

서치코일을 이용한 단상 스위치드 릴럭턴스 모터의 회전자 위치검출 및 구동

梁熒烈^{*}, 申德植[†], 任永徹^{**}, 金垸憲^{***}, 車得根^{***}

Rotor Position Detection and Drive of a Single Phase Switched Reluctance Motor Using a Search Coil

Hyong-Yeol Yang, Duck-Shick Shin, Young-Cheol Lim, Kwang-Heon Kim, and Deuk-Keun Cha

요 약

본 논문에서는 서치코일을 이용한 단상 스위치드 릴럭턴스 모터의 회전자 위치 검출법을 제안한다. 지금까지 단상 스위치드 릴럭턴스 전동기의 회전자 위치는 홀센서를 이용하거나 포토 인터럽터를 주로 사용하였다. 하지만 이러한 센서는 많은 단점을 가지고 있기 때문에 본 논문에서는 기존의 위치센서의 약점을 보완하기 위해 위치 검출 방법의 저 비용과 강인성에 초점을 두고, 단상 스위치드 릴럭턴스 모터의 돌극에 장착된 서치코일에 유기되는 전압 파형을 이용하여 위치 검출을 시도하였다. 회전자의 위치정보를 포함하고 있는 서치코일에서 유기되는 전압 파형을 이용해 회전자의 특정위치를 검출하고 적절한 타이밍에 주권선을 여자시킴으로써 단상 스위치드 릴럭턴스 모터를 구동할 수 있게 된다. 실험을 통하여 서치코일만을 이용하여 단상 SRM을 구동시킨 결과와 엔코더를 사용하여 구동시킨 결과와 비교함으로써 본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper presents a method of detecting rotor position for single phase Switched Reluctance Motors(SRMs) using a 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 have many disadvantages. 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 simulation and experimental results are presented to verify the performance of the proposed method in this paper.

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

1. 서 론

현재까지는 다상 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor: SRM)가 주로 연구되어 왔으며, 단상 SRM은 다소 연구가 활발하게 진행되지는 못하고 있다. 단상 SRM은 정렬된 위치에서는 자기동(self-starting)이 되지 않아 정지용 자석을 사용하거나 기동을 위해 특수한 형태의 회전자를 사용해야 하며, 전력밀도가 낮기 때문에 특별한 영역에서만 주로 사용이 되기 때문이다. 하지만 구조가 간단하고 강인

[†]교신저자 : 전남대 전기공학과 석사과정

E-mail : ejr1r1004@hanmail.net

^{*}정회원, 전남대 전기공학과 & RRC-HECS 공학박사

^{**}정회원, 전남대 전기공학과 교수

^{***}정회원, 동의대 전기공학과 교수

접수일자 : 2005. 7. 26

1차 심사 : 2005. 8. 25

심사완료 : 2005. 9. 13

하며 저가로 구성할 수 있기 때문에 저출력, 저성능 응용분야에는 매우 적합한 전동기라고 할 수 있다^[1].

다상 SRM과 마찬가지로 단상 SRM도 적절한 위치에서 스위치를 온, 오프 시켜야 하기 때문에 회전자의 위치정보를 얻기 위한 센서를 장착하게 된다. 이러한 회전자 위치 센서로는 주로 엔코더, 홀센서 또는 포토 인터럽터 등을 사용한다^{[2]-[3]}.

그러나 이러한 위치 센서들은 모터의 부피를 증가시키고 가격 상승의 원인이 되며, 고온이나 고압과 같은 환경에서 사용 시에는 전체 시스템의 신뢰도를 떨어뜨리게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 간접적으로 회전자의 위치를 검출하는 방법이 연구가 활발히 진행되고 있으며^{[4]-[6]} 서치코일을 이용한 3상 TSRM의 회전자 위치 검출에 관해 연구도 진행되고 있다^[7]. 그러나 단상 SRM에 관한 회전자 위치 추정에 관한 연구는 매우 적은 실정이다.

본 논문에서는 단상 SRM의 고정자의 돌극에 서치코일을 장착하여, 서치코일에서 발생하는 유기기전력으로부터 회전자의 특정한 위치를 검출하여 구동하는 방법을 제안한다.

