

50[W]급 태양전지의 가상 구현을 위한 모듈의 직·병렬 연결 특성 해석 및 제어

한정만, 류태규, 고재석, 최규하

건국대학교 전기공학과

Analysis and Control of Series · Parallels Connection Characteristics for Virtual Implementation of 50[W] Solar Cell Module

J.M. Han, T.G. Ryu, J.S. Gho, and G.H. Choe

Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University

ABSTRACT

The solar energy is purity and infinity. Solar power converter were used to convert the electrical energy from the solar arrays to a stable and reliable power source. So many countries research this solar energy system. The photovoltaic system is construct many solar cell array.

In this paper, new implementation solar system was showed buck converter that V-I curve produced. This system can be used to study the short-term and long-term performances of solar cell and efficiency. This system is a far more cost effective and reliable replacement for field and outdoor flight testing.

Study of buck converter, analysis and control series or parallels connection characteristics of solar cell array.

1. 서 론

태양광발전 시스템은 용량에 따라 모듈을 직·병렬로 연결하여 원하는 출력을 발전할 수 있다. 하지만 태양광 발전에 관련된 연구를 수행하는데 있어 태양전지의 설치를 위한 넓은 공간이 요구되며 아울러 태양광발전의 특성이 일사량과 온도변화에 따라서 크게 변화되므로 동일 조건으로의 재현 또는 재실험이 불가능하다.

그러므로 태양광발전 시스템을 가상 구현 할 수 있는 장치가 있다면 이러한 문제점은 해결 할 수 있을 것이다. 또한 태양광발전 시스템은 큰 출력을 내기 위해 작은 단위셀을 직렬 또는 병렬로 연결하여 사용하고 있다.

따라서, 본 논문에서는 태양광발전 시스템의 출력 특성을 갖는 가상 구현 장치를 구현하기 위하여 단위셀의 출력 특성을 낼 수 있는 장치를 DC-DC컨버터로 구현하

고 컨버터를 직·병렬로 연결하여 가상구현장치의 출력 특성에 관하여 고찰하였다.^[1]

2. 태양전지

2.1 태양전지의 출력 특성

태양전지의 출력특성은 제조상의 차이점이나, 환경적 요인들에 의해서 변화된다. 제조상의 차이점을 무시하고 환경의 변화에 따른 출력특성은 크게 온도에 따른 온도 특성과 일사량에 따른 일사량특성으로 구분할 수 있다.

그림 1은 일사량에 따른 태양전지의 출력의 변화를 보여주고 있으며 그림 2는 온도에 따른 태양전지의 출력 변화를 나타내고 있다. 일사량의 변화시 태양전지의 개방전압은 큰 변화가 없는 반면 출력전류가 크게 변화하고 있음을 알 수 있다. 온도 변화시 단락전류는 큰 변화가 없는 반면에 개방전압이 크게 변화하고 있다. 또한 전압이 변화하면 전류도 변하므로 이 특성을 컨버터로 구현하기 위해서는 전압과 전류를 동시에 제어 할 필요가 있다.

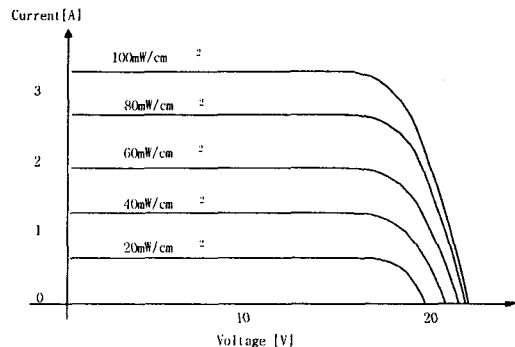


그림 1 태양전지의 일사량에 따른 출력특성
Fig. 1 Solar cell output characteristics with varying radiation.

