

계통 연계형 태양광 발전시스템의 모델링 및 해석

전진홍, 김슬기, 안종보, 김용상

한국전기연구원 전력연구단

A Modeling and Analysis of a Grid Connected Photovoltaic Generation System

JEON Jin-Hong, KIM Seul-Ki, AHN Jong-Bo, KIM Eung-Sang

Electric Power Research Laboratory, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 계통 연계를 위한 실증 시스템 개발 연구의 일부로 진행되고 있는 태양 전지 어레이의 모델링과 해석 결과에 대한 내용을 제시하고자 한다. 태양광 발전 시스템은 태양광 에너지를 전기 에너지를 변화하여 주는 태양 전지판과 발전된 전기 에너지를 전력 계통에 연계하여 주는 전력변환 장치(PCS)로 구성되어 있다. 모델링에 사용된 주요 파라미터는 현재 연구원에서 보유하고 있는 실제 태양광 발전시스템을 기준으로 하였다. 개발된 모델을 이용하여 시스템의 주요 특성 곡선을 추출하였으며 기존의 연구 결과와 비교하여 제안된 모델의 타당성을 검증하였다. 본 논문에서 제시된 태양광 시스템 모델은 향후 전체 시스템의 동적 응답에 대한 해석 및 계통 연계 운전 검토를 위한 연구에 적용될 계획이다.

1. 서 론

산업의 발달과 생활수준의 고급화로 인하여 전력 에너지 수요는 급격하게 증가하는 반면, 이러한 전력 에너지 수요를 충족할 수 있는 대규모 발전 설비의 확충은 경제적, 환경적인 문제로 인하여 어려움이 점점 증가하고 있다. 이에 대한 해결 방안으로 배전망에 소규모 발전설비를 접속하여 운전하는 마이크로그리드 시스템이 제시되고 있으며 국내외에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 마이크로 그리드 시스템의 전력 에너지원으로 친환경적인 신재생에너지를 이용한 발전설비에 대한 관심이 매우 높다. 또한, 최근 고유가와 환경 문제로 인하여 신재생에너지원에 대한 관심이 높아지고 있으며 이를 실제 시스템에 적용하고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다. 이미 미국, 일본, 유럽의 선진국에서는 많은 연구가 진행되어 왔으며 특히 미국에서는 IEEE P1547의 계통 연계 기준안을 통해 신재생에너지 전원의 계통 연계 기준이 확립되어 있다^{[1]-[6]}.

이러한 신재생에너지 전원 중 태양광 발전 시스템은 태양광 에너지를 이용하여 전력을 생산하므로 진동과 소음이 없으며 최소 20년 이상의 수명을 가지는 반영구적인 발전 시스템이다. 본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 계통 연계를 위한 실증 시스템 개발 연구의 일부로 진행되고 있는 모델링 및 모의 해석 결과에 대한 내용을 제시하고자 한다. 태양광 발전 시스템은 태양광 에너지를 전기 에너지를 변화하여 주는 태양 전지판과 발전된 전기 에너지를 전력 계통에 연계하여 주는 전력변환 장치(PCS)로 구성되어 있다. 본 논문에서는 태양 전지판을 모델링하고 이를 해석한 결과를 제시하고자 한다. 모델링에 사용된 주요 파라미터는 현재 연구원에서 보유하고 있는 실제 태양광 발전시스템을 기준으로 하였다. 개발된 모델을 이용하여 시스템의 주요 특성 곡선을 추출하였으며 기존의 연구 결과와 비교하여 제안된 모델의 타당성을 검증하였다. 본 논문에서 제시된 태양광 시스-

템 모델은 향후 전체 시스템의 동적 응답에 대한 해석 및 계통 연계 운전 검토를 위한 연구에 적용될 계획이다.

2. 본 론

2.1 태양광 발전시스템의 구성

태양광발전시스템의 일반적 구성은 태양전지 어레이, 축전지와 전력변환기 등 주변기기 등의 조합에 따라 여러 가지 형태로 시스템을 구성할 수 있다^{[5]-[6]}. 본 논문에서는 현재 국내 배전계통에 보급중인 계통 연계형 PV 시스템 중 현재 한국전기연구원에 실증 시험을 위해 설치되어 있는 시스템을 모델링 대상으로 하였다. 태양광 발전 시스템에 사용되는 태양전지판은 그림 1에서 제시하는 바와 같이 셀, 모듈, 어레이로 구성된다. 태양전지 셀은 태양 전지의 기본구성 단위로 일반 다이오드 정도의 출력 전압과 전류 용량을 가진다. 태양 전지 모듈은 여러 개의 셀이 직렬로 연결되어 있는 구성단위로 시스템에 필요한 전압 확보를 위해 여러 개의 셀을 직렬로 연결한다. 태양 전지 어레이에는 여러 개의 모듈이 직병렬로 연결되어 구성된다. 실제 설치되는 시스템은 모두 어레이 형태를 가지고 있으며 적용하는 발전 시스템의 사양에 따라 직렬과 병렬 모듈의 개수를 결정한다^[4].

