

PSCAD/EMTDC를 이용한 계통연계형 태양광발전시스템의 모델링 및 모의 해석

論 文

54A-3-1

PSCAD/EMTDC Based Modeling and Simulation Analysis of a Grid-Connected Photovoltaic Generation System

金 슬 기[†] · 全 鎮 洪^{**} · 金 應 相^{***}

(Seul-Ki Kim · Jin-Hong Jeon · Eung-Sang Kim)

Abstract - The paper addresses modeling and analysis of a grid-connected photovoltaic generation system (PV system). PSCAD/EMTDC, an industry standard simulation tool for studying the transient behavior of electric power system and apparatus, is used to conduct all aspects of model implementation and to carry out extensive simulation study. This paper is aimed at sharing with the PSCAD/EMTDC user community our user-defined model for PV system applications, which is not yet available as a standard model within PSCAD/EMTDC. An equivalent circuit model of a solar cell has been used for modeling solar array. A series of parameters required for array modeling have been estimated from general specification data of a solar module. A PWM voltage source inverter (VSI) and its current control scheme have been implemented. A maximum power point tracking (MPPT) technique is employed for drawing the maximum available energy from the PV array. Comprehensive simulation results are presented to examine PV array behaviors and PV system control performance in response to irradiation changes. In addition, dynamic responses of PV array and system to network fault conditions are simulated and analysed.

Key Words : Grid interface, Photovoltaic generation, PSCAD/EMTDC simulation, VSI, MPPT

1. 서 론

태양광발전시스템은 무한하고 풍부한 태양광 에너지를 이용하여 청정한 전력을 생산해낼 수 있다. 진동과 소음이 없으며, 수명이 최소 20년 이상으로 반영구적이며, 설비 자동화가 용이하며, 운전 및 유지관리에 드는 비용을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 반면에 태양광발전설비의 건설에는 초기 투자가 요구되므로 상용전력에 비하여 발전단가가 높고, 일사량에 따른 발전량 편차가 심하므로 안정된 전력공급을 위한 추가적인 건설비 보완이 필요하다는 단점이 있다. 이러한 태양광발전시스템의 기상조건에 따른 제약과 이용 기술상의 문제점은 기술개발과, 실증시험 및 모의를 통하여 개선되어야 할 사항이며, 이와 관련하여 최대 출력점 추종제어에 관한 연구[1,2], 실제 기상조건을 이용한 PV 시스템의 실시간 시뮬레이션 기법 [3] 등 태양전지 모델링을 통한 특성 모의 연구가 이루어져 왔다.

PSCAD/EMTDC는 전력기기 및 전력계통의 전자기과도현상 모의 해석 프로그램이다. EMTDC는 실제로 사용자가 정의한 전력계통에 대한 전자기과도 해석을 수행하며, PSCAD는 다양한 소프트웨어 모듈을 함유하여 EMTDC에 그래픽한 인터페이스를 제공하는 역할을 한다. 이 프로그램에서는 사용자가 정의한 모델 또는 프로그램에서 지원하는 기능으로

전기회로 또는 제어시스템을 구성하여, 외란 및 파라미터 변동에 대한 모델의 운전특성을 시험하고 응답의 안정성을 검토하기 용이하며, 전력계통의 과도현상 및 정상상태 해석에 대한 광범위한 연구 분야를 다룰 수 있다[4, 5].

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 기반으로 하여 계통연계형 태양광발전시스템의 동특성 해석 모델 및 그 모델링 방법을 제시한다. 개발된 모델을 바탕으로 태양전지 및 PV 시스템의 출력 및 응답특성을 모의하고 해석한다. 태양전지 어레이 모델링을 위하여 태양전지 등가회로 모형을 이용하며, 태양전지의 규격 데이터로부터 모델링에 필요한 다양한 파라미터를 유추한다. 어레이 직류 출력의 교류 변환을 위한 3상 PWM 전압원인버터 모델을 제시하고, 전류제어를 통한 출력 제어 방식을 모델링한다. 전체 시스템의 출력제어를 위하여 최대출력점 추종제어(MPPT) 방식이 적용된다. 모델링되는 계통연계형 태양광발전시스템의 전체 구성은 현재 국내에 보급 중인 시스템을 대상으로 한다. 제시된 모델을 이용하여 태양전지 어레이의 출력특성 및 PV 시스템의 출력성능을 모의하며, 연계선로의 고장에 대한 PV 어레이 및 시스템의 응답특성을 고찰한다. 현재 PSCAD/EMTDC에서 지원하는 표준 모델이 없는 PV 시스템에 대한 사용자 정의 모델 및 모델링 기법을 국내 PSCAD/EMTDC 사용자 그룹과 공유하여, PV 시스템 과도현상 해석에 관심있는 사용자들에게 관련 정보를 제공하는 것 또한 본 논문의 주요 목적이다.

[†] 교신저자, 正 會 員 : 韓國電氣研究院 先任研究員

E-mail : blksheep@keri.re.kr

* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 先任研究員

** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 責任研究員

接受日字 : 2004年 10月 20日

最終完了 : 2005年 2月 3日

2. PSCAD/EMTDC 모델링

2.1 계통연계형 PV 시스템의 구성

태양광발전시스템의 일반적 구성은 태양전지 어레이, 축전

지와 전력변환기 등 주변기기 등의 조합에 따라 여러 가지 형태로 이용시스템을 구성할 수 있다. 본 논문에서는 모델링 대상으로 현재 국내 배전계통에 보급중인 계통연계형 PV 시스템을 대상으로 한다. 일반적인 구성은 그림 1과 같이 태양광으로부터 전기를 발생하는 태양전지 어레이, 어레이의 직류출력을 적절한 출력제어 방식을 이용하여 교류출력으로 변환하는 전력변환장치 그리고 이 교류 출력전압을 연계계통의 전압과 동일한 수준으로 승압하는 연계변압기로 이루어진다.

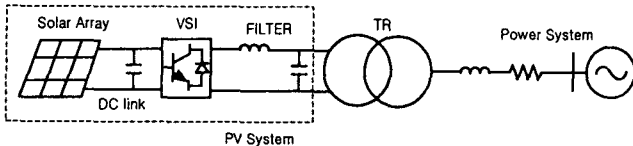


그림 1 계통연계형 PV 시스템 구성
Fig. 1. Grid-connected photovoltaic generation system

2.2 태양전지 어레이 모델링

태양전지 모델링을 위하여 다양한 등가회로 모형이 제시되어 왔다[1,2,3]. 본 연구에서는 그림 2와 같은 전류원, 다이오드 및 직렬저항으로 구성되는 등가회로 모형을 이용한다.

