

## 태양광용 부스트 컨버터의 2중 루프 제어 및 단일 루프 제어의 특성 비교

김동환\*, 임지훈\*, 송승호\*, 최주엽\*, 안진웅\*\*, 이상철\*\*, 이동하\*\*

\*광운대학교 전기공학과(juyeop@kw.ac.kr),  
\*\*대구경북과학기술원

### Comparative Study between Two and Single-loop Control of Boost Converter for PVPCS

Kim, Dong-Whan\* Im, Ji-Hoon, Song, Seung-Ho\* Choi, Ju-Yeop\*  
An, Jin-Ung, Lee, Sang-Chul\*\* Lee, Dong-Ha\*\*

\*Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University(donghwan06@gmail.com)  
\*\*Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology

#### Abstract

In photovoltaic system, the characteristic of photovoltaic module such as open circuit voltage and short circuit current will be changed because of cell temperature and solar radiation. Therefore, a boost converter of the PV system connects between the output of photovoltaic system and DC link capacitor of grid connected inverter as controlling duty ratio for maximum power point tracking(MPPT). This paper shows the dynamic characteristic of the boost converter by comparing single-loop control algorithm and two-loop control algorithm using both analog and digital control. The proposed both compensation method has been verified with computer simulation and simulation results obtained demonstrate the validity of the proposed control schemes.

Keywords : PVPCS용 부스트 컨버터(boost converter for PVPCS), 이중 제어 루프(two-loop control), 단일 제어 루프(single-loop control), 주파수 영역 설계(frequency domain design)

#### 기 호 설 명

$G_{dv}(s)$  : 전압제어전달함수  
 $G_{di}(s)$  : 전류제어전달함수  
 $T_i(s)$  : 전류제어루프  
 $T_v(s)$  : 전압제어루프  
~ : 소신호

#### 1. 서 론

최근 스마트 그리드의 관심이 증가됨에 따라 태양광발전은 계통과 직접적으로 연결되어 발전을 하는 계통연계형 발전방식의 개발이 적극적으로 진행되고 있다. 이를 위해서는 전력변환장치 즉, PCS (Power Conditioning

System)이 반드시 필요하다.

태양전지는 외부 환경의 변화에 따라 출력 변화가 심하고 저전압발전을 하기 때문에 PCS의 부스트 컨버터를 이용하여 계통연계 인버터가 동작할 수 있도록 전압을 상승시키는 한편 태양전지의 전압을 제어하여 태양전지가 최대 출력을 낼 수 있도록 하여야 한다.

본 논문에서는 태양광 PCS의 부스트 컨버터를 모델링하여 시간영역과 주파수영역에서 검토하고 태양광 어레이 전압만을 제어하는 단일 루프 방식과 태양광 어레이 전압과 인덕터 전류를 제어하는 2중 루프 방식의 제어기를 각각 설계하여 특성을 비교하였다. 기존의 태양광 PCS의 경우 전압만을 제어하여 컨버터의 내부 소자가 소손되는 경우가 많이 발생하였다. 하지만 2중 루프 제어를 통하여 내부 회로를 보호할 수 있는 안정된 제어기 설계가 가능할 것으로 보인다.

## 2. 태양광 PCS의 구성 및 운영

그림 1은 계통 연계 시 태양광 어레이, 부스트 컨버터, 그리고 인버터에 의해 구성된 태양광 PCS의 구조이다. 먼저 태양광 모듈은 태양의 일사량과 온도의 외부 환경 변화에 따라 전압과 전류가 달라지며 그에 따른 최대 전력 동작점 또한 달라진다. 따라서 부스트 컨버터는 태양광 어레이에서 출력되는 전압을 제어하여 최대 전력 동작점(MPP : Maximum Power Point)에서 동작할 수 있도록 한다.

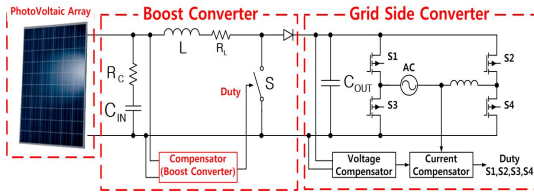


그림 1. 태양광 PCS의 구성

계통연계인버터는 태양광 어레이에서 출력된 DC전압을 계통에 공급하기 위해 AC전류·

전압으로 변환하게 된다. 계통연계 시 AC전압은 상용전원에 의해 일정하게 유지되기 때문에 인버터의 스위칭 동작에 의해 인버터가 동작할 수 있도록 DC-Link 전압을 380[V]~400[V]로 일정하게 제어하게 된다.

