

배전선로 절체에 의한 태양광전원의 수용성 향상방안에 관한 연구

이명근, 이후동, 페레이라 마리토, 박지현, 태동현, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

A Study on Enhancement Method of Hosting Capacity for PV System Based on Primary Feeder Reconfiguration

Myung-Geun Lee, Hu-Dong Lee, Marito Ferreira, Ji-Hyun Park,
Dong-Hyun Tae and Dae-Seok Rho*

Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 최근, 정부는 신재생에너지전원을 확대하는 정책을 시행하고 있으며, 이에 따라 다수의 대용량 태양광전원이 배전계통에 활발하게 연계되고 있는 실정이다. 하지만, 이러한 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, 역조류 현상에 의하여 수용가 전압이 규정전압범위를 벗어날 가능성이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 배전계통에서 태양광전원의 수용성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 선로절체에 의한 태양광전원의 수용성 향상을 위하여, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 3분할 3연계로 구성된 배전계통의 모델링을 제시하고, 태양광전원을 최대한 수용할 수 있는 선로절체 평가알고리즘을 제시한다. 또한, 배전선로 절체 구간 및 태양광전원 연계 용량 등의 다양한 운용 시나리오에 기반하여, 변압기 2차측 직하 수용가전압을 규정전압범위 이내로 유지하는 최대 태양광전원 용량을 산정하기 위하여 최적의 선로절체 구간을 산정한다. 제한한 배전계통의 수용성 평가알고리즘과 모델링을 바탕으로 수용가전압 특성을 분석한 결과, 대용량 태양광전원이 연계된 배전선로를 용량의 여유가 남아있는 선로와 절체하여 재구성하게 되면, 더 많은 용량의 태양광전원의 연계가 가능하여, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

Abstract Recently, the Korean government has implemented a policy to expand renewable energy sources. Large-scale PV systems are being actively interconnected with the distribution system. On the other hand, when a large-scale PV system is installed and operated, the customer voltages could violate the allowable voltage limit due to reverse power flow of the PV system. To overcome these problems, an enhancement method for hosting the capacity of the PV system in a distribution system is being actively conducted. Therefore, to improve the hosting capacity of the PV system, this paper proposes a model of a reconfiguration of the distribution system, which is composed of three sections and three connections based on PSCAD/EMTDC S/W, and proposes an evaluation algorithm for the feeder reconfiguration to maximize an adaption of the PV system. In addition, this paper presents the optimal method of the feeder reconfiguration section to evaluate the maximum capacity of the PV system to keep customer voltages within the allowable voltage limits based on various operation scenarios, such as the capacity of a PV system and section of feeder reconfiguration. From the simulation results based on the PSCAD/EMTDC modeling and evaluation algorithm, it was confirmed that they are a useful and practical tool to enhance hosting the capacity of a PV system in a distribution system.

Keywords : Enhancement for Hosting Capacity of PV System, Feeder Reconfiguration, Evaluation Algorithm, PSCAD/EMTDC S/W

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20172410100030)와 한국에너지기술평가원의 연구(No.20182410105070)에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)

email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received September 9, 2019

Revised September 30, 2019

Accepted November 1, 2019

Published November 30, 2019

1. 서론

최근, 정부는 환경문제로 인하여 석탄 발전원의 비중을 줄이고 태양광전원 및 풍력발전 중심의 신재생에너지 전원을 확대하는 '재생에너지 3020'정책을 시행하고 있다. 또한, 기존의 태양광전원의 수용한계가 없어지고, 1MW 이하의 태양광전원은 무제한으로 접속할 수 있게 되어, 대용량 태양광전원이 배전계통에 연계되고 있는 실정이다. 따라서, 태양광전원의 출력이 부하소비량보다 많을 경우, 수용가 전압이 규정전압범위($220 \pm 13V$)를 벗어나게 되는 문제점이 발생할 수 있다. 또한, 피크부하를 기준으로 주상변압기 탭을 결정하여 태양광전원이 연계되는 경우, 경부하 시 과전압 현상이 발생하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 신재생에너지전원의 급격한 도입에 대한 전압안정화 방안으로 선로절체를 활용하여, 배전계통에서 태양광전원의 수용성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-5].

따라서, 본 논문에서는 선로절체에 의한 태양광전원의 수용성 향상을 위한 평가알고리즘을 제시한다. 구체적으로, 배전선로 절체 구간 및 태양광전원 연계 용량 등의 다양한 운용 시나리오에 기반하여, 변압기 2차측 직하 수용가전압을 규정전압범위 이내로 유지하는 최대 태양광전원 용량을 산정하기 위하여 최적의 선로절체 구간을 결정한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용 변전소, 태양광전원, 수용가부하, 3분할된 자기선로와 타선로로 구성된 배전계통의 모델링을 제시한다. 또한, 상기의 모델링을 바탕으로 태양광전원을 최대한 수용할 수 있는 선로절체 평가알고리즘을 제시한다. 제한한 배전계통의 수용성 평가알고리즘과 모델링을 바탕으로 수용가전압 특성을 분석한 결과, 대용량 태양광전원이 연계된 배전선로를 용량의 여유가 남아있는 선로와 절체하여 재구성하게 되면, 더 많은 용량의 태양광전원의 연계가 가능하여, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

2. 태양광전원 연계 시 배전계통의 문제점 분석

일반적으로 배전계통에서는 주상변압기 2차측의 수용가전압을 규정전압범위($220 \pm 13V$)로 유지시키기 위해, 피크부하 시를 기준으로 배전선로의 주상변압기 탭을 결

