

배전계통에 있어서 선로전압조정장치의 LDC방식에 의한 태양광전원의 수용성 향상 평가알고리즘

이세연, 이후동, 태동현, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

Evaluation algorithm for Hosting Capacity of PV System using LDC Method of Step Voltage Regulator in Distribution Systems

Se-Yeon Lee, Hu-Dong Lee, Dong-Hyun Tae, Dae-Seok Rho*
Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 최근, 정부의 재생에너지 3020 정책에 따라 태양광전원 등의 신재생에너지전원을 확대하는 보급 사업이 적극적으로 시행되고 있다. 하지만, 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되는 경우, 수용가전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되는 현상이 발생될 수 있어, 태양광전원의 수용성이 저하되어 보급이 지연될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계될 경우, 태양광전원의 수용성을 향상시키기 위하여, 선로전압조정장치(step voltage regulator, SVR)의 LDC(line drop compensation, LDC)방식에 의한 태양광전원의 수용성 향상 평가알고리즘을 제시한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, LDC방식의 SVR과 대용량의 태양광전원 등으로 구성된 복합 배전계통의 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로, SVR의 운용방식에 따른 태양광전원의 수용성을 비교·분석한 결과, LDC방식으로 운용하는 경우에는 태양광전원이 6.5[MW]까지 연계되어도 수용가전압이 규정전압 범위 이내로 유지되어, 본 논문에서 제안한 LDC 방식에 의한 태양광전원의 수용성 향상 평가알고리즘의 유용성을 확인하였다.

Abstract According to the 3020 RE (renewable energy) policy of the Korean Government, distributed generators, including PV (photovoltaic) and WP (wind power) systems, have been installed and operated in distribution systems. On the other hand, if large-scale PV systems are interconnected in a distribution system, the spread of PV systems may be postponed due to a reduction of the hosting capacity in PV systems because of the over-voltage phenomena at the customer end by violating the allowable voltage limits. Under these circumstances, this paper proposes an evaluation algorithm of the hosting capacity of a PV system based on the LDC (line drop compensation) method of SVR (step voltage regulator) to improve the hosting capacity when large-scale PV systems are installed in a distribution system. Moreover, this paper presents a modeling of a complex distribution system, which is composed of a large-scale PV system and SVR with the LDC method using PSCAD/EMTDC. The simulation results confirmed that the proposed algorithm and modeling are useful and practical tools for improving the hosting capacity of a PV system because the customer voltages are maintained within the allowable voltage limits even if 6.5[MW] of the PV system is installed in a distribution system with the LDC method of SVR.

Keywords : Hosting Capacity, PV System, SVR, LDC Method, Distribution System, Evaluation Algorithm

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20182410105070)와 한국에너지기술평가원의 연구(No.20191210301940)에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received June 9, 2020

Revised June 30, 2020

Accepted July 3, 2020

Published July 31, 2020

1. 서론

최근, 정부는 탈원전 및 미세먼지 대응, 온실가스 감축을 위해 신재생에너지 발전 비중을 2040년까지 30~35[%]로 늘릴 계획을 발표하였으며, 태양광전원 등의 신재생에너지전원을 확대하는 보급 사업이 적극적으로 시행되고 있다. 하지만, 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되면, 연계용량 및 연계구간에 따라 수용가전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되는 현상이 발생할 수 있어, 태양광전원의 수용성이 저하될 가능성이 있다. 이러한 배경으로, SVR을 도입하여 대용량 태양광전원의 배전계통 연계에 의한 수용가의 과전압현상을 해결하고, 태양광전원의 수용성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1-4].

따라서, 본 논문에서는 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계될 경우, SVR의 LDC방식에 의한 태양광전원의 수용성 향상 평가알고리즘을 제시한다. 즉, 태양광전원의 연계용량, SVR의 설치 유·무 및 운용방식 등의 다양한 운용시나리오에 기반하여 태양광전원의 수용성을 평가한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, LDC방식의 SVR과 대용량의 태양광전원 등으로 구성된 복합 배전계통의 모델링을 제한한다. 이를 바탕으로, SVR의 운용방식에 의한 태양광전원의 수용성을 비교·분석한 결과, 본 논문에서 제안한 LDC방식에 의한 태양광전원의 수용성 향상 평가알고리즘의 유용성을 확인하였다.

