

토오크 리플 저감을 위한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 폴 형상 최적화

최용권, 윤희성, 고창섭, 김효준<sup>(1)</sup>  
 충북대학교 전기공학과, 자화전자<sup>(1)</sup>

Pole Shape Optimization of Switched Reluctance Motor for Reduction of Torque Ripple

Yong Kwon Choi, Hee Sung Yoon, Chang Seop Koh, Hyo Jun Kim<sup>(1)</sup>  
 Chungbuk National University, Jahwa Electronics<sup>(1)</sup>

**Abstract** - This paper proposes a new stator pole shape having non-uniform air-gap in order to minimize the undesirable torque ripple of switched reluctance motor(SRM). Through numerical analysis using finite element method(FEM) and optimization, the proposed pole-shape-optimized stator is proven to give reduced torque ripple.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor : SRM)는 다른 전동기의 특성에 비하여 고효율, 안정성, 용이한 가변속도 그리고 유지보수의 불필요성 등의 장점을 가지고 있기 때문에 최근에는 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 향후 다양한 산업분야로 적용 범위가 점차 신장될 것으로 기대되고 있다.

그러나 스위치드 릴럭턴스 전동기는 고정자와 회전자 가 모두 돌극 구조를 가지는 형상적 요인뿐만 아니라 펄스 형태의 여자방식으로 인하여 진동 및 소음을 유발하는 큰 토오크 리플을 발생시키는 단점이 있다.

토오크 리플 저감에 대한 지금까지의 선행연구는 주로 턴온 각( $\theta_{on}$ )과 턴오프 각( $\theta_{off}$ ) 조정 그리고 고정자 극호( $\beta_s$ )와 회전자 극호( $\beta_r$ )를 조정하는데 초점을 두었다. 그러나 고속구동 시 여자전류의 확립을 위한 시간이 고려되어야 하기 때문에 턴온 각( $\theta_{on}$ )과 턴오프 각( $\theta_{off}$ )을 조정하여 토오크 리플을 감소시키는 것은 한계가 있다.

따라서, 본 연구에서는 턴온 각, 턴오프 각, 고정자 극호, 그리고 회전자 극호가 고정되어 있을 때 고정자 극호의 형상을 변화시킴으로써 공극길이를 조정해 이에 따른 토오크 리플특성을 조사하였으며 반응표면법(Response Surface Methodology : RSM)을 이용한 최적설계를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 초기 모델을 보여준다. 표 1은 초기 모델의 사양을 나타낸다. 그림 2는 초기 모델의 인덕턴스 프로파일을 보여주고 있다. 초기 모델의 토오크 파형 및 전류 파형의 유한요소해석(FEA) 결과는 그림3에 나타났다.

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

식 (1)에서 토오크는 전류와 인덕턴스의 함수임을 알 수 있다. 그러므로 토오크 파형이 일정하게 유지되도록 하기 위해서는 전류의 값을 일정하게 유지하고 이와 동시에  $dL/d\theta$  또한 일정한 값을 갖도록 해야 한다.

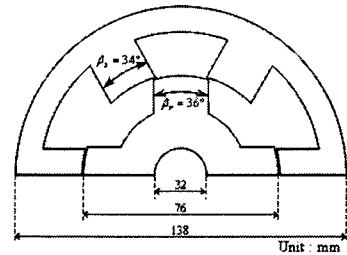


그림 1. 초기 모델  
 Fig 1. Initial Model

표 1. 초기 모델 사양  
 Table 1. Specification of Initial Model

Rated Power	3.5 [Kw]
Voltage	72 [V]
Rated Speed	6000 [RPM]
Air-gap	0.25 [mm]
Turns / Phase	18

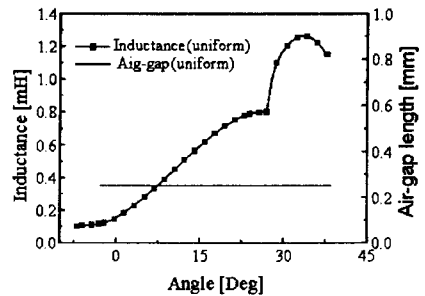


그림 2. 초기 모델의 인덕턴스 및 공극길이 프로파일  
 Fig 2. Inductance and Air-gap Profiles of Initial Model