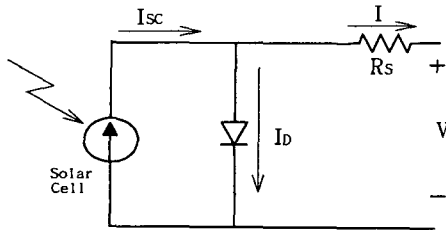


그림 2 간략화된 태양전지 등가회로 모형
Fig. 2 Simplified equivalent circuit model of a solar cell

PSCAD/EMTDC 프로그램에서는 전류원, 다이오드, 저항 소자에 대한 모델이 제공되지만, 다이오드의 경우, $I_0(\exp[(V+IR_s)/nV_T]-1)$ 의 비선형성을 모델에 포함하고 있지 않기 때문에 단순히 등가회로 상의 각각 소자에 해당되는 PSCAD 모델들을 연결하여서는 올바른 태양전지 특성을 반영할 수 없다. 따라서 위의 등가회로에서 얻을 수 있는 수리 관계식으로부터 적절한 사용자 정의 모델을 구성한다.

그림 2의 등가회로 모형에서 식 (1)과 같은 수리 관계식을 얻을 수 있다.

$$I = I_{SC} - I_0 \left(\exp \left[\frac{V + IR_s}{nV_T} \right] - 1 \right) \quad (1)$$

- 단, I_{SC} = 태양전지 단락전류 [A]
- I_D = 다이오드 전류 [A]
- I_0 = 다이오드 포화전류 [A]
- V = 부하전압 [V]
- R_s = 직렬저항 [Ω]
- n = 다이오드 이상정수 (1~2)
- V_T = 열 전위차 [V]. 단, $V_T = m \cdot (kT/q)$
- k = 볼츠만 상수 (1.38e-23 [J/K])
- T = 절대온도 [K]

- q = 쿨롱 상수 (1.6e-19 [C])
- m = 태양전지 모듈 내의 셀(cell) 수

식 (1)에서 V 를 I 에 대하여 나타내면, 식 (2)와 같다.

$$V = nV_T \ln \left(\frac{I_{SC} - I}{I_0} + 1 \right) - I \cdot R_s \quad (2)$$

식 (2)에서 단락전류의 일사량 및 온도에 관한 특성은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다 [6].

$$I_{SC} = I_{SC(ref)} \left(\frac{S}{1000} \right) + J(T - T_{ref}) \quad (3)$$

- 단, T_{ref} = 기준온도 (=298 [K])
- $I_{SC(ref)}$ = 기준온도에서의 단락전류 [A]
- S = 일사량 [W/m²]
- J = 단락전류 온도계수 [A/K]

식 (1)로부터 기준온도에서의 다이오드 포화전류는 식(4)와 같이 구할 수 있다. 식 (5)는 다이오드 포화전류의 온도에 관한 특성을 나타낸다 [2]. 식 (6)은 밴드 에너지 갭의 온도에 대한 특성식이다.

$$I_{0(ref)} = I_{SC(ref)} \frac{1}{\exp \left[\frac{V_{OC(ref)}}{nV_T} \right] - 1} \approx I_{SC(ref)} \cdot \exp \left[- \frac{V_{OC(ref)}}{nV_T} \right] \quad (4)$$

$$I_0 = AT^\gamma \exp \left[\frac{-E_g}{nkT} \right] \quad (5)$$

$$E_g = 1.16 - 7.02 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T - 1108} \text{ [eV]} \quad (6)$$

- 단, V_{OC} = 태양전지 개방전압 [V]
- A = 포화전류 온도계수 [A/K]
- γ = 온도의존 인자
- E_g = band 에너지 갭 [eV], 1 eV = 1.6e-19 Joul

표 1은 태양전지 모델링을 위하여 필요한 파라미터의 산출 방법을 정리한 것이다. 일반적으로, 제조업체에서 제공하는 태양전지 모듈 사양서에서 얻을 수 있는 데이터는 표 1에 나와 있는 기본데이터 항목 정도이다.

표 1 태양전지 모델링을 위한 파라미터 산출
Table 1 Parameters for the solar cell model

구분	기본 데이터	유추 파라미터	가정 파라미터	기타
항목	$V_{oc(ref)}$ $I_{sc(ref)}$ V_{mp} I_{mp} P_{max} m	식 (2) → R_s 식 (4) → $I_{0(ref)}$ 식 (5), (6) → A 식 (5) → I_0	n (1.0~2.0) γ (=3)	$T_{ref} = 25^\circ\text{C}$ $S_{ref}=1000[\text{W/m}^2]$ $k=1.38\text{e-}23[\text{J/K}]$ $q=1.6\text{e-}19 [\text{C}]$ $*J=(0.065\pm 0.015)\%/\text{C}$
산출 방법	모듈 사양서	관계식 이용	실험적 값 - 참고문헌[1-3]	기본 상수

*J는 태양전지 모듈 사양서에서 제공하지 않는 경우, 기타에서 제시한 값 이용

본 연구에서는 기본 데이터를 바탕으로 위에서 제시된 관계식을 이용하여 일부 파라미터를 유추하였다. 또한 가정이 필요한 파라미터는 참고문헌 [1-3]에서 제시된 실험적 값을 활용하였다.

태양전지 1 cell의 경우, 발전시스템의 전원으로 사용하기에는 단자전압 및 출력이 작기 때문에 일반적으로 여러 cell을 직렬 연결하여 그림 3과 같이 태양전지 모듈을 구성한다. 이 태양전지 모듈을 기본 단위로 하여 설계하고자 하는 전원시스템의 규격에 맞도록 직렬 또는 병렬 연결하여 태양전지 어레이를 형성한다. 태양전지 사양서에 나와 있는 기본 데이터는 태양전지 모듈의 데이터를 나타낸다.

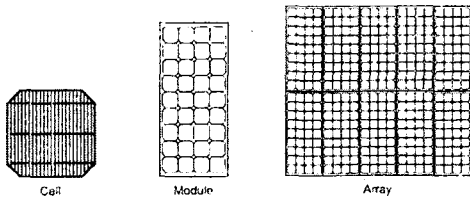


그림 3 태양전지 셀, 모듈 및 어레이 구성
Fig. 3 Solar cell, module and array

식 (1)과 (2)는 태양전지 모듈의 데이터를 바탕으로 한 전지 모듈의 관계식이며, 태양전지 어레이에서의 특성을 구현하기 위해서는 모듈의 직렬 연결 수 N_s 와 병렬 연결 수 N_p 를 포함하여 재구성한다[6]. 태양전지 어레이의 변수 및 데이터를 다음과 같이 구할 수 있다.

- 어레이 출력전류 : $I_{AF} = N_p I$ (7)
- 어레이 단락전류 : $I_{SCA} = N_p I_{SC}$ (8)
- 어레이 단자전압 : $V_A = N_s V$ (9)
- 어레이 개방전압 : $V_{OCA} = N_s V_{OC}$ (10)
- 어레이 직렬저항 : $R_{SA} = (N_s/N_p)R_s$ (11)

식 (7)-(11)을 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (12)와 같은 태양전지 어레이의 특성 식을 얻을 수 있다.

$$I_A = N_p I_{SC} - N_p I_o \left(\exp \left[\frac{V_A + I R_{SA}}{n N_s V_T} \right] - 1 \right) \quad (12)$$

앞서 기술한 특성 관계식을 바탕으로 사용자 정의 기능을 사용하여 태양전지 어레이를 모델링하였다. 그림 4는 PSCAD에서 구현한 태양전지 어레이 모델을 나타낸다. 일사량(I_{ns})과 온도(T_{mp})를 입력변수로 갖는다. 표 2는 PV 어레이 모델에 입력되는 데이터 및 파라미터를 나타낸다.

