

태양광 시스템의 부정합 손실 저감을 위한 모듈 전류 보상 기법

안희욱*, 박기엽**

*금오공과대학교 전자공학부(hwahn@kumoh.ac.kr),
**금오공과대학교대학원 전자공학부(camgy1@nate.com)

Compensation of PV Module Current for Reduction of Mismatch Losses in PV Systems

Ahn, Hee-Wook* Park, Gi-Yob**

*Dept. of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology
**Dept. of Electronic Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology

Abstract

A current compensation method to reduce the mismatch loss in PV systems is proposed as a way to increase the power generation efficiency. A dc-dc converter is used to supply currents to irregular modules in a PV string and is powered from the string output. The converter's voltage conversion ratio is adjusted so that all the modules in the string are operated at the maximum power point. The power rating and size of the converter can be reduced since only the current difference between the regular and irregular module may be supplied. The compensated string shows very little voltage mismatch compared to other regular strings. The validity of the proposed method is verified through a simulation and experiments in a prototype PV system.

Keywords : 태양광 시스템(PV system), 부정합 손실(Mismatch Loss), 부정합 보상용 컨버터(Mismatch Compensation Converter), 국지적 최대점(Local Maximum)

1. 서 론

태양광 발전시스템(PV system)은 설치 수량이 증가하고 태양 전지의 가격이 하락하고 있지만 풍력이나 여타 신재생 에너지에 비하여

발전 단가가 여전히 높기 때문에 경제성 확보를 위한 노력이 다방면에서 이루어지고 있다. 그 중의 한 분야는 PV 시스템의 발전 효율을 최대화 시키는 노력인데, 특히 PV 시스템 내의 모듈 간의 전기적 특성 차이로 인한 부정합

Submit date : 2012. 1. 31, Judgment date : 2012. 2. 11, Publication decide date : 2012. 6. 5
Communication author : Ahn, Hee-Wook (hwahn@kumoh.ac.kr)

손실(Mismatch Loss)을 최소화 시키는 기술에 관심이 증가하고 있다.[1-6]

PV 시스템의 기본 구성 요소인 PV 모듈은 모두 동일한 특성을 갖고 있다는 전제하에 시스템을 설계하는 것이 일반적이다. 그러나 모듈의 특성이 서로 다르면, 시스템 전체의 출력 전력이 모듈 각각의 최대전력의 합보다 작아지게 되며, 그 차이를 부정합 손실(Mismatch Loss)이라고 부른다. 모듈 간의 출력 차이의 원인으로는 PV 모듈의 제조공정에서 발생하는 오차, 장기간 사용에 따른 특성 열화의 불균일 등에 의한 전기적 특성의 차이와, 구름이나 나무에 의한 부분적 그림자, 모듈 설치 고도각의 차이, 온도의 차이 등에 의한 작동 조건의 차이를 들 수 있다[1,2].

모듈 부정합은 PV 시스템의 발전 효율을 악화시킬 뿐 아니라 이로 인한 모듈 온도 상승을 유발하여 장기적으로 수명을 단축시키는 요인으로도 작용하므로 부정합을 최소화 시키려는 노력이 이루어져 왔다[3-6]. 분산형 인버터 방식이나 모듈 내장형 인버터, PV 어레이의 직병렬 결선 방법[4] 등과 같은 시스템 차원의 접근 방법과 모듈 내장형 dc-dc 컨버터[5,6] 등이 대안으로 제시되고 있다. 그 중에서 부정합 손실 저감을 위해 PV 모듈에 설치되는 컨버터는 모듈의 전기적 특성을 변환 시키는 방식이 대부분인데 컨버터의 전력 처리 용량이 모듈의 최대전력보다 커야 하므로 크기와 무게, 전력 손실이 증가하게 된다. 그리고 전류가 부족한 모듈의 특성을 변환시켜 전류를 증가 시키면 전압이 감소하고 이에 따라 스트링의 전압이 감소하여 또 다른 부정합을 야기할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 전류가 부족한 모듈에 대하여 부족한 전류만큼을 보상하는 기법을 제안한다.

