

## 서치코일을 이용한 단상 SRM의 구동

신덕식, 양형열, 임영철  
전남대학교

### Drive of Single-phase Switched Reluctance Motors Using Search Coils

D. S. Shin, H. Y. Yang, Y. C. Lim  
Chonnam National University

#### ABSTRACT

This paper presents a method of detecting rotor position for single phase Switched Reluctance Motors(SRMs) using search coil. In the single phase SRM, mainly Hall effect sensors or photo interrupters have been used to detect the rotor position. But these sensors cause high cost and increase the volume of the motor. Furthermore when the motor is used in very hostile environment like high temperature or pressure, its reliability goes down.

In this paper, low cost and robust characteristics of rotor position detection method are focused in order to compensate for disadvantage of existing sensors. Search coils wound around the stator pole are used for detection of the rotor position in single phase SRM. Rotor position detection is achieved through electromotive force patterns induced by time-varying flux linkage in the search coil. The validity of the method is verified by experimental results.

**Key Words:** Single phase SRM, Search coil, Rotor position

#### 1. 서 론

현재까지는 다상 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor: SRM)가 주로 연구되어왔으며, 단상 SRM은 다소 연구가 활발하게 진행되지는 못하고 있다. 단상 SRM은 정렬된 위치에서는 자기동(self-starting)이 되지 않아 정지용자석을 사용하거나 기동을 위해 특수한 형태의 회전을 사용해야하며, 전력밀도가 낮기 때문에 특별한 영역에서만 주로 사용이 되기 때문이다. 하지만 구조가 간단하고 강인하며 저가로 구성할 수 있기 때문에 저출력, 저성능 응용분야에는 매우 적합

한 전동기라고 할 수 있다<sup>[1]</sup>.

다상 SRM과 마찬가지로 단상 SRM도 적절한 위치에서 스위치를 온, 오프 시켜야 하기 때문에 회전의 위치정보를 얻기 위한 센서를 장착하게 된다. 이러한 회전자 위치 센서로는 주로 엔코더, 홀센서 또는 포토 인터럽터 등을 사용한다<sup>[2]-[3]</sup>. 그러나 이러한 위치 센서들은 모터의 부피를 증가시키고 가격 상승의 원인이 되며, 고온이나 고압과 같은 환경에서 사용 시에는 전체 시스템의 신뢰도를 떨어뜨리게 된다.

이런 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 서치코일이 장착된 3상 SRM이 연구되어 지고 있다<sup>[4]</sup>. 본 논문에서는 단상에 서치코일을 장착하여, 서치코일에서 발생하는 유기기전력으로부터 회전의 특정한 위치를 검출하여 구동하는 방법을 제안한다.

실험에 앞서 전자기해석 프로그램인 Maxwell 2D<sup>TM</sup>를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 회전의 위치에 따른 서치코일의 유기전압 파형을 이용한 회전자 위치 검출의 가능성을 검토하고 실험을 통해서 제안한 방법의 우수성을 증명하였다.

#### 2. 서치 코일의 장착

그림 1은 본 논문에서 사용된 단상 SRM과 서치코일을 나타내었다. 서치코일은 0.3mm, 5턴이 고정자 6개의 돌극에 감겨있다. 턴수는 SRM의 정격과 제어기의 A/D 변환기의 입력전압을 고려해서 선정한다. 서치 코일에는 전류가 흐르지 않으므로 매우 얇아도 문제가 없으나 기계적 충격에 견딜 수 있는 굵기가 필요하며, 돌극에 장착할 때는 모터의 진동에 의해 서치코일이 손상되지 않도록 적절한 조치를 취해야 한다.

