Matlab/Simulink를 이용한 계통연계형 태양광발전 모델링

서훈철*, 윤영민**, 김선룡**, 이시봉**
기초전력연구원*, 포스코건설**

Modeling of Grid-Connected Photovoltaic Generation using Matlab/Simulink

*H. C. Seo, **Y. M. Yoon, **S. R. Kim, **S. B. Lee
* KESRI, **POSCO E&C

Abstract - This paper introduces the modeling of grid-connected photovoltaic(PV) generation using Matlab/Simulink. The model is based on the equivalent circuit of the PV solar cell including the effects of solar irradiation and temperature changes. The PV arrays are modeled to be bulit up with the series/parallel combination of PV solar cell and are connected to the distribution system via an inverter. The simulation results show that the typical characteristics and outputs of the PV arrays are accurate.

1. 서 론

현재, 태양광, 풍력 등의 신재생 에너지의 계통연계가 증가하고 있다. 특히, 태양광 발전의 용량이 점점 커짐에 따라 태양광 발전 연계 시 계통에 역조류문제, 고조파 및 전압변동 문제, 상 불평형 문제, 주파수변동 등 다양한 문제점이 발생하고 있다. 따라서 태양광 발전 특성의 정확한 모델링 및 시뮬레이션을 통하여 이러한 문제점들의 분석 및 대책이 필요한 상황이다.

본 논문에서는 Matlab-Simulink를 이용하여 계통연계형 태양광 발전을 모델링하였다. 태양전지 셀의 등가회로를 기반으로 하여 셀의 직렬 및 병렬 연결을 반영하도록 태양광 array를 모델링하였다. 또한, 조사량 및 온도의 영향에 따라 태양광 발전의 출력이 변동하므로, 이러한 요소들을 반영할 수 있는 태양광 발전을 모델링하였다.

2. 태양광 발전

2.1 태양광 Array[1]

태양광 array는 태양광 셀의 직렬과 병렬 결합이다. 태양광 셀의 등가회로는 다음 그림 1과 같다. 그림 1에서 태양광 셀의 출력전압은 다음 식 (1)과 같다.

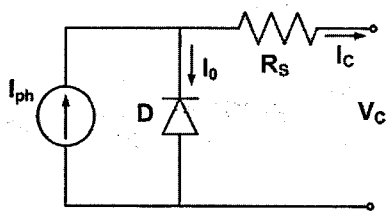

그림 1. 태양광 셀의 등가회로

$$V_C = \frac{AkT_C}{e}\ln\left(\frac{I_{ph}+I_0-I_C}{I_0}\right) - R_S I_C \quad (1)$$

여기서, e: electron charge(1.602×10^{-19}C)
k: Boltzmann constant(1.38×10^{-23}J/K)
I_c: 셀의 출력전류(A)
I_{ph}: 태양광전류, 조사량 및 온도의 함수(5A)
I_0: 다이오드의 역포화 전류(0.0002A)
R_s: 셀의 직렬 저항(0.001Ω)
T_c: 셀의 동작 온도(20℃)
Vc: 셀의 출력 전압(V)

A는 curve fitting factor로서 식 (1)에 의하여 얻어진 셀의 I-V 특성을 시험에 의하여 얻어진 실제 특성으로 조정하기 위하여 사용된다. 식 (1)은 하나의 태양광 셀의 출력전압을 나타낸다. 따라서, 전체 태양광 array의 전압을 계산하기 위하여 직렬로 연결된 셀의 수를 식 (1)에 의하여 얻어진 출력전압에 곱하면 된다. Array의 전류는 병렬로 연결된 셀을 통하여 흐르는 전류의 합이다. 따라서, 식 (1)에서 하나의 셀의 출력전류 I_C는 array의 전류를 병렬로 연결된 셀의 수로 나눔으로서 구할 수 있다.

2.2 조사량 및 온도의 영향[1]

식 (1)의 I_C는 어떤 특정 셀의 동작 온도 T_c 및 이에 대응하는 조사량 S_c에서 유효한 값이다. 온도와 조사량이 변한다면, 태양광 array의 출력 전압 및 전류 또한 이에 따라 변할 것이다. 따라서, 온도와 조사량의 변화에 대한 영향이 최종 태양광 array 모델에 포함되어야 한다.

