

## 적용 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 Switched Reluctance Generator의 위치 센서 없는 구동에 관한 연구

최양광\*, 김영석\*, 김영조\*\*, 최정수\*\*\*  
 인하대학교 전자 전기 공학부\*, 유한대학교\*\*, 경기공업대학교\*\*\*

### Adaptive Sliding Mode Observer for DC-Link Voltage Control of Switched Reluctance Generator without Position Sensor

Yang-kwang Choi\*, Young-seok Kim\*, Young-jo Kim\*\*, Jung-soo Choi\*\*\*  
 In-Ha University\*, Yu-Han Collage\*\*, Kyonggi Institute of Technology\*\*\*

**Abstract** - The position information of the rotor are required while the SRG(Switched Reluctance Generator) is driven. The position information is generally provided by shaft encoder or resolver. But it is weak in the dusty, high temperatur and EMI environment. Therefore, the sensor is able to required to be eliminated from the SRG.

In this paper, a estimation algorithm for the rotor position of the SRG is introduced and a constant DC-link voltage is controlled by PID controller. The estimation algorithm is implemented by the adaptive sliding observer and that it is able to estimate the rotor position well is proved by the simulation.

#### 1. 서 론

SRG(Switched Reluctance Generator)의 구동에 위해서는 회전자 위치가 파악되어야 하며, 현재는 엔코더 레졸버 등의 고정밀 위치센서를 이용하여 구동하고 있으나, 이러한 위치센서를 사용할 경우, 단점은 고가의 고정밀 위치센서비용에 의한 경제성의 저하, SRG를 산업용 및 기타의 장소에서 사용할 경우 EMI, 충격, 진동, 열 등에 의한 센서의 성능저하로 인한 센서사용의 제약, 센서에서 출력되는 신호를 처리하기 위한 별도의 하드웨어 및 소프트웨어를 요구로 인한 제어방법의 복잡성, 그리고 센서의 부착에 의한 시스템 크기의 증가를 들 수 있다. 따라서 위치센서를 이용하지 않고 SRG를 구동시킨다면 여러 가지의 면에서 성능을 향상시킬 수 있다.

일반적으로, 관측기의 운동방정식에서 관성계수나 마찰계수와 같은 운동방정식의 파라미터들은 측정이 매우 어려우며, 이로 인해 운동방정식을 이용하는 관측기는 실제구현에는 제한이 따르게 된다.

본 논문에서는 운동방정식을 이용하는데 따른 문제점을 해결하기 위하여, 속도 동정칙을 사용하여 속도와 위치를 추정하는 적용 슬라이딩 관측기를 적용하는 방법을 연구하였다.

적용 슬라이딩 관측기는 슬라이딩 모드를 이용하여, 전류 추정을 위한 슬라이딩 모드 관측기를 구성하고, 구성된 관측기의 슬라이딩 모드 존재조건 및 수렴 조건은 리아푸노프 함수의 안정성을 통해 확보하였다.

이에 의해 속도 동정칙을 구성하고, 추정속도가 실제 속도에 수렴하도록 안정성을 확보하였다.

적용 슬라이딩 관측기의 적용 가능성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과 초기 구동시에는 추정오차가 크나, 정상상태에서는 만족할 만한 추정결과를 얻었다.

#### 2. SRG의 위치센서 없는 구동

#### 2.1 SRG의 구조

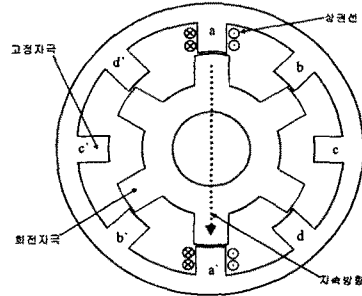


그림 1 SRG의 구조(8/6)  
 Fig. 1 Structure of SRG(8/6)

SRG의 구조는 그림1에서 나타내듯이 이중 돌극형 구조이다. 고정자는 간단한 집중권을 갖고있고, 회전자에는 권선이나 영구자석과 같은 계자가 없으므로, 매우 간단하며 견고한 구조를 가지고 있으며, 대부분의 발열이 고정자에서만 발생하므로 냉각이 빠르고 용이하다.

