

# 온라인 턴 오프각제어를 통한 SRM의 성능최적화

鄭炳湖<sup>†</sup>, 崔然玉<sup>\*\*</sup>, 李康淵<sup>\*\*\*</sup>, 曹錦培<sup>\*\*\*\*</sup>, 鄭壽福<sup>†</sup>

## Online Turn-Off Angle Control for Performance Optimization of the Switched Reluctance Motor

Byeong-Ho Jeong, Youn-Ok Choi, Kang-Yeon Lee, Geum-Bae Cho, Soo-Bok Chung

### 요 약

본 논문에서는 개선된 온라인 턴 오프각 제어방식을 이용하여 스위치드 릴럭턴스 전동기의 성능최적화를 위한 온라인 전류제어방식을 제안한다. 성능최적화를 위한 제어방식은 에너지효율의 최대화와 토크리플 저감이라는 두 가지 측면에서 접근하며, 두 가지 조건을 모두 만족할 수 있는 최적의 턴 오프 위치각은 제안된 알고리즘의 연산방식을 통해 획득된 턴 오프각 제어를 통해 구현됨으로서 SRM의 성능최적화를 이룬다. 제안된 제어기는 토크와 전류 특성, 자속변동의 정보와 같은 복잡한 데이터베이스나 SRM이 가지는 고유의 자화곡선을 요구하지 않는다는 장점을 가지며 제안된 연산 제어기를 시뮬레이션과 실험을 통해 실제 적용가능성과 그 타당성을 입증한다.

### ABSTRACT

This paper represent improved on-line turn off angle control schemes for switched reluctance motors based on current control. For the purpose of finding the optimal commutation switching angle point with improved controller, 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 torque ripple reduction and obtaining approximately flat-topped current waveform. The proposed control scheme is demonstrated simulation and on a prototype experimental system.

**Key Words** : switched reluctance motor, optimal turn off angle control, performance optimization, soft chopping strategy

### 1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기의 고유의 특성인 간결한 구조, 낮은 생산단가, 적은 관성, 고속 전동기로의 실

현가능성 등은 가변속 드라이브 응용장치 분야에서 비교적 우수한 성능을 보유하고 있다고 알려져 있다.<sup>[1]</sup> 그러나 적절한 스위칭동작을 위한 회전자 위치정보의 획득이 필수적이고 타 전동기에 비해 상대적으로 높은 토크리플은 기계적인 진동과 노이즈를 발생시키는 원인이다. 또한, 이중돌극형 구조와 고정자와 회전자극이 부분적으로 오버래핑되는 위치에서의 강한 자기포화에 의한 비선형성으로 인해 동적 특성 분석에 어려움이 있다.<sup>[2]</sup> 따라서 전동기의 성능을 평가하고 분석하는데 기준프레임 방식으로는 SRM의 분석이 이루어질 수 없고 수치해석적인 방식이나 구조 해석적인 방

<sup>†</sup>교신저자 : 정회원, 조선대 전기공학과 교수

E-mail : sbjung@chosun.ac.kr

<sup>\*</sup>정회원, 도립남도대학 강사

<sup>\*\*</sup>정회원, 조선대 전기공학과 BK연구교수

<sup>\*\*\*</sup>정회원, 조선대 강사

<sup>\*\*\*\*</sup>정회원, 조선대 전기공학과 교수

접수일자 : 2006. 7. 18

1차 심사 : 2006. 8. 22

2차 심사 : 2006. 9. 30

심사완료 : 2007. 1. 24

식이 주로 채택되고 있다.<sup>[3]</sup>

고성능 SRM 드라이브의 연구는 주로 톨리플 저감과 에너지효율의 최적화에 대한 연구가 그 주류를 이루고 있으며 이를 위해 고정자나 회전자의 구조와 같은 설계 사양을 변화시키는 방법과 인가전압과 전류의 크기, 톨 온각과 톨 오프각 및 부하조건 등의 운전 파라미터를 최적으로 조합시켜 운전하는 제어기법과 같은 다양한 방식들이 제안되고 있다.<sup>[4]</sup> 또한 자기동조 제어방식의 경우, 비선형 모델을 이용하고 회귀적인 인식 알고리즘을 이용하여 온라인 업데이트된 데이터를 이용하므로 많은 프로세서가 이용되며 또한 몇 개의 사이클이 소모된다.<sup>[5]</sup>

SRM의 전류방식(Commutation Strategy)은 톨-속도 범위, 전동기 효율, 톨리플, 노이즈등의 주요한 특성을 지배하며 전동기의 성능을 결정하게 된다. 전류제어 알고리즘을 구현하고자 할 때, 이러한 영역들에 대한 사항이 고려되어야 한다.<sup>[6]</sup>

본 논문에서는 최적의 톨 오프각의 결정을 통한 성능최적화 구현을 위한 제어방식을 제안하는데 이는 전류제어방식이 적용된 SRM 드라이브에서 톨리플을 최소화하며 에너지효율을 최대화하기 위한 최적의 톨 오프각의 온라인 결정방식으로 적용된다. 또한 제안된 시스템에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 불확실성을 가진 모델링에 대해 보장하고 자기곡선이나 고정된 톨곡선이 요구되지 않기 때문에 기존의 하드웨어에 쉽게 적용될 수 있으며 컨트롤러의 추가비용이나 복잡성에 영향을 미치지 않는다. 시뮬레이션과 실험결과를 통해 제안된 최적화된 제어기의 동작특성을 실제적으로 검증한다.

