, **Im TaeBin
 Electrical Engineering, Hanyang University, KETI(Korea Electronics Technology Institute)

Abstract - The pole shape, turn-on angle, and turn-off angle are important design factors that largely influence Switched Reluctance Motor's performance when designing a switched reluctance motor. These design factors must be considered simultaneously because an independent factor restricts the improvement of the switched reluctance motor's performance. After performing the analysis using nonlinear same characteristic finite element method that contains a operating circuit, the influence upon the torque characteristics was analyzed by the pole shape and the angles. This paper presents the most suitable design value according to input conditions and various speeds. Especially, the most suitable angles were derived from the voltage equation, and an effective design range is showed from the angles.

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. 그러나 이러한 여러 가지의 장점에도 불구하고 스위치드 릴럭턴스 전동기는 고정자와 회전자간 이종 돌극으로 구성된 구조와 펄스 형태의 여자방식으로 인해 토오크 맥동이 크고 소음과 진동이 심하며 구동 드라이브가 없으면 SRM의 구동이 불가능하다는 단점을 내재하고 있다. 따라서 스위치드 릴럭턴스 전동기를 산업분야에 적용하기 위해서는 저 토오크 리플, 고 토오크 밀도가 요구되어 이를 위한 전동기 설계와 구동 방법에 대한 연구가 필연 시 되며 또한 SRM의 형태에 따라 구동 방법도 달리해야하므로 구동방법을 고려한 SRM의 설계가 당연히 적용되어야한다. 스위치드 릴럭턴스 전동기의 설계 원리는 Lawrenson등에 의해 기본 틀이 마련되었고, Miller 등에 의해 정리되었으며, 현재에도 다양한 설계와 구동 방법에 대한 연구가 여러 문헌을 통해 보고되고 있다[1][2][3]. 또한 최근에는 토오크 리플을 줄이기 위해 신경망 이론(Neural Network Algorithm)에 의한 최적의 기하학적 형상을 찾는 방법이 소개되기도 하였다[4]. 이들은 주로 기하학적 변수인 고정자 극호와 회전자 극 호를, 토오크 리플을 줄이기 위한 설계 변수로서 정의한 설계 방법을 제안하였다. 그러나 기존 방법들은 고정자 극호와 회전자 극호의 SRM 형상에 대해 구동방법이 토오크 리플에 미치는 영향을 고려하여 설계에 적용하지 못하였다. 즉 전기적 변수인 턴 온 각(θ_{on})과 턴 오프 각(θ_{off})에 의한 영향을 고려한 기하학적 설계방법을 명확하게 제시하지 못하였다.

따라서, 본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성을 높이기 위하여 토오크 리플 최소화를 기본 목표로 하는 설계 방법을 연구하였으며, 뿐만 아니라 평균

토오크 최대화도 함께 분석하였다. 이러한 목적을 만족시키는 설계 방법으로 본 연구는 SRM의 형태, 즉 고정자 극호와 회전자 극호에 따라 구동방법을 4가지 타입으로 구분하고 각 타입별로 턴 온 각(θ_{on})과 턴 오프 각(θ_{off})을 유도하여 SRM의 특성분석 과정에 적용, 구동조건이 고려된 SRM의 토오크리플 저감 설계를 수행하였다. 또한 본 논문은 설계를 위한 해석의 경우의 수를 줄여 효율적인 설계를 수행할 수 있도록 설계 가능 범위를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 SRM 모델과 설계 방법

본 논문의 설계방법은 먼저 고정자 극호와 회전자 극호에 따라 4가지 타입으로 구분한 구동방법에 대해서 설명하고, 각 타입별로 턴 온 각(θ_{on})과 턴 오프 각(θ_{off})의 유도 결과를 제시하였다. 본 논문의 설계를 위한 SRM의 특성평가는 비선형과 과도 특성을 고려한 유한요소 해석에 의해 검토하였으며 SRM의 고정자 극호와 회전자 극호 설계를 위한 기본 사양은 표 1과 같다.

