

SRM의 정밀 각도제어를 위한 아날로그 엔코더

김태형, 안영주*, 안진우
경성대, *부경대

Analog Encoder for Precise Angle Control of SRM

T.H. Kim, Y.J. An*, and J.W. Ahn
Kyungsoong Univ., *Pukyong National Univ

ABSTRACT

In a switched reluctance motor drive, it is important to synchronize the stator phase excitation with the rotor position, because the position of rotor is an essential information. In the high-speed region, switching angles are fluctuated back and forth out of the preset value, which is caused by the sampling period of the microprocessor.

In this paper, a low cost analog encoder suitable for practical applications is proposed. The validity of the proposed analog encoder with a proper logic controller is verified from the experiments.

Keywords : SRM, Analog encoder, switching angle control

서, 위치 신호를 계산하고 발생하는데에 마이크로 프로세서가 많이 사용된다. 그러나 이런 경우 위치 신호의 해상도는 엔코더뿐만 아니라 마이크로프로세서의 주기에 의해서도 제한받게 된다.

본 논문에서 SRM드라이브의 고성능 스위칭 각 제어에 적합한 새로운 저가형의 아날로그 엔코더를 제시한다. 또한 매우 간단한 구조의 회로로 스위치 온-오프각의 제어가능한 기법을 제안한다. 제안된 스위칭 기법에서 스위치 온-오프각의 해상도는 일반적인 방법과는 다르며 마이크로프로세서의 샘플링 주기와 진동기 속도에 영향을 받지 않으므로 온-오프 스위칭각 제어는 어떠한 위치에서도 수행될 수 있다

1. 서 론

저렴한 비용은 산업용 전동기와 드라이브 부문에서 우위를 차지하는 중요한 요소 중의 하나이다. 스위치드 릴럭턴스 모터(SRM)은 단일 여자기로서 기계적 구조가 단순하고 저가형의 강인성 전동기로서 서보전동기와 마찬가지로 넓은 가변속 운전 에 적합하다^[1]. 이에 현재까지 SRM은 가정용품, 전기자동차, 항공기 등에 대한 응용이 폭넓게 연구 되어 왔다^{[2],[3]}. 하지만 SRM드라이브에서 고정자의 상여자와 회전자의 위치를 동기화 시키는 것은 중요하다. 따라서 더 나은 스위칭동작을 위해 정확한 회전자 위치 정보는 필수적이다^[5]. 일반적으로 회전자의 위치를 알아내기 위해서 엔코더나 레졸버가 사용되고 있으나, 고해상도의 위치검출을 위해서는 가격이 높아지게 된다. 이에 가격의 경쟁력면에서 산업용 전동기로서의 활용에 많은 제약을 받아왔다. 따라서 설치비용을 줄이기 위하여 저가형 엔코더나 센서리스기법이 채택되고 있다^[4, 6]. 저가형 엔코더를 사용하였을 경우 그 분해능의 제한으로 인하여 정확한 상의 검출이 어려우며, 센서리스 기법을 사용 경우 각 상 스위치의 적절한 제어를 위해

2. SRM의 기본원리

그림 1은 일반적인 SRM드라이브 시스템을 나타 낸 것이다. 토크는 식1에서와 같이 스위칭전류의 제곱과 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 편미분 값에 비례한다.

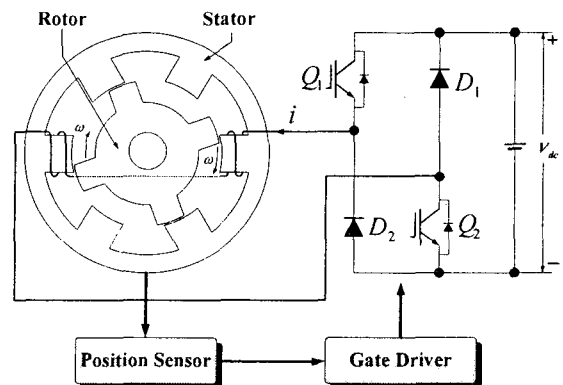


그림 1 SRM 드라이브 시스템
Fig. 1 SRM Drive System

$$\tau(\theta) = \frac{1}{2} i(\theta)^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

