

# 간접식 센서에 의한 토로이달 스위치드 릴럭턴스 모터의 회전자 위치검출 및 구동

양형열, 신덕식, 임영철  
전남대학교

## Toroidal Switched Reluctance Motor Drive Systems Using Indirect Rotor Position Sensor

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

### ABSTRACT

A method for driving and position sensing of TSRM(Toroidal Switched Reluctance Motor) using the search coil is presented in this paper. Position information of the rotor is essential for SRM drives. The rotor position sensor such as an opto-interrupter or high performance encoder is generally used for the estimation of rotor position. However, these discrete position sensors not only add complexity and cost to the system but also tend to reduce the reliability of the drive system.

In order to solve these problems, in the proposed method, rotor position detection is achieved using the voltage waveforms induced by the time varying flux linkage in the search coils, and then the appropriate phases are excited to drive the SRM. But the search coil EMF is generated only when the motor rotates. Therefore the rotor position sensing method at standstill is also suggested.

**Keywords** : TSRM, search coil, rotor position

### 1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor: SRM)는 간단한 구조, 높은 효율, 높은 동작속도 등의 장점을 가지므로 최근에 전력용 반도체의 기술이 발전함에 따라 주목받고 있는 전동기라고 할 수 있다<sup>[1]</sup>.

SRM에 있어서 회전자 위치 정보는 필수적이다. 본 연구는 기존의 위치 센서들의 문제점인 고속 회전의 제약, 고온 고압의 환경에서 신뢰성 저하, 고장시 별도의 보수 필요, 충격에 약한 점 등의 단점

을 해결 할 수 있는 방법으로 서치 코일을 내장한 SRM을 제안하였다.

서치코일을 이용한 위치 추정방법은 모터가 회전 시 회전자의 위치에 따른 모터내부의 자속변화를 감지하여 회전자의 위치를 알아내지만, 정지시에는 서치코일의 유기전압이 발생하지 않으므로 정지시에 위치 검출 할 수 있는 방법을 함께 제시하였다. 그리고 제안한 위치검출 방법에 대한 가능성을 시뮬레이션을 통해 확인하고 실험을 통해서 제안한 방법의 우수성을 증명하였다.

### 2 제안된 위치추정 방법

#### 2.1 서치코일의 장착

본 논문에서 사용되는 전동기는 TSRM(Toroidal Switched Reluctance Motor)으로서 두 상이 동시에 여자되어 하나의 돌극에 자속을 흘려준다<sup>[2]</sup>. 서치코일은 그림 1에서 보인바와 같이 고정자의 각 상의 돌극중 하나에 0.16mm, 10턴씩 장착되어있다. 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.

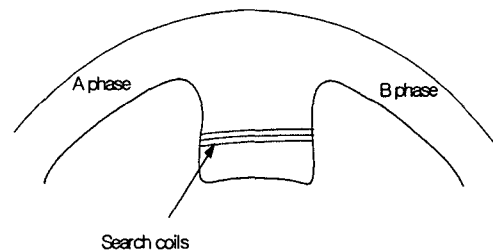


그림 1 서치코일의 장착도.

Fig. 1 Installation of the search coil.

## 2.2 초기 기동 시 위치 검출법

SRM이나 TSRM를 기동(starting)하기 위해서는 정지 상태에서 회전자의 초기 위치를 반드시 알아야 구동이 가능하다. 회전자의 초기 위치를 알 수 없는 센서리스 구동 방법의 경우 강제 정렬법을 이용해 회전자를 원하는 위치에 놓고 초기 기동을 시키는 경우가 있다<sup>[3-5]</sup>. 이런 강제 정렬의 방법은 정밀제어를 해야 하는 곳이나 부하가 역회전을 하지 않아야 하는 곳에서는 치명적인 문제를 발생한다. 따라서 정지 시 회전자의 초기 위치검출은 고성능 SRM에서는 필수적인 요소라 할 수 있다.

