

# 태양광 발전 시스템에서의 벅 컨버터 제어기 설계

## Design of Buck Converter Controller in a Photovoltaic Power Conditioning System

박봉희\* · 정승환\*\* · 최주엽\*† · 최익\*\* · 이상철\*\*\* · 이동하\*\*\*

Park Bong-Hee\*, Seung-Whan Jeong\*\*, Ju-Yeop Choi\*† ,  
Choy Ick\*\*, Lee Sang-Cheol\*\*\* and Lee Dong-Ha\*\*\*

(Submit date : 2013. 11. 30., Judgment date : 2013. 12. 10., Publication decide date : 2014. 4. 7.)

**Abstract :** Generally, buck converter controller is designed to control the output voltage of the converter. However, design of the controller in a photovoltaic power conditioning system is different from theoretical design guideline. The controller in a photovoltaic power conditioning system controls the input voltage of the converter (the output voltage of the solar cell) to meet a maximum power point tracking (MPPT) performance. In this study, a new model for buck converter used in a photovoltaic power conditioning system is proposed, which is linearized after state-space averaging in each period. Also, mathematical expression of the modeled buck converter is interpreted separately as small and large signals; therefore its appropriateness is measured to design linear voltage and current controllers.

**Key Words :** 벅 컨버터(Buck Converter), 상태공간평균화 방법(State-space averaging method), 태양광발전 시스템(Photovoltaic power conditioning system)

### 1. 서 론

신재생에너지는 다양한 자연에너지의 특성

과 이용기술을 활용하여 기존의 화석연료와 원자력 에너지를 대체하는 재생 가능한 에너지이다. 화석에너지의 고갈문제와 환경문제에

\*\*† 최주엽(교신저자) : 광운대학교 전기공학과  
E-mail : juyeop@kw.ac.kr, Tel : 02-940-5146  
\*박봉희 : 광운대학교 전기공학과  
\*\*정승환 : 광운대학교 로봇학부  
\*\*최 익 : 광운대학교 로봇학부  
\*\*\*이상철 : 대구경북과학기술원  
\*\*\*이동하 : 대구경북과학기술원

\*† Choi Ju-Yeop(corresponding author) : Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University.  
E-mail : juyeop@kw.ac.kr, Tel : 02-940-5146  
\*Park Bong-Hee : Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University.  
\*\*Seung-Whan Jeong : Department of Robot Engineering, Kwangwoon University  
\*\*Choy Ick : Department of Robot Engineering, Kwangwoon University  
\*\*\*Lee Sang-Cheol : DGIST  
\*\*\*Lee Dong-Ha : DGIST

대한 핵심 해결방안이라는 점에서 선진 각국에서는 신재생에너지에 대한 과감한 연구개발과 보급정책 등을 추진하고 있으며, 2011년 총발전량의 3.46%를 신재생에너지로 생산하였으며 2030년까지 총에너지의 11%를 신재생에너지로 보급한다는 장기적인 목표 하에 신재생에너지기술개발 및 보급사업 등에 대한 지원을 강화하고 있는 실정이다. 그 중에서도 태양광발전(태양전지) 시스템은 국내에서 가장 발달한 신재생에너지 분야 중 하나로서 선진국 기술 수준의 90% 수준이며, 벅 컨버터로 구성된 태양광 PCS는 입력전압에 대하여 출력전압을 낮추는 스텝 다운 컨버터로 배터리 충전 및 중소형 발전 시스템에 쓰이고 있다. 태양광발전 시스템에서는 일사량과 온도에 따라 태양 전지의 전압과 전류가 심하게 변동하기 때문에 MPPT 제어를 필요로 한다. 이로 인하여 태양전지를 입력으로 하는 컨버터는 일반적인 모델과는 맞지 않다. 또한, 이런 오류가 있는 방법으로 모델링하여 설계한 제어기가 좋은 성능을 내기는 어렵다. 본 논문에서는 먼저, 입력과 출력성분을 반대로 구성한 벅 컨버터의 모델을 제시한다. 그리고 스위치의 상태별 모델링 후에, 상태공간평균화 방법을 이용하여 선형화한다. 제어기는 전류와 전압 제어를 복합적으로 설계하고, 그 특성을 MATLAB으로 시뮬레이션하여 검증하였다.