부정합 현상과 보상 원리를 2장에서 알아보고, 3장에서는 제안된 전류 보상 기법을 설명하며, 4장에서는 시뮬레이션과 실험을 통

하여 그 효과를 확인한다.

2. 부정합 현상과 보상 원리

PV 모듈의 전기적 특성은 광전(Photo-voltaic) 변환 특성, 직렬저항, 병렬 저항과 같은 내부 요소와 입사광량, 온도 등의 외부 요소에 의하여 결정되는데 이것들이 모듈 간에 차이가 생기면 모듈의 최대전력점에 반영되어 나타난다. 특히 최대전력점 전류가 모듈 간에 서로 다르면, 이들이 직렬 연결된 스트링에서 전류는 동일하므로 모든 모듈이 최대전력점에서 동작하는 것이 불가능하게 된다. 이 경우는 전류 부정합 또는 직렬 부정합에 해당하고, 모듈 또는 스트링이 병렬 연결된 구조에서 최대전력점 전압의 불일치가 발생한 경우는 전압 부정합 또는 병렬 부정합에 해당한다. 부정합이 발생하면 모든 모듈이 동시에 최대전력을 생산 하는 것이 불가능하게 되므로 부정합 손실이 발생하게 된다.

직렬 부정합이 발생한 PV 스트링의 전기적 특성을 그림 1에 I-V 곡선과 P-V 곡선으로 나타내었다. 스트링은 전기적 특성이 동일한 정규(Regular) 모듈 7개와 이에 비하여 전류가 부족한 비정규(Irregular) 모듈 1개로 구성된 경우의 예이다. PCU(Power Conditioning Unit)의 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 기능에 의하여 스트링 전력이 최대화 되도록 제어 되고 있는 상황에서 스트링의 동작점은 국지적 극대점 A_s 와 B_s 중의 하나일 것이다. A_s 에서 동작하는 경우, 스트링 전류는 I_A 이고 모듈 전류는 이와 동일하므로 정규 모듈은 A_m 에서 동작하지만 비정규 모듈은 최대 전류가 스트링 전류보다 작기 때문에 바이패스 다이오드가 도통되어 전력 생산을 하지 않게 된다. 스트링의 동작점이 B_s 인 경우, 모듈 전류는 I_B 이고, 정규 모듈과 비정규 모듈의 동작점은 각각 B_m 과 B_m' 으로 된다. 비정규 모듈은 최대전력점 근처에서 동작

하지만 정규 모듈은 최대전력점보다 작은 전력을 생산한다. 결국 동작점 A_s 에서는 비정규 모듈이 활용되지 않고, 동작점 B_s 에서는 정규 모듈이 최대로 활용되지 못하므로 부정합 손실이 발생하게 된다.

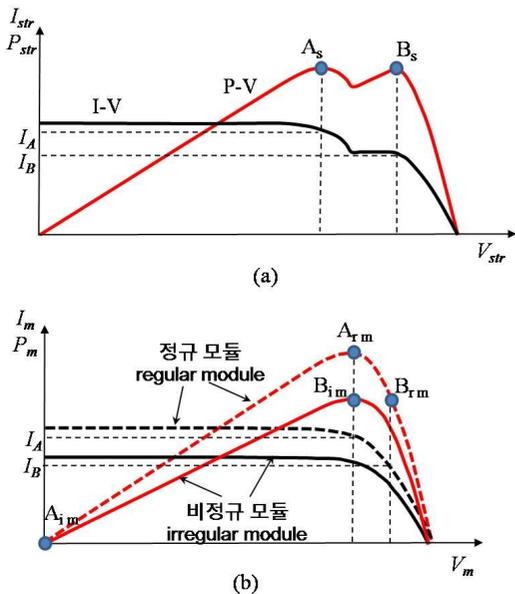


Fig. 1 Characteristic curve of PV string (a) and module (b) in the case of series mismatch

