

SVR과 BESS를 이용한 배전선로의 협조제어전략에 관한 연구

김병기*, 노대석**

*한국에너지기술연구원,

**한국기술교육대학교

e-mail : bk_kim@kier.re.kr, dsrho@koreatech.ac.kr

A Study on the Coordination Control Strategy of Distribution Feeder Using the Step Voltage Regulator and Battery Energy Storage System

Byung-Ki Kim*, Dae-Seok Rho**

*Korea Institute of Energy Research,

**Korea University of Technology and Education,

요 약

현 배전계통에 설치된 선로전압조정장치(SVR: Step Voltage Regulator)는 급격한 부하 변동 시 수용가의 전압을 규정치($220\pm 13V$) 이내로 유지시키기 위하여, 미리 설정된 동작지연시간(tsec) 따라 Tap동작이 이루어지고 있다. 그러나 태양광전원이 연계된 배전계통에서는 SVR의 동작지연시간동안 수용가전압이 규정치를 벗어날 가능성을 가지고 있어서, 전지전력저장장치(BESS: Battery Energy Storage System)의 도입이 필요한 실정이다. 본 논문에서는 SVR의 시지연 기간 동안 전지전력저장장치에 의하여 수용가전압을 안정화시키는 SVR과 BESS의 협조제어알고리즘을 제안한다. SVR과 BESS 의한 협조제어알고리즘을 바탕으로 고압배전선로의 수용가전압 특성을 분석한 결과, 제안한 SVR과 BESS에 의하여 수용가전압이 규정치 이내로 유지됨을 알 수 있어, 본 논문에서 제안한 협조제어알고리즘의 유용성을 확인하였다.

1. 서론

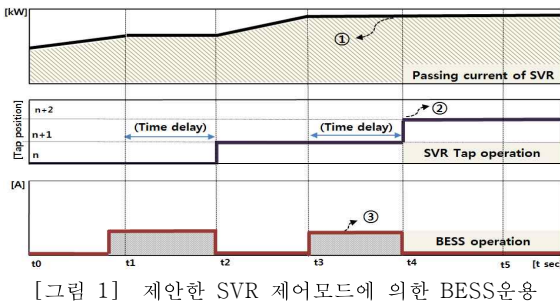
현 배전계통에 설치된 SVR은 급격한 부하 변동시, 수용가의 전압을 규정치($220\pm 13V$) 이내로 유지시키기 위하여[1], 미리 설정된 동작지연시간(sec) 이후에 Tap동작이 이루어지도록 운용되고 있다[2]. 이때 SVR의 동작지연시간동안 수용가전압은 규정치를 벗어날 가능성을 가지고 있어, 본 논문에서는 SVR의 동작 지연시간(tsec)동안 BESS에 의하여 수용가전압을 안정화시키는 SVR과 BESS의 전압조정방안을 제안하였다. 구체적으로 기존 SVR모드에서는 BESS의 운용전류가 고려된 SVR의 통과전류에 의하여 크기가 증가하거나 감소하게 된다. 이에 따라 SVR의 탭은 기존 탭을 유지하게 되고, BESS의 도입용량만 증가하는 문제점이 있어, 논문에서는 SVR의 시지연 기간 동안 전지전력저장장치(Battery Energy Storage System)에 의하여 수용가전압을 안정화시키는 SVR과 BESS의 협조제어알고리즘을 제안한다. 구체적으로 BESS가 계통에 도입되어 운용되는 경우에 기존 SVR모드에서는 BESS의 운용전류가 고려된 SVR의 통과전류에 의하여 크기가 증가하거나 감소하여 SVR의 탭이 기존 탭을 항상 유지하게 되어, BESS의 도입용량만 증가하는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 BESS의 운용(충·방

전)전류를 고려하지 않고 부하전류에 의해서만 SVR의 탭을 동작시키는 새로운 제어모드를 제안한다. 또한, 이 제어모드를 바탕으로 SVR의 시지연 기간 동안 수용가전압이 규정범위를 벗어나게 되는 경우, BESS의 충·방전 동작을 결정하고 적정 도입용량을 산정하는 BESS의 운용알고리즘을 제시한다. 이에 따라 본 논문에서 제안한 알고리즘을 바탕으로 태양광전원이 연계된 배전계통의 수용가전압특성을 분석한 결과, 제안한 SVR과 BESS의 협조제어 알고리즘에 의하여 수용가전압이 안정적으로 유지됨을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