정한다. 그러나, 태양광전원이 연계되는 경우, 경부하 시에 규정전압범위를 벗어날 가능성이 있어, 배전계통의 전압 안정도가 저하될 수 있다. Fig. 1은 피크부하를 기준으로 임의의 태양광전원이 연계된 배전선로에서 부하용량에 따른 수용가 전압특성을 나타낸 것이다. Fig. 1의 a 그래프는 피크부하(7MVA)일 때의 전압특성이며, Fig. 1의 b 그래프는 경부하(4MVA)일 때의 전압특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 태양광전원이 연계되었을 경우, 피크부하 시에는 규정전압을 유지하지만, 경부하 시에는 과전압 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 태양광전원의 배전계통 수용성 향상을 위한 다양한 연구가 필요함을 알 수 있다.

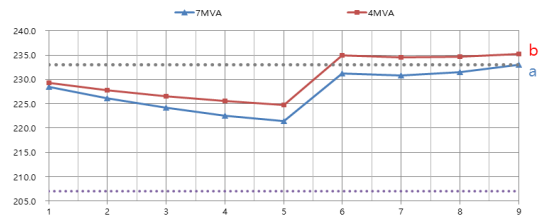


Fig. 1. Characteristics of customer voltage at peak and off-peak load

3. 선로절체에 의한 태양광전원이 연계된 배전계통의 수용성 평가알고리즘

배전계통에서 태양광전원의 연계위치나 연계 용량에 따라 수용가전압이 규정전압범위를 벗어나게 되어, 배전계통의 태양광전원 수용성이 저하될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 태양광전원의 용량과 다양한 선로절체 시나리오에 기반하여, 태양광전원 수용성을 향상시키기 위한 최적의 선로절체구간을 산정하는 배전계통의 수용성 평가알고리즘을 제시한다. 이에 대한 자세한 평가절차는 다음과 같다.

[Step 1] 절체 가능한 두 개의 대상 배전선로의 선종, 선로 공장, 부하량, 주상변압기 탭 등의 배전계통 데이터와 태양광전원의 도입구간을 상정한다.

[Step 2] 절체 구간 별 Case(i)를 상정하고, 해당 Case(i)를 초기값으로 설정한다.

[Step 3] 해당 Case(i)에 대하여, 배전선로 절체구간 전체의 부하용량의 합이 10MVA 이상인 경우에는 선로절체가 불가능한 것으로 판단한다.

[Step 4] 배전선로 절체구간 전체의 부하용량의 합이 10MVA 미만인 Case(i)에 대하여, 태양광전원의 연계용량($C_{pv}(i)$)을 초기값으로 지정한다. 또한, 선로번호와 선로구간을 각각 n, m 으로 상정한다.

[Step 5] 모든 수용가 구간에 대하여, 직하 수용가전압($V_{fc}(n, m)$)을 Eq. (1)을 이용하여 산정하고, 주상변압기의 탭은 Eq. (2)에서 산정한 값이 0~5%이면 13,200, 5%~10%이면 12,600, 10%를 초과하면 12,000탭으로 결정한다.

$$V_{fc}(n, m) = \left(V_{pri}(n, m) \times \frac{230}{V_{tap}} \right) - V_d \times f_h \quad (1)$$

$$\Delta V_{pri}(n, m) = \frac{V_s - \sum_{m=1}^{m-1} V_{pri}(n, m)}{V_s} \times 100\% \quad (2)$$

여기서, n : 선로번호, m : 선로구간, $V_{fc}(n, m)$: n 번 선로의 m 번째 구간의 직하 수용가전압, $V_{pri}(n, m)$: n 번 선로의 m 번째 구간에서의 1차측 전압, V_{tap} : 주상변압기의 1차측 탭 전압, V_d : 주상변압기부터 직하수용가까지의 저압선로 전압강하, f_h : 부하율, ΔV_{pri} : 고압측 전압강하, V_s : 배전용 변전소 송출전압

[Step 6] [Step 5]에서 산정한 직하 수용가전압($V_{fc}(n, m)$)이 규정전압범위의 상한치(V_{limit}^{upper})를 벗어나지 않으면, 태양광전원의 용량을 증가시켜 [Step 4]로 돌아간다.

[Step 7] [Step 5]에서 산정한 직하 수용가전압($V_{fc}(n, m)$)이 규정전압범위의 상한치($V_{upperlimit}$)를 벗어나면, 이때의 태양광전원 연계용량($C_{pv}(i)$)을 해당 Case(i)의 최대 수용량으로 산정하고, 다른 절체구간 Case(i)인 [Step 3]으로 돌아간다.

[Step 8] 모든 Case(i)에 대하여 태양광전원 연계용량을 산정한 후, 이 중에서 최대의 연계용량

($C_{pv}(i)$)을 가지는 Case(i)를 절체 대상으로 결정한다.

따라서, 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 Fig. 2와 같다.

