

태양전지의 V-I 특성 구현을 위한 PWM컨버터의 해석 및 제어

류태규, 유재현, 한정만, 고재석, 최규하
 건국대학교 전기공학과

Analysis and control of PWM converter for V-I output characteristic implementation of solar cell

T.G Ryu, J.H Yoo, J.M Han, J.S Gho, G.H Choe
 Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University

ABSTRACT

In this paper, the virtual implement of solar cell was proposed to solve the problems as reappearance and repetition of some situation in experiment of photovoltaic. To realize the VISC, mathematical model of solar cell for driving converter was studied and the buck converter were compared in viewpoint of tracking error of characteristic curve of solar cell using computer simulation.

일사량 변화에 따라 출력특성을 변화시킬 수 없다는 문제점이 있지만, 간단하게 근사한 모델을 구할 수 있다는 장점도 있다.

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

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

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

1. 서 론

태양전지는 태양에너지의 조사 상태, 즉 시시각각 변해가는 기상에 따라서 발전량 및 동작점이 변동하기 때문에 일정한 조건하에서 연구가 용이하지 않다. 또한, 연구단계에서 발전단지를 조성해야 하기에 넓은 설치장소와 많은 설치비용이 들게 된다.

따라서 본 논문에서는 이러한 태양광발전시스템의 연구에 있어서 실험의 재현성을 부가하여 연구의 생산성을 높이고 실험 데이터의 신뢰도를 확보하기 위해서 태양전지의 PWM컨버터를 이용한 가상구현장치에 대하여 연구하였다.^{[1][2]} 가상구현장치에서 적용할 태양전지 모델에 대해서 고찰하였으며, PWM컨버터에 대해서 컴퓨터시뮬레이션에 의해서 고찰하였다.

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

V_{mp}, I_{mp} : 최대전력점에서의 전압 및 전류

V_{oc}, I_{sc} : 태양전지의 개방전압 및 단락전류

m, n : 전압상수 및 전류상수

2.2 매개변수형 모델

매개변수형 모델은 광기전력효과를 수학적으로 모델링한 것이다. 태양전지의 매개변수형 모델은 식 (4)에서 보는 바와 같이 광기전류성분을 제외하면 다이오드 식과 매우 유사함을 알 수가 있다. 따라서 그림 1에서 나타내는 바와 같이 광기전력을 전류원으로 나타내고, 이와 역병렬로 다이오드를 연결하여 태양전지를 나타낼 수가 있게 된다.

2. 태양전지 모델링

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

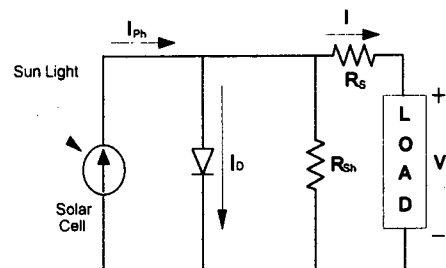


그림 1 태양전지의 등가회로
 Fig. 1 Equivalent circuit of solar cell

$$I = I_{ph} - I_D$$

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

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

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

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

- 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($100 [mW/cm^2]$)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. 가상구현의 개념

태양전지의 가상구현장치는 그림 2와 같이 구성되며, 실제 태양전지의 특성을 측정하여 데이터로 저장하는 로깅시스템과 제어시스템, 태양전지의 전압, 전류를 출력하는 컨버터로 이루어진다.^[3]

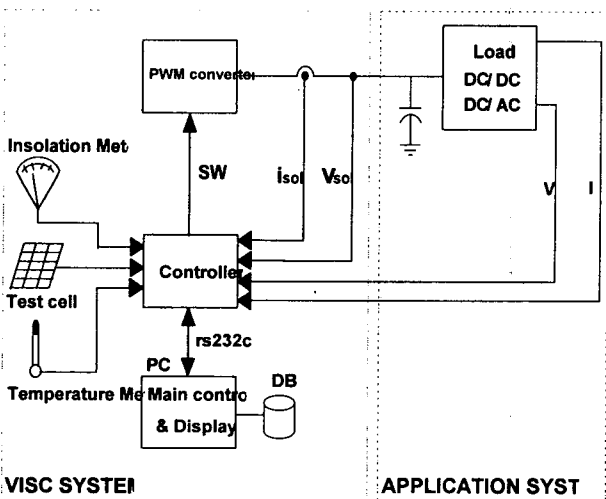


그림 2 PWM 컨버터를 이용한 태양전지의 가상 구현
Fig. 2 Virtual implementation of solar cell using PWM converter