2. SVR의 제어모드에 의한 BESS의 전압조정

기존 SVR 제어모드에서는 SVR의 동작 지연시간동안 BESS를 운용하는 경우, 충·방전전류에 의하여 SVR을 통과하는 부하전류의 크기가 감소하거나 증가하여, 탭이 동작하지 않게 되고, 이에 따라 BESS의 도입용량이 무한대로 증가할 수 있는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 SVR의 동작 지연시간동안 규정범위를 벗어나는 수용가전압에 의하여 BESS가 도입되는 경우, BESS의 운용전류를 고려

하지 않고 기존의 부하전류에 의해서만 SVR의 탭이 동작되도록 하는 개선된 제어모드를 제안한다. 구체적으로 이 제어모드에서는 BESS의 운용전류를 계측하여 SVR의 통과전류에 적용하게 되면, SVR은 BESS의 운용전류를 제외한 부하전류에 의해서만 동작하게 되어, BESS는 SVR의 시지연 기간 동안에만 동작하게 된다. 즉 제안한 SVR모드에 의하여 BESS가 도입되는 경우에 SVR 통과전류는 그림 1의 ①과 같이 기존 부하전류만 고려되어, SVR의 탭은 ②와 같이 t_2 와 t_4 에서 각각 동작하게 된다. 이에 따라 BESS는 그림 2의 ③과 같이 SVR의 동작지연시간동안에만 운용되어 도입용량이 무한대로 증가하지 않게 된다.



[그림 1] 제안한 SVR 제어모드에 의한 BESS운용

3. 선로전압조정장치와 전지전력저장장치의 협조제어 전략

3.1 기존 선로전압조정장치의 탭 동작 알고리즘
각 시간대의 SVR Tap 위치를 결정하기 위하여, SVR의 최적 송출전압과 SVR의 기준전압을 비교하여 탭 위치($\Delta V_k(t)$)를 구하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_p(t) = \frac{V_{send}(t) - V_n}{V_n \times T_{int}} \quad (1)$$

여기서, $T_p(t)$: SVR 탭위치, $V_{send}(t)$: 최적 송출전압, V_n : SVR 기준전압(13,200V), T_{int} : SVR Tap 간격(1.25%), t : 시간대

한편, SVR의 탭 위치를 결정하기 위하여, 부하변동에 따른 최적송출전압은 임의지점의 부하 중심점 전압 (V_{ce})에 대하여 대상 배전계통의 등가 임피던스(Z_{eq})와 SVR의 통과 전류의 곱으로 구해진다. 하지만 SVR의 시지연 기간동안 규정범위를 초과하는 수용가의 전압을 적정범위 이내로 유지하기 위하여 BESS가 운용되는 경우, SVR의 최적송출전압은 BESS의 운용전류가 고려된 SVR의 통과전류에 의하여 크기가 증가하거나 감소하게 된다. 따라서 이 송출전압에 의한 전

압변동분의 합이 불감대폭을 벗어나지 않게 되면, SVR의 탭은 기존 탭을 유지하게 되어 BESS의 도입용량만 증가하는 문제점이 발생할 수 있다.

3.2 선로전압조정장치와 전지전력저장장치의 협조제어 전략

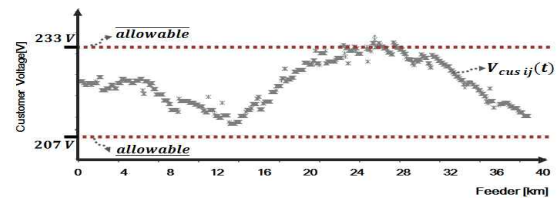
본 논문에서는 BESS의 운용(충·방전)전류를 고려하지 않고 부하전류에 의해서만 SVR의 탭을 동작시키는 제어모드를 제안한다. 즉 이 제어모드에서는 식 (3)과 같이 BESS의 운용전류를 계측하여 SVR의 통과전류에 적용하게 되면, 식 (2)와 같이 BESS의 운용전류를 제외한 부하전류에 의해서만 SVR의 최적송출전압이 결정된다. 그리고 이 송출전압에 의하여 전압변동분의 합이 불감대폭을 벗어나게 되면 SVR의 탭은 동작하게 되고, 이에 따라 BESS는 SVR 동작지연시간동안에만 운용되어 도입용량이 무한대로 증가하지 않게 된다.

