

SRM의 안정된 운전을 위한 고정밀 온, 오프 제어기법에 관한 연구

Study on the high performance On Off control for stable SRM drive

박성준*, 이영진**, 박한웅***, 한성현****, 이만형**

*동명대학, **부산대학교, ***해군사관학교, ****경남대학교

Abstract - In SRM drive, The accuracy of the switching angles is dependent upon the resolution of the encoder and the sampling period of the microprocessor. As the speed increases, the amount of the switching angle deviation from the preset values is increased by the sampling period. Therefore, in this paper the low cost liner encoder for the practical and stable SRM drive is proposed and the control algorithm to provide the switching signals using the simple digital logic circuit is presented. and it is verified from the experiments that the proposed encoder and logic controller can be a powerful candidate for the practical low cost SRM drive.

1. 서 론

SRM은 톨릭턴스 토모크를 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 고속 운전이 가능한 장점을 갖고있다. 반면에 회전자 위치에 따른 적절한 스위칭 동작을 위해서는 회전자 위치각에 대한 정보를 검출하기 위한 위치 검출 장치가 필수적이라는 취약점을 가지고 있다. 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 이를 완전히 제거하기 위한 센서리스 구동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 이러한 연구에서는 각 상의 스위치를 ON·OFF 시키기 위해 마이크로프로세서를 이용하고 있다. 그러나 마이크로 프로세서에 의한 SRM의 제어 방식에서 상 스위치의 ON·OFF 精度는 엔코더

의 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.

따라서 본 연구에서는 SRM구동을 위한 저가형 엔코더를 제안하고, 제안된 엔코더의 출력신호를 사용하여 간단한 회로에 의해 상 스위치 ON·OFF각을 제어하는 방식을 제안하였다. 출력신호를 사용하여 간단한 회로에 의해 상 스위치 온, 오프 제어방식을 제안하였다. 제안된 상 스위치 제어방식에서 스위치 온, 오프각 제어정도는 기존의 일반적인 상스위치 제어방식과 달리 마이크로프로세서의 샘플링주기 및 SRM의 운전속도와 관계없이 항상 원하는 위치에서 ON·OFF스위칭을 행할 수 있다. 따라서 온, 오프각 제어에 의한 광범위한 속도영역에서 안정된 속도 제어가 가능할 뿐만 아니라, 정·역운전 및 PWM에 의한 전류제어운전도 가능하다. 나아가 엔코더 및 제어를 저가격화화 더불어 구동시스템의 안정화를 구현함으로써 SRM의 실용화 가능성이 실험을 통해 입증되었다.

2. 본 론

2.1 SRM의 동작 원리와 구동 전류

SRM은 톨릭턴스 토모크를 동력화한 전동기로, 이를 최대한 이용하기 위하여 보통 고정자와 회전자 모두 돌극형(salient-pole type) 구조로 하고 고정자에만 집중권으로 권선이 감겨져 있다. 이때 토크는 자기회로의 톨릭턴스가 최소화되는 방향으로 발생하며, 상당 발생토크의 크기는 식 (1)에서와 같이 상권선에 흐르는 전류 i 의 제곱과 회전자 위치각 θ 에 대한 인덕턴스 L 의 변화율에 비례한다.

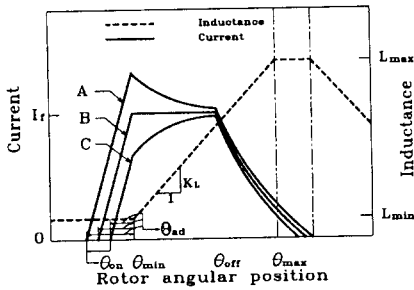
$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (1)$$

따라서 인덕턴스의 변화율이 최대가 되도록 하고 각 상스위치의 ON·OFF 시점에서 부하에 대응하는 전류의 확립과 소호를 신속히 하여 토크 발생 구간을 최대한 활용하여야 한다. SRM의 고정자 권선에 전압을 인가할 경우 상당 전압 방정식은 식 (2)와 같다.