## 2. 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성

### 2.1 SRM의 톨특성

스위치드 릴럭턴스 전동기는 각각의 상이 독립적으로 여자하며, 여자하는 고정자 극의 권선 인덕턴스가 최대가 되는 위치로 회전자가 움직이려는 경향에 의해 톨가 발생된다. 또한 자속쇄교는 회전자 위치의 높은 비선형성을 가진 함수로 나타낼 수 있고 회전자의 정렬된 위치 주위의 자속 경로는 포화될 수 있다. 각각의 상  $j$ 에 대한 전압방정식은 식(1)과 같다.

$$V_j = Ri_j + \frac{d\lambda_j(i, \theta)}{dt} \quad (1)$$

일정속도 영역에서 자속쇄교에 대한 변화율은 식(2)와 같다.

$$\frac{d\lambda_j}{dt} = \frac{\partial \lambda_j}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial \lambda_j}{\partial \theta} \cdot \omega_r = L_j(i, \theta) \frac{di}{dt} + e_j \quad (2)$$

여기서  $L_j(i, \theta) = \partial \lambda_j / \partial i$ 는 증가형 인덕턴스(회전자 위치각  $\theta$ 에서 자화곡선의 기울기)이고  $e_j$ 는 역기전력이다. 각각의 상에 의해 발생된 순시적인 전자기 톨는 임의의 상의 Co-energy의 부분적분으로 주어지고 D' Lambert의 원리로부터 유도되며 식(3)과 같다.

$$T_j(i, \theta) = \left. \frac{\partial W(i, \theta)}{\partial \theta} \right|_{i=constant} \quad (3)$$

여기서  $W(\theta, i) = \int_0^i \lambda di \big|_{\theta=constant}$ 이며, 총 순시 톨는 식(4)와 같이 각각의 개별적인 상 톨의 합과 같다.

$$T_{inst}(\theta, i) = \sum_{phase}^j T_{ph}(\theta, i) \quad (4)$$

식(4)를 적분하고,  $\theta_{sk}$ 를 스트로크각이라고 할 때, 평균 톨는 식(5)과 같이 유도될 수 있다.

$$T_{avg} = \frac{1}{\theta_{sk}} \int_0^{\theta_{sk}} T_{inst} d\theta \quad (5)$$

정상상태 동작에서 톨 리플은 순시 톨의 최대값과 최소값을 평균 톨로 나누어서 백분율로 표시한 것으로 식(6)과 같다.

$$Torque\ Ripple = \frac{T_{inst}(max) - T_{inst}(min)}{|T_{avg}|} \times 100\% \quad (6)$$

### 2.2 SRM의 동작특성

4상 SRM 드라이브의 파워 컨버터 톨폴로지는 그림 1에서 보는 것처럼 한 개의 상은 제어 가능한 두 개의 스위칭 반도체 소자와 두 개의 다이오드가 한 개의 상을 여자시킬 수 있도록 구성된다. 이런 형태의 컨버터를 비대칭 브리지 컨버터라고 부르며 가장 일반적으로 적용되는 형태이고 상전류 중첩이 용이하고 제어특성

이 우수한 토폴로지로 잘 알려져 있다.<sup>[7]</sup>

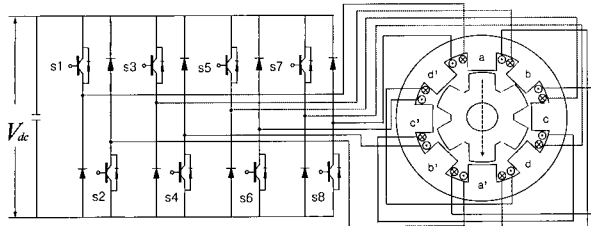


그림 1 8/6 SRM 단면과 비대칭 브리지컨버터의 연결  
Fig. 1 Cross-sectional 8/6 SRM structure with asymmetric bridge converter circuit

각각의 상에서 자속쇄교  $\lambda_j$ 는 회전자 위치의 주기적인 함수로 나타나기 때문에 식(7)과 같이 비선형 연속함수로 나타낼 수 있다.

$$\lambda_j(i_j, \theta) = \lambda_s(1 - e^{-i_j \cdot f_j(\theta)}), i_j > 0 \quad (7)$$

SRM의 효율을 1회전당 평균토크와 회전속도 그리고 전압과 전류와의 관계는 식(8)과 같다.

$$\eta = \frac{T \cdot \omega_m}{V_{dc} \cdot i_{dc}} \times 100[\%] \quad (8)$$

여기서  $i_{dc}$ 는 각각의 상에 대한 인가전류의 평균값이다.

### 3. 최적의 턴 온각과 턴 오프각의 결정

#### 3.1 인덕턴스와 자속쇄교곡선에 따른 스위칭각의 해석

SRM의 비선형성에 대한 수학적 해석은 FEM이나 분석적 모델을 통한 해석방식이 적용되며 이는 매우 복잡하여 SRM의 성능최적화 방식에서는 전동기의 동작과형에 대한 분석적 접근방식이 유리하다.<sup>[1,8]</sup> 그림 2는 프린징을 무시한 이상적인 인덕턴스와 자속쇄교 프로파일, 듀티사이클에 의한 전압, 그리고 소프트 초핑 방식에 의해 전류제어(Current Control)된 SRM 드라이브의 자속쇄교의 동작과형을 보여준다.

