

Application and Verification of MPPT-Based Electrical Fault Detection Method for PV Generation Systems

태양광 발전 시스템에서 MPPT 특성 기반의 전기적 고장 진단 기법의 적용 및 검증

Hyun-Jae Lee · Sae-hee Park · Hyun-Soo Park · Jin-Geun Shon

이현재* · 박세희* · 박현수* · 손진근†[Ⓜ]

Abstract

This paper proposed an algorithm that can detect failures occurring in electrical fault while continuously performing MPPT in general solar power generation systems. The MPPT characteristics that appear in each situation were analyzed, and the characteristics of MPPT that appeared in electrical fault were analyzed and formulated. As a result, it is possible to judge whether the solar panel is normal, partial shade, or electrical fault, and verified through simulation. The hardware to which the proposed algorithm is applied detects electrical fault well and verifies its reliability. If the proposed algorithm is applied to the solar power generation system, it is judged that economic and social losses caused by fire can be reduced.

Key Words

Electrical Fault, Ground Fault Protect Device, Maximum power Point Tracking, Over Current Protect Device, Solar Power System

1. 서론

기후변화 협약 국제적 이행 요구 및 4차 산업혁명에 따라 재생에너지 수요가 증가하고 있다. 이러한 기술적 진보를 통해 빅 데이터 및 인공지능으로 인한 기상 예측의 정확성 증가에 따른 재생에너지의 효율화 및 에너지 절약이 극대화될 것으로 보인다. 특히 태양광 발전은 소음 및 진동 그리고 가스 배출이 존재하지 않아 도심 내 설치가 가능하며 공유형 태양광, 건물일체형 태양광 등 태양광 산업의 범위가 확장되고 있다.

하지만 이러한 태양광 발전의 보급률이 증가하면서 그 추세에 따라 화재 발생률 또한 늘어나고 있다. 세계적으로 태양광 발전에서 큰 화재가 발생하고 있으며 크나큰 경제적, 사회적 손실을 야기하고 있다[1-2]. 특히 태양광 패널에서 지락, 단락으로 인한 화재가 자주 발생하고 있으며 이로 인한 경제적, 사회적 손실이 크게 발생하고 있다. 따라서 태양광 발전에서 지락, 단락에 의한 고장 및 화재의 감시가 중요하다는 것을 판단할 수 있다. 이렇게 지락, 단락에 의한 화재가 빈번이 나는 이유를 살펴보기 위해 태양광 발전 시스템에서 일반적으로 쓰이는 구조와 제어 방식을 살펴볼 필요가 있다.

그림 1은 태양광 발전 시스템에서 고장, 화재를 감시하기 위한 태양광 시스템의 구성도이다. 일반적으로 OCPD(Over

Current Protect Device)와 GFPD(Ground Fault Protect Device)를 이용해 회로를 구성하고 고장 시 회로를 차단할 수 있도록 조치한다. 태양광 발전 시스템에서 태양광 패널이 발전할 수 있는 전압, 전류의 한계가 존재하므로 비선형적인 P-V 특성곡선을 갖게 되며 이는 온도, 바람, 먼지 등과 같은 여러 영향에 따라라도 바뀌게 된다. 따라서 출력을 효율적으로 얻기 위해 MPPT(Maximum Power Point Tracking)를 사용하게 된다.

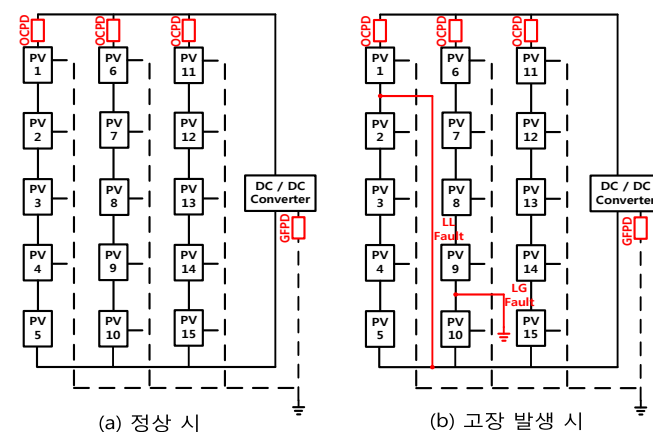


그림 1 일반적인 5×3 구조의 태양광 시스템의 구성도
 Fig. 1 General 5×3 structure solar system configuration

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gachon University, Korea.
 E-mail: shon@gachon.ac.kr
<https://orcid.org/0000-0001-8357-4437>

* Dept. of Electrical Engineering, Gachon University, Korea.

