

에너지 저장장치를 포함하는 신재생에너지원용 부스트 컨버터의 인덕터 기생저항에 따른 제어기 설계 영향 분석

朴宜宰*, 朴鍾厚[†], 田喜鍾**

Influence of the Parasitic Inductor Resistance on Controller Design of Boost Converter for Renewable Energy System including an Energy Storage

Sun-Jae Park, Jung-Hu Park, and Hee-Jong Jeon

요 약

현재 스마트 그리드 산업으로 인하여 신재생에너지의 활용이 중시되고 있다. 이러한 시점에서 신재생에너지원을 더욱 효율적이고 안정적으로 사용하기 위해서 에너지 저장장치의 필요성이 부각되고 있다. 이러한 경우 신재생 에너지를 계통에 사용할 수 있도록 만들어 주는 부스트 컨버터와 에너지 저장장치의 에너지 전달을 위한 충·방전기를 사용하게 된다. 이 두 가지 전력변환장치의 사용을 위해, 상호 간섭에 의해 각각의 제어기 설계에 어떠한 영향을 미치는지 알아야 한다. 우선 각각의 제어기 설계를 위해 시뮬레이션을 통한 간접적인 결과를 얻어내야 하는데, 이 때 인덕터를 이상적으로 생각하고 시뮬레이션을 할 수도 있고, 실제 하드웨어와 같이 인덕터에 기생하는 저항을 포함하여 시뮬레이션 할 수도 있다. 본 논문에서는 부스트 컨버터의 인덕터 기생저항이 부스트 컨버터와 충·방전기의 제어기 설계시 어떠한 영향을 미치는 지에 대해 비교해 봄으로써 시뮬레이션시 인덕터 기생 저항 성분을 반드시 고려하여 설계해야 한다는 것을 주파수 영역에서의 MATLAB 시뮬레이션과 시간영역에서의 PSIM 시뮬레이션을 통해 살펴보았다.

ABSTRACT

Nowadays, industry of smart grid is important for practical use of the renewable energy. In this situation, it is important to use the energy storage to make more stable and efficient renewable energy sources. The power conditioning systems consist in a boost converter which makes renewable energy source connected with the grid-connected inverter and the charger/discharger which takes the energy transfer between the boost converter and an energy storage. The effects on the controller design of each converter must be investigated to avoid the instability of the entire system. small-signal modelling of the boost converter and charger/discharger have been done and a controller design example is also presented. In this paper, effects on the controller design of the boost converter and the charger/discharger are investigated according to the existence of the parasitic resistance of the boost converter. In conclusion, the parasitic resistance of the inductor should be considered from the aspect of both the frequency domain analysis and time domain simulation using both MATLAB and PSIM.

Key Words : Renewable Energy, Energy Storage, Parasitic Resistance, Boost Converter

1. 서 론

현재 스마트 그리드의 관심이 증가됨에 따라 신재생에너지산업의 개발이 활성화되고 있다. 이러한 시점에서 신재생에너지원을 사용하기 위한 전력변환장치

[†]교신저자 : 정회원, 숭실대 전기공학부 조교수

E-mail : wait4u@ssu.ac.kr

*학생회원, 숭실대 전기공학부 석사

**정회원, 숭실대 전기공학부 교수

접수일자 : 2011. 8. 12

2차 심사 : 2011. 9. 14

1차 심사 : 2011. 9. 9

심사완료 : 2011. 9. 21

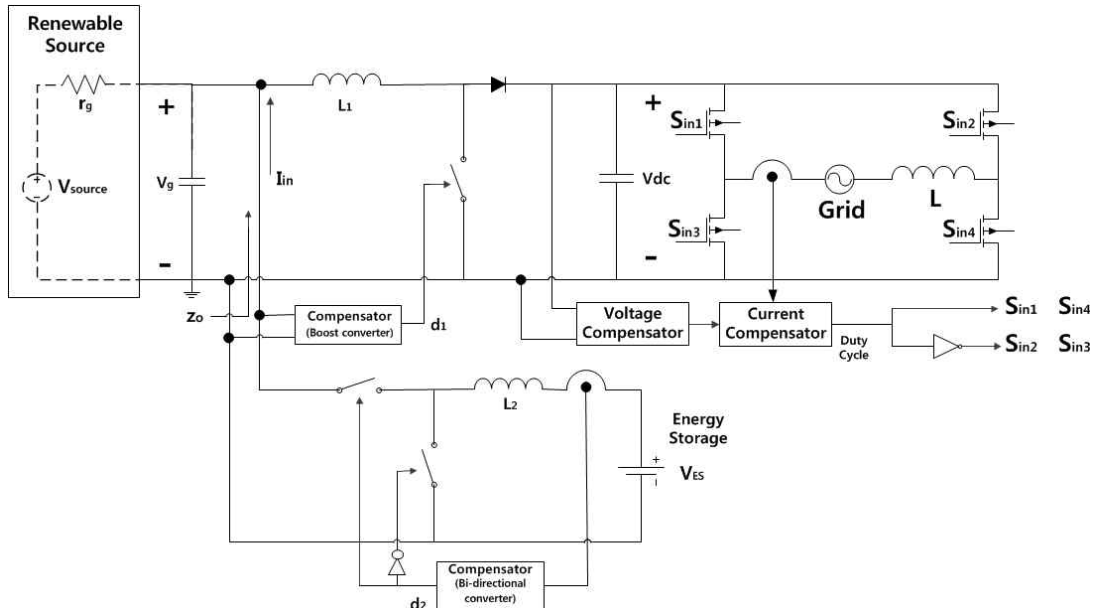


그림 1 신재생 에너지를 포함하는 부스트 컨버터와 충·방전기의 회로도
 Fig. 1 Circuit diagram of Boost Converter and Charger/Discharger including Renewable Energy Source

즉, PCS (Power Conditioning System)의 개발이 적극적으로 진행되고 있다. 대표적인 신재생 에너지원으로 태양광발전, 풍력발전, 그리고 연료전지 등이 있고, 이러한 신재생 에너지원들의 공통된 첫 번째 특징으로는 저전압발전을 한다는 것이다. 그림 1과 같이 신재생 에너지를 계통으로 연결하여 실생활에 사용할 수 있도록 만들기 위해서 저전압으로 발전된 전력을 부스트 컨버터를 이용하여 인버터가 동작할 수 있는 범위까지 승압을 시켜야한다.^[1] 부스트 컨버터의 출력전압인 DC-Link 전압은 계통에 AC전력을 공급할 수 있도록 만들어주는 인버터를 동작시킬 수 있는 최소한의 전압인 320[V]이상이 필요하다.