$L(\theta)$: 전동기의 인덕턴스 프로파일

SRM의 제어는 입력전압, 스위칭 온-오프각에 의해서 수행된다. 스위칭 온-오프각은 SRM의 상 전류량과 전류파형을 조절하는데 전압원에서 전류를 효과적으로 상승시키기 위해서는 고정자의 돌극과 회전자의 돌극이 교차되기 전에 선행 스위칭을 필요로 한다. 스위칭-온 각은 전류를 상승시키기 위한 주요한 요소이다. 따라서 최적의 운전 특성을 얻기 위해서는 스위칭-온각이 정확하게 제어되어야 한다.

3. SRM용 엔코더

3.1 일반적인 엔코더

일반적으로 마이크로프로세서와 디지털부호방식의 엔코더 시스템은 고성능, 데이터 취급의 용이성 그리고 프로그램 할 수 있는 특성으로 인해 전동기 제어에서 많이 이용된다.

증분형 엔코더의 경우, 회전자 위치와 속도의 정확도는 샘플링 주기와 엔코더 해상도에 달려있다. 제어성능은 회전자 위치의 정확도와 마이크로프로세서의 성능에 의해 결정된다. 회전자 위치의 절대 측정오차는 엔코더 해상도($\Delta\theta_D$)와 샘플주기($\Delta\theta_P$) 중의 회전자 위치의 편차에 의해 결정된다.

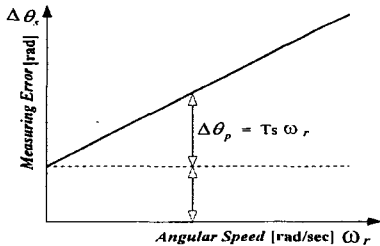


그림 2 회전자 속도에 따른 회전자 위치의 측정오차
Fig. 2 Measuring error of rotor position according to rotor speed

그림 2는 증분형 엔코더를 사용한 시스템에서 마이크로프로세서의 속도에 따른 절대 측정오차를 나타낸다. 저속영역에서는 엔코더 해상도에 의해서, 전동기속도가 증가할수록 샘플링주기에서 전동기 위치의 편차가 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 1024펄스의 엔코더 시스템과 회전자극수가 8극인 경우, 전동기의 속도가 3000[rpm]이고 200[μs]의 샘플링 주기를 가진다면 최대 전기각 31.6125도의 오차를 가질 수 있다. 이는 토크리플의 유발과 전체 시스템의 가격의 상승을 가져오게 된다.

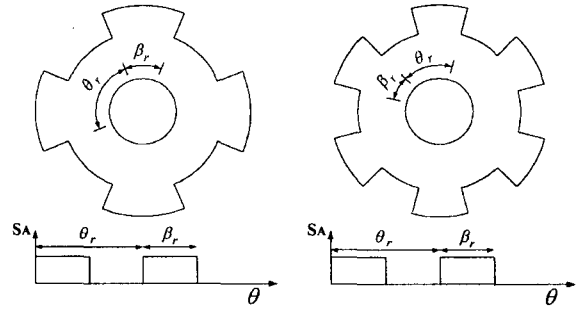


그림 3 단순한 광학엔코더와 센서 신호
Fig. 3 A simple optical encoder and sensor signal

광학식 엔코더의 경우 스위칭 각 제어는 인덕턴스 프로파일에 정렬되어 있는 광학엔코더의 신호에 의해 수행된다. 그림 3은 간단한 엔코더 디스크와 상의 센서 신호를 나타내었다. 광학엔코더의 구조는 매우 간단하며 저가이지만, 고해상도의 스위칭 각 제어는 매우 어렵다. 스위칭 온-오프각은 광학엔코더 신호의 상승에지와 하강에지에서 계산되며, 계산된 스위칭 각의 정확도는 마이크로프로세서와 회전자속도에 달려있다. 이 경우 토크조절을 위해 PWM기법이 채택되지만 고주파의 스위칭은 스위칭손실을 발생하게 한다.

