

소호각 제어를 이용한 Switched Reluctance Generator의 출력 전압 제어

論 文

50B-7-7

Output Voltage Control Method of a Switched Reluctance Generator using Turn-off Angle Control

金永祚* · 全炯禹** · 金榮石***

(Young-jo Kim · Hyoung-woo Jeon · Young-seok Kim)

Abstract - A SRG (Switched Reluctance Generator) has many advantages such as high efficiency, low cost, high-speed capability and robustness compared with other types of machine. But the control methods that have been adopted for SRGs are complicated. This paper proposes a simple control method using the PID controller which only controls turn-off angles while keeping turn-on angles of the SRG constant. In order to keep the output voltage constant, the turn-off angle for load variations is controlled by using linearity between the generated current and the turn-off angle since the reference generated current can be led through the voltage errors between the reference and the actual voltage. The suggested control method enhances the robustness of this system and simplifies the hardware and software by using only the voltage and the speed sensors. The proposed method is verified by experiments.

Key Words SRG, PID controller, turn-off angle

1. 서 론

최근 20여년간 SR기기는 영구자석과 회전자 권선, 브러시가 없기 때문에 견고한 구조를 가지고 있으며, 기기 제작의 저 비용, 그리고 높은 효율 때문에 상당한 주목을 받아왔다. 또한 반도체 제조기술과 그의 응용기술, 현대제어이론과 그들을 실제의 시스템에 적용하는 기술의 진보에 따라 SR기기 구동시스템이 산업계에 널리 확산되어가고 있다. 초기에 SR기기 구동은 전력변환기기의 신뢰성 결여와 SR 기기에서 발생하는 전자계에 의한 소음 때문에 실용화에 많은 어려운 점이 있었다. 최근에 IGBT 등의 전력용 스위치 소자와 ASIC 기술의 발전으로 전력변환기기의 신뢰성 문제를 극복하는 동시에 전동기설계 CAD기술의 발달로 SR기기에서 발생하는 소음을 상당한 수준으로 억제시키게 되었다.

따라서 최근 SRM(Switched Reluctance Motor)의 경우는 가변속 및 센서리스 제어 등 상당한 연구개발이 진행되어 왔으며 적용범위도 확대되고 있다. 그러나 SRM과 동등한 특성을 갖고 있는 SRG(Switched Reluctance Generator)의 연구는 아직 도입단계에 있으며, 단지 일부 국외에서만 소량으로 항공 우주분야에서 대형 고속 SRG에 대하여 연구 개발하고 있다. 또한 일부에서 산업용으로 자동차용 발전기로서 연구 개발 중에 있다. 이와 같이 SRG에 대한 연구가 여전히 미흡한 이유는 기존의 SRM에서 볼 수 있는 소음 및

과열 등의 단점을 완전히 극복하지 못한 것으로부터 비롯되며, SRG에 대한 최적 설계 기술 및 기존 발전기를 대체할 수 있는 구체적인 응용 분야로의 확대가 원만히 이루어지지 않은 것으로 사료된다.

SRG는 다른 동기발전기나 유도발전기에 비해서 회전자에 권선이거나 영구자석을 가지고 있지 않으므로 초기에는 여자전류를 고정자 권선에 공급해 주어야 한다. 따라서 동작방법을 보면 SRM과 유사하게 스위치 턴-온을 통한 전원을 상에 인가시키는 여자 동작과 스위치 턴-오프에 의한 다이오드를 통해 발전된 전류를 출력으로 전달하는 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] 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 일정하게 할 필요가 있다.

이러한 전압제어 방식으로 전압 에러치의 PI제어를 통하여 전류 지령치를 구하고 이것으로 지령 토크를 구하여 On 각을 제어하는 방법[2]과 전압에러치를 이용하여 발전전류를 구한 다음 Inverse model을 통한 On/Off 각을 제어하여 전압을 제어하는 방법[3]과 그리고 On/Off 각을 일정하게 하여 전류를 PWM을 사용하여 전압을 제어하는 방법[4] 등을 사용하였다.

그러나 위의 방법들은 복잡한 알고리즘을 토대로 만들어져 있어 많은 연산 시간을 가지는 것과 look-up table과 같은 장치가 요구되어지며 PWM으로 인한 소음 발생 및 발전전류의 감소 등을 볼 수 있다.

따라서 본 논문에서는 발전전류와 턴오프 각이 비례함을 도출하고, 또한 전압오차를 PID제어하여 지령전류를 발생하는

* 正 會 員 : 柳韓大 制御計測科 副教授 · 博士課程

** 準 會 員 : 三星電子 研究員

*** 正 會 員 : 仁荷大 電子電氣컴퓨터學科 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 2月 27日

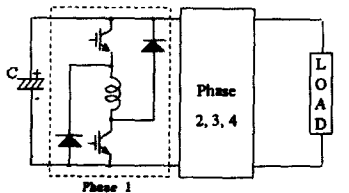
最終完了 : 2001年 6月 18日

것에 대한 타당성을 입증하였다. 이를 이용하여 부하 변동에 따른 DC Link전압의 변동을 억제하기 위해 PID제어를 사용한 턴오프 각 만을 제어함으로써 제어알고리즘과 하드웨어를 간단하게 구성하여 시스템의 현실성을 확인하였다.

