

계통연계형 태양광발전시스템의 동특성 모델링 및 모의해석

김 응상¹⁾, 김 슬기²⁾

한국전기연구원

Modeling and Simulation Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Generation System in terms of Dynamic behavior

Eungsang Kim, Seulki Kim

Korea Electrotechnology Research Institute

Key words : Grid interface(계통연계), Photovoltaic generation(태양광발전), VSI(전압원인버터), MPPT Control(최대출력제어)

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. An equivalent circuit model of a solar cell has been used for modeling solar array. 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

1. 서론

본 논문에서는 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 이용한다. 어레이 직류 출력의 교류 변환을 위한 3상 PWM 전압원인버터 모델을 제시하고, 전류제어를 통한 출력제어 방식을 모델링한다. 전체 시스템의 출력제어를 위하여 최대출력점 추종제어(MPPT) 방식이 적용된다. 모델링되는 계통연계형 태양광발전 시스템의 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.

2. 시스템 모델링

본 논문에서는 모델링 대상으로 현재 국내 배전 계통에 보급중인 계통연계형 PV 시스템을 대상으로 한다. 일반적인 구성은 그림 1과 같이 태양광으로부터 전기를 발생하는 태양전지 어레이, 어레이의 직류 출력을 교류출력으로 변환하는 전력변환장치 그리고 이 교류 출력전압을 연계계통의 전압과 동일한 수준으로 승압하는 연계변압기로 이루어진다.

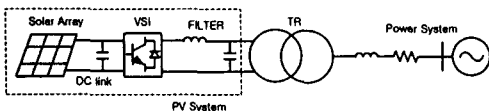


Fig. 1 Grid-connected photovoltaic system

2.1 태양전지 어레이 모델링

태양전지 모델링을 위하여 다양한 등가회로 모형이 제시되어 왔다[1,2,3,4]. 본 연구에서는 그림 2와 같은 전류원, 다이오우드 및 직렬저항으로 구성된 등가회로 모형을 이용한다.

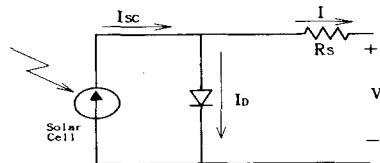


Fig. 2 Equivalent circuit model of PV cell

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

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

여기서, I_{sc} 는 태양전지 단락전류 [A], I_0 는 다이오우드 포화전류 [A], V 는 부하전압 [V], R_s 는 직렬저항 [Ω], n 은 다이오우드 이상정수 (1~2), V_T 는 열 전위차 [V] (단, $V_T = mKT/q$), k 는 볼츠만 상수 ($1.38e-23$ [J/K]), T 는 절대온도 [K], q 는 쿨롱 상수 ($1.6e-19$ [C]) 그리고, m 은 태양전지 모듈 내의 셀(cell) 수이다.

식 (1)에서 V 를 I 에 대하여 나타내면, 식 (2)와 같다.

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

단락전류의 일사량 및 온도에 관한 특성은 식

(3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, T_{ref} 는 기준온도 (≈ 298 [K]), $I_{sc(ref)}$ 는 기준온도에서의 단락전류 [A], S 는 일사량 [W/m^2] 그리고, J 는 단락전류 온도계수 [A/K]이다. 식 (1)로부터 기준온도에서의 다이오드 포화전류는 식(4)와 같이 구할 수 있다. 식 (5)는 다이오드 포화전류의 온도에 관한 특성을 나타낸다. 식 (6)은 밴드 에너지 갭의 온도에 대한 특성식이다.

$$I_0(r_{ej}) = I_{sc(ref)} \frac{1}{\exp\left[\frac{V_{oc}}{nV_T}\right] - 1} \quad (4)$$

