

태양광 모듈의 전압 및 전류 파형을 이용한 부정합 진단 기법

안희욱*, 박기엽**

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

Diagnosis Method of PV Module Mismatch using Voltage and Current Waveforms

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

*Dept. of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology(hwahn@kumoh.ac.kr),
**Dept. of Electronic Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology(camgy1@nate.com)

Abstract

Techniques for mismatch loss minimization to increase the PV system efficiency are under development recently. In this paper, a method to make diagnosis of PV module mismatch is presented, which uses a concept of operating point factor. The method is based on the fact that the ratio of the incremental conductance of a PV module to instantaneous conductance is 1 when the module is operating at its maximum power point. The variations of module voltage and current are taking place by the maximum power point tracker in the power conditioning units of PV system. The effectiveness of the method is verified through an application to a real PV system.

Keywords : 태양광 발전 시스템(PV system), 모듈 부정합(Module mismatch), 부정합 진단(Diagnosis of Mismatch), 동작점 계수(Operating Point Factor)

1. 서 론

신재생 에너지에 대한 사회적 경제적 요구에 따라 태양광 발전시스템(PV system)의 설치량이 증가하고 있다. 시장의 확대와 기술 발전 덕분에 태양 전지의 가격이 하락하고 있지만 풍력이나 여타 신재생 에너지에 비하여 발전 단가가 여전히 높기 때문에 태양광 시스템의

경제성 확보를 위한 노력이 이루어지고 있다. 특히 PV 시스템의 발전 효율을 최대화 시키는 기술에 관심이 증가하고 있다.[1-7]

PV 시스템의 기본 구성 요소는 PV 모듈과 전력조절장치(PCU: Power Condition Unit)이다. 모듈은 정격 전력이 크지 않으므로 대규모 발전을 위해서는 다수의 모듈이 직렬 및 병렬 연결된 PV 어레이 구조를 형성하며, PCU

투고일자 : 2011년 3월 8일, 심사일자 : 2011년 4월 8일, 게재확정일자 : 2011년 5월 3일
교신저자 : 안희욱(hwahn@kumoh.ac.kr)

에는 최대전력점 추종 (MPPT: Max. Power Point Tracking) 기능이 필수적으로 구비되어 있어 어레이에서 최대 출력이 발생되도록 제어한다. 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[1].

부정합이 발생하는 원인으로는 태양 전지와 모듈의 제조공정에서 발생하는 오차, 장기간 사용에 따른 특성 열화의 불균일, 오염 등에 의하여 발생하는 전기적 특성의 분산과, 구름이나 나무에 의한 부분적 그림자, 모듈 설치 고도각의 차이, 온도의 차이 등에 의하여 발생하는 환경의 불균일성을 들 수 있다 [1,2]. 이런 원인들이 단독으로 또는 복합적으로 작용하여 동일 제조 모델의 모듈이라도 특성은 다양하게 나타날 수 있다. 그리고 모듈의 일부 파손이나 특성이 다른 모듈의 의도적 혼합 사용도 부정합의 원인이 될 수 있다.

모듈 부정합은 PV 시스템의 발전 효율을 악화시킬 뿐 아니라 이로 인한 모듈 온도 상승을 유발하여 장기적으로 수명을 단축시키는 요인으로 작용하므로 부정합을 최소화 시키려는 노력이 이루어져 왔다[3-7]. 비용 및 신뢰성을 고려한 경제성이 우수하고 구조가 간단한 중앙집중식 인버터(Central Inverter) 방식이 많이 사용되고 있지만 분산형 인버터 방식[4], PV 어레이의 직병렬 결선 방법[5], 모듈 내장형 dc-dc 컨버터[6,7] 등이 대안으로 제시되고 있다. 그러나 PV 시스템이 설치되어 운전 중일 때 발전 성능을 진단하는 방법에 대해서는 아직 많은 연구가 이루어지지 않고 있다. 개별 모듈의 특성을 독립적으로 시험하여 성능을 판단할 수 있지만 정상적인 모듈 일지라도 스트링 내에서 동작할 때에는 부정합에 의하여 최대전력점에서 동작하지 않을 수도 있다.

