

태양전지의 전기적 출력 특성을 갖는 PWM컨버터 설계 및 제어

유재현, 한정만, 류태규, 고재석, 목형수, 최규하
 건국대학교 전기공학과

Analysis and Control of PWM Converter with V-I Output Characteristic of Solar Cell

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

ABSTRACT

Solar energy has many advantage like as purity and infinity. Recently many researches about new energy source are processing in several places around the world. 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. Also, Output characteristics of system analyzed through an experiment.

1. 서 론

태양전지는 태양에너지의 조사 상태, 즉 시시각각 변해 가는 기상 에 따라서 발전량 및 동작점이 변동하기 때문에 일정한 조건하에서 연구가 용이하지 않다. 뿐만 아니라, 연구단계에서 발전단지를 조성해야 하기 때문에 매우 넓은 설치장소 및 많은 설치비용이 들게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 태양광발전시스템의 연구에 있어서 실험의 재현성을 부가하여 연구의 생산성을 높이고 실험 데이터의 신뢰도를 확보하기 위해서 태양전지의 PWM 컨버터를 이용한 가상구현장치에 대하여 연구하였다. 가상구현장치에서 적용할 태양전지 모델에 대해서 고찰하였으며, PWM 컨버터에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 고찰하였다. 또한 컨버터의 출력을 실험을 통한 출력 특성 결과를 분석하였다.

2. 태양전지의 특성

태양전지의 출력특성은 크게 온도에 따른 온도특성과, 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 수가 있다. 온도의 변화시는 단락전류는 큰 변화가 없는 반면에 개방전압이 크게 변화하고 있다. 이러한 특성은 태양전지의 가상 구현시 PWM컨버터가 가져야 할 V-I 출력특성이기도 하다. 따라서, 태양전지의 가상구현 장치에서는 일사량과 온도의 변화에 따른 데이터베이스를 갖추어야 한다.

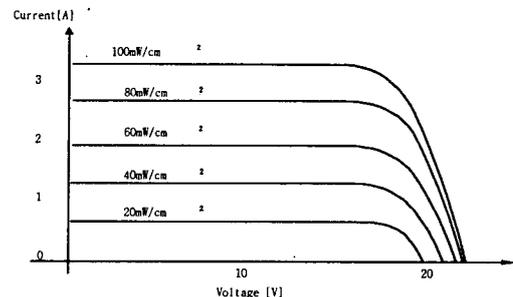


그림 1 일사량 변화에 따른 V-I곡선
 Fig. 1 V-I curve with varying radiation

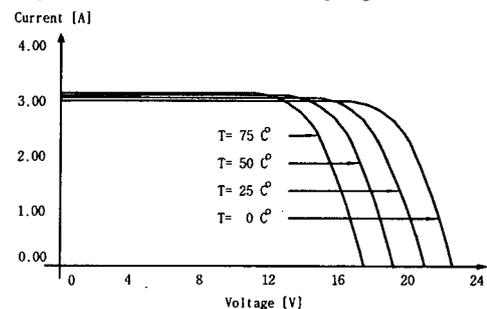


그림 2 온도 변화에 따른 V-I곡선
 Fig. 2 V-I curve with varying temperature

3. 태양전지 모델링

3.1 보간형 모델

태양전지를 가장 손쉽게 수학적으로 모델링하는 방법으로서, 태양전지의 개방전압과 단락전류, 최대 전력점을 실측하여 모델링하는 방법이다. 몇 개의 샘플된 데이터를 보간법에 의해 가장 근사한 출력 특성을 갖도록 설정하여 태양전지의 모델로 쓰게 되는데 여기에는 온도 및 일사량 변화에 따라 출력 특성을 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

3.2 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 3에서 나타내는 바와 같이 광기전력을 전류원으로 나타내고, 이와 역병렬로 다이오드를 연결하여 태양전지를 나타낼 수가 있게 된다.