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

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

여기서, V_{oc} 는 태양전지 개방전압 [V], A 는 포화전류 온도계수 [A/K], Y 는 온도의존 인자이다. 식 (1)과 (2)는 태양전지 모듈의 데이터를 바탕으로 한 전지 모듈의 관계식이며, 태양전지 어레이에서의 특성을 구현하기 위해서 모듈의 직렬 연결 수 N_s 와 병렬 연결 수 N_p 를 포함하여 재구성하면 식 (7)과 같은 태양전지 어레이의 특성 식을 얻을 수 있다.

$$I_A = N_p I_{sc} - N_p I_0 \left(\exp\left[\frac{V_A + IR_S}{nN_s V_T}\right] - 1 \right) \quad (7)$$

2.2 DC-AC 변환부 모델링

태양전지 어레이의 직류 출력을 교류 출력으로 변환하기 위하여 DC-AC 인버터를 이용한다. 3상 PWM 전류제어 전압원 인버터를 모델링하였다. 그림 3은 계통연계형 시스템의 DC-AC 변환부를 나타낸 것이다. 직류단 커패시터와 IGBT 스위치 인버터, LC 고조파 필터로 이루어진다.

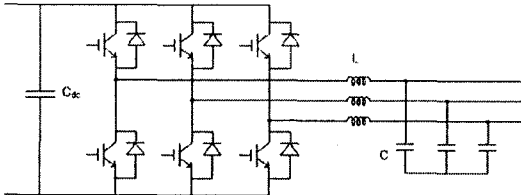


Fig. 3 DC to AC conversion system model

전류제어 인버터에서는 출력전류가 기준전류를 추종하도록 제어하여 PV 시스템의 유효전력 및 무효전력 출력을 제한한다. 지령된 기준전류 추종을 위해서 펄스폭변조방식(PWM)을 이용한다. 계통연계형 PV 시스템의 유효전력 출력 제어는 최대전력점 추종기법을 통하여 이루어진다. 무효전력제어는 역률을 1로 운전되도록 한다. 일반적으로 유효전력 및 무효전력이 상호 독립적으로 제어될 수 있도록 dq 변환 제어를 이용한다. ABC 각 3상의 변수를 A 상의 위상각을 기준으로 하는 dq 변환 행렬을 통하

여 동기회전 d-q 좌표계의 변수로 변환하면, q축 및 d축 전류의 크기를 조정하여 유효전력 및 무효전력의 독립적인 제어가 가능하다[5].

그림 4는 PV 시스템 인버터의 전류제어 블록도를 나타낸다. MPPT 제어과 무효전력 제어에 의해 q축 기준전류 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)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.

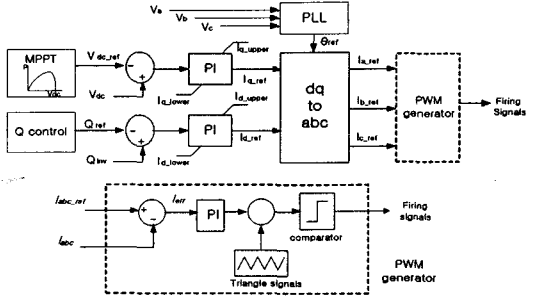


Fig. 4 Inverter current control scheme

2.3 MPPT 제어

태양전지는 그림 5와 같이 주어진 일사량과 온도 조건에서 전지의 출력전압에 따라 출력되는 전력이 변하게 된다. 태양전지를 효율적인 운전을 위해서 태양전지 어레이가 항상 최대전력점 근처에서 동작 하도록 하는 최대출력점 추종 제어가 필요하다[6].

