대용량 태양광발전이 연계된 배전계통의 수용가 전압 특성해석에 관한 연구

A Study on the Customer Voltage Characteristic of Distribution System with Large Scale PV

김 병 기* · 유 경 상* · 김 찬 혁* · 노 대 석†

(Byung-Ki Kim · Kyung-Sang Ryu · Chan-Hyeok Kim · Dae-Seok Rho)

Abstract - This paper deals with the analysis of the customer voltage characteristic in distribution system interconnected with large scale PV system. There would be many power quality issues which are caused by reverse power flow of PV system interconnected with distribution system. In order to analyze the effect of PV system on the customer voltage, detailed modeling method of distribution system and modified modelling method of PV system are proposed using PSCAD/EMTDC in this paper. So far, less than dozens KW of PV system can be simulated with the existing modelling method. Therefore, a new modeling method which can simulate the large scale PV system is proposed by considering the relationship equation on the phase and voltage in the current control algorithm. From the simulation result of proposed modelling method, it is confirmed that an optimal operation method in distribution system is suggested by analyzing the effect of PV system on customer voltage.

Key Words : PV system, Distribution system, PSCAD/EMTDC, Customer voltage, Reverse power flow, SVR

1. 서 론

최근 정부에서는 차세대 성장 동력 산업의 하나로써 녹색 성장 정책을 추진하여, 2030년까지 신재생에너지전원의 비중을 전체 에너지전원의 11% 정도로 확대하는 보급 사업을 적극적으로 수행하고 있다. 신재생에너지 전원의 활성화 방안에 따라 지자체와 신재생 에너지 발전사업자를 중심으로 대용량 분산전원을 배전계통에 활발하게 연계하고 있는 실정이다. 기존의 배전계통은 전원과 부하로만 구성되어 배전용 변전소에서 수용가로 흐르는 단방향 조류로 인하여 전압강하만 존재하였지만, 태양광전원과 같은 대용량 분산전원이 배전선로에 연계되면 양방향 조류에 의하여 말단 지점에 전압상승과 같은 다양한 문제점이 발생할 수 있다. 특히 수용가 전압은 $220V \pm 13[V]$ 로 유지하도록 전기사업법에 정해져 있는 중요한 항목으로 대용량 분산전원 연계 시에 반드시 지켜야할 기술적인 요소이다.[1]~[3] 분산전원이 배전계통에 연계되어 발생한 실계통의 문제점으로는 천안 목천 해비타트 마을에 설치된 태양광발전 운용사례를 들 수 있다. 이 마을에는 주상변압기 한 대의 변대에 30여대의 태양광전원이 연계되어 운용되고 있는 동안, 부하가 낮은 주간에 태양광 발전의 출력증가로 변태측으로 역조류가 발생하여 말단 수용가 전압이 240V를 초과하는 과전압 현상이 발생한 사

례가 보고되고 있다. 또한, 전남 장흥 D/L의 선로 중간에 설치되어 있는 선로전압조정장치(SVR)가 D/L의 말단 지점에 연계된 소수력발전의 출력증가로 인한 역조류 현상에 의하여 고장이 발생된 사례가 보고되고 있다.

