

돌극 관통 서치코일과 돌극외부 서치코일에 의한 SRM의 초기 회전자 위치검출법의 비교

양형열, 신덕식, 임영철
전남대학교

A Comparison of the Initial Rotor Position Estimation Methods by Interior Central Pole Search Coils and Exterior Pole Search Coils for SRMs

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

ABSTRACT

In this paper a comparison of the initial rotor position estimation methods by two type search coils for switched reluctance motor(SRM) is presented. The experimental results of the two methods show that the interior central pole search coil method has better performance than the exterior pole search coil method. The reason of the discrepancy in performance is described.

1. 서론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor: SRM)는 많은 장점을 가지는 전동기이지만^[1], 일반적으로 SRM의 제어를 수행하기 위해서는 레졸버, 엔코더, 혹은 Hall 센서와 같은 회전자 위치 센서가 필요하게 된다. 하지만 회전자 위치 센서는 비용을 증가시키며, 충격에 약하며, 압축기 등과 같은 고온 및 고압의 환경에서 신뢰성을 저하시킨다. 그래서 기존의 위치 센서들의 많은 단점들을 해결할 수 있는 여러 가지 방법들이 연구되어지고 있다^[2-3].

이러한 기존의 위치 센서들의 단점을 보완하기 위해 서치 코일을 내장한 SRM이 연구되어지고 있다^[4]. 이것은 전동기가 회전할 때 발생하는 서치코일의 유기기전력을 이용하여 회전자의 위치를 추정하는 방법이다. 하지만 전동기가 정지해 있을 때는 유기기전력이 발생하지 않기 때문에 유클리디안 제곱거리를 이용하여 초기위치를 검출하는 방법이 사용되고 있다^[5].

본 논문에서는 돌극관통 서치코일과 돌극 외부 서치코일, 두 가지 서치코일을 이용한 회전자의 초기 위치검출 방법의 성능을 비교하고 각각의 장단점을 분석하였다.

2. 돌극 외부 서치코일 및 돌극 관통 서치코일

2.1 돌극 외부 서치코일

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.

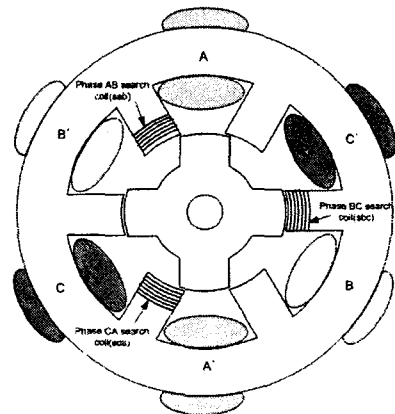


그림 1 서치코일이 장착된 TSRM의 구조
Fig. 1 Structure of the TSRM with search coils

2.2 돌극 관통 서치코일

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

모터의 중심축에서 보았을 경우 중앙 홈을 기준으로 좌측에 감긴 '좌측 돌극 관통 서치코일(sabL, sbcL, scaL)'은 반시계방향으로 구동하기 위한 서치코일이며, 돌극 우측에 장착된 '우측 돌극 관통

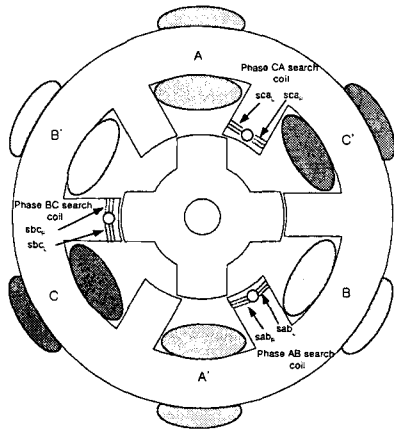


그림 2 TSRM과 장착된 서치코일
Fig. 2 Structure of the TSRM with interior central pole search coils

서치코일(sab_R, sbc_R, sca_R)은 시계방향으로 회전시키는 경우에 사용한다. 좌우의 서치코일은 회전 방향은 다르지만 회전자의 위치를 검출하여 구동하는 원리는 같다. 따라서 여기서는 좌측 돌극 관통서치코일에 대해서만 논의한다.

3. 초기위치 검출 방법

3.1 기준값 획득

회전자의 정지시의 위치를 추정하기 위해서는 먼저 전 처리 단계로 서치코일의 유기기전력(V_s)과 위치(θ_R)의 관계를 맵핑한 $V_s-\theta_R$ 기준값의 획득이 필요하다. 회전자가 정지해 있을 때 매 1° 마다 각 상에 짧은 시간 동안 펄스를 인가하여 서치 코일에 유기되는 기전력을 측정한다. 이때 3상을 연속적으로 전류의 확립이 이루어지지 못하는 짧은 시간 간격(약 $100\mu s$)으로 매우 빠르게 스위칭한다.