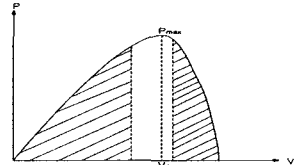


Fig. 5 P-V curve of PV array

태양전지 어레이가 전압 V 와 전류 I 로 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 V 로 나눈 $I/V + dI/dV$ 의 부호로 dP/dV 의 부호 판별이 가능하다. dP/dV 가 0일 때 최대출력점을 가진다. 따라서, ϵ 를 0에 아주 가까운 양수라고 가정할 때, $dP/dV > \epsilon$ 이면, 어레이의 전압을 증가시키고, $dP/dV < -\epsilon$ 이면, 전압을 감소시키며, $-\epsilon \leq dP/dV \leq \epsilon$ 이면, 원래의 전압을 유지한다. 그림 6은 본 연구에서 적용한 MPPT 기법의 흐름도를 보인 것이다. ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 는 허용오차로서 0에 아주 가까운 양수로 설정한다. I_s 와 V_{dc} 는 태양전지 어레이의 전류 및 전압을 나타낸다. 여기서 설정된 V_{dc_ref} 가 인버터의 유효전력 제어를 위한 기준값으로 지정된다.

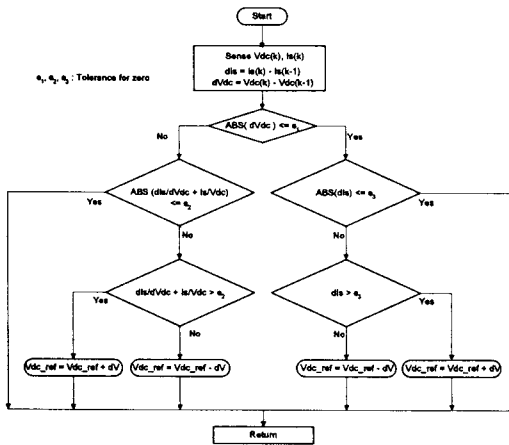


Fig. 6 Flow chart of MPPT technique applied

3. 성능모의

태양전지 어레이의 특성, 계통연계형 태양광발전 시스템의 전체 출력성능 특성을 모의하고, 1선 지락고장 및 3상 단락고장 시의 시스템의 응답특성을 모의한다. 용량은 한국전기연구원에 설치되어 있는 PV 어레이의 규격 데이터를 활용하기 위하여 동일한 용량의 9kW 급으로 선정하였다. 표 1은 모의에 사용된 시스템 파라미터이다.

Table 1 Parameters used for PV system simulation

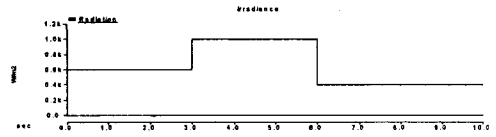
파라미터	값	파라미터	값
V_{oc}	21.7 [V]	J	0.065 [%/°C]
I_{sc}	3.35 [A]	C_{dc}	10000 [μ F]
V_{ap}	17.4 [V]	G_p	1
I_{mp}	3.05 [A]	T_s	0.05 [sec]
P_{max}	53 Wp	G_{p1}	10000
m	36	T_{s1}	0.0001 [sec]
N_s	20	스위칭	7.2 [kHz]
N_p	9	$e1, e2, e3$	1.0e-7
n	1.5	L	0.001 [H]
γ	3	C	0.01 [μ F]
T_{ref}	25 [°C]	$Tr. Rating$	100 [kVA]
S_{ref}	1000 [W/m ²]	$Tr. Ratio$	0.21/0.38 [kW]

3.1 PV 시스템 출력특성

온도는 25°C 일 때, 일사량 세기의 변동에 대한 PV 시스템의 출력성능을 모의하였으며, 그림 7은 출력성능 모의 결과를 나타낸다. 그림 7(a)는 모의에 적용된 일사량 세기의 변화를 나타내며, 그림 7(b)는 이에 대한 태양전지 어레이의 출력전압 변동을 나타낸다. 일사량이 변동되는 순간에 전압레벨의 변화에 따른 동요가 발생하나 곧 최적전압수준을 찾아가는다. 그림 7(c)는 어레이의 출력전류로서 V-I 특성에 따른 응답 특성을 보인다. 그림 7(d)에서 어레이의 출력과 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 7(e)는 PV 시스템의 유효전력 및 무효

