

서치코일 내장형 SRM의 정지시 회전자 위치 추정 기법

梁熒烈[†], 申德植^{*}, 任永徹^{**}The Rotor Position Estimation Techniques of an SRM
with Built-in Search Coils at Standstill

Hyong-Yeol Yang, Duck-Shick Shin, and Young-Cheol Lim

요 약

본 논문에서는 서치코일이 장착된 SRM(Switched Reluctance Motor)의 정지시 회전자 위치를 추정하는 방법을 비교하여 제시하였다. 서치코일이 장착된 SRM은 초기에 정지상태이므로 서치코일에서 유기기전력이 발생하지 않는다. 따라서 정지상태에서 회전자의 위치를 검출하기 위한 방법이 필요하게 된다. 본 논문에서는 유클리디안 제곱거리, 퍼지, 신경망 등 세 가지 방법을 이용하여 회전자의 위치 추정을 위한 시뮬레이션을 실행하였고 그 결과를 비교하였다. 또한 시뮬레이션 결과가 우수한 유클리디안 제곱거리를 이용하여 회전자 위치 추정을 위한 실험을 실시하여 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper presents a comparison of rotor position estimation of a switched reluctance motor(SRM) with built-in search coils by three methods. The search coil EMFs are not generated in the SRM with built-in search coils at standstill. So an initial rotor position estimation method is needed. In this paper squared euclidean distance, fuzzy logic and neural network methods are proposed for the estimation of initial rotor position. The simulated results of the three methods are compared. The simulated result of the squared euclidean distance method, which has the best performance, is supported by the experimental result.

Key Words : SRM, Search coils, Squared euclidean distance, Fuzzy logic, Neural network, Rotor position Estimation

1. 서 론

SRM을 기동(starting)하기 위해서는 정지 상태에서 회전자의 초기 위치를 반드시 알아야 한다. 따라서 여러 가지 초기위치 검출을 위한 방법들이 제안되고 있다^[1-2]. 초기 기동문제는 센서리스 구동에 있어서 또

하나의 연구할 대상이며, 이러한 문제는 인크리멘탈 엔코더를 사용하는 경우에서도 존재한다. 회전자의 초기 위치를 알 수 없는 센서리스 구동 방법의 경우 강제 정렬법을 이용해 회전자를 원하는 위치에 놓고 초기 기동을 시키게 된다^[3-5]. 이런 강제 정렬의 방법은 정밀제어를 해야 하는 곳이나 부하가 역회전을 하지 않아야 하는 곳에서는 치명적인 문제를 발생한다. 따라서 정지 시 회전자의 초기 위치검출은 고성능 SRM에서는 필수적인 요소라 할 수 있다.

회전자의 위치를 검출하는 방법은 여러 가지가 있으며, 기존의 센서들의 문제점인 주위환경에 민감한 문제점을 해결하고 저가로 회전자의 위치검출을 하기 위

[†]교신저자 : 정희원, 전남대 고품질전기전자부품 및 시스템 연구센터 연구원

E-mail : sfish@chonnam.ac.kr

^{*}학생회원, 전남대 대학원 전기공학과 석사과정

^{**}정희원, 전남대 전기공학과 교수

접수일자 : 2004. 8. 7 1차 심사 : 2004. 9. 15

심사완료 : 2004. 9. 22

한 센서로서 서치코일을 사용하는 경우가 있다^[6]. 회전시에 발생하는 유기기전력으로 회전자의 위치를 추정하지만 정지시에는 서치코일에 유기기전력이 발생하지 않으므로 별도의 위치추정 과정이 필요하게 된다. 이 경우 초기 기동을 위해 각 상에 일정 펄스를 인가하고, 이때 서치코일에 유기되는 각 상의 기전력의 크기를 비교하여 기동하는 방법을 사용하였다. 그러나 정확한 위치를 추정하지는 못하고, 단지 어떤 상을 먼저 여자시켜야 하는가에 대한 정보만을 가지고 초기기동을 실시하였다.

본 논문에서는 서치코일을 내장한 SRM의 정지시 회전자의 위치검출을 보다 정밀하게 하는 방법에 대해서 기술한다. 적절한 위치검출 방법을 찾는 과정으로 펄지, 신경망, 유클리디안 제곱거리의 세 가지 방법에 의한 위치추정 방법을 제시하고 각각의 성능을 비교하였다.