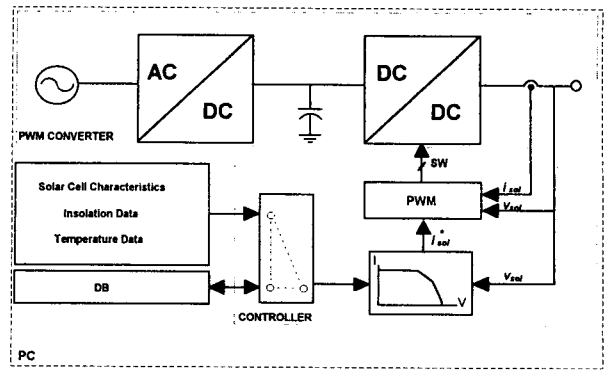


그림 3 VISC의 제어 블록도
Fig. 3 Control block of VISC

표 1 VISC 운전 모드
Table 1 VISC mode

VISC 운전 모드 리스트
· Test Cell의 온도, 일사량에 따른 V-I곡선 데이터베이스 구축 모드
· Test Cell로 부터의 태양전지모델 추출 모드
· Test Cell구동에 의한 대규모 태양전지의 리얼타임 시뮬레이터 모드
· 데이터베이스화 되어있는 출력특성을 이용한 시뮬레이터모드
· 실험조건변화의 시나리오에 의한 운전 모드
· 데이터 분석 모드

VISC시스템의 전체 제어 블록은 그림3과 같으며, AC-DC 컨버터와 DC-DC컨버터를 사용하여 상용전원의 V-I 특성을 출력시킨다.

VISC시스템의 운전모드는 표 1의 같이 나타낼 수 있고 모드는 실제 태양전지특성 측정모드, 데이터 저장모드, 데이터 분석모드, 가상구현 모드로 구성된다.

4. VISC 설계 및 평가

4.1 Buck 컨버터

태양전지 가상구현을 위해서는 DC/DC 컨버터의 회로를 갖는 전력변환부가 필요하다. 여러 가지 DC/DC 컨버터가 있지만 쉽게 구현이 가능한 Buck컨버터를 설계하여 그 특성을 분석해 보았다. Boost컨버터는 입력에 비해 출력이 증폭되므로 태양전지의 특성을 전 전압 범위에서 구현할 수 없고, Buck-boost컨버터는 응답특성이 Buck컨버터보다 느리기 때문에 Buck 컨버터를 이용하여 VISC시스템을 구현하였다. Buck컨버터의 설계는 스위치의 턴 온-오프시의 전압 및 전류 회로방정식과 CCM조건에 의해서 식 (8)의 전압증폭비에 관련된 식을 얻을 수 있으며 여기서 출력전압과 입력전압에 의해서 정격에서의 듀티비를 계산할 수가 있다. 다음은 스위칭 주파수와 전류의 리플를 대입하여 시스템을 CCM으로 동작시킬 리액터의 인

덕턴스를 식 (9)에 의해 계산할 수가 있으며, 계산 결과 인덕턴스가 너무 크면 스위칭 주파수를 허용되는 범위 내에서 조금더 증가시켜 인덕턴스를 낮추도록 해야한다. 마지막으로 식 (10)에 의해 출력단 전압리플률을 대입하여 커패시턴스를 계산할 수 있다.

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

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

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

4.2 컴퓨터 시뮬레이션

Buck 컨버터에 대해서 시뮬레이션을 위하여 PSIM을 사용하여 특성을 분석하였다.^[4] 그림 4와 표 2는 시뮬레이션 구성과 설계 정격을 보여주고 있다.

시뮬레이션 결과를 정량적으로 고찰하기 위해서 전압리플률(R_V)과 전류리플률(R_I), 모델추종오차율(ϵ_{mt})을 적용하였다. 전류리플률과 전압리플률은 스위칭 동작에 의한 전류 및 전압의 오차를 최대전력점에서의 전류 및 전압으로 각기 나누어 정의하였으며 식 (11), 식 (12)과 같이 나타낸다.

