

서치코일을 이용한 SRM의 구동법 비교

양형열, 신덕식, 임영철
전남대학교

A Comparison of the Characteristics by SRM Drives Using Search Coils

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

ABSTRACT

This paper presents a comparison of the characteristics by two types of switched reluctance motor (SRM) drives using search coils, Exterior pole search coil and Interior central pole search coil, which are used for estimation of the rotor position. The advantages and disadvantages of the two types of drive methods are also described.

1. 서 론

SRM에 있어 회전자 위치 정보는 구동 및 제어 목적을 위한 궤환으로서 필수적이다. 광 인터럽터 혹은 고정밀 엔코더와 같은 축 위치 센서가 흔히 회전자 위치를 결정하기 위해 사용된다. 그러나 이런 위치 센서들은 복잡성과 소형 모터의 응용에 대해 추가적인 비용을 요구할 뿐 아니라 모터나 구동 시스템의 부피를 증가시키는 경향이 있다. 또한 충격에 약하며 주위환경에 민감하다. 그래서 기존의 위치 센서들의 많은 단점들을 해결할 수 있는 여러 가지 방법들이 연구되어지고 있다^{[1]-[4]}.

또한 기존의 위치 센서들의 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 서치 코일을 내장한 SRM이 연구되어지고 있다^[5]. 여기에는 서치코일을 고정자 돌극의 외부에 장착하여 회전자와 고정자가 겹치는 순간을 검출하여 회전자의 위치를 추정하는 돌극 외부 서치코일과 고정자 돌극 중앙에 홈을 뚫어 서치코일을 장착하고 그 홈의 위치를 검출함으로써 회전자의 위치를 추정하는 돌극 외부 서치코일이 있다.

본 논문에서는 이러한 두 가지 방법의 특징을 비교하고 장단점을 분석해 본다.

2. 돌극 외부 서치코일

2.1 돌극 외부 서치코일의 장착

사용되는 모터는 TSRM(Toroidal Switched Reluctance Motor)으로서 두 개의 상이 동시에 여자되어 하나의 돌극에 자속을 흘려주는 형태로 되어 있다. 돌극 외부 서치코일은 그림 1에서와 같이 돌극의 둘레에 0.16mm, 10턴의 서치코일이 장착되어 있다.

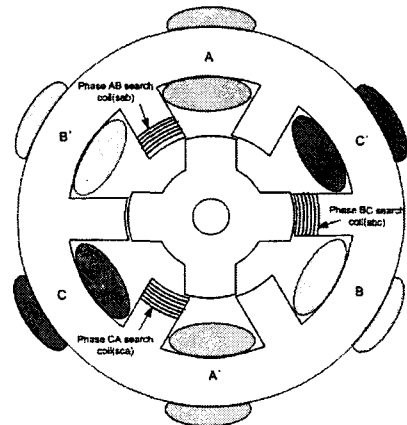


그림 1 서치코일이 장착된 TSRM의 구조
Fig. 1 Structure of the TSRM with search coils

2.2 돌극 외부 서치코일을 이용한 회전자 위치 추정

TSRM에 서치코일을 장착하는 경우 서치 코일의 유기 기전력은 다음과 같이 표현되며 여자되고 있는 두 상의 자속변화에 의해 기전력이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이때 서치코일의 유기 기전력 파형은 그림 2와 같이 나타나게 된다.

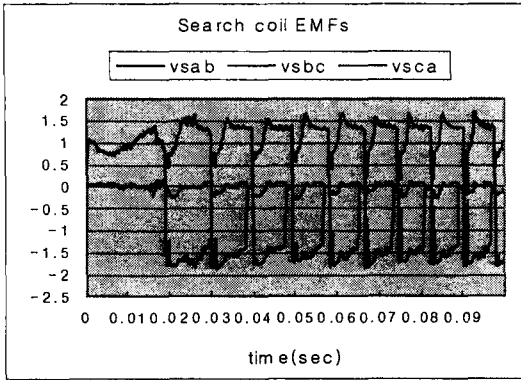


그림 2 서치코일의 시뮬레이션 파형.
Fig. 2 Simulation waveform of search coils.

$$\begin{aligned}
 e &= -\left(\frac{d\lambda_{as}}{dt} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt}\right) \\
 &= -(M_{as}\frac{di_a}{dt} + M_{bs}\frac{di_b}{dt} + i_a\frac{dM_{as}}{dt} + i_b\frac{dM_{bs}}{dt}) \quad (1) \\
 &= -(M_{as}\frac{di_a}{dt} + i_a\omega\frac{dM_{as}}{d\theta} + M_{bs}\frac{di_b}{dt} + i_b\omega\frac{dM_{bs}}{d\theta})
 \end{aligned}$$