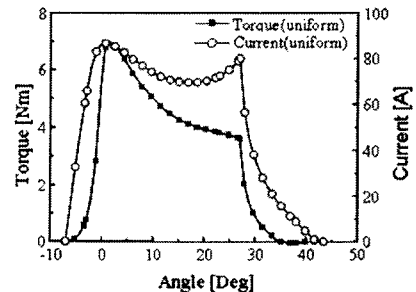


그림 3. 초기 모델의 토오크 파형 및 전류 파형  
 Fig 3. Torque and Current Profiles of Initial Model

## 2.2 설계 변수

그림 2와 그림 3의 토오크 파형에서 알 수 있듯이 토오크 감소 구간은 전류 및  $dL/d\theta$ 의 감소 구간과 대략적으로 일치한다. 따라서 본 논문은 인덕턴스 프로파일을 조정하여 전류가 일정하게 유지되도록 하는 다음과 같은 설계 변수를 제안한다.

인덕턴스 프로파일을 변화시키는 관점에서 볼 때 가장 중요한 설계 변수는 고정자와 회전자 사이의 공극 길이를 조정하는 것이다.

그림 4는 본 논문의 설계 변수  $\theta$ 에 대한 설명이다. 초기 형상의 고정자 돌극의 중심을  $\theta$ 만큼 이동하여 새로운 중심  $(x', y')$ 에서 반지름이  $R$ 인 원을 그려 균일하지 않은 공극을 만드는 과정을 나타낸다.

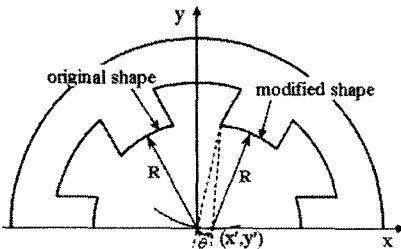


그림 4. 토오크 리플 저감을 위한 설계 변수  
Fig 4. Design Variable for Reduction of Torque Ripple

## 2.3 $\theta$ 의 변화에 따른 해석 결과 비교

그림 5와 그림 6은 초기 모델 및  $\theta = 0.5^\circ$ 인 모델의 인덕턴스 프로파일, 전류 파형 그리고 토오크 파형의 비교를 보여준다.

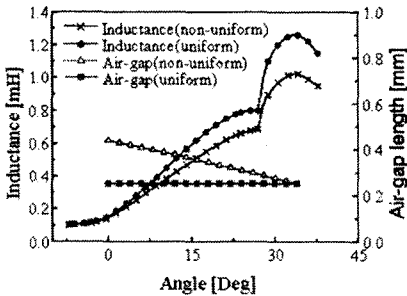


그림 5. 초기 모델 및  $\theta = 0.5^\circ$ 의 인덕턴스 파형 비교  
Fig 5. Comparison of Inductance Profiles ( $\theta=0^\circ$  Vs.  $\theta=0.5^\circ$ )

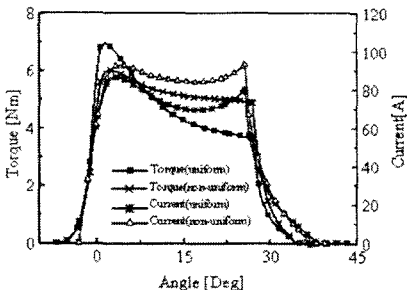


그림 6. 초기 모델 및  $\theta = 0.5^\circ$ 의 토오크 및 전류 파형 비교  
Fig 6. Comparison of Current and Torque Profiles ( $\theta=0^\circ$  Vs.  $\theta=0.5^\circ$ )

그림 7과 그림 8은 초기 모델 및  $\theta = 1.0^\circ$ 인 모델의 인덕턴스 프로파일, 전류 파형 그리고 토오크 파형의 비교를 보여준다.