## 3. 태양광 PCS의 모델링

태양광 PCS는 태양광 모듈이 MPP에서 동작할 수 있도록 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 알고리즘에 의해서 운행되어야 한다. 부스트 컨버터의 제어기는 태양광 모듈의 MPPT 알고리즘에 맞게 능동적으로 최대 전력점을 추종하여야 하며 이러한 제어기를 설계하기 위해서는 태양광 PCS 전체를 고려하여 모델링이 이루어 져야 한다.

그림 2는 태양광 어레이, 부스트 컨버터, 계통연계 인버터를 등가적으로 나타낸 회로이다. 태양광 어레이에서 발생한 전력은 전류원과 내부저항으로 모델링 하였다.

DC-Link 전압은 계통연계인버터에 의해 일정하게 유지되고 있다고 가정하여  $V_{DC}$ 의 전압원으로 나타내었다.

### 3.1 부스트 컨버터의 모델링

부스트 컨버터는 스위치의 상태에 따라 비선형적인 특징을 보이므로 상태 공간 평균화법을 이용하여 모델링 할 수 있다. 부스트 컨버터의 실제적인 특성을 고려하여 제어기를 설계하기 위해 회로 내부의 기생성분  $R_L$ (인덕터의 권선 저항)과  $R_C$ (입력 커패시터의 등가 직렬 저항)을 포함하여 모델링 하였다.

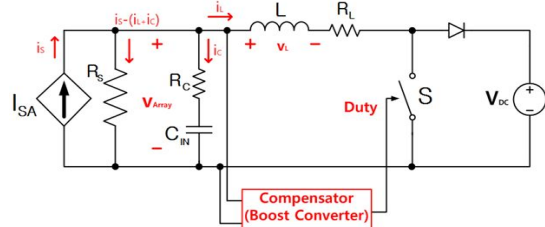


그림 2. 태양광 PCS의 등가모델

표 1. 3[kW] 태양광 시뮬레이터의 파라미터

구분	파라미터 값
$V_{array}$	150[V]
$V_{DC}$	400[V]
$R_{PV}$	7.5[Ω]
$L$	1.5[mH]
$R_L$	0.3[Ω]
$C$	470[μF]
$R_C$	0.09[Ω]
$f_s$	20[kHz]

그림 2의 부스트 컨버터 모델로 상태 공간 평균화법을 이용하여 소신호 모델링을 하면 어레이 전압과 인덕터 전류의 제어전달함수를 구할 수 있다. 그림 3은 제어전달함수의 소신호 블록도를 나타낸 것이다. DC-Link 전압은 일정하게 유지된다고 가정하였으므로  $V_{DC}$ 의 소신호 응답에 대한 영향은 없다. 따라서 듀티비의 변화에 따른 어레이 전압과 인덕터 전류의 변화의 제어전달함수만으로 간소화할 수 있다.

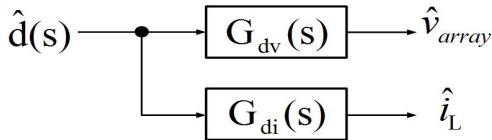


그림 2. 부스트 컨버터 제어 전달 함수의 소신호 블록도

식 1, 2는 제어 전달 함수를 구한 것이며 3, 4는 각 전달 함수에 파라미터 값을 대입하여 구한 값이다.

$$G_{dv} = \frac{\widetilde{v_{array}}(s)}{\widetilde{d}(s)} = \frac{-V_{DC}(CRR_c s + R)}{LC(R + R_c)s^2 + (CRR_c + CRR_L + CR_c R_L + L)s + R + R_L} \quad (1)$$

$$G_{di} = \frac{\widetilde{i_L}(s)}{\widetilde{d}(s)} = \frac{V_{DC}(C(R + R_c)s + 1)}{LC(R + R_c)s^2 + (CRR_c + CRR_L + CR_c R_L + L)s + R + R_L}$$

(2)

$$G_{dv} = \frac{-0.1269s - 3000}{0.000005351s^2 + 0.002887s + 7.8} \quad (3)$$

$$G_{di} = \frac{1.427s + 400}{0.000005351s^2 + 0.002887s + 7.8} \quad (4)$$

### 3.2 부스트 컨버터의 주파수 응답 특성

그림 2에서 보듯이 부스트 컨버터의 제어기는 컨버터의 제어전달함수와 함께 페루프를 형성하고 출력전압의 regulation과 과도특성과 관련하여 안정성 및 고도의 제어특성이 요구되며 이에 대응한 제어루프의 안정성 설계가 필요하다. 부스트 컨버터의 전달 함수의 특성을 Matlab의 Bode plot을 이용하여 주파수 응답 및 위상 특성을 확인하였다.