이러한 배경 하에, 본 논문에서는 배전계통의 대표적인 상용소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 실 배전계통의 상세 모델링 수법과 태양광전원의 개선된 모델링 수법을 제안하여, 배전계통에 연계된 태양광 전원이 수용가 전압에 미치는 영향을 구체적으로 해석하였다. 실 배전계통의 상세 모델링 수법으로는 회선별 단선도 상에서 먼저 개폐기를 기준으로 구간을 정의하고, 각 구간의 kW(고압수용가 계약 전력)와 kWh(저압수용가의 사용전력량) 부하에 대해 역률을 고려하여 추정된 값과 변전소 직하에서 측정한 피크치의 값을 비례식으로 나타내어, 각 구간의 실제 부하를 계산하는 방법을 제안하였다. 또한 본 논문에서는 수십kw 정도의 소규모 출력에 대해서만 모델링이 가능한 기존의 태양광전원 모델링의 단점을 보완하기 위하여, 목표로 하는 유·무효전력을 구하기 위해서 반드시 고려되어야 할 태양광전원 연계지점의 위상과 전압의 관계식을 도입하였다. 이 식은 태양광 전원이 연계되는 지점의 전압과 위상을 동기화시키기 위하여 기준이 되는 값으로 IGBT를 구동시키기 위한 6개의 PWM 신호를 생성하기 위해서 필요한 관계식이다. 즉, 위상과 전압에 대한 관계식을 전류제어 알고리즘에 적용시켜 목표로 하는 대용량 출력에 대해서도 정확하게 모델링할 수 있는 수법을 제안하였다. 그리고 제안한 EMTDC/PSCAD 모델수법에 의한 시뮬레이션 결과와 이론적인 수치해석의 결과를 비교하여, 본 연구에서 제시한 모델링의 유효성을 확인하였고, 또한 태양광전원이 수용가 전압에 미치는

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Korea University of Technology, Korea
E-mail : dsrho@kut.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Korea University of
Technology, Korea

Received : October 4, 2012; Accepted : December 20, 2012

영향을 구체적으로 분석하여 배전시스템의 최적운용방안을 제시하였다.

2. 실계통의 상세모델링 수법

2.1 배전선로의 부하분포 모델링

일반적으로 배전선로는 수백 개의 주상변압기와 고압 수용가 등의 부하 모선을 가지고 있어서 각 모선의 부하를 측정하거나 구한다는 것은 현실적으로 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 배전선로의 부하 분포를 구하기 위하여 구간 부하 모델링 수법을 제안한다. 먼저 그림 1과 같이 배전선로를 전선의 선종이 바뀌는 지점이나 분기 선로가 접속되는 지점, 보호기기가 설치되어 있는 지점, 선로 전압조정장치가 설치되어 있는 지점 등의 주요지점을 기준으로 구간(section)을 정의한다.[4]

그림 1 고압배전선의 구간부하 모델링
Fig. 1 Load modeling of primary feeder

상기에서 정의한 구간을 기준으로 각 구간에 포함된 고압수용가의 계약 전력(kW)과 저압수용가에 공급하는 주상변압기의 용량을 합산하여 각 구간의 부하설비용량을 구한다. 여기서 고압 수용가는 계약 용량(kW)을 이용하여 합산을 하고, 저압 수용가의 경우에는 주상변압기의 용량에 역률과 이용률을 곱하여 합산을 한다. 그리고 구간별로 구한 부하설비용량의 합과 해당 배전선로 전체 구간의 총 부하설비용량의 합을 비례식으로 나타내어 각 구간의 부하 분포를 구한다. 따라서 각 구간의 실제 값(전류)은 배전용 변전소 직하에서 측정한 해당 배전선로의 전체 전류 측정치와 앞에서 구한 부하 분포의 추정치의 관계로부터 식 (1)과 같이 비례식에 의하여 구한다.

$$I_{(n)} = i_{(n)} \times \frac{i_{SS}}{i_{SUM}} \quad (1)$$

여기서 i_{SS} 는 각 구간의 전류 측정치, i_{sum} 은 전체 전류의 추정치, i_n 은 전체 전류 측정치 I_n 은 각 구간의 실제 전류 값

2.2 태양광전원을 고려한 전압강하 계산 알고리즘

종래의 배전시스템에 있어서 전압강하 계산은 변전소에서 선로 말단을 향한 단방향만 고려하였으나, 역조류를 발생시키는 태양광전원이 배전시스템에 연계되는 경우, 조류 방향(유효전력의 방향)과 무효전력을 적절하게 반영해서 전압강하뿐만 아니라 전압상승도 고려해야 한다. 따라서 본 논문에서는 부하전류(I)를 유효전류 분(I_p)과 무효전류 분(I_q)으로 분해하고, 조류의 방향과 역률을 고려하여 적정한 전압강하 계산을 수행하는 새로운 전압강하 계산 알고리

