

# 진화 슬라이딩 모드 관측기를 사용한 SRM의 위치 센서리스 제어

## Position Sensorless Control of SRM using Evolutionary Sliding Mode Observer

박진현\* · 박한웅\*\* · 최영규\*\*\*

Jin-hyun Park\*, Han-woong Park\*\*, and Young-kiu Choi\*\*\*

\*진주산업대학교 산업자동화공학과

\*\*해군사관학교 전기과

\*\*\*부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부

### 요 약

진화프로그래밍과 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여, SRM의 위치 속도를 추정하고 이를 속도제어에 적용하는 것을 소개하고자 한다. 회전자 정보각의 검출은 일반적으로 엔코더나 레졸버를 사용하나, 이러한 기계적인 외부 위치 센서는 가격이 비싸므로 SRM 시스템의 설치비용과 전체 드라이버 시스템의 크기가 증가하는 요인이 된다. 따라서, 산업현장에 적용하는 한계의 원인이 된다.

본 연구에서는 위치 및 속도센서를 제거한 슬라이딩 모드 관측기를 사용하여 SRM 드라이브에 적용하였다. 그러나 SRM의 제어에 있어 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들이 매우 민감하여 작은 변화에 대해서도 위치와 속도 추정 결과에 많은 영향을 미친다. 제어이득을 일정하게 유지하고, 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들을 크게 변화시킬 경우, 관측기의 파라미터들은 관측기의 떨림 폭을 결정하므로, 위치와 속도의 추정값의 변화가 크게 발생하며 관측기의 떨림 현상이 나타난다. 본 연구에서는 이러한 슬라이딩모드 관측기의 파라미터들과 제어기의 이득들을 방향성 벡터를 갖는 진화 프로그래밍을 사용하여 최적의 파라미터들을 선정하고, 이를 제어시스템으로 구현하고자 한다.

### 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 and evolutionary programming. 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. But, if sliding mode observer parameters are selected to be large, the corresponding rapid changes of estimated position and velocity result in chattering phenomenon. Therefore, in order to reduce the chattering, this observer parameters are optimized by evolutionary programming. And PID controller is also optimized to track precisely for the SRM using evolutionary programming.

**Key Words** : 진화프로그래밍, 슬라이딩 모드 관측기

### 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 필스에 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 센

접수일자 : 2001년 8월 8일  
완료일자 : 2001년 11월 12일

서리스 구동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[2-8]. 센서리스 구동에 대한 연구는 개루프에 의한 제어법[2], 자속/전류에 의한 제어법[3], 상승 인덕턴스에 의한 제어법[4], 전류/전압에 의한 관측기 설계에 의한 방법[5-8]등 많이 연구되고 있다.

특히, 관측기의 설계에 의한 제어방법은 SRM의 선형화된 수학적 모델로부터 슬라이딩 모드 관측기를 사용하여 위치 및 속도를 추정하였다. 슬라이딩 모드(sliding mode) 관측기의 사용은 자성체의 포화, 부하의 변화, SRM 파라미터의 변화 등에도 강인하게 속도와 위치를 추정하며, 특히 외란 제거 능력이 뛰어남을 보인다. 그러나 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들과 페루프 제어시스템의 제어 이득들을 시행착오적인 반복적인 실험에 의하여 선정해야 하는 어려움을 가지고 있다[6, 7]. 이는 SRM의 제어에 있어 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들이 매우 민감하여 작은 변화에 대해서도 위치와 속도 추정 결과에 많은 영향을 미친다. 만약, 제어이득을 일정하게 유지하고, 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들을 크게 변화시킬 경우, 관측기의 파라미터들은 관측기의 떨림 폭을 결정하므로, 위치와 속도의 추정값의 변화가 크게 발생하며 관측기의 떨림 현상이 나타난다. 반대로 작게 선정할 경우, 위치와 속도의 추정값의 변화가 작아 속응성 있는 위치와 속도 추정에 문제가 생기게 된다. 또한, 슬라이딩 모드 관측기 파라미터들과 더불어 속도 제어시스템의 제어기 이득도 추정된 속도에 의하여 제어 시스템이 구성되므로 독립적인 제어기 설계가 어렵다. 따라서 적절한 슬라이딩 모드 관측기 파라미터들과 제어이득을 선정하는 것이 매우 어렵다.

본 연구에서는 이러한 슬라이딩모드 관측기의 파라미터들과 제어기의 이득들을 방향성 벡터를 갖는 진화 프로그래밍[9]을 사용하여 최적의 파라미터들을 선정하고, 이를 제어시스템으로 구현하고자 한다. 따라서 모의실험을 통하여 부드러운 위치와 속도 추정 및 빠른 추정 오차의 수렴성을 보장하는 관측기의 파라미터들을 선정하고, 정밀한 제어를 위한 제어기의 이득을 최적화 하고자 한다.

