

# 태양전지 출력제어를 위한 DC-DC 컨버터의 해석 및 설계

‘한찬영, 고재석, 최규하, \*\*김흥근, \*\*신우석  
 건국대학교, \*\*경북대학교, \*\*두원공대

## Analysis and design DC-DC converter for solar cell array output control

\*C.Y. Han, J.S. Gho, G.H. Choe, ‘ H.G. Kim, ~\*\*W.S. Shin  
 \*Konkuk Univ, \*\*Kyungpook Univ, ~\*\*Doowon Tech. college.

### ABSTRACT

Recently the problem of energy branch become worse increasingly. Therefore many researches about new energy source are processing in several places around the world. Especially solar energy has many advantages like as purity and infinity. Photovoltaic(PV) system can be classified into two types : One is stand alone type, and the other is utility interactive one. Utility interactive type PV system need some technology that Maximum peak power tracking(MPPT) and Anti-islanding and Active power filter(APF). For APF operation dc-link voltage should be high to supply sufficient output current which needed for harmonic current compensation , so usually DC-DC converter is used for boost. In this paper DC-DC converter for PV system and controller for dc-link voltage control are analyzed and designed.

### 1. 서론

최근 화석에너지 고갈에 대비하여 대체에너지원에 대한 연구개발이 국내외의 많은 기술진에 의하여 활발하게 진행중이다. 특히 태양광발전은 태양에너지의 무한정성과 태양전지의 반영구적인 수명, 태양전지의 변환효율의 상승 등 많은 장점을 지니고 있다. 또한 최근 전력용 반도체 소자의 비약적인 발전으로 고품질 고효율의 전력변환이 가능하게 됨에 따라서 태양광발전은 많은 응용분야에 있어서 에너지원으로서 적용되고 있으며 그 범위 또한 확대되는 추세이다.

태양광발전시스템은 계통의 연계유무에 따라 계통

연계형과 독립형으로 크게 분리되고 구조적으로는 DC-DC 컨버터를 태양전지측에 적용하는 방식과 적용하지 않은 방법으로 크게 나뉜다.

태양광 시스템의 주요 관련 기술로서는 태양전지로부터 최대 전력을 얻기 위한 최대전력점추적(MPPT) 알고리즘이 있으며<sup>[1,2]</sup>, 계통연계형의 경우 보호기능으로서 단독운전검출 알고리즘<sup>[3]</sup>과 전원품질 향상을 위한 능동전력 필터(Active power filter) 기능<sup>[4]</sup>등을 들 수 있다.

특히 능동전력 필터의 기능을 추가하기 위해서는 급격한 기울기를 갖는 고조파 전류를 보상하는 전류를 출력할 수 있도록 직류단 전압이 충분이 높아야 하는데 그러기 위해서는 태양전지의 직렬연결 개수를 늘려도 되지만 출력 효율이 떨어지므로 DC-DC 컨버터를 사용하여 전압을 승압하는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 이러한 능동전력 필터기능을 갖는 태양광발전시스템의 DC-DC 컨버터를 해석하고 설계한다. 또한 MPPT를 위해서는 태양전지의 고성능 전압제어가 선행되어야 하므로 전압제어 및 전류제어를 해석적으로 고찰하고 설계하였다.

### 2. 태양전지 모델링

태양전지의 수학적 모델은 컨버터를 설계하여 시뮬레이션에 의해 정확한 정특성 및 동특성을 고찰하고자 할 때 반드시 필요한 요소이다. 본 논문에서는 삼성전자의 SM-50 type의 직렬 연결 20, 병렬연결 3인 3[kW]급 태양전지 모듈을 가지고 일사량 100[mW/cm<sup>2</sup>]와 온도 25[°C]를 기준으로 모델링하였으며 비선형인 특성 곡선을 모델링하기 위해서 다음과 같은 근사화 기법을 사용하였다.<sup>[5]</sup>

$$\left(\frac{V_{cell}}{E_o}\right)^m + \left(\frac{I_{cell}}{I_s}\right)^n = 1 \quad (1)$$

