

PSCAD/EMTDC를 이용한 계통연계형 태양광발전시스템의 모델링

김슬기, 전진홍, 김웅상
한국전기연구원

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

Kim Seulki, Jeon Jinhong, Kim Eungsang
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - The paper proposes a simulation model of grid-connected photovoltaic generation system (PV system) using on PSCAD/EMTDC, a reliable power system and apparatus transient analysis program. A equivalent circuit model of a solar cell is used for modeling solar array. A series of parameters required for array modeling are deduced from general specification data of a solar module. A PWM voltage source inverter (VSI) model is presented and current control scheme is implemented for VSI control. A maximum power point tracking (MPPT) technique is applied for controlling the PV system. Simulation case study provides V-I and V-P characteristics of solar array and PV system control performance for irradiation changes.

1. 서 론

태양광발전시스템의 최대 출력점 추종제어에 관한 연구[1,2], 실제 기상조건을 이용한 직류부하 공급용 PV 시스템의 실시간 시뮬레이션 기법 [3] 등 태양전지 모델링을 통한 특성 모의 연구가 이루어져 왔다. 본 연구의 목적은 계통연계형 PV 시스템의 개발 또는 계통접속 계획 단계에서 시스템의 출력성능 및 연계제어에 미치는 영향을 사전 모의하고 분석할 수 있는 신뢰성있는 도구를 상용화되어 있는 프로그램을 이용하여 개발하는 데 있다.

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC[4]를 이용한 계통연계형 태양광발전시스템의 모의해석 모델을 제시한다. 개발된 모델을 바탕으로 태양전지 및 PV 시스템의 출력 및 운동특성을 모의하고 해석한다. 태양전지 어레이 모델링을 위하여 태양전지 등가회로 모형을 이용하며, 태양전지의 구역 데이터로부터 모델링에 필요한 다양한 파라미터를 유추한다. 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. 제시된 모델을 이용하여 태양전지 어레이의 출력특성 및 PV 시스템의 출력성능을 모의한다.

2. PV 시스템 모델링

2.1 계통연계형 PV시스템 구성

본 논문에서는 모델링 대상으로 현재 국내 배전계통에 보급중인 계통연계형 PV 시스템으로 그 구성은 그림 1과 같이 태양광으로부터 전기를 발생하는 태양전지 어레이, 어레이의 직류 출력을 적절한 출력제어 방식을 이용하여 교류출력으로 변환하는 전력변환장치 그리고 연계변압기로 이루어진다.

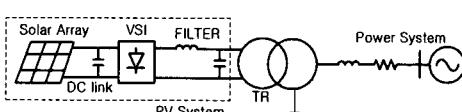


그림 1 계통연계형 PV 시스템 구성

2.2 태양전지 어레이 모델링

태양전지 모델링을 위하여 다양한 등가회로 모형이 제시되어 왔다[1,2,3,5]. 본 연구에서는 그림 2와 같은 전류원, 다이오우드 및 직렬저항으로 구성되는 등가회로 모형을 이용한다. 이 등가회로에서 얻을 수 있는 수리관계식으로부터 PSCAD/EMTDC의 사용자 정의 기능을 이용하여 모델링한다.

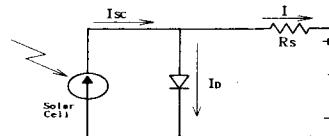


그림 2 간략화된 태양전지 등가회로 모형

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 ($1 \sim 2$), V_T 는 열 전위차 [V] (단, $V_T = m \cdot K T / q$), k 는 볼츠만 상수 ($1.38e-23 \text{ J/K}$), T 는 절대온도 [K], q 는 쿠올롱 상수 ($1.6e-19 \text{ C}$) 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.

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

여기서, T_{ref} 는 기준온도 (=298 [K]), $I_{SC(\text{ref})}$ 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.