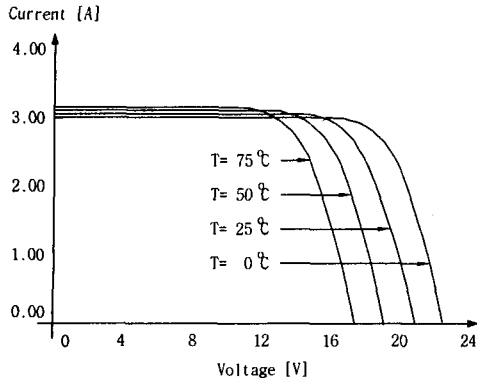


그림 2 태양전지의 온도에 따른 출력특성
Fig. 2 Solar cell output characteristics with varying surface temperature

2.2 태양전지 모델링

2.2.1 보간형 모델

태양전지를 가장 손쉽게 수학적으로 모델링하는 방법으로서, 태양전지의 개방전압과 단락전류, 최대 전력점을 실측하여 모델링하는 방법이다. 몇 개의 샘플된 데이터를 보간법에 의해 가장 근사한 출력특성을 갖도록 설정하여 태양전지의 모델로 쓰게 되는데 여기에는 온도 및 일사량 변화에 따라 출력특성을 변화시킬 수 없다는 문제점이 있지만, 간단하게 근사한 모델을 구할 수 있다는 장점도 있다.

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

$$V_{mp}=V_{oc} \sqrt[m]{\frac{n}{n+m}} \quad (2)$$

$$I_{mp}=I_{sc} \sqrt[n]{\frac{m}{n+m}} \quad (3)$$

여기서, V_{cell} , I_{cell} : 태양전지의 출력전압 및 전류

V_{mp} , I_{mp} : 최대 전력점의 전압 및 전류

V_{oc} , I_{sc} : 태양전지의 개방전압 및 단락전류

m , n : 전압상수 및 전류상수

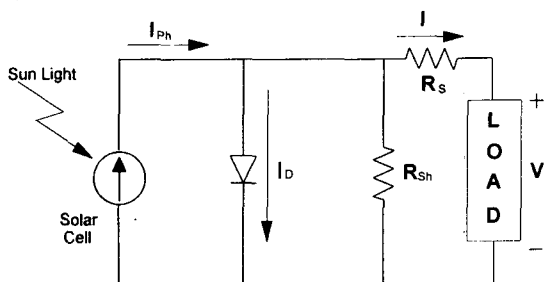


그림 3 태양전지의 등가회로

Fig. 3 Equivalent circuit of solar cell

2.2.2 매개변수형 모델

매개변수형 모델은 광기전력효과를 수학적으로 모델링한 것이다. 태양전지의 매개변수형 모델은 식 (4)와 같이 광기전류성분을 제외하면 다이오드 식과 매우 유사함을 알 수가 있다. 따라서 그림 3에서 나타내는 바와 같이 광기전력을 전류원으로 나타내고, 이와 역병렬로 다이오드를 연결하여 태양전지를 나타낼 수가 있게 된다.

$$I = I_{ph} - I_D = I_{PH} - I_0 \left[e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right] \quad (4)$$

$$I = I_{PH} - N_P \cdot I_0 \left[e^{\frac{q(V+I \cdot R_S)}{AKTN_S}} - 1 \right] - \frac{V+I \cdot R_S}{R_{SH}} \quad (5)$$

$$I_{PH} = [I_{SC} \cdot S_N + I_T(T_C - T_R)] \cdot N_P \quad (6)$$

$$I_0 = I_{OR} \left(\frac{T_C}{T_R} \right)^3 e^{\frac{qE_G}{Bk} \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_C} \right)} \quad (7)$$

여기서,

I_{PH} : 광기전류, T : 온도(K),

V, I : 태양전지 출력전압 및 전류

I_0 : 다이오드 포화전류

k : 볼츠만 상수 ($1.3810 \times 10^{-23} J/K$)

q : 전자의 전하량 ($1.60210 \times 10^{-19} C$)

S_N : 기준일사량($100 [KW/W^2]$)의 일사에너지

I_T : 표면온도1[°K]상승시 단락전류의 변화량

I_{OR} : 태양전지 동작기준온도 역포화전류

T_R : 태양전지 동작기준온도($300 [°K]$)