즘을 제안하였다. 그림 2에서 1상한은 종래의 전압 강하 영역으로 역조류나 진상역률이 존재하지 않으며, 순 조류와 지상역률만을 고려하여 계산한다. 그러나 제안한 계산식은 역조류와 진상역률까지 고려하여 1상한부터 4상한까지 전압 강하뿐만 아니라 전압상승도 고려할 수 있다.[4]-[8]

그림 2 4개의 상한을 이용한 전압강하 계산 알고리즘 개념도
Fig. 2 Concept for voltage drop calculation algorithm using 4 quadrants

따라서 $\Delta V = Z$ (impedance) $\times I$ (current)에 의해 표현되는 기존의 계산식을 기준으로 그림 3과 같이 각 구간의 유입분과 유출분에 대한 유효전류와 무효전류를 고려하고 평등부하분포와 말단집중 부하의 평균치를 고려한 새로운 전압계산식은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V_{(n)} = k \cdot \left\{ \frac{I_{Sp(n)} + I_{Rp(n)}}{2} \cdot r_{(n)} + \frac{I_{Sq(n)} + I_{Rq(n)}}{2} \cdot x_{(n)} \right\} \quad (2)$$

- 단, I_{Sp} : 구간유입 유효전류[A]
- I_{Sq} : 구간유입 무효전류[A]
- I_{Rp} : 구간유출 유효전류[A]
- I_{Rq} : 구간유출 무효전류[A]
- r : 배전선 구간 저항 값[Ω]
- x : 배전선 구간 리액턴스 값[Ω]
- ΔV_n : 구간전압 변동 값[V]

그림 3 n 구간의 유출·유입 전류
Fig. 3 Inflow and outflow current in n section

3. 태양광전원용 인버터의 제어 알고리즘

3.1 태양광전원용 인버터의 제어 개념도

그림 4는 태양광전원용 인버터의 전체적인 제어 블록도를 나타낸 것이다. 먼저 3상 교류를 d-q정좌표계를 통하여 2상 교류로 변환하고, dq동기좌표계를 통해 2상 교류를 직류로 변환시킨다. 그리고 원하는 전력을 제어하기 위해 PI제어기를 이용하여 전류 제어를 수행하는데, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다. 한편 PI 제어로 수행된 값은 검출된 위상을 기준으로 계통전압과 일치시킨 후, 직류에서 2상 교류로, 2상 교류에서 3상 교류로 역변환 된다.

역변환된 3상의 전압은 PWM에 의해 IGBT를 구동하기 위한 6개의 펄스로 변환되며, 최종적으로 태양광 전원에서 발생한 DC 출력은 IGBT에 의해 3상의 AC 출력으로 변환되어 계통에 송출된다.[9]-[10]

그림 4 태양광전원용 인버터 제어블록도
Fig. 4 Control block diagram of PV system

3.2 전류제어 알고리즘

평형 3상 시스템에서 순시 유효전력(P)과 무효전력(Q)은 d-q좌표변환 법에서 d-q축의 변수들을 이용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 동기속도로 회전하는 d-q 축에서의 V_q 는 출력단의 순시전압의 크기와 동일하고, V_d 는 0이기 때문에 순시 유효전력과 무효전력은 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q) \quad Q = \frac{3}{2}(V_d I_q - V_q I_d) \quad (3)$$

여기서, V_d, V_q : d축 및 q축에서의 출력전압
 I_d, I_q : d축 및 q축에서의 출력전류

$$P = \frac{3}{2}|V_0|I_q, \quad Q = -\frac{3}{2}|V_0|I_d \quad (4)$$

여기서, $|V_0|$: 인버터 출력전압의 크기

상기의 식으로부터 순시 유효전력(P)은 인버터 출력 전압 크기(V_0)와 동상인 선로전류 크기(I_q)에 비례하고, 순시 무효전력(Q)은 인버터 출력 전압 크기(V_0)와 90도 위상차를 이루는 선로전류의 크기(I_d)에 비례함을 알 수 있다. 또한 P와 Q는 개별적으로 I_{qref} 와 I_{dref} 에 의해 지정할 수 있으므로 각각 독립적으로 제어할 수 있다. 식 (5)와 식 (6)은 PI제어부에서 수행되는 세부적인 전류제어 알고리즘을 수식으로 나타낸 것이다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_q \cdot \omega L + V_{sq} \quad (5)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) + I_d \cdot \omega L \quad (6)$$