E<sub>o</sub> : 개방회로 전압, I<sub>s</sub> : 단락회로 전류

그리고 최대 전력점에서의 전압  $V_m$ 과 전류  $I_m$ 을 가지고 다음식을 사용하여 계수  $m$ 과  $n$ 을 구한다.

$$V_m = E_0 \sqrt{\frac{n}{n+m}} \quad (2)$$

$$I_m = I_s \sqrt{\frac{m}{n+m}} \quad (3)$$

근사화 기법으로 구한 모델을 가지고 구현한 3[kW]급 태양전지 모듈의 특성곡선은 다음 그림1과 같다.

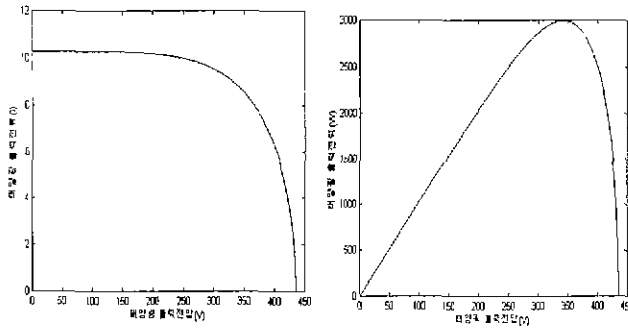


그림1. 모델링 된 태양전지 모듈의 특성곡선  
Fig. 1 Modeling PV module characteristic curve

### 3. 시스템의 구성 및 해석

Boost 컨버터를 사용한 태양광 발전 시스템의 전체 구성은 아래의 그림2와 같다.

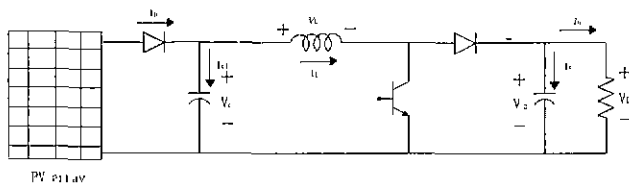


그림2. 태양광 발전 시스템의 구성  
Fig. 2 Configuration of the Photovoltaic system

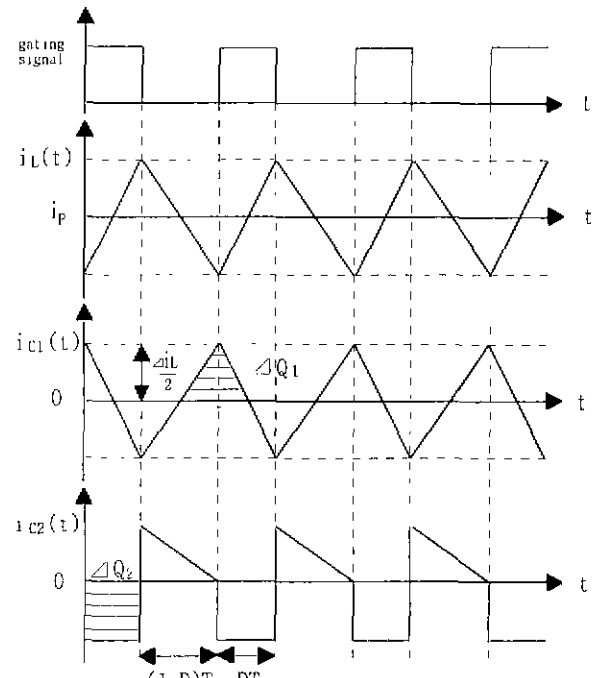
보통 DC-DC 컨버터의 관심사가 출력전압인  $V_{C2}$ 인 반면에 태양광 발전 시스템에 DC-DC 컨버터를 사용한 경우는 태양광에서 최대 출력을 끌어내기 위한 MPPT 알고리즘을 사용하므로 입력단 전압인  $V_{C1}$ 이 관심사이다. 태양전지의 특성상 주위환경에 따라 최대출력을 낼 수 있는 최대출력점 전압이 계속 바뀌므로 스위칭을 통한 인덕터 전류의 제어를 통해 입력단 전압  $V_{C1}$ 을 제어해야 한다.

