

통계학적 비교 기법을 이용한 태양광 모듈의 고장 유무 검출에 관한 연구

A Study on Fault Detection for Photovoltaic Power Modules using Statistical Comparison Scheme

조현철*† · 정영진** · 이관호***

Hyun Cheol Cho*† , Young Jin Jung** and Gwan Ho Lee***

(Submit date : 2013. 5. 13., Judgement date : 2013. 5. 13., Publication decide date : 2013. 7. 2)

Abstract : In recent years, many investigations about photovoltaic power systems have been significantly carried out in the fields of renewable power energy. Such research area generally includes developments of highly efficient solar cells, advanced power conversion systems, and smart monitoring systems. A generic objective of fault detection and diagnosis techniques is to timely recognize unexpected faulty of dynamic systems so that economic damage occurred by such faulty is decreased by means of engineering techniques. This paper presents a novel fault detection approach for photovoltaic power arrays which are electrically connected in series and parallels. In the proposed fault detection scheme, we first measure all of photovoltaic modules located in each array by using electronic sense systems and then compare each measurement in turn to detect location of fault module through statistic computation algorithm. We accomplish real-time experiments to demonstrate our proposed fault detection methodology by using a test-bed system including two 20 watt photovoltaic modules.

Key Words : 태양광 모듈(Photovoltaic module), 고장검출(Fault detection), 통계학(Statistics), 실시간 실험(Real-time experiment)

1. 서 론

최근 태양광 발전 시스템에 대한 연구가 활

발히 진행되고 있다. 이것은 고효율의 태양광 셀, 고성능의 전력변환장치 등 다양한 시스템들이 개발되고 있다. 태양광 발전 시스템에 대

*† 조현철(교신저자) : 울산과학기술대학교 전기전자공학부
E-mail : hcjo@uc.ac.kr Tel : 052-279-3166
**정영진 : 울산과학기술대학교 전기전자공학부
***이관호 : 울산과학기술대학교 공간디자인학부

*† Hyun Cheol Cho(corresponding author) : School of Electric & Electronic Eng., Ulsan College.
E-mail : hcjo@uc.ac.kr, Tel : 052-279-3166
*Young Jin Jung : School of Electric & Electronic Eng., Ulsan College.
***Gwan Ho Lee : School of Space Design Eng., Ulsan College

한 고장검출은 고장으로 인해 발생하는 경제적 손실을 최소화하기 위한 고급 모니터링 기술로서 인식되어져 오고 있다.¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

본 연구는 태양광 발전 시스템을 구성하는 태양광 모듈에 발생하는 고장 유무를 검출하는 기술을 제안한다. 우선 태양광 시스템의 출력 전압을 가우시안 확률변수로 정의한 후 가능성 함수로 표현한다. 이 함수를 통해 2진 가설 검증을 적용한 후 고장의 발생 유무를 결정한다. 본 논문에서 제안한 고장진단 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 태양광 테스트 베드를 이용하여 실시간 실험을 실시하였다.

2. 고장진단 알고리즘

동적 시스템의 고장진단 기법은 고장이 발생하지 않은 이상적인 시스템 모델과 현재의 시스템과의 출력 또는 상태를 서로 비교하여 고장의 여부를 검출한다.⁵⁾ 다시 말해 정상적인 시스템의 출력을 x_0 라 하고 실제 시스템 출력을 x_1 이라 하면 이 두 출력에 대한 오차 $e = x_0 - x_1$ 을 연산하는 정해진 기준치 γ 를 비교한다(그림 1 참조). 이러한 개념은 다음의 2진(binary) 가설(hypotheses) 검증을 통해 정의할 수 있다.

$$\begin{cases} H_0 : |e| < \gamma, & \text{No fault} \\ H_1 : \text{otherwise,} & \text{fault} \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 오차 e 의 절대값이 기준치 γ 보다 작으면 고장이 발생하지 않은 것으로 간주하며 그렇지 않은 경우 즉, 오차의 절대값이 기준치보다 크거나 같은 경우 시스템에 고장이 발생한 것으로 간주한다. 따라서 일반적인 고장검출의 경우 이러한 시스템 오차를 검출하여 고장의 유무를 진단하게 된다.



Fig. 1 A schematic diagram of fault detection system

3. 태양광 발전 시스템

태양광 발전 시스템은 그림 2과 같이 여러 개의 태양광 모듈이 직병렬로 전기적으로 연결되어 있다. 각 모듈에 발생하는 전압을 v_i , $i=1, \dots, n$ 이라 하며 이 때 n 은 모듈의 개수를 나타낸다.

