

토로이달 SRM의 초기 회전자 위치검출을 위한 돌극 관통 서치코일

論文

53D-7-2

Interior Central Pole Search Coils for Initial Rotor Position Detection of a Toroidal SRM

梁 燊 烈* · 任 永 徹**
(Hyong-Yeol Yang* · Young-Cheol Lim**)

Abstract – In this paper, a detection technique of initial rotor position at a standstill in Toroidal Switched Reluctance Motor(TSRM) with built-in interior central pole search coil is proposed. In case search coils are used as a position sensor, it has many advantages like low cost, decrease in the volume, high robust characteristics and wide applications. However, the initial rotor position detection is very difficult because the search coil's EMF is not exist at a standstill. In this paper, a new detection method of initial rotor position is suggested using interior central pole search coil. The simulation and experiment for the proposed method and their results support the validity of the proposed scheme by verifying the operation of a 6/4 TSRM using search coils.

Key Words : Toroidal SRM, Search coil, Rotor position

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor: SRM)는 간단한 구조, 높은 효율, 높은 동작속도 등의 장점을 가지므로 최근에 전력용 반도체의 기술이 발전함에 따라 주목받고 있는 전동기라고 할 수 있다[1].

SRM에 있어서 회전자 위치 정보는 제어 목적을 위한 궤환으로서 필수적이다. 광 인터럽터 혹은 고정밀 엔코더와 같은 축 위치 센서가 흔히 회전자 위치를 결정하기 위해 사용되며 최근에는 아날로그 엔코더도 개발되고 있다[2-3]. 그러나 이런 위치 센서들은 복잡성과 소형 모터의 용용에 대해 추가적인 비용을 요구할 뿐 아니라 구동시스템의 신뢰도를 저하시키는 경향이 있다[4].

따라서 센서리스 제어 등 이러한 문제점을 해결하기 위한 여러 가지 방법들이 연구되어지고 있다[5-8]. 한편으로 SRM이나 TSRM을 기동(starting)하기 위해서는 정지 상태에서 회전자의 초기 위치를 반드시 알아야 구동이 가능하다. 초기 기동문제는 센서리스 구동에 있어서 또 하나의 연구할 대상이며, 이러한 문제는 인크리멘탈 엔코더를 사용하는 경우에서도 존재한다. 그리고 기동과정에서는 보다 신뢰성이 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[9-10]. 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.

본 논문에서는 돌극의 중앙에 홀을 뚫어 장착한 서치코일을 이용하여 회전자의 초기 위치를 추정하기 위한 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 회전자의 위치에 따라 서치 코일의 유기기전력이 다르다는 특성을 기반으로 한다. 먼저 회전자의 위치(θ_R)와 서치코일 유기 기전력(V_S)의 관계인 $V_S - \theta_R$ 기준값 확득단계로, 회전자가 정지해 있을 때 매 1° 마다 각 상에 짧은 시간 동안 펄스를 인가하여 서치 코일에 유기되는 기전력을 측정한다. 측정된 유기기전력은 위치에 종속적인 관계를 가지므로 기준값으로 활용할 수 있다. 예 측단계에서는 저장된 기준값과 측정된 기전력값의 유clidean distance를 이용하여 회전자의 위치를 추정한다. 실험에 앞서 실험방법의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였고 제안한 위치검출 방법에 대한 가능성을 확인하고 실험을 통해서 제안한 방법의 우수성을 증명하였다.

2. TSRM과 서치코일

그림 1은 본 논문에서 사용된 6/4 TSRM과 서치 코일을 나타내었다. 이 TSRM은 SRM의 한 종류로서 고정자의 요크 부분에 권선이 감긴 형태로 3상중 2개상이 동시에 여자되는 구간에서 릴럭턴스 토오크가 발생한다[11]. TSRM은 여자특성, 자속의 흐름을 고려하면, 일반 SRM의 돌극에 감겨있는 권선이 인접한 두 개의 요크에 나누어져 감겨있는 형상과 같다. 따라서 일반 SRM에서 임의의 돌극에 감겨있는 권선의 여자는 TSRM의 관점에서 보면 임의의 돌극 근

* 學生會員 : 全南大 工大 電氣工學科 工博

** 正 會 員 : 全南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2004年 2月 23日

最終完了 : 2004年 4月 29日

처의 두 개의 요크에 감겨있는 권선들을 여자 시킴을 의미 한다.

돌극 관통 서치코일은 돌극 중앙의 홀을 관통하여 한 돌극당 좌우로 두 개의 코일이 장착되어 있다. 홀의 크기는 작을수록 좋지만 본 논문에서는 작업의 편의상 반경 1.5mm로 하였다. 모터의 중심축에서 보았을 경우 중앙 홀을 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 각각 0.16mm, 10턴이 감겨있으며 회전 방향은 다르지만 회전자의 위치를 검출하여 구동하는 원리는 같다.

실험장치는 그림 2와 같이 DSP(TMS320F240), Inverter, 엔코더, 서치코일을 포함한 TSRM으로 구성되어 있다.