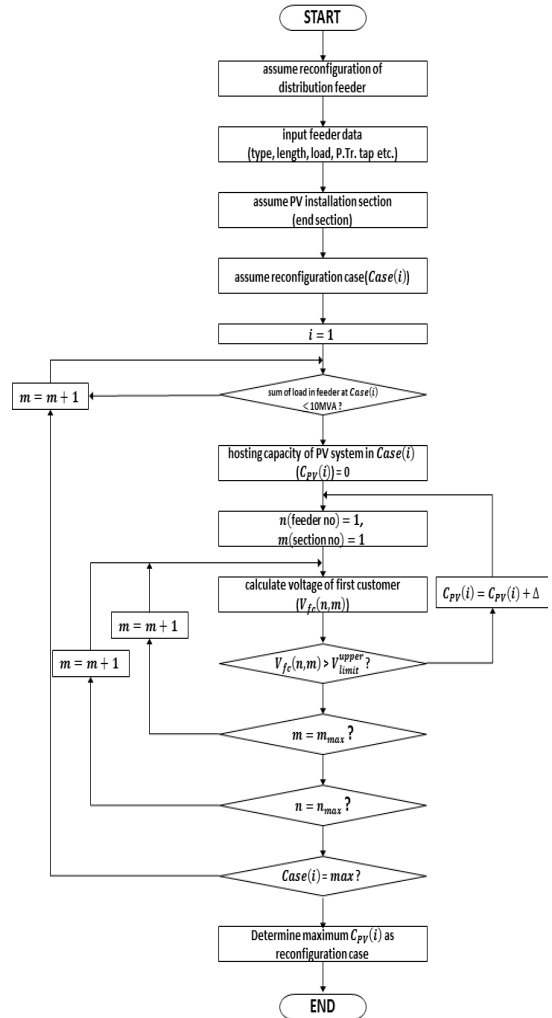


Fig. 2. Evaluation algorithm for hosting capacity of PV based on primary feeder reconfiguration

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 선로절체 및 배전계통의 모델링

4.1 배전용변전소 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소의 모델링을 수행하면, Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용변전소의 주변압기는 3권선 $Y_g - Y_g - \Delta$ 결선방식이며, 3차 권선은 제 3고조파를 제거하기 위하여 델타 결선방식을 채용하고 있다. 또한, 주변압기 2차측은 배전계통의 지락전류를 제한하기 위하여 0.6[Ω]의 NGR(neutral ground resistor)을 설치하는 것으로 가정한다.

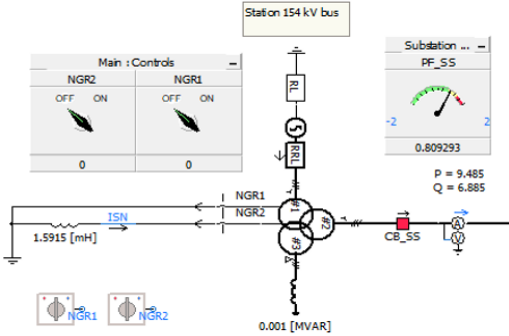


Fig. 3. Modeling of main distribution transformer

4.2 태양광전원 모델링

태양광전원의 계통연계용 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위해, PI제어기를 이용한 세부적인 전류제어 알고리즘은 Eq. (3)과 Eq. (4)와 같고, 이 제어기를 모델링하면 Fig. 4과 같다. 여기서, 인버터의 전류 제어부는 유효전력과 디커플링 회로이기 때문에 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다[6, 10].

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_q \cdot \omega L + V_{sq} \quad (3)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_d \cdot \omega L \quad (4)$$

여기서, V_d, V_q : 인버터 출력을 위한 d-q축 전압, I_{ref-dq} : 인버터 출력의 기준전류, I_d, I_q : d-q동기좌표계에 의한 계통 전류(직류), V_{sq} : 계통의 순시전압

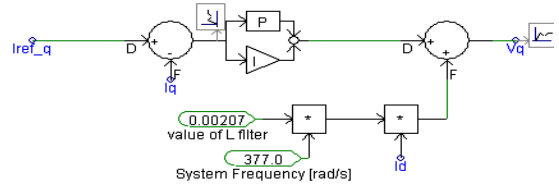
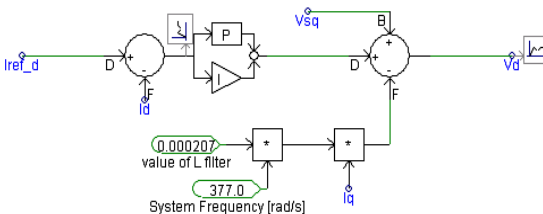


Fig. 4. Modeling of current control in PV system

상기의 Eq. (3), (4)에서 구한 V_d 와 V_q 는 d-q 좌표변환을 통해 3상의 전압으로 변환되며, IGBT를 구동시키기 위한 6개의 신호로 사용되는 PWM을 모델링하면, Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다[7].

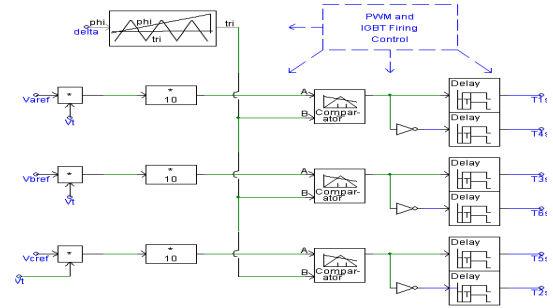


Fig. 5. Modeling of PWM in PV system

한편, 계통연계용 인버터를 모델링하면 Fig. 6과 같고, PWM 으로부터 나온 6개의 스위칭 신호에 의하여 태양광전원에서 생성된 DC 출력을 120°의 위상차를 갖는 3상의 AC출력으로 변환시킨다.