전력 출력으로서 역률 1로 운전되고 있다. 그림 7(f)는 인버터 전류제어를 위한 기준 전류 파형과 PV 시스템의 실제 출력전류 파형을 비교한 것이다. 실제 출력전류가 아주 미세하게 진동하면서 기준전류 파형을 잘 추종하고 있다. 그림 7(g)는 PV 시스템 출력단의 a, b, c 상 전압의 파형이다. 그림 7(h)는 LC 필터 이전의 인버터 전압과 필터 이후의 출력전압파형을 비교한 것으로서, LC 필터를 통해 고조파가 상당히 억제된 정현파형과 유사한 교류전압이 출력되고 있다.

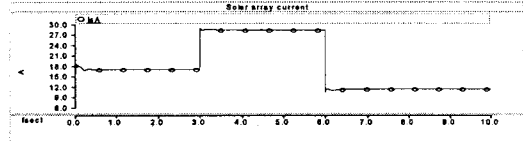
그림 8은 일사량 S가 400, 600, 1000 [W/m²] 일 때, MPPT 제어에 의한 PV 어레이의 운전점을 각 일사량에 대한 전압-출력 곡선 상에 나타낸 것으로서, PV 어레이가 각 일사량에 대한 전압-출력 곡선상의 최대 출력점 근처에서 운전되고 있는 것을 확인할 수 있다.



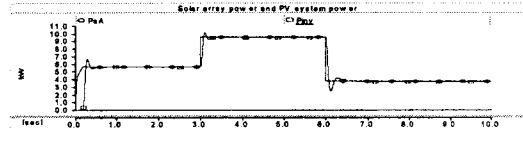
(a) Solar irradiance variation



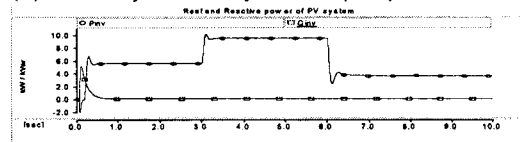
(b) PV array output voltage



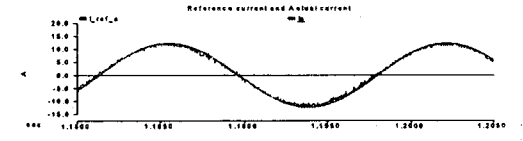
(c) PV array output current



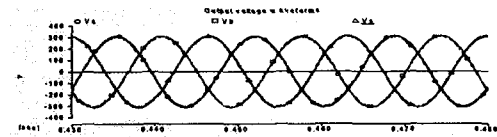
(d) PV array and PV system output power



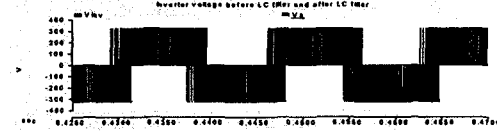
(e) Real (P_{inv}) & reactive (Q_{inv}) power of PV system



(f) Inverter reference (I_{ref_a}) & actual current (I_a)



(g) PV system voltage waveform (Va, Vb, Vc)



(h) voltage waveform before(Vinv) & after LC filter (Va)
Fig.7 Simulation results of PV system performance

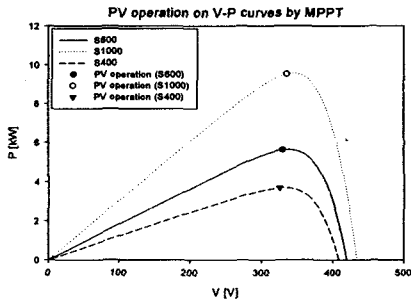


Fig. 8 PV array operation points

3.2 연계선로 고장모의

전력계통의 고장 사고 중 가장 주를 이루는 1선 지락고장과 고장전류가 가장 큰 3상 단락고장 각각에 대한 PV 시스템의 과도특성을 모의하였다. 일정한 일사량 $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ 에서 역률은 1.0으로 운전되고 있다고 가정할 때, 그림 9와 같이 1초 순간에 PV 시스템 출력단에서 100m 떨어진 저압배전선에 고장을 발생시켜 0.2초 지속한 후 고장을 제거하였다. 계통연계형 인버터의 기준전류 한계값(또는 과전류제한치)은 정격전류의 1.1~1.5 배로 설정하는 것이 일반적이며[7], 여기서는 1.2배로 설정한다.

