

자속 관측기를 이용한 센서리스 SRM의 속도제어

임근민, 김병한, 안진우, 이동희
경성대학교, 삼성전기

Sensorless Speed Control of SRM using the Flux Observer

Geun Min Lim, Byeong Han Kim, Jin Woo Ahn, Dong Hee Lee
Kyungshung University, Samsung Electro-Mechanics

ABSTRACT

본 논문은 SRM의 센서리스 속도제어를 위한 슬라이딩 모드 자속관측기법을 적용하고, 동일한 센서리스 추정방식으로 초기 기동에서 센서리스 영역까지의 전이 구간에서 오픈루프 속도리플을 억제할 수 있는 방식을 제안한다. 제안된 방식에서 센서리스 위치추정은 슬라이딩으로 자속관측기를 적용하고 있지만, 자속 계산에서 위치오차를 감소하기 위한 오차 성분을 고려하였으며, 특히 초기기동에서 동일한 관측기와 계산된 자속의 오차 성분으로 오픈루프 상태에서의 전류제어를 수행함으로써 전이구간에서의 속도리플을 억제할 수 있다. 제안된 방식은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였다.

1. 서론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 기계적 구조가 간단하여 견고하며, 단위면적당 발생토크가 높아 견인토크가 우수한 반면에[1][2], SRM의 속도제어를 위해서는 회전자 위치검출이 필수적이라는 취약점을 가지고 있다. 회전자 위치의 검출을 위해 엔코더, 레졸버 등을 사용하지만 이는 단가 상승을 초래하고 진동 및 온도 등의 환경적 제약을 받게 된다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하고자 위치센서를 제거한 센서리스 제어기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[3 4].

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, 정지상태와 저속구간에서의 위치 오차가 커져 센서리스 속도 제어가 가능한 구간까지는 강제로 오픈루프 방식으로 구동하게 된다. 제안된 방식에서는 동일한 센서리스 추정알고리즘에서 자속오차에 대한 지령위치와의 오차관계로부터 오픈루프 구동의 전류제어기를 적용함으로써, 안정적인 초기구동과 센서리스 구간까지의 전이가 가능한 제어기를 제안한다. 또한, 자속계산에서 스위칭 소자 및 유틀링 다이오드에서 발생하는 전압강하 성분을 고려하여, 자속 계산의 오차를 개선하였다. 제안된 방식을 검증하기 위하여 SRM의 비선형 모델을 구성하고 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 가능성을 살펴보았다.

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[3 4].

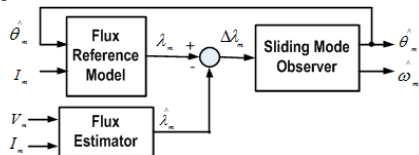


그림 1 자속관측기를 이용한 SRM의 위치 및 속도 추정
Fig. 1 Rotor position and speed estimated using flux observer

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 자

속 추정부를 통해 나타나는 실제 자속 데이터는 상권선의 전압 및 전류로 계산되는 추정자속 데이터와 비교되어 자속의 오차 성분은 자속오차 성분에 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 유틀링 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)

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

회전자 위치 추정부는 자속 오차 성분에 대한 함수로 구성되어 회전자의 위치 및 속도를 추정하게 된다. 이 때, k_θ 와 k_ω 는 회전자의 정확한 위치, 속도 추정을 위한 관측기의 이득을 의미한다.

$$\Delta \lambda_m = e_\lambda$$

$$e_\lambda = \hat{\lambda}_m - \lambda_m$$

$$\hat{\theta}_m(k) = \hat{\omega}_m(k-1) + k_\theta \cdot \text{sgn}(e_\lambda)$$

$$\hat{\omega}_m(k) = k_\omega \cdot \text{sgn}(e_\lambda)$$

하지만 자속관측기를 이용한 SRM의 위치 및 속도 추정방법은 정지 상태에서는 회전자의 위치 검출이 불가능하고 저속 구간에서는 추정 정밀도가 낮아 초기기동 및 연속적인 동작구간에서의 운전에 대하여 제한적으로 동작하는 단점이 있다.