두 번째 특징으로는 신재생 에너지원의 출력 전력은 자연 조건 및 외부 요인에 의해 상당한 영향을 받기 때문에 신재생 에너지원의 안정적인 출력을 위해 부스트 컨버터를 이용한 신재생 에너지원의 동작점 제어를 해야 한다.^[2-3]

일반적으로 위의 두 가지 특징을 가진 신재생 에너지원 시스템의 출력은 부스트 컨버터에 의해 제어가 되고, 인버터에 의해 DC-Link 전압을 제어하게 된다.

또한 스마트그리드 산업에서는 신재생 에너지원간의 효율적인 전력사용 및 전력 거래를 위한 에너지 저장장치의 필요성이 강조되고 있다. 따라서 에너지 저장장치의 사용을 위한 충·방전기의 사용이 중요시된

다. 충·방전기는 보통 내부의 인덕터 전류제어를 사용하게 된다.

충·방전기는 신재생 에너지원과 부스트 컨버터에 병렬로 연결되기 때문에, 부스트 컨버터와 충·방전기간에 서로 동특성 및 안정도에 영향을 주게 된다. 따라서 부스트 컨버터와 충·방전기의 제어기 설계시 서로의 영향을 고려하여야 한다.

본 논문은 계통연계시 신재생 에너지를 효과적으로 사용하기 위해 그림 1과 같이 부스트 컨버터와 충·방전기를 병렬 연결시 부스트 컨버터 인덕터 기생저항의 유무에 따른 제어기 설계결과를 비교하였다.

2.1절에서는 계통연계시 회로구성에 대해 설명하고, 2.2절에서는 소신호 모델링을 통해 부스트 컨버터의 제어기 설계를 수행하였다. 또한 2.3절에서는 부스트 컨버터가 충·방전기의 제어기 설계에 미치는 영향을 알기 위해서 출력 임피던스를 계산하고, 2.4절에서는 부스트 컨버터의 주파수 응답특성을 고려하여 충·방전기를 설계한다. 3장에서는 부스트 컨버터 인덕터 기생저항이 고려되지 않은 경우와 고려된 경우, 각각의 상황에 따라 MATLAB 시뮬레이션을 통해 2장에서 설계된 제어기 주파수 응답 특성을 확인하였고, PSIM 시뮬레이션을 통해 시간영역에서의 동작을 확인함으로써 부스트 컨버터 인덕터 기생저항 성분을 반드시 고려하여 설계해야 한다는 점을 살펴보았다.

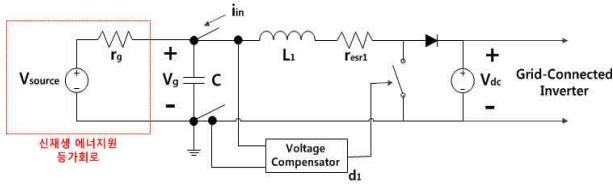


그림 2 신재생 에너지를 포함하는 부스트 컨버터의 등가회로

Fig. 2 Equivalent Circuit of Boost Converter with Renewable Energy Source

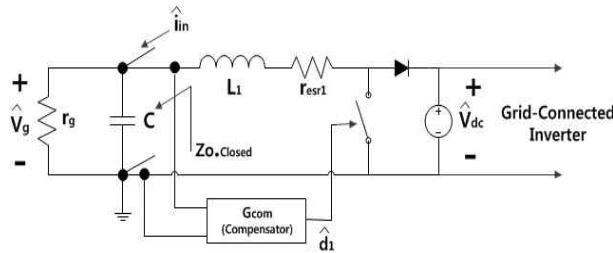


그림 3 신재생 에너지를 포함하는 부스트 컨버터의 소신호 등가모델

Fig. 3 Small-Signal Model of Boost Converter with a Renewable Energy Source

2. 본 론

2.1 계통연계시 회로의 구성

그림 1은 계통연계시 신재생 에너지원, 부스트 컨버터, 그리고 인버터에 의해 구성된 신재생 에너지원용 전력변환 시스템의 구조이다.^[4] 우선 신재생 에너지원에서의 전압은 자연조건 및 그 밖의 외부 조건에 의해 실시간으로 전력량이 변화한다. 따라서 신재생 에너지원에서 출력되는 전력량을 부스트 컨버터가 신재생 에너지원의 전압을 제어하여 최대 출력점 (MPP : Maximum Power Point)에서 동작할 수 있도록 한다.^[5-6]

또한 계통연계시 DC전압으로 출력된 신재생 에너지원 전력을 계통에 공급하기 위해서는 인버터를 이용한 AC전류·전압으로의 전력변환이 필요하게 된다. 계통연계시 AC전압은 상용전원에 의해 일정하게 유지되기 때문에 인버터의 스위칭 제어를 통해 인버터가 동작할 수 있도록 DC-Link 전압을 제어하게 된다. 이러한 경우 DC-Link 전압은 인버터의 적절한 입력동작 전압인 320[V] ~ 400[V]가 필요하게 된다.

2.2 부스트 컨버터 제어기 설계

그림 2는 신재생에너지원 및 부스트 컨버터를 등가

적으로 나타낸 회로이다. 신재생 에너지원에서 발생하는 전력은 저항과 전압원으로서 등가 모델링하여 나타내었다.^[7-8] DC-Link 전압인 V_{dc} 는 인버터에 의해 일정하게 유지되고 있다는 것을 가정하여, 전압원으로서 나타낼 수 있다.

