

# 비대칭 2상 SRM의 초기각 검출과 파라미터 오차 보상을 가지는 자속관측기법을 적용한 센서리스 속도제어

임근민, 이종현, 안진우, 이동희  
경성대학교 메카트로닉스 공학과

## Sensorless initial position detecting method and speed control using parameter compensator with flux observer of the 2-phase SRM with asymmetric inductance profile

Geun Min Lim, Jong-Heon Lee, Jin-Woo Ahn, Dong-Hee Lee  
Dept. of Mechatronics Engineering, Kyung Sung University

### ABSTRACT

본 논문은 비대칭 2상 SRM의 센서리스 속도제어를 위한 초기각 검출 및 초기 기동방식과 자속관측기를 적용한 센서리스 제어에서 전동기의 온도 및 파라미터 변동에 의한 자속 오차 성분으로 인해 발생하는 위치 추정오차를 보상하기 위한 새로운 보상기를 제안한다. 제안된 방식은 전압펄스 인가로 초기각을 검출하고 검출된 초기 위치정보를 바탕으로 동일한 전압펄스 인가를 통해 비여자상이 여자상이 되는 회전자 위치를 검출하여 상여자를 교체하는 초기기동을 통해 자속관측기를 적용한 센서리스 제어로 안정적으로 진입하도록 한다. 이 때, 제안된 추정위치 보상을 통해 추정된 센서리스 위치를 순시적으로 보상한다.

### 1. 서론

본 논문에서는 적용 SRM의 자속데이터와 상권선에 인가되는 전압 및 전류로부터 계산되는 자속과의 오차로부터 회전자 위치 및 속도를 추정하는 자속관측기를 적용하여 연속적으로 회전자 위치와 속도를 추정하였다. 자속관측기는 일정한 속도 이상에서 안정적인 회전자 위치 추정이 가능하지만, 정지 상태에서 초기각 검출이 불가능하고 저속구간에서의 위치 오차가 커서 크기가 다른 전압펄스 인가를 통해 초기각을 검출하고, 검출된 초기 위치 정보와 전압펄스 인가 방식을 이용해 비여자상이 여자상이 되는 회전자 위치를 검출하여 상여자를 교체하는 초기기동을 통해, 자속관측기법을 적용한 센서리스 제어가 안정적인 속도까지 기동된다.

또한, 자속계산에서 스위칭 소자 및 휠링 다이오드에서 발생하는 전압강하 성분을 고려하여, 자속 계산의 오차를 개선하였으며, 제안된 파라미터 오차 보상은 전동기의 온도 및 파라미터 변동에 의하여 발생하는 자속오차 성분을 보상하기 위해 SRM의 자기적인 특성에 의해 발생하는 인덕턴스 변곡점 위치를 실제 위치로 가정하여 추정된 센서리스 위치를 순시적으로 보상하였다.

제안된 방식을 검증하기 위하여 비대칭 인덕턴스 형상을 가진 2상 SRM의 센서리스 속도 제어 시스템을 구성하여 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

### 2. 자속관측기를 이용한 SRM의 위치 및 속도 추정

SRM의 자속은 회전자의 위치와 전류에 따라 고유의 값을 가지게 되므로, 실제 전동기의 자속정보와 상권선에 인가된 전압 및 전류에 의해 계산된 자속과의 오차에 의해 그림 1과 같이 회전자의 위치를 추정할 수 있다[1].

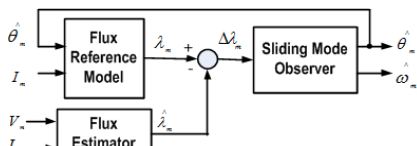


그림 1 자속관측기를 이용한 SRM의 위치 및 속도 추정  
Fig. 1 Rotor position and speed estimated using flux observer

이때, 상권선에 인가된 전압 및 전류에 의해 계산되는 자속은 다음과 같다.

$$V_s = R \cdot i_m + \frac{d\lambda(L, i_m)}{dt} = R \cdot i_m + i \frac{dL}{dt} + L \frac{di}{dt}$$

$$\hat{\lambda}_m = \int (V_s - R \cdot i_m) dt$$

회전자 위치와 상권선의 전류를 이용하여 룩-업 테이블로 구성된 자속 추정부를 통해 나타나는 실제 자속 데이터는 상권선의 전압 및 전류로 계산되는 추정자속 데이터와 비교되어 자속의 오차 성분은 자속오차 성분과 대한 함수로 구성된 회전자 위치 추정부를 통해 회전자의 위치