Received : Feb. 8, 2021 Revised : Feb. 25, 2021 Accepted : Feb. 26, 2021

그러나 이렇게 태양광 발전 시스템에서 일반적으로 쓰이는 화재 감시 구조와 제어방법을 동시적으로 사용함에 있어서 문제가 발생하게 된다. 지속적인 MPPT에 의해 지락, 단락이 발생하였을 시에도 고장 시 P-V 특성 곡선의 MPP전압으로 제어를 함으로써 전류가 자동적으로 변화하고 OCPD와 GFPD가 고장전류를 감지하지 못하는 전류 값까지 전압이 제어 되어 버리는 것이다. 그림 2는 고장이 일어나기 전의 출력 I-V 특성 곡선과 지락이나 단락으로 인한 고장이 발생하였을 때의 출력 I-V 특성 곡선을 동시에 보여준다. 정상적으로 태양광 패널이 전력을 생산할 경우 스트링(String)의 I-V 특성 곡선은 빨간색 곡선 형태를 보인다. 이 중 A점이 스트링의 MPP점을 나타낸다. 이 때 지락이나 단락에 의해 고장이 발생할 경우 스트링의 빨간색 I-V 특성 곡선이 파란색의 곡선으로 변화하게 된다. 여기서 문제점이 발생하게 되는데 A에서 제어를 수행하던 MPP지점이 지락 또는 단락과 지속적인 MPPT제어에 의해 B로 이동하며 OCPD, GFPD가 고장 전류를 검출할 수 없게 된다[3-5].

따라서 본 논문은 태양광 발전 시스템에서 지속적인 MPPT를 수행함에도 단락/지락에서 발생하는 고장을 검출 할 수 있는 MPPT 특성 기반의 전기적 고장 진단 기법을 제시한다.

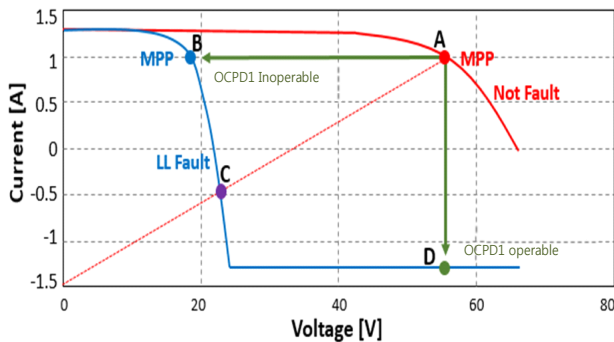


그림 2 MPPT 수행 시 고장 전과 고장 후의 I-V 특성 곡선
Fig. 2 I-V characteristic curve before and after failure when performing MPPT

2. 단락/지락 고장 검출 알고리즘 설계를 위한 연구

2.1 고장 시의 MPPT 출력 특성 분석

본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 각 상황별, 조건별에서 나타나는 MPPT의 특성을 분석할 필요가 있으며 MPPT의 특성을 분석함에 따라 단락/지락 고장일 때 나타나는 MPPT의 특성만을 이용한다.

그림 2에서 보듯이 지속적인 MPPT를 수행하였을 때 고장 전과 고장 후의 MPPT 특성이 다르게 나타난다. 단락/지락 사고가 발생할 경우 어레이의 A점이 B점으로 변화하게 된다. 스트링 전류 D는 재 생성된 I-V 특성 곡선에서 가장 오른쪽에 위치해 있음에 따라 역전류가 흐르게 되지만 지속적인 MPPT수행에 의해 D점은 B점으로 이동하게 되는 것이다. 이 때, 오

로지 MPP점의 특성들만을 이용하여 비교한다면 사고 전과 사고 후의 전압 MPP지점을 비교할 경우 전압의 급격한 감소가 일어나며 전류는 거의 동일하다. 또한, 모든 전기적인 사고 발생 시 모든 단위에서 MPP전압이 감소한다는 특징이 있다.

