

## SRM 토오크리플 저감을 위한 회전자 형상 설계

오주환, 권병일

한양대학교

### Rotor Shape Design for Minimization Torque Ripple of Switched Reluctance Motor

Oh Ju Hwan, Kwon Byoung Il

Hanyang University

**Abstract** - Switched reluctance motors have the advantage a high torque/weight ratio, as the large reluctance torque is made by salient poles of both stator and rotor, and a high reliability. On the other hand, the switched reluctance motors have the disadvantage of a large ripple torque which is made by salient poles. So the application for the industrial fields have been limited to special cases. This paper describes the design of a 12/8 switched reluctance motor using a enemy layer method of the asymmetry rotor. The design is focussed to reduce the torque ripple and radial force in the demanded value. The three dimension finite element analysis method(3D-FEM) was used for decides a enemy layer angle of the asymmetry rotor. This paper presents modifications of the rotor pole shape which reduces the torque ripple.

### 1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM: Switched Reluctance Motor)는 고정자와 회전자가 모두 돌극형 구조를 지니고 있으며, 기계적으로 강인하고 회전자 관성이 적어 고속운전 및 다이나믹한 구동특성을 갖을수 있다. 또한 단위중량당 토오크 및 효율이 우수하다. 하지만, 유도전동기와 영구자석형 전동기 그리고 동기릴럭턴스전동기보다 파라미터의 비선형적인 면이 매우 크고, 그것으로 인해 토오크 및 기동특성이 매우 좋지 않다[1]. SRM은 전류의 크기, 회전자와 고정자간의 위치에 따른 인덕턴스가 울기가 매우 비선형적인 특징 때문에 토오크 리플 및 토오크제에 어려운 문제점을 안고 있다.

이와 같은 단점을 줄이기 위해 SRM의 토오크리플에 대한 자기적인 형상설계와 새로운 제어방식 및 구동 드라이브 시스템에 대해 보고되고 있다[2][3]. 자기적인 형상설계는 주로 회전자극에 자속장벽을 주거나 또는 하이브리드 구조로 영구자석 및 권선을 추가하는 방식으로 이루어지고 있었다[4][5]. 이 것은 복잡한 형상과 제어 그리고 열악한 구동특성으로 인한 SRM의 본질적인 특성을 잊게 한다.

본 논문에서는 기존방법을 사용하지 않고 간단한 회전자 적층방법으로 토오크 리플 및 방사방향의 힘을 줄이고자 한다. 이 방법은 회전자 강판 적층을 비대칭적으로 쌓아올리는 방법이다. 기본 모델링을 통하여 초기 SRM 을 설계하고 초기모델 설계사양과 똑같은 비대칭 적층형상을 갖는 회전자를 설계한다. 설계된 초기 형상과 제안한 형상에 대한 타당성을 증명하기 위해서 3D-FEM 유한요소법을 이용하여 확인하였다.

### 2. 토오크 리플 저감을 위한 형상설계

#### 2.1 SRM의 인덕턴스 변화와 토오크 발생

스위치드 릴럭턴스 전동기의 전압방정식은 식 (1)과 같이 표현한다.

$$V_n = R_n i_n + L(\theta, i_n) \frac{di_n}{dt} + i_n \frac{dL(\theta, i_n)}{d\theta} \omega \quad (1)$$

식 (1)에서 우변의 첫 번째 항은 고정자 권선의 저항에 의한 성분이고, 두 번째 항은 기계적으로 변환되는 성분이다.

토오크식을 구하기 위하여 Coenergy  $W_c$ 를 구하면 식 (2)와 같다.

$$W_c = \frac{1}{2} i_n(\theta)^2 \cdot L_n(\theta) \quad (2)$$

토오크를 구하기 위하여 Coenergy를 위치각으로 미분하면 토오크는 식 (2)는

$$T = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i(\theta)^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (3)$$

로 표현된다. 여기서 SRM의 발생 토오크는 전류에 제곱에 비례하고 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 알 수 있다.

그럼 1은 회전자 위치에 따라 이상적인 전류가 인가되었을 때의 토오크 발생과정을 보여주고 있다.