회전자와 고정자의 극호각을 각각  $\beta_s, \beta_r$ 이라 하고 임의의 기준상의 자속을  $\lambda_j$ 라 정의한다. 전류는  $\theta_{on} - \theta_c$  동안에 여자되고, 전류포인트(Commutation Point)  $\theta_c$ 에서 이웃한 상으로 전류되며 이를 전류각

이라 한다. 또한 전류각은 토크의 변동에 의한 자속쇄교값의 변화에 대해 일정하다고 가정한다.

여기서, 임의의 기준 상인 자속  $\lambda_j$ 를 여자시켰을 때, 회전자 극이 고정자 극에 접근하는 동안 전동기의 기계적인 동작이 이루어진다.

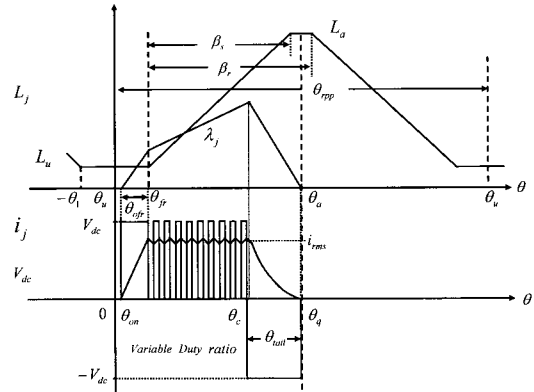


그림 2 소프트 초핑방식이 적용된 전류제어의 동작과형  
Fig. 2 Current controlled with soft-chopping strategy

#### 3.2 최적의 턴 오프각 결정

최적의 턴 오프각은 최대 에너지효율과 토크리플 저감의 상관관계에서 찾을 수 있다. 즉, 최대 에너지효율을 위한 제어방식은 여자상의 전류에 대한 충분한 프리휠링 시간을 확보함으로써 효율을 높이고, SRM의 구조적인 고유 특징인 토크리플을 최소화할 수 있는 최적의 턴 오프각을 확보하는 방식이다. 또한 이를 위한 적응제어 알고리즘을 통한 동조가 이루어지거나 절대적인 위치정보를 획득할 수 있는 위치센서(엔코더) 및 센서회로를 통해서 회전자의 기계적인 위치정보를 획득해야만 한다.

모터링 구간 내에 존재하는 턴 온각은 상전류 기준 값  $i_{ref}$  이 각  $\theta_{on}$ 에서 여자되기 때문에 고정자와 회전자 극이 오버래핑되고 인덕턴스가 상승하는 동안에서만 선택되어진다. 최소 전류에 대한 최대 토크를 발생시키는 스트로크각은 식(9)과 같다.

$$\theta_{sk} = \frac{2\pi}{qN_r} [^\circ] \quad (9)$$

여기서  $q$ 는 상의 수이고,  $N_r$ 은 회전자 극수이므로 4상, 8/6 SRM의 경우  $\theta_{sk}$ 는  $15^\circ$ 가 된다. 권선 저항  $R$ 과 프린징효과가 무시된다면 기준 상의 전류  $i_j$ 를 여자시키기 위해 선행스위칭각내에서 턴 온 되어야만

하고 이를  $\theta_{fr} - \theta_{on}$ 으로 정의하였다. 또한 회전자 위치의 비정렬된 위치에서의 자속쇄교는 식(10)과 같다.

$$\lambda_u = L_u \cdot i_{rms} \quad (10)$$

그림 3은 8/6 SRM의 이웃한 두 상의 오버래핑되는 영역을 인덕턴스, 전류, 토크, 자속쇄교의 프로파일을 이상화하여 나타낸다.

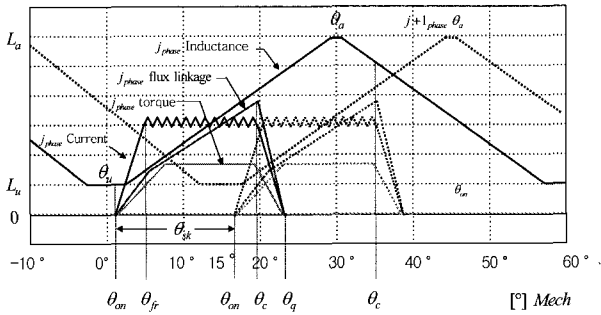


그림 3 두개 상의 중첩되는 인덕턴스, 전류, 토크, 자속쇄교 프로파일의 선형화

Fig. 3 Linearized of overlapping inductance, current, torque and flux linkage profiles of two phases

$\theta_{fr}$ 은 토크각의 시점으로 턴 온각사이의 선행스위치 각이 되고  $\theta_{fr} - \theta_{on}$ 은  $\theta_{ofr}$ 로 정의되며 식(11)과 같다.

$$\theta_{ofr} = \theta_{fr} - \theta_{on} = \frac{\omega_r \cdot L_u \cdot i^*}{V_{dc}} \quad (11)$$

여기서  $i^*$ 는 토크전류를 의미한다. 턴 온각은 식(12)과 같이 정의된다.

$$\theta_{on} = \theta_a + \theta_{fr} - \frac{\omega_r \cdot L_u \cdot i^*}{D \cdot V_{dc}} \quad (12)$$

여기서  $\theta_a$ 는 회전자 위치의 정렬위치각이다.

