

## 순시자속을 이용한 위치센서 없는 SRG의 운전

金永祚\*, 吳昇保, 金榮石

## The Position Sensorless Control of SRG using the Instantaneous Flux

Young-Jo Kim, Sung-Bo Oh, and Young-Seok Kim

## 요 약

본 논문은 SRG(Switched Reluctance Generator)의 제어를 위하여 순시자속을 이용하여 위치를 추정하고, 추정한 위치에 근거하여 출력전압을 제어하는 방법이 제안되었다. SRG를 제어하기 위해서는 정확한 회전자의 위치정보가 필수적이다. 이러한 위치정보는 일반적으로 엔코더나 레졸버와 같은 정밀한 위치센서로부터 얻어진다. 그러나, 전자기적 간섭(Electromagnetic Interference), 진동, 열, 습도 등의 열악한 환경으로 인하여 정확한 위치를 검출하는데 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위하여 위치·속도센서 없는 SRG의 제어가 요구되어 진다. 본 논문에서는 SRG를 위한 새로운 위치·속도의 실시간 추정방법이 제안되었다. 순시자속은 측정된 전압과 전류에 의해 계산한 것과 위치와 자속 프로파일로부터 회전자의 위치를 추정하였다. 출력전압은 PID 제어 알고리즘에 의해 일정 제어되었다. 제안된 방법은 시뮬레이션을 통하여 확인하였고, DSP를 적용하여 구현하였다. 실험을 통하여 제안된 방법은 부하가 변동하더라도 일정하게 출력전압을 유지하고, SRG 제어가 안정됨을 확인하였다.

## ABSTRACT

In this paper, the instantaneous flux is applied to control the position of the SRG (Switched Reluctance Generator) without position sensor. The position information of the rotor is required in the drive of SRG. These data are generally obtained by a shaft encoder or resolver. In some cases, the EMI(Electro Magnetic Interference), vibration, thermal, and humidity environments may cause the difficulties in maintaining the satisfactory performance for the position detection. Therefore, the elimination of the position and speed sensor is needed. In this paper, a new method for the position estimation of the SRG is proposed. The estimation of the flux is calculated by using the measured voltage and current. The rotor position gets from the flux profile. The output voltage is also controlled constantly by PID control algorithm. These methods are verified by computer simulations and experiments using DSP. Experimental results certificate that the proposed method is able to control the SRG stable, and keep the output voltage constant in spite of changing of the load.

**Key Words** : SRG, Sensorless control, PID control, DSP

## 1. 서 론

\*유한대학 컴퓨터제어과 교수

E-mail : yjkim@yuhan.ac.kr

접수일자 : 2002. 7. 18

1차심사 요청일 : 2002. 7. 23 2차심사 요청일 : 2002. 8. 20

심사완료일 : 2002. 9. 4

스위치드 리럭턴스(이하 SR) 기기는 다른 전기기와 비교할 때 영구자석, 회전자 권선, 브러시 등이 없어 구조가 간단·견고하며, 기기의 제작비용이 저렴하고, 높은 효율을 가지고 있기 때문에 산업응용 분야에

서 매우 커다란 주목을 받아오고 있다. 또한 반도체 제조기술과 현대제어이론이 접목된 시스템 기술 등이 진보함에 따라 SR기기 구동시스템은 산업계에 널리 확산되어 사용되고 있다. 초기에 SR기기는 전력변환기기의 신뢰성 결여와 SR기기에서 발생하는 전자계에 의한 소음 때문에 실용화에 많은 어려움이 있었으나, MOSFET, IGBT 등의 전력용 스위칭소자와 ASIC 기술의 발전으로 전력변환기기의 신뢰성 문제가 극복되었고, 모터 설계 및 제작 기술 등의 발달로 SR기기에서 발생하는 소음을 상당히 줄이게 되었다.

SRM(Switched Reluctance Motor)은 산업계의 요구에 따라 속도 제어, 토크 제어, 센서리스 제어 등이 상당히 연구 개발되어, 그 적용범위도 확대되고 있으나, SRM과 동등한 특성을 갖고 있는 SRG(Switched Reluctance Generator)의 경우는 이에 대한 연구가 국내는 물론 국외에서도 매우 미흡한 상태에 있다.

SRG는 다른 동기발전기나 유도발전기와 비교할 때 회전자에 권선이나 영구자석을 가지고 있지 않기 때문에 초기에는 여자 전류를 고정자 권선에 공급해 주어야 한다. 따라서 동작방법을 크게 두가지로 나누어, 스위치가 턴-온할 때 전원을 각 상에 인가시키는 여자 동작과 스위치가 턴-오프할 때 다이오드를 통해 발전된 전류를 전원으로 회생시키는 발전 동작으로 구분할 수 있다. 이 때 부하가 가변할 때 적절한 위치에서 턴-온과 턴-오프 시간을 조절하여 양호한 발전전류 및 일정한 출력전압을 얻을 수 있다.<sup>[1]</sup> 이러한 SRG의 특성은 자동차용 발전기나 풍력발전기 등에 응용될 수 있다. 따라서 SRG를 구동하기 위해서는 회전자의 위치 정보가 반드시 필요하며, 회전자의 위치 정보는 엔코더나 레졸버 등의 위치센서를 이용하여 얻고 있다. 그러나, 이러한 위치센서를 사용할 경우 다음과 같은 단점들을 가지고 있다. 첫째, 고가의 고정밀 위치센서 비용에 의한 경제성의 저하를 들 수 있다. 둘째, SRG를 산업용 혹은 기타의 장소에서 사용할 경우 EMI, 충격, 진동, 열 등에 의한 주위 환경에 따라 센서의 성능저하를 유발할 수 있으므로, 사용에 있어서 많은 제약을 받는다. 셋째, 센서에서 출력되는 신호를 처리하기 위하여 별도의 하드웨어 및 소프트웨어를 구성해야 하기 때문에 제어시스템이 복잡해진다.<sup>[2]</sup>