2.2 고장 후의 어레이의 전압 분석

고장 후의 어레이의 전압을 분석해보면 단락/지락 고장 시 고장 크기의 레벨에 상관없이 어레이의 MPP전압 지점이 스트링의 MPP전압 지점보다 크게 나타난다. 또한, 단락/지락 고장 시 어레이 전압이 가질 수 있는 최대 전압은 스트링 중 하나의 패널이 불균형할 때 이므로 정상적인 태양광 패널 하나의 MPP전압을 V_{mpp} , 스트링 단위 중 정상적으로 동작하는 패널의 수를 N_h 라고 정의 할 경우 단락/지락 고장이 발생한 스트링의 총 전압 V_{ST} (String Total)은 식 (1) ~ 식 (3)으로 표현될 수 있다.

$$V_{ST} = N_h \times V_{mpp} \quad (1)$$

$$V_{mpFA} = (N_h \times V_{mpp}) \left(1 + \frac{1}{s \times p} \right) \quad (2)$$

$$V_{fmax} = ((s-1) \times V_{mpp}) \left(1 + \frac{1}{s \times p} \right) \quad (3)$$

2.3 정상, 그늘짐 현상일 때의 출력 특성 분석

그림 3은 일사량이 균등히 변화할 경우 어레이의 P-V 특성 곡선을 나타낸다. 모든 태양광 패널이 $1000 W/m^2$ 의 일사량을 균등히 받았을 때 어레이 MPP 전압을 V_{AM} (Array MPP), 가장 낮은 일사량이 $300 W/m^2$ 이라고 가정한다면 MPP 전압은 V_{AM} 와 약 6%의 차이를 보이게 된다. 여기서 정확한 차이점을 구별하기 위해 4%의 차이를 추가한 약 10%의 차이를 이용해 균등하게 최소 일사량을 받았을 때의 MPP 전압 V_{min} 을 표현하면 식 (4)~식 (5)와 같다.

$$V_{AM} = S \times V_{mpp} \quad (4)$$

$$V_{min} = 0.9 \times S \times V_{mpp} \quad (5)$$

즉, V_{min} 은 한 스트링에 태양광 패널의 수(S)와 MPP 전압을 곱한 것에 10%의 차이를 곱한 결과로 표현할 수 있다.

태양광 패널에 부분적으로 그늘짐이 있었을 경우 특성을 분석하기 위해 표 1에 부분적인 일사량의 조건을 기입한 표를 나타내었다. 5개의 스트링을 기준으로 하여 4개 정도의 조건을 만들었다. 조건 1과 같은 경우 스트링의 1, 2, 3번의 패널들은 $1000 W/m^2$ 스트링의 4, 5번의 패널들은 $600 W/m^2$ 의 일사량을 받는다고 가정하였다.

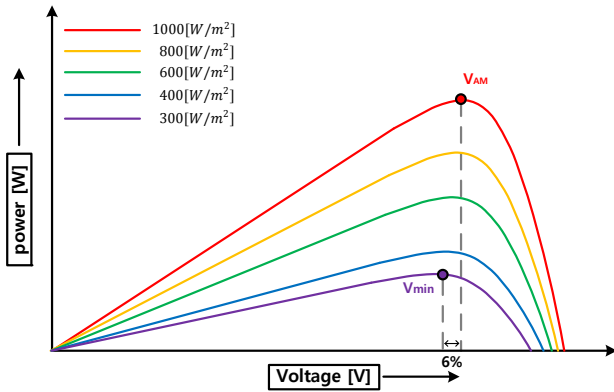


그림 3 일사량이 균등하게 변화할 경우 PV 어레이의 P-V 특성 곡선
Fig. 3 P-V characteristic curve of PV array when solar radiation varies

표 1 부분적인 일사량에 대한 모의 실험 조건

Table 1 Table containing simulation conditions for partial irradiance

	Irradiance [W/m ²]				
	Row1	Row2	Row3	Row4	Row5
PSC1	1000	1000	1000	600	600
PSC2	1000	900	800	700	600
PSC3	900	600	400	400	300
PSC4	1000	800	700	600	300

그림 4는 표 1에서 가정한 4가지 조건에 대한 PV 어레이의 P-V 특성 곡선을 나타낸다. 태양광 발전 시스템은 그림 1과 같이 일반적으로 1세대(중앙집중방식)의 형태를 채택하게 되는데 태양광 패널 하나의 고장으로 인접한 패널이 연쇄적으로 다운되지 않도록 각 패널마다 바이패스 다이오드를 병렬로 부착시킨다. 이러한 바이패스 다이오드가 있는 구조 특성상 그림과 같이 부분적인 그늘짐이 발생했을 경우 다수의 MPP 지점이 발생하게 된다. 여기서 최대 전력점인 지점을 MP(Maximum Point), 그 외의 지점을 NP (Not Maximum Point), MPP 지점 중 가장 오른쪽의 MPP 지점을 RP(Right Point)라고 한다면 RP는 V_{AM} 일 때 보다 항상 큰 지점에 발생한다.

