

PID 제어를 이용한 Switched Reluctance Generator의 출력 전압 제어

전형우*, 김영조**, 김영석*

* : 인하대학교 전자·전기·컴퓨터 공학부

** : 유한대학 제어계측학과

Output Voltage Control Method of Switched Reluctance Generator using PID Control

Hyung-woo Jeon*, Young-cho Kim**, Young-seok Kim*

* : In-Ha University, ** : Yu-Han College

ABSTRACT

A SRG (Switched Reluctance Generator) has many advantages such as efficiency, simple controllability, low cost and robustness compared with other machines. But the theories that have been adopted as SRG control methods up to the present are complicated.

This paper proposes a simple control method using PID, which controls only a turn-off angle while making turn-on angle signals of SRG constant. Controlling the voltage differences between the reference and the real value and calculating the proper turn-off angle for the load variations can implement to keep the output voltage constant. The control method suggested in this paper enhances the efficiency of this system and simplifies the hardware and software by using only the voltage and speed sensors.

The proposed method is verified by experiment.

1. 서 론

SR기기는 강인성, 기기 제작의 저 비용, 그리고 높은 효율성 때문에 적용범위도 확대되고 있을 뿐 아니라, 특히 SRM(Switched Reluctance Motor)의 경우는 속도 제어 및 토크 제어 등 상당한 연구 개발이 진행되어 왔다. 그러나 SRM과 동등한 특성을 갖고 있는 SRG(Switched Reluctance Generator)의 연구는 거의 진행되고 있지 않다.

SRG는 다른 발전기에 비해서 회전자에 권선이나 영구자석을 가지고 있지 않으므로 초기에는 여자 전류를 고정자 권선에 공급해 주어야 한다. 따라서 동작방법을 보면 SRM과 유사하게 스위치 턴-온을 통한 전원을 상에 인가시키는 여자 동작과 스위치 턴-오프에 의한 다이

오드를 통해 발전된 전류를 전원으로 회생하는 발전 동작으로 나누어서 생각할 수 있다. 이 때 가변 부하에 따른 적절한 턴-온과 턴-오프가 일어나지 않을 경우에는 DC-Link 전압이 불안정하게 된다.^{[1][2]} 즉, 부하가 너무 작으면 DC-Link 전압은 무한대를 향하여 지수 함수적으로 증가되고, 부하가 너무 크면 DC-Link 전압은 0으로 감소하게 된다.

따라서 가변부하에 따라 턴-온각 및 턴-오프각을 제어함으로써 DC-Link 전압을 안정화시킬 수 있다.

본 논문에서는 부하 변동에 따른 DC-Link 전압의 변동을 억제하기 위하여, PID를 사용하여 턴-오프각을 제어함으로써 시스템의 강인성을 확보한다. 또한 SRG 시스템의 선형성을 도출하고 PID의 제어 성능을 실험을 통하여 증명한다.

2. SRG의 동작 및 제어

2.1 SRG 동작 원리

그림 1은 한 상에 대한 SRG의 회로를 나타내고 있다. 그림에서 보는 DC-Link 콘덴서는 발전을 하기 위한 여자 동작시의 전원과 SRG에서 발전된 전원을 저장시키는 역할을 동시에 수행한다.

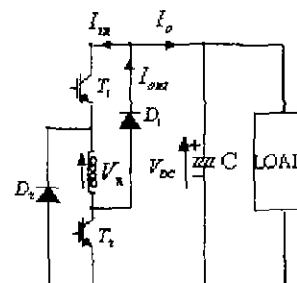


그림 1 한 상에 대한 SRG의 회로

동작방법은 두 개의 스위치 T_1 과 T_2 가 θ_{on} 에서

θ_{off} 까지의 기간동안 턴-온되어 SRG를 여자시킨다. 이 때의 상전압은 V_{dc} 가 된다. 그리고 스위치 T_1 과 T_2 가 턴-오프되면 θ_{off} 에서 θ_{ext} 까지의 기간동안은 발전된 전류가 다이오드 D_1 과 D_2 를 통하여 콘덴서로 충전된다. 이 때의 상전압은 $-V_{dc}$ 가 된다.