## 2. 벅 컨버터 모델

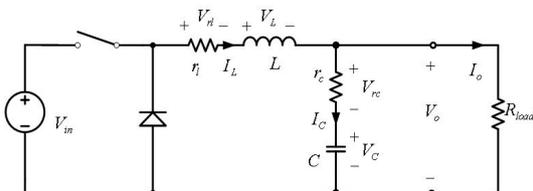


Fig.1 Buck converter circuit

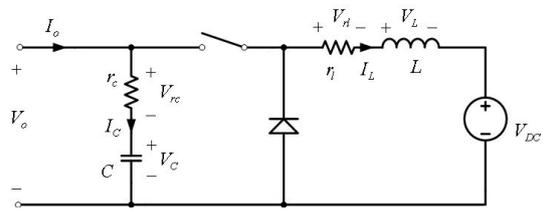


Fig. 2 Buck converter circuit with solar cell

Fig. 1은 일반적인 벅 컨버터의 회로이다. 컨버터의 회로의 입력단을 정 전압원, 출력단을 저항으로 하여 출력단의 전압 제어를 설계하는 것이 일반적이지만, 본 논문에서 목표로 하는 태양광발전 시스템과는 맞지 않기 때문에 벅 컨버터의 회로를 Fig.2와 같이 수정하였다. 수정된 회로에서는 회로의 출력단을 정전압원으로 두고, 입력단을 출력전류로 보고 있다. 또한 회로의 출력단을 정전압원으로 가정하고 있기 때문에 출력단의 커패시터를 제거하였다. 이는 정전압원의 역할로 인하여 커패시터가 동작하지 않기 때문이다. 태양전지의 전압과 전류의 변동이 있는 입력단에는 입력 커패시터를 추가하였다. 또한 L, C 각각에 ESR을 포함시켜서 좀 더 정확한 모델이 될 수 있도록 하였다. 이와 같은 개념으로 벅 컨버터의 모델을 제시하였으며, 회로의 다이오드와 스위치는 이상적인 동작을 하고 있다고 가정하였다.

## 3. 모델링

컨버터의 모델은 일반적으로 스위치 동작에 의하여 비선형특성의 방정식이 유도된다. 유도한 방정식을 선형화하기 위하여 상태공간평균화 방법을 사용하였다. 먼저, 수식 (1)과 같이 상태변수 및 파라미터를 정의하였다.

$$\begin{cases} x' = Ax + Bu \\ y = Mx + Nu \end{cases}, x = \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$, u = \begin{bmatrix} v_{dc} \\ i_o \end{bmatrix}, y = v_o$$

그리고 스위치 각각의 상태에 따른 상태/출력 방정식을 유도하였다. 스위치가 On 상태일 때의 수식은 (2), (3)이며, Off 상태일 때의 수식은 (4), (5)이다.

- On state of switch

$$\begin{bmatrix} v_c' \\ i_L' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & -\frac{r_L+r_c}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & \frac{r_c}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{dc} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$v_o = [1 \quad -r_c] \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + [0 \quad r_c] \begin{bmatrix} v_{dc} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (3)$$

- Off state of switch

$$\begin{bmatrix} v_c' \\ i_L' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{dc} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$v_o = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + [0 \quad r_c] \begin{bmatrix} v_{dc} \\ i_o \end{bmatrix} \quad (5)$$

상태공간평균화 방법을 사용한 일반적인 상태/출력방정식은 (6)과 같다. 수식 (6')은 (6)을 라플라스 변환하여 정리한 것이다. 또한 상태변수와 평균화 모델의 계수는 (7)과 같이 정의한다.

$$\begin{cases} \hat{x}' = \hat{A}\hat{x} + \hat{B}\hat{u} + [(A_1 - A_2)\bar{X} + (B_1 - B_2)\bar{U}]\hat{d} \\ \hat{y} = \hat{M}\hat{x} + \hat{N}\hat{u} + [(M_1 - M_2)\bar{X} + (N_1 - N_2)\bar{U}]\hat{d} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \hat{x}(s) = (sI - \hat{A})^{-1} \hat{B}\hat{u}(s) \\ \quad + (sI - \hat{A})^{-1} [(A_1 - A_2)\bar{X} - (B_1 - B_2)\bar{U}]\hat{d}(s) \\ \hat{y}(s) = \hat{M}\hat{x}(s) + \hat{N}\hat{u}(s) \\ \quad + [(M_1 - M_2)\bar{X} + (N_1 - N_2)\bar{U}]\hat{d}(s) \end{cases} \quad (6')$$

$$x = \bar{X} + \hat{x}, u = \bar{U} + \hat{u}, d = \bar{D} + \hat{d}, i_o = \bar{I}_o + \hat{i}_o \quad (7)$$

