

## 이원관측기를 이용한 스위치드 릴럭턴스 모터의 위치 추정

신재화  
인천전문대학

### Position Estimation of Switched Reluctance Motors Using Binary Observer

Shin Jae Hwa  
Inchon City College

**Abstract** - The binary observer estimates the rotor position and rotor flux with alleviation of the high-frequency chattering, and retains the benefits achieved in the conventional sliding observer, such as robustness to parameter and disturbance variations. The position sensorless control of SRM under the load and inductance variation is verified by the experimental results.

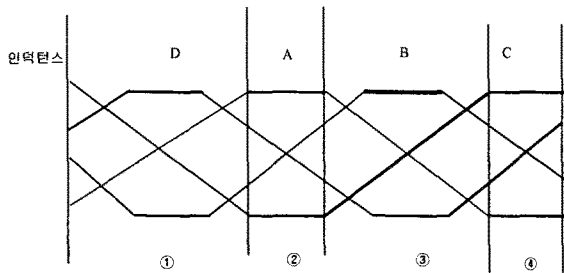
#### 1. 서 론

이원관측기[1]는 파라미터의 변동 및 외란에 대한 강인한 슬라이딩 관측기의 장점을 그대로 유지하면서 채터링 저감을 동시에 성취할 수 있게 되었으며, 인덕턴스 변동 및 부하가 변동하는 상태에서도 위치 추정이 우수함을 실험을 통하여 확인하였다.

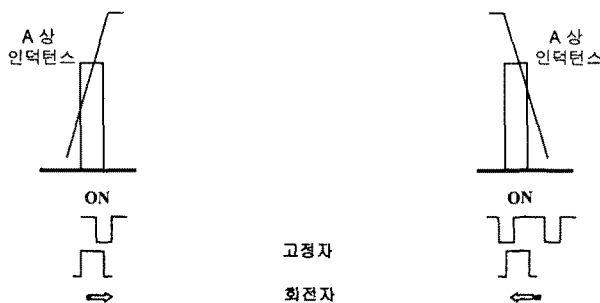
#### 2. 본 론

##### 2.1 SRM의 초기위치 설정법

SRM구동의 경우 초기위치를 파악하는 것은 중요하다. 초기 위치에 따라 최초의 여자상이 결정되기 때문이다.



〈그림 1〉 위치에 따른 A, B, C 상의 인덕턴스



〈그림 2〉 여자시 위치변동 (상승인덕턴스)

〈그림 3〉 여자시 위치변동 (하강인덕턴스)

SRM의 동작원리의 특성상, 한상 여자시 릴럭턴스가 최소로 되는 방향으로 회전하려는 성질을 이용하여, 회전자의 어떠한

위치에서도 한상에 일치시킬 수 있다.

[그림 1]은 회전자 위치에 대한 고정자 권선의 인덕턴스를 나타내고 있다. [그림 1]의 인덕턴스에서 알 수 있는바와 같이 ①, ②, ③의 어떤 영역에서든지 토크를 발생시킬 수 있다.

①의 영역에서는 A상이 양의 토크(Positive Torque)를 C상이 부의 토크(Negative Torque)를 발생하고, ②의 영역일 때는 B상과 D상이 토크를 발생시킬 수 있다.

얼라인(Align)위치(인덕턴스가 큰 위치)에 있는 고정자에 간쪽의 펄스전압을 인가하면, 권선에 흐르는 전류는 작고, 전류변화를 또한 작다. 그러나 동일한 크기와 듀티(Duty)를 갖는 전압을 언얼라인(Unalign)위치에 있는 고정자에 인가하면 그 반대 현상이 일어난다. 즉, 인덕턴스가 작기 때문에 권선에 흐르는 전류도 크고, 변화율 또한 크다.

얼라인 및 언얼라인 위치에서는 인덕턴스가 일정하므로, 토크가 발생하지 않고, 역기전력도 발생하지 않게 된다. 따라서 회전을 고정자의 어느 한상에 얼라인시키기 위해서는 전류가 상대적으로 가장 작게 흐르는 위치로 회전자를 이동시키면 된다.

본 연구에서는 [그림 2]와 [그림 3]에 보인 것과 같이 A상에 얼라인하도록 하였다.