이를 위하여, 식 (1)을 기지의 등작온도 T_c와 조사량 S_c에 대한 기준 값으로 가정한다. 셀의 등작온도는 조사량 및 온도의 함수로서 나타난다. 따라서, 온도 T_c가 임의의 온도 T_x로 변할 때 영향은 셀의 출력전압 및 태양광 전류에 대한 온도계수 C_{TV}와 C_{TI}에 의하여 다음 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{TV} = 1+\beta_T(T_C - T_X) \quad (2)$$

$$C_{TI} = 1+\frac{\gamma_T}{S_C}(T_x - T_C) \quad (3)$$

여기서, $\beta_T = 0.004$, $\gamma_T = 0.06$, T_X: 새로운 온도

대기온도가 변하지 않더라도, 조사량은 구름 및 햇볕에 따라 변할 수 있다. 조사량에서의 변화는 태양광 전류 및 셀의 동작온도에서의 변화를 유발한다. 조사량이 S_{x1}에서 S_{x2}로 증가한다면, 셀의 동작온도와 태양광 전류는 각각 T_{x1}에서 T_{x2}로, I_{ph1}에서 I_{ph2}로 증가하게 된다. 이러한 변화는 식 (4)와 (5)의 조사량에 대한 계수 C_{SV}와 C_{SI}를 이용하여 표현할 수 있다.

$$C_{SV} = 1+\beta_T\alpha_S(S_x - S_C) \quad (4)$$

$$C_{SI} = 1+\frac{1}{S_C}(S_x - S_C) \quad (5)$$

여기서 Sx: 새로운 조사량

α_s는 조사량의 변화로 인한 셀의 동작온도 변화의 기울기를 나타내는 것으로, 0.2로 설정하였다.

새로운 온도 T_X 및 조사량 S_X에 대하여 위에서 정의한 4개의 계수 C_{TV}, C_{TI}, C_{SV}, C_{SI}를 이용하여 새로운 셀의 출력전압 V_{CX} 및 태양광 전류를 I_{phx}를 다음 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{CX} = C_{TV} C_{SV} V_C$$
$$I_{phx} = C_{TI} C_{SI} I_{ph} \quad (6)$$

2.3 계통연계형 태양광 발전 모델

다음 그림 2는 국내의 A 태양광 발전이다. 각 array는 175Wp의 태양광 셀이 직렬로 17개, 병렬로 126개로 연결된 형태로서 375kW의 전력을 생산한다. 이러한 array 8개로 태양광 발전 모델이 구성되어 있으므로 태양광 발전 모델의 전체 출력은 3MW이다. 태양광 array의 출력은 인버터를 거쳐서 3상 380V의 교류로 변환되며, 4개의 array의 출력이 하나의 변압기를 이용하여 22.9kV로 승압되어 계통에 연결되는 형태이다.

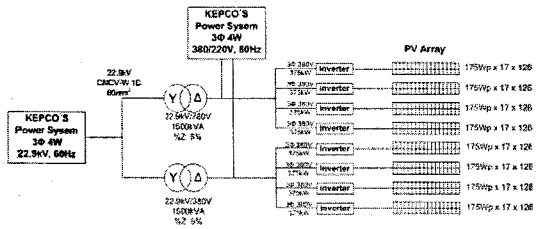

그림 2. A 태양광 발전 모델

3. Matlab/Simulink를 이용한 계통연계형 태양광 발전 모델링

3.1 Matlab/Simulink를 이용한 계통연계형 태양광 발전 모델링

그림 2의 태양광 발전 모델을 Matlab/Simulink를 이용하여 모델링하면 다음 그림 3과 같다. 현재, 전력계통은 모델링 되지 않았으며, 태양광 발전의 출력이 3MW의 부하에 전력을 공급하도록 모델링하였다. 또한 그림 3을 통하여 태양광 발전 모델은 그림 2와 같이 전체 8개의 array로 구성되어 있음을 알 수 있다.

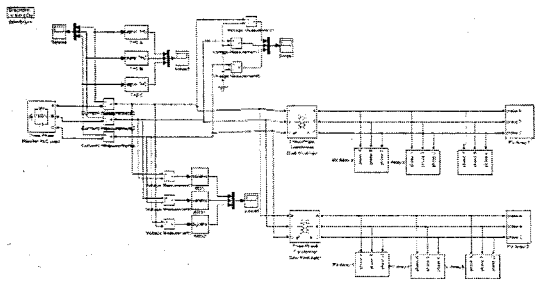

그림 3. Matlab/Simulink를 이용한 계통연계형 태양광 발전 모델링

각각의 태양광 array는 상기 2.1 및 2.2에 나타난 내용을 기반으로 셀의 직·병렬 수 및 대기온도와 조사량을 반영할 수 있도록 모델링하였다. 각각의 태양광 array 및 인버터를 하나의 subcircuit으로 구성하였다. 각 subcircuit의 구성은 다음 그림 4와 같다. 그림 4를 통하여 직렬로 연결된 수는 17, 병렬로 연결된 수는 126임을 알 수 있다. 또한, 온도 및 조사량의 변화가 반영되도록 모델링 되어 있음을 알 수 있다. 그렇지만, 그림 4에서는 대기온도 및 조사량은 초기값 20℃ 및 100W/m^{2}이 변하지 않는 것으로 모델링하였으며, 표시된 부분의 값을 다른 값으로 바꾸면 이들 값의 변화를 반영할 수 있다.태양광 array의 출력은 필터를 거쳐서 6pulse PWM 인버터를 통하여 상위 회로에 연결되도록 모델링하였다.

