

전력계통 고장시 계통연계형 태양광발전시스템의 영향분석

박성훈* · 이용식** · 정성원*** · 김재현****†

*순천대학교 전기전자정보통신공학부, 박사과정
**주식회사 에스알이엔지, 연구소장
***에스디엔 주식회사, 에너지시스템사업부, 팀장
****순천대학교 전기공학전공, 교수

Analysis of the Effect of the Grid-connected Photovoltaic System in Fault Case of Power System

Park Sung-Hun* · Lee Yong-Sik** · Jeong Sung-Won*** · Gim Jae-Hyeon****†

*Department of Electrical and Electronics Engineering, Suncheon National University, Ph.D student
**SRENG Co., Ltd, Director of Research
***SDN Company Ltd, Division of Energy System, Team Leader
****Majoring in Electrical Engineering, Suncheon National University, Professor

†Corresponding author: jhg@scnu.ac.kr

Abstract

Among the main functions of the grid-connected photovoltaic (PV) system, the anti-islanding operation function is a very important problem. Recently, due to the improvement in power generation efficiency and the maintenance advantages in PV system, the use of string inverter has increased so that the possibility of islanding operation has been raised. Generally, when a power system faults, the PV inverter must be disconnected from power system within 10 cycles by the anti-islanding operation function. However, in the real-time of power system, the output power of the PV system within 10cycles is effected. In this paper, we analyzed the effect of grid-connected PV system on power quality in a short time within 10 cycles on fault case of power system using the Matlab Simulink program.

Keywords: 태양광발전시스템(Photovoltaic System), 전력계통 영향(Power System Effect), 단독운전방지(Anti-Islanding Operation), 전력품질(Power Quality)

1. 서론

국내 전력시스템은 전력수요 증가와 더불어 급변하는 전력 패러다임 속에서 다양한 어려움에 처해있다. 원자력발전원은 폐기물 처리를 비롯한 다양한 측면에서의 안정성 제기로 인하여 신설에 어려운 상황에 있으며, 화석연료를 사용하는 기력발전원은 미세먼지 등의 환경오염 문제로 인하여 운전 가동률이 저조할 뿐 아니라 신설에 다소 제한적인 요소로



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.39, No.4, pp.69-77, August 2019
<https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.4.069>

pISSN : 1598-6411
eISSN : 2508-3562

Received: 05 July 2019

Revised: 19 August 2019

Accepted: 20 August 2019

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

인하여 대체에너지에 대한 확대의 목소리가 지속적으로 요구되고 있다^{1,2)}. 이러한 대체 에너지원으로 확대 보급되어지고 있는 신재생발전원은 전력변동 완화와 계통연계의 안정성에 대해 지속적으로 연구개발이 진행되고 있으며 관련 기술기준이 강화되고 있는 실정이다. 특히 신재생 발전원 중에 가장 많이 설치되고 보편화 되고 있는 태양광발전시스템에 대해 많은 연구개발이 이루어져왔으며, 태양광 모듈의 효율향상과 더불어 보다 효율적이며 체계적으로 전력을 생산하고 관리할 수 있는 String PV inverter 사용이 급증하고 있다³⁾.

계통연계형 태양광발전시스템에 있어서 전력계통의 안정성과 시스템 보호측면에서 단독운전방지는 대단히 중요한 문제로 판단할 수 있다^{4,5)}. 그러나 국내에서는 단독운전이 발생하는 빈도가 낮아 연구의 중요성이 다소 떨어지는 분야였으나 급속한 태양광발전시스템의 증가와 더불어 String PV inverter의 사용급증으로 인한 전력변환시스템의 병렬운전 및 개별제어 등에 의해 단독운전의 발생가능성이 예상되어 관련 연구의 필요성이 다시 요구되고 있다⁶⁻⁸⁾. ‘분산형전원 배전계통 연계 기술기준⁹⁾에 의해 연계된 신재생 발전원들이 계통의 고장이나 유지보수 등으로 인해 단독운전 상태가 발생할 경우, 해당 분산형전원은 단독운전 발생 후 최대 0.5[s] 이내에 한전계통에 대한 가압을 중지해야 하며 비정상 전압에 대해 최대 10[cycle]이내 분산형전원은 계통으로부터 분리되어야 한다. 그러나 태양광발전시스템이 단일시스템으로 대용량화되어 설치됨에 따라 단독운전 방지에 의해 최대 10[cycle] 이내로 전력계통과 분리되더라도 전력계통에 미치는 영향은 크다고 할 수 있다¹⁰⁾. 따라서 본 논문에서는 모의 전력계통과 계통에 연계된 태양광발전시스템을 모델링하고 계통연계형 태양광발전시스템이 단독운전 기능이 동작하는 10[cycle] 이내의 전력계통 고장조건에서 전력계통에 미치는 영향에 관하여 서술하였다.

