

토로이달 스위치드 릴럭턴스 모터의 서치 코일을 이용한 초기 기동법

송진수, 김종건, 양형열, 임영철
전남대학교 전기공학과

Starting The Toroidal Switched Reluctance Motor Using Search Coils

Jin-Su Song, Jong-Gun Kim, Hyong-Yeol Yang, Young-Cheol Lim
RRC & Departure of Electrical Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT

스위치드 릴럭턴스 모터의 연구에서 센서리스 구동방법이나 이와 유사한 구동 방법은 스위치드 릴럭턴스 모터의 상품화 및 상용화에 있어서 소음 문제와 함께 반드시 해결해야 할 문제이다. 그러나 센서리스 구동 방법들은 초기 구동에 있어서 강제 정렬 방법을 사용한 것이 일반적인데, 이것은 모터의 사용에 있어서 제한성을 가져다 준다. 본 논문에서는 탐색 코일을 이용한 스위치드 릴럭턴스 모터의 구동법과 함께 강제 정렬의 방법을 사용하지 않고 초기 기동문제를 해결하는 방법을 제안하였다.

1. 서 론

SRM은 이중 돌극 구조이며 릴럭턴스 토크를 이용하는 모터로 고효율, 저비용, 시스템 제어성이 강하여 이에 대한 많은 연구가 활발히 진행중에 있다. 일반적으로 SRM의 제어를 수행하기 위해서는 레졸버, 엔코더 혹은 Hall 센서와 같은 회전자 위치 센서가 필요하며 잘 알려진 바와 같이 회전자 위치 센서는 비용을 증가시키며, 충격에 약하며, 압축기 등과 같은 고온 및 고압의 환경에서 신뢰성을 저하시킨다.^[1]

최근의 SRM관련 연구들은 센서리스 제어에 관심이 모아지고 있으며, 연구 방향 또한 하나의 큰 흐름을 보이고 있다. SRM이라는 모터의 장점 중 하나는 전동기구가 간단하다는 것이고 그것으로 인한 낮은 제작비와 재료비등은 모터제작에 엄청난 경제적인 장점을 가져다 준다. 따라서 고가의 위치 센서의 사용은 이런 경제적인 장점에 대치되는 문제이며, 위에서 언급한 사용환경의 문제점들은 센서리스 연구를 활발히 촉진시키고 있다.^[6] 그러나 간단한 구조에 비해서 회전자 위치에 따른 상인덕턴스의 변화가 정현파가 아니라는 점과 전류 대 토크

발생비가 전류와 회전자의 함수로서 폭넓은 범위에 걸쳐 변한다는 점 등등의 비선형적 특성 때문에 SRM의 센서리스 연구에 어려움을 주고 있다.^[7]

본 논문에서는 낮은 제작비 및 보수율 등의 경제적인 가치와 사용 환경이나 회전속도 제한의 영향을 받지 않는 효율적인 가치를 가지며 위치 센서의 기능과 역할을 수행하는 특징을 갖는 서치 코일을 이용해 토로이달 SRM(TSRM: Toroidal Switched Reluctance Motor)의 구동과 초기 기동법을 제안하고자 한다.

2. 본 론

2.1 Toroidal SRM과 서치 코일

그림 1은 본 논문에서 사용된 6/4 토로이달 SRM과 서치 코일을 나타내었다. 이 TSRM은 고정자의 요크 부분에 권선이 감긴 형태로 3상중 2개 상이 동시에 여자되는 것이 특징이다. 일반 6/4 SRM의 경우 한 상의 여자 구간은 30°이나 토로이달 SRM의 경우는 한 상당 여자구간이 60°이며 30°씩 겹쳐서 여자된다. 따라서 각 상의 여자구간은 일반 SRM의 두 배가 된다. 회전자의 위치를 검출하기 위한 서치 코일은 각각의 고정자 돌극에 지름이 0.15[mm]인 코일을 20turns씩 감았다. 토로이달 SRM은 특성상 두상이 여자되어 로터를 회전시키며, 두상에서 각각 만들어내는 자속의 합에 의해 릴럭턴스 토크를 만들어 낸다. 두상이 만들어내는 자속의 합이 고정자의 돌극 방향으로 자로를 형성하며, 이 자속의 변화가 서치 코일에 영향을 미쳐 서치 코일에는 기전력이 유기된다. 그림 1에서 A상과 B상 사이의 돌극에 감긴 서치 코일을 AB상 서치 코일이라 명명하였으며, BC상 서치 코일, CA상 서치 코일도 이와 같은 원리로 명명하였다.