2. SVR의 운용 특성분석

SVR은 장거리 배전선로나 부하변동이 심한 고압 배전선로 등에서 필수적인 전압조정장치로서, 운용방식은 일정송출전압방식, 프로그램조정방식, LDC방식 등으로 나눌 수 있다. 일정송출전압방식은 부하량과 상관없이 송출전압을 일정하게 고정시켜 송출하는 방식(한전에서 사용하고 있는 방식)이며, 프로그램조정방식은 각 시간대별로 타임스위치의 지정에 의해 송출전압을 단계적으로 조정하는 방식이다. 또한, LDC방식은 Fig. 1과 같이 부하의 증감에 따라 변화하는 부하전류를 이용하여 SVR의 송출전압을 변경하는 방식이다. 미리 산출된 LDC정정치(부하중심점전압, 등가임피던스, 밴드폭값, 시지연값)에 의하여, 부하전류가 클 경우에는 배전선로의 전압강하가 커지게 되므로 송출전압을 높게 변경하고, 부하전류가 작을

경우에는 배전선로의 전압강하가 작아지므로 송출전압을 낮게 변경하여 전압강하를 보상한다.

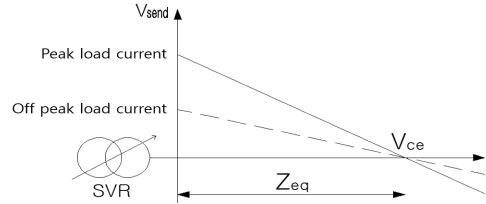


Fig. 1. Concept of voltage control by LDC method

한편, 우리나라의 배전계통에서 SVR은 주상변압기 탭으로 전압강하를 보상 할 수 없는 피치 못할 경우에만 도입되었기 때문에, 일반적으로 중부하시의 전압강하가 10[%]를 초과하는 선로에 설치하도록 권장하고 있으며, 대부분 전압강하 5[%] 지점에 설치되어 운용되고 있다. 하지만, 현재 설치된 SVR은 송출전압을 13,200[V]로 고정시켜 송출하는 일정송출전압방식으로 운용되고 있어, 대용량의 태양광전원이 연계되었을 경우, 수용가 전압이 규정전압을 벗어나게 되는 현상이 발생할 수 있어, 태양광전원의 수용성이 저하될 가능성이 있다. 따라서, 태양광전원의 수용성을 향상시키기 위하여, SVR의 운용방식을 부하전류의 크기에 따라 전압강하를 보상하는 LDC방식으로 변경해야 할 필요성이 요구되고 있다[5].

3. LDC방식에 의한 태양광전원의 수용성 향상 평가알고리즘

3.1 LDC정정치의 정식화

LDC방식에 의한 SVR의 최적송출전압(V_{send})은 전압조정요소인 등가임피던스(Z_{eq})와 부하중심점전압(V_{ce})으로 구성되며, 식 (1)과 같이 임의 지점의 부하중심점전압(V_{ce})에 대하여 등가임피던스(Z_{eq})와 SVR을 통과하는 총 부하전류(I_{load})의 곱으로 나타낼 수 있다[6].

$$V_{send}(t) = V_{ce} + Z_{eq} \times I_{load}(t) \quad (1)$$

여기서, $V_{send}(t)$: 최적송출전압[V], V_{ce} : 부하중심점 전압[V], Z_{eq} : 등가임피던스[Ω], $I_{load}(t)$: SVR을 통과하는 총 부하전류[A]

LDC정정치(V_{ce} , Z_{eq})는 선형회귀분석을 이용하여 전 체시간대에 대한 편차를 최소화하는 최소자승법으로 정 식화할 수 있으며, 구체적인 절차는 아래와 같이 5단계로 나눌 수 있다.

[Step 1] 수용가전압을 규정전압 이내로 유지시키기 위한 SVR의 송출전압 상한치는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다. 여기서, SVR의 송출전압 상한치($V_{max}(t)$)는 규정 전압의 최대치인 233V에 저압선로의 전압강하를 반영하 여 주상변압기 1차측 탭 전압(V_{tap})에 의해 고압측 전압 으로 환산되며, SVR 송출단에서 첫 번째 수용가까지의 고압선 전압강하($V_{hf}(t)$)와 SVR의 불감대폭(ΔV)을 고 려하여 산정한다. 또한, 부하의 증감에 따라 저압선로의 전압강하도 변화될 가능성이 있으므로, 수용가 부하율 (f_c)에 비례하여 주상변압기부터 직하수용가까지의 저압 선로 전압강하 (V_d)가 변화되는 것을 반영한다. 또한, 수 용가 부하율 (f_c)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{max}(t) = (233 + V_d \times f_c(t)) \times \frac{V_{tap}}{230} + V_{hf}(t) - \Delta V \quad (2)$$

$$f_c(t) = \frac{P_{cus}(t)}{P_{cus.peak}} \quad (3)$$

여기서, $V_{max}(t)$: SVR 송출전압 상한치[V], V_d : 주상변 압기부터 직하수용가까지의 저압선로 전압강하(변압기 및 인입선 전압강하의 합계)[V], V_{tap} : 주상변압기의 1차 측 탭 전압[V], $V_{hf}(t)$: SVR 송출단에서 첫 번째 수용가 까지의 고압선 전압강하[V], ΔV : SVR 불감대폭[V], $f_c(t)$: 수용가부하율, $P_{cus}(t)$: 시간대별 수용가부하용 량[VA], $P_{cus.peak}$: 최대 수용가부하용량[VA]