신재생 에너지원에서 출력된 전력은 최대전력 추종 제어를 위하여 부스트 컨버터의 전압제어를 통한 전압 및 전류제어를 하여야 전력계통에 효율적으로 공급 된다. 여기에 충·방전기 및 에너지 저장장치가 연결되는데, 충·방전기에 closed loop 상태에서의 부스트 컨버터에 의한 영향을 적용해야 하기 때문에 부스트 컨버터의 제어기 설계를 한다. 또한 제어기 설계를 위해서 control-to-output 소신호 전달함수를 유도한다. 그림 3과 같은 부스트 컨버터에서의 control-to-output은 스위칭의 도통률 제어를 통해 신재생 에너지원의 전압을 제어하게 되기 때문에 control 변수는 도통률을 의미하고, output 변수는 신재생 에너지원의 전압을 의미하게 된다. 이러한 control-to-output 전달함수를 계산하기 위해서 소신호 모델링을 사용한다.^[9-10] 그림 3은 소신호 모델링을 하기위한 부스트 컨버터의 등가 회로도이다. On, off 스위칭 시간에 따른 전압 및 전류의 해석을 통해 신재생 에너지를 포함한 부스트 컨버터의 control-to-output 전달함수를 유도하면 식 (1)과 같이 구할 수 있다.^[11-12]

$$\frac{\hat{v}_g}{\hat{d}_1} = - \frac{V_{dc}}{L_1 C s^2 + \left(\frac{L_1}{r_g} + r_{esr1} C \right) s + \left(1 + \frac{r_{esr1}}{r_g} \right)} \quad (1)$$

식 (1)은 부스트 컨버터에 인덕터 기생저항인 r_{esr1} 을 포함한 식이고, 실제 소자의 값을 측정하여 넣으면 제어기 설계시 더욱 최적화된 설계를 할 수 있다. 반대로, r_{esr1} 에 0을 넣으면 r_{esr1} 을 무시하고 유도할 수 있는 전달함수를 구할 수 있다.

또한 안정한 피드백 제어 설계를 위하여 일반적으로 식 (2)와 같은 PI 제어기를 사용하였다.

$$G_{com} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

(K_p = 비례 이득, K_i = 적분 이득)

2.3 부스트 컨버터의 출력 임피던스

신재생 에너지를 사용하는 시스템에서 에너지를 더욱 효과적으로 사용하기 위해서, 그림 1과 같이 에

너지 저장장치를 연결하여 시스템을 구성하였다. 에너지 저장장치를 사용하기 위해 충·방전기가 필요하고, 신재생 에너지원의 출력에 충·방전기를 병렬로 연결함으로써 전체 시스템이 구성된다. 이 경우 부스트 컨버터와 충·방전기는 동특성 및 안정도에 서로 영향을 주게 된다. 따라서 부스트 컨버터와 충·방전기 제어기 설계시, 서로의 영향을 고려해야 한다.

부스트 컨버터의 기생저항이 충·방전기에 어떠한 영향을 미치는지 알기 위해서는 부스트 컨버터가 충·방전기의 전기적 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서 우선적으로 해석해야 한다. 또한 충·방전기의 제어기 설계시 부스트 컨버터의 영향을 알기 위해서는 부스트 컨버터의 출력 임피던스 유도가 필수적이다. 출력 임피던스 Z_o 는 그림 1에서와 같이, v_g/i_{in} 임을 알 수 있다. 따라서 그림 4와 같이 등가적으로 나타낼 수 있다. 이때, 충·방전기는 에너지 저장장치의 충·방전을 위하여 인덕터 전류의 제어를 통하여 동작하게 된다.

그림 3과 같이 소신호 모델링을 통하여 살펴보면, 부스트 컨버터의 출력 임피던스에 대한 전달함수는 \hat{i}_{in} 이 변동할 경우 \hat{v}_g 의 값이 어떻게 변하는지를 해석하면 된다. 따라서 식 (3)에서와 같이 open loop 상태에서의 부스트 컨버터의 출력 임피던스($Z_{o.open}$)를 구할 수 있다.^[13]

$$Z_{o.open} = \frac{\hat{v}_g}{\hat{i}_{in}} = \frac{\frac{1}{C}s + \frac{r_{esr}}{LC}}{s^2 + \left(\frac{1}{r_g C} + \frac{r_{esr}}{L}\right)s + \left(\frac{1}{LC} + \frac{r_{esr}}{r_g LC}\right)} \quad (3)$$

충·방전기는 부스트 컨버터의 closed loop 상태에서의 영향을 받기 때문에 closed loop 출력 임피던스의 전달함수가 필요하다. 식 (4)를 통해 closed loop 상태에서의 출력 임피던스 유도를 할 수 있다.

$$Z_{o.closed} = \frac{Z_{o.open}}{1 + T_1} \quad (4)$$

(단, $T_1 = G_{d_1 v_g} G_{com.Boost} V_M G_{sen}$)

여기에서의 T_1 은 부스트 컨버터의 loop gain으로써 부스트 컨버터의 control-to-output, PI제어기, PWM 이득 센싱 이득의 곱으로서 이루어져 있다. ($G_{d_1 v_g}$: 부스트 컨버터의 control-to-output 전달함수, $G_{com.Boost}$: 부스트 컨버터 제어기, V_M : PWM 이득, G_{sen} : 센싱 이득)

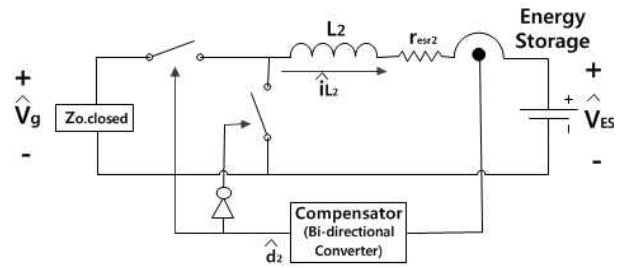


그림 4 부스트 컨버터의 영향을 고려한 충·방전기의 소신호 모델링

Fig. 4 Small-Signal Modeling of Charger/Discharger including Effect of the Boost Converter

2.4 부스트 컨버터를 고려한 충·방전기 제어 설계

그림 4는 그림 1에서의 전체 전력변환기에서 신재생 에너지원과 부스트 컨버터를 출력 임피던스로서 고려한 충·방전기의 소신호 모델링 회로도이다. 부스트 컨버터와 마찬가지로 충·방전기의 제어기 설계를 위해서는 control-to-output 전달함수를 유도해야 한다.^[14-15]