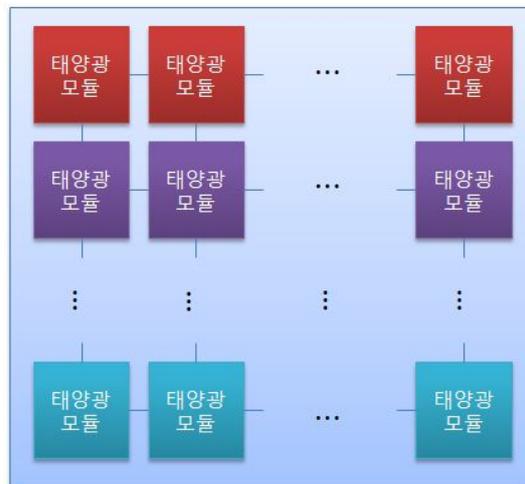


Fig. 2 A configuration of photovoltaic power modules

일반적으로 모듈의 출력 전압은 태양의 일사량과 모듈의 표면온도에 따라 랜덤한 값으로 주어지므로 각 모듈의 출력 전압을 확률변수로 정의할 수 있다. 본 논문은 이러한 개념을 바탕으로 v_i 을 평균값 m_i 와 분산 σ_i^2 에 대한 가우시안 확률분포로 정의하며 수학적으로

$v_i \sim N(m_i, \sigma_i^2)$ 와 같이 표현하며 확률분포함수는 다음과 같다.

$$p(v_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma_i^2}(v_i - m_i)^2} \quad (2)$$

한편, 고장이 발생하지 않은 이상적인 태양광 모듈에 대한 출력 전압을 $v_0 \sim N(m_0, \sigma_0^2)$ 로 표현하며 확률분포함수는

$$p(v_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma_0^2}(v_i - m_0)^2} \quad (3)$$

와 같이 주어진다. 고장이 발생하였을 경우 v_1 에 대한 확률분포를 $v_1 \sim N(m_1, \sigma_1^2)$ 로 정의하며

$$p(v_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma_1^2}(v_i - m_1)^2} \quad (4)$$

와 같이 주어진다. 마찬가지로 이 두 확률분포에 대하여 식 (1)에서 정의한 가설 검증을 적용할 수 있으며 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{cases} H_0 : v_i \sim N(m_0, \sigma_0^2), \text{ No fault} \\ H_1 : v_i \sim N(m_1, \sigma_1^2), \text{ fault} \end{cases} \quad (5)$$

이 두 확률분포에 대하여 식 (2)와 식 (3)에 대한 가능성(likelihood) 함수는 다음과 같다.

$$L = \frac{p(v_i)}{p(v_0)} \geq \gamma_L \quad (6)$$

식 (4)는 가능성 함수 L 이 기준치 γ_L 에 비해 크거나 같으며 고장이 발생한 것으로 간주하며 그렇지 않은 경우는 정상적으로 동작하는

것으로 간주한다. N 개의 출력 전압에 대한 식 (3)과 식 (4)를 식 (6)에 각각 적용하여 나타내면 다음과 같다.

$$L = \frac{\left(\frac{1}{(2\pi\sigma_0^2)^{(N-n_0+1)/2}} \right) e^{-\frac{1}{2} \sum_{k=n_0}^N (v_i(k) - m_0)^2}}{\left(\frac{1}{(2\pi\sigma_1^2)^{(N-n_0+1)/2}} \right) e^{-\frac{1}{2} \sum_{k=n_0}^N (v_i(k) - m_1)^2}} \geq \gamma_L \quad (7)$$

일반적으로 m_0 와 σ_0^2 는 정상적인 태양광 모듈에서 실시간 실험을 통해 값을 결정할 수 있으며 m_1 와 σ_1^2 는 시스템의 실시간 동작 시 이 두 값을 추정하여야 한다. 본 논문에서는 기존에 잘 알려진 최대 가능성 추정(MLE : Maximum Likelihood Estimation) 알고리즘⁶⁾을 이용하여 이 두 파라미터에 대한 추정식을 다음과 같이 표현한다.

$$m_1 = \frac{1}{N-n_0+1} \sum_{k=n_0}^N v_i(k) \quad (8)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{N-n_0+1} \sum_{k=n_0}^N (v_i(k) - \hat{m}_1)^2 \quad (9)$$

식 (7)의 양변에 자연 로그 함수를 적용하면 최종적으로 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \ln(L) &= m_1^2 \\ &= \left\{ \frac{1}{N-n_0+1} \sum_{k=n_0}^N v_i(k) \right\}^2 \geq \gamma'_{GLRT} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서

$$\gamma'_L = \frac{2\ln(\gamma_L)}{N-n_0+1} + 1 \quad (11)$$

이다. 요약하면 식 (10)에서 부등식의 왼쪽

항이 식 (11)보다 크거나 같으면 고장이 발생한 것으로 여기고 그렇지 않은 경우는 정상적으로 동작하는 것으로 간주한다.