2. 위치추정 알고리즘 적용을 위한 전처리

2.1 서치코일 장착

사용되는 모터는 TSRM(Toroidal Switched Reluctance Motor)으로서 두 개의 상이 동시에 여자되어 하나의 돌극에 자속을 흘려주는 형태로 되어있다^[7]. 서치코일은 그림 1과 같이 0.16mm, 10턴이 돌극에 장착된다.

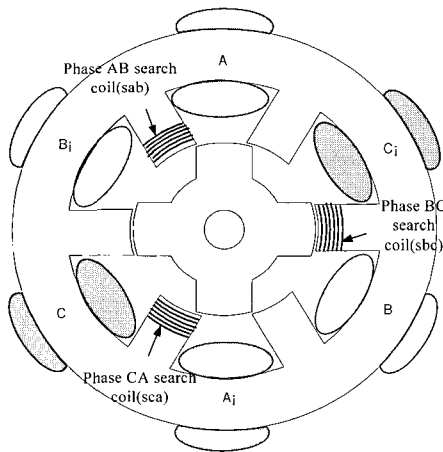


그림 1 서치코일이 장착된 TSRM의 구조
Fig. 1 Structure of the TSRM with search coils

2.2 회전자 위치에 대한 기준값 획득

서치 코일에서는 상호 인덕턴스의 크기, 즉 고정자 돌극과 회전자 돌극이 겹쳐있는 정도에 따라 3상의 서

치 코일에 식 (1)과 같은 기전력이 유기된다. 이 유기 기전력은 회전자와 고정자의 위치에 따라 변화된다.

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

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

M_{as}, M_{bs} : 주권선과 서치코일의 상호 인덕턴스

i_a, i_b : 여자되고 있는 두개의 상전류

ω : 회전속도

θ : 회전자 위치

이때 모터가 정지 상태에 있으면 서치 코일의 기전력은 식 (2)와 같이 변압기 형태의 기전력만 유기되며 정지상태에서 회전자의 위치정보를 내포하고 있다. 따라서 서치코일의 유기기전력을 통해 회전자의 위치정보 예측이 가능해진다.

$$e = -(M_{as} \frac{di_a}{dt} + M_{bs} \frac{di_b}{dt}) \quad (2)$$

회전자 위치검출은 두 단계를 거치게 되는데 먼저 회전자의 위치(θ_R)와 서치코일 유기 기전력(V_S)의 관계인 $V_S-\theta_R$ 기준값 획득단계, 저장된 기준값과 측정된 기전력값을 이용하여 위치 추정 알고리즘에 의해 회전자의 위치를 추정하는 예측단계로 구분된다. 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 μ s)으로 매우 빠르게 스위칭한다. 순간적인 단일 펄스 전압을 인가하면 모터는 계속 정지해 있고 전류는 미세하게 인가된다. 측정된 서치코일의 유기기전력은 위치에 종속적인 관계를 가지므로 기준값으로 활용할 수 있다. 그림 2에서 모터 정지시 각 상에 인가된 펄스전압에 의한 세 상의 서치코일 유기기전력의 형태를 보여주고 있다.

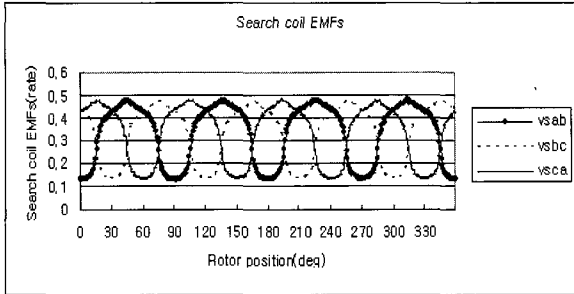


그림 2 회전자 위치에 따른 서치코일 유기기전력 분포
Fig. 2 Search coil EMFs according to rotor position