$$Prop V_{send}(t)[V] = V_{ce} + (Prop I_{load}(t)) \times Z_{eq} \quad (2)$$

$$Prop I_{load}(t)[A] = I_{load}(t) \pm I_{BESS,ct}(t) \quad (3)$$

여기서, $Prop I_{load}$: BESS의 충·방전전류를 제외한 부하전류, $Prop V_{send}$: ESS의 충·방전전류를 제외한 SVR의 최적송출전압, $I_{BESS,CT}$: BESS전류의 계측치

한편, 상기에서 제시한 SVR의 제어모드를 바탕으로 본 논문에서는 수용가전압이 규정범위를 벗어나게 되는 경우, SVR의 동작 지연시간동안 BESS의 충·방전 동작을 수행하는 BESS의 운용 알고리즘을 제안하였다. 즉, BESS는 그림 2와 같이 실시간으로 계산된 수용가전압($V_{cus,i}(t)$)이 상한치를 초과하게 되면 SVR의 동작지연시간동안 충전동작이 이루어지게 되고, 하한치 미만으로 되면 방전동작이 이루어지게 된다.



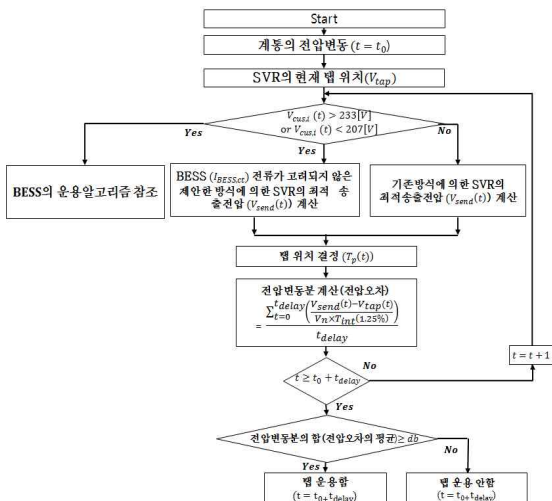
[그림 2] 수용가의 전압분포특성

수용가전압에 의한 BESS의 충·방전 운용 결정은 수용가전압이 규정치를 벗어나는 경우에 이루어지는데, 이 조건은 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 수용가전압이 상한치(233V)를 초과하게 되면 BESS는 충전동작($\sigma(t)=-1$)을 결정하게 되고, (207V) 하한치 미만으로 되면 방전동작($\sigma(t)=1$)을 결정하게 된다.

$$\sigma(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } V_{cusi,i}(t) \text{ or } V_{cuse,i}(t) > 233[V] \\ -1 & \text{if } V_{cusi,i}(t) \text{ or } V_{cuse,i}(t) < 207[V] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서, $\sigma(t)$: BESS의 운용결정

따라서, 어느 시지연 기간 동안 수용가 전압을 적정범위로 유지시키기 위한 SVR과 BESS의 협조제어를 그림 3과 같이 제안한다. 계통에 전압변동이 발생하여 SVR을 운용하는 경우, 탭 위치는 LDC 정정치에 의하여 계산된 SVR의 최적송출전압과 SVR의 기준전압(13,200V)을 비교한 값으로 결정된다. 이때 최적송출전압은 수용가전압이 규정범위를 벗어나지 않게 되면 기존 부하전류에 의하여 결정되고, 규정범위를 벗어나게 되면 BESS 전류가 고려되지 않고 기존 부하전류에 의해서만 결정된다, 그리고 시지연 기간 동안 전압변동분의 합이 불감대폭을 벗어나게 되면 SVR의 탭은 동작하게 된다. 또한, SVR의 탭 위치가 결정되고 수용가전압이 규정치를 벗어나는 경우로 판단되면, BESS는 상기의 BESS의 운용알고리즘에 의하여 SVR의 시지연 기간 동안 운용되고, SVR의 탭이 동작하게 되면 운용을 멈추게 된다.