[Step 2] 수용가전압을 규정전압의 최소치인 207[V] 이상으로 유지시키기 위한 SVR의 송출전압 하한치는 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$V_{min}(t) = (207 + V_c \times f_c(t)) \times \frac{V_{tap}}{230} + V_{hl}(t) + \Delta V \quad (4)$$

여기서, $V_{min}(t)$: SVR 송출전압 하한치[V], V_c : 말단수 용가까지의 저압선로 전압강하(변압기 및 인입선, 저압선 전압강하의 합계)[V], $V_{hl}(t)$: SVR 송출단에서 말단 수 용가까지의 고압선 전압강하[V]

[Step 3] 식 (5)는 식 (1)에 의하여 유도된 송출전압 상한치의 계산식을 나타내며, 이를 이용하여 식 (6)과 같 이 부하중심점전압의 상한치($V_{ce(upper)}$)를 산정할 수 있 다. 식 (2)에서 계산된 송출전압 상한치의 평균값 ($V_{send(upper(av))}$)과 SVR을 통과하는 총 부하전류의 평균 값($I_{load(av)}$), 등가임피던스의 상한치 ($Z_{eq(upper)} = \frac{1차 회귀계산정수의 표준편차}{시간대별 부하전류 표준편차^2}$)를 이용하여, 송출전압 상한치의 LDC정치를 산정한다.

$$V_{send(upper(av))} = V_{ce(upper)} + Z_{eq(upper)} \times I_{load(av)} \quad (5)$$

$$V_{ce(upper)} = I_{load(av)} \times (-Z_{eq(upper)}) + V_{send(upper(av))} \quad (6)$$

여기서, $V_{send(upper(av))}$: 송출전압 상한치의 평균값[V], $V_{ce(upper)}$: 부하중심점전압의 상한치[V], $Z_{eq(upper)}$: 등 가임피던스의 상한치[Ω], $I_{load(av)}$: SVR을 통과하는 부하 전류의 평균값[A]

[Step 4] 식 (7)은 식 (1)에 의하여 유도된 송출전압 하한치의 계산식이며, 이를 이용하여 식 (8)과 같이 부하 중심점전압의 하한치($V_{ce(lower)}$)를 산정할 수 있다.

$$V_{send(lower(av))} = V_{ce(lower)} + Z_{eq(lower)} \times I_{load(av)} \quad (7)$$

$$V_{ce(lower)} = I_{load(av)} \times (-Z_{eq(lower)}) + V_{send(lower(av))} \quad (8)$$

여기서, $V_{send(lower(av))}$: 송출전압 하한치의 평균값[V], $V_{ce(lower)}$: 부하중심점전압의 하한치[V], $Z_{eq(lower)}$: 등가 임피던스의 하한치[Ω]

[Step 5] 송출전압 상한치와 하한치의 분포를 이용하 여, 최적 LDC정치는 Fig. 2와 같이 산정할 수 있다. 즉, LDC정치는 SVR을 통과하는 부하전류에 대한 선 형 근사식으로 표현되며, 그래프의 Y절편은 부하중심점 전압(V_{ce})이고, 기울기는 등가임피던스(Z_{eq})를 나타낸다.

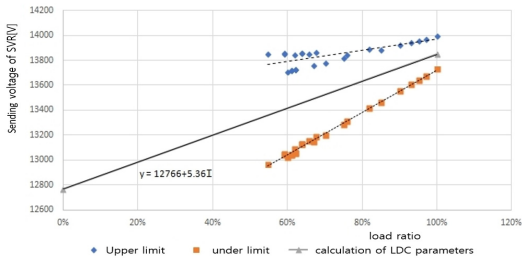


Fig. 2. Calculation concept of optimal LDC parameters

3.2 LDC방식에 의한 태양광전원의 수용성 향상 평가 알고리즘

대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되면, 연계용량 및 연계구간에 따라 수용가전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되는 현상이 발생할 수 있어, 태양광전원의 수용성이 저하될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 SVR의 LDC방식에 의한 태양광전원의 수용성 향상 평가 알고리즘을 제시한다. 이에 대한 자세한 평가절차는 다음과 같다.

[Step 1] 선종 및 금장, 부하량, 태양광전원 연계용량 및 구간, SVR 위치, 주상변압기 탭 전압 등의 배전계통 데이터를 입력한다.