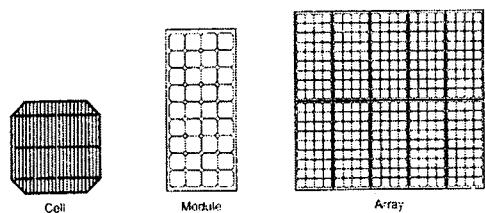


그림 1 태양 전지 어레이 구성

일반적인 태양광 발전 시스템의 구성은 그림 2와 같이 태양광으로부터 전기를 발생하는 태양전지 어레이, 어레이의 직류 출력을 적절한 출력제어 방식을 이용하여 교류출력으로 변환하는 전력변환장치 그리고 이 교류 출력전압을 연계계통의 전압과 동일한 수준으로 승압하는 연계변압기로 이루어진다^{[4]-[6]}.

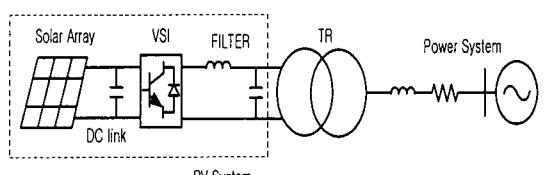


그림 2 계통연계형 PV 시스템 구성

2.2 태양전지 어레이 모델링

태양전지 모델링을 위하여 다양한 등가회로 모형이 제시되어 왔다^[1-3]. 본 연구에서는 그림 3과 같은 전류원, 다이오드 및 저항으로 구성되는 등가회로 모형을 이용한다^[4].

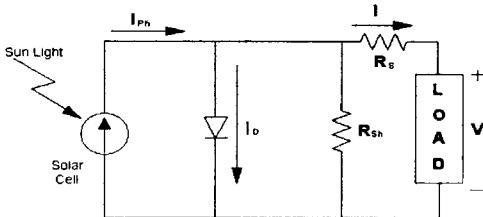


그림 3 간략화 된 태양전지 등가 모델

그림 3에 제시된 태양전지 등가 모델로부터 시스템의 수리 모델을 유도를 위한 등가회로 모형을 도출하면 그림 4와 같다.

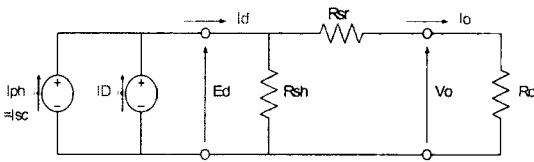


그림 4 태양 전지 회로 모델

그림 4의 회로 모델로부터 회로에 대한 방정식을 작성하면 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_d = V_o + I_o \cdot R_{sr} \quad (1-1)$$

$$I_{sc} - I_D - \frac{1}{R_{sh}} E_d - I_o = 0 \quad (1-2)$$

식(1)은 식(2)의 방정식과 같은 형태가 되어 전압과 전류에 대하여 해를 구하면 비선형 함수 형태의 해를 가진다. 따라서 본 등가 모델의 시간영역에서 모의하거나 해석을 위해서는 다른 방법에 의한 접근이 필요하다.

$$a \cdot e^{b \cdot x} + c \cdot x + d = 0 \quad (2)$$

본 논문에서는 제시된 모델의 해석을 간단히 하기 위하여 병렬 저항(R_{sh})의 값을 무한대(∞)로 가정하였다. 실제 태양 전지 셀에서 병렬 저항은 대략 수 Ω 의 값을 가진다. 병렬 저항에 인가되는 전압이 대략 1V 정도임을 가만히 살펴 병렬 저항의 값을 매우 큰 값이므로 병렬 저항으로 인한 영향은 시스템의 특성해석에 큰 영향을 미치지 않으므로 본 논문에서는 병렬 저항을 생략한 모델을 이용하였다.

태양 전지 셀의 등가 모형은 그림 4와 같이 태양광 입력에 비례하는 전류원과 다이오드 전류, 저항으로 표현할 수 있으며 그 크기는 식(3), 식(4)로 나타낼 수 있다^[4].

$$I_{sc} = f(S, T) = I_{scr} \cdot \frac{S}{1000} + J \cdot (T - T_r) \quad (3)$$

$$I_D = f(E_d, T) = I_{os} \cdot (e^{\frac{-E_d}{n \cdot k \cdot T}} - 1) \quad (4)$$

$$I_{os} = A \cdot T^\gamma \cdot e^{\frac{-E_d}{n \cdot k \cdot T}} \quad (4-1)$$

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

그림 4의 회로 모델의 직렬 저항 값은 식(5)의 방정식을 이용하여 계산할 수 있다^[4] 수리 모델의 상세한 유도 과정은 참고문헌 [4]에 나타내었다.

$$R_{sr} = \frac{n \cdot V_T(T_r) \cdot \ln(\frac{I_{scr} - I_{mp}}{I_{asr}} + 1) - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (5)$$

수리 모델에서 사용된 주요 변수와 상수는 표 1에 정리하여 나타내었다. 또한, 일반적으로 태양전지 모듈 제작사에서 제공하는 주요 파라미터는 표 2에 나타내었다.