$\theta_{fr}$ 에서  $\theta_c$ 사이의 간격동안 상전류는 전류제어기(Current Controller)에서 제공한 기준값을 추종하도록 제어되고  $\theta_a - \theta_c$ 의 간격동안 전동기 토크는 양의 극성을 가지지만  $\theta_a$  이후 시간의 역기전력  $e$ 는 인덕턴스 기울기가 감소하기 때문에 역전된다.

최대 크기의 평균토크 발생은 변환루프의 면적인

Co-energy,  $W$ 의 최대화를 의미하고 회전자 위치가 자속쇄교의 함수와 같이 간주되고 이 루프는 각각 자화와 감자구간으로 나뉠 수 있고, 두 개의 부분은 전류 포인트  $\theta_c$ 에 의해서 구분된다. 또한 전류제어의 경우는 자화구간이 두 개의 이산섹션동안에 상승되는데  $\theta_{fr} - \theta_{on}$  구간에서는 이용 가능한 전체 전압  $V_{dc}$ 가 공급되고 상전류와 자속쇄교는 상대적으로 선형적으로 증가된다. 또한 초핑구간인  $\theta_c - \theta_{fr}$ 에서는 자속쇄교는 비선형적이며 기울기가 이전 구간보다 작으며 에너지 변환은 식(13)과 같다.

$$W = \int_0^{\lambda_c} i(\lambda, \theta_{mag}(\lambda)) d\lambda + \int_{\lambda_c}^0 i(\lambda, \theta_{demag}(\lambda)) d\lambda \quad (13)$$

여기서  $\theta_{mag}$ 와  $\theta_{demag}$ 는 각각 회전자 위치에 대한 자화와 감자구간에서의 자속쇄교의 함수이다. 만약 에너지 변환이 전류각의 함수라면 전류각에 에너지 변환의 미분을 영으로 설정함으로써 최적의 전류각에 의해 만족되는 조건을 찾을 수 있다. 식(13)을 전류제어 방식에 적용하여 다시 적으면 식(14)과 같다.

$$W = \int_0^{\lambda_c} i(\lambda, \theta_{fr}(\lambda)) d\lambda + \int_{\lambda_c}^0 i(\lambda, \theta_c(\lambda)) d\lambda + \int_{\lambda_c}^0 i(\lambda, \theta_q(\lambda)) d\lambda \quad (14)$$

함수  $\theta_{mag}(\lambda)$ 은  $V_{dc}$ 와 같은 다른 시스템 파라미터와 마찬가지로 턴 온각의 결정에 의존되고 함수  $\theta_{demag}(\lambda)$ 는  $\theta_c$ 에 의존한다. 따라서 실제로 여자상이 감자하는 동안 음의 전압이 공급될 때 감자되는 위치 각은  $\theta_{dm}$ 은 식(15)과 같다.

$$\theta_{demag} = \theta_{dm} = \theta_q - \theta_c = \frac{\lambda_j(\theta_c) \cdot \omega_r}{V_{dc}} \quad (15)$$

여기서  $\lambda(\theta_c) = L(\theta_c) \cdot i(\theta_c)$ 이므로  $\theta_c$ 에서 상 자속쇄교는 토크분할 함수  $\tau(\theta_c) = \tau_d/2$ 를 고려하면 식(16)과 같다.

$$\theta_{dm} = \frac{L(\theta_c) \cdot i(\theta_c) \cdot \omega_r}{V_{dc}} = \frac{\lambda_j(\frac{\tau_d}{2}, \theta_c) \cdot \omega_r}{V_{dc}} \quad (16)$$

따라서, 전류각  $\theta_c$ 에서의 자속쇄교는 식(17)과 같다.

$$\lambda_c = \frac{V_{dc} \cdot \theta_m}{\omega_r \cdot i(\theta_c)} \quad (17)$$

자속과 전류의 출력파형을 통해 순시 상자속 연산방식을 이용한 이웃한 상과의 상관관계를 고려하면 다가오는 상의 자속은 식(18)과 같다.

$$\lambda_{j+1} = \lambda_{j+1}(i_{j+1}, i_j, \theta_{j+1}) \quad (18)$$

최대 에너지효율과 토크리플 저감의 문제는 최적의 전류위치를 기준으로 연산해야하므로 기준상의 전류와 다가오는 상의 전류와의 관계에서 이를 해석할 수 있다. 만약  $i_j(h) \leq i_j \leq i_j(h+1)$ , 여기서  $i_j(h+1)$ 과  $i_j(h)$ 는 두개의 인접한 이산 상전류이라면 상승구간에서 자속쇄교는 식(19)과 같다.

$$\lambda_j = \lambda_j(i_j, i_j(h), \theta_j) + \frac{\lambda_j(i_j, i_j(h+1), \theta_j) - \lambda_j(i_j, i_j(h), \theta_j)}{i_j(h+1) - i_j(h)} \cdot (i_j - i_j(h)) \quad (19)$$

