

태양광 PV 스트링에서의 모듈 부정합 손실의 분석 및 개선 기법 타당성 연구

안희욱*

*금오공과대학교 전자공학부 부교수, 공학박사

Analysis of Module Mismatch Loss in Solar PV String and Feasibility Study for Improvement Method

Ahn, Hee-Wook*

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

Abstract

In this paper, the power loss due to PV module mismatch in PV string is analyzed and a mismatch compensation method is proposed to improve the efficiency of PV system. The analysis of mismatch loss using PV model simulation reveals that the mismatch module may decrease the total efficiency because the MPPT function of power conditioner make the PV system operate at the local maximum point. The mismatch loss can be severe if the maximum power point current of mismatch module is less than that of string. The proposed compensation method which is simply implemented with a buck type converter shows the possibility to remove the mismatch loss. The effectiveness of the analysis and compensation method is verified by a prototype experiment.

Keywords : 태양광 발전(Solar PV power generation), 모듈 부정합(Module mismatch), 부정합 손실(Mismatch Loss), 효율 제고(Efficiency improvement), 부정합 보상 컨버터(Mismatch compensation converter, MCC)

1. 서 론

최근에 태양광 발전은 청정 에너지이면서 지속가능한 에너지라는 측면에서 사회경제적 중요성을 가지게 되었고 관련 산업과 기술개발을 위한 투자가 급증하고 있다. 그러

나 태양광 발전은 아직까지 다른 종류의 신재생 에너지에 비하여 초기 투자비가 많고 발전단가가 높기 때문에 경제성 확보를 위한 노력이 필요한 실정이다. 고효율의 태양 전지, 제조 비용이 낮은 태양 전지 등 새로운 부품을 개발하려는 노력과 함께 자동추적 방

투고일자 : 2009년 1월 9일, 심사일자 : 2009년 1월 13일, 게재확정일자 : 2009년 2월 5일
교신저자 : 안희욱(hwahn@kumoh.ac.kr)

식이나 냉각 기법 등을 이용하여 PV 시스템 설계 차원에서도 태양광 발전 효율을 개선하려는 기술개발 연구가 진행되고 있다.

태양광 발전 시스템에 사용되는 태양전지는 출력전압이 작기 때문에 여러 개의 태양전지를 직렬 연결한 모듈 형태로 제작 판매되며, 실제 시스템 설치 시에는 부하에 필요한 전력을 확보하기 위하여 다수의 모듈이 직렬 연결된 스트링(String) 구조 또는 직병렬 연결된 어레이(Array) 구조를 설계하여 사용한다. 이 때 사용되는 모듈의 전기적 특성이 균일하다는 전제 하에 시스템을 설계하는 것이 일반적이다. 그러나 시스템 내의 모듈의 전기적 특성이 서로 차이나는 부정합(不整合, mismatch)이 생기면 시스템 전체의 발전 효율이 감소하고 따라서 경제성이 낮아진다는 문제가 있다.¹⁾²⁾³⁾

모듈 부정합의 발생 원인은 다양하다. 모듈에 그림자가 부분적으로 나타나면 단락 전류가 감소하여 전류 부정합이 발생한다. 모듈 설치 초기부터 특성 차이⁴⁾가 있거나, 사용시간 경과에 따른 특성 변화의 차이 또는 모듈 내부의 부분적 파손에 의한 특성 차이 등이 나타날 수 있다. 그리고 일부 모듈의 파손에 따른 교체 또는 발전용량 추가를 위하여 새로운 모듈을 설치하는 경우에, 기존의 것과 동일한 특성의 모듈을 확보하기 어려워 유사한 특성의 모듈을 사용하게 되고 이에 따라 부정합이 발생할 수 있다.

모듈 부정합 문제를 해결하기 위한 방법으로서 모듈 일체형 컨버터 (Module Integrated Converter)가 제안되었다.²⁾³⁾ 이것은 구름에 의한 그림자의 영향을 최소화 시키기 위한 것으로서 부정합 손실을 저감시키기 위하여 스트링 내의 모든 모듈에 컨버터를 설치하는 방법이다. 그러나 모든 모듈에 컨버터를 설치하면 설비 비용이 상승하고 컨버터에서의 전력 손실이 발생하는 문제가 있다.

본 논문에서는 PV 스트링 내의 모듈 부정

합 시의 효율 향상을 위하여, 부정합 손실을 분석하고, 이를 보상하는 기법으로서 부정합의 원인이 되는 모듈에만 컨버터를 설치하는 방법을 제안한다. 그리고 실제 태양광 발전 시스템에 적용한 실험을 통하여 이 기법의 타당성을 확인한다.