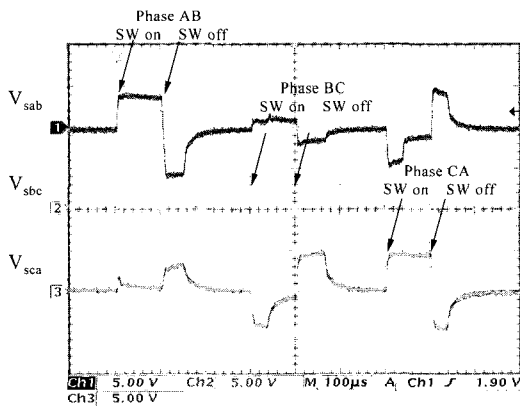


그림 3 단일펄스 입력에 대한 서치 코일 기전력
Fig. 3 Magnitude of the search coil EMFs

회전자의 위치에 따라 서치 코일의 유기 기전력의 크기는 변화된다. 위치에 따른 기전력의 분포를 얻기 위하여 회전자의 모든 위치에 대해 각각 과정의 크기를 측정하고 그 결과 그림 3에서와 같은 기전력 분포를 얻을 수 있었다.

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 퍼지, 신경망 그리고 유클리디안 제곱거리(Squared Euclidean Distance)를 이용하여 최소 오차를 가지는 위치 데이터를 추론하는 과정을 적용하

였다.

초기 회전자의 위치검출오차가 적으면 기동이 쉽지만 어느 한 곳이라도 큰 오차를 가진다면 그 위치에서는 기동이 불안정해 지게 된다. 따라서 오차는 넓게 분포되어야 하며 한 위치에서 큰 오차가 발생하는 것은 바람직하지 못하다. 이를 반영하기 위하여 사용된 평가함수는 식 (3)과 같으며, 임의의 한 위치에서 추정된 회전자 위치 오차가 크면 평가함수 값이 오차의 자승에 비례하여 커지게 되며 그 값이 클수록 좋지 않은 결과임을 의미한다.

본 논문에서는 각각의 방식에 대해 다음의 성능평가 함수에 의해 평가가 실시되었고 그 성능을 비교하였다.

$$J = \sum_{n=0}^{359} (e_{pn})^2 \tag{3}$$

e_{pn} : Rotor Position Error at Position n

3. 회전자 위치 추정 방법

3.1 퍼지논리에 의한 추정

회전자의 위치는 기계각 90° 마다 전기각으로 360° 가 되므로 89° 까지만 사용한다.

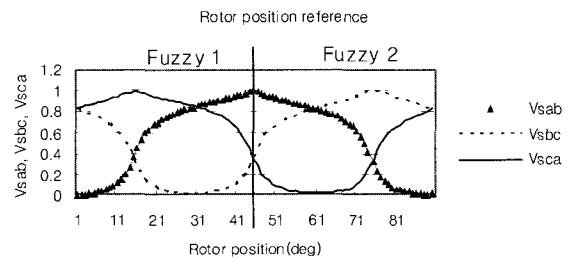


그림 4 퍼지규칙 적용을 위한 영역분할
Fig. 4 Division of area for determination of the fuzzy rules

서치코일의 유기전압은 0° 근처와 89° 근처의 값이 유사하므로 퍼지 규칙을 만들기에는 부적합하다. 따라서 적절한 부분에서 분리시켜 두개의 퍼지 로직을 이용해서 각각의 규칙을 만들고 추론을 한다.

먼저 V_{sca} 와 V_{sbc} 를 비교하여 그림 4와 같이 두 영역으로 분리한다. 즉, $V_{sca} > V_{sbc}$ 인 경우는 제 1 퍼지 로직(Fuzzy 1), $V_{sca} < V_{sbc}$ 인 경우는 제 2 퍼지 로직(Fuzzy 2)을 사용하는 것이다. 두 개의 영역은 그림 4에서 보는 것처럼 $1^\circ - 45^\circ$, $46^\circ - 90^\circ$ 로 나뉘어졌다. 그리고 비교적 선형인 부분을 한 구간으로 취하여 퍼

지 규칙을 정함으로써 오차를 줄이는 방향으로 실시하였다. 시뮬레이션은 Matlab의 Fuzzy Tool Box를 사용하여 실시되었으며 전체적인 구조는 그림 5와 같다.

