

저가형 SRM 구동회로에 관한 연구

박성준, 김정택, 추 영배, 박 한웅, 권순재, 김 철우
 *거제대학, **해군사관학교, ***부경대학교, ****부산대학교

Study on the SRM Driver of Low coast

Sung-Jun Park, Chung-Tek Kim, Young-Bae Choo, Han-Woong Park, Soom-Jae Kwon, Cheul-U Kim
 * : Koje College, ** : Korea naval academy, *** : Pukyong national univ., **** : Pusan national univ.

Abstract - SRM의 상 스위칭 제어방식에서 상 스위치의 온, 오프 제어정도는 인코더의 분해능뿐만 아니라 마이크로프로세서의 샘플링 주기에 의해 제약을 받게되며, 전동기의 속도가 고속으로 됨에 따라 상 스위치의 온, 오프 제어정도는 더욱 떨어지게 되어 정상운전상태가 불안정하게 된다. 따라서 본 연구에서는 SRM구동에 적합한 저가형 인코더를 제안하고, 제안된 인코더의 출력신호를 사용하여 간단한 논리회로에 의해 상 스위치 제어방식을 제안하였다. 제안된 상 스위치 제어방식은 스위치 온, 오프각 지연이 SRM의 운전속도와 관계없게 되어 안정된 고속운전이 가능하게 되었다.

의 릴럭턴스가 최소화되는 방향으로 토크가 발생하며, 토크는 식 (1)에서와 같이 상권선에 흐르는 전류의 제곱과 회전자 위치각에 대한 인덕턴스의 변화율에 비례한다.

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

릴럭턴스 토크를 최대화 하기 위하여 보통 고정자와 회전자 모두 돌극형(salient type)으로 하여 인덕턴스의 변화율이 최대가 되도록 하고 스위치-온 시점과 스위치-오프 시점에서 부하전류에 대응하는 전류의 확립과 소호를 신속히 하여 토크 발생 구간을 최대한 활용하여야 한다.

SRM은 회전자 및 고정자가 모두 돌극형 구조로 되어 있으며, 고정자에만 집중권으로 되어있다. SRM의 고정자 권선에 전압을 인가할 경우 상당 전압방정식은 식 (2)와 같다.

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

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

1. 서 론

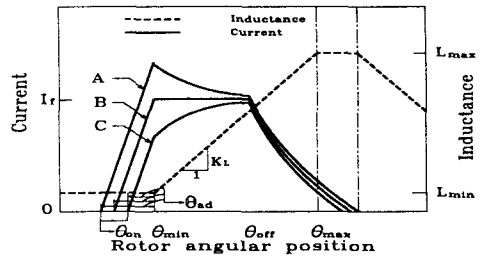
SRM(Swithed Reluctance Motor)은 전동기 구조상 장점으로 인하여 가전기기, 전기자동차, 항공기 및 산업전반에 그 응용영역을 확대해 가는 연구와 개발이 진행되고 있다. SRM은 릴럭턴스 토크를 극대화하기 위해 회전자와 고정자가 모두 돌극형의 구조를 가지며 권선은 회전자에만 집중권으로 감겨 있어 전자계 구조상 단속적인 여자 전원이 각 상권선에 순차적으로 인가되어 구동되므로 낮은 스위칭 주파수로 운전이 가능하여 고속운전이 가능한 장점을 갖고있다. 반면에 회전자 위치에 따른 적절한 스위칭 동작을 위해서는 회전자 위치각에 대한 정보를 검출하기 위한 위치 검출 장치가 필수적이다. 회전자 위치 검출은 일반적으로 인코더를 사용하나, 인코더설치 비용에 대한 부담을 줄이기 위해서 저가형 인코더를 사용한 SRM구동이나 센서리스 구동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. [1] 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 이러한 방식에서 전동기의 속도가 고속으로 됨에 따라 마이크로프로세서에 의한 상 스위치 정도는 더욱 떨어지게 되어 정상운전상태가 불안정하게 된다.

본 연구에서는 SRM구동에 적합한 저가형 인코더를 제안하고, 제안된 인코더의 출력신호를 사용하여 간단한 논리회로에 의한 상 스위치 제어방식을 제안하였다. 또한 저속도영역에서는 피크전류 일정제어방식으로 평활전류로 구동하여 기존의 델타변조방식과 달리 스위칭 주파수를 일정하게 하였다. 제안된 상 스위치 제어방식은 마이크로프로세서를 이용한 방식이 아닌 디지털 논리방식으로 스위치를 제어함으로써 스위치 온, 오프각 지연이 SRM의 운전속도와 관계없게 되어 안정된 고속운전이 가능하게 되었다.