실험에 앞서 전자기해석 프로그램인 Maxwell 2DTM를 사용하여 모든 시뮬레이션을 수행하였다. 회전자의 위치에 따른 서치코일의 유기전압 파형, 자속분포 등을 검토하였다. 그리고 제안한 위치검출 방법에 대한 가능성을 시뮬레이션을 통해 확인하고 실험을 통해서 제안한 방법의 우수성을 증명하였다.

2. 서치 코일의 장착

그림 1은 본 논문에서 사용된 단상 SRM과 서치 코일을 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 모터 사용 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 서치

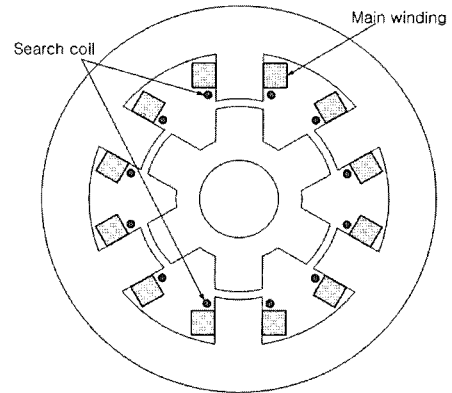


그림 1 단상 SRM과 장착된 서치코일
Fig. 1 Structure of the single phase SRM with search coil

코일을 모두 장착하여 직렬로 연결함으로써 공극 불균일로 인해 발생하는 서치코일 유기기전력의 변동을 제거하였다.

3. 서치 코일의 파형 분석

SRM의 회전자 위치에 따른 자속의 분포는 그림 2와 같다. 회전자가 고정자와 만나기 시작하는 부분(overlap starting point)부터 자속이 증가하며, 회전자와 고정자가 완전히 정렬될 때 최대값이 되며 그 이후부터 감소하기 시작함을 알 수 있다.

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

시뮬레이션에 의한 서치코일의 유기전압 파형은 그림 3과 같이 나타나게 된다.

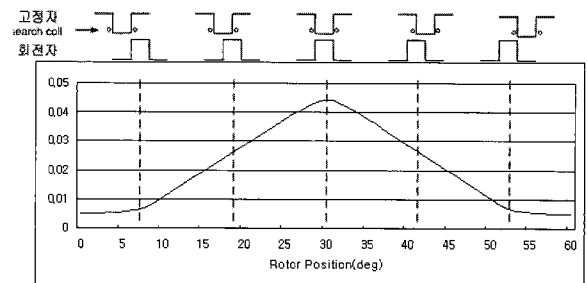


그림 2 회전자 위치에 따른 자속분포
Fig. 2 Fluxlinkage of the interior central pole search coils according to rotor position

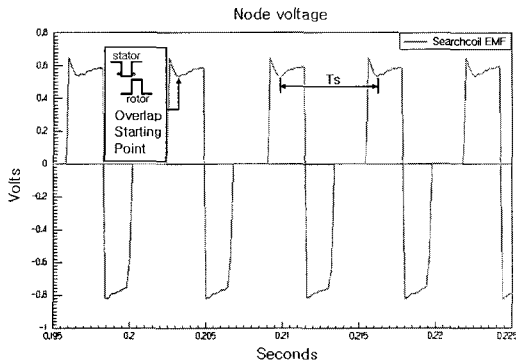


그림 3 서치코일의 시뮬레이션 파형
Fig. 3 Simulation waveform of search coils

주권선이 여자되어 있을 때 회전자가 돌극에 도달하면 서치코일에 쇄교하는 자속이 급격하게 증가하게 되고, 인덕턴스가 증가하므로 전류가 감소하게 된다. 그러므로 서치코일 유기전압이 변화하게 되고 이 변화를 관찰하여 회전자의 위치를 추정할 수 있다.

기전력은 식 (1)에 의해 나타난다. 식 (1)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.

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

- λ_s : 주권선의 전류에 의해 발생하는 서치코일 쇄교자속
- M_s : 주권선과 서치코일의 상호 인덕턴스
- i : 주권선의 전류
- ω : 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 (1)에서 변압기 기전력은 전류변화가 적어질 뿐만 아니라 아직 인덕턴스도 최저상태 이므로 낮은 값을 갖지만 속도기전력은 이 부분에서 큰 증가를 보인다.

