

진화 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 SRM의 센서리스 제어

박진현*, 박한웅**, 전항식***, 정기화**, 최영규***

* 진주산업대학교 산업자동화공학과, **해군사관학교 전기과, ***부산대학교 전자전기컴퓨터공학부

Sensorless Control of SRM using Evolution-Sliding-Mode Observer

*Jin-Hyun Park, **Han-woong Park, ***Hyang-Sik Jun, **Kee-Haw Jung, **Young-Kiu Choi

*Chinju National Univ., **Korea Naval Academy, *** Pusan National Univ.

Abstract - This paper introduces a indirect rotor position and speed estimation algorithm for the SRM(switced reluctance motor) sensorless control, based on the sliding mode observer. The information of position and speed is generally provided by encoder or resolver. However, the position sensor not only adds complexity, cost, and size to the whole drive system, but also causes limitation for industrial applications. In this paper, in order to eliminate the position sensor, indirect position sensing method using sliding mode observer is used for SRM drives. And this observer parameters are optimized by evolutionary algorithm. PI controller is also optimized for the SRM to track precisely using evolutionary algorithm.

1. 서 론

스위칭 소자에 의해 고정자와 회전자 사이의 자기저항을 최소화시키는 방향으로 연속적인 회전력을 갖는 SRM은 구조가 간단하고, 효율이 높으며, 경제성이 좋다는 장점을 갖는다. 이로 인하여, 최근 산업의 발전과 함께 자동화, 정밀화 등이 추진되면서 특수 전동기의 개발과 전력전자기술을 이용한 가변속 구동장치의 개발 등이 활발히 연구되어지면서, 스위치드 릴럭턴스 모터(switced reluctance motor : SRM)의 개발 역시 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 SRM은 스위칭의 문제와 토오크 리플 그리고 소음 등의 문제점들을 가지고 있으나, 현재에 와서는 전력전자기술의 발달과 전자계 해석 등을 통하여 많은 발전을 이루었다[1].

고정자의 각 극을 스위칭 펄스에 의해 순차적으로 여자시킬 때, 회전자극과 여자된 고정자극 사이의 자기저항이 최소가 되는 쪽으로 토오크가 발생하는 원리를 이용한 SRM은 고정자 상권선은 회전자 위치와 동기 되어 여자 되어야 하는 토오크 발생기구의 특성상 회전자 위치각에 대한 정보가 필요하다. 회전자 정보각의 검출은 일반적으로 엔코더나 레졸버를 사용하나, 이러한 기계적인 외부 위치 센서는 가격이 비싸므로 SRM 시스템의 설치비용이 상승하는 요인이 된다. 따라서, 저가형 엔코더를 사용하거나, 위치 센서를 제거한 센서리스 구동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[2-8].

센서리스 구동에 대한 연구는 개루프에 의한 제어법 [2], 상승 인덕턴스에 의한 제어법[3], 자속/전류에 의한 방법[4], 자속연산에 의한 방법[5], 전류/전압에 의한 관측기 설계에 의한 방법[6-9]등 많이 연구되고 있다. 본 연구에서는 센서리스 구동에 대한 연구 중 관측기의 설계를 슬라이딩모드(sliding mode)를 사용하는 방법을 사용하고자 한다. 기존의 슬라이딩 모드 관측기를 사용하는 방법은 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들과 페루프 제어기의 제어이득에 의한 상당히 민감하

여, 정확한 파라미터들의 선정이 필요하다. 즉, 슬라이딩 모드 of 떨림(chattering) 현상과 그 떨림 폭의 선정이 성능에 많은 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 SRM 모터의 속도와 위치를 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 추정하고, 정밀한 속도 추적을 위해 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들과 PI 제어기의 이득들을 진화 프로그래밍을 사용하여 최적화하였다. 이를 모의실험을 통하여 보이고자 한다.

