

스위치드 릴럭턴스 전동기의 토오크 리플 저감을 위한 형상 설계

김홍석*, 권병일*, 이진우*, 김병택**
 한양대학교*, 삼성전기(주)**

Shape Design for minimization Torque Ripple of Switched Reluctanc Motor

H.S.Kim*, B.I.Kwon*, J.W.Lee*, B.T.Kim**
 *Hanyang University, **Samsung Electro-mechanics Co. Ltd

Abstract - A major problems of Switched Reluctance Motor(SRM) is torque ripple which causes undesirable acoustic noise and vibration. To reduce the torque ripple two different approaches are used. One is to modify a motor geometry, the other is to manipulate motor current to improve performance. This paper presents modifications of the rotor pole shape which reduces the torque ripple.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM이라 함)는 이중 돌극형 구조이고 기계적으로 견고하며 고속운전이 용이하고 다른 전동기보다 단위중량당 토오크 및 효율이 우수하다. 그러나, SRM은 전류의 크기와 회전자와 고정자의 위치에 따라 인덕턴스의 비선형적인 특징으로 인하여 진동과 소음의 원인이 되는 토오크 리플이 크다는 단점을 가지고 있다.[1]

최근에는 SRM의 주 단점인 소음·진동의 대한 분석과 이를 억제하기 위한 새로운 제어 방식 및 드라이브 설계 분야에 많은 연구가 이루어지고 있다.[2]-[4]

SRM의 토오크 리플을 줄이는 방법으로는 전동기의 설계 측면과 제어 측면이 있다. 일반적으로 토오크 리플을 저감시키기 위한 새로운 여자 방식 및 제어 방법에 대한 연구가 이루어져 왔으나, 설계 관련 연구는 부족하다. 따라서 본 논문에서는 전동기의 회전자의 형상을 변화하여 전동기의 릴럭턴스값 변화를 통한 인덕턴스 값의 변화로 토오크 리플을 저감하였다.

2. 토오크 리플 저감을 위한 형상설계

2.1 SRM의 인덕턴스 변화와 토오크 발생

스위치드 릴럭턴스 전동기의 전압방정식은 식 (1)과 같이 표현한다

$$V = Ri + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt}$$

$$= Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (1)$$

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

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

$$W_c = \frac{1}{2} i(\theta)^2 \cdot L(\theta) \quad (2)$$

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 발생토오크는 전류에 제곱에 비례하고 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 알 수 있다.[1]

그림 1은 회전자 위치에 따라 이상적인 전류가 인가될 때의 토오크 발생과정을 보여주고 있다.

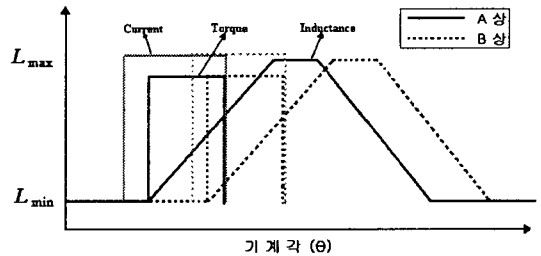


그림 1. 토오크 발생과정
 Fig 1. Torque produce

토오크가 발생하는 구간인 인덕턴스 가변 구간에서 인덕턴스의 변화량이 일정하고, 전류 변화가 없는 평활 전류를 갖도록 턴 온각과 턴 오프각을 조정하면, 전류의 변화가 0이되어, 토오크의 리플성분을 줄일 수 있게 되고 일정속도로 운전할 수 있다. 그리고, 진동·소음의 주원인인 급격한 기자력의 변화를 완화시키는 방법으로 한 상의 스위치 오프 전 다른 상이 동작하도록 중복시키는 여자방식을 채택하였다.[3]

2.2 초기형상의 구조와 해석

그림 2는 설계된 4상 8/6극 스위치드 릴럭턴스 전동기의 형상을 나타내고 있다. 본 논문에서 사용된 전동기는 회전자와 고정자의 극조각이 각각 18° 와 22° 인 13.5 [kW]급 SRM이며 표1에 모델 사양을 나타내었다.