본 논문에서는 회전 시에 위치를 검출하는데 사용한 서치코일을 이용하여 정지 시 회전자의 초기 위치를 추정한다. 이 방법은 회전 시 사용한 서치코일을 사용함으로써 추가적인 센서가 필요치 않은 장점도 얻게 된다.

먼저 전 처리 단계로 서치코일의 유기기전력( $V_s$ )과 위치( $\theta_R$ )의 관계를 맵핑한  $V_s-\theta_R$  기준값의 획득이 필요하다. 서치코일의 유기기전력을 발생하기 위해 3상을 연속적으로 짧은 시간동안(약  $100\mu s$ ) 스위칭한다. 이때 모터는 계속 정지해 있고 전류는 미세하게 인가된다.

서치 코일에서는 상호 인덕턴스의 크기, 즉 고정자 돌극과 회전자 돌극이 겹쳐있는 정도에 따라 3상의 서치 코일에 기전력이 유기된다. 이 유기기전력은 회전자와 고정자의 위치에 따라 각각 결정된다. 이때 서치코일에 유기되는 기전력은 전동기가 회전할 때와 같이 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이 유기기전력은 회전자의 위치정보를 내포하고 있다. 따라서 서치코일의 유기기전력을 통해 회전자의 위치정보 예측이 가능해진다.

$$e = -(M_{as} \frac{di_a}{dt} + i_a \omega \frac{dM_{as}}{d\theta} + M_{bs} \frac{di_b}{dt} + i_b \omega \frac{dM_{bs}}{d\theta}) \quad (1)$$

그림 2는 TSRM의 회전자가 정지 상태일 때, 연속적으로 단일 펄스 전압을 인가 시 AB상 서치코일, BC상 서치코일, CA상 서치코일에 유기되는 기전력의 파형을 나타낸다.

회전자의 위치에 따라 서치 코일의 유기 기전력의 크기는 변화된다. 위치에 따른 기전력의 분포를 얻기 위하여 회전자의 위치에 대해 각각 파형의 크기를 측정하였다. 측정된 유기 기전력의  $V_s-\theta_R$  기준값 분포는 그림 3과 같다.

실용적인 측면에서, 위와 같은 기전력 분포는 회전자 위치검출에 직접 사용할 수 없다. 왜냐하면 회전자가 회전하여 동일한 위치에 도달하더라도 측정된 서치코일의 유기기전력은  $V_s-\theta_R$  기준값과 동일하게 재현되지 않기 때문이다.

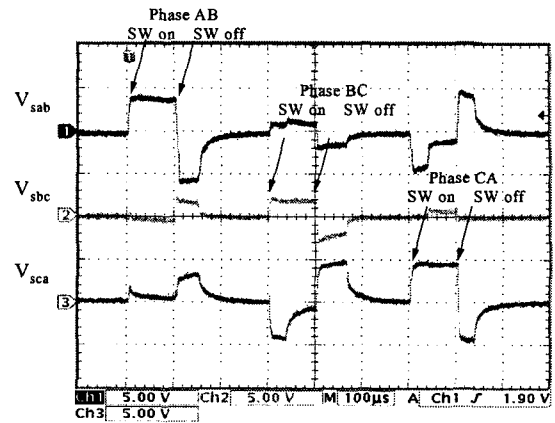


그림 2 단일펄스 입력에 대한 서치 코일 기전력  
Fig. 2 Magnitude of the search coil EMFs

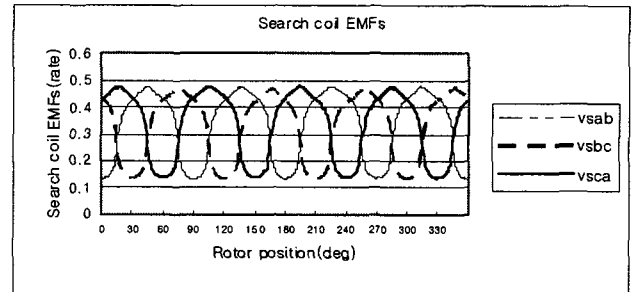


그림 3 회전자 위치에 따른 서치코일 유기기전력 분포  
Fig. 3 Search coil EMFs according to rotor position