재료로는 투자율이 높은 철(Fe)을 사용하고, 고정자만을 집중권으로 하고, 내부에 자석(Magnet)이 없기 때문에 동기 발전기에 비하여 유리한 점을 가진다.

그러나, SRG의 발전 동작시 역 토크로 인한 전자기적 소음이 발생하며, 상의 여자를 위해서는 회전자의 위치를 알아야 하므로, 위치정보가 필요하다.

표1은 본 논문의 시뮬레이션에서 사용한 SRG에 대한 사양이다.

표 1 SRG의 사양  
 Table 2 Specification of SRG

고정자 극수	8	회전자 극호	24.6°
고정자 상수	4	회전자 극간 간격	35.4°
고정자 극호	22.8°	상권선 저항	1.2Ω
고정자 극간 간격	22.2°	상 최소 인덕턴스	9mH
회전자 극수	6	상 최대 인덕턴스	72mH

#### 2.2 SRG의 구동

그림2는 한 상에 대한 SRG의 구동회로를 나타내며, 권선에 자속을 생성하는 여자동작과 여자된 자속을 이용한 발전동작으로 구분하여 동작한다.

동작방법은 두 개의 스위치  $T_1$ 과  $T_2$ 를  $\theta_{on}$ 에서  $\theta_{off}$ 까지 턴-온하여,  $V_{dc}$ 의 전압을 가하여 상권선을 여자시키고, 이 후  $T_1$ 과  $T_2$ 를 턴-오프하면,  $\theta_{off}$ 에서  $\theta_{ext}$ 까지

발전 동작을 하게 된다.

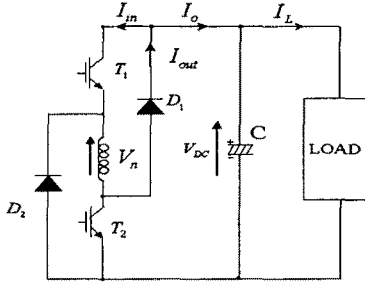
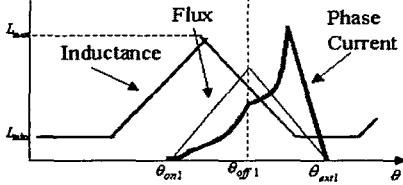
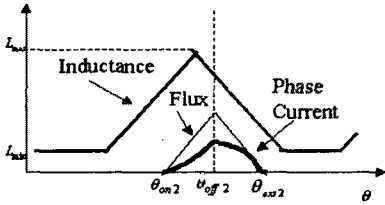


그림 2 한 상에 대한 SRG의 회로  
Fig. 2 SRG circuit of single phase

그림 3은 회전자 회전시 SRG의 여자 구간에 따른 전류파형으로 그림 3의 (a)는 여자구간이 클 때, 그림 3의 (b)는 여자구간이 작을 때, 전류의 파형이다



(a) 여자구간이 큰 경우



(b) 여자구간이 작은 경우

그림 3 SRG의 여자구간에 따른 전류,  
인덕턴스와 자속 파형

Fig. 3 Phase currents, Flux linkages and Idealized inductance profile for the excitation section of SRG

### 2.3 적응 슬라이딩 모드 관측기

본 논문은 적응 슬라이딩 관측기를 SRG에 적용한 경우로서 발전기의 전압 방정식만을 이용하여 위치를 추정하며, SRG의 전압 방정식은 식(1)과 같다.[2]

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

여기서,

$V$  : 전원전압,  $i_n$  : 각 상의 전류,

$L_n$  : 각 상의 고정자 인덕턴스,

$\theta_n$  : 각 상의 회전자 위치,  $\omega$  : 회전자 속도,

$n$  : 1~4 고정자의 상

식(1)로부터 적응 슬라이딩 관측기는 식(2)와 같이 구성되어질 수 있다.

$$\frac{d\hat{i}_n}{dt} = -\frac{R_n}{L_n} \hat{i}_n - \frac{1}{L_n} \frac{d\hat{L}_n}{d\hat{\theta}_n} \hat{\omega} \hat{i}_n + K_{sn} e_{in} \quad (2)$$