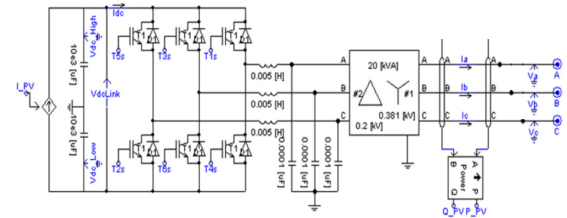


Fig. 6. Modeling of grid-connected inverter

4.3 수용가부하 모델링

수용가부하는 R부하와 L부하, C부하를 MC로 조합하여 다양한 역률(지상과 진상) 및 계통 조건을 모의할 수 있도록 Fig. 7과 같이 모델링하였다[8, 9, 11]. 즉, R(저항)부하는 10[kW]~1[MW] 범위로 조절이 가능하고, L(리액터)과 C(콘덴서)부하는 10[kVar]~1[MVar] 범위로 조절이 가능하도록 구성한다.

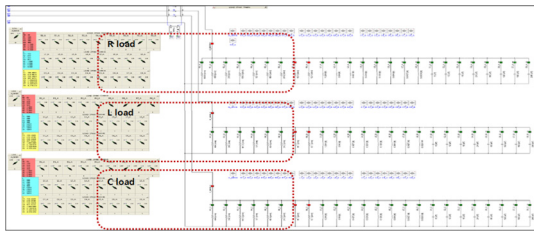


Fig. 7. Modeling of customer load

4.4 배전선로 절체 모델링

실 계통의 3분할 된 선로구성을 이용하여, 배전선로의 절체를 모델링하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 자기 배전선로에서는 분리할 구간의 개폐기를 a와 같이 개방하고, 타 배전선로에서는 절체용 개폐기를 b와 같이 투입하여 두 선로를 절체한다.

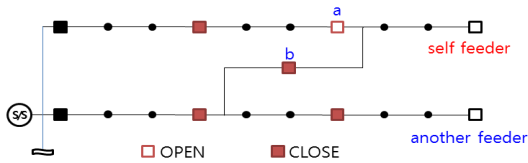


Fig. 8. Modeling of feeder reconfiguration

4.5 전체 배전계통 모델링

상기의 내용을 바탕으로 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용 변전소, 태양광전원, 수용가, 절체선로 등으로 구성된 전체 배전계통을 나타내면 Fig. 9와 같다. 여기서, A 부분은 배전용 변전소, B는 태양광전원, C는 수용가 부하, D는 절체 시 연계선로를 나타낸 것이다.

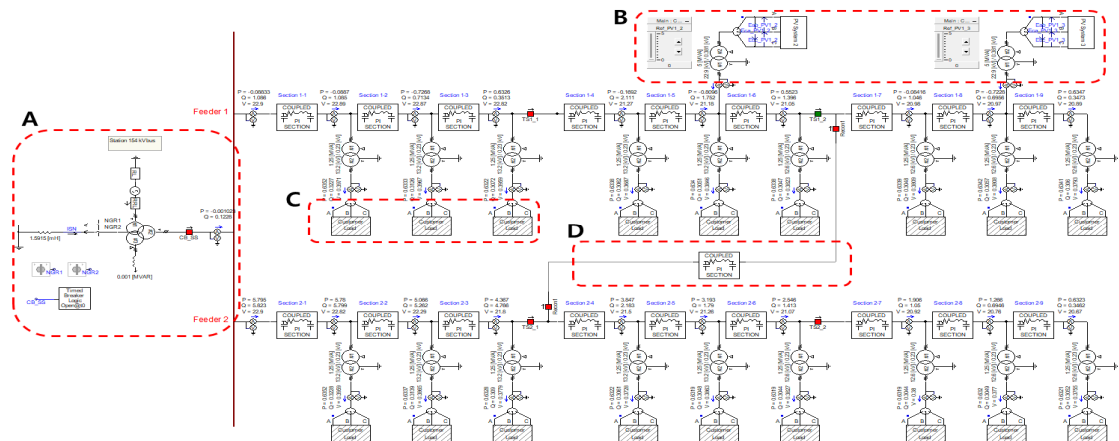


Fig. 9. Modeling of entire distribution system

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서는 배전선로 절체 구간 및 태양광전원 연계 용량 등의 다양한 운용 시나리오에 기반하여, 수용가 전압의 규정전압범위를 초과하지 않는 태양광전원의 최대 용량을 산정하기 위하여, Table 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다[12]. 여기서, 배전선로는 9개의 구간으로 나누고, 1번 구간은 CNCV-325mm², 공장은 1.2km, 2~7번 구간은 ACSR-160mm², 공장은 3.6km 8~9번 구간은 ACSR-95mm², 공장은 3.6km로 상정한다. 또한, 저압측의 전압강하 분담율은 주상변압기의 전압강하분(0.5%)과 인입선 전압강하분(0.5%), 저압 배전선로 전압강하분(3%)으로 상정한다. 한편, 배전용변전소의 송출전압은 13,200[V]의 일정값으로 상정하며, 미절체 시 주상변압기의 1차측 탭은 1~5번 구간은 13,200탭, 6~9번 구간은 12,600탭을 적용한다. 또한, 태양광전원은 각 절체 구간의 말단인 6번, 9번 구간에 각각 연계한다. 또한, 배전선로 절체 시 태양광전원의 수용성을 분석하기 위하여 Table 2와 같이 절체 구간을 상정한다. 여기서, 선로 절체 시의 각 선로의 부하용량이 10MVA가 초과하는 경우는 상정하지 않고, 선로 재구성은 영구적으로 유지되는 것으로 상정하여 고압 배전선로 전압강하율에 따라 주상변압기 탭을 재선정한다. 또한, 선로절체 이전의 부하용량은 피크부하 시(7MVA)와 경부하 시(4MVA)를 고려하여 각 구간에 균등하게 분배되는 것으로 상정하여, 각 Case 별 태양광전원이 연계되지 않았을 시 수용가 전압 특성을 분석하여 절체가 적절하지 판단하고, 절체가 가능한 Case에서의 태양광전원의 연계 용량을 산정한다.