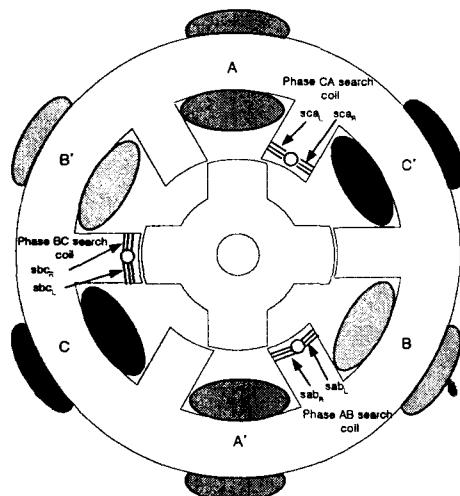


그림 1 TSRM과 장착된 서치코일

Fig. 1 Structure of the TSRM with interior central pole search coils

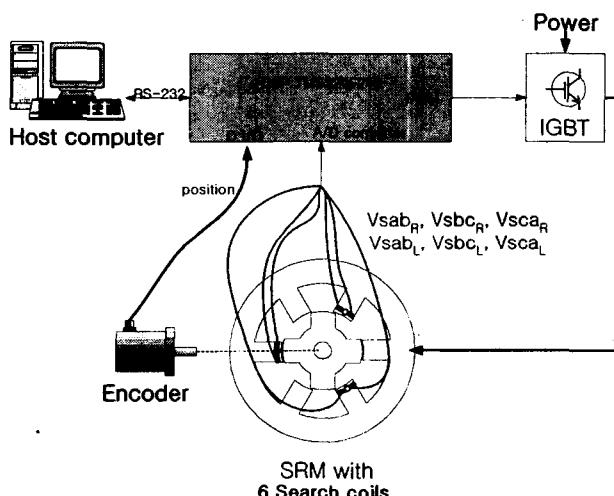


그림 2 전체 시스템 구성도

Fig. 2 System configuration of the experimental TSRM drive

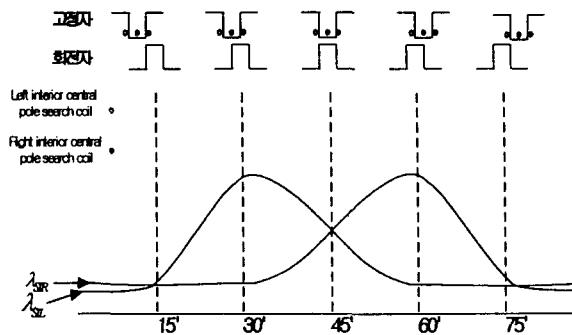


그림 3 회전자 위치에 따른 자속분포

Fig. 3 Fluxlinkage of the interior central pole search coils according to the rotor position

그림 3은 일정한 전류가 흐를 경우 돌극 관통 서치코일의 회전자 위치에 따른 자속분포를 나타낸다. λ_{sr} 는 우측 돌극 관통 서치코일의 자속, λ_{sl} 는 좌측 돌극 관통 서치코일의 자속을 나타내고 있다.

회전자가 코일이 감긴 부분까지 접근한 후부터 자속이 증가하고 있으며, 회전자와 고정자가 완전히 정렬되어 있는 상태에서도 계속해서 증가하고 있는 모습을 보인다. 그리고 회전자가 돌극 관통의 서치코일을 벗어나기 시작하는 시점부터 감소하기 시작한다. 여기에서 자속의 변화는 회전자의 위치정보를 포함하고 있음을 알 수 있고 서치코일의 유기기전력이 자속의 변화에 의존한다는 점에서 서치코일 기전력 역시 위치정보를 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

3. 회전자 위치 검출 방법

3.1 회전자 위치에 대한 기준값 생성

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 작성된 기준값 획득 프로그램을 이용하여 매 1°마다 각 상에 짧은 시간 동안 펄스를 인가하여 서치 코일에 유기되는 기전력을 측정한다. 이때 3상을 연속적으로 전류의 확립이 이루어지지 못하는 짧은 시간 간격으로 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.

한편 서치 코일에서는 상호 인덕턴스의 크기, 즉 고정자 돌극과 회전자 돌극이 겹쳐있는 정도에 따라 3상의 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 서치코일의 유기기전력을 통해 회전자의 위치정보 예측이 가능해진다.

본 논문에서 사용되는 SRM은 TSRM이므로 여자되고 있는 두 상의 자속변화에 의해 기전력이 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

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

$\lambda_{as}, \lambda_{bs}$: A, B상 전류에 의해 발생되는 서치코일 쇄교자속
 M_{as}, M_{bs} : 주권선과 서치코일의 상호 인덕턴스
 i_a, i_b : 여자되고 있는 두개의 상전류
 ω : 회전속도

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

그림 4는 TSRM의 회전자가 정지 상태일 때, 단일 펄스 전압을 인가 시 AB상 서치코일(V_{sab}), BC상 서치코일(V_{sbc}), CA상 서치코일(V_{sca})에 유기되는 기전력의 파형을 나타낸다. 펄스가 인가되는 시간은 $100\mu s$ 이며 그림 4에서는 $V_{sca} > V_{sab} > V_{sbc}$ 의 크기 순으로 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 정확도를 더욱 높이기 위해서 이와 같은 각 상의 펄스 열은 5회 씩 가해지며 이것의 평균값을 계산하여 V_{sab} , V_{sbc} , V_{sca} 를 취하게 된다.

회전자의 위치에 따라 서치 코일의 유기 기전력의 크기는 변화된다. 위치에 따른 기전력의 분포를 얻기 위하여 회전자의 모든 위치에 대해 각각 파형의 크기를 측정하였다.

좌측 돌극 관통 서치코일과 우측 돌극 관통 서치코일의 경우 측정된 유기 기전력의 $V_{S-\theta_R}$ 기준값 분포는 각각 그림 5, 그림 6과 같다.

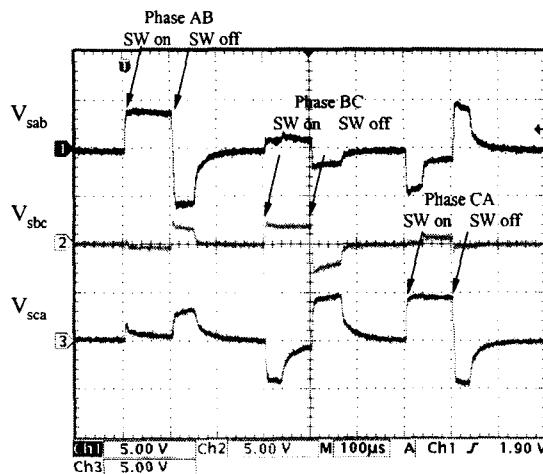


그림 4 단일펄스 입력에 대한 서치 코일 기전력
Fig. 4 Magnitude of the search coil EMFs

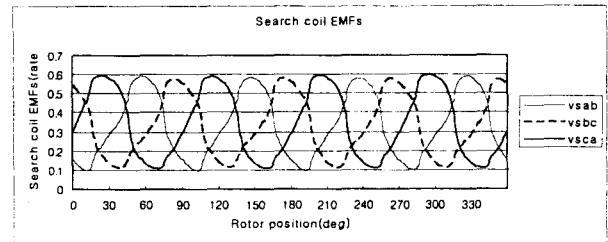


그림 5 회전자의 위치에 따른 좌측 돌극 관통 서치코일의 유기기전력 분포

Fig. 5 Search coil EMFs according to rotor position for left interior central pole search coil

