

# 돌극관통 서치코일을 이용한 스위치드 릴럭턴스 모터의 회전자 위치검출 및 구동

신덕식, 양형열, 임영철  
전남대학교

## Switched Reluctance Motor Drives Using Interior Central Pole Search Coils

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

### ABSTRACT

This paper presents a new method of detecting rotor position in Toroidal Switched Reluctance Motor(TSRM). In this paper, low cost and robust characteristics of rotor position detection method are focused in order to compensate for disadvantage of general sensors. Search coils wound through the hole of the stator poles are used for detection of the rotor position in TSRM. Rotor position detection is achieved through electromotive force patterns induced by time-varying flux linkage in the search coils and then adequate phase is excited for drive. The initial rotor position estimation method is also described. The validity of the method is verified by experimental results.

**Key Words** : Toroidal SRM, Search coil, EMF

### 1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor: SRM)는 많은 장점을 가지고 있지만 회전자 위치 정보는 필수적이다.

광 인터럽터 혹은 고정밀 엔코더와 같은 축 위치 센서들이 흔히 회전자 위치를 결정하기 위해 사용된다. 그러나 이런 위치 센서들은 복잡성과 소형 모터의 응용에 대해 추가적인 비용을 요구할 뿐 아니라 구동시스템의 신뢰도를 저하시키는 경향이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 여러 가지의 간접 위치 검출구조에 관한 센서리스 제어 결과가 보고 되어지고 또한 연구되고 있다<sup>[1-4]</sup>.

그러나 SRM은 간단한 구조에 비해서 회전자 위치에 따른 상인덕턴스의 변화가 정현파가 아니라는

점과 전류 대 토크 발생비가 전류와 회전자의 함수로써 폭넓은 범위에 걸쳐 변한다는 점 등의 비선형적 특성 때문에 SRM의 센서리스 연구에 어려움을 주고 있다<sup>[5]</sup>.

본 연구는 기존의 위치 센서들의 문제점인 고속회전의 제약, 고온 고압의 환경에서 신뢰성 저하, 고장시 별도의 보수 필요, 충격에 약한 점 등의 단점을 해결 할 수 있는 방법으로 서치 코일을 내장한 SRM을 제안하였다.

그리고 제안한 위치검출 방법에 대한 가능성을 시뮬레이션을 통해 확인하고 실험을 통해서 제안한 방법의 우수성을 증명하였다.

### 2. TSRM과 서치 코일

그림 1은 본 논문에서 사용된 6/4 TSRM과 서치코일을 나타내었다. 돌극 관통 서치코일은 돌극 중앙의 홀을 관통하여 한 돌극당 좌우로 두 개의 코일이 장착되어 있다. 모터의 중심축에서 보았을 경우 중앙 홀을 기준으로 좌측에 감긴 '좌측 돌극 관통 서치코일(sabl, sbcl, scal)'은 반시계방향으로

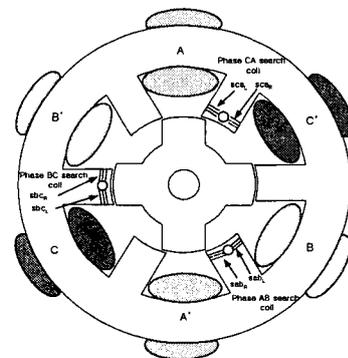


그림 1 TSRM과 장착된 서치코일  
Fig. 1 Structure of the TSRM with interior central pole search coils

구동하기 위한 서치코일이며, 돌극 우측에 장착된 '우측 돌극 관통 서치코일(sabr, sbcr, scar)'은 시계방향으로 회전시키는 경우에 사용한다. 좌우의 서치코일은 각각 0.16mm, 10턴이 감겨있으며 회전 방향은 다르지만 회전자의 위치를 검출하여 구동하는 원리는 같다.