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

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

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

여기서, V_{oc} 는 태양전지 개방전압 [V], A는 포화전류 온도계수 [A/K], t 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.

$$I_A = N_p I_{SC} - N_p I_o (\exp \left[\frac{V_A + IR_S}{n N_s V_T} \right] - 1) \quad (7)$$

일반적으로, 제조업체에서 제공하는 태양전지 모듈 사양서에서 제시된 규격에서 얻을 수 있는 기본 데이터는 한정되어 있으며, 이 사양서의 정보로부터 적절한 태양 전지 모델에 필요한 모든 파라미터들을 직접 얻을 수 없다. 따라서 사양서에 나와 있지 않은 파라미터의 경우, 기본 데이터와 위에서 제시한 관계식을 이용하여 그 값을 유추할 수 있다. 표 1은 태양전지 모델링을 위한 파라미터를 나타낸 것이다.

표 1 태양전지 모델링을 위한 파라미터

기본 데이터	유추 파라미터	가정 파라미터	기타
V_{oc}			$T_{ref} = 25^\circ C$
I_{sc}	식 (2) $\rightarrow R_s$		$S_{ref} = 1000 [W/m^2]$
V_{mp}	식 (3) $\rightarrow I_{o,ref}$	$n (1.0 \sim 2.0)$	$K = 1.38e-23 [J/K]$
I_{mp}	식 (2), (4) $\rightarrow A$	$v (=3)$	$q = 1.6e-19 [C]$
P_{max}	식 (4) $\rightarrow I_0$		$J = (0.065 \pm 0.015)\% / ^\circ C$
m			
태양전지 모듈 사양서	기본데이터와 관계식을 이용하여 유추	경험적 실험적 값 - 참고문헌	기본 상수

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

2.3 DC-AC 변환부 모델링

태양전지 어레이의 직류 출력을 교류 출력으로 변환하기 위하여 DC-AC 인버터를 이용한다. 3상 PWM 전류 제어 전압원 인버터를 모델링하였다.

그림 3은 계통연계형 시스템의 DC-AC 변환부를 나타낸 것이다. 직류단 커��시터와 3상 IGBT 스위치 인버터, LC 고조파 필터로 이루어진다.

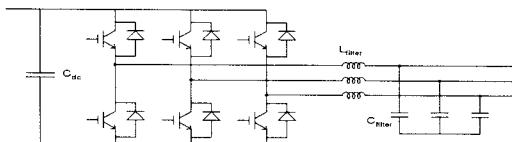


그림 3 DC-AC 변환부 모델

전류제어 인버터에서는 출력전류가 기준전류를 추종하도록 제어하여 PV 시스템의 유효전력 및 무효전력 출력을 제어한다. 지령된 기준전류 추종을 위해서 정현파 폭변조방식(SPWM: Sinewave Pulse Width Modulation)을 이용한다. 계통연계형 PV 시스템의 유효전력 출력 제어는 최대전력점 추종 기법을 통하여 이루어진다. 무효전력제어는 역률을 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 각 3상의 변수를 A상의 위상각을 기준으로 하는 dq 변환 행렬을 통하여 동기회전 d-q 좌표계의 변수로 변환하면, q축 및 d축 전류의 크기를 조정하여 유효전력 및 무효전력의 독립적인 제어가 가능하다[6].

그림 4는 PV 시스템 인버터의 전류제어 블록도를 나타낸다. MPPT 제어와 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.

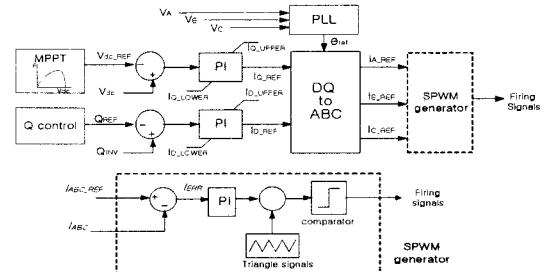


그림 4 인버터 전류제어 블록도

그림 5은 그림 4의 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.