## 2. SRM의 비선형 모델링 및 슬라이딩 모드 관측기

### 2.1 SRM의 비선형 모델링

SRM의 비선형 자기 특성은 로터의 위치, 권선전류의 측정으로부터 비선형 함수로 모델링 되며, SRM의 전자기 출력 토크 역시 비선형 함수로 묘사될 수 있다. 따라서 자속 및 토크는 아래 식 (1), (2)와 같이 정의된다.

$$\lambda = \lambda(i, \theta) \quad (1)$$

$$T = T(i, \theta) \quad (2)$$

이러한 비선형 함수값은 실제 실험을 위한 모터로부터 로터의 위치와 전류값을 변화시키며 인덕턴스를 측정된 데이터로부터 구해진다.

SRM의 상태 미분 방정식은 아래 식과 같이 정의되어진다[7].

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

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

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

여기서,  $R_n$  은 n상의 고정자 저항,  $i_n$ 은 n상의 고정자 전류,  $v_n$  은 n상의 고정자 전압값을 의미한다. 그리고  $\theta$ 와  $\omega$ 는 회전자 위치와 속도를 나타내며  $T_L$ 은 부하토크를 나타내었다.

### 2.2 슬라이딩 모드 관측기

슬라이딩 모드 관측기는 회전자의 위치와 속도를 추정하기 위한 SRM의 상태 공간 모델로부터 구한다[7-8]. 간단히 말하면, 슬라이딩 모드 관측기는 전압과 전류를 측정하여 회전자의 위치와 속도를 추정한다.

슬라이딩 모드 관측기의 오차 수정은 모터의 전압 전류의 측정으로부터 구해지는 것과 수학적 모델과 인덕턴스 데이터로부터 계산된 모터 자속의 차를 기초로 하여 구하여 진다. 실제 전압과 전류의 측정으로부터 구해지는 자속은 식 (6)과 같이 구하여진다.

$$\lambda_n(t) = \int_0^t (v_n(t) - i_n(t)R_n)dt \quad (6)$$

이와 같은 상 자속 추정은 모터가 움직이지 않거나, 매우 낮은 속도일 때, 자속 추정 적분 오차가 축적될 수 있다. 그러므로, 매우 낮은 속도에서 센서리스 동작의 연구가 매우 중요하다. 그러나 SRM이 속도를 갖는다면, 전류나 자속은 주기적으로 0이 되므로 적분 오차는 어떤 한계값을 가지게 될 것이다.

본 논문에서는 SRM을 위한 2차 슬라이딩 모드 관측기를 아래 식과 같이 구성하였다.

$$\hat{\theta} = \hat{\omega} + k_\theta \text{sgn}(e_f) \quad (7)$$

$$\hat{\omega} = k_\omega \text{sgn}(e_f) \quad (8)$$

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

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

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

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 대입하면,

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

식(12)에 속도 오차 정의식(10)을 대입하면, 위치 오차 동역학식은 다음과 같다.

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

그리고, 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 동역학식은 아래와 같다.

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

만약, 위의 식에서 앞의 세가지 항보다 큰  $k_\omega$ 를 선택한다면, 속도 오차 동역학식은 다음과 같이 간단히 정리될 수 있다.

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

따라서, 식 (13)과 식 (16)으로부터 관측기의 오차 수렴성이 나타나는데, 만약 슬라이딩 표면( $e_\theta = 0$ )에 도달할 경우, 오차 동역학식은 아래와 같이 되어진다. 즉 슬라이딩 모드 관측기의 오차는 슬라이딩 표면에 도달할 경우, 위치 오차는 0가 되고, 속도 오차는 지속적으로 감소함을 나타낸다.

$$\frac{de_\theta}{dt} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{de_\omega}{dt} = -\left(\frac{k_\omega}{k_\theta}\right)e_\omega \quad (18)$$

이러한 오차 동역학식이 안정화될 수 있는 오차 함수는 많이 존재하나, 오차 함수는  $\theta$ 나  $\omega$ 로부터 구할 수 없으므로, 측정된 상전류와 추정된 상전류로부터 자속을 계산하여, 오차 함수를 정의하였다. 아래는 선택된 오차함수를 나타낸다.

$$e_f = \sum_{i=1}^{N_s} f_n'(\hat{\theta})(\hat{\lambda}_n - \lambda_n) \quad (19)$$

오차함수의 오차 항에는 식 (20)과 같이 추정된 회전자의 위치가 고려된 추정된 자속이 포함되어 있다. 이는 미리 측정된 인덕턴스 프로파일로부터 구한다.