[그림 1]의 ①의 영역에서는 A상은 양의 토크영역(Positive Torque Region)이므로, [그림 2]와 같이 일정 듀티(Duty)를 갖는 펄스(Pulse)전압을 인가하면 토크가 발생하여, 인덕턴스가 증가하는 방향인 화살표방향으로 이동하고, 결국 전류가 최소화 되는 얼라인 위치에 A상은 고정된다.

또한 ②의 영역일 경우도 마찬가지로 [그림 3]과 같이 여자하게 되면, 부 토크가 발생하여, 화살표 방향인 왼쪽방향으로 이동하고 결국, A상에 얼라인된다. ②의 영역에서는 ①과 ②의 영역에서처럼 A상만을 여자시켜서는 토크가 발생하지 않으므로, 먼저 D상을 여자하여 회전자를 D상 고정자에 일치시킨 다음, [그림 1]과 같이 하면, A상에 고정시킬 수 있다.

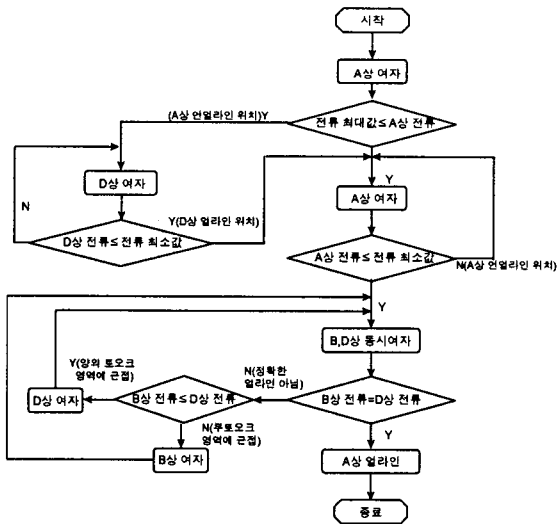
그러나, ②의 영역에서는 다르다. A상은 정확하게 얼라인 되어 있지는 않지만 인덕턴스가 일정한 구간에 있으므로, 토크를 발생하지 못한다. A상의 여자만으로는 정확하게 회전자와 고정자를 일치시키는 것은 불가능하다.

따라서, 토크를 발생시킬 수 있는 B상과 D상을 이용한다. ①, ②, ③의 영역에서의 인가전압과 동일한 듀티의 전압을 B와 D상에 인가하면, 두 상의 발생 토크 차에 의하여 회전자가 회전하게 되므로, 회전하지 않을 정도의 듀티를 갖는 전압을 동시에 B와 D상에 인가하면, 두 상의 전류는 차이가 있게 된다. 이 차이는 회전자가 ①의 영역에 근접하고 있는지 ②의 영역에 근접하고 있는지를 판별할 수 있게 한다.

B상 전류가 D상 전류보다 크다면(B상 인덕턴스가 D상 인덕턴스보다 작다), 회전자는 ①의 영역에 근접하고 있다고 판단하고, B상을 ①, ②, ③영역에서 A상에 인가한 전압 듀티보다 는 작고 B, D상 동시 인가 듀티보다는 큰 전압을 B상에 인가하면, 토크가 발생하여 회전자가 A상에 얼라인 될 것이다. 그 반대의 경우에도 B상에서와 동일한 방법으로 D상을 여자한다. 이러한 동작을 반복 수행하면, 거의 정확하게 A상을 일치시킬 수 있다. 그러나 이러한 방법은 전류의 측정오차에 따라 크나큰 영향을 받게 된다.

본 연구에서는 속도 및 위치센서없이 속도제어를 실현하므로, 상기의 방법으로 초기 위치를 설정하고, B상을 최초 여자상으로 하여 초기 구동을 시작하였다.

상기의 방법을 플로차트(Flowchart)로 하면, [그림 4]와 같다.



〈그림 4〉 초기위상 설정 플로차트

먼저 A상을 여자하여 회전자가 열라인 위치에 있는지 언얼라인 위치에 있는지를 판별한다. A상의 전류가 실험을 통하여 구한 최대 전류값보다 크다면, 언얼라인 위치에 있고, 작다면 양 또는 부의 토크 영역에 있게 된다. 만약 언얼라인 위치에 있다면 D상을 턴-온하여 회전자를 D상에 열라인하고, 다시 A상의 전류를 인가하여 A상에 열라인한다. 이 때 A상의 전류는 최소 전류값보다 작거나 같아야 한다

다음으로 B와 D상을 동시에 여자하여 각 전류가 동일한지(A상에 정확하게 열라인), 다른지(정확한 열라인이 아님)를 판별한다. 판별 결과 B상과 D상 전류가 같지 않다면, B상 전류와 D상 전류를 비교한다.