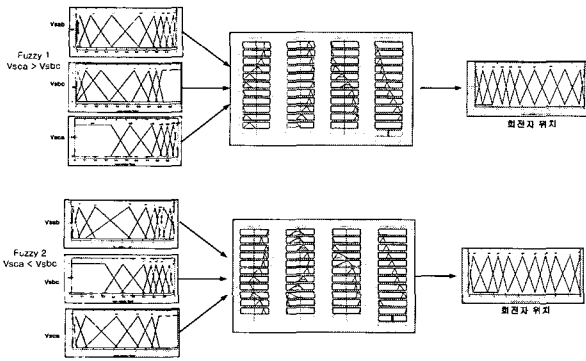


그림 5 퍼지로직의 전체 구조
Fig. 5 Architecture of the double Fuzzy logic structure

3.2 신경망에 의한 위치 추정

신경망에서도 퍼지에서와 마찬가지로 기계각으로 90°까지를 두 영역으로 나누어 두 개의 신경망을 적용한다. 입력으로 서치코일 유기전압, 출력으로 회전자 위치를 사용하며, 일반적으로 많이 사용되는 역전파 신경망(back-propagation neural network)을 이용하였다^[8].

입출력의 패턴 데이터는 정규화하였고, 입력뉴런과 출력뉴런의 활성화함수로는 시그모이드(sigmoid) 함수를 사용하였으며, 적절한 학습율, 은닉뉴런 및 반복횟수를 찾아내기 위하여 많은 경우에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. 학습율은 0.01 - 0.09, 은닉뉴런 개수는 10 - 25개까지 변경하였으며, 각각의 경우에 대해서 200,000 번까지 반복학습을 실시하였다.

그 결과 제 1 신경망은 학습율 0.07, 은닉뉴런 20개, 반복횟수 120,000회일 때 회전자의 위치 추정 성능이 가장 우수함을 확인할 수 있었다. 그리고 제 2 신경망은 학습율 0.08, 은닉뉴런 20개, 반복학습 횟수 50,000 회일 때 회전자의 위치 추정이 가장 적절함을 판단할 수 있었다.

학습종료 후 성능 평가 시에는 학습에 포함되지 않았던 서치코일 유기전압도 입력에 포함하여 평가되었다.

그림 6은 전체 신경망의 구조를 나타낸다.

3.3 유클리디안 제곱거리에 의한 위치 추정

측정된 3상의 유기기전력은 식 (4)와 같이 유클리디안 제곱거리를 이용하여 위치를 추정한다.

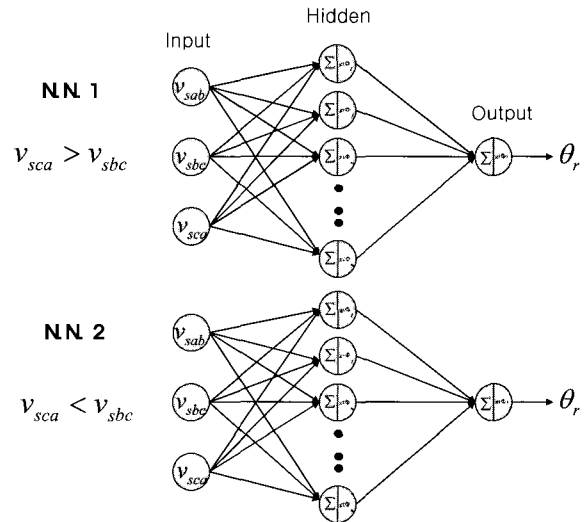


그림 6 신경망의 전체 구조
Fig. 6 Structure of the Neural Network

$$d(k) = [(V_{sab}^* - V_{sabk})^2 + (V_{sbc}^* - V_{sbc k})^2 + (V_{sca}^* - V_{sca k})^2] \quad (4)$$

여기서, $k = 0, 1, \dots, 89$

$d(k)$: 회전자 위치 k에서의 유클리디안 제곱거리

V_{sab}^* : ab상 서치코일 EMF(측정값)

V_{sbc}^* : bc상 서치코일 EMF(측정값)

V_{sca}^* : ca상 서치코일 EMF(측정값)

V_{sabk} : ab상 서치코일 EMF(기준값), $0^\circ - 89^\circ$

$V_{sbc k}$: bc상 서치코일 EMF(기준값), $0^\circ - 89^\circ$

$V_{sca k}$: ca상 서치코일 EMF(기준값), $0^\circ - 89^\circ$

식 (4)를 이용하여 현재 획득한 서치코일 유기기전력과 $V_S - \theta_R$ 기준값의 유클리디안 제곱거리 $d(k)$ 를 구하면, 전체 90개의 유클리디안 제곱거리중에서 가장 작은 $d(k)$ 값을 가지는 각 k에 해당하는 각도가 현재의 회전자 위치가 된다.

