

태양광 발전 연계 계통에서 개폐서지 해석

서훈철, 김철환
성균관대학교

Analysis of Switching Surge in Distribution System with Photovoltaic Generation System

Hun-Chul Seo, Chul-Hwan Kim
Sungkyunkwan University

Abstract - This paper analyzes the switching surge in distribution system with photovoltaic (PV) generation system. The change of overvoltage by PV generation system is analyzed using lattice diagram. To verify the analysis results, the distribution system with PV generation system is modeled using EMTP-RV and the various simulations are performed.

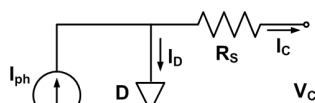
1. 서 론

전력계통에서는 뇌격에 의하여 발생하는 과전압, 차단기의 개폐동작 등에 의하여 발생하는 과전압 등 다양한 과전압이 발생하게 된다. 뇌 방전에 의하여 발생한 낙뢰가 전력설비에 직접적으로 떨어진다면, 절연과 피 등 설비가 큰 손상을 입게 된다. 고장 혹은 차단기 동작에 의하여 발생하는 개폐 과전압은 뇌에 의하여 발생하는 과전압보다 그 크기는 작지만 뇌 과전압과 마찬가지로 절연과 피 등 설비에 손상을 입히게 된다 [1]. 현재, 스마트그리드 구현을 위하여 태양광 발전, 풍력 발전 등 다양한 종류의 분산전원이 계통에 연계되고 있다. 따라서, 과전압 발생 시 이러한 분산전원에도 손상을 입힐 수 있으므로 이에 대한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 태양광 발전 연계 시 여러 가지 과전압 중 개폐과전압을 분석하였다. 격자도를 이용하여 태양광 발전의 연계 유무에 따른 과전압 해석을 수행하여, 태양광 발전 연계 시 과전압의 크기 변화를 분석하였다. 이러한 분석결과를 증명하기 위하여 EMTP-RV를 이용하여 태양광 발전이 연계된 배전계통을 모델링하였으며, 다양한 경우를 모의하여 그 결과를 분석하였다.

2. 태양광 발전

태양광 셀의 등가회로는 다음 그림 1과 같다. 그림 1에서 태양광 셀의 출력전압은 다음 식 (1)과 같다. 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_c 는 array의 전류를 병렬로 연결된 셀의 수로 나눔으로서 구할 수 있다 [2].



<그림 1> 태양광 셀의 등가회로

$$V_c = \frac{AkT_c}{e} \ln\left(\frac{I_{ph} + I_0 - I_c}{I_0}\right) - R_s I_c \quad (1)$$

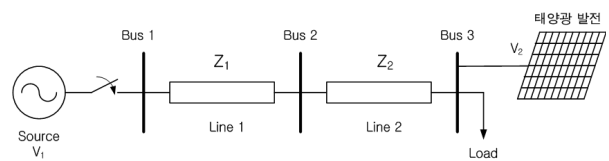
여기서, A: Curve fitting factor, e: electric charge($1.602 \times 10^{-19}C$)
k: Boltzmann 상수($1.38 \times 10^{-23}J/K$), I_c : 셀의 출력전류(A)
 I_{ph} : 태양광 전류(5A), I_0 : 다이오드의 역포화 전류(0.0002A),
 V_c : 셀의 출력 전압(V), R_s : 셀의 직렬 저항(0.001Ω),
 T_c : 셀의 동작 온도(20°C)

3. 태양광 발전 연계 시 과전압 해석

3.1 격자도를 이용한 태양광 발전의 유무에 따른 과전압 해석

다음 그림 2는 태양광 발전이 연계된 배전계통을 나타낸다. 태양광 발

전은 주로 부하단 근처에 연계된다. 그림에서 V_1 은 전원단에서 공급되는 전압의 크기, V_2 는 태양광 발전에 의하여 공급되는 전압의 크기를 나타낸다. 또한, Z_1 과 Z_2 는 Line 1과 Line 2의 특성 임피던스를 나타낸다.