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 (1)과 같이 변압기 형태의 기전력만 유기된다. 이 유기기전력은 정지 상태에서 회전자의 위치정보를 내포하고 있다. 따라서 서치코일의 유기기전력을 통해 회전자의 위치 정보 예측이 가능해진다.

$$e = -(M_{as} \frac{di_a}{dt} + M_{bs} \frac{di_b}{dt}) \quad (1)$$

M_{as}, M_{ba} : 주권선과 서치코일의 상호 인덕턴스
 i_a, i_b : 여자되고 있는 두개의 상전류

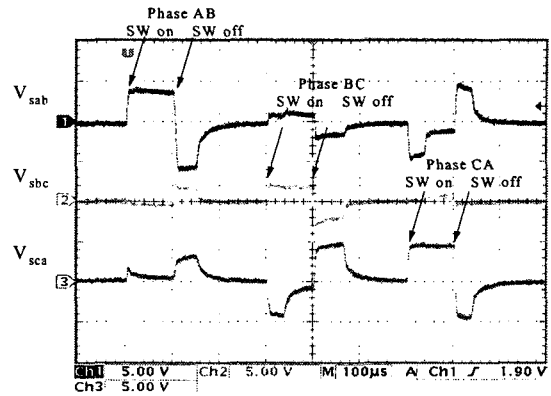


그림 3 단일펄스 입력에 대한 서치 코일 기전력
Fig. 3 Magnitude of the search coil EMFs

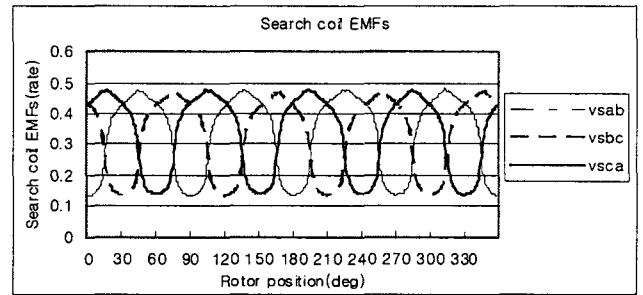


그림 4 회전자 위치에 따른 돌극 외부 서치코일 유기기전력 분포
Fig. 4 Exterior pole search coil EMFs according to rotor position

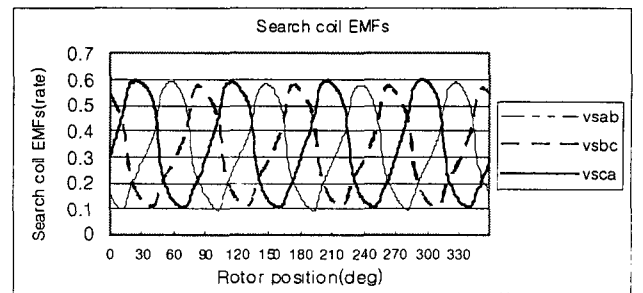


그림 5 회전자의 위치에 따른 좌측 돌극 관통 서치코일의 유기기전력 분포
Fig. 5 Interior central pole search coil EMFs according to rotor position

그림 3은 TSRM의 회전자가 정지 상태일 때, 연속적으로 단일 펄스 전압을 인가 시 AB상 서치코일, BC상 서치코일, CA상 서치코일에 유기되는 기전력의 파형을 나타낸다. 위치에 따른 기전력의 분포를 얻기 위하여 회전자의 모든 위치에 대해 각각 파형의 크기를 측정된 결과 그림 4(돌극 외부 서치코일), 그림 5(돌극 관통 서치코일)에서와 같은 기전력 분포를 얻었다. 이것은 전원전압 변동에 민감하지 않도록

세 개의 서치코일 유기기전력을 식 (2)에 의해 변형된 결과이다.

$$\begin{aligned}
 V_{sab}' &= \frac{V_{sab}}{(V_{sab} + V_{sbc} + V_{sca})} \\
 V_{sbc}' &= \frac{V_{sbc}}{(V_{sab} + V_{sbc} + V_{sca})} \\
 V_{sca}' &= \frac{V_{sca}}{(V_{sab} + V_{sbc} + V_{sca})}
 \end{aligned} \quad (2)$$

V_{sab}' : 수정된 ab상 서치코일 유기전압
 V_{sbc}' : 수정된 bc상 서치코일 유기전압
 V_{sca}' : 수정된 ca상 서치코일 유기전압

그러나 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, 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 회전자 위치를 추정한다.