여기서, I_{ref-q} 는 인버터 출력의 기준전류 [A], I_q 는 계통전류값 [A]

3.3 제안한 전류제어 모델링

전류제어 알고리즘에 의해 산출된 V_q 와 V_d 는 d-q 좌표 변환을 통해 3상의 전압으로 역변환되며, IGBT를 구동시키기 위한 6개의 PWM 신호로 변환된다. 본 논문에서는, 수십kw 정도의 소규모 출력에 대해서만 모델링이 가능한 기존의 태양광전원 모델링의 단점을 보완하기 위하여, 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 구하기 위해서 반드시 고려되어야 할 태양광전원 연계지점의 위상과 전압의 관계적인 식 (7)과 식 (8)을 도입하였다.

$$\phi = (\tan^{-1} \frac{V_q}{V_d}) \times \frac{180}{\pi} \quad (7)$$

$$V_t = \sqrt{V_q^2 + V_d^2} \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

여기서 ϕ 는 연계계통의 위상각, V_t 는 연계계통의 전압

상기의 식들은 태양광 전원이 연계되는 지점의 전압과 위상을 동기화시키기 위하여 기준이 되는 값으로 IGBT를 구동시키기 위한 6개의 PWM 신호를 생성하기 위해서 필요한 관계식이다. 즉, 위상과 전압에 대한 관계식을 전류제어 알고리즘에 적용시켜 목표로 하는 대용량 출력에 대해서도 정확하게 모델링할 수 있도록 하였다.

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 모델링

4.1 실 배전계통 모델링

그림 5는 실 배전계통의 회선별 단선도를 나타낸 것으로 각 구간 부하는 배전용 변전소부터 말단지점까지 GA(개폐기)가 설치된 지점을 기준으로 6개 구간으로 나누어 모델링 하였다. 그리고 앞에서 제안한 부하 분포 모델링 수법에 의하여 고압 수용가는 계약 용량을 이용하여 수용가 별로 합산을 하고, 저압 수용가의 경우에는 주상변압기의 용량에 역률과 이용률을 곱하여 합산을 하는 방법으로 각 구간의 부하를 산정하였다.

그림 5 실계통의 회선별 단선도
Fig. 5 Single line diagram of real distribution system

각 구간의 부하를 산정하여 전체 구간의 총 부하 설비용량을 구하면 약 37[MW]이다. 그러나 지역별, 시간대 별, 계절별로 변화하는 수용가의 특성을 반영하기 위하여 구간별로 구한 부하설비용량의 합과 해당 배전선로 전체 구간의 총 부하설비용량의 합을 비례식으로 나타내어 각 구간의 부하 분포를 구하였다. 예를 들어 배전용 변전소의 송출단에서 측정된 부하 용량이 5[MW]라고 가정하면, 각 구간의

실제부하들은 식 (1)을 이용하여 그림 6과 같이 구할 수 있다. 따라서 태양광전원이 연계된 실 배전계통의 부하분포 특성을 분석하면, 선로 중간지점(4번 구간)에 부하가 50 % 이상 집중되어 있음을 알 수 있다.

모든 구간 부하의 합=37177.846kW

<5MW기준 으로 각 구간의 부하를 환산>

37177.846 : 5000 = 3079.45 : 1구간 부하(= 414.15kW)
 37177.846 : 5000 = 3093.27 : 2구간 부하(= 416.01kW)
 37177.846 : 5000 = 7902.54 : 3구간 부하(= 1062.8kW)
 37177.846 : 5000 = 20601.71 : 4구간 부하(= 2770.7kW)
 37177.846 : 5000 = 2444.21 : 5구간 부하(= 328.72kW)
 37177.846 : 5000 = 56.67 : 6구간 부하(= 7.62kW)