즉, A/D 변환기의 분해능을 넘는 미세한 회전자의 위치변화, A/D 변환기의 측정오차, 회전자 및 고정자의 불균일, 유기 기전력의 미세한 진동 등에 의해 다른 기전력이 측정되는 것이다.

따라서 측정된 기전력에 해당하는 위치를 검출하기 위해서는  $V_s-\theta_R$  기준값에서 가장 근접하는 위치를 추론하기 위한 과정이 필요하다. 본 논문에서는 유클리디안 제곱거리(Squared Euclidean Distance)를 이용하여 최소 오차를 가지는 위치 데이터를 추론하는 과정을 적용한다.

## 2.3 유클리디안 제곱거리(Squared Euclidean Distance)

유클리디안 제곱거리를 선택하여 최소 오차를 가지는 위치 데이터를 추론하는 과정을 적용한다. 유클리디안 거리는 다차원 공간에서 직선 최단거리를 말하며, 유클리디안 제곱거리는 이를 제곱한 것으로 두 벡터  $x$ 와  $y$  사이의 거리는 식 2와 같다.

$$d(x, y) = \|x - y\|^2 = \sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2 \quad (2)$$

식 2를 적용하기 위해, 정지해 있는 모터의 각상에 짧은 펄스전압을 인가하여 각 서치 코일에 유기되는 기전력을 측정한다. 측정된 3상의 유기기전

력은 식 3와 같이 변형된 유클리디안 제곱거리를 이용하여 위치를 추정한다.

$$\theta_R = \min[(Vsab^* - Vsab_k)^2 + (Vsbc^* - Vsbc_k)^2 + (Vsca^* - Vsca_k)^2] \quad (3)$$

여기서,  $k = 0, 1, \dots, 359$

$\theta_R$ : 회전자 위치

$Vsab^*$ : ab상 서치코일 EMF(측정값)

$Vsbc^*$ : bc상 서치코일 EMF(측정값)

$Vsca^*$ : ca상 서치코일 EMF(측정값)

$Vsabk$ : ab상 서치코일 EMF(기준값),  $0^\circ - 359^\circ$

$Vsbck$ : bc상 서치코일 EMF(기준값),  $0^\circ - 359^\circ$

$Vscak$ : ca상 서치코일 EMF(기준값),  $0^\circ - 359^\circ$

위에서 기술한 것처럼 회전자의 위치를 추론하는 과정은 먼저 표준으로 획득된  $V_s - \theta_R$  기준값과 임의의 위치에서 얻은 측정값의 유클리디안 제곱거리를 산출한다. 다음으로 이 값들을 비교하여 min 연산을 통해 가장 작은 유클리디안 제곱거리를 갖는 출력을 선택한다.

#### 2.4 회전 시 서치코일 유기기전력을 이용한 위치추정

그림 4에서 서치 코일의 정(+)의 기전력이 나타나는 구간이 ON되는 구간을 나타내며, 이 구간에서만 회전자의 위치 정보를 담고 있다. 그림 5에서 T1은 이전 상에서의 토크 발생 시작점과 현재 ON되고 있는 상의 토크 발생 시작점을 시간으로 나타낸 값이다. 6/4 SRM의 경우 위치적으로  $30^\circ$ 를 나타내고,  $30^\circ$ 를 T1으로 나눈 값은 현재의 각속도를 가리킨다. T1은 위치적으로  $30^\circ$ 를 나타내므로 현재의 속도(T1)를 알고 토크 발생구간 시작점을 검출하면 스위치 ON 구간을 계산할 수 있고, T2의 시간 후에 커뮤테이션이 가능하다. 본 논문에서 T2는 최대  $30^\circ$ 의 구간을 갖으며, T1과 T2의 차이는 다음 여자상의 어드밴스 각이다.

