

순시 자속과 펄스전압 인가를 이용한 위치센서 없는 SRG의 구동

최양광*, 김영석*, 오승보*, 김영조**
 인하대학교 전자·전기 공학부*, 유한대학**

The Position Sensorless Control SRG using the Instantaneous Flux and the Pulse Voltage

Yang-kwang Choi*, Young-seok Kim*, Sung-bo Oh*, Young-jo Kim**
 In-Ha University*, Yu-Han College**

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 temperator and EMI environment. Therefore, It is required for the sensor to be eliminated from 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 using the instantaneous flux profile, and the initial position is estimated by injecting high frequency pulse voltage.

It is proved that the rotor position is estimated very well by the exeriments.

1. 서 론

SRG(Switched Reluctance Generator)의 구동을 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. 본 논문에서는 순시자속을 이용하여 위치를 추정하는 방법을 이용하고, 이를 위한 초기위치의 검출은 회전하는 회전자에 펄스전압을 인가하였을 때, 인덕턴스의 변화에 따른 전류의 변화를 이용하여 초기위치를 검출하였다. 또한, 제안된 위치추정 알고리즘을 DC-link 전압의 정전압 제어 알고리즘에 적용하였다.

2. SRG의 위치센서 없는 구동

2.1 SRG의 구조

SRG의 구조는 그림 1에서 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.

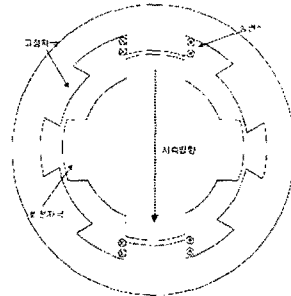


그림 1 SRG의 구조.

Fig. 1 Structure of SRG.

표 1은 본 논문의 실험에서 사용한 SRG에 대한 사양이다.

표 1. SRG의 사양

Table. 1 Specification of SRG

고정자 극수	6 극	정격출력	1 Hp
고정자 각도	33.2 도	권선저항	229 Ω
고정자 극간 간격	26.8 도	정격전류	5 A
회전자 극수	4 극	정격전압	DC 240 V
회전자 각도	33.2 도	정격회전수	4000 rpm
회전자 극간 간격	56.8 도	최대전류	8 A

2.2 SRG의 구동

그림 2는 한 상에 대한 SRG의 구동회로를 나타내며, 권선에 자속을 생성하는 여자동작과 여자된 자속을 이용한 발전동작으로 구분하여 동작한다.

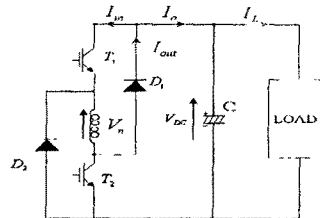
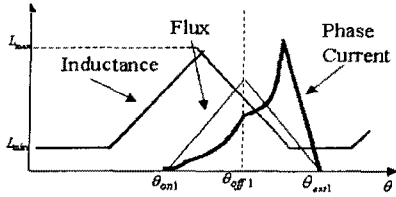


그림 2 한 상에 대한 SRG의 회로.

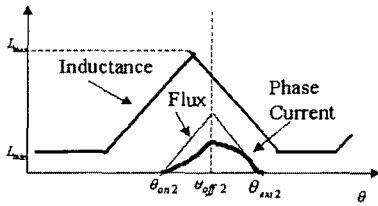
Fig. 2 SRG circuit of single phase.

동작방법은 두 개의 스위치 T_1 과 T_2 을 θ_{on} 에서 θ_{off} 까지 턴-온하여, V_{dc} 의 전압을 가하여 상권선을 여자시키고, 이 후 T_1 과 T_2 를 턴-오프하면, θ_{off} 에서 θ_{ext} 까지 발전 동작을 하게된다.