그림 2는 SRG의 소호각에 따른 전류의 파형을 보여 주고 있는데 (a)의 그림은 여자전류를 충분히 공급받은 경우로써 충분히 큰 전류가 회생되는 것을 보이는 반면에 (b)의 그림에서는 적게 공급받는 경우로써 작은 전류만이 회생되고 있는 것을 볼 수 있다. 그러므로 발전되는 전류량은 소호각으로부터 결정되는 것을 알 수 있다.

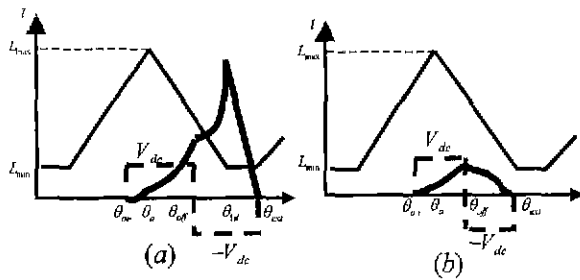


그림 2 스위치 턴-오프각에 따른 전류파형

다음은 전류량에 따른 SR기기의 인덕턴스 프로파일을 나타내고 있다.

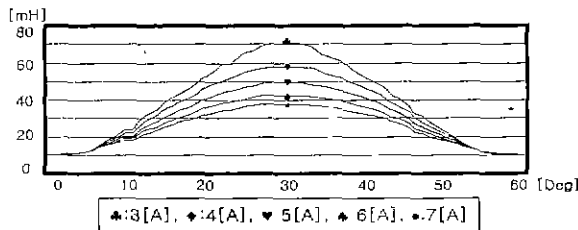
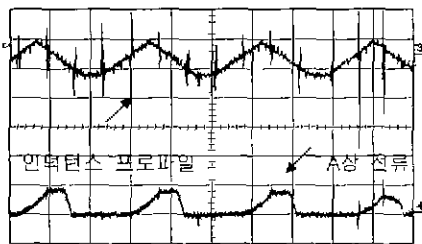


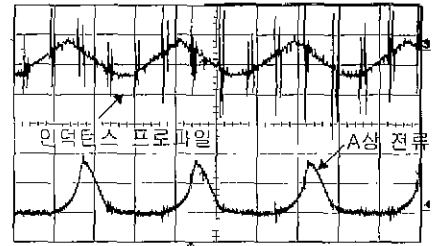
그림 3 전류에 따른 인덕턴스 프로파일

여기서 볼 수 있듯이 SR-Machine의 인덕턴스는 전류의 양에 따라 점차 감소되어지고 있는 것을 볼 수 있다.

다음은 도통각에 따른 SRG의 전류파형을 나타내었다.



(a) 도통구간을 15°로 주었을 경우



(b) 도통구간을 17°로 주었을 경우
그림 4. off각에 따른 전류 파형

전류 파형을 보면 도통구간에서는 여자전류를 확립하는 구간이고, 소호구간에서는 발전되어 나오는 구간이다.

2.2 SRG 모델링

SRG의 발전동작시 공급되는 여자전류와 회생되는 전류의 차는 총 발전 전류가 된다. 식 (1)은 한 주기동안의 총 발전전류의 평균값을 나타낸다.

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

여기서 $I_o = I_{out} - I_m$, N_r : 회전수의 극수,
 N_s : 고정자의 극수, i_n : 상 전류

식 (1)로 부터 발전기에 부하를 인가한 경우 캐패시터 C에 충전된 전류는 부하로 공급되므로 부하전류(I_L)와 발전전류(I_o)의 관계는 식 (2)과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{DC}(t) &= V_{DC}(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i dt \\
 &= V_{DC}(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t \left[\frac{N_r \cdot N_s}{4\pi} \cdot I_o - I_L \right] dt
 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 보는 것과 같이 DC-Link 전압은 발전전류(I_o)와의 관계식으로 나타낼 수 있다.