### 3. 제안된 위치추정 방법

#### 3.1 초기 기동법

초기 회전자 위치검출을 위해 먼저 서치코일의 유기기전력( $V_s$ )과 위치( $\theta_R$ )의 관계를 맵핑한  $V_s-\theta_R$  기준값의 획득이 필요하다. 회전자가 정지해 있을 때 매  $1^\circ$ 마다 각 상에 짧은 시간 동안(약  $100\mu s$ ) 펄스를 인가하여 모든 위치에서 서치 코일에 유기되는 기전력을 측정한다. 측정된 서치코일의 유기기전력은 위치에 종속적인 관계를 가지므로 기준값으로 활용할 수 있다. 그림 2는 TSRM의 회전자가 정지 상태일 때, 단일 펄스 전압을 인가 시 AB상 서치코일( $V_{sab}$ ), BC상 서치코일( $V_{sbc}$ ), CA상 서치코일( $V_{sca}$ )에 유기되는 기전력의 파형을 나타낸다. 좌측 돌극 관통 서치코일과 우측 돌극 관통 서치코일의 경우 측정된 유기 기전력의  $V_s-\theta_R$  기준값 분포는 각각 그림 3, 그림 4와 같다.

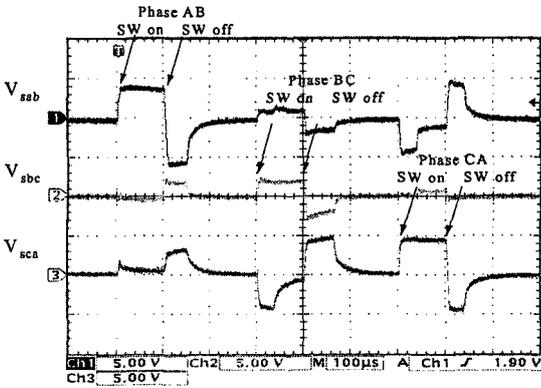


그림 2 단일펄스 입력에 대한 서치 코일 기전력  
Fig. 2 Magnitude of the search coil EMFs

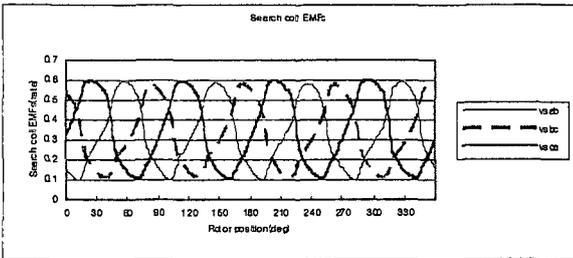


그림 3 회전자의 위치에 따른 좌측 돌극 관통 서치코일의 유기기전력 분포  
Fig. 3 Left interior central pole search coil EMFs according to the rotor position

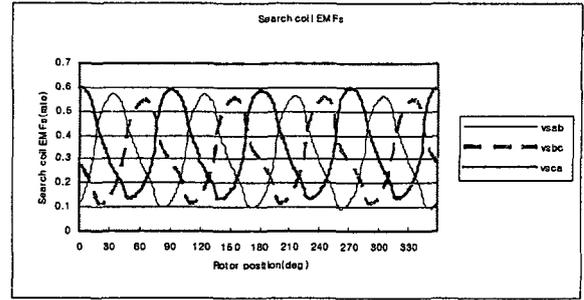


그림 4 회전자의 위치에 따른 우측 돌극 관통 서치코일의 유기기전력 분포  
Fig. 4 Right interior central pole search coil EMFs according to rotor position

한편 서치 코일에서는 3상의 서치 코일에 식 (1)과 같은 기전력이 유기된다. 이때 모터가 정지 상태에 있으면 서치 코일의 기전력은 식 (2)와 같이 변압기 형태의 기전력만 유기된다. 이 유기기전력은 정지상태에서 회전자의 위치정보를 내포하고 있다. 따라서 서치코일의 유기기전력을 통해 회전자의 위치정보 예측이 가능해진다.

$$e = -\left(\frac{d\lambda_{as}}{dt} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt}\right)$$

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

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

$\lambda_{as}, \lambda_{bs}$ : A, B상전류에 의해 발생하는 서치코일 쇄교자속

$M_{as}, M_{bs}$ : 주권선과 서치코일의 상호 인덕턴스

$i_a, i_b$ : 여자되고 있는 두개의 상전류

$\omega$ : 회전속도

$$e = -(M_{as} \frac{di_a}{dt} + M_{bs} \frac{di_b}{dt}) \quad (2)$$

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. 즉, 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.

