

서치 코일을 이용한 토로이달 스위치드 릴럭턴스 모터의 위치 검출

김종건, 양형열, 임영철
전남대학교 전기공학과

Position Detection of Toroidal Switched Reluctance Motor Using Search Coils

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

ABSTRACT

본 논문에서는 저비용과 강인한 제어성에 관심을 갖고 토로이달 SRM을 기존의 위치 센서가 아닌 서치 코일을 이용해 인가 전압과 전류에 의한 쇄교 자속에 의해 유기되는 전압 파형을 이용하여 위치 검출을 시도하였다. 서치 코일에서 유기되는 전압 파형을 이용해 특정지점을 검출하여 토로이달 6/4 SRM을 구동시켜 그 타당성을 검증하였다.

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 회전자 위치 검출법을 제안하고자 한다.

1. 서 론

SRM은 이중 돌극 구조로 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 보수를

2. 본 론

2.1 전체 시스템 구성

전체시스템의 구성은 그림1과 같고 크게 PC, C167CR 마이크로 컨트롤러를 포함하는 주 제어 보드 부분, 범용 Full 브릿지 인버터를 모듈화한 IPM, 위치 정보를 획득하기 위한 애플루트 타입의 엔코더, 전류의 역류를 방지하기 위한 다이오드, 전기적 절연을 위한 포토 커플러 그리고 서치 코일을 내장한 토로이달 모터로 구성되어있다. 엔코더로 구동하는 경우에는 엔코더의 8비트의 신호를 이용해서 회전자의 위치를 검출하고, 서치 코일로 구동하는 경우에는 유기되는 전압 파형을 A/D로 입력 받아서 원하는 점을 검출한다. 서치 코일에서의 유기 전압 파형은 주 제어 보드에서 제어 할 수 있도록 증폭기로 OFFSET을 조정하도록 하였다. 또한 전류값 측정을 위한 전류 센서, 속도 디스플레이를 위한 LCD를 추가로 구성하였다.

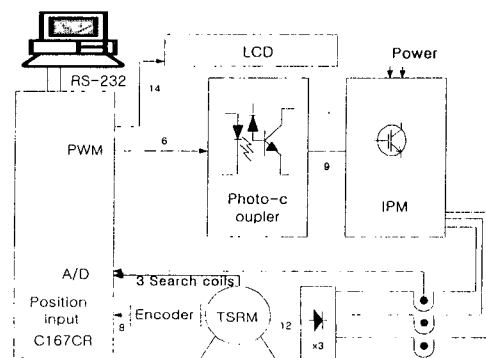


그림 1 전체 시스템 구성도

2.2 Toroidal SRM과 서치 코일

그림 2는 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 그림 3에서 보듯이 토로이달 SRM의 경우는 60° 이며 30° 씩 겹쳐서 여자된다. 따라서 각 상의 여자구간은 일반 SRM의 두 배가 된다. 회전자의 위치를 검출하기 위한 서치 코일은 고정자의 돌극에 각각 20turns씩 감았다. 토로이달 SRM을 구동하기 위해서 범용적으로 사용되고 있는 풀브릿지 형태의 인버터가 사용되었다. 또한 토로이달 SRM의 각 상은 델타결선으로 되어있으며 각 상에 전류를 단방향으로 흐르게 하기 위한 다이오드가 부착되어있다.

