

서치 코일을 이용한 스위치드 릴럭턴스 모터의 초기 회전자 위치 검출법

송진수, 양형열, 유영재*, 임영철
 전남대학교 전기공학과, *목포대학교 제어시스템공학부

Sensing Method of the Initial Rotor Position in Switched Reluctance Motors Using Search Coils

J.S. Song, H.Y. Yang, Y.J. Ryoo*, and Y.C. Lim
 RRC & Dept of Electrical Eng., Chonnam National Univ.,
 *Dept of Control System Eng., Mokpo National Univ.

ABSTRACT

In this paper, an sensing method of initial rotor position in Switched Reluctance Motor(SRM) at standstill is proposed. In case search coils are used as a position sensor, A search coil used in a method of detecting positions of TSRM has many advantages, which is highly efficient in low cost and maintenance free, and characterized by its function and role as a position sensor. However, the initial rotor position detection is very difficult because the search coil's EMF is not exist at a standstill. In this paper, a new sensing method of initial rotor position using squared Euclidean distance at a standstill too is suggested. The simulation and experiment for the proposed method are achieved. The validity of the proposed method is verified by experimental results.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor; SRM)에 대한 연구는 각종 전력전자 기술의 발전으로 경제성 있는 전력변환장치가 개발되고 전력용 스위칭 반도체가 실용화 되면서 활발하게 진행되고 있다. SRM의 특징은 이중 돌극 구조로 고효율, 저비용, 강한 시스템 제어성, 견고성, 내환경성 및 고속운전 등의 많은 장점을 가지고 있다^[1].

이와 같은 장점에 반하여, 일반적으로 SRM의 제어를 수행하기 위해서는 레졸버, 엔코더, 혹은 Hall 센서와 같은 회전자 위치 센서가 필요하게 된다. 회전자 위치 센서는 비용을 증가시키며, 충격에 약하며, 압축기 등과 같은 고온 및 고압의 환경에

서 신뢰성을 저하시킨다^[2].

따라서 이러한 단점을 제거하기위한 방안으로 센서리스에 관한 여러 가지 방법들이 연구되어지고 있다^{[3][4][5]}.

한편으로 기존의 위치 센서들의 여러 가지 문제점을 해결 할 수 있는 방법으로 서치 코일을 내장한 SRM이 연구되어지고 있으며^[6], 이 방법은 서치 코일을 고정자의 돌극에 장착함으로써 회전자가 회전할 때 고정자 및 회전자 사이의 릴럭턴스의 변화를 감지하여 위치검출에 이용한다. 즉 고정자극과 회전자극이 겹쳐지는 시점(토크 시작점)을 검출함으로써 회전자의 위치를 파악하는 방법이다.

그러나 이 방법은 회전자가 고정되어있는 초기 기동시에는 회전자의 위치를 정확히 알지 못한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 전동기가 정지해 있는 상태에서 정확한 위치 추정이 가능한 방법을 제안하였다. 이와 더불어 초기 기동시 회전자의 정확한 위치 검출을 행함으로써 초기 기동을 원활하게 하는 방법도 제시되었다.

제안하는 방법은 회전자의 위치에 따라 서치 코일의 유기기전력이 다르다는 특성을 기반으로 한다. 먼저 회전자의 위치(θ)와 서치코일 유기 기전력(Vs)의 관계인 Vs- θ_R 기준값 획득단계로, 회전자가 정지해 있을 때 매 1°마다 각 상에 짧은 시간 동안 펄스를 인가하여 서치 코일에 유기되는 기전력을 측정한다. 측정된 유기기전력은 위치에 종속적인 관계를 가지므로 기준값으로 활용할 수 있다. 예측단계에서는 저장된 기준값과 측정된 기전력값의 유클리디안, 제곱거리(Squared Euclidean Distance)를 이용하여 회전자의 위치를 검출한다.

2. 서치코일

그림 1은 본 논문에서 사용된 6/4 TSRM과 서치

코일을 나타내었다. 회전자의 위치를 검출하기 위한 서치 코일은 각각의 고정자 돌극에 지름이 0.12 mm인 코일이 20 turns씩 감겨있다. A상과 B상 사이의 서치 코일을 AB상 서치 코일이라 하면, B상과 C상 사이의 서치 코일은 BC상 서치 코일, 나머지는 CA상 서치 코일이며 그림 1과 같이 장착되어 있다.