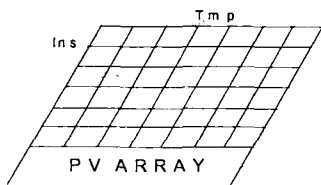


그림 4 PV 어레이 모델(PSCAD/EMTDC)
Fig. 4. PV array model

표 2 태양전지 어레이 모델의 입력 데이터
Table 2 Input data for the PV array model

구분	데이터	기호
태양전지 모듈 데이터 (단, $T=T_{ref}$, $S=S_{ref}$)	개방전압 [V]	V_{oc}
	단락전류 [A]	I_{sc}
	최대출력점 전압 [V]	V_{mp}
	최대출력점 전류 [A]	I_{mp}
	최대출력 [W]	P_{max}
	모듈 내 cell 수	m
태양전지 어레이	모듈의 직렬 연결 수	N_s
	모듈의 병렬 연결 수	N_p
기타 데이터	이상정수	n
	온도의존 계수	γ
	기준온도 [$^{\circ}C$]	T_{ref}
	기준 일사량 [W/m^2]	S_{ref}
	단락전류 온도계수 [$\%/^{\circ}C$]	J

2.3 DC-AC 변환부 모델링

태양전지 어레이의 직류 출력을 교류 출력으로 변환하기 위하여 DC-AC 인버터를 이용한다. 인버터의 스위칭 소자로는 IGBT, MOSFET, SCR 등이 있다. 인버터의 방식으로는 전류원 인버터와 전압원 인버터로 나누어지며, 제어방식에 따라 전압제어와 전류제어 방식으로 분류된다. 현재 국내에 보급 중인 계통연계형 PV 시스템 인버터의 대부분은 IGBT 스위치를 사용한 전류제어형 전압원 인버터이며, 본 논문에서도 이 방식의 3상 PWM 인버터를 모델링하였다. 그림 5는 계통연계형 시스템의 DC-AC 변환부를 나타낸다. 직류단 커패시터와 3상 IGBT 인버터, LC 고조파 필터로 이루어진다.

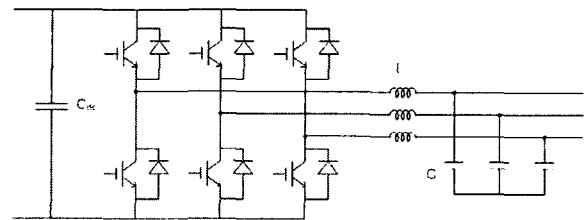


그림 5 DC-AC 변환부 모델
Fig. 5 DC to AC conversion system model

전류제어 인버터에서는 출력전류가 기준전류를 추종하도록 제어하여 PV 시스템의 유효전력 및 무효전력 출력을 제어한다. 지령된 기준전류 추종을 위해서 펄스 폭 변조방식(PWM: Pulse Width Modulation)을 이용한다. 계통연계형 PV 시스템의 유효전력 출력 제어는 최대전력점 추종기법을 통하여 이루어진다. 무효전력제어는 역률, 출력전압, kVar 등 제어대상에 따라 다르나, 본 연구에서는 역률제어방식을 따르고, 역률 1로 운전되도록 한다. MPPT 기법 및 무효전력 제어 적용에 대해서는 다음 두 절에서 기술한다.

일반적으로 유효전력 및 무효전력이 상호 독립적으로 제어될 수 있도록 dq 변환 제어를 이용한다. abc 세 축에서의 변수를 회전 dq 변환 행렬 $T(\theta)$ 을 통하여 a축 변수와 동일한

위상각을 가지고 동기속도로 회전하는 dq축 상의 변수로 변환한다.

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (13)$$

단, $[v_o \ v_d \ v_q]^T = T(\theta)[v_a \ v_b \ v_c]^T$ 이다.

여기서, v_o, v_d, v_q 는 odq 축의 변수
 v_a, v_b, v_c 는 abc 축의 변수
 θ 는 변수 v_a 의 위상각 [rad]

평형 3상 시스템에서 순시 유효전력 P 및 순시 무효전력 Q는 dq 축의 변수들을 이용하여 식 (14)로 표현될 수 있다.

$$P = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q), \quad Q = \frac{3}{2} (V_q I_d - V_d I_q) \quad (14)$$

단, V_d, V_q = d축 및 q축에서의 출력전압
 I_d, I_q = d축 및 q축에서의 출력전류

동기속도로 회전하는 dq축에서의 V_q 는 출력단의 순시전압의 크기와 동일하고 V_d 는 0이므로, 식 (14)는 식 (15)로 축약될 수 있다 [7].

$$P = \frac{3}{2} |V_o| I_q, \quad Q = -\frac{3}{2} |V_o| I_d \quad (15)$$

단, $|V_o|$: 인버터 순시출력전압의 크기

식 (15)에서 순시 유효전력은 인버터 출력전압의 크기와 출력전압과 동상인 선로전류의 크기에 비례하고, 순시 무효전력은 출력전압의 크기와 출력전압과 90°의 위상차를 이루는 선로전류의 크기에 비례함을 알 수 있다. 출력전압의 크기는 연계계통의 교류전압과 동일한 상수로 가정하면, P와 Q는 각각 I_q 와 I_d 에 좌우된다. 따라서 q축 및 d축 전류의 크기를 조정하여 유효전력 및 무효전력의 독립적인 제어가 가능하다.

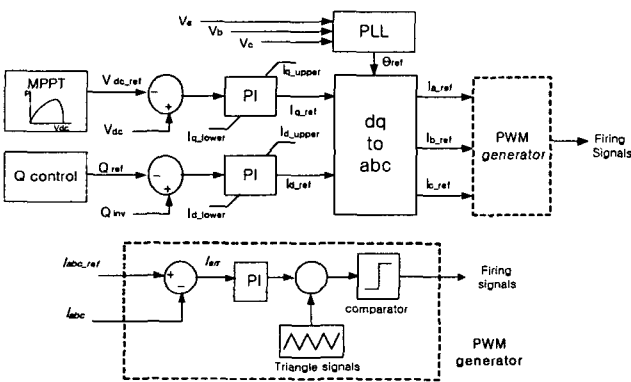


그림 6 인버터 전류제어 블록도
 Fig. 6 Block diagram of inverter current control scheme

그림 6은 PV 시스템 3상 PWM 인버터의 전류제어 블록도를 나타낸다. MPPT 제어와 무효전력 제어에 의해 q축 기준

전류 I_{q_ref} 와 d축 기준전류 I_{d_ref} 를 설정한다. 이 기준전류는 역 dq 변환에 의하여 각 a, b, c 상에 대한 기준전류 I_{a_ref} 와 I_{b_ref}, I_{c_ref} 로 변환된다. 위상동기제어(PLL:Phase Locked Loop)를 이용하여 역 dq 변환의 기준 위상각을 θ_{ref} 를 발생한다. a, b, c상의 기준전류 벡터와 실제전류 I_{abc} 벡터와의 오차신호 I_{err} 를 캐리어파인 삼각파와 비교하여 인버터의 스위칭 신호를 발생한다. 그림 7은 그림 6의 블록도를 바탕으로 하여 PSCAD/EMTDC에서 구현한 PV 시스템 인버터의 출력제어 회로도를 나타낸다. 회로도에서 “Voltage reference generator”는 사용자 정의 모듈로서 MPPT 기법을 이용하여 유효전력 제어를 위한 태양전지 어레이 최적 출력전압 기준값을 생성한다.