표 1. 기본설계 모델의 주요사양

항 목	값	단위	항 목	값	단위
고정자 극수	6	Poles	회전자 극수	4	Poles
정격 전압	12	V	정격 전류	4	A
동작 속도	500	rpm	상 수	3	Phase
고정자 지름	100	mm	회전자 지름	40	mm
공극 길이	0.3	mm	적층폭	40	mm

2.1.1 SRM 형태에 따른 4가지 Type의 구동방법

그림 1은 SRM의 고정자 극호와 회전자 극호에 따라 토오크 리플을 저감시킬 수 있는 4가지 type의 가능한 구동방법과 그에 따라 예상되는 인덕턴스와 전류, 그리고 발생 토오크 파형을 나타내었다. 그림에서 Type I은 β_s 와 β_r 이 30° 보다 작을 경우로 각 상의 상승 인덕턴스 구간이 연속적으로 연결되지 않기에 만약 시정수를 무시하고 이상적으로 전류를 흘려도 토오크 덩이 발생하여 토오크 리플을 줄일 수 없다. 그러나 Type II, Type III, Type IV와 같이 고정자와 회전자 극호가 30° 이상(β_s 와 $\beta_r \geq 30^\circ$)이 되면, 한 상의 상승 인덕턴스 구간이 끝나는 위치에서 다른 상의 상승 인덕턴스가 시작하거나

중첩이 되므로 그림 1과 같이 스위칭 조건에 따라 구동하면 토오크 리플을 줄일 수 있다.

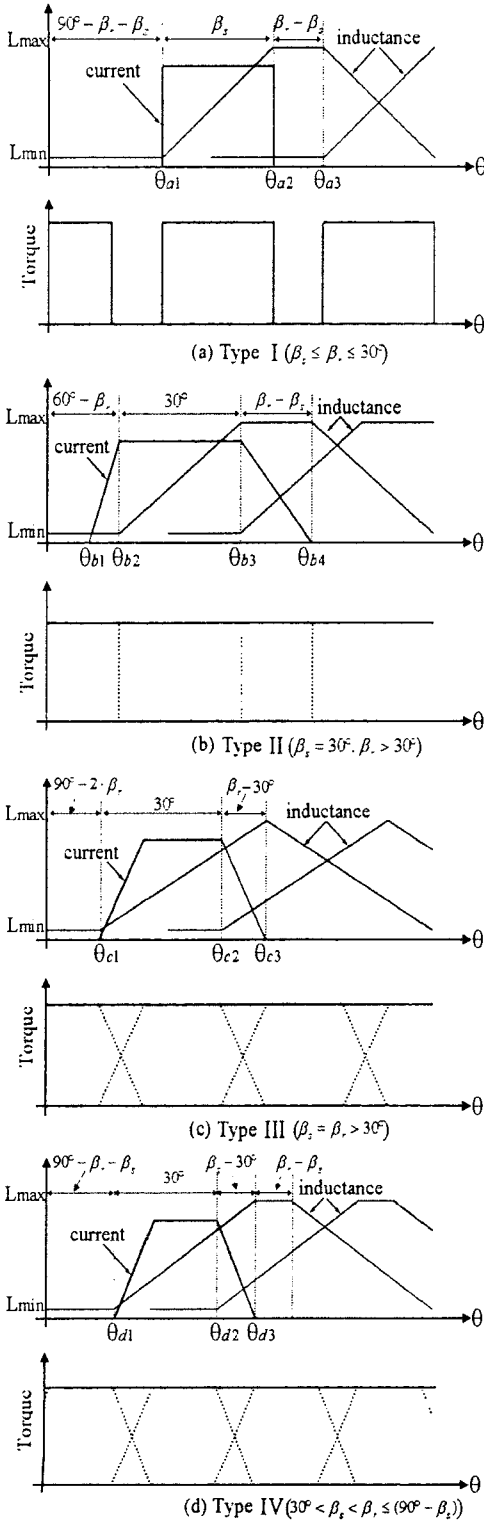


그림 1. SRM의 4가지 Type의 구동방법

2.1.2 θ_{on} 과 θ_{off} 의 유도

최적의 θ_{on} 과 θ_{off} 은 독립적인 설계 변수가 아니라 극호 β_s 와 β_r 에 따라 변하는 변수이므로 극호 β_s 와 β_r 에 따른 각각의 θ_{on} 과 θ_{off} 를 제시하여야한다 따라서 본 논문에서는 상승 인덕턴스 구간에서 일정 평활전류가 흐르도록, 하강 인덕턴스 구간에서는 전류가 0이 되도록 θ_{on} 과 θ_{off} 를 결정하였다. 그림 1의 Type I은 근본적으로 토오크 리플을 줄일 수 없으므로 본 논문에서는 고려하지 않았다 그림 1의 θ_{b2} 부터 일정한 평활전류가 흐르기 위한 Type II에서 턴온 각(θ_{on})을 유도하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다