이러한 이유에서 SRM에서도 센서리스 구동은 현재 까지 많이 연구되어져 왔다. 그러나, SRG의 경우에 있어서는 국내에서 뿐만이 아니라 국외에서도 거의 연구되어진 바가 없는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 SRG에서 발생하는 한 상의 전압 및 전류를 이용하여

순시적으로 자속을 실시간으로 계산하고<sup>[3-4]</sup>, 측정하여 얻어진 자속과 위치의 프로파일을 이용하여 계산되어진 자속값에 해당하는 위치를 순시적으로 추정하는 구동 방법을 연구하였다. 또한, 추정된 위치를 이용하여 출력전압을 일정전압으로 유지하도록 PID제어를 사용하여 턴-오프 각을 제어하였다. 이러한 방법은 DSP(TMS320C31)를 이용한 제어기를 사용하여 구현하였으며 실험을 통하여 제안된 제어기의 타당성을 입증하였다.

## 2. SRG의 개요

### 2.1 SRG의 구조

SRG는 그림 1에서처럼 회전자와 고정자 모두 돌극을 가지는 이중 돌극형 구조이다. 고정자는 간단한 집중권을 가지고 있고, 회전자에는 권선이나 영구자석을 가지고 있지 않아 성층에 의한 적층이 가능하다. SRG는 구조가 매우 간단하고 견실한 구조를 가지고 있으며, 제조 공정수가 적고, 구동시 회전자의 관성이 적은 것이 특징이다. 대부분의 발열이 고정자에서 발생하므로 냉각이 빠르고 용이하며, 회전자가 매우 간단하고 견실한 구조이다.

고정자 및 회전자의 재료는 투자율이 높은 철(Fe) 등을 사용하고, 고정자의 권선 방식은 집중권으로 한다. SRG의 내부는 자석(Magnet)이 없기 때문에 동기 발전기에 비하여 가격이 낮고, 발전기의 효율면에서도 회전자의 저항손이 존재하는 유도 발전기에 비하여 저항손이 존재하지 않으므로 유리하다. 그리고, 단위체적 및 단위중량 당 에너지의 밀도를 다른 기기와 비교하여 볼 때 우수한 특성을 가지고 있다. 그러나, SRG는 DC전류를 상권선에 인가하여 발생된 기전력에 의해 발전을 하므로, 이로 인한 전자기적 소음 및 진동이 발생하는 단점을 가지고 있다.

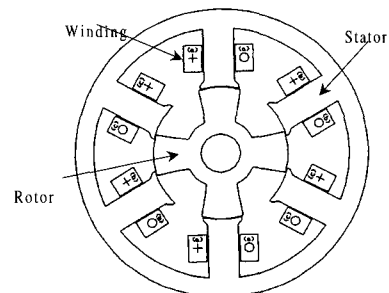


그림 1 SRG의 구조(6/4)  
Fig. 1 Structure of SRG(6/4)

### 2.2 SRG의 구동회로

그림 2는 타여자 방식의 SRG의 컨버터를 나타내었다. 타여자 방식은 기동회로와 연결되어 단자전압을 유지하고, 발전시에는 발전전압이 기동전원보다 커졌을 때 다이오드를 기동전원과 순방향으로 직렬 연결하여 발전전압과 기동전원을 분리하도록 하였다.

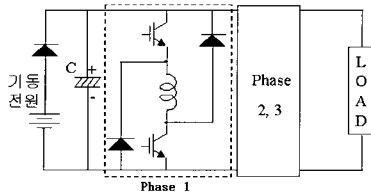


그림 2 여자방식에 따른 SRG의 컨버터  
Fig. 2 Converter of SRG according to an excited method

### 2.3 SRG의 동작원리

그림 3은 SRG의 한 상에서 발생하는 발전 전원을 얻기 위한 회로를 나타내고 있다. 발전 회로의 동작은 자속을 생성시켜야 하는 여자 구간과 발생한 자속으로 발전시키는 발전구간으로 나눌 수 있다. 여자구간은 스위치를 On시켜 단자전압으로 SRG에 인가하여 여자시킨 뒤에, 스위치를 Off시켜 발생한 자속을 이용하여 인덕턴스가 시간에 대하여 음의 기울기를 가지는 구간에서 발전전류를 발생시킨다<sup>[5-6]</sup>.

이를 위한 동작방법은 두 개의 스위치  $T_1$ 과  $T_2$ 를 여자구간  $\theta_{on}$ 에서  $\theta_{off}$ 까지 도통하여 SRG를 여자시킨다. 이 때의 상전압은  $V_{DC}$ 가 된다. 이렇게 생성된 자속은 스위치  $T_1$ 과  $T_2$ 가 턴-오프되면 발전구간  $\theta_{off}$ 에서  $\theta_{ext}$ 까지 발전되어 전류가 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 를 통하여 콘덴서로 충전된다. 이 때의 상전압은  $-V_{DC}$ 가 된다. DC-link 콘덴서는 발전을 하기 위한 여자 동작시의 전원과 SRG에서 발전된 에너지를 저장시키는 역할을 동시에 수행하게 된다.