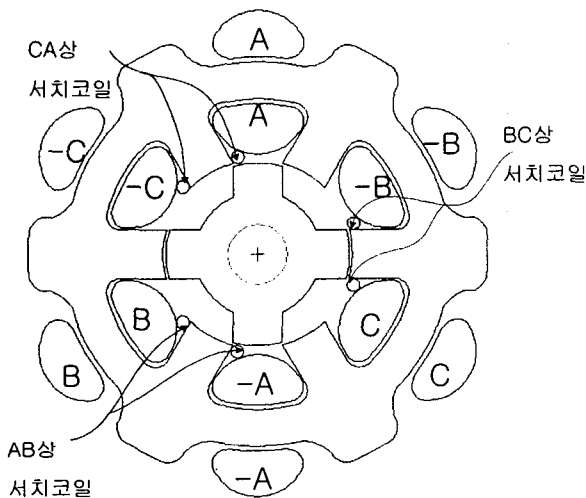


그림 2 Toroidal SRM과 서치 코일

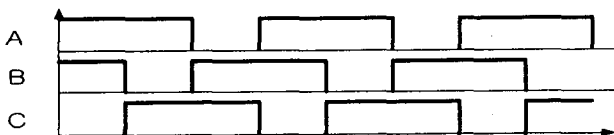


그림 3 3상 TSRM 스위칭 타임차트

2.3 서치 코일 파형 분석

그림 4는 토로이달 SRM의 엔코더를 이용한 구동시 2000rpm에서의 각 상의 전류 파형을 나타낸다. 6/4 토로이달 SRM의 경우 90° 를 주기로 한다. 그림 4, 5, 6은 엔코더를 사용하여 토로이달 SRM 구동시 서치 코일에 유기되는 전압 파형과 상전류 파형이다. 검출된 서치 코일의 파형은 A/D 입력을 위하여 2.5V의 OFFSET이 주어진 파형이며, 해당 상의 ON구간에서 정(+)의 전압이 발생하고 OFF와 동시에 역전압이 걸리어 부(-)의 전압이 발생하고 잠시 후 다시 유기전압이 소멸되는 것을

알 수 있다. 즉 각 슬롯에 감겨있는 서치 코일에 유기되는 전압 파형에서 각 상의 ON시점과 OFF시점을 알아낼 수 있는 것이다.

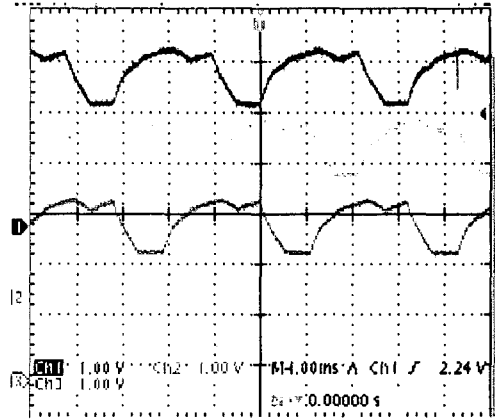


그림 4 엔코더를 이용한 구동시 3상 전류 파형

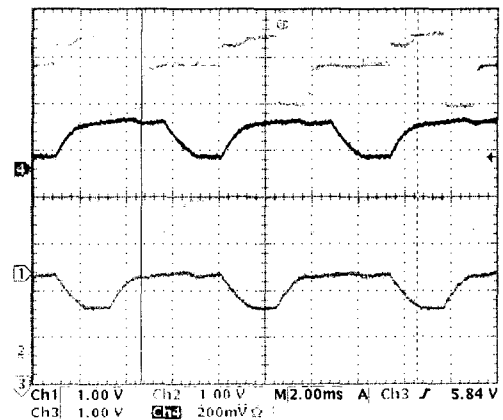


그림 5 BC상 서치 코일과 3상 전류 파형

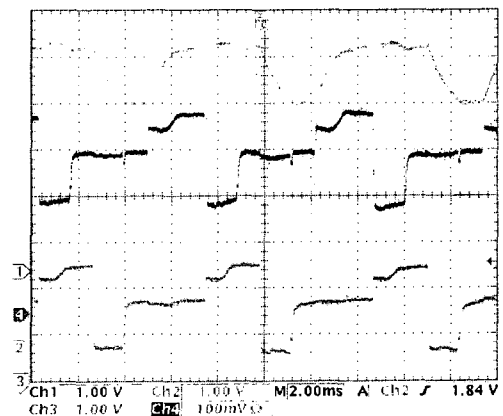


그림 6 C상 전류와 서치 코일 파형

그림 5, 6은 엔코더를 이용하여 TSRM 구동시 전류파형과 서치 코일의 유기 전압 파형을 비교 분석하였다. 위에서 설명했듯이 TSRM의 경우 상전류가 60° 의 ON구간을 가진다. 그러나 6/4 SRM의 경우 ON구간은 최대 30° 로 위