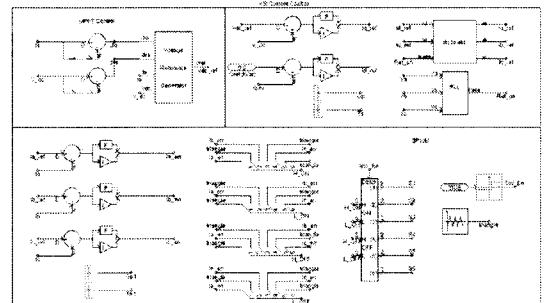


그림 5 PV 시스템 인버터 제어 회로도(PSCAD/EMTDC)

2.4 MPPT 제어 적용

태양전지는 그림 6에서와 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. 인버터를 제어하여 어레이의 출력전압을 최적화함으로써 최대 출력점 동작이 가능하게 된다[7].

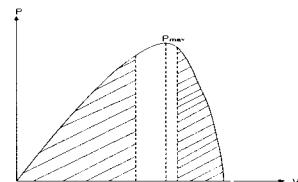


그림 6 태양전지 어레이 V-P 곡선

태양전지 어레이가 전압 V 와 전류 I 로 동작하고 있으면、アレイの出力 $P = V \cdot I$ です。出力に 대한 전압の微分係数 dP/dV は式 (8) とあります。

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (8)$$

식 양변을 V 로 나눈 $I/V+dI/dV$ 의 부호로 dP/dV 의 부호 판별이 가능하다. $dP/dV > 0$ 일 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 7은 본 연구에서 적용한 MPPT 기법의 흐름도를 보인 것이다. 이 흐름도는 그림 7에 있는 최적 어레이 전압 산출을 위한 사용자 정의 모델로서 구현된다. e_1 , e_2 , e_3 는 허용오차로서 0에 아주 가까운 양수로 설정한다. I_s 와 Vdc 는 태양전지 어레이의 전류 및 전압을 나타낸다. 여기서 설정된 Vdc_ref 가 그림 4의 인버터의 유효전력 제어를 위한 기준값으로 지정된다.

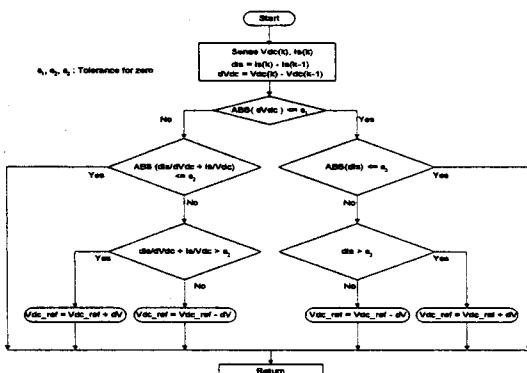


그림 7 적용된 MPPT 기법의 흐름도

2.5 무효전력 제어

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

일정역률제어 모드에서 무효전력 기준값은 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{ref} = P_{INV} \cdot \frac{\sqrt{1 - PF^2}}{PF} \quad (9)$$

여기서, PF = 원하는 일정역률

P_{INV} = 인버터의 유효전력 출력

3. 사례연구

개발한 PSCAD/EMTDC 모델을 바탕으로 태양전지 어레이의 특성 및 9kW급 계통연계형 태양광발전시스템의 출력성능 특성을 모의한다. 그림 10은 본 연구에서 구현한 계통연계형 PV 시스템의 PSCAD/ EMTDC 모델을 나타낸다. 표 2는 본 모의에 사용된 PV 시스템의 파라미터들을 나타낸 것이다.

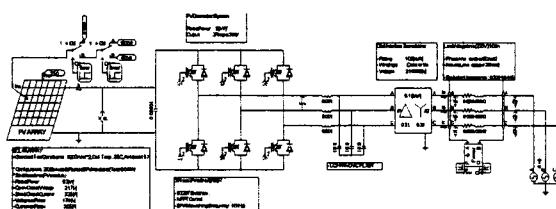


그림 8 계통연계형 PV 시스템 PSCAD/EMTDC 모델

표 2 PV 시스템 모델의 파라미터

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	f_{sw}	10 [kHz]
N_p	9	e_1, e_2	2.0e-6
n	1.5	e_3	1.0e-5
γ	3	L_{filter}	0.001 [H]
T_{ref}	25 [°C]	C_{filter}	0.01 [μF]
S_{ref}	1000 [W/m ²]		