직렬 부정합 손실은 정규 모듈과 비정규 모듈의 최대전력점 전류가 일치하지 않기 때문에 발생함을 알 수 있다. 만약 비정규 모듈의 전류 부족분($I_A - I_B$)을 보상한다면 모든 모듈이 항상 최대 전력을 생산할 수 있을 것이다. 그리고 보상된 모듈의 전압과 정규 모듈의 전압의 차이는 크지 않으므로 해당 스트링의 전압은 정상적인 스트링의 전압과 거의 동일하게 되어 스트링 간의 병렬 부정합이 발생할 가능성이 작아질 것으로 예상된다.

3. 전류 보상 방법

비정규 모듈에 대하여 전류를 보상하는 방법으로서, 그림2처럼 설치되는 dc-dc 컨버터

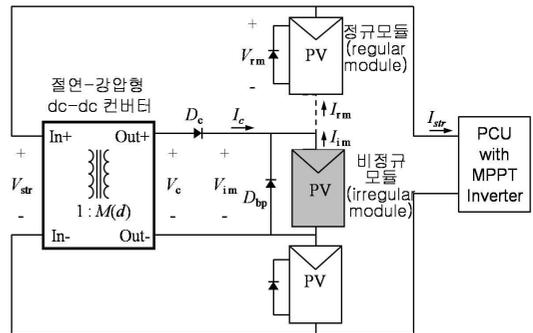


Fig. 2 Circuit diagram for installation of current-compensation converter

가 PV 스트링의 출력으로부터 전력을 공급받아서 비정규 모듈의 전류 부족분을 보상하도록 한다.

3.1 전류 보상을 위한 컨버터

스트링 전압을 비정규 모듈의 전압으로 변환하는 dc-dc 컨버터를 사용한다. 스트링 전압이 모듈 전압 보다 항상 높기 때문에 컨버터는 강압(step-down)형이어야 하고, 스트링 전압의 음극과 모듈 전압의 음극은 전위가 다를 수 있기 때문에 절연(isolation)형이어야 한다. 여러 가지의 강압-절연형 컨버터 중에서, 스트링 전압이 700V 이상인 경우도 많다는 점을 고려하여 스위칭 소자의 전압 스트레스가 작은 두 스위치 포워드 컨버터(Two switch forward converter)가 가장 적합하다고 판단된다. 이것의 전압변환비(Voltage Conversion Ratio)는

$$M(d) = \frac{V_c}{V_{str}} = n \cdot d \quad (1)$$

로 주어지며, 여기서 n 은 변압기의 권선비, d 는 스위칭 듀티(duty ratio)를 나타낸다.

3.2 전류 보상을 위한 컨버터 제어

그림 3(a)에 나타난 바와 같이 비정규 모듈과 정규 모듈의 전류 차이 I_c 만큼을 컨버터가 보상하도록 하기 위하여 컨버터를 제어하는 방법이 필요하다. 그런데 PV 모듈의 전류는 일사 강도(irradiation)에 비례하므로 그

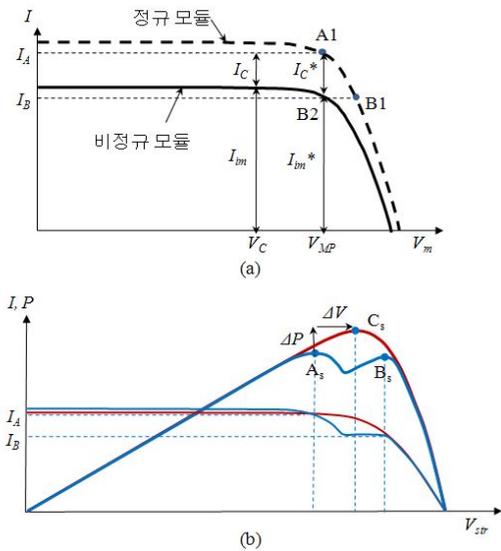


Fig. 3 Variation of operating point by current compensation.
(a) I-V curve of PV module (b) P-V and I-V curve of PC string