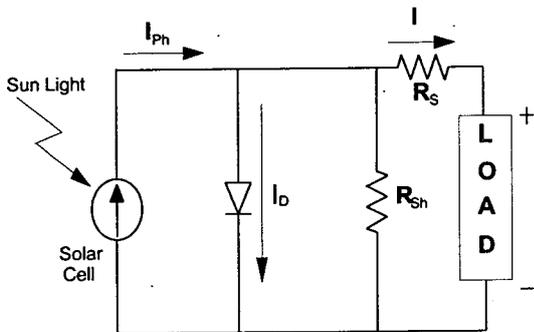


그림 3 태양전지의 등가회로

Fig. 3 Equivalent circuit of solar cell

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

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

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

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

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

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

4. 가상구현의 개념

태양전지의 가상구현장치는 그림4와 같이 구성되며, 실제 태양전지의 특성을 측정하여 데이터로 저장하는 로깅시스템과 제어시스템, 태양전지의 전압, 전류를 출력하는 컨버터로 이루어진다. 이와 같이 태양전지와 같은 특성을 내는 시스템을 VISC시스템이라 한다.

VISC시스템의 운전모드는 실제 태양전지특성 측정모드, 데이터 저장모드, 데이터 분석모드, 가상구현 모드로 구성된다.

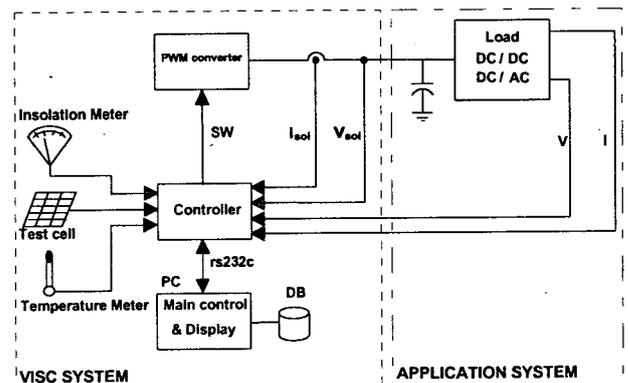


그림 4 PWM 컨버터를 이용한 태양전지의 가상 구현

Fig. 4 Virtual implementation of solar cell using PWM converter

5. VISC 평가 및 설계

5.1 Buck 컨버터

태양전지 가상구현을 위해서는 DC/DC 컨버터의 회로를 갖는 전력변환부가 필요하다. 여러 가지 DC/DC 컨버터가 있지만 쉽게 구현이 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 전압 증폭비에 관련된 식을 얻을 수 있으며 여기서 출력전압과 입력전압에 의해서 정격에서의 듀티비를 계산할 수가 있다. 다음은 스위칭 주파수와 전류의 리플률을 대입하여 시스템을 CCM으로 동작시킬 리액터의 인덕턴스를 식 (9)에 의해 계산할 수가 있으며, 계산 결과 인덕턴스가 너무 크면 스위칭 주파수를 허용되는 범위내에서 조금더 증가시켜 인덕턴스를 낮추도록 해야한다. 마지막으로 식 (10)에 의해 출력단 전압리플률을 대입하여 커패시턴스를 계산할 수 있다.

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

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

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

5.2 컴퓨터 시뮬레이션

VISC시스템에 사용된 Buck컨버터를 시뮬레이션하기 위하여 그림 5와 같이 PSIM을 사용하여 특성을 분석하였다. 시뮬레이션에서는 보간형을 이용하여 태양전지의 출력 전압, 전류를 입력 받아 모델 내에서 제어하도록 한다. 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 서의 전압과 전류이다. 모델추종오차율(ϵ_{mt})은 태양전지 모델을 컨버터의 출력전압 및 전류가 추종하는 정도를 나타내며 모델이 출력하는 지령전류와 컨버터의 출력전류의 오차를 모델 출력전류로 정규화하여 정의하여 식 (13)과 같이 표현한다.

그림 6는 컨버터 및 모델 출력의 전류-전압곡선을 보여주고 있다. 모델출력은 컨버터의 지령치이므로 컨버터의 출력이 이를 추종하도록 해야 한다. 그림 6는 전반적으로 추종을 정확히 하고 있음을 알 수가 있다.