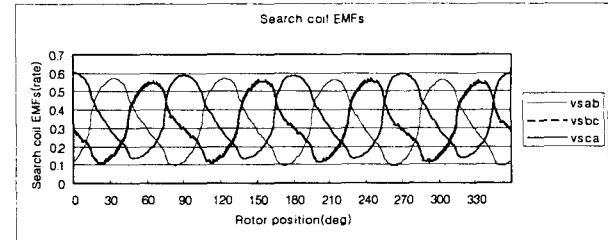


그림 6 회전자의 위치에 따른 우측 돌극 관통 서치코일의 유기기전력 분포

Fig. 6 Search coil EMFs according to rotor position for right interior central pole search coil

각 서치코일의 유기 기전력은 A/D 변환기를 통해 얻은 디지트(digit)값을 정규화 하여 전원전압의 변동에도 안정한 위치검출을 할 수 있도록 식 (3)을 통하여 수정한 값이며, 회전자가 기계적으로 0° 에서 90° 로 회전하면 전기적으로 0° 에서 360° 에 해당된다. 따라서 실제 $V_{S-\theta_R}$ 기준값은 89° 까지만 측정하면 된다. 하지만 본 논문에서는 다양한 실험을 위해 360° 전체의 기준값을 1° 단위로 측정하였다.

회전자의 위치를 검출하기 위한 펄스는 ab상, bc상, ca상 순으로 연속적으로 인가한다. 이때 절대적인 회전자의 위치를 알기 위해 엔코더를 이용한다. 엔코더는 1024ppr의 분해능을 가지며 DSP로 엔코더 펄스가 입력되면서 4체배 되어 4096의 분해능을 가지게 된다. 따라서 89° 까지는 1024의 펄스를 가지며 1펄스 당 0.088° (1° 당 11.378펄스)의 값을 갖는다.

$$\begin{aligned} V_{sab}' &= \frac{V_{sab}}{(V_{sab} + V_{sbc} + V_{sca})} \\ V_{sbc}' &= \frac{V_{sbc}}{(V_{sab} + V_{sbc} + V_{sca})} \\ V_{sca}' &= \frac{V_{sca}}{(V_{sab} + V_{sbc} + V_{sca})} \quad (3) \end{aligned}$$

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

그러나 $V_{S-\theta_R}$ 기준값 분포를 얻기 위해 1024개의 데이터를 모두 얻을 필요는 없다. 실제로 위치 추정을 위해 측정값을 입력받을 때 서치 코일의 기전력의 정밀도가 1° 이하를 구분할 정도로 정확하지는 않을 뿐만 아니라 회전자의 초기

위치 판별을 위해서는 1° 의 분해능이면 충분하기 때문이다.

그러나 이렇게 분해능이 높은 엔코더를 사용함으로써 각각도에 대한 보다 정확한 입력값을 얻을 수 있다.

실용적인 측면에서, 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 최소 오차를 가지는 위치 데이터를 추론하는 과정을 적용한다.

3.2 유클리디안 제곱거리

유클리디안 거리(Euclidean distance)는 다차원 공간에서 직선 최단거리를 말하며, 유클리디안 제곱거리는 이를 제곱한 것으로 두 벡터 x 와 y 사이의 거리는 식 (4)와 같다.

$$d(x, y) = \|x - y\|^2 = \sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2 \quad (4)$$

식(4)를 적용하기 위해, 정지해 있는 모터의 각 상에 짧은 펄스전압을 인가하여 각 서치 코일에 유기되는 기전력을 측정한다. 측정된 3상의 유기기전력은 식(5)와 같이 변형된 유클리디안 제곱거리를 이용하여 위치를 추정한다.

$$\begin{aligned} \theta_R = \min & [(V_{sab} * V_{sabk})^2 + (V_{sbc} * V_{sbck})^2 \\ & + (V_{sca} * V_{scak})^2] \quad (5) \\ k & = 0, 1, 2, \dots, 89 \end{aligned}$$

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), $0^{\circ} - 89^{\circ}$

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

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

위에서 기술한 것처럼 회전자의 위치를 추론하는 과정은 먼저 표준으로 획득된 $V_{S-\theta_R}$ 기준값과 임의의 위치에서 얻은 측정값의 유클리디안 제곱거리 산출한다. 다음으로 이 값을 비교하여 \min 연산을 통해 가장 작은 유클리디안 제곱거리를 갖는 출력을 선택하여 회전자의 위치로 추론한다. 즉 임의의 위치에 회전자가 위치해 있을 때 단일펄스를 입력하여 얻은 각 상의 서치코일 유기기전력과 이미 획득된 각 각도에 대한 $V_{S-\theta_R}$ 기준값($0^{\circ} - 89^{\circ}$)의 유클리디안 제곱거리를 모두 계산하여, 이중에서 가장 작은 값을 가지는 위치를 현재 회전자의 위치로 결정하는 것이다. 이 모든 과정은 식 (5)를 통해 이루어지게 된다.

4. 시뮬레이션

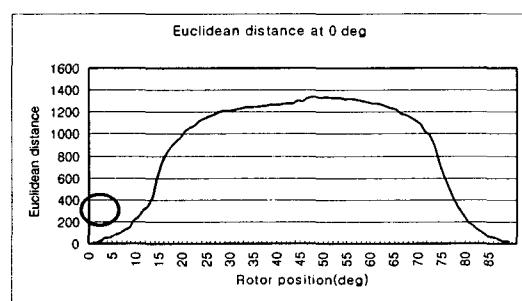
제안된 방법의 유용성을 검증하기 위해 다음과 같이 시뮬레이션을 수행하였다. 좌측, 우측 서치코일의 모든 조건이 같고 방향만 반대이므로 시뮬레이션은 우측 돌극 관통 서치코일에 대해서만 실시되었다. 실제 얻은 위와 같은 회전자 위치에 대한 서치코일 유기전압을 입력으로 시뮬레이션을 실시하여 오차의 정도를 파악하고, 최종적으로 평가함수를 사용하여 그 성능을 평가하였다.