크기가 일정하지 않고 일사 조건에 따라 수시로 변한다. 컨버터 출력 전류의 기준치를 설정하려면 모듈의 특성과 일사강도를 알아야 하는데 현실적으로 매우 어려운 문제이다. 그래서 본 논문에서는, 전류 보상이 최적으로 이루어지려면 비정규 모듈이 최대전력점에서 작동되어야 한다는 점에 착안하여, 컨버터의 출력전압이 비정규 모듈의 최대전력점 전압과 동일하게 되도록 제어하는 방법을 적용한다.

일반적으로 PV 스트링에는 동일 정격의 모듈이 사용되고, 모듈의 최대전력점 전압 V_{MP} 는 입사광의 영향을 크게 받지 않기 때문에 비정규 모듈의 최대전력점 전압은 정규 모듈의 것과 동일하다고 볼 수 있으므로, 스트링 전압은

$$V_{str} = m \cdot V_{rm} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 m 은 스트링 내의 직렬 모듈의 수량이다. 식 1과 식 2의 관계로부터 컨버터의 최적 전력변환비는

$$M^*(d) = \frac{1}{m} \quad (3)$$

가 된다. 즉, 컨버터의 최적 듀티는 스트링 내의 모듈 수량에 따라 결정된다는 것을 알 수 있다. 따라서 컨버터의 듀티가 최적치를 항상 유지하도록 하는 방법이 효과적일 것이다.

3.3 보상 효과 분석

최적 보상 후의 스트링의 동작점 C_s 를 보상 전의 동작점 A_s 와 비교하면, 비정규 모듈은 전력을 발생하지 않다가 보상 후에는 최대전력점에서 동작하게 되므로 보상에 의한 전력 증가량은 비정규 모듈의 최대전력에 해당하고 스트링 전압의 증가량은 모듈의 정격 전압과 같아진다.

$$\Delta P = V_{MP} \cdot I_{im}^* \quad (4)$$

$$\Delta V = V_{MP} \quad (5)$$

전류 보상에 의하여 모든 모듈에서 최대전력이 생산되는 상황으로서 부정합 손실이 제거된다는 것을 의미한다. 그리고 국지적 극대점은 하나만 남게 되므로 MPPT 기능이 원활하게 작동될 수 있다. 또한 스트링 전압은 정상적 스트링의 전압과 동일하게 되고 따라서 스트링 사이에 병렬 부정합이 발생할 가능성이 해소되는 효과도 예상할 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션

전류 보상을 위한 컨버터의 듀티를 변화 시킬 때 PV 시스템의 MPPT 기능과 연동 되어 나타나는 효과를 확인하기 위하여 PSpice 시뮬레이션을 실시한다. 시뮬레이션 회로는 그림 4와 같이 계층 구조로 구성하였다. PV 스트링은 표 1의 특성이 나타나도록 Lumped diode 모델[8]을 적용한 모듈 8개를 직렬 연결하고 이 중의 한 개는 비정규 모듈이며 정규 모듈보다 일사강도가 75% 수준이 되도록 하였다. MPPT 기능은 P&O (Perturb and Observe) 방식[9]을 적용하여 스트링 전압을 3V씩 20ms 마다 변화시키면서 최대전력점을 찾아가도록 구성하고, 부하측은 부스트(Boost) 컨버터와