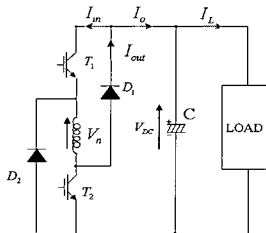
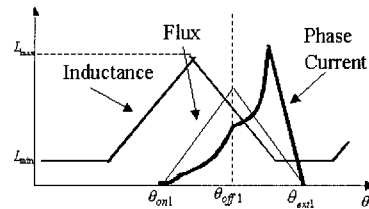


그림 3 SRG의 발전 회로  
Fig. 3 Generating Circuit of a SRG

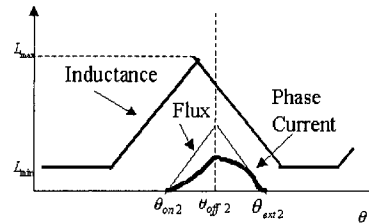
### 2.4 SRG의 여자구간에 따른 전류 파형

그림 4의 (a)는 여자전류를 충분히 공급했을 경우, 즉 스위치를 On한 후 충분히 여자를 시킨 후에 스위치를 Off한 경우인데, 이 때는 여자전류보다 큰 발전전류가 생성되는 것을 볼 수 있다.

그림 4의 (b)는 그림 4의 (a)보다 여자전류를 적게 공급한 경우인데, 이 때는 여자전류에 비해 작은 발전전류만 생성되는 것을 볼 수 있다. 따라서, 발전량은 자속의 양에 따라 좌우되므로 소호각의 크기에 따라 결정되는 것을 알 수 있다. 실제로 발전되는 전류는 발전되는 전류의 총합 중 여자전류를 뺀 만큼의 전류이므로 이것이 곧 부하전류가 인가된다.



(a) 여자전류가 많은 경우



(b) 여자전류가 적은 경우

그림 4 여자구간에 따른 전류, 인덕턴스와 자속 파형

Fig. 4 Phase current, flux linkage and idealized inductance profile during the excitation period.

### 2.5 SRG의 자속 프로파일

본 논문에서 제안된 방법을 구현하기 위하여 먼저 각각의 회전자 위치에 해당하는 자속값을 구하여 자속과 위치의 관계를 정립하여야 한다. 일반적으로 자속과 위치의 관계는 근사화된 고차함수를 이용하여 나타내어지거나, 실제로 위치에 해당하는 자속값을 계산하여 각각의 자속값에 해당하는 위치를 대응시켜 룩업테이블(Look-up table)을 만들 수 있다.

위치에 따른 자속값을 얻기 위하여 SRG의 회전자를 고정시키고, 전압을 한 상에 인가하였으며, 이때 전류의 상승율과 전류와 전압 값을 이용하여 계산하였다.

이를 통하여 실제구동시의 자속값과 가장 가까운 값을 얻어내었다.

그림 5는 SRG 한 상의 등가회로이며, 이를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[13]</sup>.

$$\begin{aligned}
 V_m &= R_m i_m + \frac{d\lambda_m(\theta, i_m)}{dt} \\
 &= R_m i_m + \frac{\partial \lambda_m}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} + \frac{\partial \lambda_m}{\partial i_m} \frac{di_m}{dt} \\
 &= R_m i_m + \omega_m \frac{\partial \lambda_m}{\partial \theta} + \frac{\partial \lambda_m}{\partial i_m} \frac{di_m}{dt}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,  $V_m$ 은 상전압,  $R_m$ 은 상저항,  $i_m$ 은 상전류 (여자구간일 경우  $i_m$ 은 양(+))의 부호, 발전구간일 경우  $i_m$ 은 음(-)의 부호),  $\omega_m$ 은 SRG의 전기 각속도,  $\frac{d\lambda_m(\theta, i_m)}{dt} = e$ 는 역기전력을 각각 나타낸다. 자속쇄교수  $\lambda_m$ 은 식 (2)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$\lambda_m(\theta, i_m) = i_m \frac{(V_m - R_m i_m)}{\frac{di_m}{dt}} \tag{2}$$

식 (2)와 같이 SRG 한 상의 전압, 전류 및 전류의 미분 항으로부터 자속을 구할 수 있다.<sup>[2]</sup>

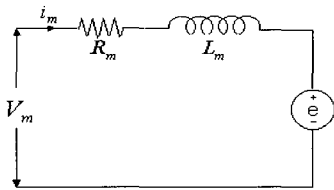


그림 5 SRG 한 상의 등가회로  
Fig. 5 The Equivalent circuit for reference phase of the SRG

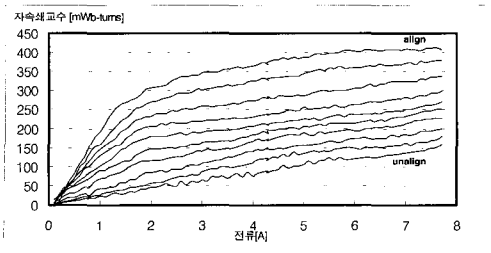


그림 6 회전자의 위치에 따른 자속 곡선  
Fig. 6 Flux linkage profile about rotor position

그림 6은 위의 방법을 이용하여 얻어진 회전자 위치에 따른 자속 곡선이다. 회전자의 돌극과 고정자의 돌극이 일치되었을 때 전류의 파형을 보면 자속포화현상에 의하여 곡선이 비선형성을 나타내는 것을 알 수 있다.

