

3[kw]급 태양전지 가상구현시스템의 병렬운전

이상용, 정병환, 오방원, 이병인, 최규하
 건국대학교 전기공학과

Parallel operation of VISC system for 3[kw] solar cell

S.Y. Lee, B.H. Jeong, B.W. Oh, B.I. Lee, and G.H. Choe
 Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University

ABSTRACT

Many solar cell array need to be connected by series or parallel to extract the high power. Especially, during parallel operation to reduce circulation current the individual converter has to share and control the load current. Generally, Current Sharing(CS) can be implemented using droop and active current sharing method. In this paper, one 3[KW] PWM converter was replaced as one 3[KW] solar cell array(3 parallels, each parallel has twenty single modules), two 3[KW] solar cell array is paralleled to generate 6[KW] power. Also each converter used voltage-current controller and Automatic MSCPM(Master-Slave Current-programming Method) for current sharing(AS).

1. 서론

태양광발전의 출력특성은 일사량과 온도변화와 같은 기후 조건에 의해 크게 변화하므로 동일조건으로 반복 실험이 불가능하다.^{[1][2]} 따라서 태양전지 가상 구현 시스템은 필수적이다. 또한 태양전지 array의 용량 확대를 위해서 태양전지를 직렬 또는 병렬로 연결하여 사용한다. 병렬연결 시 순환전류를 억제 하기위해 부하전류 분담제어를 한다. 본 연구실에서 3[KW] 태양전지(50W 20개 직렬, 직렬모듈 3개 병렬구조)를 설치하였고 일사량과 온도가 변할 때 실제 태양전지와 같은 출력을 얻기 위해 3[KW] 태양전지 가상구현 시스템을 개발하였다.^[3] 본 논문에서는 이러한 3[KW] 태양전지 가상구현시스템의 용량증대(6[KW])를 목적으로 기준 일사량과 온도(100[mW/cm²], 25[°C])에서 전압-전류 제어기를 갖는 동일한 두 대의 가상구현 시스템의 병렬 운전을 simulation을 통해 수행하였다. 이때 효율적인 각 컨버터 출력전류의 분담제어를 위해 MSCPM (Master-Slave Current-programming Method)를 사용하였다. 그리고 부하변화 시 출력특성을 얻었으며 태양전지 출력과 비교하였다.

2. 태양전지의 특성 및 모델링

태양전지의 전기적 출력특성은 그림 1과 같이 일사량이 증가함에 따라 출력전압과 출력전류가 증가하고 셀의 온도가 높아짐에 따라 출력전류는 증가하고 출력전압은 감소한다. 보간형 모델은 온도 및 일사량 변화에 따라 출력특성을 변화시킬 수 없다는 문제점이 있지만 개방전압(Voc)과 단락전류(Isc), 최대전력점(Vmp, Imp)을 실측하여 모델링 하여 몇 개의 샘플 된 데이터를 보간법에 의해 가장 근사적인 출력특성을 갖도록 설정하여 태양전지의 모델로 상용하게 된다. 식 (1), (2), (3)은 보간법에 의한 모델링 방정식을 근사적으로 나타낸 것이다.

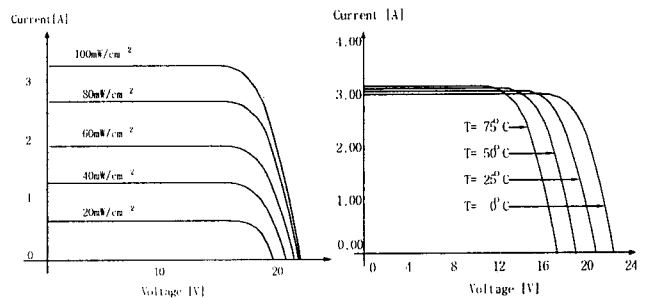


그림 1 태양전지의 일사량과 온도 변화에 따른 출력특성
 Fig. 1 output characteristics of solar cell when the insolation and temperature are varied

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

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

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

여기서, V_{cell}, I_{cell} : 태양전지의 출력전압 및 전류
 V_{mp}, I_{mp} : 최대 전력점 전압 및 전류
 V_{oc}, I_{sc} : 태양전지의 개방전압 및 단락전류
 m, n : 전압상수 및 전류상수

3. 태양전지의 가상구현 시스템

태양전지의 가상구현 시스템은 PWM converter, DSP controller, Data acquisition, Data logger 등으로 구성된다. 가상구현 시스템의 동작은 다음과 같다. 실제온도와 일사량을 센서로부터 센싱하여 얻어진 signal은 부하로부터 feedback된 signal과 함께 DSP controller로 보내진다. PC와 DSP로 동작하는 Controller는 PWM 컨버터의 gate signal을 적절히 조절하여 출력을 조절함으로써 컨버터 동작을 직접적으로 control 한다. 가상구현 시스템의 전력부는 빠른 응답을 갖고 제어하기 쉬운 Buck 컨버터를 사용하였다. 그림 2 과 표 1은 Buck converter 회로도 및 설계 사양을 나타낸다.