2. 본 론

2.1 SRM의 비선형 모델링 및 슬라이딩 모드 관측기

SRM의 비선형 자기 특성은 전류, 회전자의 각에 의한 비선형 함수로 모델링 되어지며, SRM의 전자기 출력 토크 역시, 전류, 회전자의 각에 의해 비선형 함수로 묘사될 수 있다. 따라서 자속 및 토크는 아래 식 (1), (2)와 같이 정의된다.

$$\lambda = \lambda(i, \theta) \tag{1}$$

$$T = T(i, \theta) \tag{2}$$

SRM의 상태 미분 방정식은 아래 식과 같이 정의되어진다[7-9].

$$\frac{d\lambda_n}{dt} = -R_n i_n(t) + v_n(t) \tag{3}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega(t) \tag{4}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{D}{J} \omega(t) + \frac{1}{J} \sum T_n(\theta, \lambda_n) - \frac{1}{J} T_L(t) \tag{5}$$

여기서, R_n : n상의 고정자 저항, i_n : n상의 고정자 전류, v_n : n상의 고정자 전압, θ : 회전자 위치, ω : 회전자 속도, T_L : 부하를 나타내었다.

슬라이딩 모드 관측기는 회전자의 위치와 속도를 추정하기 위한 SRM의 상태 공간 모델이 포함되어 있다 [7-9]. 간단히 말하면, 슬라이딩 모드 관측기는 전압과 전류를 측정하여 회전자의 위치와 속도를 추정한다.

오차의 수정은 모터의 전압 전류의 측정으로부터 구해지는 것과 수학적 모델로부터 계산된 모터 자속의 차를 기초로 하여 구하여 진다. 실제 전압과 전류로부터 구해지는 자속은 식 (6)과 같이 구하여진다.

$$\lambda_n(t) = \int_0^t (v_n(t) - i_n(t) R_n) dt \tag{6}$$

SRM을 위한 2차 슬라이딩 모드 관측기는 아래 식과 같이 구성하며

$$\dot{\hat{\theta}} = \hat{\omega} + k_{\theta} \text{sgn}(e_{\theta}) \tag{7}$$

$$\dot{\hat{\omega}} = k_{\omega} \text{sgn}(e_{\omega}) \tag{8}$$

$\hat{\theta}$, $\hat{\omega}$ 는 회전자의 위치와 속도의 추정값이며, e_{θ} 는 측정과 추정된 변수로부터 정의된 오차 함수이다. SRM 관측기의 오차 다이내믹스를 구하기 위하여 아래와 같이 정의하였다.

$$e_{\theta}(t) = \theta(t) - \hat{\theta}(t) \tag{9}$$

$$e_{\omega}(t) = \omega(t) - \hat{\omega}(t) \tag{10}$$

식 (9)를 양변을 미분하면

$$\frac{de_\theta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - \frac{d\hat{\theta}}{dt} \quad (11)$$

식(11)에 식(4)와 식(7)을 적용하면 아래와 같다.

$$\frac{de_\theta}{dt} = \omega(t) - \hat{\omega}(t) - k_\theta \text{sgn}(e_\theta) \quad (12)$$

식(12)에 속도오차정의식(10)을 대입하면 다음과 같다

$$\frac{de_\theta}{dt} = e_\omega(t) - k_\theta \text{sgn}(e_\theta) \quad (13)$$

속도 오차 정의식의 양변을 미분하면 식(14)와 같이 정의된다.

$$\frac{de_\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dt} - \frac{d\hat{\omega}}{dt} \quad (14)$$

식(14)에서 식(5)와 식(7)을 대입하면 속도 오차 다이내믹은 아래와 같이 구하여 진다.

$$\frac{de_\omega}{dt} = -\frac{D}{J}\omega(t) + \frac{1}{J}\sum T_n(\theta, \lambda_n) - \frac{1}{J}T_L(t) - k_\omega \text{sgn}(e_\omega) \quad (15)$$

만약, 위의 식에서 앞의 세가지 항보다 큰 k_ω 를 선택한다면 오차 다이내믹은 다음과 같이 간단히 정리될 수 있다.

$$\frac{de_\omega}{dt} = -k_\omega \text{sgn}(e_\omega) \quad (16)$$

그러므로 식(13)과 식(16)은 관측기의 수렴성의 나나내며, 만약 슬라이딩 표면($e_\theta = 0$)에 도달할 경우, 오차 다이내믹은 아래와 같다.

$$\frac{de_\theta}{dt} = 0 \quad \frac{de_\omega}{dt} = -\left(\frac{k_\theta}{k_\omega}\right)e_\omega \quad (17)$$

오차 다이내믹이 안정화될 수 있는 오차 함수는 많이 존재하나, 오차 함수는 θ 나 ω 로부터 구할 수 없으므로, 측정된 상전류와 추정된 상전류로부터 오차 함수를 정의하였다. 아래는 선택된 오차함수를 나타낸다.