4. 회전자 위치추정 시뮬레이션

4.1 퍼지 로직에 의한 시뮬레이션

퍼지로직을 이용한 초기위치 추정 시뮬레이션 결과는 그림 7, 8과 같다. 기계각으로 약 $\pm 4^\circ$ 정도의 오차를 가졌고 비교적 많은 오차로 판단되었다.

총 오차합계는 602, 성능평가 결과는 1483이므로 큰 오차를 가짐으로써 정확도가 떨어짐을 알 수 있다.

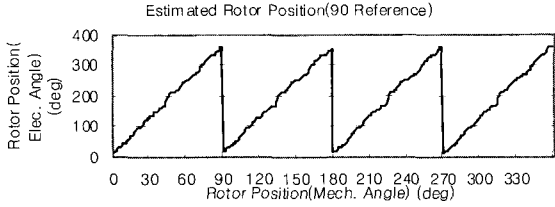


그림 7 추정된 회전자 위치
Fig. 7 Estimated rotor position

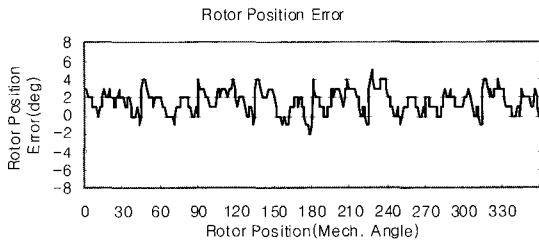


그림 8 위치 추정 오차
Fig. 8 Rotor position error

4.2 신경망에 의한 시뮬레이션

신경망을 사용하여 회전자의 위치를 검출하는 단계에서는 전체적으로 약 $\pm 1-2^\circ$ 의 오차를 보이며 비교적 양호한 결과를 얻었다.

오차 합계는 194이며, 평가치는 254를 가진다. 이는 퍼지논리에 의한 방법과 비교할 때 매우 우수함을 알 수 있다.

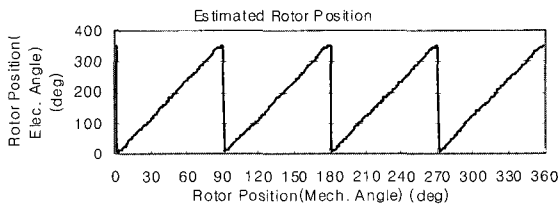


그림 9 추정된 회전자 위치
Fig. 9 Estimated rotor position

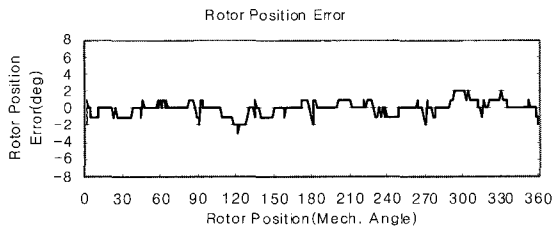


그림 10 위치 추정 오차
Fig. 10 Rotor position error

4.3 유클리디안 제곱거리에 의한 시뮬레이션

유클리디안 제곱거리는 89° 까지의 기준값만으로 추정했을 경우, 식 (4)에 의하여 89° 까지는 오차가 없이 정확한 결과를 보여주며 그 이후에는 약간씩 오차를 나타내게 됨을 그림 11, 12를 통해 알 수 있다.

그리고 오차합계는 187, 성능평가 결과는 269로서 신경망을 사용했을 경우와 유사하다고 할 수 있다.

표 1에 세 가지 방법에 의한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 유클리디안 제곱거리를 사용하는 경우 신경망을 사용했을 경우와 유사한 결과를 가지며, 계산이 보다 간단하기 때문에 본 논문에서는 유클리디안 제곱거리를 선택하여 실험하였다.