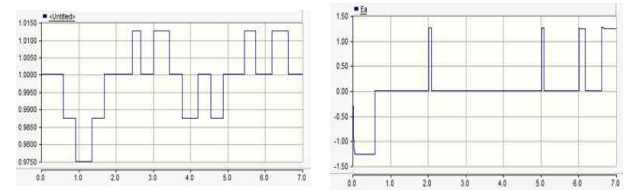


[그림 3] SVR과 BESS의 협조제어 알고리즘

4. 시뮬레이션 분석 및 결과

4.1 BESS와 SVR의 전압조정 특성

본 논문에서는 제안한 SVR 제어모드를 바탕으로 BESS의 동작특성을 분석하였다. 이 제어모드에 의하여, SVR의 Tap 동작횟수는 기존 방식보다 증가하지만, BESS 운용시간은 그림 4와 같이 기존 방식에 의한 운용시간보다 감소함을 확인하였다. 따라서 제안한 SVR 제어모드에 의하여 BESS를 운용한다면 BESS의 도입용량을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.



(a) SVR의 동작특성

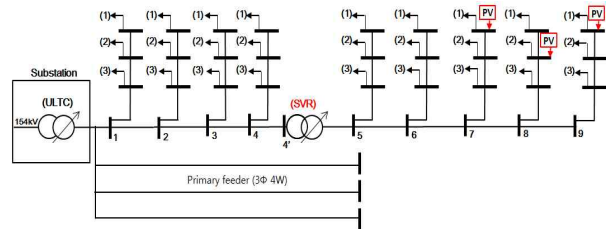
(b) BESS의 동작특성

[그림 4] SVR과 BESS의 동작특성

4.2 BESS와 SVR의 전압조정에 의한 수용가전압 특성분석

(1) 시뮬레이션 조건

SVR과 BESS의 운용에 따른 전 수용가의 전압특성을 분석하기 위하여, 그림 5와 같이 9개의 구간과, 말단에 태양광전원을 연계하고, 4번째 구간에는 SVR과 BESS를 도입하였다. 또한 SVR 설치점 이후의 주상변압기는 12600/230 Tap을 적용하고, 표1과 같이 계통의 데이터를 적용하여 시뮬레이션 분석을 수행하였다.