서치코일은 하나의 돌극에만 장착해도 위치검출이 가능하나, 이 경우에는 제조사의 결함, 장시간의

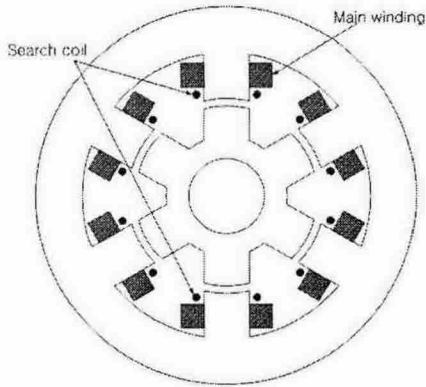


그림 1 단상 SRM과 장착된 서치코일  
Fig. 1 Structure of the single phase SRM with search coil

모터사용 등으로 인해 발생하는 공극의 불균일에 의해서 서치코일 유기기전력의 형태가 일정하지 않고 변화하게 될 가능성을 내포하고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 6개의 돌극에 서치코일을 모두 장착하여 직렬로 연결함으로써 공극 불균일로 인해 발생하는 서치코일 유기기전력의 변동을 제거하였다.

### 3. 서치 코일의 파형 분석

SRM은 회전자가 고정자와 만나기 시작하는 부분(overlap starting point)부터 자속이 증가하며, 회전자와 고정자가 완전히 정렬될 때 최대값이 되며 그 이후부터 감소하기 시작한다.

서치 코일에 유기되는 전압 파형은 패러데이 법칙에 따라 상권선의 전류 및 주권선과 서치코일의 상호인덕턴스에 의한 시변 쇄교자속의 변화로 인해 서치 코일에 나타나는 전압 파형이다.

시뮬레이션에 의한 서치코일의 유기전압 파형은 그림 2와 같이 나타나게 된다.

서치코일이 돌극에 감겨있으므로 회전자가 돌극에 도달하면서 부터는 서치코일에 쇄교하는 자속이 급격하게 증가하게 되고, 인덕턴스가 증가하므로

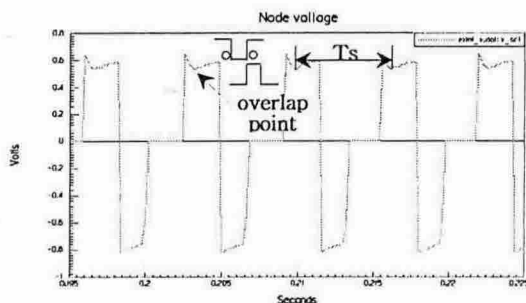


그림 2 서치코일의 시뮬레이션 파형  
Fig. 2 Simulation waveform of search coils

전류가 감소하게 된다. 그러므로 서치코일 유기전압의 변화를 관찰하여 회전자의 위치를 추정할 수 있다.

기전력은 식 1에 의해 나타난다. 식 1에서 상전류의 변화에 의한 시변 쇄교자속은 변압기 기전력(transformer emf) 성분이고, 회전자의 회전에 의해 상호 인덕턴스 변화로 발생하는 시변 쇄교자속은 속도 기전력(motional emf) 성분이다.

$$\begin{aligned}
 e_s &= -\frac{d\lambda_s}{dt} \\
 &= M_s \frac{di}{dt} + i \frac{dM_s}{dt} \\
 &= M_s \frac{di}{dt} + i \frac{dM_s}{d\theta} \omega
 \end{aligned} \quad (1)$$

$\lambda_s$ : 주권선의 전류에 의해 발생하는 서치코일 쇄교자속

$M_s$ : 주권선과 서치코일의 상호 인덕턴스

$i$ : 주권선의 전류

$\omega$ : 회전속도

위 식에서 알 수 있듯이 주권선과 서치코일의 상호 인덕턴스와 상전류의 변화율, 상호 인덕턴스의 변화율과 전류 및 회전속도에 의해서 서치코일 유기전압이 결정된다.

회전자가 서치코일의 위치에 왔을 때 가장 큰 변화는 상호인덕턴스가 증가하기 시작하는 것이다. 따라서 식 1에서 변압기 기전력은 전류변화가 적어질 뿐만 아니라 아직 인덕턴스도 최저상태 이므로 낮은 값을 갖지만 속도기전력은 이 부분에서 큰 증가를 보인다. 그러므로 이 부분에서 서치코일의 유기기전력은 급격한 변화를 보이고 이 부분을 검출할 수 있다.