및 속도를 추정하게 된다. 이 때, 전동기의 실제 자속 정보는 FEM특성 해석을 통해 얻을 수 있고, 룩-업 테이블로 구성되어 있다. 자속을 계산함에 있어 전압은 PWM 듀티비와 스위칭 소자 및 휠링 다이오드에서 발생하는 전압강하 성분 때문에 발생하는 계산된 자속의 오차 성분으로 인해 회전자의 위치오차가 발생할 수 있으므로 본 논문에서는 전압강하 성분을 고려하여 자속오차 성분을 감소시킴으로써 회전자의 위치오차를 감소시킨다.

$$V_s = \frac{t_{on}}{T_s} \cdot V_{dc} - 2 \cdot V_{drop}$$

( $\frac{t_{on}}{T_s}$ : PWM듀티비,  $V_{drop}$ : 스위칭소자의 전압강하)

$$\hat{\lambda}_m = \int (\frac{t_{on}}{T_s} \cdot V_{dc} - 2 \cdot V_{drop} - R \cdot i_m) dt$$

회전자 위치 추정부는 자속 오차 성분과 대한 함수로 구성되어 회전자 위치 및 속도를 추정하게 된다.

### 3. 제안된 초기각 검출 및 초기 기동 방식

SRM의 센서리스 제어에서 회전자의 초기각 검출은 필수적이다[1]. 일반적으로 강제 정렬방법이나 전압펄스 인가를 통해 초기각을 검출하지만 산업응용에서 역회전하면 안되는 경우 강제 정렬방법을 적용하기 어렵고, 대칭 2상 SRM의 경우 전압펄스 인가를 통한 펄스 전류 응답은 두 위치에서 같은 값을 가지게 되므로 초기각 검출에 어려움이 있다.

본 논문에서 적용한 자속관측기법에 의한 센서리스 제어는 정지 상태에서 회전자 위치 검출이 불가능하고 저속 구간에서 위치 추정 오차가 크므로, SRM의 센서리스 속도 영역을 초기각 검출 및 초기 기동구간과 자속관측기법을 적용한 센서리스 제어 구간으로 나누었다. 그림 2는 운전속도에 따른 제어방법을 나타낸다.

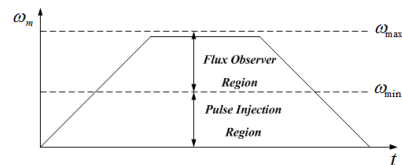


그림 2 운전속도에 따른 제어방법  
Fig. 2 According to driving speed control method of SRM

본 논문에서 적용된 비대칭 인덕턴스 형상을 가진 SRM의 초기각 검출 방식은 크기가 서로 다른 펄스형 전압을 인가하여 측정된 전류의 오차와 회전자 위치 데이터를 포함하고 있는 전류 데이터를 통해 추정된다. 또한, 추정된 초기각 위치 정보를 기반으로 동일한 전압펄스 인가로 검출되는 전류 응답을 통해 회전자 위치를 연속적으로 추정함과 동시에 비여자상이 여자상이 되는 회전자 위치를 검출함으로써 초기기동이 가능하도록 하였으며, 상여자를 교체함과 동시에 센서리스 추정각도를 수정함으로써, 센서리스 제어가 안정적으로 구동되는 속도까지 기동된다.