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

여기서, I_{model} ; 출력 전류 지령값

I ; 출력 전류

그림 7, 그림 8은 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 9, 그림 10는 각기 오버슈트와 과도응답특성을 보여 주고 전압 및 전류의 오버슈트는 25[%]이내에 들었으며 반복되는 시뮬레이션동안 큰 변화를 보이지 않았다. 과도응답시간 또한 과도응답시간도 60[ms]로 일정한 응답시간을 보여주었다.

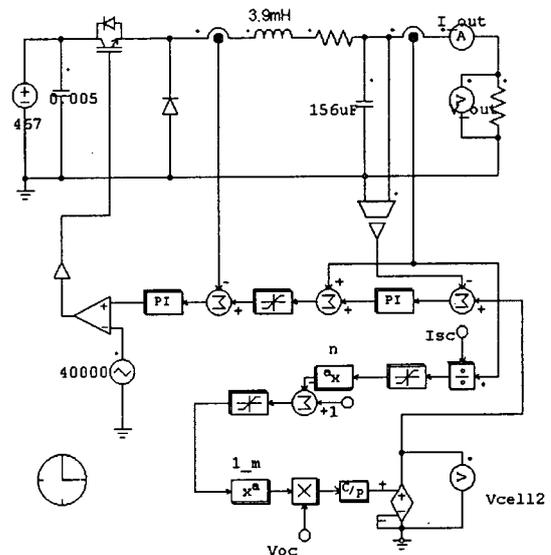


그림 5 Buck컨버터를 적용한 VISC 구성도
Fig. 5 VISC system using buck converter

표 2 Buck 컨버터 정격
Table 2 Buck converter parameter

| 항 목 | 설계값 | 단 위 |
|---------|------|------------|
| 입 력 전 압 | 457 | [V] |
| 정격 용량 | 3000 | [W] |
| 스위칭 주파수 | 40 | [kHz] |
| 인덕턴스 | 3.9 | [mH] |
| 커패시턴스 | 156 | [μ F] |
| 전압 리플 | 5 | [%] |
| 전류 리플 | 5 | [%] |