그림 6 부하설비용량 5[MW]의 각 구간의 부하산정

Fig. 6 Load calculation of 5[MW] load at each section

상기의 내용을 바탕으로 배전용 변전소, 부하, 배전선로, 태양광전원으로 구성된 실 배전계통을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 그림 7과 같이 모델링하였다. 배전용 변전소의 주 변압기는 45/60[MVA]의 용량을 가지며, 부하는 ZIP모델 중 현재 가장 높은 비중을 차지하는 정전력 부하로 모델링 하였다. 그리고 배전선로는 6개 구간으로 나누어지는데 1번 구간은 배전용 변전소로부터 3[KM]지점까지이고 2번구간은 4[Km] 지점, 3번 구간은 6[KM]지점, 4번 구간은 7[Km] 지점, 5번 구간은 6[Km]지점, 6번 구간은 5[Km] 지점으로 총 구간은 31[Km]이고 선종은 ACSR-160[mm]과 ACSR-95[mm]를 기본으로 모델링하였다.

그림 7 PSCAD/EMTDC를 이용한 실 배전계통 모델링

Fig. 7 Real distribution system modeling using PSCAD/EMTDC

4.2 태양광전원용 인버터의 모델링

(1) d-q 좌표변환부 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 3상의 교류 전압과 전류를 d-q좌표변환을 이용하여 DC 전압과 전류로 변환하기 위해 그림 8과 같이 모델링하였다. 또한 전류제어 알고리즘으로부터 나온 DC 전압을 3상 교류 전압으로 변환하기 위한 모델링은 그림 9와 같다.

그림 8 d-q 좌표변환 모델링

Fig. 8 Modeling of d-q transformation

그림 9 역 d-q좌표변환 모델링

Fig. 9 Modeling of inverse d-q transformation

(2) 전류제어부 모델링

그림 10은 목표로 하는 유효전력(P)과 무효전력(Q)의 출력 값을 설정하기 위하여 기준전류를 산출하는 P·Q 변환부를 모델링 한 것이다.

그림 10 P,Q 변환 모델링

Fig. 10 Modeling of P and Q transformation

목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위해 PI제어를 이용한 세부적인 전류제어 알고리즘에 대한 모델링은 그림 11과 같다. 여기서 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.

그림 11 전류 제어 모델링

Fig. 11 Modeling of current control

(3) 제안 방식의 모델링

그림 12는 태양광 전원이 연계되는 지점의 전압과 위상을 동기화시키기 위하여 기준이 되는 값으로, 목표로 하는 대용량 출력에 대해서도 정확하게 모델링할 수 있도록 본 논문에서 도입한 위상과 전압에 대한 관계식인 식 (7)과 식 (8)을 모델링 한 것이다.

그림 12 전압과 위상에 대한 관계식 모델링

Fig. 12 Modeling of voltage and phase equation

그림 13은 위상과 전압에 대한 관계식을 적용한 PWM 모델링으로 역변환된 3상의 전압은 IGBT를 구동하기 위한 6개의 PWM 스위칭 신호로 변환된다.

그림 13 IGBT 제어를 위한 PWM 모델링

Fig. 13 Modeling of PWM for IGBT Control

그림 14는 계통연계 인버터의 모델링으로 PWM 모델링으로부터 나온 6개의 스위칭 신호에 의해 구동되는 IGBT는 태양광전원에서 생성된 DC 출력을 120°의 위상차를 갖는 3상의 AC출력으로 변환시켜 계통에 송출한다.

그림 14 계통연계 인버터 모델링

Fig. 14 Modeling for grid-connected inverter

5. 시뮬레이션 및 분석

5.1 태양광전원 인버터의 출력 특성 분석

(1) 태양광전원 인버터의 대용량 출력특성

대용량의 출력을 내기 위해 1,000[kW], 0[kVAR]의 출력을 갖는 태양광전원 인버터에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 1,000[kW]에 대한 기준전류 값은 다음과 같이 계산되어진다.

$$-2.15 = -\frac{2}{3} \times \left[\frac{1}{0.310} \right]$$

그리고 무효전력에 대한 기준전류 값은 다음과 같다.