### 4. 제안된 파라미터 오차 보상기

비대칭 인덕턴스 형상을 가진 SRM의 자속을 계산함에 있어 전동기의 연속적인 구동으로 인한 온도 상승으로 상권선 저항값의 변동으로 인해 회전자 추정위치의 오차가 발생한다. 이는 상권선 저항의 변동에 의한 상전류 변화는 자속 추정 방식에서 계산되는 자속 오차를 포함하도록 하기 때문이다. 본 논문에서는 전동기의 온도나 파라미터 변동에 관계없이 자기적인 특성에 의해 회전자 위치를 추정할 수 있는 인덕턴스 변곡점 검출기법을 이용하여, 이때의 추정된 회전자 위치와 자속관측기에서 추정된 회전자 위치와의 오차 성분으로부터 추정자속의 오차를 보정한다. 그림 3은 인덕턴스 변곡점의 검출방법을 나타내었다. 그림 3의 인덕턴스 변곡점 검출 방식은 상 인덕턴스 변곡점을 전류의 형상을 통해 회전자의 위치를 검출하는 방식으로, 토크 리플을 억제하기 위한

전류 형상제어가 어렵고 불연속적으로 회전자의 위치를 검출하는 단점이 있다. 하지만 여자전류를 지령치에 추종하도록 제어하기 위해 SRM에서는 어드밴스 각도를 가지고 여자전류를 형성시키게 되고, 어드밴스 각도에서 인덕턴스의 변곡점까지는 토크를 발생하지 않는 영역에 해당하므로, 인덕턴스의 변곡점까지 여자전류의 형상으로 불연속적인 회전자 위치를 검출하고, 인덕턴스의 상승구간에서부터는 토크 제어를 위한 전류 제어방식을 적용하면 파라미터 변동에 영향이 적은 회전자 위치의 불연속적인 검출이 가능하다.

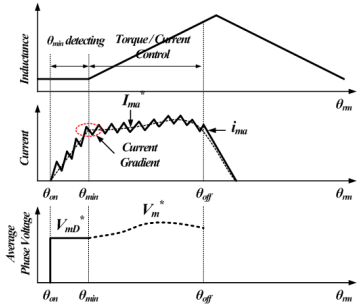


그림 3 인덕턴스 변곡점의 검출방법  
Fig. 3 The inductance break point detecting method

### 5. 실험 결과

본 논문에서 제안한 센서리스 기법의 증명을 비대칭 인덕턴스 형상을 가진 2상 SRM을 이용하여 실험을 수행하였다.

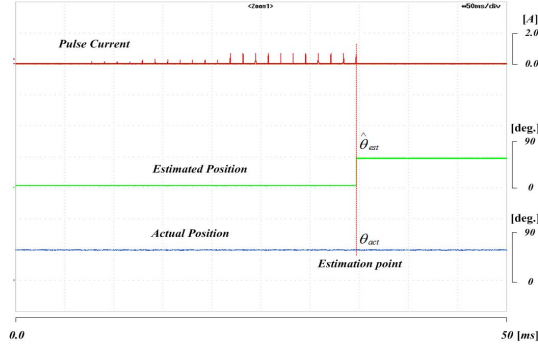


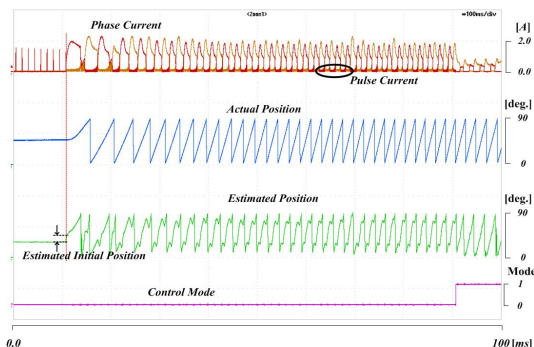
그림 4 회전자의 실제 위치와 추정위치  
Fig. 4 The actual position and estimated position

그림 4는 본 논문에서 제안한 초기 각 검출 방법이다. 정지 상태에서 크기가 다른 전압펄스를 인가하여 실제 초기각을 추정하였다.

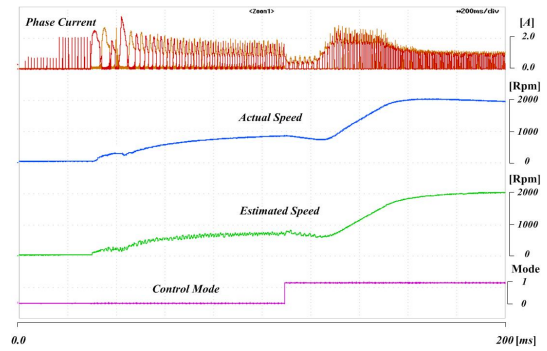
그림 5는 지령속도 2000[rpm]에 대한 실험결과이다. 추정된 회전자의 초기각을 이용하여 전압 펄스 인가를 통해 초기 기동 방식으로 안정적인 센서리스 속도제어가 가능할 때까지 기동되었다. 이 때, Control Mode 0은 초기 각 검출 및 초기 기동 방식을 적용한 구간을 의미하고 Control Mode 1은 센서리스 제어 구간을 의미한다. Control Mode는 내부 프로그램을 이용한 전환을 통해 이루어진다.