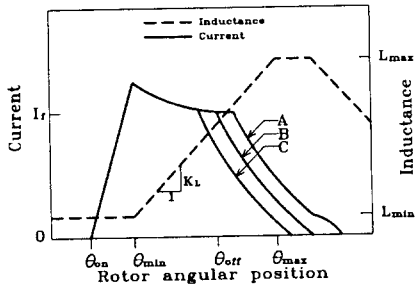
$$V = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (2)$$

단, $\omega = \frac{d\theta}{dt}$: 회전자 각속도 [rad/s]

그림 1은 스위칭 각도의 변화에 따른 상전류 파형을 보여주고 있다. 그림의 θ_{min} 과 θ_{max} 는 각각 고정자와 회전자의 극이 서로 겹쳐지기 시작하여 완전히 일치할 때의 회전자각도를 나타낸다. 그림 1의 (a)는 스위치 오프각을 고정시켜 두고 어드밴스 각도(온 각도)를 조정했을 경우로써, ON각이 변하면 토크 발생구간의 시작점에서 확립된 전류의 크기는 각기 다르며 이 값은 권선 저항을 무시하면 거의 어드밴스 각도에 비례한다.



(a) Off angle is fixed.



(b) On angle is fixed.

그림 1. 스위칭 각 변화에 따른 상전류 파형

Fig. 1. Phase current waveforms according to the variation of the switch angles

또, 3개의 파형 중 A 및 C의 상전류 파형은 토크 발생구간에서 전류의 변화율이 正 또는 負 가되므로 발생 토크도 일정하지 않고 토크 맥동도 심하다. 그러나 토크 발생 구간에서 일정한 전류를 가지는 B의 상전류 파형은 인덕턴스의

변화율이 일정하면 평활한 토크를 발생하고 토크 맥동이 적어 전동기를 효율적으로 운전하기 위한 기준전류가 된다.

그림 1의 (b)는 스위치 온각을 고정하여 두고 스위치 오프각을 가변 시켰을 경우로써, OFF각이 최대 인덕턴스 점에 가까울수록 토크 발생영역의 활용도가 높아져서 정 토크의 발생에 유리하나, 너무 크게 하면 負 토크의 영향을 받을 수 있어 토크 맥동을 유발하고 기계적 출력이 오히려 감소할 수 있다. 그러므로 부하토크와 운전속도에 관계없이 상전류의 형상이 평활한 전류가 되도록 스위치 온각을 결정하고 負 토크가 발생하지 않도록 OFF 각도를 조정하여야 릴럭턴스 토크를 효과적으로 이용할 수 있으며 맥동이 작은 평활한 토크를 얻을 수 있다.

일반적인 SRM 구동시스템에서 온, 오프각은 회전자 위치각에 따라 스위칭이 이루어져야 하므로 회전자의 위치정보가 필수적이다. 일반적으로 회전자 위치각은 레졸버(resolver)나 엔코더(encoder)를 전동기 측에 장치하여 검출하는 것이 보통이며, 특히 단가를 고려하여 증분형 엔코더(incremental encoder)를 사용하는 것이 보통이다. 이 증분형 엔코더(incremental encoder)에 의해 위치에 따른 출력펄스수를 증감형 계수기(up-counter)에 의해 디지털 값으로 얻어지며, 이를 이용하여 마이크로 프로세서에 의해 각 상의 상 신호를 제어하게 된다. 그러나 이러한 상스위치 온, 오프 제어방식은 마이크로 프로세서의 샘플링에 의해 그 정도가 크게 좌우되며, 특히 고속으로 갈수록 그 정도는 낮아지게 되어 SRM의 정상상태 운전이 불안정하게 될 수 있다. 따라서 이러한 제어기는 일반적으로 DSP로써 구현하여 샘플링 주파수를 줄이고 있으나, 안정된 운전을 위한 최대속도에는 한계가 있다.