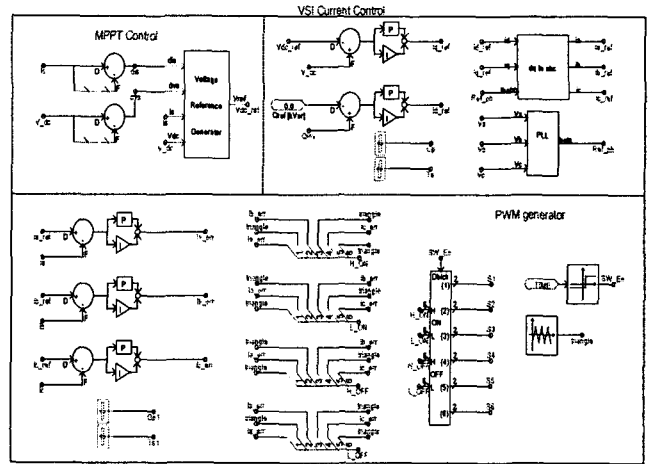


그림 7 PV 시스템 인버터 제어 회로도 (PSCAD/EMTDC)
 Fig. 7 Inverter control implemented in PSCAD/EMTDC

2.4 MPPT 제어

태양전지는 그림 8에서와 같이 주어진 일사량과 온도 조건에서 전지의 출력전압에 따라 출력되는 전력이 변하게 된다. 따라서 태양전지를 효율적으로 동작시키기 위해서 태양전지 어레이가 항상 최대전력점 근처에서 동작하도록 하는 최대출력점 추종 제어가 필요하다. 태양전지 어레이에 연결된 인버터를 제어하여 어레이의 출력전압을 최적화함으로써 최대출력점 동작이 가능하게 된다[8].

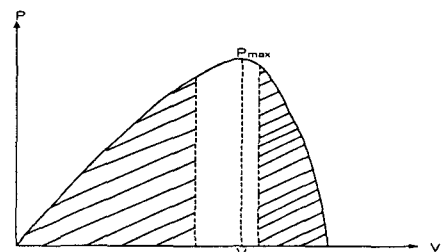


그림 8 태양전지 어레이 출력-전압 곡선
 Fig. 8 P-V curve of PV array

태양전지 어레이가 전압 V와 전류 I로 동작하고 있으면, 어레이의 출력 $P = V \cdot I$ 이다. 출력에 대한 전압의 미분함수 dP/dV 는 식 (16)과 같다.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (16)$$

식 양변을 V로 나눈 I/V+dI/dV의 부호로 dP/dV의 부호 판별이 가능하다. dP/dV가 0일 때 최대출력점을 가진다. 따라서, ε를 0에 아주 가까운 양수라고 가정할 때, dP/dV > ε이면, 어레이의 전압을 증가시키고, dP/dV < -ε이면, 전압을 감소시키며, -ε ≤ dP/dV ≤ ε이면, 원래의 전압을 유지한다. 그림 9는 본 연구에서 적용한 MPPT 기법의 흐름도를 보인 것이다. 이 흐름도는 그림 7에 있는 최적 어레이 전압 산출을 위한 사용자 정의 모델로서 구현된다. e1, e2, e3는 허용오차로서 0에 아주 가까운 양수로 설정한다. Is와 Vdc는 태양 전지 어레이의 전류 및 전압을 나타낸다. 여기서 설정된 Vdc_ref가 그림 7의 인버터의 유효전력 제어를 위한 기준값으로 지정된다.

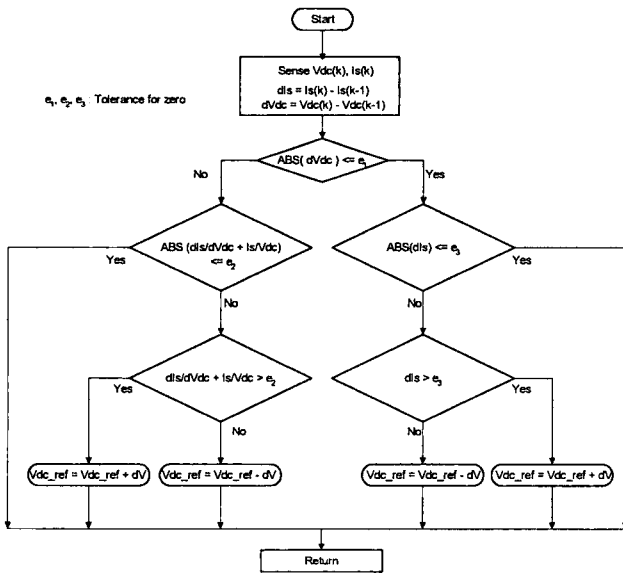


그림 9 적용된 MPPT 기법의 흐름도
Fig. 9 Flow chart of MPPT technique implemented

2.5 무효전력 제어

무효전력 제어모드는 제어 대상에 따라 역률제어, 무효전력량제어, 전류제어 및 전압제어 등이 있으며, 모드에 따라 공급되는 무효전력 투입량이 결정된다. 본 논문에서는 일정

역률제어를 적용하는데, 일정역률제어 모드에서 무효전력 기준값은 식(17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{ref} = P_{inv} \cdot \frac{\sqrt{1 - PF^2}}{PF} \quad (17)$$

단, PF = 원하는 일정역률
P_{inv} = 인버터의 유효전력 출력

무효전력을 제어할 수 있는 양은 시스템의 정격에 의하여 제한되며[9], 이러한 제한 값이 모델링 시 고려되어야 한다. PV 시스템의 무효전력 공급능력은 인버터의 정격에 의해 결정되며, 이는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{limits} = \pm \sqrt{S_{inv}^2 - P_{mV}^2} \quad (18)$$

단, Q_{limits} 과 S_{inv}는 무효전력 공급능력[kVar]과 인버터의 정격용량[kVA]이다.