위의 그림2에서 정상상태일 경우 태양전지는 전류원으로 가정할 수가 있으므로 시스템을 상태평균화 기법<sup>[6]</sup>을 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_{C1} \\ \dot{v}_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} & \frac{1}{L(D-1)} \\ -\frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_{C1} \\ v_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} i_p \quad (4)$$

최대전력을 태양전지로부터 끌어내기 위해서는 컨버터의 인덕터 전류가 연속적으로 흐르도록 컨버터가 CCM 모드로 동작해야 하므로 그에 맞게 인덕터의 크기를 설정해야 하며 커패시터  $C_1$ 과  $C_2$ 는 커패시터 전압의 리플을 고려하여 설계한다.

파라미터 선정을 위해서 정상상태에서의 시스템의 각부 전류 파형을 도시하면 다음 그림3과 같다.



$T$ : 스위칭의 주기,  $D$ : 듀티,  $f$ : 스위칭 주파수  
 $I_{C1}$ : 커패시터  $C_1$ 에 흐르는 전류  
 $I_{C2}$ : 커패시터  $C_2$ 에 흐르는 전류  
 $I_L$ : 인덕터에 흐르는 전류  
 $Q_1$ : 커패시터  $C_1$ 의 전하량,  $Q_2$ : 커패시터  $C_2$ 의 전하량

그림3. 시스템의 각부 전류파형  
Fig. 3 Current waveform of system

정상상태에서 리플을 고려한 인덕터 전류의 최소치는 다음과 같고

$$i_{Lmin} = \frac{V_{C1}}{(1-D)^2 R} - \frac{V_{C1} DT}{2L} \quad (5)$$

컨버터가 CCM 모드로 동작하기 위해서는 인덕터 전류의 최소치가 0보다 커야 하므로 인덕터의 크기는 다음을 만족해야 한다.

$$L > \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (6)$$

출력전압과 입력전압의 리플은 커패시터에 흐르는 전류 파형으로부터 다음과 같이 구해지며 이에 근

거해 커패시터 값을 선정할 수 있다.

$$C_1 \Delta Q_1 = \frac{T \Delta i_L}{8} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta V_{C1}}{V_{C1}} = \frac{D V_{C1}}{8L C_1 f^2} \quad (8)$$

$$|\Delta Q_2| = \left(-\frac{\Delta V_{C2}}{V_{C2}}\right)DT = C \Delta V_{C2} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta V_{C2}}{V_{C2}} = \frac{D}{R C_2 f} \quad (10)$$

#### 4. 제어기의 설계

시스템의 구성에서 언급한 바와 같이 태양광 발전 시스템에서는 입력단 전압이 최대 출력을 낼 수 있도록 제어되어야 하는데 태양전지는 일사량과 표면온도의 변화에 의해 최대출력점이 바뀌므로 일사량의 변화나 표면온도의 변화 등에 의한 최대출력 전압의 변화를 충분히 추종할 수 있도록 제어가 설계되어야 하며 inner loop와 outer loop를 갖는 multiloop 제어를 사용한다.

①inner loop : 빠른 동적응답을 위한 인덕터 전류 제어

②outer loop : 컨버터의 전류 지령치를 만들기 위해 최대 전력점을 추종하는 전압제어

##### 4.1 전압제어기의 설계

전압제어기 설계를 위한 DC단 모델은 그림4와 같고 전달함수는 순수 적분기로 모델링할 수 있다.

