

광범위한 여자각 제어가 가능한 SRM전용 엔코더 개발

박성준*, 김종달*, 손우현*, 김규섭*, 이일천*, 김철우**
 *동명대학 전기전자계열, **부산대학교 전기과

Study on the Exclusive SRM Encoder for Angle Control in Wide Region

Sung-Jun Park, Jong-Dal Kim, Mu-Heon Shon, Gyu-Seob Kim, Yil-Chun Lee, Cheul-U Kim
 DongMyoung College, Pusan National Univ.

Abstract - In general, the accuracy of the switching angles is dependent upon the resolution of the encoder and the sampling period of the microprocessor. But the region of high speed, switching angles are fluctuated back and forth from the preset values, which are cause by the sampling period of the microprocessor.

Therefore, the low cost linear encoder suitable for the practical and stable SRM drive is proposed and the control algorithm to provide the switching signals using the simple analog type switching logic circuit is also presented in this paper.

1. 서 론

SRM에서 회전자 위치각의 검출은 일반적으로 엔코더나 레졸버를 사용하나, 이러한 기계적인 외부 위치센서는 분해능이 높을수록 단가가 상승하게 된다. 따라서 설치비용에 대한 부담을 줄이기 위해서 저가형 엔코더를 사용하거나 이를 완전히 제거하기 위한 센서리스 구동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁾. 한편 각 상의 스위치를 온·오프 시켜 SRM을 구동하기 위하여 일반적인 제어기로 마이크로 프로세서를 이용하고 있다. 그러나 마이크로 프로세서에 의한 SRM의 제어방식에서 상스위치의 온·오프 정도는 엔코더의 분해능뿐만 아니라 마이크로 프로세서의 샘플링 주기에 의해 제약을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 SRM 구동에 적합하고, 경제적인 면에서 저가형 선형 엔코더를 제안하였다. 또한 제안된 엔코더의 출력신호를 사용하여 간단한 회로에 의해 상스위치 온·오프각을 제어하는 방식을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 SRM의 특성

자기적 구조를 매개로 하는 전기기계 에너지변환기구의 토오크 발생기구는 상호 토오크(mutual torque)와 릴럭턴스 토오크(reluctance torque)가 있다. 상호 토오크는 고정자와 회전자에 각각 여자에너지를 인가할 때 극대화되는 토오크로 일정 회전자각 여자특성에서 발생된다.

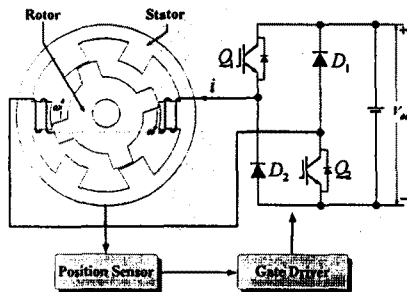


그림 1 SRM 구동시스템
 Fig. 1 SRM Drive system

릴럭턴스 토오크는 고정자 또는 회전자 한 쪽에만 여자에너지를 인가할 때 자기적 구조에 의존하여 발생하는 토오크로서 자기회로의 릴럭턴스와 여자에너지의 변화로 유도되며, 여자에너지를 인가한 상의 릴럭턴스가 최소화되려는 특성에 기인한다. 그림 1은 이중 돌극형 SRM 드라이브의 기본 구성도 이다. 그림 2는 SRM의 회전자 위치에 따른 토오크 특성이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 회전자 위치에 따라 정의 토오크와 부의 토오크가 발생하게 된다. 따라서 각 상에서 발생하는 토오크를 적절히 이용하려면 회전자의 위치에 동기된 여자전압의 인가가 필요하다.