$$\hat{\lambda}_n(t) = \hat{\lambda}_n(i_n(t), \hat{\theta}(t)) \quad (20)$$

함수  $f_n(\theta)$ 의 선택은 오차함수 식(19)가 위치 추정의 오차가 수렴이 보장되도록 아래 식과 같이 선택하였다[7]. 각 상의 인덕턴스가 비선형 주기함수를 가지므로 선형 주기함수로 변환하여 근사하였다.

$$f_n(\theta) = \cos(N_r\theta - (n-1) \cdot 2\pi/N_{ph}) \quad (21)$$

여기서,  $N_r$ 은 회전자의 극수이며,  $N_{ph}$ 는 고정자 상수이다.

### 3. 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 방법에서와 같은 국부 탐색이 아닌, 여러 해를 동시에 탐색하는 전역 탐색방법이므로 국부 수렴의 확률이 줄어든다. 특히 파라미터 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[9]. 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 파라미터들을 최적화하고, PID제어기의 제어이득을 최적화하고자 한다. 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들은 관측기의 위치와 속도 추정값의 최대 떨림 폭을 결정하는 중요한 요소이다. 그러므로 떨림 폭을 감소시키며, 빠른 위치, 속도 추정을 위하여 정확한 관측기의 파라미터  $k_\theta$ ,  $k_\omega$ 를 구해야한다. 그리고 이러한 추정값에 대한 제어성능 향상을 위하여 제어이득을 최적화하여야 한다.

슬라이딩 모드 관측기의 위치와 속도 추정과 최적의 제어이득의 선정하기 위하여 진화프로그래밍의 파라미터 벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{a}_i = [k_{\theta,i}, k_{\omega,i}, PID_{P,i}, PID_{I,i}, PID_{D,i}, \text{dir}_{prod}(k_{\theta,i}), \text{dir}_{prod}(k_{\omega,i}), \text{dir}_{prod}(PID_{P,i}), \text{dir}_{prod}(PID_{I,i}), \text{dir}_{prod}(PID_{D,i})]^T \quad (22)$$

여기서,  $k_{\theta,i}$ 는  $i$ 번째 슬라이딩 모드 관측기의 위치이득,  $k_{\omega,i}$ 는  $i$ 번째 슬라이딩 모드 관측기의 속도이득,  $PID_{P,i}$ 는  $i$ 번째 PI 제어기의 비례이득,  $PID_{I,i}$ 는  $i$ 번째 PI 제어기의 적분이득,  $PID_{D,i}$ 는  $i$ 번째 PI 제어기의 미분이득을 나타내었다. 그리고  $\text{dir}_{prod}()$ 는 방향성 벡터의 합이다.

진화프로그래밍의 최적화를 위한 적합도 함수는 아래와 같이 설정하였다.

$$\Phi(\mathbf{a}_i) = \frac{1}{\eta_1 \sum_{k=0}^N |e_1(k)| + \eta_2 \sum_{k=0}^N |e_2(k)| + \eta_3 \sum_{k=0}^N |e_3(k)|} \quad (23)$$

여기서,  $N$ 은 전체 시간샘플링 횟수이고,  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\eta_3$ 는 상수값이다.

적합도 함수의 오차항들은 아래에 정의하였다.

$$e_1(k) = (\omega_{ref} - \omega(k))(e^{\frac{ak}{b}} - 1) \quad (24)$$

$$e_2(k) = \omega(k) - \hat{\omega}(k) \quad (25)$$

$$e_3(k) = \hat{\omega}(k) - \omega_f(k) \quad (26)$$

여기서,  $\omega_{ref}$ 는 모터의 지령속도,  $\omega(k)$ 는 모터의 속도,  $\hat{\omega}(k)$ 는 모터의 추정속도,  $\omega_f(k)$ 는 모터의 추정속도의 2차 필터링값을 의미한다.  $e_1(k)$ 는 PID 제어기의 제어이득의 최적화를 위한 항이며,  $e_2(k)$ 는 실제속도와 추정속도의 차로써 추정속도가 빠르게 실제속도를 추정하도록 하기 위한 항이다. 그리고  $e_3(k)$ 는 추정속도의 떨림 폭이 최소화되도록 억제하는 항이다.

4. SRM 제어시스템 구성 및 모의 실험

그림 1은 SRM 제어시스템의 구성을 나타내었으며, 모의 실험을 위한 SRM의 사양은 표 1과 같다. 모의 실험을 위한 인덕턴스 프로파일은 그림 2와 같이 실제 모터로부터 회전자를 1° 씩 변화시키면서 전류 한계치를 12A로 하고, 이 한계치에 도달할 때까지 전압펄스를 인가하여 그 때의 전류파형을 오실로스코프로 측정하였다. 그리고 권선 저항을 고려하여 측정된 전압과 전류 데이터에 의한 인덕턴스를 계산하였다.