2. 부정합 손실 분석

PV 시스템은 그림 1 처럼 스트링 방식으로 구성되는 경우가 많다. PV 스트링에서 직류 전압이 발생하면 전력 변환 장치(Power Conditioning Unit, PCU)에서 부하에 적합한 전압으로 변환한다. 전력 생산 최대화를 위하여 PCU에는 최대 전력점 추적(MPPT) 기능이 포함된다. MPPT 기능은 스트링 내의 모듈이 모두 균일한 전기적 특성을 발휘한다는 전제 하에 모듈 각각이 최대 전력점에서 작동될 때 시스템 전체의 전력이 최대화 되도록 설계한다. 그러나 모듈 간에 전기적 특성 차이가 있는 경우, 즉 모듈 부정합이 있는 경우에는 MPPT가 정상적이라 하여도 스트링의 최대 전력은 각 모듈의 최대전력을 합친 것보다 작아지는데 그 차이를 부정합 손실(mismatch loss)라고 부른다. 이것을 정량적으로 표현하는 방법으로서 단위법(per unit)을 이용하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

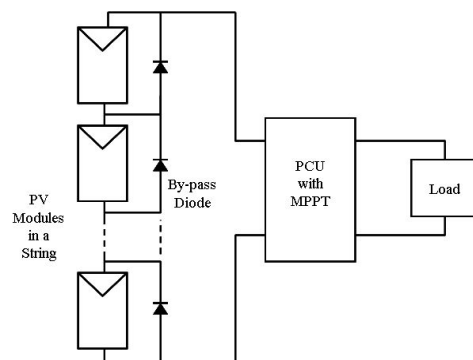


그림 1. PV 시스템의 구성

부정합 손실(ML) =

$$\frac{(\sum \text{모듈 최대전력}) - (\text{스트링 최대전력})}{(\text{정규 모듈의 최대전력})} \quad (1)$$

부정합 손실을 분석하기 위하여 PV cell의 전기적 모델을 이용한 시뮬레이션을 실시한다. PV cell의 모델링은 전류원과 1개의 다이오드, 직류 저항으로 구성되는 모델⁵⁾을 이용한 것이다. 시뮬레이션에 사용된 PV 스트링은 일곱 개의 정규 모듈(Regular Module)과 한 개의 비정규 모듈(Irregular Module)로 이루어진 상태이고, 비정규 모듈의 단락 전류가 부정합된 경우와 개방 전압이 부정합된 경우에 대하여 전력-전류 특성곡선을 구하였다.

그림2(상)은 비정규 모듈의 단락 전류가 정규 모듈의 0.7배인 경우의 P-I 특성이다. 최대전력점(maximum power point, MPP)이 두 곳에 나타나므로 스트링 MPPT가 불안정하게 될 가능성이 있음을 알 수 있다. 동작점이 A인 경우, 정규 모듈은 모두 최대전력점에서 동작하지만 비정규 모듈의 출력은 0이 되고 부정합 손실은 0.74 p.u.이다. 동작점이 B이면 전체 전력은 A의 경우보다 작아지고 부정합 손실은 증가한다. 이 때에는 비정규 모듈은 최대전력점 근처에서 작동하지만 정규 모듈은 최대전력점이 아닌 곳에서 작동하는 상황이다.

그림2(중)의 그래프는 비정규 모듈의 단락 전류가 정규 모듈의 1.2배인 경우이다. 최대전력점은 한 곳 뿐이므로 MPPT가 용이하고, 부정합 손실은 0.08 p.u.로서 작은 편이다.

그림2(하)는 개방 전압 부정합이 0.7인 경우이다. 부정합 손실은 0에 가깝고 최대전력점은 한 곳 뿐이므로 바람직한 특성이다. 스트링에서는 동일한 전류가 모든 모듈에 흐르므로 모듈의 최대전력점 전류가 동일하다면 부정합 손실은 없어지는 상황이다. 전류 부