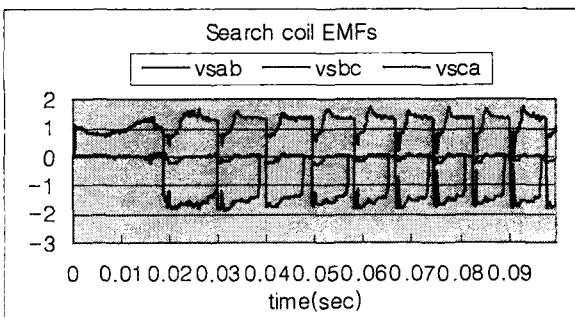


그림 4 서치코일의 시뮬레이션 파형  
Fig. 4 Simulation waveform of search coils

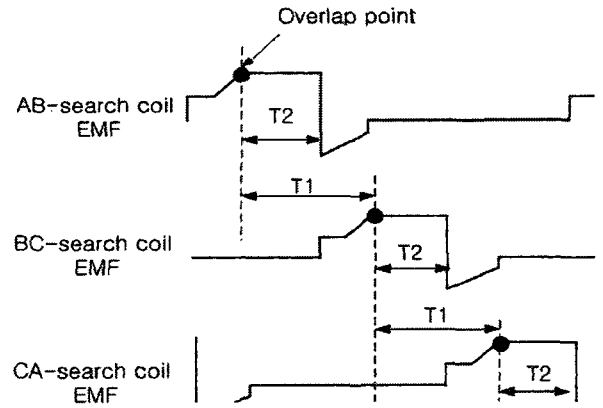


그림 5 서치코일을 이용한 위치추정 원리.  
Fig. 5 Control principle using search coils.

$$T2 = \alpha T1 \quad (4)$$

식 4는 전체 토크 발생 구간에서 스위치 ON 구간의 시간을 결정하는 식이다.  $\alpha$ 는 전체 정토크 발생 구간에서 실제 여자되고 있는 정토크 구간의 비율을 의미한다. 따라서 전체 정토크 구간에서 소호 구간은 다음 상의 선행각도를 제공한다. 이러한 서치 코일을 이용한 구동법은 역방향 운전에서도 그대로 적용된다.

그림 6은 토크 발생구간 시작점을 검출하기 위한 방법으로 서치 코일의 기전력 파형과 미분 파형이다. 미분 파형에서 알 수 있듯이 토크 발생구간 시작점을 미분 파형을 이용하면 쉽게 검출할 수 있다. 즉  $\frac{dVs}{dt}$  값이 0 이 되는 부분을 검출함으로써 회전자와 고정자가 겹치기 시작하는 부분을 검출할 수 있는 것이다. 서치코일 기전력을 제어기에서 입력받을 때는 잡음을 제거하기 위해서 이동평균을 취하게 되며, 고속 회전시에는 이동평균이 시간 지연의 요인이 되므로 사용되지 않는다.

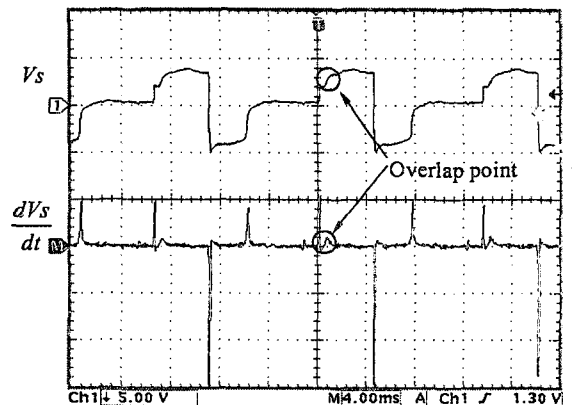


그림 6 서치코일 유기 기전력과 미분파형.  
Fig. 6 Search coil EMF and differential waveform.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 초기 위치 추정

유클리디안 제곱거리를 이용하여 정지시 회전자 위치검출을 모든 각도에서 시도한 결과 그림 7, 8과 같은 결과를 얻었고, 제안한 방법에 의한 회전자 위치 추정 결과가 아주 우수함을 알 수 있다.