### 3. 순시 자속을 이용한 위치추정

#### 3.1 위치 추정을 위한 SRG의 등가회로

그림 3과 그림 5는 SRG의 한 상에 대한 회로 및 등가회로이다. 이로부터 자속쇄교수는 자속과 권선의 감긴 턴수의 곱으로 표현할 수 있으므로 식 (3)와 같이 쓸 수 있다.

$$\lambda_m(\theta, i_m) = L(\theta, i_m) \cdot i_m = n \cdot \phi_m \tag{3}$$

또한, 식 (3)으로부터 총자속쇄교수( $\lambda_m$ )을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\lambda_m = \int_0^T (V_m - R i_m) dt \tag{4}$$

#### 3.2 초기위치 추정방법

SRG가 정지상태에서 구동을 시작하기 위하여 회전자와 고정자의 상대적인 위치를 파악해야 한다. 그러나, 초기상태에는 여자전류 및 발전전류가 존재하지 않기 때문에, 이러한 전류를 이용하여 위치를 추정할 수 없다. 따라서, SRG 한 상에 일정한 진폭과 주파수를 가지는 펄스형태의 전류를 임의로 흘려주어 위치를 추정하는 방법을 사용하였다<sup>[3-8]</sup>.

초기 위치를 추정하는 방법은 고정자 인덕턴스의 변화주기를 한 주기로 하고, 주기마다 발생시키는 트리거 신호의 시간차와 회전자의 초기 위치에 따라 변동하는 전류 파형과 측정된 SRG의 쇄교자속 프로파일을 이용하여 계산한다.

SRG 한 상에 펄스형태의 전류를 흘려주었을 때 전류의 상승률은 인덕턴스의 변화에 따라 다르게 나타난다. 즉, 인덕턴스가 큰 부분에서는 전류의 상승률이 적기 때문에 펄스형태의 전류를 흘려주었을 때 전류가 상승할 수 있는 최대 진폭은 인덕턴스 성분에 의하여 줄어들고, 인덕턴스가 적은 부분에서는 전류의 상승률이 크기 때문에 전류가 상승할 수 있는 최대 진폭은 증가한다. 따라서 트리거 주기 신호의 시간과 위치에 따른 펄스형태의 전류 파형의 변화를 이용하여 초기구동에 필요한 위치를 추정할 수 있다.

본 실험에서는 회전자 위치를 전류 파형으로부터 추정하고, 일정시간 지연된 후에 추정된 위치를 이용하여 센서리스 알고리즘을 적용시켰다. 이러한 초기위치 추정방법은 알고리즘이 단순하여 제어가 간단하고, 정확한 위치추정을 할 수 있으므로 견고한 동작특성을 보인다.

### 3.3 SRG의 출력전압제어

그림 3과 같이 SRG의 발전 동작시 공급되는 여자전류와 회생되는 전류의 차는 총 발전전류가 된다. 한 주기동안(90°)에 다른 상(A, B, C)들의 전류가 모두 존재하므로 한 주기동안의 총 발전전류의 평균값  $I_{o, total}$ 은 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned}
 I_{o, total} &= \frac{N_s}{2} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_n dt \\
 &= \frac{N_s}{2} \cdot \frac{1}{2\pi/N_r} \int_0^{2\pi/N_r} i_n dt \\
 &= \frac{N_r \cdot N_s}{4\pi} \cdot I_o
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서  $I_o = I_{out} - I_{in}$ ,  $N_r$ : 회전수의 극수,  
 $N_s$ : 고정자의 극수,  $i_n$ : 상 전류  
 $I_o$ : 발전전류,  $I_{out}$ : 회생전류  
 $I_{in}$ : 여자전류

식 (5)로 부터 발전기에 부하가 존재하는 경우 발전된 전류는 부하로 흐르므로 부하전류( $I_L$ )와 발전전류( $I_o$ )의 관계는 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{DC}(t) &= V_{DC}(t_o) + \frac{1}{C} \int_{t_o}^t i_n dt \\
 &= V_{DC}(t_o) + \frac{1}{C} \int_{t_o}^t \left[ \frac{N_r \cdot N_s}{4\pi} \cdot I_o - I_L \right] dt
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서,  $V_{DC}$ : DC-Link 전압,  $I_L$ : 부하 전류

식 (6)에서 보는 것과 같이 DC-Link 전압은 발전전류( $I_o$ )와의 관계를 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{DC}(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t [M \cdot I_o - I_L] dt \tag{7}$$

여기서  $M$ : 상수

식 (7)에서 출력전압은 발전된 전류의 적분형태로 나타나며, 발전된 전류는 여자구간에 대하여 선형적인 형태로 나타내어진다. 따라서 여자구간을 제어한다면, 출력전압을 부하의 변화에 견실하게 일정전압을 출력하게 할 수 있다.

### 3.4 순시 자속을 이용한 SRG의 센서리스 제어

그림 7은 제안된 센서리스 구동방법의 블록선도이다. 위의 방법으로 추정된 위치를 이용하여 SRG를 여자시켜 발전전류를 얻어낸다. 또한 턴-온구간에서 SRG 한 상에 전류를 흘려 자속을 발생시키고, 턴-오프구간에서는 그 발생된 자속을 이용하여 외부토크에 의해 발전을 하게된다. 여자구간을 PID 제어하므로써 부하의 변동에 의한 출력전압이 일정한 전압으로 유지하도록 턴-온 값은 최적의 초기값을 설정하고, 턴-오프 값을 제어하였다.