일반적인 SRG 수식을 표현하면 식 (3)와 식 (4)으로 표현된다.

$$V = R_n i + \frac{d\lambda}{dt} = R_n i + \omega L \frac{di}{d\theta} + \omega i \frac{dL}{d\theta} \quad (3)$$

$$(R_n i - V) d\theta + \omega L di + \omega dL i = 0 \quad (4)$$

식 (1)의 발전전류(I_o)를 구하기 위해, 식 (5)과 식 (6)과 같이 여자 영역의 전류를 I_{in} 과 발전 영역의 전류를 I_{out} 으로 나누어서 생각한다.

$$I_m = \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} i d\theta = \int_{\theta_{on}}^{\theta_n} i d\theta + \int_{\theta_n}^{\theta_{off}} i d\theta \quad (5)$$

$$I_o = \int_{\theta_{off}}^{\theta_{on}} i d\theta = \int_{\theta_{off}}^{\theta_{1st}} i d\theta + \int_{\theta_{1st}}^{\theta_{on}} i d\theta \quad (6)$$

식(5)와 식(6)을 간단하기 위해 '오일러 공식'을 사용하고, 전류가 부토오크 영역으로 전류가 흐르지 않는다면 발전전류(I_o)와 소호각(θ_{off})의 관계는 식(7)과 같다.^[3]

$$I_o = I_{out} - I_m = \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} i d\theta - \int_{\theta_{on}}^{\theta_{on}} i d\theta \quad (7)$$

$$= G\theta_{off}^4 + H\theta_{off}^3 + J\theta_{off}^2 + K\theta_{off} + M$$

식 (7)에 나타난 I_o 값과 θ_{off} 의 관계는 사차방정식으로 나타난다. 사용되는 θ_{off} 는 0보다 큰 경우에만 사용되므로 사용구간을 그림으로 나타내면 그림 4의 (b)와 같고, SRG 정수에 따른 시뮬레이션의 결과로는 그림 4의 (a)와 같다. 여기서 turn-on각은 $-0.087[rad]$ 으로 하였다. 인덕턴스 프로파일의 최고점을 $0[rad]$ 으로 잡음.

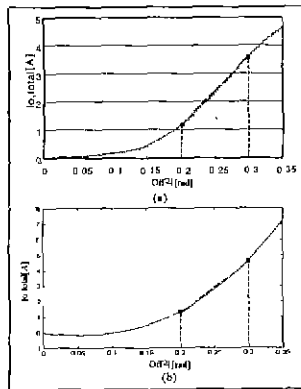


그림 4 시뮬레이션(a)과 Matlab(b)으로 구한 off각에 대한 $I_o, total$ 의 파형.

그림 4에서 소호각(θ_{off})이 $0.15[rad]$ 이하에서는 적은 발전전류를 가지고, $0.15[rad]$ 이상이 되면 직선적으로 증가한다. 또한 일정구간($\theta_{off}: 0.2 \sim 0.3[rad]$) 안에서 전류 I_{total} 은 소호각 θ_{off} 에 비례적으로 나타난다.

따라서 그림 4에서 그런 직선을 수식으로 나타내면 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{off} = \theta_{off0} + K \cdot I_{ref} \quad (8)$$

2.3 SRG의 제어방법

본 논문에서 제안된 SRG의 제어방법은 그림 5에서 나타내었다. 즉 피드백 방법을 사용하여 실제 전압을 측정하고 그것을 지령전압과 비교하여 전압의 오차를 PID 제어 방법을 사용하여 새로운 지령전류 I_{ref} 을 구하고, 식(8)을 이용하여 소호각(θ_{off})을 결정한다.