3.2 제안된 엔코더

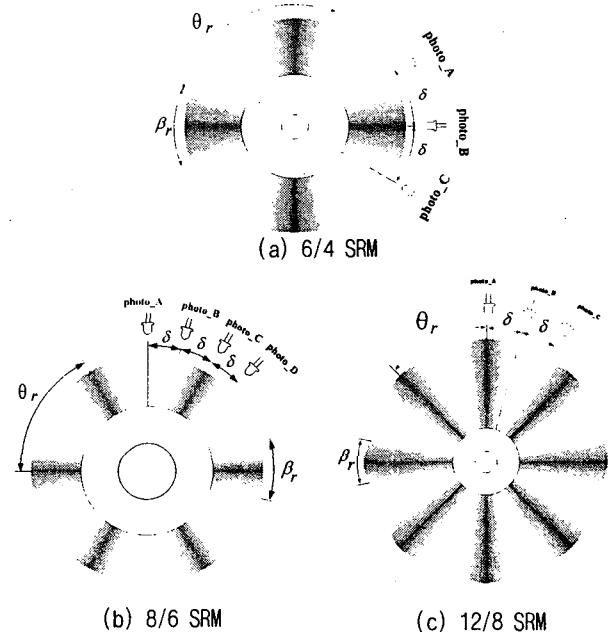


그림 4 제안된 아날로그 엔코더용의 디스크판
Fig. 4. Disk plate for the proposed analog encoder

본 논문에서는 SRM 스위칭각 제어용의 새로운 형태의 엔코더를 제안한다. 제안된 엔코더는 단순

하지만 고해상도의 스위칭제어가 가능하다.

그림 4는 제안된 6/4, 8/6, 12/8 SRM용 아날로그 엔코더를 각각 나타낸다. 일반적인 증분형이나 광학엔코더에서 디지털신호가 나오는 것처럼, 제안된 엔코더는 원판의 명암에 비례하여 아날로그 신호가 나오게 된다. 원판의 명암정도는 포토트랜지스터의 선형적인 신호에 세팅되어 있다. 포토트랜지스터의 출력은 전압값으로서 삼각파로서 위치각의 역할을 하므로 회전자의 위치를 알 수 있다.

4. 스위칭 각과 제어 토폴로지

본 논문에서 제안된 엔코더로 효과적인 스위칭 각 제어 방법이 제안된다. 제안된 스위칭 각 제어 방법은 독립적으로 스위칭 온과 오프의 두 지령신호에 기반을 두고 있다

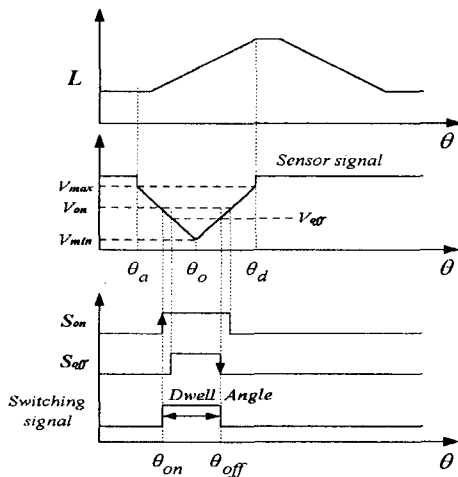


그림 5 상스위칭 각 제어

Fig. 5. Switching angle control principle

그림 5는 아날로그 엔코더로 제안된 스위칭 각 제어 토폴로지의 기본원리를 나타낸다. 인덕턴스 프로파일에 따른 제안된 엔코더의 출력신호를 나타내었다.

전동기 모드에서 스위칭 온각은 센서신호의 하강영역에, 스위칭 오프각은 상승영역에 위치한다. 엔코더 신호 패턴의 끝쪽에는 계단형태의 신호로 되어 최대 드웰각 내에서 여자 간격을 제한한다.

전동기 속도와 부하조건에 따라서, 지령신호에 의해 적절한 스위칭 온각과 스위칭 오프각이 독립적으로 제어될 수 있다. 스위칭 온각은 센서 신호의 하강영역과 스위칭 온 지령신호와의 교차지점에 선택된다.

최대 스위칭 온각은 최소 인덕턴스 구간에 있기 때문에 정격부하에서 전류의 상승을 매우 빠르게 한다. 그리고 최소 스위칭 온각은 인덕턴스 상승구간에 있어서 경부하에서 부드러운 전류상승이 가능하여 토크발생이 매끄럽게 된다.