표 1 주요 변수 및 상수

| 회로 모델에 사용되는 변수 | |
|----------------|---------------------|
| 변수 | 물리적 의미/값 |
| I_o | 태양전지 셀 출력 전류 |
| I_{ph} | 태양전지 셀 광 전류 |
| I_D | 태양전지 셀 다이오드 전류 |
| I_{sc} | 태양전지 셀 단락 전류 |
| I_{os} | 태양전지 셀 다이오드 역 포화 전류 |
| V_o | 태양전지 셀 단자 전압 |
| V_{dc} | 태양전지 셀 단자 개방 전압 |
| E_d | 태양전지 셀 내부 전압 |
| I_d | 태양전지 셀 내주 전류 |
| R | 부하 저항 |
| R_{sr} | 태양 전지 셀 직렬 기생 저항 |
| R_{sh} | 태양 전지 셀 병렬 기생 저항 |

물리적 상수 및 변수

| 물리적 상수 및 변수 | |
|-------------|--|
| 변수 | 물리적 의미/값 |
| S | 일사량 W/m^2 |
| q | 단위 전하량(Coulomb Constant) : 1.6×10^{-19} C |
| k | 볼츠만 상수(Boltzman Constant) : 1.38×10^{-23} J/K |
| T | 절대 온도 K |
| n | 다이오드 이상정수(Junction Constant) : 1~2 |
| A | 온도 계수 |
| J | 단락 전류 온도 계수 A/K |
| γ | 온도 의존 지수 : 3 |
| E_g | 에너지 겹 (1eV = 1.6×10^{-19} J) eV |
| V_T | 열 전위차 : kT/q V |

태양전지 모듈 구성에 사용되는 변수

| 태양전지 모듈 구성에 사용되는 변수 | |
|---------------------|----------------------|
| 변수 | 물리적 의미/값 |
| N_c | 태양 전지 모듈의 셀 수 |
| N_{msr} | 태양 전지 Array의 직렬 모듈 수 |
| N_{msh} | 태양 전지 Array의 병렬 수 |

표 2 제작사에서 제공하는 태양전지 모듈 데이터

| 최대 출력과 관련 값 | |
|----------------|-------------------------|
| 변수 | 물리적 의미/값 |
| P_{max} | 태양전지 모듈의 최대 출력 W |
| V_{mp} | 태양전지 모듈의 최대 출력에서 전압 V |
| I_{mp} | 태양전지 모듈의 최대 출력에서 전류 A |
| P_{max_ref} | 태양전지 모듈의 보장 가능한 최대 출력 W |

| 기본 전압 전류 특성 | |
|-------------|--------------------------------------|
| 변수 | 물리적 의미/값 |
| I_{nr} | 태양전지 모듈의 단락 전류 A |
| V_{nr} | 태양전지 모듈의 단자 개방 전압 V |
| $J(C_{nr})$ | 단락 전류의 온도 계수 A/ $^\circ\text{C}$ (%) |
| C_{V_nr} | 단자 개방 전압의 온도 계수 mV/ $^\circ\text{C}$ |
| C_p | 출력의 온도 계수 W/ $^\circ\text{C}$ (%) |

| 축정 조건 | |
|-------|----------------|
| 변수 | 물리적 의미/값 |
| S_r | 기준 일사량 W/m^2 |
| T_r | 기준 온도 K |

2.3 태양전지 특성 검토

동가회로 모델로부터 유도된 수리모델이 적합한지를 검증하기 위하여 제시된 태양 전지 모델의 전압-전류 특성 곡선을 기준에 제시된 특성과 동일한지 비교하였다. 특성 곡선 도출을 위하여 그림 5와 같은 알고리즘을 가지는 프로그램을 작성하였으며 제시된 알고리즘은 태양 전지의 동특성 모의 해석에도 적용이 가능하다.

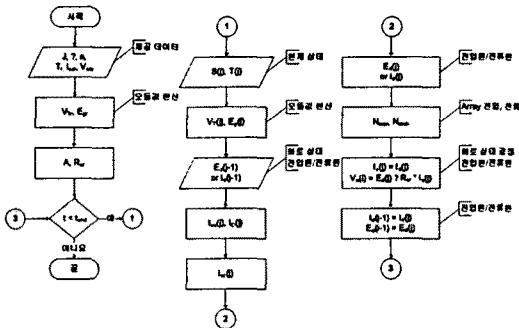


그림 5 특성 곡선 도출을 위한 순서도

수리 모형 검증을 위해 현재 한국전기연구원에서 보유하고 있는 9kW 태양전지 어레이를 구성하고 있는 모듈의 파라미터를 사용하였으며 주요 값은 표 3과 같다.