$$\theta_{on} = \theta_x - \omega \cdot \frac{L_{min}}{R} \ln \left| 1 - \frac{R}{R - \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega} \right| \cdot \frac{180}{\pi} [\text{deg.}] \quad (1)$$

여기서, L_{min} 는 최소 인덕턴스. R은 상 저항. ω 는 각속도. θ 는 회전자 위치를 나타낸다
턴오프 각(θ_{off})의 조건은 인덕턴스가 감소하는 시점(θ_{b1})까지 평활전류가 영(췌)이 되도록 하여 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta_{off} = \theta_{b1} - \omega \cdot \frac{L_{max}}{R} \ln \left| \frac{R - \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega}{2R - \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega} \right| \cdot \frac{180}{\pi} [\text{deg.}] \quad (2)$$

여기서, L_{max} 는 최대 인덕턴스. R은 상 저항. ω 는 각속도. θ 는 회전자 위치를 나타낸다.

Type III과 Type IV의 턴온 각과 턴오프 각은 식 (3)과 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{on,c,d} = \theta_{c1}, \theta_{d1} \quad (3)$$

$$\theta_{off,c,d} = (\theta_{c2}, \theta_{d2}) - \omega \cdot \frac{L_{min}}{R - \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega} \ln \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \frac{180}{\pi} [\text{deg.}] \quad (4)$$

2.1.3 설계 가능 범위

각 Type별로 고정자 극호와 회전자 극호에 대해 전류를 상승하고 하강시키는데 확보된 각도 θ_{min} 과 θ_{max} 를 정리하면 다음 식 (5),(6),(7)과 같다.

$$\text{Type II} : \theta_{min} = (60^\circ - \beta_r), \theta_{max} = (\beta_r - \beta_s) \quad (5)$$

$$\text{Type III} : \theta_{min} = (\beta_r - 30^\circ), \theta_{max} = (\beta_r - 30^\circ) \quad (6)$$

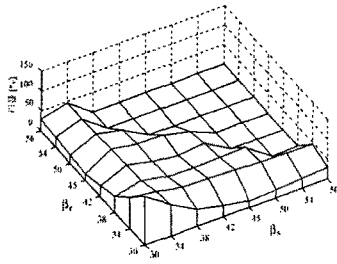
$$\text{Type IV} : \theta_{min} = (\beta_s - 30^\circ), \theta_{max} = (\beta_s - 30^\circ) \quad (7)$$

실제 전류의 상승, 하강에 필요한 각도가 (5)~(7)식의 확보된 각도보다 크면 원하는 구동이 되지 않으므로 토오크 리플이 크게 발생할 수 있다. 따라서 500[RPM]에서 필요한 각도가 확보된 각도 범위 내에 있는 고정자 극호와 회전자 극호를 정리하여 표 2에 나타내었고, 이 범위를 설계 가능 범위라고 명명하였다. 결국 설계 가능 범위의 극호에 대해서만 특성 평가를 하여 설계에 반영하여도 무방하다.

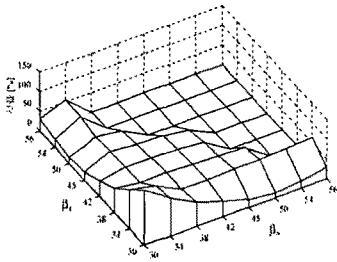
표 2. 500[RPM]에서 설계 가능 범위

Type	계산된 설계 가능 범위
II	$\beta_s = 30^\circ, 45.9^\circ \leq \beta_r < 54.8^\circ$
III	$45^\circ \leq (\beta_s = \beta_r) \leq 45^\circ$
IV	$44.5^\circ \leq \beta_s < \beta_r \leq 45.5^\circ$