### 4. 서치 코일 유기기전력의 검출

서치코일의 유기전압은 AD변환기를 통해 제어로 입력된다. 입력된 파형은 그림 3과 같이 오버랩 포인트(회전자와 고정자가 만나기 시작하는 점)에서 급격하게 변화하게 된다. 따라서 그 부분을 검출하면 회전자의 위치를 추정할 수 있게 된다.

본 논문에서는 서치코일의 변화되는 부분을 보다 정확하게 검출하기 위해 양의 기전력 부분만을 증폭 하여 사용하였다. 6극 단상 SRM의 경우 매 60°마다 그 점을 검출하게 된다. 따라서 오버랩 포인트를 6번 검출하면 1회전 했다는 것을 알 수 있다.

검출된 서치코일 유기기전력은 그림 3과 같이 나타난다. 서치 코일의 정(+)의 기전력이 나타나는 구간이 ON되는 구간을 나타내며, 이 구간에서만 회전자의 위치 정보를 담고 있다.  $T_s$ 는 이전 상에

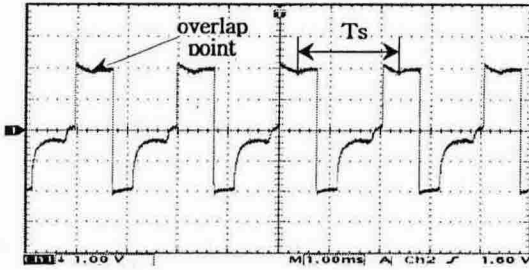


그림 3 서치코일 유기기전력  
Fig. 3 Search coil EMFs

서의 토크 발생 시작점(overlap point)과 현재 ON 되고 있는 상의 토크 발생 시작점을 시간으로 나타낸 값이다. 6극 단상 SRM의 경우 위치적으로 60°를 나타내고, 60°를  $T_s$ 로 나눈 값은 현재의 각속도를 가리킨다.

따라서 속도는 다음 식에 의해 계산된다.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{60^\circ}{INT_s * T_i[\text{sec}]} * \frac{60[\text{sec}]}{1[\text{min}]} * \frac{1[\text{revolution}]}{360^\circ} \quad (2)$$

$INT_s$ : 60도 회전시 인터럽트 개수(샘플링 개수)  
 $T_i$ : 인터럽트(샘플링) 주기

현재의 속도를 알고 토크 발생구간 시작점을 검출하면, 다음과 같이 오버랩 포인트 검출 이후 오프 시키고자 하는 각도  $\theta_{off}$  후에 스위치 오프가 가능하다.

$$n_{off} = \frac{INT_s * \theta_{off}}{60^\circ} \quad (3)$$

$n_{off}$ :  $\theta_{off}$  가 될 때까지의 인터럽트 개수

다음 상에서 적절한 어드밴스  $\theta_{adv}$ 를 주고 스위치를 온 시키기 위해서는 식 4와같이  $n_{on}$  만큼의 인터럽트 후에 스위치를 온 시키면 된다.

$$n_{on} = \frac{(60^\circ - \theta_{adv})}{60^\circ} * INT_s \quad (4)$$

그림 4는 토크 발생구간 시작점을 검출하기 위한 방법으로 서치 코일의 기전력 파형과 그것의 미분 파형이다. 그림에서 알 수 있듯이 토크 발생구간 시작점을 미분 파형을 이용하면 쉽게 검출할 수 있다.

즉  $\frac{de_s}{dt}$  값이 양(+)이 되는 점을 검출함으로써 회전자와 고정자가 겹치기 시작하는 부분을 검출할 수 있는 것이다.

제어기에 입력되는 서치코일 유기기전력은 잡음 제거를 위해서 이동평균(Moving average)을 취하는 방법으로 필터링 된다.

