

## BRAKING을 고려한 SRM의 속도제어

신정기<sup>1</sup>, 남정한<sup>2</sup>, 권영안<sup>3</sup>  
부산대학교 전기공학과

### Speed Control of SRM using Braking Operation

Jeong-Gi Shin, Jeong-Han Nam, and Young-Ahn Kwon  
Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University

**Abstract** - The switched reluctance motor(SRM) has a simple structure with a doubly-salient and is studied as a variable speed motor since it has a good performance in a wide range of speed and torque.

This paper presents the control scheme in which ON/OFF angles are controlled by PI controller that compensates the error between the command and real speeds, and the speed response is improved by braking operation in motor decelerating.

### 1. 서론

스위치드 릴리턴스 전동기(SRM)는 회전자가 여자권선의 인덕턴스가 최대가 되는 방향으로 움직이려는 릴리턴스 토크 특성을 이용한 전동기이다. SRM은 유도기나 동기기에 비해 구조가 간단하고 경제적이라는 장점으로 인해 그 실용화 및 고성능화를 위한 많은 연구가 이루어지고 있다.[1]-[3]

SRM은 기동 특성이 우수하고 넓은 속도범위에서의 운전이 원활하기 때문에 가변속 전동기로써 활용할 수 있다. 지금까지는 여러 가지 전류 도통각 조정 알고리즘에 의해 산출된 스위칭 각으로 속도제어를 행하고 있다. 그러나 이러한 제어방식에서는 감속 운전에서의 속응성이 떨어진다는 단점이 있다.

본 논문에서는 속도를 feedback하고 그 오차를 보상하기 위해 PI 제어방식에 의한 ON, OFF 각도를 제어하고, control logic에 의해 braking 동작을 제어함으로써 감속 운전시의 속응성을 높일 수 있음을 보인다. 그리고 위치와 속도의 feedback를 위해 저가의 센서인 옵토 인터럽터(opto-interrupter)를 사용한 10hp, 3상, 12/8 SRM을 대상으로 구동 시스템을 제작하고 실험을 통하여 원활한 4상한 속도제어의 가능성 및 응답 특성의 우수성을 보인다.

### 2. SRM의 4상한 제어

SRM의 토크는 상여자권선과 고정자 및 회전자로 구성되는 자기회로에서 힐리턴스가 최소가 되려는 성질에 의해 발생한다. 이때, 토크는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서  $i$ ,  $L$ ,  $\theta$ 는 각각 순시 상전류, 상인덕턴스, 그리고 회전자자의 위치이다. 식 (1)로부터 토크는 전류의 방향에 무관하며 인덕턴스의 기울기의 방향에 따라 그 방향이 결정된다. 따라서 상의 점호 위치에 따라서 정, 역의 토크를 결정할 수 있다.

#### 2.1 Control logic을 통한 기동 및 braking 영역에서의 스위칭 신호

그림 1은 A상의 인덕턴스 곡선과 옵토 인터럽터에서의 각상의 출력파형 및 정회전과 역회전시의 스위칭 신호를 나타낸다. 그림 1(c)는 정회전 기동시와 역회전 braking시의 스위칭 신호로 인덕턴스가 증가하는 영역에서 스위치를 터-온하고, (d)는 역회전 기동시와 정회전 braking시의 스위칭 신호로 인덕턴스 감소영역에서 터-온한다.

그림 2는 회전자의 위치에 따른 한상의 인덕턴스 곡선과 전류파형이다. 그림 2의 (1)이 그림 1(c)의 스위칭 신호에 따른 전류 파형이다.