그림3은 회전자 회전시 SRG의 여자 구간에 따른 전류파형으로 그림3의 (a)는 여자구간이 클 때, 그림3의 (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 SRG의 쇄교자속 프로파일의 작성

$$V_m = R_m i_m + \frac{d\lambda_m(\theta, i_m)}{dt} \quad (1)$$

$m=1,2,3$

식(1)은 SRG의 한 상에 대한 전압방정식이며, 식(1)에서 회전자를 구속된 상태로하여 전압을 인가하면 식(2)와 같다.

$$V_m = R_m i_m + L(i_m) \cdot \frac{di_m}{dt} + \frac{dL(i_m)}{d\theta} \cdot \omega \cdot i_m \quad (2)$$

여기서, $\omega=0$ 인 상태이므로, 전압 V_m 을 인가한 후 시간에 따른 전류의 값을 측정하고, 측정된 전류의 각각의 값에 대한 시간에 대한 변화를 측정한다면, 각각의 전류에 따른 인덕턴스의 값을 산출할 수 있다.

$$\lambda_m(i_m) = L(i_m) \cdot i_m \quad (3)$$

식(3)에 의해 전류의 값에 따른 $\lambda_m(i_m)$ 을 산출할 수 있으므로 회전자를 $\Delta\theta$ 만큼씩 증가시키면서, 전류의 값에 따른 $\lambda_m(i_m)$ 을 산출하고, θ 를 90° 변화시킬때까지 $\lambda_m(i_m)$ 를 모두 산출하여, 자속 프로파일을 작성하였다.

그림4는 전류에 따른 $\lambda_m(i_m)$ 의 값이다.

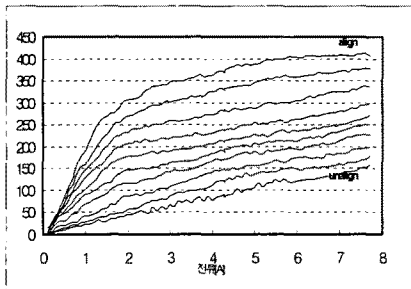


그림 4. 전류에 따른 쇄교자속의 곡선.
Fig. 4 Plots of flux linkage for current.

2.4 자속 프로파일을 이용한 회전자의 위치추정

회전자가 회전하는 상태에서 한 상에서의 현재의 전류 값과 쇄교자속값이 주어진다면, 그림4로부터 현재의 고정자에 대한 회전자의 위치정보를 알 수 있다. 현재의 전류와 전압을 측정하여, 식(4)에 대입하면, 현재의 쇄교자속값을 산출할 수 있으므로, 쇄교자속을 산출하기 위해 측정된 전류값과 산출된 쇄교자속을 이용하면, 측정된 순간의 위치정보를 알 수 있다.

$$\lambda_m = \int_0^T (V_m - R_m i_m) dt \quad (4)$$

T : 고정자의 한상에서 회전자의 위치변화에 따른

인덕턴스의 변화주기

그러나 그림4에서 보여진 것처럼, 전류에 따른 쇄교자속 곡선이 측정오차로 인하여 매끄럽지 못하므로, 그림4의 쇄교자속 프로파일에 의한 추정위치는 실제의 회전자 위치와 다르게 되어, 이를 실제 센서리스 알고리즘에 적용하기 어렵다. 따라서 그림4의 쇄교자속 프로파일에서 얻어지는 추정위치 중 그 값이 실제위치와 가장 근사한 한 개의 추정위치만을 사용한다. 회전자가 회전하는 상태에서, 실제위치와 가장 근사한 추정위치를 정하고, 이를 식(4)와 그림4의 쇄교자속 프로파일에서 얻어진 위치와 비교하여, 그 값이 동일하면, 트리거 신호를 발생시키고, 그 이전의 트리거 신호와의 시간차이를 측정하여, 측정된 시간과 위치를 이용하여 시간에 대한 위치의 기울기를 산출하고, 이를 이용하여 시간에 대한 위치값을 산출하여, 턴-온 및 턴 오프각에 대한 정보로 사용한다.

2.5 펄스전압 인가를 이용한 초기위치 추정

쇄교자속 프로파일을 이용한 위치추정 알고리즘에서, 고정자 인덕턴스의 변화주기를 한 주기로 하였을 때, 추정위치값은 한 주기마다 발생하는 트리거 신호의 시간차와 이에 의한 위치의 기울기를 사용하여 산출하므로, 쇄교자속 프로파일을 이용한 위치추정 알고리즘을 처음으로 구동하기 위한 기울기 값이 필요하다. 이러한 요구에 의해 다음의 초기위치 추정알고리즘을 제안한다.