$$0 = \frac{2}{3} \times \left[\frac{0}{0.310} \right]$$

그림 15와 같이 기존의 모델링 수법에 의한 태양광전원 인버터의 출력은 60[kW]이하에서는 정확한 값을 가지나, 더 큰 출력에 대해서는 목표로 하는 값을 얻을 수 없었지만, 본 연구에서 제안한 모델링에 의한 태양광전원 인버터의 출력은 1,000[kW]에 대해서도 목표로 하는 출력을 얻을 수 있음을 확인하였고, 무효전력도 적절하게 제어가 됨을 확인 할 수 있었다.

(a) 기존의 태양광전원 모델링

(a) Conventional PV modeling

(b) 제안한 태양광전원 모델링

(b) Proposed PV modeling

그림 15 기존 수법과 제안한 수법의 태양광전원 모델링 비교

Fig. 15 Comparison of conventional and proposed PV modeling

(2) 태양광전원 인버터의 무효전력 출력특성

유효전력뿐만 아니라 무효전력에 대한 출력도 제어가 가능함을 보여주기 위해 200[kW], 50[kVAR] 태양광전원 인버터에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 200[kW]에 대한 기준전류 값은 다음과 같이 계산되어진다.

$$-0.43 = -\frac{2}{3} \times \left[\frac{0.2}{0.310} \right]$$

그리고 50[kVAR]에 대한 기준전류 값은 다음과 같이 계산되어진다.

$$-0.107 = -\frac{2}{3} \times \left[\frac{0.05}{0.310} \right]$$

그림 16과 같이 기존의 모델링 수법에 의한 태양광전원 인버터는 목표로 하는 값을 얻을 수 없었지만, 본 연구에서 제안한 모델링에 의한 태양광전원 인버터의 출력은 200 [kW]에 대해서 목표로 하는 출력을 얻을 수 있음을 확인하였고, 무효전력도 적절하게 제어가 됨을 확인할 수 있었다.

(a) 기존의 태양광전원 모델링

(a) Conventional PV modeling

(b) 제안한 태양광전원 modeling

(b) Proposed PV modeling

그림 16 기존 태양광전원 인버터와 제안한 태양광전원 인버터의 비교

Fig. 16 Comparison of conventional and proposed PV system

5.2 태양광전원 연계에 따른 수용가의 전압특성 분석

(1) 태양광전원 연계 전 수용가 전압 특성

표 1은 태양광전원 연계 전 시간대별 부하용량에 따라 선로말단 구간(그림 5의 5, 6구간)의 주상변압기 직하와 말단의 수용가 전압을 나타낸 것이다. 1~4번 구간의 선종은 ACSR-160[mm²]이고, 5, 6번 구간은 ACSR-95[mm²]이다. 또한 1~4번 구간내에 있는 주상변압기 탭은 13,200/230이고, 5,6번 구간의 주상변압기 탭은 12600/230이다. 주상변압기 직하의 수용가 전압은 2%의 주상변압기 내부전압강하 분만을 고려하여 계산하였고, 말단 수용가 전압은 주상 변압기의 내부전압강하뿐만 아니라 저압 배전선로 전압 강하분(4%)과 인입선로 전압강하분(2%)을 고려하여 총 8%의 전압강하분담을 고려하였다. 상기의 조건에 따라 저압측의 직하 수용가와 말단 수용가의 전압은 모두 허용치(220±13V) 이내를 유지하여 문제가 없음을 확인하였다.

