

# 배전계통의 전압안정화를 위한 선로전압조정장치와 전지전력저장장치의 협조제어 알고리즘에 관한 연구

## A Study on the Coordination Control Algorithm of Step Voltage Regulator and Battery Energy Storage System for Voltage Regulation in Distribution System

김 병 기\* · 왕 종 용\* · 박 재 범\* · 최 성 식\* · 유 경 상\*\* · 노 대 석\*  
(Byung-Ki Kim · Jong-Yong Wang · Jea-Bum Park · Sung-Sik Choi ·  
Kyung-Sang Ryu · Dae-Seok Rho)

**Abstract** - In order to maintain customer voltages within allowable limit(220±13V) as much as possible, tap operation strategy of SVR(Step Voltage Regulator) installed in distribution system is very important, considering the scheduled delay time(30 sec) of SVR. However, the compensation of BESS(Battery Energy Storage System) during the delay time of SVR is being required because the customer voltages in distribution system interconnected with PV(Photovoltaic) system have a difficulty to be kept within allowable limit. Therefore, this paper presents the optimal voltage stabilization method in distribution system by using coordination operation algorithm between BESS and SVR. It is confirmed that customer voltage in distribution system can be maintained within allowable limit(220±13V).

**Key Words** : Battery energy storage system, Optimal voltage stabilization method, PV system, Step voltage regulator

### 1. 서 론

최근 정부에서는 차세대 성장 동력 산업의 하나로서 녹색성장 정책을 추진하여, 2030년까지 신재생 에너지전원의 비중을 전체 에너지전원의 11% 정도로 확대하는 보급 사업을 적극적으로 수행하고 있다. 이러한 신재생에너지 전원의 활성화 방안에 따라 지자체와 신재생 에너지 발전사업자를 중심으로 대용량 태양광전원을 배전계통에 활발하게 연계하고 있는 실정이다. 하지만, 태양광전원이 배전계통에 도입되어 운용되는 경우, 급격한 출력변동에 의하여 수용가전압은 규정치를 벗어날 염려가 있다. 이를 해결하기 위하여, 전력회사에서는 태양광전원이 연계된 배전계통에 선로전압조정장치(Step Voltage Regulator)를 도입하고 있다. 하지만 미리 설정된 지연시간(t sec) 이후에 탭이 동작하는 SVR의 특성에 의하여, 이 지연시간동안 수용가전압은 규정치를 벗어날 가능성이 있다[1-5].

따라서 본 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·방전)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 수용가 전압이 안정적으로 유지됨을 알 수 있어, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

### 2. 선로전압조정장치의 제어모드 특성분석

#### 2.1 기존의 선로전압조정장치 제어모드 특성

기존 SVR의 탭 운용은 LDC 정정치에 의하여 계산된 송출전압과 SVR의 기준전압(13200V)을 비교하여 보상율을 구한 후, 이를 이용하여 탭 위치를 결정하게 된다. 예를 들어 SVR의 전압조정범위가 ±10%이고 탭수가 17개 탭이라면, 각 탭간격은 1.25%

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Korea University of Education and Technology, Korea

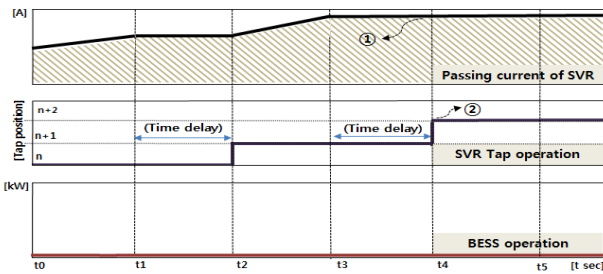
E-mail : dsrho.kut.ac.kr

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

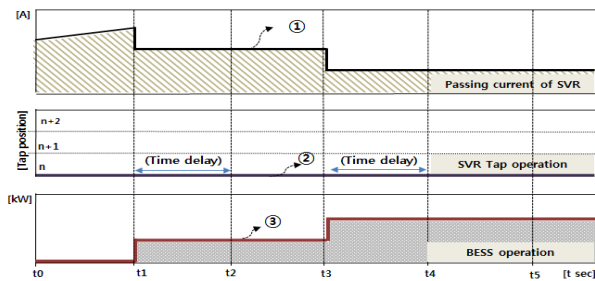
\*\* Korea Institute of Energy Research, Korea

Received : August 12, 2015; Accepted : November 26, 2015

이므로 이를 기준하여 보상율이 구해진다. 또한 SVR의 각 탭은 동작지연시간(Time delay)동안 전압변동분(오차의 적분요소)의 합이 불감대폭(50%)을 벗어나면 동작하게 된다. 이 제어모드로 SVR의 동작 지연시간동안 수송가 전압이 적정치를 벗어나는 경우 BESS가 동작하게 되고, 이에 따라 BESS의 충·방전전류에 의하여 SVR을 통과하는 부하전류 크기가 감소하거나 증가하게 된다. 이 때 부하전류에 응동하여 전압변동분의 합이 불감대폭을 벗어나지 않게 되면, SVR의 탭은 그림 1과 같이 기존의 위치를 유지하게 된다. 따라서 부하변동에 의하여 SVR의 탭이 동작하지 않게 되어, BESS는 계속 동작하게 되고, 이로 인하여 BESS의 도입용량이 증가하는 문제점을 안고 있다. 예를 들어 수송가의 전압을 적정범위 이내로 유지하기 위하여 SVR의 동작지연시간동안 BESS가 운용되는 경우, SVR의 통과전류는 그림 1(a)의 ①과 같이 BESS 도입전의 통과전류에 비하여, 그림 1(b)의 ①과 같이 BESS의 운용에 따라 크기가 증가하거나 감소하게 된다. 이에 따라 계산된 SVR의 최적송출전압 의하여 전압변동분의 합이 불감대폭을 벗어나게 되면 SVR의 탭은 그림 1(a)의 ②와 같이 동작해야하지만 탭은 그림 1의 ②와 같이 동작하지 않게 된다. 그리고 SVR에 의하여 조정되어야 할 전압범위를 BESS가 담당하게 되어, BESS 용량은 ③과 같이 증가하게 된다.