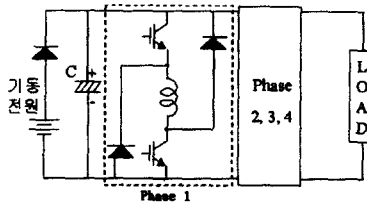
2. SRG의 구동회로 특징

2.1 구동회로

SRG의 구동에는 자여자 방식과 타여자 방식이 있다. [1] 그림 1의 (a)는 자여자 방식의 컨버터를 나타낸다. 이 방식은 잔류 자속을 이용하여 초기전압을 유지시킨다. 잔류 자속을 통해 단자전압을 유지시키고 유지된 단자 전압을 가지고 고정자 권선에 인가한 후 발전을 시키므로 기동회로가 필요치 않다. 따라서 하드웨어적으로는 간단해 지지만, 만약 과부하가 걸리면 충전전압은 계속 줄어들어서 '0'으로 떨어져 기동이 불가능하게 된다.



(a) 자여자 방식의 컨버터



(b) 타여자 방식의 컨버터

그림 1 SRG컨버터의 여자방식

Fig. 1 Excitation methods of converters for the SRG.

그림 1 (b)는 타 여자 방식의 컨버터를 나타낸다. 타여자 방식은 기동회로와 연결되어 단자전압을 유지하고도 자여자 방식과는 달리 발전시에도 계속 전압을 유지시키기 위해 전원을 공급해야 한다. 이러한 타 여자 방식은 과부하시에도 단자 전압이 떨어지지 않는지만 기동전원이 요구된다는 단점이 있다.

2.2 구동회로의 동작원리

그림 2은 한 상에 대한 SRG의 회로를 나타내고 있다. SRG는 회전자에 영구자석이나 계자권선이 없으므로 따로 여자를 시켜주어야 한다. 따라서 동작은 자속을 발생시켜야 하는 여자 구간과 발생한 자속으로 발전하는 발전구간으로 나눌 수 있는데, 여자구간은 스위치를 On시켜 단자전압으로 SRG에 인가하여 여자 시킨 뒤에, 스위치를 Off시켜 발생한 자속이 감소되어지면서 발전전류를 발생시킨다.

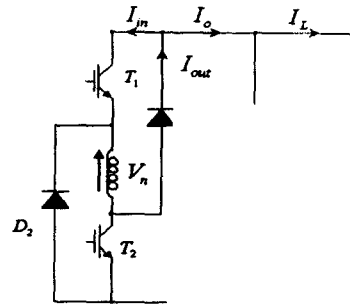
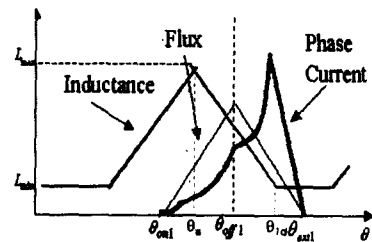


그림 2 부하회로를 갖는 SRG

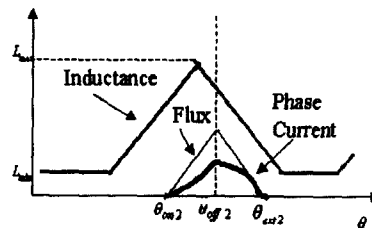
Fig. 2 One phase leg of a SRG

동작방법은 두 개의 스위치의 기간동안 도통되어 SRG의 DC-Link 전압은 V_{dc} 가 된다. 이렇게 생성된 자속은 스위치 T_1 과 T_2 가 턴-오프되면 θ_{off} 에서 θ_{end} 까지의 기간동안은 발전되어 발전된 전류가 다이오드 D_1 과 D_2 를 통하여 콘덴서로 충전된다. 이 때의 상전압은 $-V_{dc}$ 가 된다. 그림2에서 보는 DC-Link 콘덴서는 발전을 하기 위한 여자 동작시의 전원과 SRG에서 발전된 전하를 저장시키는 역할을 동시에 수행한다.

2.3 여자구간($\theta_{on} \sim \theta_{off}$)에 따른 전류파형



(a) 충분히 여자했을 경우



(b) 적게 여자했을 경우

그림 3 여자구간에 따른 전류와 인덕턴스 및 자속 파형

Fig. 3 Phase currents, flux linkages and idealized inductance profile for the excitation period.

그림 3의 (a)는 인덕턴스 프로파일을 기준으로 충분히 여자했을 경우[5], 즉 스위치를 On하여 충분히 여자를 시킨 후에 스위치를 Off한 경우인데, 이 때는 여자전류보다 큰 발전 전류가 생성되는 것을 볼 수 있다.