그림 4와 같이 부스트 컨버터의 영향을 배제할 수 없기 때문에 부스트 컨버터 출력 임피던스를 넣어서 control-to-output 전달함수를 유도하면 된다. 식 (5)를 통해 신재생 에너지원과 부스트 컨버터가 포함된 충·방전기의 control-to-output 전달함수를 계산하였다.

$$\frac{\hat{i}_{L_2}}{\hat{d}_2} = \frac{V_g - D_2 I_{L_2} Z_{o.dosed}}{L_2 s + r_{esr2} + D_2 Z_{o.dosed}} \quad (5)$$

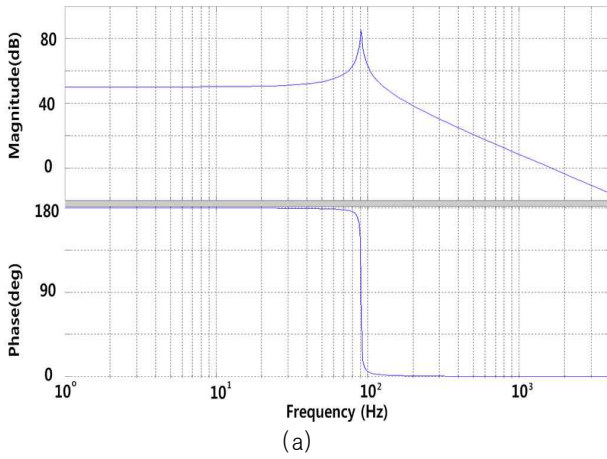
식 (5)는 충·방전기의 기생저항인 r_{esr2} 를 포함한 식이며, 복잡하지만 제어기 설계 시, 더욱 실제와 근접하는 설계를 할 수 있다. 또한 충·방전기의 control-to-output 전달함수로 충·방전기의 루프를 닫기 위해서 부스트 컨버터와 같이 PI 제어기(식 (2))를 이용하였다.

3. 분석 및 설계

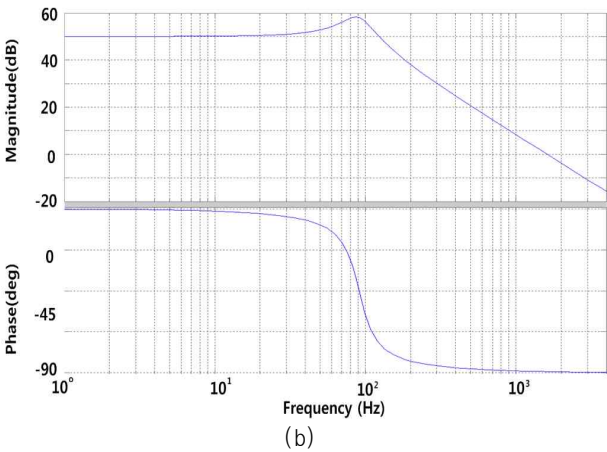
3.1 주파수 응답특성

시뮬레이션은 소신호 모델링을 통해 계산된 식을 사용하여 MATLAB 시뮬레이션을 통해 주파수 응답 특성으로 나타낸 보데선도로 안정도를 검증하였다.

표 1은 시뮬레이션을 하기 위한 신재생 에너지 등가저항, 부스트 컨버터와 충·방전기의 소자들, 스위칭



(a)



(b)

그림 5 부스트 컨버터의 control-to-output 주파수 응답 특성

- (a) 이상적인 부스트 컨버터의 인덕터
- (b) 부스트 컨버터의 기생저항을 포함한 인덕터

Fig. 5 Frequency Response for control-to-output of the boost converter

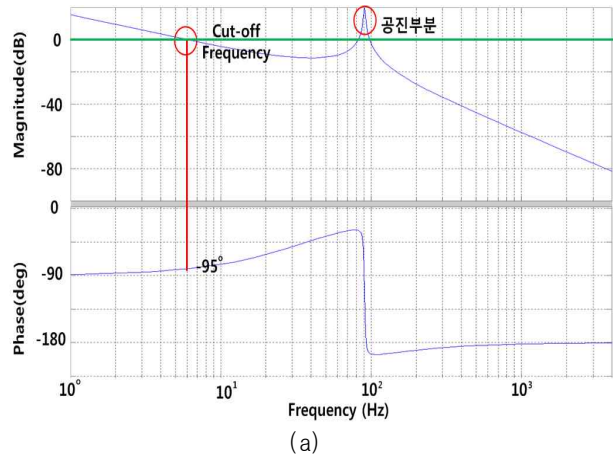
- (a) Ideal Inductor of the Boost Converter
- (b) Inductor including the ESR of the Boost Converter

에 대한 값들을 나타낸 것이다. 그림 5에서부터 그림 10까지는 본 논문에서 유도된 식으로 시뮬레이션 된 주파수 응답특성이다. 여기에서 (a)는 부스트 컨버터의 이상적인 인덕터, 즉, 인덕터의 기생저항인 r_{esr1} 이 0 $[\Omega]$ 일 경우에 대한 주파수 응답 특성이고, (b)는 부스트 컨버터의 인덕터에 기생저항인 r_{esr1} 을 포함했을 경우의 주파수 응답 특성이다. 여기서의 r_{esr1} 은 0.3 $[\Omega]$ 을 사용하였다.