한 상에 펄스전압을 인가하였을 때, 위치에 따른 인덕턴스의 값은 주기적으로 변화하므로, 인가전압에 의해 발생하는 상전류의 진폭은 위치의 변화에 따라 주기적으로 변하게 되고, 이를 이용하여 위치를 추정한다. 즉, 인덕턴스가 작은 부분에서는 많은 전류가 흐르고, 인덕턴스가 큰 부분에서는 적은 전류가 흐르므로, 전류의 변화가 심한부분에서 전류에 해당하는 위치값이 가장 명확한 부분을 선택하여, 해당전류일 때, 트리거 신호를 발생시키고, 발생된 트리거 신호의 시간차와 위치값을 이용하여, 쇄교자속 프로파일을 이용한 위치추정 알고리즘을 처음으로 구동하기 위한 기울기 값을 산출하고, 이를 이용하여 초기위치를 산출한다.

2.6 위치추정 및 정전압 제어 알고리즘

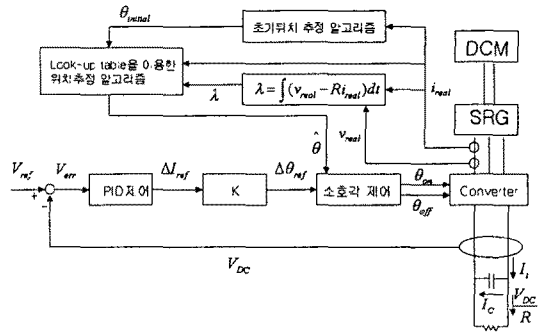


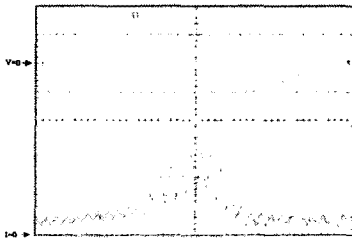
그림 5. 제안된 센서리스 구동방법의 블록선도
Fig. 5 Block-diagram of the proposed sensorless method for the SRG

그림5는 쇄교자속 프로파일과 초기위치 추정알고리즘을 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 PID제어의 입력으로 하고, 그 출력을 발전전류의 지령치로 하여, 그 값을 턴-오프각으로 하였다.[1] 이에 요구되는 위치정보를 쇄교자속 프로파일과 초기위치 추정알고리즘을 통하여 추정한다. 제안된 센서리스 구동방법에서 Look-up table은 C언어의 배열을 사용하여 구성하였고, 행은 0.1A 간격으로 전류를 나타내고, 열은 1° 간격으로 위치를 나타내도록 하였다. 배열을 구성하는 각 원소에는 쇄교자속의 값이 저장되도록하여, 현재 측정된 전류를 이용하여 행을 결정하고, 그 행의 열을 증가시키면서, 식(4)에 의해 산출된 쇄교자속값과 Look-up table의 쇄교자속 값을 비교하여 가장 근사한 쇄교자속 값을 찾아낸다. 이때의 가장 근사한 쇄교자속값의 열값을 회전자의 위치 값으로 하며, 이에 의한 위치값이 지정한 위치일 때 마다 트리거 신호를 발생한다.

3. 실험 결과

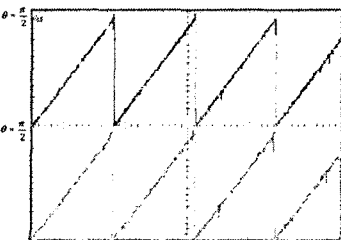
3.1. 초기위치의 추정

그림6은 초기위치 추정을 위하여 한상에 인가한 전압과 이로 인해 발생하는 상전류의 파형을 보였으며, 그림7은 초기위치 추정알고리즘으로 추정된 위치와 엔코더를 이용하여 계산된 위치를 D/A 컨버터를 이용하여 보인 파형이다. 그림8은 초기위치 추정 알고리즘에서 쇄교자속 프로파일을 이용한 위치추정 알고리즘으로 변환하는 순간의 상전압과 상전류의 파형을 나타내었으며, 그림9는 알고리즘 변환 순간에서 쇄교자속 프로파일을 이용한 위치추정 알고리즘에 의한 위치와 엔코더로 측정된 위치를 나타내었다.