그림 3의 (b)는 그림 3의 (a)보다 적게 여자한 경우인데, 이 때는 여자전류에 비해 작은 발전전류만이 생성되는 것을 볼 수 있다.

따라서 발전량은 자속의 양에 따라 좌우되므로 소호각으로부터 결정되는 것을 알 수 있다. 발전되는 전류는 여자전류를 뺀 만큼이므로 이것이 곧 부하전류로 인가된다.

3. SRG의 모델링

3.1 SRG의 기본 수식[3]

SRG의 발전동작시 공급되는 여자전류와 회생되는 전류의 차는 총 발전 전류가 된다. 식 (1)에서 $I_{o, total}$ 은 한 주기동안의 총 발전전류의 평균값을 나타낸다. 이 수식을 보면 한 주기동안(60°), 다른 상들의 전류(A, B, C, D)가 모두 존재하므로 다음과 같이 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 $I_o = I_{out} - I_{in}$, 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.

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

여기서 $V_{dc}(t)$: DC-Link 전압, I_L : 부하 전류

3.2 제안된 수식

일반적인 SRG 수식은 식 (3)과 식 (4)과 같이 표현된다.

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

여기서 R_n : 권선저항, λ : 자속, L : 인덕턴스, ω : 속도

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

식 (1)의 발전전류(I_o)와 소호각(θ_{off})과의 관계를 구하기 위해, 식 (5)과 식 (6)과 같이 여자 영역의 전류를 I_{in} 과 발전 영역의 전류를 I_{out} 으로 나누어서 생각한다.

$$I_{in} = \int_{\theta_m}^{\theta_{off}} i_n d\theta = \int_{\theta_m}^{\theta_a} i_n d\theta + \int_{\theta_a}^{\theta_{off}} i_n d\theta \quad (5)$$

$$I_{out} = \int_{\theta_{off}}^{\theta_m} i_n d\theta = \int_{\theta_{off}}^{\theta_{1d}} i_n d\theta + \int_{\theta_{1d}}^{\theta_m} i_n d\theta \quad (6)$$

식(5)와 식(6)을 간단하기 위해 '오일러 공식'을 사용하고, 전류가 전동기 영역까지는 전류가 흐르지 않는다면 발전전류(I_o)와 소호각(θ_{off})의 관계는 식(7)과 같이 소호각의 4차 방정식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} I_o &= I_{out} - I_{in} = \int_{\theta_{off}}^{\theta_m} i_n d\theta - \int_{\theta_m}^{\theta_{off}} i_n d\theta \\ &= G\theta_{off}^4 + H\theta_{off}^3 + J\theta_{off}^2 + K\theta_{off} + M \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$G = \frac{R_n^2 (V_{dc} - R_n i_a)}{\omega^3 L_{1d} L_{offa} L_{offd}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} H &= \frac{R_n A}{\omega L_{1d}} - \frac{R_n (V_{dc} - R_n i_a)}{2\omega^2 L_{offd} L_{offa}} \\ &\quad - \frac{R_n^2 (\theta_{om} + \theta_{1d})}{\omega^3 L_{1d} L_{offa} L_{offd}} (V_{dc} - R_n i_a) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} J &= \frac{-R_n E}{2\omega L_{offd}} - \frac{1}{2\omega} \left\{ \frac{V_{dc}}{L_{offd}} - \frac{2V_{dc}}{L_{1d}} + \frac{(V_{dc} - R_n i_a)}{L_{offa}} \right\} \\ &\quad + \frac{R_n F}{\omega L_{1d}} + \left(\frac{R_n \theta_{1d}}{\omega L_{offd}} - \frac{dL_d}{L_{offd}} \right) \frac{(V_{dc} - R_n i_a)}{\omega L_{offa}} \\ &\quad - \frac{R_n (\theta_{om} + \theta_{1d}) A}{\omega L_{1d}} + \frac{R_n^2 (\theta_{om} + \theta_{1d})^2}{4\omega^3 L_{1d} L_{offa} L_{offd}} (V_{dc} - R_n i_a) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} K &= \left(\frac{R_n \theta_{1d}}{\omega L_{offd}} - \frac{dL_d}{L_{offd}} \right) E - \frac{R_n (\theta_{om} + \theta_{1d}) F}{\omega L_{1d}} + B \\ &\quad - \left(\frac{R_n \theta_{1d}^2}{2\omega L_{offd}} - \frac{dL_d}{L_{offd}} \theta_{1d} \right) \frac{(V_{dc} - R_n i_a)}{\omega L_{offa}} \\ &\quad + \frac{R_n (\theta_{om} + \theta_{1d})^2}{4\omega L_{1d}} A \end{aligned} \quad (11)$$