3. 성능모의

개발한 PSCAD/EMTDC 모델을 바탕으로 태양전지 어레이의 특성을 모의하고, 계통연계형 태양광발전시스템의 전체 출력성능 특성을 모의한다. 용량은 현재 한국전기연구원에 설치되어 있는 PV 어레이의 규격 데이터를 활용하기 위하여 동일한 용량의 9kW 급으로 선정하였다. 또한, 연계선로 고장시의 PV 어레이 및 시스템의 과도특성을 보기 위하여 1선 지락고장 및 3상 단락고장 시의 시스템의 응답특성을 모의한다. 표 3은 모의에 사용된 파라미터들을 나타낸 것이다. 그림 10은 구현한 계통연계형 PV 시스템의 PSCAD/EMTDC

표 3 PV 시스템 모델의 파라미터
Table 3 Parameters used for PV system simulation

파라미터	값	파라미터	값
V _{oc}	21.7 [V]	J	0.065 [%/°C]
I _{sc}	3.35 [A]	C _{dc}	10000 [μF]
V _{mp}	17.4 [V]	G _p	1
I _{mp}	3.05 [A]	T _s	0.05 [sec]
P _{max}	53 Wp	G _{p1}	10000
m	36	T _{s1}	0.0001 [sec]
N _s	20	스위칭 주파수	7.2 [kHz]
N _p	9	e1, e2, e3	1.0e-7
n	1.5	L	0.001 [H]
v	3	C	0.01 [μF]
T _{ref}	25 [°C]	Tr. Rating	100 [kVA]
S _{ref}	1000 [W/m ²]	Tr. Ratio	0.21/0.38 [kV]

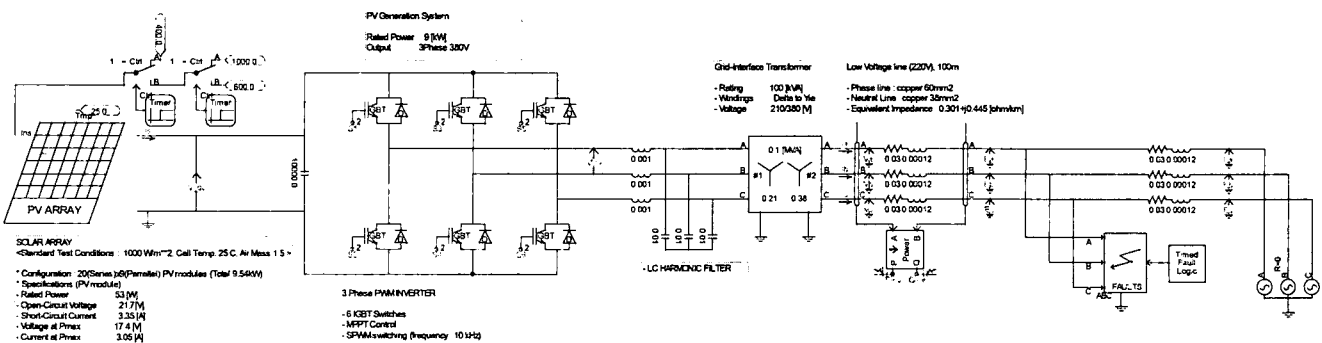


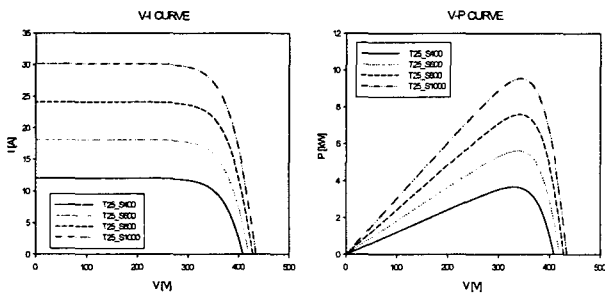
그림 10 계통연계형 PV 시스템 PSCAD/EMTDC 모델
Fig. 10 Grid-connected PV system implemented in PSCAD/EMTDC

모델을 나타낸다.

3.1 태양전지 어레이의 출력특성

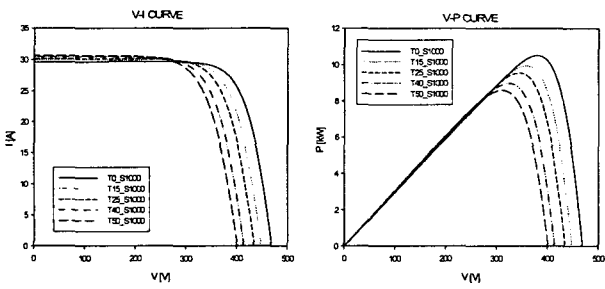
9kW급 PV 시스템의 태양전지 어레이는 총 180개의 모듈 (20직렬×9병렬)로 구성될 수 있다. 태양전지 어레이 모델을 이용하여 특정 일사량 및 온도 조건 하에서의 V-I 특성 및 V-P 특성을 모의하였다. 그림 11 및 그림 12는 온도 25°C에서 일사량 변화 (S = 400, 600, 800, 1000 [W/m²])에 대한 V-I 곡선들 및 V-P 곡선들을 나타낸다. 그림 13 및 그림 14는 일사량이 일정할 경우(S= 1000 [W/m²]), 온도변화 (T = 0, 15, 25, 40, 50 [°C])에 대한 V-I 곡선 및 V-P 곡선이다.

그림 11에서 일사량이 상승함에 따라 유사한 곡선의 유형을 유지하면서, 어레이의 전압 및 전류가 증가하게 된다. 이로 인해, 그림 12와 같이 전압에 대한 출력 특성 또한 일사량이 증가할 때, 증가되는 특성을 보인다. 또한 그림 13에서 온도가 증가함에 따라 전류는 증가하지만, 전압은 감소하는 경향을 보인다. 전압감소의 폭이 전류 증가 폭보다 다소 커서 전체 출력은 그림 14와 같이 온도 증가에 대하여 감소 추세를 보인다.



(a) V-I 곡선 (b) V-P 곡선

그림 11 일사량 변화에 따른 V-I 및 V-P 곡선
Fig. 11 V-I and V-P curve for different solar irradiance



(a) V-I 곡선 (b) V-P 곡선

그림 12 온도변화에 따른 V-I 및 V-P 곡선
Fig. 12 V-I and V-P curve for different temperature

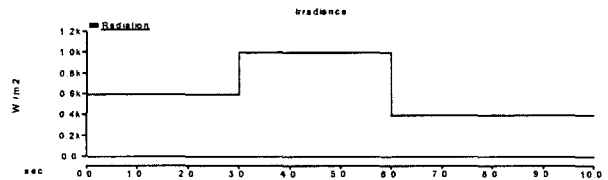
3.2 PV 시스템 출력특성 모의

계통연계형 PV 시스템이 역률 1로 운전되고 있다고 가정한다. 온도는 25°C 일 때, 그림 15의 일사량 세기의 변동에 대한 PV 시스템의 출력성능을 모의하였다.