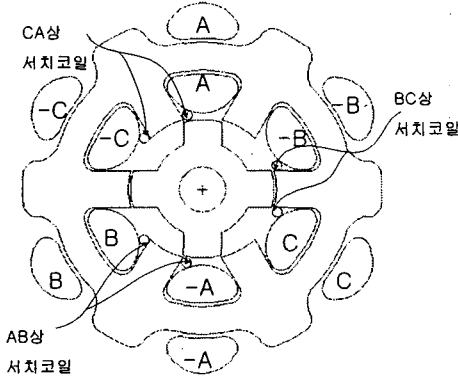


그림 1 Toroidal SRM과 서치 코일
Fig. 1 TSRM and Search coils

3. 서치코일 유기기전력의 분석

그림 2는 TSRM 회전시 A상 전류 파형과 B상 전류 파형 그리고 AB상 서치 코일의 기전력 파형을 나타낸다.

A상과 B상이 동시에 여자되고 있는 구간에서 서치 코일은 정(+)의 기전력이 발생되며, 그 파형의 형태는 그림 2의 파형과 같음을 알 수 있다. 또한 서치 코일의 파형과 수직의 실선, 점선이 만나는 점들은 토오크 발생 시작점(Overlap starting point)이다.

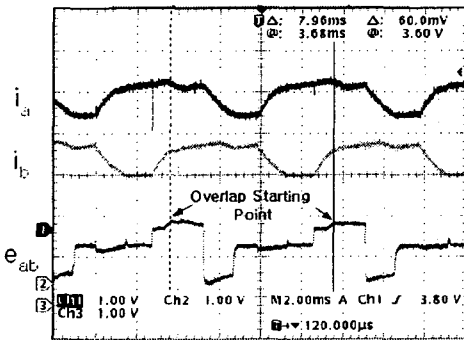


그림 2 A상, B상 전류와 AB 서치 코일
Fig. 2 Currents of A and B-phase and AB-search coil EMF

그림 3은 TSRM을 구동하는 경우 서치 코일의 기전력의 성분을 분석한 시뮬레이션 파형이다. 서치 코일에 유기되는 전압 파형은 패러데이 법칙에 따라 상권선의

전류에 의한 시변 쇄교자속과 회전자의 회전 운동으로 인한 상호 인덕턴스의 변화에 의해 생기는 시변 쇄교자속의 합이 2차측 코일(서치 코일)에 나타나는 전압 파형이다.

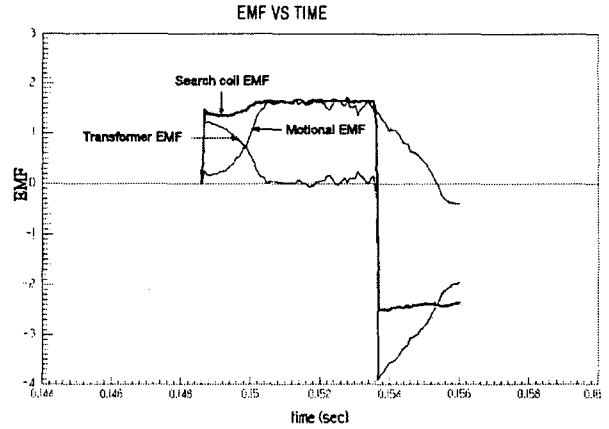


그림 3 서치 코일 파형의 성분 분석
Fig. 3 Analysis of waveform of a search coil

서치 코일의 유기 전압 파형 즉 기전력은 다음과 같이 식 (1), (2), (3)으로 표현된다.

$$e = - \frac{d\lambda_s}{dt} \quad (1)$$

$$= - \left(M \frac{di_p}{dt} + i_p \frac{dM}{dt} \right) \quad (2)$$

$$= - \left(M \frac{di_p}{dt} + i_p \omega \frac{dM}{d\theta} \right) \quad (3)$$

λ_s 는 서치 코일의 쇄교자속을 나타내며, i_p 는 상권선의 전류의 합이고, M 은 상권선의 자기 인덕턴스와 서치 코일의 자기 인덕턴스에 의한 상호인덕턴스이다. 식 (2)에서 상전류의 변화에 의한 시변 쇄교자속은 변압기 기전력(transformer emf) 성분이고, 회전자의 회전에 의해 상호 인덕턴스 변화로 발생하는 시변 쇄교자속은 속도 기전력(motional emf) 성분이다.