여기서,

$$K_{sn} = k_{s1n} + k_{s2n} \text{sgn}(e_{in}) \quad (3)$$

$$e_{in} = \hat{i}_n - i_n \quad (4)$$

$\hat{i}$  : 각 상의 추정전류,  $\hat{L}$  : 각 상의 추정 인덕턴스

$\hat{\theta}_n$  : 각 상의 추정위치,  $\hat{\omega}$  : 추정속도

식(1)과 식(2)에서 파라미터 변동항이 존재하지 않는다고 가정하면, 오차방정식은 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{de_{in}}{dt} &= -\frac{R_n}{L_n} e_{in} - \frac{1}{L_n} \frac{d\hat{L}_n}{d\hat{\theta}_n} (\hat{\omega} \hat{i}_n - \omega i_n) + K_{sn} e_{in} \\ &= \left( -\frac{R_n}{L_n} - \frac{d\hat{L}_n}{d\hat{\theta}_n} \hat{\omega} + k_{s1} \right) e_{in} \\ &\quad - \frac{1}{L_n} \frac{d\hat{L}_n}{d\hat{\theta}_n} (\hat{\omega} - \omega) i_n + k_{s2} e_{in} \text{sgn}(e_{in}) \quad (5) \end{aligned}$$

식(6)과 같이 슬라이딩 초평면을 설정하고, 식(7)의 리아프노프 함수를 고려하면, 식(4)가 S로 수렴하기 위한 조건은 식(8)과 같다.

$$S = \{ e_{in} \mid e_{in} = 0 \} \quad (6)$$

$$V_i = \frac{1}{2} e_{in}^2 \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} V_i = e_{in} \frac{de_{in}}{dt} < 0 \quad (8)$$

식(5)와 식(8)에서, 관측기의 안정성을 확보할 수 있는 조건은 식(9)와 식(10)과 같다.

$$-\frac{R_n}{L_n} - \frac{1}{L_n} \frac{d\hat{L}_n}{d\hat{\theta}_n} \hat{\omega} + k_{s1n} < 0 \quad (9)$$

$$-\frac{1}{L_n} \frac{d\hat{L}_n}{d\hat{\theta}_n} (\hat{\omega} - \omega) i_n + k_{s2n} e_{in} \text{sgn}(e_{in}) = 0 \quad (10)$$

식(9)와 식(10)이 만족되도록  $k_{s1n}, k_{s2n}$ 이 선택된다면, 식(4)는 S로 수렴한다.

식(10)을 만족시키면서, 속도 추정오차를 0으로 수렴시키기 위한 새로운 리아프노프 함수로 식(11)을 고려한다.

$$V_\omega = \frac{1}{2} (\hat{\omega} - \omega)^2 \quad (11)$$

한 샘플 주기에 속도가 불변 ( $\frac{d\omega}{dt} = 0$ )이라 가정하고, 이를 미분하면 식(12)와 같고, 속도 동정칙을 식(13)과 같이 설정한다.

$$\frac{dV_\omega}{dt} = (\hat{\omega} - \omega) \frac{d\hat{\omega}}{dt} \quad (12)$$

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = -g \sum_{j=1}^4 \frac{d\hat{\theta}_j}{d\hat{L}_j} k_{s2j} e_{ij} \text{sgn}(e_{ij}) \quad (13)$$

여기서,  $g$ 는 양의 상수

식(13)에 의해 식(11)이 안정함을 증명하기 위해, 관측기의 안정성을 확보한 상황 ( $\hat{i}_n - i_n = 0$ )에서, 식(5)를  $n$ 상으로 확장하면, 식(14)이고,

$$0 = \sum_{j=1}^4 \left[ -(\hat{\omega} - \omega) \frac{1}{L_j} \frac{d\hat{L}_j}{d\hat{\theta}_j} i_j + k_{s2j} e_{ij} \text{sgn}(e_{ij}) \right] \quad (14)$$

식(13)와 식(14)에서 식(15)을 얻는다.

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = -g (\hat{\omega} - \omega) \sum_{j=1}^4 \frac{1}{L_j} i_j \quad (15)$$

식(15)를 식(12)에 대입하면, 식(16)이며,

$$\frac{d}{dt} V_\omega = -g (\hat{\omega} - \omega)^2 \sum_{j=1}^4 \frac{1}{L_j} i_j \quad (16)$$

상전류와  $\hat{L}_j$ 의 값은 항상 양이므로, 식(16)은 항상 양이 되어 안정성이 보장된다.