Table 1. Distribution feeder conditions

contents	type of feeder (mm ²)	feeder impedance (Ω/km)	length (km)
section 1	CNCV-325	0.075 +j0.124	1.2
section 2	ACSR-160	0.182 +j0.391	3.6
section 3	ACSR-160	0.182 +j0.391	3.6
section 4	ACSR-160	0.182 +j0.391	3.6
section 5	ACSR-160	0.182 +j0.391	3.6
section 6	ACSR-160	0.182 +j0.391	3.6
section 7	ACSR-160	0.182 +j0.391	3.6
section 8	ACSR-95	0.404 +j0.484	3.6
section 9	ACSR-95	0.404 +j0.484	3.6
reconfiguration line	ACSR-160	0.182 +j0.391	10

Table 2. Reconfiguration cases

contents	reconfiguration section	
	feeder 1 - section	feeder 2 - section
Case(I)	non reconfiguration	
Case(II)	3	3
Case(III)	3	6
Case(IV)	3	9
Case(V)	6	3
Case(VI)	6	6
Case(VII)	6	9
Case(VIII)	9	3
Case(IX)	9	6

5.2 절체하지 않는 경우의 수용가전압 특성분석

여기서는 배전선로 절체를 하지 않은 경우에 대하여, 태양광전원 연계용량에 따른 수용가전압 특성을 제시한다. 가장 가혹한 조건인 선로 말단인 9번 구간에 태양광전원이 설치되는 경우, 수용가전압이 규정전압범위 이내로 유지되는 최대 태양광전원의 도입용량을 산정하면, Table 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 피크부하 시의 연계 가능한 태양광전원 용량은 6구간에서 0.35MW, 9구간에서 3.83MW이며, 경부하 시의 연계 가능한 태양광전원 용량은 6구간에서 0MW, 9구간에서 1.36MW이다. 한편, 상기와 같이 최대 도입용량의 태양광전원이 연계된 경우의 구간별 수용가전압의 특성을 나타내면 Fig. 10과 같다. 여기서, 실선은 피크부하 시를 나타내며, 점

선은 경부하 시를 나타낸다. 이 그림에서와 같이 6번 구간에서 가장 먼저 수용가의 과전압 현상이 나타남을 확인할 수 있다.

Table 3. Available capacity of PV system in Case(I)

load	hosting capacity(MW)		total
	Section 6	Section 9	
peak load (7MVA)	0.35	3.83	4.18
off-peak load (4MVA)	-	1.36	1.36

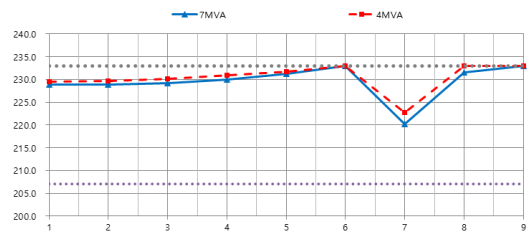


Fig. 10. Characteristics of customer voltage in Case(I) with PV system

5.3 선로절체 시 수용가전압 특성분석

5.3.1 가능 Case(i) 산정

Table 4와 같이, 대상 Case(i)에서 피크부하를 기준으로 배전선로의 총 부하용량을 평가하면, Case(II), (III), (IV), (VIII), (IX)는 선로의 부하용량이 10MVA를 초과하여 선로절체가 불가능하고, Case(V), (VI), (VII)에서는 가능함을 알 수 있다.

Table 4. Available cases for reconfiguration based on load capacity

contents	customer load[MVA]		available cases
	feeder 1	feeder 2	
Case(II)	2.333	11.667	unable
Case(III)	2.333	11.667	unable
Case(IV)	2.333	11.667	unable
Case(V)	4.667	9.333	able
Case(VI)	4.667	9.333	able
Case(VII)	4.667	9.333	able
Case(VIII)	11.667	2.333	unable
Case(IX)	11.667	2.333	unable

5.3.2 Case(V)의 수용가전압 특성분석

자기 선로의 6번 구간과 타 선로의 3번 구간이 연계된 Case(V)에 대하여, 절체 시 태양광전원을 연계하지 않았

을 때, 수용가 전압특성은 Fig. 11과 같이 피크부하(7MVA)와 경부하(4MVA) 모두 1~9구간에서 규정전압 범위를 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한, Table 5와 같이 피크부하 시 도입 가능한 태양광전원 용량은 자기선로의 6구간에서 8.14MW, 타선로의 9구간에서 4.12MW이며, 두 개의 선로의 총 합은 12.26MW로 산정되며, 경부하 시에는 자기선로 6구간에서 5.50MW, 타선로 9구간에서 1.07MW로 두 개의 선로의 총 합은 6.57MW로 산정된다. 따라서 Case(V)의 경우는 절체를 하지 않은 경우에 비하여 경부하 시를 기준으로 5.21MW를 추가로 연계할 수 있음을 알 수 있다. 한편, 피크부하 시에 태양광전원이 12.26MW가 연계된 경우, 각 구간의 수용가 전압을 나타내면 Fig. 12과 같고, 경부하 시에 태양광전원이 6.57MW가 연계된 경우, 타선로 9구간의 수용가 전압을 나타내면 Fig. 13와 같다. 여기서, A 부분은 절체 이전의 수용가전압 특성이고, B 부분은 절체 이후의 특성으로 절체에 의하여 수용가 전압이 개선됨을 알 수 있다.