3.1 태양전지 어레이의 출력특성

태양전지 어레이 모델을 이용하여 특정 일사량 및 온도 조건 하에서의 V-I 특성 및 V-P 특성을 모의하였다. 그림 9는 온도 25°C에서 일사량 변화 ($S = 400, 600, 800, 1000 [W/m^2]$)에 대한 V-I 곡선들 및 V-P 곡선들을 나타낸다. 그림 10은 일사량이 일정할 경우 ($S = 1000 [W/m^2]$), 온도변화 ($T = 0, 15, 25, 40, 50 [°C]$)에 대한 V-I 곡선 및 V-P 곡선이다. 그림 9에서 일사량이 상승함에 따라 유사한 곡선의 유형을 유지하면서, 어레이의 전압 및 전류가 증가하게 된다. 이로 인해, 전압에 대한 출력 특성 또한 일사량이 증가할 때, 증가되는 특성을 보인다. 그림 10에서 온도가 증가함에 따라 전류는 증가하지만, 전압은 감소하는 경향을 보인다. 전압감소의 폭이 전류 증가 폭보다 다소 커서 전체 출력은 온도 증가에 대하여 감소 추세를 보인다.

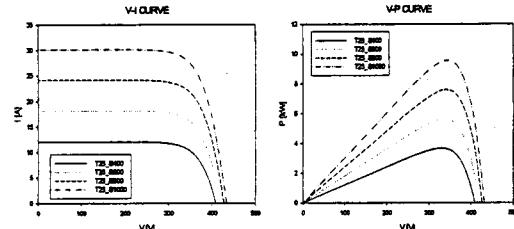


그림 9 일사량변화에 대한 V-I 및 V-P 곡선

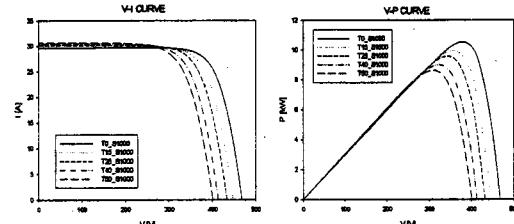


그림 10 온도변화에 대한 V-I 및 V-P 곡선

3.2 PV 시스템 출력특성 모의

9kW 계통연계형 PV 시스템이 역률 1로 운전되고 있다고 가정한다. 온도는 25°C 일 때, 그림 11의 일사량 세기의 변동에 대한 PV 시스템의 출력성능을 모의하였다. 그림 12는 일사량 변동에 대한 태양전지 어레이의 출력전압 변동을 나타낸다. 일사량이 변동되는 순간에 전압레벨의 변화에 따른 동요가 발생하나 곧 최적전압수준을 찾아간다. 그림 13은 어레이의 출력전류로서 V-I 특성에 의해 출력전압 변동에 따른 응동 특성을 보인다. 그림 14에서 어레이의 출력과 인버터의 출력은 일사량 변동을 직접적으로 반영한다. 인버터 출력이 어레이 출력

력에 비하여 미소한 시간지연을 보이는 것은 인버터 제어에 따른 것으로 볼 수 있다. 그림 15는 PV 시스템의 유효전력 및 무효전력 출력이다. 그림 16에서 실제 출력전류가 인버터 전류제어를 위한 기준 전류 파형을 잘 추종하고 있다. 그림 17은 PV 시스템 출력단의 a, b, c 상 전압의 파형이다. 그림 18은 LC 필터 이전의 인버터 전압과 필터 이후의 출력전압파형을 비교한 것으로서, LC 필터를 통해 고조파가 상당히 억제됨을 볼 수 있다.