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 (6)과 같으며, 임의의 한 위치에서 추정된 회전자 위치 오차가 크면 평가함수 값이 오차의 자승에 비례하여 커지게 되며 그 값이 클수록 좋지 않은 결과임을 의미한다.

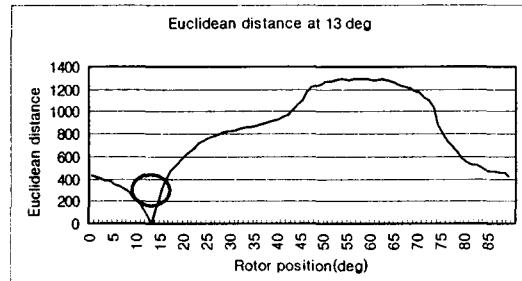
$$J = \sum_{n=0}^{359} (e_{pn})^2 \quad (6)$$

e_{pn} : Rotor Position Error at Position n

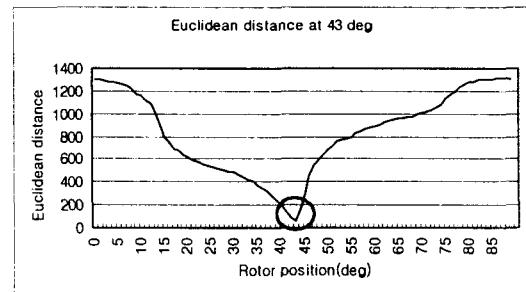
그림 7은 시뮬레이션 수행 과정을 보여준다. $V_{S-\theta_R}$ 기준값이 그림 4, 5와 같고 회전자가 임의의 위치($0^{\circ}, 13^{\circ}, 43^{\circ}, 68^{\circ}$)에 있을 경우에 대한 시뮬레이션을 실시한 결과, 그림 7에서 각 회전자의 위치에서 가장 작은 유클리디안 제곱거리 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 시뮬레이션에 의해서 제안한 방법에 의한 회전자의 위치 추정 결과가 아주 우수함을 알 수 있다.



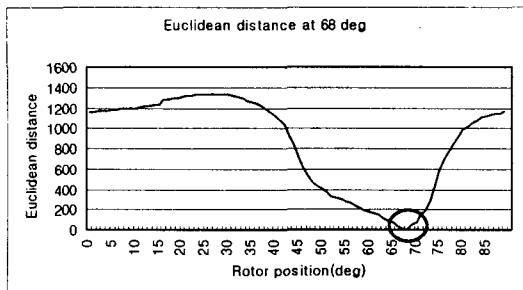
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7. 유클리디안 제곱거리를 이용한 회전자의 위치 추정 과정: (a): 0° , (b): 13° , (c): 43° , (d): 68° 에 회전자가 위치한 경우

Fig. 7 Rotor position estimation using Euclidean distance; (a): at 0° , (b): at 13° , (c): at 43° , (d): at 68°

5. 시뮬레이션 및 실험 결과

5.1 시뮬레이션 결과

$V_{S-\theta_R}$ 기준값이 그림 4, 5와 같이 획득되었을 경우, 모든 회전자의 위치에 대한 위치추정을 위한 시뮬레이션 결과를 그림 8 - 그림 9에 나타내었다. 그림 8은 엔코더를 이용하여 측정한 회전자의 실제위치이며, 그림 9는 제안된 방법에 의해 추정된 회전자의 위치를 나타낸다. 그림 10에서 그 오차를 보여주고 있다. 이것은 0° 에서 89° 가 전기적으로 0° 에서 359° 가 되므로 0° 에서 89° 까지의 기준값만으로 시뮬레이션을 실행한 결과이다. 식 (6)에서 알 수 있듯이 시뮬레이션에서는 360° 모두를 기준값으로 할 경우에는 오차는 나타나지 않게 되며, 만일 0° 에서 89° 까지의 기준값이 다른 영역 ($90^\circ-180^\circ$, $180^\circ-270^\circ$, $270^\circ-360^\circ$)의 기준값과 모두 같다면 오차는 나타나지 않을 것이다. 하지만 미세한 회전자의 위치변화, A/D 변환기의 오차, 회전자 및 고정자의 불균일, 유기 기전력의 미세한 진동 등에 의해 약간씩 다른 값을 가지기 때문에 약간의 오차를 나타내게 된다.

시뮬레이션은 그림 8-그림11에서 보는 것과 같이 89° 까지는 모든 각에서 정확하게 나타났다. 그리고 90° 이후부터 약간씩 오차를 갖게 된다. 성능평가 결과는 44를 나타냈으며 오차가 고루 분포되어 있고 모두 1° 이내의 오차이므로 회전자의 위치를 파악하여 구동하는데 있어서는 큰 문제가 없다고 할 수 있다.