만약 B상전류가 크다면(A상 양의 토크 영역에 회전자는 근접되어 있다) B상을 여자하여 정확하게 회전자와 고정자를 일치시킨다. B상의 전류가 작다면 반대로 D상을 상기와 같이 실행하여 정확하게 열라인시킨다.

## 2.2 진상각 결정법

진상각 결정법에 대하여 상세히 기술하면 전동기의 전류방정식으로부터 상전류(실제전류)가 지령전류로 상승 및 하강하는 시간을 구하고 그에 따라 턴-온 진상각( $\theta_{oad}$ )과 턴-오프 진상각( $\theta_{off ad}$ )을 결정한다[2].

식 (1)의 전류에 대한 상태방정식의 해를 구하면 식 (2)와 같다, 이를 시간에 대하여 정리하면 식(3)과 같다.

$$V = R_n i_n + L_n \frac{di_n}{dt} + \frac{\partial L_n}{\partial \theta_n} \omega i_n \quad (1)$$

$$i_n(t) = \frac{V - E_n}{R_n} + \left( i_{no} - \frac{V - E_n}{R_n} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

여기서,  $E_n = \omega \frac{dL_n}{d\theta_n} i_n$ ,  $\omega$ : 회전자 각속도

$$t_{ad} = -\frac{L_n}{R_n} \ln \left( \frac{i_{nref} - \frac{V - E_n}{R_n}}{i_{no} - \frac{V - E_n}{R_n}} \right) \quad (3)$$

여기서,  $i_{nref}$ : 상전류의 지령치

$t_{ad}$ : 진상각 인가 시간

$i_{no}$ : 상전류의 초기치(실제전류)

상전류의 초기치는 영이므로 식 (3)을 다시 정리하면 식 (4)

와 같다. 지령전류( $i_{nref}$ )와 역 기전력을 이용하여 전류의 상승시간을 구하고, 식 (5)로부터 턴-온 진상각을 구한다. 식 (5)에 의한 점호각은 식 (6)과 같다.

$$t_{on ad} = -\frac{L_n}{R_n} \ln \left( \frac{i_{nref} - \frac{V - E_n}{R_n}}{-\frac{V - E_n}{R_n}} \right) \quad (4)$$

여기서,  $t_{on ad}$ : 턴-온 진상각 인가시간

$$\theta_{oad} = \omega t_{on ad}, \quad \theta_{oad}: \text{턴-온 진상각} \quad (5)$$

$$\theta_o = \theta_1 - \theta_{oad}, \quad \theta_o: \text{점호각} \quad (6)$$

또한 전류 소호각( $\theta_{off}$ )의 계산도 동일한 방법에 의해서 식 (7), (8), (9)로 구할 수 있다.

$$t_{off ad} = -\frac{L_n}{R_n} \ln \left( \frac{-\frac{V - E_n}{R_n}}{i_{no} - \frac{V - E_n}{R_n}} \right) \quad (7)$$

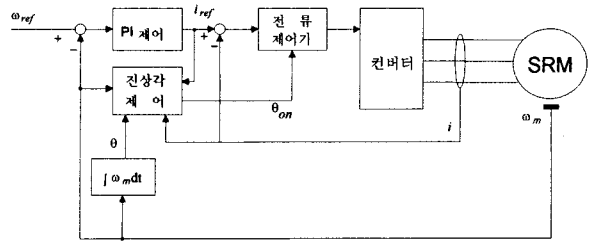
여기서,  $t_{off ad}$ : 턴-오프 진상각 인가시간

$$\theta_{off ad} = \omega t_{off ad}, \quad \theta_{off ad}: \text{턴-오프 진상각} \quad (8)$$

$$\theta_{off} = \theta_2 - \theta_{off ad}, \quad \theta_{off}: \text{소호각} \quad (9)$$

식 (6)과 식 (9)의 결과에 따라 실제속도 및 전류에 대한 최적의 도통각을 결정할 수 있다.

상기의 방법을 제어 블록선도로 표현하면 다음과 같다.