$$e_f = \sum_{i=1}^N f_i'(\theta)(\hat{\lambda}_i - \lambda_i) \quad (18)$$

오차함에는 식(19)과 같이 추정된 회전자 위치가 고려된 추정된 자속이 포함되어 있다.

$$\hat{\lambda}_i(t) = \hat{\lambda}_i(i, t), \hat{\theta}(t) \quad (19)$$

함수 $f_i(\theta)$ 의 선택은 오차함수 식(18)이 위치 추정의 오차가 수렴이 보장되도록 아래 식과 같이 선택하여야 한다[7].

$$f_i(\theta) = \cos(N_i\theta - (n-1) \cdot 2\pi/N_{ph}) \quad (20)$$

여기서, N_i 는 회전자의 극수이다.

2.2 방향성 벡터를 갖는 진화프로그래밍

60년대 중반부터 지속적으로 연구가 진행되어 온 진화알고리즘(evolutionary algorithm : EA)은 최근 들어 이에 대한 관심이 크게 늘어 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 최적화 문제에 있어서 진화알고리즘은 매우 유용한 기법으로 기존의 최적점 탐색 방법에서의 같은 국부 탐색이 아닌, 여러해를 동시에 탐색하는 전역 탐색 방법이므로 국부 수렴의 확률이 줄어든다. 특히 파라메터 영역의 연속성과 미분치의 존재성과 같은 조건이 필요 없으며, 다른 탐색 방법에서 필요로 하는 보조적인 정보도 필요치 않다[10-11]. 본 연구에서는 이러한 진화알고리즘 중 진화프로그래밍을 사용하고자 한다. 특히 진화프로그래밍의 빠른 수렴 특성을 구하고자 방향성 벡터를 갖는 진화프로그래밍을 사용하고자 한다[12]. 방향성 벡터를 갖는 진화프로그래밍은 더 빠른 수렴 속도를 얻기 위하여 2가지 측면에서 방향성의 도입을 적용하였다. 첫번째는 진화프로그래밍 각각의 개체에 의하여 방향성을 얻는 방법과 두번째는 각 세대의 방향성을 얻는 방법을 들 수 있다. 각각의 개체에 의한 방향성은 부모 세대와 자식 세대간의 일대일 비교에 의하여 방향성을 얻는 방법이며, 각 세대의 방향성은 집단 내의 가장 좋은 개체의 방향으로 방향성을 얻는 방법이다. 이는 일반적인 진화프로그래밍이나 기존의 방향성을 갖는 진화프로그래밍 역시 무성생식만을 하나, 이러한 집단들이

방향성을 갖도록 함으로써 유성생식이 가능하다. 즉 가장 좋은 개체의 방향으로 랜덤변수를 발생하므로 각각의 개체는 유성생식의 효과를 가진다. 본 연구에서는 방향성 벡터를 갖는 진화프로그래밍을 사용하여, 슬라이딩 모드 관측기의 이득을 최적화하고 PI제어기의 제어이득을 최적화하고자 한다. 슬라이딩 모드 관측기의 이득은 위치 및 속도 추정값을 계산하는 중요한 요소로서 정밀한 속도 추정을 위해 정확한 이득 k_θ , k_ω 를 구현하여야 한다.

정밀한 슬라이딩 모드 관측기의 위치 및 속도 추정과 제어이득의 선정하기 위하여 진화프로그래밍의 파라메터 벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$a_i = [k_{\theta,i}, k_{\omega,i}, PI_{p,i}, PI_{i,i}, dir_{prod}(k_{\theta,i}), dir_{prod}(k_{\omega,i}), dir_{prod}(PI_{p,i}), dir_{prod}(PI_{i,i})]^T \quad (21)$$

여기서, $k_{\theta,i}$ 는 i 번째 슬라이딩 모드 관측기의 위치이득, $k_{\omega,i}$ 는 i 번째 슬라이딩 모드 관측기의 속도이득, $PI_{p,i}$ 는 i 번째 PI 제어기의 비례이득, $PI_{i,i}$ 는 i 번째 PI 제어기의 적분이득을 나타내었다. 그리고 $dir_{prod}()$ 는 방향성 벡터의 합이다.