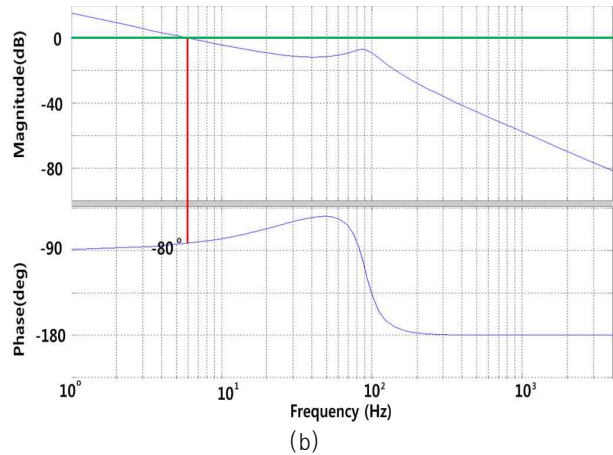
그림 5는 부스트 컨버터의 control-to-output에 대한 주파수 응답 특성이다. (a)와 (b)를 비교해 보면,

표 1 부스트 컨버터의 소자 값
Table 1 Element of Boost Converter

V_g	150 [V]	V_{dc}	320 [V]
V_{Source}	300 [V]	V_{ES}	100 [V]
C	2200 [μ F]	r_g	45 [Ω]
L_1	1.4 [mF]	L_2	1.4 [mF]
r_{esr1}	0.3 [Ω]	r_{esr2}	0.3 [Ω]
D_1	0.53125	D_2	0.363636
$f_{sw_{Boost}}$	20 [kHz]	$f_{sw_{Bi-directional}}$	20 [kHz]
I_{L_1}	3 [A]	I_{L_2}	1 [A]



(a)



(b)

그림 6 부스트 컨버터의 Loop Gain 주파수 응답 특성
(a) 이상적인 부스트 컨버터의 인덕터
(b) 부스트 컨버터의 기생저항을 포함한 인덕터

Fig. 6 Frequency Response for Loop Gain of the boost converter

- (a) Ideal Inductor of the Boost Converter
- (b) Inductor including the ESR of the Boost Converter

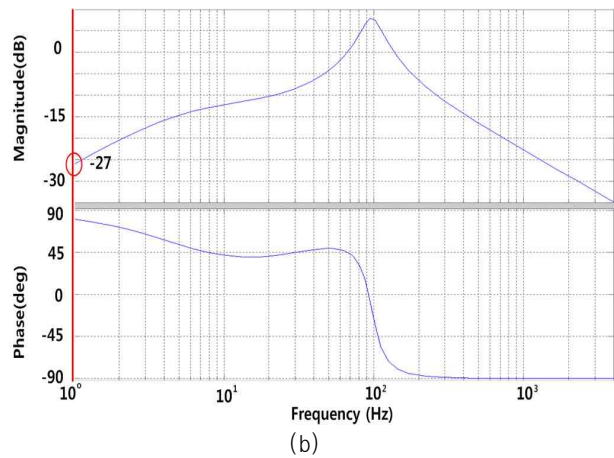
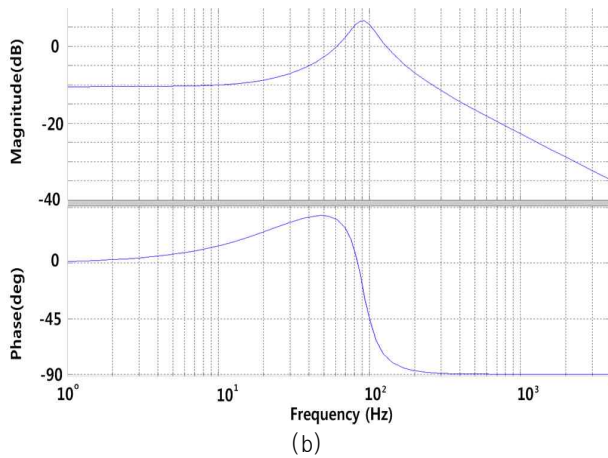
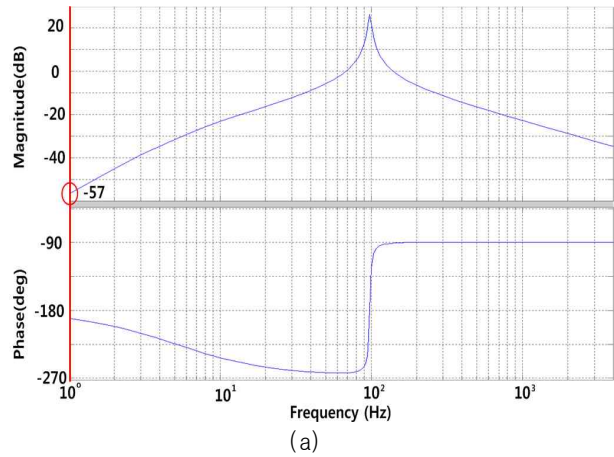
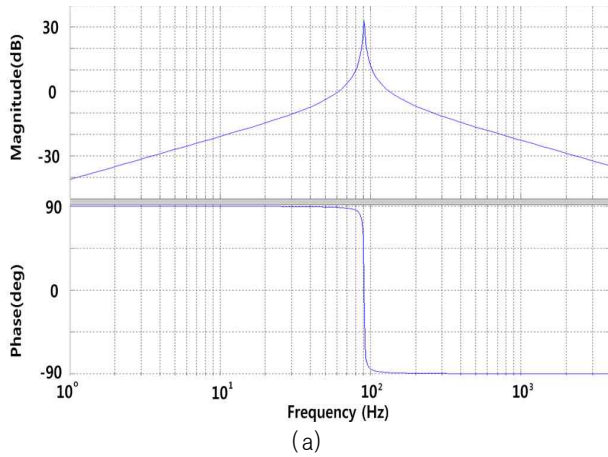


그림 7 부스트 컨버터의 오픈루프 출력 임피던스 주파수 응답 특성
(a) 이상적인 부스트 컨버터의 인덕터
(b) 부스트 컨버터의 기생저항을 포함한 인덕터

그림 8 부스트 컨버터의 폐루프 출력 임피던스 주파수 응답 특성
(a) 이상적인 부스트 컨버터의 인덕터
(b) 부스트 컨버터의 기생저항을 포함한 인덕터

Fig. 7 Frequency Response for Output Impedance of the boost converter in Open Loop
(a) Ideal Inductor of the Boost Converter
(b) Inductor including the ESR of the Boost Converter

Fig. 8 Frequency Response for Output Impedance of the boost converter in Closed Loop
(a) Ideal Inductor of the Boost Converter
(b) Inductor including the ESR of the Boost Converter

(a)의 경우에 (b)에 비해 감쇠비가 작다는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 6에 (a)와 (b)는 그림 5에서의 control-to-output에, 동일한 PI 제어를 이용하여 시뮬레이션을 한 결과이다. 그림 6에서의 (a)를 보면 감쇠비가 작기 때문에 보데선도의 크기 0[dB]에서 하나의 컷오프 주파수와 하나의 공진구간이 존재한다는 것을 볼 수 있다. 공진주파수를 보면 -180° 이하로서 위상마진이 0° 이하를 가지게 되고, 따라서 부스트 컨버터의 제어가 불안정하게 판정된다. 하지만 (b)의 경우

컷오프 주파수에서 90° 이상 위상마진을 가진다는 것을 알 수 있다.

