

태양광전원의 연계용량에 의한 SVR의 LDC 정정치 특성평가에 관한 연구

이세연*, 노대석**

*한국폴리텍대학, **한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail: seyeonlee@kopo.ac.kr

A Study on Characteristics of LDC Settings for SVR with Interconnection Capacity of PV System

Se-Yeon Lee*, Dae-Seok Rho**

*Korea Polytechnics, **Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요 약

SVR의 LDC방식은 부하전류의 크기에 따라 배전선로의 전압강하를 보상하여 송출전압을 조정하는 방식이다. 하지만, 이러한 운용방식은 배전선로의 단방향 조류를 고려하여 LDC정정치를 산정하므로, 대용량의 태양광전원으로 인한 역조류가 발생할 경우, 수용가전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 대용량의 태양광전원이 연계된 배전계통에 있어서, 역조류를 고려한 SVR의 LDC 정정치 산정알고리즘을 제시한다. 즉, 태양광전원의 연계에 의한 양방향조류를 고려하여, SVR의 연계지점 이후 구간의 수용가전압을 규정전압 범위 이내로 유지할 수 있도록 최적 LDC 정정치를 산정한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, LDC방식의 SVR과 대용량의 태양광전원 등으로 구성된 복합 배전계통의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 태양광전원의 연계용량에 따른 LDC 정정치 및 수용가전압의 특성을 비교·분석한 결과, 태양광전원의 연계 용량에 따라 수용가전압을 규정전압 범위 이내로 유지할 수 있는 SVR의 LDC 정정치를 산정할 수 있어 본 논문의 유용성을 확인하였다.

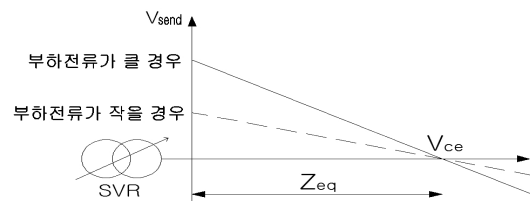
1. 서 론

SVR(step voltage regulator)은 장거리 배전선로나 부하변동이 심한 고압배전선로의 전압을 안정적으로 조정하기 위한 장치로서, LDC(line drop compensation)방식 및 일정송출전압방식, 프로그램조정방식 등으로 운용될 수 있다. 현재, 우리나라의 배전계통에 설치된 SVR은 2차측 전압을 13,200[V]로 고정시켜 송출하는 일정송출전압방식으로 운용되고 있으나, 최근에는 태양광전원이 배전계통에 활발히 도입되면서, SVR의 운용방식을 부하전류의 크기에 따라 전압강하를 보상하는 LDC 방식으로 변경해야 할 필요성이 요구되고 있다. 하지만, 이러한 LDC방식은 배전선로의 단방향 조류를 고려하여 정정치를 산정하는 방식으로 운용되므로, 대용량의 태양광전원으로 인한 역조류가 발생할 경우, 수용가전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 대용량의 태양광전원이 연계된 배전계통에 있어서, SVR의 LDC 정정치 산정알고리즘을 제시한다. 즉, 태양광전원의 연계에 의해 발생하는 양방향조류를 고려하여, 수용가전압을 규정전압 범위 이내로 유지시키기 위한 LDC정정치를 산정한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, LDC방식의 SVR과 대용량의 태양광전원 등으로 구성된 복합 배전계통의 모델링을 제안한다. 이를 바탕으로 태양광전원의

연계용량에 따른 LDC 정정치 및 수용가전압의 특성을 비교·분석한 결과, 태양광전원의 연계 용량에 따라 수용가전압을 규정전압 범위 이내로 유지할 수 있는 SVR의 LDC 정정치를 산정할 수 있어 본 논문의 유용성을 확인하였다.

2. 태양광전원의 연계용량에 의한 SVR의 LDC정정치 특성평가

LDC방식은 그림 1과 같이 부하의 증감에 따라 변화하는 부하전류를 이용하여 SVR의 송출전압을 변경하는 방식이다. 미리 산정된 LDC 정정치에 의하여, 부하전류가 클 경우에는 배전선로의 전압강하가 커지게 되므로 송출전압을 높게 변경하고, 부하전류가 작을 경우에는 배전선로의 전압강하가 작아지므로 송출전압을 낮게 변경하여 전압강하를 보상한다.



