

세 가지 방법에 의한 서치코일 내장형 SRM의 정지시 회전자 위치 추정방법 비교

양형열, 신덕식, 임영철
전남대학교

A Comparison of the Rotor Position Estimation of an SRM with Built-in Search Coils by Three Methods at a Standstill

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

ABSTRACT

This paper presents a comparison of the rotor position estimation of a switched reluctance motor(SRM) with built-in search coils. Squared euclidean distance, fuzzy logic and neural network are used to estimate the rotor position. The simulation is performed by three methods and the results are compared. The experiment of squared euclidean distance is achieved and compared with the simulation result.

1. 서 론

SRM을 기동(starting)하기 위해서는 정지 상태에서 회전자의 초기 위치를 반드시 알아야 한다. 초기 기동문제는 센서리스 구동에 있어서 또 하나의 연구할 대상이며, 이러한 문제는 인크리멘탈 엔코더를 사용하는 경우에서도 존재한다. 그리고 기동과정에서는 보다 신뢰성 있고 정밀한 기동 알고리즘이 요구된다. 회전자의 초기 위치를 알 수 없는 센서리스 구동 방법의 경우 강제 정렬법을 이용해 회전자를 원하는 위치에 놓고 초기 기동을 시키는 경우가 있다^[1-2]. 이런 강제 정렬의 방법은 정밀 제어를 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 위한 센서로서 서치코일을 사용하는 경우가 있다^[3]. 회전시에 발생하는 유기기전력으로 회전자의 위치를 추정하지만 서치코일은 정지시에는 유기기전력이 발생하지 않으므로 별도의 위치추정 과

정이 필요하게 된다.

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

2. 회전자 위치에 따른 기준값 분포 획득

2.1 서치코일 장착

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

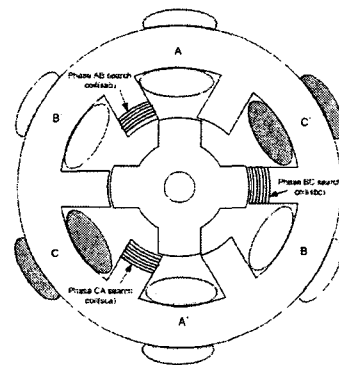


그림 1 서치코일이 장착된 TSRM의 구조

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 3

상의 서치 코일에 식 (1)과 같은 기전력이 유기된다. 이 유기기전력은 회전자와 고정자의 위치에 따라 변화된다. 이때 모터가 정지 상태에 있으면 서치 코일의 기전력은 식 (2)와 같이 변압기 형태의 기전력만 유기된다. 이 유기기전력은 정지상태에서 회전자의 위치정보를 내포하고 있다. 따라서 서치 코일의 유기기전력을 통해 회전자의 위치정보 예측이 가능해진다.

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

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

M_{as}, M_{bs} : 주권선과 서치코일의 상호 인덕턴스

i_a, i_b : 여자되고 있는 두개의 상전류

ω : 회전속도

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

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.

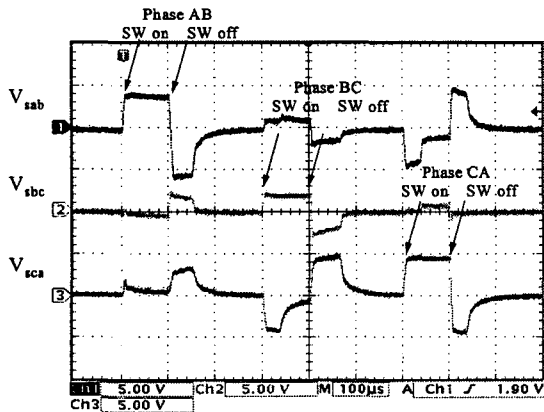


그림 2 단일펄스 입력에 대한 서치 코일 기전력
Fig. 2 Magnitude of the search coil EMFs

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 μs)으로 매우 빠르게 스위칭한다. 순간적인 단일 펄스 전압을 인가하면 모터는 계속 정지해 있고 전류는 미세하게 인가된다. 측정된 서치코일의 유기 기전력은 위치에 종속적인 관계를 가지므로 기준값으로 활용할 수 있다. 그림 2에서 모터 정지시 각 상에 인가된 펄스전압에 의한 세 상의 서치코일 유기기전력의 형태를 보여주고 있다.

회전자의 위치에 따라 서치 코일의 유기 기전력의 크기는 변화된다. 위치에 따른 기전력의 분포를 얻기 위하여 회전자의 모든 위치에 대해 각각 파형의 크기를 측정된 결과 그림 3에서와 같은 기전력 분포를 얻었다.

