

스위칭각 온, 오프 예약기법을 통한 SRM의 고정도 제어

박 성준* . 김 종달* . 손 무언* . 김 규섭* . 이 일천 . 김 규섭* . 김 철우*
 * 동명대학, **부산대학교

Time Reservation Method for High Resolution Angle Control of SRM Drive

Sung-Jun Park* · Jong-Dal Kim* · Mu-Heon Shon* · Gyu-Seob Kim* · Yil Chun Lee* · Cheul-U Kim**
 Dong-Myong College* · Pusan National Univ.**

Abstract - SRM(Swithed Reluctance Motor)은 회전자 위치와 동기 되어 여자 되어야 한다. 이러한 토오크 발생기구의 특성상 회전자 위치각에 대한 정보가 필수적이다. 회전자 위치각의 검출은 일반적으로 엔코더나 레졸버를 사용하나, 본 연구에서는 저 분해능 엔코더를 사용한 경우에도 고정도의 온, 오프 스위칭 각을 제어하기 위해서 미소각 예측 및 미래 지향적 스위칭각도 제어기법을 제안하였다. 또한 이를 프로토타입으로 구현하기 위해서 89C196의 HSO(High speed output) 기능을 사용하였다.

릴럭턴스 토크를 최대한 이용하기 위하여 보통 고정자와 회전자 모두 돌극형(salient type)으로 하여 인덕턴스의 변화율이 최대가 되도록 하고 스위칭-온 시점과 스위칭-오프 시점에서 부하전류에 대응하는 전류의 확립과 소호를 신속히 하여 토크 발생 구간을 최대한 활용하여야 한다. SRM은 회전자 및 고정자가 모두 돌극형 구조로 되어있으며, 고정자에만 집중권으로 되어있다. SRM의 고정자 권선에 전압을 인가할 경우 상당 전압방정식은 식 (2)와 같다.

1. 서 론

SRM은 릴럭턴스 토크를 극대화하기 위해 회전자와 고정자가 모두 돌극형의 구조를 가지며 권선은 고정자에만 집중권으로 감겨 있어 여자전원을 단속적이면서 순차적으로 각 상권선에 인가하여 구동시킨다. SRM은 고정자 상권선은 회전자위치와 동기 되어 여자 되어야 하는 토오크 발생기구의 특성상 회전자 위치각에 대한 정보가 필수적이다. 회전자 위치각의 검출은 일반적으로 엔코더나 레졸버를 사용하나, 이러한 기계적인 외부 위치센서의 분해능이 높을수록 단가가 상승하게 된다. 따라서 설치비용에 대한 부담을 줄이기 위해서 저가형 엔코더를 사용하거나, 또는 이를 완전히 제거하기 위한 센서리스 구동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 이러한 연구들에서는 각 상의 스위치를 ON·OFF시키기 위해 마이크로프로세서를 이용하고 있다. 그러나 마이크로프로세서에 의한 SRM의 스위칭 각 제어방식에서 상 스위치의 ON·OFF 精度는 엔코더의 분해능뿐만 아니라 마이크로프로세서의 샘플링 주기에 의해 제약을 받게 된다. 더욱이 이 경우, 전동기의 운전속도가 고속이 될수록 마이크로프로세서에 의한 상 스위치 ON·OFF각의 정확도는 더욱 떨어지게 되어 정상운전상태가 불안정하게 된다.[2] 따라서 본 연구에서는 저 분해능 엔코더를 사용한 경우에도 고정도의 온, 오프 스위칭 각을 제어하기 위해서 미소각 예측 및 미래 지향적 스위칭각도 제어기법을 제안한다. 이를 위해서 89C196의 HSO기능을 사용하여 제어기의 구성의 경제적 측면도 고려하였다.

$$V = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (2)$$

단, $\omega = \frac{d\theta}{dt}$: 회전자 각속도

SRM은 회전자 위치각에 따라 스위칭이 이루어져야 하므로 회전자의 위치 정보가 필수적이다. 일반적으로 회전자 위치각은 증분형 엔코더(incremental encoder)에서 나오는 펄스를 증감형 계수기(up-counter)에 의해 디지털 값으로 얻어지며, 이를 이용하여 마이크로프로세서에 의해 매 샘플링 시점마다 각 상의 상 신호를 제어하게 된다. 그러나 이러한 방식은 마이크로 프로세서의 샘플링에 의해 그 정도가 크게 좌우되어 고속으로 갈수록 그 정도는 낮아지게 되어 SRM의 정상상태 운전이 불안정하게 될 수 있다. 기존 시스템에서와 같이 마이크로프로세서를 사용하여 SRM의 상 스위치를 제어할 경우 그 제어정도는 인코더의 분해능($\Delta\theta_e$)과 샘플링 주기 동안에 회전자 위치각의 변화($\Delta\theta_m$)에 의해 결정된다. 한 회전당 펄수가 N_p 인 인코더에서 기계적 위치각 분해능은 전동기의 속도와 무관하며 그 값은 식(3)과 같다.