(a) 기존 SVR 제어모드에 의한 탭 운용(BESS 도입 전)  
 (a) Tap operation by existing SVR control mode without BESS



(b) 기존방식에 따른 SVR 제어모드(BESS 도입 후)  
 (b) Tap operation by existing SVR control mode with BESS

그림 1 기존의 SVR 제어모드 의한 BESS운용  
 Fig. 1 Tap operation by existing SVR control mode

2.2 제안한 선로전압조정장치의 제어모드 특성

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 수송가전압에 의하여 BESS가 도입되는 경우, BESS의 운용전류를 고려하지 않고 기존의 부하전류에 의해서만 SVR의 탭이 동작되도록 하는 개선된 제어모드를 제안한다. 구체적으로 이 제어모드에서는 BESS의 운용전류를 계속하여 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 2의 ①과 같이 기존 부하전류만 고려되어, SVR의 탭은 ②와 같이 t2와 t4에서 각각 동작하게 된다. 이에 따라 BESS는 그림 2의 ③과 같이 SVR의 동작지연시간동안에만 운용되어 도입용량이 무한대로 증가하지 않게 된다.

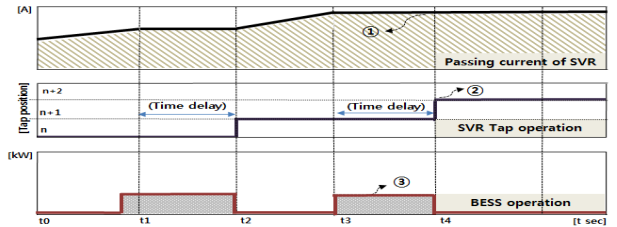


그림 2 제안한 SVR 제어모드에 의한 BESS운용  
 Fig. 2 Tap operation by proposed SVR control mode

3. 선로전압조정장치와 전지전력저장장치의 협조제어 알고리즘

3.1 선로전압조정장치의 탭 동작 알고리즘

각 시간대의 SVR 탭 위치를 결정하기 위하여, SVR의 최적 송출전압과 SVR의 기준전압을 비교하여 탭 위치( $\Delta V_k(t)$ )를 구하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[6-7].

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

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

상기에서 구한 탭 위치에 탭 간격을 곱하면 SVR의 최적보상율이 구해지고, 식 (2)와 같이 각 시간대마다 정수부인  $T_{pi}(t)$ 와 소수부인  $T_{pd}(t)$ 로 나타낼 수 있다.

$$T_p(t) = (T_{pi}(t), T_{pd}(t)) \quad (2)$$

SVR의 탭 동작은 주어진 불감대폭에 따라 결정되는데 일반적으로  $\pm 0.5(50\%)$ 보다 크면 동작하게 되고, 작으면 동작하지 않게 된다. 따라서 식 (3)의 소수부가 불감대폭( $bd = 0.5$ )보다 크면  $T_{pi}(t)$ 에 1 또는 -1이 더해지고, 불감대폭보다 작으면 무시하게 된다.

$$T_p'(t) = \begin{cases} T_{pi}(t) + 1 & \text{if } T_{pd}(t) \geq bd \\ T_{pi}(t) & \text{if } -bd < T_{pd}(t) < bd \\ T_{pi}(t) - 1 & \text{if } T_{pd}(t) \leq -bd \end{cases} \quad (3)$$

한편, SVR의 탭동작은 상기에서 결정된 탭위치( $T_p(t)$ )와 현재 운용되고 있는 SVR 탭위치( $T_{SVR}(t)$ )를 비교하여 결정되는데, 이 조건은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 ( $e_k(t)$ )가 1이 되면 탭동작이 이루어지고, 0이 되면 탭이 운용하지 않음을 의미한다.

$$e_k(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } |T_p'(t) - T_{SVR}(t)| \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $T_{SVR}(t)$  : 현재 운용되고 있는 SVR 탭위치

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

따라서 본 논문에서는 식 (5)와 같이 BESS의 운용(충·방전) 전류를 고려하지 않고 부하전류에 의해서만 SVR의 탭을 동작시키는 제어모드를 제안한다. 즉 이 제어모드에서는 식 (6)과 같이 BESS의 운용전류를 계측하여 SVR의 통과전류에 적용하게 되면, BESS의 운용전류를 제외한 부하전류에 의해서만 SVR의 최적송출전압이 결정된다. 그리고 이 송출전압에 의하여 전압변동분의 합이 불감대폭을 벗어나게 되면 SVR의 탭은 동작하게 되고, BESS는 SVR 시지연 기간 동안에만 운용되어 도입용량이 무한대로 증가하지 않게 된다.

$$Prop V_{send}(t)[V] = V_{ce} + (Prop I_{load}(t)) \times Z_{eq} \quad (5)$$

$$Prop I_{load}(t)[A] = I_{load}(t) \pm I_{BESS,ct}(t) \quad (6)$$

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

### 3.2 전지전력저장장치의 운용 알고리즘

#### (1) 전지전력저장장치의 운용 전략

상기에서 제시한 SVR의 제어모드를 바탕으로 본 논문에서는 수용가전압이 규정범위를 벗어나게 되는 경우, SVR의 시지연 기간 동안 BESS의 충·방전 동작을 수행하는 BESS의 운용 알고리즘을 제안한다. 즉, BESS는 그림 3과 같이 실시간으로 계산된 수용가전압( $V_{cus,i}(t)$ )이 상한치를 초과하게 되면 SVR의 시지연 기간 동안 충전동작이 이루어지게 되고, 하한치 미만으로 되면 방전동작이 이루어지게 된다.