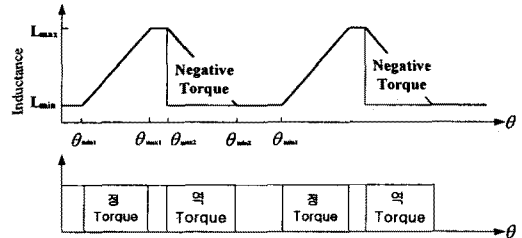


그림 2 SRM의 토오크 발생 특성
 Fig. 2 Characteristic of torque generation for SRM

2.2 제안된 엔코더

일반적인 SRM의 상스위치 제어방식은 제어기를 마이크로 프로세서를 사용하며, 인크리멘터 인코더와 같은 위치검출기로부터 회전자 위치정보를 받아 상스위치의 온, 오프를 결정한다. 이와 같이 마이크로프로세서를 이용하여 SRM의 상스위치를 제어할 경우 그 제어정도는 엔코더의 분해능(\$\Delta\theta_e\$)과 샘플링 주기 동안에 회전자 위치각의 변화(\$\Delta\theta_m\$)에 의해 결정된다. 따라서 요구되는 상스위치 온, 오프 정도에 맞추기 위해서는 엔코더의 분해능과 마이크로 프로세서의 샘플링 주기를 적절히 선택하여야 한다.

한 회전당 펄스수가 \$N_p\$인 엔코더에 의한 전기적 위치각 분해능은 전동기의 속도와 무관하며 그 값은 식 (1)과 같다.

$$\Delta\theta_e = P_s \frac{2\pi}{N_p} [\text{Rad}] \quad (1)$$

또한 샘플링 주기 동안에 회전자의 전기각 위치각의 변화(\$\Delta\theta_m\$)는 전동기의 속도에 좌우되며 그 값은 식 (2)와 같다.

$$\Delta\theta_m = P_s \cdot \omega_{rps} \cdot T_s [\text{Rad}] \quad (2)$$

\$T_s\$: 마이크로 프로세서의 샘플링 주기 [s]

\$\omega_{rps}\$: 초당회전수

마이크로 프로세서를 사용한 상스위치 제어 방식에서 온·오프각 변동은 엔코더의 분해능과 마이크로 프로세서의 샘플링 주기에 의해 결정되며, 그 값은 식 (1)과 식 (2)로부터 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\Delta\theta_s = P_s \frac{2\pi}{N_p} + P_s \cdot \omega_{rps} \cdot T_s \quad [Rad] \quad (3)$$

엔코더의 전기각 오차는 속도와 무관한 함수가 되나, 전동기의 속도가 증가함에 따라 샘플링에 의한 오차는 $P_s \cdot T_s$ 의 기율기로 증가한다. 또한 엔코더의 분해능과 마이크로 프로세서의 위치각 변동이 정수 배로 나타나지 않으면 스위칭각 제어에는 저차 고조파성분이 나타나게 된다. 이로 인하여 SRM의 토크성분에도 동일한 저차 고조파성분이 나타나게 되어 안정화 운전이 악영향을 미치게 된다. 일반적으로 전동기의 속도가 저속인 경우에는 샘플링에 의한 위치각 변동이 엔코더의 각도 분해능 $\Delta\theta_s$ 보다 적으므로 온·오프각의 변동은 엔코더의 분해능에 의해 지배를 받게된다. 그러나 전동기의 속도가 고속이 될수록 엔코더의 분해능은 변동이 없으나 샘플링에 의한 위치각 변동은 크게 나타나게 되며, 이 경우 온·오프각의 변동은 샘플링에 의한 위치각 변동에 지배를 받게된다. 따라서 엔코더가 갖고 있는 정도와 유사한 분해능을 갖는 온·오프 각을 제어하기 위해서 고속의 샘플링이 요구되며, 이를 위해서는 고성능을 갖는 마이크로 프로세서가 필수적이다. 이러한 고속의 마이크로 프로세서의 도움을 받지 않고 고정도의 상스위치를 제어하기 위해서는 특별한 제어기법이 필요하다. 따라서 8/6 SRM의 경우 간단한 엔코더를 이용하여 상스위치의 온·오프를 정밀하게 할 수 있는 방식으로 그림 3과 같이 형태의 선형 엔코더를 생각할 수 있다.