본 논문에서는, PV 시스템이 운전 중일 때 PV 모듈의 부정합 발생 여부를 진단하는 방법으로서, 모듈 전압과 전류의 파형을 분석하는 방법을 제안한다. 모듈의 동작상태를 나타내는 동작점 계수라는 개념을 정의하여 모듈의 동작상태를 나타내고 부정합 상태를 나타내는 지표로 활용한다. 제안된 기법을 실제 태양광 시스템에 대한 적용하여 그 타당성을 확인한다.

2. 모듈의 I-V 곡선과 전압/전류 파형의 관계

PV 모듈의 전기적 특성은 그림1 처럼 단일 다이오드 회로 모델로 나타낼 수 있고 이것으로부터 출력 전류와 전압의 관계를 구하면 식 (1)처럼 표현된다.

$$I = I_{ph} - I_o \cdot \left\{ \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

여기서 $V_t = \frac{N_s \cdot a \cdot k_b \cdot T}{q}$ 이고 I_o : p-n 접합의 역방향 포화 전류, N_s : 직렬 연결 전지의 수, T : 온도, a : 다이오드의 ideality factor, k_b : 볼츠만 상수, q : 전자의 전하량이다.

PV 모듈의 특성을 나타낼 때에는 그림2와 같은 I-V곡선을 이용하는 경우가 많다. 모듈의 특성은 식(1)에서 처럼 직렬저항(R_s), 병렬저항(R_{sh}), 입사광량(I_{ph}) 등의 파라미터에 의하여 결정되는데 이들이 제조공정이나 열화 과정에서 차이가 생기면 모듈의 특성에 반영되어 나타난다. 특히 최대전력점 전압과 전류가

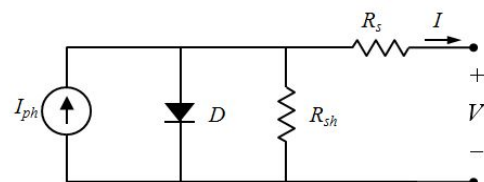


그림 1. PV 모듈의 단일 다이오드 회로 모델

모듈 간에 서로 다르면, 이들이 직렬 연결된 스트링에서 전류는 동일하므로 모든 모듈이 최대전력점에서 동작하는 것이 불가능하게 된다. 따라서 모듈에서의 부정합 손실, 즉 모듈의 최대전력과 실제 발생하는 전력의 차이가 발생하게 된다.

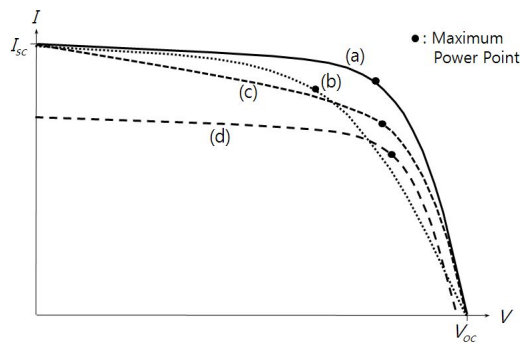


그림 2. PV 모듈의 성능 저하에 따른 I-V 곡선의 특성 변화. (a) 정상 모듈, (b) 직렬 저항의 증가, (c) 병렬 저항의 감소, (d) 입사광 감소