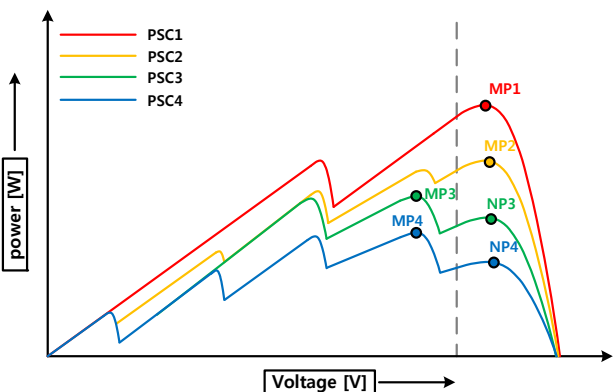


그림 4 부분적으로 일사량이 변화할 경우 PV 어레이의 P-V 특성 곡선
Fig. 4 P-V characteristic curve of PV array when the irradiance changes partially

2.4 부분 그늘짐 현상일 때의 RP 분석

그림 4와 같은 조건에서 모든 RP가 V_{max} 보다 크게 나타나지만 모든 경우에서 이러한 조건이 일치하지 않을 수 있다[6]. 따라서 RP전압의 한계를 분석할 필요가 있다. 균등한 일사량에서 한 스트링의 전압 V_{string} 은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{string} = V_{PV_1} + V_{PV_2} + V_{PV_3} + \dots V_{PV_n} = n \times V_{PV_n} \quad (6)$$

여기서 n번에 그늘짐이 생기게 된다면 (n-1)개의 패널들은 n번의 패널이 생산하는 전류와 동일한 전류를 내보내기 위해 전압을 높이는 현상이 발생하게 된다. 이에 따라 부분 그늘짐이 발생했을 경우를 포함한 식은 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{string} = V_{PV_1} + V_{PV_2} + V_{PV_3} + \dots V_{PV_n} > n \times V_{PV_n} \quad (7)$$

균등한 일사량의 조건에서 V_{RP} 는 항상 V_{min} 보다 클 것이 분명하다. 또한, 그늘짐 패널의 수가 정상적인 패널의 수보다 적으면 V_{RP} 는 V_{AM} 보다 크게 나타난다. 그늘짐 패널의 수가 정상적인 패널의 수보다 많으면 V_{RP} 는 V_{AM} 보다 작게 나타나지만 300 W/m^2 의 균일한 일사량을 받았을 때 V_{RP} 보다 높으므로 이를 수식으로 표현하면 식 (8)~식 (9)와 같다.

$$V_{AM} < V_{RP} < 0.9 V_{OC} \quad (N_{un-shaded} > N_{shaded}) \quad (8)$$

$$V_{min} < V_{RP} < V_{AM} \quad (N_{un-shaded} < N_{shaded}) \quad (9)$$

2.5 전기적인 고장일 때 정상과 부분 그늘짐의 분석

그림 5는 단락/지락 고장이 발생하였을 경우 정상적, 부분 그늘짐의 P-V 특성 곡선을 나타낸다. LL1, LG1이 발생하였을 경우 V_{RP} 는 모두 V_{min} 보다 작다는 것을 알 수 있다.

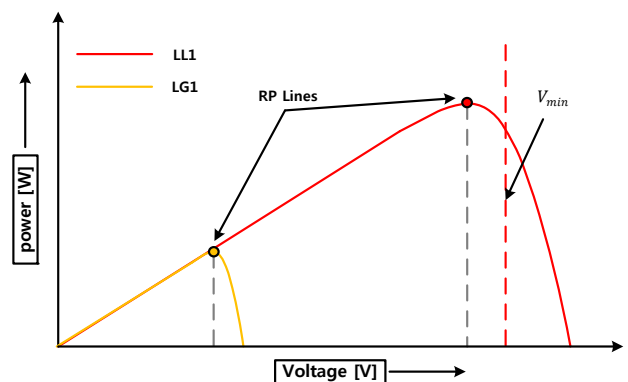


그림 5 단락/지락 고장이 발생한 경우 정상적, 부분 그늘짐의 P-V 특성 곡선
Fig. 5 P-V characteristic curve of normal, partial shade when LL/LG fault occurs