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

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

여기서, ΔV 와 ΔI 는 전압과 전류의 peak-to-peak 리플 크기이며 V_{mp} 및 I_{mp} 는 모델의 최대전력점에

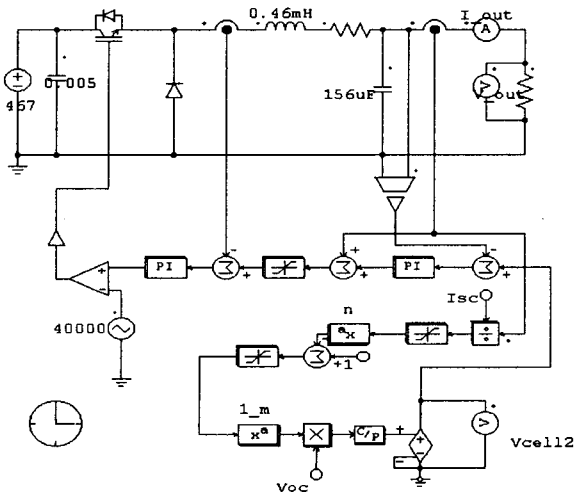


그림 4 Buck컨버터를 적용한 VISC구성도
Fig. 4 VISC system using buck converter

표 2 Buck 컨버터 정격

Table 2 Buck converter parameter

항 목	설계값	단 위
입력 전압	457	[V]
정격 용량	3000	[W]
스위칭 주파수	40	[kHz]
인덕턴스	0.46	[mH]
커패시턴스	156	[μF]
전압 리플	5	[%]
전류 리플	5	[%]

서의 전압과 전류이다. 오버슈트는 모델 출력전압에 대한 과도상태에서 최대전압비로 표현하였다. 모델추종 오차율(ϵ_{mt})은 태양전지 모델을 컨버터의 출력전압 및 전류가 추종하는 정도를 나타내며 모델이 출력하는 지령 전류와 컨버터의 출력전류의 오차를 모델 출력전류로 정규화하여 정의하여 식 (13)과 같이 표현한다.

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

여기서, I_{model} ; 출력 전류 지령값

I ; 출력 전류

그림 5는 컨버터 및 모델 출력의 전류-전압곡선을 보여주고 있다. 모델출력은 컨버터의 지령치이므로 컨버터의 출력이 이를 추종하도록 해야 한다. 그림 5는 전반적으로 추종을 정확히 하고 있음을 알 수가 있다.

그림 6, 그림 7은 전압 및 전류의 리플률을 보여주고 있다. 이 리플률들은 최대전력점에서 5%를 기준으로 설계한 것으로서 설계치를 만족하고 있다. 출력단 전압을 높일수록 전압리플률, 전류리플률은 감소하는 추세를 보인다.

그림 8, 그림 9는 각기 오버슈트와 과도응답특성을 보여 주고 전압 및 전류의 오버슈트는 25[%]이내에 들었으며 반복되는 시뮬레이션동안 큰 변화를 보이지 않았다. 과도응답시간 또한 과도응답시간도 60[ms]으로 일정한 응답시간을 보여주었다.

마지막으로 이를 출력 특성을 세밀히 분석하기 위하여, 그림 10과 같이 모델지령치와 VISC출력값과의 오차를 구하여 도시하여 고찰을 해보았다. 그림에서 알 수 있듯이 추종오차율은 전 전압 범위에서 약 -2.5[%]에서 0.5[%]정도로 모델지령치와 VISC출력특성값의 차이가 적음을 알 수 있었다.