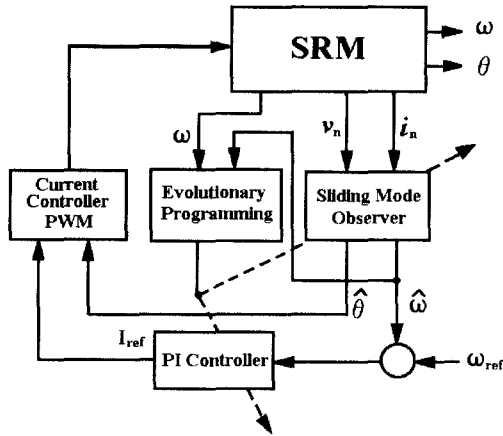


그림 1. SRM 제어를 위한 블록다이어그램  
Fig. 1. Block diagram of SRM control

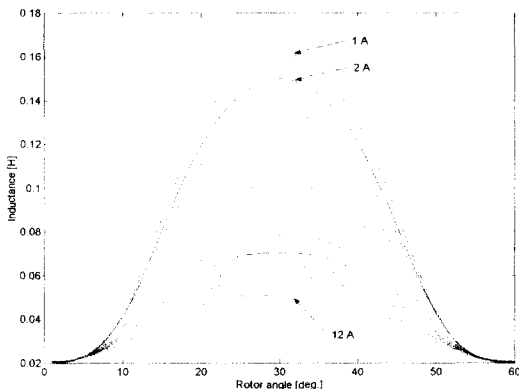


그림 2. 측정된 인덕턴스 프로파일  
Fig. 2. The measured inductance profiles

표 1. SRM의 사양  
Table 1. Specification of SRM

SRM (고정자/회전자)	정격출력 (W)	전압 (V)	고정자 극수	회전자 극수
8/6	400W	160V	22°	22°

SRM의 모의실험에서 샘플링 주기는 2<sup>-13</sup>으로 하였다. 그림 3-6은 최적화 알고리즘의 유용성을 보이기 위하여 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들과 PID 제어기의 이득값을 아래 표 2와 같이 주었을 경우의 응답곡선이다. 파라미터들의 설정은 500rpm의 지령속도에 대해 추적이 가능하도록 설

정하였다.

표 2. 관측기의 파라미터와 제어기의 이득값  
Table 2. Controller gains and observer parameters.

cases	슬라이딩 모드 관측기		PID 제어기		
	$k_\theta$	$k_\omega$	비례이득	적분이득	미분이득
case (1)	2 <sup>6</sup>	2 <sup>11</sup>	3×10 <sup>-2</sup>	8×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-4</sup>
case (2)	2 <sup>6</sup>	2 <sup>12</sup>	3×10 <sup>-2</sup>	8×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-4</sup>
case (3)	2 <sup>5</sup>	2 <sup>11</sup>	3×10 <sup>-2</sup>	8×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-4</sup>
case (4)	2 <sup>5</sup>	2 <sup>12</sup>	3×10 <sup>-2</sup>	8×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-4</sup>
case (5)	2 <sup>6</sup>	2 <sup>11</sup>	2×10 <sup>-2</sup>	8×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-4</sup>
case (6)	2 <sup>6</sup>	2 <sup>11</sup>	3×10 <sup>-2</sup>	7×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-4</sup>
case (7)	2 <sup>6</sup>	2 <sup>11</sup>	3×10 <sup>-2</sup>	8×10 <sup>-2</sup>	1×10 <sup>-4</sup>
case (8)	2 <sup>6</sup>	2 <sup>11</sup>	3×10 <sup>-2</sup>	7×10 <sup>-2</sup>	1×10 <sup>-4</sup>

그림 3-4은 표 1의 경우 (1)~(4)에 해당하는 성능으로 PID 제어기의 이득값은 고정시키고, 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들을 변화시켰을 때의 성능이다. 이의 결과에서도 알 수 있듯이 관측기의 작의 변화에도 추정 속도의 성능에 많은 영향이 있음을 알 수 있다. 또한 관측기의 속도 추정을 위한 파라미터  $k_\omega$ 가 크면, 추정 속도의 떨림 폭이 증가함을 보인다.