$$\Delta\theta_e = \frac{360}{N_p} \text{ [deg.]} \quad (3)$$

또한 샘플링 주기 동안에 회전자 위치각의 변화($\Delta\theta_m$)는 전동기의 속도에 좌우되며 그 값은 식 (4)와 같다.

$$\Delta\theta_m = 6 \cdot \omega \cdot T_s \text{ [deg.]} \quad (4)$$

T_s : 마이크로프로세서의 샘플링 주기 [s]

마이크로프로세서를 사용한 상 스위치 제어 방식에서 온, 오프각 변동은 인코더의 분해능과 마이크로프로세서의 샘플링 주기에 의해 결정되며, 그 값은 식(3)과 식(4)로부터 식(5)와 같이 주어진다.

$$\Delta\theta_s = \Delta\theta_m + \Delta\theta_e = 6T_s \omega_r + \frac{360}{N_p} \text{ [deg.]} \quad (5)$$

식(5)를 전동기 속도에 따른 온, 오프각 제어정도를 도식적으로 나타내면 그림 1과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 전동기의 속도가 증가함에 따라 샘플링에 의한 오차는 $6T_s$ 의 기울기로 증가한다. 또한 인코더의 분해능

2. 본 론

2.1 시간 예약기법을 통한 고정밀 온, 오프제어

SRM은 릴럭턴스 토크를 동력화한 전동기로 자기회로의 릴럭턴스가 최소화되는 방향으로 토크가 발생하며, 토크는 식 (1)에서와 같이 상권선에 흐르는 전류의 제곱과 회전자 위치각에 대한 인덕턴스의 변화율에 비례한다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (1)$$

과 마이크로프로세서의 위치각 변동이 정수 배로 나타나지 않으면 스위칭각 제어에는 저차 고조파성분이 나타나게 된다. 이로 인하여 SRM의 토크성분에도 동일한 저차 고조파 성분이 나타나게 되어 안정화 운전에 악영향을 미치게 된다.

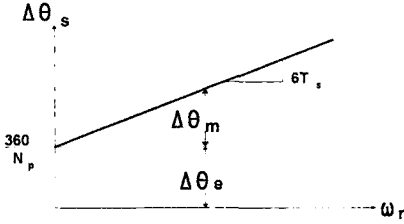


그림 1. 속도에 따른 스위칭각 예라
Fig. 1. Error of switching angle to speed

일반적으로 전동기의 속도가 저속인 경우에는 샘플링에 의한 위치각 변동이 엔코더의 각도 분해능 $\Delta\theta_e$ 보다 적으므로 ON·OFF각의 변동은 엔코더의 분해능에 의해 지배를 받게된다. 그러나 전동기의 속도가 고속이 될수록 엔코더의 분해능은 변동이 없으나 샘플링에 의한 위치각 변동은 크게 나타나게 되며, 이 경우 ON·OFF각의 변동은 샘플링에 의한 위치각 변동에 지배를 받게 된다. 따라서 엔코더가 갖고 있는 정도와 유사한 분해능을 갖는 온, 오프 각을 제어하기 위해서 고속의 샘플링이 요구되며, 이를 위해서는 고성능을 갖는 마이크로프로세서가 필수적이다. 이러한 고속의 마이크로프로세서의 도움을 받지 않고 고정도의 상 스위치를 제어하기 위해서는 특별한 제어기법이 필요하다.

일반적으로 사용하는 상 스위치각 제어는 마이크로 프로세서의 샘플링 시점마다 비교 제어하므로 샘플링의 영향을 받을 수 밖에 없다. 이를 극복하기 위한 한 방법은 아래와 같다. 한 샘플링 기간동안 속도의 변동이 없다고 가정하면, 식 (6)의 속도 항은 상수가 된다.

$$d\theta = \omega_r T \quad (6)$$

식 (6)를 기반으로 하여 다음 샘플링 시간의 전 영역에 대한 위치정보를 얻을 수 있다. 이 위치 정보는 식 (7)와 같이 결정된다.