초기형상에서 권선에 인가된 전류는 기자력의 급격한 변화를 개선하기 위하여 2상 여자방식을 사용하여 토오크 리플을 저감하고자 했으며, 적정토오크를 얻기 위한 전류의 확립을 위해 선행스위칭 각을 주었다.

2상 동시여자 구간을 이용하기 위하여 도통각을 늘려 주게 되는데, 늘어난 도통구간에 의해 상 스위치의 오프 시점이 인덕턴스가 상당히 큰 구간에서 선택되므로 상 전환시 전류의 소호시간이 길어진다. 이로 인하여 SRM의 운전 효율이 감소하게 된다.

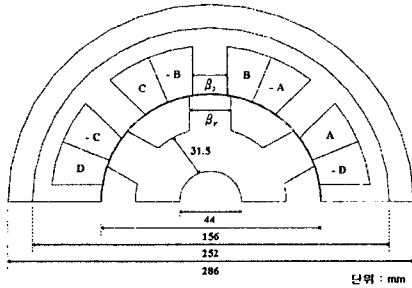


그림 2. SRM 형상 및 치수
Fig. 2 Configuration and dimension of SRM

표 1. 모델 사양
Table 1. Specification of initial model

항목	값	단위	항목	값	단위
정격출력	13.5	kW	공극길이	0.5	mm
정격전압	80	V	적층폭	157	mm
턴수	10	T/pole	코일선경	6.54	mm
고정자극수	8	-	고정자요크폭	13	mm
회전자극수	6	-	회전자요크폭	31.5	mm
기준 속도	1800	rpm	회전자극호각	22	degree
코어재질	S-40	-	고정자극호각	18	degree

해석 모델에서는 그림 3과 같이 선행각을 8° , 전류의 중첩각을 5° 를 주었으며, 300A의 전류초평을 고려하였다.

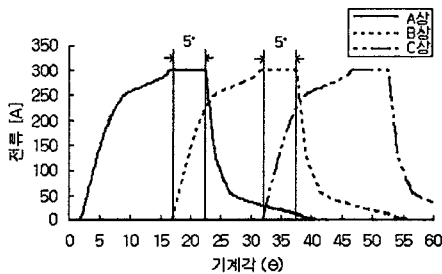


그림 3. 초기형상의 전류파형
Fig 3. Current of initial shape

속도가 1800 [rpm]으로 일정할 때, 인가된 전류에 대한 토오크 파형을 그림 4에서 나타내었다. 해석한 결과 평균 토오크는 86.4 [Nm]이며, 토오크 리플은 식 (4)에 의해서 9.5 [%]이다. 그림 5는 초기형상의 토오크 파형에 대한 고조파 분석이다.[5]

$$\text{토오크 리플} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N T_n^2}}{T_0} \times 100 [\%] \quad (4)$$

n : 고조파 차수, T_0 : 평균 토오크

2.3 변형된 형상 및 해석 결과

그림 4.의 초기형상의 토오크 파형에서 A, B부분에서 토오크가 급격히 변화한다. 토오크가 급격히 변화하는 이유는 회전자와 고정자가 중첩되기 전에 공극에서의 포

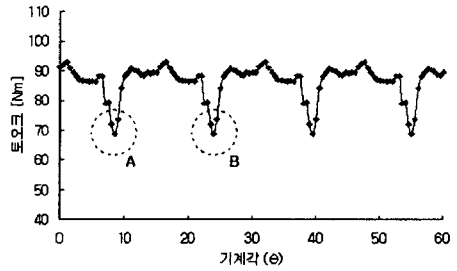


그림 4. 초기형상의 토오크 파형
Fig 4. Torque wave of initial shape

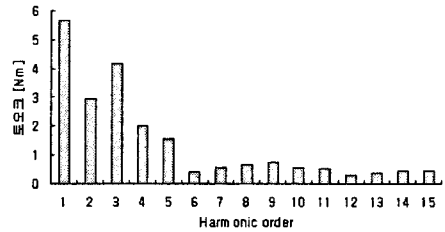


그림 5. 초기형상의 토오크 리플 고조파 특성
Fig 5. Harmonic components of initial shape of torque ripple