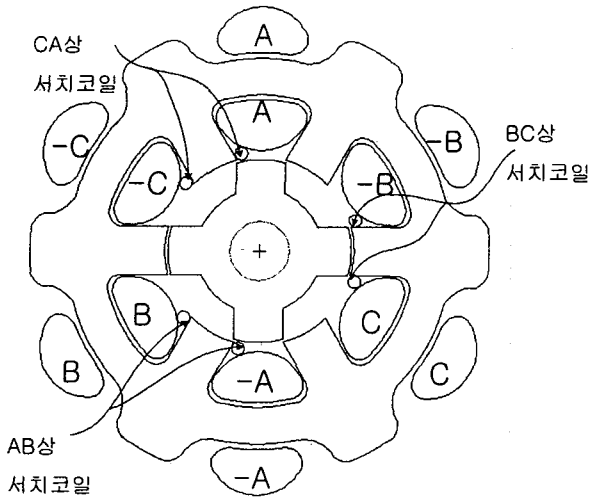


그림 1 Toroidal SRM과 서치 코일

2.2 서치 코일의 파형 분석

엔코더를 이용하여 모터를 회전시키는 경우에 고정자의 돌극에서 자속 변화는 서치 코일에 기전력을 유기시킨다. 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. 서치 코일의 전압 파형으로부터 위치 정보의 포함 유무를 알기 위하여 드웰각 20°, 선행 각도 10°의 조건에서 시뮬레이션을 실행한 결과의 파형은 그림 2와 같으며, 파형을 분석한 결과 고정자 돌극과 회전자 돌극이 겹치기 시작하는 지점, 즉 토크 발생 시작점의 위치에 대한 정보를 담고 있음을 확인할 수 있었다.

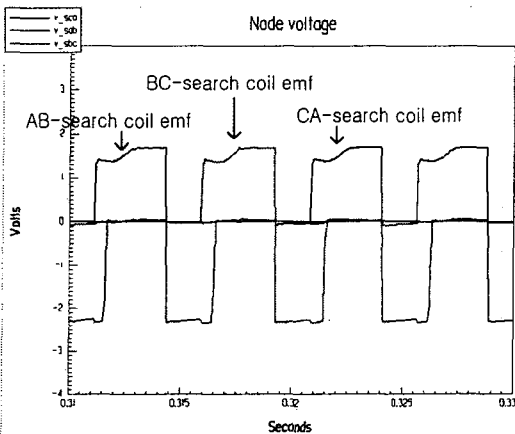


그림 2 서치 코일의 시뮬레이션 파형

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. 서치 코일에 유기되는 전압은 시변 자계에서 이동회로에 대한 패러데이 법칙의 일반형과 매우 유사하다고 볼 수 있다. 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 그림 3에서처럼 변압기 기전력과 속도 기전력의 합으로 나타난다. 따라서 서치코일의 기전력은 변압기의 원리와 발전기의 원리에 의해 유기됨을 알 수 있다.