#### 2.2 PI 제어를 통한 가속 및 정상상태에서의 스위칭 신호

SRM의 토크는 상전류에 따라 크게 영향을 받는다. 따라서 토크의 백동을 줄이기 위해서는 토크 발생 영역에서 전류의 변동을 가능한 억제할 수 있도록  $\theta_{ON}$ 각을 결정해야 한다. 순시 상전류  $i$ 는  $\theta_{ON}$ 에서 ON되어 인덕턴스가 증가하기 시작하는

위치각  $7.5^\circ$ 에서  $i_{ref}$  가 될 때까지 식 (2)의 관계에 따라 선형적으로 증가한다.

$$\theta_{ON} = i_{ref} \frac{L_{min}}{V_{dc}} \omega_r \quad (2)$$

단,  $i_{ref}$  : 인터턴스가 증가하기 시작하는 점에서의 상전류  
 $\omega_r$  : 회전자 각속도

$L_{min}$  : 상인덕턴스의 최소값

$V_{dc}$  : DC - Link 전압

제어를 통하여 결정한다.

$$\theta_{OFF} = K_p \times E + K_i \times \int E dt \quad (3)$$

단,  $K_p$  : 비례 이득

$K_i$  : 적분 이득

$E$  : 속도 오차(지령속도( $\omega_c$ ) - 실제속도( $\omega_r$ ))



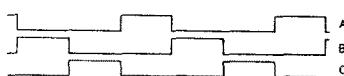
(a) A상의 인터턴스 곡선



(b) 옵토 인터럽터 출력파형



(c) 정회전 기동 및 역회전 braking시의 스위칭 신호



(d) 역회전 기동 및 정회전 braking시의 스위칭 신호

그림 1 인터턴스 곡선 및 스위칭 신호

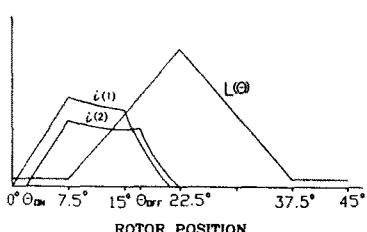


그림 2 회전자 위치에 따른 인터턴스 및 전류파형

점호각을 식 (2)에서와 같이 결정하고 소호각은 식 (3)에서 PI

그런데 식 (2)와 식 (3)에서 결정된 점호각과 소호각에 의해 제어하는 경우 부하가 커지면 소호각이 최대가 되더라도 전류의 피크치가 작아서 지령속도를 추종하지 못하는 경우가 발생한다. 이 경우에는 식 (2)에서 결정된 점호각에 추가로 PI 제어를 한다. 그림 2에서 점호각은  $0^\circ \sim 7.5^\circ$ , 소호각은  $7.5^\circ \sim 17.5^\circ$ 로 제한한다. 최대 소호각은 역토오크의 발생을 막기 위해  $L_{max}(22.5^\circ)$  위치보다 앞서서 제한된다. 그림 2의 i(2)가 PI 제어에 의한 전류파형이다.

### 3. 구동 시스템 구성

그림 3은 4상한 속도제어를 위한 구동시스템으로, 전동기, 인버터, 위치 및 속도 검출기, 제어기 등으로 구성하였다. 먼저 제어기는 앞에서 언급한 control logic과 PI 제어기로 구성되며, 기동 및 braking 시에는 control logic으로 점호각과 소호각을 결정하는 스위칭 신호를 발생하고, 가속 및 정상상태에서는 PI 제어기를 통하여 스위칭 신호를 발생한다.

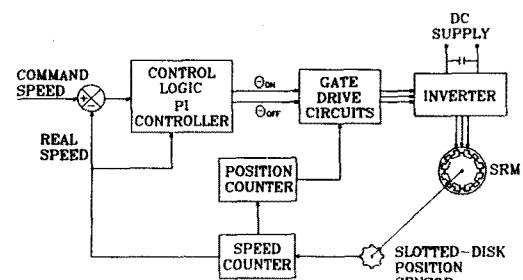


그림 3 구동시스템 구성도

위치 및 속도 검출기는 엔코더 대용으로 저가이며 간단한 옵토 인터럽터를 사용한다. 이것은 회전자와 같은 모양의 slotted-disk와 결합되어 인터턴스의 증가, 감소 영역에서 각각 0과 1의 신호를 발생한다. 그리고 옵토 인터럽터의 낮은 해상도

를 보완하기 위하여 별도의 위치와 속도 카운터를 사용한다.