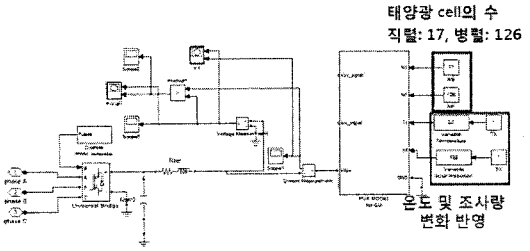

그림 4. 각각의 태양광 array 및 인버터 모델링

3.2 시뮬레이션 결과

각 array의 P-V 특성 및 I-V 특성은 다음 그림 5~6과 같다. 태양광의 전압은 전류가 0인 개방회로 전압에서 시작하여, 시뮬레이션이 시작됨에 따라 부하는 태양광으로부터 전류를 공급받아 태양광의 동작점이 최대 전력점(maximum power point)으로 이동하고 있음을 알 수 있다.

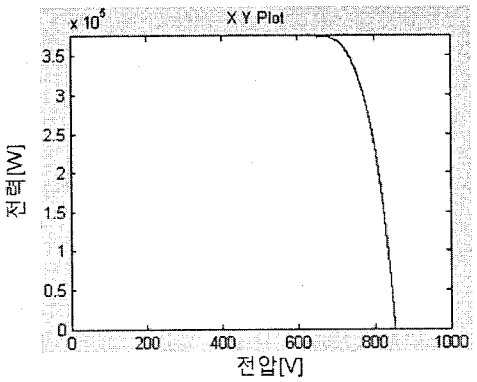

그림 5. 태양광 array의 P-V 특성

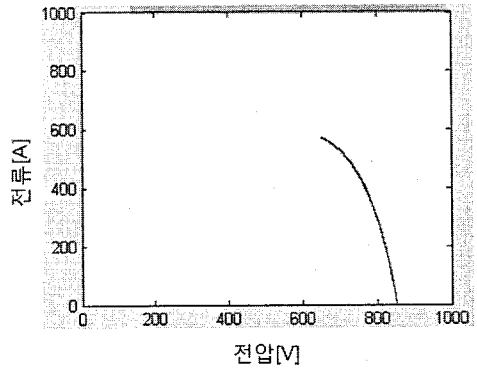

그림 6. 태양광 array의 I-V 특성

다음 그림 7은 하나의 태양광 array의 출력전력을 나타낸다. 출력에서 약간의 진동은 존재하나, 373.4kW 정도의 출력을 나타내어 거의 최대 출력에 가깝게 동작하고 있음을 확인할 수 있다. 이 값에 태양광 array 수를

곱하면 태양광 발전은 전체 2.987MW의 출력으로 동작하고 있음을 알 수 있다. 다음 그림 8은 인버터 및 변압기를 거쳐서 부하에 공급하는 전압이다. 22.7-22.8kV로 즉, 정격전압 22.9kV와 0.43~0.87%의 차이로 동작하고 있음을 알 수 있다. 다음 그림 9는 부하로 흐르는 전류를 나타낸다. 고조파가 많음을 확인할 수 있다. 또한, 그림 8과 9를 통하여 시뮬레이션 시간이 지날수록 최대 출력점에 가깝게 동작하고 있음을 알 수 있다.