2.2 제안된 엔코더

기존 시스템에서와 같이 마이크로프로세서를 사용하여 SRM의 상스위치를 제어할 경우 그 제어정도는 인코더의 분해능($\Delta\theta$)과 샘플링 주기 동안에 회전자 위치각의 변화($\Delta\theta_m$)에 의해 결정된다.

한 회전당 펄스수가 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 상스위치 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 제어 정도를 도식적으로 나타내면 그림 2와 같다.

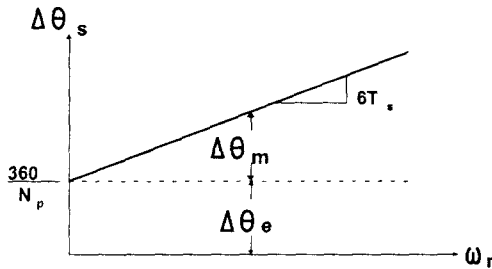


그림 2. 속도에 따른 스위칭각 예라
Fig. 2. Error of switching angle to speed

그림에서 알 수 있듯이 전동기의 속도가 증가함에 따라 샘플링에 의한 오차는 $6T_s$ 의 기울기로 증가한다. 또한 인코더의 분해능과 마이크로프로세서의 위치각 변동이 정수배로 나타나지 않으면 스위칭각 제어에는 저차 고조파성분이 나타나게 된다. 이로 인하여 SRM의 토크성분에도 동일한 저차고조파 성분이 나타나게 되어 안정화 운전에 악영향을 미치게 된다.

일반적으로 전동기의 속도가 저속인 경우에는 샘플링에 의한 위치각 변동이 인코더의 각도 분해능 $\angle\theta_e$ 보다 적으므로 ON·OFF각의 변동은 인코더의 분해능에 의해 지배를 받게 된다. 그러나 전동기의 속도가 고속이 될수록 인코더의 분해능은 변동이 없으나 샘플링에 의한 위치각 변동은 크게 나타나게 되며, 이 경우 ON·OFF각의 변동은 샘플링에 의한 위치각 변동에 지배를 받게 된다. 따라서 인코더가 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 상스위치를 제어하기 위해서는 특별한 제어기법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 간단한 인코더를 이용하여 상스위치의 온, 오프

프를 정밀하게 할 수 있는 방식으로 그림 3과 같은 형태의 인코더를 제안한다.

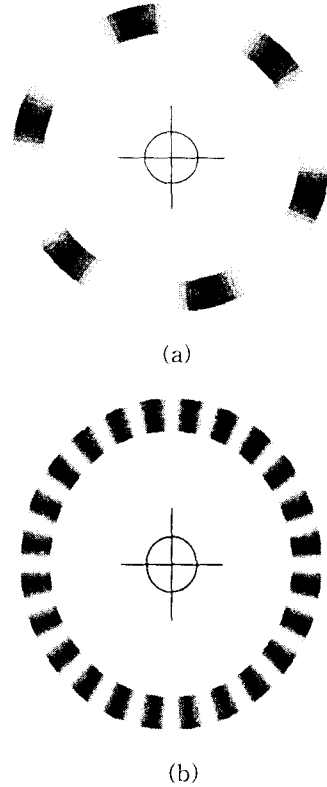


그림 3. 제안된 저가형 인코더
Fig. 3. Proposed low cost encoder

그림에서 제안된 인코더는 본 실험에 사용되는 8/6 SRM의 경우에 대한 인코더의 형태이다.

그림에서 보는바와 같이 인코더의 기판은 기존의 디지털 방식 인코더와 달리 인코더의 기판에 색깔을 선형으로 사용함으로써 인코더가 회전함에 따라 투과되는 광량은 선형적으로 증가 및 감소를 하게 된다. 이로 인하여 포토 트랜지스터의 출력은 위치각의 함수로한 삼각파가 출력된다. 따라서 포토 트랜지스터의 출력전압으로 SRM의 회전자 위치를 파악할 수 있다.