의 경우 30° 간격으로 Commutation했다. 그림 5(밑에서부터 A, B, C상, BC상 서치 코일)에서 서치 코일의 유기 전압은 B상과 C상에 의한 쇠교자속에 의해 발생하는 전압이며, 정(+)의 전압 발생 구간은 C상의 전류의 영향을 받고 있으며, 부(-)의 전압 발생 구간은 스위칭 오프되어 소호되고 있는 B상의 전류의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

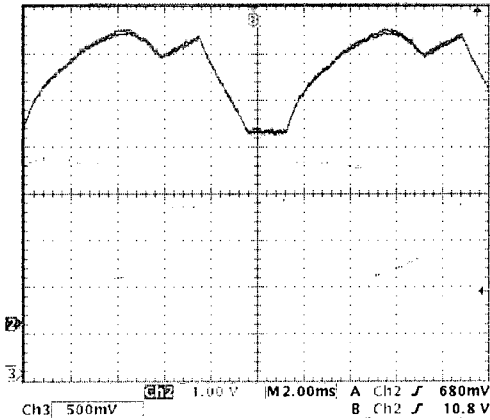


그림 7 Advance 0°

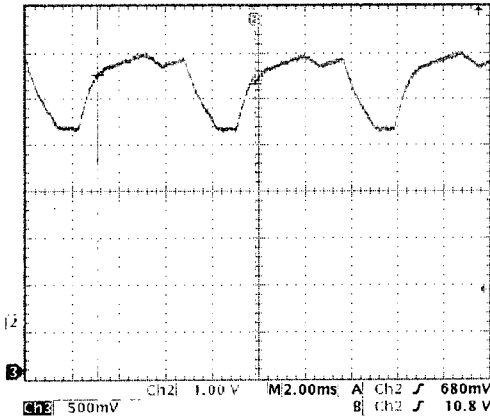


그림 8 Advance 10°

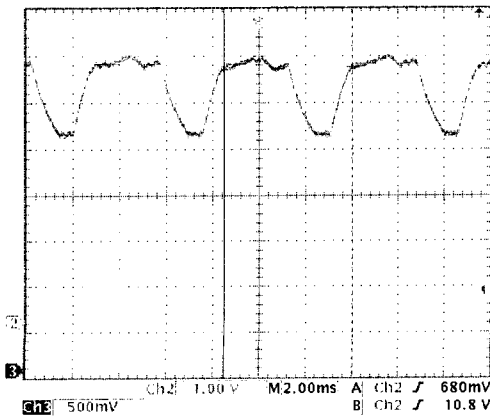


그림 9 Advance 15°

그림 7, 8, 9는 각각 어드밴스 각도를 다르게 하였을 때 상전류 파형과 서치 코일의 유기 전압을 분석한 파형으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 전류 확립구간이 없는 어드밴스 0° 에서의 상전류와 10° , 15° 의 전류 확립구간을 가진 상전류를 비교해 보면 확립구간이 없는 것의 상전류 형태와 확립구간이 있는 상전류의 형태는 토크 발생구간에서 현저한 차이를 보여주고 있다. 토크 발생구간이 시작되는 점에서 어드밴스 각도 증가에 따라 상전류의 증가분은 급격히 감소한다. 이것은 서치 코일의 유기 전압에서도 그대로 반영된다. 토크 발생구간이 시작되는 점 즉 고정자의 돌극과 회전자의 돌극이 겹치기 시작하는 지점의 위치는 서치 코일의 유기 전압이 증가하다가 일정하게 되는 부분과 일치하는 것을 알 수 있다.