추정전류와 오차성분의 크기가 항상 일정하지 않고 순

시적으로 변하기 때문에 추정속도가 실제속도로 수축하는 시간이 변동할 수 있다.

안정한 수축속도를 유지할 수 있도록, 적분이득  $K_I$ 를 부가한  $g$ 로 사용하고, 동시에 응답속도를 빠르게 하기 위해  $K_P$ 를 추가하면, 식(13)의 속도 동정칙은 식(17)과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\omega}}{dt} &= K_I \left[ \sum_{j=1}^4 k_{\omega j} e_{ij} \operatorname{sgn}(e_{ij}) - \frac{d\hat{\theta}_j}{dL_j} \right] \\ &+ K_P \frac{d}{dt} \left[ \sum_{j=1}^4 k_{\omega j} e_{ij} \operatorname{sgn}(e_{ij}) \frac{d\hat{\theta}_j}{dL_j} \right] \quad (17) \\ &= K_I \left[ \sum_{j=1}^4 k_{\omega j} (\hat{i}_j - i_j) \operatorname{sgn}(\hat{i}_j - i_j) - \frac{d\hat{\theta}_j}{dL_j} \right] \\ &+ K_P \frac{d}{dt} \left[ \sum_{j=1}^4 k_{\omega j} (\hat{i}_j - i_j) \operatorname{sgn}(\hat{i}_j - i_j) \frac{d\hat{\theta}_j}{dL_j} \right] \end{aligned}$$

## 2.4 위치추정 및 정전압제어 알고리즘

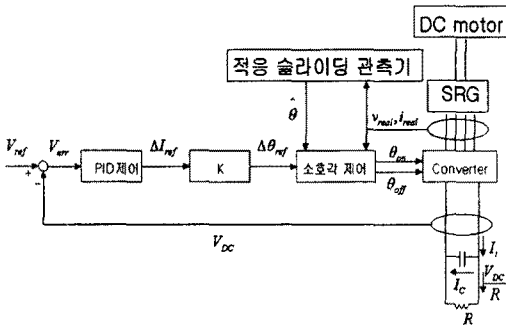


그림 4 적용 슬라이딩 관측기를 이용한 SRG의 정전압 제어의 블록도

Fig. 4 Block diagram of constant voltage control method for SRG using adaptive sliding mode Observer without position sensor

그림4는 적응 슬라이딩 관측기를 이용한 SRG의 정전압 제어 알고리즘으로, 그림3에서 턴-온각을 고정시키고 턴-오프각을 변화시켰을 때, 순시 발전전류의 적분치는 턴-오프각에 비례하므로, 지령전압에 대한 DC-link 전압의 요구치를 PID제어기의 입력으로 하고, 그 출력을 발전전류의 지령치로 하여, 그 값을 턴-오프각으로 하였다. [1] 이에 요구되는 위치정보를 적응 슬라이딩 관측기를 통하여 추정한다.

여기서, 적응 슬라이딩 관측기는 식(2)와 (17)에 의하여 구성되며, 각 상의 전압과 전류를 입력으로 하고, 추정위치를 출력으로 한다.

## 2.5 시물레이션 결과

시물레이션은 C언어로 수행되었으며 8/6극 SRG를 모델링하였다. 반복루프를 이용하여  $dt$ 을 미소시간으로 정하여 루프가 반복될 때마다 시간을  $dt$ 만큼 증가시키고, 특히 SRG, DC-link voltage, DCM은 전체 루프 내에 다시 루프를 설정하여  $dt/100$ 의 시간의 증가를 100번 반복하면서 상태들의 변화가 일어나도록 구성하여, 실제 실험시의 샘플링 동작에서 발생하는 오차가 고려되도록 구성하였고, 이에 의해 각 상태들의 변화를 관찰하면서 시물레이션을 수행하였다

그림5, 6은 각각 초기 구동시와 200Ω에서 100Ω으로 부하변화 및 100Ω에서 200Ω으로 부하변화시에 출력전압, 실제속도, 추정속도 및 한 상의 전류의 파형이

며, 그림7, 8은 각각 200Ω 및 100Ω에서 출력전압이 정상상태일 때, 실제위치, 추정위치 및 한 상의 전류의 파형이다.