$$M = \left(\frac{dL_d \theta_{1d}}{L_{offd}} - \frac{R_n \theta_{1d}^2}{2\omega L_{offd}} \right) E + \frac{R_n (\theta_{om} + \theta_{1d})^2 F}{4\omega L_{1d}} - D \quad (12)$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{-R_n}{\omega^2 L_{offa} L_{offd}} (V_{dc} - R_n i_a) \theta_a \\ &\quad + \frac{R_n}{\omega L_{offd}} \left(\frac{dL_a}{L_{offa}} + 1 \right) i_a + \frac{V_{dc}}{\omega L_{offd}} \\ &\quad - \left(\frac{R_n}{\omega L_{offd}} \theta_{1d} - \frac{dL_d}{L_{offd}} - 1 \right) \frac{(V_{dc} - R_n i_a)}{\omega L_{offa}} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{V_{dc} \theta_{1d}}{\omega L_{offd}} - \frac{V_{dc} (\theta_{om} + \theta_{1d})}{\omega L_{1d}} \\ &\quad + \frac{(V_{dc} - R_n i_a) \theta_a}{\omega L_{offa}} - \frac{dL_a i_a}{L_{offa}} \end{aligned} \quad (14)$$

$$D = \frac{V_{dc}\theta_{1d}^2}{2\omega L_{offd}} - \frac{V_{dc}(\theta_{on} + \theta_{1d})^2}{4\omega L_{1d}} - \frac{dL_a}{L_{offa}} i_a \theta_a + \frac{(V_{dc} - R_n i_a)}{2\omega L_{offa}} \theta_a^2 + \frac{V_{dc}}{\omega L_a} (\theta_a - \theta_{on})^2 \quad (15)$$

$$E = -\frac{(V_{dc} - R_n i_a)}{\omega L_{offa}} \theta_a + \left(\frac{dL_a}{L_{offa}} + 1\right) i_a \quad (16)$$

$$F = -\left(\frac{R_n \theta_{1d}}{\omega L_{offd}} - \frac{dL_d}{L_{offd}} - 1\right) E - \frac{V_{dc} \theta_{1d}}{\omega L_{offd}} \quad (17)$$

오프각에 대한 $I_{o, total}$ 의 관계에 대한 시뮬레이션 결과는 그림4와 같다. 소호각(θ_{off})은 '0'보다 큰 경우로서 인덕턴스 프로파일의 최고점을 0도로 설정하였으며, turn-on각은 -3도로 설정하였다.

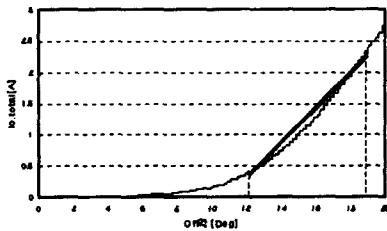


그림 4 턴 오프각에 대한 $I_{o, total}$ 의 특성 파형.

Fig. 4 Characteristics waveform of $I_{o, total}$ for turn-off angle

그림 4에서 소호각(θ_{off})이 12도 이하에서는 적은 발전전류를 가지고, 12도 이상이 되면 직선적으로 증가한다. 또한 일정구간(θ_{off} : 12도~19도)안에서 전류 $I_{o, total}$ 은 소호각 θ_{off} 에 비례적으로 나타난다.

따라서 그림 4에서 나타낸 직선을 수식으로 나타내면 식(18)과 같다.

$$\theta_{off} = \theta_{off0} + K \cdot I_{o, ref} \quad (18)$$

여기서 $I_{o, ref}$ 는 발전전류의 지령치이다.

3.3 SRG의 제어방법

전절에서 발전전류 I_o 와 소호각 θ_{off} 와 관계를 나타내었다. 다음은 DC-Link 전압 V_{dc} 와 I_o 의 관계식을 통해 적합한 제어기를 찾아보면, 식(2)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{dc}(t) = V_{dc}(t_0) + \frac{1}{C} \int (Q I_o - I_L) dt \quad (19)$$

여기서 $Q = \frac{N_r \cdot N_s}{4\pi}$

이것을 다시 발전전류 I_o 의 관계식으로 나타내기 위하여 식(19)를 다시 전개하면 식(20) 및 식(21)이 된다.

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = Q I_o - I_L \quad (20)$$

$$I_o = \frac{C}{Q} \frac{dV_{dc}}{dt} + \frac{I_L}{Q} = \frac{C}{Q} \frac{dV_{dc}}{dt} + \frac{V_{dc}}{R_L Q} \quad (21)$$

$$= K_d \frac{dV_{dc}}{dt} + K_p \cdot V_{dc}$$

여기서 $I_L = \frac{V_{dc}}{R_L}$, R_L : 부하저항, K_d, K_p : 상수

이 되고, 이것을 다시 Laplace Formula으로 나타내면

$$I_o = K_d s \cdot V_{dc} + K_p \cdot V_{dc} = (K_d s + K_p) \cdot V_{dc} \quad (22)$$

이 된다. 여기서 전압 에러치를 다음과 같다고 하면,

$$V_{err} = V_{ref} - V_{dc} \quad (23)$$

가 되고, 따라서 전압 에러치에 대한 발전전류의 지령치와의 관계는 식(24)와 같다.

$$\Delta I_{o, ref} = (K_d s + K_p) \cdot V_{err} \quad (24)$$

따라서 PD 제어 방법이 적합하다. 그러나 PD는 응답속도는 빠르나 정상상태에서 오차를 감소시키지 못하는 단점을 가지고 있다. 따라서 적분기(I)를 사용하여 정상상태에서 시스템의 안정성을 유지할 수 있도록 한다.

