

## SRM의 고정도 여자 제어를 위한 엔코더의 운전특성

강유정, 안진우, 박성준\*, 김철우\*\*  
 경성대학교, 동명대학\*, 부산대학교\*\*

### Driving Characteristics of Encoder for High Performance Excitation Control of SRM

Yu-Jung Kang, Jin-Woo Ahn, Sung-Jun Park\*, Cheul-U Kim\*\*  
 Kyungsung Univ. , Dongmyong College\*, Pusan National Univ.\*\*

#### ABSTRACT

SRM(Switched Reluctance Motor) uses reluctance torque by pulse excitation control. SRM drives are much studied in electrical vehicles and industrial application due to the simple, robust mechanical structure and high speed characteristics. For the high performance control of SRM, it is necessary to synchronize the stator phase excitation with the rotor position.

This paper proposes a new encoder for high performance excitation control of SRM. The proposed encoder has complex structures of incremental and absolute encoder. An each phase inductance profile can be synchronized with 4-bit absolute position signal and incremental pulses are used for speed detection. Low cost and simple manufacturing of SRM encoder is possible.

엔코더는 회전자의 절대위치 검출에 대한 장점에 비해 부피가 크고, 가격이 매우 비싸다는 단점이 있다. 이러한 이유로 인하여 대부분의 전동기에서는 증분형 엔코더를 사용하여 속도 및 회전자 위치를 검출하게 된다. 하지만 증분형 엔코더는 회전자의 초기 기동시에 절대위치를 검출하기 매우 어려워져서 특히 견인 및 전기자동차용 구동부의 초기 기동에 문제를 발생시키기도 한다.<sup>[4]</sup>

본 논문은 SRM 구동에 적합한 경제적인 회전자 위치 및 속도 검출방식에 관한 연구로 기존의 증분형 엔코더와 절대치 엔코더의 장점을 복합한 혼합형 엔코더를 제안한다. 제안된 엔코더는 6/4 및 8/6 SRM 구동에 필수적인 15°의 전기적인 분해능을 절대치 방식으로 검출하고, 여자 전원의 제어 및 속도 검출을 위해서 증분형 펄스 신호를 사용하는 혼합구조형 엔코더이다.

제안된 엔코더는 5kW급 6/4 SRM에 적용되어 운전특성을 검증하였다.

#### 1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 펄스형의 여자 전원에 의한 고정자와 회전자의 릴럭턴스 토크를 이용하는 전동기구조로써, 기계적인 구조가 매우 간단하고 견고하다. 또한 다른 전동기구조에 비하여 효율이 높고, 견인특성이 좋으며 고속회전 특성이 우수하여 특히 견인용 전동기구조와 전기자동차의 구동부에 대한 응용이 활발히 연구되고 있다.<sup>[1,2]</sup> 펄스형의 여자전원에 의해 SRM의 고효율 및 고성능 운전을 위해서는 인덕턴스 프로파일에 동기화한 제어가 필수적이므로 회전자의 위치정보를 필요로 하게 된다. 전동기의 회전자 위치검출을 위한 센서로는 엔코더나 레졸버가 널리 사용되고 있다.<sup>[3]</sup> 레졸버는 연속적인 회전자 위치와 속도를 검출할 수 있다는 장점이 있지만, 복잡한 부가적인 회로를 필요로 하며, 절대치