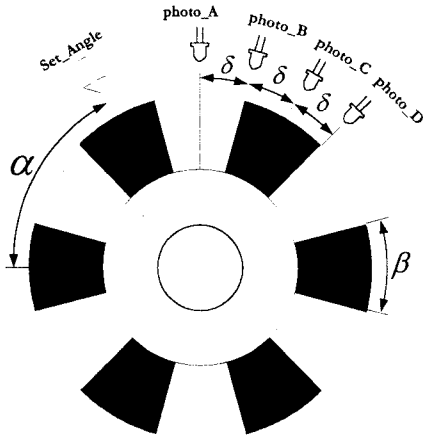


그림 3 제안된 저가형 선형 엔코더
Fig. 3 Proposed low cost linear encoder

그림 3에서 제안된 엔코더는 본 실험에 사용되는 8/6 SRM의 경우에 대한 엔코더의 형태이다. 그림 4에서 보는바와 같이 엔코더의 기판은 기존의 디지털 방식 엔코더와 달리 엔코더의 기판에 색감을 선형으로 사용함으로써 엔코더가 회전함에 따라 투과되는 광량은 선형적으로 감소 및 증가를 하게된다. 광량이 변하는 부분에서 포토트랜지스터의 출력은 위치각의 함수가 된다. 따라서 포토트랜지스터의 출력전압으로 SRM의 회전자 위치를 파악할 수 있다. 광량이 변하는 부분의 변위(β)는 상스위치 온, 오프 제어가 가능한 범위가 된다. 제안된 엔코더의 형태에서 엔코더의 출력주기(α)는 그림 4의 (a)와 같이 SRM 인덕턴스의 한 주기에 해당되는 식 (4)과 같이 정의될 수 있다. 8/6 SRM의 경우 주기는 기계각 60° 가 되며, 6/4 SRM에서는 90° 가 된다. 또한 SRM에서 연속적으로 토크를 발생시키기 위해서 한 상이 담당해야 할 변위는 식 (5)와 같이 정의할 수 있다. 8/6 SRM의 경우 최소 주기는 기계각 15° 가 되며, 6/4 SRM의 경우 주기는 기계각 30° 가 된다.

$$\alpha = 2 \frac{\pi}{P_r} \quad [Rad] \quad (4)$$

$$\beta \geq 2 \frac{2\pi}{P_s P_r} \quad [Rad] \quad (5)$$

단, P_s : 고정자의 극수, P_r : 회전자의 극수

엔코더의 출력주기를 식 (4)와 같이 정의되고, 포토트랜지스터의 개수가 식(6)을 만족하면 상 스위칭을 위한 회전자 위치각을 완전히 얻을 수 있어 기동시에도 회전자의 위치를 파악할 수 있는 장점이 있다.

$$P_o = \frac{P_s}{2} \quad (6)$$

8/6 SRM의 경우 4상 전동기가 되므로 포토트랜지스터의 개수가 4개가 되며, 6/4 SRM의 경우는 3개가 된다.

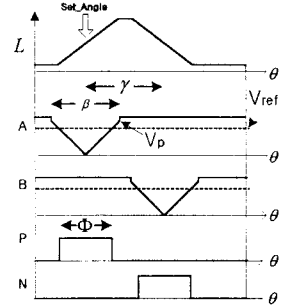


그림 4 A상 스위치의 스위칭 패턴
Fig. 4 Switching patterns of the A-phase switch

본 실험에 사용된 전동기는 8/6 SRM이므로 이를 구동하기 위해서는 4 개의 포토커플러가 필요하다. 엔코더에서 4 개의 포토커플러는 기계각 δ (기계각 15°)만큼 위상 차를 두고 설치되어 있으며, 각각의 포토커플러는 각 상의 온, 오프를 위한 부로 사용된다. 상스위치 신호는 선형인코더의 각 산출력과 지령치를 비교하여 형성한다. 이와 같이 형성된 상스위치가 온 되는 각도 변위(Φ)는 식 (7)과 같다.

$$\Phi = \beta \frac{V_{ref}}{V_p} \quad [degree] \quad (7)$$

상스위치가 온 되는 각도 변위인 V_{ref} 지령치는 하나의 D/A변환기를 통하여 발생한다.