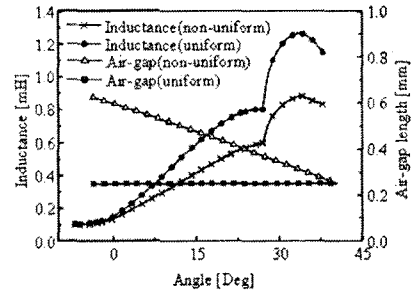


그림 7. 초기 모델 및  $\theta = 1.0^\circ$ 의 인덕턴스 파형 비교  
Fig 7. Comparison of Inductance Profiles ( $\theta=0^\circ$  Vs.  $\theta=1.0^\circ$ )

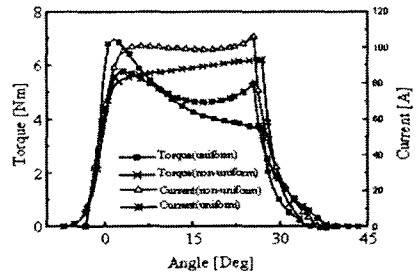


그림 8. 초기 모델 및  $\theta = 1.0^\circ$ 의 토오크 및 전류 파형 비교  
Fig 8 Comparison of Current and Torque Profiles ( $\theta=0^\circ$  Vs.  $\theta=1.0^\circ$ )

앞에서 언급한 것과 같이 설계 변수  $\theta$  값의 변화에 따라 인덕턴스 프로파일에 변화가 나타났으며 이로 인하여 전류 및 토오크 파형이 가변됨을 확인하였다.

위의 결과는 또한 토오크 파형은  $dL/d\theta > 0$ 인 구간에서 전류 파형에 상당히 종속적임을 알려준다.

## 3. 반응표면법(RSM)을 이용한 최적화

### 3.1 설계 영역

표 2는 반응표면법(Response Surface Methodology)에서 가장 일반적으로 사용되는 중심합성계획법(Central Composite Design : CCD)을 이용하여 설계 변수의 범위를 정한 것이다.

표 2. 설계 변수의 범위  
Table 2. The Level of Design Variable

Coded Values	-1.414	-1.0	0	1.0	1.414	
Real Values	$\theta$ [°]	0	0.15	0.5	0.85	1

$$T_{ripple} = T_{max} - T_{min} \quad (2)$$

본 논문에서는 토오크 리플을 저감하기 위한 목적함수를 식 (2)와 같이 정의하였다.

그림 9는 토오크 리플에 대한 반응표면을 보여준다.

$\theta = 0.805^\circ$ 인 경우, 반응표면법과 유한요소해석에 의한 토오크 리플 결과는 각각 0.3828과 0.22824의 값을 나타내었다.

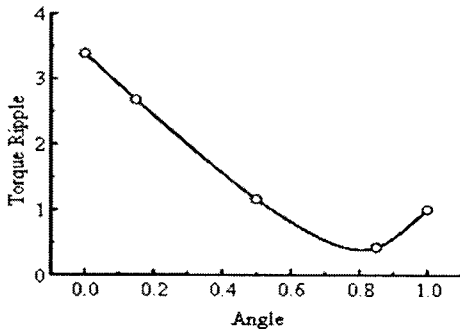


그림 9. 토오크 리플에 대한 반응표면  
Fig 9. Response Surface for Torque Ripple(First Iteration)

그림 10은 위의 설계 변수 범위보다 작은 구간에서 샘플 포인트를 추출하여 추가한 후의 토오크 리플에 대한 반응표면을 보여준다. 최종 반응표면은 15개의 샘플 포인트로 구성되어 있다. 그림 10의 결과로부터 최적점은  $\theta = 0.766^\circ$ 임을 알 수 있다.