#### 2. SRM의 구동원리

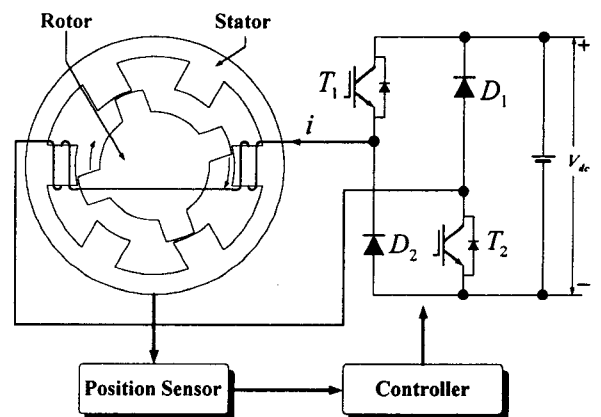


그림 1 SRM 구동시스템  
 Fig. 1 SRM drive system

그림 1은 본 논문에서 적용된 6/4 SRM의 기계적 구조와 한 상에 대한 구동회로를 나타내고 있다. SRM의 킬러턴스 토크는 그림 1의 구동 회로에서 반도체 스위치의 펄스형 여자 전원에 의해 발생하며, 회전자와 고정자의 인덕턴스가 최대가 되는 방향으로 작용하게 된다.

SRM의 킬러턴스 토크는 전자기 에너지 루프에서 coenergy  $W'_c$ 의 개념을 도입하여 해석될수 있으며, 이중 돌극형 SRM의 자기구조상 자기회로의 coenergy  $W'_c$ 는 다음과 같다.

$$W'_c = \frac{1}{2} i^2 \cdot L(\theta, i) \quad (1)$$

이때,  $i$ 는 상권선의 전류,  $L$ 은 권선의 인덕턴스를 의미한다.

한 상에 대한 토크  $T_e$ 는 회전자의 위치각  $\theta$ 에 대한 coenergy의 편미분함으로서 다음과 같다.

$$T_e = \frac{\partial W'_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (2)$$

즉, SRM의 발생 토크는 전류의 제곱에 비례하고 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 알 수 있다.

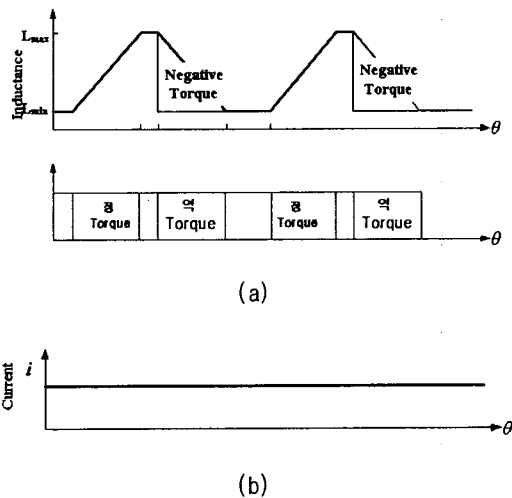


그림 2 일정한 여자전류에서의 토크  
(a) 한상의 인덕턴스 프로파일  
(b) 일정여자전류

Fig. 2 Torque at constant exciting current  
(a) Inductance profile  
(b) Constant exciting current

토크가 전류의 제곱에 비례함으로써 상전류의 방향과 무관하게 토크를 발생시킬 수 있다.

또한 그림 2에서 보이는 것과 같이 인덕턴스의 기울기에 따라서 토크의 작용 방향이 달라지므로 회전방향에 대하여 역방향의 토크인 부토크(Negative Torque)가 발생하는 회전자의 위치각도가 존재한다. 따라서 SRM의 고성능 운전 및 최적 토크 운전을 위해서는 인덕턴스 프로파일에 동기된 회전자의 위치각 정보가 필수적이며, 부토크의 억제를 위해서는 반드시 회전자의 위치각에 따라 동기되어 스위칭을 해야한다

### 3. 제안된 엔코더

일반적인 SRM의 상스위치 제어방식은 제어기를 마이크로 프로세서를 사용하며 엔코더와 같은 위치센서로 회전자 위치정보에 의해 상 스위치의 온, 오프를 결정한다. 현재 전동기의 회전자 센서로 널리 사용되고 있는 증분형 엔코더의 경우에는 초기 기동시 회전자 위치각에 대한 정보를 얻을 수 없어 외부의 힘으로 회전을 회전시킨 후 제어에 들어가거나 엔코더 신호검출 카운터에 충전기를 추가하여 카운터 값에 대한 정보를 유지하는 형태를 취하고 있다. 이러한 증분형 엔코더는 전기자동차에 장착한 전동기구의 위치검출기로 사용할 경우 축전지의 방전 후 초기기동에 문제가 될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 높은 분해능을 갖는 절대치 엔코더나 레졸버를 사용할 경우 경제적 면에서 매우 불리하기 때문에 SRM에 적용하기에 적합하지 않다.