T_C : 태양전지표면 온도(°K)

E_G : P-N 접합에서의 에너지 갭($1.12[eV]$)

R_S, R_{SH} : 직렬저항 및 병렬저항

N_S, N_P : 직렬·병렬로 연결된 셀의 개수

3. 컨버터 설계

3.1 Buck 컨버터

태양 전지 단위셀의 구현을 위한 컨버터는 태양전지 단위셀의 출력 범위(전압 0~25[V], 전류 0~3.5[A])에서 제어가 가능한 Buck 컨버터를 선택하였다. Buck 컨버터의 입출력 관계에 의한 듀티비는 식 (8)로 표현되며, 스위칭 주파수와 전류, 전압의 리플률을 대입하여 시스템을 CCM모드로 동작시킬 인덕턴스와 커패시턴스를 식 (9)와 식 (10)에 의해 계산하였다. 그림 4는 Buck 컨버터의 회로도이다.

$$\frac{V}{V_s} = D \quad (8)$$

$$\Delta I = \frac{V_s D(1-D)}{f_s L} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{DV_s(1-D)}{f_s L} \left(\frac{1}{8f_s C} \right) \\ &= \frac{V_s D(1-D)}{8LCf_s^2} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,

V : 출력전압 V_s : 입력전압

ΔI : 전류리플 ΔV : 전압리플

f_s : 스위칭주파수 D : 듀티비

그림 5는 태양전지 어레이의 가상 구현을 위한 Buck 컨버터의 직렬 (a), 병렬 (b) 연결한 구성도이다. PV Model Block에서 일정한 온도와 일사량에 해당하는 태양전지 출력 지령치를 제어기에 보내어 컨버터를 제어하였다.

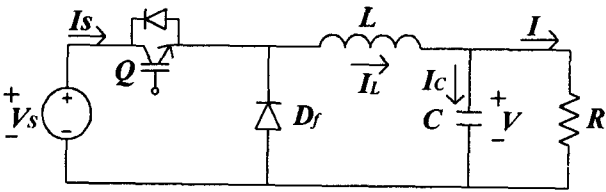


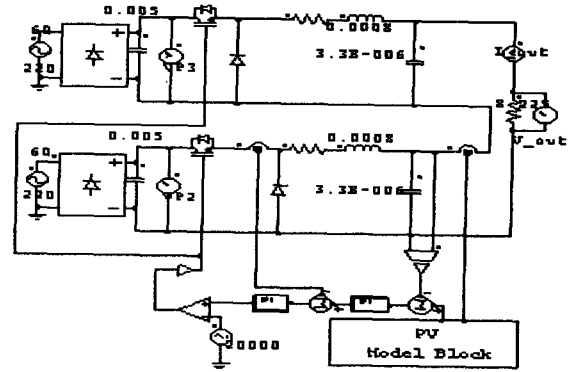
그림 4 Buck 컨버터
Fig. 4 Buck converter

4. 시뮬레이션

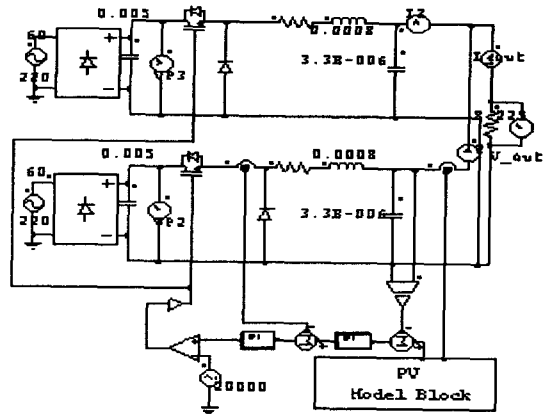
태양전지 가상구현을 위해 설계한 Buck 컨버터를 검증하기 위해 시뮬레이션을 실행하였다. PV Model Block은 삼성 전자의 SM-50을 기본 모델로 하였고, SM-50의 사양은 표 1과 같다. 가상 구현을 위한 컨버터의 정격은 표 2와 같이 설계하였다. 시뮬레이션은 정격으로 설계된 컨버터 두 대를 기준 1로 정하고 컨버터의 L,C 공진 주파수의 값을 0.7, 0.8, 0.9, 1.1, 1.2, 1.3배로 변동시켜 비교하였다. 시뮬레이션은 부하를 10[%]에서 100[%]로 변동시켜 이때의 전압과 전류를 샘플링 하였다. 샘플링 한 데이터는 MATLAB을 이용하여 표시하였다. 단일 컨버터, 직렬, 병렬 연결시 출력 특성을 P-V 곡선과 전압 리플률, 전류 리플률을 이용하여 비교하였다. 전압 리플률과 전류 리플률은 전압과 전류의 리플을 최대 전력점에서의 전압과 전류로 나누어 정의하였으며 식 (11)과 식 (12)와 같이 나타낸다.