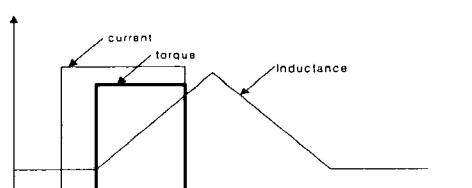


그림 1. 토오크 발생과정

Fig. 1 Torque produce

토오크가 발생되는 구간인 인덕턴스 사상구간에서 인덕턴스의 변화량이 일정하고, 일정한 전류가 인가되었을 때 토오크 리플은 줄어들고 일정한 속도로 운전할 수 있다. 또한 토오크 리플로 인한 진동을 억제할 수 있다.

#### 2.2 SRM 기본 설계 및 특성해석

그림 2는 본 논문에서 사용된 SRM으로써 고정자와 회전자 극호각이  $\beta_s = 15^\circ$ ,  $\beta_r = 16^\circ$  인 12/8 인 모델이다.

기본 설계된 SRM에서 권선에 일정한 전류를 인가한 상태에서 회전자의 위치에 따른 Static토오크특성과 인덕턴스 특성을 그림 3과 같이 살펴보았다.

회전자와 고정자가 중첩되기 전에 토오크가 급격히 변화하는 이유는 공극에서의 포화현상에 의해서 그림 2에

서 이상적인 인덕턴스 성분이 그림 2에서 실제 인덕턴스와 같이 공극에서 누설자속으로 인한 인덕턴스가 증가하기 때문이다.

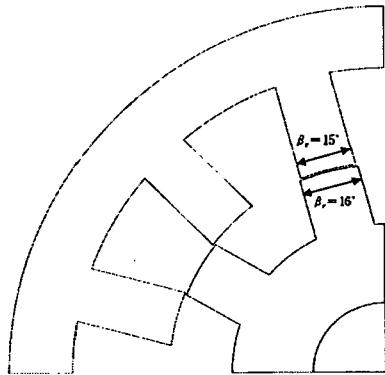


그림 2. 초기형상 및 극호각

Fig. 2 Configuration and dimension of initial model

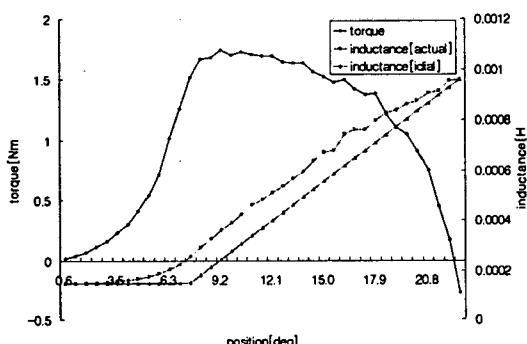


그림 3. 초기형상 토오크 및 인덕턴스(0[deg])

Fig. 3 Torque and inductance of initial model

초기형상의 토오크 리플을 저감하기 위해 공극에서의 누설자속을 최대한 줄이기 위해 그림 4와 같이 회전자의 적층방법을 비대칭적으로 쌓아 올린다. 비대칭각은  $x = 1\sim 5^\circ$  까지 변화를 주었으며, 강판 한 장의 두께는 2[mm]로 정의하였다.

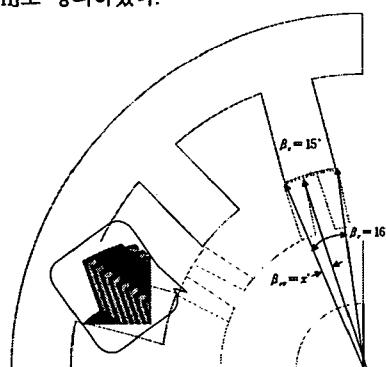


그림 4. 회전자 형상변화

Fig. 4 Rotor pole shape disign

그림 5는 초기형상과  $1\sim 5^\circ$  까지 변화를 준 제안된 형상에서 회전자 위치에 따른 방사방향의 힘을 나타내었

다. 그림 6은 일정한 전류 10[A]일 때 회전자의 위치에 따른 인덕턴스 값이다.

공극에서 누설자속에 의한 포화가 일어남으로 누설자속이 생기는 부분에 자속의 면적을 줄이고 갑작스러운 자속포화를 줄이기 위한 방법이다. 기존의 방법은 회전자의 극을 노치(notch)를 줘 공극의 증가로 누설자속을 줄이는 방법을 택하거나, 회전자 극에 베리어(barrier)를 줘 인덕턴스의 기울기를 변화시켰다.