식(4)로부터

$$C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = -i_L + i_P \quad (11)$$

태양전지는 전류원의 특성을 가지고 있으나 실제로 태양전지의 출력전류는 온도나 일사량의 영향을 받아 변동을 하지만, 이러한 변동보다는 시스템의 제어 루프의 속도가 훨씬 빠르므로 제어기의 관점에서, 그러한 일사량에 의한 변동을 무시한다.

$$G(s) = \frac{1}{s C_1} \quad (12)$$

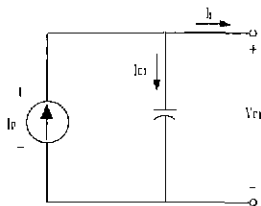


그림4. 전압제어기 설계를 위한 모델링

Fig. 4 Modeling for design voltage controller

전압제어기로 PI제어기를 사용할 때 페루프 전달함수는 다음과 같고

$$\frac{V_{C1}}{V_{C1}^*} = \frac{k_{PI}s + k_{dI}}{C_1 s^2 + k_{PI}s + k_{dI}} \quad (13)$$

gain값은 settling time과 overshoot을 고려해서 선정하며 dc 이득 1을 유지하고 페루프 전달함수로부터 영점을 제거하기 위해 지상보상기를 다음과 같은 값으로 삽입한다.

$$G_p(s) = \frac{k_{dI} / k_{PI}}{s + k_{dI} / k_{PI}} \quad (14)$$

따라서 위의 것들을 이용하여 전압제어기의 흐름도를 나타내면 다음 그림5와 같다.

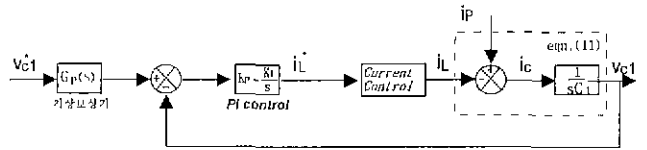


그림5. 전압제어기 흐름도

Fig. 5 Voltage controller flow chart

##### 4.2 전류제어기의 설계

식(4)로부터

$$L \frac{d i_L}{dt} = V_{C1} + d V_{C2} - V_{C2} \quad (15)$$

small signal equation을 위의 식에 적용하면

$$L \frac{d \hat{i}_L}{dt} = \hat{V}_{C1} - \hat{V}_{C2} + D \hat{V}_{C2} - \hat{d} V_{C2} \quad (16)$$

좋은 추종성능을 내기 위해서는  $\hat{V}_{C1}$ 과  $\hat{V}_{C2}$ 의 변동의 영향을 줄여야 하는데 부하단에 배터리를 연결한다고 가정할 경우  $\hat{V}_{C2}$ 의 변동은 매우 작고 느리므로 전류제어기의 설계시에는 무시할 수 있지만  $\hat{V}_{C1}$ 의 변동은 매우 크므로 전향보상 제어신호인  $\hat{v}_{conf}$ 를 사용하여 보상한다.

전류제어기의 페루프 전달함수는 다음과 같고

$$\frac{i_L}{i_L^*} = \frac{k_{PI}s + k_{dI}}{L s^2 + k_{PI}s + k_{dI}} \quad (17)$$

gain의 선정과 지상보상기의 선정은 전압제어기와 같은 방식으로 하며 전류제어기의 흐름도는 다음 그림 6과 같다.

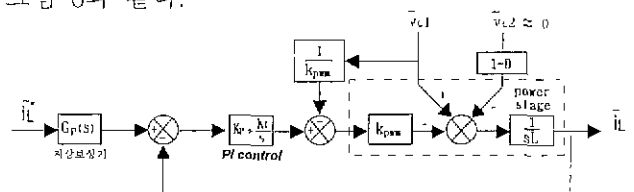


그림6. 전류제어기 흐름도

Fig. 6 Current controller flow chart

## 5. 설계예시 및 시뮬레이션

시스템 설계를 위해 표1과 같은 설계조건을 설정하였고 앞에서의 해석적 접근법에 근거하여 표2와 같이 설계 파라미터를 선정하였다. 설계된 시스템을 검증하기 위하여 전력전자 전용 시뮬레이션 툴인 PSIM을 사용하였으며 제어기의 설계와 검증은 Matlab을 사용하여 행하였다

