

# 온라인 턴오프각제어를 통한 SRM의 성능최적화에 관한 연구

정병호 조금배 백형래\* 김동휘\*\*, 김대곤\*\*\*, 김평호\*\*\*\*  
 조선대학교\*, 한영대학\*\*, 전남과학대학\*\*\*, 서강정보대학\*\*\*\*

## Online Turn-off Angle Control for Performance Optimization of the SRM

B. H. Jeong, G. B. Cho, H. R. Baek, D. H. Kim, D. G. Kim, P. H. Kim  
 Chosun Univ., HanYoung College, Chonnam Science College, Seokang College

### ABSTRACT

This paper represent improved On-line Turn off Angle control schemes for switched reluctance motors based on current control. For the purpose of the finding optimal commutation switching angle point, it is utilized turn on and turn off position calculation with inductance vs. current vs. flux linkage analysis method. The goal of proposed paper is the maximization of the energy conversion per stroke and maximizing efficiency and obtaining approximately flat-topped current waveform. The proposed control scheme is demonstrated on a prototype experimental system.

### 1. 서론

고성능 SRM 드라이브의 연구는 주로 토크리플 저감과 에너지효율의 최적화에 대한 연구가 그 주류를 이루고 있다.<sup>[1]</sup> 이를 위해 고정자나 회전자 구조와 같은 설계 사양을 변화시키는 방법과 인가전압과 전류의 크기, 턴 온과 턴 오프 각 및 부하조건 등의 운전 파라미터를 최적으로 조합시켜 운전하는 제어기법등의 방식들이 다양한 제안되고 있다.<sup>[2][3][4]</sup>

본 논문에서는 최적의 턴 오프각의 선정을 통한 토크제어방식을 제안하는데 이는 전류제어방식이 적용된 SRM 드라이브에서 토크리플을 최소화하기 위한 최적의 턴 온, 턴 오프각의 온라인 결정방식이다. 또한 제안된 시스템에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 불확실성을 가진 모델링에 대해 보장하고 자기 곡선이나 고정된 토크곡선이 요구되지 않기 때문에 기존의 하드웨어에 쉽게 적용될 수 있다는 장점이 있다. 새로운 제어 알고리즘은 컨트롤러의 비용이나 복잡성에 영향을 미치지 않으며 시뮬레이션과 실험결과를 통해서 제안된 제어기의 동작의 특성을 실제적으로 검증한다.

### 2. 인덕턴스에 따른 스위칭각의 해석

그림1에서는 이상적인 인덕턴스 프로파일(프린징을 무시)과 자속해교 프로파일, 듀티사이클에 의한 전압, 그리고 소프트 초핑방식에 의해 전류제어(Current Control)된 SRM 드라이브의 자속해교의 동작과형을 보여주고 있다. Dwell각의 0에서부터 피크값에 이르는 시간으로 설정되고 전동기의 상전류를 위한 단일 펄스 동작은 듀티 사이클이 일정해지면서 전류

(Commutation)가 이루어지므로 동작의 파형은 턴 온각, 턴 오프각, 듀티사이클에 의해서 특징지어진다.

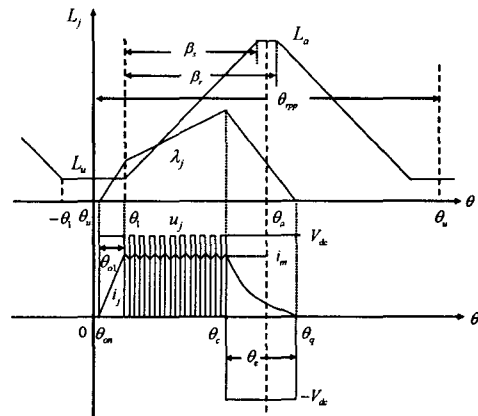


Fig. 1 Running Waveform of a Current Controlled Drive with Soft-Chopping Strategy

그림 1 소프트 초핑방식을 이용한 전류제어 드라이브의 동작파형

이상화하여 나타난 인덕턴스프로파일은 회전자와 고정자의 극호각의 크기에 따라 결정되며 인덕턴스의 최대값은 고정자의 극호각의 크기에 따라 다르다.

### 3. 최적의 턴 온각과 턴 오프각의 결정

최소 전류에 대한 최대 토크를 발생시키기 위한 상에 대한 스트로크 각은 다음과 같이 주어진다.

$$\theta_s = \frac{2\pi}{qN_r} \tag{1}$$

여기서  $q$ 는 상의 수이고  $N_r$ 은 회전자 극수이므로 4-상, 8/6 SRM의 경우  $\theta_{sk}$ 는 15°가 된다.

두 개의 이웃한 상의 자속해교 프로파일이 오버래핑되는 영역은 음의 토크를 발생시킨다. 최적의 전류각(Commutation Angle)이 두 개의 이웃한 전동기 상에 의해 자속해교되는 특성을 보이고 두 개의 자속해교특성 곡선의 교차각  $\theta_c$ 가 존재한다.