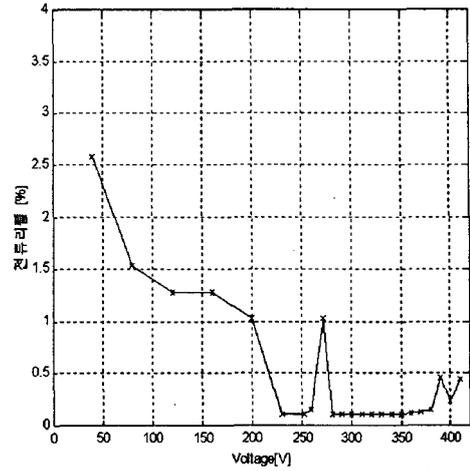


그림 8 전류리플
Fig. 8 Current Ripple

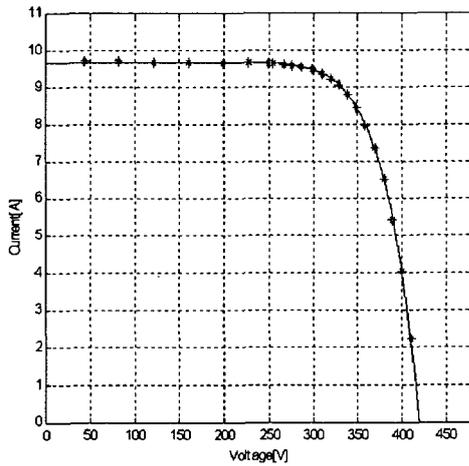


그림 6 태양전지의 V-I 특성 비교
Fig. 6 Comparison of V-I characteristics for solar cell

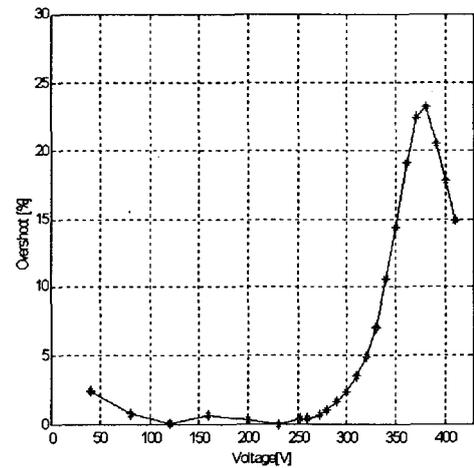


그림 9 오버슈트
Fig. 9 Overshoot

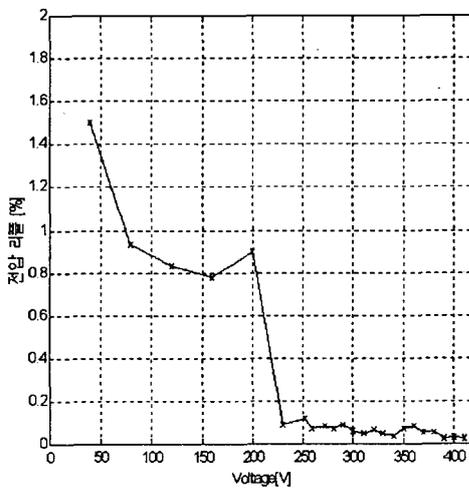


그림 7 전압리플
Fig. 7 Voltage Ripple

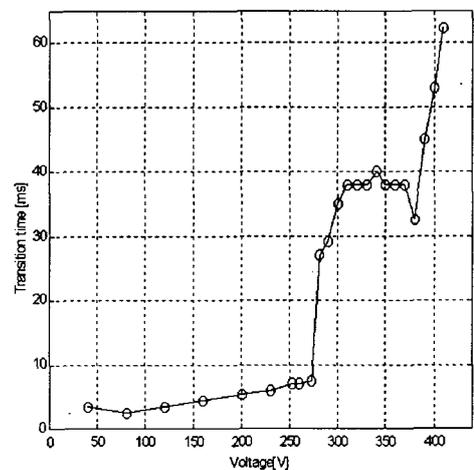


그림 10 과도응답
Fig. 10 Transition response

6. 실험

VISC시스템제작은 설정된 파라미터를 기준으로 벽 컨버터를 제작하였다. 제작된 컨버터의 출력특성을 확인하고 분석하기 위하여 그림 11과 같이 삼성전자 SM-50의 V-I특성곡선과 출력지점을 바꾸어 가며 측정된 실험결과를 비교하였다. 그림 12 (a), (b), (c)는 그림 10의 비교곡선에서의 A, B, C 지점의 출력 전압과 전류 파형을 보여주고 있다.

그림 11에서 저전압 영역에서 약간의 오차가 생기는 것을 알 수 있다. 이 오차에 원인은 듀티비 제한의 따른 오차이다. 그림 13은 그림 10의 비교곡선에서 (ㄱ)에서 (ㄴ)로 출력 변화시켜 그에 따른 응답 시간을 알아보았다. 그림 13에서 출력변화에 따른 응답시간이 대략 8[ms]라는 것을 확인하였다.