3. 제안된 초기 구동 및 속도 제어 방식

본 논문에서는 자속관측기에 의한 위치 추정과 속도 제어가 가능한 속도영역을 설정하고, 초기 기동에서 안정적인 기동과 부하상태에 따라 적절한 토크 전류가 인가되어 속도리플을 억제할 수 있는 기동 전류 제어기를 적용하였다. 제안된 기동 전류 제어기는 전동기의 자속과 계산된 자속의 오차를 사용하게 되며, 이때 두 정보 사이의 오차는 지령속도와 실제 속도의 차이를 나타내게 되므로, 자속의 오차에 대하여 기동전류를 연속적으로 제어하는 방식이다. 제안된 방식에서는 동일한 센서리스 알고리즘을 적용하므로 구조가 매우 단순한 장점이 있으며, 센서리스 구간에서는 추정위치를 사용하고 오픈루프 구간에서 지령속도에 따른 위치 지령을 사용하도록 설계된다. 또한 자속의 오차 성분도 센서리스 구간에서는 위치 및 속도 추정을 위하여 사용되고, 오픈루프 구간에서는 기동 전류를 제어하기 위해 사용된다.

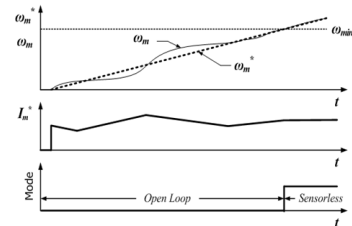


그림 2 운전속도에 따른 제어방법
Fig. 2 According to driving speed control method of SRM

그림 2는 제안된 센서리스 SRM의 속도 제어를 위한 구간별 적용방

식을 나타내고 있다. 그림 2에서 초기 기동에서 기동전류는 정격부하를 가정하여 정격전류로 기동하지만, 자속오차에 따라 기동전류를 연속적으로 가변하여 제어함으로써, SRM의 속도가 지령속도를 추종하도록 제어되며, 센서리스 제어가 가능한 일정속도 이상 상승하게 되면, 센서리스 동작으로 전환된다. 그림 3은 제안된 센서리스 SRM의 제어 블록도를 나타내고 있다. 그림 3에서 오픈루프 구간에서는 지령속도에 따른 지령 위치 $\hat{\theta}_m^*$ 에 따라 전류 지령을 계산하는 루틴으로 동작하고, 센서리스 구간에서는 추정위치 $\hat{\theta}_m$ 과 추정속도 $\hat{\omega}_m$ 에 따라 속도 제어기에 의한 지령전류가 적용된다.

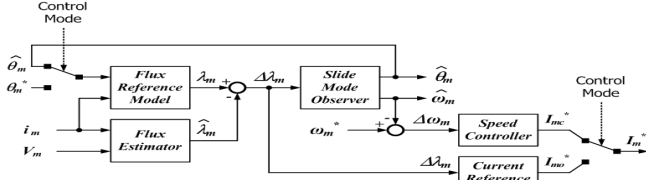


그림 3 센서리스 SRM의 제어 블록도
Fig. 3 Block diagram of sensorless control of SRM

이때, 기동전류 $I_{m,0}^*$ 는 동일한 자속관측기를 통한 자속 오차로부터 PI 제어기를 적용하여 다음과 같이 계산된다.

$$I_{m,0}^* = K_p \cdot \Delta\lambda_m + K_i \cdot \int \lambda_m \cdot dt$$

초기 정렬과 기동상태에서는 전동기에 인가된 부하상태를 인지할 수 없으므로 자속의 오차는 인가된 토크 전류와 부하 상태에 따른 속도의 오차를 나타내므로, 기동전류의 가감에 따라 안정적인 기동이 가능하게 된다. 그림 4는 본 논문에서 제안하는 자속 슬라이딩 모드 관측기의 전체 제어블록도이다. 오픈루프 제어구간 및 센서리스 제어구간은 동일한 제어블록도를 사용하지만, 지령속도와 회전자 속도에 대한 동작모드 결정부는 내부 프로그램을 이용한 전환스위치를 통해 동작하게 된다.

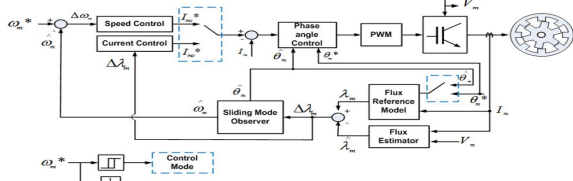


그림 4 자속 슬라이딩 관측기의 제어 블록도
Fig. 4 Block diagram of sensorless control of SRM

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 센서리스 기법의 증명을 위해 SRM의 수치모델을 구성하여 시뮬레이션을 하였다.