서치 코일의 기전력은 식 (2)와 (3)에서처럼 변압기 기전력과 속도 기전력의 합으로 나타난다. 따라서 회전시에 서치코일의 기전력은 변압기의 원리와 발전기의 원리에 의해 유기됨을 알 수 있다.

4. 정지 시 위치 추정법

4.1 회전자 위치에 대한 기준값 생성

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^{[7][8]}. 이

런 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 추정하기 위한 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 회전 시 사용한 서치코일을 사용함으로써 추가적인 센서가 필요치 않은 장점도 얻게 된다.

먼저 전처리 단계로 서치코일의 유기기전력(V_s)과 위치(θ_R)의 관계를 맵핑한 $V_s-\theta$ 기준값의 획득이 필요하다. 서치코일의 유기기전력을 발생하기 위해 PWM으로 인가전압을 작게 초평한다. 이때 3상을 연속적으로 전류의 확립이 이루어지지 못하는 짧은 시간 간격으로 매우 빠르게 스위칭한다. 순간적인 단일 펄스 전압을 인가하면 모터는 계속 정지해 있고 전류는 미세하게 인가된다.

한편 서치 코일에서는 상호 인덕턴스의 크기, 즉 고정자 돌극과 회전자 돌극이 겹쳐있는 정도에 따라 3상의 서치 코일에 기전력이 유기된다. 이 유기기전력은 크기가 다르며 회전자와 고정자의 위치에 따라 각각 결정된다. 이때 모터가 정지 상태에 있으므로 서치 코일의 기전력은 식 (4)와 같이 변압기 형태의 기전력만 유기된다. 이 유기기전력은 정지상태에서 회전자의 위치정보를 내포하고 있다. 따라서 서치코일의 유기기전력을 통해 회전자의 위치정보 예측이 가능해진다.

$$e = -M \frac{di_p}{dt} \quad (4)$$

그림 4는 TSRM의 회전자가 정지 상태일 때, 연속적으로 단일 펄스 전압을 인가 시 AB상 서치코일, BC상 서치코일, CA상 서치코일에 유기되는 기전력의 파형을 나타낸다.

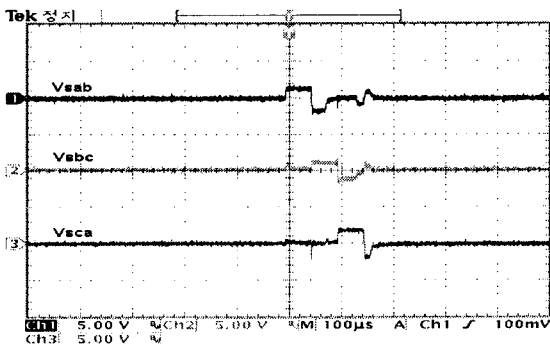


그림 4 단일펄스 입력에 대한 서치 코일 기전력
Fig. 4 Magnitude of the search coil EMFs

회전자의 위치에 따라 서치 코일의 유기 기전력의 크기는 변화된다. 위치에 따른 기전력의 분포를 얻기 위하여 회전자의 위치에 대해 각각 파형의 크기를 측정하였

다. 측정된 유기 기전력의 $V_s-\theta_R$ 기준값 분포는 그림 6과 같다.

그림 5에서 서치코일의 유기 기전력은 A/D 변환기를 통해 얻은 디지털(digit)값이며, 회전자가 기계적으로 0° 에서 90° 로 회전하면 전기적으로 0° 에서 360° 에 해당된다. 따라서 실제 $V_s-\theta_R$ 기준값은 90° 까지만 측정하면 된다.