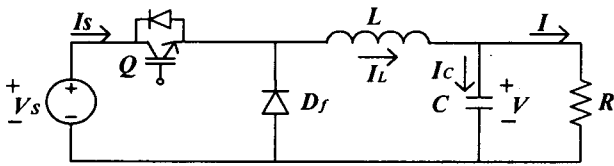


그림 2 Buck 컨버터 회로도
Fig. 2 Buck converter circuit

표 1 Buck 컨버터 설계사양
Table 1 Buck converter design specification

항 목	설 계 값	단 위
입력 전압(Vs)	450-620	[V]
출력 전압(Vo)	420(MAX)	[V]
정격 용량	3000	[W]
스위칭 주파수	20	[kHz]
리액턴스	3	[mH]
커패시턴스	220	[uF]
전압리플	5	[%]
전류리플	5	[%]

4. 병렬운전 및 제어

실제로 각 컨버터의 임피던스와 Line 임피던스 및 특성 차이로 순환전류가 발생할 수 있다. 또한 제어 변수 검출오차 출력필터의 인덕턴스 오차와 같이 여러 가지 요인에 의해 인버터간의 출력전압 불균형을 이루어 항상 순환전류가 존재한다. 그림 3과 식 (4), (5)는 병렬 연결된 DC/DC 컨버터 등가회로와 각부의 전압, 전류를 나타낸다.

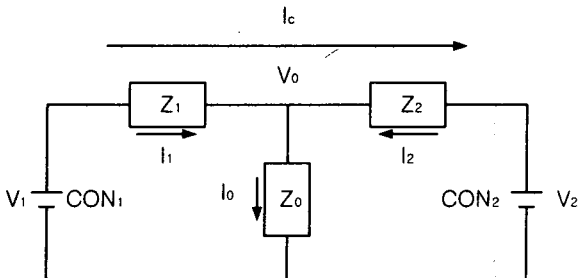


그림 3 병렬 컨버터 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit of paralleled converter

$$I_1 = \frac{V_1 - V_0}{Z_1}, I_2 = \frac{V_2 - V_0}{Z_2} \quad (4)$$

$$I_0 = \frac{V_0}{Z_0}, V_0 = \frac{V_1 + V_2}{2 + \frac{Z}{Z_0}} \quad (5)$$

여기서, V_1, V_2 : 각 컨버터 전압
 Z_1, Z_2 : 선로 임피던스
 I_0, V_0, Z_0 : 공통 전류, 전압, 부하 임피던스
 I_1, I_2 : 각 컨버터 전류
 I_C : 순환전류

이러한 문제를 해결하기 위해 전류분담(current sharing)제어를 해야 한다. 컨버터 병렬 연결방법에는 크게 Droop method와 Active Current-sharing method가 있으며 본 논문에서는 Active current-sharing method 중 각 컨버터의 전압과 전류를 센싱 받아 부하 전류가 같아질 때 까지 출력 전압 루프의 지령치를 전류 프로그램 예러로 조정하고 전류분담 제어 능력이 뛰어나고 병렬연결 시스템에서 많이 사용되는 그림 4의 outer loop regulation을 사용하였다.

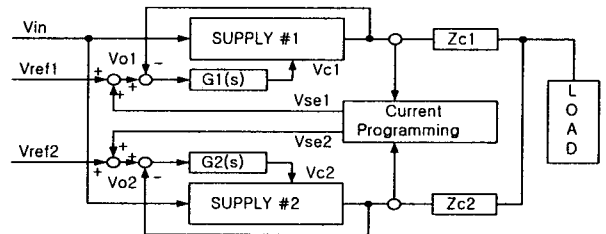


그림 4 외부 루프 regulation
Fig. 4 outer loop regulation

전류 프로그래밍 방법으로 MSCPM (Master-Slave Current-Programming Method)을 사용하였다. MSCPM은 제어기 구조가 단순하고 전류분담 시 과도 특성이 우수한 장점이 있다. MSCPM방식은 그림 5의 Automatic MS Control는 각 컨버터 중 가장 큰 전류를 출력하는 컨버터가 자동적으로 Master로 설정되고 나머지 컨버터가 Slave로 설정되어 전류분담 제어를 하는 방식이다.