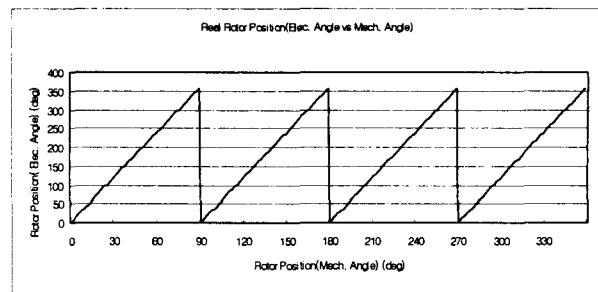


그림 8 엔코더에 의해 측정된 회전자 위치

Fig. 8 Measured rotor position with an encoder

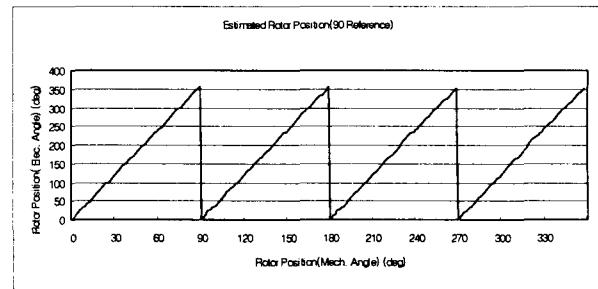


그림 9 제안된 방법에 의해 추정된 회전자 위치

Fig. 9 Estimated rotor position

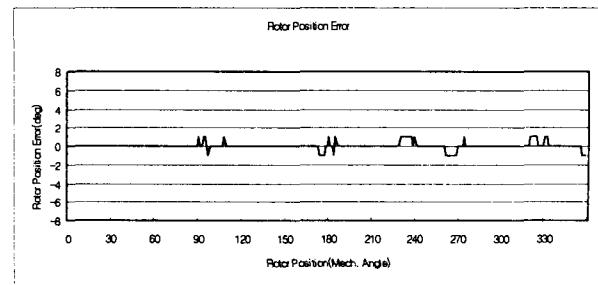


그림 10 추정된 회전자 위치 오차

Fig. 10 Rotor position error

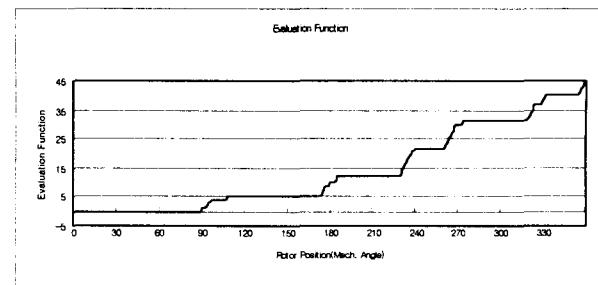


그림 11 성능평가 결과

Fig. 11 Evaluated result

기준값을 설정하는 과정에서 0° - 89° 까지의 서치코일 유기전압을 이용하였던 것을 정확도를 높이기 위해 전기적으로 같은 각도인 4개 각의 평균값을 이용하여 기준값을 설정하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 평균값을 기준값으로 취할

경우 성능평가 결과가 14로 0° - 89° 의 기준값을 사용했을 경우보다 더 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 그림 12 - 그림15는 평균값 기준 시뮬레이션 결과를 보여준다.

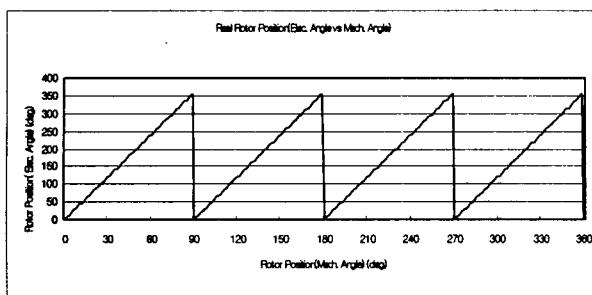


그림 12 앤코더에 의해 측정된 회전자 위치
Fig. 12 Measured rotor position with an encoder

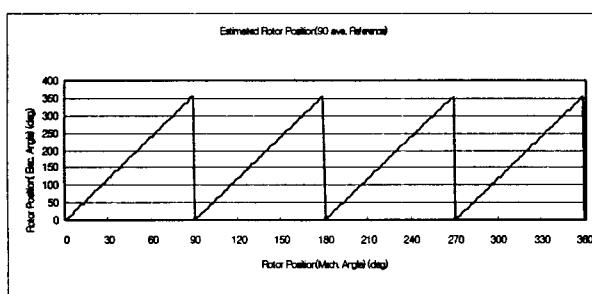


그림 13 제안된 방법에 의해 추정된 회전자 위치
Fig. 13 Estimated rotor position

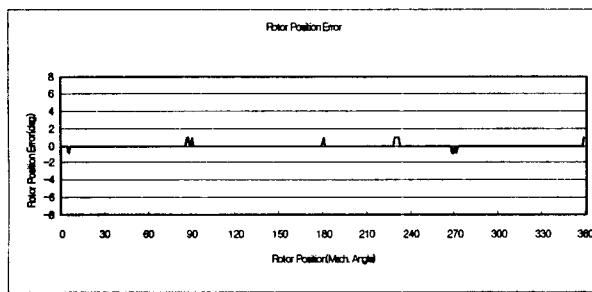


그림 14 추정된 회전자 위치 오차
Fig. 14 Rotor position error

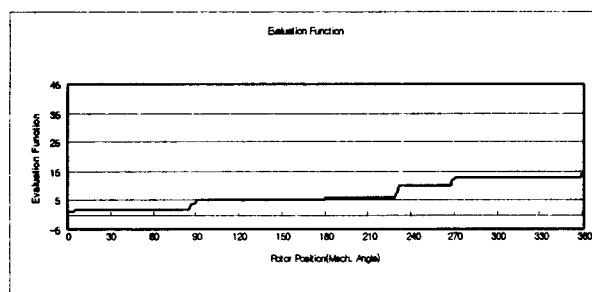


그림 15 성능평가 결과
Fig. 15 Evaluated result

표 1 기준값 선정 방법에 따른 회전자 위치 추정 결과
Table 1 Result of the rotor position estimation according to the reference

추정 방법	오차 합계	성능 평가	사용 메모리
360° 기준	0	0	360×3
90° 기준	44	44	90×3
평균값 기준	14	14	90×3

유클리디안 제곱거리 이용시 기준값 선정에 따른 시뮬레이션 결과는 표 1과 같다.

오차 합계와 성능 평가치의 값이 같은 것은 오차가 모두 1° 이하라는 것을 의미한다. 위 결과를 고려할 때 정확도가 중요시 되는 경우에는 360° 기준값을 사용하고 약간의 오차를 허용하는 경우에는 평균값 기준을 사용하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

5.2 실험 결과

SRM이 정지상태에 있을 경우 유클리디안 제곱거리를 이용하여 회전자의 위치를 검출한다. 정확성을 높이기 위해 기준값을 360개 모두를 사용한 경우와 메모리 사용량을 줄이기 위해 90개의 기준값을 사용한 경우, 그리고 90개의 평균값만을 사용한 경우 모두에 대해 실험을 실시하였다.

5.2.1 360도 기준(우측 돌극 관통 서치코일)

우측 돌극 관통 서치코일의 경우 시뮬레이션에서도 이미 결과를 예측한 것과 같이 평가 결과값은 6을 기록하여 가장 좋은 결과를 보였다.