본 논문에서 제안된 엔코더는 6/4 및 8/6 SRM 구동을 위해 최소의 분해능(15°)을 갖는 절대치 엔코더와 증분형 펄스 엔코더의 복합구조로 구성되어 일반적으로 사용되는 6/4 및 8/6 SRM구동에 적합한 구조를 취하고 있다. 6/4 SRM의 경우 전기각 360°는 기계각 90°에 해당되며 한 상의 실제적인 기계각은 30°에 해당된다. 또한 8/6 SRM의 경우에는 전기적인 위치각 360°는 기계각 60°에 해당되며 한 상이 담당해야할 기계적 위치각은 15°에 해당된다. 따라서 회전자의 기계적인 위치를 16분주하여 최소 주기를 15°로 표현한 4비트의 절대치 신호를 통하여 6/4 및 8/6 SRM에서 한 상이 담당해야 할 주기의 정보를 쉽게 검출할 수 있다.

그림 3은 본 논문에서 제안된 엔코더의 출력 파형을 나타낸 것이다. 최상위 비트는 회전자의 기계적인 위치를 360분주한 증분형 펄스로 여자제어를 위한 위치각 및 회전자 속도를 검출하기 위한 신호로 사용되고, 하위의 4비트 절대위치는 6/4 및 8/6 SRM의 각 상의 회전자 위치를 표현하게 된다. 제안된 엔코더는 엔코더의 출력 정보를 표현하는 회전원판과 고정원판으로 구성되어 있으며, 5개의 수광 및 발광 다이오드를 통하여 출력 신호를 검출하게 된다.

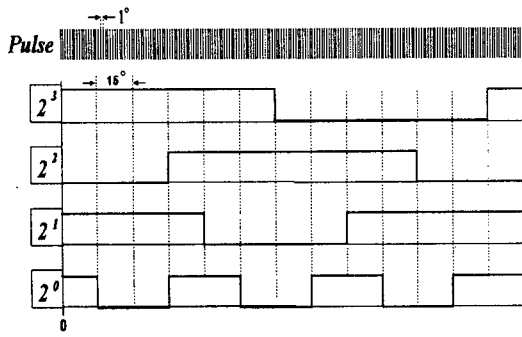


그림 3 제안된 엔코더의 출력파형  
Fig. 3 Output waveform of proposed encoder

그림 4와 5는 본 논문에서 제안된 엔코더의 회전 원판 및 제작된 엔코더의 사진을 나타내고 있다.

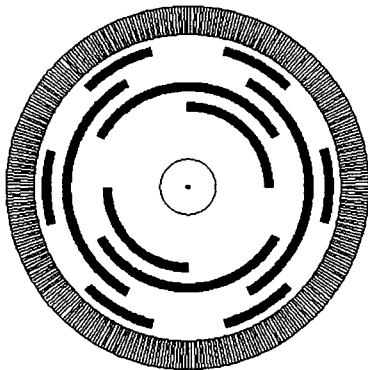


그림 4 제안된 엔코더의 회전 원판  
Fig. 4 Rotating board of proposed encoder

절대치 신호를 위한 4비트는 그레이 코드화 하였으며, 엔코더의 회전원판은 흑백을 반전하여 그림으로 도시하였다.

