

저가형 엔코더를 이용한 SRM의 안정운전에 관한 연구

박 성준*, 추 영배*, 박 한웅**, 안 진우***, 권 순재****, 김 철우*****

*거제대학, **해군사관학교, ***경성대학교, ****부경대학교,*****부산대학교

Study on the Stable SRM Operation Using Low Cost Encoder

Sung-Jun Park*, Young-Bae Choo*, Han-Woong Park**, Jin-Woo Ahn***, Soon-Jae Kwon****, Cheul-U Kim*****

..:Kije College, ..:Korea naval academy, ...:Kyung Sung Univ.,...:Pukyong national Univ.,:Pusan national Univ.

Abstract

SRM구동을 위한 위치 검출기로 포토 트랜지스터 1개를 이용한 저가형 인코더를 제안하고, 제안된 인코더의 출력신호를 사용하여 간단한 논리회로에 의한 상 스위치 제어방식을 제안하였다. 제안된 상 스위치 제어방식은 스위치 온, 오프 각 지연이 SRM의 운전 속도와 관계없이 되어 안정된 고속운전이 가능하게 되었다.

1. 서론

전력용 반도체 소자의 기술 개발이 급속히 이루어짐에 따라 고속 스위칭과 소자의 대용량화가 가능하게 되고, 산업의 메카트로닉스화에 따라 다기능, 고성능을 가진 전동기의 개발이 활발히 이루어지고 있다. SRM(Switched Reluctance Motor)은 단일여자기기(singly excited machine)로 구조가 간단하고 저렴하며 각 상의 분리로 단락사고(shoot-through fault)에 대해 안정적이며, 직류전동기의 속도-토크 특성을 가지고 있고 넓은 속도범위 및 고속, 정역 회전특성이 우수하고 강인하다는 특성을 가지고 있어 선진국을 중심으로 가전기기, 전기자동차, 항공기 및 산업전반에 그 응용영역을 확대해 가는 연구와 개발이 진행되고 있다.[1] SRM에서 회전자 위치 검출은 일반적으로 인코더를 사용하나, 인코더설치 비용에 대한 부담을 줄이기 위해서 저가형 인코더를 사용한 SRM구동이나 센스리스 구동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구에서는 각 상의 스위칭 온, 오프를 위해서 마이크로프로세서를 이용하고 있다. 그러나 마이크로 프로세서에 의한 SRM의 상 스위치 제어방식에서 상 스위치의 온, 오프 정도는 인코더의 분해능뿐만 아니라 마이크로프로세서의 샘플링 주기에 의해 제약을 받게된다. 또한 이러

한 방식에서 전동기의 속도가 고속으로 됨에 따라 마이크로프로세서에 의한 상 스위치 정도는 더욱 떨어지게 되어 정상운전상태가 불안정하게 된다.

본 연구에서는 SRM구동을 위한 위치 검출기로 포토 트랜지스터 1개를 이용한 저가형 인코더를 제안하고, 제안된 인코더의 출력신호를 사용하여 간단한 논리회로에 의한 상 스위치 제어방식을 제안하였다. 제안된 상 스위치 제어방식은 마이크로프로세서를 이용한 방식이 아닌 디지털 논리방식으로 스위치를 제어함으로써 스위치 온, 오프 각 지연이 SRM의 운전속도와 관계없이 되어 안정된 고속운전이 가능하게 되었다.

2. 본론

2.1 SRM의 동작 원리와 구동 전류

SRM은 회전자 및 고정자가 모두 돌극형 구조로 되어있으며, 고정자에만 집중권으로 되어있다. SRM의 고정자 권선에 전압을 인가할 경우 상당 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$V = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (1)$$

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

최소 인덕턴스 구간에서의 $\theta = \theta_{on}$ 에서 스위치 온이 이루어질 경우 인덕턴스가 일정하므로 식 (1)의 우변 두 번째 항인 속도 기전력은 영이 되어 토오크는 발생하지 않으며 상전류 해를 구하면 식 (2)가 된다.

$$i(\theta) = \frac{V_i}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L_{mm}} \frac{\theta - \theta_{on}}{\omega}}) \quad (2)$$

