

최적의 스위칭각제어를 통한 SRM의 성능최적화에 관한 연구

정병호\*, 최연옥\*, 조금배\*, 백형래\*, 이성길\*\*, 최문한\*\*\*  
 조선대학교 전기공학과\*, 광주보건대학\*\*, (주)AD엔지니어링

Online Switching Angle Control  
 for Performance Optimization of the SRM

B. H. Jeong, Y. O. Choi, G. B. Cho, H. L. Baek, S. G. Lee, M. H. Choi  
 Chosun University Dept. of Electrical Engineering\*, Gwangju Health Collega\*\*, AD Eng. Co.

**Abstract** - This paper represent improved On-line Turn off, commutation 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 simulation experimental result.

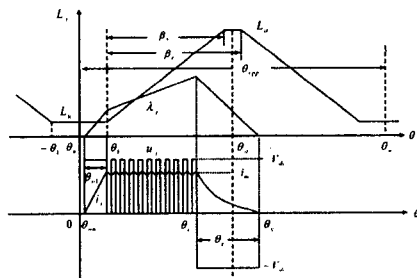
1. 서 론

고성능 SRM 드라이브의 연구는 토크리플 저감과 에너지효율의 최적화에 대한 연구가 그 주류를 이루고 있다.[1] 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.[2]

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 자기곡선이나 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. 인덕턴스 특성에 따른 스위칭각의 해석

그림1에서는 이상적인 인덕턴스 프로파일(프린징을 무시)과 자속쇄교 프로파일, 듀티사이클에 의한 전압, 그리고 소프트 초평방식에 의해 전류제어(Current Control)된 SRM 드라이브의 자속쇄교의 동작파형을 보여주고 있다. Dwell각은 초기시간으로 설정된 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.[3]



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

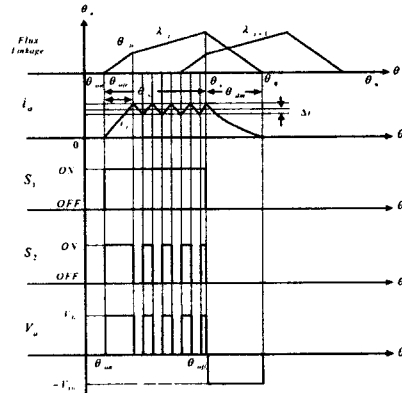
이상화하여 나타난 인덕턴스프로파일은 회전자와 고정자의 극호각의 크기에 따라 결정되며 인덕턴스의 최대값은 고정자의 극호각의 크기에 따라 다르다.

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 q는 상의 수이고 N<sub>r</sub>은 회전자 극수이므로 4-상, 8/6 SRM의 경우 Θ<sub>sk</sub>는 15°가 된다. 두 개의 이웃한 상의 자속쇄교 프로파일이 오버래핑되는 영역은 음의 토크를 발생시킨다. 최적의 전류각(Commutation Angle)이 두 개의 이웃한 전동기 상에 의해 자속쇄교되는 특성을 보인다.



<Fig 2> Waveforms Considering the Overlapping Flux Linkage Profiles

그림 2에서는 SRM 동작 기준으로 설정된 임의의 상에 대한 동작의 전류파형, 전압파형, 두 개의 이웃한 상의 자속 쇄교파형이 오버래핑되는 형태를 회전자에 변화에 따라 보여준다. Θ<sub>c</sub>-θ<sub>om</sub> 간격동안 자속은 두 개의 이산 섹션에서 증가한다. 권선 저항 R과 프린징효과가 무시된다면 기준 상의 전류 i<sub>r</sub>를 여자시키기 위해 Advance각에서 턴 온되어야만 하고 그림 3에서는 이를 θ<sub>fr</sub>-θ<sub>om</sub>으로 정의하였다. 회전자의 비정렬된 위치에서의 자속쇄교는 다음의 식(2)와 같다.

$$\lambda_u = L_u \cdot i_{rms} \tag{2}$$

θ<sub>fr</sub>은 인덕턴스의 증가시점으로 스트로크각에서 전류각을 변 각과 같고 이를 정리하면 다음의 식(3)과 같다.

$$\Theta_{Advanced\ Angle} = \theta_{fr} - \theta_{om} = \theta_{ofr} = \frac{L_u \cdot i_{rms} \cdot \omega_r}{V_{dc}} \tag{3}$$

여기서 θ<sub>ofr</sub>은 토크각의 시작 포인트로 토크의 발생시점을 의미한다. θ<sub>om</sub>에서 θ<sub>c</sub>사이의 간격동안 상전류는 전류제어기(Current Controller)에서 제공한 기준값을 추종하도록 제어된다. 정렬된 위치 θ<sub>c</sub>에 도달하면 공급 전압 V<sub>dc</sub>와 상의 역기전력 e<sub>j</sub>는 동일한 극성을 가지게 되고 상전류