3.2 유클리디안 제곱거리

측정된 3상의 유기기전력은 식 (3)과 같이 변형된 유클리디안 제곱거리를 이용하여 위치를 추정한다.

$$\begin{aligned}
 \theta_R &= \min[(V_{sab}^* - V_{sabk})^2 \\
 &+ (V_{sbc}^* - V_{sbc k})^2 + (V_{sca}^* - V_{sca k})^2]
 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $k = 0, 1, \dots, 359$

θ_R : 회전자 위치

V_{sab}^* : ab상 서치코일 EMF(측정값)

V_{sbc}^* : bc상 서치코일 EMF(측정값)

V_{sca}^* : ca상 서치코일 EMF(측정값)

V_{sabk} : ab상 서치코일 EMF(기준값), $0^\circ - 359^\circ$

$V_{sbc k}$: bc상 서치코일 EMF(기준값), $0^\circ - 359^\circ$

$V_{sca k}$: ca상 서치코일 EMF(기준값), $0^\circ - 359^\circ$

회전자의 위치를 추론하는 과정은 먼저 표준으로 획득된 $V_s - \theta_R$ 기준값과 임의의 위치에서 얻은 측정값의 유클리디안 제곱거리를 산출한 다음, 이 값들을 비교하여 min 연산을 통해 가장 작은 유클리디안 제곱거리를 갖는 출력을 선택한다.

4. 실험결과

4.1 돌극 외부 서치코일

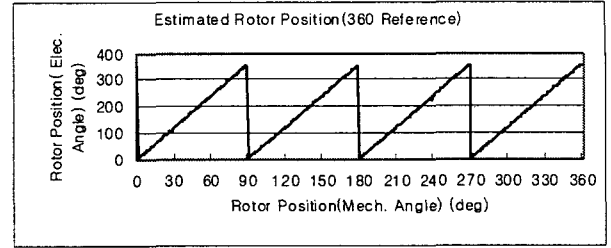


그림 6 추정된 회전자 위치

Fig. 6 Estimated rotor position

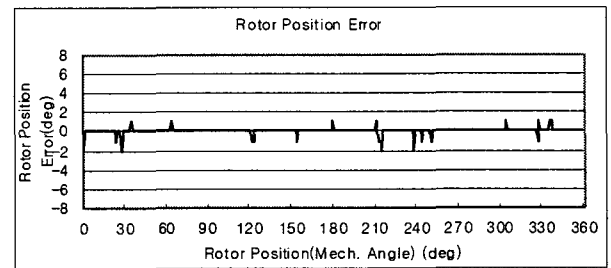


그림 7 위치 추정 오차

Fig. 7 Rotor position error

돌극 외부 서치코일을 이용한 회전자 위치검출 결과는 그림 6, 그림 7과 같다.

4.2 돌극 관통 서치코일

돌극 관통 서치코일을 이용한 회전자 위치검출 결과는 그림 8, 그림 9와 같다.

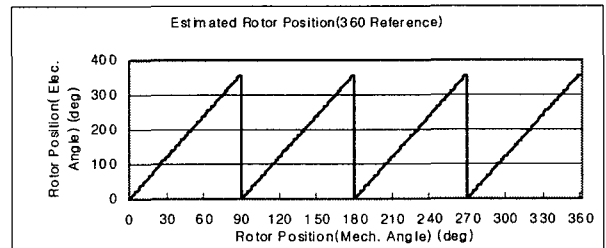


그림 8 제안된 방법에 의해 추정된 회전자 위치

Fig. 8 Estimated rotor position

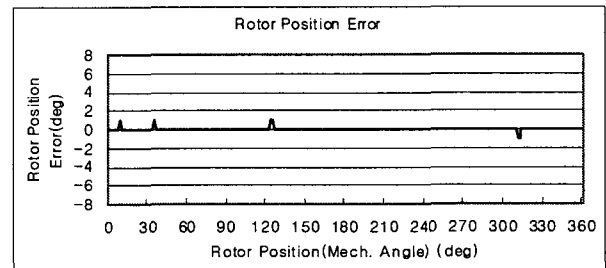


그림 9 추정된 회전자 위치 오차

Fig. 9 Rotor position error

5. 실험결과 분석

두 경우 모두 정확한 위치를 추정해야 하지만 전기적으로 같은 각도에서 모두 값이 같지 않고 그 이웃하는 각과 비슷해지는 경우가 발생하므로 항상 정확한 위치를 추정하지는 못한다. 모터의 공극이 일정하고 회전자와 고정자가 균일하다면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

돌극 외부 서치코일은 주로 0°, 30°, 60°, 120°, 180°, 210°, 240°, 300°, 330° 부근에서 오차가 발생함을 알 수 있다. 돌극 관통 서치코일의 경우에는 10°, 35°, 125°, 310° 부근에서 주로 오차가 발생하였다.