그림5, 6, 7, 8은 적응 슬라이딩 관측기를 이용하여 센서없는 위치추정과 정전압출력 제어가 가능함을 보여준다.

그림7과 8의 (상), (중)에서 추정위치 오차가 발생하더라도 이는 다시 실제위치로 수렴함을 알 수 있다.

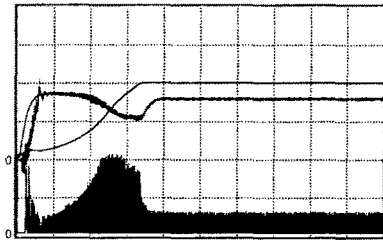
그림9는 초기구동시에서 추정속도 및 추정속도의 오차를 나타내었다. 초기의 속도 상승시에는 속도오차가 크나 이내 실제 속도로 수렴함을 알 수 있다.

그림10은 200Ω에서 100Ω으로 부하변화시 추정속도, 추정속도의 오차를 나타내었으며, 부하변화시에도 안정적으로 동작함을 알 수 있다.

적용 슬라이딩 관측기는 전류 오차를 이용하여 속도 변동분을 산출하고, 이는 SRG의 회전축에 가해진 외부토크와 SRG가 발전동작시 발생하는 역토크의 합산을 추정하고자 하는 것이다.

즉, 안정성을 확보한 상황에서 추정속도 변동분을 비례 적분하여 추정 속도값을 산출하고, 이를 다시 적분함으로써 추정위치 값을 산출한다.

그림11은 외부에서 공급된 토크와 SRG에서 발생된 역토크를 각각 (상), (하)에 보였으며, 그림12는 그림11에 보여진 토크들의 합산을 (상)에 보였고, 이를 추정하는 추정속도 변동분을 (하)에 보였다.

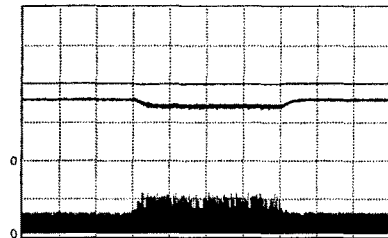


상:100V/div, 중:250rad/sec/div, 하:5A/div, 0.25sec/div

그림 5 초기구동시

출력전압(상), 실제 및 추정속도(중), 한 상의 실제전류(하)

Fig. 5 DC-link voltage(upper), real and estimated speed(mid) and a real phase current(lower) when the SRG is started

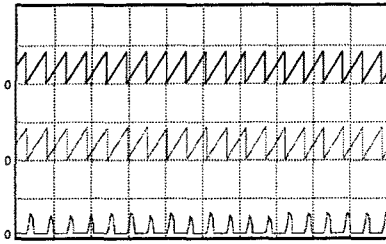


상:100V/div, 중:250rad/sec/div, 하:5A/div, 0.25 sec/div

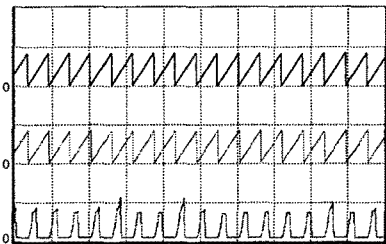
그림 6 부하변화시

출력전압(상), 실제 및 추정속도(중), 한 상의 실제전류(하)

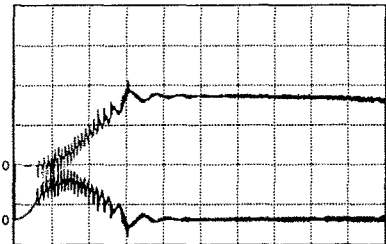
Fig. 6 DC-link voltage(upper), real and estimated speed(mid) and a real current(lower) when the load is changed