### 3.2 유클리디안 제곱거리

유클리디안 거리는 다차원 공간에서 직선 최단거리를 말하며, 유클리디안 제곱거리는 이를 제곱한 것으로 두 벡터  $x$ 와  $y$  사이의 거리는 식 (3)과 같다.

$$d(x, y) = \|x - y\|^2 = \sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2 \quad (3)$$

식(3)을 적용하기 위해, 정지해 있는 모터의 각 상에 짧은 펄스전압을 인가하여 각 서치 코일에 유기되는 기전력을 측정한다. 측정된 3상의 유기기전력은 식(4)와 같이 변형된 유클리디안 제곱거리를 이용하여 위치를 추정한다.

식 (4)에 의하여 초기 회전자 위치를 파악하면 적절한 상을 여자시켜 구동이 가능하다.

$$\theta_R = \min[(Vsab^* - Vsab_k)^2 + (Vsbc^* - Vsbc_k)^2 + (Vsca^* - Vsca_k)^2] \quad (4)$$

$k = 1, 2, \dots, 359$

$\theta_R$ : 회전자 위치

$Vsab^*$ : ab상 서치코일 EMF(측정값)

$Vsbc^*$ : bc상 서치코일 EMF(측정값)

$Vsca^*$ : ca상 서치코일 EMF(측정값)

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

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

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

### 3.3 서치코일을 이용한 구동

그림 5는 Maxwell 2D에 의해 분석된 돌극 관통 서치코일의 회전자 위치에 따른 자속분포를 나타낸다.  $\lambda_{sr}$ 은 우측 돌극 관통 서치코일의 자속,  $\lambda_{sl}$ 은 좌측 돌극 관통 서치코일의 자속을 나타내고 있다.

회전자가 코일이 감긴 부분까지 접근한 후부터 자속이 증가하고 있으며, 회전자와 고정자가 완전히 정렬되어있는 상태에서도 계속해서 증가하고 있는 모습을 보인다.

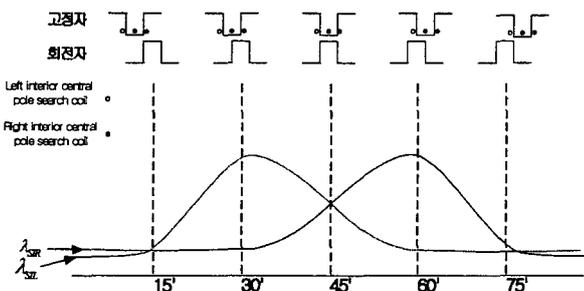


그림 5 회전자 위치에 따른 자속분포  
Fig. 5 Fluxlinkage of the interior central pole search coils according to rotor position.

그리고 회전자가 돌극 관통의 서치코일을 벗어나기 시작하는 시점부터 감소하기 시작한다. 서치코일의 유기기전력은 그림 5에서 보는 것처럼 회전자의 위치 정보를 포함한다. 서치코일이 돌극의 중앙에 감겨있으므로 회전자가 돌극의 중앙까지 도달하기 전에는 낮은 전압이 약간 발생하지만, 서치코일의 근처에 도달하면서부터는 서치코일에 쇠교하는 자속이 급격하게 증가하게 되므로 서치코일의 유기기전력이 급상승하게 된다. 그러므로 서치코일 유기전압의 상승값을 관찰하여 회전자의 위치를 추정할 수 있다.

시뮬레이션에 의한 서치코일의 유기전압 파형은 그림 6과 같이 나타나게 된다. 위치검출을 더욱 확실히 하기 위해서 입력된 파형에 상승을 취한다. 그러면 그 기울기가 훨씬 증가하여 위치검출의 오차를 줄일 수 있게 된다. 그리고 상승을 취한 서치코일 유기전압을 적분하여 보다 잡음에 강하게 한다. 그러므로 입력된 서치코일은 다음과 같은 과정을 거쳐 기준전압과 비교하게 된다.

$$Vs' = \int Vs^2 dt \quad (5)$$

식 (5)에 의해 계산된 서치코일 유기기전력은 서치코일이 감긴 부분이 되면 급상승하게 되고, 따라서 이 점을 검출할 수 있다. 이 점은  $30^\circ$ (회전자와 고정자가 절반 접친 상태)이므로 여기에서 스위치 오프를 하게 되면  $15^\circ$ 의 어드밴스각을 갖게 된다. 따라서 원하는 어드밴스각  $\theta_{ad}$ 를 주기 위해서는  $15^\circ - \theta_{ad}$ 의 각도 만큼 회전한 후에 상전환(commutation)을 해준다. 그리고 계속해서 다음 상의 서치코일 위치를 파악하여 구동하게 된다.