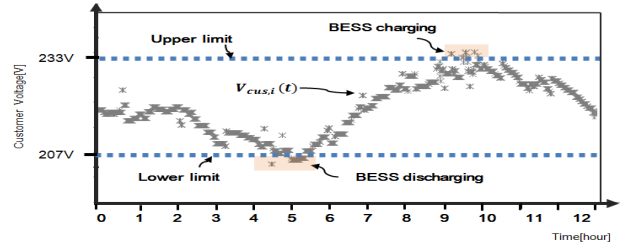


그림 3 수용가의 전압분포특성

Fig. 3 Voltage distribution characteristic of customer

BESS의 충·방전 운용을 결정하기 위하여, 규정범위를 벗어나는 수용가전압을 산출하는 문제는 BESS의 도입전 고압배전선로의 각 구간전압(Guess-seidel method)과, 주상변압기의 탭 전압, 저압선로의 전압강하 그리고 부하율에 의하여 결정되는데, 이들의 관계는 식 (7)과 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{cusd,i}(t)[V] = ((V_i(t)) \times \frac{230}{V_{ptr}}) - V_d \times f_h(t) \quad (7)$$

$$V_{cuse,i}(t)[V] = ((V_i(t)) \times \frac{230}{V_{ptr}}) - V_e \times f_h(t) \quad (8)$$

여기서,  $V_{cusd,i}(t)$  :  $i$ 번째 구간의 직하수용가 전압[V],  
 $V_{cuse,i}(t)$  :  $i$ 번째 구간의 말단수용가 전압[V],  
 $V_{ob}(t)$  : BESS에 의한 전압조정범위  
 $V_d$  : 주상변압기부터 직하수용가까지의 저압선로 전압강하분,  
 $V_e$  : 주상변압기부터 말단수용가까지의 저압선로 전압강하분,  $f_h(t)$  : 부하율

상기 식 (7)과 식 (8)의 수용가전압에 의한 BESS의 충·방전 운용 결정은 수용가전압이 규정치를 벗어나는 경우에 이루어지는데, 이 조건은 식 (9)와 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.

$$\sigma(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } V_{cusd,i}(t) \text{ or } V_{cuse,i}(t) > 233[V] \\ -1 & \text{if } V_{cusd,i}(t) \text{ or } V_{cuse,i}(t) < 207[V] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

여기서,  $\sigma(t)$  : BESS의 운용결정

한편, BESS운용에 의하여 수용가전압을 규정치 이내로 유지시키는 BESS의 전압조정범위( $V_{ob}(t)$ )는 그림 4와 같이 규정범위를 벗어난 수용가전압을 고압측( $Max V_{c,i}$ ,  $Min V_{c,i}$ )으로 환산한 값과 규정전압의 상·하한치( $Upper\ limit$ ,  $Lower\ limit$ )를 고압측으로 환산한 값의 차에 의하여 결정된다. 여기서  $Max V_{c,i}$ 는 규정치를 벗어난 수용가전압 가운데에서 가장 큰 수용가전압을 고압측으로 환산한 값을 의미하고,  $Min V_{c,i}$ 는 규정치를 벗어난 수용가전압 가운데에서 가장 작은 수용가전압을 고압측으로 환산한 값을 의미한다.

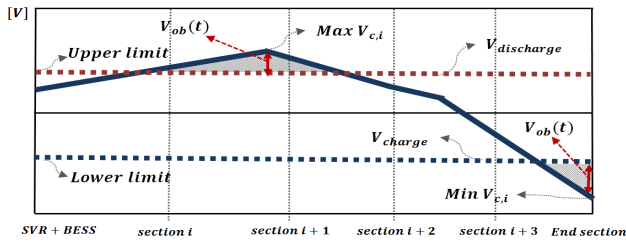


그림 4 BESS의 전압조정범위 개념도

Fig. 4 Concept for Voltage Regulation distribution range of BESS

규정전압의 상·하한치를 고려한 BESS의 충·방전 동작전압은 수용가전압의 규정치와 저압수용가의 직하와 말단까지의 전압강하 그리고 부하율에 의하여 결정되고, 이 전압은 각 대상구간의 주상변압기 탭 전압에 의하여 고압측으로 환산되어지며, 이를 나타내면 식 (10), 식 (11)과 같다.

$$V_{charge}(t)[V] = \{233 + V_d \times f_h(t)\} \times \frac{V_{ptr}}{230} \quad (10)$$

$$V_{discharge}(t)[V] = \{207 + V_e \times f_h(t)\} \times \frac{V_{ptr}}{230} \quad (11)$$

여기서,  $V_{charge}(t)$  : BESS의 충전동작전압,  $V_{discharge}(t)$  : BESS의 방전동작전압

따라서 상기 식 (10)과 식 (11)에서 계산된 BESS의 충·방전 동작전압과, 적정범위를 벗어나는 수용가전압 가운데에서 가장 큰 수용가전압을 고압측으로 환산하여 구간의 전압 차를 구하면 BESS의 전압조정범위( $V_{ob}(t)$ )가 되며, 이는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ob}(t)[V] = \begin{cases} Max V_{c,i}(t) - V_{charge}(t) & \text{if } \sigma = -1 \\ V_{discharge}(t) - Min V_{c,i}(t) & \text{if } \sigma = 1 \end{cases} \quad (12)$$

여기서,  $V_{ob}(t)$  : BESS에 의한 전압조정범위  $V_{ref}(t)$  : BESS의 충·방전 동작기준전압,  $Min V_{c,i}(t)$ :  $Max V_{c,i}(t)$  규정치를 초과한 수용가전압 가운데에서 가장 큰 수용가전압을 고압측으로 환산한 값,  $Max V_{c,i}(t)$ : 규정치를 미만이 수용가전압 가운데에서 가장 작은 수용가전압을 고압측으로 환산한 값