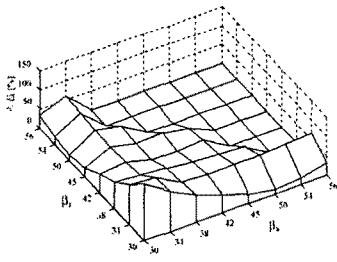
2.2 설계 결과



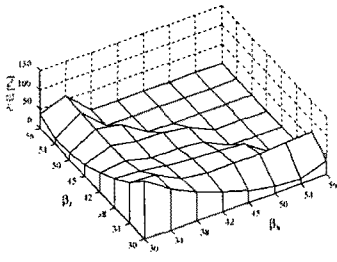
(a) 300(rpm)



(b) 500(rpm)



(c) 1000(rpm)



(d) 2000(rpm)

그림 2. 극호에 따른 토오크 리플 특성

그림 2는 300[rpm], 500[rpm], 1000[rpm], 2000[rpm] 속도에서 두 극호의 조합에 따른 토오크 리플 특성의 해석 결과를 나타내고 있다. 그림 4.11로부터 Type II

($\beta_s = 30^\circ$, $\beta_r \geq 30^\circ$)와 Type III($\beta_s = \beta_r \geq 30^\circ$)가 Type IV($30^\circ < \beta_s \leq \beta_r \leq 90^\circ - \beta_s$)보다 전체적으로 토오크 리플 특성이 좋게 나타남을 알 수 있다. 또한, Type II는 대체적으로 β_s 이 증가할수록 모든 속도에 대해 토오크 리플이 감소하고, Type III도 두 극호가 증가할수록 토오크 리플이 감소하는 경향을 보이고 있다. $\beta_s \geq 30^\circ$, $\beta_r = 30^\circ$ 인 경우도 토오크 리플은 Type II와 비슷한 양상을 보여 주고 있지만, 슬롯면적과 자속이 통과하는 회전자의 코어 면적이 작아 Type II($\beta_s = 30^\circ$, $\beta_r \geq 30^\circ$)보다 토오크 밀도가 낮다. β_s , β_r 조합에 따른 토오크 리플 특성은 속도가 증가할수록 전류의 여자와 소호 하는데 필요한 시간이 줄어들므로 β_s 이 증가하는 것이 유리하며, β_s , β_r 조합 중 β_s 가 30° 이고 β_r 이 크도록 설계된 경우가 가장 적은 토오크 리플 특성을 나타내고 있음을 해석 결과로부터 알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 구동방법이 고려된 스위치드 릴럭턴스 전동기의 토오크 리플 저감 설계 방법을 시도하였다. 스위치드 릴럭턴스 전동기의 토오크 리플은 고정자와 회전자 극호의 조합과 스위칭 조건에 따라 그 특성이 지배적이기 때문에 이에 초점을 두고 자세하게 해석, 검토하였다. SRM 설계를 위해 기하학적 변수인 고정자와 회전자 극호, 전기적인 변수인 턴온과 턴오프 각을 동시에 고려하였으며, 또한 두 극호와 속도 변화에 따라 스위칭 조건과 입력전류 등을 고려하여 두 극호의 설계 가능 범위를 제안하였다.

본 논문에서 제시한 사양에 대해 극호 조합에 따른 토오크 특성 결과를 보면, 고정자 극호를 증가시키면 점적율과 기자력이 작아지므로 토오크 밀도를 높이고 토오크 리플을 줄이기 위해서는 기본적으로 30° 가 가장 적합하며, 회전자 극호를 넓히는 것이 효과적이다. 즉 Type II($\beta_s = 30^\circ$, $\beta_r \geq 30^\circ$)의 경우가 전반적으로 우수한 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 본 연구에서 제안한 6/4 SRM의 설계 가능 범위는 많은 노력과 시행착오를 하지 않고도 토오크 리플과 평균 토오크를 설계목적으로 하는 경우 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료되며 이상에서 얻은 결과로 볼 때 본 연구에서 제안한 SRM 설계 기법은 입력전압, 극수 등이 다른 전기기계에도 효과적으로 이용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 국제공동연구(과제번호: M1-0011-0021) 지원으로 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 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.
- [2] T. J. E. Miller, *Switched Reluctance Motors and their control*, Hillsboro, OH: Magna Physics Publishing and London: Oxford University Press, 1993.
- [3] 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.
- [4] 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.