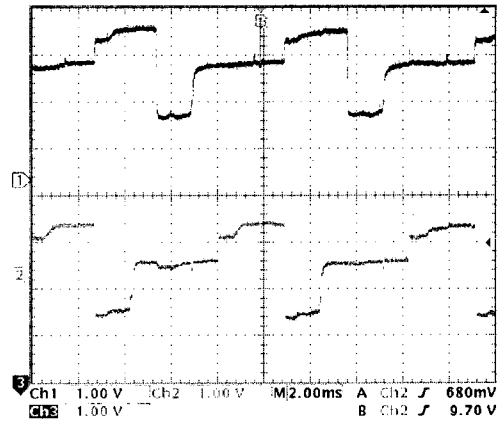


그림 10 인가전압 30V, Advance 10°

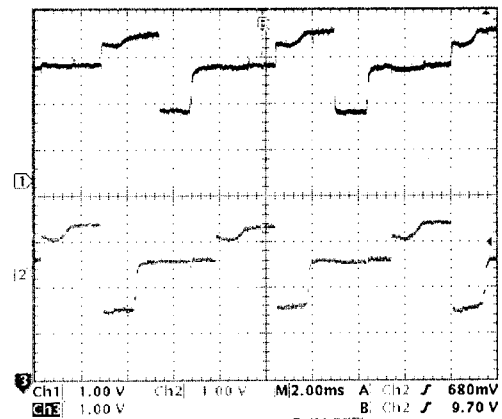


그림 11 인가전압 30V, Advance 15°

그림 10, 11은 엔코더를 이용하여 모터 구동시 인가전압 30V에서 측정된 무부하에서의 서치 코일의 전압 파형으로, 어드밴스 각도의 차이에 따라 서치 코일의 유기 전압 파형에서 토크 발생구간이 시작되는 지점을 나타낸 유기 전압의 파형이다. 6/4 토로이달 SRM을 정상 상태에서 구동시 10° 의 어드밴스에서는 전류 확립구간과 토크 발생구간이 시간적으로 1대 2의 비율을 보였고, 15° 의 어드밴스에서는 1대 1의 비율을 보였다.

2.4 서치 코일을 이용한 위치 검출

본 논문에서 제안하는 토로이달 SRM의 회전자 위치 검출 방법은 서치 코일에서 회전자의 돌극이 고정자의 돌극과 겹치기 시작하는 점의 위치를 알고 현재의 속도를 측정함으로써 ON, OFF 시점을 결정하는 것이다. 그림 12는 AB상의 서치 코일을 나타낸다. 토로이달 SRM은 특성상 두상이 여자되어 로터를 회전시키며 A상과 B상 사이의 서치 코일을 AB상 서치 코일이라 명명했다. 그림 13은 서치 코일을 이용한 위치 검출로 TSRM을 구동시키는 방법을 나타낸다.

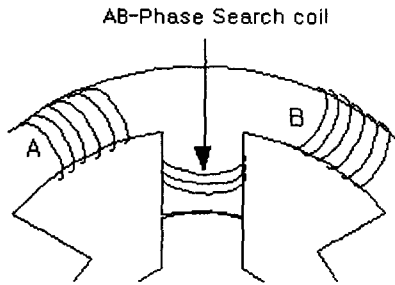


그림 12 AB상의 서치 코일

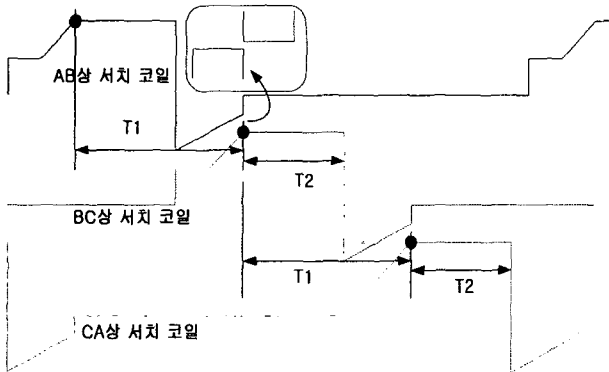


그림 13 서치 코일을 이용한 제어 원리

일정한 어드밴스 각도를 가지고 회전자가 회전할 때 각 서치 코일에서 검출되는 전압 파형은 그림 13의 형태와 같다. 어드밴스 각도가 없는 경우에는 위의 파형처럼 나타나지 않는다. 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.

위 13 그림에서 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 위치적으로 30°를 나타내므로 현재의 속도를 알고(T1의 시간을 알고 있고) 토크 발생구간 시작점을 검출하면 $T2 = \alpha T1$ 의 시간에서 Commutation을 한다. 예를 들어 α 가 2/3의 값이면 토크 발생구간은 20°가 되고 10°의 어드밴스 각도를 갖게 된다.