수용가의 규정범위를 벗어나는 고압측 전압은 적정범위를 가장 많이 벗어나는 수용가전압과, 주상변압기의 탭전압, 저압선로의 전압강하 그리고 부하율에 의하여 계산되며, 이는 식 (13)과 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

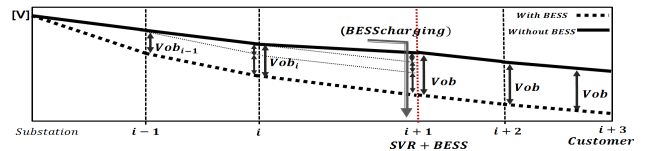
$$Max V_{c,i}(t)[V] = (Max V_{cus,i}(t) + V_d \times f_h(t)) \times \frac{230}{V_{ptr}} \quad (13)$$

$$Min V_{c,i}(t)[V] = (Min V_{cus,i}(t) + V_e \times f_h(t)) \times \frac{230}{V_{ptr}} \quad (14)$$

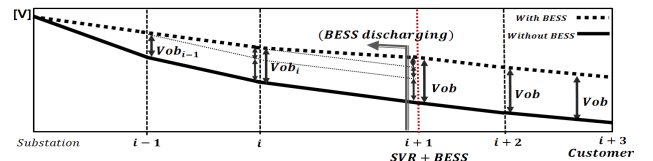
여기서,  $Max V_{cus,i}(t)$  규정치를 초과한 수용가전압 가운데에서 가장 큰 수용가전압,  $Min V_{cus,i}(t)$ : 규정치를 미만이 수용가전압 가운데에서 가장 작은 수용가전압

## (2) 전지전력저장장치의 적정 도입용량 산정

SVR의 동작지연시간동안 수용가전압을 적정범위로 유지하기 위하여, 상기 식 (12)에서 구한 수용가의 전압조정범위에 의하여 BESS의 적정 도입용량을 결정하고, 이 용량크기 만큼 수용가의 전압을 조정하게 된다. 예를 들어 BESS를 충전상태로 운용하면 그림 5(a)와 같이 BESS의 설치점 이전 구간들의 전압강하가 BESS의 전압조정범위만큼 증가하여, 이에 따라 상한치(233V)를 초과한 수용가전압은 규정범위 이내로 유지된다. 또한 BESS를 방전상태로 운용하면 그림 5(b)와 같이 BESS 설치점 이전 구간들의 전압강하가 BESS의 전압조정범위만큼 감소하여, 이에 따라



(a) BESS의 충전상태에 따른 전압조정  
(a) Voltage Regulation by charge mode of BESS



(b) BESS의 방전상태에 따른 전압조정  
(b) Voltage Regulation by discharge mode of BESS

그림 5 BESS의 충·방전 운용에 따른 전압조정

Fig. 5 Voltage Regulation by charge and discharge operation of BESS

하한치(207V)를 벗어난 수용가전압은 규정범위 이내로 유지된다. 즉 BESS의 적정 도입용량은 송출단에서 부터 BESS의 설치구간 까지에 대한 전체 임피던스와 상기에서 결정된 BESS의 전압조정 범위에 의하여 구해질 수 있다.

따라서, BESS의 적정 도입용량을 구하기 위한 구간 임피던스 합은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{total} = \sum_{i=1}^{nb} Z_i \quad (15)$$

여기서,  $L_{drate\ i}$  : 구간  $i$ 의 임피던스 분담율,  $n_B$  : BESS의 도입구간 번호  $Z_i$  : 구간  $i$ 의 선로임피던스

그리고 식 (12)에서 결정된 BESS의 전압조정범위와, (15)에서 구해진 선로임피던스를 곱하면 BESS의 적정 도입용량이 결정되는데, 이는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_B(t) = \frac{V_{ob}(t)}{Z_{total}} \quad (16)$$

여기서,  $I_B$  : BESS의 운용전류

**(3) 전지전력저장장치의 운용 알고리즘**

상기에서 제한한 BESS의 적정용량 결정방식에 의하여 SVR의 어느 한 시지연 기간동안 BESS가 운용되는 절차를 설명하면 하기와 같다.

**[Step 1]** 전압조정이 이루어지지 않는 SVR의 시지연 기간동안 수용가 전압이 규정치를 벗어나는 경우, 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. 이 과정에서 만약 수용가전압이 한 곳이라도 규정치를 벗어나지 않는다면, BESS는 투입되지 않고 시지연 기간 동안 지속적으로 수용가전압의 초과여부를 판단하여 BESS의 동작여부를 결정하게 된다.

**[Step 2]** BESS의 운용이 결정되면 규정범위를 벗어난 수용가전압( $V_{cus, i}(t)$ )과 규정전압의 상·하한치의 차에 의하여 수용가전압을 규정치 이내로 유지시키는 BESS의 전압조정범위( $V_{ob}(t)$ )를 구한다.

**[Step 3]** 전압조정범위에 의하여 BESS의 적정 용량을 결정하고, 이 용량(전류치)크기 만큼 BESS는 충·방전 운용을 수행한다.

**[Step 4]** SVR의 시지연 기간 이후에 BESS는 운용을 정지하게 된다.

따라서 상기에서 설명한 BESS의 운용절차를 나타내면 그림 6과 같다.