[Step 2] 3.1절의 식 (1)~식 (8)과 같이 LDC정정치 산정알고리즘을 이용하여, LDC정정치(부하중심점전압 (V_{ce}), 등가임피던스(Z_{eq}))를 산정한다.

[Step 3] 배전계통 운용방식을 초기값인 SVR이 미설치된 경우로 설정한다.

[Step 4] 시뮬레이션 시간대(t) 및 수용가구간($s_c(n)$)을 초기값으로 설정한다.

[Step 5] 전체 시간대(t_{max})에 대하여, 모든 구간의 직하수용가전압($V_{f,c,s_c(n)}(t)$)을 계산하고, 최대 직하수용가전압($V_{f,c,max}$)을 산정한다.

[Step 6] [Step 5]에서 산정한 최대 직하수용가전압($V_{f,c,max}$)이 규정전압 범위의 상한치($V_{upperlimit}$)를 벗어나는지 판단하여, 해당 배전계통 운용방식에 따른 태양광전원의 수용성을 평가한다.

[Step 7] 배전계통 운용방식을 다음 방식으로 설정하여 [Step 4]로 돌아간다. 또한, 상기의 절차를 반복하여, SVR의 일정송출전압방식 및 LDC방식에 의한 태양광전원의 수용성을 평가한다.

따라서, 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 Fig. 3과 같다.

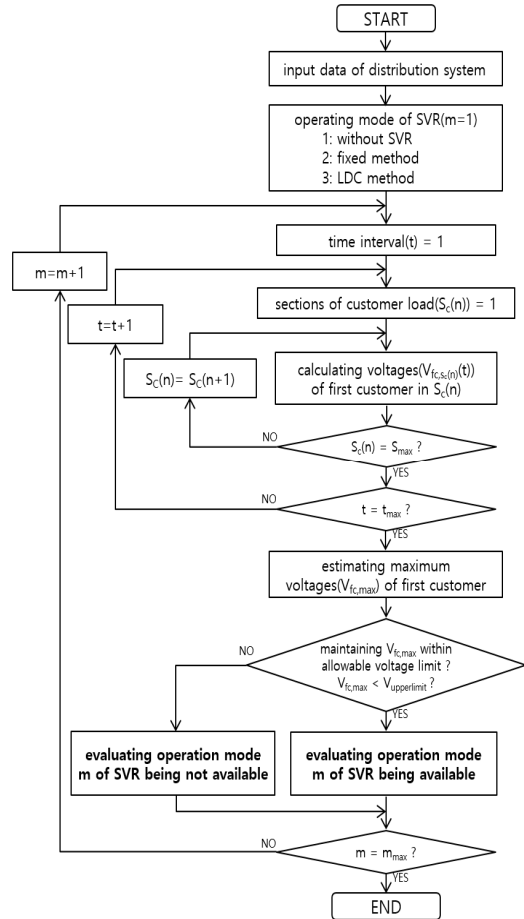


Fig. 3. Evaluation algorithm for hosting capacity of PV system using LDC method

4. PSCAD/EMTDC에 의한 배전계통 모델링

4.1 LDC방식의 모델링

3.1절에 제시한 LDC정정치에 대한 정식화를 바탕으로, LDC방식을 PSCAD/EMTDC로 모델링하면 Fig. 4와 같다. 여기서, A부분은 산정한 부하중심점전압(V_{ce})

을 입력할 수 있고, B부분은 산정된 등가임피던스(Z_{eq})와 실시간으로 측정된 부하전류에 의하여 송출전압(V_{send})을 결정한다[7].

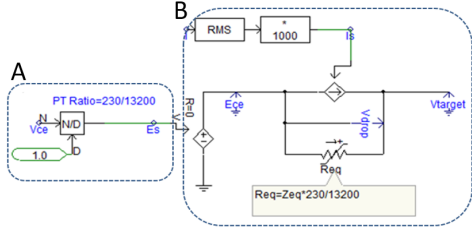


Fig. 4. Modeling of LDC method

또한, LDC방식의 SVR 제어부를 모델링하면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, A부분은 목표로 하는 전압(V_{set})과 SVR의 2차측 전압(V_{means})의 오차를 구하는 것이고, B부분은 오차에 대한 불감대폭(BW)의 범위를 벗어난 값인지 판정하는 것이다. C부분에서는 오차가 시지연동안 지속되면 다음 단계로 수행하고, 지속되지 않으면 초기치로 정정한다.