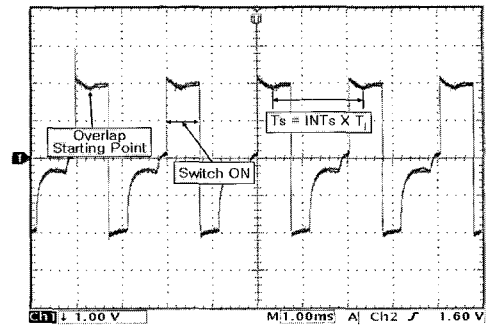


그림 4 서치코일 유기기전력
Fig. 4 Search coil EMFs

그러므로 이 부분에서 서치코일의 유기기전력은 급격한 변화를 보이고 이 부분을 검출할 수 있다.

4. 서치 코일 유기기전력의 검출

서치코일의 유기전압은 그림 3에서 보는 것과 같이 고정자와 회전자가 겹치기 시작할 때 급격하게 변화하게 된다. 이 유기전압이 AD변환기를 통해 제어기 (DSP)로 입력되어 오버랩 시작점을 검출하면 회전자의 위치를 추정할 수 있게 된다.

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

검출된 서치코일 유기기전력은 그림 4와 같이 나타난다. 서치 코일의 정(+)의 기전력이 나타나는 구간이 ON되는 구간을 나타내며, 이 구간에서만 회전자의 위치 정보를 담고 있다. T_s 는 이전 스위치 ON 구간에서의 오버랩 시작점과 현재 ON 구간에서의 오버랩 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.

$$\begin{aligned}
 \omega &= \frac{d\theta}{dt} \\
 &= \frac{60^\circ}{INT_s \times T_t \text{sec}} \times \frac{60[\text{sec}]}{1[\text{min}]} \times \frac{1[\text{revolution}]}{360^\circ}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

- INT_s : 60도 회전시 인터럽트 개수(샘플링 개수)
- T_t : 인터럽트(샘플링)주기

위 식에서 INT_s 는 60도 회전 구간동안 제어기의 인

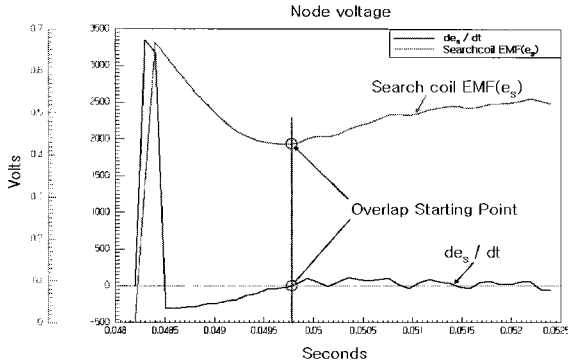


그림 5 서치코일 유기 기전력과 미분파형
Fig. 5 Search coil EMF and differential waveform

터럽트 개수이며 매 인터럽트마다 AD 샘플링을 한다. T_s 는 인터럽트 발생 주기를 의미하며 본 논문에서는 4us주기로 샘플링을 하였다.

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

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

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

다음 상에서 적절한 어드밴스 θ_{adv} 를 주고 스위치를 온 시키기 위해서는 식 (4)와 같이 n_{on} 만큼의 인터럽트 후에 스위치를 온 시키면 된다.

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

그림 5는 토크 발생구간 시작점을 검출하기 위한 방법으로 서치 코일의 기전력 파형과 그것의 미분파형이다. 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 잡음제거를 위해서 이동평균(Moving average)을 취하는 방법으로 필터링 된다.

5. 전체 시스템의 구성

실험장치는 그림 6과 같이 구성되어 있다.

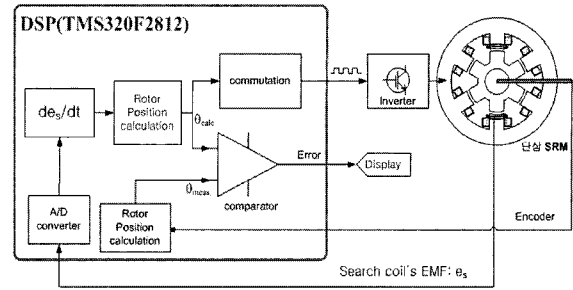


그림 6 전체 시스템 구성도
Fig. 6 System configuration of the experimental SRM drive

1) DSP(TMS320F2812)

DSP는 주 제어장치로서 입력단자로 디지털 입력, AD변환기를 가지고 있고 이를 통하여 서치코일, 엔코더, 전류 등의 입력을 받아들이며, 출력단자로 PWM 단자를 가지고 있어서 Inverter에 SRM구동을 위한 on, off 신호를 출력한다.