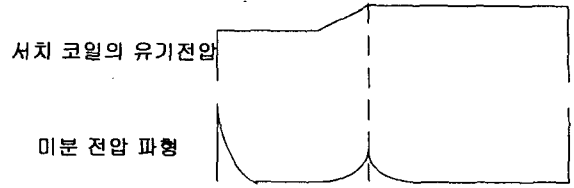


그림 14 서치 코일의 유기 전압 파형과 미분 파형

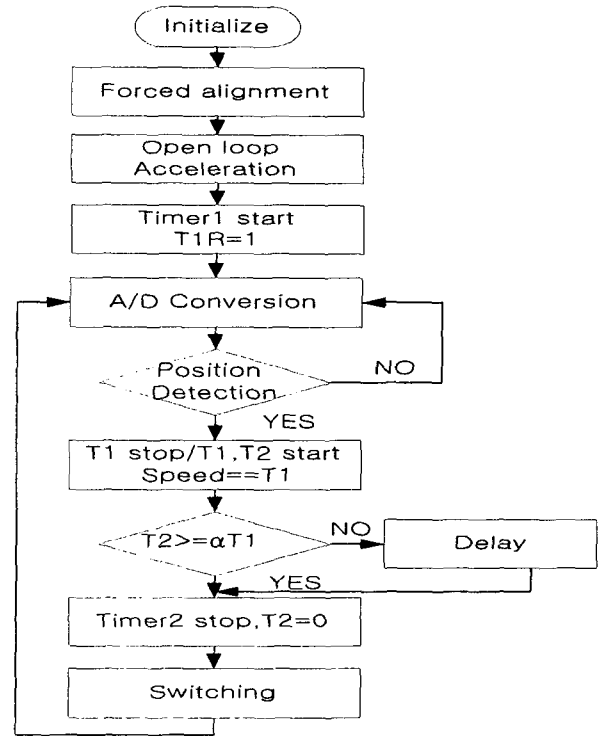


그림 15 제어 알고리즘 플로차트

그림 14는 토크 발생구간 시작점을 검출하기 위한 방법으로 서치 코일의 유기 전압 파형을 미분하였다. 미분 파형에서 알 수 있듯이 피크를 나타내는 부분이 처음 ON되는 시점과 토크 발생구간 시작점, 이 두 점이 나타나는데 두 번째 피크점을 소프트웨어 방법으로 검출하였다. 그림 15는 위치를 검출하여 TSRM을 구동시키는 프로그램으로 크게 강제정렬, 오픈 루프 가속, A/D 컨버전, 타이머 값 비교, 스위칭으로 이루어져있다.

2.5 실험결과 및 고찰

그림 16은 실제 실험에 사용된 TSRM과 주변장치를 보여준다. 실험은 Advance 10°에서 이루어졌으며, $T2 = \alpha T1$ 에서 α 의 값은 2/3이다. 결과 비교는 2000rpm에서 엔코더에 의한 TSRM의 상전류 파형과 서치 코일의 유기 전압 파형, 서치 코일에 의한 위치 검출법으로 상전류 파형과 서치 코일의 유기 전압 파형을 분석하였다. 본 논문에서 제안하는 방법은 서치 코일이 위치 센서와 같은 기능을 부여하는 것으로 실제 위치 센서와 같

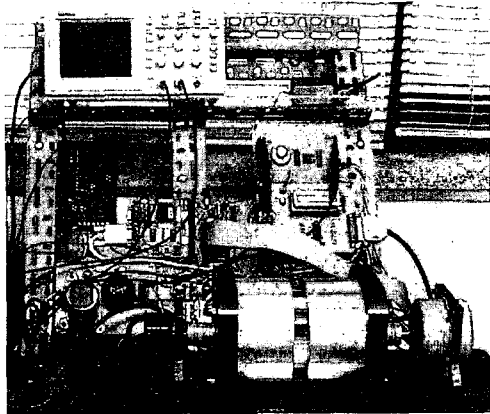


그림 16 실험장치 구성도

은 기능을 할 수 있는지 관심을 보였다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 서치 코일은 각각의 회전자의 위치를 검출하는 기능은 없다. 그러나 회전자의 돌극과 고정자의 돌극이 겹치기 시작하는 지점은 서치 코일의 유기 전압 파형에서 검출할 수가 있다. 하나의 특정 지점만을 검출하는 서치 코일로 토로이달 SRM을 구동시킨 결과 엔코더를 이용한 구동과 거의 같은 결과를 보였으며, 그림 17, 18, 19, 20은 그 비교결과를 잘 보여준다.