인덕턴스가 상승하는 구간은 토오크가 발생하는 구간으로 식 (1)에서 우변 두 번째 항의 전류를 제외

한 항은 속도가 일정할 경우 상수가 되며 전류해는 다음과 같다.

$$i(\theta) = \frac{V}{R + R_s} \left[1 - e^{-\frac{R+R_s}{L(\theta)} \frac{\theta - \theta_{on}}{\omega}} \right] \quad (3)$$

$$\text{여기서, } R_s = \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega$$

그리고 스위치 오프시 상전류가 I_{off} 만큼 초기값을 가지고 회전자 위치각 $\theta = \theta_{off}$ 에서 스위치 오프가 이루어지면 상권선에는 부의 전원 전압이 인가되고 같은 방법으로 전류해를 구하면 식 (4)가 된다.

$$i(\theta) = I_{off} - \frac{V}{R + R_s} \left[1 - e^{-\frac{R+R_s}{L(\theta)} \frac{\theta - \theta_{off}}{\omega}} \right] \quad (4)$$

이때 SRM의 톨럭턴스 토크는 자기회로의 톨럭턴스가 최소화되는 방향으로 발생하며, 이때 발생하는 토크는 식 (5)에서와 같이 상권선에 흐르는 전류의 제곱과 회전자 위치각에 대한 인덕턴스의 변화율에 비례한다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (5)$$

그림 1은 자기적 포화가 없는 인덕턴스 프로파일을 가진 경우로 식 (2)~(4)에서 얻어진 전류해에 의해 계산된 상전류 파형으로 스위칭 각도의 변화에 따른 상전류 파형을 보여주고 있다.

그림 1에서는 상권선의 최소 인덕턴스의 영향으로 전류의 확립은 순간적으로 이루어지지 않고 시간 지연이 생기게 되며, 이를 보상하기 위해서 인덕턴스가 증가하는 시점보다 앞선 각(θ_{ad})에서 상 스위치를 온 하여야 한다. B의 파형은 적정 θ_{ad} 인 θ_A 에서 상 스위치를 온 함으로써 평활전류를 형성함을 알 수 있으며, A의 파형은 평활전류를 형성하기 위한 적정각보다 큰 θ_A 에서 상 스위치를 온 하여 과여자가 됨을 나타내고 있고, C의 파형은 적정 각보다 적은 θ_C 에서 상 스위치를 온 하여 부족여자가 됨을 나타내고 있다. 그러므로 인덕턴스 증가 구간에서 정토크의 발생을 효과적으로 하기 위해서는 전동기의 속도와 여자전압의 크기에 따른 적정 온각을 구할 필요가 있다.

인덕턴스 증가 구간에서 전동기를 효과적으로 하기 위해서는 다음과 같은 조치가 필요하다.

(1) 전동기 영역에서 인덕턴스 상승 구간($\theta_{min} \sim \theta_{max}$)에서 스위치-온이 될 경우 인덕턴스의 영향으로 인하여 전류의 확립이 충분하지 않다. 따라서 토오크 발생을 위해 충분한 전류를 확립하기 위해서는 그 구간 이전의 최소 인덕턴스 구간($\theta_0 \sim \theta_{min}$)에서 스위치 온을 행하여야 한다. 이러한 θ_{ad} 의 증가에도 불구하고 전류가 확립되지 못하면 전류확립시 높은 전압을 인가할 수 있는 외부회로를 추가하는 것이 바람

직하다.

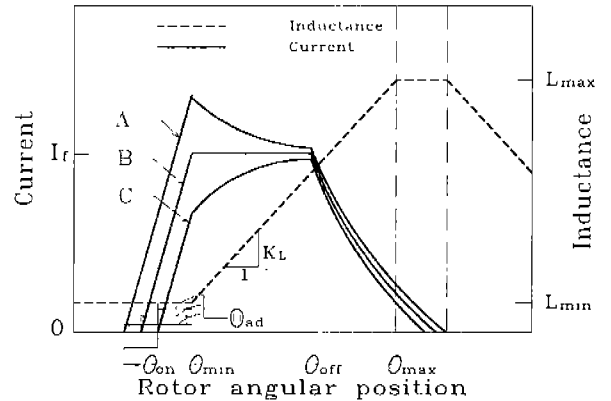


그림 1 스위칭 각도 변화에 따른 상전류 파형
Fig. 1 Current waveform by switching angles

2.2 회전자 위치와 상 신호

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 마이크로 프로세서에 의해 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.