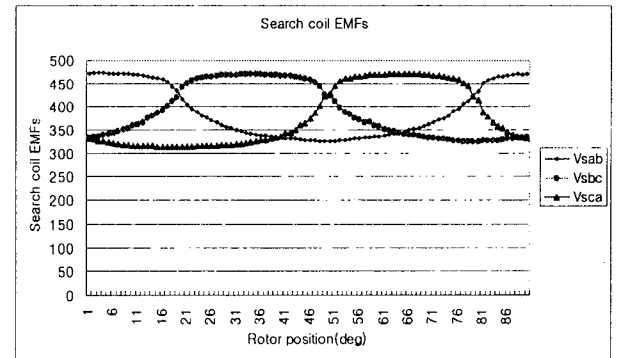


그림 5 회전자 위치에 따른 서치 코일 유기 기전력 분포
Fig. 5 Search coil EMFs according to the Rotor Position

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, 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.

4.2 유클리디안 제곱거리

유클리디안 거리(Euclidean distance)는 다차원 공간에서 직선 최단거리를 말하며, 유클리디안 제곱거리는 이를 제곱한 것으로 두 벡터 x 와 y 사이의 거리는 식 (5)과 같다.

$$d(x, y) = \|x - y\|^2 = \sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2 \quad (5)$$

식 (5)을 적용하기 위해, 정지해 있는 모터의 각 상에 짧은 펄스전압을 인가하여 각 서치 코일에 유기되는 기전력을 측정한다. 측정된 3상의 유기기전력은 식(6)과 같이 변형된 유클리디안 제곱거리를 이용하여 위치를 추정한다.

$$\theta_R = \min[(Vsab^* - Vsab_k)^2 + (Vsbc^* - Vsbc_k)^2 + (Vsca^* - Vsca_k)^2] \quad (6)$$

$k = 1, 2, \dots, 90$

θ_R : 회전자 위치

$Vsab^*$: ab상 서치코일 EMF(측정값)

$Vsbc^*$: bc상 서치코일 EMF(측정값)

$Vsca^*$: ca상 서치코일 EMF(측정값)

$Vsab_k$: ab상 서치코일 EMF(기준값), $0^\circ - 90^\circ$

$Vsbc_k$: bc상 서치코일 EMF(기준값), $0^\circ - 90^\circ$

$Vsca_k$: ca상 서치코일 EMF(기준값), $0^\circ - 90^\circ$

5. 시뮬레이션

제안된 초기위치 검출방법의 유용성을 검증하기 위해 다음과 같이 시뮬레이션을 수행하였다.

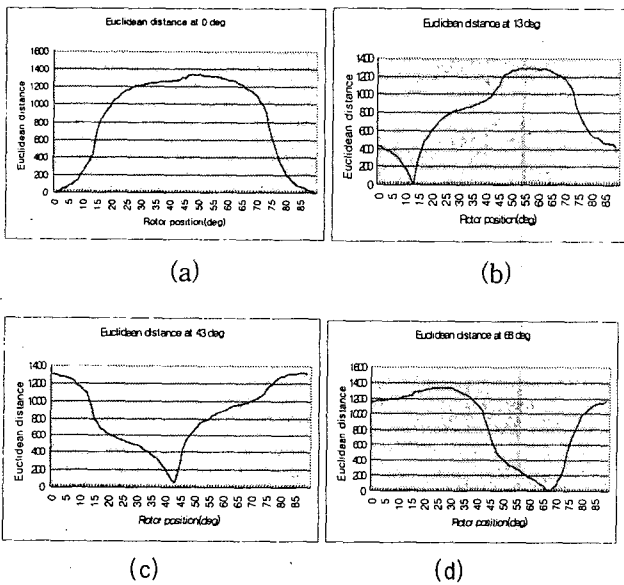


그림 6. 유클리디안 거리를 이용한 회전자의 위치 추정:

(a): 0° , (b): 13° , (c): 43° , (d): 68°

Fig 6 Rotor position estimation using Euclidean distance:

(a): at 0° , (b): at 13° , (c): at 43° , (d): at 68°

$Vs-\theta_R$ 기준값이 그림 5와 같고 회전자의 위치가 각각 0° , 13° , 43° , 68° 인 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 각 회전자의 위치에서 가장 작은 유클리디안 제곱거리 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 시뮬레이션에 의해서 제안한 방법에 의한 회전자의 위치 추정 결과가 아주 우수함을 알 수 있다.