2. 단독운전 방지를 위한 기술기준

신재생에너지 분산형전원은 전력계통 연계시 전력품질과 보호협조에 관한 문제점이 반드시 해결되어야 하며 계통연계에 의해서 정전 등의 공급신뢰도, 전압, 주파수, 역률 등의 전력품질 면에서 다른 전기수용가에 악영향을 미칠 수 있다. 뿐만 아니라 전력공급 설비 또는 인근 다른 지역의 수용가에도 문제를 야기할 수 있기 때문에 시스템 보호와 작업자의 안전 확보가 이루어져야 한다¹¹⁾. 특히, 전력계통 점검 및 고장 등으로 인하여 계통으로부터 분리되어 단독운전이 형성될 수 있는 경우, 분산형전원은 단독운전을 검출하여 전력공급을 중단해야 하며 단독운전 방지를 위하여 지역계통과 병렬 운전되고 있는 분산형전원의 공통접속점의 지역 계통으로부터 전압강하 또는 사고를 감지한 후 지정된 시간 이내에 반드시 분리되어야 한다. 이러한 기술기준에 의해 inverter의 계통 전압 변동에 따른 정상 운전 범위는 기준전압의 88 ~ 110[%]로 하고 계통에서 비정상 전압상태가 발생할 때로부터 태양광 발전설비가 계통으로 완전히 분리될 때까지의 시간(고장제거시간)은 Table 1과 같으며 PV inverter의 계통의 주파수 변동에 따른 고장제거시간은 Table 2와 같다.

Table 1 Separation time about voltage range⁹⁾

Voltage range (Ratio to reference voltage, %)	Separation time (sec)
$V < 50$	0.16
$50 \leq V < 88$	2.00
$110 < V < 120$	2.00
$V \geq 120$	0.16

Table 2 Separation time about frequency range⁹⁾

Range of power capacity (kW)	Frequency range (Hz)	Separation time (sec)
≤ 30	> 60.5	0.16
	< 59.3	0.16
> 30	> 60.5	0.16
	$< (59.8 \sim 57.0) / \text{setting option}$	0.16 (s) ~ 300 (ms) / setting
	< 57.0	0.16

3. 고장조건에 대한 단독운전 모의실험

3.1 모의 전력시스템 구성

본 논문은 정격 전압 22,900[V], 단락용량 10[MVA]의 Swing 발전기를 계통전원 공급원으로 하고 6,600[V] 선로를 기준으로 Table 3과 같이 3개의 부하와 250[kW] 계통연계형 태양광발전시스템을 연계하여 Fig. 1과 같이 모의 전력시스템을 구성하였다. 태양광발전시스템과 연계된 변압기 용량은 1[MVA]로서 1,2차측 임피던스

Table 3 Load capacity on simulation power system

No.	Rated voltage (V)	Capacity of active power (kW)	Capacity of rective power (kW)
Load 1	6,600	100	10
Load 2	6,600	300	20
Load 3	6,600	2	0
Total		402	30