여기서, 전류의 크기  $i_j$ 를 위치각  $\theta_j$ 로 변환하여 정리하면 식(20)과 같다.

$$\lambda_j = \lambda_u + \frac{\lambda_u - \lambda_c}{\theta_c - \theta_{fr}} \cdot (\theta_j - \theta_{fr}) \quad (20)$$

$\lambda_{j+1}$ 의 위치를  $j$ 상의 식으로 변환할 때, 스트로크각의 성분 만큼 차이가 발생하므로 이를 고려하면  $j$ 상 자속쇄교는 식(21)과 같다.

$$\lambda_{j+1} = \lambda_u + \frac{\lambda_c - \lambda_u}{\theta_c - \theta_{fr}} \cdot [(\theta_j - \theta_{fr}) - \theta_{sk}] \quad (21)$$

또한 식 (20)과 같은 방식으로  $j$ 상의 감자구간의 자속을 정리하면 식(22)과 같다.

$$\lambda_j = \lambda_c + \frac{0 - \lambda_u}{\theta_q - \theta_c} \cdot (\theta_i - \theta_{dm}) \quad (22)$$

또한, 턴 오프각,  $\theta_c$ 와 토크리플을, 에너지효율사이의 관계를 통해 교점각  $\theta_i$ 는 식(23)과 같다.

$$\theta_i = \theta_c + \frac{\theta_{dm}}{2} \quad (23)$$

$j$ 상과  $j+1$ 상의 오버래핑에 의한 자속쇄교의 교점각  $\theta_i$ (Intersection Angle)은  $j$ 상의 감소구간과  $j+1$ 상의 상승구간의 교점으로 정의될 수 있으므로 식(24)과 같다.

$$\lambda_F(\theta_c(j)) = \lambda_R(\theta_{on}(j+1)) \quad (24)$$

따라서  $\lambda_j$ 상의 하강구간과  $\lambda_{j+1}$ 의 상승구간에서의 교점이 발생하므로 식(23)와 (24)을 이용하여 정리하면 최적의 전류각  $\theta_c$ 는 식(25)과 같다.

$$\theta_c = \theta_{on} + \theta_{fr} + 2\theta_{sk}(1 - \frac{\theta_{ofr}}{\theta_{dm}}) - \theta_{dm} \quad (25)$$

위의 식에서와 같이 최적의 전류 포인트를 확보하기 위해서는  $\theta_{on}$ ,  $\theta_{fr}$ ,  $\theta_{dm}$ 의 정확한 정보가 요구되고 입력변수로  $\omega_r$ 과  $\tau_d$ 가 적용된다.

#### 4. 최적의 스위칭각 제어기의 적용

그림 4는 최적의 제어기를 SRM 테스트 드라이브의 블록 다이어그램을 보여준다. 기준 전류  $i_{rms}$ 는 비례적분 제어기와 전류제한기를 통해서 속도오차 ( $\omega_{ref} - \omega_r$ )로부터 결정된다.

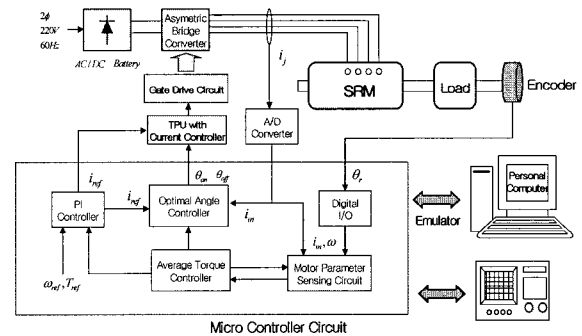


그림 4 SRM 제어기의 블록 다이어그램  
Fig. 4 Block diagram of experimental setup

전류제어기는 각각의 상에 대해서 상전류제어에 이용되고 샘플링에 의해서  $j$ 상의 PWM을 발생시키며 상

전류  $i_j$ 와 기준 전류  $i_{rms}$ 를 비교한다.

각각의 동작 조건에 대해서 최적의 전류각  $\theta_c$ 의 값을 결정하기 위해서  $\theta_{on}$ 각의 위치, 속도, 전류의 기준값, 전압 정보뿐만 아니라  $L_u$ 와  $L_a$ 의 인덕턴스의 값이 요구된다. 또한 회전자각의 간격  $\theta_{dm}$ 과 정확한 턴 온각 $\theta_{on}$  값이 요구된다. 회전자각의 간격  $\theta_{fr}$ 과  $\theta_{dm}$ 은 온라인 연산되고 스트로크각  $\theta_{sk}$ 는 기본적인 SRM 설계 파라미터로부터 쉽게 얻어질 수 있다. 최적 각 제어부는 검출된 각각의 전류와 절대형 엔코더를 통해 획득된 데이터를 이용하여 최적의 턴 온각을 및 턴 오프각을 연산하도록 하였다. 연산된 결과를 PWM 제어하도록 하기 위해 TPU에서 게이트 펄스 신호를 생성하도록 하였다. 집선의 마이크로 컨트롤러부는 최대 12MHz의 클럭주파수를 가지며 TPU의 생성신호는 최대 10kHz이다. 디지털 I/O Port, A/D 컨버터의 활용 범위를 높이기 위해서 별도의 신호처리회로를 통해서 운용하였고 샘플링 시간은 10 $\mu$ s이다.