$$\theta_f = \theta_b + \frac{d\theta}{T} t_f \quad (7)$$

단, θ_f : 알고자 하는 미래의 각도
 θ_b : 현재의 회전자 위치각
 t_f : 미소 미래의 시간

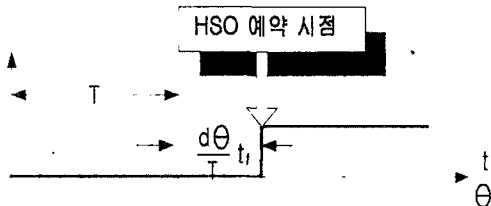


그림 2. 스위칭 시간 예약 개념도
Fig. 2. Subscription of switching time

이 위치 정보를 갖고 다음 샘플링 시간영역에서 원하는 위치에 상 스위치를 온, 오프하기 위해서는 시간

약한다. 이를 위해서 80C196의 HSO기능을 이용하면 간단히 해결할 수 있다. 이때 예약할 시간은 식 (8)의 조건이 만족할 때 HSO단에 그 시간을 예약하면 된다. 이때 상 스위치를 온 할 것인지 오프 할 것인지는 HSO의 command 레지스터에 세팅하게 된다.

$$t_f = (\theta_f - \theta_b) \frac{T}{d\theta} \leq T \quad (8)$$

이와 같은 개념은 그림 2에 나타내고 있다.

2.2 M/T기법을 통한 속도검출

고정도 속도제어를 위해서는 정확한 속도정보가 필수적이다. 그림 3은 엔코더에서의 위치 및 속도 검출 원리를 설명한 것으로 (a)는 인코더의 상태변환 시점을 임펄스로 표현하고 있으며, (b)는 기준 클럭 주파수 f_c 를 가지는 프로그램 카운터의 출력 파형으로 위치 및 속도 검출시 필요한 기준 클럭 주기를 제공한다. 1 회전당 P개의 펄스를 발생시키는 엔코더가 T_d 시간 동안에 m_1 개의 펄스를 발생시킨다고 하면 T_d 시간 동안에 이동한 회전자 위치각의 변위 (θ_d)는 식 (9)로 주어진다.

$$\theta_d = \frac{2\pi m_1}{P} \quad (9)$$

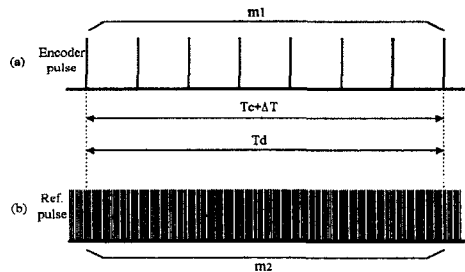


그림 3 위치 및 속도검출 원리
Fig. 3 Basic Principle of speed and position detection

그리고 시간 T_d 는 일정주파수 발전기의 주기 T_c 와 속도에 따라 변화하는 ΔT 의 합으로 주어지고 발전기의 기준주파수 f_c 로 나누어져 디지털화된 값이 m_2 라고 하면 T_d 는 식 (10)과 같이 된다.

$$T_d = \frac{m_2}{f_c} \quad (10)$$

한편, 속도식은 (11) 및 (12)과 같이 구할 수 있다.

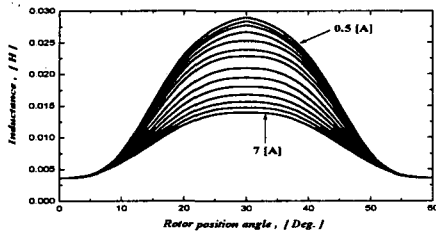
$$\omega = \frac{\theta_d}{T_d} \quad (11)$$

$$\omega = \frac{2\pi f_c m_1}{P m_2} \quad (12)$$

3. 실험결과 및 고찰

실험에 사용된 SRM은 고정자와 회전자의 극이 8/6 이고 400W, 3000rpm, 160V 기기용써 인덕턴스 프로파일은 그림 4와 같으며, 이것은 회전자를 1° 씩 변화시켜가면서 전류 한계치를 7A로 하고 이 한계치를 도

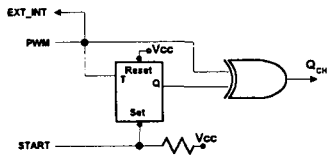
달할 때까지 전압펄스를 인가하여 그때의 전류파형을 오실로스코프로 측정한 뒤, 권선 저항을 고려하여 측정한 전압 및 전류데이터에 의해 인덕턴스를 계산하였다.