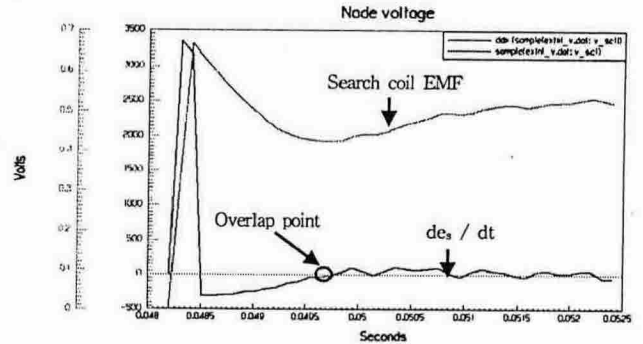


그림 4 서치코일 유기 기전력과 미분파형  
Fig. 4 Search coil EMF and differential waveform

## 5. 실험결과 및 고찰

모터는 단상이므로 정지용 자석을 이용하여 항상 구동이 가능한 일정한 위치에 정지해 있으므로 곧바로 기동이 가능하다. 서치코일을 이용하여 구동 시에도 정지상태에서 정상상태로의 가속구간 없이 바로 기동하고 있음을 그림 5 (b)에서 볼 수 있다.

그림 5와 6은 엔코더와 서치코일을 사용하여 기동시 및 정상상태에서의 서치코일 유기기전력, 보다 정확한 검출을 위해 증폭된 서치코일 유기기전

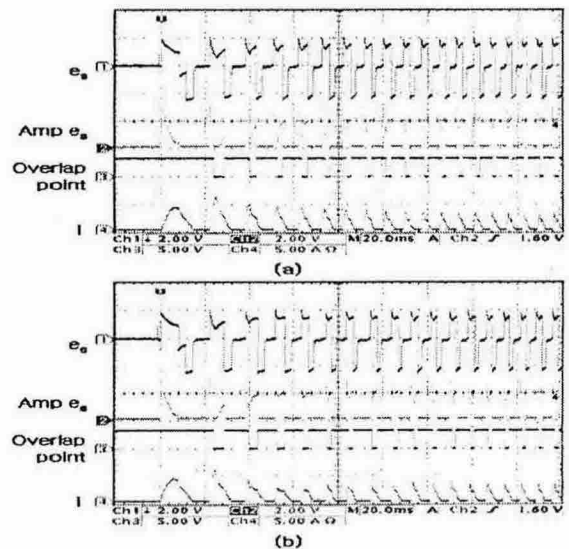


그림 5 초기 기동시 : 서치코일 유기기전력, 증폭된 서치코일 유기기전력, Overlap point 검출 신호, 상전류 파형

- (a) 엔코더를 이용한 구동
- (b) 서치코일을 이용한 구동

Fig. 5 Startup : search coil EMF, amplified search coil EMF, overlap point detection signal and winding current

- (a) Using Encoder
- (b) Using search coil EMF

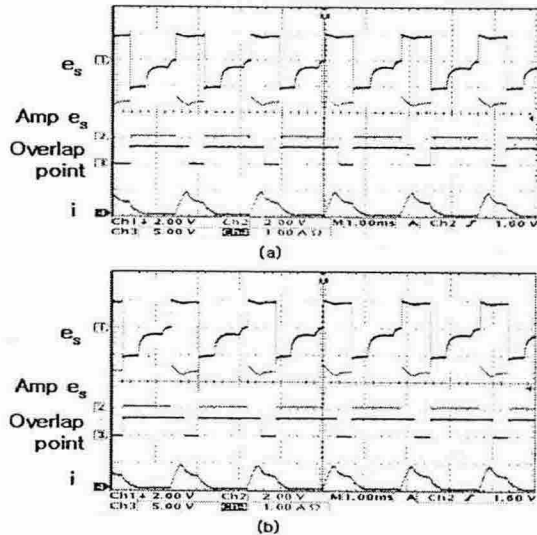


그림 6 정상상태 : 서치코일 유기기전력, 증폭된 서치코일 유기기전력, Overlap point 검출 신호, 상전류 파형

(a) 엔코더를 이용한 구동

(b) 서치코일을 이용한 구동

Fig. 6 Steady state : search coil EMF, amplified search coil EMF, overlap point detection signal and winding current