사용된 제어기 PID는 식(2)처럼 V_{dc} 와 i 사이의 관계가 적분치로 나타나므로 PD 제어기가 적합하다.

$$V_{dc} = \frac{1}{C} \int i dt \Rightarrow i = C \frac{d}{dt} V_{dc} \quad (9)$$

그러나 PD는 응답속도는 빠르나 정상상태에서 리플이 발생하므로 리플을 감소시키기 위해서 약간의 적분기(I)를 사용하여 정상상태에도 안정성을 유지할 수 있도록 한다.

그림 5는 제안된 SRG 출력전압 제어방법의 블록 다이어그램을 보여주고 있다.

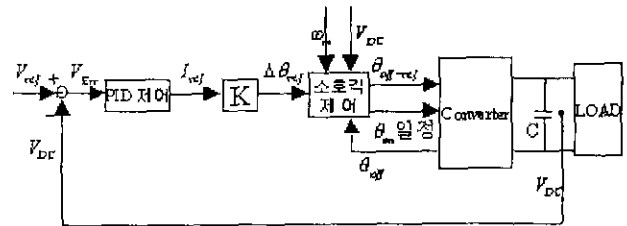


그림 5 제안된 SRG DC-Link 전압 제어방법의 블록 다이어그램

2.4 시뮬레이션 결과

다음의 각각의 부하 변동시에 따른 SRG의 전류·시뮬레이션 파형을 볼 수 있다.

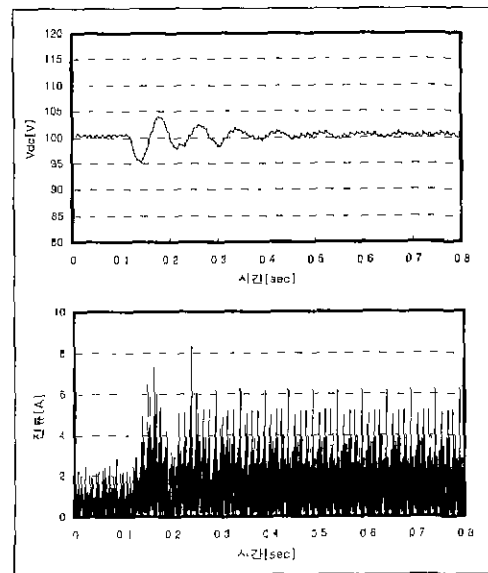


그림 6. 부하 증가시의 DC-Link 전압과 전류 시뮬레이션 파형

그림 6의 파형은 부하가 $290[\Omega]$ 에서 $110[\Omega]$ 로 증가했을 경우에 따른 적절한 소호각을 찾기 위해 소호각의 변화에 따른 DC-Link 전압과 전류의 변동을 볼 수 있다. 정상상태에서 부하의 증가로 전압이 감소한 후에 부하에 따른 소호각을 찾아 약 $0.5[sec]$ 안에 다시 정상상태로 회복하고 있다.

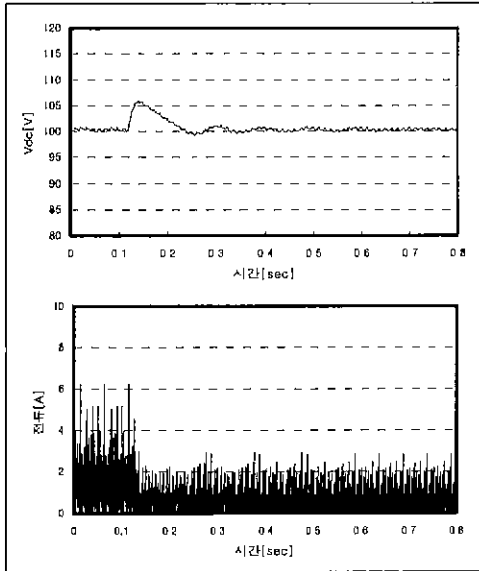


그림 7. 부하 감소시의 DC-Link 전압과 전류 시뮬레이션 파형

그림 7의 파형은 부하가 $110[\Omega]$ 에서 $290[\Omega]$ 로 감소했을 때의 DC-Link 전압과 각 상의 전류의 변동을 보여주고 있다. 정상상태에서 부하의 감소로 전압이 증가한 후에 약 $0.3[\text{sec}]$ 안에 다시 정상상태로 회복하고 있다.