따라서 부스트 컨버터의 제어기 설계시 인덕터의 기생저항을 고려하지 않으면 공진부의 이득이 0 [dB]를 넘으면서 위상이 급변동하기 때문에 높은 컷오프 주파수를 갖는 제어기 설계가 어려워지거나, 제어기의 컷오프 주파수를 공진부보다 훨씬 낮게 설계하여야 하기 때문에 하드웨어의 제어기 설계가 실제보다 훨씬 보수적으로 될 것임을 알 수 있다.

그림 7은 부스트 컨버터의 오픈 루프 출력 임피던

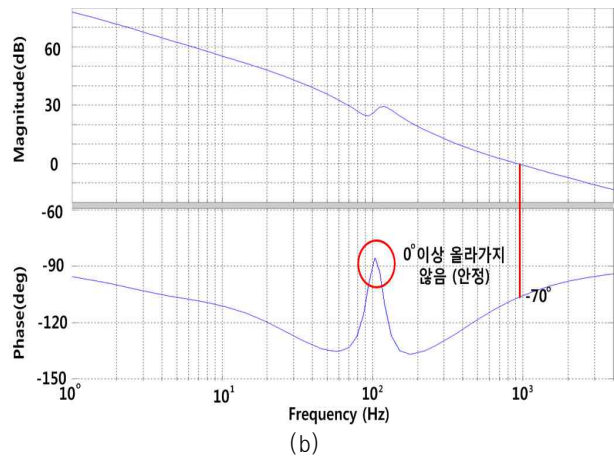
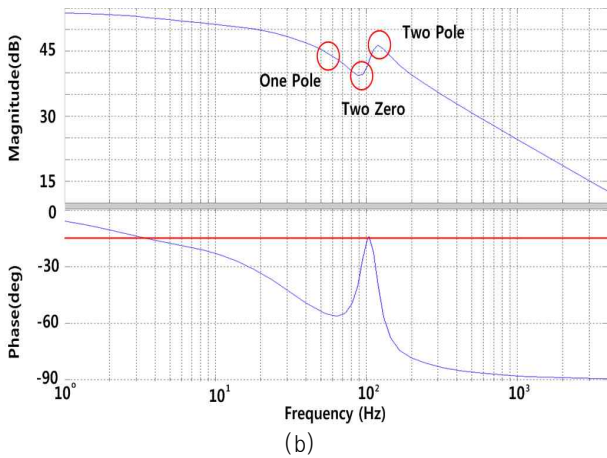
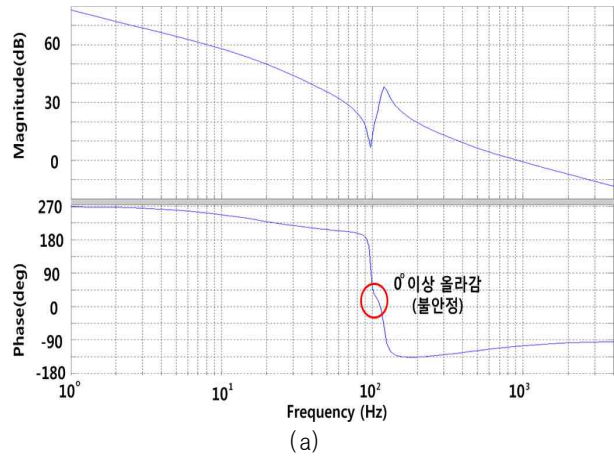
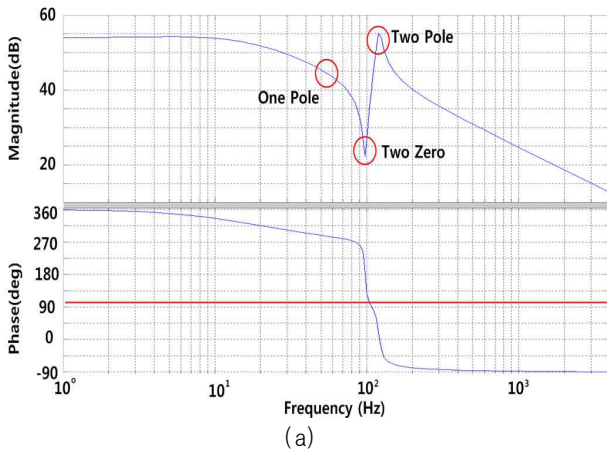


그림 9 부스트 컨버터의 영향을 포함한 충·방전기의 control-to-output 주파수 응답 특성
(a) 이상적인 부스트 컨버터의 인덕터
(b) 부스트 컨버터의 기생저항을 포함한 인덕터

그림 10 부스트 컨버터의 영향을 포함한 충방전기의 Loop Gain 주파수 응답 특성
(a) 이상적인 부스트 컨버터의 인덕터
(b) 부스트 컨버터의 기생저항을 포함한 인덕터

Fig. 9 Frequency Response for control-to-output of Charger/Discharger including the Boost Converter
(a) Ideal Inductor of the Boost Converter
(b) Inductor including the ESR of the Boost Converter

Fig. 10 Frequency Response for Loop Gain of the Charger/Discharger including the Boost Converter
(a) Ideal Inductor of the Boost Converter
(b) Inductor including the ESR of the Boost Converter

스를 시뮬레이션 한 결과이다. 그림 7에서 저주파부분을 비교해 보면 (a)의 경우 90°에서 시작하므로 영점이 존재하고 (b)의 경우 영점이 존재하지 않는 것을 알 수 있다.