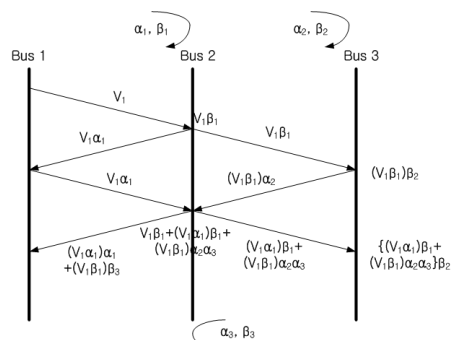
<그림 2> 태양광 발전이 연계된 배전계통

태양광 발전 연계 시 과전압이 어떻게 달라지는지 알아보기 위하여 격자도를 이용하여 과전압 해석을 수행하였다. 과전압 해석 시 부하는 저항부하로 고려하였다. 다음 그림 3은 태양광 발전이 연계되지 않은 경우 격자도를 이용한 과전압 해석 결과이다. 그림에서 α_1 과 β_1 은 Bus 1에서 Bus 2로 향하는 서지에 대하여 Bus 2에서의 반사계수 및 전송계수이다. 유사하게, α_2 , β_2 는 Bus 2에서 Bus 3으로 향하는 서지에 대하여 Bus 3에서의 반사계수 및 전송계수이며, α_3 과 β_3 는 Bus 3에서 Bus 2로 향하는 서지에 대하여 Bus 2에서의 반사계수, 전송계수이다. 각 계수는 다음 식 (2-4)와 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \beta_1 = 1 + \alpha_1 \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \frac{R - Z_2}{R + Z_2} \quad \beta_2 = 1 + \alpha_2 \quad (3)$$

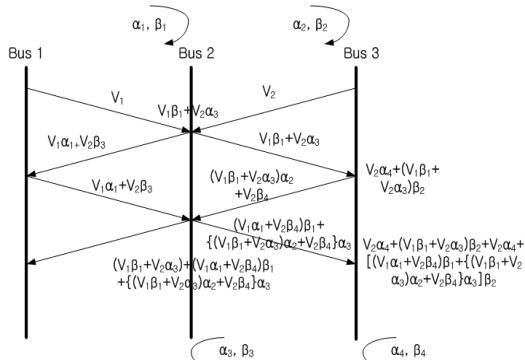
$$\alpha_3 = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \beta_3 = 1 + \alpha_3 \quad (4)$$



<그림 3> 태양광 발전이 연계되지 않은 경우의 격자도 해석 결과

다음 그림 4는 태양광 발전이 연계된 경우의 격자도 해석 결과이다. 그림에서 α_1 , β_1 , α_2 , β_2 , α_3 , β_3 는 그림 3의 경우와 동일하다. 그림 3의 경우와는 달리 태양광 발전에 의하여 공급된 전력으로 인하여 부하에서 Bus 3으로 향하는 서지가 발생하므로 이 서지에 대한 Bus 3에서의 반사계수 및 전송계수인 α_4 , β_4 가 추가되며, 다음 식 (5)와 같이 구할 수 있다. V_1 은 그림 3과 동일하며, 태양광 발전에 의하여 공급되는 전압인 V_2 가 추가된다.

$$\alpha_4 = \frac{Z_2 - R}{Z_2 + R} \quad \beta_4 = 1 + \alpha_4 \quad (5)$$



〈그림 4〉 태양광 발전이 연계된 경우의 격자도 해석 결과

3.2 태양광 발전이 과전압의 크기에 미치는 영향 분석

태양광 발전이 과전압의 크기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 식 (6-7)과 같이 각 모선에서 그림 4의 결과에서 그림 3의 결과의 차를 구하였다. 식 (6-7)은 서지가 가장 처음 전파된 시점에서 각 모선에서의 전압 크기의 변화를 구한 것이다.

$$V_{Bus2_DG} - V_{Bus2_NoDG} = V_1\beta_1 + V_2\alpha_3 - V_1\beta_1 = V_2\alpha_3 \quad (6)$$

$$V_{Bus3_DG} - V_{Bus3_NoDG} = V_2\alpha_4 + (V_1\beta_1 + V_2\alpha_3)\beta_2 - V_1\beta_1\beta_2 = V_2(\alpha_4 + \alpha_3\beta_2) \quad (7)$$

식 (6-7)을 보면, 태양광 발전이 과전압에 미치는 영향은 반사계수 및 전송계수에 의하여 결정됨을 알 수 있다. 각 반사계수 및 전송계수는 선로의 특성임피던스와 부하량의 상대적인 크기에 따라 결정된다. 다음 표 1은 각 조건에 따라 각 전송계수 및 반사계수의 부호를 나타낸 것이다.

〈표 1〉 각 조건에 따라 각 전송계수 및 반사계수의 부호

| 조건 \ 계수 | $Z_1 < Z_2, Z_2 < R$ | $Z_1 < Z_2, Z_2 > R$ | $Z_1 > Z_2, Z_2 < R$ | $Z_1 > Z_2, Z_2 > R$ |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| α_3 | - | - | + | + |
| α_4 | - | + | - | + |
| β_2 | + | + | + | + |

다음 표 2는 표 1 및 식 (6-7)을 기반으로 태양광 발전 연계 시 각 모선에서 과전압의 크기 변화를 나타낸 것이다. 표 2에서 감소는 태양광 발전이 연계된 경우에 과전압의 크기가 더 작다는 것을 의미하며, 증가는 태양광 발전으로 인하여 과전압의 크기가 더 커진다는 것을 의미한다. 감소 혹은 증가는 각 계수의 크기에 따라 감소할 수도 있으며, 증가할 수도 있음을 의미한다.