[그림 1] LDC방식의 개념도

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

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

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

LDC정정치(V_{α} , Z_{eq})는 선형회귀분석을 이용하여 전체시 간대에 대한 편차를 최소화하는 최소자승법으로 정식화할 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. 또한, 부하의 증감에 따라 저압선로의 전압강하도 변화될 가능성이 있으므로, 수용가 부하율(f_c)에 비례하여 주상변압기부터 직하수용가까지의 저압선로 전압강하(V_d)가 변화되는 것을 반영한다.

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

여기서, $V_{max}(t)$: SVR 송출전압 상한치[V], V_d : 주상변압기부터 직하수용가까지의 저압선로 전압강하(변압기 및 인입선 전압강하의 합계)[V], V_{tap} : 주상변압기의 1차측 탭 전압[V], $V_{hf}(t)$: SVR 송출단에서 첫 번째 수용가까지의 고압선 전압강하[V], ΔV : SVR 불감대폭[V], $f_c(t)$: 수용가부하율, $P_{cus}(t)$: 시간대별 수용가부하용량[VA], $P_{cus,peak}$: 최대 수용가부하용량[VA]

[Step 2] 수용가전압을 규정전압의 최소치인 207[V] 이상으로 유지시키기 위한 SVR의 송출전압 하한치는 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{min}(t) = (207 + V_e \times f_c(t)) \times \frac{V_{tap}}{230} + V_{hl}(t) + \Delta V \quad (3)$$

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

[Step 3] 식 (4)는 식 (1)에 의하여 유도된 송출전압 상한치의 계산식을 나타내며, 이를 이용하여 식 (5)와 같이 부하중심점전압의 상한치($V_{\alpha(upper)}$)를 산정할 수 있다.

$$V_{send(upper(av))} = V_{\alpha(upper)} + Z_{eq(upper)} \times I_{load(av)} \quad (4)$$

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

여기서, $V_{send(upper(av))}$: 송출전압 상한치의 평균값[V], $V_{\alpha(upper)}$: 부하중심점전압의 상한치[V], $Z_{eq(upper)}$: 등가임피던스의 상한치[Ω], $I_{load(av)}$: SVR을 통과하는 부하전류의 평균값[A]

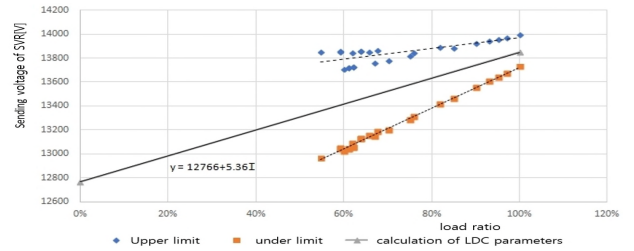
[Step 4] 식 (6)은 식 (1)에 의하여 유도된 송출전압 하한치의 계산식이며, 이를 이용하여 식 (7)과 같이 부하중심점전압의 하한치($V_{\alpha(lower)}$)를 산정할 수 있다.

$$V_{send(lower(av))} = V_{\alpha(lower)} + Z_{eq(lower)} \times I_{load(av)} \quad (6)$$

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

여기서, $V_{send(lower(av))}$: 송출전압 하한치의 평균값[V], $V_{\alpha(lower)}$: 부하중심점전압의 하한치[V], $Z_{eq(lower)}$: 등가임피던스의 하한치[Ω]

[Step 5] 송출전압 상한치와 하한치의 분포를 이용하여, 최적 LDC정치는 그림 2와 같이 산정할 수 있다. 즉, LDC정치는 SVR을 통과하는 부하전류에 대한 선형 근사식으로 표현되며, 그래프의 Y절편은 부하중심점전압(V_{α})이고, 기울기는 등가임피던스(Z_{eq})를 나타낸다.

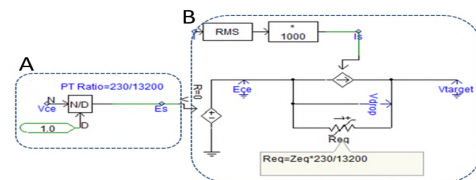


[그림 2] 최적 LDC정치 산정 그래프

3. PSCAD/EMTDC에 의한 배전계통 모델링

3.1 LDC방식의 SVR 모델링

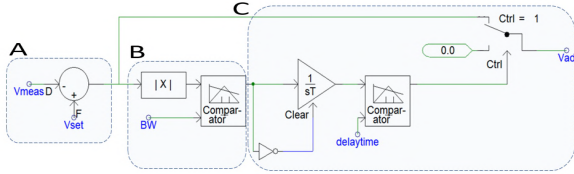
2장에 제시한 LDC방식을 PSCAD/EMTDC로 모델링하면 그림 3과 같다. 여기서, A부분은 산정된 부하중심점전압(V_{α})을 입력할 수 있고, B부분은 산정된 등가임피던스(Z_{eq})와 실시간으로 측정된 부하전류에 의하여 송출전압(V_{send})을 결정한다.