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 적용하고 식 (3)과 같은 성능평가 함수에 의해 성능을 비교하였다.

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

e_{pn} : Rotor Position Error at Position n

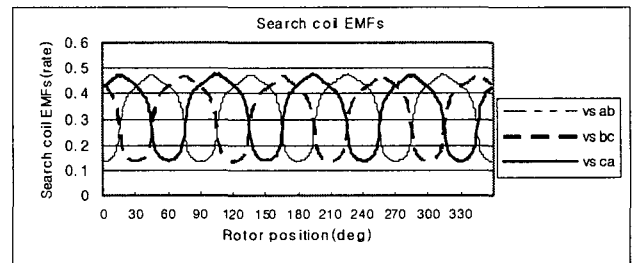


그림 3 회전자 위치에 따른 서치코일 유기기전력 분포
Fig. 3 Search coil EMFs according to rotor position

3. 퍼지 논리에 의한 위치 추정

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

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

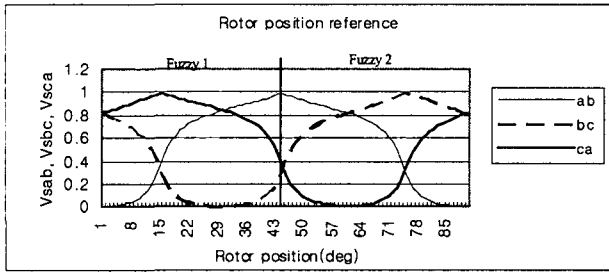


그림 4 퍼지규칙 적용을 위한 영역분할
Fig. 4 Division of area for determination of the fuzzy rules

먼저 Vsca와 Vsbc를 비교하여 그림 4와 같이 두 영역으로 분리한다. 즉, Vsca > Vsbc 인 경우는 제 1 퍼지 로직(Fuzzy 1), Vsca < Vsbc 인 경우는 제 2 퍼지 로직(Fuzzy 2)을 사용하는 것이다. 두 개의 영역은 그림 4에서 보는 것처럼 1° - 45°, 46° - 90°로 나뉘어졌다. 그리고 비교적 선형인 부분을 한 구간으로 취하여 퍼지 규칙을 정해 오차를 줄이는 방향으로 실시하였다. 시뮬레이션은 Matlab의 Fuzzy Tool Box를 사용하여 실시되었으며 전체적인 구조는 그림 5와 같다.

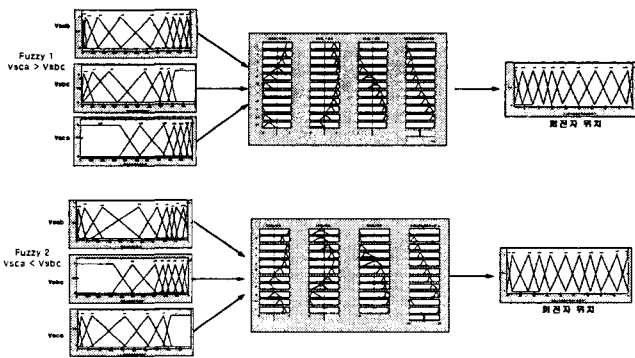


그림 5 퍼지로직의 전체 구조
Fig. 5 Architecture of the double Fuzzy logic structure

4. 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 회로망(Backpropagation Neural Net)을 사용한다.

두 개의 다층 신경회로망의 구조는 각각 입력 3개, 은닉뉴런 20개 그리고 출력뉴런은 1개의 세포로 구성하였다. 신경회로망의 학습율은 0.08로 하였으며 50,000회 반복 학습하였다.

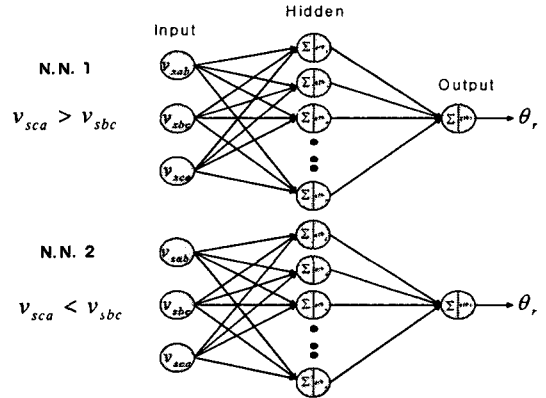


그림 6 신경망의 전체 구조
Fig. 6 Structure of the Neural Network

5. 유클리디안 제곱거리에 의한 위치 추정

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

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

여기서, $k = 0, 1, \dots, 89$

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° - 89°

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

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

위에서 기술한 것처럼 회전자의 위치를 추론하는 과정은 먼저 표준으로 획득된 $V_S - \theta_R$ 기준값과 임의의 위치에서 얻은 측정값의 유클리디안 제곱거리를 산출한다. 다음으로 이 값들을 비교하여 min 연산을 통해 가장 작은 유클리디안 제곱거리를 갖는 출력을 선택하여 회전자의 위치로 추론한다.