표 1 설계 조건

Table 1 Design parameter

태양전지 모듈의 최대출력	3[kW]
태양전지 모듈의 개방전압	435[V]
태양전지 모듈의 단락전류	10.28[A]
태양전지 모듈의 최대전력점전압	342[V]
태양전지 모듈의 최대전력점전류	8.78[A]
전압제어기 settling time	0.1[sec]
전류제어기 settling time	0.0025[sec]
전압제어기 overshoot	10[%]
전류제어기 overshoot	10[%]
컨버터 인덕터전류	CCM
입력단 전압리플	1[%]
출력단 전압리플	1[%]

표 2 설계 파라미터

Table 2 Design parameter

전압제어기 P gain( $k_{p1}$ )	0.08
전압제어기 I gain( $k_{i1}$ )	3.36
전류제어기 P gain( $k_{p2}$ )	3.2
전류제어기 I gain( $k_{i2}$ )	537
인덕터(L)	0.47[mH]
입력단 커패시터(C1)	25[uF]
출력단 커패시터(C2)	58.6[uF]
출력단 전압	400[V]
스위칭 주파수	10[kHz]

그림 7은 컨버터의 듀티를 0.42로 했을 경우의 각 부 전류 파형을 나타내고 있다. 그림 8은 컨버터의 듀티를 0.15로 했을 경우로 입력단 전압이 340[V]일때의 입력단과 출력단의 전압 파형이다. 입력단 전압의 경우 리플이 0.2[%], 출력단 전압의 경우는 리플이 0.3[%]로 설계조건을 만족하고 있는 것을 볼 수 있다. 그림9는 전체 제어기의 보드 선도이며 영점을 지상보상기를 사용해 극-제로 소거를 하므로 안정도가 향상되고 있음을 볼 수 있다. 그림 10과 11은 주위환경의 변화 시 최대전력점의 전압이 바뀌므로 제어기의 성능을 검증하기 위한

시뮬레이션으로 입력단 전압지령치를 250[V]에서 340[V]로 상승시켰을때와 370[V]에서 340[V]로 감소시켰을때의 입력단과 출력단의 전압파형이다. 일사량이나 주위 온도의 변화에 따른 전압지령치를 충분히 추종할 수 있도록 전압제어기의 settling time을 0.1[sec]로 설계하였으며 파형에서 보는 바와 같이 출력단 전압은 400[V]를 유지하고 있으며 입력단 전압이 0.1[sec]만에 전압지령치의 변화를 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다.