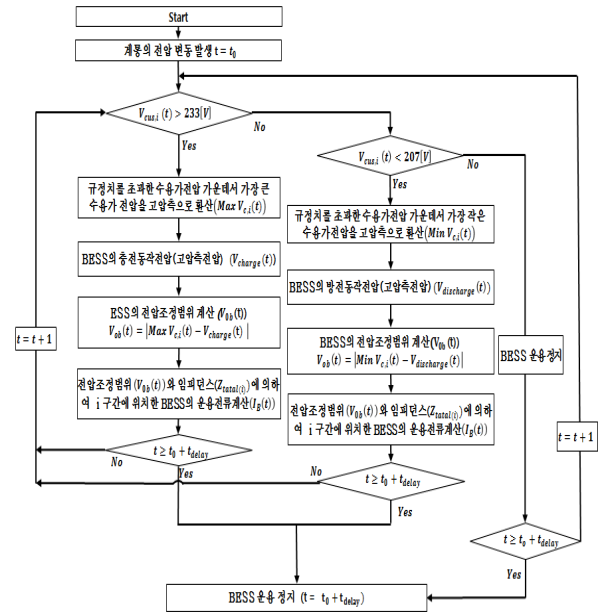


그림 6 BESS 운용 알고리즘  
Fig. 6 Operation algorithm of BESS

**3.3 선로전압조정장치와 전지전력저장장치의 협조제어 알고리즘**

상기에서 제한한 SVR의 운용 알고리즘과 BESS 제어 알고리즘을 바탕으로, 어느 시지연 기간 동안 수용가 전압을 적정범위로 유지시키기 위한 SVR과 BESS의 협조제어를 그림 7과 같이 제한한다. 계통에 전압변동이 발생하여 SVR을 운용하는 경우, 탭 위치는 LDC 정정치에 의하여 계산된 SVR의 최적송출전압과 SVR의 기준전압(13,200V)을 비교한 값으로 결정된다. 이때 최적

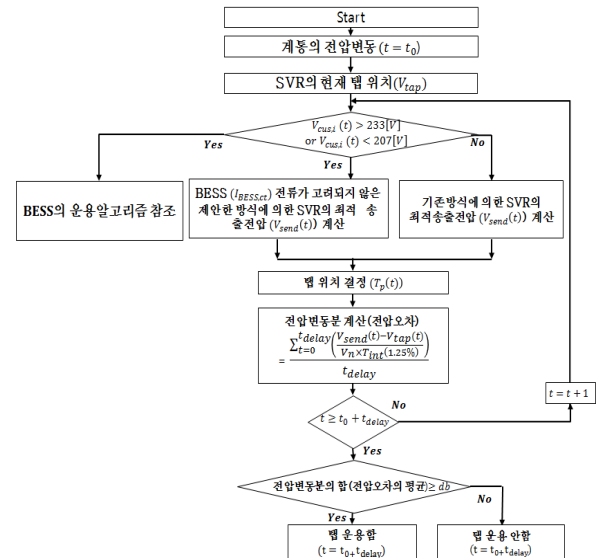


그림 7 SVR과 BESS의 협조제어 알고리즘  
Fig. 7 Coordination control algorithm of SVR and BESS

송출전압은 수용가전압이 규정범위를 벗어나지 않게 되면 기존 부하전류에 의하여 결정되고, 규정범위를 벗어나게 되면 식 (5)와 같이 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. 따라서 상기에서 설명한 SVR과 BESS의 협조제어는 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

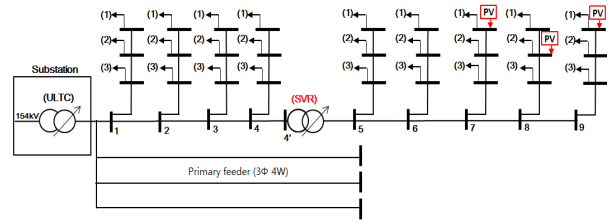


그림 8 태양광전원이 연계된 배전계통 구성도  
Fig. 8 Configuration of distribution system with PV system

#### 4. 시뮬레이션 분석

##### 4.1 시뮬레이션 조건

###### (1) 평가지표

본 논문에서 제안한 운용 방식에 대하여 수용가전압의 개선 효과를 정량적으로 평가하기 위하여, 식 (11)과 같이 평가지표를 이용한다. 즉, 평가지표(PI : Performance Index)는 전체 고찰시간대에 대하여 전체 대상노드의 수용가 전압과 표준전압과의 편차를 제곱의 합으로 나타낼 수 있다.

$$PI(t) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [\{V_{cusd}(t,i) - V_r\}^2 + \{V_r - V_{cuse}(t,i)\}^2] \quad (11)$$

여기서, T : 전체 고찰 시간 n : 구간의 총수,  $V_r$ : 표준전압 (220[V]),  $V_{cusd}(t,i)$ : 각 구간의 직하수용가 전압  $V_{cuse}(t,i)$ : 각 구간의 말단수용가 전압

상기의 지표는 배전계통에 있어서 전체 수용가의 전압분포특성의 수준을 평가하는 것으로, 평가지표가 작으면 작을수록 수용가 전압특성이 양호하다는 것을 나타낸다. 따라서 각 전압조정 방식에 의한 평가지표 값을 비교함으로써, 그 수법자체의 좋고 나쁨을 평가할 수 있다.

###### (2) 시뮬레이션 조건

SVR과 BESS의 도입에 따른 수용가의 전압특성을 분석하기 위하여, 그림 8과 같이 배전선로는 9개의 구간과 9개의 분기선으로 이루어지고, 각 구간의 선종은 부하전류 크기에 따라 ACSR-160mm<sup>2</sup>과 ACSR-95mm<sup>2</sup>로 구성되며, 총 금장은 36.8km로 가정한다. 또한 태양광전원은 7번, 8번, 9번 구간의 분기선에 연계되고, SVR과 BESS는 5번 구간에 도입되는 것으로 가정한다. 그리고 저압 측의 직하수용가 전압은 주상변압기의 내부전압 강하분(1.2%)과 인입선의 전압강하분(2%)을 상정하고, 말단 수용가 전압은 주상 변압기의 내부전압 강하분, 저압 배전선로의 전압강하분(4%), 인입선의 전압강하분을 고려한다. 이에 대한 계통의 상세 데이터는 표 1과 같다.