6. 회전자 위치추정 결과

6.1 퍼지 로직에 의한 시뮬레이션 결과

퍼지로직을 이용한 초기위치 추정 시뮬레이션 결과는 그림 7과 같다. 기계각으로 약 ±4° 정도의 오차를 가졌고 비교적 많은 오차로 판단되었다. 성능

평가 결과는 1483으로서 큰 값을 가짐으로써 정확도가 떨어짐을 알 수 있다.

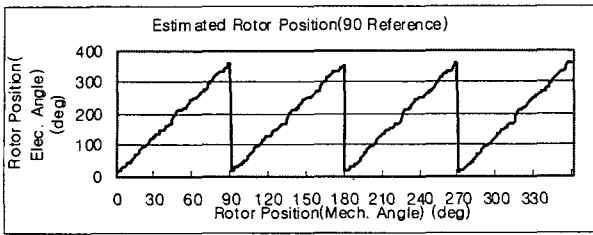


그림 7 추정된 회전자 위치
Fig. 7 Estimated rotor position

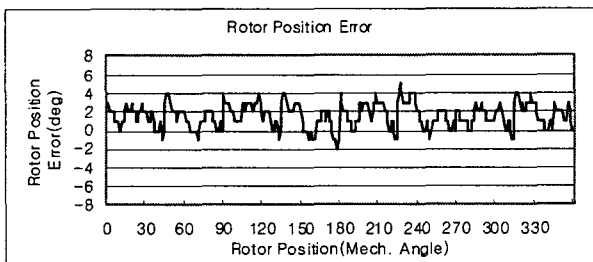


그림 8 위치 추정 오차
Fig. 8 Rotor position error

6.2 신경망에 의한 시뮬레이션 결과

신경망을 사용하여 회전자의 위치를 검출하는 단계에서는 전체적으로 약 $\pm 1-2^\circ$ 의 오차를 보이며 비교적 양호한 결과를 얻었다. 평가치는 254를 가진다.

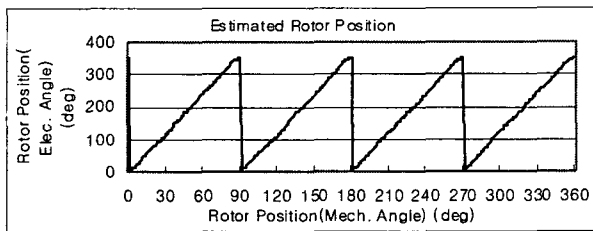


그림 9 추정된 회전자 위치
Fig. 9 Estimated rotor position

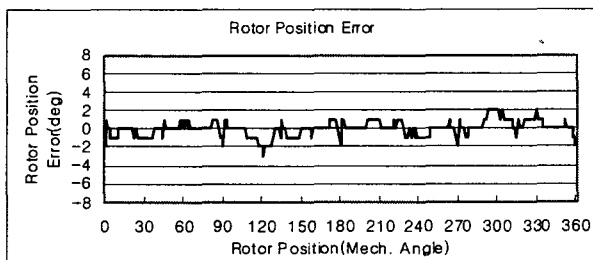


그림 10 위치 추정 오차
Fig. 10 Rotor position error

6.3 유클리디안 제곱거리에 의한 시뮬레이션 결과

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

그리고 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. 그리고 성능을 높이기 위해 360° 전체를 기준값으로 하여 보다 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

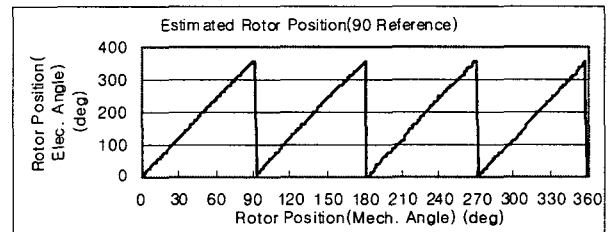


그림 11 추정된 회전자 위치
Fig. 11 Estimated rotor position

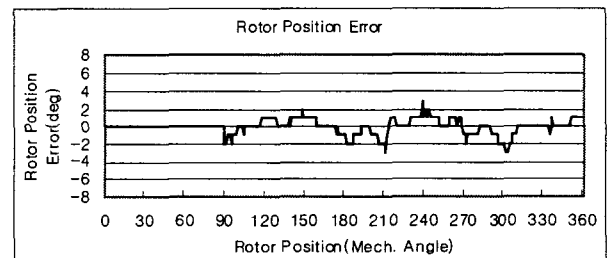


그림 12 위치 추정 오차
Fig. 12 Rotor position error

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

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

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 $120^\circ, 180^\circ, 210^\circ, 240^\circ, 300^\circ, 330^\circ$ 부근에서 오차가

발생함을 알 수 있다.