〈그림 5〉 각도-전류제어의 블록도

[그림 5]에서 PI제어기는 실제속도와 지령속도의 오차를 비례-적분하여 지령전류를 발생하고, 그 값을 전류제어기 및 진상각 제어기에 출력한다. 진상각 제어기는 지령 전류 및 실제 속도를 피드백하여 식 (6)과 식 (9)에 의하여 점호각( $\theta_o$ )과 소호각( $\theta_{off}$ )을 결정하고, 결정된 값을 전류 제어기로 출력한다. 전류제어기에서는 도통각( $\theta_{off} - \theta_{on}$ )내에서 지령전류와 실제전류가 일치하도록 PWM제어를 실행한다. 상기와 같이 Angle-Current Control을 실행하면, 저속에서 고속까지 양호한 속도 응답 성능을 얻을 수 있고, 부하에 대한 강인성도 확보할 수 있다.

SRM의 속도 제어는 전류의 크기와 인덕턴스의 변동율을 조절함으로써 가능하나 인덕턴스의 변동율은 기계적으로 결정되어 있으므로 변동값 자체를 조절할 수는 없다. 그러나, 인덕턴스의 변동은 정(+),부(-)로 발생하므로, 전류가 인덕턴스의 변동이 음(-)인 영역에서 인가되면 부(-)토크가 발생하게 된다. 따라서, 부(-) 토크가 인가되지 않도록 하여야 한다.

또한, 속도가 상승하면 역기전력이 증가되어 고정자 권선에 인가되는 실제전압이 감소되므로 빠른 전류 상승을 얻을 수 없다. 따라서, 인덕턴스가 작은 구간에서 스위치를 턴-온하면 고정자 권선에 인가되는 실제전압을 높게 유지할 수 있으므로 전류의 상승을 빠르게 할 수 있다.

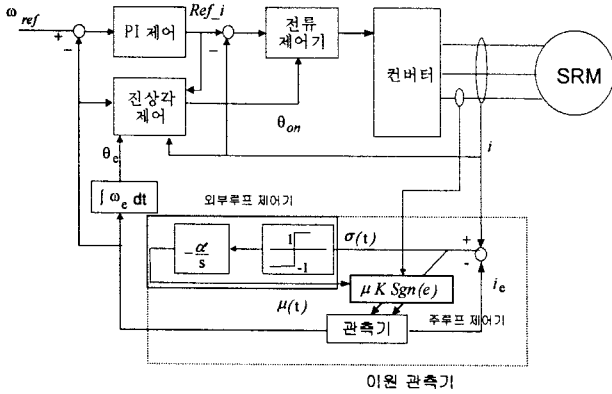
정렬구간 내에서  $\theta_{on ad}$ (턴-온 진상각) 만큼 앞에서 스위칭을 실시하여 전류의 확립을 빠르게 하고, 전류 소호시에도 소호각을  $\theta_{off ad}$ (턴-오프 진상각)만큼 앞에서 스위칭을 턴-오프하면 부 토크 영역에서 전류가 흐르지 않게 된다.

이와 같이 턴-온·턴-오프 각을 조절함으로써 최대한의 토크

영역을 이용할 수 있게 된다. 또한, 저령전류를 실제전류가 완전히 추종할 수 있도록 상 전압을 턴-온, 턴-오프하면서 포핑(Chopping)을 실시하고 있다.

### 2.3 이원 관측기를 이용한 위치 추정

본 알고리즘에서 사용하는 모터 상태방정식은 운동방정식을 포함하고 있다. 본 관측기의 안정성을 이원제어이론을 적용하여 검토하고, 전류 및 속도를 동시에 추정하는 방법을 제시한다. [그림 6]은 이원 관측기를 포함한 제어 블록선을 보이고 있다. 점선부분이 관측기로서, 주루프 제어기와 외부루프제어기를 갖는 구조로 되어있다. 주루프 제어기는 전류 및 속도추정에 대한 강인성을 확보하고, 외부루프제어기는 파라미터 변동에 대한 강인성을 확보한다.



<그림 6> 이원 관측기 전체 블록도

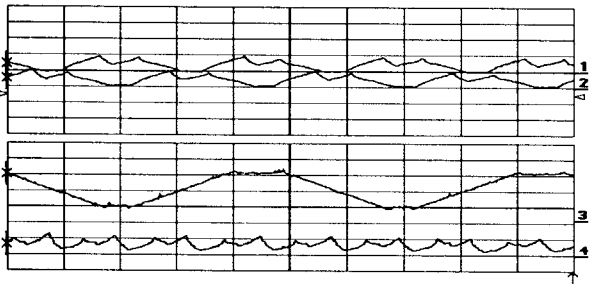
### 3. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 전동기의 규격과 실험장치도는 참고문헌 [3]과 같다.