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

M_{as}, M_{bs} : 주권선과 서치코일의 상호 인덕턴스

i_a, i_b : 여자되고 있는 두개의 상전류

ω : 회전속도

그림 11은 토크 발생구간 시작점을 검출하기 위한 방법으로 서치 코일의 기전력 파형과 미분 파형이다. 미분 파형에서 알 수 있듯이 토크 발생구간 시작점을 미분 파형을 이용하면 쉽게 검출할 수 있다. 즉 $\frac{dVs}{dt}$ 값이 0 이 되는 부분을 검출함으로써 회전자와 고정자가 겹치기 시작하는 부분을 검출할 수 있는 것이다.

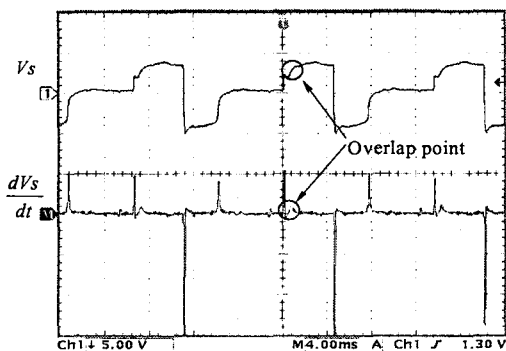


그림 3 서치코일 유기 기전력과 미분파형.
Fig. 3 Search coil EMF and differential waveform.

서치코일 기전력을 제어기에서 입력받을 때는 잡음을 제거하기 위해서 이동평균을 취하게 되며, 고속 회전시에는 이동평균이 시간지연의 요인이 되므로 사용되지 않는다.

3. 돌극 관통 서치코일

3.1 돌극 관통 서치코일의 장착

돌극 관통 서치코일은 돌극 외부 서치코일과 마찬가지로 그림 4에서와 같이 돌극에 뚫린 홈에 좌우로 각각 0.16mm, 10턴의 서치코일이 장착되어있다.

모터의 중심축에서 보았을 경우 중앙 홈을 기준으로 좌측에 감긴 '좌측 돌극 관통 서치코일(sab_L, sbc_L, sca_L)'은 반시계방향으로 구동하기 위한 서치코일이며, 돌극 우측에 장착된 '우측 돌극 관통 서치코일(sab_R, sbc_R, sca_R)'은 시계방향으로 회전시키는 경우에 사용한다. 좌우의 서치코일은 회전 방향은 다르지만 회전자의 위치를 검출하여 구동하는 원리는 같다.

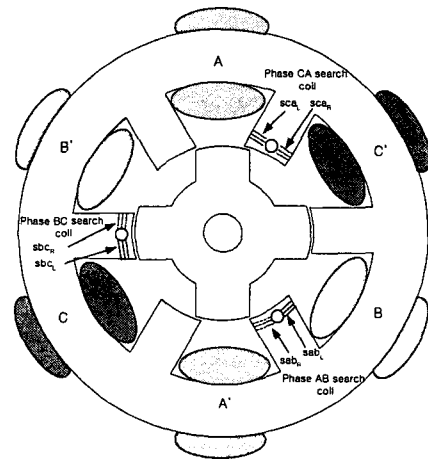


그림 4 TSRM과 장착된 서치코일
Fig. 4 Structure of the TSRM with interior central pole search coils

3.2 돌극 관통 서치코일을 이용한 회전자 위치 추정

서치코일에서 발생하는 유기기전력은 돌극 외부 서치코일과 마찬가지로 식 (1)에 의해 나타나게 된다. 그리고 시뮬레이션에 의한 서치코일의 유기전압 파형은 그림 5와 같이 나타나게 된다. 이것은 입력전압 155V, 회전수 1250rpm일 때의 시뮬레이션 파형이며, Maxwell 2D™를 사용하여 시뮬레이션 한 결과이다.

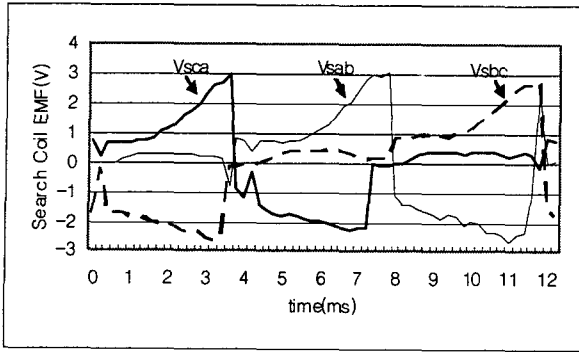


그림 5 서치코일 유기기전력 파형
Fig. 5 Search coil EMF waveforms.