진화프로그래밍의 최적화를 위한 적합도 함수는 아래와 같이 설정하였다.

$$\phi(a) = \frac{1}{\eta_1 \sum_{k=0}^N |e_1(k)| + \eta_2 \sum_{k=0}^N |e_2(k)| + \eta_3 \sum_{k=0}^N |e_3(k)|} \quad (22)$$

$$e_1(k) = \omega - \hat{\omega}, \quad e_2(k) = \omega_{ref} - \omega, \quad e_3(k) = \omega - \omega_f$$

여기서, ω_{ref} 는 모터의 지령속도, ω 는 모터의 속도, $\hat{\omega}$ 는 모터의 추정속도, ω_f 는 모터의 추정속도의 2차 필터링값을 의미한다. 그리고 N 은 전체 시간샘플링 횟수이고, η_1, η_2, η_3 는 상수값이다.

2.2 SRM 제어시스템 구성 및 모의 실험

그림 1은 SRM 제어시스템의 구성을 나타내었다.

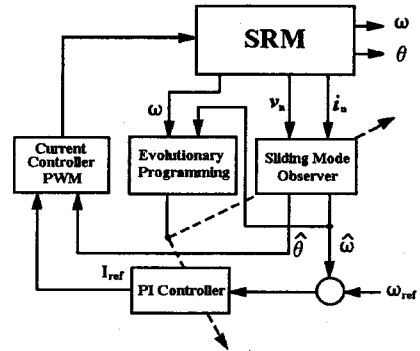


그림 1. SRM 제어를 위한 블록다이어그램
Fig. 1. Block diagram of SRM control

SRM의 모의실험에서 샘플링 주기는 2^{-13} 으로 하였으며, 그림 2는 최적화 알고리즘의 유용성을 보이기 위하여 슬라이딩 모드 관측기의 이득값과 전류 제어기의 이득값을 아래 표 1과 같이 주었을 경우의 응답곡선이다.

그림 2의 결과에서 알 수 있듯이 슬라이딩 모드 관측기의 이득과 제어기의 이득의 변화에 SRM의 성능이 매우 민감함을 보였다. 이는 슬라이딩 모드 관측기의 이득이 추정 위치와 추정 속도의 한계 크기를 결정하므로, 적절한 선정이 요구되어진다. 또는 PI 제어기의 이득 역시 제어성능을 결정하는 중요한 요인으로 작용함을 볼 수 있다.

본 연구에서는 그림 1과 같이 제어기를 구성하여 최적화 알고리즘인 진화 프로그래밍을 사용하여 슬라이딩

모드 관측기와 제어기의 이득을 최적화 하고자 한다.

진화 프로그래밍의 개체수는 10개로 하였으며, 세대수는 20세대이다. 그림 3 에서 최적이득을 구하기 위한 적합도 함수의 변화추이를 나타내었고, 그림 4에서는 최적화된 이득을 사용한 SRM의 성능을 나타내었다. 최적화되기 전의 성능에 비하여 매우 개선됨을 확인할 수 있었다.

표 1 관측기 및 제어기의 이득값

Table 1 Gains of observer and controller.

경우	슬라이딩 모드 관측기		PI 전류 제어기	
	k_w	k_θ	비례이득	적분이득
경우 1	2^6	2^{11}	2×0.01	8×0.01
경우 2	2^6	2^{12}	2×0.01	8×0.01
경우 3	2^6	2^{11}	3×0.01	8×0.01
경우 4	2^6	2^{11}	2×0.01	7×0.01