,  $\bar{X}$ : DC component of  $x$

,  $\hat{x}$ : AC component of  $x$

$$\hat{A} = A_1 d + A_2(1-d), \hat{B} = B_1 d + B_2(1-d)$$

$$\hat{M} = M_1 d + M_2(1-d), \hat{N} = N_1 d + N_2(1-d)$$

$X_1$ : Coefficient of On state

$X_2$ : Coefficient of Off state

스위치 상태에 따라 구한 수식의 계수를 수식 (7)에 적용하여 정리하면 수식 (8)과 같다. (8)의 행렬들에는 파라미터들의 DC값이 포함되어 있는데, 이 DC값들을 정의하기 위하여 컨버터는 태양전지의 MPP (Maximum Power Point)에 동작하고 있음을 가정한다.

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\bar{D}}{C} \\ \frac{1}{L} & -\frac{r_L+r_c\bar{D}}{L} \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & \frac{r_c\bar{D}}{L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\hat{M} = [1 \quad -r_c\bar{D}], \hat{N} = [0 \quad r_c]$$

(8)의 계수를 (6')에 대입하여 구한 최종 수식은 (9), (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_c(s) \\ \hat{i}_L(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \bar{D} Ls + r_L + r_c\bar{D} - r_c\bar{D}^2 \\ -Cs \quad \bar{D}(1+r_cCs) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{dc}(s) \\ \hat{i}_o(s) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$+ \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} -(\bar{I}_L Ls + \bar{I}_L r_L + \bar{D}\bar{V}_c + \bar{D}\bar{I}_o r_c) \\ C(\bar{V}_c + r_c\bar{I}_o - r_c\bar{I}_L)s - \bar{D}\bar{I}_L \end{bmatrix} \hat{d}(s)$$

$$\hat{v}_o(s) = [1 \quad -\bar{D}r_c] \begin{bmatrix} \hat{v}_c(s) \\ \hat{i}_L(s) \end{bmatrix} + [0 \quad r_c] \begin{bmatrix} \hat{v}_{dc}(s) \\ \hat{i}_o(s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$- \bar{I}_L r_c \hat{d}(s)$$

$$\Delta = \frac{1}{LCs^2 + C(\bar{D}r_c + r_L)s + \bar{D}^2}$$

#### 4. 블록다이어그램

수식 (9), (10)의 상태/출력 방정식으로 전달함수의 블록다이어그램으로 표현한 것이

Fig. 3이다. G1 ~ G6 블록은 수식 (9)와 G7 ~ G10 블록은 수식 (10)과 같다. 각각의 전달함수는 따로 표현하지 않았다.

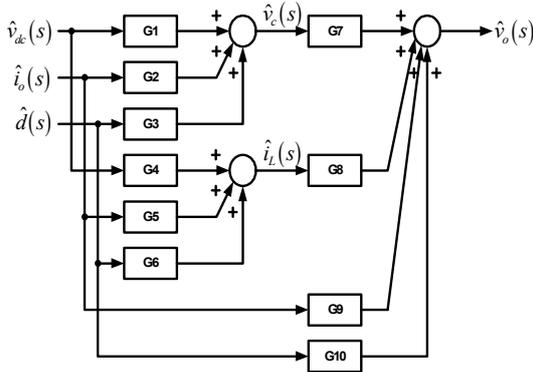


Fig. 3 Block diagram of buck converter model

아래 Fig. 4와 같이 벅 컨버터의 입력단으로 태양전지와 연결할 경우에  $i_o$ 에 피드백 성분이 더해지게 된다. 입력단의 표시한 부분은 태양 전지를 등가적으로 표현한 것으로서  $r_s$ 는 태양전지의 내부저항 값이다.

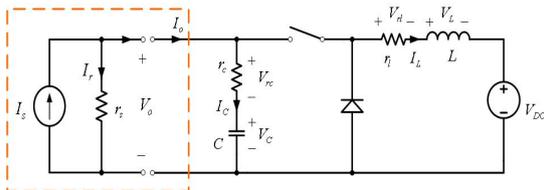


Fig. 4 Buck converter circuit including solar cell

입력단의 태양전지 등가회로를 추가함으로써 Fig. 5와 같이 피드백성분이 추가 되게 되고, 전류원  $I_s$ 는 미소성분의 변화없이 일정하다고 가정하면,  $i_o = -i_r$ 이 성립하게 된다. 이는 기존의 입력  $i_o(s)$ 에 출력  $v_o(s)$ 와  $-\frac{1}{r_s}$ 의 피드백 성분이 더해짐을 의미한다.