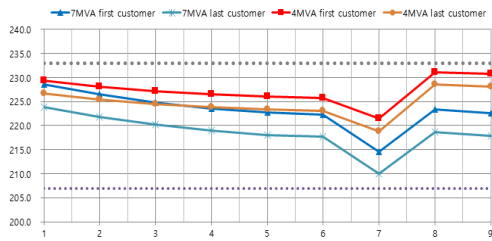


Fig. 11. Characteristics of customer voltage in Case(V) without PV system

Table 5. Hosting capacity of PV system in Case(V)

load	hosting capacity(MW)		total
	section 6	section 9	
peak load (7MVA)	8.14	4.12	12.26
off-peak load (4MVA)	5.50	1.07	6.57

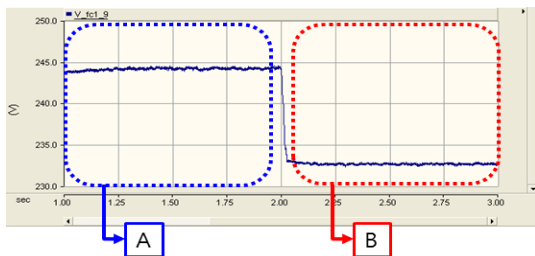


Fig. 12. Characteristics of customer voltage in Case(V) with PV system at peak load

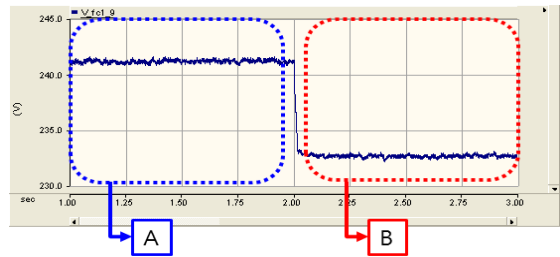


Fig. 13. Characteristics of customer voltage in Case(V) with PV system at off-peak load

5.3.3 Case(VI) 수용가전압 특성분석

자기 선로의 6번 구간과 타 선로의 6번 구간이 연계된 Case(VI)에 대하여, 절체 시 태양광전원을 연계하지 않았을 때, 수용가 전압특성은 Fig. 14와 같이 피크부하(7MVA)와 경부하(4MVA) 모두 1~9구간에서 규정전압 범위를 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한, Table 6과 같이 피크부하에서 도입 가능한 태양광전원 용량은 자기선로 6구간에서 8.14MW, 타선로 9구간에서 6.52MW이며, 두 개의 선로의 총 합은 14.66MW가 산정된다. 경부하에서는 자기선로 6구간에서 5.50MW, 타선로 9구간에서 2.88MW이며, 두 개의 선로의 총 합은 8.38MW로 산정된다. 따라서 Case(VI)의 경우는 절체를 하지 않은 경우에 비하여 경부하 시를 기준으로 7.02MW를 추가로 연계할 수 있음을 알 수 있다. 한편, 피크부하 시에 태양광전원이 14.66MW가 연계된 경우, 타선로 9구간의 수용가 전압을 나타내면 Fig. 15와 같고, 경부하 시에 태양광전원이 8.38MW가 연계된 경우, 각 구간의 수용가 전압을 나타내면 Fig. 16과 같다. 여기서, A 부분은 절체 이전의 수용가전압 특성이고, B 부분은 절체 이후의 특성으로 절체에 의하여 수용가 전압이 개선됨을 알 수 있다.

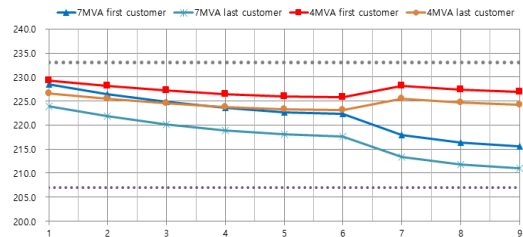


Fig. 14. Characteristics of customer voltage in Case(VI) without PV system

Table 6. Hosting capacity of PV system in Case(VI)

load	hosting capacity(MW)		total
	section 6	section 9	
peak load (7MVA)	8.14	6.52	14.66
off-peak load (4MVA)	5.50	2.88	8.38

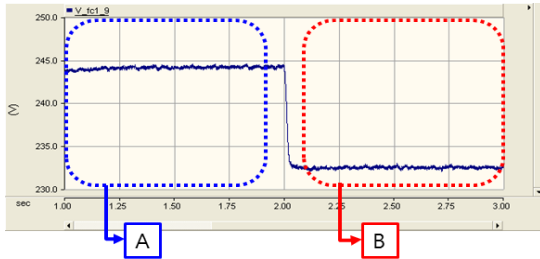


Fig. 15. Characteristics of customer voltage in Case(VI) with PV system at peak load