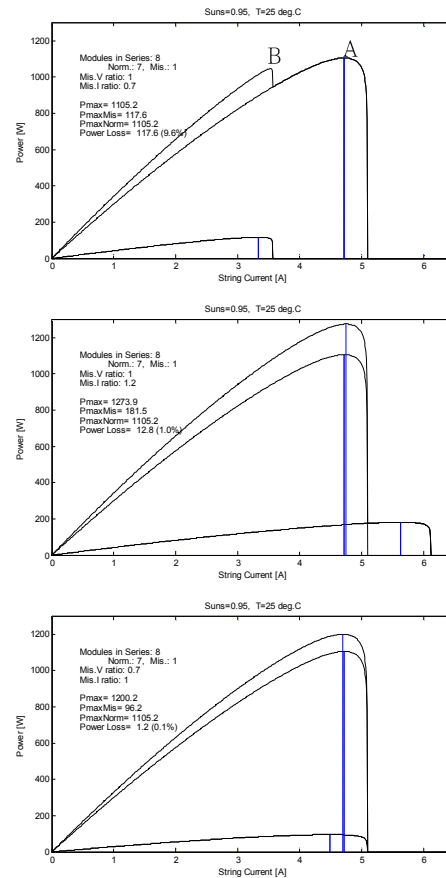


그림 2. PV 스트링에 비정규 모듈 한 개가 포함된 경우의 전력-전류 특성에 대한 시뮬레이션 결과.

- (상) 단락 전류 부정합 비율이 0.7 일 때.
- (중) 단락 전류 부정합 비율이 1.2 일 때.
- (하) 개방 전압 부정합 비율이 0.7 일 때.

정합에 비하여 전압 부정합은 손실 유발 작용이 작다고 볼 수 있다.

3. 부정합 보상 기법

PV 시스템에서 발생한 부정합 손실은 항구적이므로 장기적인 경제성 관점에서 보면 부정합 손실을 최소화 시킬 방안이 필요하다.

앞에서의 손실 분석 결과를 보면 부정합 손실이 가장 큰 경우는 비정규 모듈의 단락 전류가 정규 모듈의 것보다 작을 때이다. 이

것은 정규 모듈의 MPP 전류보다 비정규 모듈의 MPP 전류가 작기 때문에 부정합 손실이 발생하는 상황이다. 만약 두 전류의 크기를 일치시키는 방법을 적용한다면 손실의 감소를 기대할 수 있을 것이다. 참고로 그림2(하)의 시뮬레이션 결과는 전류 부정합 비율이 0.7인 모듈을 전류 부정합 비율이 1로 되도록 변환 시킨 경우에 해당하는 것으로 볼 수 있으므로 부정합 손실 저감 효과를 확인할 수 있다.

스위칭 DC-DC 컨버터의 전류 증폭 기능을 활용한 부정합 보상 컨버터 (Mismatch Compensation Converter, MCC)라는 개념을 도입하면 그림3과 같이 비정규 모듈의 V-I 특성을 변화시킬 수 있다. 최대전력은 동일하게 유지하면서도 MPP 전류를 조정하여 스트링 MPP 전류에 일치시킬 수 있으므로 부정합 보상을 기대할 수 있다.

이러한 기능을 가진 MCC의 구현 방법을 선정할 때 요구되는 사항은, 전류 증폭률이 1 이상일 것, 변환 단계에서 전력 손실이 작을 것, 비정규 모듈의 MPPT를 보장하면서도 스트링 MPPT에 악영향을 주지 말 것 등이다. 이를 고려하여 그림4와 같이 MCC를 구현하였다. DC-DC 컨버터의 종류로는, 입출력 간 절연이 필요 없고, 전류 증폭률이 1보다 크면서 부품 수가 적고 신뢰성과 효율이 높은 백-컨버터(Buck converter)가 적합하다. 모듈 단위의 MPPT 기능을 위해서는, 입력전력 최대화 기법 등의 다양한 방법^(6,7)

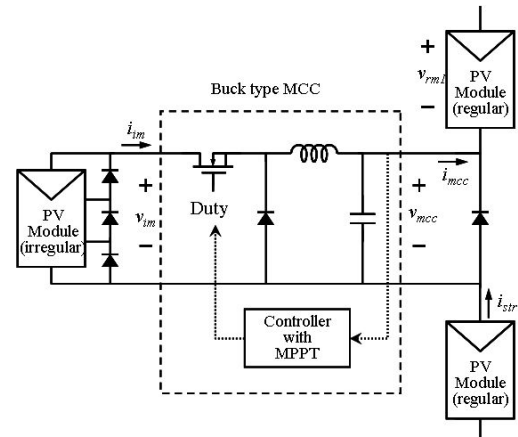


그림 4. 부정합 보상 컨버터(MCC)의 구현 예

중에서 측정 회로가 간단한 출력전압 최대화 기법⁷⁾을 적용한다. 그리고 최적화 기법으로는 기본적인 등고법(Hill-Climing Method)을 적용하며, 스트링 PCU의 MPPT 기능과의 상호 간섭을 피하기 위하여 MPPT 제어 주기를 상대적으로 길게 설정하는 것이 바람직하다.