### 5. 시뮬레이션 및 실험결과

#### 5.1 시뮬레이션결과

제안된 SRM의 제어의 효용성을 확보하기 위해 4상, 1마력의 8/6 SRM이 시뮬레이션 및 실험용으로 이용되었다. SRM의 파라미터는 표1과 같다.

표 1 4상 8/6 SRM의 파라미터  
Table 1 Four phase, 8/6 SRM parameter

Parameter	Value
Phase winding resistance	R = 1.2 [ $\Omega$ ]
Number of rotor poles	$N_r = 6$
Number of stator poles	$N_s = 8$
Aligned Phase Inductance	$L_u = 48.2$ mH
Unaligned Phase Inductance	$L_a = 8.8$ 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 SRM의 모델은 m-file을 이용하여 수행하였다.

그림 5는 전류와 자속쇄교와의 관계를 시뮬레이션

결과를 통해 보여준다. 8/6 SRM의 모델링 결과를 토대로 자속과 전류의 관계를 회전자의 위치변화에 따라 나타냈다.

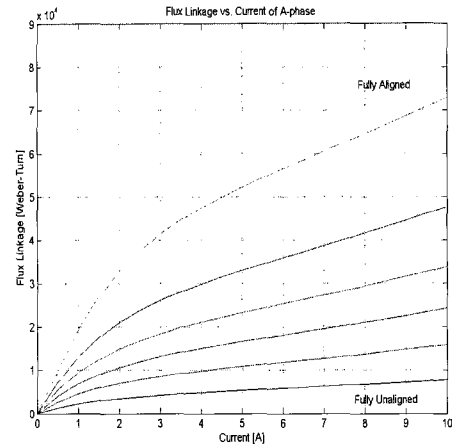


그림 5 전류와 자속쇄교와의 관계  
Fig. 5 Simulation result for current vs. flux linkage

그림 6은 회전자 위치와 토크와의 관계를 시뮬레이션 결과를 통해 보여준다. SRM 모델링을 통해 회전자 위치와 토크와의 관계를 전류를 변화시키며 그 특성을 보여준다.

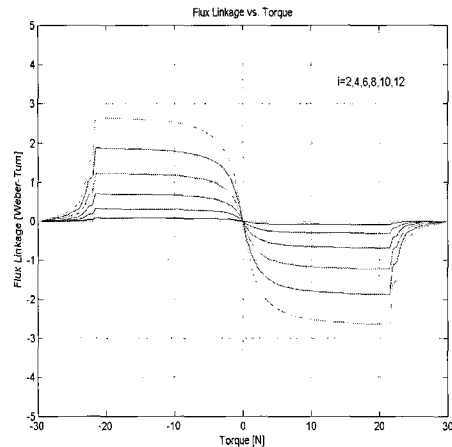
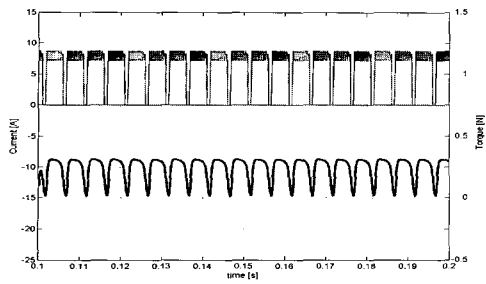
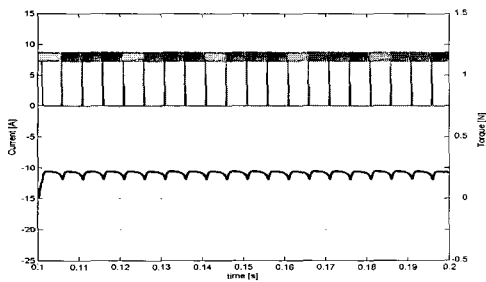


그림 6 회전자 위치와 토크와의 관계  
Fig. 6 Simulation result for rotor position vs. torque

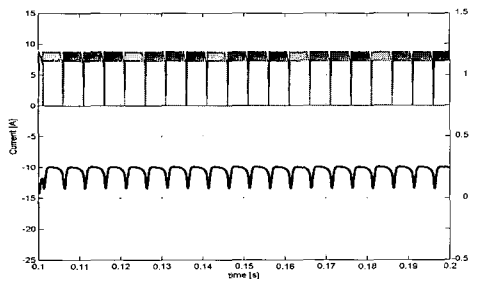
그림 7은 500[rpm]에서 에너지효율을 최대화와 토크 리플 최소화, 그리고 최적의 성능을 가진 제어기의 전류와 토크파형을 시뮬레이션 결과를 보여준다. 각각의 턴 오프각은 13.8°, 14.9°, 14.1°의 값을 도출하였다.