2.6 RPP 전압 범위 이상일 경우 단락/지락 고장 검출

V_{min} 은 스트링에 직렬로 연결되어 있는 태양광 패널의 수

(S)에 크게 의존하며 이에 따라 V_{RP} 가 V_{min} 보다 클 경우가 존재한다. S가 10일 때를 가정하면 그림 2와 같이 단락/지락 고장이 발생하였을 경우 전류의 변화는 거의 없으나 전압의 변화가 크게 나타난다. 반면, 정상적인 경우에서 그늘짐이 발생하였을 경우 전류의 변화량이 크게 나타나며 전압의 변화량은 작게 나타난다. 따라서 단락/지락 고장 시 주목할 점은 전압의 변화량이므로 이를 이용하여 수식으로 표현하면 식 (10-13)과 같다.

$$\Delta V_f = V_{AM} - V_{fmax} \quad (10)$$

$$|\Delta V_{RPF}| = |\Delta V_{RPnew} - \Delta V_{RPold}| \geq \Delta V_f \quad (11)$$

$$\Delta I_{RPF} = I_{RPnew} - I_{RPold} \geq 0 \quad (12)$$

$$\Delta P_{RPF} = P_{RPnew} - P_{RPold} < 0 \quad (13)$$

2.7 고장 진단을 위한 V_{RP} 의 범위 설정

실제적으로 LL/LG 고장을 진단하기 위하여 2.1부터 2.6까지의 수식들을 정리하면 표 2와 같이 나타낼 수 있다.

표 2 허용 오차를 고려한 V_{RP} 의 범위 설정 표

Table 2 Table of the range of V_{RP} of taking the tolerance into account

No.	V_{RP}	$ \Delta V_{RP} $ [V]	ΔI_{RP} [A]	ΔP_{RP} [W]	Operating Condition
1	$\leq 1.05 V_{fmax} \ \& \ < 0.9 V_{AM}$	$\geq 0.9 \Delta V_f$	-	-	LL/LG Fault
2	$\leq 1.05 V_{fmax} \ \& \ > 0.9 V_{AM}$	$\geq 0.9 \Delta V_f$	> 0	< 0	LL/LG Fault

2.8 단락/지락 고장 검출 알고리즘 설계

표 2를 살펴보면 1번과 2번의 범위가 단락/지락 고장으로 식별할 수 있으며 이를 허용하여 알고리즘을 설계 할 수 있다.

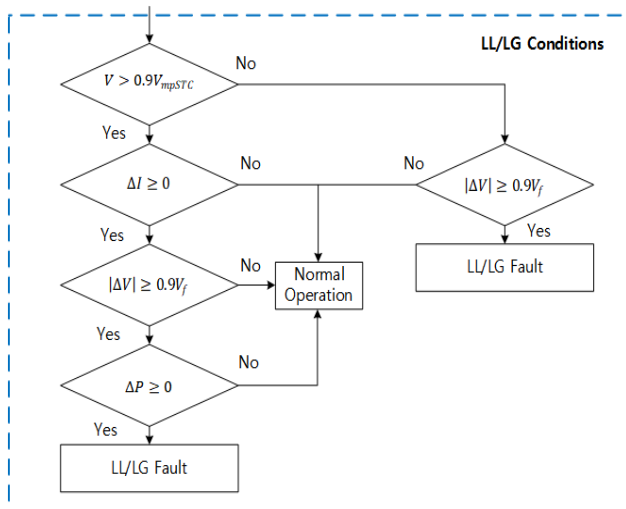


그림 6 단락/지락 고장 진단을 위한 알고리즘

Fig. 6 Algorithm for LL/LG fault diagnosis

3. 단락/지락 고장 검출 알고리즘의 적용 및 검증

3.1 모의 실험 및 결과 고찰

3×2로 구성된 태양광 발전시스템을 구성하여 시뮬레이션을 진행하였으며 MPPT는 일반적인 P&O 알고리즘을 사용하였다 [7-8].