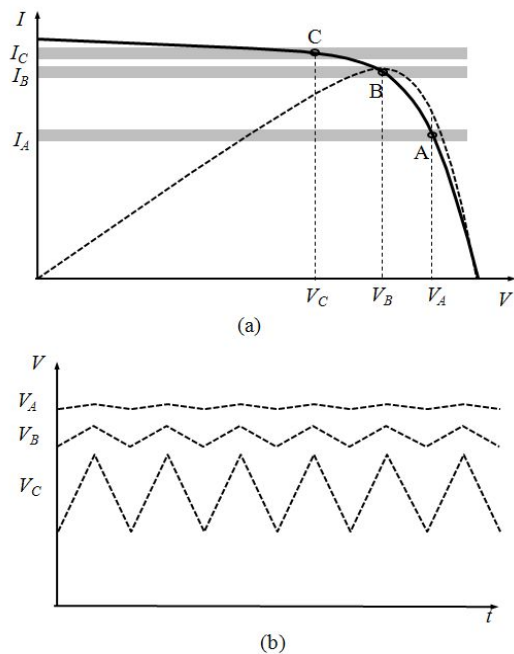


그림 3. 도식화된 PV 모듈의 동작점 위치와 전압 파형의 관계. (a) I-V 곡선 상의 동작점의 위치. (b) 전압 파형의 변화

PV 모듈의 출력 전압과 전류는 I-V 곡선 상의 동작점으로 표시할 수 있는데 이것은 PCU의 MPPT 기능에 의하여 결정된다. MPPT 기법은 다양하지만 일반적으로 P&O (Perturb and Observe) 방식을 바탕으로 하며, 이것은 어레이 전압 또는 전류를 조금씩 변화시켜 가면서 최대전력점을 찾아간다[8]. 이 과정에 의하여 어레이 전압 즉, 스트링 전압은 지속적으로 소폭의 변화를 반복하게 된다. 이것은 스트링 전류, 즉 모듈 전류의 변화로 나타나고 모듈의 동작점을 결정하게 되므로 모듈의 전압 변화량은 모듈의 I-V 곡선 상의 동작점의 기울기에 의해 결정된다. 그림3은 전류의 변화폭이 일정할 때 전압의 변화폭이 동작점 위치에 따라 결정되는 관계를 보여 준다. 동작점 위치가 MPP의 좌측이면 모듈 전압의 변화폭이 크고, 우측이면 변화폭이 작게 나타남을 알 수 있다. 따라서 모듈의 전류와 전압의 파형을 분석하면 최대전력점에서의 동작 여부, 즉 부정합 발생 여부를 판단할 수 있을 것이다. 스트링을 구성하는 PV 모듈의 I-V 곡선이 모두 동일하면 각 모듈은 MPP에서 동작하고 전압 파형의 변화폭이 같을 것이다. 그러나, 모듈의 I-V 곡선이 동일하지 않고 부정합이 있는 경우에는 전압 파형의 변화폭이 서로 다르게 나타날 것이다.

3. PV 모듈의 동작점 계수

부정합이 생기면 모듈의 동작점은 MPP에서 벗어나게 되는데 이것을 정량화하기 위하여 전압과 전류의 파형을 이용하는 방법을 모색한다. MPPT 방법 중의 하나인 증분 컨덕턴스 (Incremental conductance) 방법에서 이용되는 PV 모듈의 최대 전력 조건은 다음과 같다[9]:

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (2a)$$

$$\text{또는} \quad \frac{dI}{dV} = \frac{-I}{V} \quad (2b)$$

이것은 PV 모듈의 순시치 컨덕턴스의 크기와 증분 컨덕턴스의 크기가 같아질 때 최대 전력이 발생한다는 것을 나타낸다. 즉, 모듈 전류와 전압의 파형에서 변화량의 비율이 크기의 비율과 같을 때 모듈은 MPP에서 동작한다는 의미이다. 이 조건이 성립되지 않으면 부정합 손실이 발생되고 있음을 나타낸다. 이를 활용하여 다음과 같이 동작점 계수를 정의한다:

$$k = \left| \frac{dI/dV}{I/V} \right| \quad (3)$$

실제 모듈의 I-V 곡선으로부터 동작점 계수를 산출하여 그림4에 나타내었다. 전압, 전류, 전력은 각각 모듈의 개방 전압(Voc), 단락 전류(Isc), 최대 전력(Pmax)을 기준으로 정규화 시킨 값을 사용하였다. 이것을 참고하여 부정합 계수의 특성을 살펴보면 다음과 같다:

- (1) $k=1$ 이면 MPP에서 동작하고 있으며 부정합 손실은 생기지 않는다.
- (2) $k < 1$ 이면 동작점이 MPP의 왼쪽에 있어서 전압은 낮고 전류는 크며, $k > 1$ 이면 그 반대이다.
- (3) 동작점 계수가 1에서 멀어 질수록 출력 전력은 작아지고 부정합 손실이 증가한다는 것을 나타낸다. 예를 들어 동작점 계수가 0.1인 경우와 3.0인 경우, 전력은 0.82 p.u.이므로 부정합 손실은 $1-0.82=0.18$ p.u. 이고 손실율이 18%라는 의미이다.
- (4) MPP 근처에서는 전력 곡선의 변화가 완만하므로 $0.5 < k < 1.5$ 이면 부정합 손실이 5% 이하의 매우 작은 수준이라고 진단할 수 있다.
- (5) 모듈 특성의 변화에 의하여 I-V 곡선의 모양이 달라지는 경우, 위의 성질은 변함없지만 (3)과 (4)에서의 수치는 영향을 받게 된다.