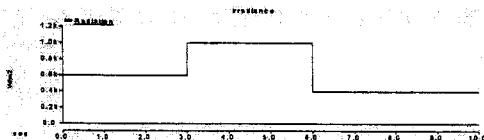


그림 11 일사량 변동

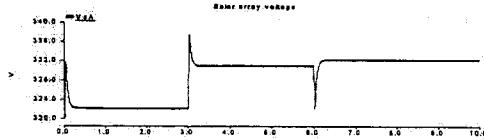


그림 12 태양전지 어레이 출력전압

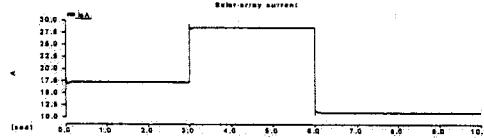


그림 13 태양전지 어레이 출력전류

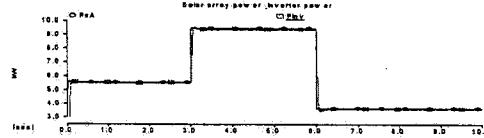


그림 14 태양전지 어레이 출력과 인버터 출력



그림 15 PV 시스템 유효전력(Pinv) 및 무효전력(Qinv) 출력

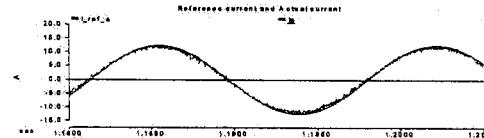


그림 16 인버터 기준전류(I_ref_a)와 실제전류(Ia)

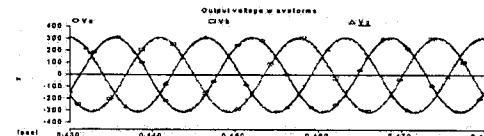


그림 17 PV 시스템 출력전압 파형(Va, Vb, Vc)

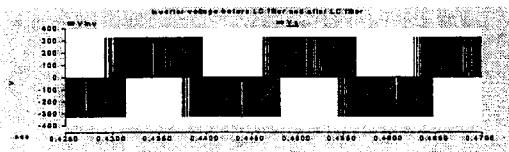


그림 18 필터이전 전압파형(Vinv)과 이후의 전압파형(Va)

그림 19는 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).

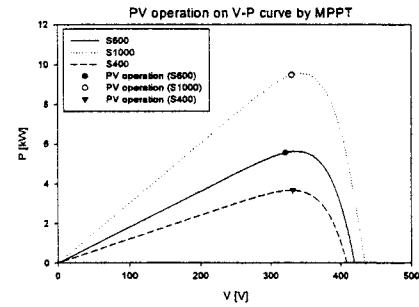


그림 19 전압-출력 곡선 상의 PV 어레이 운전점

4. 결 론

컴퓨터 모의해석을 위한 계통연계 운전형 PV 시스템의 동특성 모델을 제시하였고, 신뢰성 있는 상용 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 기반으로 하여 모델링 및 모의해석을 수행하였다. 사용자 정의 기능을 이용하여 태양전지 어레이, 전압원인버터 및 MPPT 기법을 적용 구현하였다. 태양전지 어레이의 기본적인 V-I 및 V-P 특성 모의와 일사량 변동에 대한 전체 PV 시스템의 출력성능을 모의 해석하여 본 논문에서 제안한 모델의 유통성을 검증하였다. 본 연구에서 개발된 프로그램은 제품개발 단계 및 계통연계 시 PV 시스템의 출력성능모의, 제어성능 분석 및 계통에 미치는 영향 검토 시 신뢰성 있는 정보를 제공할 수 있다고 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Mohammad A. S. Masoum, Hooman Dehboneyi, 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, December 2002, pp. 514-522.
- [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, March 2004.
- [4] Manitoba HVDC Research Center, PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software User's Manual, 1998.
- [5] Luis Castaner and Santiago Silvestre, Modeling Photovoltaic Systems Using PSpice, JOHN WILEY & SONS, LTD, 2002.
- [6] 김술기, 김용상, "계통연계형 가변속 풍력발전방식의 PSCAD/EMTDC 모의 및 해석", 대한전기학회 논문지 52B권 8호, 2003년 8월, pp. 413-420.
- [7] Mukund R. Patel, Wind and Solar Power Systems, CRC Press, USA, 1999.