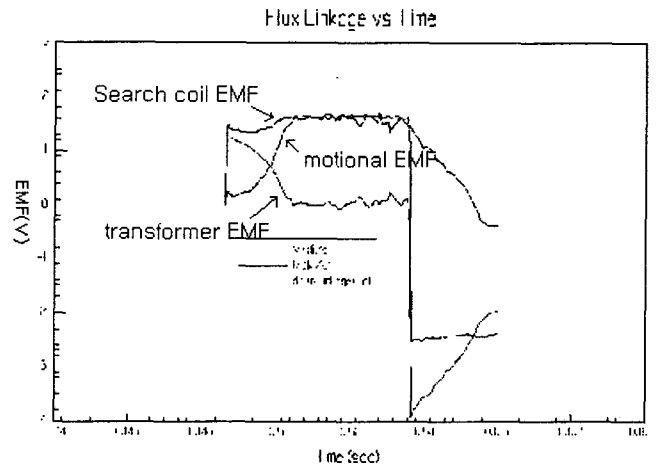


그림 3 서치 코일 파형의 성분 분석

그림 3은 TSRM을 엔코더를 이용하여 구동하는 경우 서치 코일의 기전력의 성분을 분석한 시뮬레이션 파형이다. 서치 코일의 기전력 성분에서 속도 기전력 성분은 상호 인덕턴스의 변화에 의해서 생긴다. 이러한 상호 인덕턴스는 상권선의 자기 인덕턴스와 서치 코일의 자기 인덕턴스에 의해 형성되며, 상호 인덕턴스는 상권선의 자기 인덕턴스와 종속적 관계를 가진다. 그러므로 상호 인덕턴스 프로파일은 상권선의 자기 인덕턴스 프로파일의 회전자의 위치정보를 포함한 것과 같이 회전자의 위치 정보를 포함한다. 이것은 서치 코일의 기전력 성분에서 속도 기전력 성분으로 나타나며, 속도 기전력 성분이 일정하게 유지되기 시작되는 부분은 토크 발생 시작점이다.

그림 4는 A상 전류 파형과 B상 전류 파형 그리

고 AB상 서치 코일의 기전력 파형을 나타낸다. A상과 B상이 동시에 여자되고 있는 구간에서 서치 코일은 정(+)의 기전력이 발생되며, 그 파형의 형태는 그림 3의 시뮬레이션 파형과 같음을 알 수 있다.

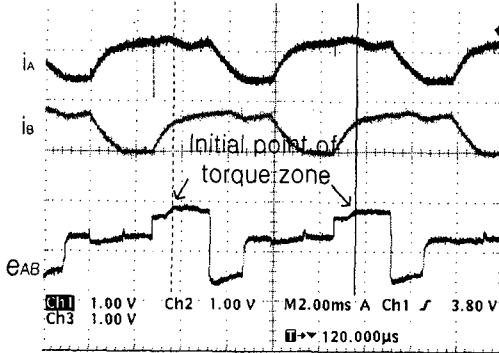


그림 4 A상, B상 전류와 AB 서치 코일

2.3 서치 코일을 이용한 구동법

토로이달 SRM의 회전자 위치 검출 방법은 서치 코일에서 회전자의 돌극과 고정자의 돌극이 겹치기 시작하는 점의 위치를 알고 현재의 속도를 측정함으로써 ON, OFF 시점을 결정하는 것이다. 그림 5는 서치 코일을 이용한 위치 검출로 TSRM을 구동시키는 방법을 나타낸다.

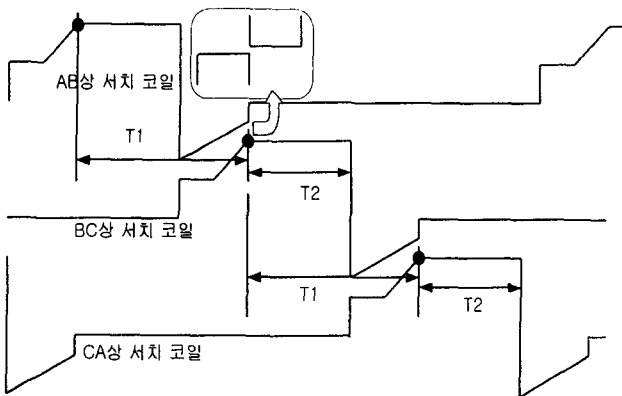


그림 5 서치 코일을 이용한 제어 원리

일정한 어드밴스 각도를 가지고 회전자가 회전할 때 각 서치 코일에서 검출되는 전압 파형은 그림 5의 형태와 같다. 어드밴스 각도가 없는 경우에는 전압 파형이 평평하기 때문에 검출하지 못한다. 그리고 서치 코일의 정(+)의 유기 전압이 나타나는 구간이 ON되는 구간을 나타내며, 이 구간에서만 회전자의 위치 정보를 담고 있다. 다른 구간들의 파형 형태는 회전자의 위치와 관계없이 상전류의 영향이 그대로 반영되어 나타난다.