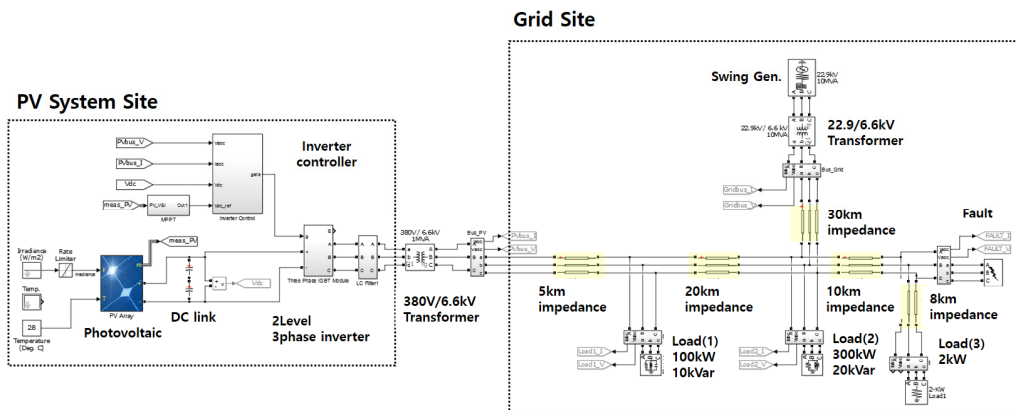


Fig. 1 Configuration of Matlab Simulink program

는 각각 $0.001+j0.003[\text{pu}]$ 이며 자화 임피던스는 $500+j500[\text{pu}]$ 로 설정하였다. 모의실험 특성분석을 위하여 3번 부하(Load3) 인근에서 5[cycle] 동안의 전력계통 고장이 발생하는 조건으로 하며, 태양광 발전시스템에서 전력계통으로 유입되는 전압, 전류 특성과 계통에 미치는 영향을 분석하였다.

PV inverter의 출력단 고조파 제거를 위해 LC필터를 사용하여 이상적인 정현파에 근접하도록 설계하였으며 필터 설계식은 식(1)과 같다. 일반적으로 차단 주파수(f_c)는 스위칭 주파수의 0.1배로 선정하므로 1,600[Hz]를 적용하여 계산하였으며 계산을 통해 L값은 약 0.5[mH], C값은 20[μF]를 사용하였다.

$$L_f = \frac{1}{C_f} \left(\frac{1}{2\pi f_c} \right)^2 \tag{1}$$

태양광 모듈은 개방전압(V_{oc}) 37.3[V], 단락전류(I_{sc}) 8.66[A], 최대전력점 전압(V_{mp}) 30.7[V], 전류(I_{mp}) 8.15[A]의 특성을 지니며, 직렬 20, 병렬 50 모듈로 연결하여 250[kW]의 태양광발전시스템을 구성하였다.

3.2 전력시스템 모의실험 특성분석

정상상태 및 고장상태에 대한 모의실험 조건은 일사량 1000[W/m²]와 온도 25[°C]를 기준으로 하며, 고장지점에서 3상 단락, 1선 지락, 선간 단락고장을 10/60 ~ 15/60[cycle]동안 발생시켜 각 고장에 대한 PV 시스템 출력특성과 정상분(Positive sequence), 역상분(Negative sequence), 영상분(Zero sequence) 전압 및 전류의 특성을 분석하였다. 전력계통 특성을 분석하기 위한 계측 위치는 태양광발전시스템 출력 변압기 1차측(계통측)이며 Y결선으로 구성되어 있다.

(1) 정상상태조건

정상상태에 대한 모의실험 출력특성으로 250[kW]의 태양광발전시스템 출력특성과 6,600[V] 계통선로의 출력특성은 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)는 PV inverter로 입력되는 태양광어레이 출력 특성으로 615[V_{dc}], 406[A_{dc}], 약 250[kW]을 나타내며, Fig. 2(b)-(d)는 PV inverter에서 전력계통으로 출력되는 전압, 전류특성과 정상분, 역상분, 영상분 전압 및 전류 크기 특성을 나타낸다. PV inverter 출력은 Δ결선 380[V] 선로에 연계되어 Δ-Y 변압기를 거쳐 6,600[V]의 전력계통으로 인입되며, Fig. 2(b),(c)는 상전압 기준(3,810[V])에 대한 특성을 나타낸다. Fig. 3은 전력계통 모델링에서 PV 시스템, 계통 공급측, 부하(1), 부하(2), 부하(3)의 각 구간별 a상 전압, 전류, 입출력전력에 대한 특성으로 각 모선에 대한 부하 유효전력 및 무효전력에 따라 정상적인 출력특성을 나타낸다. 각 구간의 모든 전압의 크기와 위상은 동일하며, 전류특성은 해당 부하에 따라 전류의 위상 및 크기만 상이함을 확인할 수 있다.