4. 실험 장치의 구성

4.1 전체 시스템 구성도

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

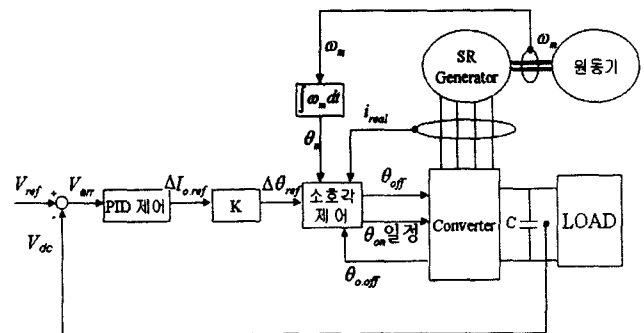


그림 5 제안된 DC-Link 전압 제어의 블록 다이어그램
Fig. 5 Proposed block diagram of the DC-link control voltage

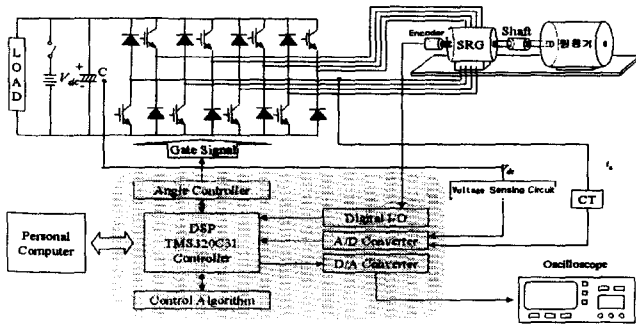


그림 6 전체 시스템 구성도

Fig. 6 The configuration of total system.

실험을 위한 전체 하드웨어는 그림 6과 같이 구성하였으며, 제한한 제어 알고리즘을 실시간으로 추정하기 위해서 고속·고정밀 연산이 가능한 32비트 DSP인 TMS320C31 프로세서를 사용하였다.

여기서, 전압 검출회로로 부터 검출된 DC-Link 전압은 16bit A/D 변환기를 통하여 DSP로 입력되고, DSP에 의해 소프트웨어로 파라미터의 값이 실시간으로 갱신되어 제어 알고리즘을 통해 IGBT 동작을 위한 Gate신호를 발생시키게 된다. 이때의 샘플링 주기는 100[μs]이다.

4.2 SRG 및 원동기 사양

SRG의 실험사양을 표 1에 나타내었다.

표 1 SRG 실험 사양

Table 1 Experimental specifications of the SRG.

인크리멘탈 엔코더	6000 p/r	부하 조건	저항 부하
DC-Link 콘덴서	4700μF	DC-Link 지령전압	DC 200V
인터럽트 주기	100μs	정격 속도	3000 rpm

표 2 SRG 사양

Table 2 Specifications of the SRG.

고정자 극수	8 극	정격 용량	1 Hp
고정자 극호	22.8 도	한상분 저항	1.5 Ω
고정자 극간 간격	22.2 도	정격 전류	5 A
회전자 극수	6 극	정격 전압	DC 240 V
회전자 극호	22.6 도	정격 회전수	4000 rpm
회전자 극간 간격	35.4 도	최대 전류	8 A

표 3 직류 전동기 사양

Table 3 Specifications of the DC Motor.

극 수	2 극	정격 전압	DC 100V
권 선	Shunt	정격 전류	7.5 A
정격 용량	1 Hp	정격 속도	3000 rpm

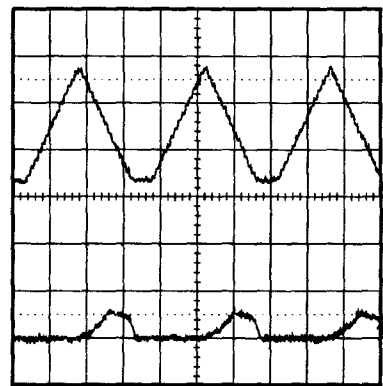
본 실험에서 사용한 SR-Machine의 사양을 표 2에서 나타

내었다. SRG는 원동기를 이용하여 회전시켜야만 발전이 가능하게 된다. 따라서 본 실험에서 사용한 원동기의 사양을 표3에 나타낸다.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 전류제어기