충·방전기 제어기 영향을 알기 위해서 그림 8과 같이 부스트 컨버터에서 페루프 상태의 출력 임피던스를 알아야 한다. 제어기는 저주파 영역을 사용하기 때문에 충·방전기의 제어기 설계시 부스트 컨버터의 출력 임피던스에서 저주파 영향을 많이 받는다는 것을 알

수 있다. 저주파 영향을 살펴보면 (a)는 1[Hz]에서 출력 임피던스의 크기가 -60[dB]정도인 반면 (b)는 -25[dB]이고, 그림 4와 같이 병렬로 연결되는 등가 회로에서 충·방전기의 제어기 설계시 부스트 컨버터 인덕터 기생저항을 고려한 경우, 고려하지 않은 경우와 고려한 경우 저주파 영역에서 차이가 크다. 따라서 시뮬레이션 할 경우 r_{esr1} 를 고려해야 할 필요가 있다.

그림 9는 부스트 컨버터의 영향을 포함한 충·방전기의 control-to-output 전달함수를 시뮬레이션 한 결과

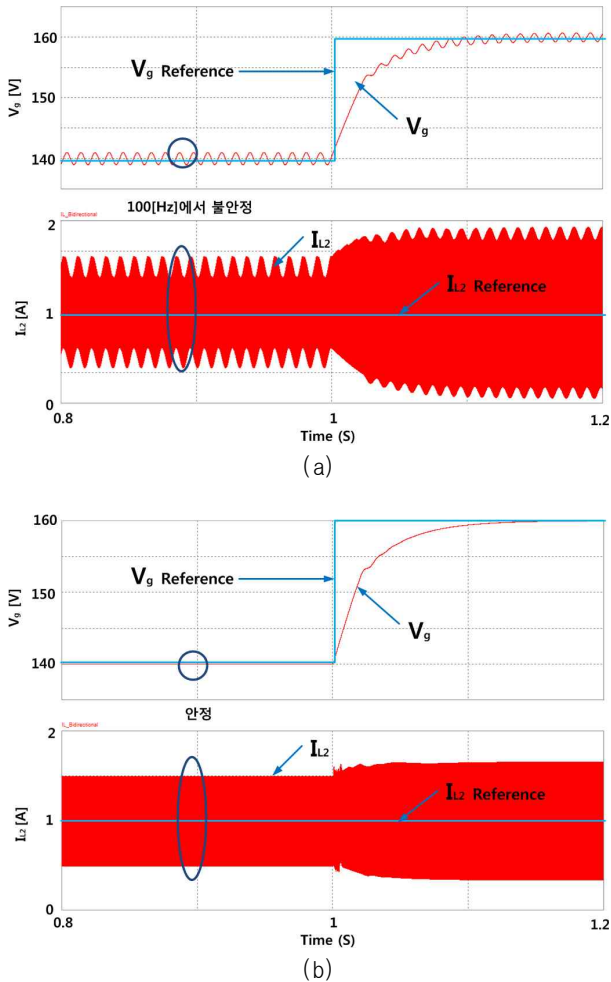


그림 11 신재생 에너지원 전압 및 충·방전기 인덕터 전류 파형
 (a) 이상적인 부스트 컨버터의 인덕터
 (b) 부스트 컨버터의 기생저항을 포함한 인덕터
 Fig. 11 Voltage of the Renewable Energy Source and Inductor Current of the Charger/Discharger
 (a) Ideal Inductor of the Boost Converter
 (b) Inductor including the ESR of the Boost Converter

이다. 그림 9에서의 (a)와 (b)를 비교해 보면, 두 그림 모두 약 100[Hz]에서 1 극점, 2 영점, 2 극점이 순차적으로 존재하고, 위상이 급격히 상승했다가 떨어지는 부분이 존재한다는 것을 볼 수 있다. (a)의 위상을 보면 최대 지점이 100°로서, (b) 위상의 약 -15°의 최대 지점을 갖는 것보다 상대적으로 훨씬 적은 감쇠비를 가짐을 알 수 있다.

그림 10에서 PI 제어기를 사용하여 폐루프 상태에서의 보데선도를 비교하면, 그림 10에서의 (a)의 경우

약 100[Hz]에서의 위상이 0°를 넘어가는 것과 같이 100[Hz]에서의 크기가 심하게 커지는 것을 볼 수 있다. 하지만 (b)의 경우 위상이 0°를 넘어가지 않고 모든 주파수 영역에서 안정적인 것을 알 수 있다. 컷오프 주파수에서의 위상마진이 약 70°로 안정적으로 제어기가 설계되었음을 알 수 있다.

3.2 시간영역 분석

그림 11 (a)와 (b)는 PSIM 시뮬레이션을 통해서, 시간영역에서 부스트 컨버터의 인덕터 기생저항이 존재하지 않을 경우와 기생저항이 존재할 경우, 부스트 컨버터에 의해서 제어되는 신재생 에너지원의 전압과 충·방전기에서 제어되는 충·방전기 인덕터의 전류를 시뮬레이션을 통해 나타내었다. 신재생 에너지원의 전압을 1초 이전에는 140[V]로 제어하였고, 1초가 된 순간 160[V]로 스텝-변화함으로써 신재생 에너지원의 전압이 안정적으로 추종하는 지 확인해 보았다.

그림 11(a)와 같이 부스트 컨버터 인덕터 기생저항을 고려하지 않았을 경우, 신재생 에너지원의 전압은 그림 6(a)의 주파수 응답특성을 통해 알 수 있듯이 약 100[Hz]에서 위상마진이 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다. 그림 11(a)에서의 시간영역에도 마찬가지로, 부스트 컨버터의 동작이 100[Hz]로 발진하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 10(a)의 충·방전기의 인덕터 전류는 주파수 응답특성 해석과 같이, 약 100[Hz]에서 주파수 특성이 커지는 것을 볼 수 있다. 따라서 그림 11(a) 시간영역에서도 마찬가지로, 충·방전기의 전류가 100[Hz]로 불안정하게 흔들리는 것을 확인할 수 있다.