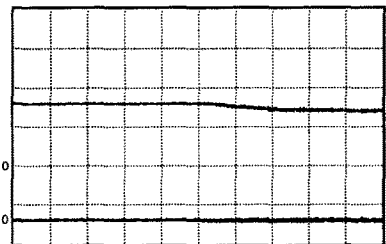
하:5A/div,0.005sec/div  
그림 7 100Ω 부하저항시  
실제위치(상), 추정위치(중),  
한 상의 실제전류(하)  
Fig. 7 Real(upper) and estimated(mid)  
position and a real current (lower)  
at the resistor of 100Ω



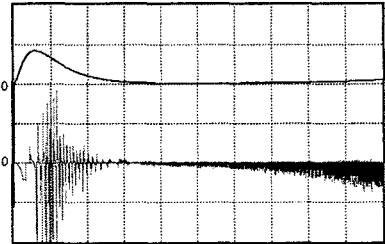
하:5A/div, 0.005sec/div  
그림 8 200Ω 부하저항시  
실제위치(상), 추정위치(중), 한 상의  
실제전류(하)  
Fig. 8 Real(upper) and estimated(mid)  
position and a real current (lower)  
at the resistor of 200Ω



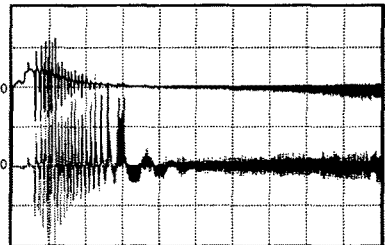
상,하:250rad/sec/div, 0.05 sec/div  
그림 9 초기구동시  
추정속도(상), 속도추정오차(하)  
Fig. 9 Estimated speed(upper) and  
error of estimated speed(lower)  
when the SRG is started



상,하:250rad/sec/div, 0.05 sec/div  
그림 10 부하변화시  
추정속도(상), 속도추정오차(하)  
Fig. 10 Estimated speed(upper) and  
error of estimated speed(lower)  
when the load is changed



상:0.1N·m/div, 하:0.1N·m/div,  
0.05 sec/div  
그림 11 초기구동시  
DCM에서 공급된 토크(상), b:SRG에서  
발생된 토크(하)  
Fig. 11 Torque(upper) supplied from  
DCM and torque(lower) generated from  
SRG when the SRG is started



상:0.1N·m/div, 하:0.1N·m/div,  
0.05 sec/div  
그림 12 초기구동시  
DCM에서 공급된 토크와 SRG에서 발생된  
토크의 합(상),  
추정속도의 변동분(하)  
Fig. 12 a:Sum(upper) of torque  
supplied from DCM and torque  
generated from SRG and changed  
rate(lower) of estimated speed for time  
when the SRG is started

### 3. 결 론

본 논문에서는 SRG의 정전압 출력제어 에서 위치정보를 얻기 위해, 적응 슬라이딩 관측기를 이용하여 위치정보를 얻는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션 결과 초기구동시에는 추정에러가 크나, 이내 정상상태에 도달하며, 정상상태와 부하변화시에는 매우 안정적 동작하였다. 시뮬레이션시 SRG, DC-link전압, DCM의 미분방정식은 미소시간  $dt$ 의 변화에 대해 1차선형으로 근사 하였다.

이 논문은 에너지기술 학술진흥사업의 연구비 지원에 의하여 연구 되었습.

### (참 고 문 헌)

- [1] 김영조, 전형우, 김영석, "소호각 제어를 이용한 Switched Reluctance Generator의 출력 전압 제어", 대한전기학회 논문지, 제50B권 7호, pp.356-363, 2001.
- [2] 신재화, 양이우, 김영석, "적응 슬라이딩 관측기를 이용한 SRM의 속도 및 위치 센서 없는 제어", 대한전기학회 논문지, 제49B권 11호, pp.763-770, 2000.
- [3] I. Husain, S. Sodhi and M Ehsni, "A Sliding Mode Observer Based Controller for Switched Reluctance Motor Drives", IEEE IAS Annual Meeting, pp.635-643, 1994.
- [4] Yoon-Seok Han, Jung-Soo Choi, Young-Seok Kim "Sensorless PMSM Drive with a Sliding Mode Control Based Adaptive Speed and Stator Resistance Estimator" IEEE Trans. on Magnetics, VOL.36, NO. 5, pp 3588 - 3591, 2000.