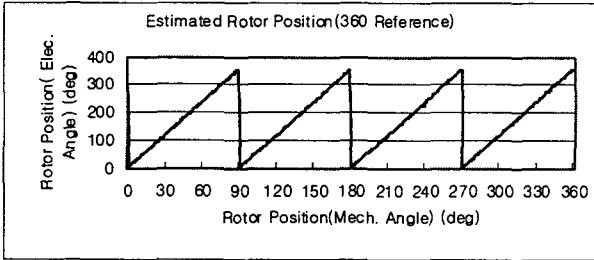


그림 7 추정된 회전자 위치

Fig. 7 Estimated rotor position

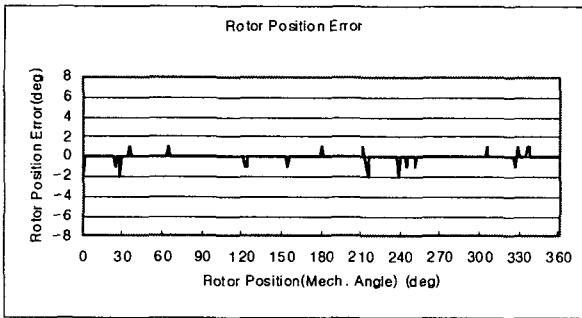


그림 8 회전자 위치 오차.

Fig. 8 Rotor position error

#### 3.2 회전시 위치 추정

초기 위치 검출 후 기동시의 서치코일 유기전력이 그림 9에 잘 나타나있다. 그림에서 서치코일 유기전력은 반전증폭기에 의해 반전된 파형으로 되어있다.

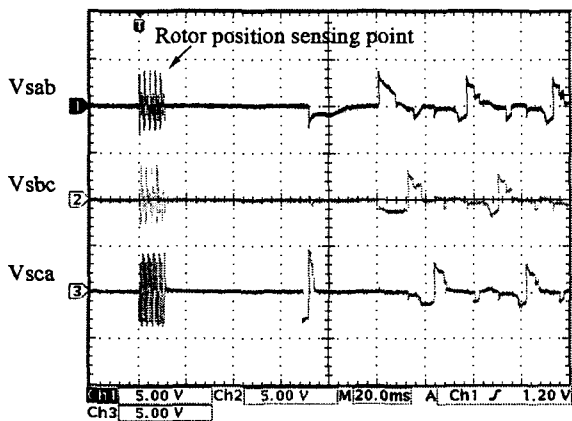


그림 9 초기위치 검출 및 기동.

Fig. 9 Initial rotor position sensing.

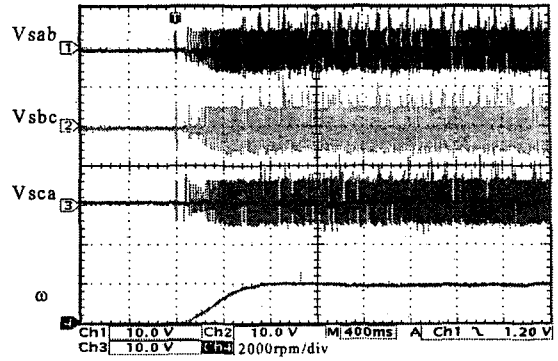


그림 10 기동시 서치코일 기전력과 속도파형

Fig. 10 Startup: search coil EMFs and speed

기동시키기 전에 현재 회전자의 위치검출을 위해 짧은 펄스를 5번 인가해주고 그때 얻은 유기기전력 값의 평균을 취하여 회전자 위치를 추정하므로 보다 정확한 위치를 검출할 수 있다. 현재 위치를 파악한 후 적절한 상을 여자시켜서 기동하는 과정을 그림 9, 그림 10을 통해 볼 수 있으며 원활한 초기 기동이 이루어지고 있는 것을 알 수 있다.