그림 5에서 T1은 이전 상에서의 토크 발생 시작점과 현재 ON되고 있는 상의 토크 발생 시작점을 시간으로

나타낸 값이다. 6/4 SRM의 경우 위치적으로 30°를 나타내고, 30°를 T1으로 나눈 값은 현재의 속도를 가리킨다. T1은 위치예를 들어 α 가 2/3의 값을 가지면 토크 발생구간은 20°가 되고 10°의 어드밴스 각도를 갖게 된다. 또한 α 가 1/2의 값이면 토크 발생구간은 15°가 되고 15°의 어드밴스 각도를 갖게 된다. 적으로 30°를 나타내므로 현재의 속도를 알고(T1의 시간을 알고 있고) 토크 발생구간 시작점을 검출하면 T2의 시간 후 커뮤테이션을 한다.

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

식 (4)는 전체 토크 발생 구간에서 스위치 ON 구간의 시간을 결정하는 식이다. α 는 전체 정토크 발생 구간에서 실제 여자되고 있는 정토크 구간의 비율을 의미한다. 따라서 전체 정토크 구간에서 소호 구간은 다음 상의 선행각도를 제공한다. 예를 들어 α 가 2/3의 값이면 T1이 30°를 시간으로 나타내는 값이므로, 토크 발생구간을 시간으로 표시된 T1값은 20°구간의 시간을 의미하며 다음 여자상에 10°의 선행각도를 갖게 한다. α 가 1/2의 값이면 토크 발생구간은 15°가 되고 15°의 선행각도를 갖게 한다. 이러한 서치 코일을 이용한 구동법은 역방향 운전에서도 그대로 적용된다.

2.4 초기 기동법

정지 상태의 SRM이나 TSRM을 기동(starting)하기 위해서 초기 회전자의 위치를 반드시 알아야 한다. 초기 회전자의 위치를 알 수 없는 센서리스 구동 방법의 경우 강제 정렬법을 이용해 회전자를 원하는 위치에 놓고 초기 기동(Starting the SRM)을 시키는 경우가 있다. 이런 강제 정렬의 방법은 정밀제어를 해야 하는 곳이나 부하에 무리를 주어서는 안되는 곳에서는 적당하지 못하다. 본 논문에서 제안한 서치 코일을 이용한 TSRM의 구동에서 초기 기동의 위치 검출법은 다음과 같다.

PWM으로 인가전압을 작게 초핑한 다음, 3개 상을 연속적으로 전류의 확립이 이루어지지 못하는 시간 간격으로 매우 빠르게 스위칭하면서 단일 펄스 전압을 인가하면 모터는 계속 정지해 있고 전류는 미세하게 인가되어 서치 코일에서는 상호 인덕턴스의 크기 즉 고정자 돌극과 회전자돌극이 겹쳐 있는 정도에 따라 3개의 서치 코일에 기전력이 유기되며, 그 크기가 각각 결정된다. TSRM이 3상인 경우 최고값을 먼저 선정하고 나머지 두개 값을 비교하는 방법으로 서치 코일에 유기되는 전압 크기의 순위와 크기 비율을 알면 최초에 여자시킬 상을 결정할 수 있다.

이때 모터가 정지 상태에 있으므로 서치 코일의 기전력은 식 (5)와 같이 변압기 기전력만 유지된다.

$$e = -M \frac{di_p}{dt} \quad (5)$$

그림 6은 TSRM 정지 상태에서 연속적으로 단일 펄스 전압을 인가시 AB상 서치 코일, BC상 서치 코일, CA상 서치 코일에 유기되는 기전력의 파형을 나타낸다. 그림 6에서는 서치 코일의 기전력 크기가 AB>BC>CA를 나타내므로 최초 여자 상들은 BC상으로 결정되며 처음에 ON을 시켜 초기 기동을 시킨다.