이와 같은 시뮬레이션을 보는 바와 같이 이 제어방법이 다른 방법들^{[4][5]}보다 더 빠른 제어가 가능함을 확인하였다.

2.5 실험 결과

다음은 실험상태에서의 DC-Link 전압과 전류파형을 보여주고 있다. 인터럽트주기를 $100[\mu\text{s}]$ 로 주었으며 지령치 전압은 $100[\text{V}]$ 로 하고 전압간격은 $10[\text{V}]$ 이며 전류의 간격은 $1[\text{A}]$ 이다.

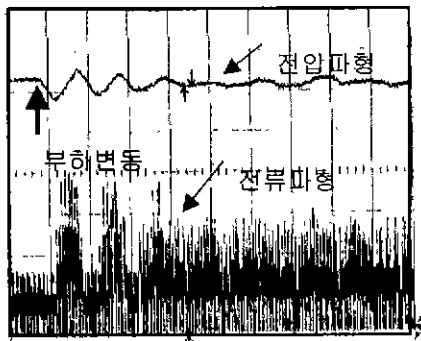


그림 8. 부하 증가시의 DC-Link 전압과 전류 실험 파형

그림 8은 부하를 $270[\Omega]$ 에서 $150[\Omega]$ 으로 변화를 시켰다. 시간의 주기는 $0.2[\text{sec}]$ 로 하였으며 부하변동은 시뮬레이션과 비슷하게 잘 제어가 되고 있는 것을 볼 수 있다.

그림 9는 부하 감소시의 DC-Link 전압과 전류 파형을 보여주고 있다.

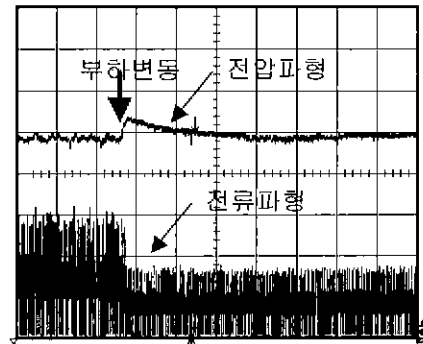


그림 9. 부하 감소시의 DC-Link 전압과 전류 실험 파형

여기서의 부하 변동은 $110[\Omega]$ 에서 $290[\Omega]$ 으로 변화시켰다. 다음의 파형도 시뮬레이션과 비슷하게 나오며, 잘 제어가 되고 있는 것을 볼 수 있다.

3. 결론

이 논문에서 제안된 제어방법인 PID의 제어의 당위성을 수학적으로 증명하였고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다.

SRG의 DC-Link 전압이 PID제어를 사용하여 가변부하에 따라 빠른 응답성능을 보이고 있다.

제어 방법이 매우 간단하기 때문에 소프트웨어와 하드웨어가 매우 간단하게 설계할 수 있고, 부하변동에 대하여도 강인하다.

이 논문의 연구는 에너지기술 학술진흥사업의 지원에 의해서 수행되었음

참고 문헌

- [1] P.C. Kjaer, C. Cossar, J.J. Gribble, Y.Li, T.J.E. Miller, "Switched Reluctance Generator Control Using An Inverse Machine Model", ICEM pp. 380-386, 1994.
- [2] Radun A. "Generating With the Switched Reluctance Motor", Proceedings APEC pp.41-47, 1994
- [3] 전형우, 김영조, 김영석 "PID 제어를 이용한 Switched Reluctance Generator의 출력전압제어", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp.3-6, 1999.
- [4] Radun A. "Linearizer for a Switched Reluctance Generator" US Patent 5204604, April 20, 1993.
- [5] P.C.Kjaer, C.Cossar, J.J.Gribble, Y.Li, T.J.E. Miller, "Minimisation of Reactive Power Flow in Switched Reluctance Generator", IPEC-Yokohama pp.1022-1027, 1995