비대칭 회전자 적층에 따른 회전자 극폭은 다음 식(4)와 같이 정의 하였다.

$$t_r = 2 \times r_1 \times \sin \frac{(\beta_r - x)}{2} \quad (4)$$

여기서  $r_1$ 은 회전자 반경,  $x$ 는 비대칭각이다.

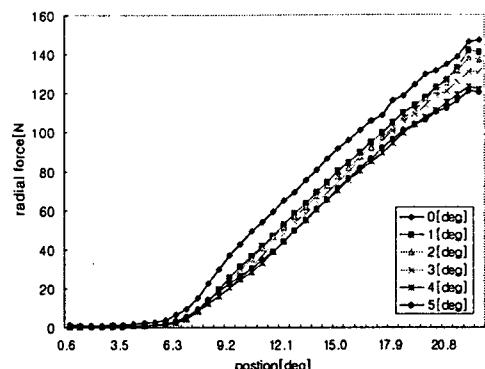


그림 5. 회전자위치에 따른 방사방향 힘

Fig. 5 Radial force accoding to rotor position

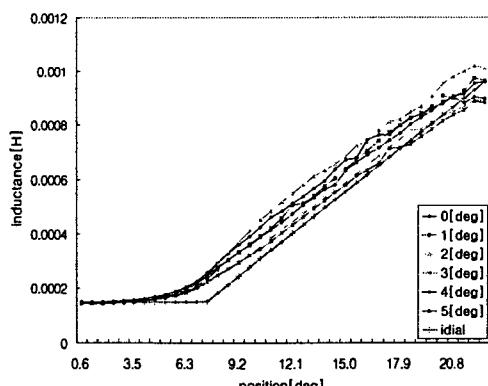


그림 6. 회전자 위치에 따른 인덕턴스

Fig. 6 Inuctance accoding to rotor position

기본설계에서 회전자 치폭을 유지시키고 비대칭각만을 변화시켜 준다면 전체적인 극호각은 늘어나게 되어 인덕턴스 기울기 구간은 늘어나게 되고 고정자와 회전자간의 주극호각이 같게 되거나 다르게 되어 데드존(dead zone) 구간은 줄어들거나 늘어나게 된다. 본 논문에서는 초기형상에서 정의한 회전자 극호각만을 유지시키고 비대칭각을 변화 주었다.

SRM의 토오크는 회전각  $\theta$ 의 함수이며, 회전자  $\theta$ 로 한상의 인덕턴스  $L$ 를 편미분한 식 (3)과 같다. 누설자속을 무시하면 그림 1에서와 같이 정토오크를 발생하는 인덕턴스( $L_{min} - L_{max}$ )는 회전자와 고정자 극호각의 중첩에 비례한다.

그림 6에서 회전자와 고정자가 충돌되기 시작하는 부분에서 인덕턴스의 기울기는 변함으로 토오크의 기울기와 같은 변하게 된다.

비대칭 회전자 적층각을  $0\sim5^\circ$  까지 변화시켰을 때, 인덕턴스의 기울기는  $1^\circ$ 의 형상변화에서 가장 이상적인 인덕턴스 값과 일치한다.  $1^\circ$  이상 형상변화를 주면 공극 부분의 릴리턴스 증가로 인하여 오히려 초기 토오크 크기가 적어지고 연속적인 동작에서 토오크 리플이 커지게 되는 경향을 살펴볼 수 있다.

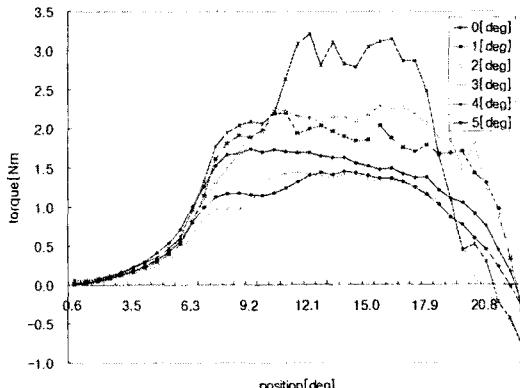


그림 7. 토오크 특성

Fig. 7 Torque characteristic

그림 8과 그림 9는 1000[rpm] 동특성 해석을 통해 초기 모델과 제안된 모델에서 회전자 위치 변화에 따른 토오크와 연속적인 토오크를 산정하여 이를 비교한 것이다. 그림 9는 그림 8에 방법으로 연속적인 토오크 파형을 비교하였다.