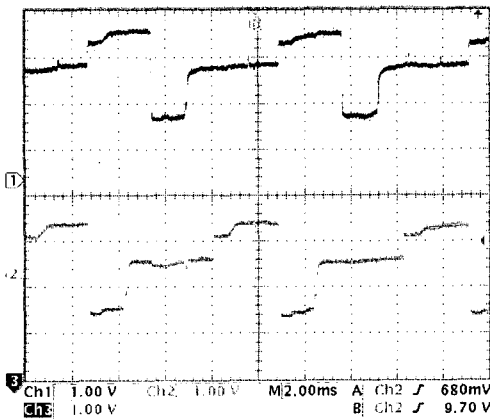


그림 17 엔코더를 이용한 구동시 유기 전압 파형

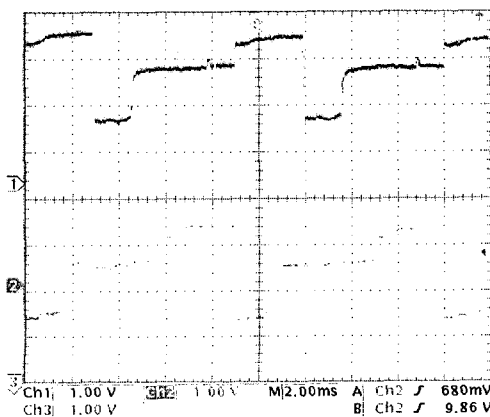


그림 18 서치 코일의 위치 정보를 이용한 구동시 유기 전압 파형

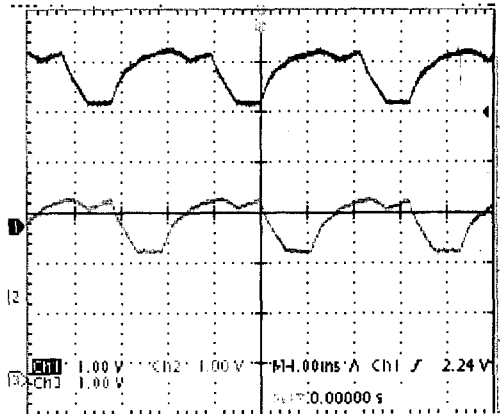


그림 19 엔코더를 이용한 구동시 3상 전류 파형

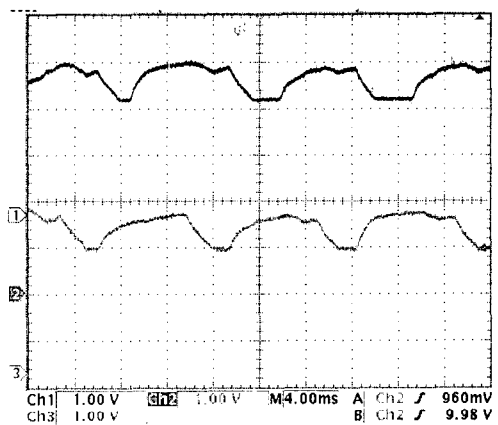


그림 20 서치 코일의 위치 정보를 이용한 구동시 3상 전류 파형

3. 결 론

본 연구에서는 엔코더와 같은 위치 센서를 대신하여 위치를 찾아내어 모터를 구동시키는 방법으로 서치 코일을 제안하였다. 위치 센서를 이용하여 토로이달 SRM을 구동시 유기되는 서치 코일의 전압 파형을 분석한 결과 위치 정보를 담고 있음을 확인하였다. 이를 토대로 엔코더와 같은 위치 검출 센서를 사용하지 않고도 각 상의 슬롯에 감긴 서치 코일의 특정지점 검출과 현재의 속도 계산으로 토로이달 SRM을 구동시킨 결과 엔코더로 구동시키는 경우와 동일한 결과값을 나타냈음을 증명하였다. 이렇게 서치 코일을 이용한 위치 검출 방법은 저가의 모터 생산을 가능하게 하고, 충격에 강하며, 수리를 필요로 하지 않을 뿐만 아니라 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. Szesznyand, and W.H. Bocknell. "Microcomputer Control of Swithched 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, February 1983.
- [6] E. Mese and 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, and 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.