그림 11의 (a)는 엔코더를 이용하여 구동한 경우의 서치코일 유기전압 파형이며, 그림 11의 (b)는 제안된 방법을 이용하여 구동한 경우의 서치코일 유기전압 파형이다.

엔코더로 구동했을 경우와 서치코일로 구동했을 경우의 서치코일 유기기전력을 비교해 보면 거의 같은 파형을 나타내고 있음을 알 수 있고, 엔코더를 사용하지 않고 서치코일만을 이용해서 구동하는 것이 가능하다는 것을 보여준다.

그림 12에서는 과부하가 인가되었을 경우의 구동 특성을 보여준다. 4000rpm에서 거의 0rpm까지 순간적으로 속도가 떨어져서 거의 멈추었음에도 불구하고 부하가 제거되는 순간 다시 기동하고 있음을 보여줌으로써 제안된 방법이 부하에도 강인하다는 것을 입증하였다.

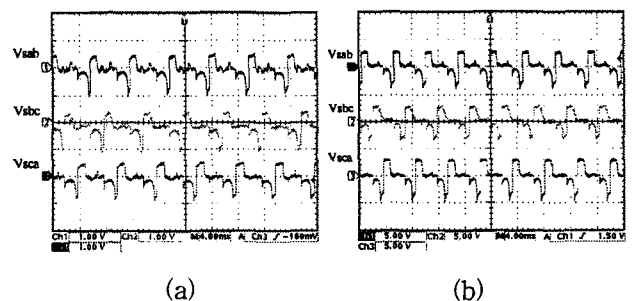


그림 11 서치코일 유기기전력

(a) 엔코더 구동시 서치코일 유기기전력

(b) 제안된 방법에 의한 구동 시 서치코일 유기기전력

Fig. 11 Search coil EMFs

(a) Search coil EMFs using encoder

(b) Search coil EMFs using proposed method

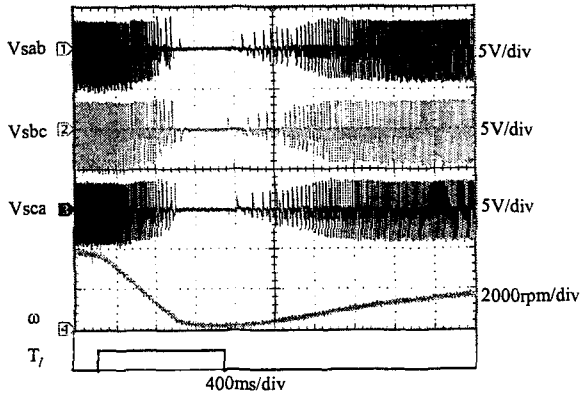


그림 12 부하 변동시 서치코일 유기기전력 및 속도 파형  
Fig. 12 Performance of the proposed method during load change

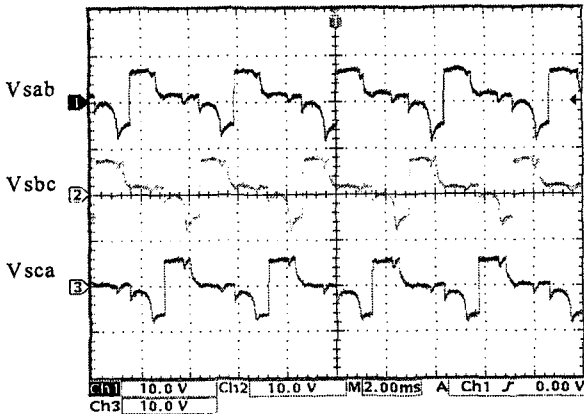


그림 13 역방향 구동시 서치코일 유기기전력  
Fig. 13 Search coil EMFs during reverse drive

제안된 방법은 역방향 구동도 가능하다. 그림 13에서 역방향 구동 시 서치코일 파형을 보여준다. 정방향 구동 시와 상 여자순서가 반대로 되어있음을 알 수 있다.