$i_j$ 는 지수함수적으로 감소한다.  $\theta_a - \theta_c$ 의 간격동안 전동기 토크는 양의 극성을 가지고 각  $\theta_a$  이후에 역기전력  $e_j$ 는 인덕턴스 기울기가 감소하기 때문에 역전된다. 그러므로 상 전류가 더욱 낮은 비율로 감소하고 소멸되는 각  $\theta_c$ 에 이르기까지 발생된 토크는 음의 극성, 브레이킹 토크를 가지게 된다. 회전자 위치가 자속쇄교의 함수와 같이 간주되고 이 루프는 각각 자화와 감자구간으로 나눌 수 있고, 두 개의 부분은 전류 포인트(commutation point)  $\theta_c$ 에 의해서 구분되며 에너지 변환은 다음의 식(4)와 같다.

$$W = \int_0^{\lambda_c} i(\lambda, \theta_{mag}(\lambda)) d\lambda + \int_{\lambda_c}^0 i(\lambda, \theta_{demag}(\lambda)) d\lambda \quad (4)$$

여기서  $\theta_{mag}$ 와  $\theta_{demag}$ 는 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. 여기서 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. 실제로 전체 음의 전압이 공급될 때 감자되는 위치각은 다음의 식(5)과 같다.

$$\theta_{demag} = \theta_c - \frac{\omega_r}{V_{dc}} (\lambda - \lambda_c) \quad (5)$$

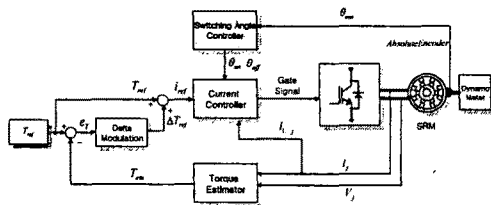
그림 4에서는 SRM의 구조 해석적 측면에서 최적의 스위칭각을 결정하기 위한 두개 상의 중첩되는 자속쇄교 프로파일과 스위칭 동작파형과 전류 및 전압파형을 보여준다. 임의의 기준 상의 비정렬된 회전자 위치는 스위칭각을 연산하기 위한 기준 동작점으로 놓는다.  $\theta_c - \theta_{on}$  간격동안 자속은 두개의 이산 섹션에서 증가하는데  $\theta_{fr} - \theta_{on}$  영역에서 이용가능한 전체 전압  $V_{dc}$ 가 공급되고 상전류는 자속쇄교와 같이 선형적으로 증가한다.  $\theta_c - \theta_{fr}$ 의 초평동작 동안의 자속쇄교  $\lambda_1$ 은  $\theta_{fr} - \theta_{on}$ 의 영역보다 증가 기울기가 작다. 최적의 전류각은 식 (6)과 같다.

$$\theta_c^{opt} = \theta_1 + \theta_{o1} + 2\theta_{sk} - 2\theta_{sk} \frac{\Theta}{\Theta_e} - \theta_e \quad (6)$$

식 (6)의 조건으로부터 최적의 전류각을 계산하기 위하여 회전자 각 간격  $\theta_{o1}$ 와  $\theta_e$ 의 측정이 요구됨이 포함되어 있다.

#### 4. 최적의 제어기의 적용

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

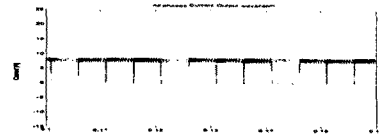


<Fig 3> Block Diagram of the test SRM Drive Controller

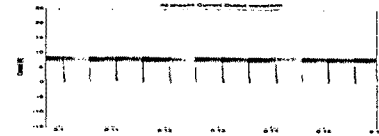
그림 10의 (a)에서는 최대효율을 위한 스위칭각제어 방식을(b)에서는 최적의 턴 오프각 제어방식을 (c)에서는 토크리플을 최소화를 위한 제어방식에 따른 각 상의 전류파형을 보여준다.



(a) Minimum loss operation



(b) Optimal turn-off angle control

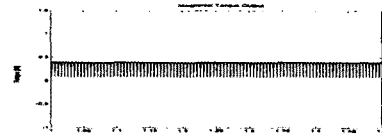


(c) Torque ripple minimize operation

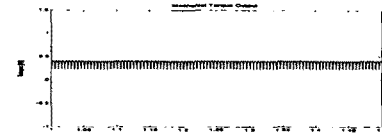
<Fig 5> Simulation Result of current waveform at 500rpm, in a four-phase

<그림 5> 4상 500rpm에서 전류파형의 시뮬레이션 결과

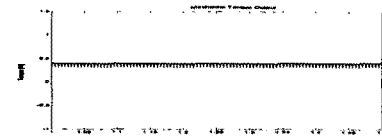
그림 11는 제어방식에 따른 각 상의 토크 파형을 보여준다.



(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 턴 오프각의 최적의 제어기로부터 최대 에너지효율과 최소토크리플동작과 비교된다. 제안된 최적의 제어기가 적용되어 효율과 토크리플 사이의 기준이 적용될 수 있는 기준이 마련되었다.

#### 6. 결 론

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.

#### [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] 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.