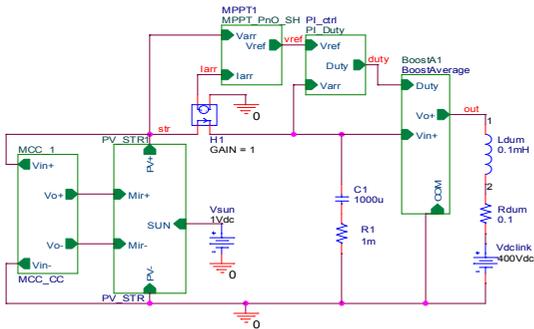


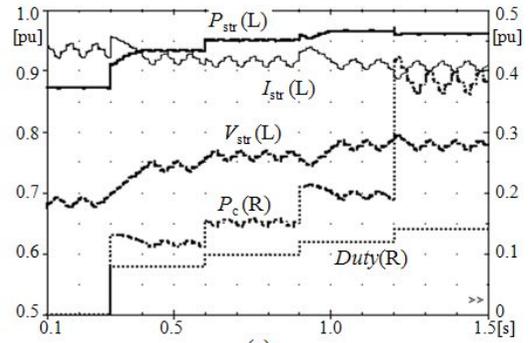
Fig. 4 Block diagram of PSpice simulation circuit

Table 1 Specification of PV system used for the simulation and experiment

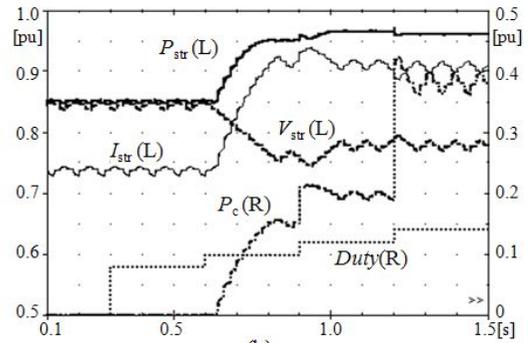
| | Module | String (8 module) |
|-----------------------------|-----------------|----------------------|
| Max. power, P_{max} [Wp] | 175 | 1,400 |
| Rated voltage, V_{mp} [V] | 35.65 | 285.2 |
| Rated current, I_{mp} [A] | 4.91 | 4.91 |
| Open voltage, V_{oc} [V] | 44.5 | 356 |
| Short current, I_{sc} [A] | 5.36 | 5.36 |
| Type of PV cell | Mono C. silicon | |

400Vdc 전압원으로 모델링 하였다. 전류 보상용 컨버터는 직류변압기 모델[7]로 구현하고 이 컨버터의 전압변환비는 듀티와 동일하도록 설정하였다. 시뮬레이션은 듀티를 0, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14 의 순서로 변화 시키면서 진행되었는데 0.12는 식 3을 적용한 최적 전압변환비(1/8)에 근접한 수준이다. 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같고 표 1의 정격치를 기준으로 정규화 시켜 나타내었다.

그림5(a)는 보상 전의 스트링 동작점이 그림3의 A_s 에 해당하는 경우이다. 듀티가 증가함에 따라 컨버터의 전력(P_c)이 증가하면서 스트링 전압(V_{str})은 증가하고 전류(I_{str})는 감소하며 전력($P_{str}=V_{str}*I_{str}$)은 증가함을 알 수 있으며, 듀티가 0.12 일 때, 스트링 전력이 최대로 됨을 알 수 있다. 그림5(b)는 보상 전의 스트링 동작점이 B_s 인 경우이다. 듀티가 0.1 보다 작을 때에는 스트링 전력에 변화가 없다가 그 이상이 되면 전력이 증가하고 듀티가



(a)



(b)

Fig. 5 Simulation results when the current-compensation converter was applied. L: Left axis, R: Right axis. (a) When the initial operating point is A_s (large current, low voltage). (b) When the initial operating point is B_s (small current, high voltage)

0.12 일 때 최대 전력이 발생된다. 따라서 컨버터의 전압변환비를 식 3의 값으로 일정하게 유지하면 보상 전의 동작점과 상관없이 스트링 전력은 최대로 증가하며, MPPT 기능과의 연동이 원활하게 이루어짐을 알 수 있다. 그리고 보상용 컨버터의 듀티가 0.12를 초과하면 스트링 전력은 약간 감소함에도 불구하고 컨버터의 전력이 대폭 증가하는 상황이 발생하는데 이를 방지하기 위하여 듀티를 식 3의 값으로 제한하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