제안된 인코더의 형태에서 인코더의 출력주기는 그림 4의 (a)와 같이 SRM 인턱턴스의 한 주기에 해당되는 식 (6)과 같이 정의될 수 있다. 8/6 SRM의 경우 주기는 기계각 60° 가 된다. 또한 인코더의 출력 주기를 한 상이 담당해야 할 변위인 식 (7)과 같이 정의 할 수 있다. 8/6 SRM의 경우 주기는 기계각 15° 가 된다.

$$\delta = \frac{360}{P_r} \text{ [deg.]} \quad (6)$$

$$\delta = 2 \frac{360}{P_s P_r} \quad [\text{deg.}] \quad (7)$$

단, P_s : 고정자의 극수
 P_r : 회전자의 극수

식 (7)에 나타난 펄스폭(δ)은 SRM에서 연속적인 토크를 발생시키기 위해 한 상이 담당해야 할 위치각의 폭이 된다.

엔코더의 출력주기를 식 (6)과 같이 정의되면, 상 스위칭을 위한 회전자 위치각을 완전히 얻을 수 있어 기동시에도 회전자의 위치를 파악할 수 있는 장점이 있으나, 엔코더의 출력을 선형으로 만드는 것이 매우 어렵다는 단점으로 인해 동일한 상 전류파형 형성에 매우 큰 어려움이 있다.

엔코더의 출력주기를 식 (7)과 같이 정의되면, 엔코더의 출력이 비선형성으로 나타나더라도 간단한 회로로 동일한 형태의 상스위치를 제어할 수 있는 장점이 있으나, 상 스위칭을 위한 회전자 위치각을 완전히 얻을 수 없어 기동시에도 회전자의 위치를 파악할 수 없는 단점이 있다.

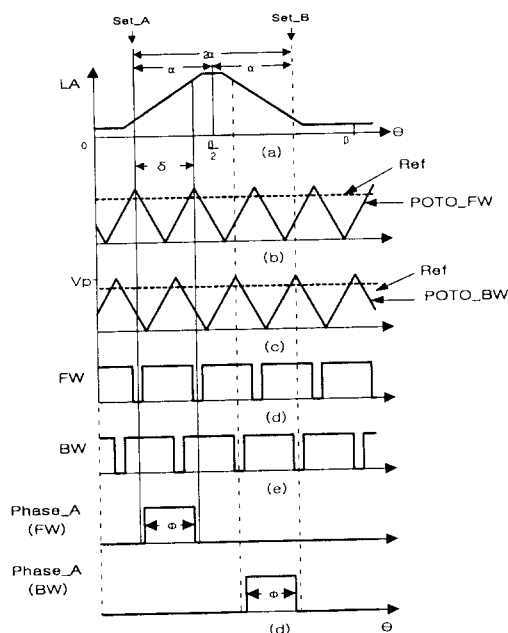


그림 4. 상 스위치의 스위칭 패턴

Fig. 4. Switching patterns of the phase switch

이 방식에서는 정회전과 역회전을 위한 포토커플러가 필요하다. 엔코더에서 두 개의 포토커플러는 기계각 γ 만큼 위상차를 두고 설치되어 있으며, 각각의 포토커플러는 정 회전을 위한 부와 역회전을 위한 부로 사용된다. 인코더의 두상의

위상차(γ)는 SRM의 정, 역운전시 동일한 형태의 상스위치를 형성하기 위한 위상차가 되며, 이는 SRM의 프로파일에 의해 결정된다.

본 실험에서는 엔코더의 출력주기를 식 (7)과 같이 정의하여 SRM의 상스위치를 제어하였다.