RS-232 port를 통하여 Host computer와 통신이 가능하다.

2) Inverter board

IGBT 드라이버인 IR2112를 통해 2개의 IGBT의 게이트에 on, off 신호를 동시에 인가하여 권선이 여자되도록 드라이브 된다.

3) 엔코더

기준이 되는 정확한 위치검출을 위해 1회전당 1024pulse의 분해능을 가지는 엔코더를 사용하였다. DSP에서 엔코더의 신호를 입력받아 4채배 하므로 실제로 처리되는 분해능은 1회전당 4096pulse가 된다.

4) 서치코일

0.3mm 직경을 가진 서치코일이 6개의 돌극에 각각 5턴씩 장착되어 있다.

5) SRM

6극의 단상 SRM으로 일정한 위치에 정지시킬 수 있도록 전자석을 이용한 회전자 위치 고정 장치가 부착되어 있다.

6. 실험결과 및 고찰

모터는 단상이므로 정지용 자석을 이용하여 항상 구동이 가능한 일정한 위치에 정지해 있으므로 곧바로 기동이 가능하다. 서치코일을 이용하여 구동시에도 정지상태에서 정상상태로의 가속구간 없이 바로 기동하고 있음을 그림 7(b)에서 볼 수 있다.

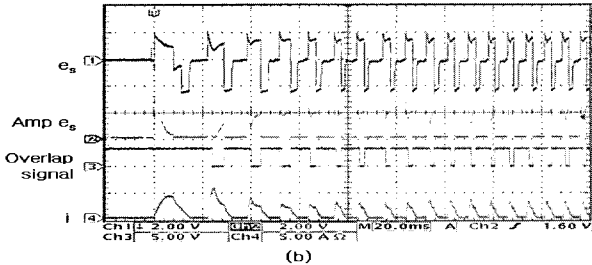
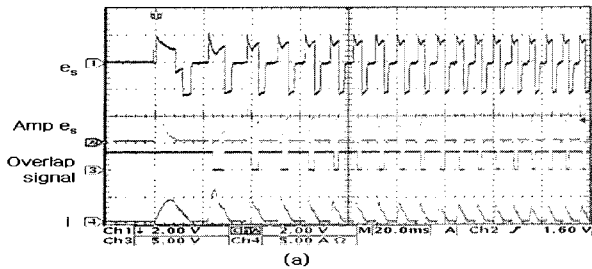


그림 7 초기 기동시 : 서치코일 유기기전력, 증폭된 서치코일 유기기전력, Overlap point 검출 신호, 상전류 파형 (a)엔코더를 이용한 구동 (b)서치코일을 이용한 구동

Fig. 7 Startup : search coil EMF, amplified search coil EMF, overlap point detection signal and winding current (a)Using Encoder (b)Using search coil EMF

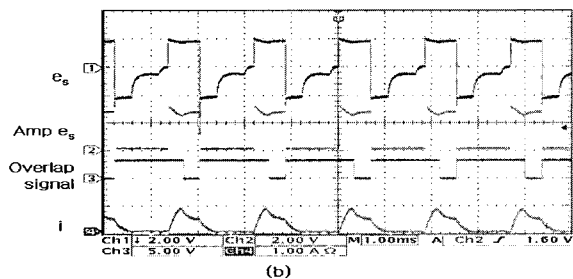
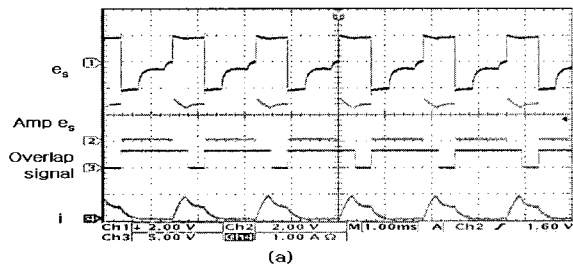