[그림 5] 배전계통 구성도

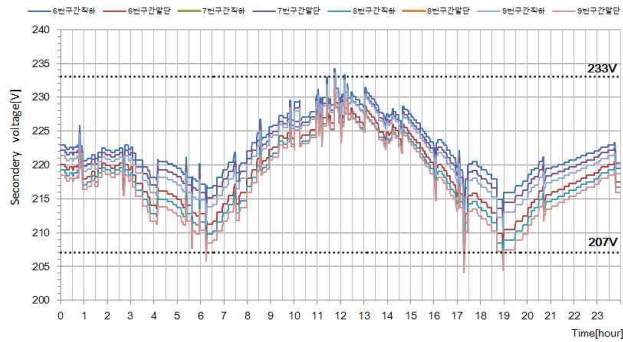
[표 1] 시뮬레이션 데이터

Section Number	Section Impedance R (Ω/km) X (Ω/km)	Length (km)	Branch Number	Branch Length (km)	Section Impedance R (Ω/km) X (Ω/km)	Load(PU)	PV system (MW)
1	0.182 0.391	2	1	0.5	0.403 0.408	0.0032+j0.0015	0
			2	0.5	0.403 0.408	0.0032+j0.0015	0
			3	0.5	0.403 0.408	0.0032+j0.0015	0
2	0.182 0.391	2	1	0.5	0.403 0.408	0.0063+j0.0031	0
			2	0.5	0.403 0.408	0.0063+j0.0031	0
			3	0.5	0.403 0.408	0.0063+j0.0031	0
3	0.182 0.391	4	1	0.5	0.403 0.408	0.0032+j0.0015	0
			2	0.5	0.403 0.408	0.0032+j0.0015	0
			3	0.5	0.403 0.408	0.0032+j0.0015	0
4	0.182 0.391	2	1	0.5	0.403 0.408	0.0063+j0.0031	0
			2	0.5	0.403 0.408	0.0063+j0.0031	0
			3	0.5	0.403 0.408	0.0063+j0.0031	0
5	0.182 0.391	3.3	1	1	0.403 0.408	0.0241+j0.0114	0
			2	1	0.403 0.408	0.0241+j0.0114	0
			3	1	0.403 0.408	0.0241+j0.0114	0
6	0.182 0.391	4	1	0.8	0.403 0.408	0.0202+j0.0101	0
			2	0.8	0.403 0.408	0.0202+j0.0101	0
			3	0.8	0.403 0.408	0.0202+j0.0101	0
7	0.403 0.408	8	1	0.8	0.403 0.408	0.0111+j0.0054	0~2.6
			2	0.8	0.403 0.408	0.0111+j0.0054	0
			3	0.8	0.403 0.408	0.0111+j0.0054	0
8	0.403 0.408	4	1	0.8	0.403 0.408	0.0111+j0.0054	0~0.8
			2	0.8	0.403 0.408	0.0111+j0.0054	0
			3	0.8	0.403 0.408	0.0111+j0.0054	0
9	0.403 0.408	7.6	1	0.8	0.403 0.408	0.0221+j0.0107	0~0.5
			2	0.8	0.403 0.408	0.0221+j0.0107	0
			3	0.8	0.403 0.408	0.0221+j0.0107	0

(2) SVR이 도입된 배전계통의 수용가 전압특성

그림 6은 태양광전원이 연계된 배전계통에 SVR 도입운용에 따른 고압배전선로의 말단구간 수용가에 대한 전압특성

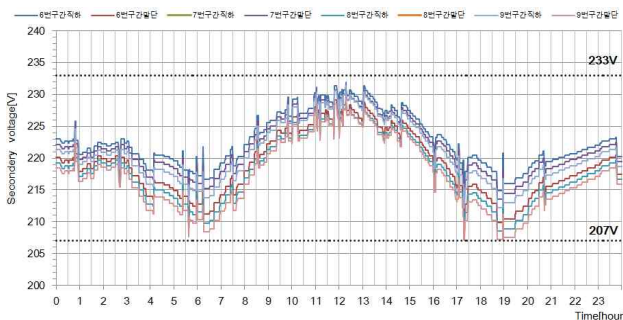
분석한 것이다. 여기에서 전압특성분석 시간은 태양광전원의 출력패턴과 부하패턴을 고려하였다. 시뮬레이션 결과, SVR를 도입한 경우, 태양광발전량에 따른 수용가의 과전압 및 저전압이 모두 해소되어 적정 범위를 유지 하였지만, SVR의 동작지연시간(tsec)동안에는 전압보상이 이루어지지 않아, 완벽하게 규정전압을 유지할 수 없음을 확인하였다.



[그림 6] SVR 운용에 따른 수용가 전압특성

(3) SVR과 BESS가 도입된 배전계통의 수용가 전압특성

그림 7은 태양광전원이 연계된 배전계통에 SVR과 BESS의 도입운용에 따른 고압배전선로의 말단구간 수용가에 대한 전압특성 분석한 것이다. 시뮬레이션 결과, SVR과 BESS가 도입되어 복합적으로 운용되는 경우, 태양광발전량에 따른 수용가의 과전압 및 저전압이 모두 해소되어 적정 범위를 유지 하였고, SVR의 동작지연시간(tsec)동안에 BESS의 충·방전에 따른 전압보상이 이루어져 완벽하게 규정전압을 유지할 수 있음을 확인하였다.



[그림 7] SVR 과 BESS의 협조운용에 따른 수용가 전압특성

5. 결론

태양광전원이 연계된 배전계통에 SVR과 BESS의 협조제어전략을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 태양광발전량에 따른 수용가의 과전압 및 저전압이 모두 해소되어 적정 범위를 유지하였고, SVR의 Tap동작지연시간(tsec)동안에 BESS의 충·방전에

따른 전압보상이 이루어져 완벽하게 규정전압을 유지할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] “분산전원 배전계통 연계기술기준, 한국전력공사” 2005.5
- [2] 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
- [3] B.K. Kim, “Novel voltage control method of the primary feeder by the energy storage system and step voltage regulator,” Energies, vol. 12(17), 3357, pp. 1-18, 2019.