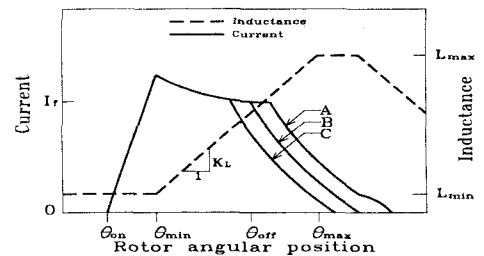
2. 본 론

2.1 SRM의 동작 원리와 구동 전류

SRM은 릴럭턴스 토크를 동력화한 전동기로 자기회로



(a) 스위치 온각 변화시의 상전류 파형



(b) 스위치 오프각 변화시의 상전류 파형

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

그림 1은 스위칭 각도의 변화에 따른 상전류 파형을 보여주고 있다. 그림 1의 (a)는 스위치 오프각을 고정

시켜 두고 어드밴스 각도(온 각도)를 조정했을 경우이고 그림 1의 (b)는 스위치 온각을 고정하여 두고 스위치 오프각을 가변 시켰을 경우이다. 그림에서 보면 토크 발생구간의 시작점에서 각기 다른 확률 전류를 가지며 이 값은 권선 저항 강하를 무시하면 거의 어드밴스 각도에 비례한다. 3개의 파형 중 2개의 상전류 파형은 토크 발생 구간에서 정 또는 부의 전류 구배를 가지므로 발생 토크도 일정하지 않고 토크 맥동도 심하다. 그러나 토크 발생 구간에서 일정한 전류를 가지는 상전류 파형은 인덕턴스의 변화율이 일정하면 평활한 토크를 발생하고 토크 맥동이 적어 전동기를 효율적으로 운전하기 위한 기준 전류가 된다.

그림 1의 (b)에서 스위치 오프가 최대 인덕턴스 점에 가까울수록 토크 발생영역의 활용도가 높아져서 정 토크의 발생에 유리하나 너무 늦추어지면 부 토크의 영향을 받을 수 있어 토크 맥동을 유발하고 기계적 출력이 오히려 감소할 수 있다.

그러므로 부하 토크와 운전 속도에 관계없이 상전류의 형상이 평활한 전류가 되도록 스위치 온각을 결정하고 정 토크 출력에 미치는 부 토크의 영향을 최소화하도록 스위칭 각도를 조정하여야 킬러턴스 토크를 효과적으로 이용할 수 있으며 토크 맥동이 없는 평활한 토크를 얻을 수 있다

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_T)는 전동기의 속도에 좌우되며 그 값은 식 (3)과 같다.

$$\theta_T = 60 \omega_r T \quad (3)$$

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 분해능 보다 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 포토커플러 각각의 포토커플러는 정 회전을 위한 부와 역회전을 위한 부로 사용된다. 인코더의 펄스의 주기는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\delta = 2 \frac{360}{P_s P_r} \quad (4)$$

단, P_s : 스테이터의 폴수
 P_r : 로터의 폴수

식 (4)에 나타난 펄스폭(δ)는 SRM에서 연속적인

토크를 발생시키기 위해 한 상이 담당해야 할 위치각의 폭이 된다. 따라서 인코더의 A상 펄스에는 두 개의 정보가 있다. 그 첫째는 펄스의 상승에지의 위치각이며, 이 각은 상스위치 온 용으로 이용된다. 두 번째 정보는 펄스폭이 되며, 이 값은 상스위치 온 유지각으로 사용된다. 인코더 A상을 기준으로 상스위치를 시프터 시킨다면 SRM 구동은 정확히 될 것이다.

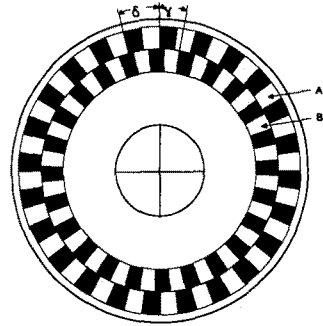


그림 2 저가형 인코더의 형태
 Fig. 2 Type of low cost encoder

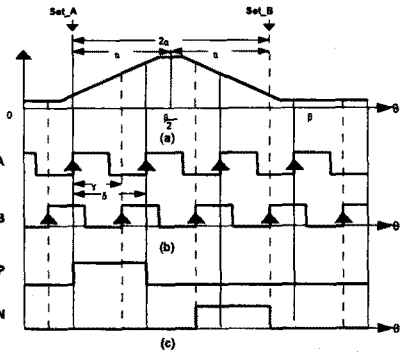


그림 3 상스위치 발생 개념도
 Fig. 3 Principle of switching generation

인코더 B상은 역회전시 상스위치 온, 오프를 위해서 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 프로파일과 인코더의 A상 및 B상 신호와 이때의 게이트신호를 나타내고 있다.

그림에서 β 는 SRM의 인덕턴스의 주기를 나타내며 그 값은 식 (5)와 같다.

$$\beta = \frac{360}{P_r} \quad (5)$$

ε 는 상스위치의 인덕턴스 최대점의 중앙부를 기준으로 한 상스위치의 오프시점을 나타내고 있다. 이 각은 상스위치 온각인 α 에 의해 결정되며 그 관계식은 식 (6)과 같다.

$$\alpha = \varepsilon + \delta \quad (6)$$

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

정회전을 위해서는 Set_A를 기준으로 A상 클럭으로 4카운터마다 온 신호로 사용하면 된다. 이를 위해서 4bit 시프트 레지스터를 사용하면 간단히 해결할 수 있다. 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.