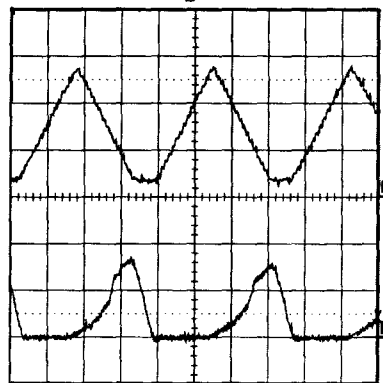
그림 7과 그림 8는 On각을 일정하게 두고 DC-Link 전압을 200V로 인가 하였을때 도통각에 따라 변화되어지는 기준 인덕턴스 프로파일과 상전류를 보여주고 있다. 그림 7과 8의 인덕턴스 프로파일에서 얼라인(aligned)되었을 때의 인덕턴스에서 언얼라인(unaligned)되었을 때의 인덕턴스를 토대로 프로그램으로 코딩하여 D/A컨버터를 이용하여 출력을 나타낸다. 인덕턴스 프로파일을 토대로 어느 위치에서 도통되어 각각의 도통각의 변화에 따라 달라지는 전류의 파형을 알 수 있도록 했다.



상 : 25[mH/div.], 하 : 1 [A/div.], 시간 : 1[ms/div.]

그림 7 도통각 15도일 때의 인덕턴스 프로파일(상) 및 상전류(하)

Fig. 7 The inductance profile(upper) and phase current (lower) when dwell angle is 15° .



상 : 25[mH/div.], 하 : 1 [A/div.], 시간 : 1[ms/div.]

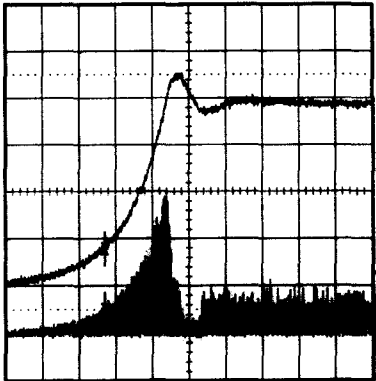
그림 8 도통각 20도일 때의 인덕턴스 프로파일(상) 및 상전류(하)

Fig. 8 The inductance profile(upper) and phase current (lower) when dwell angle is 20° .

전류의 실험 파형들을 보면 그림 3에서 보는 바와 같이 여자구간이 클수록 발전전류도 함께 커지는 것을 볼 수 있다. 각각의 도통구간은 15도와 20도를 나타내었다.

5.2 과도상태에서의 DC-Link 전압

SRG를 타여자로 구동하기 위해 초기에 2V DC-Link에 인가하고 PID 제어기를 통해 지령치 전압까지 초기전압을 유지시키는 방법을 택하였다.



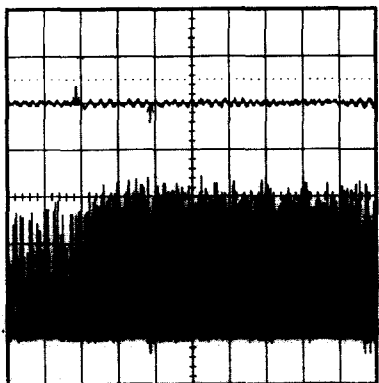
상 : DC link 전압(상) : 50[V/div.], 상전류(하) : 2[A/div.], 시간 : 0.5[sec/div.]

그림 9 지령전압 200V일 때의 과도 DC-link 전압과 상전류
Fig. 9 The transient DC-link voltage and phase current when reference voltage is 200V.

그림 9는 지령전압을 200V로 하였을 때의 초기에 확립되는 DC-Link 전압(위)과 상전류(아래) 파형을 보여주고 있다. 그림 9에서와 같이 지령치 전압에 따라 전압 유지되고 있는 것을 볼 수 있다.

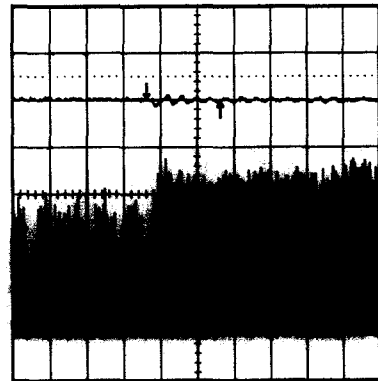
5.3 PI제어기 및 PID 제어기의 비교 검토

PID제어기가 본 시스템에 적합함을 보이기 위해 PI제어기와 PID제어기를 사용하여 부하 가변에 대한 실험을 통하여 비교 하였다. 그림 10와 그림 11은 부하를 142[W]에서 400[W]로 변화시킬 때의 DC-Link 전압과 상전류 파형을 각각 나타내었다.



상 : 50[V/div.], 하 : 2[A/div.], 0.5[sec/div.]

그림 10 PI 제어기 사용시 DC-Link전압 및 전류파형
Fig. 10 The DC-link voltage and current of the PI controller.



상 : 50[V/div.], 하 : 2[A/div.], 0.5[sec/div.]