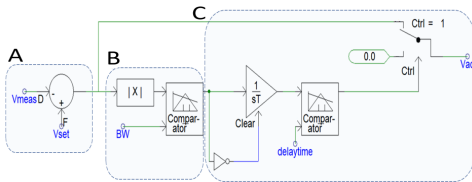


Fig. 5. Modeling of control section in SVR

상기에서 구한 오차를 통해, SVR의 탭 동작제어부를 모델링하면 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, A부분은 오차가 양의 값으로 탭 업 동작을 수행하는 것이고, B부분은 오차가 음의 값으로 탭 다운 동작을 수행하는 것이다. 또한, C부분은 최종적으로 SVR의 탭 위치를 선택하는 것이다[8].

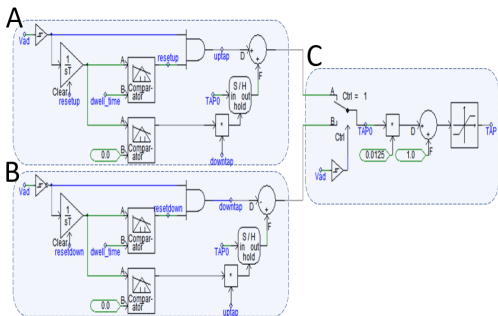


Fig. 6. Modeling of tap operation control in SVR

4.2 태양광전원 모델링

태양광전원의 계통연계용 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위해, PI제어기를 이용하여 전류제어 알고리즘을 모델링하면 Fig. 7과 같다. 여기서, 인버터의 전류 제어부는 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다[9].

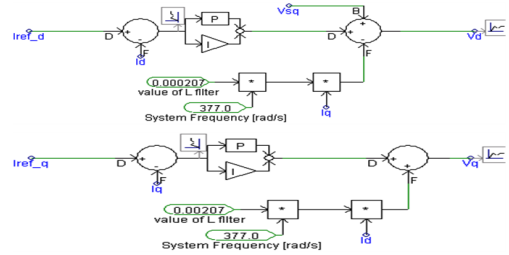


Fig. 7. Modeling of current control in PV system

상기의 모델링에서 구한 V_d 와 V_q 는 d-q 좌표변환을 통해 3상의 전압으로 변환되며, IGBT를 구동시키기 위한 6개의 신호로 사용되는 PWM을 모델링하면, Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다.

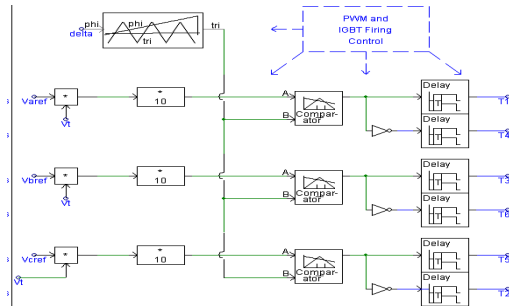


Fig. 8. Modeling of PWM in PV system

한편, 계통연계용 인버터를 모델링하면 Fig. 9와 같고, PWM 으로부터 나온 6개의 스위칭 신호에 의하여 태양광전원에서 생성된 DC 출력을 120°의 위상차를 갖는 3상의 AC출력으로 변환시킨다[10].

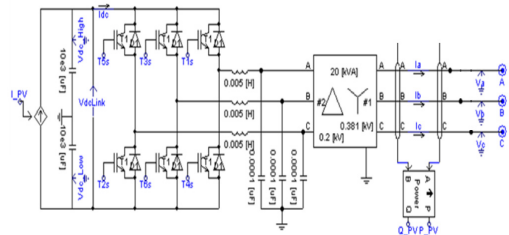


Fig. 9. Modeling of grid-connected inverter

4.3 전체 배전계통 모델링

SVR 및 ESS, 태양광전원 등으로 구성된 전체 배전계통을 모델링하면 Fig. 10과 같다. 여기서 A 부분은 배전용 변전소, B부분은 SVR, C부분은 수용가 부하, D부분은 태양광전원을 나타낸 것이다.

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서는 태양광전원의 연계용량, SVR의 설치유무 및 운용방식 등의 다양한 운용시나리오에 기반하여, 태양광전원의 수용성을 비교 분석하기 위해 Table 1과 같은 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 배전선로는 총 10개 구간으로 구성하고, 1번~7번 구간의 선종은 ACSR-160[mm²], 8번~10번 구간의 선종은 ACSR-95[mm²]로 상정한다. 또한, 각 수용가의 부하용량은 중부하 시 1[MVA], 경부하 시 0.6[MVA]로 상정하며, 역률은 0.9를 적용한다. 여기서, SVR이 설치되지 않은 경우의 주상변압기 1차측 탭은 1~2구간은 13,200탭, 3~7구간은 12,600탭, 8~10구간은 12,000탭을 적용한다. 한편, SVR이 설치되는 경우, 주상변압기 1차측 탭은 1~6구간은 13,200탭, 7~10구간은 12,600탭을 적용한다. 또한, 저압측의 전압강하 부담률은 주상변압기 전압강하분(2%)과 저압 배전선로 전압강하분(4%), 인입선 전압강하분(2%)으로 상정한다.