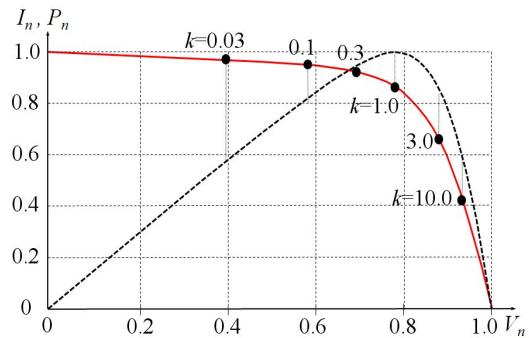


그림 4. PV 모듈의 정규화된 I-V 곡선에서 동작점 위치와 동작점 계수의 관계 (150 Wp 모듈의 경우)

전압, 전류의 파형으로부터 동작점 계수를 산출하기 위해서는, 전압과 전류의 측정이 동시에 이루어져야 하며, 측정된 데이터를 이용하여 다음과 같이 계산 한다:

$$k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_j \quad (4)$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{I_j - I_{j-1}}{V_j - V_{j-1}} \right| \frac{V_j}{I_j}$$

여기서 V_j 와 I_j 는 j 번째 샘플링의 전압과 전류 측정치이며 n 은 샘플링 수이다. 새로운 측정 데이터가 생길 때마다 동작점 계수를 계산하고 이들의 평균치를 최종적으로 사용함으로써 측정 잡음이나 매우 작은 전압 변화에 의한 민감한 반응을 방지할 수 있다.

4. 실제 시스템 적용 예 및 활용 방안

동작점 계수를 이용한 부정합 진단 기법을 실제 PV 시스템에 적용하였다. 적용 대상인 태양광 발전소는 운전 시작 후 2년이 경과한 것으로서, 150Wp 단결정 실리콘 태양전지 모듈이 17직렬*196병렬 구조의 어레이를 구성하며 한 개의 인버터에 연결되어 있다. 동일 스트링 내의 모듈들에 대하여 전압/전류 파

형을 측정하고 동작점 계수를 산출하였으며, 이것과 모듈의 I-V곡선을 비교함으로써 동작점 계수와 부정합 손실의 관계를 분석하였다.

모듈 전압과 전류의 파형 측정을 위하여 5 초 마다 17개소의 전압과 1개소의 전류를 동시에 측정할 수 있는 무선 데이터 로거를 제작하여 사용하였다. 측정은 2010. 10. 28. 12시 경의 쾌청한 날씨에 이루어졌고, 측정된 전압 파형 중에서 특성의 차이가 확인한 것 4개를 선정하여 전류 파형과 함께 그림5에 나타내었다. 선정된 모듈의 I-V 곡선을 구하기 위하여 모듈을 시험실로 옮겨 표준 시험조건 (STC: 1000W/m², 25°C, 1.5AM)에서 측정을 실시하고 그 결과를 파형 측정 시의 표면 온도(45 °C) 및 경사 일사량(950W/m²)으로 보정을 실시하였다. 그림6에는 모듈 4개의 I-V

표 1. 실제 운전 중인 모듈의 동작점 계수와 부정합 손실 분석 결과

항목 \ 모듈	m1	m2	m3	m4
동작점 계수, k	2.86	1.95	0.93	0.36
동작점 평균전압[V]	35.3	33.4	33.6	24.6
동작점 평균전류[A]	3.27	3.27	3.27	3.27
전력 평균[W]	115.4	109.2	109.9	80.4
보정 최대 전력[Wp]	134.1	119.1	110.6	102.7
부정합 손실율 [%]	13.9	8.3	0.6	21.7

곡선을 함께 나타내고, 전류 파형 측정치의 동작 범위(ΔI)를 표시해 두었다. 그리고 전압, 전류 파형의 데이터를 식(4)에 적용하여 산출한 동작점 계수와 아래 식으로 계산한 부정합 손실율을 표1에 나타내었다.