5. 실험 결과 및 검토

제안된 엔코더와 제어 토폴로지의 유효성을 검증해 보기 위해서 아날로그 엔코더가 장착된 12/8 SRM이 테스트되었다. 표 1은 테스트된 전동기의 규격을 나타낸다.

표 1 프로토타입 전동기의 제원

TABLE 1 Specification of the prototype motor

Stator/rotor pole	12/8	Stator pole arc	14 [deg.]
Rated Power	200 [W]	Rotor pole arc	18 [deg.]
Rated speed	2000 [rpm]	Winding resistance	3 [Ω]
Rated voltage	200 [V]	Maximum inductance	122 [mH]
Rated torque	2.5 [Nm]	Minimum inductance	21 [mH]

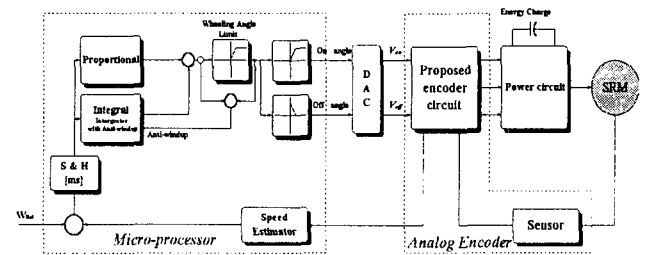


그림 6 제어 시스템의 블록도

Fig. 6 Block diagram of the control system

그림 6은 제어 시스템의 블록도를 나타낸다. 메인 프로세서로서 간단한 PIC프로세서가, 스위칭 각 제어를 위해 2채널 10bit D/A 컨버터가 사용되었다. 제어 해상도는 D/A 컨버터의 해상도에 의해 결정된다.

$$\theta_{resolution} = \frac{\beta_r \cdot V_{max}}{2^{n+1} \cdot (V_{max} - V_{min})} \quad (2)$$

여기서 n은 D/A 컨버터의 비트수로서, 본 논문에서는 스위칭 각의 해상도는 대략 0.01°이다

그림 7은 프로토타입 엔코더의 사진과 그 출력파형을 나타낸다. 실험한 전동기는 12개의 고정자돌극과 8개의 회전자 돌극을 가진다. 아날로그 위치 신호를 만들어 내는 상 간격으로 3개의 포토센서가 장착되었다. 스위칭 온, 오프 신호는 센서신호와 두 스위칭 지령과의 조합에 의해서 결정된다.

그림 8은 센서신호, 스위칭 온 지령, 스위칭신호, 상전류를 보여준다. 상전류파형은 센서신호와 스위칭 지령으로 결정된다.

그림 9는 제안된 엔코더와 제어 시스템에서 부하변동에 따른 스위칭각 조정과 상전류를 보여준다. 부하는 2000[rpm]에서 1.3[Nm]에서 2.5[Nm]로 변한다. 스위칭

각이 스위칭 온 지령의 변화에 의해 조절된다. 갑작스런 부하변동에 스위칭각이 적절하게 제어될 수 있어, 매끄러운 토크발생이 가능하다. 실험결과는 제안된 엔코더와 제어방법의 유효성을 보여준다.