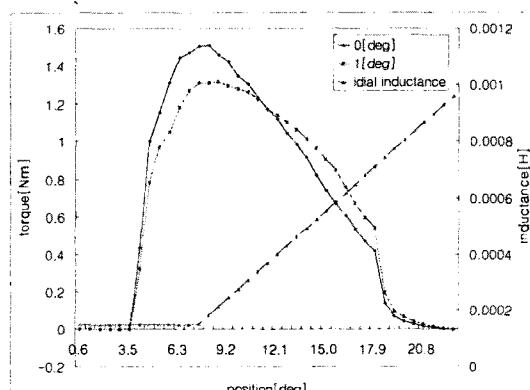


그림 8. 발생토오크 비교( $0[deg]$ ,  $1[deg]$ )

Fig. 8 Comparison of occurrence torque

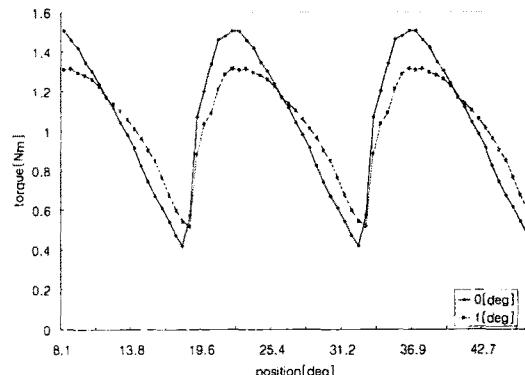


그림 9. 토오크 특성 비교( $0^\circ$ 와  $1^\circ$ )  
Fig. 9 Comparison of torque( $0^\circ$  and  $1^\circ$ )

그 결과 회전자의 형상과 토오크 및 전류 그리고 방상방향의 특성들을 고려해 보면  $1^\circ$ 변화 주었을 때가 토오크 리플을 저감할 수 있고 진동 및 소음을 저감할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 전동기의 토오크 리플을 저감하기 위한 방법 및 소음과 진동을 줄이기 위해 회전자의 적층 방법을 비대칭적으로 쌓아올렸다.

SRM의 정확한 해석을 위하여 정특성과 동특성 해석을 3D-FEM을 이용하여 해석하였다. 그 결과 토오크 리플을 최소화하는 비대칭각을 유한요소법으로 결정하였고, 토오크 및 전류 그리고 방사방향의 힘을 고려할 경우 비대칭각  $1^\circ$ 가 적합하였다. 초기형상과 제안한 회전자 비대칭 적층형상을 갖는 SRM에 비해 평균토오크는 줄어들지만 토오크리플은 감소 시킬 수 있었다. 이후 비대칭 적층 형상에 대해 강판의 두께와 제어적인 측면을 더욱 고려하여 해석 및 실험을 통한 본 논문의 타당성을 검증할 계획이다.

### [참 고 문 현]

- [1] TJE Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Magna physics publishing and clarendon press, 1993
- [2] Iqbal Husain, M. Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control", IEEE Trans. on PE, Vol.11, No.1, pp. 91-98, 1996.
- [3] Funda Sahin, H. Bulent Ertan, Kernal Leblebicioglu, "Optimum Geometry for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motors", IEEE Trans. on EC, Vol.15, No.1, March 2000
- [4] Jin Woo Lee, Hong Seok Kim, Byung Il Kwon, Byung Taek Kim, "New Rotor Shape Design for Minimum Torque Ripple of SRM Using FEM", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 40, No.2, pp.754-757, March 2004
- [5] J.Hur, G.H.Kang, J.Y.Lee, J.P.Hong, B.K.Lee, "Design and Optimization of High Torque, Low Ripple Switched Reluctance Motor with Flux Barrier for Direct Drive", IEEE IAS, Vol. 1, No.4, pp.401-408, Oct 2004