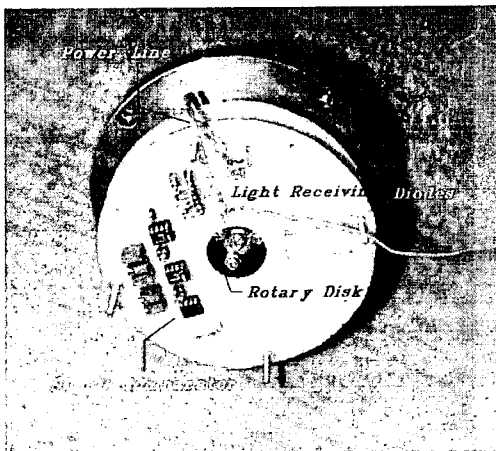


그림 5 제작된 엔코더  
Fig. 5 Prototype encoder

또한, 수광 다이오드의 반응속도에 대한 출력신호를 보정하기 위하여 각 출력신호에 대한 비교회로를 적용하여 제작하였다.

#### 4. 실험결과 및 검토

본 논문에서 제안된 엔코더의 검증을 위하여 5kW급 6/4 SRM에 적용하여 그 운전 성능을 실험하였다. 시험기의 정격속도는 6000rpm이며 요구되는 엔코더의 최대 출력주파수는 36kHz이다.

실험을 위한 제어기는 PIC 16C74A를 사용하였고, 그림 6은 이에 대한 전체 시스템의 구성도를 나타내고 있다.

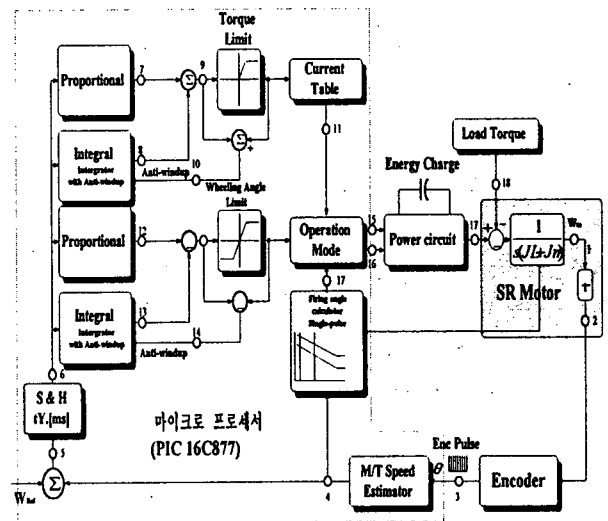


그림 6 시스템 구성도  
Fig. 6 Configuration of control system

회전자의 절대위치는 제안된 엔코더로부터 4비트의 캡처기능을 사용하였고, 속도정보는 최외각 비트를 M/T 방식을 적용하여 계산하였다.

속도 제어기는 지령속도에 대한 PI 제어기를 적용하였고, 기동시의 평활 토크 출력을 위한 기준 전류는 테이블 방식으로 인가되도록 하였다. 초기 기동시의 평활 토크를 위한 전류제어는 PIC의 A/D 컨버터 기능을 사용한 PI 제어기로 제어되도록 설계하였다.

그림 7은 SRM 운전에 적용된 엔코더의 출력파형을 나타내고 있다. 엔코더의 출력신호는 기계적인 위치각 15°의 간격으로 상승 에지가 나타나므로 8/6 및 6/4 SRM 모두에 적용하여 한 상의 주기적으로 표현이 가능함을 알 수가 있다.