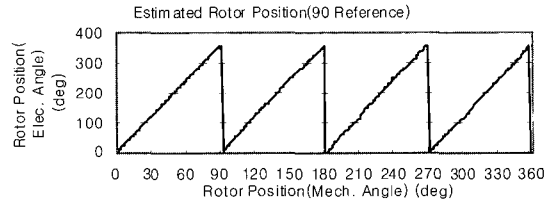


그림 11 추정된 회전자 위치
Fig. 11 Estimated rotor position

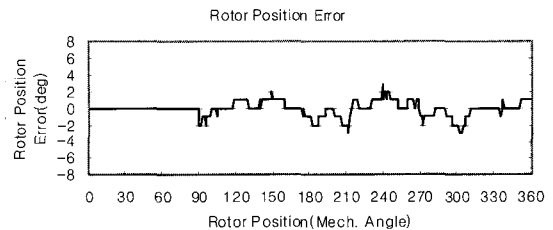


그림 12 위치 추정 오차
Fig. 12 Rotor position error

표 1 세 가지 방법에 의한 시뮬레이션 결과
Table 1 Comparison of simulation results by three methods

적용이론	오차합계	성능평가
퍼지논리	602	1483
신경망	194	254
유클리디안 제곱거리	187	269

5. 회전자 위치추정 실험 결과

유클리디안 제곱거리를 이용한 회전자 위치검출 실험은 90° 를 기준값으로 하여 먼저 실시되었으며, 성능을 높이기 위해 360° 전체를 기준값으로 하여 다시 한번 실시되었다.

그림 13-16에서 유클리디안 제곱거리에 의한 실험결과를 보여준다. 90°를 기준값으로 하여 실험했을 경우(그림 13-14) 시뮬레이션 결과와 유사함을 알 수 있으며, 시뮬레이션에서와 마찬가지로 주로 120°, 180°, 210°, 240°, 300°, 330° 부근에서 오차가 발생함을 알 수 있다.

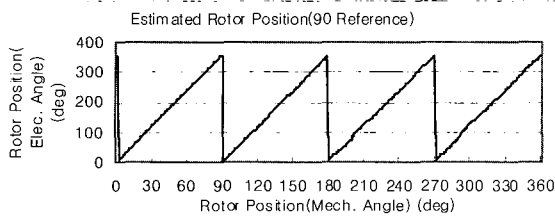


그림 13 추정된 회전자 위치(90°기준값)
Fig. 13 Estimated rotor position(90°reference)

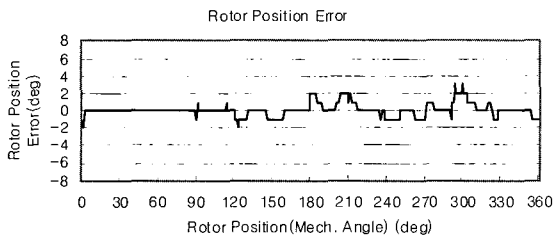


그림 14 위치 추정 오차(90°기준값)
Fig. 14 Rotor position error(90°reference)

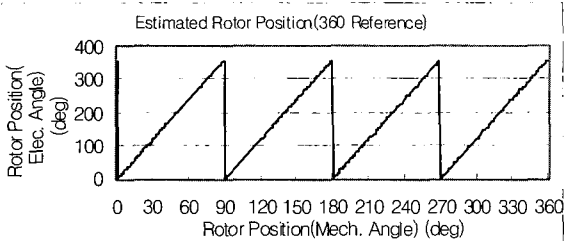


그림 15 추정된 회전자 위치(360°기준값)
Fig. 15 Estimated rotor position(360°reference)

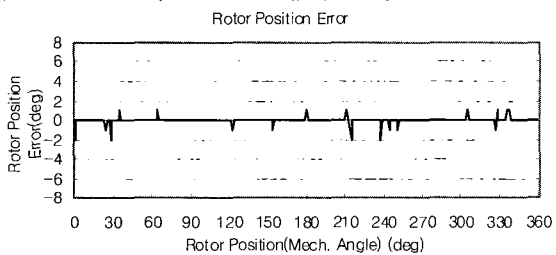


그림 16 위치 추정 오차(360°기준값)
Fig. 16 Rotor position error(360°reference)

360°를 기준값으로 했을 경우(그림 15-16)는 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

360° 기준의 경우는 모두 정확한 위치를 추정해야 하지만 전기적으로 같은 각도에서의 기준값이 모두 값이 같지 않고, 그 이웃하는 각과 비슷해지는 경우가 발생하므로 항상 정확한 위치를 추정하지는 못한다.