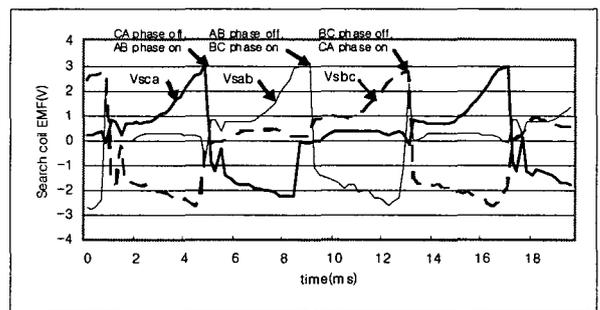


그림 6 서치코일 유기기전력  
Fig. 6 Search coil EMFs

## 4. 실험 결과

### 4.1 초기위치 추정

그림 7, 8에 초기위치 추정 결과를 보여 주고 있다. 6개의 오차가 존재하지만 이것은 전동기가 기동하는데 전혀 문제가 없으며, 회전자와 고정자의 돌극이 균일하다면 발생하지 않을 것으로 보인다.

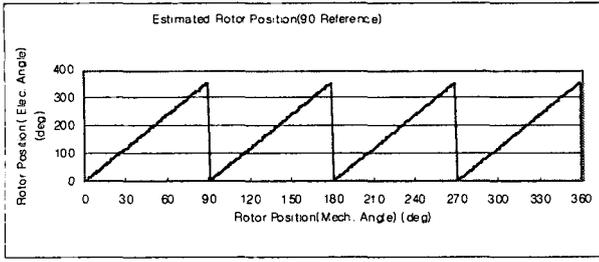


그림 7 추정된 회전자 위치  
Fig. 7 Estimated rotor position

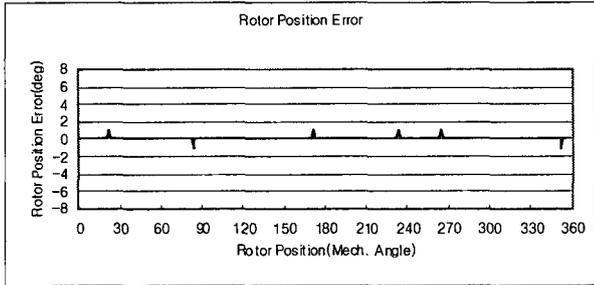


그림 8 추정된 회전자 위치 오차  
Fig. 8 Rotor position error

#### 4.2 초기 위치 검출 및 기동 시 서치코일 유기전압

정지상태에서 기동하는 과정을 그림 9를 통해 알 수 있다. 초기 기동시의 회전자 위치 파악을 위해 펄스를 5회 인가하고 이때 유기되는 서치코일의 기전력의 평균값으로 현재의 위치를 추정한다. 그리고 적절한 상을 여자시킴으로써 모터를 기동한다.

#### 4.3 기동 시 서치코일 유기 전압 파형

돌극 외부 서치코일에서와 마찬가지로 모터 기동 시 정지상태에서 2000rpm까지 증가하고 있는 속도 곡선을 그림 10에서 볼 수 있다. 속도가 증가할수록 서치코일 유기전압은 증가하며 2000rpm으로 속도가 안정될 때는 일정한 크기의 기전력을 나타내고 있다.