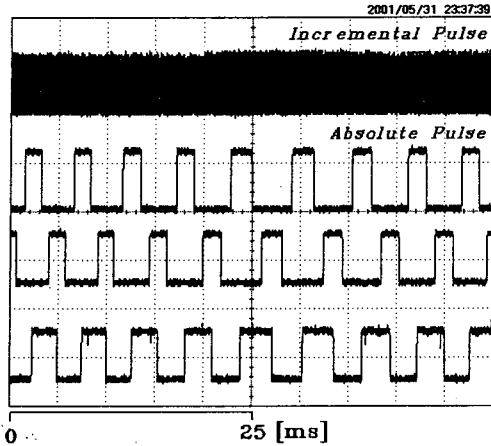


그림 7 SRM 구동시 엔코더의 출력파형  
Fig. 7 Output waveform of encoder during SRM driving

그림 8은 SRM 운전시 엔코더 2bit 출력에 대한 게이트 신호의 파형을 나타내고 있다. 엔코더 신호의 두 bit는 서로 15°의 상차각을 가지므로 이 관계에 의해 게이트 신호가 발생함을 알 수 있다.

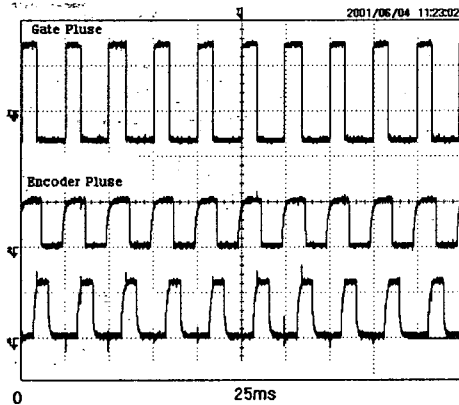


그림 8 엔코더 출력에 따른 게이트 신호  
Fig. 8 Gate pulse with encoder output

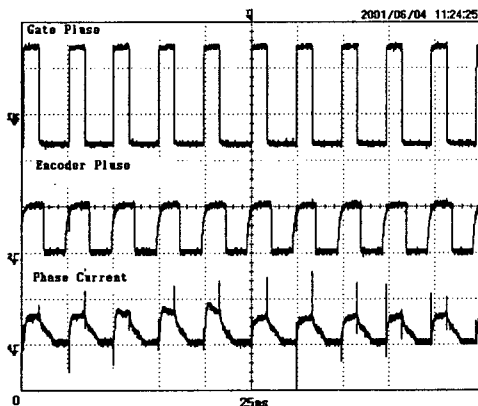


그림 9 한상의 게이트 신호, 엔코더 신호, 상전류  
Fig. 9 Gate signal, encoder signal and phase current of one phase

그림 9는 SRM 무부하 운전시의 엔코더 신호와 인버터 한상(B상)의 게이트신호에 따른 한상의 상전류를 나타내고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서 제안된 SRM용 복합형 엔코더는 기존의 절대치 엔코더와 증분형 엔코더의 장점을 복합한 구조이다. SRM의 한 상에 대한 구조적인 위치 정보는 절대치 정보를 적용하고, 속도 및 고정도 여자전원의 제어를 위해서 1° 간격의 정밀도를 가지는 360 분주형 증분형 펄스를 출력하도록 하였다. 제안된 엔코더는 기존의 범용 절대치 엔코더에 비해 SRM 전용화된 신호만을 출력하게 되므로 그레이 코드에서 절대위치의 변환이 용이하고 경제적인 제작이 가능하다.

또한 기존의 증분형 엔코더에서 문제가 되는 초기 기동문제를 쉽게 해결함으로써, 전 부하로 초기 기동하는 응용 분야에 그 활용이 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] D. W. J. Puller "New data base for switched reluctance drive simulation." Proc. IEE. Vol.138. Pt-B. No. 6, pp. 331~336. 1991.
- [2] M. Ehsani, I. Husain and A. B. Kulkarni, Elimination of Discrete Position Sensor and Current Sensor in Switched Reluctance Motor Drives." IEEE Trans. On IA, Vol. 28. No. 1. pp. 128~135, 1992.
- [3] 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
- [4] Lawrenson PJ, et al : "Variable -speed switched reluctance motors", Proceedings IE Vol 127, PT, B, pp. 253~265.