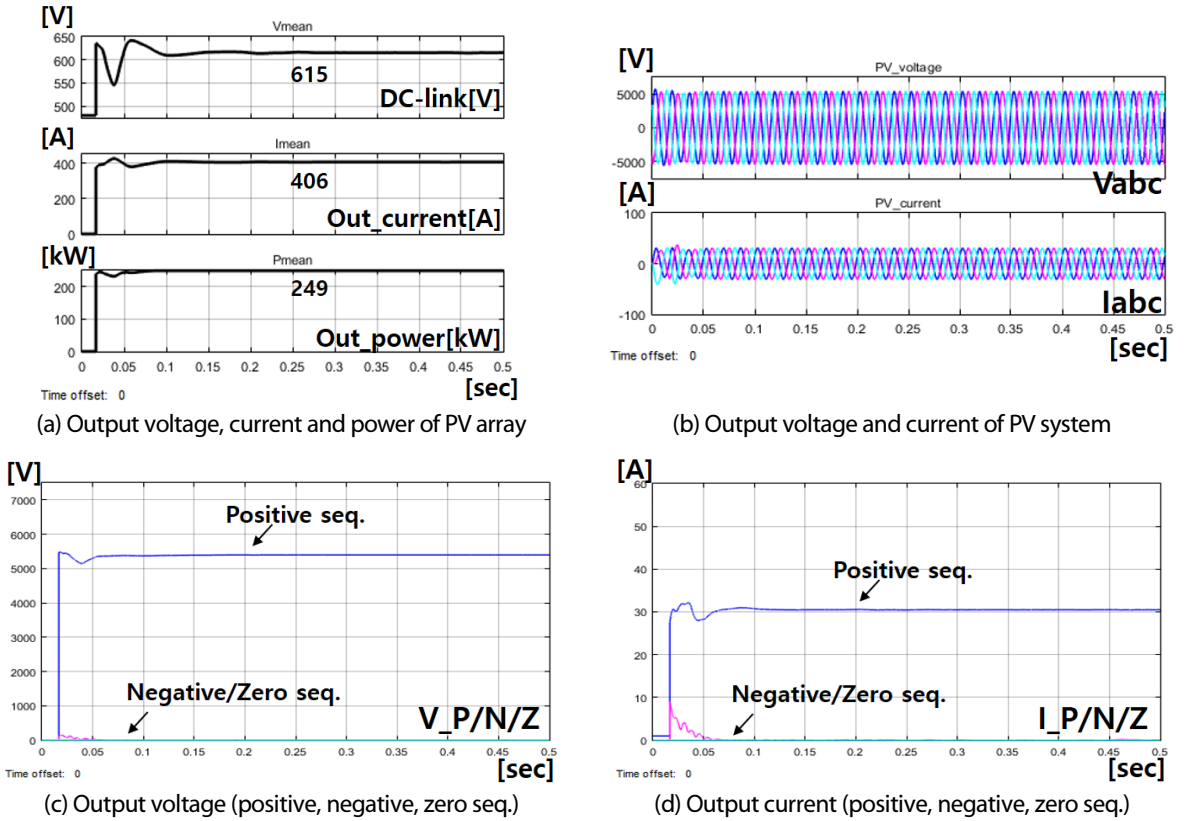


Fig. 2 Characteristic results of PV system on steady state

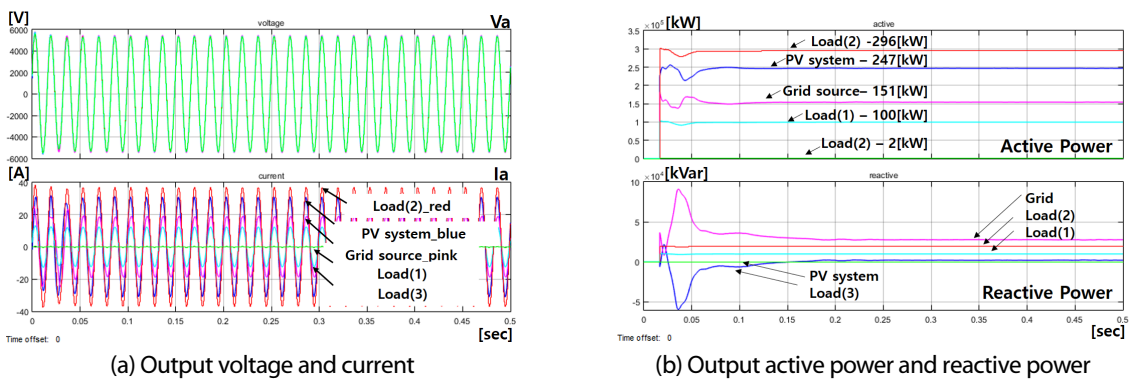


Fig. 3 Characteristic results about power system

(2) 3상 단락고장 조건

3상 단락고장에 대한 모의실험 결과는 Fig. 4와 같다. 3상 지락발생시 3상이 모두 단락된 상태가 되어 3상 단락 고장이라 하며, 고장구간(10/60 ~ 15/60[cycle])동안 고장지점으로부터 선로 및 부하 임피던스에 의해 계통 상전압이 710[V]로 나타나며, 태양광발전시스템으로부터 계통으로 유입되는 전류는 약 60[%]이상 커짐을 확인할 수 있다. 태양광발전시스템에서 계통으로 유입되는 고장전류는 제어기 한계 값에 도달하기까지 커지지만 PV 특성곡선에 의해 PV 출력전력은 매우 낮아짐을 확인할 수 있다. 또한 고장제거 후의 출력은 PV시스템의 제어기 영향으로