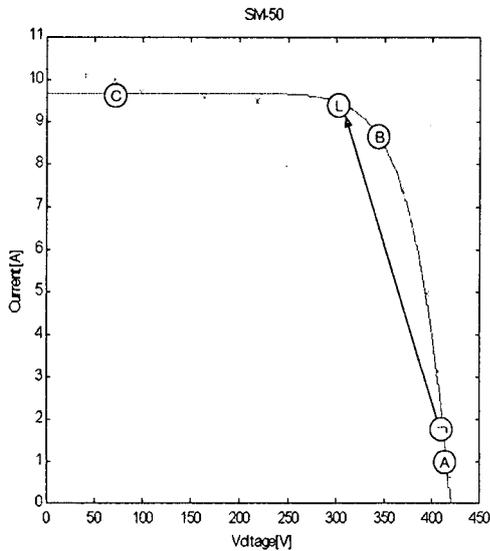
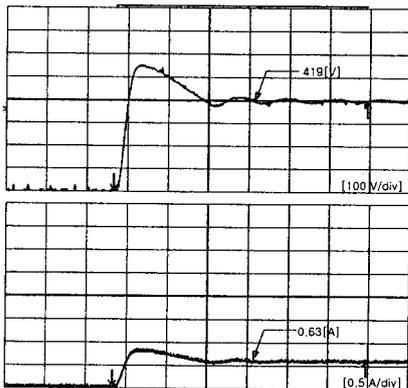
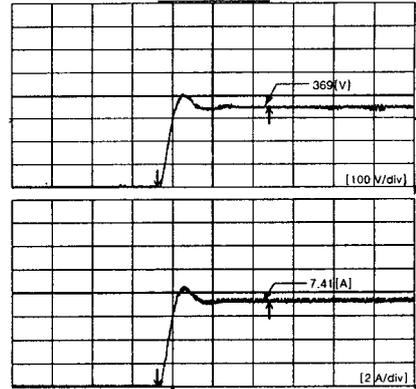


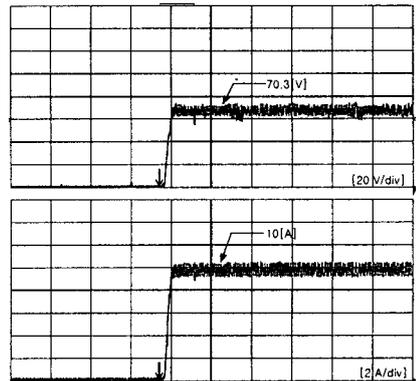
그림 11 실험 결과 비교
Fig. 11 Comparison of experimentation result



(a) A점의 전압, 전류



(b) B점의 전압, 전류



(c) C점의 전압, 전류

그림 12 출력 전압, 전류 파형
Fig. 12 Waveform of output voltage, current

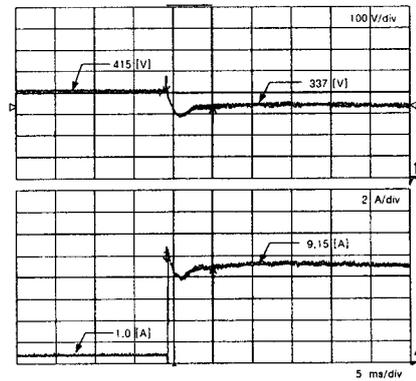
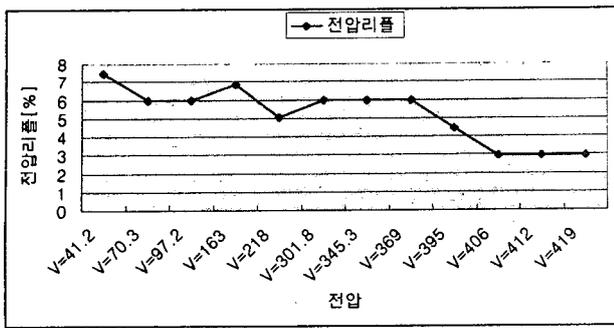
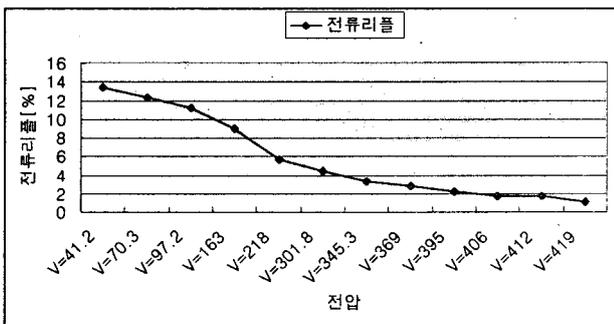