서치코일의 유기기전력은 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.

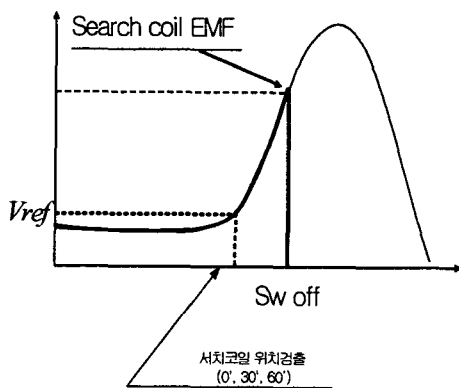


그림 6 회전자 위치검출의 원리
Fig. 6 Principle of the rotor position detection method.

4. 서치코일을 이용한 위치검출의 결과

4.1 돌극 외부 서치코일의 실험결과

돌극 외부 서치코일을 이용하여 실험하여 그림 7-9와 같은 결과를 얻었다. 부하 인가시 속도가 크게 감소했음에도 불구하고 정상적인 회전을 하고 있음을 알 수 있다. 또한 고속운전시에도 정상적으로 위치검출을 하여 구동하고 있음을 볼 수 있다.

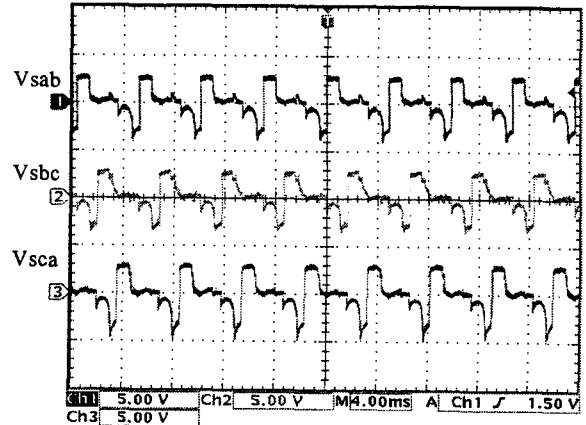


그림 7 제안된 방법에 의한 구동 시 서치코일 유기기전력.
Fig. 7 Search coil EMFs using proposed method.

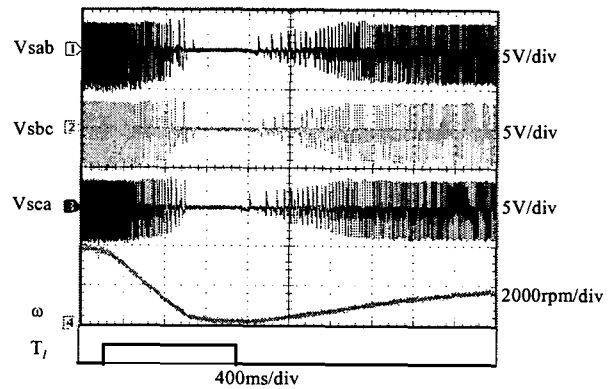


그림 8 부하 변동시 서치코일 유기기전력 및 속도 파형.
Fig. 8 Performance of the proposed method during load change.

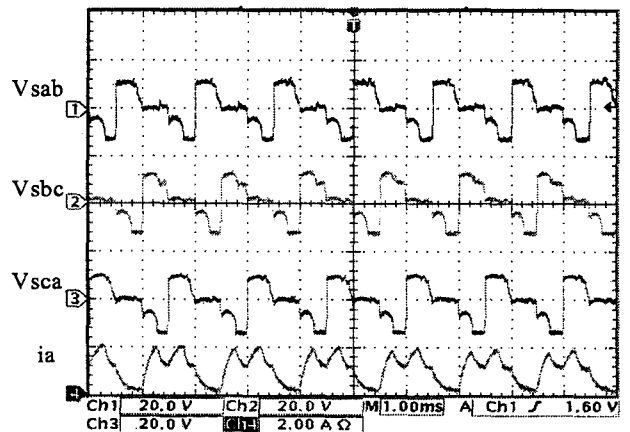


그림 9 고속운전 시(10000rpm) 서치코일 유기기전력 및 전류 파형.
Fig. 9 Performance of the proposed method at high speed(10000rpm).