마이크로프로세서를 사용하여 SRM의 상스위치를 제어할 경우 샘플링 주기에 해당되는 위치각의 변화(θ_r)는 전동기의 속도에 좌우되며 그 값은 식 (6)과 같다.

$$\theta_r = 60 \omega_r T \quad (6)$$

단, T : 샘플링 주기, ω_r : 속도(rpm)

전동기의 속도가 저속인 경우에는 샘플링에 의한 위치각 변동이 인코더의 각도 분해능($\Delta\theta$)보다 적으므로 온, 오프 각 변동은 샘플링에 의한 위치각 변동에 지배를 받고, 그 정도는 인코더의 분해능에 의해 결정된다. 그러나 전동기의 속도가 고속인 경우 인코더의 분해능은 변동이 없으나 샘플링에 의한 위치각 변동은 크게 나타나게 되며, 샘플링에 의한 위치각 변동이 인코더의 분해능보다 큰 경우에는 온, 오프 각 변동뿐만 아니라 분해능도 샘플링에 의한 위치각 변동에 의해 지배를 받게 된다.

간단한 인코더를 이용하여 상스위치의 온, 오프를 정밀하게 할 수 있는 방식으로 그림 2와 같은 형태의 인코더를 생각할 수 있다. 그림에서 인코더는 두 개의 포토커플러로 각각의 포토커플러는 정 회전을 위한 부와 역회전을 위한 부로 사용된다. 인코더의

펄스의 주기는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\delta = 2 \frac{360}{P_s P_r} \quad (7)$$

단, P_s : 스테이터의 폴수, P_r : 로터의 폴수

식 (7)에 나타난 펄스폭(δ)은 SRM에서 연속적인 토크를 발생시키기 위해 한 상이 담당해야 할 위치각의 폭이 된다. 따라서 인코더의 A상 펄스에는 $\frac{1}{2}$ 개의 정보가 있다. 그 첫째는 펄스의 상승에지의 위치각이며, 이 각은 상스위치 온 용으로 이용된다. $\frac{1}{2}$ 번째 정보는 펄스폭이 되며, 이 값은 상스위치 온 유지각으로 사용된다. 인코더 A상을 기준으로 상 스위치를 시프트 시킨다면 SRM 구동은 정확히 될 것이다.

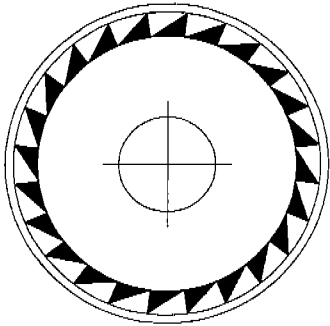


그림 2 저가형 인코더의 형태
Fig. 2 Type of low cost encoder

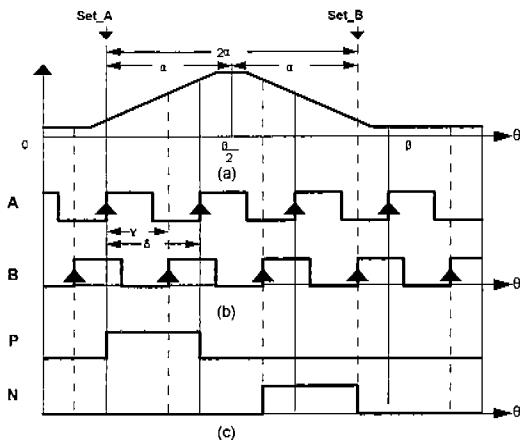


그림 3 상 스위치 발생 개념도
Fig. 3 Principle of switching generation

인코더 B상은 역회전시 상스위치 온, 오프를 위해 사용되며, A상과 B상의 위상차인 γ 에 의해 인덕턴스 프로파일 상에서 임의의 상스위치 온각을 설정할 수 있다. 또한 A상과 B상을 기존의 인코더의 정, 역 판정회로를 그대로 적용하여 회전방향을 감지할 수 있다.