그림 4는 두 제어전달함수의 Bode plot을 나타낸다. 실선은  $G_{dv}$ 를 파선은  $G_{di}$ 를 나타낸다. DC를 포함한 저주파 영역에서의 이득은  $G_{dv}$ 는 51[dB],  $G_{di}$ 는 34[dB]가 되며 공진주파수는 189[Hz]가 되는 것을 알 수 있다.

특히  $G_{di}$ 의 경우 위상이 저주파 영역에서 180°앞서서 시작하는 것을 확인할 수 있다. 이는 부스트 컨버터의 제어 대상이  $v_{DC}$ 가 아닌 어레이 측 전압  $v_{array}$ 가 되기 때문에 시비율의 변화에 따른 전압 변화가 반대가 된다는 것으로 확인할 수 있다.

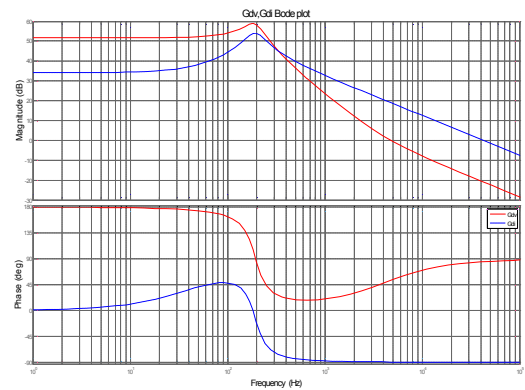


그림 4. 부스트 컨버터 제어 전달 함수의 Bode plot (실선 : 전압제어 전달함수, 파선 : 전류제어 전달함수)

#### 4. 부스트 컨버터의 제어기 설계 및 비교

앞서 모델링한 부스트 컨버터의 제어전달 함수를 이용하여 태양광 어레이의 전압만을 제어하는 단일 루프의 전압제어기와 태양광 어레이 전압과 인덕터 전류를 제어하는 2중 루프 제어기를 설계하였다. 또한 제어기의 성능을 실험적으로 검증하기 위해 디지털 제어기로 구현 PSIM 시뮬레이션을 통하여 그 과도특성을 비교 확인하였다.

##### 4.1 단일루프 제어기 설계

그림 5는 단일루프 제어방식의 제어 블록도를 나타낸다.

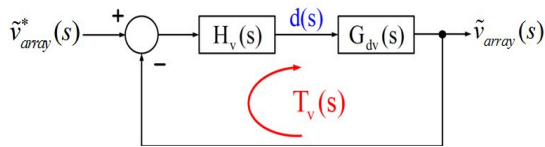


그림 5. 단일 루프 제어의 제어 블록도

$$\begin{aligned} \bullet \text{ Loop Gain} &= H_v(s) \times G_{dv}(s) \\ &= \frac{H_v(s) \times G_{dv}(s)}{1 + H_v(s) \times G_{dv}(s)} \end{aligned} \quad (5)$$

디지털 제어기 설계 시 실시간 제어 시와 동일한 위상마진을 가지기 위해서는 대상 신호의 위상지연 보상을 위하여 대역폭을 줄여야 한다. 따라서 Loop Gain의 교차 주파수( $f_c$ )를 스위칭 주파수 20[kHz]의  $\frac{1}{20}$ 인 1[kHz]가 되도록 제어기를 설계하였다.

또한, 제어기  $H_v(s)$ 는 보다 안정적인 과도 특성을 위하여 3pole-2zero 제어기로 설계하였다. 식 (5)에 제어 블록도의 전달함수를 나타내었다.

그림 6은 시스템과 제어기( $H_v(s)$ ), 보상된 Loop Gain의 주파수 응답 특성을 나타내며 그림 (7)은  $T_v(s)$ 의 step response를 확인한 것이다.