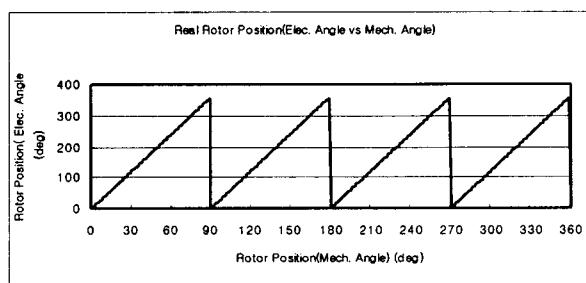


그림 16 앤코더에 의해 측정된 회전자 위치
Fig. 16 Measured rotor position with an encoder

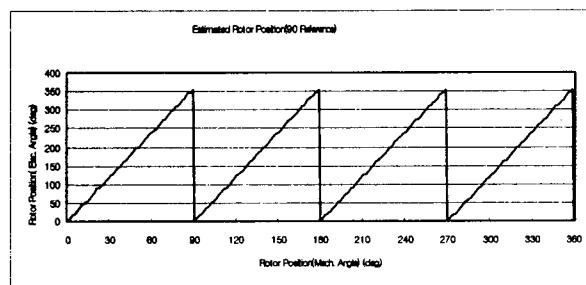


그림 17 제안된 방법에 의해 추정된 회전자 위치
Fig. 17 Estimated rotor position

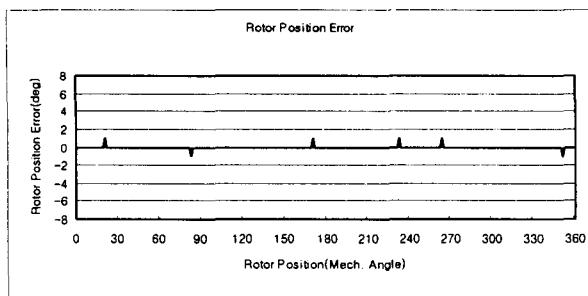


그림 18 추정된 회전자 위치 오차

Fig. 18 Rotor position error

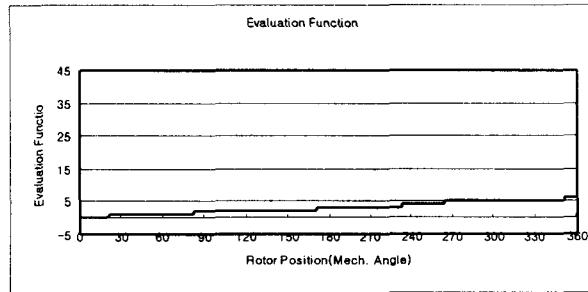


그림 19 성능평가 결과

Fig. 19 Evaluated result

5.2.2 90도 기준(우측 돌극 관통 서치코일)

그림 20 ~ 그림 23은 90도 기준값을 이용한 실험결과를 나타낸다.

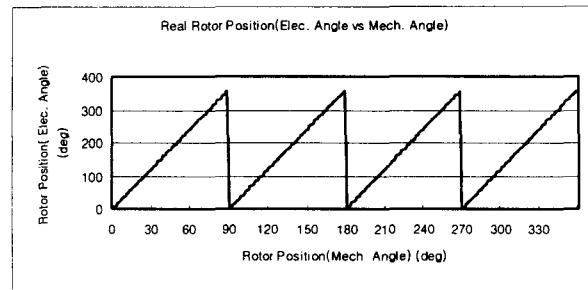


그림 20 엔코더에 의해 측정된 회전자 위치

Fig. 20 Measured rotor position with an encoder

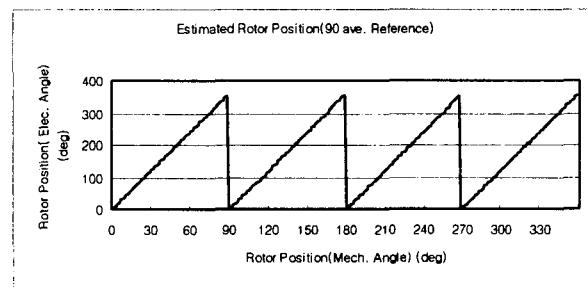


그림 21 제안된 방법에 의해 추정된 회전자 위치

Fig. 21 Estimated rotor position

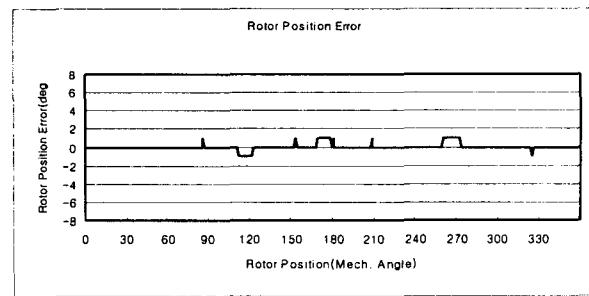


그림 22 추정된 회전자 위치 오차

Fig. 22 Rotor position error

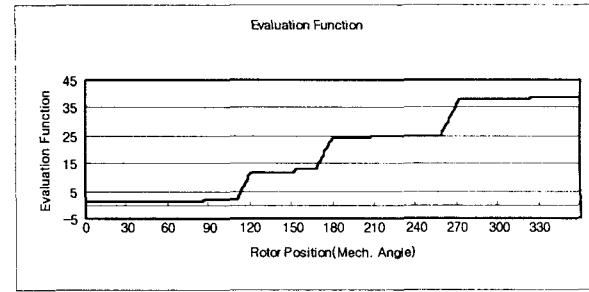


그림 23 성능평가 결과

Fig. 23 Evaluated result

이 경우 90°까지는 거의 정확한 위치추정을 하고 있으나, 그 이후에는 공극의 불균형으로 인해 전기적으로 같은 각도에서도 정확한 값을 얻지 못하는 경우가 발생하고 있다.

실험 결과에서는 전기적으로 0° 위치인 180°, 270° 부근에서 약간의 오차를 보이고 있으며 한 상이 최소의 인덕턴스를 갖는 구간인 30° 부근에서도 약간의 오차를 가지고 있다.

이 방법은 평가치 39로서 비교적 오차가 큰 편이므로 사용하지 않는다.