Table 1. Simulation conditions

section	line impedance [Ω /km]		length [km]	customer load [MVA]		PF	primary tap voltage of P.TR [V]	
	R	X		peak load	off peak load		without SVR	with SVR
1	0.18	0.39	3	1	0.6	0.9	13200	13200
2	0.18	0.39	3	1	0.6	0.9	13200	13200
3	0.18	0.39	3	1	0.6	0.9	12600	13200
4	0.18	0.39	2	1	0.6	0.9	12600	13200
5	0.18	0.39	2	1	0.6	0.9	12600	13200
6	0.18	0.39	2	1	0.6	0.9	12600	13200
7	0.18	0.39	2	1	0.6	0.9	12600	12600
8	0.4	0.48	6	1	0.6	0.9	12000	12600
9	0.4	0.48	3	1	0.6	0.9	12000	12600
10	0.4	0.48	3	1	0.6	0.9	12000	12600

태양광전원의 연계용량은 3[MW], 5[MW], 6.5[MW]로 상정하며, 여기서 6.5[MW] 이상은 LDC방식의 역조류 현상에 의하여 최대치를 고려한 것이다. 또한, 태양광전원의 연계구간은 수용가의 과전압현상이 가장 빈번하게 발생할 수 있는 선로 말단지점으로 상정한다. 한편, 배전용변전소의 송출전압은 13,200[V]의 일정값으로 상정하며, SVR의 설치 위치는 중부하 시 전압강하를 고려하여, 3번 구간으로 상정한다. 여기서, 일정송출전압방식은 SVR의 2차측 전압을 13,200[V]로 고정시켜 송출하고, LDC방식은 Fig. 11과 같은 일 부하 데이터와 태양광 발전량을 적용하여, 3.1절의 LDC정정치 산정알고리즘에 의해 LDC정정치($V_{cc}, Z_{c,q}$)를 산정한다.