(a) Minimum loss operation



(b) Torque ripple minimization

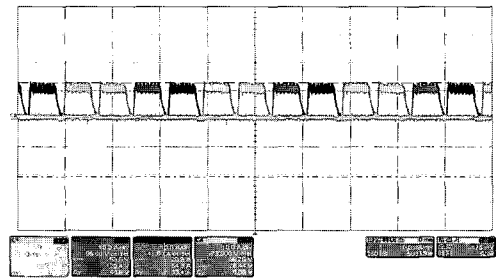


(c) Optimal turn-off angle control

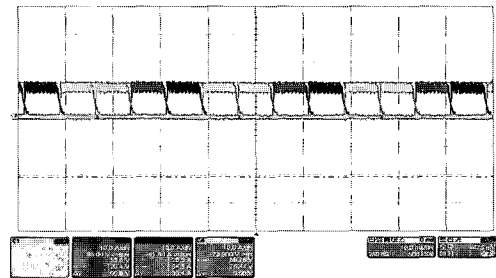
그림 7 4상 500rpm에서 전류파형의 시뮬레이션 결과  
Fig. 7 Simulation result of current and torque waveforms at 500rpm, in a four-phase

5.2 실험결과

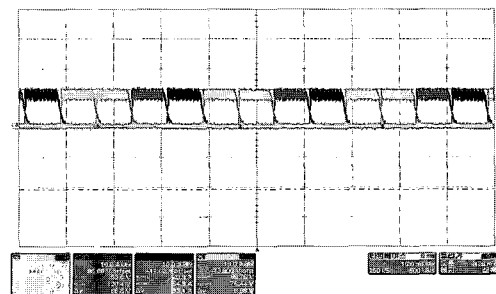
입력전압은 직류 48[V]이고 턴 온각은 2.4°이다. 그림 8은 세 가지 형태의 동작에 대한 4상 SRM의 전류 파형을 보여준다. 그림 8의 (a)에서는 충분한 전류소호 시간을 확보하기 위해 전류각을 13.2°로 설정하였다. (b)는 여자상의 턴 오프 스위칭각이 14.8°로 동작시킨 전류파형이다. 이는 이웃한 상이 턴 온되기 직전까지 턴 오프각을 유지시킴으로서 토크리플을 저감시키도록 전류파형을 생성시켰다. (c)에서는 최적 제어방식이 적용된 턴 오프각제어를 통한 전류출력파형을 보여준다.



(a) 최대 에너지효율을 가진 전류파형  
(a) Maximum energy efficiency current waveforms



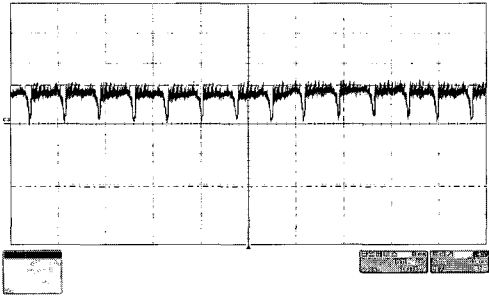
(b) 토크리플 최소화를 위한 전류파형  
(b) Torque ripple minimization control applied current waveforms



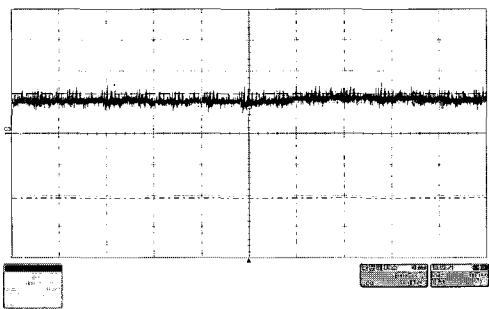
(c) 최적의 턴 오프각제어가 적용된 전류파형  
(c) Optimal turn off angle control applied current waveforms

그림 8 4상, 500rpm에서 전류파형(10A/10ms)  
Fig. 8 Experiment results of current waveforms at 500rpm in four phase

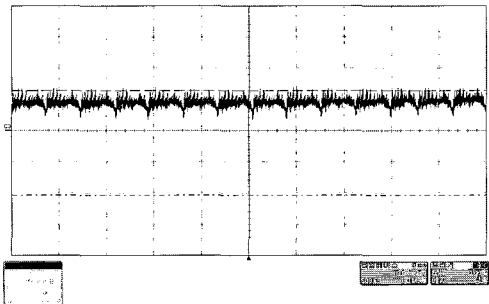
그림 9는 최대 에너지효율제어방식, 최소 토크리플 제어방식, 성능최적화제어방식에 따른 각각의 세 가지 제어방식에 따른 토크 출력파형을 보여준다. 최적의 턴 오프각을 연산하기 위한 제안된 알고리즘을 통해 일정한 턴 온각과 가변 턴 오프각, 즉 토크각의 변화에 대응하는 제어방식이 적용된 실험에서 토크리플은 1.4, 에너지효율은 약 62%로 각각 나타났다.