이는 그림 10, 11에서 보는 바와 같이 위의 각도에서 한 상 또는 두 상의 기울기가 너무 완만하여 1°-2°정도의 각도는 거의 비슷한 값의 서치코일 기전력을 가지기 때문으로 분석된다.

특히 돌극 외부 서치코일의 경우에 위의 각도에서 하나의 상이 더욱 완만한 분포를 보이고 있을 뿐만 아니라 다른 두 상의 기울기도 비교적 완만하기 때문에 오차가 더 커짐을 짐작할 수 있다. 돌극 관통 서치코일의 경우는 위의 각도에서 한 상이 약간 완만한 부분을 갖고 있으나 다른 두 상의 기울기가 크므로 보다 정확한 위치를 판단할 수 있다.

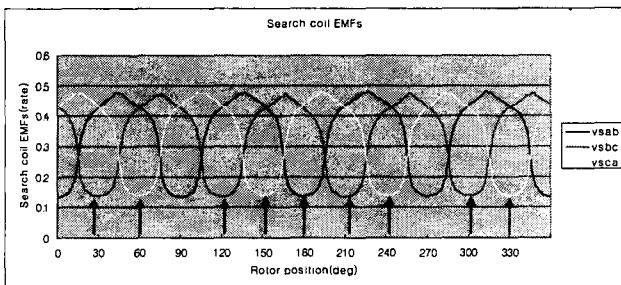


그림 10 돌극 외부 서치코일의 오차 발생 지점
Fig. 10 Error point of the rotor position in Exterior pole search coil

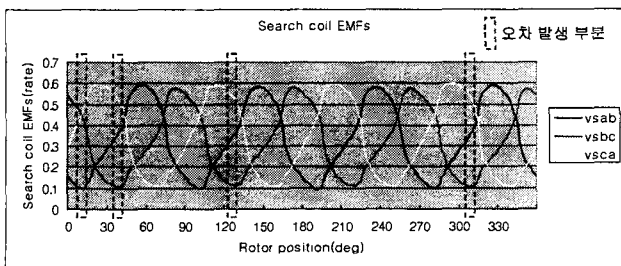


그림 11 돌극 관통 서치코일의 오차 발생 지점
Fig. 11 Error point of the rotor position in left interior central pole search coil

따라서 돌극 관통 서치코일의 경우가 더욱 정확한 위치를 추정할 수 있으며, 이는 실험 결과에서 알 수 있다. 돌극 외부 서치코일의 경우 오차 합계는 25로 나타났으며, 최고 2°까지의 오차를 가진다. 돌극 관통서치코일에서는 오차 합계가 7이며 모든 위치에서의 회전자 위치오차는 1°이하이다. 돌극 외부 서치코일의 경우 비교적 오차가 많으나 기동하는 데는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 돌극 외부 서치코일과 돌극 관통 서치코일에 의한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 정지 시 회전자 위치검출 방법의 결과를 비교 분석 하였다. 실험결과 돌극 관통 서치코일의 경우가 보다 정확한 위치검출이 이루어짐을 알 수 있고, 그 원인은 회전자 위치에 따른 서치코일 유기기전력 분포에 있음을 알 수 있었다.

이러한 분석으로 인해 보다 정밀한 위치를 검출하기 위해서는 서치코일 유기기전력 분포가 급격한 기울기를 갖는 것이 유리하다는 것을 알 수 있었고, 향후에는 기전력 분포를 보다 명확한 방향으로 이끌어내는 연구가 진행되어야 할 것이다.

이 논문은 전남대학교 고품질전기전자부품 및 시스템연구센터의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] 안진우, "스위치드 릴럭턴스 전동기", 오성미디어 2001.1
- [2] R. Krishnan, "Sensorless operation of SRM drives: R & D status", The 27th Ann. Conf. of the IEEE Ind. Electr. Soc., Vol. 2, pp. 1498-1503, Nov.-Dec. 2001
- [3] E. Mese and D. A. Torrey, "An approach for sensorless position estimation for switched reluctance motors using artificial neural networks", IEEE Trans. on Power Electr., Vol. 17 Issue: 1, pp. 66-75, Jan. 2002
- [4] 양형열, 김중건, 임영철, "서치코일을 이용한 토로이달 스위치드 릴럭턴스 모터의 회전자 위치 검출", 전력전자학회논문지, 제 7권, 제 6호, pp.537-545. 2002
- [5] 양형열, 송진수, 류영재, 임영철, "유클리디안 제곱거리를 이용한 스위치드 릴럭턴스 모터의 정지 시 회전자 위치 추정법", 전력전자학회 논문지, 제 8권 4호, p.344-350, 2003