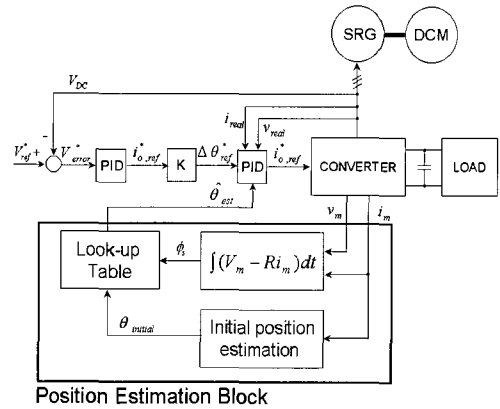


그림 7 제안한 센서리스 구동방법의 블록선도  
 Fig. 7 Block-diagram of the proposed sensorless drive method

## 4. 실험 장치의 구성

### 4.1 하드웨어 구성도

실험을 위한 전체 하드웨어 구성도는 그림 8와 같다. 제안한 알고리즘을 구현하기 위하여 고속·고정밀 연산이 가능한 32비트 DSP(Digital Signal Processor) TMS320C31 제어기를 사용하였다.

전체적인 하드웨어의 구성도를 보면 PT를 이용하여 한 상의 전압을 측정하고, CT를 통하여 한 상에 흐르는 전류를 측정하여, 이들 값들은 16-bit A/D변환기를 통하여 DSP에 입력이 된다. 이들 데이터를 이용하여 제안된 알고리즘에 의해 위치를 추정하게 된다.

추정된 위치에 의하여 각 상마다 IGBT 구동용 게이트의 동작을 위하여 게이트 신호가 입력된다. 이 때 연산하고 데이터 값을 샘플링 하는 주기는 111[μsec]이다. 계산된 파라미터(실제속도, 추정속도, 순시자속 값, 전류, 전압, 인덕턴스 등) 값을 오실로스코프를 통하여 확인하였다.

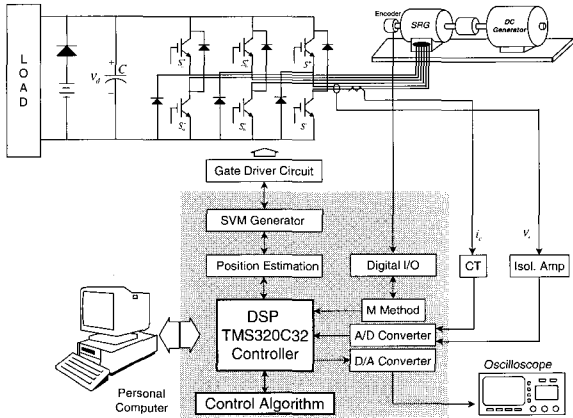


그림 8 SRG의 전체 하드웨어 시스템 구성도  
Fig. 8 Configuration of a total hardware system for the SRG.

4.2 SRG 및 원동기 사양

본 실험에 사용된 SRG의 사양은 다음 표 1과 같으며, SRG의 실험사양을 표 2와 같고, 표 3은 원동기로 사용된 직류전동기의 사양을 나타내었다. 본 논문에서는 원동기로서 속도의 조정범위가 넓고 정토크 제어에 적합한 타여자 방식의 직류전동기를 기동기로서 사용하였다.

표 1 SRG 사양  
Table 1 Specification of the SRG

고정자 극수	6 극	용량	1 Hp
고정자 극호	33.2 도	권선 저항	2.29 Ω
고정자 극간 간격	26.8 도	정격 전류	5 A
회전자 극수	4 극	정격 전압	DC 240 V
회전자 극호	33.2 도	정격 회전수	3000 rpm
회전자극간 간격	56.8 도	최대 전류	8 A

표 2 실험사양  
Table 2 Specification of Experiments

인크리멘탈 엔코더	6000p/r	부하 조건	저항 부하
DC-Link 콘덴서	8200μF	전압제어 지령전압	DC 100V
인터럽트 주기	111μs	스위칭 소자	IGBT

표 3 직류전동기 사양  
Table 3 Specification of the DC motor

극 수	2 극	정격 전압	DC 100V
기동 방식	타여자 기동	정격 전류	7.5 A
출력	1 Hp	정격 속도	3000 rpm

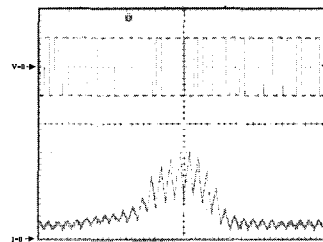
5. 실험 결과

5.1 초기위치 추정

회전자의 초기위치를 추정하기 위하여 진폭이 100V 이고 주기가 222[μs]인 펄스형태의 전압을 SRG 한 상에 인가해 주었다.

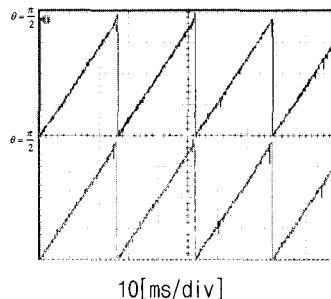
그림 9은 회전자가 1800[rpm]일 때 한 상에 테스트 펄스를 인가한 경우의 전압과 전류파형을 나타내었다. 3.2절에서 전술한 것과 같이 회전자의 위치가 변함에 따라 인덕턴스 및 전류의 상승기울기가 변화하고 있는 것을 볼 수 있으며, 이 방법을 이용하여 초기위치를 추정한다.

그림 10은 테스트 펄스파형을 통하여 추정된 초기 추정위치와 실제위치를 비교한 파형이다. 제안한 초기위치 추정 알고리즘으로 추정된 위치와 실제위치는 ±2° 의 오차를 보이며, 비교적 양호하게 추정하고 있음을 알 수 있다.