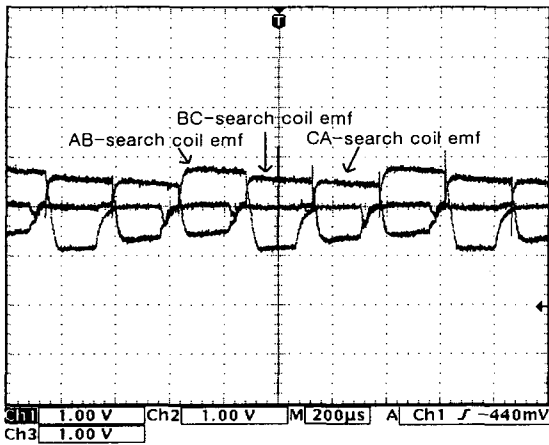


그림 6 초기 기동을 위한 서치 코일 기전력 크기 비교 파형

초기 기동을 위한 최초 여자 상들은 위에서 제시한 방법으로 찾아낼 수 있으며, 어느 시점에서 오프를 할 것 인가의 문제점은 여전히 안고 있다. 이것은 서치 코일의 기전력의 크기를 A/D 컨버전을 통하여 그 크기를 알고 있으므로 회전자의 돌극이 고정자의 돌극에 완전히 겹치기 3° 이전의 기전력 크기의 값을 특정값으로 지정하여 A/D 컨버전한 기전력의 값의 크기가 이 값에 도달하면 오프 시키는 방법을 사용한다. 여기서 3°는 초기 구동법 이후 정상 상태의 구동법으로 변경하여 구동하기 위해 필요한 최소한의 선행각도를 제공함과 동시에 최초의 여자 상들에 의해 만들어지는 릴럭턴스 토크로 회전자를 회전시키기 위함이다. 그림 7은 회전자가 반시계 방향으로 회전시 C상과 A상(이후 CA상이라 함)의 사이의 돌극을 기준으로 3°의 선행각도를 보이고 있으며, CA상을 여자시키기 위한 회전자의 최소의 임계위치이다. CA상을 기준으로 회전자의 4개 돌극 중에 1개가 그림 7과 8사이에 위치할 때 최초의 여자상은 CA상으로 결정되며, 결정된 상들을 여자시키면 회전자는 회전하기 시작하고 서치 코일 기전력의 값은 서서히 증가한다. 서치 코일의 기전력의 크기가 특정값에 이르면 회전자는 그림 8과 같이 위치하고 이 지점에서 여자 상을 오프시킨다.

이것은 BC상, CA상에도 똑같이 적용된다. 회전자의 최소의 임계위치와 특정값 사이의 각도는 30°를 나타내며 선형적으로 값이 증가함을 알 수 있었다.

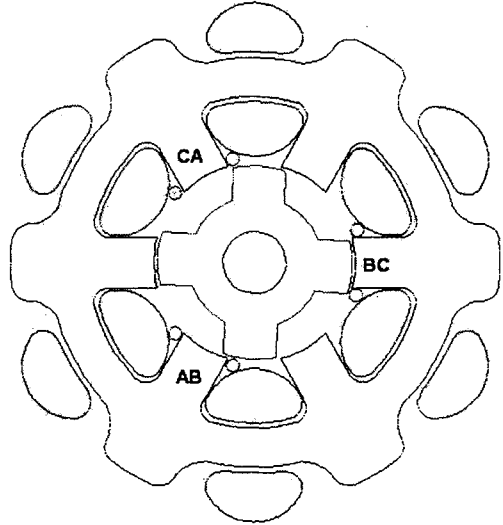


그림 7 초기 구동시 CA상을 여자하기 위한 회전자의 최소의 임계위치

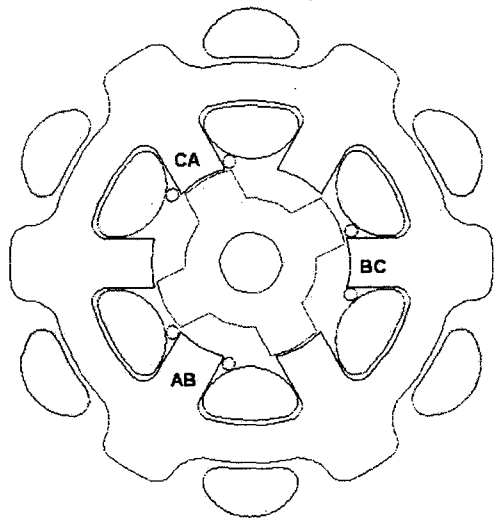


그림 8 초기 구동시 CA상을 오프시키기 위한 회전자의 위치

따라서 서치 코일의 기전력을 A/D 컨버전한 값들은 회전자의 위치에 대한 정보와 밀접한 관계를 갖는다. 그림 7, 8은 CA상을 여자시키기 위한 회전자의 최소의 임계 위치와 오프시키기 위한 위치를 보여주고 있으며, 그림 8에서처럼 A/D의 값이 특정값에 이르면 위치적으로 회전자의 돌극과 고정자의 돌극이 완전 정렬되는 지점의 3° 이전 위치에 이르게되고, CA상은 오프되고 AB상이 여자된다.