화현상에 의해서 그림 1과 같이 이상적인 인덕턴스가 발생하지 않고, 그림 8에서 변형된 인덕턴스와 같은 파형을 갖기 때문이다.

초기형상의 토오크 리플을 저감하기 위하여 그림 6과 같이 회전자의 회전방향측 형상만 1~7(mm) 깊이로 변화를 주었다.

그림 7에서 회전자와 고정자가 중첩되기 시작할 때의 자속선도를 나타내었다. 그림 8은 전류가 300A로 일정할 때의 회전자 위치에 따른 인덕턴스값이다. 300A를 준 이유는 토오크가 발생하는 인덕턴스 구간의 전류값이 300A 이기 때문이다.

그림 6과 같은 형상을 준 이유는 회전자와 고정자의 중첩시 그림 7 (a)와 같은 공극에서의 누설자속에 의한 포화가 일어남으로, 그림 7 (b)와 같이 누설자속이 생기는 부분의 공극의 증가를 통하여 릴럭턴스를 증가시킴으로써 그림 8과 같은 인덕턴스의 변화를 주었다.

토오크 값은 식 (3)에서 인덕턴스 기울기인 $dL(\theta)/d\theta$ 에 의해서 그림 8의 회전자와 고정자가 중첩되는 부분의 인덕턴스의 기울기가 변함으로써 토오크 파형의 변화를 줄 수 있다.

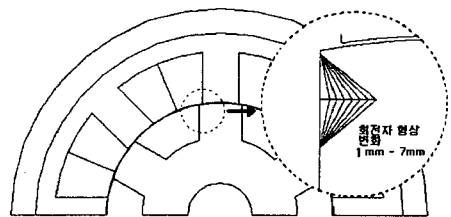


그림 6. 회전자 형상 변화.
Fig 6. Rotor pole shape design.

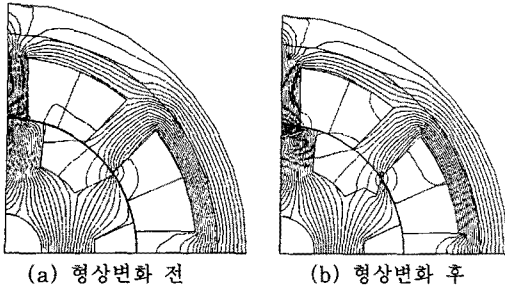


그림 7. 형상 변화 전·후의 자속 분포도
Fig 7. Magnetic Flux distribution (initial vs 7mm)

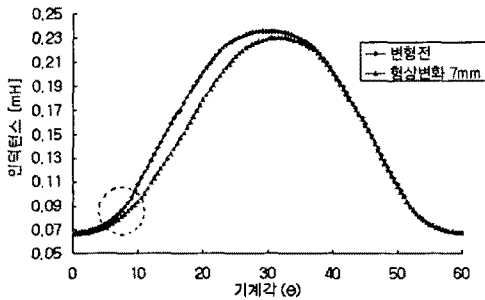


그림 8. 형상 변화 전·후의 인덕턴스 비교 (일정전류 : 300A)
Fig 8. Comparison of inductance profile (initial vs 7mm, 300A)

회전자의 형상을 회전방향으로 1~7[mm] 까지 변화를 주었을 때, 토오크 리플은 2[mm]의 형상 변화를 주었을 때가 가장 적음을 알 수 있었다. 2[mm] 이상 형상변화를 주면, 공극부분의 릴럭턴스 증가로 인하여 오히려 토오크 리플이 커지게 된다. 그림 9는 회전자 형상을 2[mm]변화 주었을 때의 전류 파형이다.