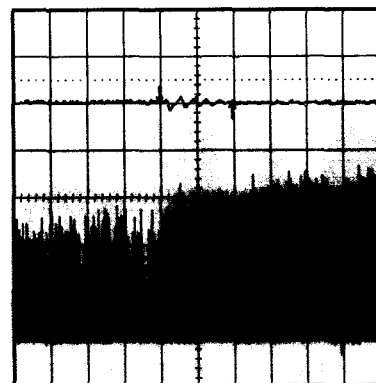
그림 11 PID 제어기 사용시 DC-Link전압 및 전류파형
Fig. 11 The DC-Link voltage and current of PID controller.

그림 10와 그림 11의 실험파형에서 보는 바와 같이 PI제어기는 보편적으로 많이 사용되어 왔으나, 여기서의 제어기로는 맥동의 발생과 응답속도의 저하로 적합하지 않다. 이에 반해 PID제어기는 맥동의 발생이 적었다.

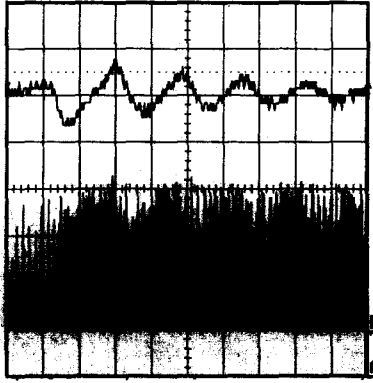
따라서 피이드백 방법을 사용하여 실제 전압을 측정하고 그것을 지령전압과 비교하여 전압의 오차를 PID제어 방법을 사용하여 오차만큼을 보상시켜주기 위한 새로운 지령전류 $\Delta I_{o,ref}$ 을 구하고, 식 (18)을 이용하여 소호각을 결정한다. 이렇게 결정된 소호각과 일정하게 유지된 점호각(θ_{on})을 통한 각제어로 SRG의 출력전압을 제어한다.

5.4 부하 변동시의 DC-Link 전압 및 상 전류 파형

그림 12와 그림 13은 출력을 148[W]에서 450[W]로 변동시켰을 때의 DC-Link 전압과 상전류 파형을 보여준다. 부하를 변동시켰을 경우 부하에 따라 빠르게 동작하여 DC-Link 전압의 변동은 큰 폭으로 변화하지 않고 지령전압에 잘 따르고 있음을 볼 수 있다.



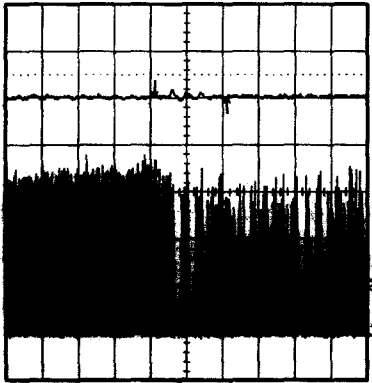
(a) DC-link 전압(상): 50[V/div.], 상전류(하): 2[A/div.], 시간 : 0.5[sec/div.]



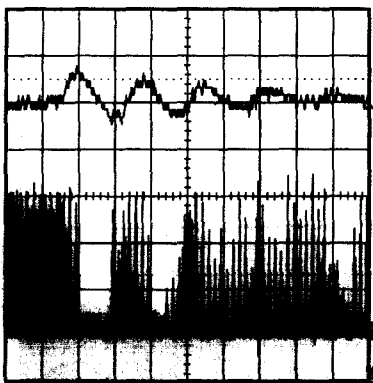
(b) DC-link 전압(상): 10[V/div.], 상전류(하): 2[A/div.], 시간 : 0.1[sec/div.]

그림 12 부하증가시의 DC-Link 전압과 전류 파형 (148[W]→450[W])

Fig. 12 The DC-link voltage and phase current when the load increases from 148W to 450W.



(a) DC-link 전압(상) : 50[V/div.], 상전류(하) : 2[A/div.], 시간 : 0.5[sec/div.]



(b) DC-link 전압(상) : 10[V/div.], 상전류(하) : 2[A/div.], 시간 : 0.1[sec/div.]

그림 13 부하감소시의 DC-Link 전압과 전류 파형(450[W]→148[W])

Fig. 13 The DC-link voltage and phase current when the load decreases from 450W to 148W.

실험은 지령전압을 200V, 부하는 저항부하만을 사용하였으며, 파형은 DC-Link 전압과 상전류 파형을 보여주고 있다. 각각의 파형들은 전압간격을 50[V/div.], 전류간격을 2[A/div.], 그리고 시간을 0.5[sec/div.]으로 나타내었고, 그림 12와 13의(b) 그림은 (a)의 그림에서 위·아래 화살표로 표시된 부분을 확대하여 전압간격을 10[V/div.], 전류간격을 2[A/div.], 시간을 0.1[sec/div.]으로 확대하여 나타내었다.