(a) Using Encoder

(b) Using search coil EMF

력, 오버랩 포인트 검출파형 신호 및 상전류 파형을 보여주고 있다. 엔코더로 구동했을 경우와 서치코일로 구동했을 경우의 서치코일 유기기전력을 비교해 보면 거의 같은 파형을 나타내고 있음을 알

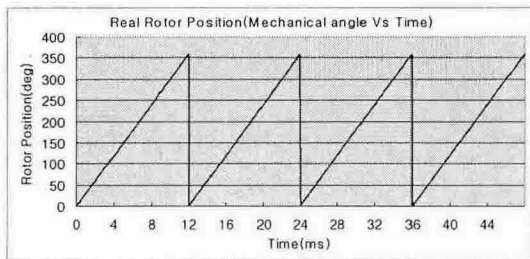


그림 7 엔코더에 의해 검출된 회전자 위치

Fig. 7 Measured rotor position with an encoder

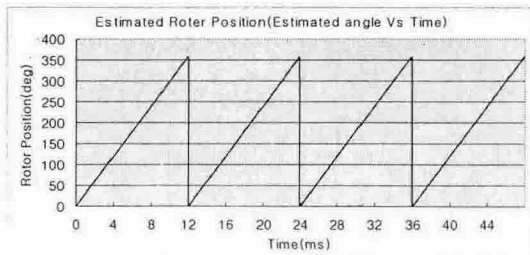


그림 8 제안된 방법으로 추정된 회전자 위치

Fig. 8 Estimated rotor position

수 있고, 엔코더를 사용하지 않고 서치코일만을 이용하여 구동하여도 정상적으로 운전이 가능하다는 것을 보여준다.

그림 7과 8에서는 5000rpm으로 회전시 실제 회전자 위치와 제안된 방법에 의해 추정된 회전자 위치를 비교한 것으로서 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 이를 통해서 제안된 방법으로 단상 SRM의 구동이 가능하며, 그 성능 또한 우수함을 보여준다.

## 6. 결론

본 연구에서는 서치코일을 이용하여 단상 스위치드 릴럭턴스 모터(Switched Reluctance Motor: SRM)의 회전자 위치추정 방법을 제안하였다.

실험에 앞서 전자기해석 프로그램인 Maxwell 2D™로 시뮬레이션을 수행하여 실험에 사용된 단상 SRM에서의 서치코일 유기전압 파형을 분석하여 회전자 위치를 추정할 수 있음을 확인 하였다.

서치코일을 이용하여 위치를 추정하기 위해서 회전자의 위치에 따른 서치코일에 유기되는 기전력의 변화를 이용하여 위치정보를 얻어내는 방법을 사용한다. 본 논문에서는 서치코일 파형의 미분을 이용하여 회전자의 위치를 추정하는 방법을 제안하였다. 그리고 실험을 통하여 본 논문에서 제안하는 방법의 우수성을 입증하였다.

본 논문에서 제안한 방법은 진동, 고온, 고압 등으로 인해 기존의 위치 센서가 사용되기 어려운 특수한 환경에서 많은 각광을 받을 것으로 기대되며, SRM의 소형화, 저가형 SRM 상품화에 크게 기여할 것으로 기대된다.

이 논문은 전남대학교 고품질전기전자부품 및 시스템연구센터의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 참고 문헌

- [1] 안진우, "스위치드 릴럭턴스 전동기", 오성미디어 2001. 1
- [2] K. M. Richardson, C. Pollock, and J. O. Flower, "Design and Performance of a Rotor Position Sensing System for a Switched Reluctance Machine Propulsion Unit", Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc., pp. 168-173. 1996, Oct
- [3] I.-W. Yang and Y.-S. Kim, "Rotor speed and position sensorless control of a switched reluctance motor using the binary observer", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol.147, No. 3, pp. 220-226, 2000.
- [4] 양형열, 김종건, 임영철, "서치코일을 이용한 토로이달 스위치드 릴럭턴스 모터의 회전자 위치 검출", 전력전자학회논문지, 제 7권, 제 6호, pp.537-545. 2002