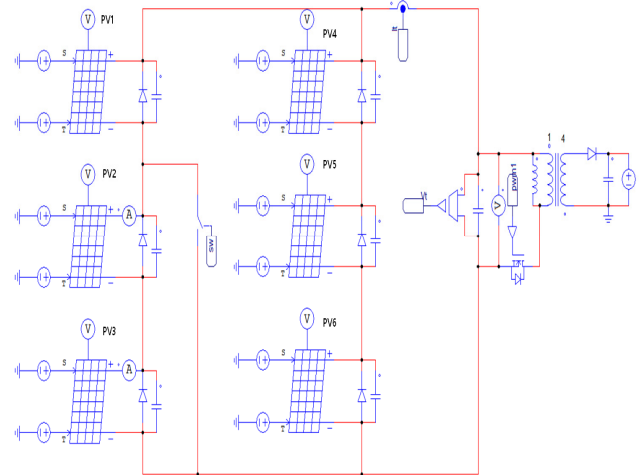


그림 7 시뮬레이션 진행을 위한 PSIM 회로도

Fig. 7 PSIM schematic for simulation

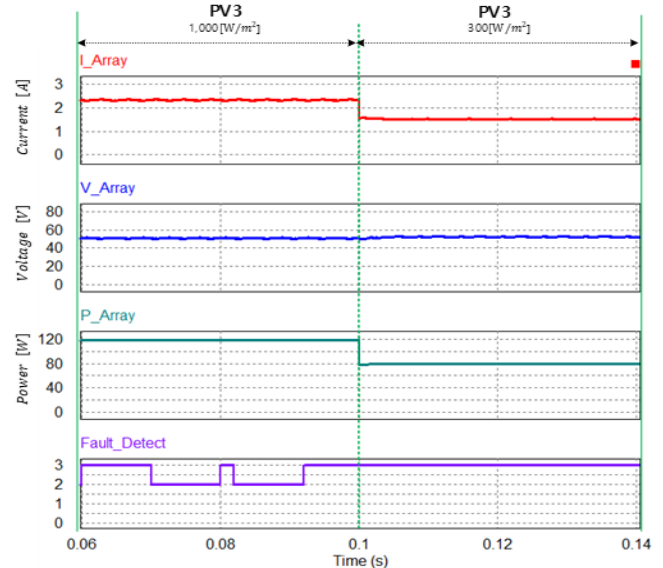


그림 8 일반적인 P&O일 때 일사량이 변화할 시의 전압 전류 및 고장 검출 신호 파형

Fig. 8 Voltage current and fault detection signal waveform when irradiation changes in general P&O

그림 8은 일사량이 1000 W/m^2 로 정상적인 경우에서 300 W/m^2 로 변동시의 그래프를 나타낸다. 0.06[s]부터 0.14[s]까지 측정하였으며 0.1[s]에서 갑작스런 일사량 변화 시 전압은 소폭 증가하였으나 전류는 대폭 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 Fault_Detect case는 3으로 잘 추종하고 있음을 나타낸다.

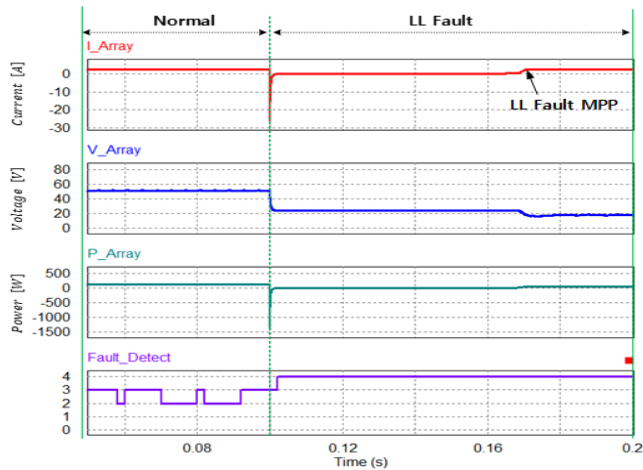


그림 9 일반적인 P&O일 때 선간 단락 고장 시 전압 전류 및 고장 검출 신호 파형

Fig. 9 Voltage current and fault detection signal waveform in case of LL/LG fault in general P&O

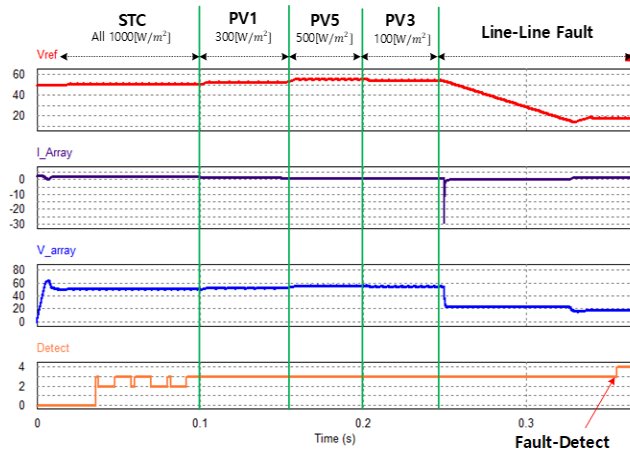


그림 10 복합적인 경우 전압 전류 및 고장 검출 신호 파형

Fig. 10 Voltage current and fault detection signal waveform in many cases

그림 9는 최대 일사량일 경우 단락/지락 고장 시를 나타낸다. 0[s]부터 0.2[s]까지 측정하였으며 0.1[s]에서 단락 고장 발생 시 전압은 소폭 증가하였으나 전류는 대폭 감소함을 볼 수 있다. Fault_Detect는 case 4로 고장을 잘 판별했음을 알 수 있다.