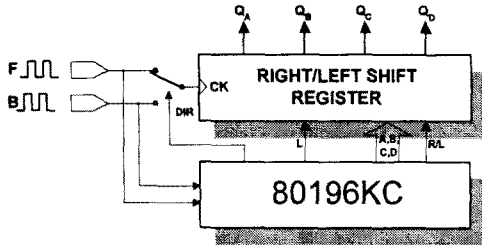


그림 4 제어블록도
Fig. 4 Control block diagram

그림 4는 상 스위치를 제어하기 위한 제어블록도이다. 제어 및 상태를 표시하기 위해서 제어기는 80196를 사용하였다. 우선 기동을 위해서는 로드단자를 인에이블하여 시프트 레지스터에 Q_C가 온 되게 하여 로터의 위치를 SET에 위치시킨다. 그리고 정회전을 위해서는 인코더의 A상이 시프트 레지스터의 클럭입력으로 선택(DIR단자)한 후 Q_A가 온 되게 하면 되고, 역회전을 위해서는 인코더의 B상이 시프트 레지스터의 클럭입력으로 선택한 후 Q_D가 온 되게 하면 된다. 마이크로프로세서의 HSI핀으로 인코더의 A, B상을 입력받아 전동기의 정, 역회전은 인코더의 A, B상의 위상을 검출하여 판정하고, 속도는 고속입력단자의 사건기록으로부터 계산되어진다. DIR단자는 토크의 영역에 의해 결정되어지고, R/L단자는 전동기의 정, 역회전에 의해 결정되어진다.

3. 실험 결과 및 고찰

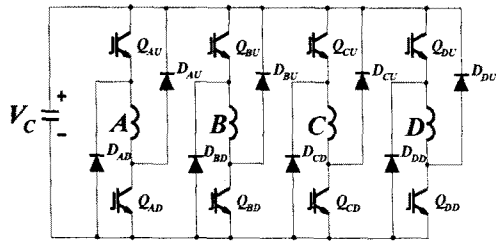
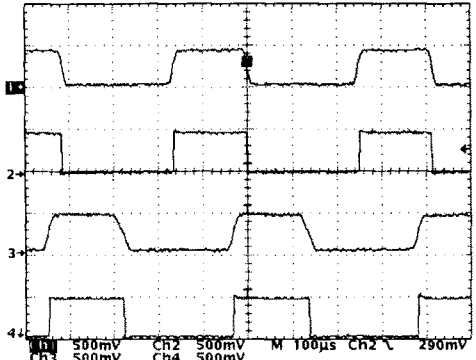
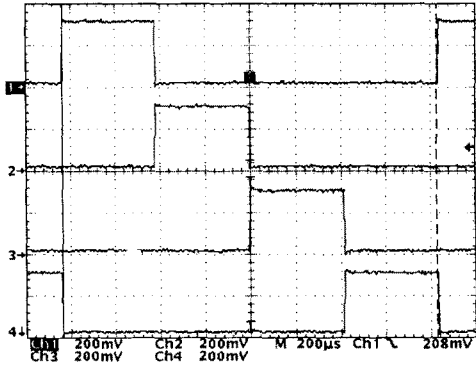


그림 5 SRM 인버터 회로
Fig. 5 SRM inverter circuit

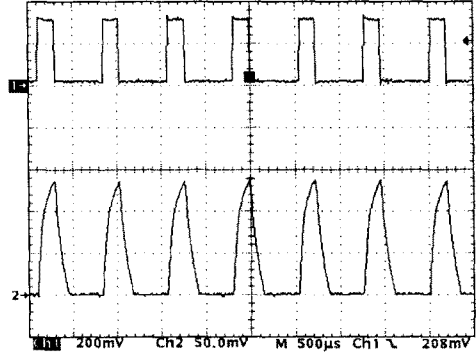
그림 5는 본 연구에서 사용되는 기존의 클래식 인버터를 나타내고 있다. 그림 6(a)는 6000[rpm]으로 운전될 때의 포토카플라의 출력과 비교기의 출력을 나타내고 있다. 이 출력인 A상과 B상의 출력 위상에 의해 전동기의 속도를 판단하고, 펄스마다 각 상에 순차적으로 게이트신호를 인가한다. 이때의 게이트 신호는 그림 6(b)에 나타나 있다. 그림 6(c)는 상 스위칭 신호와 전류를 나타내는 파형이다. 그림에서 보는 바와 같이 상 스위치의 정확한 온, 오프로 인하여 상류는 매우 안정된 상태를 보이고 있다. 안정된 상 스위치의 온, 오프는 정상상태에서 시스템의 안정도에 큰 도움이 된다.



(a) 포토카플라 출력 및 비교기 출력



(b) 상 스위치 신호



(c) 상 스위치 신호와 상전류

Fig. 6 Control signal and Current
그림 6. 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, 오프가 지연이 SRM의 운전속도와 관계없게 되어 안정된 고속운전이 가능하게 되었다.

(참고 문헌)

[1] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szesznyi and W. H. Bocknell : "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor." IEEE Trans. on Industrial Application, vol. 22, no. 4, pp. 708-715, 1986.