### 4. 실험결과

#### 4.1 무부하 실험파형

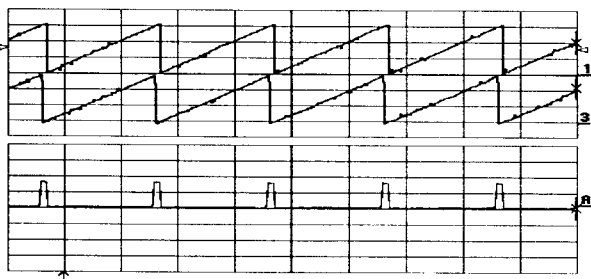
[그림 7]은 각상 전류, 인덕턴스, 토크를 보이고 있다. 전류의 증폭은 이루어지고 있으나, 토크 리플을 완전하게 제거하지 못하고 있다.



상(1): 4[A]/div 상(2): 4[A]/div 중: 30[mH]/div 하: 0.4[Nm]/div  
div 2[ms]/div

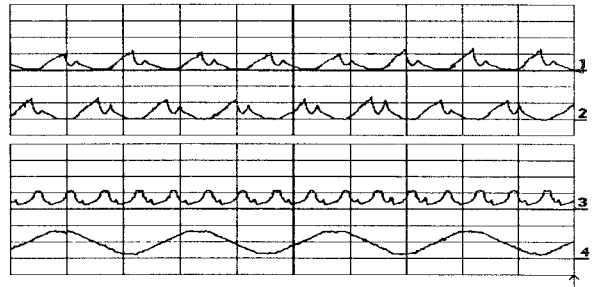
<그림 7> 각상전류(상1, 상2), 인덕턴스(중), 토크(하)

#### 4.2 부하 실험파형



상: 20[Deg]/div 중: 20[Deg]/div 하: 40[Deg]/div 5[ms]/div  
<그림 8> 실제위치(상), 추정위치(중), 추정오차(하)-1,000rpm 지령시

[그림 8]은 실제위치, 추정위치, 위치추정오차를 보이고 있다. 또한 [그림 9]는 각상의 전류 및 인덕턴스, 토크를 나타내고 있다. 속도추정성능(오차 ±20rpm)은 양호하나, [그림 8]에 나타난 것과 같이 위치 오차가 발생하고 있다. 위치 오차는 3정도로 일정한 형태를 지니고 있다. 이것은 속도의 적분에 의하여 위치가 얻어지므로, 이를 반영한 것이다.



상(1): 4[A]/div 상(2): 4[A]/div 중: 0.4[Nm]/div 하: 20[mH]/div  
div 5[ms]/div

<그림 9> 각상전류(상1, 상2), 토크(중), 인덕턴스(하)

## 5. 결 과

적용 슬라이딩모드 관측기에서 발생하는 채터링현상을 저감하며, 스위칭 주파수의 한계, 제어지연 등이 존재해도 연속적인 제어입력을 생성할 수 있는 이원제어기를 기초로 하여 새로운 이원관측기를 설계하였다. 특히 저속영역에서 기존의 적용 슬라이딩모드 관측기의 장점을 유지하면서 채터링이 저감된 위치 추정치를 얻을 수 있었다.

그러나 고속에서는 회전자의 위치가 샘플시간(130[μs])동안 약 4.5°(2,500[rpm]에서)정도 진행하게 된다. 그러므로 넓은 속도영역에서 속도를 제어하기 위해서는 채터링현상과 외란 및 파라미터 변동에 대한 강인성을 유지하는 문제를 적절히 타협하는 것이 중요하며, 이를 위한 연구가 추후 필요하리라고 사료된다.

## [참 고 문 헌]

[1] S.V. Emelyanov, Binary Automatic Control Systems, Mir Publishers, Moscow, 1987.  
[2] 안진우, 황영문, '스위치드 릴럭턴스 전동기 구동과 응용', 신지서원, 1998.  
[3] 신재화, "이원관측기를 이용한 SRM의 가변속제어", 시립인천전문대 논문집 Vol 42, pp 35-47, 2005.