제안한 초기 구동방법은 최대 120°를 회전하고 정상상태의 구동법으로 변경되어 구동하게 된다. 또한 특정값

을 절대값으로 지정하지 않고 다른 두 개의 기전력의 크기값과 비교한 상대적인 값으로 결정하면, 부하 변동의 경우에도 이 방법은 적용 가능하다.

2.5 실험결과 및 고찰

본 논문에서는 TSRM이나 SRM의 고정자 돌극에 서치 코일을 감아서 그 파형으로 특정 위치를 찾아내어 구동하는 방법을 제시하였으며, 초기 기동의 문제 해결에 초점을 맞추었다. 여러 센서리스 방법들은 초기 기동의 문제를 강제정렬과 오프루프 가속으로 그 문제를 해결하였으나 이런 방법들은 앞서 설명한 것처럼 모터의 사용에 제한을 가져다 줄 뿐만 아니라 그 정밀성을 저하시키는 요인이 된다. 제안한 방법은 강제 정렬을 하지 않을 뿐만 아니라 오프루프 가속없이 A/D의 값과 그 크기의 비교로 최초의 여자 상을 결정하고 특정 A/D의 값에 이르게 되면 오프하는 방식으로 과도 상태에서 기동문제를 해결하였다. 이 방법은 엔코더를 이용한 초기 기동 특성과 비교하여 응답특성이 거의 차이가 없음을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 SRM의 경제적 장점을 최대한 이용하고 초기의 위치적 센싱의 방법에서 나타나는 문제를 해결하기 위해 서치 코일을 이용한 그 초기 기동법을 제안하였다. 엔코더와 같은 위치 검출 센서를 사용하지 않고도 각 상의 돌극에 감긴 서치 코일의 기전력의 절대 크기값과 상대적 크기값 등을 이용하여 최초 여자상의 결정 및 오프 시점의 결정으로 초기 기동의 문제를 해결하였다. 이렇게 서치 코일을 이용한 초기 기동법과 위치 검출 방법은 강제 정렬법을 사용하는 센서리스 방법보다 그 정밀도 면에서 우수하고 모터의 사용범위를 넓혀준다. 본 논문에서 제시한 방법은 기존 위치 센서를 사용한 모터보다 훨씬 저가의 모터 생산을 가능하게 하고, 충격에 강하며, 수리를 필요로 하지 않을 뿐만 아니라 고온 고압의 환경에서 구동을 가능하게 하고 위치 검출 센서가 차지하는 부피만큼 모터의 크기를 줄일 수 있다는 장점을 가진다.

본 연구는 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

[1] B.K. Bose, T.J.E. Miller, P.M. Szezesnyand and W.H.Bocknell. "Microcomputer Control of Switched

Reluctance Motor", IEEE Tr-IA, vol. 22, no. 4, pp. 708-715, 1986.
 [2] Ki-Bong Kim "Field Analysis of Low Acoustic Noise Switched Reluctance Motor", IEEE Transactions on Magnetics. Vol.33, No.2, pp. 2026-2029, March 1997.
 [3] B.W. Williams. "Power Electronics Devices Drivers and Applications", John Wiley & Sons, New York, 1987
 [4] T.J.E. Miller "Switched Reluctance Motors and Their Control". Clarendon Press. 1993.
 [5] P.J. Lawrenson. "Switched Reluctance Motors Drives". Electronics & Power, pp. 144-147, Feb. 1983.
 [6] E. Mese, D. A. Torrey. "Sensorless Position Estimation for Variable-Reluctance Machines using Artificial Neural Networks", IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting, pp. 540-547, 1997.
 [7] S.S. Murthy, B. Sing, V.K. Sharma, "A Frequency Response Method to Estimate Inductance Profile of Switched Reluctance Motor", International Conference on Power Electronics and Drives Systems Proceedings, pp. 181-187, 1997.
 [8] Jae-Dong Choi, "Sensorless speed control of Switched Reluctance Motor using Intelligent Control Algorithm", February 2000.
 [9] 안진우, 스위치드 릴럭턴스 전동기, 오성미디어, 2001.1