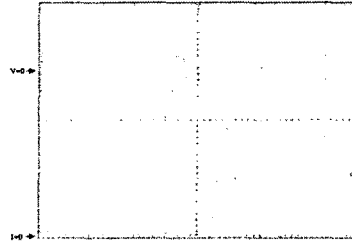
상 : 200[V/div], 하 : 500 [mA/div], 4[ms/div]

그림 6 SRG의 상전압(상) 및 상전류(하)
Fig. 6 Phase voltage(upper) and phase current(lower)



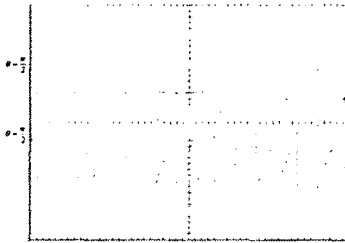
10[ms/div]

그림 7 추정위치(상) 및 실제위치(하)
Fig. 7 Estimated position(upper) and Real position(lower)



상 : 100[V/div], 하 : 1[A/div], 2[ms/div]
그림 8 초기 추정위치를 이용하여 센서리스 구동시 상전압(상) 및 상전류(하)

Fig. 8 Phase voltage(upper) and phase current(lower) waveform of sensorless control using the initial estimated position



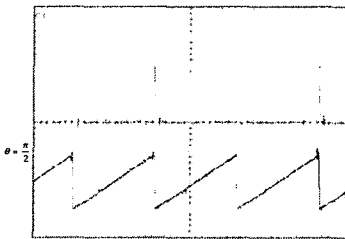
10[ms/div]

그림 9 초기 추정위치를 이용하여 센서리스 구동시 추정위치(상) 및 실제위치(하)

Fig. 9 Estimated position(upper) and real position(lower) of sensorless control using the initial estimated position

3.2 자속 프로파일을 회전자의 위치추정

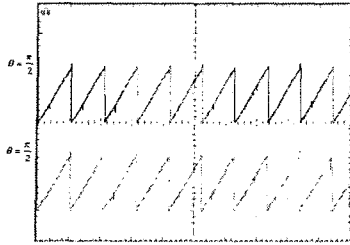
그림 10은 쇄교자속 프로파일을 이용한 위치추정 알고리즘구동시 트리거 신호와 추정위치가 D/A 컨버터를 이용하여 보여진 파형이며, 그림11은 쇄교자속 프로파일을 이용한 위치추정 알고리즘구동시 추정위치와 엔코더로 측정된 위치를 보였다. 또한 그림12는 초기위치 추정 알고리즘에서 쇄교자속 프로파일을 이용한 위치추정 알고리즘으로 변환하는 순간의 DC-link의 전압과 상전류의 파형을 나타내었다.



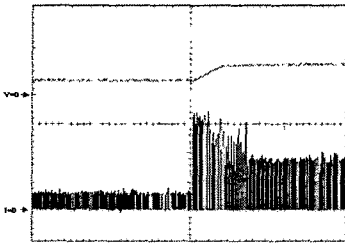
4[ms/div]

그림 10 트리거 신호(상) 및 추정위치(하)

Fig. 10 Trigger signal(upper) and Estimated position(lower)



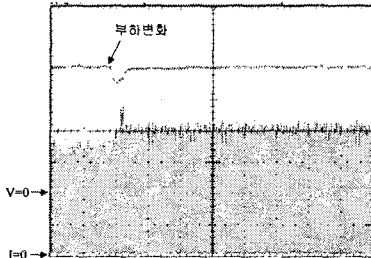
4[ms/div]
 그림 11 추정위치(상) 및 실제위치(하)
 Fig. 11 Estimated position(upper) and Real position(lower)