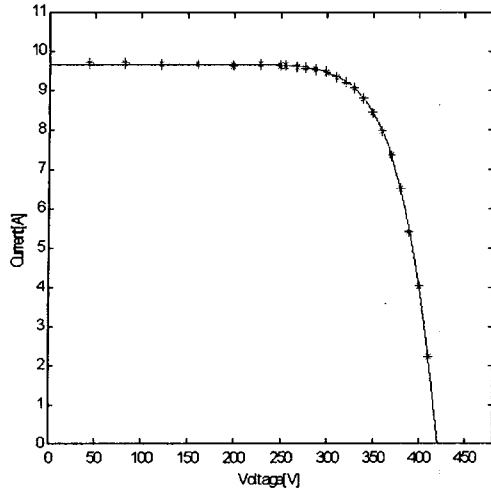


그림 5 태양전지의 V-I 특성비교
Fig. 5 Comparison of V-I characteristics for solar cell

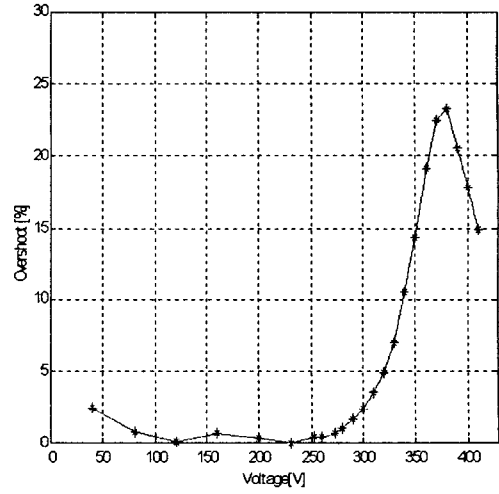


그림 8 오버슈트
Fig. 8 Overshoot

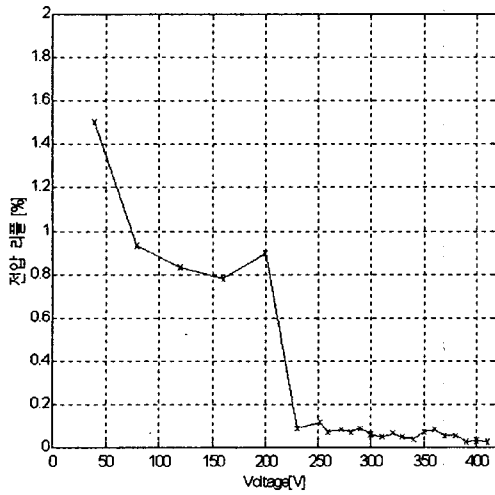


그림 6 전압리플
Fig. 6 Voltage Ripple

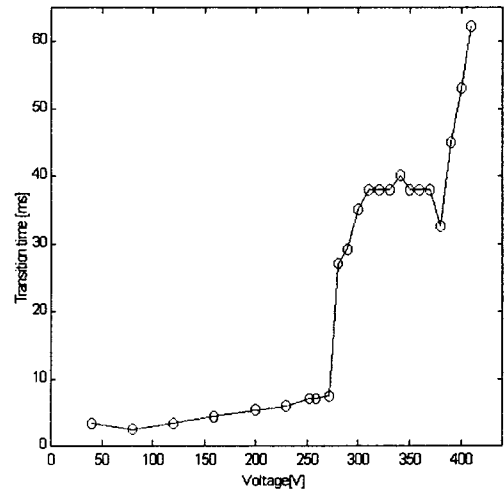


그림 9 과도응답
Fig. 9 Transition response

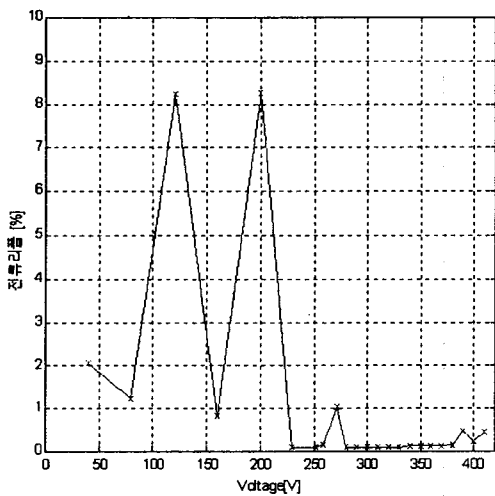


그림 7 전류리플
Fig. 7 Current Ripple

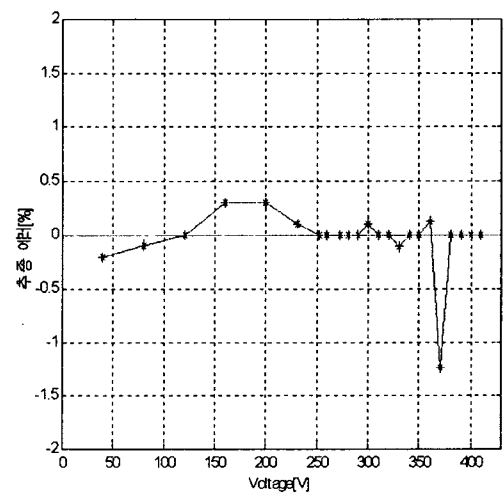


그림 10 추종에러
Fig. 10 Tracking error

5. 동특성 실험

태양전지 가상구현을 위해서는 VISC의 응답속도 사양을 결정하여야 한다. 이를 위해서 그림 11과 같이 일사량을 100%에서 60%로 변화시켜 보았다.