만약 모터의 공극이 일정하고 회전자와 고정자가 균일하다면 모든 위치에서 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

표 2에서 시뮬레이션과 실험에 의한 오차합계 및 성능평가값을 보여주고 있다. 표 2에서 보는 것과 같이 시뮬레이션과 실험결과는 거의 비슷한 양상을 보이고 있으며 360도 기준일 경우 사용되는 메모리가 많지만 좋은 성능을 보여주고 있다. 따라서 메모리가 크게 영향을 미치지 않는다면 360도 전체의 기준값을 사용하는 것이 바람직 할 것이다.

표 2 시뮬레이션과 실험결과의 비교

Table 2 Comparison of simulation and experimental results

추정 방법	시뮬레이션		실험		사용 메모리 (word)
	오차 합계	성능 평가	오차 합계	성능 평가	
360° 기준	0	0	25	33	360×3
90° 기준	187	269	145	205	90×3

6. 결 론

본 논문에서는 서치코일을 내장한 SRM의 정지시 회전자 위치검출 방법을 제시하였다. 퍼지논리, 신경망 및 유클리디안 제곱거리의 세 가지 방법에 의한 위치 추정 방법을 제시하고 각각의 성능을 비교하였다.

시뮬레이션을 통한 세 가지 방법에 의한 위치추정 결과에서 신경망과 유클리디안 제곱거리의 성능이 우수하게 나타났으며, 비교적 계산이 간단하고 쉽게 구현할 수 있는 유클리디안 제곱거리에 대해 실험이 실시되었다. 실험을 통하여 제안된 유클리디안 제곱거리의 위치추정 성능의 우수성이 입증되었으며, 초기 기동 시 강제정렬방식의 문제점을 극복할 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 전남대학교 고품질전자부품 및 시스템연구센터의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] 안진우, 송현수, 이동희, "SRM의 정밀각도제어를 위한 아날로그 엔코더", 전력전자학회논문지, 제 9권, 제 1호, pp.30~35, 2004.
- [2] 안진우, 박성준, 김태형, "SRM의 센서리스 제어를 위한 인덕턴스 추분기법", 전력전자학회 논문지, 제8권, 제 5호, pp. 427~434, 2003.
- [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] C. C. Chan, Quan Jiang, "Study of Starting Performances of Switched Reluctance Motors", PEDS 95, pp. 174~179, 1995.
- [5] Gabriel Gallegos Lopez, Philip C.Kjaer, J.E.Miller, "A New Sensorless Method for Switched Reluctance Motor Drives", IEEE Trans. on Industry Appl., Vol. 34, No. 4, pp. 832~840, 1998.
- [6] 양형열, 김종건, 임영철, "서치코일을 이용한 토로이달 스위치드 릴럭턴스 모터의 회전자 위치 검출", 전력전자학회논문지, 제 7권, 제 6호, pp.537~545. 2002.
- [7] Kim Ki-Bong, "Toroidal Switched Reluctance Motor part 1. fundamentals", Korea Germany symposium 11, pp. 135~141, 1998.
- [8] James A. Freeman, David M. Skapura, "Neural Networks Algorithms, Applications, and Programming Techniques", Addison-Wesley Publishing Company, 1991.

저 자 소 개



양형열(梁煥烈)

1969년 5월 27일생. 1993년 전남대 전기공학과 졸업. 1993년~1994년 현대자동차(주) 근무. 1998년 전남대 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 졸업(공학박). 현재 한국과학재단 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(공학박). 1997년 호주 모나시 대학 Visiting Scholar. 현재 전남대 전기공학과 교수. 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템연구센터 소장. 당 학회 부회장.

품질 전기전자부품 및 시스템연구센터 소장. 당 학회 부회장.