360°를 기준값으로 했을 경우(그림 13-14)는 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

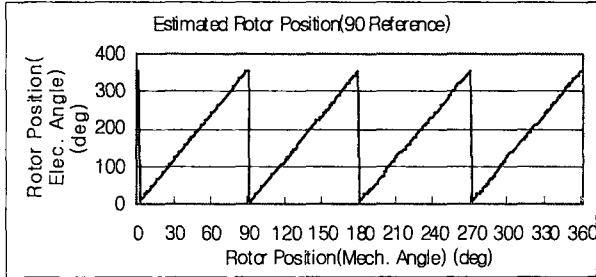


그림 13 추정된 회전자 위치(90°기준값)
Fig. 13 Estimated rotor position(90°reference)

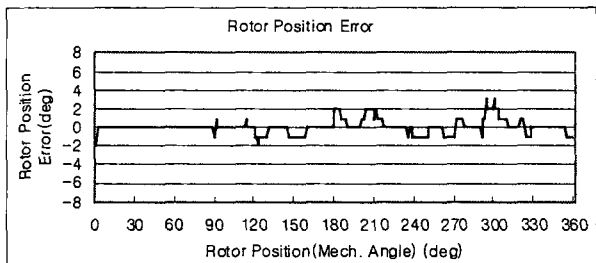


그림 14 위치 추정 오차(90°기준값)
Fig. 14 Rotor position error(90°reference)

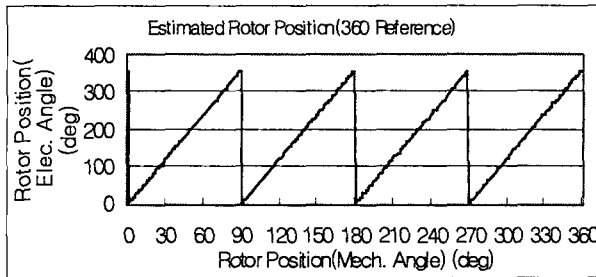


그림 15 추정된 회전자 위치(360°기준값)
Fig. 15 Estimated rotor position(360°reference)

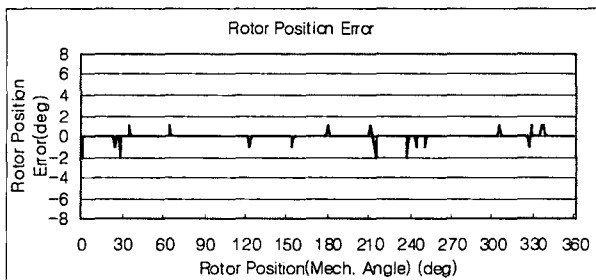


그림 16 위치 추정 오차(360°기준값)
Fig. 16 Rotor position error(360°reference)

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 |

표 2에서 보는 것과 같이 시뮬레이션과 실험결과 는 거의 비슷한 양상을 보이고 있으며 360도 기준 일 경우 사용되는 메모리가 많지만 좋은 성능을 보 여주고 있다.

360° 기준의 경우 모두 정확한 위치를 추정해야 하지만 전기적으로 같은 각도에서의 기준값이 모두 값이 같지 않고, 그 이웃하는 각과 비슷해지는 경 우가 발생하므로 항상 정확한 위치를 추정하지는 못한다. 모터의 공극이 일정하고 회전자와 고정자 가 균일하다면 모든 위치에서 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

7. 결 론

본 논문에서는 서치코일을 내장한 SRM의 정지 시 위치검출에 관한 것으로, 적절한 회전자의 위치 검출 방법을 찾는 과정으로 퍼지, 신경망, 유클리디 안 제곱거리의 세 가지 방법에 의한 위치추정 방법 을 제시하고 각각의 성능을 비교하였다.

시뮬레이션을 통하여 세 가지 방법에 의한 위치 추정 결과를 비교하였으며, 실험을 통하여 비교적 좋은 결과를 보인 유클리디안 제곱거리의 위치추정 성능의 우수성을 입증하였다.

이 논문은 전남대학교 고품질전기전자부품 및 시 스템연구센터의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 양형열, 김종건, 임영철, "서치코일을 이용한 토로이달 스위치드 릴럭턴스 모터의 회전자 위치 검출", 전력전자학회논문지, 제 7권, 제 6호, pp.537-545. 2002