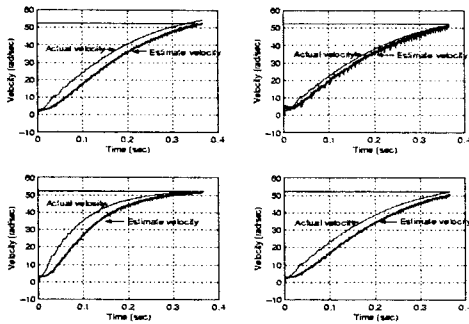


그림 2. SRM 속도응답곡선

a) 경우 1 b) 경우 2 c) 경우 3 d) 경우 4

그림 2. The velocity responses of SRM

a) case 1 b) case 2 c) case 3 d) case 4

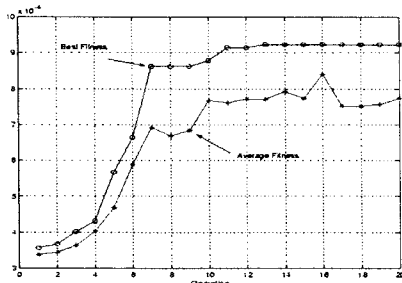


그림 3. 최대 적합도 함수의 변화추이
Fig. 3. Trend of maximum fitness

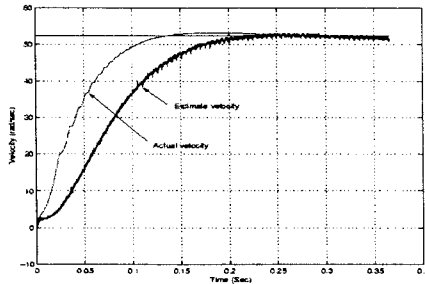


그림 4. 최적화된 이득을 갖는 SRM의 속도응답곡선
Fig.4. The velocity responses of SRM with optimum gains

3. 결 론

SRM의 센서리스 구동에 대한 연구로 슬라이딩 모드 관측기를 사용하는 방법을 적용하였다. 그러나, 기존의 슬라이딩 모드 관측기를 사용하는 방법은 슬라이딩 모드 관측기의 이득과 페루프 제어기의 제어이득에 의한 상당히 민감하여, 정확한 파라미터들의 선정이 필요하다. 즉, 슬라이딩 모드의 떨림(chattering) 현상과 그 떨림 폭의 선정이 성능에 많은 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 SRM 모터의 속도와 위치를 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 추정하고, 정밀한 속도 추적을 위해 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들과 PI 제어기의 이득들을 방향성 벡터를 갖는 진화 프로그래밍을 사용하여 최적화하였다. 이를 모의실험을 통하여 그 유용성을 확인하였다.

(참고 문헌)

- [1] H. Moghbelli, G. E. Adams and R. G. Hoft, "Performance of 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors," IEEE Trans. IA, Vol. 27, No. 3, pp. 531-538, 1991
- [2] J. T. Bass, N.M. Ehsani and T. J. Miller, "Robust Torque control of Switched-Reluctance Motors without a Shaft-Position Sensor," IEEE Trans. IE, Vol. 33, No. 3, pp. 212-216, 1986
- [3] P. P. Acarnley, R. J. Hill and C. W. Hooper, "Detection of Rotor Position in Stepping and Switched Reluctance Motors by Monitoring of Current Waveforms," IEEE Trans. IE, Vol. 32, No. 3, pp 215-222, 1985
- [4] J. P. Lyons, S. R. MacMinn, M. A. Preston, "Flux/Current Methods for SRM Rotor Position Estimation," IEEE IAS Annual Meeting, pp.482-487, 1991
- [5] P. P. Acarnley, C. D. French and I. H. Albahadly, "Position Estimation in Switched-Reluctance Drivers," EPE, pp 765-770, 1995
- [6] C. Elmas and H. Z. L. Parra, "Position Sensorless Operation of a Switched Reluctance Drive Based on Observer," EPE, pp 82-87, 1993
- [7] Roy A. McCann, Mohammad S. Islam, and Iqbal Husain, "Application of a Sliding-Mode Observer for Position and Speed Estimation in Switched Reluctance Motor Drivers," IEEE Trans. IA, Vol. 37, No. 1, pp. 51-58, 2001
- [8] Mohammad S. Islam, and Iqbal Husain, "Torque-ripple Minimization with Indirect Position and Speed Sensing for Switched Reluctance Motors," IEEE Trans. IE, Vol. 47, No. 5, pp. 1126-1133, 2000
- [9] Y. J. Zhan, C. C. Chan, and K. T. Chau, "A Novel Siding-Mode Observer for Indirect Position Sensing of Switched Reluctance Motor Drivers," IEEE Trans. IE, Vol. 46, No. 2, pp. 390-397, 1999
- [10] David E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1989.
- [11] L. David, Genetic Algorithms and Simulated Annealing, Reading, MA: Pitman Publishing, 1987.
- [12] 박진현, 배준경, "방향성 벡터를 갖는 개선된 진화프로그래밍," 한국 퍼지 및 지능시스템 학회 논문지, Vol. 10 No. 6, pp. 542-547, 2000