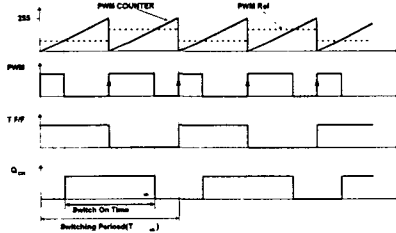
(b) Inductance profiles

그림 4. SRM의 인덕턴스 프로파일
Fig. 4. The inductance profiles of SRM

실험에 사용된 8/6 SRM에 장착된 1024펄스 수의 인코더는 80C196KC의 타이머 2단자로 입력되며, 이 타이머는 2 체배하여 카운터 됨으로 타이머 2를 통해 얻는 값은 2048이 되나, 그 정도를 낮추기 위해 타이머 2 값을 쉬프트 연산을 수행하여 펄스 수를 128로 하였다.



(a) Voltage controller



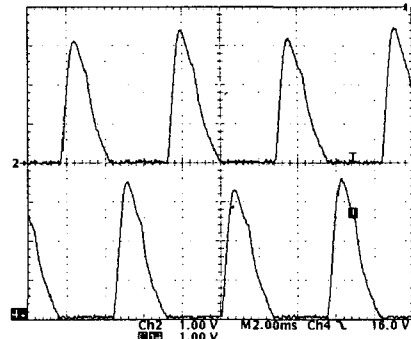
(b) operation waveform

그림 5. 전압제어기와 동작 파형
Fig. 5. Voltage controller and operation waveform

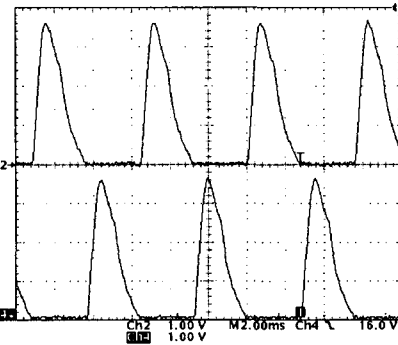
SRM의 여자전압을 제어하기 위한 PWM파형은 80C196의 PWM 단자, 인터럽터 단자 및 외부의 T 플립플롭을 이용하여 그림 5와 같이 구성하였다. 그와 같이 PWM발생기는 기존 80C196의 8Bit 카운터에 의한 PWM기능을 9Bit 카운터에 의한 PWM기능으로 그 정도를 2배 개선한 형태가 된다. 기동시 START단자를 이용하여 T 플립플롭의 출력을 High로 설정하고 PWM 주기마다 번갈아 가며 ON 시간과 OFF 시간을 출력하면 된다. 또한 PWM을 동기 시키기 위해 PWM출력을 외부 인터럽터로 사용하여 PWM출력의 상승 에지 시 새로운 PWM값을 PWM 레지스터에 쓰게 하였다. 이 PWM제어기는 SRM의 여자전압을 제어하기 위한 감압 초과 펄스의 스위칭신호로 사용된다.

그림 6은 SRM이 1800 rpm으로 정회전하고 있을 때 기존의 마이크로프로세서 방식과 제안된 방식에서 상 스위칭 안정도를 비교하기 위한 실험 결과 파형이다. 그림 (a)는 기존의 스위칭방식으로 상 스위치의 ON, OFF각 제어정도가 떨어져서 상 전류 파형이 일정한 형

태가 되지 못한다. 이 결과 상 토크에도 상당한 맥동이 있을 것으로 사료된다. 한편, 제안된 상 스위칭 방식인 그림 (b)에서는 ON, OFF각이 항상 일정한 위치에서 제어되어 상전류 파형은 일정한 형태를 유지하고 있다.



(a) Conventional



(b) Proposed

그림 6. 제안된 방식과 기존방식의 상전류 파형 비교
Fig. 6. Comparison of phase current waveforms

4. 결 론

본 연구에서는 SRM구동에 있어 상 스위치의 고정도 오, 오프를 행하기 위해 스위치 신호 예약기법을 제안하고, 제안된 제어방식의 타당성을 위해 80C196KC의 HSO단자를 통해 그 성능을 검증하였다. 제안된 상 스위치 제어방식은 스위치 온, 오프각이 SRM의 운전속도와 관계없게 되어 안정된 고속운전이 가능하게 되었다.

(참 고 문 헌)

- [1] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szeszsy and W. H. Bocknell : "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor." IEEE Trans. on Industrial Application, vol. 22, no. 4, pp. 708-715, 1986.
- [2] Paul P. Acarnley, Rolaud J. Hill and Clive W. Hooper: "Detection of Rotor Position in Stepping and Switched Motors by Monitoring of Current Waveforms", IEEE Trans. on IE, Vol.32, No.3, pp.215-222, 1985.
- [3] I. E. Liang, Y. Liao, and T. A. Lipo, "A New Variable Reluctance Motor Utilizing An Auxiliary Commutation Winding," IEEE Trans. on IA, Vol.30, No.2, pp.423-432, 1992.