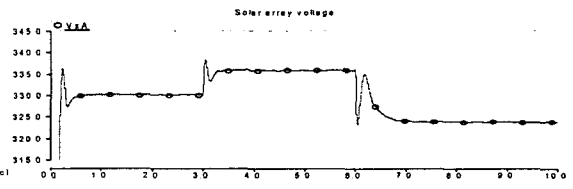
그림 16은 일사량 변동에 대한 태양전지 어레이의 출력전압 변동을 나타낸다. 일사량이 변동되는 순간에 전압레벨의 변화에 따른 동요가 발생하나 곧 최적전압수준을 찾아간다. 그림 17은 어레이의 출력전류로서 V-I 특성에 의해 출력전압 변동에 따른 응답 특성을 보인다. 그림 18에서 어레이의 출

력과 인버터의 출력은 일사량 변동을 직접적으로 반영한다. 일사량 변동 시 인버터 출력이 어레이 출력에 비하여 미소한 시간지연을 보이는 것은 인버터 제어에 따른 것으로 볼 수 있다. 그림 19는 PV 시스템의 유효전력 및 무효전력 출력으로서 역률 1로 운전되고 있다. 그림 20은 인버터 전류제어를 위한 기준 전류 파형과 PV 시스템의 실제 출력전류 파형을 비교한 것이다. 실제 출력전류가 아주 미세하게 진동하면서 기준전류 파형을 잘 추종하고 있다. 그림 21은 PV 시스템 출력단의 a, b, c 상 전압의 파형이다. 그림 22는 LC 필터 이전의 인버터 전압과 필터 이후의 출력전압파형을 비교한 것으로서, LC 필터를 통해 고조파가 상당히 억제된 정현파형과 유사한 교류전압이 출력되고 있음을 볼 수 있다.

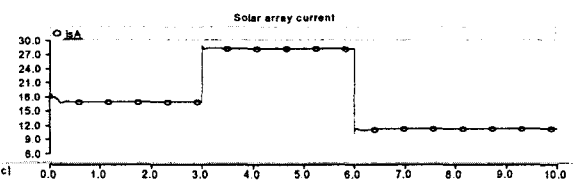
그림 23은 일사량 S가 400, 600, 1000 [W/m²] 일 때, MPPT 제어에 의한 PV 어레이의 운전점을 각 일사량에 대한 전압-출력 곡선 상에 나타낸 것이다. PV 어레이가 각 일사량에 대한 전압-출력 곡선 상의 최대 출력점 근처에서 운전되고 있는 것을 확인할 수 있다.



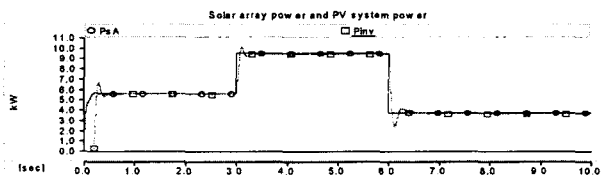
(a) 일사량 변동
(a) Solar irradiance variation



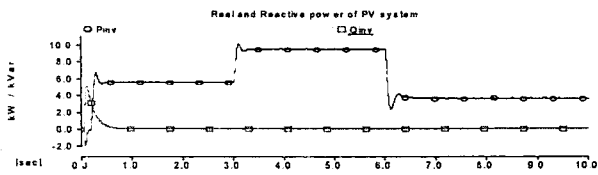
(b) 태양전지 어레이 출력전압
(b) PV array output voltage



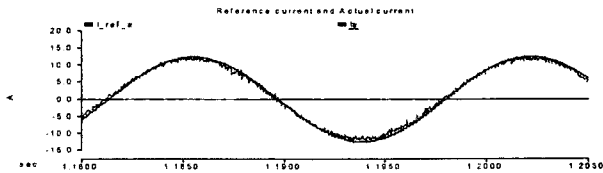
(c) 태양전지 어레이 출력전류
(c) PV array output current



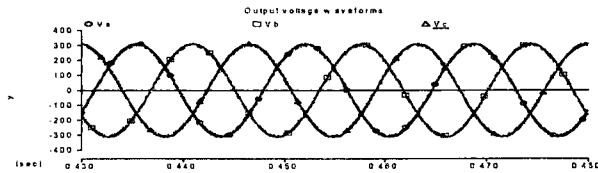
(d) PV 어레이 출력과 PV 시스템 출력
(d) PV array and PV system output power



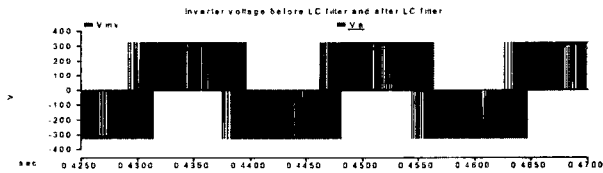
(e) PV 시스템 유효전력(Pinv) 및 무효전력(Qinv) 출력
(e) Real (Pinv) and reactive (Qinv) generation of PV system



(f) 인버터 기준전류(I_ref_a)와 실제전류(Ia)
(f) Inverter reference (I_ref_a) and actual current (Ia)



(g) PV 시스템 출력전압 파형(Va, Vb, Vc)
(g) PV system voltage waveform (Va, Vb, Vc)



(h) 필터이전 전압파형(Vinv) 및 필터이후의 전압파형(Va)
(h) voltage waveform before (Vinv) and after LC filter (Va)

그림 13 PV 시스템 출력특성 모의 결과
Fig. 13 Simulation results of PV system performance

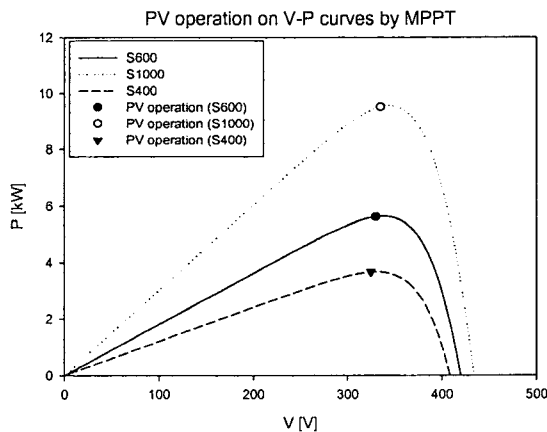


그림 14 전압-출력 곡선 상의 PV 어레이 운전점
Fig. 14 PV array operation point on P-V curve

3.3. 연계선로 고장 모의

전력계통의 고장 사고 중 가장 주를 이루는 1선 지락고장과 고장전류가 가장 큰 3상 단락고장 각각에 대한 PV 시스템의 과도특성을 모의하였다. 일정한 일사량 1000 [W/m²]에서 역률은 1.0으로 운전되고 있다고 가정할 때, 그림 24와 같이 1초 순간에 PV시스템 출력단에서 100m 떨어진 저압배전선에 고장을 발생시켜 0.2초 지속한 후 고장을 제거하였다.

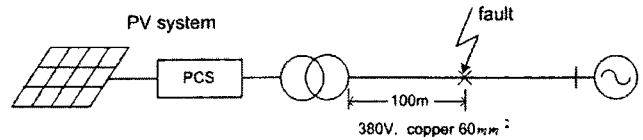
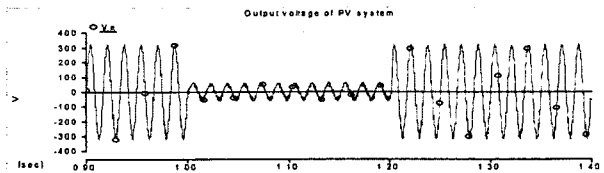


그림 15 PV 시스템 연계선로 고장 모의
Fig. 15 Fault on PV system feeder

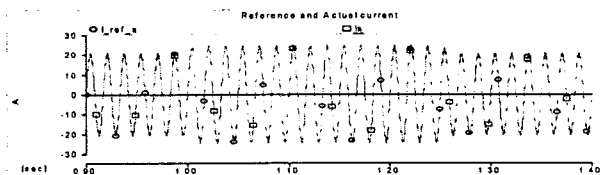
계통연계형 인버터의 기준전류 한계값(또는 과전류 제한치)은 정격전류의 1.1~1.5 배로 설정하는 것이 일반적이며 [10], 여기서는 1.2 배로 설정하였다.