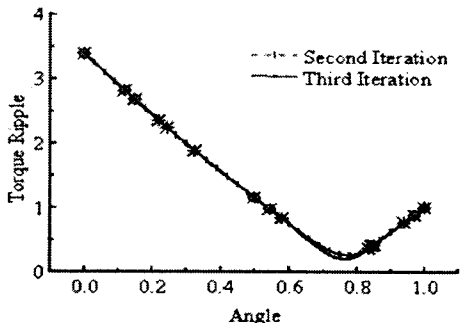


그림 10. 토오크 리플에 대한 반응표면  
Fig 10. Response Surface for Torque Ripple(Second and Third Iteration)

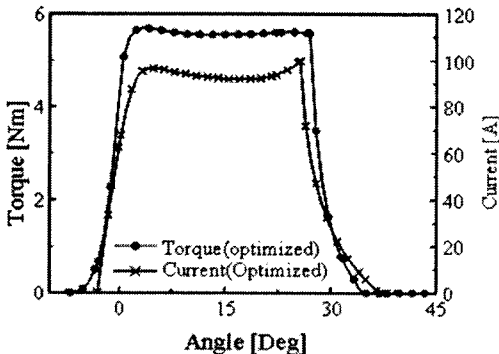


그림 11. 최적화 모델의 토오크 및 전류 파형  
Fig 11. Torque and Current Profiles of Optimized Model

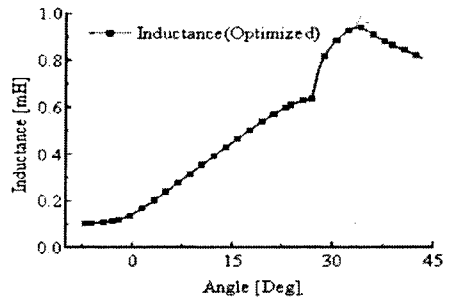


그림 12. 최적화 모델의 인덕턴스 파형  
Fig 12. Inductance Profiles of Optimized Model

그림 11과 그림 12는  $\theta = 0.766^\circ$ 인 경우의 토오크 파형, 전류 파형 그리고 인덕턴스 프로파일을 보여준다.

위에서 언급한 것과 같이 전류 파형은 거의 일정하게 유지되고 있으며  $dL/d\theta$  또한 초기 모델과 비교하여 일정한 값을 가지고 있음을 알 수 있다.

표 3에서 알 수 있듯이 반응표면법에 의한 토오크 리플 값은 유한요소해석 결과와 비교하여 큰 오차가 없음을 보여준다.

표 3. 최적설계 결과  
Table 3. Optimum Result of Analysis Model

Optimum Result	FEA		RSM	
		$T_{ripple}$		$T_{ripple}$
Optimized Model	$0.766^\circ$	0.18		0.20
Initial Model	$0^\circ$	3.38691		

#### 4. 결 론

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 가장 큰 문제점인 토오크 리플을 저감하기 위한 방법으로 고정자 돌극의 형상 변화를 통한 균일하지 않은 공극을 갖는 모델을 제시했다.

고정자 돌극의 형상 변화는 인덕턴스 파형의 변화를 초래하여 전류가 일정하게 유지되도록 하였으며 그 결과 토오크 리플이 상당히 감소하였다.

그리고 반응표면법을 적용하여 최적화를 수행하였고 유한요소해석을 통하여 그 결과의 유용성을 확인하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] TJE Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Magna Physics Publishing, 1993
- [2] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", CRC Press, 2001
- [3] N. Sheth, et al., "Effects of non-uniform air-gap on the torque characteristics of a switched reluctance motor," IEEE Trans. on Magn., Vol. 40, No. 4, pp. 2032-2034, July 2004
- [4] 김윤현, 최재학, 김솔, 이주, 류세현, 성하경, 임태민, 박진환 "스위치드 릴럭턴스 전동기의 토오크 리플 저감 설계", 대한전기학회논문지, Vol. 50B, No. 7, pp. 339-349, July 2002
- [5] J. Hur, et al., "Design and Optimization of High Torque, Low Ripple Switched Reluctance Motor with Flux Barrier for Direct Drive," IAS, pp.401-408, 2004
- [6] P. Alotto, et al., "A Multiquadrics-based Algorithm for the Acceleration of Simulated Annealing Optimization Procedures," IEEE Trans. on Magn., Vol. 32, No. 3, pp. 1198-1201, May 1996
- [7] 박성현, "현대실용계획법", 민영사, 2001