$$\text{부정합 손실율} = \frac{\text{최대 전력} - \text{평균 전력}}{\text{최대 전력}}$$

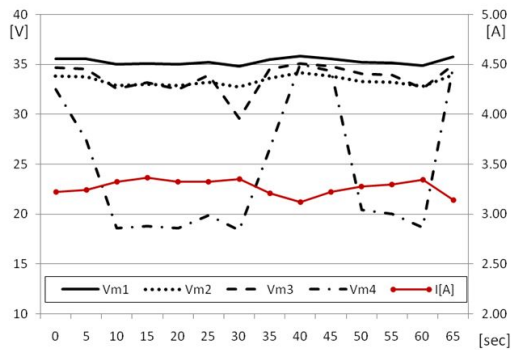


그림 5. 실제 시스템에서 측정된 모듈 4개의 전압 및 스트링 전류의 파형

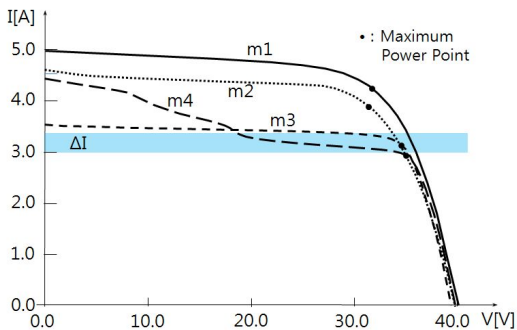


그림 6. 실제 시스템에 사용된 모듈 4개의 I-V 곡선

동작점 계수와 부정합 손실율의 관계를 살펴 보면, 3절에서 언급한 바와 같이, $k=0.93$ 인 모듈 m3은 손실율이 0.6% 이므로 MPP에서 동작하고 있음을 알 수 있고 이것은 그림6에서 m3의 동작점이 MPP에 매우 가깝다는 사실에서도 확인 된다. 동작점 계수가 1보다 클 수록(m1과 m2) 또는 작을 수록(m4) 부정합 손실이 증가하는 경향도 볼 수 있다. 그림5의 파형에서 보면 m1과 m2가 정상적으로 동작되는 듯 보이지만 정량적 분석을 적용해 보면 MPP에서 동작하고 있지 않음이 나타난다. 이런 모듈의 경우, I-V 곡선을 측정하여도 부정합 발생 여부를 판단하기가 쉽지 않다. 따라서, 동작점 계수를 활용하면 비록 부정합 손실의 정확한 산출에는 한계가 있지만 부정합 발생 여부 효과적으로 진단 할 수 있게 된다.

5. 결 론

동작되고 있는 PV 모듈의 전압과 전류 파

형을 분석하고 동작점 계수를 산출하여 PV 모듈의 부정합 상태를 진단하는 기법을 제안하였다. 이것을 실제 PV 시스템에 적용한 결과, 모듈의 동작점 계수가 대략 0.5와 1.5 사이의 값이면 모듈의 최대 전력에 근접한 전력이 발생되며 1에서 멀어질수록 부정합 손실이 증가한다는 관계를 확인하였다. 개별 모듈에 대하여 전압과 전류의 파형을 측정하고 분석함으로써 전체 시스템의 부정합 상황을 판단할 수 있으므로, 제안된 기법은 운전 중인 PV 시스템의 발전 성능 진단과 모니터링 및 시스템 개선에 효과적으로 활용 될 수 있을 것으로 예상된다. 향후에는 부정합이 확인된 PV 시스템의 개선을 위하여 동작점 계수를 활용하는 방법을 연구할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

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. Jinlei Ding, Rakesh Radhakrishnan, "A new method to determine the optimum load of a real solar cell using the Lambert W-function", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92 (2008) 1566 - 1569.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 안희욱, "태양광 PV 스트링에서의 모듈 부정합 손실의 분석 및 개선 기법 타당성 연구", *한국태양에너지학회 논문집*, Vol. 29, No. 1, pp.58-63, 2009.
8. 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.
9. C. Hua, C, Shen, "Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage systems," *Proc. IEEE APEC'98*, pp. 697-685, 1998.