4.2 돌극 관통 서치코일의 실험결과

돌극 외부 서치코일을 이용하여 실험하여 그림

10-12와 같은 결과를 얻었다. 돌극 외부 서치코일의 경우와 마찬가지로 부하로 인한 속도감소에 영향을 받지 않고 정상회전을 하고 있으며, 고속에도 정상적으로 위치를 검출하여 구동이 가능함을 보여주고 있다.

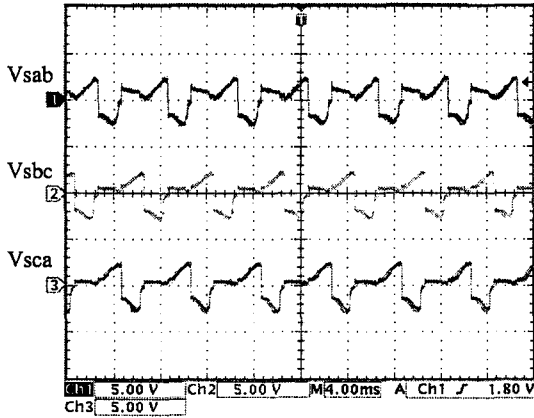


그림 10 엔코더 이용 구동시 서치코일 유기기전력
Fig. 10 Search coil EMFs using encoder.

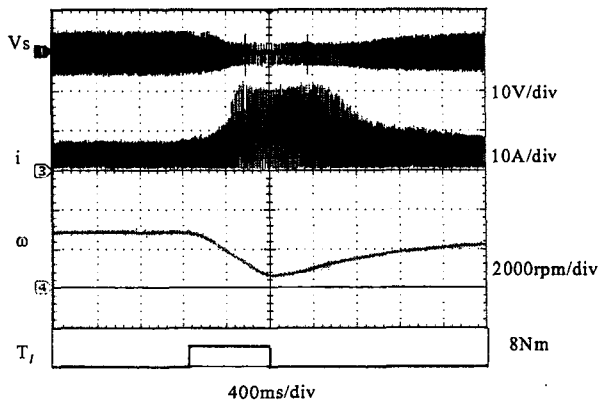


그림 11 부하 인가시 제안된 방법의 성능
Fig. 11 Performance of the proposed method during load change.

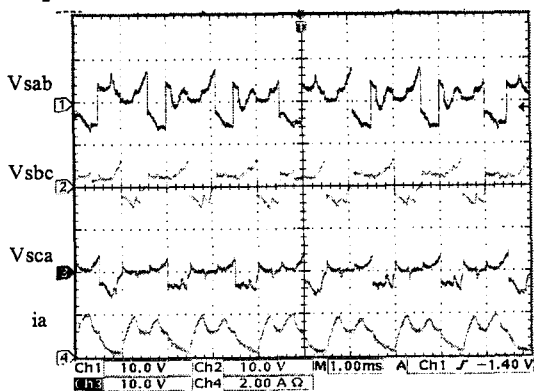


그림 12 고속 회전(10000rpm)시 서치코일 유기기전력 및 전류파형
Fig. 12 Performance of the proposed method at high speed(10000rpm).

5. 두 가지 서치코일의 비교

두 가지 서치코일 모두 엔코더를 사용했을 때와 마찬가지로 정상적으로 회전함을 알 수 있었고, 부하에 강인한 특성을 보여주었다. 또한 두 가지 방법 모두 고속회전이 가능하다.

두 방법의 형태상 차이점으로는 서치코일 장착방법에 있다. 돌극 외부 서치코일은 돌극 둘레에 장착하므로 제작이 쉬워 제품단가가 저렴하다. 또한 정역회전이 3개의 서치코일로 가능하다. 반면에 돌극 관통 서치코일은 돌극에 홀을 뚫고 서치코일을 장착해야 하므로 제작이 다소 어렵고 복잡하다. 그리고 정역회전을 하려면 6개의 서치코일이 필요하다.

돌극 외부 서치코일과 돌극 관통 서치코일은 구동에 있어서 각각 장단점을 가지고 있다. 가장 큰 차이점은 어드밴스각의 조절범위라고 할 수 있다. 돌극 외부 서치코일은 고정자 돌극과 회전자 돌극이 서로 겹치기 시작하는 위치를 검출하므로 이미 겹쳐진 후에는 위치 검출을 할 수 없다. 즉 어드밴스 각을 반드시 어느 정도 주어야 한다는 것이다. 따라서 돌극 외부 서치코일은 속도 제어 범위의 한계를 가진다.