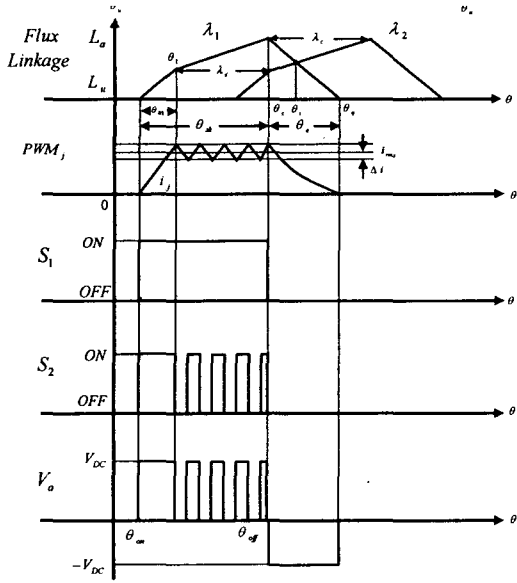


Fig. 2 Waveforms Considering the Overlapping Flux Linkage Profiles

그림 2 두 상의 중첩되는 자속쇄교 프로파일과 동작파형

그림 2에서는 SRM 동작 기준으로 설정된 임의의 상에 대한 동작의 전류파형, 전압파형, 두 개의 이웃한 상의 자속 쇄교파형이 오버래핑되는 형태를 회전각에 변화에 따라 보여준다.  $\theta_c - \theta_{on}$  간격동안 자속은 두 개의 이산 섹션에서 증가한다. 그림 2에서 초평동작 기간동안의 상 A의 자속쇄교는 다음의 식(2)와 같다.

$$\lambda_1^r = \frac{\lambda_c - \lambda_d}{\theta_c - \theta_1} (\theta - \theta_1) + \lambda_d \quad (2)$$

이웃한 상 B의 초평동작 기간동안 상 A에 대한 스트로크 각에 의해 지연되므로 상 B의 자속 쇄교는 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_2^r = \frac{\lambda_c - \lambda_d}{\theta_c - \theta_1} (\theta - \theta_1 - \theta_{sk}) + \lambda_d \quad (3)$$

최적의 턴 온 각이 일정하게 유지될 때 각  $\theta_1$ 에서의 자속쇄교는 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_d = L_u i \quad (4)$$

그리고 전도각  $\theta_c$ 에서 최대 자속쇄교는

$$\lambda_c = \frac{V_{dc} \theta_e}{\omega_r} \quad (5)$$

자속감소기간( $\theta_e = \theta_q - \theta_c$ )에서 전체 음의 전압은 상권선에 공급되기 때문에 자속 쇄교는 선형적으로 감소하고 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_1^f = \lambda_c \left(1 - \frac{\theta - \theta_c}{\theta_e}\right) \quad (6)$$

교차각  $\theta_f$ 위에서 상1과 상2의 자속쇄교는 같으므로

$$\lambda_1^f = \lambda_1^r = \frac{\lambda_c}{2} \quad (7)$$

최적의 턴 오프각 조건은 다음과 같다.

$$\theta_c^{opt} = \theta_1 + \theta_{o1} + 2\theta_{sk} - 2\theta_{sk} \frac{\theta_{o1}}{\theta_e} - \theta_e \quad (8)$$

식 (8)의 조건으로부터 최적의 전류각을 계산하기 위하여 회전각 간격  $\theta_{o1}$ 와  $\theta_e$ 의 측정이 요구됨이 포함되어 있다. 그러므로  $\theta_{o1}$ 와  $\theta_e$ 의 간격의 측정을 통해서 속도와 부하토크의 요구를 고려한 정보가 공급된다.

#### 4. 최적의 제어기의 적용

제안된 SRM의 제어의 효율성을 확보하기 위해 4상, 1마력의 8/6 SRM의 모델이 시뮬레이션에 적용되었다.

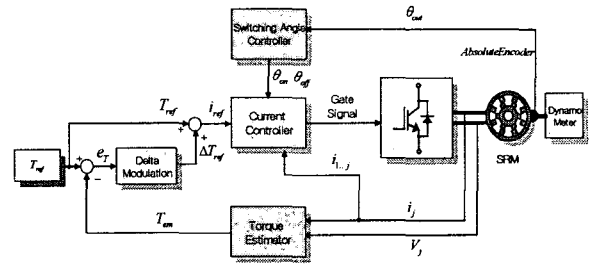


Fig. 3 Block Diagram of the test SRM Drive Controller

그림 3 시험용 SRM 드라이브 제어기의 블록 다이어그램

모델로 적용된 SRM의 파라미터는 표1에서 보여주는 바와 같다.

Table 1 Four phase, 8/6 SRM Parameter

표 1 4상 8/6 SRM의 파라미터

Parameter	Value
Phase winding resistance	$R = 1.2 [\Omega]$
Stroke Angle	$2\pi/q N_r = 15^\circ$
Aligned Phase Inductance	$L_a = 8.8 \text{ mH}$
Unaligned Phase Inductance	$L_u = 48.2 \text{ mH}$
stator pole arc	$\beta_s = 23^\circ$
rotor pole arc	$\beta_r = 23^\circ$

제안된 SRM과 드라이브는 Matlab Simulink를 이용하여 시뮬레이션하였다. 전체시스템은 Simulink를 이용하여 시뮬레이션하였고 실행속도를 위해 전동기는 m-file을 이용하여 수행하였다. 그림 8은 4상 SRM에 대한 입력전압파형을 보여준다.