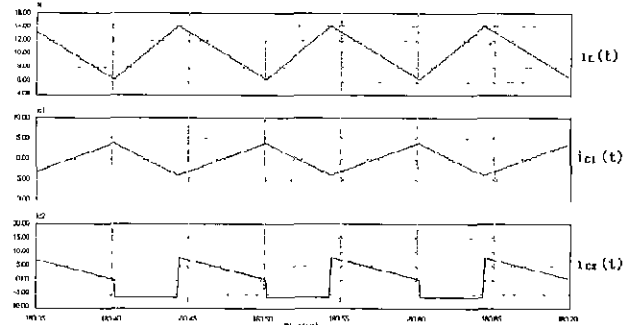


그림7. Duty가 0.42일 경우의 각 부 전류파형

Fig. 7 Current waveform when duty is 0.42

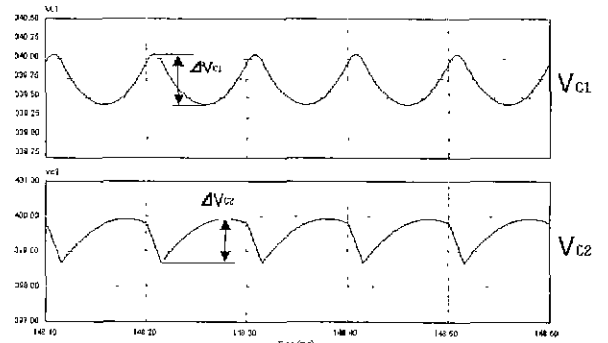


그림8. Duty가 0.15일 경우의 전압파형

Fig. 8 Voltage waveform when duty is 0.15

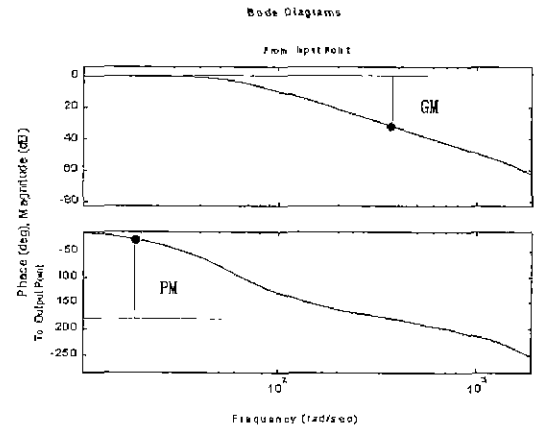


그림9. 전체 제어기의 보드 선도

Fig. 9 Bode plot of controller

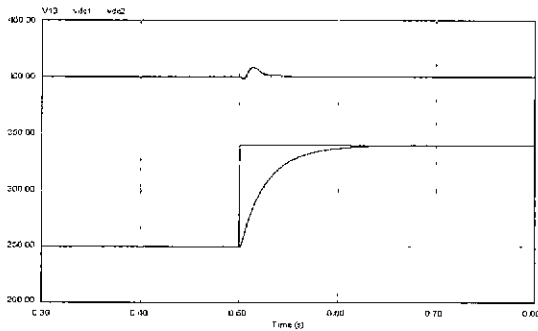


그림10. 전압지령치 상승시의  
입력단과 출력단의 전압파형

Fig. 10 Voltage waveform of input side and output side when voltage reference is increased

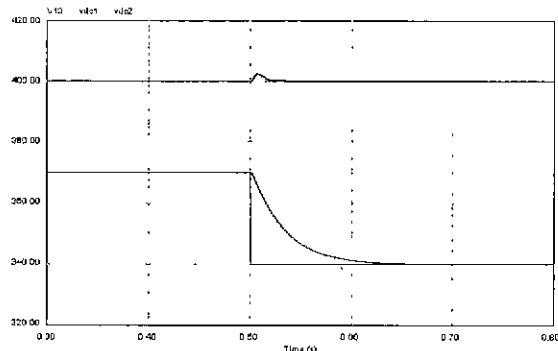


그림11. 전압지령치 감소시의  
입력단과 출력단의 전압파형

Fig. 11 Voltage waveform of input side and output side when voltage reference is decreased

## 6. 결론

태양광 발전 시스템에서 주로 사용되는 DC-DC 컨버터에 대해서 해석하고 설계조건에 따른 회로정수 설계 및 전압제어기 및 전류제어기 설계에 대해 해석적인 방법으로 기술하였으며 시뮬레이션을 통해 설계된 시스템의 성능을 검증하였다.

차후의 연구로는 실험을 통하여 설계된 회로정수 및 제어기 설계에 대한 검증을 하고 동작특성에 대하여 분석을 해야한다.

## 참 고 문 헌

- [1] Chihchinag Hua, Chihming Shen, "Study of Maximum Power Tracking Techniques of system and Control of DC/DC Converter for Photovoltaic Power System", Proceedings of the Record of the 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Vol 1, 1998, pp.86-92
- [2] K H Hussein, I.Muta, "Maximum photovoltaic power

tracking : an algorithm for rapidly changing atmosphere conditions", IEE Proc. Transm. Distrib., Vol.142, No 1, 1995, pp.59-64

[3] 고재석, "계통연계형 태양광 발전시스템을 위한 새로운 역충전 방지 알고리즘 및 디지털 제어기 설계", 전국대학교 공학석사 학위논문, 1996

[4] 이상용, "전원측 무효전력 보상기능을 갖는 계통연계형 태양광 발전시스템의 해석 및 설계", 99'전력전자 학계학술대회, pp 591-594

[5] Mikhiko Matsui. "A New Maximum Photovoltaic Power Tracking Control Scheme Based on Power Equilibrium at DC Link", Proc of IEEE Industry Application Meeting - Volume 2, 1999, pp804-809

[6] Daniel W. Hart, "Introduction to Power Electronics", Prentice Hall, pp.408-413