4. 실험 및 결과 검토

실험에 사용된 PV 시스템은 모듈 8개가 직렬 연결된 스트링 한 개와 계통연계형 PCU 한 대로 구성된 것으로서 그림5 처럼 건물 옥상에 설치되었다. PV 모듈은 최대전력 175W, 최대전력점 전압 35.65V, 최대전력점 전류

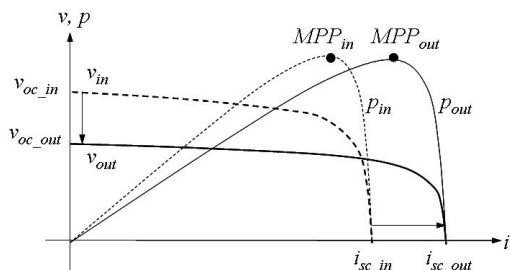


그림 3. MCC에 의한 전기적 특성 변화



그림 5. 실험에 사용된 PV 시스템의 사진. 흰색 모듈은 차광막이 설치된 부분임.

4.91A의 단결정 실리콘 태양전지로 구성된 것이다. 부정합 상황을 만들기 위하여 모듈 한 개에 흰색 반투명 차광막을 설치하였다. 작동 상태를 확인하기 위한 측정은, 모듈 전압, 스트링 전류, 스트링 전압, 컨버터 출력 전압 등을 1초마다 데이터 로거로써 수집하는 방법으로 이루어졌다.

그림6은 차광막의 설치와 제거를 반복할 때의 측정 결과로서 구간 A와 C가 차광막이 설치된 상태이다. 단, 300~550초 구간은 작은 구름이 지나가면서 동작이 불안정한 상황이 나타난 것이다.

먼저 구간 A와 B 사이의 변화를 관찰하면, 스트링 전류는 4.8A로서 차광막의 영향을 받지 않고 거의 동일하며, 출력 전력은 1140W에서 1320W로 증가하였다. 구간 A에서 비정규 모듈의 전압이 0이므로 이 모듈에서는 전력이 전혀 발생되지 않는다. 이것은 그림2(상)의 동작점 A에 해당하는 것임을 알 수 있다. 정규 모듈의 모듈당 전력은 구간 B에서 $1320/8=165W$ 이고 구간 A에서는 $1140/7=163W$ 이다. 출력 전력의 변화량 180W는 모듈당 전력보다 큰 값인데 그 차이는 비정규 모듈에 있는 3개의 바이패스 다이오드가 도통되어 발생된 전력 손실을 반영한다.

구간 C와 D에서의 전력 변화를 보면 1050W에서 1340W로 290W 만큼 증가 하였다. 구간 D에서 모듈당 전력은 $1340/8=168W$ 이다. 차광막이 있는 구간 C에서 비정규 모듈은 $3.5A * 30V=105W$ 만큼의 전력을 출력하고 있음에도 불구하고 전체 전력의 변화량(290W)은 모듈 한 개의 전력보다 더욱 크다. 그리고 정규 모듈의 모듈당 전력을 계산하면 135W로서 최대전력(168W)과는 차이가 크다. 이것은, 그림2(상)의 동작점 B와 같이 PCU의 M PPT 기능에 의하여 local maximum에서 동작하고 있음을 나타낸다. 따라서 비정규 모듈 한 개가 스트링에 존재하는 경우, 전체 전력은 감소하는데 비정규 모듈이 없는 경우보

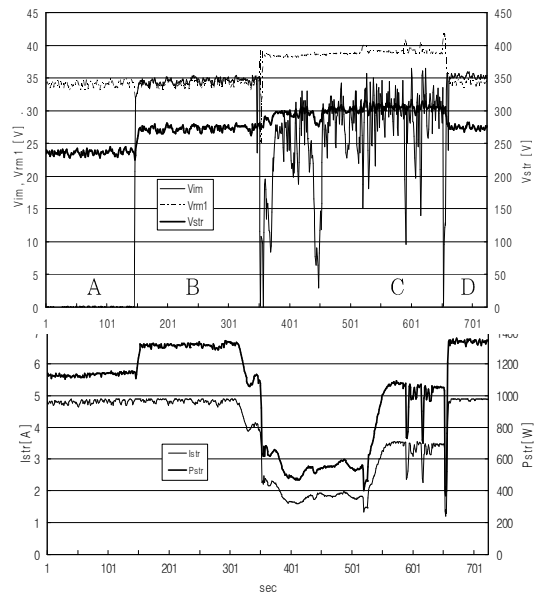


그림 6. 모듈 부정합의 영향을 실험한 데이터 차광막을 설치(A, C), 제거(B, D)할 때.