4.2 실험

제안된 전류보상 기법의 효과를 확인하기 위해 실제 PV 시스템에 적용하는 실험을 실시하였다. 사용된 PV 시스템은 표 1의 특성



Fig. 6 Photo of PV string in experiment

을 가진 모듈 8개가 포함된 스트링 한 개와 계통연계형 PCU 한 대로 구성되었고 그림 6 처럼 건물 옥상에 설치되었으며 작은 구름이 조금 있는 맑은 날씨에 실험이 진행 되었다. 부정합 상황을 만들기 위해 모듈 한 개를 반투명 차광막으로 덮었다. 3장에서 언급한 전류 보상용 컨버터를 제작하여 사용하였고 컨버터의 전압변환비는 0.12로 유지하는 상태이다. 각종 전압과 전류를 2.5초마다 동시에 측정하고 이로부터 전력을 계산하여 그 결과를 그림 7의 그래프로 나타내었으며, 실험 조건과 스트링 전력의 변화를 표 2에 정리하였다. 실험은 차광막에 의한 부정합이 발생된 상태에서 컨버터를 중지 시킨 채로 시작하고 (구간 T_1), 컨버터를 작동 시키다가(구간 T_2), 컨버터를 다시 중지 시키는(구간 T_3) 순서로 진행되었다. T_4 구간은 차광막을 제거하여 부정합이 제거된 상황이다. 보상 전의 상태인 구간 T_1 과 T_3 에서 동작 상태가 다르게 나타난 원인은 그림 3에서의 부정합 동작점 B_s 와 A_s 에 각각 해당하는 상황이 우연히 발생한 때문이다.

컨버터가 작동하는 구간 T_2 에서 스트링 전류와 비정규 모듈 전류의 차이를 컨버터에서 보상하고 있음을 알 수 있다. 구간 T_3 에서 컨버터가 중지되었는데도 전류가 흐르는 이유는 컨버터 출력단 회로가 바이패스 통로로 이용되는 현상 때문이다.

공급의 상태를 중심으로, 제안된 보상 기법

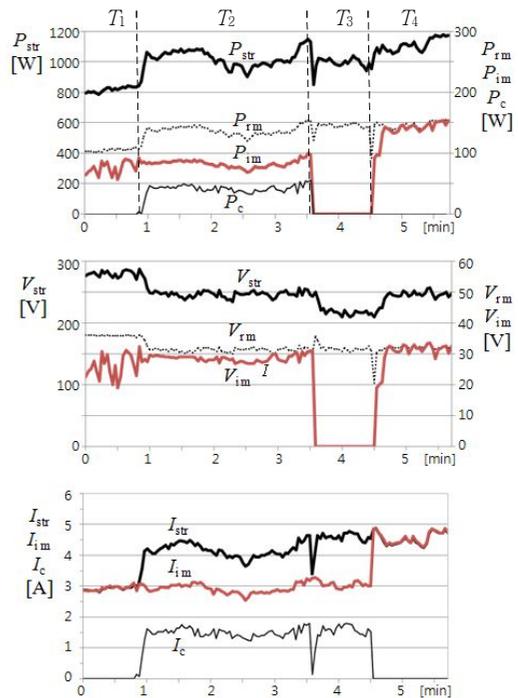


Fig. 7 Experiment waveforms verifying the effectiveness of proposed current compensation technique (top: powers, center: voltages, bottom: currents)

Table 2 Analysis of experimental results

| Time interval | T_1 | T_2 | T_3 | T_4 |
|---------------------|-------|------------|-------|-------|
| Shading | Yes | Yes | Yes | No |
| Converter | off | on | off | off |
| Operating point* | B_s | C_s | A_s | - |
| String power[W]** | 820 | 1050..1130 | 1010 | 1190 |
| Power loss[W] | 230 | - | 120 | - |
| Power loss ratio[%] | 28.0 | - | 11.9 | - |

* Refer to Fig.3(a).