또한 일사량이 급격히 변화한다는 가정하에서 그림 12, 그림 13는 각기 일사량을 100%에서 60%, 60%에서 100%로 변화 시켜보았다. 여기서 과도응답시간이 약 15[ms]를 확인할 수 있었다.

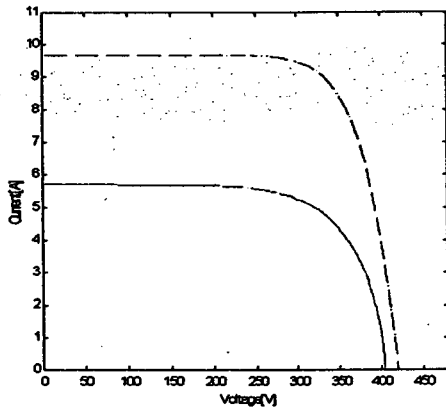


그림 11 일사량변화에 의한 V-I 특성 곡선
Fig. 11 V-I characteristics on varying illuminations

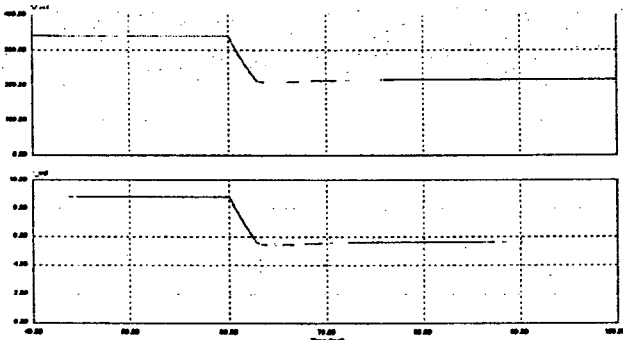


그림 12 일사량 변화시(100%→ 60%) 출력파형
Fig. 12 Output wave on varying illuminations

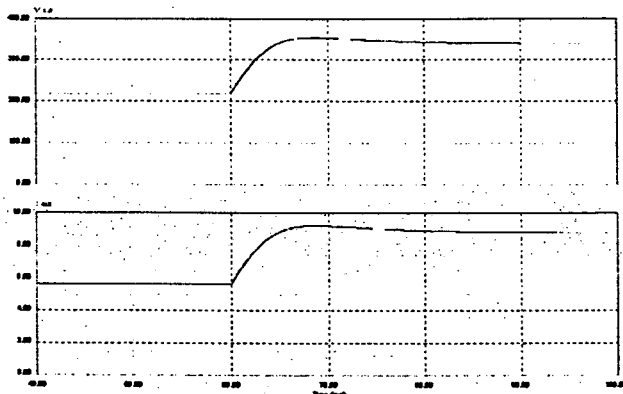


그림 13 일사량 변화시(60% → 100%) 출력파형
Fig. 13 Output wave on varying illuminations

6. 결 론

본 논문을 통하여 태양전지의 가상구현을 위해서 태양전지의 모델링에 대해서 고찰하였으며, 이의 구현을 위해 스위칭 컨버터의 설계 및 특성을 분석 연구하였다. VISC 시스템에 적합한 Buck 컨버터 최대출력 전압을 기준으로 저전압 영역에서는 전류 리플을 키지고 고전압영역에서는 전압, 전류리플이 작아지는 특성을 알았으며, 또한 고전압 영역에서는 오버슈트가 증가된다는 특성과 과도응답시간이 길어져서 VISC시스템의 응답시간을 지연시킨다는 문제점이 있다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 동특성 분석을 통하여 VISC 시스템의 응답시간 속도를 고찰하였다.

향후 연구는 본 논문을 통해서 얻어진 이론과 설계를 바탕으로 PWM컨버터를 이용한 태양전지 가상구현장치의 구현을 실현하는 것이며 실규모 태양전지어레이의 실시간 출력 특성(Real Time Output Characteristics)을 보여주도록 해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Kame Khouzam, Keith Hoffman, "Real Time Simulation of Photovoltaic Arrays", PP. 1~16, 1998.
- [2] Katsumi Ohniwa, Tadao Fujimaki, "Simulator for photovoltaic Solar Cell Module", *T.IEE Japan*, Vol 110, No 4, PP. 361~367, 1990.
- [3] Chihchinag Hua, Chihming Shen, Jongrong Lin, "Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking", *IEEE Trans. on*
- [4] Jae-hyun Yoo, "Analysis and Control of PWM Converter with V-I Output Characteristic of Solar Cell", ISIE 2001.