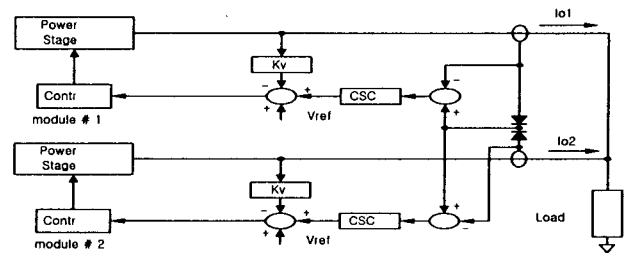


그림 5 Automatic MSCPM을 위한 병렬 블록 다이어그램
Fig. 5 parallel Block diagram for Automatic MSCPM

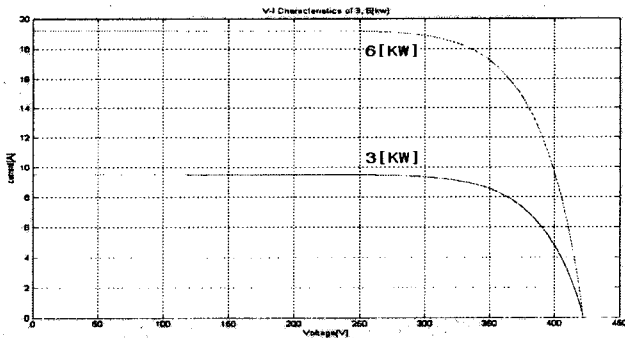
5. 시뮬레이션

지금까지의 모델링과 시스템 설계를 기반으로 기준 일사량과 온도(100[mW/cm²], 25[°C])에서 전압-전류제어기를 갖는 Buck Converter를 Automatic MSCPM 방식에 의해 병렬운전을 시뮬레이션을 통하여 구현해보았다. 표2는 기준 일사량과 온도에서 50W급 태양전지 SM-50을 단위모듈로 한 3[kW]급 태양광발전 시스템과 이를 병렬로 연결했을 때의 6[kW]급(50W 20개 직렬, 직렬모듈 6개 병렬구조) 태양광발전 시스템의 사양을 나타내고 그림 6의 (a)와 (b)는 3[kW] 및 6[kW]의 V-I 와 P-V characteristics를 나타낸다. 그림 6에서 6[kW] curve는 3[kW] 보다 전류가 2배 증가한 형태를 보이며 이는 표2의 사양과 일치함을 알 수 있다. 표 2는 3[kW]와 6[kW]의 태양광발전 시스템의 사양을 나타낸다.

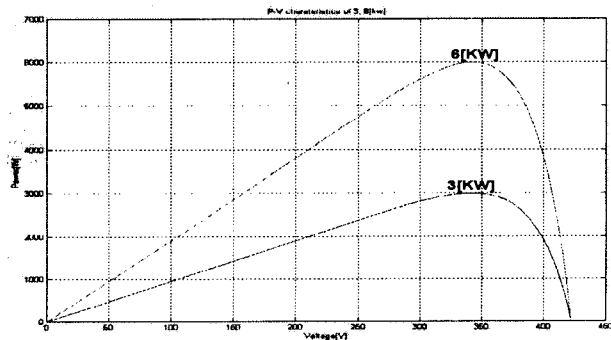
표 2 기준일사량과 온도일 때 3[kW] 및 6[kw] 태양광발전 시스템의 사양

Table 2 Specification of 3 and 6[kw] PV system at reference insolation and temperature

최대전력 (P_{max})	3 [kW]	6 [kW]
최대전력 전류 (I_{mp})	8.76 [A]	17.52 [A]
최대전력 전압 (V_{mp})	342 [V]	342 [V]
단락전류 (I_{sc})	9.51 [A]	19.02 [A]
개방전압 (V_{oc})	422 [V]	422 [V]



(a) I-V 특성곡선
(a) I-V characteristics



(b) P-V 특성곡선
(b) P-V characteristics

그림 6. 기준 일사량과 온도일 때 3[kW]와 6[kW]의 V-I 및 P-V 특성
Fig. 6 I-V and P-V characteristics of 3[kw] and 6[kw] solar cell at reference insolation and temperature