** Values are before and after the state change.

의 효과를 분석하면 다음과 같다:

- (1) 스트링 전력은 T_1 과 T_2 구간에서 28%, T_2 와 T_3 구간에서는 11.9% 만큼 증가함을 알 수 있다.
- (2) 보상 후의 스트링 전압은 250V로서 정상적 스트링의 전압(T_4 구간)과 동일하게 된다.
- (3) 컨버터에서 처리되는 전력(P_c)은 40W 정도인데 이것은 비정규 모듈의 전력(P_{im})

80W 에 비하여 50% 수준에 불과하다.

- (4) T_2 구간에서 구름에 의한 전류의 변화가 나타나는데, 입사광량의 변화 시에도 전류 보상이 적절히 이루어진다.

5. 결 론

PV 시스템에서 모듈 일부의 전류 특성이 악화된 경우에 발생하는 부정합 손실을 저감하는 방법으로서 부족 전류 보상 기법을 제안하였다. 보상용 컨버터와 제어기법을 적용한 결과, 시스템의 전력이 증가하는 효과를 시뮬레이션과 실험으로 확인하였다. 특히, 컨버터의 스위칭 듀티를 일정하게 유지하는 방법이 유효함을 보였다. 그리고 보상 후에 스트링 전압의 감소가 거의 없으므로 스트링 간에 부정합이 발생할 가능성이 줄고, 보상용 컨버터의 전력 처리 용량이 모듈 내장형 컨버터 방식에 비하여 감소하며, 입사광량의 변화에 따른 영향을 받지 않는다는 특성을 확인 하였다.

제안된 기법은 전류 특성이 서로 다른 모듈로 PV 시스템을 구성하거나 장기간 사용에 따라 특성 변화로 인한 부정합 손실이 발생할 때 PV 시스템의 효율 개선 및 경제성 확보에 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원으로 수행 되었습니다.

References

1. N.D. Kaushika, Anil K. Rai, "An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks", Energy 32 (2007) pp.755 - 759.
2. D. Picault, B. Raison, S. Bacha, J. de la Casa, J. Aguilera, "Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch

- losses", Solar Energy 84 (2010) pp.1301 - 1309, www.elsevier.com/locate/solener
3. A.S.Bahaj, R.M.Braid, P.A.B.James, "Post installation optimisation of a building integrated PV system at Southampton University", Conf. Record of 29th IEEE PV Specialists Conference, May 2002, pp.1504 -1507.
4. D. Picault, B. Raison, S. Bacha, J. Aguilera, J. De La Casa, "Changing photovoltaic array interconnections to reduce mismatch losses: a case study", "EEEIC 2010 9th (Int'l Conf. on Environment and Electrical Engineering), Prague, pp.37-40.
5. G. Walker, P. Sernia, "Cascaded DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules", IEEE Tr. on P.E., Vol.19, No.4, pp. 1130-1139, July 2004.
6. Hee-Wook Ahn, "Analysis of Module Mismatch Loss in Solar PV String and Feasibility Study for Improvement Method", J. of Korean Solar Energy Society, Vol.29, No.1, pp.58-63, 2009.
7. R. W. Erickson, Dragan Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics Second Edition", Kluwer Academic, 2001.
8. R.K. Nema1, S. Nema1, G. Agnihotri, "Computer Simulation Based Study of Photovoltaic Cells/Modules and their Experimental Verification", Int'l J. of Recent Trends in Engineering, Vol 1, No. 3, May 2009, pp.151-156.
9. K. S. Phani Kiranmai, M. Veerachary, "Maximum Power Point Tracking: A PSPICE Circuit Simulator Approach", Proc. IEEE PEDS 2005, pp.1072-1077.