$$R_V = \frac{\Delta V}{V_{mp}} \times 100[\%] \quad (11)$$

$$R_I = \frac{\Delta I}{I_{mp}} \times 100[\%] \quad (12)$$



(a) 직렬 연결
(a) Series Connection



(b) 병렬 연결
(b) Parallel Connection

그림 5 Buck 컨버터를 이용한 어레이 구성도
Fig. 5 Solar cell configuration using Buck Converter.

표 1 SM-50 사양
Table 1 SM-50 specification.

· 최대 출력	: 50 w
· 최대 출력 전압	: 16.8v
· 최대 출력 전류	: 2.97A
· 단락 전류	: 3.23A
· 개방 전압	: 21v

표 2 Buck 컨버터 정격
Table 2 Buck converter parameter.

항 목	설계값	단 위
입 력 전 압	311	[V]
정 격 용 량	50	[W]
스 위 칭 주 파 수	40	[kHz]
인 덕 터 스	0.8	[mH]
커 패 시 터 스	3.3	[μF]
전 압 리 플	5	%
전 류 리 플	5	%

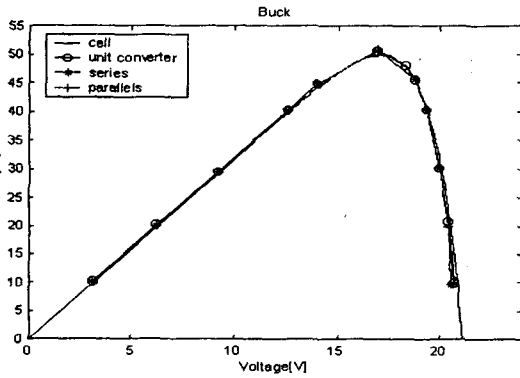
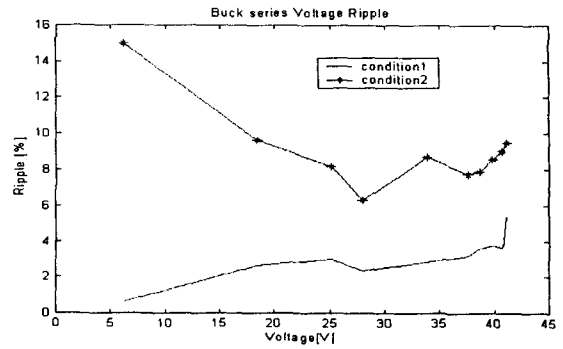
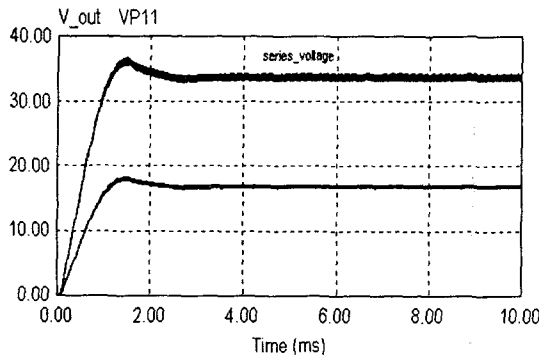