6. 전체 시스템의 구성

전체시스템의 구성은 그림 7과 같고 크게 PC, DSP(TMS320F240)을 포함하는 주 제어 보드, 회전자의

정확한 위치검출을 위한 엔코더, 그리고 서치 코일을 내장한 토로이달 SRM으로 구성되어있다.

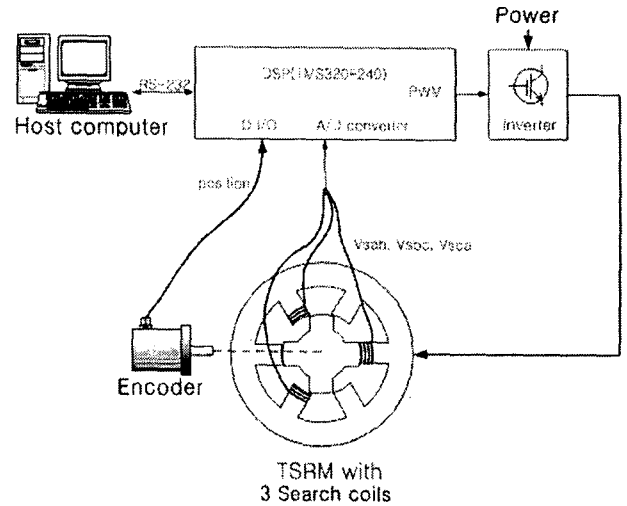


그림 7 전체 시스템 구성도

Fig. 7 Configuration of the system

7. 실험 및 결과

회전자의 위치를 검출하기 위한 펄스는 약 $50\mu s$ 이며, ab상, bc상, ca상 순으로 연속적으로 인가한다.

이때 절대적인 회전자의 위치를 알기 위해 엔코더를 이용한다. 엔코더는 1024ppr의 분해능을 가지며 DSP로 엔코더 펄스가 입력되면서 4배 배되어 4096의 분해능을 가지게 된다. 따라서 90° 까지는 1024의 펄스를 가지며 1 펄스당 0.088° (1° 당 11.378 펄스)의 값을 갖는다.

그러나 $Vs-\theta_R$ 기준값 분포를 얻기 위해 1024개의 데이터를 모두 얻을 필요는 없다. 실제로 위치 추정을 위해 측정값을 입력받을 때 서치 코일의 기전력의 정밀도가 1° 이하를 구분할 정도로 정확하지는 않을 뿐만 아니라 회전자의 초기위치 판별을 위해서는 1° 의 분해능이면 충분하기 때문이다.

그러나 이렇게 분해능이 높은 엔코더를 사용함으로써 각 각도에 대한 보다 정확한 입력값을 얻을 수 있다.

그림 8은 회전자의 실제위치와 추정된 위치를 보여준다. 처음 88° 까지(기준값 획득 영역)는 오차가 전혀 없으며 전기각으로 0° 부근(기계각 0° , 90° , 180° , 270°)에서는 약간의 오차를 가지는 것을 볼 수 있다. 그러나 다른 부분에서는 1° , 2° 이내의 오차로 정확한 위치를 추정하고 있는 것을 알 수 있다.

오차가 나타나는 원인은 $Vs-\theta_R$ 기준값 분포를 얻는 부분에서 $1^\circ - 90^\circ$ 까지만 사용하였으며, 이때 실험용으로 제작된 TSRM의 특성이 전기적으로 같은 위치인 0° , 90° , 180° , 270° 에서의 동일한 특성을 내지 못하기 때문으로 여겨진다.