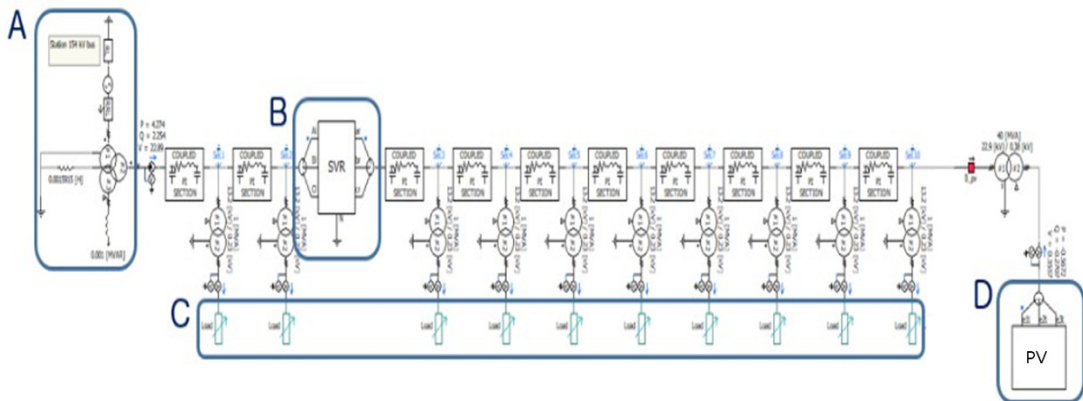


Fig. 10. Modeling of entire distribution system

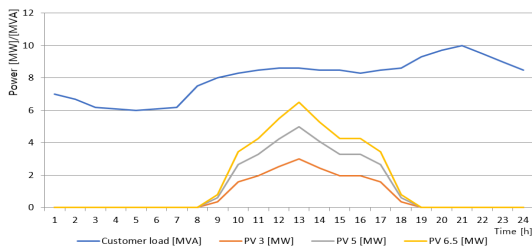


Fig. 11. profiles of daily load and output in PV system

5.2 SVR의 운용방식에 의한 수용성 평가

여기서는 SVR이 설치되지 않은 경우와 SVR이 설치되는 경우로 나누고, 후자는 일정송출전압방식과 LDC방식으로 분류하여, 태양광전원의 연계용량에 따른 수용가 전압의 특성 및 수용성을 분석한다. 먼저, 고압배전선로에 SVR이 설치되지 않은 경우, 전체 구간 중 전압이 가장 높은 10번 구간의 직하수용가전압과 전체 구간 중 전압이 가장 낮은 7번 구간 말단수용가전압에 대하여, 태양광전원의 연계용량별 특성을 나타내면 Fig. 12와 같다. 여기서, Fig. 12의 ①은 10번 구간 직하수용가전압 특성을 나타낸 것이며, Fig. 12의 ②는 7번 구간 말단수용가전압의 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 3[MW] 이상의 태양광전원이 연계될 경우, 고압배전선로 말단의 수용가전압이 과전압현상에 의해 규정전압 범위를 벗어나게 되어 배전계통의 수용성이 저하됨을 확인하였다. 또한, 태양광전원의 연계용량이 증가될수록, 이로 인한 역조류가 증가하여 수용가전압이 규정전압을 벗어나는 폭이 증가됨을 알 수 있었다.

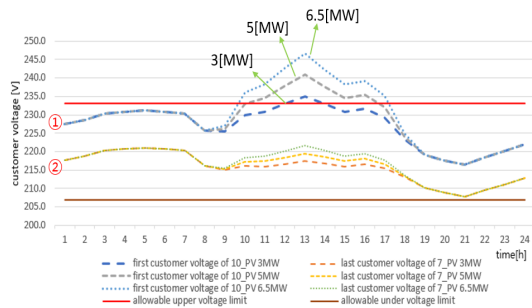


Fig. 12. Characteristic of customer voltages without SVR

또한, 고압배전선로에 SVR이 설치되어 일정송출전압 방식으로 운용되는 경우, 태양광전원의 연계용량별 10번 구간의 직하 수용가전압 및 6번 구간의 말단 수용가전압 특성을 나타내면 Fig. 13과 같다. 여기서, Fig. 13의 ①은

10번 구간 직하수용가전압 특성을 나타낸 것이며, Fig. 13의 ②는 6번 구간 말단수용가전압의 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 태양광전원의 연계용량이 3[MW]인 경우에는 수용가전압이 규정전압 범위 이내로 유지되어 배전계통의 수용성이 향상됨을 확인하였다. 그러나, 태양광전원의 연계용량이 5[MW] 이상으로 증가하는 경우, 수용가전압이 과전압현상에 의해 규정전압 범위를 벗어나게 되어 배전계통의 수용성이 저하됨을 알 수 있었다.

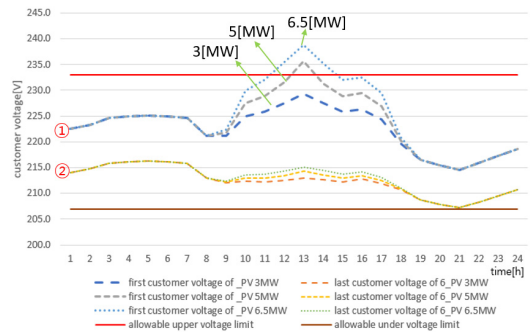


Fig. 13. Characteristic of customer voltages with SVR by fixed sending method

한편, 본 논문에서 제안한 LDC방식으로 운용되는 경우, 수용가전압의 특성을 나타내면 Fig. 14와 같다. 이 그림에서와 같이, 6.5[MW] 이하의 태양광전원이 연계되어도, 수용가전압이 규정전압 범위 이내로 유지되어 배전계통의 수용성이 향상됨을 확인하였다.

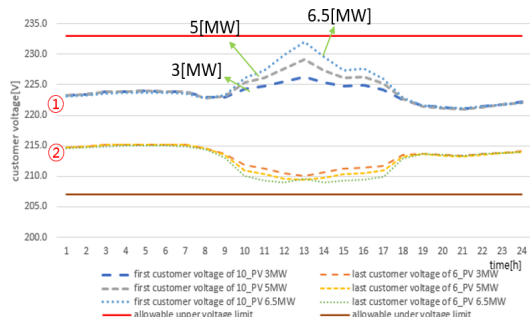


Fig. 14. Characteristic of customer voltages with LDC method

5.3 종합 분석

상기의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 SVR의 설치 유무 및 운용방식에 따른 태양광전원의 수용성을 평가하면

Table 2와 같다. 이 표에서와 같이, 고압배전선로에 SVR이 설치되지 않은 경우, 3[MW] 이상의 태양광전원이 연계되면, 고압배전선로 말단의 수용가전압이 과전압 현상에 의해 규정전압 범위를 벗어나게 됨을 알 수 있었다. 또한, 고압배전선로에 SVR이 설치되어 일정송출전압 방식으로 운용되는 경우, SVR이 설치되지 않은 경우보다 4[MW]까지 태양광전원이 연계되어도 수용가전압에 문제점이 발생하지 않지만, 5[MW]이상의 태양광전원이 연계되면, 수용가의 과전압현상이 발생됨을 알 수 있었다. 한편, 본 논문에서 제안한 LDC방식으로 운용되는 경우, 6.5[MW]까지 태양광전원이 연계되어도, 수용가전압이 규정전압 범위 이내로 유지되어 배전계통의 수용성이 향상됨을 확인하였다. 여기서, 6.5[MW]는 SVR의 역조류현상에 의한 태양광전원의 최대 연계용량(10[MW])까지 연계할 수 있음을 알 수 있었다.