약 0.15[s] 후에 정상상태에 도달한다. 3상 평형고장 상태로서 전압, 전류 모두 역상분, 영상분 크기는 '0'(영)으로 나타나지만 고장 발생시점과 제거시점에 직류성분에 의해 부분적 역상 및 영상분이 나타남을 확인할 수 있다.

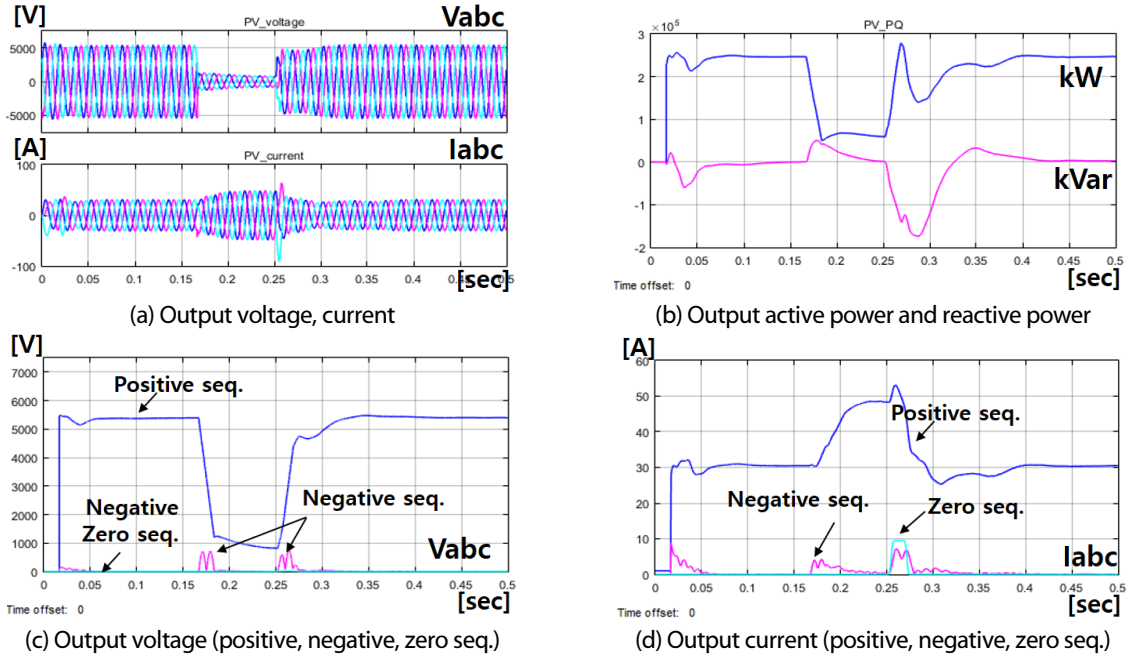


Fig. 4 PV system output characteristic results on 3-phase ground fault state

(3) 1선 지락고장 조건

1선 지락고장에 대한 모의실험 결과는 Fig. 5와 같다. 고장구간(10/60 ~ 15/60[cycle])에서 a상이 지락 됨에 따라 Fig. 5(a)와 같이 태양광발전시스템 출력단자의 a상 전압강하가 발생하며 선로 불평형 상태가 된다. 1선 지락고장에 의한 전류의 대칭성분인 정상분, 영상분, 역상분의 전류의 크기는 동일한 크기로 나타나야 하지만 고장점 위치와 태양광발전시스템의 출력 단자간의 거리차로 인한 선로 임피던스 영향으로 인하여 a상 전압은 '0'(영)으로 나타나지 않았으며, 영상분 전압은 매우 작은 값으로 나타나고 역상분 전압은 약 1,300[V]을 나타낸다. 1선 지락시 태양광발전시스템에서 출력되는 a, b상 전류가 2배 이상 커졌으며, 정상분 전류와 영상분 전류는 약 40[A], 역상분 전류는 약 12[A]의 크기로 나타남을 확인할 수 있다. 고장구간에서 PV inverter의 DC-link 단 전압은 계통의 불평형 전압으로 약 540 ~ 705[V] 범위로 진동이 발생하였다. 이는 각 상별 전압 불평형에 의해 PV inverter의 DC-link 제어를 위한 기준전압(V_{dc_ref})과의 차에 의해 발생되고 전류 제어 기준 전류(I_{d_ref}) 값은 고장 중에 한계 값으로 제한됨을 확인할 수 있다.