상: 200[V/div], 하: 500 [mA/div], 4[ms/div]

그림 9 SRG의 한상에 펄스 전압을 인가하였을 때의 상전압(상) 및 상전류(하)  
Fig. 9 Phase voltage(upper) and phase current(lower) when voltage pulse is injected to a phase of the SRG

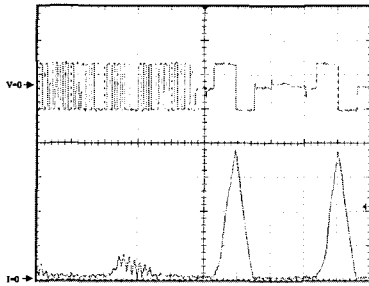


10[ms/div]

그림 10 SRG의 한상에 펄스 전압을 인가하였을 때 얻어진 추정위치(상) 및 실제위치(하)  
Fig. 10 Estimated position(upper) and real position (lower) acquired when voltage pulse is injected to a phase of the SRG

그림 11는 추정된 초기위치를 이용하여, 제안된 센서리스 알고리즘이 동작되는 순간에서의 전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다.

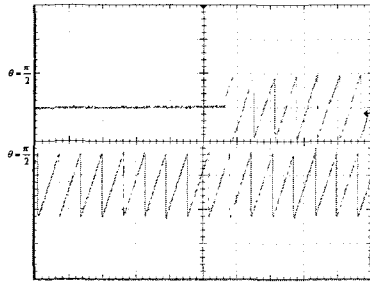
그림 12은 그림 11와 같은 조건하에서의 실제위치와 자속을 이용한 센서리스 알고리즘에 의하여 추정된 회전자의 위치 파형이다. 그림 11와 12에서 볼 수 있듯이 제어기 전환시에도 양호하게 위치를 추정하고 있음을 볼 수 있다.



상 : 100[V/div], 하 : 1[A/div], 2[ms/div]

그림 11 초기 추정위치를 이용하여 SRG를 센서리스 구동시 상전압(상) 및 상전류(하)

Fig. 11 Phase voltage(upper) and phase current(lower) of the SRG at the sensorless control using the initial estimated position



10[ms/div]

그림 12 초기 추정위치를 이용하여 SRG를 센서리스 구동을 하였을 때 추정위치(상) 및 실제위치(하)

Fig. 12 Estimated position(upper) and real position (lower) of the SRG at the sensorless control using the initial estimated position

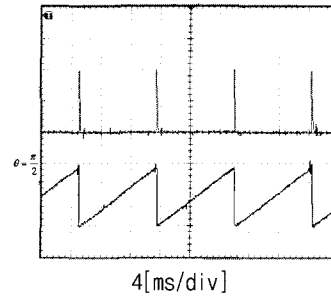
### 5.2 센서리스 구동

제안한 알고리즘의 타당성을 증명하기 위하여 부하를 변동하면서 실험을 행하였다.

그림 13는 트리거 펄스 및 추정위치를 나타내었다. 자속을 이용하여 위치를 추정하기 위하여 한 상의 자속값을 계산하고, 그 자속값에 해당하는 위치를 추정

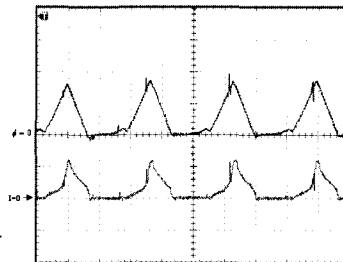
하였다. 한 주기마다 회전자가 동일한 위치에 있을 때, 펄스를 발생시켜 일차함수의 그래프 형태로 위치를 추정하는 방법을 사용하였다. 추정결과를 볼 때 추정성능이 양호함을 볼 수 있다.

그림 14 및 그림 15은 계산된 자속 및 이때의 전류 및 전압 파형을 나타내고 있다. 자속을 계산할 때 한 주기마다 리셋하는 방법을 사용하였다.



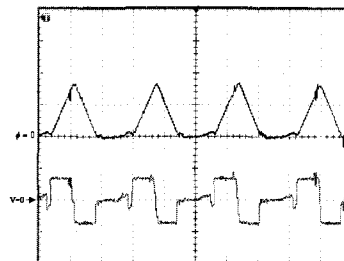
4[ms/div]

그림 13 정상상태에서 트리거 신호(상) 및 추정위치(하)  
Fig. 13 Trigger signal(upper) and estimated position (lower) in steady state



상 : 200[mWb/div], 하 : 5 [A/div], 4[ms/div]

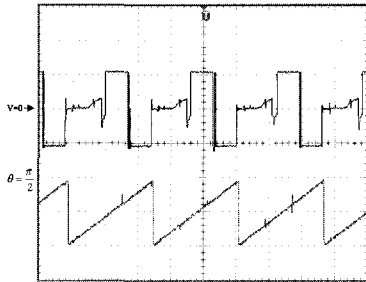
그림 14 정상상태에서 자속(상) 및 상전류(하) in steady state



상 : 200[mWb/div], 하 : 300 [V/div], 4[ms/div]

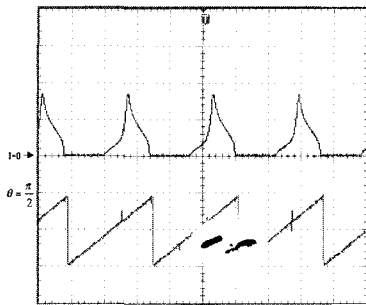
그림 15 정상상태에서 자속(상) 및 상전압(하) in steady state

그림 16~18는 그림 13과 같은 추정위치와 한 상의 전압, 전류 및 자속을 나타내었다. 자속은 전류가 흐르는 동안에만 발생되나, 위치추정은 전 구간에서 이루어지는 것을 볼 수 있다.