그림 10은 발생할 수 있는 복합적인 경우들을 그래프로 나타내었다. 일사량을 변동할 경우 그늘짐을 정상적으로 판별하며 선간 고장일 경우 고장판별을 정상적으로 시행하고 있음을 나타낸다.

3.2 실험 및 결과 고찰

시뮬레이션으로 구현한 회로를 기반으로 하드웨어를 이용해 본 알고리즘에 대한 검증을 실시하였다. 하드웨어 실험에 쓰인 태양광 패널은 2개를 직렬로 이용한 축소 구조를 적용하여 실험을 진행하였다. 이에 따라, 본 논문에서 제시한 MPPT와 비교하는 알고리즘으로 이루어진 하드웨어 구성도를 그림 11에 나타내었다.

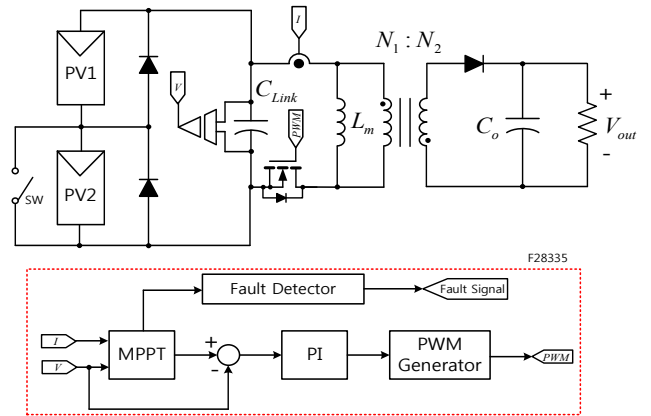


그림 11 제안된 알고리즘을 적용한 하드웨어 구성도

Fig. 11 Hardware configuration diagram applying the proposed algorithm

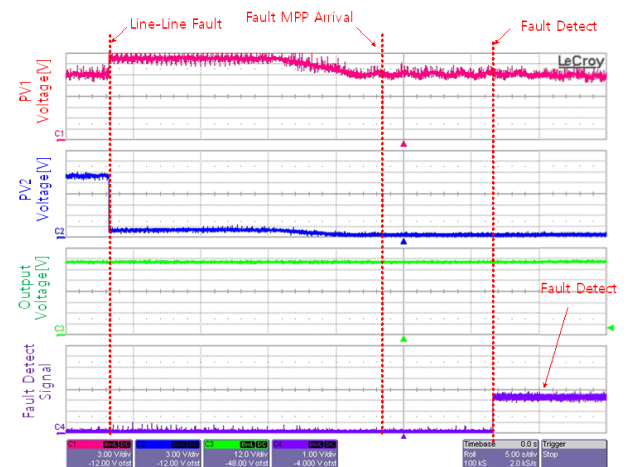


그림 12 제안된 알고리즘을 적용한 하드웨어의 전기적 고장 시 전압 전류 및 고장 검출 신호 파형

Fig. 12 Voltage current and fault detection signal waveform in case of electrical fault of hardware applying the proposed algorithm

그림 12는 제안된 알고리즘을 적용한 하드웨어의 전기적 고장 시 파형 결과를 나타낸다. 약 15[s]에서 임의적인 선간 단락을 실시하였으며 약 32[s]에서 MPPT가 도달하는 순간 고장을 잘 검출하는 것을 알 수 있다. 이는 갑작스런 전기적 고장에도 제시한 알고리즘에 의해 하드웨어가 고장을 잘 검출하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 지속적인 MPPT를 수행함에도 단락/지락에서 발생하는 고장을 검출할 수 있는 알고리즘을 제시한다. 지속적인 MPPT가 OCPD, GFPD와 같은 보호 장비에 미치는 영향을 분석하였으며 이에 따라 제안하는 알고리즘의 필요성을 제시하였다. 단락/지락 고장 검출 알고리즘을 설계하기 위하여 6가지의 조건별 MPPT의 특성들을 분석하고 수식화 하였으며 이 중에서 단락/지락 조건일 때 나타나는 특성들을 이용해 단락/지락 고장 검출 알고리즘을 설계하였다. 이를 검증하기 위