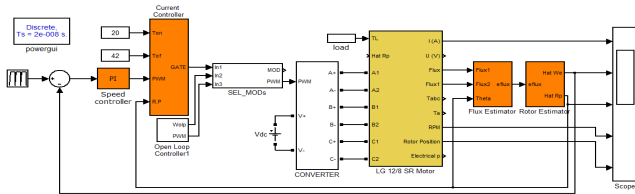


그림 5 Simulink를 통한 SRM의 모델
Fig. 5 Simulink model of SRM

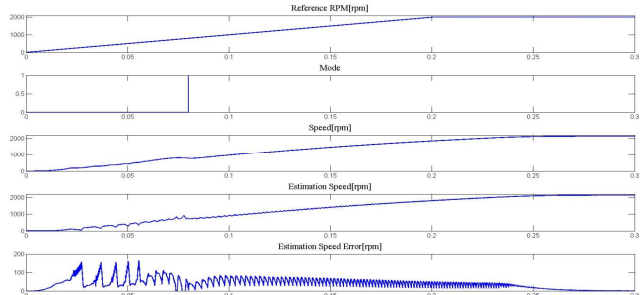


그림 6 제안된 센서리스의 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Simulation results of proposed sensorless SRM

그림 6은 본 논문에서 제안된 센서리스 SRM의 시뮬레이션 결과이다.

800rpm까지 초기 기동 알고리즘을 포함한 오픈루프 전류제어를 하고, 지령속도 2000rpm까지 센서리스 제어가 되고 있는 동시에 연속적인 회전자 위치와 속도를 추정하는 것을 보이고 있다. Mode=0은 오픈루프 제어구간을 의미한다.

그림 7은 2000rpm으로 구동되고 있는 SRM을 지령 속도를 1500rpm으로 가변 하였을 때의 시뮬레이션 결과이다. 회전자 위치와 속도를 연속적으로 추정하면서 속도제어가 가능함을 보이고 있다. 이 때의 실제 회전자 속도와 추정속도 및 실제 회전자 속도와 추정속도의 오차를 나타내었다. 이 때의 부하는 정격부하의 2.86%로 일정하다.

그림 8은 SRM이 2000rpm으로 구동되고 있을 때, 부하를 가변 하였을 때의 시뮬레이션 결과이다. 회전자 속도가 2000rpm까지 정격부하의 2.86%로 일정하다가 0.7초 일 때 정격부하의 71%로 가변 하였을 때, 회전자의 실제속도와 추정속도 및 회전자 실제속도와 추정속도와와의 오차를 나타내었다.

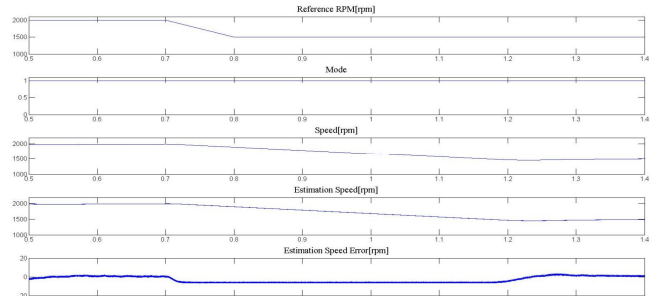


그림 7 지령 속도를 가변하였을 때 시뮬레이션 결과(0.7s)
Fig. 7 Results when varying the speed reference(0.7s)

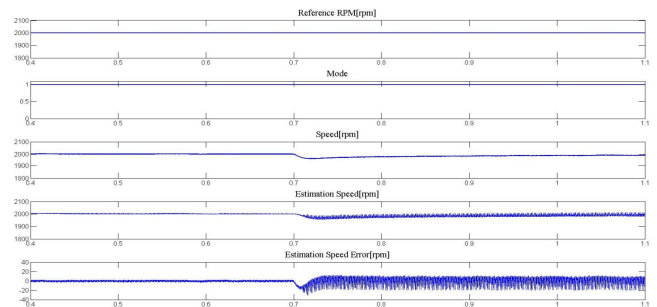


그림 8 부하를 가변하였을 때 시뮬레이션(0.7s)
Fig. 8 Results when varying the load(0.7s)

5. 결론

본 논문에서는 SRM의 저가격화를 위하여 자속 관측기를 이용한 센서리스 SRM 제어기법을 제안하였다. 제안된 기법의 효율성을 검증하기 위하여 수치모델을 통해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 초기 기동에서부터 동일한 관측기에 의한 오차 성분으로 오픈루프 구동의 전류제어와 센서리스 제어로 SRM의 센서리스 제어시스템의 구현이 가능하고 지령속도 및 부하 변동에 대해 속도제어가 이루어짐을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

감사의 글

이 논문은 삼성전기 연구비 지원에 의하여 연구되었음

[참고 문헌]

- [1] 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
- [2] H.J. Guo, W.B. Lee, "An improved sensorless driving method of switched reluctance motors using impressed voltage pulse", PCC Osaka 2002
- [3] 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/August 1998
- [4] Ibrahim H. Al Bahadly, "Examination of a Sensorless Rotor Position Measurement Method for Switched Reluctance Drive", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.55, No.1, pp.288-295, 2008