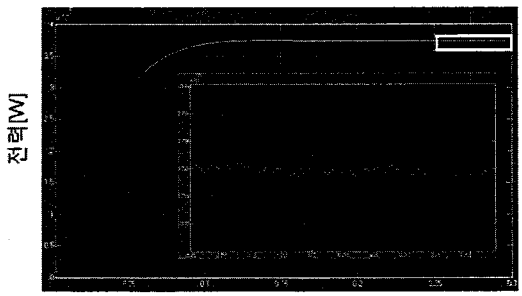

그림 7. 태양광의 출력전력

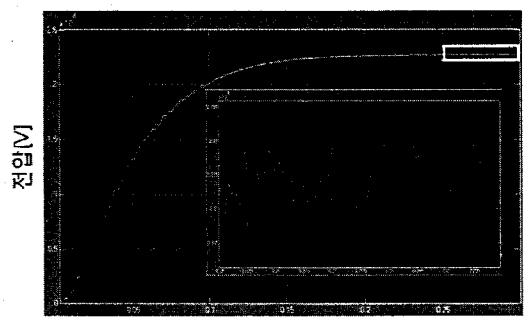

그림 8. 인버터 및 변압기를 거쳐서 부하에 공급하는 전압

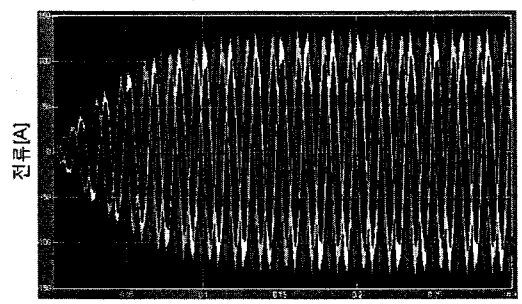

그림 9. 부하로 흐르는 전류

3.3 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 우선 한전의 분산형 전원 계통연계 기술기준을 검토하였다. 그 중 동기화 기준은 다음 표 1과 같다. 모델링된 태양광 발전의 경우 3MW 이므로 전압차는 3%이여야 한다. 그림 8에서 나타난 것과 같이 정격전압의 전압차는 0.43~0.87%로서 해당범위 내에서 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 9에서 보면 부하로 흐르는 전류에 고조파가 많음을 알 수 있다. 이에 대한 검증을 위하여 실제 A 태양광 발전의 전력품질 데이터와 비교하였다. A 태양광 발전의 THD는 10.1%이다. 그림 9의 전류파형에 대하여 THD를 분석하면 다음 그림 10과 같이 3상 평균 10%이다. A 태양광 발전에 대하여 정확한 운전기준은 알 수 없으나, 이 값은 국내의 분산형 전원 계통연계 기준인 5%를 초과하는 범위이고 오차가 0.1로서 매우 작기 때문에 모델링은 정확하게 된 것으로 간주할 수 있다.

표 1. 한전의 분산형 전원 계통연계 기술기준의 분산전원 설비 투입순간, 발전설비와 계통사이의 변수기준

발전용량 합계(kVA)	주파수 차 (Hz)	전압 차(%)	위상각 차 (도)
0~500	0.3	10	20
500~1,500	0.2	5	15
1,500~10,000	0.1	3	10

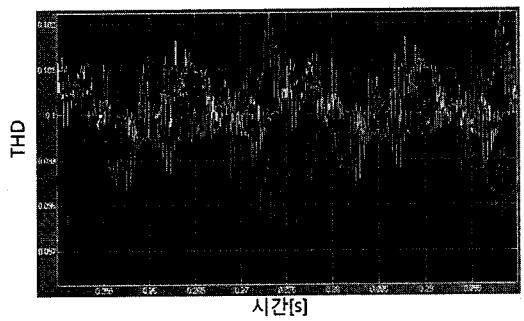

그림 10. 부하에 흐르는 전류에 대한 THD 분석결과

4. 결 론

본 논문에서는 Matlab/Simulink를 이용하여 국내의 A 태양광 발전에 대하여 모델링하였다. 태양광 셀의 등가회로를 기반으로, 태양광 array의 직, 병렬 구성을 반영하도록 태양광 array를 모델링하였다. 또한, 온도 및 조사량의 반영 시 태양광 셀의 출력 전압 및 전류가 변화하기 때문에, 이들의 대한 영향을 반영하도록 온도계수 및 조사량계수 설정하여 태양광 array를 모델링하였다.

A 태양광 발전의 모델링 결과, 전체 출력인 3MW에 가깝도록 2.987MW의 출력으로 동작하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 태양광의 P-V 및 I-V 특성을 통하여 전형적인 태양광 발전의 출력을 보이고 있으며, 최대 출력점에서 동작하고 있음을 볼 수 있었다. 부하에 공급하고 있는 전압은 정격전압의 허용 범위 내에서 동작하고 있으며, 부하로 흐르는 전류에 대한 THD 분석결과를 통하여 실제 A 태양광 발전의 THD와 거의 동일한 값에서 동작하고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 분석결과를 통하여 계통연계형 태양광 발전의 모델링은 적절하게 수행되었음을 확인할 수 있었다.

이러한 모델링 결과를 태양광 발전의 실제 배전계통 연계 시 전력품질 및 보호측면에서 다양한 분석을 수행할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] I. H. Altas, A. M. Sharaf, "A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment", International Conference on Clean Electrical Power, May 21-23, 2007, pp. 341-345.