그림 4는 SRM의 한 상에 대한 인덕턴스 프로파일과 엔코더의 포토트랜지스터, 위치각 지령치, FW상 및 BW상 신호와 이때의 게이트신호를 나타내고 있다. 그림에서 β 는 SRM의 인덕턴스의 주기를 나타내며 그 값은 식 (8)과 같은 값이 된다.

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

정회전의 경우를 살펴보면 그림에서 보는 바와 같이 엔코더의 포토커플러의 출력과 상스위치 지령치를 비교하여 FW상 펄스를 형성한다. 이와 같이 형성된 FW상 펄스 열을 각상의 상스위치로 순차적으로 분배하면 된다. 이때 상스위치가 온되는 각도 변위는 식 (9)와 같다.

$$\phi = \delta \frac{V_{ref}}{V_p} \quad [\text{deg.}] \quad (9)$$

상스위치가 온되는 각도 변위인 V_{ref} 지령치는 전동기의 정회전 및 역회전에 관계없이 하나의 D/A변환기를 통하여 발생한다. 전동기의 회전방향이 정회전일 때는 FW에 의해 상스위치가 결정되고, 역회전을 위해서는 BW에 의해서 상스위치가 결정된다. 위치각 변위지령치를 하나로 하는 이유는 FW와 BW에 의해 전동기의 정회전 및 역회전 판정용으로 사용하기 위함이다. 따라서 엔코더 BW상은 역회전시 상스위치 온, 오프를 위해서 사용되며, FW상과 BW상을 기존의 엔코더의 정, 역 판정회로를 그대로 적용하여 회전방향을 감지할 수 있다.

정회전을 위해서는 Set_FW를 기준으로 각 상스위치를 FW상 클럭으로 4카운터마다 온 신호로 사용하면 된다. 역회전을 위해서는 Set_BW를 기준으로 각 상스위치를 BW상 클럭으로 4카운터마다 온 신호로 사용하면 된다. 전동기의 정, 역회전 판정은 FW, BW상을 이용하여 기존의 엔코더에서 사용하는 방식을 그대로 사용한다.

2.3. 제어기의 구성

그림 5는 제안된 엔코더에 의한 8/6 SRM의 인덕턴스 프로파일과 인코더의 출력 및 정·역회전 운전시의 각 상의 게이트신호를 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 정회전을 위해서는 FW상 클럭을 기준으로 하여 각 상스위치는 4카운터마다 온 신호로 사용하면 된다. 이를 위해서 4진 카운터와 2/4 멀티플렉스를 조합하여 사용

하면 간단히 해결할 수 있다.

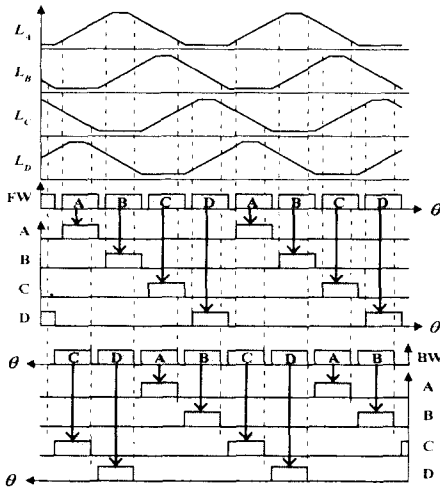
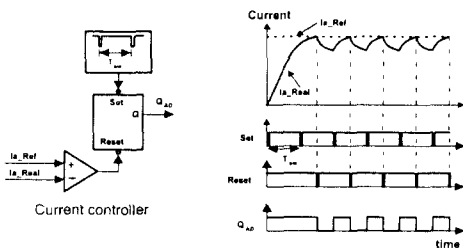


그림 5. 정·역회전 운전시 게이트신호
Fig. 5. Gate signal when forward and backward directions

역회전을 위해서는 BW상 클럭으로 4 카운터마다 온 신호로 사용하면 된다. 전동기의 정, 역회전 판정은 FW, BW상을 이용하여 기존의 엔코더에서 사용하는 방식을 그대로 사용한다

본 논문에서 제안한 제어방식은 상스위치의 온, 및 오프각 제어방식이 된다. 따라서 전동기의 속도를 제어하기 위해서는 전압제어 방식을 채택할 필요가 없다.