그림 5-6은 표 1의 경우 (5)~(8)에 설정한 파라미터들로 관측기의 파라미터  $k_\theta$ ,  $k_\omega$ 를 2<sup>6</sup>, 2<sup>11</sup>으로 고정시키고, PID 제어기의 이득값을 변화시켰을 때의 결과이다. 관측기의 파라미터들과 더불어 제어기의 이득값의 변화에도 추정 속도와 추적 속도에 많은 영향을 미친다.

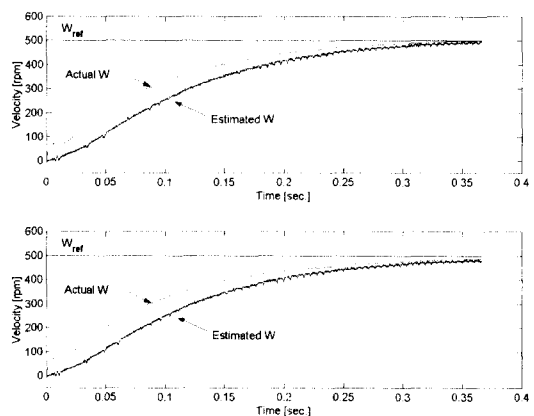


그림 3. SRM 속도응답곡선  
a) 경우 (1) b) 경우 (2)  
Fig. 3. The velocity responses of SRM  
a) case (1) b) case (2)

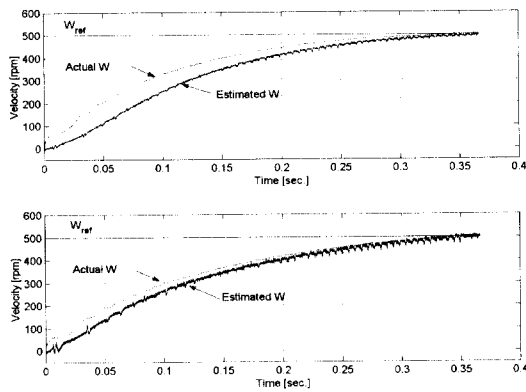


그림 4. SRM 속도응답곡선  
a) 경우 (3) b) 경우 (4)  
Fig. 4. The velocity responses of SRM  
a) case (3) b) case (4)

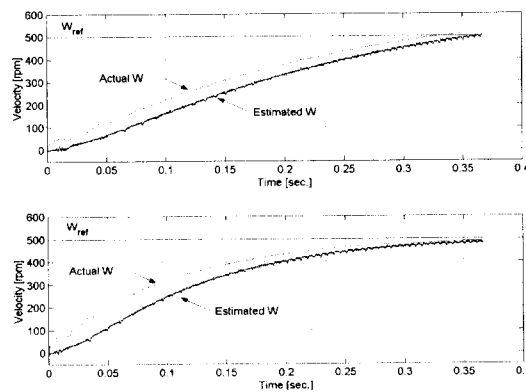


그림 5. SRM 속도응답곡선  
a) 경우 (5) b) 경우 (6)  
Fig. 5. The velocity responses of SRM  
a) case (5) b) case (6)

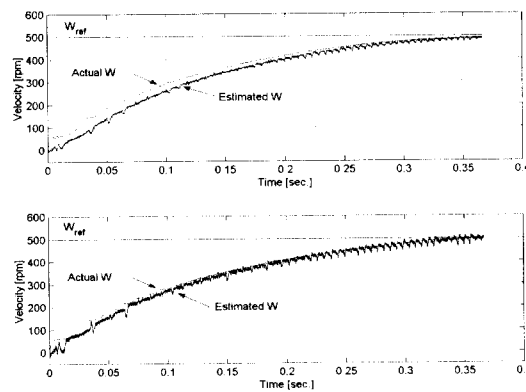


그림 6. SRM 속도응답곡선  
a) 경우 (7) b) 경우 (8)  
Fig. 6. The velocity responses of SRM  
a) case (7) b) case (8)

따라서, 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들과 제어기의

이득 변화에 SRM의 성능이 매우 민감하며, 속도 추정과 속도 추종 성능이 크게 차이를 보였다. 이는 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들이 추정 위치와 추정 속도의 한계 크기를 결정하므로, 적절한 선정이 요구되어진다. 또는 PID 제어기의 이득 역시 제어성능을 결정하는 중요한 요인으로 작용함을 볼 수 있다. 기존의 연구에서는 이러한 관측기의 파라미터들과 제어기의 이득값들을 실험을 통하여 시행착오법(try and error)을 사용하여 적절한 성능이 되도록 구하였으나, 본 연구에서는 그림 1과 같이 제어기를 구성하여 최적화 알고리즘인 진화 프로그래밍을 사용하여 슬라이딩 모드 관측기와 제어기의 이득을 최적화 하고자 한다.

제안된 알고리즘 구현을 위한 진화 프로그래밍의 파라미터들은 표 3과 같다.