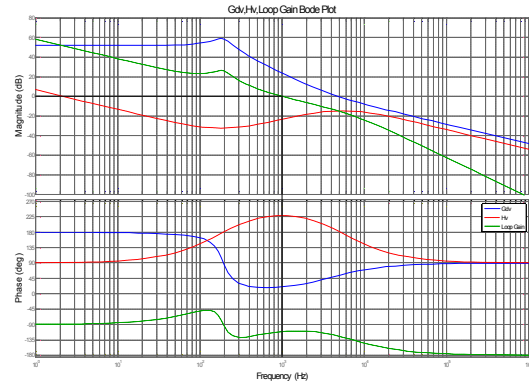


그림 6. 단일 루프 제어의 주파수 응답 특성  
(실선 : 전압제어 전달함수,  
파선 : 제어기, 점선 : Loop Gain )

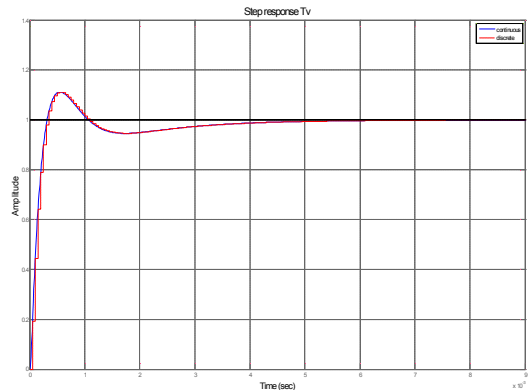


그림 7. 단일 루프 제어의 Step Response  
(실선 : 실시간 제어, 파선 : 이산시간 제어)

##### 4.2 2중 루프 제어기 설계

그림 7은 2중 루프 제어방식의 제어 블록도를 나타낸다. 2 중 루프는 내부에 전류 제어 루프를 두어 전압 제어기의 응답이 인덕터 전류 지령이 될 수 있도록 설계하였다.

전압 제어기의 차단 주파수를 단일 루프 제어 방식과 비교하기 위하여 동일하게 1[kHz]로 설정하였으며 전류 제어기는 그보다 빠른 응답을 위해서 2배 높은 2[kHz]로 하여 설계하였다. 또한 전압 제어기를 3pole-2zero 제어기로 전류 제어기를 2pole-1zero 제어기로 설계하였다. 식 (6)에 각각의 전달 함수를 나타내었다.

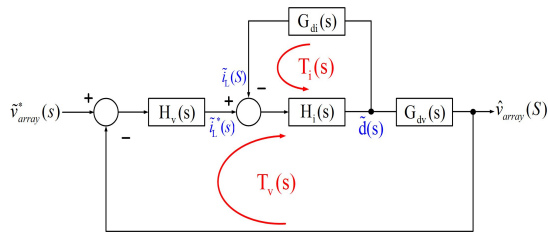


그림 8. 2 중 루프 제어의 제어 블록도

$$\begin{aligned}
 \text{Inner Loop Gain} &= H_i \times G_{di} & (6) \\
 T_i &= \frac{H_i}{1 + H_i \times G_{di}} \\
 \text{Outer Loop Gain} &= H_v \times T_i \times G_{di} \\
 T_v &= \frac{H_v \times T_i \times G_{di}}{1 + H_v \times T_i \times G_{di}}
 \end{aligned}$$

그림 (9)에 내부 전류 제어 루프의 시스템과 제어기, Loop Gain의 주파수 응답 특성을 나타내었고 그림 (10)에  $T_i(s)$ 의 step response를 확인하였다.

그림 (11)에 내부 루프와 결합된 시스템과, 외부 제어기, 전체 Loop Gain의 주파수 응답 특성을 보였다. 그림(12)는  $T_v(s)$ 의 step response를 확인 하여 2중 루프 제어 전체의 과도 특성을 확인하였다.