그림 8 정상상태 : 서치코일 유기기전력, 증폭된 서치코일 유기기전력, Overlap point 검출 신호, 상전류 파형 (a)엔코더를 이용한 구동 (b)서치코일을 이용한 구동

Fig. 8 Steady state : search coil EMF, amplified search coil EMF, overlap point detection signal and winding current (a)Using Encoder (b)Using search coil EMF

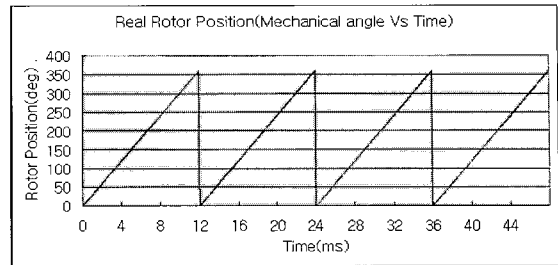


그림 9 엔코더에 의해 검출된 회전자 위치
Fig. 9 Measured rotor position with an encoder

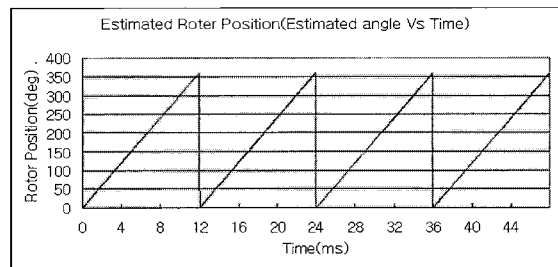


그림 10 제안된 방법으로 추정된 회전자 위치
Fig. 10 Estimated rotor position

그림 7과 8은 엔코더와 서치코일을 사용하여 기동시 및 정상상태에서의 서치코일 유기기전력, 보다 정확한 검출을 위해 증폭된 서치코일 유기기전력, 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 수 있고, 엔코더를 사용하지 않고 서치코일만을 이용하여 구동하여도 정상적으로 운전이 가능하다는 것을 보여준다.

그림 9와 10에서는 5000rpm으로 회전할 때 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.

7. 결론

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

실험에 앞서 전자기해석 프로그램인 Maxwell 2DTM로 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 2004년 전남대학교 Post-Doc. 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

[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] E. Mese, and D. A. Torrey. "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.
 [5] 안진우, 박성준, 김태형, "SRM의 센서리스 제어를 위한 인덕턴스 추론기법", *전력전자학회 논문지*, Vol. 8, No. 5, pp.427-434, 2003.
 [6] 천동진, 정도영, 이상호, 이봉섭, "간단한 위치검출기를 이용한 SRM 가변속 디지털 제어시스템 개발", *전력전자학회 논문지*, Vol. 6, No. 2, pp. 202-208, 2001.
 [7] 양형열, 김종건, 임영철, "서치코일을 이용한 토로이달 스위치드 릴럭턴스 모터의 회전자 위치 검출", *전력전자학회 논문지*, 제7권, 제6호, pp. 537-545. 2002.

저 자 소 개



양형열(梁煥烈)

1969년 5월 27일생. 1993년 전남대 전기공학과 졸업. 1993년~1994년 현대자동차(주) 근무. 1998년 동 대학원 졸업(석사). 2004년 전남대 전기공학과 졸업(공학). 현재 산업자원부 지정 전남대 고품질전기전자부품 및 시스템연구센터 연구원.



신덕식(申德植)

1979년 2월 26일생. 2004년 호남대 전기공학과 졸업. 2004년~현재 전남대 전기공학과 석사과정.



임영철(任永徹)

1953년 4월 23일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1997년 호주 모나시 대학 Visiting Scholar. 현재 전남대 전기공학과 교수. 산업자원부 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터 소장. 당 학회 부회장.



김광현(金堯憲)

1960년 12월 27일생. 1983년 전남대 제어계측공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 전남대 전기공학과 교수.



차득근(車得根)

1951년 7월 14일생. 1976년 영남대 전기공학과 졸업. 1982년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1989년 전기응용(전기기기) 기술사. 1999년 호주 New South Wales대학 Visiting Scholar. 현재 동의대 전기공학과 교수. 당 학회 산학협동이사.