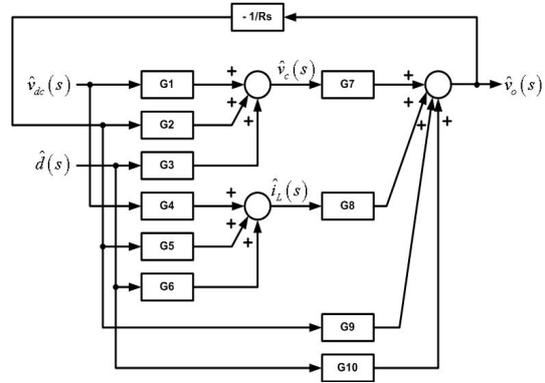


Fig. 5 Block diagram about buck converter model including solar cell

기존의 블록다이어그램에 피드백 루프를 더 하고, 간략화 하면 다음 Fig. 6과 같은 블록다이어그램을 새롭게 구할 수 있다. 블록다이어그램의 각 전달함수는 수식 (11)과 같이 정리된다.

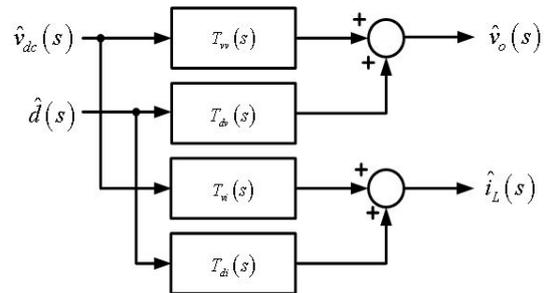


Fig. 6 Simple block diagram of buck converter model

$$\begin{aligned} T_{vv} &= \frac{Den_{vv}}{Num}, T_{dv} = \frac{Den_{dv}}{Num} \\ T_{vi} &= \frac{Den_{vi}}{Num}, T_{di} = \frac{Den_{di}}{Num} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Num &= (r_s + r_c)LCs^2 + (r_c r_s \bar{C}\bar{D} + r_L r_s C + r_c^2 \bar{C}\bar{D} \\ &\quad + r_s r_L C + L - r_c^2 \bar{C}\bar{D}^2)s + (r_L + r_s \bar{D}^2 - r_c \bar{D}^2 + r_c \bar{D}) \\ den_{vv} &= r_s \bar{D}(1 + r_c C s) \\ den_{dv} &= -r_s (r_c L \bar{C} \bar{L} s^2 + (L \bar{L} + r_c \bar{C} \bar{D} \bar{V}_c + r_c^2 \bar{C} \bar{D} \bar{V}_c + r_c r_L \bar{C} \bar{L})s \\ &\quad + r_L \bar{L} + \bar{D} \bar{V}_c + r_c \bar{D} \bar{I}_o) \\ den_{vi} &= -(r_s C s + r_c C s + 1) \\ den_{di} &= C \{ \bar{V}_c (r_c + r_s) + r_c \bar{I}_o (r_c + r_s) - r_c \bar{L} ((1 - \bar{D}) r_c + r_s) \} s \\ &\quad + \bar{L} \bar{D} (r_c - r_s) + r_c (\bar{I}_o - \bar{L}) + \bar{V}_c \end{aligned}$$

## 5. 전류 및 전압 제어기 설계

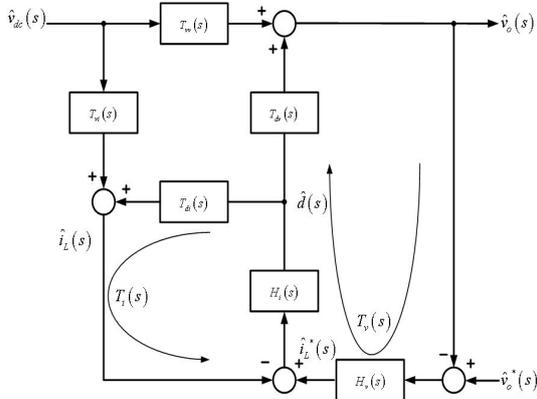


Fig. 7 Block diagram including controller

Fig. 7은 전류와 전압 제어기를 포함하여 그린 블록다이어그램이다. inner loop로 전류 제어기가 동작하고 있으며, outer loop로 전압 제어기가 동작하고 있다. 단순히 전압 제어기만 구성하는 것이 아니라 전류 제어기를 inner loop로 포함시킴으로써 보다 빠른 응답성을 기대할 수 있으며, 전류의 크기를 제한하여 회로를 보호할 수 있는 등의 효과가 있다. 이 때, 입력  $v_{dc}^*(s)$ 는 0으로 하여, 입력  $\hat{d}(s)$ 에 대한 전류 및 전압 제어기를 구성할 수 있도록 하였다.