표 1 태양광전원이 연계전의 수용가전압 특성

Table 1 Customer voltage without PV system

전체 부하용량	구간	P.tr 직하[V]	P.tr 말단[V]
3MW	5구간	232.13	226.85
	6구간	231.96	226.68
5MW	5구간	228.84	221.25
	6구간	228.32	220.74
7MW	5구간	226.58	217.78
	6구간	226.23	217.43

(2) 3[MW] 태양광전원 연계 시의 수용가전압 특성

표 2는 3[MW] 태양광전원 연계 후 부하용량에 따라 5, 6구간의 주상변압기 직하와 말단의 수용가전압을 비교한 것이다. 배전선로의 전체 부하용량이 3[MW]시에 주상 변압기 직하 수용가의 전압이 허용치를 초과하는 과전압현상이 발생함을 확인하였다. 이와 같은 현상은 선로 말단(6번 구간)에 연계된 태양광전원에서 공급하는 역조류의 양과 역률변화분에 의하여 5번, 6번 구간에서 전압상승을 초래하여 수용가의 전압이 허용치를 벗어나게 된다. 따라서 태양광전원의 연계용량이 지속적으로 증가하거나 선로 전체의 부하량이 감소하는 경우, 이러한 수용가 과전압 현상은 더욱 악화될 수 있음을 확인하였다.

표 2 태양광전원(3[MW]) 연계 후의 수용가전압 특성

Table 2 Customer voltage with PV system

전체 부하용량	구간	P.tr 직하[V]	P.tr 말단[V]
3MW	5구간	234.08	225.28
	6구간	234.94	226.94
5MW	5구간	231.15	225.67
	6구간	232.84	226.26
7MW	5구간	228.72	219.92
	6구간	229.78	221.80

5.3 태양광전원 연계에 의한 과전압현상 해결 방안

(1) 선로증강 방안

태양광전원 연계에 의한 수용가 전압의 과전압 방지 대책으로 전압강하분을 감소시키기 위하여 5번, 6번 구간의 선종을 ACSR-160mm²로 교체하여 선로용량을 증강 시키는 방법을 고려하였다. 표 3은 3[MW]의 태양광전원이 연계되어 운전되는 경우, 시간대별 부하용량에 따른 수용가의 전압 분포 특성으로, 선로를 증강하면 저압측 수용가의 전압이 허용치 이내에 유지함을 확인하였다.

표 3 선로 증강 후의 수용가전압 특성

Table 3 Customer voltage after changing the primary feeder capacity

전체 부하용량	구간	P.tr 직하[V]	P.tr 말단[V]
3MW	5구간	232.03	224.48
	6구간	232.87	225.19
5MW	5구간	230.26	221.75
	6구간	231.17	222.68
7MW	5구간	228.72	219.92
	6구간	229.98	221.18

(2) 선로전압조정장치(SVR)의 도입 방안

표 3은 5번 구간에 SVR을 설치하여 운용한 결과로서, 5번, 6번 구간의 주상변압기 직하/말단의 수용가 전압을 나타낸 것이다. SVR 도입 후에는 태양광전원 연계에 의하여 발생된 수용가의 과전압이 모두 해소되어, 적정 범위를 유지 할 수 있음을 확인하였다.

표 4 SVR 설치 후의 수용가전압 특성

Table 4 Customer voltage with SVR

전체 부하용량	구간	P.tr 직하[V]	P.tr 말단[V]
3MW	5구간	229.25	224.85
	6구간	231.42	226.68
5MW	5구간	224.84	216.58
	6구간	225.97	218.31
7MW	5구간	218.58	209.45
	6구간	220.23	211.16

6. 결 론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 대용량 태양광발전이 연계된 배전계통의 수용가 전압특성을 분석하였다. 이를 위해 배전계통의 상세 모델링 수법과 태양광전원의 개선된 모델링 수법을 제안하였으며, 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 각 구간의 실제 부하를 구하기 위해 고압 수용가는 계약 용량(kW)을 이용하여 합산을 하고, 저압 수용가의 경우에는 주상변압기의 용량에 역률과 이용률을 곱한 다음 합산을 하여 구간별로 구한 부하설비용량의 합과 해당 배전선로 전체 구간의 총 부하설비용량의 합을 비례식으로 나타내어, 각 구간의 부하 분포를 구하는 배전계통의 상세 모델링 수법을 제안하였다.

(2) 전압강하분만을 고려하는 기존의 전압강하 계산식을 개선하기 위하여 태양광전원의 역조류와 역률을 고려하고, 평등부하분포와 말단집중 부하의 평균치를 고려한 새로운 전압강하 계산식을 제안하였다.