[그림 3] LDC방식의 모델링

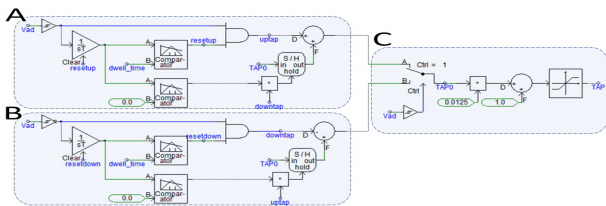
또한, LDC방식의 SVR 제어부를 모델링하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, A부분은 목표로 하는 전압(V_{set})과 SVR의 2차측 전압(V_{means})의 오차를 구하는 것이고, B부분은 오차에 대한 불감대폭(BW)의 범위를 벗어난 값인지

판정하는 것이다. C부분에서는 오차가 시지연동안 지속되면 다음 단계로 수행하고, 지속되지 않으면 초기치로 정정한다.



[그림 4] SVR의 제어부 모델링

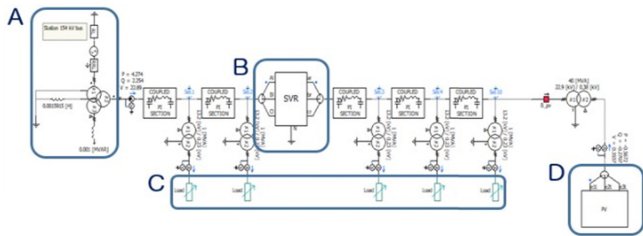
상기에서 구한 오차를 통해, SVR의 탭 동작제어부를 모델링하면 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, A부분은 오차가 양의 값으로 탭 업 동작을 수행하는 것이고, B부분은 오차가 음의 값으로 탭 다운 동작을 수행하는 것이다. 또한, C부분은 최종적으로 SVR의 탭 위치를 선택하는 것이다[8].



[그림 5] SVR의 탭 동작 제어 모델링

3.2 전체배전계통 모델링

LDC방식의 SVR 및 태양광전원 등으로 구성된 전체 배전계통을 모델링하면 그림 6과 같다. 여기서 A 부분은 배전용 변전소, B부분은 SVR, C부분은 수용가 부하, D부분은 태양광전원을 나타낸 것이다.



[그림 6] 전체 배전계통 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

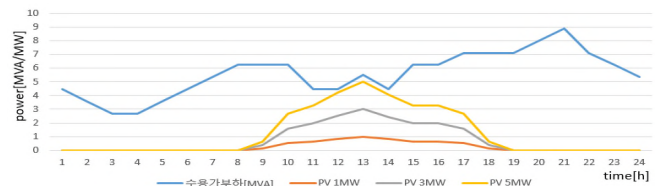
4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서는 태양광전원의 연계용량에 따른 LDC정정치의 특성을 비교·분석하기 위해 표 1과 같은 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 배전선로는 총 5개 구간으로 구성하고, 1번~3번 구간의 선종은 ACSR-160[mm²], 4번~5번 구간의 선종은 ACSR-95[mm²]로 상정한다. 또한, 1번~2번 및 4번~5번 수용가의 부하용량은 중부하 시 0.1[MVA], 경부하 시 0.03[MVA]로 상정하고, 3번 수용가의 부하용량은 중부하 시 8.5[MVA], 경부하 시 2.25[MVA]로 상정하며, 역률은 0.95를 적용한다.