그림 3은 SRM의 한 상에 대한 인덕턴스 프로파

일과 인코더의 A상 및 B상 신호와 이때의 게이트신호를 나타내고 있다.

그림에서 β 는 SRM의 인덕턴스의 주기를 나타내며 그 값은 식 (8)과 같다.

$$\beta = \frac{360}{P_r} \quad (8)$$

ϵ 은 상 스위치의 인덕턴스 최대점의 중앙부를 기준으로 한 상 스위치의 오프시점을 나타내고 있다. 이 각은 상 스위치 온각인 α 에 의해 결정되며 그 관계식은 식 (9)와 같다.

$$\alpha = \epsilon + \delta \quad (9)$$

상 스위치 온각인 α 는 전동기의 운전조건이나 인덕턴스 프로파일에 의해 설정되는 값이며, 온각이 주어지면 오프각은 자동적으로 주어진다.

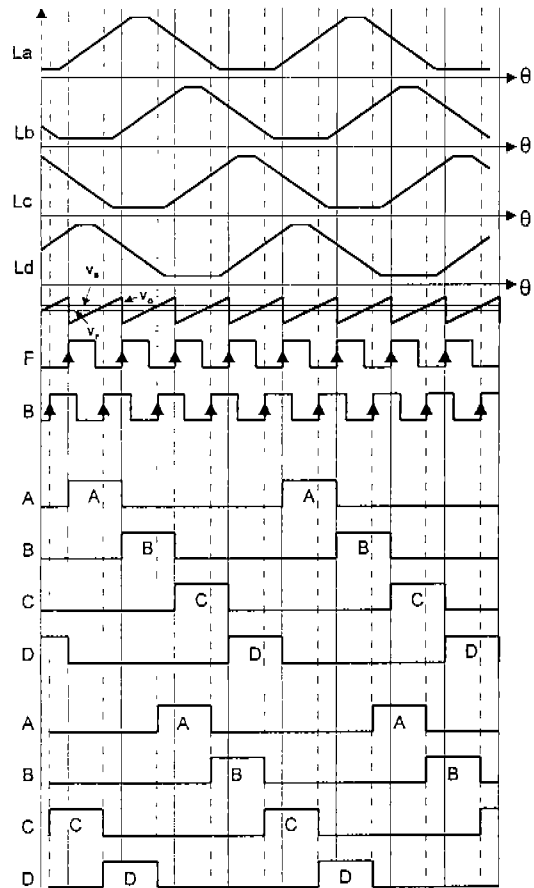


그림 4 상스위치의 발생
Fig. 4 Phase switching generation

그림 4는 정 및 역회전에 대한 전체적인 상스위치 발생을 나타내고 있다. 인코더의 A,B상을 발생하기 위해서는 포토 트랜지스터의 출력과 설정전압(V_A, V_B)과의 비교를 위한 비교기를 통과한 결과이다.

정회전을 위해서는 Set_A를 기준으로 A상 클럭으로 4카운터마다 온 신호로 사용하면 된다. 역회전을 위해서는 Set_B를 기준으로 B상 클럭으로 4 카운터마다 온 신호로 사용하면 된다. 전동기의 정, 역회전 판정은 A, B상을 이용하여 기존의 인코더에서 사용하는 방식을 그대로 사용한다.

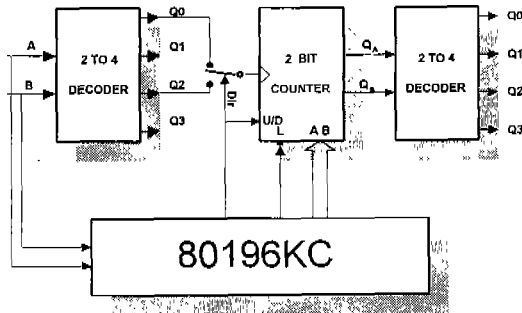


그림 5 제어블록도.
Fig. 5 Control block diagram

그림 5는 상 스위치를 제어하기 위한 제어블록도이다. 제어 및 상태를 표시하기 위해서 제어기는 80196을 사용하였다. 우선 기동을 위해서는 인코더 신호 A,B를 입력받아 로타의 근사적인 위치를 찾는다. 그리고 정회전을 위해서는 Dir단을 1로 역회전을 위해서는 Dir단을 0으로 설정한다. 마이크로프로세서의 HSI핀으로 인코더의 A, B상을 입력받아 전동기의 정, 역회전은 인코더의 A, B상의 위상을 검출하여 판정하고, 속도는 고속입력단자의 사건기록으로부터 계산되어 진다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 6은 본 연구에서 사용되는 기존의 클래식 인버터를 나타내고 있다.