표 3. 진화프로그래밍의 파라미터  
Table 3. Parameters of Evolutionary Programming

내용	방향성 벡터를 갖는 진화프로그래밍
Type	$(\mu + \lambda)$ -EP
$\mu$ 와 $\lambda$ 의 수	$\mu = 40, \lambda = 40$
집단	10
세대수	30
적합도(maximize)	식 (23) ~ 식 (26)

그림 7은 최적의 파라미터 문자열을 구하기 위한 적합도 함수의 변화추이를 나타내었다. 작은 집단과 작은 세대수에도 빠르게 수렴됨을 알 수 있다. 또한 방향성 벡터를 갖는 진화 프로그래밍에 의해 최적화된 파라미터는 표 4와 같다.

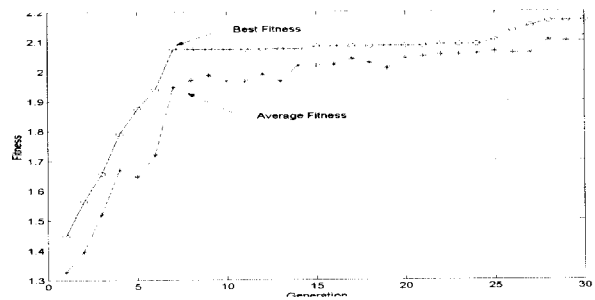


그림 7. 최대 적합도 함수의 변화추이  
Fig. 7. Trend of maximum fitness

표 4. 최적화된 파라미터  
Table 4. Optimization parameters

슬라이딩 모드 관측기		PI 전류 제어기		
$k_\theta$	$k_\omega$	비레이득	적분이득	미분이득
2 <sup>5.3825</sup>	2 <sup>10.0599</sup>	$4.1411 \times 10^{-2}$	$9.4794 \times 10^{-2}$	$1.4954 \times 10^{-2}$

그림 8~9는 진화 프로그래밍에 의해 최적화된 파라미터와 제어기의 이득을 사용하여, 실제 회전자와 추정된 회전자의 각이 0° 라고 가정하고, 지령 속도 500[rpm]에 대한 위치와 속도의 추정값과 속도 추적 결과를 나타내었다. 그림 8에서 알 수 있듯이 실제 회전자의 위치를 슬라이딩 모드 관측

기에 의하여 잘 추정함을 보인다. 또한, 위치 추정값의 떨림 폭이 매우 작음을 확인할 수 있다. 그림 9-(a)에서는 실제 회전자의 속도와 추정된 속도를 나타내었다. 최적화된 제어기에 의하여 빠르게 정상 상태에 도달함을 알 수 있었다. 그리고 약 250 msec 후 실제 속도와 추정된 속도가 거의 같음을 확인할 수 있다. 그리고 속도 추정값의 떨림폭도 매우 작음을 확인할 수 있다. 그림 9-(b)에서는 이러한 추적 속도에 대한 전류 명령과 한 상의 전류값을 나타내었다.

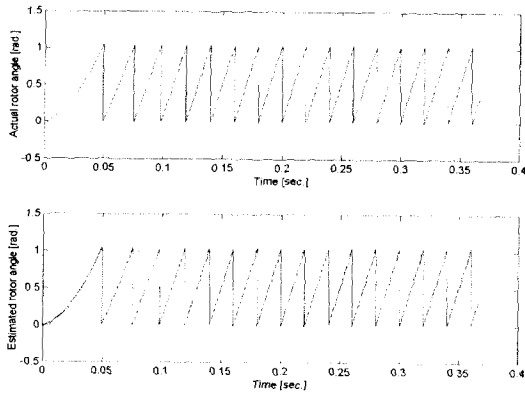


그림 8. 실제 각도 및 추정된 각도 - 실제 각도  $0^\circ$   
Fig. 8. Actual angle and Estimated angle - Actual angle is assumed to be  $0^\circ$

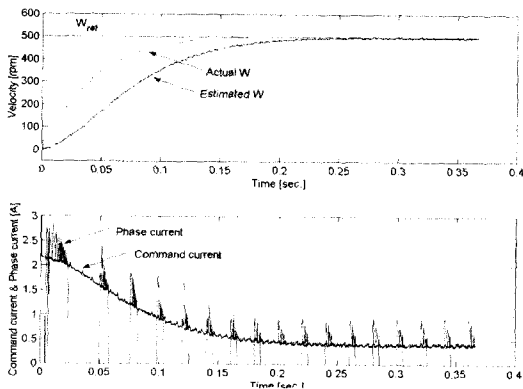


그림 9. (a) 실제속도와 추정된 속도 (b) 전류명령과 상전류 - 실제각도  $0^\circ$   
Fig. 9. (a) Actual velocity and Estimated velocity (b) Command current and phase current - Actual angle is assumed to be  $0^\circ$