전동기를 구동에 있어 초기 위치각에 대한 정보가 없다. 이를 해결하기 위해서 본 구동방식에서는 기동전에 임의의 한 상에 정격전류를 흘려 초기 위치를 일정하게 하였다. 초기 기동전류를 흘리기 위해서는 전류제어기가 필수적이며, 전류제어기는 그림 8과 같은 피크전류 제어방식으로 전류를 제어하였다.



(a) Current controller

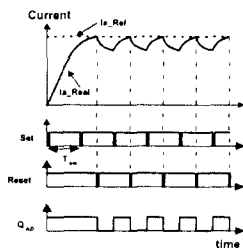


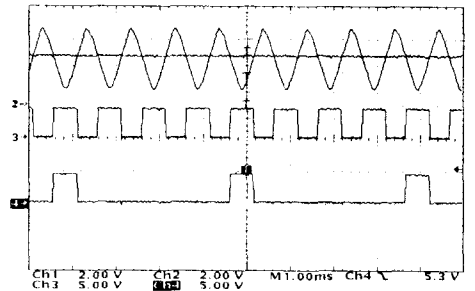
그림 6. 전류제어기와 동작파형

Fig. 6. Current controller and operation waveform

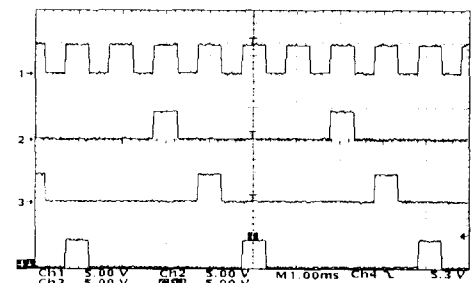
그림 6의 전류제어기는 비교기와 프리플롭으로 구성되어 있다. 스위칭 주기마다 프리플롭의 셀 단자를 인에이블시켜 스위치를 온하게하여 실제 전류는 증가하게되고, 비교기에서 전류지령치와 실제전류를 비교하여 실제전류가 지령치전류보다 크게되면 리셀단자를 인에이블시켜 스위치를 오프하여 전류는 감소하게 된다. 이러한 전류제어 방식은 제어기의 속응성은 델타변조기법과 동일한 우수한 특성을 갖게되고, 스위칭주파수는 일정하게 할 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

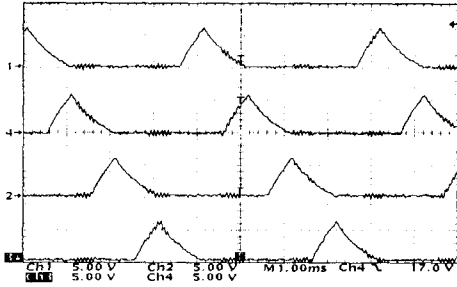
먼저 SRM이 시계방향으로 회전하고 있을 때를 정회전, 반시계방향으로 회전하고 있을 때를 역회전이라 정의한다. SRM이 2500(rpm)으로 정회전하고 있을 때, 선형 포토트랜지스터의 출력과 위치각 변위 지령치, FW의 출력신호 및 A상의 게이트신호를 그림 7(a)에 나타나 있으며, 그림 (b)는 FW와 A-C상 게이트신호를 나타내고 있다. B~C상 신호는 A상의 신호를 15° 씩 시프트시켰다. 그림 (c)는 각 상 전류를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 일정한 회전자위치각에서 상 스위치를 ON·OFF함으로써 상전류는 거의 동일한 형태를 가지고 있음을 알 수 있다