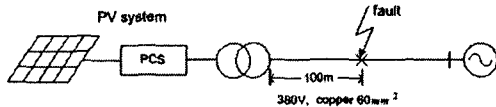
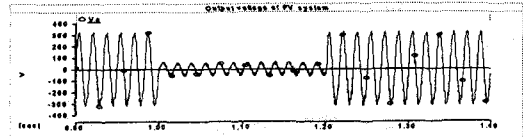


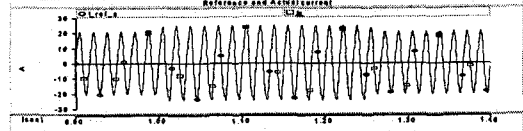
Fig. 9 Fault on PV system feeder

3.2.1 1선 지락고장 결과

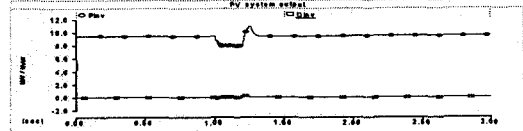
그림 10(a)는 1선 지락고장 시 고장이 발생한 a 상의 상전압을 나타내며, 그림 10(b)는 인버터의 a 상 기준전류와 a 상의 고장전류를 보인 것이다. 기준전류는 정격 전류의 1.2배로 제한되므로, 고장이 발생하더라도 실제 전류는 기준전류를 추종하게 되어, 계통으로 유입되는 고장전류가 기준전류 한계 이내로 제한됨을 알 수 있다. 그림 10(c)는 PV 시스템의 유효전력 및 무효전력 출력의 변동을 나타내며, 그림 10(d), 10(e)와 10(f)는 각각 1선 고장 시의 PV 어레이의 출력전류, 출력전압 및 출력전력의 과도특성을 나타낸다.



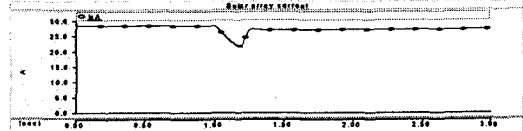
(a) PV system output voltage (phase a)



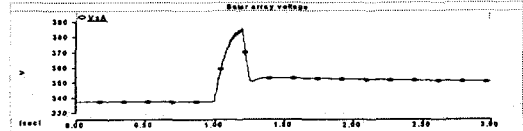
(b) PV system reference and fault current (phase a)



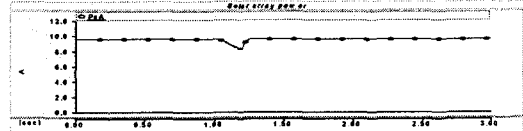
(c) Real and reactive power generation of PV system



(d) PV array output current



(e) PV array output voltage

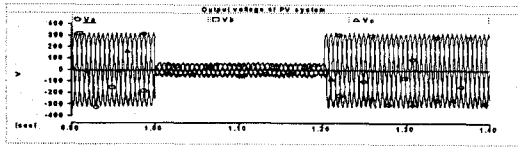


(f) PV array power

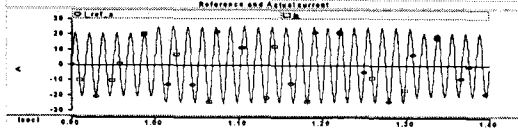
Fig. 10 PV system response to single phase to ground fault