5.2.3 평균값 기준(우측 돌극 관통 서치코일)

전기적으로 동일한 각도의 평균값들을 기준으로 하여 실험한 결과 아주 우수한 성능을 보여주었다. 평가치는 18로서 같은 90개의 데이터를 이용하여 위치를 추정하는 90° 기준인 경우의 반밖에 되지 않는다. 따라서 메모리를 우선으로 하는 경우에는 이 방법이 적격이라 할 수 있다.

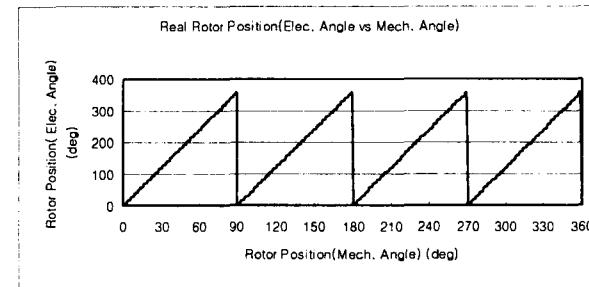


그림 24 엔코더에 의해 측정된 회전자 위치

Fig. 24 Measured rotor position with an encoder

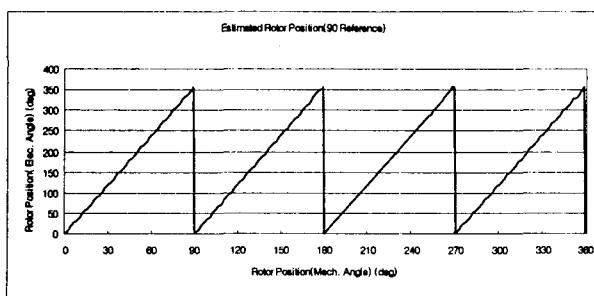


그림 25 제안된 방법에 의해 추정된 회전자 위치

Fig. 25 Estimated rotor position

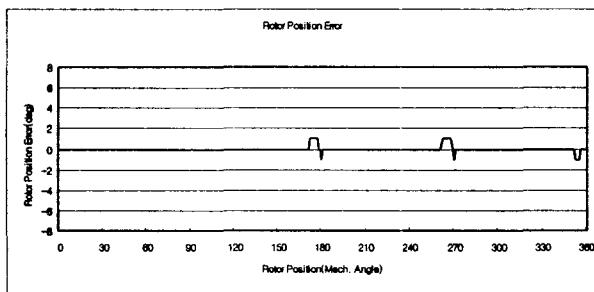


그림 26 추정된 회전자 위치 오차

Fig. 26 Rotor position error

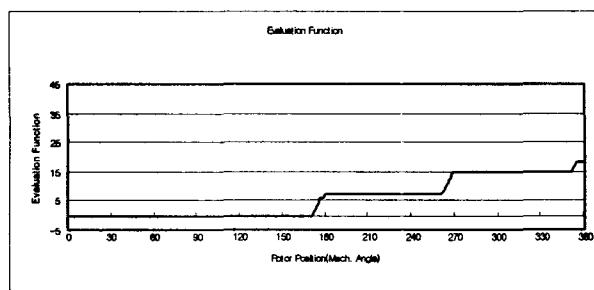


그림 27 성능평가 결과

Fig. 27 Evaluated result

5.2.4 초기값 추정 결과 분석

초기값 추정 결과는 표 2와 같이 나타남을 볼 수 있다. 시뮬레이션과 실험결과는 거의 비슷한 양상을 보이고 있으

표 2 시뮬레이션과 실험에 의한 위치추정 결과

Table 2 Comparison of simulation and experimental results

추정 방법	시뮬레이션		실험		사용 메모리
	오차 합계	성능 평가	오차 합계	성능 평가	
360도 기준	0	0	6	6	360×3
90도 기준	44	44	39	39	90×3
평균값 기준	14	14	18	18	90×3

며 360도 기준일 경우 가장 성능이 좋지만 사용되는 메모리가 많고, 평균값 기준일 때 메모리대비 성능이 가장 좋은 것

으로 나타났다.

360도 기준의 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 모든 위치에서 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

5.2.5 360도 기준(좌측 돌극 관통 서치코일)

좌측 돌극 관통 서치코일에 대해서는 가장 성능이 좋은 360도 기준값에 대해서만 실험이 실시되었다. 좌측 돌극 관통 서치코일의 경우에도 우측 돌극 관통 서치코일과 거의 비슷한 수준의 오차가 발생하였다.