상스위치 온, 오프에 의한 SRM의 속도제어는 일반적으로 온 각 제어에 의한 방식이나 오프 각 제어에 의한 방식을 사용한다. 온각 및 오프각을 동시에 각각 제어할 경우 온각 및 오프각 제어의 기준을 잡기가 어렵다. 따라서 온각 및 오프각을 동시에 제어할 경우 일반적으로 온가 및 오프각의 증감비율을 같이하여 제어하는 것이 보통이다. 본 연구에서도 각도제어는 위와 같은 방법이 된다. 그림 5는 제안된 인코더의 셀카 설정과 최대 온각도 변위의 설정에 대한 도식적 그림을 나타내고 있다. SRM의 상스위치가 온 되는 각도 인덕턴스가 증가하기 시작하는 각을 기준으로 해서 앞 변위를 일반적으로 어드벤스 각도라 하며, 뒷 변위를 딜레이 각도(θ_d)라 한다. 변위에서 어드벤스 최대각(θ_a)은 상전류 정착을 위한 여자전압의 크기, 상스위칭 소자의 전류정격 및 전동기의 파라메타에 의해 결정되므로 수식적으로 표현하기는 매우 어려운 실정이라서 실험에 의해서 결정되어진다. 딜레이 최대각 역시 감자전압의 크기 및 전동기 파라메타에 의해 결정되므로 실험적 시행착오에 의해 결정되어진다.

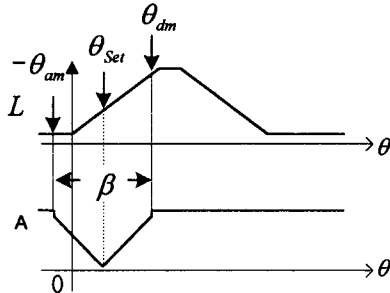


그림 5 제안된 인코더의 셀각도 및 최적 β 의 결정
 Fig. 5 Determination of set angle & β width for proposed encoder

실험에 의해서 어드벤스 최대각 및 딜레이 최대각이 설정되어지면 제안된 인코더의 셀각도는 결정되어 질 수 있다. 본 연구에서는 셀각도를 최대 어드벤스 각도와 최대 딜레이 각도의 중앙값인 평균치로 설정하였다. 따라서 최대 온각 변위 각(β)은 아래와 같이 주어진다.

$$\beta = \theta_a + \theta_d \quad (8)$$

따라서 정부하에서 상스위칭은 구간이 적은 경우에서 인덕턴스의 증가영역 중간영역에서 상전류를 흘려 상전류의 급작스런 변동에 의한 토크의 급작스런 발생을 방지하고 전류소호시 인덕턴스의 증가영역에서 전류를 완전히 소호한다. 또한 정적부하에서는 출력의 증대를 위하여 인덕턴스의 최소영역에서 전류를 정착시키는 형태로 상스위치를 제어할 수 있다.

2.3 실험결과 및 고찰

실험에 사용된 SRM은 고정자와 회전자극의 극이 8/6이고 1[kW,] 5000[rpm], 200[V]기기로써 이를 구동시키기 위해 클래식 인버터를 사용하였다.