그림 12에서 보면 부하를 변동시킨 후 1초이내에 맥동의 변화가 없어지고, 부하변동시의 맥동율은 5[%]이내에 이루어졌다. 최대 맥동전압은 ±8[V]정도이다. 또한 저출력이나 대출력일 때의 정상상태에서도 1[%]~2[%]이내의 맥동율만이 발생하는 거의 일정한 DC-Link 전압 파형을 볼 수 있다. 따라서 제안한 제어방법의 적합성을 보여주고 있다

그림 13은 부하감소시의 파형을 나타내었다. 그림 13의 (a)와 (b)는 출력을 450[W]에서 148[W]로 변동시켰을 때의 파형을 보여준다.

그림 13에서도 그림 12의 경우와 마찬가지로 부하변동시에 1초이내에 리플의 변화가 없이 감소되어지며, 부하시의 맥동율도 5[%]이내에 이루어 졌으며 최대 맥동전압은 ±8[V]정도이다.

또한 정상시의 파형도 부하증가시의 파형과 마찬가지로 1[%]~2[%]이내의 맥동율만이 발생하는 거의 일정한 DC-Link 전압 파형을 볼 수 있다. 실험을 통하여 제안한 제어방법의 적합함을 확인 할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 제안된 제어방법인 소호각 제어의 당위성을 시뮬레이션과 수학적으로 증명하였고, 실험을 통하여 확인하였다.

SRG의 자체가 비선형적인 특성이 강하지만, 이것을 시뮬레이션과 수식전개를 통해 발전전류와 소호각과의 선형성을 입증하여 보다 간단한 제어방법을 제안하였다.

이 제안된 방법은 복잡한 기계적인 특성을 파악하지 않아도 되며, 또한 Look-up Table과 같은 다른 소프트웨어나 하드웨어 장치를 사용하지 않고 쉽게 제어됨을 알 수 있었다. 또한 기계적인 파라미터를 측정하지 않아도 되기 때문에 다른 모든 SRG 에 적용하기가 쉬운 특징을 가지고 있다.

PID 제어기의 적합성을 수식전개를 통해 당위성을 입증하였으며, PI 제어기와의 비교 실험을 통하여 빠른 응답특성과 리플을 감소 등의 타당성을 확인하였다.

따라서 제안한 제어 방법에 의한 소프트웨어가 간결하게 설계되어지므로 연산시간을 감소시킬 수 있고, 안정성이 증대되어진다. 또한 주변 하드웨어가 간결하므로 비용을 절감시킬 수 있으며, 부하변동에 빠른 수렴특성과 정상상태에서 양호한 응답특성을 가지므로 보다 견실한 시스템을 확립 할 수 있었다.

감사의 글

이 논문의 연구는 에너지기술학술진흥사업의 지원에 의해서 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] A.V. Radun, "Generating with the switched reluctance motor", Proceedings of APEC , pp.41-47, 1994.
- [2] Arthur Radun, James Rulison, and Peter Sanza, "Switched reluctance starter/generator" SAE Paper 921974, Aerotech '92, Anaheim, CA, pp.1771-1782, 1992,
- [3] P.C. Kjaer, C. Cossar, J.J. Gribble, Y.Li, and T.J.E. Miller, "Switched reluctance generator control using an inverse machine model", ICEM, pp. 380-385, 1994.
- [4] Caio A. Ferreira, Stephen R. Jones, William S. Heglund and William D. Jones "Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application" IEEE Transaction on Industry Applications. Vol.31, No.3, May/Jun pp. 553-561, 1995.
- [5] 양이우, 김진수, 김영석 "MRAS 관측기를 이용한 SRM의 속도 및 위치 센서없는 제어", 대한전기학회 논문지, 제 48B권 제 11호, pp.632-639, 1999.
- [6] 공 관식의 1명, "SRM의 고효율 구동을 위한 가변 스위칭각도 조정방식에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 제 44권 제1호. pp.25-33. 1995.
- [7] 양이우, 김진수, 김영석 "적용 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 SRM의 속도 및 위치센스 없는 제어". 대한전기학회논문지, 제 49 권 제 11 호 pp.763-770, 2000.

저 자 소 개



김 영 조 (金永祚)
 1950년 1월 8일 생. 1972년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 단국대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 현재 인하공과대학 전기공학과 박사과정 수료. 유한대학 제어계측과 부교수.

Tel : 011-381-0831, Fax : 02-682-6080
 E-mail : yjkim@yuhan.ac.kr



김 영 석 (金榮石)
 1951년 6월 11일 생. 1977년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987~1989년 한국전기연구소 선임연구원 실장. 현재 인하대공대 전기공학과 교수.

Tel : 032-860-7397, Fax : 032-863-5822
 E-mail : youngsk@inha.ac.kr



전 형 우 (全炯禹)
 1973년 9월 29일 생. 1999년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 현재 삼성전자 연구원.

Tel : 019-338-1665, Fax : 82-31-200-5679
 E-mail : hwjeon73@samsung.co.kr