그림 10~11은 실제 회전자의 각을  $50^\circ$  라고 가정하였을 때의 지령 속도에 대한 위치와 속도의 추정값과 속도 추적 결과를 나타내었다. 그림 10에서 알 수 있듯이 실제 회전자와 추정값이 다를 경우에도 약 5 msec 후 잘 추정함을 보인다. 이것 역시, 위치 추정값의 떨림폭이 매우 작음을 확인할 수 있다. 그림 11-(a)에서도 실제 회전자의 속도와 추정된 속도가 빠르게 정상 상태에 도달함을 알 수 있었다. 그림 11-(b)에서는 이러한 추적 속도에 대한 전류 명령과 한 상의 전류값을 나타내었다. 결과적으로 회전자의 위치에 관계없이 슬라이딩 모드 관측기가 실제 위치와 속도에 대하여 잘 추정함을 보인다.

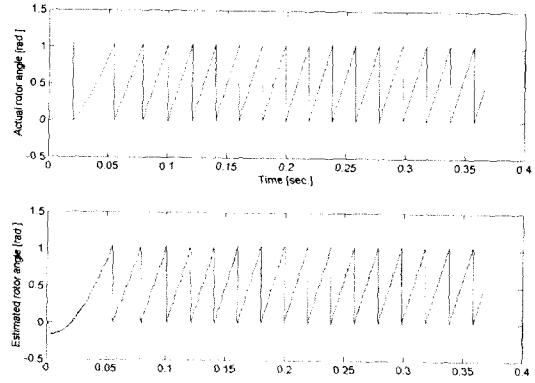


그림 10. 실제 각도 및 추정된 각도 - 실제 각도  $50^\circ$   
Fig. 10. Actual angle and Estimated angle - Actual angle is assumed to be  $50^\circ$

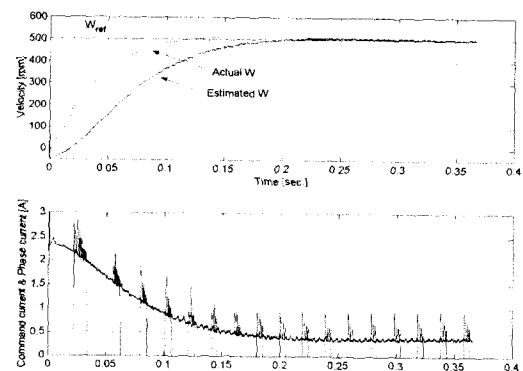


그림 11. (a) 실제속도와 추정된 속도 (b) 전류명령과 상전류 - 실제각도  $50^\circ$   
Fig. 11. (a) Actual velocity and Estimated velocity (b) Command current and phase current - Actual angle is assumed to be  $50^\circ$

그림 12~13은 실제 회전자의 각을  $50^\circ$  라고 가정하고 부하토크를 0.01Nm를 인가한 경우, 지령 속도에 대한 위치와 속도의 추정값과 속도 추적 결과를 나타내었다. 결과 그림에서 알 수 있듯이 슬라이딩 모드 관측기의 강인함에 의하여 위치와 속도가 잘 추정함을 보인다. 특히 추정값의 떨림폭도 작음을 확인할 수 있었다.

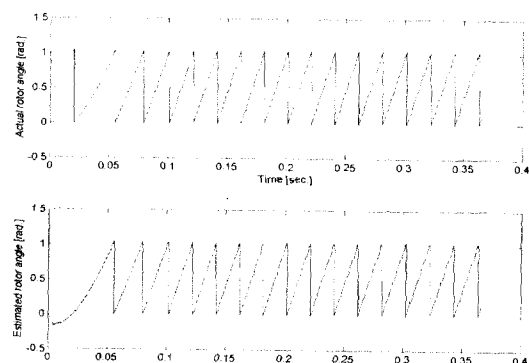


그림 12. 실제 각도 및 추정된 각도 - 실제 각도  $50^\circ$  이고 부하토크 0.01Nm로 가정  
Fig. 12. Actual angle and Estimated angle - Actual angle is assumed to be  $50^\circ$  and Load torque 0.01Nm