#### 4. 실험 결과

실험에 사용된 SRM은 10hp, 3상, 12/8 극으로서 SRM 단면 및 스위칭 회로는 그림 4와 같다.

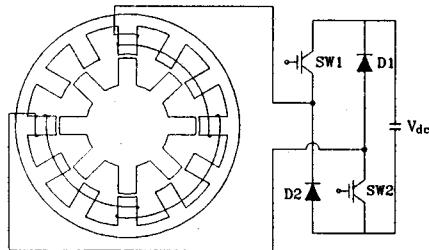


그림 4 3상 12/8 극 SRM의 단면 및 스위칭 회로

그림 5와 6은 본 연구에서 제시한 제어 알고리즘을 적용하여 실험한 결과이다. 그림 5는 지령속도 1000rpm에서 기동한 후 500rpm으로 속도변환한 것이다. 그림에서 (a)는 braking을 이용한 경우이고 (b)는 braking 없이 PI 제어만 사용한 경우이다.

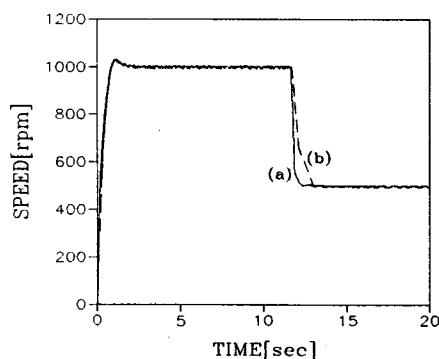


그림 5 지령속도 1000 → 500 rpm에서 옹답특성

그림 6은 지령속도를 1000rpm에서 -700rpm으로 속도변환한 뒤 다시 700rpm으로 속도변환한 경우이다. 이와 같은 가변 지령 속도에서도 양호한 4상한 속도제어 특성을 보임을 알 수 있다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 위치센서로 저가의 옵토 인터럽터를 사용한

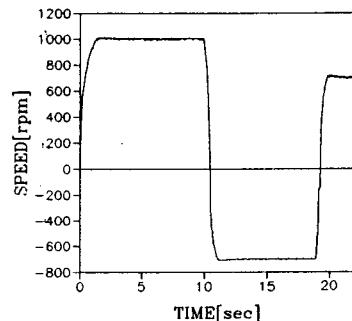


그림 6 지령속도 1000 → -700 → 700 rpm에서 옹답특성

SRM에 대해 control logic과 PI 제어기를 이용한 속도제어기를 설계하고 시험하였다. 옵토 인터럽터를 통하여 속도를 feedback하고 그 오차를 보상하기 위하여 PI 제어방식으로 ON, OFF 각도를 제어하고, 기동 및 braking 시에는 control logic에 의하여 제어함으로써 PI 제어기 만으로 구동하는 경우 보다 특히 감속 운전시의 속응성이 뛰어나고 4상한 속도제어도 가능함을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] P. J. Lawreson, "Variable-speed Switched Reluctance Motors", *Proc. Inst. Elec. Eng.*, vol. 127, pp. 253-265, July 1980.
- [2] Y.A.Kwon and K.Reichert, "Choppingless Operation of a Nonlinear Switched Reluctance Motor", *Int Conf on Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines*, pp. 451-454, 1991.
- [3] Y.A.Kwon, S.H.Kim, and J.K. Shin, "Computation of Optimal Excitation of a Switched Reluctance Motor Using Variable Voltage", *Int Conf of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE/IECON'96)*, to be published, 1996
- [4] B. K. Bose, "Microprocessor Control of Switched Reluctance Motor", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-22, pp. 708-715, 1986.
- [5] Roger C. Becerra, "Commutation of SR Motors", *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 8, pp. 257-263, July 1993.