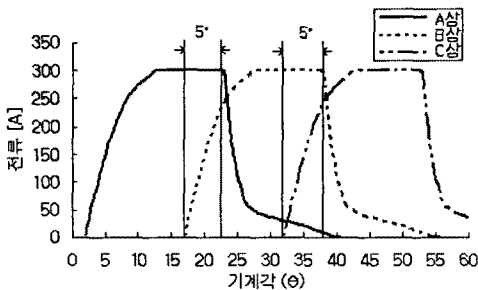


그림 9. 형상 변화시 전류파형 (2mm)
Fig 9. Current of new shape

그림 10에 형상 변화 전과 2[mm] 변화를 주었을 때의 토오크 파형을 비교하였다. 그림 11에서는 그림 10의 토오크 파형의 고조파 분석을 하였다. 고조파 분석 결과 식 (4)를 이용하여 2[mm] 형상 변화시 평균 토오크는 85.7 [Nm]이며, 토오크 리플은 5.58 [%]이다. 이상의 시뮬레이션을 통하여 회전자의 형상을 2[mm] 변화를 주었을 때, 토오크 리플이 3.92 [%] 저감됨을 알 수 있었다.

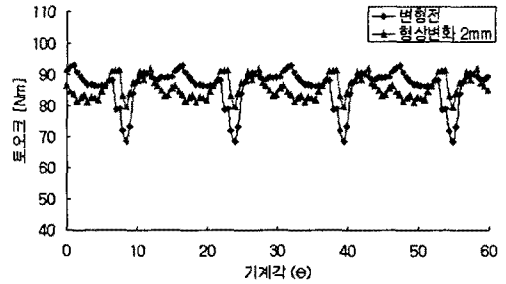


그림 10. 형상 변화 전, 2mm 깊이로 회전자 형상 변화시 토오크 파형 비교
Fig 10. Comparison of torque wave (initial vs 2mm)

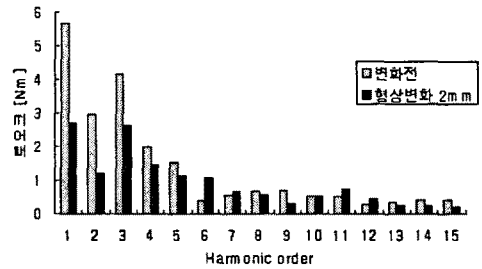


그림 11. 형상 변화 전·2mm 변화 후의 고조파 특성파형 비교

Fig 11. Comparison of harmonic components of torque ripple (initial vs 2mm)

3. 결 론

본 논문에서는 소음·진동의 원인이 되는 토오크 리플을 저감하기 위한 방법으로서 회전자의 형상변화시의 토오크 리플 저감에 대하여 살펴보았다. SRM의 정확한 해석을 위하여 구동회로를 고려한 2차원 유한요소 해석을 사용하였다. 해석 결과 회전자의 회전방향으로 2 [mm]깊이의 형상변화를 준 경우 평균 토오크는 0.7 [Nm] 감소하였지만 형상변화전의 토오크 리플 보다 3.92 [%]의 토오크 리플을 감소할 수 있었다. 이러한 결과는 SRM의 토오크리플 저감설계 시 유용한 자료가 될 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [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] 김창섭, 오석규, 안진우, "하이브리드 여자방식을 이용한 SRM의 진동 소음 저감 특성", 전기학회논문지, 제50B권 제9호, pp 438-444, 2001. 9.
- [4] Funda Sahin, H. Bulent Ertan, Kemal Leblebicioglu, "Optimum Geometry for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motors," IEEE Trans. on EC, Vol. 15, No. 1, March 2000
- [5] 김병택, "인버터 구동용 3상 능형 유도전동기의 성능향상을 위한 회전자 설계", 한양대학교 박사학위 논문, pp 45, 2000