하지만 그림 11(b)와 같이 부스트 컨버터 인덕터 기생저항을 고려하였을 경우, 신재생 에너지원의 전압 및 충·방전기의 전류의 주파수 응답특성을 나타낸 그림 6(b)와 그림 10(b)는 동일하게 시간영역에서 빠르고 안정적으로 추종 제어되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 실제 하드웨어에서 미세한 기생성분이 존재하더라도 이를 무시할 경우 제어기 설계의 결과가 크게 달라질 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문은, 에너지의 효율적인 사용을 위한 에너지 저장장치를 사용한 신재생 에너지용 전력변환시스템에서 부스트 컨버터의 인덕터 기생저항에 따른 제어기 설계 및 충·방전기 제어기 설계에 미치는 영향에 대해서 소신호 모델링 및 MATLAB 시뮬레이션을 통한

보데선도와 PSIM 시뮬레이션을 통한 시간영역에서의 분석을 통해 살펴보았다. 부스트 컨버터의 인덕터 기생저항을 무시하고 설계시, 부스트 컨버터의 제어기 설계가 낮은 감쇠비에 의해 어려워지고 결과적으로 충·방전기의 설계가 어려워진다. 하지만 부스트 컨버터 인덕터 저항을 넣어서 시뮬레이션하면 부스트 컨버터의 제어기 설계 및 충·방전기의 제어기 설계가 가능하다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 신재생 에너지를 사용하는 전력변환기와 충·방전기의 연결을 하는 시스템에서 부스트 컨버터와 충·방전기의 제어기 설계시 부스트 컨버터 기생저항을 고려해야 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (No. 2010-0025674).

참고 문헌

- [1] B. M Hasaneen, Adel A. Elbaset Mohammed, "Design and Simulation of DC/DC Boost Converter", *Proceeding of the IEEE*, pp. 335-340, 2008.
- [2] Alberto Reatti, Luca Pellegrini, and M.K. Kazimierczuk, "Impact of Boost Converter Parameters on Open-Loop Dynamic Performance for DCM", *Proceedings of the IEEE*, pp. 513-516, 2002.
- [3] Fermia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli, M., "A Technique for Improving P&O MPPT Performances of Double-Stage Grid-Connected Photovoltaic Systems", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, pp. 4473-4482, 2009, Nov.
- [4] Woo-Young Choi, Jae-Yeon Choi, "High-Efficiency Power Conditioning System for Grid-Connected Photovoltaic Modules", *Journal of Power Electronics*, Vol. 11 No. 4, pp. 390-619, 2011. 7.
- [5] Rae-Young Kim, "Improved Renewable Energy Power System using a Generalized Control Structure for Two-Stage Power Converters", *Virginia Polytechnic Institute and State University*, 2009.
- [6] 차한주, 최정완, 윤기갑, "연료전지용 3상 전류형 능동클램프 DC-DC 컨버터", *전력전자학회 논문지*, 제12권, 제6호, pp. 433-519, 2007. 12.
- [7] 김수석, 김희준, "MATLAB을 이용한 DC-DC 컨버터의 병렬운전 해석 연구", *대한전기학회 논문지*, 제47권 제9호, pp. 1432-1440, 1998. 9.
- [8] 김종원, 정두용, 장수진, 이병국, 원충현, "슈퍼커패시터를 이용한 직류철도 회생에너지 저장장치", *전력전자학회 논문지*, 제13권, 제4호, pp 247-256, 2008. 8.
- [9] M.G. Villalva ; T.G. de siqueira ; E. Ruppert ; "Voltage Regulation of Photovoltaic arrays : small-signal analysis and control design", *IET Power Electronics*, pp. 869-889, 2010, Jan.
- [10] Vorperian, V.; "Simplified analysis of PWM converters using model of PWM switch. Continuous conduction mode", *Aerospace and Electronic systems, IEEE Transaction on*, pp. 490-496, 1990, May.
- [11] Hasaneen, B.M.; Elbaset Mohammed, A.A.; "Design and simulation of DC/DC boost converter", *Power System Conference, 2008. MEPCON 2008. 12th International Middle East*, 335-340, 2008, 12-15 March.
- [12] Koutroulis, E.; Kalaitzakis, K.; Voulgaris, N.C.; "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system", *Power Electronics, IEEE Transaction on*, pp. 46-54 2001, Jan.
- [13] Kazimierczuk, M.K.; Sathappan, N.; Czarkowski, D.; "Voltage-mode-controlled PWM buck DC-DC converter with a proportional controller", *Aerospace and Electronics Conference*, 1993. NAECON 1993., Proceedings of the IEEE 1993 National, 1993, 24-26 May.
- [14] Bolduc, P.; Lehmicke, D.; Smith, J.; "Performance of a grid-connected PV system with energy storage", *Photovoltaic Specialist Conference*, 1993., Conference Record of the Twenty Third IEEE, 1159-1162, 1993, 10-14 May.
- [15] Jinhui Xue; Zhongdong Yin; Bingbing Wu; Ziping Wu; Jun Li; "Technology Research of Novel Energy Storage control for the PV Generation System", *Power and Energy Engineering Conference*, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific, 1-4, 2009, 27-31 March.

저 자 소 개



박선재(朴宣宰)

1983년 10월 13일생. 2009년 숭실대 공대 전기공학부 졸업. 2009년~2011년 동 대학원 전기공학부 석사 졸업



박종후(朴鍾厚)

1975년 8월 26일생. 1999년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박). 2004년~2005년 Virginia Tech(Visiting Scholar). 2006년~2007년 반도체공동연구소 선임연구원 및 연수연구원. 2007년~2009년 서울대 정보기술사업단 박사후 연구원. 2009년~현재 송실대 전기공학부 조교수.



전희종(田喜鍾)

1953년 1월 6일생. 1975년 송실대 공대 전기공학과 졸업. 1977년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1977년~1981년 공군사관학교 전자공학과 교수. 1983년~현재 송실대 전기공학과 교수. 1995년~1996년 Univ. of Victoria CA. 객원교수. 2000년~2001년 전력전자학회 부회장. 2003년~2005년 송실대 정보지원처장. 2008년~2010년 송실대 공과대학 학장.