(3) 수십kw 정도의 소용량 출력에 대해서만 모델링이 가능한 기존의 태양광전원의 EMTDC/PSCAD 모델링의 단점을 보완하기 위하여, 태양광전원 연계지점의 위상과 전압의 관계식을 도입하여, 목표로 하는 대용량 유·무효 전력을 구하는 모델링을 제시하였다. 이 모델링 수법에 의하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 수 MW급의 대용량 유효전력과 무효전력 출력에 대하여 정확한 모델링이 가능함을 확인하였다.

(4) 태양광전원이 선로 말단에 연계되면, 태양광전원에서 공급하는 역조류의 양과 역률변화분에 의하여 말단 구간에서 전압상승을 초래 하여 수용가의 전압이 허용치를 벗어나게 된다. 또한 태양광전원의 연계용량이 지속적으로 증가하거나 선로 전체의 부하량이 감소하는 경우, 이러한 수용가 과전압 현상은 더욱 악화될 수 있음을 확인하였다.

(5) 태양광전원 연계로 인한 수용가의 과전압 현상을 해결하는 방안으로서, 선로를 증강하는 경우와 선로전압조정장치를 도입하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과 수용가 과전압현상이 해소됨을 확인하였다.

References

- [1] IEEE 1547.6 "IEEE Standard conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System", June, 2009
- [2] IEEE 1547.1 "IEEE Standard conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System", June, 2005
- [3] "Interconnected the technique basis in distribution system of distribution generations", Korea Electric Power Corporation (KEPCO), Apr, 2004
- [4] Dae-seok Rho, et al., "Optimal Algorithms for Voltage Management in Distribution Systems Interconnected with New Dispersed Sources", Korea Institute of Electrical Engineers, pp. 192~201, June, 2011
- [5] Hyeon-seok Park, et al., "A Study on the Customer Voltage Characteristic Based on the Test Devices for PV Systems", KAIS, pp. 4529-4536, November. 2010
- [6] Dae-Seok Rho. et al, "optimal Operation System of Step Voltage Regulator in Primary Feeders with Distributed Generations", KAIS, pp.2698-2706, June. 2011
- [7] Kyung-sang Ryu, et al., "Development of Evaluation Simulator of New Power Sources Using the LabVIEW Software", GDC 2011, CCIS 261, pp. 87-94, 2011
- [8] Byung-Ki Kim. et al., "Optimal Operation Methods of Protection Devices in Distribution Systems with PV Systems", Trans. KIEE. Vol. 60A. No. 8, August. 2011

- [9] Dae-seok Rho, et al., "A Study on the PV System Modeling Based on the PSCAD/EMTDC", Korea Academia -industrial cooperation societytions, pp. 69-72, May, 2010
- [10] Kyung-sang Ryu, et al., "The Detailed Modeling for PV System Based on the PSCAD/EMTDC" KAIS, pp. 461-465, June, 2012

저 자 소 개

김 병 기 (Byung-Ki Kim)

2008년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사), 2012.2월 : 동대학원 전기공학과(공학석사), 2012년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 전기공학전공 박사과정 재학중
 <관심분야> 배전계통 운용, 전력품질, 신재생에너지, 스마트그리드

유 경 상 (Kyung-Sang Ryu)

2008년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사), 2011년 3월 ~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 전기공학전공 석사과정 재학 중
 <관심분야> 배전계통 운용, 신재생에너지, 전력품질

김 찬 혁 (Kyung-Hyeok Kim)

2008년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사), 2010.2월 : 동대학원 전기공학과(공학석사), 2011년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 전기공학전공 박사과정 재학중
 <관심분야> 배전계통 운용, 전력품질, 신재생에너지, 스마트그리드

노 대 석 (Dae-Seok Rho)

1985.2 : 고려대학교 전기공학과 (공학사), 1987.2 : 동대학원 전기공학과 (공학석사), 1997.3 : 일본 북해도대학교대학원 전기공학과(공학박사), 1987.3 ~ 1998.8 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원, 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수
 <관심분야> 전력/배전 계통, 분산전원, 전력품질해석