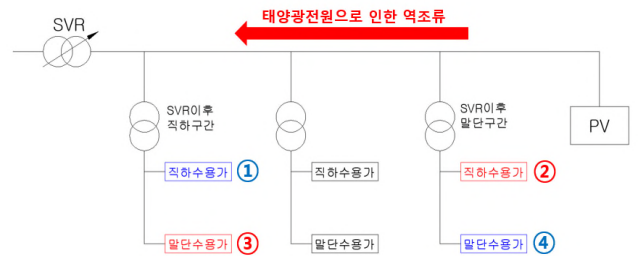
[표 1] 시뮬레이션 조건

구간	선로임피던스 [Ω/km]		선로 길이 [km]	부하용량 [MVA]		역률	주상변압기 1차측 탭전압 [V]
	R	X		중부하	경부하		
1	0.18	0.39	6	0.1	0.03	0.95	13200
2	0.18	0.39	6	0.1	0.03	0.95	13200
3	0.18	0.39	6	8.5	2.55	0.95	13200
4	0.4	0.48	12	0.1	0.03	0.95	13200
5	0.4	0.48	13	0.1	0.03	0.95	13200

태양광전원의 연계용량은 1[MW], 3[MW], 5[MW]로 상정하며, 연계구간은 수용가의 과전압현상이 가장 빈번하게 발생할 수 있는 선로 말단지점으로 상정한다. 또한, SVR의 설치 위치는 중부하 시 전압강하를 고려하여, 3번 구간으로 상정한다. 여기서, 그림 7과 같은 일 부하 데이터와 태양광 발전량을 적용하여 LDC정정치(V_{ce} , Z_{eq})를 산정한다. 한편, 역조류가 발생하지 않는 경우에는, 그림 8과 같이 SVR을 기준으로 직하구간 1번 수용가와 말단구간 4번 수용가의 전압을 각각 송출전압의 상한치 및 하한치로 산정하지만, 태양광전원에 의해 배전선로에 역조류가 발생하는 경우, 말단구간 2번 수용가와 직하구간 3번 수용가의 전압을 각각 송출전압의 상한치 및 하한치로 산정한다.



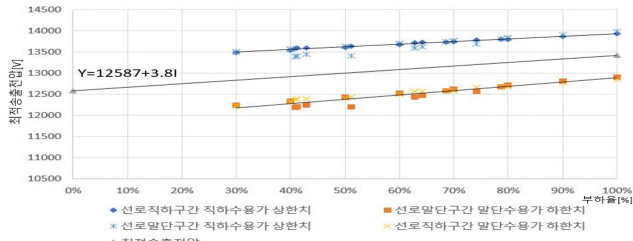
[그림 7] 일 부하 및 태양광 발전량 곡선



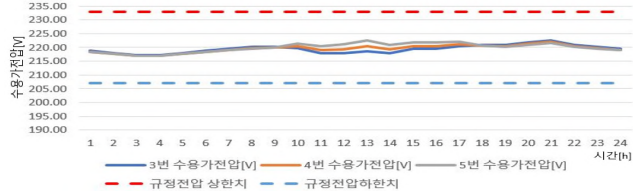
[그림 8] 태양광전원의 역조류를 고려한 송출전압의 상한치 및 하한치

4.2 태양광전원 연계 시 LDC정정치 및 수용가전압 특성분석

여기서는 태양광전원의 연계용량에 따른 LDC정정치 및 수용가전압의 특성을 분석한다. 먼저, 1[MW]의 태양광전원이 연계된 경우, 제안한 알고리즘에 의하여 산정된 LDC정정치 및 수용가전압의 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 그림 9의 (a)는 LDC정정치의 특성을 나타낸 것으로, 부하중심점전압은 12,587[V], 등가임피던스는 3.8[Ω]으로 산정됨을 알 수 있다. 또한, 그림 9의 (b)는 SVR 이후 수용가전압을 나타낸 것으로, 수용가전압이 규정전압 범위 이내로 유지되는 것을 확인하였다.