(a) output signals of photo Tr., encoder and gate signal



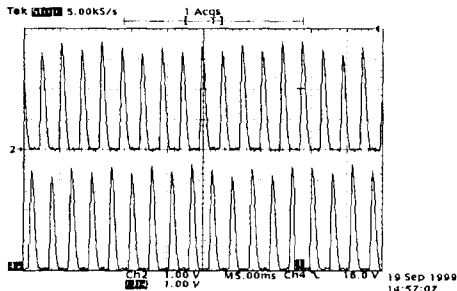
(b) Gate signal and corresponding encoder signal



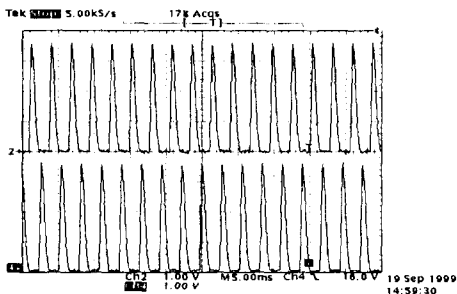
(c) Each phase currents

그림 7. 상스위치 게이트신호 및 상전류 파형
Fig. 7. Waveforms of the phase switch gate signals and phase current(2500rpm)

그림에서 보는 바와 같이 고속에서도 일정한 회전자위치각에서 상 스위치를 ON·OFF시킬 수 있으므로 상전류는 거의 동일한 형태를 가지며, 매우 안정된 속도 및 토크제어를 행할 수 있음을 보이고 있다. 정확하고 안정된 상 스위치의 온, 오프는 정상상태에서 시스템의 안정도에 큰 도움이 된다.



(a) Conventional



(b) Proposed

그림 8. 제안된 방식과 기존방식의 상전류 파형 비교(3600rpm)
Fig. 8. Comparison of phase current waveforms (3600rpm)

그림 8은 SRM이 3600(rpm)으로 정회전하고 있을 때 기존의 마이크로프로세서 방식과 제안된 방식에서 상 스위칭 안정도를 비교하기 위한 실험 결과 파형이다. 그림 (a)는 마이크로프로세서를 이용한 기존의 스위칭방식으로 상스위치의 온, 오프각 제어정도가 떨어져서 상 전류파형이 일정한 형태가 되지 못한다. 이 결과 상 토크에도 상당한 리플이 있을 것으로 사료된다. 한편, 제안된 상스위칭 방식인 그림 (b)에서는 온, 오프각이 항상 일정한 위치에서 제어되어 상 전류파형은 일정한 형태를 유지하고 있다.

4. 결 론

SRM구동에 적합한 저가형 엔코더를 제안하고, 제안된 엔코더의 출력신호를 사용하여 간단한 논리회로에 의해 상 스위치 제어방식을 제안하였다. 제안된 상 스위치 제어방식은 스위치 온, 오프각 지연이 SRM의 운전속도와 관계없이 항상 일정하므로 이를 적절히 보상시켜주면 항상 정확한 위치에서 ON·OFF스위칭을 행할 수 있어 뿐만 아니라 ON·OFF제어에 의해 광범위한 속도영역에서 안정된 운전이 가능할 하였다. 나아가 엔코더 및 제어를 저가격화함으로써 구동시스템의 안정화·저가화를 구현함으로써 SRM의 실용화 가능성을 실험을 통해 입증하였다.

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] D. W. J. Puller "New data base for switched reluctance drive simulation." *Proc. IEE*, Vol.138, Pt-B, No.6, pp.331-336, 1991.
- [3] Paul P.Acarney, 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.
- [4] S. Vukosavic and V. R. Stefanovic, "SRM Inverter Topologies: A Comparative Evaluation", *IEEE Trans. on IA*, Vol.27, No.6, pp. 1034-1047, 1991.
- [5] J. T. Bass, "Robust torque Control of Switched-Reluctance Motors without Shaft-Position Sensor", *IEEE Trans. on IE*, Vol.33, No.3, pp.212-216, 1986.