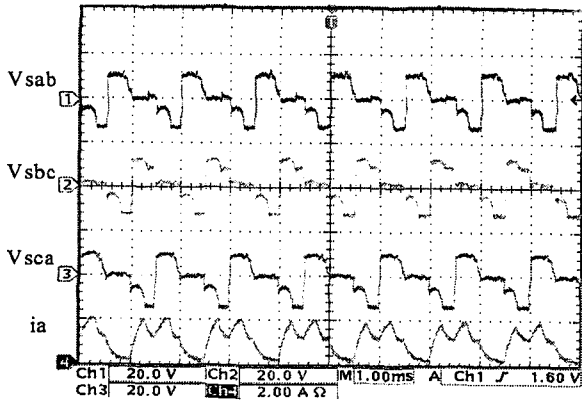


그림 14 고속운전 시(10000rpm) 서치코일 유기기전력 및 전류파형  
Fig. 14 Performance of the proposed method at high speed(10000rpm)

그림 14는 10000rpm으로 회전시의 서치코일 유기전압 파형 및 전류파형이다. 보통 고정밀 엔코더의 속도 한계는 6000rpm 이므로 속도를 높이는 경우에는 엔코더는 장치에서 제거된다. 서치코일을 이용한 구동이 고속에서도 가능하다는 것을 이 실험을 통해서 알 수 있고, 이는 SRM 회전자의 위치센서로서 서치코일을 이용하여 적용분야를 확대할 수 있다는 것을 의미한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 서치코일을 이용하여 TSRM의 초기 기동 시 및 회전 시 위치 검출 및 구동하는 방법을 제안하였다. 제안된 서치코일은 하나의 내장된 위치센서로서 외부 전원 없이 동작하고 더 이상의 추가적인 부피증가를 필요로 하지 않는다.

초기 기동 시 회전자 위치 추정 방법으로 유클리디안 제곱거리를 사용하여 실험을 한 결과 우수한 성능을 보여주었다. 또한 초기 위치 검출 후 원활한 기동과 정상상태 회전시 부하에 강함을 보여주었으며, 고속 회전 시에도 위치검출이 가능함을 증명하였다. 본 논문에서 제한한 방법은 충격에 강하며, 온도변화에 영향을 받지 않을 뿐만 아니라 유지보수가 필요 없다는 장점을 가진다. 본 논문에서 제안한 방법은 많은 장점을 가지고 있으므로 SRM의 소형화, 저가형 SRM 상품화에 크게 기여할 것으로 여겨진다.

이 논문은 전남대학교 고품질전기전자부품 및 시스템연구센터의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 참고 문헌

- [1] 안진우, 황영문, 스위치드 릴럭턴스 전동기 구동과 응용, 신지서원, 1998
- [2] Kim Ki-Bong, "Toroidal Switched Reluctance Motor part 1. fundamentals", Korea-Germany symposium 11, pp. 135-141, 1998
- [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] Gabriel Gallegos-Lopez, Philip C. Kjaer, T.J.E. Miller, "A New Sensorless Method for Switched Reluctance Motor Drives", IEEE Trans. on Industry Appl., Vol. 34, No. 4, pp. 832~840, 1998.
- [5] C. C. Chan, Quan Jiang, "Study of Starting Performances of Switched Reluctance Motors", PEDS 95, pp. 174 - 179, 1995