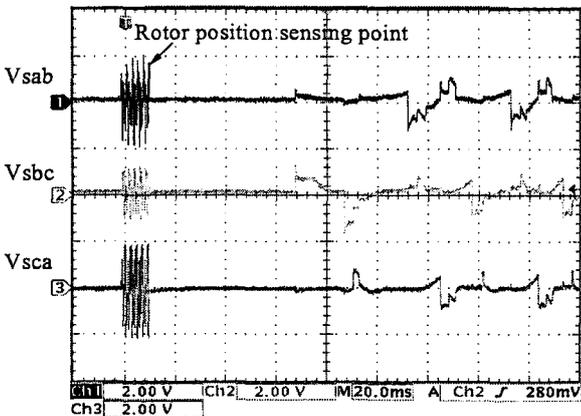


그림 9 초기 기동시 서치코일 유기기전력  
Fig. 9 Search coil EMFs during start-up

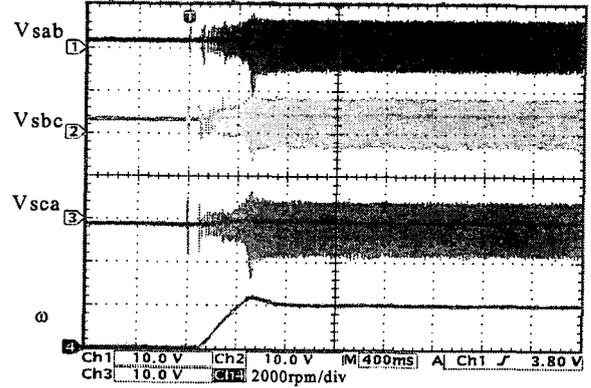


그림 10 기동 : 서치코일의 유기기전력과 속도  
Fig. 10 Startup: search coil EMFs and speed

#### 4.4 엔코더 구동 시 서치코일 유기전압과 서치코일 구동 시 전압 비교

엔코더로 구동했을 경우(그림 11(a))와 서치코일로 구동했을 경우(그림 11(b))의 서치코일 유기기전력을 비교해 보면 거의 같은 파형을 나타내고 있음을 알 수 있고, 엔코더를 사용하지 않고 서치코일만을 이용해서 구동하는 것이 가능하다는 것을 보여준다.

#### 4.5 부하 변동 시 속도 및 서치코일 유기 전압 파형

서치코일로 모터를 구동할 경우에 부하에도 매우 강한 특징을 가지고 있다는 것을 실험파형을 통해 증명하였다. 그림 12에서 약 3700rpm에서 1000rpm까지 순간적으로 속도가 떨어졌음에도 불구하고 부하가 제거되는 순간 다시 속도가 증가하고 있다. 이때 전류가 높아지는 것을 볼 수 있으며 제안된 방법이 부하에도 매우 강인하다는 것을 알 수 있다.

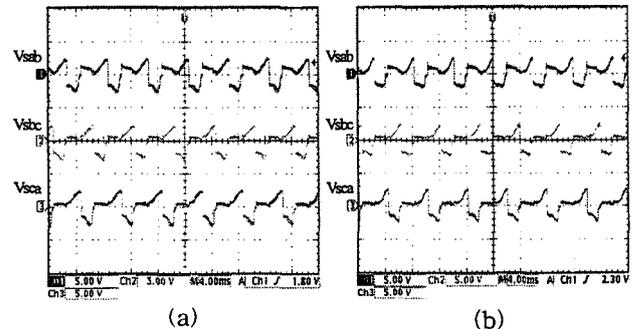


그림 11 서치코일 유기기전력  
(a) 엔코더로 구동시 서치코일의 유기기전력  
(b) 서치코일로 구동시 서치코일의 유기기전력

Fig. 11 Search coil EMFs  
(a) Search coil EMFs using encoder  
(b) Search coil EMFs using proposed method

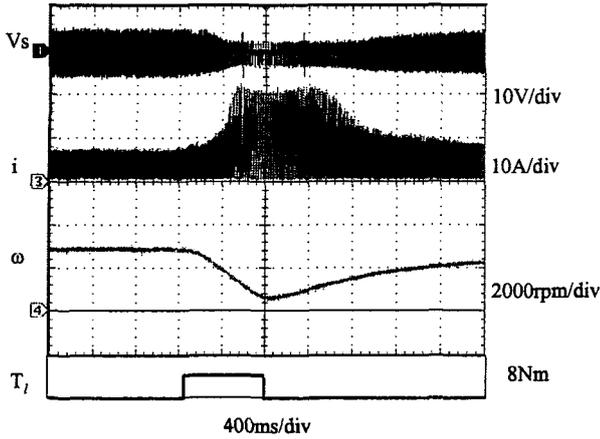


그림 12 부하 인가시 제안된 방법의 성능  
 Fig. 12 Performance of the proposed method during load change.