3.3.1. 1선 지락고장 결과

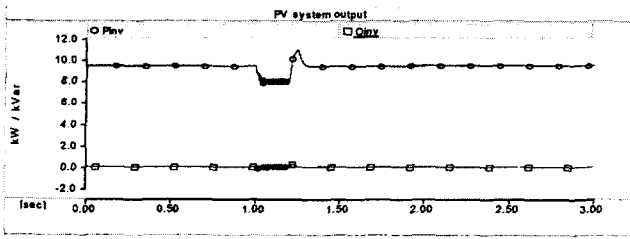
그림 25는 1선 지락고장 시 고장이 발생한 a상의 상전압을 나타내며, 그림 26은 인버터의 a상 기준전류와 a상의 고장전류를 보인 것이다. 기준전류는 정격 전류의 1.2배로 제한되므로, 고장이 발생하더라도 실제 전류는 기준전류를 추종하게 되어, 계통으로 유입되는 고장전류가 기준전류 한계 이내로 제한됨을 알 수 있다. 고장 제거 후, PV 시스템의 전압과 전류는 고장 전 원래의 값을 회복한다. 그림 27은 PV 시스템의 유효전력 및 무효전력 출력의 변동을 나타내며, 그림 28, 29와 30은 각각 1선 고장 시의 PV 어레이의 출력전류, 출력전압 및 출력전력의 과도특성을 나타낸다. 고장에 따른 PV 시스템의 출력저하로 PV 어레이의 출력 및 전류가 저하되고, 이에 따라 PV 어레이의 전압은 상승하다가 고장 제거 후 정상 값으로 복귀한다.



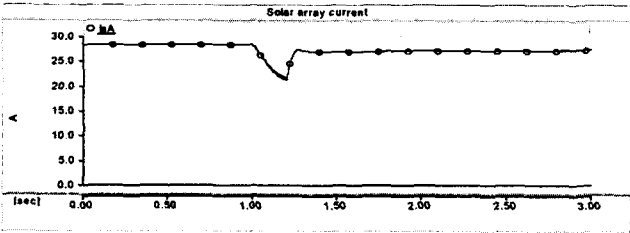
(a) PV 시스템 출력전압 (a상)
(a) PV system output voltage (phase a)



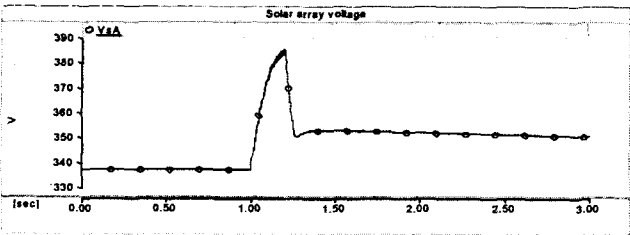
(b) PV 시스템 기준전류 및 고장전류 (a상)
(b) PV system reference and fault current (phase a)



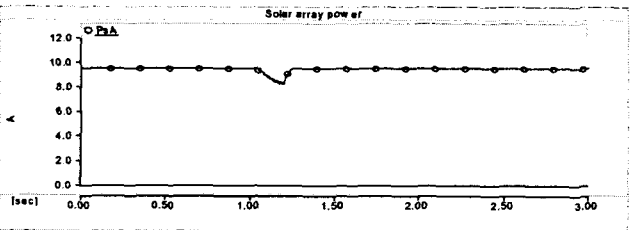
(c) PV 시스템의 유효 및 무효전력 출력
(c) Real and reactive power generation of PV system



(d) PV 어레이의 출력전류
(d) PV array output current



(e) PV 어레이의 출력전압
(e) PV array output voltage



(f) PV 어레이 출력
(f) PV array power

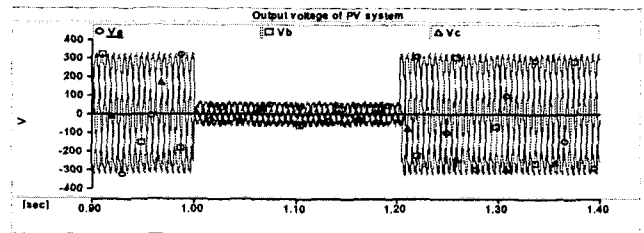
그림 16 1선 지락고장 시 PV 시스템 응답특성
Fig. 16 PV system response to single phase to ground fault

3.3.2 3상 단락고장 결과

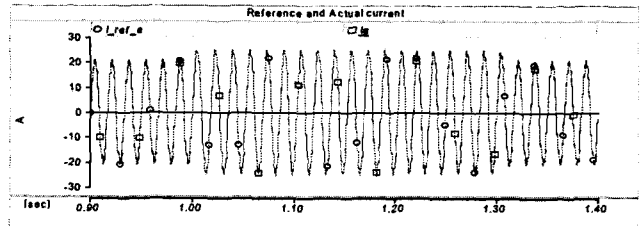
그림 31은 PV 시스템 각 상의 출력전압을 나타낸 것으로서, 고장이 발생하는 1초에 전압이 모두 급감하였다가 고장 제거 직후 원래의 값을 회복하고 있다. 그림 32는 PV 시스템 인버터의 기준전류와 출력단에서 실제 전류를 나타낸다. 1선 지락고장 시와 마찬가지로 고장전류는 인버터 기준전류의 제한치 이내인 정격전류의 1.2배로 제한되고 있다. 그림 33은 PV 시스템의 유효전력 및 무효전력 출력의 변동을 나타낸다. 고장전류의 제한으로 인하여 고장 시 계통에 유입되는 출력 또한 제한된다는 것을 알 수 있다. 고장제거 후 원래의 출력

을 회복한다. 그림 34와 그림 35는 각각 PV 어레이의 출력전류 및 전압을 보여주며, 그림 36은 이 때의 어레이의 출력을 나타낸다. 고장으로 인하여 그림 33에서 보듯이 인버터에 의한 출력이 급속히 하락하기 때문에 태양전지 어레이의 출력 및 전류 또한 0에 가까워지고, 태양전지의 V-I 특성에 의해 어레이의 출력전압은 급상승하다가 고장 제거 직후 원래의 값으로 회복된다.