Table 2. Characteristic of hosting capacity for PV with SVR operation method

capacity of PV system [MW]	without SVR	with SVR	
		fixed sending method	LDC method
2	O	O	O
3	X	O	O
4	X	O	O
5	X	X	O
6.5	X	X	O

6. 결론

본 논문에서는 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계될 경우, 태양광전원의 수용성을 향상시키기 위하여, SVR의 LDC방식에 의한 태양광전원의 수용성 향상 평가 알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계 될 경우, 수용가전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되어 태양광전원의 수용성이 저하될 수 있는 가능성을 확인하였다.
- (2) 배전계통에 SVR을 설치하여 일정송출전압방식 또

는 LDC방식으로 운용하는 경우, SVR을 설치하지 않은 경우보다 수용가전압을 안정적으로 유지할 수 있어 태양광전원의 수용성이 향상됨을 확인하였다.

- (3) 제안한 LDC방식의 알고리즘에 의하여, SVR의 운용방식에 따른 태양광전원의 수용성을 비교·분석한 결과, SVR을 LDC방식으로 운용하면 산정된 LDC정정치를 적용하여 SVR의 송출전압을 조절할 수 있어, 태양광전원의 수용성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] Shinya Sekizaki, Mutsumi Aoki, Hiroyuki Ukai, Shunsuke Sasaki, Takaya Shigetou, Weihua Wang, Jean Belanger, "Effective Voltage Control by SVR to Reduce the Capacity of SVC using Solar Radiation Information with Real Time Simulator", *Journal of International Council on Electrical Engineering*, Vol.3, No.4, pp.340-347, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/IJCEE.2013.3.4.340>
- [2] Mi-Young Kim, Dae-Seok Rho, Yong-Taek Oh, Jae-Yun An, Jae-Eon Kim, Eung-Sang Kim, "A Study on the Optimal Voltage Regulation in Distribution Systems with Dispersed Generation Systems", *The transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.54, No.5, pp.251-258, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EMPD.1995.500814>
- [3] Shuhei Takahashi, Yasuhiro Hayashi, Masaki Tsuji, Eiji Kamiya, "Method of Optimal Allocation of SVR in Distribution Feeders with Renewable Energy Sources", *Journal of International Council on Electrical Engineering*, Vol.2, No.2, pp.159-165, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/IJCEE.2012.2.2.159>
- [4] Eunmi Lee, "A Study on the Optimal Operation of Step Voltage Regulator(SVR) in the Distribution Feeders", Master's thesis, Korea University of Technology and education, pp.4-13, 2004.
- [5] Hyun-Ok Lee, "A Study on Optimal Placement and Voltage Control Method of SVR in Smart Grid", Ph.D dissertation, Soongsil University, pp.23-32, 2014.
- [6] Joon-Ho Son, Sang-Won Heo, Dae-Seok Rho, Eui-Hwan Kim, "Optimal Operation System of Step Voltage Regulator in Primary Feeders with Distributed Generations", *The Korea Academy Industrial Cooperation Society*, Vol.12, No.6, pp.2698-2706, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.6.2698>
- [7] Byung-Ki Kim, Ki-Young Kim, Ju-Goang Lee, Song-Shik Choi, Dae-Seok Rho, "A Study on the Modeling of Step Voltage Regulator and Energy

Storage System in Distribution System Using the PSCAD/EMTDC”, *The Korea Academy Industrial Cooperation Society*, Vol.16, No.2, pp.1355-1363, 2015.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.2.1355>

[8] 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://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.8.1031>

[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] Byung-Ki Kim, Kyung-Sang Ryu, Chan-Hyeok Kim, Dae-Seok Rho, “A Study on the Customer Voltage Characteristic of Distribution System with Large Scale PV”, *The transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.62, No.1, pp.29-36, 2013.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.62.1.029>

이 세 연(Se-Yeon Lee)

[정회원]



- 2015년 8월 : 한양대학교 공학대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과(박사수료)
- 2020년 2월 ~ 현재 : 한국폴리텍 대학 전기제어과 교수

<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>

전력/배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

태 등 현(Dong-Hyun Tae)

[정회원]



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

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[정회원]



- 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