3.2.2 3상 단락고장 결과

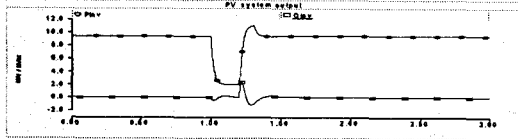
그림 11(a)는 PV 시스템 각 상의 출력전압을 나타낸다. 그림 11(b)는 PV 시스템 인버터의 기준전류와 출력단에서 실제 전류를 나타낸다. 1선 지락고장 시와 마찬가지로 고장전류는 인버터 기준전류의 제한치 이내인 정격전류의 1.2배로 제한되고 있다. 그림 11(c)는 PV 시스템의 유효전력 및 무효전력 출력의 변동을 나타낸다. 그림 11(d)와 그림 11(e)는 각각 PV 어레이의 출력전류 및 전압을 보여주며, 그림 11(f)는 이 때의 어레이의 출력을 나타낸다. 그림 12는 1선 지락고장과 3상 단락고장 발생 후 0.2초가 경과되는 동안의 PV어레이 운전점의 변동 궤적을 나타낸다. 1선 지락고장보다 3상 단락고장이 PV 어레이의 운전점에 더 큰 변동을 일으키고 있음을 알 수 있다.



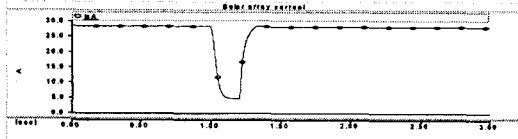
(a) Voltage waveform (Phase a, b and C)



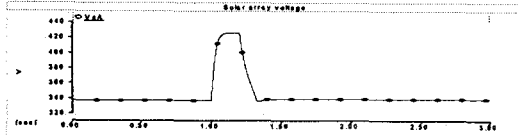
(b) Inverter reference (I_{ref_a}) & actual current (I_a)



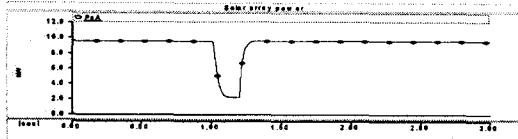
(c) Real & reactive power generation of PV system



(d) PV array output current



(e) PV array output voltage



(f) PV array power

Fig. 11 PV system response to three phase short circuit fault

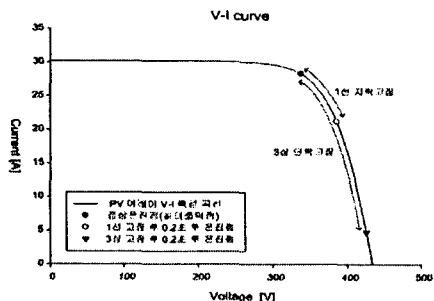


Fig. 12 PV array operation point variations for faults

4. 결론

컴퓨터 모의해석을 위한 계통연계 운전형 PV 시

스템의 동특성 모델을 제시하고, 신뢰성있는 상용 프로그램인 PSCAD /EMTDC를 기반으로 하여 모델링 및 모의해석을 수행하였다. 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 해석하였다.

본 연구에서 제안된 모델링 및 모의 해석은 제품 개발 단계 및 계통연계 시 PV 시스템의 출력성능도의, 제어성능 분석 및 계통에 미치는 영향 검토 시 신뢰성있는 정보를 제공할 수 있다고 사료된다. 향후 다양한 보호협조 방식에 대한 모의를 추가함으로써 보다 광범위한 해석이 가능하도록 진행될 예정이다.

References

- [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] Luis Castaner and Santiago Silvestre, *Modeling Photovoltaic Systems Using PSpice*, JOHN WILEY & SONS, LTD, 2002.
- [5] 김슬기, 김응상, "계통연계형 가변속 풍력발전방식의 PSCAD/EMTDC 모의 및 해석", *대한전기학회 논문지* 52B권 8호, 2003년 8월, pp. 413-420.
- [6] Mukund R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*. CRC Press, USA, 1999.
- [7] 한국전력공사 배전처, *일본 분산형전원 계통연계 기술지침*, pp. 126-129, 1998년 10월.