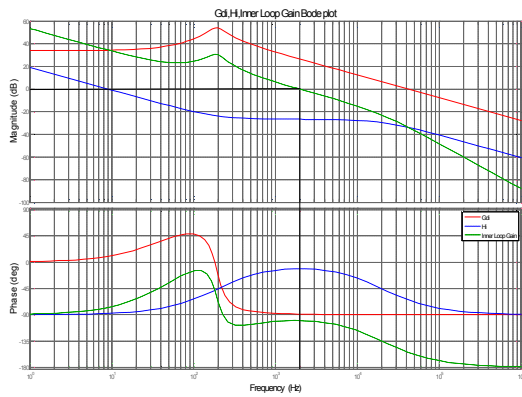


그림 9. 전류 제어 루프의 주파수 응답 특성  
(실선 : 전류 제어 전달 함수, 파선 : 전류 제어기, 점선 : Inner Loop Gain )

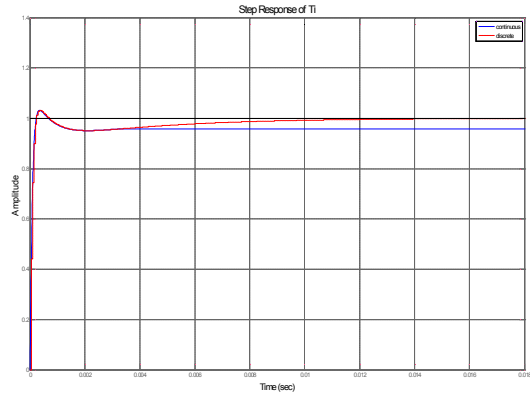


그림 10. 전류 제어 루프의 Step Response  
(실선 : 실시간 제어, 파선 : 이산시간 제어)

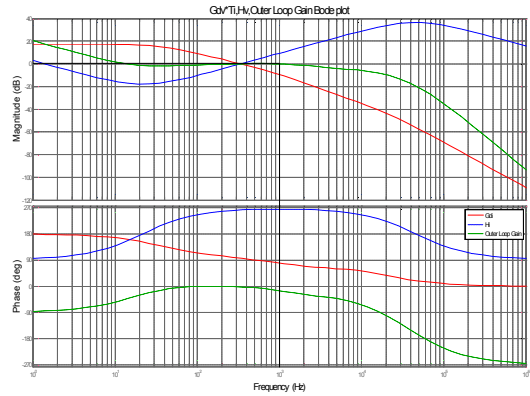


그림 11. 2중 루프 제어의 주파수 응답 특성  
(실선 :  $G_{dv} \times T_i$  제어 전달 함수, 파선 : 외부 제어기, 점선 : Outer Loop Gain )

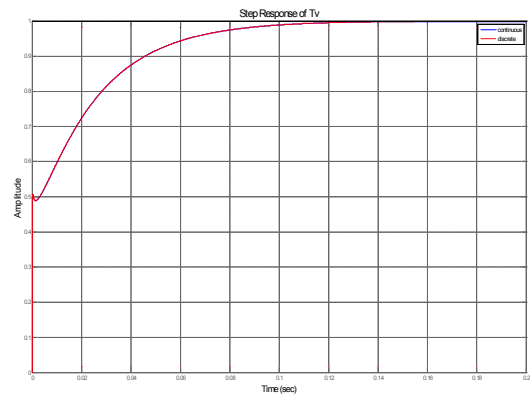


그림 12. 2 중 루프 제어의 Step Response  
(실선 : 실시간 제어, 파선 : 이산시간 제어)

### 4.3 단일 루프 제어기와 2중 루프 제어기의 특성 비교

PSIM 시뮬레이션을 이용하여 두가지 제어기의 특성을 비교 하였다. 제어기는 MPPT 알고리즘에 의해 태양광 어레이 측의 전압 지령을 받아 MPP 부근에서 제어된다고 가정하여 200[V] 이상에서 전압지령을 0.1초 마다  $\pm 5[v]$ 를 변경하였다.

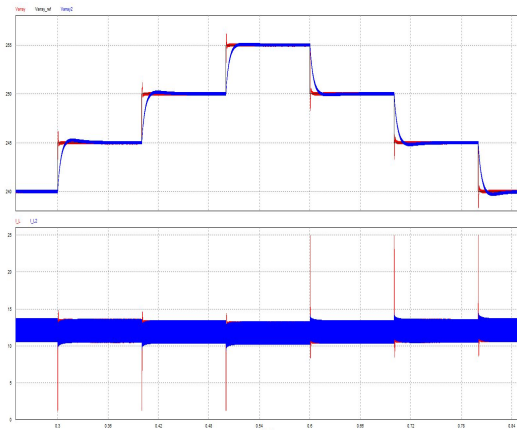


그림 13. 시뮬레이션 결과 파형  
(위 : 어레이 전압, 아래 : 인덕터 전류)  
(빨강 : 단일 루프 제어, 파랑 : 2 중 루프 제어)  
(시간div : 60[ms], 전압div : 5[v], 전류div : 5[A])