표 1 배전계통 데이터

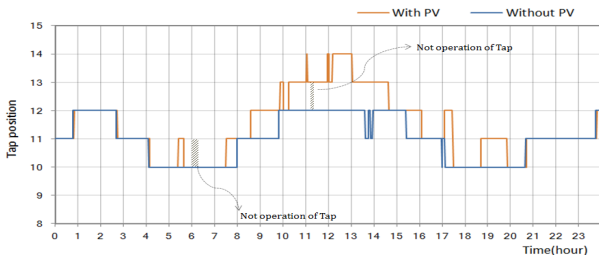
Table 1 Data of distribution system

[1PU: 10MVA]

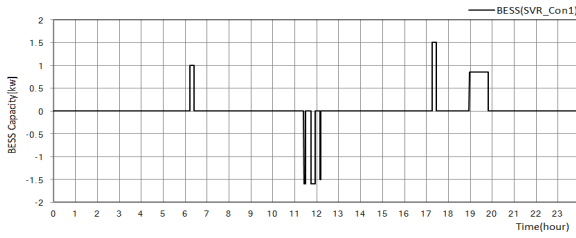
Section Number	Section Impedance		Length (km)	Branch Number	Branch Length (km)	Section Impedance		Load(PI)	PV system (MW)
	R (Ω/km)	X (Ω/km)				R (Ω/km)	X (Ω/km)		
1	0.182	0.391	2	1	0.5	0.403	0.408	0.0032+j0.0015	0
				2	0.5	0.403	0.408	0.0032+j0.0015	0
				3	0.5	0.403	0.408	0.0032+j0.0015	0
2	0.182	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

##### 4.2 선로전압조정장치와 전지전력저장장치의 동작특성

태양광전원의 출력패턴을 고려하여, 0시부터 24시 까지 기존 SVR의 제어모드에 의한 BESS의 동작특성을 분석한다. 여기서 기존 SVR 제어모드에 의하여 BESS가 운용되는 경우, 그림 9(a)와 같이 SVR의 탭은 BESS운용에 의하여 시지연 기간 이후에도

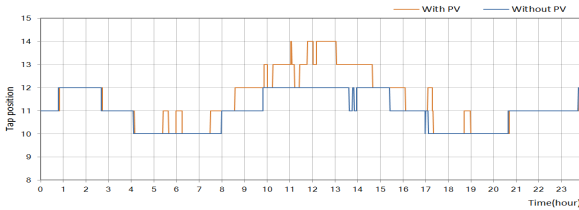


(a) 기존 SVR 제어모드에 의한 탭동작  
(a) Tap operation by existing SVR control mode

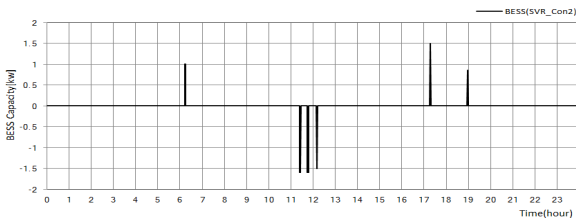


(b) 기존 SVR 제어모드에 의한 BESS 운용  
(b) BESS operation by existing SVR control mode

그림 9 기존 SVR 제어모드에 의한 BESS의 동작특성  
Fig. 9 Operation characteristic of BESS by existing SVR control mode



(a) 제안한 SVR 제어모드에 의한 탭동작  
(a) Tap operation by proposed SVR control mode



(b) 제안한 SVR 제어모드에 의한 BESS 운용  
(b) BESS operation by proposed SVR control mode

그림 10 제안한 SVR 제어모드에 의한 BESS의 동작특성  
Fig. 10 Operation characteristic of BESS by proposed SVR control mode

기존 위치를 유지하게 되고, 이에 따라 BESS의 운용시간은 그림 9(b)의 우측과 같이 증가함을 알 수 있다. 따라서 기존 SVR 제

어모드에 의하여 수용가전압이 규정범위 이내로 만족할 때까지 BESS가 운용되어 BESS의 도입용량이 증가할 수 있음을 알 수 있다.

제안한 SVR의 제어모드에 의하여 BESS가 운용되는 경우, 그림 10(a)와 같이 SVR의 탭은 BESS의 운용전류가 고려되지 않아 시지연 기간 이후에 정확하게 동작 하였고, 이에 따라 BESS는 그림 10(b)와 같이 SVR의 시지연 기간 동안에만 운용되어 도입시간이 기존 방식에 비하여 감소함을 알 수 있다. 따라서 제안한 SVR의 제어모드로 BESS를 운용한다면 도입용량이 무한대로 증가하지 않음을 알 수 있다.

한편, 기존 SVR제어모드와 제안한 SVR 제어모드에 의한 BESS 운용시간을 비교하면 표 2와 같이 제안한 방법으로 BESS를 운용한 경우 기존의 방법보다 약 4320[sec] (방전시: 3720[sec], 충전시: 600[sec]) 만큼의 운용시간이 감소됨을 알 수 있다. 즉 제안한 SVR 제어모드에 의하여 BESS를 운용한다면 도입용량은 약 1/10정도로 감소될 수 있다.

표 2 SVR 제어모드에 의한 BESS의 운용특성

Table 2 Operation characteristic of BESS by SVR control mode

	Discharge	Charge
기존 SVR제어모드(sec)	4080	960
제안한 SVR 제어모드(sec)	360	360
운용시간차 [A-B](sec)	3720	600

### 4.3 전지전력저장장치의 적정 도입용량 결정

SVR 제어모드에 의한 BESS의 운용특성에 의하여 SVR의 탭 위치가 결정되고 수용가전압이 상·하한치(220V± 13V)를 벗어나는 경우, 시지연 기간 동안의 BESS의 적정 도입용량은 그림 11과 같이 최소 1.28MW에서 최대 1.6MW로 결정되어 운용됨을 확인할 수 있다.