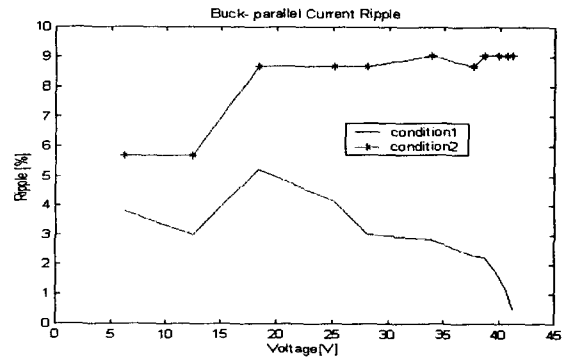
그림 6 컨버터 모델의 P-V 특성 곡선
Fig. 6 P-V Characteristics Curve of Converter Model.



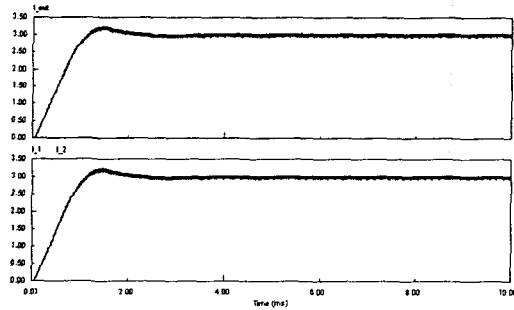
(a) 직렬 연결시 전압 리플률
(a) Voltage Ripple on Series Converter



(a) 컨버터 직렬 연결시 전압 파형
(a) Current wave form of Series Converter



(b) 병렬 연결시 전류 리플률[%]
(b) Current Ripple on Shunt Converter



(b) 컨버터 병렬 연결시 전류 파형
(b) Current wave form of Shunt Converter

그림 7 컨버터 연결에 따른 전압, 전류 파형
Fig. 7 Voltage, Current Wave form of Shunt, Series Converter.

그림 6은 컨버터의 P-V 특성을 태양전지 모델과 비교한 것이다. 접선이 태양전지이며, 컨버터 하나의 출력, 직렬 연결시 컨버터 하나의 출력, 병렬 연결시 컨버터 하나의 출력 순으로 표시하였다. 컨버터간 출력은 2%(1W)이내의 차이를 보이고 있다.

그림 7은 직렬 연결시 (a) 전압 파형과 병렬 연결시 (b) 전류 파형이다. (a)에서 위 부분은 최종 출력 전압이고, 아래 부분은 컨버터 하나의 출력 전압이다. 직렬의 특성대로 2배로 증가하는 것을 볼수 있다. (b)에서 위 부

그림 8 리플률

Fig. 8 Ripple Ratio.

분은 최종 출력 전류이고, 아래 부분은 컨버터 하나의 출력 전류이다. (a)의 경우와 같이 병렬 특성인 전류의 증가가 2배가됨을 볼 수 있다.

컨버터의 L,C 공진 주파수를 20% 변동 시켰을 경우 시뮬레이션에서는 전압 리플률과 전류 리플률은 많은 차이를 보이고 있다. 그림 8(a)는 직렬 연결시 전압 리플률이다. 최종 출력전압 리플률은 컨버터의 L,C 공진 주파수가 설계치일때보다 1%상승하지만, 컨버터 하나의 전압 리플률은 높은 전압에서는 4%증가하지만, 낮은 전압에서는 10%이상 증가하고 있다. (b)는 병렬 연결시 컨버터의 L,C 공진 주파수가 설계치일때와 20% 증가 시켰을 경우의 전류 리플률이다. 여기서도 최종 출력 전류리플률은 설계치일 때 보다 1%이내의 증가를 보이나, (a)와는 반대로 높은 전압에서 많이 증가하는 현상을 보이고 있다. 이는 태양전지의 특성이 전압이 증가하면 전류가 감소하는 것으로 낮은 전류에서 전류 리플률이 크게 증가한 것을 알 수 있다.