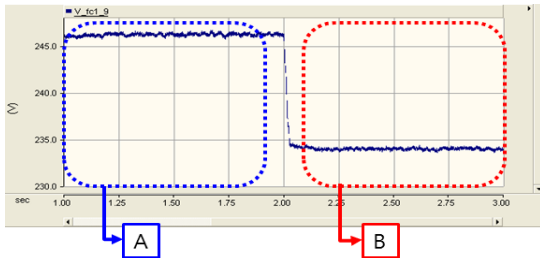


Fig. 16. Characteristics of customer voltage in case(VI) with PV system at off-peak load

5.3.4 Case(VII) 수용가전압 특성분석

자기 선로의 6번 구간과 타 선로의 9번 구간이 연계된 Case(VII)에 대하여, 절체 시 태양광전원을 연계하지 않았을 때, 수용가 전압특성은 Fig. 17와 같이 피크부하(7MVA)에서는 1~9구간에서 규정전압범위를 벗어나지 않지만, 경부하(4MVA)에서는 7~9구간에서는 벗어나는 것을 알 수 있다. 따라서, 경부하의 경우는 선로절체가 적절하지 않음으로 판단하여 상정하지 않는다. 여기서, Table 7과 같이 피크부하에서 도입 가능한 태양광전원 용량은 자기선로 6구간에서 8.14MW, 타선로 9구간에서 4.29MW이며, 두 개의 선로의 총 합은 12.43MW으로 산정된다. 따라서 Case(VII)의 경우는 절체를 할 수 없음을 알 수 있다. 한편, 피크부하 시에 태양광전원이 14.66MW가 연계된 경우, 타선로 9구간의 수용가 전압을 나타내면 Fig. 18와 같다. 여기서, A 부분은 절체 이

전의 수용가전압 특성이고, B 부분은 절체 이후의 특성으로 절체에 의하여 수용가 전압이 개선됨을 알 수 있다.

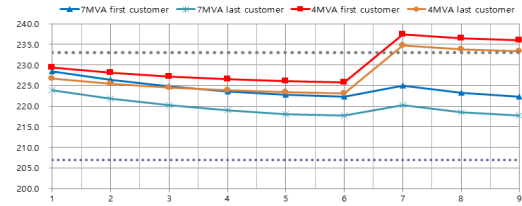


Fig. 17. Characteristics of customer voltage in Case(VII) without PV system

Table 7. Hosting capacity of PV system in Case(VII)

load	hosting capacity(MW)		total
	section 6	section 9	
peak load (7MVA)	8.14	4.29	12.43
off-peak load (4MVA)	-	-	-

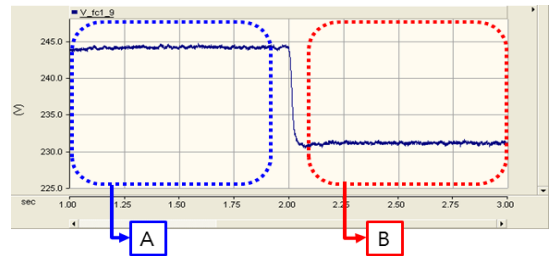


Fig. 18. Characteristics of customer voltage in Case(VII) with PV system at peak load

5.4 종합분석

Table 8은 선로를 절체하지 않은 경우인 Case(I)과 절체하는 경우인 Case(V), (VI), (VII)에 대하여, 태양광전원의 도입 가능 용량을 산정한 것이다. 여기서, 선로를 절체하지 않았을 경우(Case(I))에 연계 가능한 태양광전원의 용량은 피크부하에서 3.17MW, 경부하에서 0.18MW이다. 이에 비해 절체하는 경우 추가로 연계 가능한 태양광전원의 용량은 피크부하 시에 Case(V)는 8.08MW, Case(VI)은 10.48MW, Case(VII)은 8.25MW이며, 경부하 시에 Case(V)는 5.21MW, Case(VI)은 7.02MW, Case(VII)은 0MW이다. 따라서, Case(VI)가 경부하 시를 기준으로 7.02MW를 추가로 연계할 수 있으므로 최대의 태양광전원 용량을 연계 할 수

있는 절체 가능한 최적의 Case임을 확인할 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인할 수 있다.

Table 8. Hosting capacity of PV system at each case

load	contents	hosting capacity [MW]	available capacity [MW]
peak load (7MVA)	Case(I)	4.18	-
	Case(V)	12.26	8.08
	Case(VI)	14.66	10.48
	Case(VII)	12.43	8.25
off-peak load (4MVA)	Case(I)	1.36	-
	Case(V)	6.57	5.21
	Case(VI)	8.38	7.02
	Case(VII)	-	-

6. 결론

본 논문에서는 배전계통에 연계되는 태양광전원의 수용성 향상을 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통을 모델링하고, 수용가전압을 규정전압범위 이내로 유지시키는 태양광전원의 용량과 절체구간을 산정하는 배전계통 수용성 평가알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 피크부하 시를 기준으로 배전계통에 주상변압기 탭을 설정하였을 경우 경부하 시 태양광전원이 배전계통에 연계되면, 태양광전원에서 공급하는 역조류가 전압상승을 초래하여, 규정전압범위가 벗어날 가능성을 확인하였다.
- (2) 제안한 알고리즘을 적용하여, 선로절체에 따른 태양광전원 용량을 미절체 시와 비교한 결과, 피크부하 시에 Case(V)는 8.08MW, Case(VI)은 10.48MW, Case(VII)은 8.25MW이며, 경부하 시에 Case(V)는 5.21MW, Case(VI)은 7.02MW, Case(VII)은 0MW이다. 따라서, Case(VI)의 경우가 최대의 태양광전원 용량을 연계 할 수 있는 절체 가능 Case임을 확인할 수 있었고, 따라서, 절체 하지 않은 경우에 대하여, 추가로 가능한 연계 용량은 7.02MW임을 알 수 있다.
- (3) 본 논문에서는 선로절체에 의한 태양광전원의 수용성 향상을 위해, 배전계통 상용해석프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 3분할3연계로 구성

된 배전계통의 모델링을 제시하고, 태양광전원을 최대로 수용할 수 있는 선로절체 평가알고리즘을 제시한다. 이를 바탕으로 수용가전압 특성을 분석한 결과, 대용량 태양광전원이 연계된 배전선로와 다른 선로를 절체하여 재구성하게 되면, 태양광전원의 수용성을 향상시킬 수 있어, 본 연구의 유용성을 확인할 수 있다.