### 5.1 파라미터 값

Table 1. Parameter about buck converter

Parameter	Value	Parameter	Value
$C$	4700u (F)	$R_c$	0.0001 ( $\Omega$ )
$L$	25u (H)	$R_l$	0.001 ( $\Omega$ )
$\bar{V}_c$	45.4 (V)	$\bar{I}_L$	6.43 (A)
$\bar{V}_o$	45.4 (V)	$\bar{I}_o$	1.7 (A)
$\bar{D}$	0.2643	$\bar{V}_{DC}$	12 (V)

Table 2. Parameter about solar cell

$I_{sc}$	1.85 (A)	$V_{oc}$	56 (V)
$I_m$	1.7 (A)	$V_m$	45.4 (V)
$P_m, MPP$	77.1 (W)		

수식 (11)을 보면 각 입출력 변수들의 DC값들이 계수행렬에 포함이 되어있다. 이것은 상태공간평균화 방법을 사용하여 선형화하는 과정에서 벡 컨버터가 정상상태임을 가정하여 소신호 성분을 모델링하였기 때문이다. 모델링한 벡 컨버터의 정상상태는 입력단의 태양광 전지의 MPP(Maximum Power Point)에서 이루어 졌다고 가정하였다. 이에 관한 파라미터 값들은 Table 1과 Table 2에 명시하였다.

### 5.2 전류제어기 설계

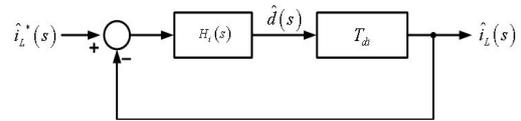


Fig. 8 Block diagram of current controller

먼저 내루프(inner loop)의 전류제어기를 설계하도록 한다. 제어 대상이 되는 전달함수 블록과 제어기 블록을 따로 구성한 것이 Fig. 8과 같다. 전류 제어기의 페루프는  $H_i(s)$ 와  $T_{di}(s)$ 로 구성된다.  $T_{di}(s)$ 와 전류제어기를 포함한  $T_{di}(s)$ 의 보데선도는 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서  $T_{di}(s)$ 는 매우 안정한 특성을 가지지만, 200Krad/sec (=31.8Khz)의 높은 교차 주파수를 가진다. 전달 함수 특성이 비록 안정하나, 교차 주파수가 높음으로서 스위칭 동작에 따른 리플 영향이 매우 심하다. 제어 블록  $H_i(s)$ 는 교차 주파수를 스위칭 주파수의 1/5 정도로 줄일 수 있도록 하고, 위상 여유를 60°이상

으로 안정하게 설계하였다. 일반적으로 교차 주파수는 플랜트의 교차 주파수 1/10이하로 설계를 하게 된다. 하지만 현 플랜트의 특성방정식이 높은 값의 허수근을 가진다. 이로 인한 오버슈트와 정상상태오차를 줄일 수 있도록 하고, 스위칭 리플의 영향을 최대한 줄일 수 있는 이득 (gain)을 선택하였다.

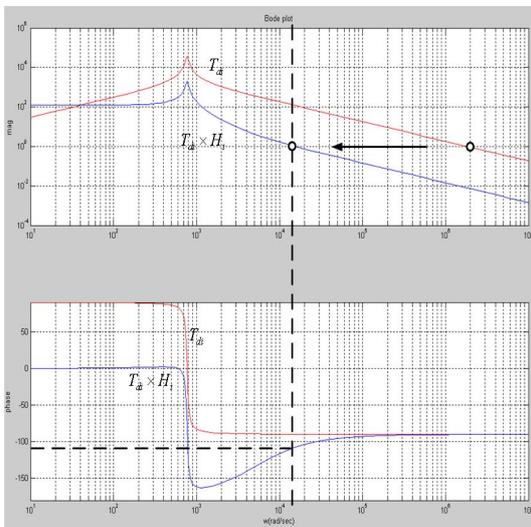


Fig. 9  $T_{di}$  and Bode plot of  $T_{di}$  including current controller

### 5.3 전압제어기 설계

Fig. 10은 외루프(outer loop)의 전압제어기를 포함한 블록다이어그램이다. 전류제어기 루프를 포함하게 되며, 이에 따라 교차 주파수는 전류 제어기의 1/10이하로 설계해야 하는 것이 좋다.