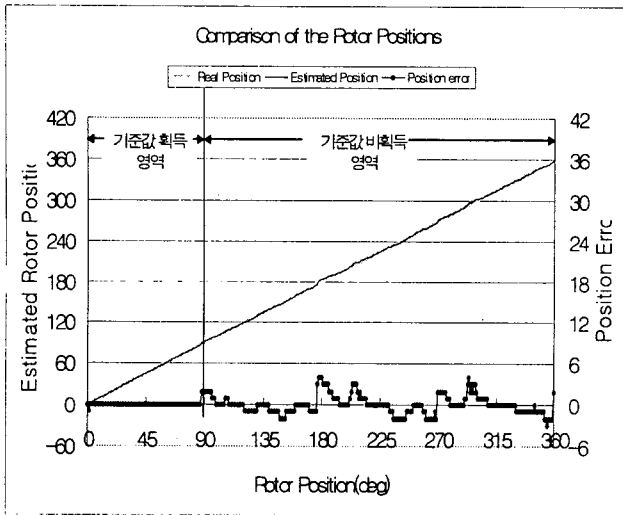


그림 8 추정된 회전자 위치와 실제 회전자 위치의 비교
 Fig. 8 The comparison of the estimated rotor position and the real rotor position

만약 고정자 및 회전자가 균일하고, 공극이 모든 돌극에서 일정하다면 이러한 오차는 나타나지 않을 것으로 예상된다. 또한 $V_s - \theta_R$ 기준값을 $0^\circ - 360^\circ$ 까지 모두를 취하면 오차는 나타나지 않는다. 하지만 회전자의 초기 위치 추정에 있어서 $1^\circ, 2^\circ$ 이내의 오차는 큰 문제가 되지 않기 때문에 위의 방법($0^\circ - 90^\circ$ 까지만 취하는 방법)도 적절할 것으로 본다.

8. 결 론

본 논문에서는 유클리디안 제곱거리(squared Euclidean distance)를 이용하여 서치코일이 내장된 SRM 회전자의 초기 위치를 추정하는 방법을 제안하였다. 엔코더, 포토 인터럽터, 홀센서, 레졸버 등의 기존의 위치센서 대신에 서치 코일을 센서로 사용하는 SRM은 저가, 강인성, 부피감소, 내 환경성, 사용 환경의 확대 등 많은 장점을 가진다. 반면, 회전자가 회전하고 있는 동안에만 위치검출이 되고 초기 정지상태에서는 불가능한 문제점이 있었다.

따라서 본 논문에서는 정지상태에서 서치코일의 유기 기전력과 위치관계를 규명하고, 유클리디안 제곱거리를 이용하여 위치를 추정하는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 실용 가능성을 보여주었고 실험을 통해 회전자의 실제 위치와 추정 위치를 비교함으로써 제안한 방법의 정확성과 유용성을 입증하였다.

제안된 방법을 SRM에 적용하면 회전자의 초기 위치를 임의의 상에 강제로 고정해야 하는 강제정렬방식의 문제점이 극복될 것이다. 뿐만 아니라, 회전자의 초기 위치를 보다 정밀하게 알 수 있으므로 정밀한 초기 기동이 가능하여 SRM의 성능향상이 예상된다.

본 연구는 한국과학재단 지정 전남대 고품질전기자부품 및 시스템 연구센터의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] 안진우, 스위치드 릴럭턴스 전동기, 오성미디어, 2001.
- [2] T.J.E. Miller "Switched Reluctance Motors and Their Control", Magna Physics Publishing and Clarendon Press. 1993.
- [3] THOMPSON, K. R., ACARNLEY, P. P., and FRENCH, C.: 'Rotor Position Estimation in a Switched Reluctance Drive Using Recursive Least Squares', IEEE Trans., IE-47, (2), pp. 368-379, 2000.
- [4] MESE, E., and TORREY, D. A. "An Approach for Sensorless Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using Artificial Neural Networks", IEEE Trans., PE-17,(1), pp. 66-75, 2002.
- [5] MESE, E., and TORREY, D. A. "Sensorless Position Estimation for Variable-Reluctance Machines using Artificial Neural Networks", Proceedings of IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting, IAS'97, pp. 540-547, 1997.
- [6] 양형열, 김종건, 임영철 "서치 코일을 이용한 토로이달 스위치드 릴럭턴스 모터의 회전자 위치 검출", 전력전자학회 논문지, Vol. 7, No. 6, pp. 537-545, 2002.
- [7] 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.
- [8] Gabriel Gallegos-Lopez, Philip C.Kjaer, 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.