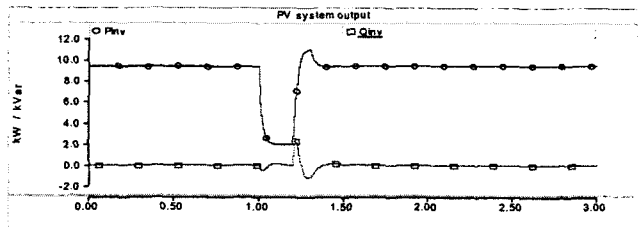
그림 37은 1선 지락고장과 3상 단락고장 발생 후 0.2초가 경과되는 동안의 PV 어레이 운전점의 변동 궤적을 나타낸다. 1선 지락고장보다 3상 단락고장이 PV 어레이의 운전점에 더 큰 변동을 일으키는 고장임을 알 수 있다. 이러한 PV 어레이의 운전점 변동 궤적을 통하여 연계계통선로의 고장이 PV 어레이의 운전조건에 미치는 영향을 파악할 수 있다.



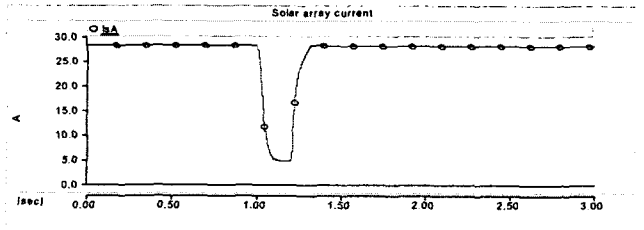
(a) 출력전압 파형 (a, b, c 상 전압)
(a) Voltage waveform (Phase a, b and C)



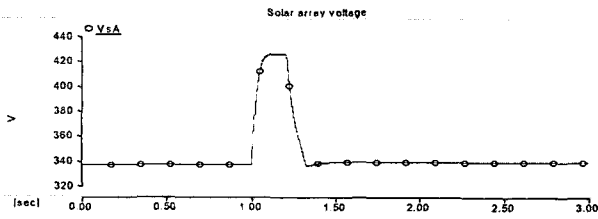
(b) 인버터 기준전류(I_ref_a)와 실제 출력전류(Ia)
(b) Inverter reference (I_ref_a) and actual current (Ia)



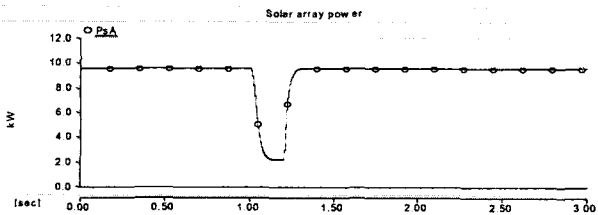
(c) PV 시스템의 유효전력 및 무효전력 출력
(c) Real and reactive power generation of PV system



(d) PV 어레이의 출력전류
(d) PV array output current



(e) 태양전지 어레이의 출력전압
(e) PV array output voltage



(f) PV 어레이의 출력
(f) PV array power

그림 17 3상 단락고장 시 PV 시스템 응답특성
Fig. 17 PV system response to three phase short circuit fault

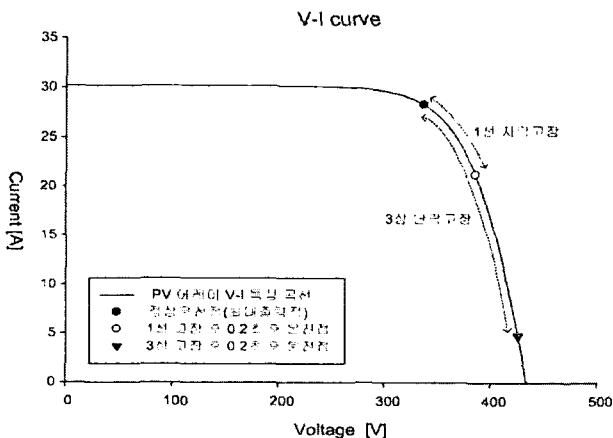


그림 18 선로고장 시 PV 어레이의 운전점 변동
Fig. 18 PV array operation point variations for faults applied

4. 결 론

컴퓨터 모의해석을 위한 계통연계 운전형 PV 시스템의 동특성 모델을 제시하였고, 신뢰성있는 상용 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 기반으로 하여 모델링 및 모의해석을 수행하였다. 사용자 정의 기능을 이용하여 태양전지 어레이, 전압원인버터 및 MPPT 기법을 적용 구현하였다. 제시된 모델링을 통하여 태양전지 어레이의 기본적인 V-I 및 V-P 특성과 일사량 변동에 대한 전체 PV 시스템의 출력성능 및 연계선로의 고장에 대한 PV 어레이 및 시스템의 응답특성을 모의 해석하였다.

본 연구에서 제안된 모델링 및 모의 해석은 제품개발 단계

및 계통연계 시 PV 시스템의 출력성능모의, 제어성능 분석 및 계통에 미치는 영향 검토 시 신뢰성있는 정보를 제공할 수 있다고 사료된다. 향후 연계보호기능에 대한 모델링 작업이 추가되어 다양한 보호협조 방식에 대한 모의를 추가함으로써 보다 광범위한 해석이 가능하도록 진행될 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] Mohammad A. S. Masoum, Hooman Dehbonei, and Ewald F. Fuchs, "Theoretical and Explanation Analysis of Photovoltaic Systems With Voltage- and Current-Based Maximum Power-Point Tracking", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 17, No. 4, pp. 514-522, December 2002.
- [2] L Zhang, A Al-Amoudi, Yunfei Bai, "Real-time Maximum Power Point Tracking for Grid-Connected Photovoltaic Systems", *Power Electronics and Variable Speed Drives*, 18-19 September 2000, Conference Publication No. 475.
- [3] Minwon Park and In-Keun Yu, "A Novel Real-Time Simulation Technique of Photovoltaic Generation Systems Using RTDS", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 19, No. 1, pp. 164-169, March 2004.
- [4] Manitoba HVDC Research Center, *PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software User's Manual*, 1998.
- [5] Olimpo Anaya-Lara and E. Acha, "Modeling and Analysis of Custom Power Systems by PSCAD/EMTDC", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 17, No. 1, pp. 266-272, January 2002.
- [6] Luis Castaner and Santiago Silvestre, *Modeling Photovoltaic Systems Using PSpice*, JOHN WILEY & SONS, LTD, 2002.
- [7] 김슬기, 김용상, "계통연계형 가변속 풍력발전방식의 PSCAD/EMTDC 모의 및 해석", *대한전기학회 논문지* 52B권 8호, 2003년 8월, pp. 413-420.
- [8] Mukund R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*. CRC Press, USA, 1999.
- [9] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [10] 한국전력공사 배전처, *일본 분산형전원 계통연계 기술지침*, pp. 126-129, 1998년 10월.

저 자 소 개



김슬기(金슬기)

1972년 5월 7일 생. 1998년 고려대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재, 한국전기연구원 신전력시스템 연구그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1332

E-mail : blksheep@keri.re.kr



전진홍(全鎭洪)

1972년 12월 16일 생. 1995년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재, 한국전기연구원 전력설비진단 연구그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1355

E-mail : jhjeon@keri.re.kr



김응상(金應相)

1962년 6월 21일 생. 1988년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 1991년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재, 한국전기연구원 신전력시스템 연구그룹 책임연구원

Tel : 055-280-1330

E-mail : eskim@keri.re.kr