#### 4.6 서치코일을 이용한 고속회전

돌극 관통 서치코일에서도 저속에서 뿐만 아니라 고속에서도 우수한 성능을 보여준다. 그림 13은 10000rpm으로 회전시의 서치코일 유기전압 파형 및 전류파형이다. 이 경우에 엔코더는 장치에서 제거된다. 돌극 관통 서치코일을 이용한 구동이 고속에서도 가능하다는 것을 이 실험을 통해서 알 수 있고, 이는 SRM 회전자의 위치센서로서 서치코일을 이용하여 적용분야를 확대할 수 있다는 것을 의미한다.

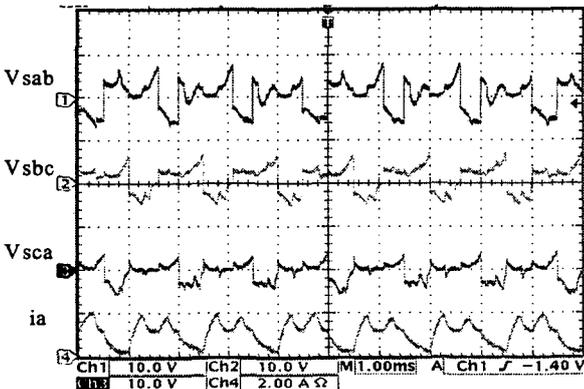


그림 13 고속운전 시(10000rpm) 서치코일 유기기전력 및 전류파형  
 Fig. 13 Performance of the proposed method at high speed(10000rpm)

### 5. 결 론

본 연구에서는 기존의 위치 센서들의 많은 문제점을 해결 할 수 있는 방법으로 돌극 관통 서치코일을 내장한 TSRM을 제안하였다.

본 논문에서는 유클리디안 제곱거리를 이용하여 회

전자의 위치를 추정하는 예측단계를 통하여 회전자의 위치를 추정하는 방법을 제안하였다. 그리고 실험을 통하여 부하에 강인한 구동이 가능함을 보여 본 논문에서 제안하는 방법의 우수성을 입증하였고, 제안한 방법에 대하여 10000rpm 이상의 고속운전이 가능함을 보임으로써 서치코일을 이용한 제안한 방법의 적용 분야가 넓어질 수 있다는 것을 보여주었다.

이렇게 서치 코일을 이용한 구동 방법은 기존 위치 검출 센서를 사용했을 때 나타나는 비용의 문제뿐만 아니라 내충격의 문제, 속도 제약의 문제, 사용 환경의 문제, 모터의 부피증가 문제 등을 해결함으로써 강인한 특성의 구동장치를 구현할 수 있을 것으로 사료된다.

본 논문에서 제안한 방법은 진동, 고온, 고압 등으로 인해 기존의 위치 센서가 사용되기 어려운 특수한 환경에서는 많은 각광을 받을 것으로 기대되며, 위와 같은 많은 장점을 가지고 있으므로 SRM의 소형화, 저가형 SRM 상품화에 크게 기여할 것으로 보인다.

이 논문은 전남대학교 고품질전기전자부품 및 시스템 연구센터의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

### 참 고 문 헌

- [1] H. Gao, F. R. Salmasi, M. Ehsani, "Sensorless control of SRM at standstill", Sixteenth Ann. IEEE Applied Power Electr. Conf. and Exposition, Vol. 2, pp. 850-856, March 2001
- [2] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni and P. Vas, "Position sensorless control of a SRM drive using ANN-techniques", The Thirty-Third IAS Ann. Mtg. Ind. Appl. Conf., Vol. 1, pp. 709-714, Oct. 1998
- [3] P. Jinupun and P. Chi-Kwong Luk, "Direct torque control for sensorless switched reluctance motor drives", Seventh Int. Conf. on (IEE Conf. Publ. No. 456) Power Electr. and Variable Speed Drives, pp. 329-334, Sept. 1998
- [4] 안진우, 박성준, 김태형, "SRM의 센서리스 제어를 위한 인덕턴스 추론기법", 전력전자학회 논문지, Vol.8, No. 5, pp. 427 - 434, 2003
- [5] S. S. Murthy, B. Sing, V. K. Sharma "A frequency response method to estimate inductance profile of switched reluctance motor", International Conf. on Power Electr. and Drives Systems Proc., pp. 181-187, 1997