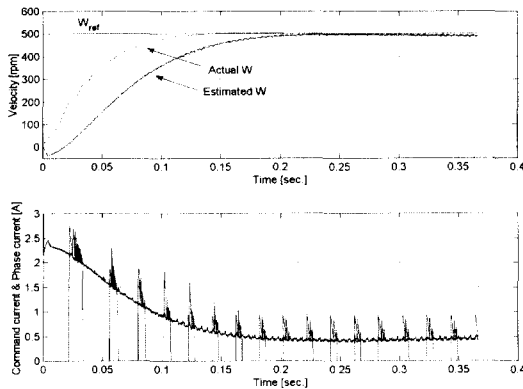


그림 13. (a) 실제속도와 추정된 속도 (b) 전류명령과 상전류 - 실제각도 50° 부하토크 0.01Nm

Fig. 13. (a) Actual velocity and Estimated velocity (b) Command current and phase current - Actual angle is assumed to be 50° and load torque 0.01Nm

### 5. 결론

SRM의 센서리스 구동에 대한 연구로 슬라이딩 모드 관측기를 사용하는 방법을 적용하였다. 그러나, 기존의 슬라이딩 모드 관측기를 사용하는 방법은 슬라이딩 모드 관측기의 파라미터들과 페루프 제어기의 제어이득에 상당히 민감하여, 정확한 파라미터들과 제어이득의 선정이 필요하다. 따라서 이러한 파라미터들을 선택하기 위해서는 시행 착오법을 사용하여 많은 시간과 노력이 요구되어진다. 이는 슬라이딩 모드의 떨림 현상이 관측기의 파라미터들에 밀접한 관계를 가지고 있으므로 관측기의 파라미터들의 선정이 성능에 많은 영향을 미친다. 또한 제어기의 이득 역시 관측기의 추정값을 사용하므로 제어기의 이득들도 많은 영향을 미치게 된다.

따라서 본 연구에서는 SRM 모터의 속도와 위치를 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 빠르게 추정하고, 추정된 위치와 속도 오차의 수렴성과 관측기의 떨림 현상을 줄이기 위해 관측기의 파라미터들을 방향성 벡터를 갖는 진화 프로그래밍으로 최적화하였다. 그리고 정밀한 속도 추적을 위한 PID 제어기의 이득들도 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. on Industrial Application*, 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. on Industrial Electronics*, vol. 33, no. 3, pp. 212-216, 1986

[3] 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

[4] 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. on Industrial Electronics*, vol. 32, no. 3, pp. 215-222, 1985

[5] C. Elmas and H. Z. L. Parra, "Position Sensorless Operation of a Switched Reluctance Drive Based on Observer," *EPE*, pp. 82-87, 1993

[6] 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. on Industrial Application*, vol. 37, no. 1, pp. 51-58, 2001

[7] Mohammad S. Islam, and Iqbal Husain, "Torque-ripple Minimization with Indirect Position and Speed Sensing for Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, pp. 1126-1133, 2000

[8] 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. on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 2, pp. 390-397, 1999

[9] 박진현, 배준경, "방향성 벡터를 갖는 개선된 진화 프로그래밍," *한국 퍼지 및 지능시스템 학회 논문지*, vol. 10 no. 6, pp. 542-547, 2000

[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.

### 저 자 소 개



#### 박진현 (Jin-Hyun Park)

1992년 : 부산대학교 전기공학과 졸업  
 1994년 : 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업 (석사)  
 1997년 : 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업 (박사)  
 1997년~1999년 : 부산정보대학 전기전자계열 전임강사

1999년~현재 : 진주산업대학교 산업자동화공학과 조교수

주관심분야 : 지능제어, 진화알고리즘, 가변구조제어, 로봇틱스  
 Tel : 055-751-3386, Fax : 055-751-3389  
 E-mail : jh-park@cjcc.chinju.ac.kr



**박한웅(Han-Woong Park)**

1983년: 부산대학교 전기공학과 졸업  
1987년: 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업  
(석사)  
1997년: 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업  
(박사)  
1990년~현재: 해군사관학교 전기과 조교수

주관심분야: 전력전자, 전동기제어 및 인공지능 제어  
Tel : 055-549-1266, Fax : 055-542-0033  
E-mail : hwpark@navy.ac.kr



**최영규(Yong-Kiu Choi)**

1980년: 서울대학교 전기공학과 졸업  
1982년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과  
졸업(석사)  
1987년: 한국과학기술원 대학원 전기 및 전자  
공학과 졸업(박사)  
1990년~1991년: CALTECH Visiting Scholar  
1998년~1999년: Univ. of Southwestern Louisiana Visiting  
Professor  
1986년~1990년: 부산대학교 전기공학과 교수  
1990년~현재: 부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부 교수

주관심분야: 지능제어, 진화알고리즘, 가변구조제어, 로봇틱스,  
전력전자  
Tel : 051-510-2371, Fax : 051-510-0212  
E-mail : ykichoi@hyowon.pusan.ac.kr