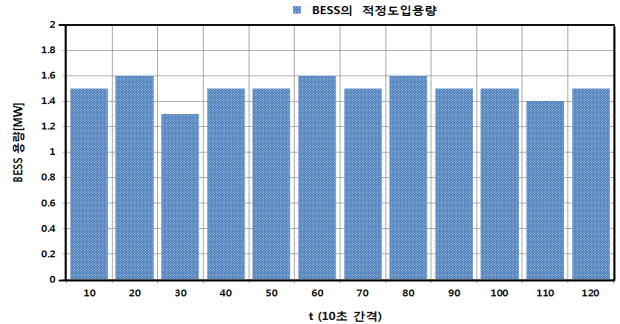


그림 11 시지연기간 동안의 BESS의 적정 도입용량

Fig. 11 Proper introduction capacity of BESS during the time delay of SVR

#### 4.4 선로전압조정장치와 전지전력저장장치의 협조제어에 의한 수용가 전압 특성 분석

##### (1) 선로전압조정장치가 도입된 배전계통의 수용가 전압특성

배전계통에 SVR이 도입되고 태양광전원 연계된 경우, 하루 동안 변화하는 수용가의 전압특성을 분석한다. 상기에서 발생하였던 수용가의 과전압 및 저전압 현상은 그림 11과 같이 SVR 도입에 의하여 모두 해소됨을 알 수 있다. 하지만 SVR의 시지연 기간 동안(120sec)에는 전압조정이 이루어지지 않아, 수용가 전압은 그림 12와 같이 완벽하게 규정치 이내로 유지할 수 없음을 확인 할 수 있다. 따라서 이 시지연 기간 동안 발생하는 수용가의 전압문제를 해결하기 위해서는 BESS의 도입이 필수적임을 알 수 있다.

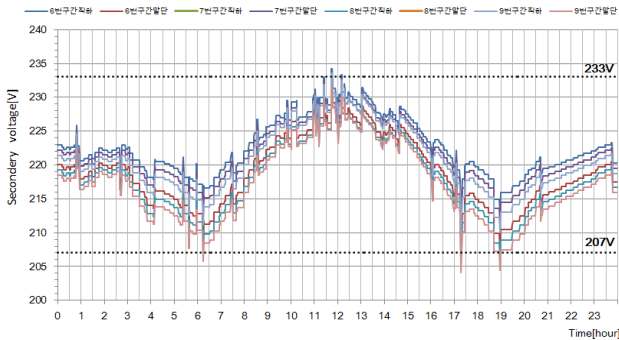


그림 12 SVR 운용에 의한 수용가 전압특성  
Fig. 12 Customer voltage characteristic by SVR operation

##### (2) 선로전압조정장치와 전지전력저장장치의 협조제어에 의한 수용가 전압특성

상기에서 발생된 SVR의 시지연 기간 동안 수용가전압이 규정 범위를 벗어나는 문제점을 해결하기 위하여, BESS를 도입하여 수용가의 전압특성을 분석한 결과, 수용가전압은 그림 13과 같이 과전압 및 저전압이 모두 해소되어 항상 적정 범위로 유지됨을 확인 할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 SVR과 BESS에 의한 협조제어의 유용성이 입증됨을 알 수 있다. 여기에서 BESS의

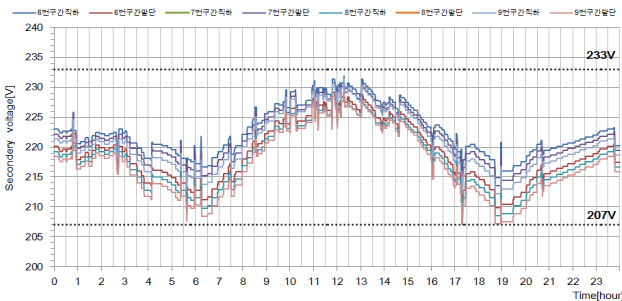


그림 13 SVR과 BESS의 운용에 의한 수용가 전압특성  
Fig. 13 Customer voltage characteristic by SVR and BESS operation

도입위치와 도입용량은 상기의 도입위치 및 적정 도입용량 산정 알고리즘에 의하여 결정된 위치와 용량으로 가정된다.

한편, 태양광전원 연계된 배전계통에서 SVR과 BESS의 도입에 따른 평가지수를 비교하면 그림 14와 같고, 평가지표의 합계를 비교하면 표 3과 같다. 여기에서 평가시간은 24시간으로 이루어지고, 비교방식은 SVR과 BESS가 도입되지 않은 경우, SVR만 도입된 경우 그리고 SVR과 BESS가 도입된 경우로 나누어진다. 따라서 평가지표 분석에 의하여, SVR만 도입된 운용방식보다 SVR과 BESS의 협조제어에 의한 운용방식이 수용가의 전압을 규정치 이내로 유지시킬 수 있음을 알 수 있다.

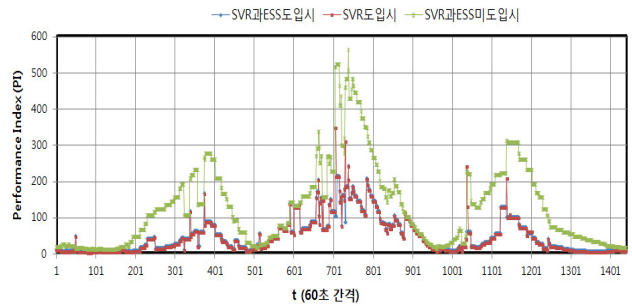


그림 14 시뮬레이션 결과에 대한 평가지수 비교  
Fig. 14 Comparison of performance Index for simulation results

표 3 각 방식의 평가지수 비교

Table 3 Comparison for performance Index of each method

	PV	SVR	SVR+BESS
태양광전원이 연계되지 않은 경우	138873	63353.17	63158.35
태양광전원이 연계된 경우	179058.8	69421.06	67020.46

## 5. 결 론

본 연구에서는, SVR과 BESS의 전압조정방안을 바탕으로, SVR 제어모드에 의한 BESS의 협조제어 알고리즘을 제안하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 지연시간(t sec) 이후에 탭을 동작시키는 SVR의 특성에 의하여, 이 시간동안 수용가전압은 규정치를 벗어날 가능성을 가지고 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 SVR의 동작지연시간동안 BESS의 충·방전에 의하여 전압을 보상하여 안정적으로 전압을 유지할 수 있는 SVR과 BESS의 협조제어 알고리즘을 제안하였다.