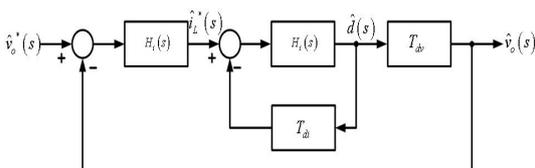


Fig. 10 Block diagram of voltage controller

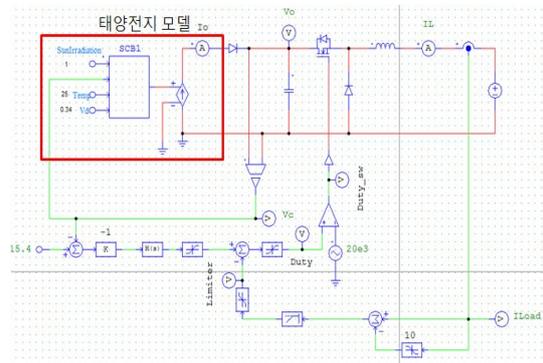


Fig. 11 PSIM simulation of the buck converter circuit

Fig. 11은 실제 태양전지와 유사하게 모델링된 태양전지 모델을 넣은 회로이다. Fig. 12는 빨간색으로 표시한 것이 리미터를 포함한 회로, 파란색으로 표시한 것이 리미터를 포함하지 않은 단순히 전압제어기만으로 구성된 회로의 시뮬레이션 결과이다. 두 경우 모두 정상 상태에 도달하는 것에는 문제가 없는 것을 알 수 있으며, 리미터를 포함한 회로는 전압제어기만 구성된 회로에 비해 전류가 제한된 상황에서 출력전압을 제어하고 있음을 알 수 있다.

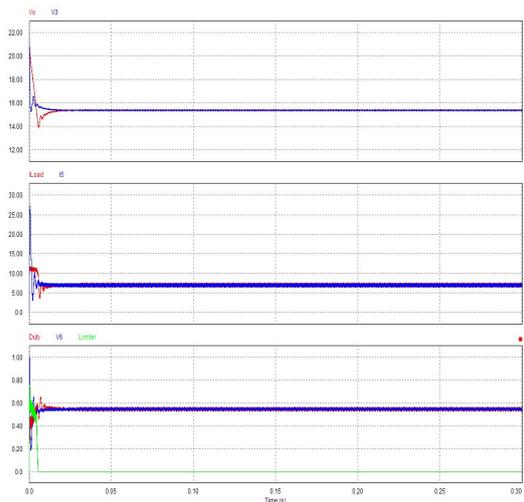


Fig. 12 PSIM Simulation result of the buck converter with solar cell and controller

## 6. 결 론

본 논문에서는 태양광발전 시스템에서 사용되는 벽 컨버터의 새로운 모델을 제시하고, 이를 상태평균화 방법으로 모델링하여 선형화하였다. 또한, 전류 및 전압 제어를 설계하고, 이를 MATLAB 및 PSIM으로 시뮬레이션하여 검증하였다. 추후 실제 시스템을 위한 시뮬레이션을 통해 태양광발전 시스템에 적용하고, 실험으로 검증해야할 것이다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부 대구경북과학기술원 일반사업(14-BD-01)에 의해 수행되었습니다.

## Reference

1. Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power Electronics : Converters, Applications, and Design", Third Edition, John Wiley & Sons, Inc. pp. 161-172, pp. 322 -337, 2003.
2. Moussa, W.M, Morris, J.E., "Comparison between state space averaging and PWM switch for switch mode power supply analysis", Southern Tier Technical Conference, 1990., 25 April 1990, pp.15-21
3. Enslin, J.H.R., Wolf, M.S., Snyman, D.B., Swiegers, W., "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 44 Issue: 6, pp. 769 -773, npr 1997
4. New Renewable Energy Center in the korea Energy Management Corporation, "Renewable Portfolio Standard"