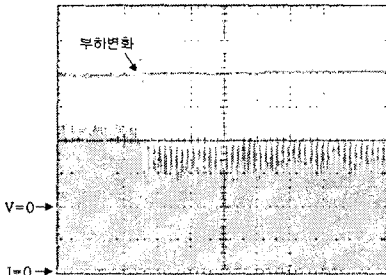
상 : 100[V/div], 하 : 1[A/div], 1[s/div]
 그림 12 DC_Link전압(상) 및 상전류(하)
 Fig. 12 DC_Link voltage(upper) and current(lower)

3.2 DC-link의 정전압 제어

그림13은 부하저항을 200Ω에서 150Ω으로 변화시켰을 때 DC-link의 전압과 상전류의 파형을 보였고, 그림14는 부하저항을 150Ω에서 200Ω으로 변화시켰을때 DC-link의 전압과 상전류의 파형을 보였다.

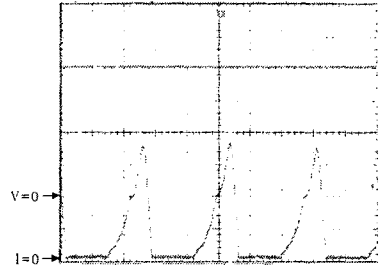


상 : 50[V/div], 하 : 1[A/div], 10[s/div]
 그림 13 부하증가시 DC_Link전압(상) 및 상전류(하)
 Fig. 13 DC_Link voltage(upper) and phase current(lower) when the load is increased.

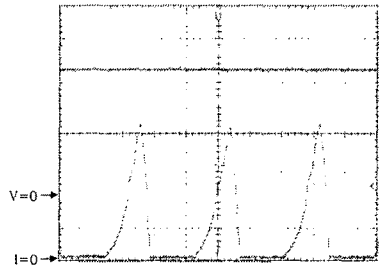


상 : 50[V/div], 하 : 1[A/div], 4[s/div]
 그림 14 부하감소시 DC_Link전압(상) 및 상전류(하)
 Fig. 14 DC_Link voltage(upper) and phase current(lower) when the load is decreased.

그림15는 부하저항이 200Ω일 때, DC-link의 전압과 상전류의 파형이며, 그림16은 부하저항이 150Ω일 때, DC-link의 전압과 상전류의 파형이다.



상 : 50[V/div], 하 : 1[A/div], 2[ms/div]
 그림 15 DC-link 전압(상) 및 상전류(하)
 Fig. 15 DC-link voltage(upper) and phase current(lower) with the load = 200Ω



상 : 50[V/div], 하 : 1[A/div], 2[ms/div]
 그림 16 DC-link 전압(상) 및 상전류(하)
 Fig. 16 DC-link voltage(upper) and phase current(lower) with the load = 150Ω

4. 결 론

본 논문에서는 SRG의 정전압 출력제어에 필요한 위치 정보를 얻기 위해, 쇄교자속의 프로파일을 이용하는 방법을 제안하고, 이를 구동하기 위하여 초기위치 추정에 필요한 위치정보를 얻기위한 방법으로 펄스전압을 인가하는 방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 실험을 통하여 증명되었으며, DC-link 전압은 부하변화에도 매우 안정적으로 동작함을 알 수 있다.

이 논문은 에너지기술 학술진흥사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습.

[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.
- [1] M. Stiebler, K. Liu, "Rotor Position Estimation of A Switched Reluctance Generator", EPE97, No.3, pp575 ~ 579, 1997
- [2] J.P. Lyons, S.R. MacMinn, M.A. Preston, "Flux/Current Method For Rotor Position Estimation", IEEE, June 1, pp482 ~ 487, 1991
- [3] PP Acarnley, CD French, IH Al-Bahadly, "Position Estimation in Switched-Reluctance Drives", ENE95, No. 3, pp765 ~ 770, 1995
- [4] Stephen R.Jones, Barry T.Drager, "Sensorless Switched Reluctance Starter/Generator Performance", IEEE Industrial Applications Magazine, November /December, pp33 ~ 38, 1997