(2) BESS가 계통에 도입되어 운용되는 경우에 기존 SVR모드에서는 BESS의 운용전류가 고려된 SVR의 통과전류에 의하여 크



가 증가하거나 감소하여 SVR의 탭이 기존 탭을 항상 유지하게 되어, BESS의 도입용량만 증가하는 문제점이 발생할 수 있다. 하지만 기존의 선행 연구들에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안들이 제시되지 않아 본 논문에서는 BESS의 운용(충·방전)전류를 고려하지 않고 부하전류에 의해서만 SVR의 탭을 동작시키는 새로운 제어모드를 제안하였다.

(3) 제안한 SVR의 제어모드에 의하여 BESS가 운용되는 경우, SVR의 탭은 BESS의 운용전류가 고려되지 않아 시지연 기간 이후에 정확하게 동작 하였고, 이에 따라 BESS는 SVR의 시지연 기간 동안에만 운용되어 도입시간이 기존 방식에 비하여 감소함을 알 수 있었다. 따라서 제안한 SVR의 제어모드로 BESS를 운용한다면 도입용량이 무한대로 증가하지 않음을 확인하였다.

(4) 본 논문에서 제안한 SVR과 BESS의 협조제어 알고리즘에 의하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 수용가에서의 과전압 및 저전압이 모두 해소되어 적정 범위를 유지 하였고, SVR의 시지연 기간 동안에 BESS의 충·방전에 의하여 전압보상이 이루어져 완벽하게 규정전압을 유지할 수 있음을 확인하였다. 또한 평가지표 분석에 의하여, SVR만 도입된 운용방식보다 SVR과 BESS의 협조제어에 의한 운용방식이 수용가의 전압을 규정치 이내로 유지시킬 수 있음을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20131020400720)

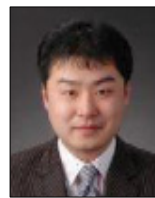
### References

[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] IEEE 1547 "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System", July, (2003)  
 [4] D. Rho and Hasegawa, J, "A study on the optimal voltage regulation methods in power distribution systems interconnected with dispersed energy storage and generation systems", JIEE, Vol. 8, No. 4, pp. 702-707, 1995  
 [5] B. Kim and D. Rho, "Optimal Voltage Regulation Method for Distribution System with Distributed Generation Systems Using the Artificial Neural Net-

works", JEET 2013, Vol. 8, No. 4, pp. 712-718, 2013.

[6] D. Rho and M. Kim, "A study on the Optimal Operation of Line Voltage Regulator (SVR) in Distribution Feeders", 2004 IFAC Symposium, Seoul, South Korea, 2004. 9.  
 [7] M. Kim, D. Rho, J. Kim, K. Kim, "Optimal Operation Method of Multiple Voltage Regulators in Distribution Systems Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems", Trans. KIEE, Vol. 54A, No. 2, 2005. 2.  
 [8] Ljubomir A. Kojovic, "Coordination of Distributed Generation and Step Voltage Regulator Operations for Improved Distribution System Voltage Regulation", IEEE, 2006.  
 [9] Tomonobu Senjyu, Yoshitaka Miyazato, Atsushi Yona, Naomitsu Urasaki, Toshihisa Funabashi, "Optimal Distribution Voltage Control and Coordination With Distributed Generation", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 23, NO. 2, pp. 1236-1242, April 2008.  
 [10] Xiaohu Liu, Andreas Aichhorn, Liming Liu and Hui Li, "Coordinated Control of Distributed Energy Storage System With Changer Transformers for Voltage Rise Mitigation Under High Photovoltaic Penetration", IEEE Transactions Smartgrid, Vol. 3, pp. 897-906, June 2012.

### 저 자 소 개



#### 김 병 기 (Byung-Ki Kim)

1982년 1월 1일생. 2008년 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 2008~2010년 경북직업전문학교 교사. 2015년 8월~현재 한국기술교육대학교 박사후 연구원  
 E-Mail : bkwin100@kut.ac.kr



#### 왕 종 용 (Jong-Yong Wang)

1985년 1월 15일생. 2012년 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업. 2014~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정  
 E-Mail : wangjy2014@kut.ac.kr



**박재범 (Jea-Bum Park)**

1981년 10월 30일생. 2011년 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업. 2014년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

E-Mail : pjbwwkd@kut.ac.kr



**최성식 (Sung-Sik Choi)**

1980년 4월 17일생. 2010년 한국기술교육대학교 정보통신공학과 졸업. 2014년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014~현재 동 대학원 전기공학과 박사 과정 재학 중

E-Mail : immotal1114@kut.ac.kr



**유경상 (Kyung-Sang Ryu)**

1981년 4월 25일생. 2008년 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업. 2013년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년 3월~현재 한국에너지기술연구원 재직 중

E-Mail : ksryu@kier.re.kr



**노대석 (Dae-Seok Rho)**

1962년 2월 21일생. 1985년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 3월 일본 북해도대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년~1998년 한국전기연구소 선임연구원 근무. 1999~현재 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기전공 정교수.

E-Mail : dsrho@kut.ac.kr