전압-전류제어기를 사용한 병렬연결 된 3[kW] DC/DC 컨버터회로를 그림 7에 나타냈으며 그림 8은 부하전류분담 제어를 위해 Automatic MSCPM를 사용했을 때 부하(R=19.85)가 일정할 때 컨버터 B의 line 임피던스를 A보다 크게 하여 컨버터 A와 B 각각의 출력전류의 과도응답 과 순환전류를 나타낸다. Δi 는 약 0.2[A]로 컨버터 A에서 B로 흐르는 순환전류를 나타낸다. 여기서 가장 큰 출력 전류를 갖는 컨버터가 Master가 되고 자동적으로 나머지 컨버터가 Slave가 된다. 이런 현상에 의해 자동적으로 Master, Slave 상태가 설정된다. 그림 10은 그림 9와 같이 기준 일사량과 온도일 때 MPP(Maximum power point) ③(R = 19.85)에서 순간적으로 ⑥로 다시 ③으로 동작점을 이동시킬 경우 라인 임피던스가 서로 다른 컨버터의 출력전류 그에 따른 출력 전압을 나타내었다. 이때 rising time과 falling time은 각각 11.8[ms]와 8.86[ms]로 나타났다. 그리고 정상상태 출력전압과 전류를 표 3에 정리하였다. 이때 오차는 3%이내인 것을 알 수 있다.

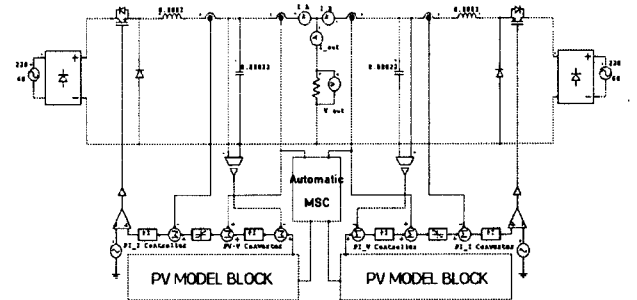
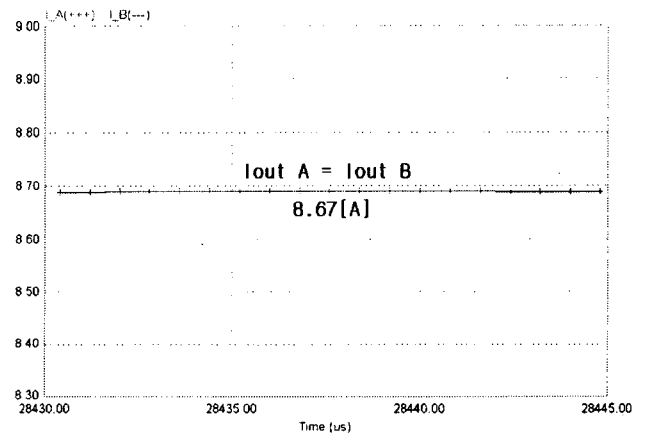
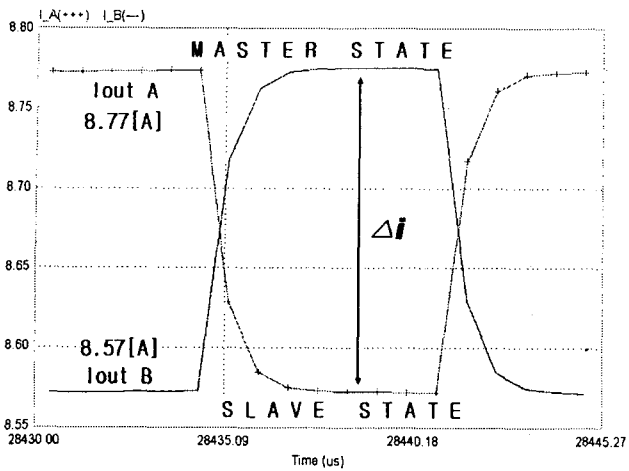


그림 7 Automatic MSCPM을 사용한 전압-전류제어기를 갖는 병렬연결 된 3[kW] DC/DC 컨버터

Fig. 7. Paralleled two 3[kW] DC/DC converters using voltage -current controller with Automatic MSCPM



(a) 동일한 라인임피던스 일 때 각 컨버터 출력전류
(a) Output current of individual converter when identical line impedance



(b) 서로 다른 라인 임피던스일 때 각 컨버터 출력전류
 (b) Output current of individual converter when different line impedance

그림 8 동일한 line 임피던스와 다른 line 임피던스를 갖는 병렬 운전 된 컨버터 출력의 과도응답

Fig. 8 Transient response of output current for two paralleled converters incase of identical and different line impedance