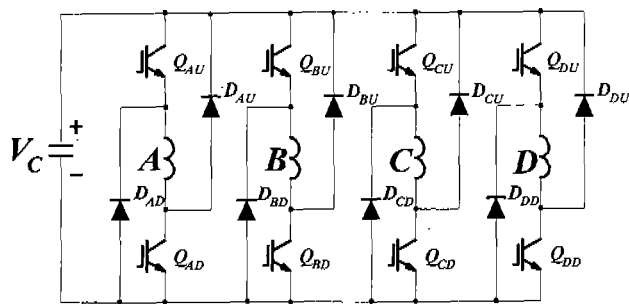
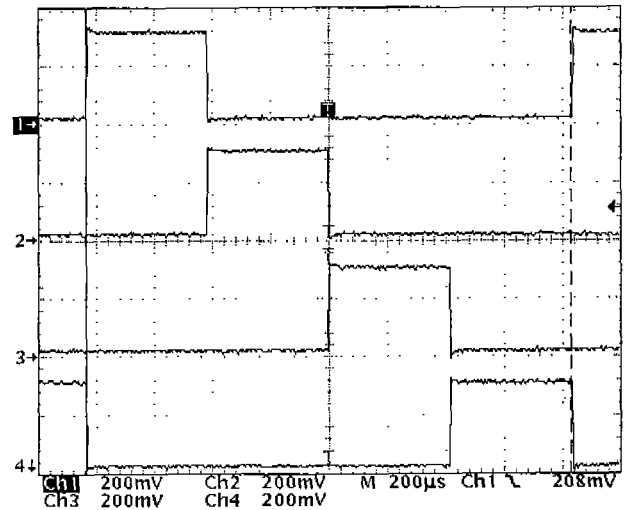
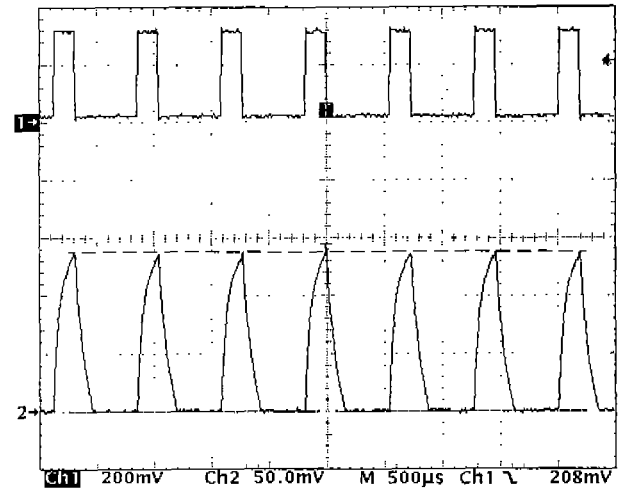


그림 6 SRM 인버터 회로
Fig. 6 SRM inverter circuit

그림 6은 상 스위칭 신호와 전류를 나타내는 파형이다. 그림에서 보는 바와 같이 상 스위치의 정확한 온, 오프로 인하여 상류는 매우 안정된 상태를 보이고 있다. 안정된 상 스위치의 온, 오프는 정상상태에서 시스템의 안정도에 큰 도움이 된다.



(a) 상 스위치 신호



(b) 상 스위치 신호와 상전류

Fig. 7 Control signal and Current

그림 7. 제어신호 및 상전류 파형

4. 결론

본 연구에서는 SRM구동에 적합한 저가형 인코더를 제안하고, 제안된 인코더의 출력신호를 사용하여 간단한 논리회로에 의해 상 스위치 제어방식을 제안하였다. 제안된 상 스위치 제어방식은 스위치 온, 오프 각 지연이 SRM의 운전속도와 관계없게 되어 안정된 고속운전이 가능하게 되었다.

참고 문헌

- [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.