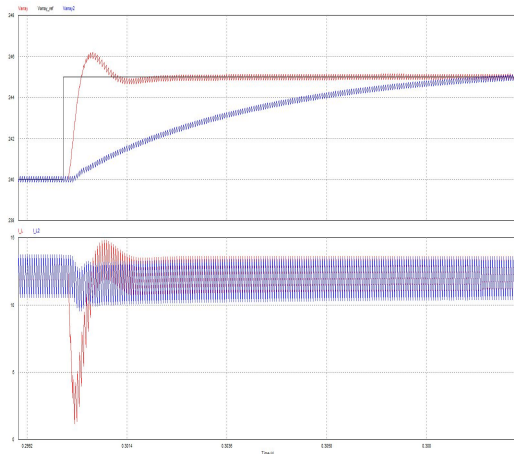


그림 14. 전압 상승 시뮬레이션 결과 파형  
(위 : 어레이 전압, 아래 : 인덕터 전류)  
(빨강 : 단일 루프 제어, 파랑 : 2 중 루프 제어)  
(시간div : 2.2[ms], 전압div : 2[v], 전류div : 5[A])

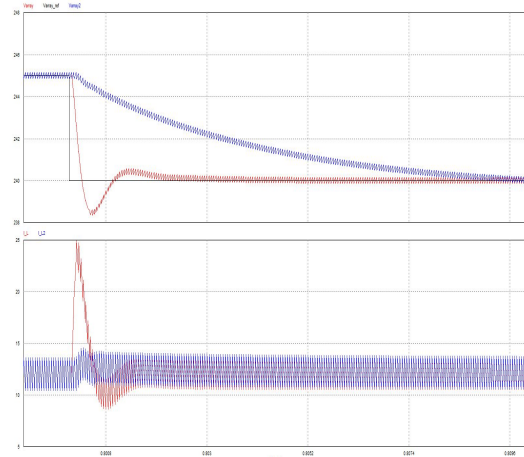


그림 15. 전압 하강 시뮬레이션 결과 파형  
(위 : 어레이 전압, 아래 : 인덕터 전류)  
(빨강 : 단일 루프 제어, 파랑 : 2 중 루프 제어)  
(시간div : 2.2[ms], 전압div : 2[v], 전류div : 5[A])

그림 (13), (14), (15)에서 보면 단일 루프 제어기는 전류 제어가 되지 않아 전압 지령의 변화 시 overshoot가 생기는 것을 확인할 수 있다. 하지만 2 중 루프 제어기는 다소 느린 응답을 보이거나 인덕터 전류를 제어하여 전압의 스텝 변화시 인덕터 전류의 overshoot를 제어함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 태양광 PCS의 부스트 컨버터의 제어기를 전압 제어만을 하는 단일 루프 방식과 전류와 전압을 동시에 제어하는 2 중 루프 제어 방식의 제어기를 설계하고 비교하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 2중 루프 제어를 하게 될 경우 인덕터에 흐르는 전류를 제어하여 큰 전압 스텝 변화 시 컨버터 내부 소자의 손상 및 파손을 줄여 줄 수 있을 것으로 확인되었다. 추후 제어기의 성능을 실제 태양광 PCS 시뮬레이터를 통하여 검증 작업을 진행할 것이다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부의 대구경북과학기술원 일반사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. (12-BD-0101)

## 참 고 문 헌

1. 임지훈 외 “태양광용 부스트 컨버터의 디지털 제어기 설계”, 2010 한국태양에너지학회 추계학술발표대회 논문집
2. 정승환 외 “State-Space Averaging Method를 사용한 태양광 발전시스템에서의 벡 컨버터 모델링”, 전력전자학회 2009년 추계학술대회 논문집
3. 박선재 외 “에너지 저장장치를 포함하는 신재생에너지원용 부스트 컨버터의 인덕터 기생저항에 따른 제어기 설계 영향 분석”, 전력전자학회 2011년 추계학술대회 논문집
4. M.G. Villalva 외 “Voltage regulation of photovoltaic arrays: small-signal analysis and control design”, IET Power Electron, 2010, vol.3
5. 김희준 저 “스위칭전원의 기본설계”, 성안당