그림 13 출력 변화 파형
Fig. 13 Waveform of output change

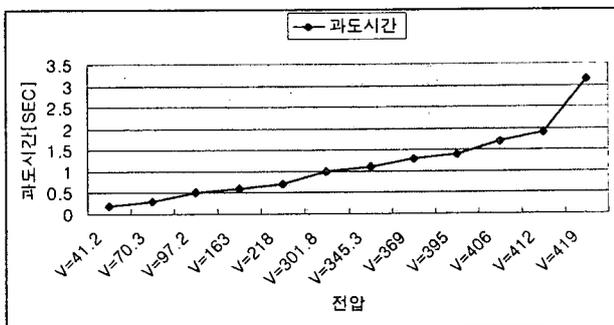
그림 14(a), (b), (c), (d)에서는 실험 결과를 바탕으로 시뮬레이션결과와 같은 방법으로 리플, 과도 시간, 오버슈트를 분석하였다. 출력 실험 파형을 보면 저전압 영역으로 갈수록 시뮬레이션 결과와 같이 리플은 커지고 과도시간과 오버슈트는 감소하는 것을 알 수 있다.



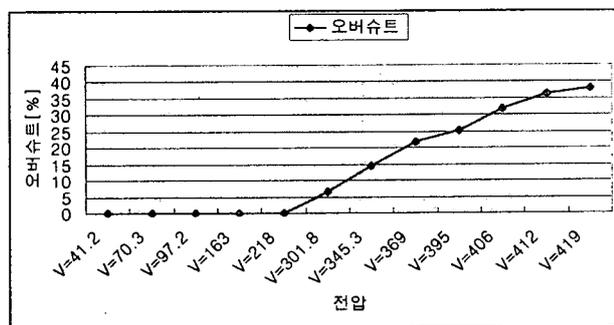
(a) 전압리플



(b) 전류리플



(c) 과도시간



(d) 오버슈트

그림 14 출력 분석
Fig. 14 Output analysis

7. 결론

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 전류리플을 키치고 고전압영역에서는 전압, 전류리플이 작아지는 특성을 알았으며, 또한 고전압 영역에서는 오버슈트가 증가된다는 단점과 과도응답시간이 길어져서 VISC시스템의 응답시간을 지연시킨다는 문제점이 있다는 것을 확인할 수 있었다.

향후 연구는 사용자가 연구실에서 태양전지의 출력특성을 쉽게 분석하고 다양한 태양전지의 출력을 알 수 있도록 통신용 프로그램개발이 필요하다. 또한 VISC 시스템에 신뢰성 검증과 지연되는 응답시간을 최대한 앞당겨 실제 태양전지와 같은 출력특성을 갖도록 해야한다.

이 논문은 에너지관리공단의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

참 고 문 헌

- [1] Karne 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 Industrial Electronics*, Vol 45, No 1, pp. 99~107, 1998.
- [4] J.Merten, J.M.Asensi, "Improved Equivalent Circuit and Analytical Model for Amorphous Silicon Solar Cells and Modules", *IEEE Trans. of Electron Device*, Vol. 45, No. 2, Feb. 1998.
- [5] Mikihiko Matsui, Tatsuya Kitano, "A new maximum photovoltaic power Tracking Control Scheme Based on Power Equilibrium at DC link," *Proceeding of IEEE Industry Application Meeting*, Vol.2, 1999, pp. 804~809
- [6] Jae-hyun Yoo, "Analysis and Control of PWM Converter with V-I Output Characteristic of Solar cell," *ISIE2001*.
- [7] 류태규, "태양전지의 V-I특성 구현을 위한 PWM컨버터의 해석 및 제어," 전력전자학회 학술대회 논문집, 2001, pp. 67~71
- [8] 고재석, "PWM 컨버터-인버터 시스템의 제어기 최적설계," 건국대학교 공학박사 학위논문, 2001.
- [9] 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
- [10] 김홍성, "3상 계통연계형 태양광 발전시스템의 제어기 설계," 건국대학교 공학박사 학위논문, 1988.