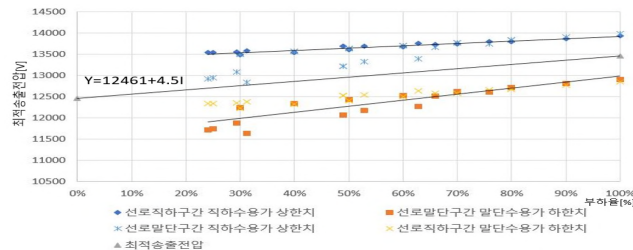
(a) LDC정정치 특성



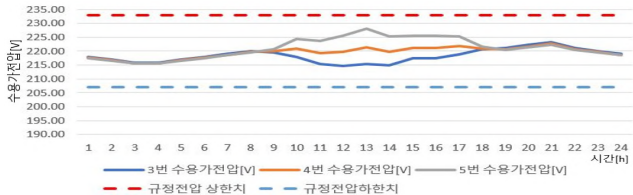
(b) SVR이후 수용가전압 특성

[그림 9] 1MW의 태양광전원 연계 시 LDC 정정치 및 수용가 전압 특성

또한, 3[MW]의 태양광전원이 연계된 경우, LDC정정치 및 수용가전압의 특성을 나타내면 그림 10과 같다. 그림 10의 (a)는 LDC정정치의 특성을 나타낸 것으로, 부하중심점 전압은 12,461[V]로 산정되어 태양광전원의 연계용량이 1[MW]인 경우보다 낮아지며, 등가임피던스는 4.5[Ω]으로 산정되어 높아짐을 알 수 있다. 또한, 태양광전원에 의해 역조류가 발생 하는 경우, 변경되는 송출전압의 상한치 및 하한치의 폭이 감소되어 LDC정정치를 선정할 수 있는 범위가 감소됨을 알 수 있다. 한편, 그림 10의 (b)는 SVR 이후 수용가전압을 나타낸 것으로, 수용가전압이 규정전압 범위 이내로 유지되는 것을 확인하였다.



(a) LDC정정치 특성

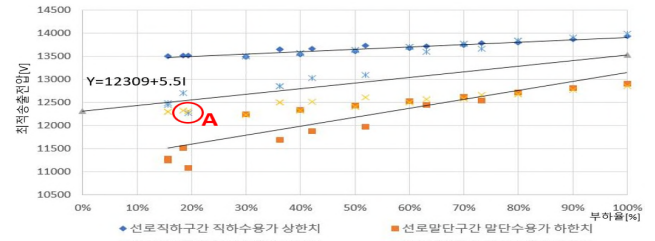


(b) SVR이후 수용가전압 특성

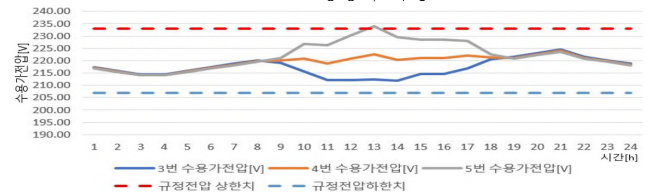
[그림 10] 3MW의 태양광전원 연계 시 LDC 정정치 및 수용가 전압 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 5[MW]의 태양광전원이 연계된 경우, LDC정정치 및 수용가전압의 특성을 나타내면 그림 11과 같다. 그림 11의 (a)는 LDC정정치의 특성을 나타낸 것으로, 부하중심점 전압은 12,309[V]로 산정되어 태양광전원의 연계용량이 3[MW]인 경우보다 더욱 낮아지며, 등가임피던스는 5.5[Ω]으로 산정되어 더욱 높아짐을 알 수 있다. 또한, 그림 11의 (b)는 SVR 이후 수용가전압을 나타낸 것

으로, 13시에 5번구간의 수용가전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되는 것을 확인하였다. 따라서, 그림 11의 (a)에서 A부분과 같이, 태양광전원에 의해 역조류가 발생 하는 경우, 변경되는 송출전압의 하한치가 상한치보다 높아지므로, 수용가전압을 규정전압범위 이내로 유지시킬수 있는 LDC정정치를 선정할 수 없음을 알 수 있었다.



(a) LDC정정치 특성



(b) SVR이후 수용가전압 특성

[그림 11] 5MW의 태양광전원 연계 시 LDC 정정치 및 수용가전압 특성

5. 결 론

본 논문에서는 대용량의 태양광전원이 연계된 배전계통에 있어서, SVR의 LDC정정치 선정알고리즘을 제시하였으며, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, LDC방식의 SVR과 대용량의 태양광전원 등으로 구성된 복합 배전계통의 모델링을 제안하였다. 이를 바탕으로 태양광전원의 연계용량에 따른 LDC 정정치 및 수용가전압의 특성을 비교분석한 결과, 태양광전원의 연계 용량에 따라 수용가전압을 규정전압 범위 이내로 유지할 수 있는 SVR의 LDC정정치를 선정할 수 있어 본 논문의 유용성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이현옥, “스마트그리드 환경에서 선로전압조정장치의 설치위치선정 및 전압제어에 관한 연구”, 숭실대학교 대학원, 학위논문(박사), 6월, 2014년.