4. 실시간 실험

본 논문에서 제안한 태양광 발전 시스템의 고장검출 알고리즘의 타당성 검증을 위하여 20W 태양광 모듈 2개를 이용하여 실시간 실험을 실시하였다. 실시간 테스트베드는 그림 3과 같으며 모듈 하나는 정상적인 동작을 하고 나머지 모듈은 약 65초 부근에서 임의의 고장을 발생시켰다. 이 때 두 태양광 모듈에 발생하는 전압을 파형으로 나타내었으며 그림 4와 같다. 이 그림으로부터 고장이 발생하기 전 초기 시간부터 고장이 발생할 때 까지 약 8V 정도의 전압이 발생하는 것을 알 수 있다. 고장의 발생은 약 65초 부근에서 일어났으며 이 때 한 쪽의 모듈이 약 3.5V 정도로 감소한 것을 볼 수 있다. 그림 5는 정규화된 가능성 함수값에 대한 파형을 보여준다. 고장이 발생한 약 65초 이후부터 가능성 값이 점점 증가하여 0.9 정도에 도달하는 것을 볼 수 있다. 이러한 실시간 실험을 통해 본 논문에서 제안한 고장검출 알고리즘에 대한 타당성을 입증하였다.



Fig. 3 A fault detection test-bed of the photovoltaic system

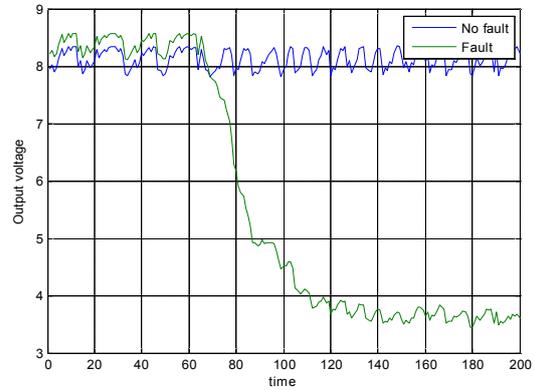


Fig. 4 Waveforms of the output voltage of the photovoltaic systems

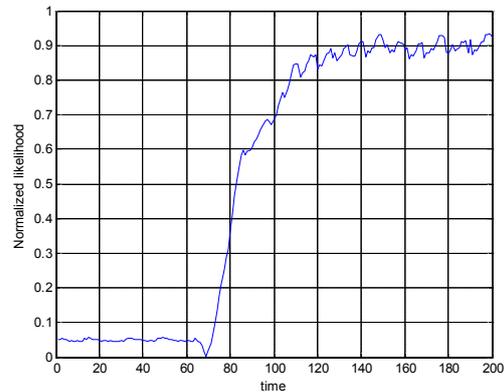


Fig. 5 Waveform of likelihood function values

5. 결론

본 논문은 태양광 발전 시스템의 고장 유무 검출 알고리즘을 제안하였다. 태양광 시스템의 출력 전압은 가우시안 확률변수로 정의하였으며 정상적으로 동작하는 태양광 시스템의 확률분포에 대한 가능성 함수를 정의하였다. 이 함수를 이용하여 2진 가설 검증 알고리즘에 적용하여 고장 유무 결정 알고리즘을 도출하였다. 제안한 고장진단 기법의 타당성 검증을 위하여 간단한 태양광 테스트베드를 이용하여 성능을 검증하였으며 고장이 발생한 경

우와 정상적인 상태의 출력 파형을 비교하였으며 고장 검출 알고리즘을 적용하여 가능성 함수 값을 도출하여 고장 발생 지점을 정확히 알 수 있었다. 향후 연구로는 보다 더 실용적 가치를 검증하기 위하여 100W용 태양광 발전 시스템에 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용하기로 한다.

random signals and applied Kalman filtering, Wiley, 1996.

후 기

본 연구는 중소기업청의 기업부설연구소 사업비 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. Hyun C. Cho, Ji H. Park, and Dong W. Kim, "The stable adaptive converter control method of photovoltaic power systems using Lyapunov redesign approach," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 61, no. 4, pp. 161-167, 2012.
2. Ji H. Park, Hyun C. Cho, and Dong W. Kim, "Neural PID Based MPPT Algorithm for photovoltaic generator system," Journal of The Korean Society for New and Renewable Energy, vol. 8, no. 3, pp. 14-22, 2012.
3. Hyun C. Cho and Gwan H. Lee, "Fault detection algorithm of photovoltaic power systems using stochastic decision making approach," The Korea Signal processing system, vol. 12, no. 3, pp. 212-216, 2011.
4. Hyun C. Cho, "A Study on dynamic modeling of photovoltaic power generator systems using probability and statistics theories," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 61, no.7, pp. 1007-1013, 2012.
5. K.-H. Chaoa, S.-H. Hob, M.-H. Wanga, "Modeling and fault diagnosis of a photovoltaic system," Electric Power Systems Research, vol. 78, no. 1, pp. 97-105, 2008.
6. R. G. Brown, P. Y. C. Hwang, Introduction to