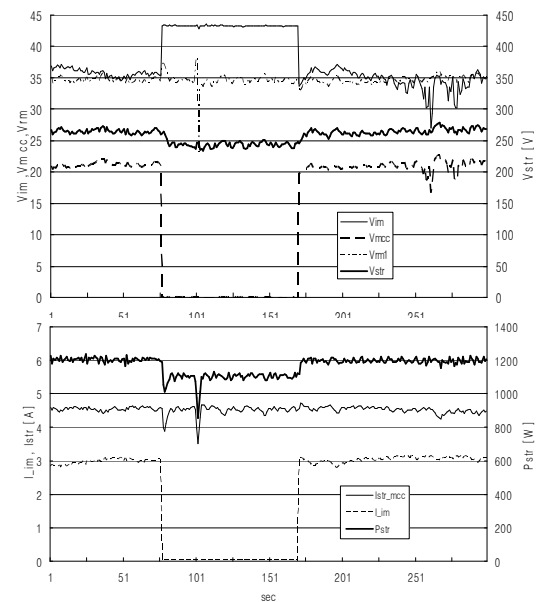


그림 7. 부정합 보상 컨버터(MCC)를 ON-OFF-ON시켰을 때의 효과를 측정된 데이터

다 더 작아질 수 있음을 알 수 있다.

그림7은 MCC의 효과를 측정된 결과이다.

차광막이 설치된 모듈에 그림4 처럼 MCC를 연결한 후에 MCC를 ON, OFF(75초), ON(170초) 시킬 때 스트링 전류의 크기 변화는 거의 없고, 스트링 전압만 변화한다. MCC가 OFF 되었을 때의 전력은 1100W이고 모듈당 전력은 157W이다. MCC가 ON 되었을 때의 전력은 1200W이고 100W 만큼 증가한 결과이다. 비정규 모듈의 최대전력은 정규 모듈의 최대 전력의 64%(100/157)에 해당하며 MCC를 사용함으로써 비정규 모듈의 전력 생산 능력을 활용할 수 있게 됨을 알 수 있다.

5. 결 론

직렬연결된 PV 모듈 중에서 일부 모듈의 전기적 특성이 부정합된 경우에 대하여 전력 손실 가능성을 분석하고 손실저감 기법을 제안하였다. 주요 결론은 다음과 같다:

- (1) 스트링 내의 일부 모듈의 단락 전류 특성이 정규 모듈의 것보다 작을 때 부정합 손실이 심각하게 발생한다.
- (2) PCU의 MPPT 성능 저하를 초래하는 local maximum이 나타날 수 있고, PV 시스템의 최대 가용 전력을 활용할 수 없으므로 경제성을 저하시키는 요인이 된다.
- (3) 비정규 모듈에 부정합 보상 컨버터를 설치하면 부정합 손실을 줄이고 local maximum을 제거하여 최대 전력을 얻을 수 있다.
- (4) 제안된 보상기법은, 태양광 발전시스템의 신규 설치 및 기존 시스템의 유지보수 시에 발전 효율의 유지 또는 향상을 위한 기법으로 활용 가능하다.

참 고 문 헌

1. S.B.Kjaer, K.Pedersen, F.Blaabjerg, "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for PV Modules", IEEE Tr.

- on IA, Vol.41, No.5, pp.1292-1306, 2005.
2. H.R. Enslin, M.S.Wolf, D.B.Snyman and W.Swiegers, "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter", IEEE Trans. Ind. Electronics., vol. 44, pp. 769-773, Dec. 1997.
3. 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.
4. 김경수, 강기환, 유권중, "옥외 설치된 비정질 실리콘 박막태양전지모듈의 전기적 출력 특성 분석", 한국태양학회 논문집, Vol. 28, No. 4, pp.62-67, 2008.
5. G. Walker, "Evaluating MPPT Converter Topologies using MATLAB PV Model", J. of Electrical & Electronics Engineering Australia, Vol.21, pp.49-56, 2001.
6. T. Esram, P.L.Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", IEEE Tr. on Energy Conversion, Vol.22, No.2, pp. 439-449, June 2007.
7. D. Shmilovitz, "On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters," in IEE Proc. Elect. Power Appl., pp. 239 - 248, 2005.