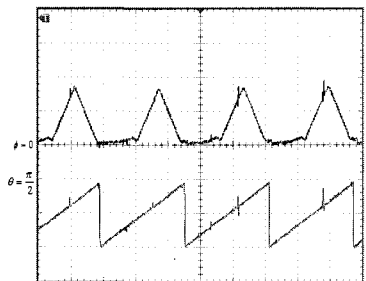
상 : 200[V/div] 4[ms/div]

그림 16 SRG의 상전압(상) 및 추정위치(하)  
Fig. 16 Phase voltage(upper) and estimated position (lower) of the SRG



상 : 5 [A/div], 4[ms/div]

그림 17 SRG의 상전류(상) 및 추정위치(하)  
Fig. 17 Phase current(upper) and estimated position (lower) of the SRG



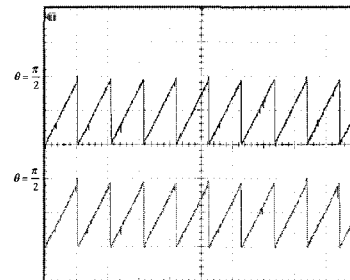
상 : 200[mWb/div], 4[ms/div]

그림 18 SRG의 자속(상) 및 추정위치(하)  
Fig. 18 Flux(upper) and estimated position(lower) of the SRG

그림 19은 추정위치와 실제위치를 나타낸 파형으로써 추정위치와 실제위치와의 오차는 약  $\pm 2$ 도이며 양호한 추정성능을 나타내는 것을 볼 수 있다. 여기서 발생한 위치오차는 SRG의 출력전압에 영향을 주지만 턴-오프각을 변화시켜 출력전압제어를 하기 때문에 SRG의 안정된 운전이 가능하다.

그림 20은 C상 및 A상의 회전자 위치 추정을 나타내었다. 한 상의 위치를 자속을 이용하여 계산하고, 다른 상의 위치는 기계적으로 30도 일정한 각도를 가지면서 형성되었기 때문에, 나머지 상에 대한 위치정보를 파악할 수 있다.

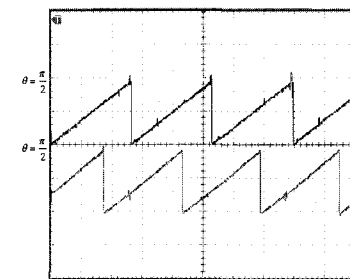
그림 21는 센서리스 구동시의 DC-Link 전압과 이때의 전류 파형을 나타내었다. 센서리스 구동시에도 회전자 위치 추정을 통해 양호하게 제어됨을 볼 수 있다. 위치센서 없이 구동을 하였을 경우 실험결과를 관찰하여 보면 위치오차가 약  $\pm 2$ 도이며, 위치추정성능이 비교적 양호함을 볼 수 있었다. 그리고 출력전압도 양호하게 발전이 되는 것을 확인할 수 있다.



4[ms/div]

그림 19 트리거펄스를 이용한 추정위치(상) 및 실제위치(하)

Fig. 19 Estimated position(upper) and real position (lower) using the trigger pulse

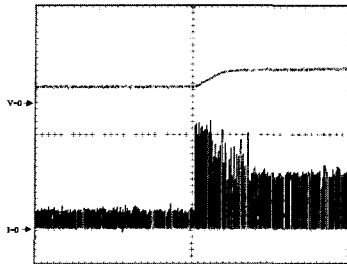


4[ms/div]

그림 20 C상 추정위치(상) 및 A상 추정위치(하)

Fig. 20 Estimated position of phase C(upper) and estimated position of phase A(lower)





상 : 100[V/div], 하 : 1[A/div], 1[s/div]

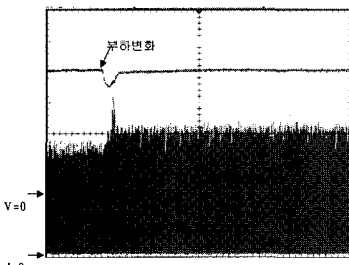
그림 21 센서리스 구동시 DC\_Link 전압(상) 및 상전류(하)  
Fig. 21 DC\_Link voltage(upper) and current(lower) at the sensorless control

### 5.3 출력전압제어

SRG의 출력전압은 여자전류에 비례하여 변화한다. 따라서 SRG의 출력전압을 제어하기 위하여 본 실험에서는 턴-온각을 고정시키고 턴-오프각을 제어하였다. 제어법은 PID 제어를 사용하였으며, 가변부하에 따라 턴-오프각을 제어하므로써, 부하의 변화에 의하여 견실하게 출력전압을 안정화시킬 수 있었다.

실험은 제안한 센서리스 알고리즘을 적용시켜 저항 부하의 값을 순간적으로 변화시켜 지령전압이 그대로 유지하는지를 확인하였다. 지령전압은 200V로 설정하였다.

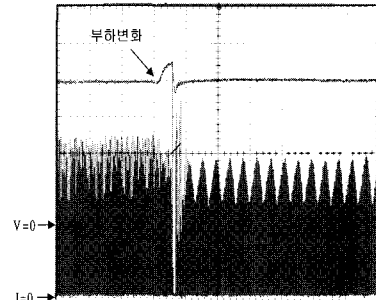
그림 22은 위치센서 없이 구동을 하는 도중에 부하를 200W에서 267W로 변화시켰을 때의 DC\_Link전압의 변화를 측정된 결과이다. 부하의 증가로 인하여 턴-오프각이 증가되고 여자구간이 늘어나면서 출력전압을 유지한다. 실험결과에서 살펴볼 때 부하변화시 과도 상태에서 지령전압에 대하여 출력전압이 약간의 오차를 발생하지만 수 초 후에 턴-오프각을 제어하여 지령전압을 양호하게 유지함을 볼 수 있다.