그림 6은 센서리스 제어시 상권선 저항이 150%로 변동되었을 때의 실험결과이다. 상권선 저항의 변동으로 인해 회전자 추정 위치가 오차가 발생하지만 파라미터 오차 보상을 통해 회전자 추정 위치의 오차를 순서적으로 보상한다.

그림 7은 자속관측기를 적용한 센서리스 제어시 지령속도를 3000[rpm]으로 가변하였을 때의 실험결과이다. 그림 7을 통해 본 논문에서 제안하는 센서리스 제어방법을 통해 속도제어가 가능함을 확인할 수 있다.



(a) Estimated position



(b) Estimated speed

그림 5 지령속도 2000[rpm]에 대한 실험결과  
Fig. 5 Experimental results of 200[rpm]

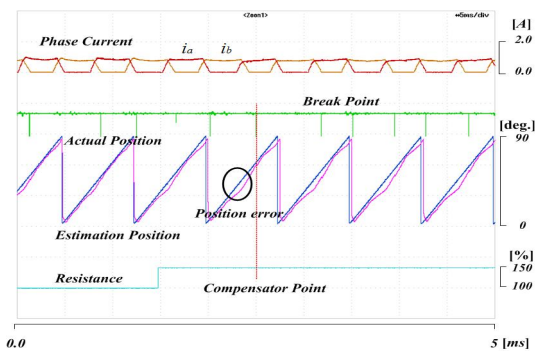


그림 6 파라미터 오차 보상을 이용한 회전자 위치 보상  
Fig. 6 The compensator of rotor position using parameter compensator

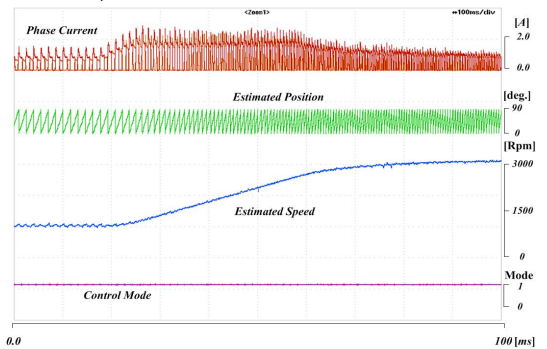


그림 7 지령속도 3000[rpm] 대한 실험결과  
Fig. 7 Experimental results of 3000[rpm]

### 5. 결론

본 논문에서는 센서리스 SRM의 초기 각 검출 및 초기 기동방식과 자속관측기법을 적용한 센서리스 제어기법을 제안하고 제안된 기법의 효용성을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험 결과 전압펄스 인가 방식을 통해 비대칭 인덕턴스 형상을 가진 2상 SRM의 검출된 초기 각 위치정보를 바탕으로 초기 기동을 통해 안정적인 센서리스 제어가 가능한 구간까지 기동되었고 또한, 센서리스 제어 구간에서 파라미터 오차 보상으로 파라미터 변동에 의한 자속오차를 보상함으로써 센서리스 SRM의 전 속도영역에서 회전자 위치 및 속도 추정을 통해 속도제어가 이루어짐을 실험을 통하여 검증하였다.

### 감사의 글

이 논문은 삼성전기 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

### [참고 문헌]

- [1] Gabriel Gallegos-Lopez, Philip C. Kjaer, Timothy J.E. Miller, "A New Sensorless Method for Switched Reluctance Motor Drives", IEEE Trans. on Industrial Applications, Vol.34, No.4, July 1998
- [2] H.J. Guo, M.Takahashi, T. Watanabe, and O. Ichinokura, "A New Sensorless Drive Method of Switched Reluctance Motors Based on Motor's Magnetic Characteristics", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 37, No. 4, July 2001