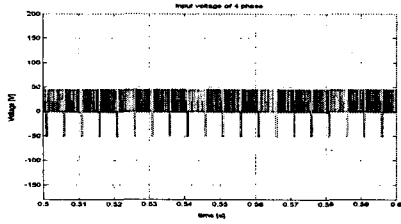
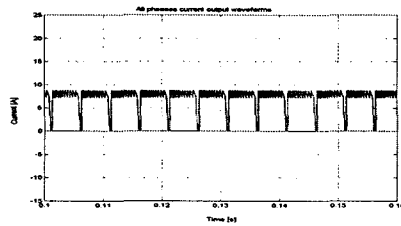


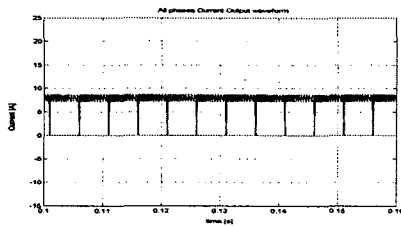
Fig. 4 Simulation Result of Voltage waveform at 500rpm, in a four-phase

그림 4 4상 500rpm에서 전압파형의 시뮬레이션 결과

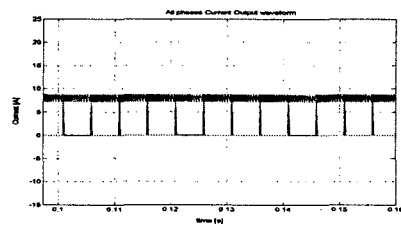
그림 10의 (a)에서는 최대효율을 위한 스위칭각제어 방식을 (b)에서는 최적의 턴 오프각 제어방식을 (c)에서는 토크리플 최소화를 위한 제어방식에 따른 각 상의 전류파형을 보여준다.



(a) Minimum loss operation



(b) Optimal turn-off angle control

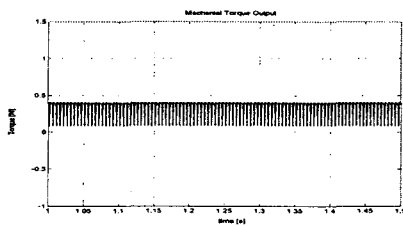


(c) Torque ripple minimize operation

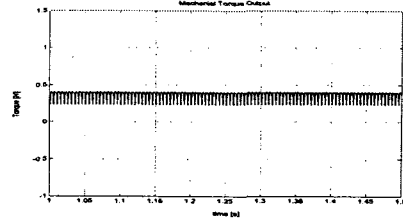
Fig. 5 Simulation Result of current waveform at 500rpm, in a four-phase

그림 5 4상 500rpm에서 전류파형의 시뮬레이션 결과

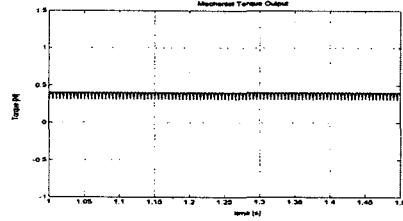
그림 11는 제어방식에 따른 각 상의 토크 파형을 보여준다.



(a) minimum loss operation



(b) Optimal turn-off angle control



(c) Torque ripple minimize control

Fig. 6 Simulation Result of Torque waveform at 500rpm, torque step variation

그림 6 500rpm에서 토크의 스텝변화에 따른 시뮬레이션파형

최적의 성능의 동작이 턴 온과 턴오프각의 최적의 제어기로부터 최대 에너지효율과 최소토크리플동작과 비교된다. 제안된 최적의 제어가 적용되어 효율과 토크리플 사이의 기준이 적용될 수 있는 기준이 마련되었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 전류 제어방식이 적용된 SRM 드라이브의 성능 최적화를 위한 온라인 턴 오프각에 대한 제어방식이 제안되었다. 턴 오프각의 제어 목표는 에너지 효율과 토크 리플 기준사이의 적절한 균형이 이루어지도록 분석적인 방식을 통해 최적의 온라인 턴 오프 각의 결정에 관한 전류제어 방식이 제안되었다. 향후 부하 변동이 큰 견인구동용 드라이브의 특성에 따른 효과적인 적용방법에 대한 연구가 요구된다.

## 참고 문헌

- [1] Christos Mademlis and Iordanis Kioskeridis "Performance Optimization in Switched Reluctance Motor With Online Commutation Angle Control" IEEE transactions on energy conversion, Vol. 18, NO. 3, September 2003, pp. 448-457.
- [2] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szczesny, and W. H. Bicknell, "Microcomputer control of switched reluctance motor", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-22, pp. 708-715, July/Aug. 1986.
- [3] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, P. T. Blenkinsop, J. Corda, and N. N. Fulton, " Variable speed reluctance motors", Proc. Inst. Elect. Eng. B, vol. 127, no. 4, pp. 253-265, July 1980.