그림 13에서 보는 바와 같이 돌극 관통 서치코일의 어드밴스각 제어범위는 $-7^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 로 넓은 범위를 가지고 있으나 돌극 외부 서치코일의 경우는 $-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 로 저속운전에서의 한계를 가지고 있다.

돌극 외부 서치코일은 속도 제어에는 어려운 점을 안고 있으나 돌극 관통 서치코일에 비해서 장착하기가 매우 쉽고, 양방향 구동이 가능하다는 장점을 가지므로 속도 제어가 필요 없는 곳에서는 사용하기에 적절하다고 할 수 있다.

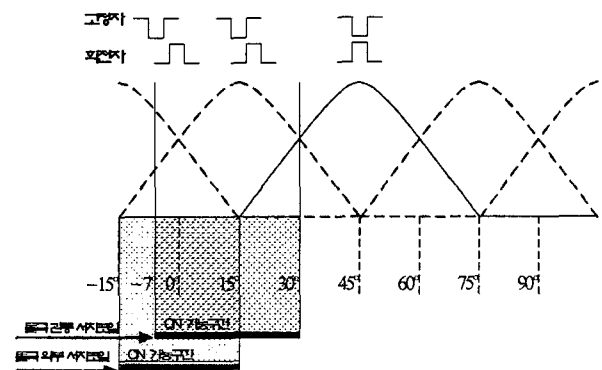


그림 13 구동방법에 따른 어드밴스각 적용 가능 범위
Fig. 6.13 Possible range of the advance angle according to the search coil drive method.

각각의 서치코일 방식을 비교하면 표 1과 같다.

참고 문헌

표 1 돌극 외부 서치코일과 돌극 관통 서치코일의 특징 비교
Table 1 Comparison of interior central pole search coil method and exterior pole search coil method.

비교항목	돌극 외부 서치코일	돌극 관통 서치코일
검출 방식	오버랩 포인트 검출	돌극 중앙 홀 위치 검출
장착	간편	약간 복잡
제작비	저가	돌극 외부 서치코일에 비해 고가
양방향 구동	가능	좌우 관통 서치코일 모두 사용 시 가능
어드밴스각	0도 이상만 가능	모든 영역에서 가능
제어성	떨어짐	우수함

위와 같은 비교 관점에서 볼 때 돌극 외부 서치코일은 중속 이상의 단방향 또는 양방향 구동에 적합하며, 돌극 관통 서치코일은 제작하는데 약간의 불편함을 가지고 있지만 저속에서 고속까지 속도 제어가 가능하므로 직류 직권전동기가 사용되고 있는, 저속 시에 고티크를 요구하는 곳에 적절하리라고 생각된다.

6. 결 론

본 논문에서는 돌극 외부 서치코일과 돌극관통 서치코일을 이용한 구동법의 차이점을 비교하고 각각의 장단점을 분석 하였다. 실험을 통하여 두 방법 모두 원활한 구동이 가능하며 고속운전 또한 가능함을 보여주었고 부하에도 강인함을 알 수 있었다.

두 방법의 차이점은 서치코일 장착방법에 따른 제작비와 어드밴스각의 제한에 있다. 어드밴스각의 범위에 따라서 속도 제어 영역이 결정되므로 이는 매우 중요한 특징이라고 할 수 있다.

돌극 외부 서치코일은 저속영역이 제한되므로 적용 영역이 줄어들어 일정한 속도나 고속영역에서만 사용가능하며, 돌극 관통 서치코일의 경우는 전영역에 걸쳐 사용가능하므로 적용 범위가 넓다고 할 수 있다. 따라서 서치코일을 이용한 SRM은 이러한 특징을 고려하여 적용이 되어야 할 것이다.

이 논문은 전남대학교 고품질전기전자부품 및 시스템연구센터의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

- [1] N.G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities : Role of Power Electronics in Future Power System", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 76, No. 4, pp. 481-482, 1988, April.
- [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, Oct. 1996
- [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] P. Liou, ShyShenq and Wang Wenwei, "Indirect rotor position sensing for switched reluctance motor using search coil", *Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering*, Vol. 2, pp. 939-942, 1996, May
- [5] B. Fahimi, G. Suresh and M. Ehsani, "Review of sensorless control methods in switched reluctance motor drives", *Conf. Rec. of the 2000 IEEE Ind. Appl. Conf.*, Vol. 3, pp. 1850-1857, 2000, Oct.
- [6] 양형열, 김중건, 임영철, "서치코일을 이용한 토로이달 스위치드 릴럭턴스 모터의 회전자 위치 검출", *전력전자학회논문지*, 제 7권, 제 6호, pp.537-545. 2002