5. 실험 및 고찰

설계한 컨버터를 제작 검증하기 위하여 모델 추종 오

차율을 적용하였다. 모델 추종 오차율(ϵ_{mt})은 태양전지 모델을 컨버터의 출력전압 및 전류가 추종하는 정도를 나타내며 모델이 출력하는 지령전류와 컨버터의 출력전류의 오차를 모델 출력전류로 정규화하여 식 (13)과 같이 표현하였다.

그림 9는 실험을 부하를 달리 하였을 경우 전압에 따른 모델 추종 오차율을 보여 주고 있다. 오차율은 -1.5% ~9.1%사이의 분포를 보이고 있다. 실제 태양전지에서 사용하는 최대전력 출력모드 내에서는 6%이내의 오차율을 보이고 있다.

$$\epsilon_{mt} = \frac{I_{model} - I}{I_{model}} \times 100[\%] \quad (13)$$

여기서, I_{model} ; 출력 전류 지령값

I ; 출력 전류

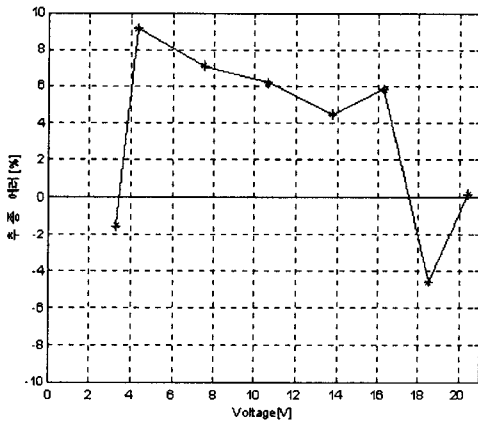


그림 9 모델 추종 오차율
Fig. 9 Tracking error

6. 결 론

본 논문에서는 태양전지 어레이의 가상 구현을 위하여 컨버터를 설계하고 그 특성을 분석하였다. 시뮬레이션을 통하여 설계한 컨버터의 직렬·병렬 연결특성을 분석하였고, 실험을 통하여 태양전지의 가상 구현을 검증하였다.

시뮬레이션을 통하여 태양전지의 모델링과 시스템의 설계 및 제어 방법과 제어기 이득 선정에 대하여 검증하였다. 시뮬레이션에서 2%이내의 오차 범위 내에서 태양전지의 출력 특성을 구현할 수 있었고, 컨버터의 직·병렬 연결시 필터의 L,C 공진 주파수의 범위를 정할 수 있었다.

또한, 실험을 통하여 저항 부하에서 가상 구현이 가능함을 검증할 수 있었다.

향후 연구 과제로는 가상 구현 어레이의 병렬 연결시

전류 제어에 대한 연구가 필요하고, 직렬 또는 병렬 연결시 생기는 선로 저항에 따른 가상 구현 장치의 출력 특성에 대한 연구가 필요하다.

이 논문은 산학 협동 재단 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] Kame Khouzam, Keith Hoffman, "Real Time Simulation of Photovoltaic Modules", *Solar Energy*, Vol 56, pp. 524-526, 1996.
- [2] 최해룡 "태양전지의 가상구현을 위한 정전력제어에 관한 연구", 전력전자학회 학술대회 논문집, pp. 10-13, 2000.
- [3] Y. Iida, Y. Fuchikami, and Y. Neba, "Analysis of step-up chopper circuit with photovoltaic arrays", *IEEE Japan Annual Meeting*, Vo; 4, No 841, pp. 4/180, 1998.
- [4] Jae-hyun Yoo, "Analysis and Control of PWM Converter with V-I Output Characteristic of Solar Cell", *ISIE 2001*.
- [5] 고재석, "PWM 컨버터-인버터 시스템의 제어기 최적 설계," 건국대학교 공학박사 학위논문, 2001.
- [6] Binal K. Bose, "An Adaptive Hysteresis-Band Current Control Technique of A Voltage-Fed PWM Inverter For Machine Drive System", *IEEE Trans. on Ind. Electron*, Vol. 26, no. 5, 1990, pp. 880~884.
- [7] 김홍성, "3상 계통연계형 태양광 발전시스템의 제어기 설계," 건국대학교 공학박사 학위논문, 1988.