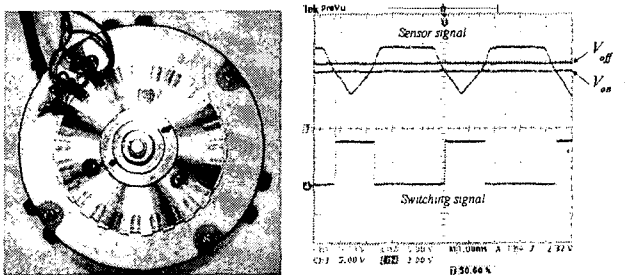
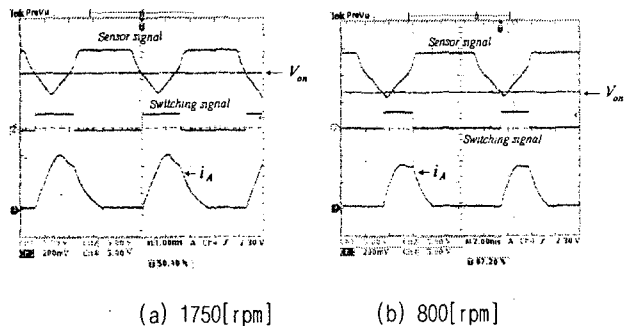
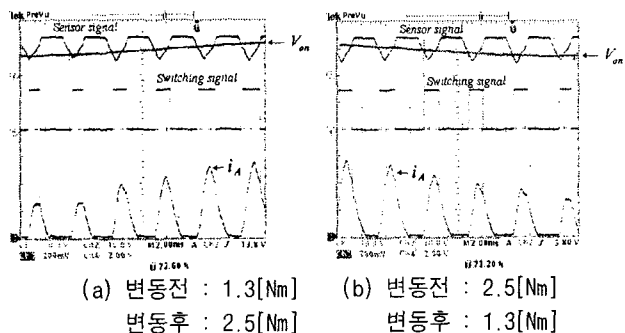


그림 7 SRM에 장착된 엔코더와 엔코더의 출력파형
Fig 7. Prototype encoder and output signals of the encoder



(a) 1750[rpm] (b) 800[rpm]
(횡:1ms/div, 종:2A/div) (횡:2ms/div, 종:2A/div)

그림 8 제어시스템에서의 신호(위로부터 센서신호, 스위칭 온 지령, 스위칭 오프 지령, 전류)
Fig 8. Signals in the control system(sensor signal, switching-on reference, switching signal and current from top trace)



(a) 변동전 : 1.3[Nm] (b) 변동전 : 2.5[Nm]
변동후 : 2.5[Nm] 변동후 : 1.3[Nm]

그림 9 2000[rpm]에서 갑작스런 부하의 변동에 따른 스위칭 특성(수평: 2.0[ms/div] 수직: 2.0[A/div])
Fig 9. Switching characteristics of sudden load disturbance at 2000[rpm] (Hor : 2.0[ms/div], Ver(current) : 2.0[A/div])

6. 결 론

본 논문에서 저가형의 간단한 구조이지만 고성능의 아날로그 엔코더를 제안하였고, 실제적인 SRM

에 적용가능함을 보였다.

제안된 엔코더는 간단한 구조의 광학 엔코더와 회전자 위치의 고해상도 검출을 위한 아날로그 명암패턴을 사용하였다. 명암패턴의 끝부분에 스텝변화를 주어 간단히 여자각의 제한이 가능했다. 스위칭 온, 오프 각은 분리된 스위칭 온 지령과 스위칭 오프 지령으로 수행하였다.

실험결과로부터, 적절한 제어방법으로 제안된 아날로그 엔코더는 유효성이 있음을 검증하였다.

이 연구는 과학재단 목적기초연구(No. R01-2001-00300-0) 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] P. J. Lawrenson, J.M. Stephenson and P. T. Blenkinsop et al, Variable-speed Switched Reluctance Motors, IEE Proc. B, vol. 127, no. 4, 1980, pp. 253-265.
- [2] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szeszsy and W. H. Bocknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. Industrial Application, vol. 22, no. 4, pp. 708-715, 1986.
- [3] Hassan Moghbelli, Gayle E. Adams and Richard G. Hoft, "Performance of 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors," IEEE Trans. on IA, Vol. 27, No. 3, pp. 531-538, 1991.
- [4] M. Ehsani, I. Husain, S. Mahajan, and K.R. Ramani, "New Modulation Encoding Techniques for Indirect Rotor Position Sensing in Switched Reluctance", IEEE Trans. on IA, Vol. 30, No. 1, pp. 85-91, 1994.
- [5] J. W. Ahn et al, Novel Encoder for SRM Drive with High Resolution Angle Control, Proceedings of IEEE / ISIE 2001, pp. 1781-1785, 2001.
- [6] M. Ehsani, and K.R. Ramani, "Direct Control Strategies Based on Sensing Inductance in Switched Reluctance Motors", IEEE Trans. on PE, Vol. 11, No. 1, pp. 74-82, 1996.