(a) 최대 에너지효율제어의 토크출력파형  
(a) Maximum energy efficiency torque waveforms



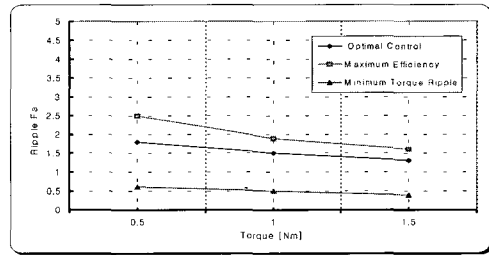
(b) 최소 토크리플제어의 토크출력파형  
(b) Torque ripple minimization control applied torque waveforms



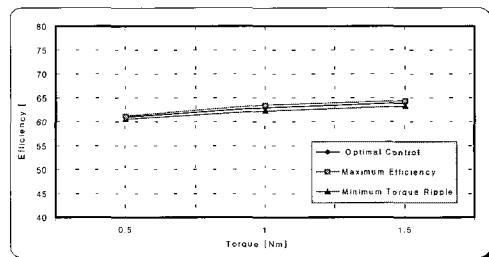
(c) 최적제어방식이 적용된 토크출력파형  
(c) Optimal control applied torque waveforms

그림 9 4상, 500rpm에서 토크출력파형 (0.5Nm/10ms)  
Fig. 9 Experiment results of torque waveforms in four phase

그림 10은 실험결과를 이용하여 최적의 성능의 동작이 턴 온과 턴오프각의 최적의 제어기로부터 최대 에너지효율과 최소 토크리플동작을 비교분석하였다. 즉, SRM이 가지는 고유특성인 토크리플을 최소화하며 에너지효율을 높이는 최적의 턴 오프각을 선정하여 비교분석함으로써 최적화의 타당성을 입증할 수 있도록 하였다.



(a) 토크리플성분의 비교  
(a) Comparison of optimal control with maximum energy efficiency and minimum torque ripple operation



(b) 에너지효율 비교  
(b) Comparison of optimal control with maximum energy efficiency and minimum torque ripple operation

그림 10 토크리플과 에너지효율의 비교  
Fig. 10 Comparison of torque ripple factor and energy efficiency

## 6. 결 론

최적의 턴 오프각은 최대 에너지효율 제어와 토크리플제어의 상관관계에서 찾을 수 있다. 즉, 최대에너지효율을 위한 제어방식은 충분한 회수전류시간을 확보함으로써 효율을 높이면서 SRM의 고유의 특징인 토크리플을 저감할 수 있는 최적의 스위칭각을 확보하는 방식이다. 따라서 본 논문에서는 전류 제어방식이 적용된 SRM 드라이브의 성능 최적화에 대한 문제가 연구되었다. 제어 목표는 에너지 효율과 토크리플 기준 사이의 적절한 균형이 이루어지는 것으로 최적의 온라인 턴 오프 각의 결정에 관한 전류제어 방식이 제안되었다. 최적의 턴 오프각에 대한 수학적 분석은 두 개의 이웃하는 상의 자속 쇄교파형으로 부터 유도되기 때문에 SRM 성능 최적화는 성취될 수 있었다. 제안된 제어기는 기존의 SRM 모델의 비선형성을 고려하지 않고 적용할 수 있어 다양한 형태의 스위치드 릴럭턴스 전동기에 적용이 용이하다고 사료된다.



이 논문은 2004년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

**참 고 문 헌**

- [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] 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.
- [3] K. Russa, I. Husain, and M. E. Elbuluk, "A Self-tuning Controller for Switched Reluctance Motors", IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, pp. 545-552, May 2000.
- [5] J. M. Stephenson, A. Hughes, and R. Mann, " Torque Ripple Minimization in a Switched Reluctance Motor by Optimum Harmonic Current Injection", Proc. Inst. Elect. Eng.-Elect. Power Allicat., vol. 148, no. 4, pp. 322-328, July 2001.
- [6] Krzysztof Russa, Iqbal Husain, Malik Elbuluk "A Self-Tuning Controller for Switched Reluctance Machines", IEEE Trans. Power Electronics, pp. 1269-1275, 1998.
- [7] J.J. Gribble, P.C.Kjaer, T.J.E. Miller, "Optimal Commutation in Average Torque Control of Switched Reluctance Motors", IEE, Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 146, No. 1, pp. 2-10, January 1999.
- [8] Robert B. Inderka, Rik W. A. A. De Doncker, "High-Dynamic Direct Average Torque Control for Switched Reluctance Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 4, July/August 2003, pp. 1040-1045.
- [9] Shuyu Cao and K. J. Tseng, "Evaluation of Neighboring Phase Coupling Effects of Switched Reluctance Motor With Dynamic Modeling Approach", in Proc. PIEMC 2000, vol. 2, pp. 881-886, 2000.

**저 자 소 개**

**정병호(鄭炳湖)**



1971년 5월 28일생. 1997년 여수대 기관공학과 졸업. 1999년 조선대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2005년~현재 목포대 시간강사, 2004년~현재 도립남도

대 시간강사.

**최연옥(崔然玉)**



1969년 11월 8일생. 1995년 조선대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 조선대 전기공학과 BK연구교수.

**이강연(李康淵)**



1970년 3월 2일생. 1997년 조선대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2005년~현재 조선대 시간강사.

**조금배(曹錦培)**



1980년 조선대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 졸업(석사). 1995년 건국대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1966년~1987년 미국 Univ. of oklahoma 객원연구원. 1998년~1999년 미국 oregon state Univ.

교환 방문교수. 현재 조선대 전기공학과 교수. 당 학회 부회장.

**정수복(鄭壽福)**



1945년 1월 23일생. 1969년 조선대 전기공학과 졸업. 1980년 건국대 대학원 전기공학과 졸업. 2001년 대한전기학회 광주 전남지회 지회장. 현재 조선대 전기공학과 교수.