하여 시뮬레이션을 진행하였으며 태양광 패널이 정상 운행할 때, 부분적으로 그늘짐이 생겼을 때, 단락/지락 고장일 때를 판단할 수 있다는 것을 검증하였다. 이에 따라 제안하는 MPPT 특성 기반의 전기적 고장 진단 기법을 태양광 발전 시스템에 적용한다면 지속적인 MPPT에서 발생하는 고장 검출의 오류를 예방할 수 있으며 큰 화재로 인한 경제적, 사회적 손실을 감소시킬 수 있다고 판단된다.

Acknowledgements

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20194030202290).

References

- [1] IRENA, 'Renewable Capacity Statistics 2019'. ISBN:978-92-9260-123-2, pp. 24, Dan Lewis, March 2019.
- [2] S. S. Nair, "A Survey report of the firefighters on fire hazards of PV fire," 2018 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN), Pondicherry, pp. 1-5, 2018. doi: 10.1109/ICSCAN.2018.8541219.
- [3] D. S. Pillai and N. Rajasekar, "A comprehensive review on protection challenges and fault diagnosis in PV systems," Renewable Sustain. Energy Rev., vol. 91, pp. 18-40, Aug. 2018.
- [4] F. Harrou, Y. Sun, B. Taghezouit, A. Saidi, and M. E. Hamlati, "Reliable fault detection and diagnosis of photovoltaic systems based on statistical monitoring approaches," Renewable Energy, vol. 116, pp. 22-37, Feb. 2018.
- [5] M. Dhimish, V. Holmes, B. Mehrdadi, and M. Dales, "Simultaneous fault detection algorithm for grid-connected photovoltaic plants," IET Renewable Power Gener., vol. 11, no. 12, pp. 1565-1575, Jul. 2017.
- [6] R. Hariharan, M. Chakkarapani, G. S. Ilango, and C. Nagamani, "A method to detect photovoltaic array faults and partial shading in PV systems," IEEE J. Photovolt., vol. 6, no. 5, pp. 1278-1285, Sep. 2016.
- [7] Dezso Sera, Laszlo Mathe, Tamas Kerekes, Sergiu Viorel Spataru and Remus Teodorescu, "On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems," IEEE Journal of photovoltaics, vol. 3, no. 3, July 2013.
- [8] Sathish Kumar Kollimalla and Mahesh Kumar Mishra, "A Novel Adaptive P&O MPPT Algorithm Considering Sudden Changes in the Irradiance," IEEE Transactions on sustainable energy conversion, vol. 29, no. 3, September 2014.

저자소개



이현재 (Hyun-Jae Lee)

He received his M.S. degree in Gachon University, Gyeonggi-Do, Korea, currently he is pursuing his Ph. D. degree in Gachon University, Gyeonggi-Do, Korea. His research interests are Power conversion and Power control.
E-mail: lhj501@gachon.ac.kr



박세희 (Sae-hee Park)

She received her B.S. degree in Kwangwoon University, Seoul and M.S. degree in Gachon University, Gyeonggi-Do, Korea. Her research interests are Power conversion and Power control.
E-mail: tpgmltpgml94@naver.com



박현수 (Hyun-Soo Park)

He received his B.S. degree in Gachon University, Gyeonggi-Do, Korea, currently he is pursuing his M. S. degree in Gachon University, Gyeonggi-Do, Korea. His research interests are Power conversion and Power control.
E-mail: sys5028@gachon.ac.kr



손진근 (Jin-Geun Shon)

He received his B.S., M.S. and Ph. D. degrees in the Department of Electrical Engineering from Soongsil University in 1990, 1992 and 1997. He was Chief Researcher in Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Gyeonggi-do, Korea, during 1992-1995. He was a Postdoctoral Researcher in the Department of Electrical and Electronic Engineering, Kagoshima University, from 2002 to 2003. He was also a Visiting Scholar in the Power Electronics Laboratory, Michigan State University, from 2009 to 2010. He is currently a Professor at the school of Electrical Engineering, Gachon University, Korea. His research interests are the power conversion, control and diagnosis of power utility.
E-mail: shon@gachon.ac.kr