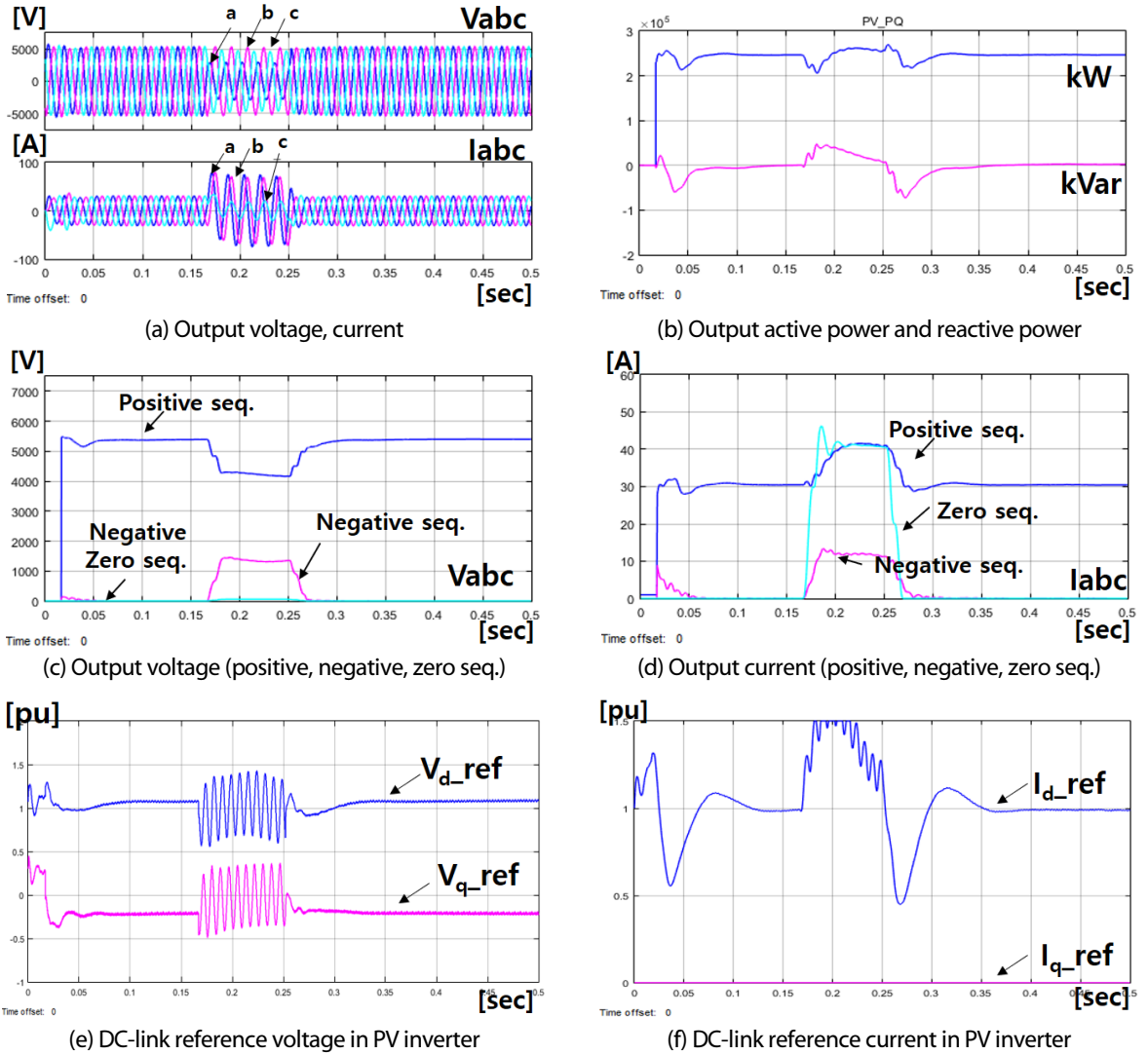


Fig. 5 PV system output characteristic results on 1-line ground fault state

(4) 선간 단락고장 조건

선간 단락고장에 대한 모의실험 결과는 Fig. 6과 같다. 고장구간에서 a, b상 선로가 단락된 고장조건으로 Fig. 6(a)와 같이 a상 전류가 b상의 역전류로 흐르게 되어 영상분 전류는 '0'(영)이 된다. 대칭분 전압에서 영상분은 '0'(영)이 되고 정상분 전압과 역상분 전압이 같은 크기가 되어야 하나 고장점 위치와의 거리차로 인한 선로 임피던스의 영향으로 정상분 전압은 약 3,200[V], 역상분 전압은 약 2,400[V]의 크기로 나타난다. 고장구간에서 DC-link 단 전압이 계통의 불평형 전압에 의해 약 560~741[V] 범위로 진동이 발생하고, I_{d_ref} 값이 제어기 한계값으로 제한되었다. 또한 고장제거시 DC-link단 전압이 368[V]로 강압되었다가 정상상태로 회복됨을 확인할 수 있다.