상 : 50[V/div.], 하 : 2.26[A/div.], 10[s/div.]

그림 22 부하 변동(200W→ 267W)시 DC\_Link전압(상) 및 상전류(하)  
Fig. 22 DC\_Link voltage(upper) and phase current (lower) with load variations(200W → 267W)

그림 23는 센서리스 구동중에 저항부하를 267W에서 200W로 변화시켰을 때의 DC\_Link전압의 변화를 측정된 결과이다. 마찬가지로 부하의 감소로 인하여 출력전압의 변화하나 수초내에 지령전압을 양호하게 추종함을 볼 수 있다.



상 : 50[V/div.], 하 : 2.26[A/div.], 4[s/div.]

그림 23 부하 변동(267W→ 200W)시 DC\_Link전압(상) 및 상전류(하)  
Fig. 23 DC\_Link voltage(upper) and phase current(lower) with load variations(267W→ 200W)

## 6. 결 론

본 논문에서는 위치 센서없는 SRG의 운전을 위한 센서리스 제어방법으로, 상 전압과 전류를 측정하여 자속을 계산하고, 계산된 자속과 위치와의 관계를 Look-up table로 나타내어 위치를 추정하는 방법을 제안하였다. 또한 출력전압을 제어하기 위하여 PID제어를 하여, 부하의 변화에 의하여 출력전압이 안정적으로 일정한 값을 유지하도록 하는 방법을 적용하였다.

본 논문에서 제시된 센서리스 알고리즘을 실험에 의하여 운전하여본 결과 위치추정오차는 약 ±2도였으며, 추정위치를 이용하여 양호하게 SRG를 구동할 수 있었다. 출력전압제어 실험에서도 추정위치를 이용하여 정 출력전압 제어를 위해 턴-오프각을 PID 제어하였는데, SRG의 정격범위 내에서 부하의 변화에 따른 출력전압의 변동율이 크지 않았고, 안정적으로 정 출력전압을 유지하는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

이 논문은 2000년도 에너지 기술 학술진흥사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습. (2000-E-EL30-P-15)

참 고 문 헌

[1] Arthur Radun, "Generating With the Switched Reluctance Motor", IEEE APEC, pp. 41~47, 1994.

[2] Stephen R. Jones and Barry T. Drager, "Sensorless Switched Reluctance Starter/Generator Performance", IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 3, No. 6, Nov./Dec. 1997.

[3] M. Stiebler and K. Liu, "Rotor Position Estimation of A Switched Reluctance Generator", ENE '97, Vol. 3, pp. 575~579, 1997.

[4] J.P. Lyons, S.R. MacMinn, and M.A. Preston, "Flux/Current Method For Rotor Position Estimation", IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Vol. 1, pp. 482~487, 1991.

[5] 김영조, 전형우, 김영석, "소호각 제어를 이용한 Switched Reluctance Generator의 출력전압제어", 대한전기학회 논문지, Vol. 50, No. 7, pp. 356~363, 2001.

[6] 양이우, 신재화, 김영석, "적응 슬라이딩 모드를 이용한 SRM의 속도 및 위치센서 없는 제어", 대한전기학회 논문지, Vol. 49, No. 11, pp. 763~770, 2000.

[7] P.P. Acarnley, C.D. French, and I.H. Al-Bahadly, "Position Estimation in Switched-Reluctance Drives", EPE '95, Vol. 3, pp. 765~770, 1995.

[8] G.G. Lopez, P.C. Kjaer, and T.J.E. Miller, "A New Sensorless Method for Switched Reluctance Motor Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 4, pp. 832~840, 1998.

[9] 최경호, 김동희, 노채균, 김민희, "스위치드 리럭턴스 전동기의 인덕턴스 산정에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제6권, 제4호, pp. 333~340, 2001.

[10] 김갑동, 최재동, 이학주, 안재황, 성세진, "노이즈성분을 고려한 SRM 센서리스 위치 추정의 오차 해석", 전력전자학회 논문지, 제6권, 제1호, pp. 74~81, 2001.

[11] 천동진, 정도영, 이상호, 이봉섭, 박영록, "간단한 검출기를 이용한 SRM 가변속 디지털 제어시스템 개발", 전력전자학회 논문지, 제6권, 제2호, pp. 202~208, 2001.

[12] 오석규, 최태완, 안진우, "SRM 드라이브의 운전성능 향상을 위한 스위칭각 특성에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제6권, 제6호, pp. 506~513, 2001.

[13] David A. Torrev, "Switched Reluctance Generators and Their Control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, Feb. 2002.

저 자 소 개



김영조(金永祚)

1950년 1월생. 1972년 인하대 전기공학과 졸업. 1986년 단국대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 유한대학 컴퓨터제어과 교수.



오승보(吳昇保)

1975년 1월생. 2000년 제주대 전자공학과 졸업. 2002년 인하대 전기공학과 졸업(석사). 현재 삼성전자 DVD개발그룹 연구원.



김영석(金營石)

1951년 6월 11일생. 1977년 인하대 전기공학과 졸업. 1987년 일본 나고야 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1987년~1989년 전기연구원 전력전자연구실장. 현재 인하대학교 전자전기공학부 교수. 당 학회 부회장.