〈표 2〉 태양광 발전 연계 시 각 모선에서 과전압의 크기 변화

| 모선 \ 조건 | $Z_1 < Z_2, Z_2 < R$ | $Z_1 < Z_2, Z_2 > R$ | $Z_1 > Z_2, Z_2 < R$ | $Z_1 > Z_2, Z_2 > R$ |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Bus 2 | 감소 | 감소 | 증가 | 증가 |
| Bus 3 | 감소 | 감소 혹은 증가 | 감소 혹은 증가 | 증가 |

4. 시뮬레이션 및 결과검토

4.1 계통모델 및 시뮬레이션 조건

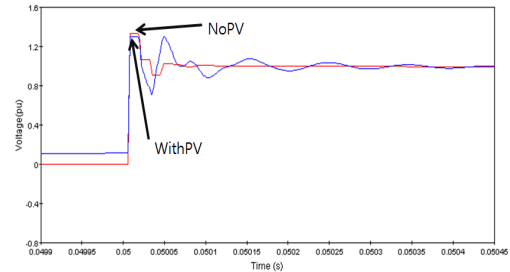
상기 3절의 해석결과를 증명하기 위하여 그림 2에 나타난 전형적인 배전계통을 사용하였다. 그 시뮬레이션 조건은 다음 표 3과 같다. Line 1, 2의 특성임피던스 및 부하 임피던스의 크기를 표 1-2에 나타난 조건대로 변경하였다. 개폐가 발생하는 위치는 그림 2와 같이 전원단이다.

4.2 시뮬레이션 결과

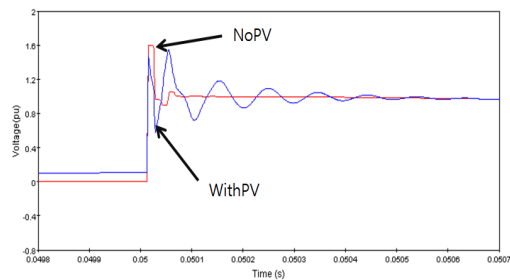
다음 그림 5는 Case 1에 대하여 Bus 2에서 측정된 결과이다. 태양광 발전이 연계되지 않은 경우(그림 5에서 NoPV)는 최대 1.33pu이며, 태양광 발전이 연계된 경우(그림 5에서 WithPV)는 최대 1.29pu이다. 그림 6은 동일한 case에서 Bus 3에서 측정된 결과이다. 태양광 발전이 연계되지 않은 경우는 최대 1.6pu이며, 태양광 발전이 연계된 경우는 최대 1.55pu이다. Bus 2와 Bus 3에서의 결과 모두 표 2의 분석결과와 마찬가지로 태양광 발전이 연계된 경우 과전압이 감소함을 알 수 있다.

〈표 3〉 시뮬레이션 조건

| 임피던스 \ Case | $Z_1(\Omega)$ | $Z_2(\Omega)$ | $R(\Omega)$ |
|-------------|---------------|---------------|-------------|
| Case 1 | 100 | 200 | 300 |
| Case 2 | 100 | 200 | 100 |
| Case 3 | 300 | 200 | 300 |
| Case 4 | 300 | 200 | 100 |



〈그림 5〉 Case 1에 대하여 Bus 2에서 측정된 결과



〈그림 6〉 Case 1에 대하여 Bus 3에서 측정된 결과

다음 표 4는 4가지 case에서 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 4가지 Case 모두 표 2의 분석결과와 일치함을 알 수 있다.

〈표 4〉 시뮬레이션 결과

| Case \ Bus | Bus 2(pu) | | Bus 3(pu) | |
|------------|-----------|--------|-----------|--------|
| | NoPV | WithPV | NoPV | WithPV |
| Case 1 | 1.33 | 1.29 | 1.60 | 1.55 |
| Case 2 | 1.33 | 1.32 | 1.03 | 1.17 |
| Case 3 | 1.15 | 1.29 | 1.19 | 1.41 |
| Case 4 | 1 | 1.018 | 1 | 1.014 |

5. 결 론

본 논문에서는 태양광 발전 연계 시 개폐서지를 분석하였다. 격자도를 이용하여 태양광 발전의 연계 유무에 따른 과전압을 해석을 수행하였으며, 이를 기반으로 태양광 발전이 과전압의 크기에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과를 증명하기 위하여 EMTP-RV를 이용하여 모의하였다. 분석결과, 태양광 발전 연계 시 선로의 특성임피던스 및 부하의 크기에 따라 과전압의 크기가 표 2의 조건에 따라 커질 수도 있고, 작아질 수도 있음을 확인하였다. 본 논문의 결과를 기반으로 태양광 발전을 포함한 분산전원 연계 시 과전압 감소 대책 개발이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 20103060130010)

[참 고 문 헌]

[1] Allan Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", John Wiley & Sons 1991.
[2] H. C. Seo, C. H. Kim, Y. M. Yoon, C. S. Jung, "Dynamics of Grid-connected Photovoltaic System at Fault Conditions", IEEE T&D 2009.