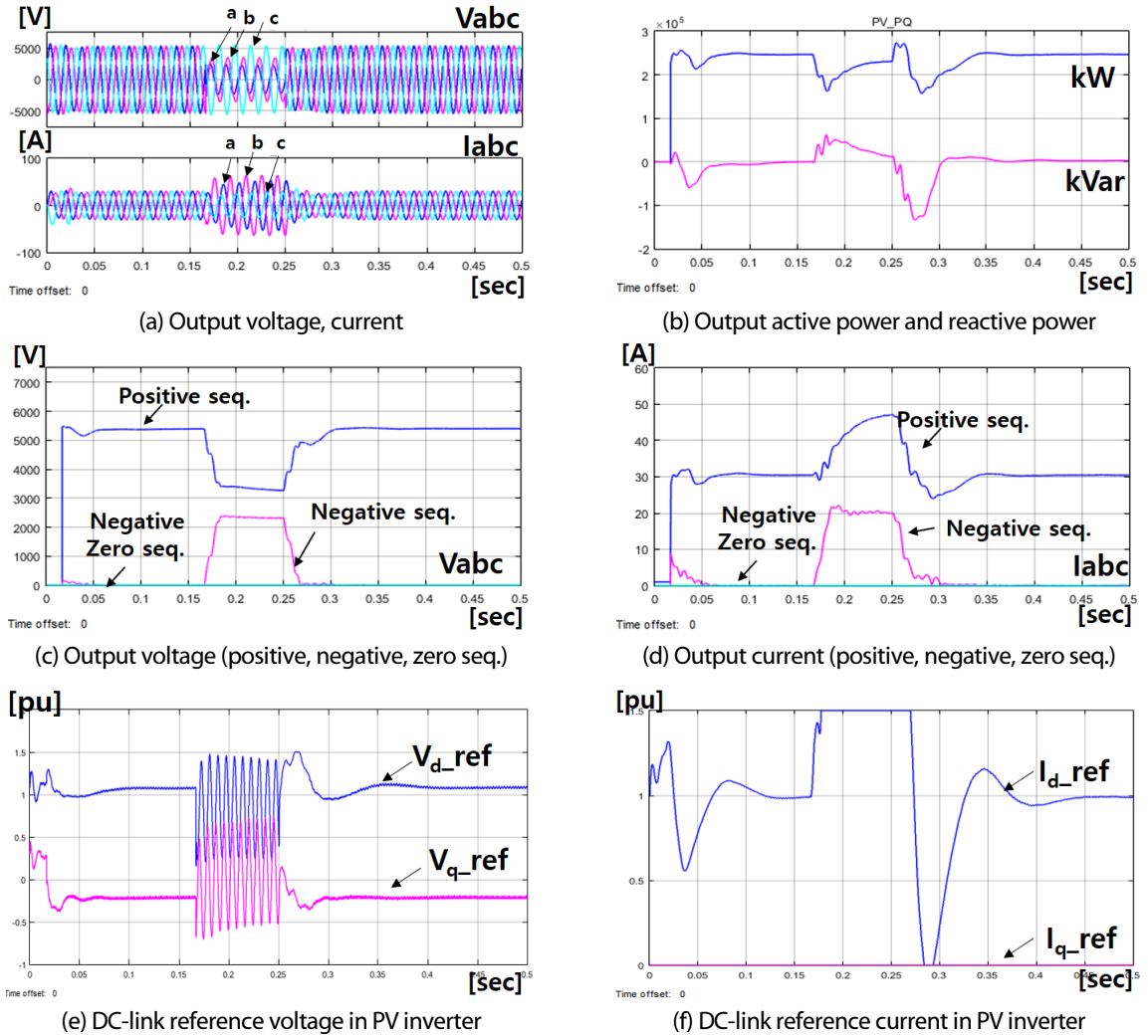


Fig. 6 PV system output characteristic results on line to line fault state

4. 결론

일반적으로 태양광발전시스템의 inverter에 적용되는 단독운전 기법은 무효전력을 투입하여 주파수 변동을 일으켜 단독운전을 검출하며, 전력계통의 고장이나 유지보수 등에 의한 비정상적인 계통으로부터 단독운전을 방지하기 위해 10[cycle]이내에 태양광발전시스템은 전력계통으로부터 분리해야 한다. 그러나 비정상 전력계통에서 분산형전원이 단독운전 하기 전 10[cycle] 이내에 발생하는 문제점에 대해서는 별도의 규정이 없는 실정이다. 본 논문에서는 이러한 단독운전 방지기능이 동작하기 이전의 매우 짧은 시간 내에 계통연계형 태양광발전시스템이 전력계통에 미치는 영향을 분석하기 위해 태양광발전시스템 및 모의계통도를 구성하여 모의실험을 통해 확인하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 전력계통의 어느 한 지점에 임의의 사고를 가정하여 3상단락, 1선지락, 선간단락 고장조건에 대해 시스템 특성을 분석하였다. 전력계통 고장 발생 및 제거 시점에 직류성분에 의해 부분적으로 역상 및 영

상분이 나타남을 확인하였으며, 전력계통의 불평형 전압으로 인하여 inverter의 DC-link단 전압이 크게 진동함을 확인하였다.

- (2) 모델링된 inverter 용량 및 전류 제어기 제한 값에 의해 태양광발전시스템에서 전력계통으로 유입되는 사고전류 크기가 결정되며, 10[cycle] 이내의 짧은 시간이지만 계통으로 유입되어 보호기기의 오동작 및 부하에 영향을 줄 수 있는 특성을 확인하였다.
- (3) 지속적으로 성장하고 있는 계통연계형 태양광발전시스템과 전력계통의 안정성을 위하여 단독운전 동작 이내의 사고유입전류를 차단하거나 흡수할 수 있는 보호시스템에 대해 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후기

This paper was supported by Suncheon National University Research Fund in 2016.

REFERENCES

1. Ministry of Trade, Industry and Energy, 8th Plan for Electricity Supply and Demand, 12. 2017.
2. Kouro, S., Leon, J. I., Vinnikov, D., and Franquelo, L. G., Grid-connected Photovoltaic Systems: An Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology, *IEEE Ind. Electron. Mag.*, Vol. 9, No. 1, pp. 47-61, 2015.
3. Kim, D. H., Cho, S. R., Choy, I., Lee, T. K., and Choi, J. Y., The Anti-islanding Scheme for a Number of Grid-connected Inverters Under Parallel Operation, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 37, No. 3, pp. 12-22, 2017.
4. IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, *IEEE Std. 929-2000*, Apr. 2000.
5. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, *IEEE Std. 1547-2008*, 2003.
6. Voglitsis, D., Papanikolaou, N. P., and Kyritsis, A. C., Active Cross-Correlation Anti-Islanding Scheme for PV Module-Integrated Converters in the Prospect of High Penetration Levels and Weak Grid Conditions, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, No. 3, pp. 2258-2274, 2019.
7. Kim, B. H., Park, Y. S., Sul, S. K., Kim, W. C., and Lee, H. Y., Anti-islanding Detection of Photovoltaic Inverter Based on Negative Sequence Voltage Injection to Grid, *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 17, No. 6, pp. 546-552, 2012.
8. Lim, J. R., Hwang, H. M., Shin, W. G., Ju, Y. C., Jung, Y. S., Kang, G. H., and Ko, S. W., A Case Study on the Islanding Detection Protection of PV System and ESS System, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 39, No. 1, pp. 59-66, 2019.
9. KEPCO, Standard for Interconnecting Distributed Energy Resources with Distribution System, 2018
10. Jia, K., Gu, C., Xuan, Z., Li, L., and Lin, Y., Fault Characteristics Analysis and Line Protection Design Within a Large-Scale Photovoltaic Power Plant, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 5, pp. 4099-4108, 2018.
11. The Technical Guideline for the Grid Connection of the Substitution Energy Generation System. Ministry of Commerce, Industry and Energy, Final Report, 2004.