표 3 태양 전지 모듈 파라미터

| 모델명 | GMG 10530 |
|----------|--------------------------------------|
| 개방전압 | 21.7 [V] |
| 단락전류 | 3.35 [A] |
| 최대출력점 전압 | 17.4 [V] |
| 최대출력점 전류 | 3.05 [A] |
| 최대출력 | 53 W _p |
| 시험조건 | 1000 W/m ² , 25°C, AM 1.5 |

본 논문에 제시된 수리 모델을 통해 계산된 태양전지 어레이 및 모듈의 최대 출력 값은 다음과 같으며 그 결과는 표 3에 제시된 제작사 데이터와 근사함을 알 수 있다.

- 어레이 최대 출력 : 9.56kW @ 344.5V, 27.7A
- 모듈 최대 출력 : 53.1W @ 17.2V, 3.08A

제시된 수리 모델을 이용하여 일어진 전압-전류 특성 곡선 및 전압-전력 특성 곡선은 각각 그림 6, 그림 7과 같다. 각각의 특성 곡선은 일사량과 온도 변화에 따른 특성을 나타낸 것이다. 그림 6과 그림 7에서 왼쪽의 특성 곡선은 온도가 일정할 때 일사량 변화에 따른 특성 곡선이며 오른쪽의 그림은 일사량이 일정할 때 온도 변화에 따른 특성을 나타낸 것이다.

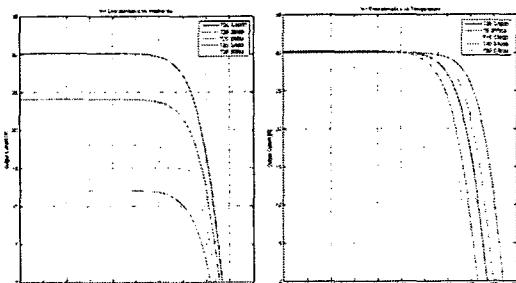


그림 6 전압-전류 특성 곡선

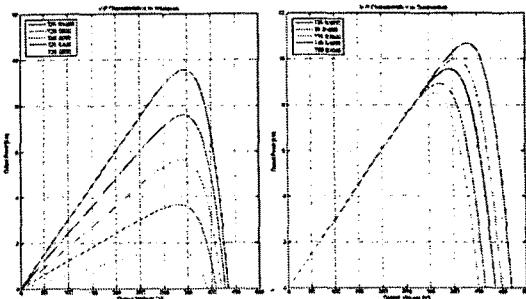


그림 7 전압-전력 특성 곡선

그림 6과 그림 7의 특성 곡선은 제작사에서 제시한 특성 곡선과 일치함을 확인하여 본 논문에서 제시된 수리 모형이 실제 시스템의 특성을 충실히 나타낼 수 있음을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 계통 연계를 위한 실증 시스템 개발 연구의 일부로 진행되고 있는 태양광 시스템의 모델링 및 특성 해석 결과에 대한 내용을 제시하였다. 태양광 시스템의 일반적인 구조와 동가 모델을 제시하였으며 제시된 동가 모델로부터 회로 모형을 도출하였다. 도출된 회로 모형으로부터 특성 해석 및 동특성 모의에 적용할 수리 모형을 제시하였으며 제시된 수리 모형의 타당성 검증을 위하여 최대 출력과 최대 출력에서의 전압, 전류 값을 검토하였으며 일사량 및 온도 변화에 따른 특성 곡선을 도출하여 기준 데이터와 비교하였다. 수리 모형의 검증에 사용된 주요 파라미터는 현재 한국전기연구원에서 보유하고 있는 실제 태양광 발전 시스템을 데이터를 사용하였다. 본 논문에서 제시된 태양광 시스템 모델은 향후 전체 시스템의 동적 응답에 대한 해석 및 계통 연계 운전 검토를 위한 연구에 적용될 계획이다.

[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] 김슬기, 전진홍, 김웅상, "PSCAD/EMTDC를 이용한 계통연계형 태양광 발전 시스템의 모델링 및 모의 해석", 대한전기학회 논문지 54A권 3호, 2005년 3월, pp107-116
- [5] Luis Castaner and Santiago Silvestre, Modeling Photovoltaic Systems Using PSpice, JOHN WILEY & SONS, LTD, 2002.
- [6] Mukund R. Patel, Wind and Solar Power Systems. CRC Press, USA, 1999.