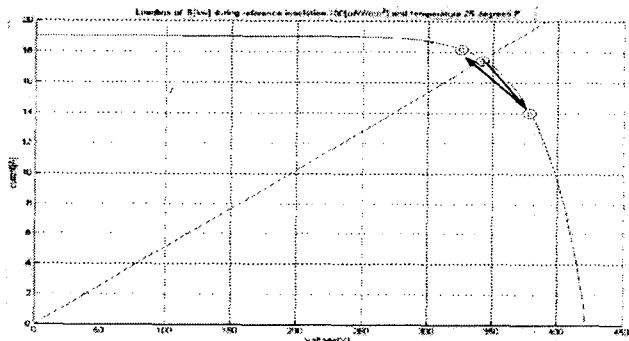


그림 9 기준 일사량과 온도에서 부하변화 시 6[kw]의 I-V 특성곡선

Fig. 9 I-V characteristics of 6[kw] solar cell at reference insolation and temperature

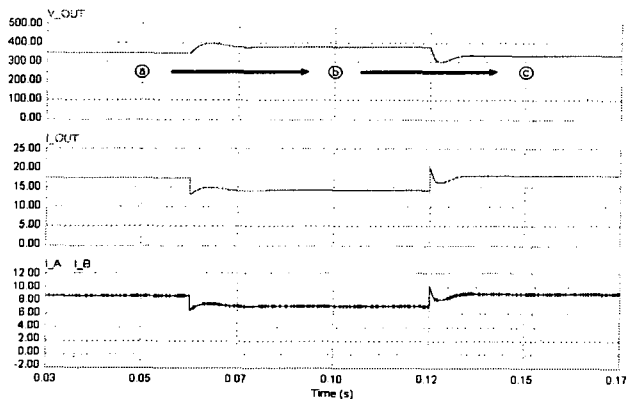


그림 10 기준 일사량과 온도에서 부하 변화 시 라인임피던스가 서로 다른 두 대의 병렬운전 된 3[kw] 태양전지 어레이의 출력

Fig. 10 Output of two paralleled 3[kw] converters with different line impedance at reference insolation and temperature when load is varied

표 3 기준일사량과 온도일 때 부하 변동 시 6[kw] 태양전지 출력

Table 3 Output of 6[kw] solar cell at reference insolation and temperature when the load is varied

6[kw]	① R=19.85[Ω]		② R = 26.5[Ω]		③ R= 18.6[Ω]	
	전압[V]	전류[A]	전압[V]	전류[A]	전압[V]	전류[A]
태양전지출력	345.78	17.59	378.7	14.21	331.2	17.8
전압-전류제어기	344.3	17.34	377.5	14.24	332.8	17.9

6. 결 론

기준 일사량과 온도(100[mW/cm², 온도 25[°C])에서 설정하고 부하를 넓은 범위에서 순간적으로 변화시킬 경우 전압-전류제어기 갖는 두 대의 동일한 3[KW] parallel운전(6[KW])을 simulation을 통해 수행하였다. 이때 각 컨버터의 효율적인 출력전류의 분담제어를 위해 Automatic MSCPM(Master-Slave Current-programming Method)를 사용하였다. Automatic MSCPM(Master-Slave Current-programming Method)를 사용할 경우 부하가 일정하고 각 컨버터의 line임피던스가 다를 경우 각 컨버터간의 순환 전류가 흐르며 이때 가장 큰 전류를 출력하는 컨버터가 Master가 되고 나머지 컨버터가 Slave가 되는 형상을 simulation을 통해 확인하였다. 그리고 기준일사량과 온도에서 부하 변할 때 출력전압과 전류의 변화과형을 simulation을 통해 구현하였다. 두 대의 병렬운전 된 동일한 3[KW] 태양전지 어레이의 정상상태 출력과 6[KW] 태양전지 어레이의 정상상태 출력은 값과 오차가 3%이하로 거의 일치함을 확인하였다. 향후 두 대의 동일한 3[KW] 태양전지 가상구현시스템의 parallel운전의 실험을 수행하며 또한 다수의 3[KW] 태양전지 가상구현시스템의 parallel운전을 수행하여 dynamic 특성과 전류와 전압 추종 특성을 비교 분석해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Fred C Treble, "Generating Electricity from The Sun", pp. 103-124, Oct 1990.
- [2] Martin A. Green "Solar Cells Operating Principles, Technology, and System Application", pp. 79-101, April. 1982.
- [3] Robert F. Pierret, "Semiconductor Device Fundamentals", pp. 195-368, March. 1996
- [4] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2nd Edition, pp. 790-835, 1981.
- [5] Mrig L, DeBlasio R, O'Sullivan G. A, Tomko T., "An advanced PV system simulator to demonstrate the performance of advanced PV cells and devices", Proceeding of 16th IEEE PV Specialists Conference, San Diego, pp. 199-204, 1982.