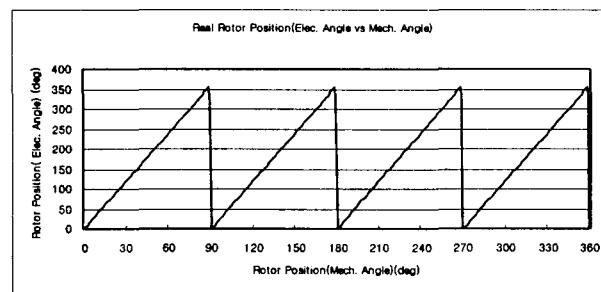


그림 28 엔코더에 의해 측정된 회전자 위치

Fig. 28 Measured rotor position with an encoder

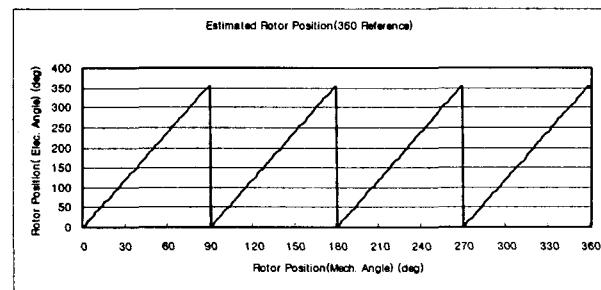


그림 29 제안된 방법에 의해 추정된 회전자 위치

Fig. 29 Estimated rotor position

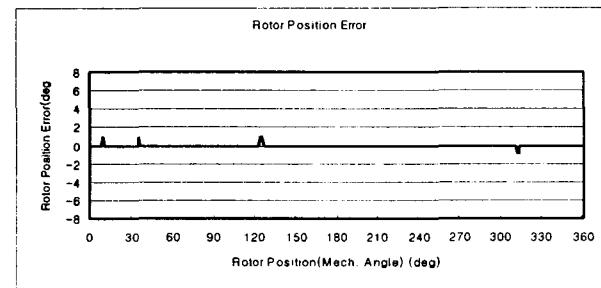


그림 30 추정된 회전자 위치 오차

Fig. 30 Rotor position error

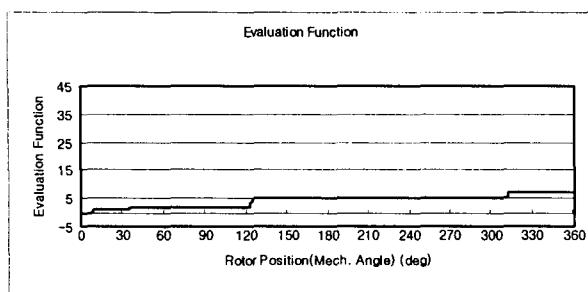


그림 31 성능평가 결과

Fig. 31 Evaluated result

그림 28 - 그림 31에서 보는 바와 같이 평가 결과값은 7을 기록하여 역시 좋은 결과를 보였다. 이 실험 결과는 우측 돌극 관통 서치코일과 마찬가지로 매우 정확한 위치 추정을 하고 있다는 것을 보여주며 거의 같은 특성을 가진다고 볼 수 있을 것이다.

5.2.6 오차 분석 및 고찰

우측 돌극 관통 서치코일의 경우에는 주로 20° , 80° , 170° , 230° , 260° , 350° 부근에서 오차가 발생하고 좌측 돌극 관통 서치코일의 경우에는 10° , 35° , 125° , 310° 부근에서 주로 오차가 발생하였다. 이는 그림 5, 6에서 보는 바와 같이 위의 각도에서 한 상 또는 두 상의 기울기가 너무 완만하여 $1^\circ\text{--}2^\circ$ 정도의 각도는 거의 비슷한 값의 서치코일 기전력을 가지기 때문에 분석된다. 실험에서 보여준 결과는 시뮬레이션의 결과와 매우 유사하다는 것을 알 수 있다.

성능평가 결과를 볼 때 우측 돌극 관통서치코일에서 360도 기준일 경우는 6, 90도 기준일 경우는 39, 평균값 기준일 경우는 18로 나타났고, 좌측 돌극 관통서치코일에서는 360도 기준일 경우 7로 나타났다. 이 모든 경우에 오차합계와 성능평가의 값이 같으므로 모든 위치에서의 회전자 위치오차는 1° 이하이며 이것은 초기위치를 추정하여 기동하기에 적합한 조건이 된다고 할 수 있다. 하지만 연산시간이나 메모리 사용량이 같은 조건에서는 보다 적은 오차를 가지는 것이 바람직하므로 90도 기준인 경우는 사용하지 않고 평균값 기준을 사용한다. 그리고 메모리나 연산양이 중요시되지 않는 곳에서는 오차를 최소화하기 위해서 360도 기준값을 사용하는 것이 적합할 것이다.

6. 결 론

본 논문에서는 돌극의 중앙에 훌을 뚫어 장착한 서치코일을 이용하여 회전자의 초기 위치를 추정하기 위한 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 회전자의 위치에 따라 서치 코일의 유기기전력이 다르다는 특성을 기반으로 한다. 회전자의 위치(θ_R)와 서치코일 유기 기전력(V_S)의 관계인 $V_S-\theta_R$ 기준값 획득단계와 저장된 기준값과 측정된 기전력값의 유clidean 제곱거리(Squared Euclidean Distance)를 이용하여 회전자의 위치를 추정하는 예측단계를 통하여 회전자의 위치를 추정하게 된다.

시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 실용 가능성 및 성능을

보여주었고, 실험을 통해 회전자의 실제 위치와 추정위치를 비교한 결과 매우 적은 오차를 나타냄으로써 제안한 방법의 정확성과 유용성을 입증하였다.

제안된 방법을 SRM에 적용하면 회전자의 초기 위치를 임의의 상에 강제로 고정해야 하는 강제정렬방식의 문제점이 극복될 것이다. 뿐만 아니라, 회전자의 초기위치를 보다 정밀하게 알 수 있으므로 정밀한 초기 기동이 가능하여 SRM의 성능향상이 예상된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 전남대 고품질전기전자부품 및 시스템연구센터 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 안진우, “스위치드 릴릭턴스 전동기”, 오성미디어 2001.
- [2] 홍정표, 박성준, 권순재, “디지털 아날로그 혼합형 고정도 엔코더 개발”, 전력전자학회논문지, 제8권, 제6호, pp. 512-518, 2003.
- [3] Jin-Woo Ahn and Sung-jun Park, “An Analog Encoder for Precise Angle Control of SRM”, Journal of Power Electronics, KIPE, Vol.3, No.3, pp. 167-174, 2003.
- [4] T.J.E. Miller, “Switched Reluctance Motors and Their Control”, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993.
- [5] 양형열, 김종건, 임영철, “서치코일을 이용한 토로이달 스위치드 릴릭턴스 모터의 회전자 위치 검출”, 전력전자학회논문지, 제 7권, 제 6호, pp.537-545, 2002.
- [6] 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, Oct. 2000.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] K-B. Kim, “Toroidal Switched Reluctance Motor part 1. fundamentals”, Korea-Germany symposium 11, pp. 135-141, 1998.

저자 소개



양형열 (梁熒烈)

1969년 5월 27일생. 1993년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1993년~1994년 현대자동차(주) 근무. 1998년 전남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동대학원 졸업(박사). 현재 한국과학재단 지정 전남대학교 고품질전기전자부품 및 시스템연구센터 연구원.

Tel : 062) 530-3921

E-mail : sfish@chonnam.ac.kr



임영철 (任永徹)

1953년 4월 23일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년 호주 모나시대학 Visiting Scholar. 현재 전남대 전기공학 교수. 한국과학재단 지정 전남대 고품질전기전자부품 및 시스템 연구센터 소장.

Tel : 062) 530-1743

E-mail : yclim@chonnam.ac.kr