References

- [1] V. Vai, E. Gladkikh, M. C. Alvarez-Herault, B. Raison and L. Bun, "Study of low-voltage distribution system with integration of PV-battery energy storage for urban area in developing country," 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, 2017, pp. 1-6.
- [2] O. M. Akeyo, V. Rallabandi and D. M. Ionel, "Multi-MW solar PV pumping system with capacity modulation and battery voltage support," 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), San Diego, CA, 2017, pp. 423-428.
- [3] J. Wang, S. Hashemi, S. You and C. Trøeholt, "Active and reactive power support of MV distribution systems using battery energy storage," 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Toronto, ON, 2017, pp. 382-387.
- [4] M. Zeraati, M. E. H. Golshan and J. M. Guerrero, "A Consensus-Based Cooperative Control of PEV Battery and PV Active Power Curtailment for Voltage Regulation in Distribution Networks," in IEEE Transactions on Smart Grid.
- [5] V. Vai, E. Gladkikh, M. C. Alvarez-Herault, B. Raison and L. Bun, "Study of low-voltage distribution system with integration of PV-battery energy storage for urban area in developing country," 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, 2017, pp. 1-6.
- [6] Yong-Ho Yoon, "Integrated Management System to Improve Photovoltaic Operation Efficiency", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 19, No. 4, pp. 113-118, 2019. DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.4.113>
- [7] Chang-Yong Lee, Jinho Kim, "The Prediction and Analysis of the Power Energy Time Series by Using the Elman Recurrent Neural Network", Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, Vol. 41, No. 1, pp. 84-93, 2018.

DOI: <https://doi.org/10.11627/jkise.2018.41.1.084>

- [8] H. C. KI, "A study on millimeter Wave Power Amplifiers Using Spatiol Combining", Ther Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 17, No.4, pp.77-82, 2017.
- [9] Jong-Yong Wang, Byung-Ki Kim, Jea-Bum Park, Byung-Mok Kim, Eung-Sang Kim, Dae-Seok Rho, "A Study on the Modeling and Operation Algorithm of Independent Power System for Carbon Free", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 65, No. 5, pp. 760~768, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.5.760>
- [10] Hong-Yeol Choi, Sung-Sik Choi, Min-Kwan Kang, Dae-Seok Rho, "Optimal Voltage Control Algorithm of Small Hydro Generators for Voltage Stabilization in Distribution system with large scaled PV systems", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 67, No. 7, pp. 824~832, 2018.
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.7.824>
- [11] Min-Kwan Kang, Sung-Sik Choi, Jae-Beom Park, Yang-Hyeon Nam, Eung-Sang Kim, Dae-Seok Rho, "A Study on the Modeling Method of Performance Evaluation System for MW Scaled Energy Storage System Using the PSCAD/EMTDC", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 66, No. 6, pp. 885 891, 2017.
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.6.885>
- [12] Yang-Hyun Nam, Sung-Sik Choi, Min-Kwan Kang, Hu-Dong Lee, Ji-Hyun Park, Dae-Seok Rho, "A Study on the Large-scale Adoption Method of Distribution System Interconnected with PV System by Energy Storage System", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 67, No. 8, pp. 1031~1039, 2018.
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.8.1031>
- [13] Sung-Sik Choi, Min-Kwan Kang, Hu-Dong Lee, Yang-Hyun Nam, Ji-Hyun Park, Dae-Seok Rho, "A Study on an Evaluation Modeling of Power System Performance for Frequency Regulation ESS Based on the PSCAD/EMTDC", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 67, No. 8, pp. 1024~1030, 2018.
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.8.1024>
- [14] Myung-geun Lee, Se-Yeon Le, Hong-Yeol Choi, Ji-Hyun Park, Dae-Seok Rho, "A Study on Hosting Capacity Enhancement of PV System in Distribution System Using Feeder Reconfiguration Method" the Korea Academia-Industrial cooperation Society. 11. 2019.

이 명 근(Myung-Geun Lee)

[정회원]



- 2013년 2월 : 목원대학교 기술마케팅학과 (이학사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드

이 후 동(Hu-Dong Lee)

[정회원]



- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드, 보호협조

페레이라 마리토(Marito Ferreira)

[정회원]



- 2013년 2월 : 동티모르 국립대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력품질 해석, 분산전원, 전기저장장치

박 지 현(Ji-Hyun Park)

[준(학생)회원]



- 2017년 2월 : 청주대학교 태양광 에너지공학과 (공학사)
- 2017년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

신재생에너지, 전력계통, 마이크로그리드

태 동 현(Dong-Hyun Tae)

[정회원]



- 2014년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[중신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)

- 1987년 3월 ~ 1998년 8월: 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석