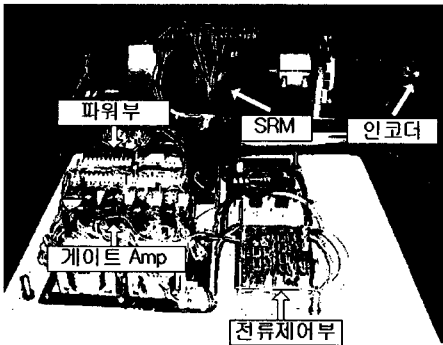


그림 6 SRM 시스템의 구동회로
 Fig. 6 Driving circuit of SRM system

이상과 같이하여 본 연구에서 제안한 시스템을 구성한 사진은 그림 6과 같다. 그림에서 표시된 시스템 구성은 크게 SRM, 파워부, 게이트 앰프, 전류제어부, 인코더의 5개 부분으로 나눌 수 있다. SRM전동기는 기존의 유도전동기의 프레임틀 그대로 사용하여 본 실에서 제작한 것이며, 파워부부분은 IGBT(1MBH60-100)를 사용하였다.

게이트 앰프는 자체 과전류 보호기능과 플트신호의 출력을 가진 EXB841을 사용하였다. 전류제어기인 피크전류 일정제어는 델타변조제어와 동일한 특성을 가지면서 스위칭 주파수가 일정하게 제어할 수 있으며 본 실험에서는 3 [kHz]로 세팅하였다.

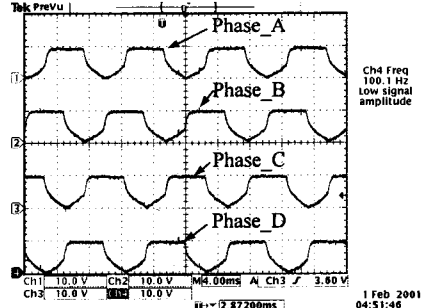


그림 7. 선형 인코더의 출력파형
 Fig. 7. Output waveforms of liner encoder

그림 7은 선형인코더의 특성을 보기 위해 SRM이 1000[rpm]으로 회전하고 있을 때, 인코더의 각 상신호를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 양호한 출력파형을 보임을 알 수 있다.

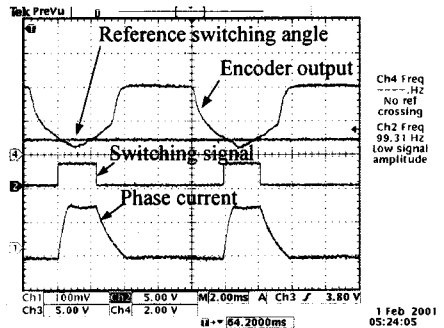


그림 8. 인코더 출력, 지령각도, 상스위칭 신호 및 전류파형
 Fig. 8. Waveforms of encoder output, command angle, phase switch signal and phase current

그림 8은 1000[rpm]에서 1[kW] 부하시 인코더의 출력, 스위칭각도 지령치, 지령각도, 상스위칭 신호 및 상전류파형을 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 정확한 상스위칭의 동작으로 동일한 상전류 형상을 보임을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구는 SRM의 회전자 위치에 따른 적절한 스위칭 동작을 위해 SRM 구동에 적합한 새로운 선형 인코더를 제안하였으며, 제안된 인코더와 조합하여 상스위의 온, 오프각을 아날로그 적으로 구현함으로써 기존의 마이크로 프로세서를 사용한 경우 샘플링시간에 의한 상스위칭 변동 분에 대한 문제를 해결하였다. 또한 피크전류 일정 방식의 전류제어기를 사용함으로써 기존의 델타변조방식에서 가변스위칭 주파수 동작에 대한 문제점을 해결하였다. 본 연구에서 제안된 선형 인코더는 SRM전용 인코더로 저가형으로 구성하였으며 상스위치의 온, 오프 정도도 양호한 것으로 나타났다.

[참 고 문 헌]

[1] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szeszesny and W. H. Bocknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", *IEEE Trans. Industrial Application*, vol. 22, no. 4, pp. 708-715, 1986.
 [2] I. Husain and M. Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Drives by PWM Current Control", *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 11, no. 1, pp. 91-98, 1996.