

선로전압조정장치(SVR)가 설치된 고압배전선로에서 전기저장장치(ESS)의 최적운용 및 적정용량 산정방안

김병기¹, 유경상¹, 김대진¹, 장문석¹, 고희상¹, 노대석^{2*}

¹한국에너지기술연구원 시스템융합연구실

²한국기술교육대학교 전기전자통신공학부

Optimal Operation Method and Capacity of Energy Storage System(ESS) in Primary Feeders with Step Voltage Regulator(SVR)

Byungki Kim¹, Kyung-Sang Ryu¹, Dae-Jin Kim¹,
Moon-seok Jang¹, Hee-sang Ko¹, Daeseok Rho^{2*}

¹System Convergence Laboratory, Korea Institute of Energy Research

²Electrical Electronics & Communication Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 최근 국가의 3020정책에 따라 신재생에너지전원의 도입이 활발히 이루어지고 있는 상황이다. 하지만 신재생에너지전원 중의 하나인 태양광전원이 대규모로 배전계통에 도입되어 운용될 경우, 태양광전원의 간헐적 특성에 의한 출력변동과 역조류에 의하여 수용가 전압은 규정범위(220V±6%)를 벗어날 수 있는 문제점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위한 방안 중 하나로, 배전선로에 시설된 선로전압조정장치를 이용한 수용가 전압조정 방안이 제안되고 있으나, 기계적으로 동작하는 선로전압조정장치의 특성으로 인하여, 탭 변경 시간동안 수용가의 전압이 규정범위를 벗어날 가능성을 가지고 있다. 이에 본 논문에서는 선로전압조정장치 탭 변경시, 기계적인 특성에 의하여 탭 동작이 지연되는 시간동안 전기저장장치를 도입하여 전압문제를 해결할 수 있는 전기저장장치의 최적운용전략을 제시하고, 파라메타 분석법을 이용하여 선로전압조정장치와 협조하여 운용되는 전기저장장치의 적정위치 및 적정용량 산정방안을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 선로전압조정장치와 전기저장장치의 상호동작에 대한 최적운용 전략과 전기저장장치의 산정 알고리즘을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 선로전압조정장치의 탭 변경 시간동안 수용가의 규정전압(220V±6%) 여부를 검증함으로써, 본 논문에서 제안한 수법이 계통의 전압안정화에 기여할 수 있는 방안임을 확인하였다.

Abstract When a large-scale photovoltaic (PV) system is introduced into a distribution system, the customer's voltage may exceed the allowable limit (220V±6%) due to voltage variations and reverse power flow in the PV system. In order to solve this problem, we propose a method for adjusting the customer voltage using the existing step voltage regulator (SVR) installed in the primary feeder. However, due to the characteristics of a mechanically operating SVR, the customer voltage during the tap changing time of the SVR is likely to deviate from the allowable limit. In this paper, an energy storage system (ESS) with optimal operation strategies, and an appropriate capacity calculation algorithm are proposed, and the parallel driving scheme between the SVR and the ESS is also proposed to solve the customer voltage problem that may occur during the tap changing time of the SVR. The simulation results show that the allowable limit of the customer voltage is verified by the proposed methods during the tap changing time of the SVR when the large-scale PV system is connected to the distribution system.

Keywords : Energy Storage System, Step Voltage Regulator, Primary feeder, Distribution System, Photovoltaic

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(no. 20172410100030)

본 연구는 한국에너지기술연구원 주요사업(B8-2442)을 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

*Corresponding Author : Daeseok Rho (Korea University of Technology and Education)

Tel: +82-10-2306-2213 email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received February 9, 2018

Revised March 28, 2018

Accepted June 1, 2018

Published June 30, 2018

1. 서론

태양광전원이 대규모로 배전계통에 도입되어 운용될 경우, 태양광전원의 출력변동과 역조류에 의하여 수용가 전압은 규정범위($220 \pm 13V$)를 벗어날 수 있다. 따라서 배전계통의 전압품질을 일정수준으로 유지하면서 대용량의 태양광전원을 계통에 안정적으로 연계·보급할 수 있는 기술개발이 요구되어지고 있다[9].

이러한 배경 하에 최근에는 배전 계통의 전압을 적정 범위로 유지하기 위하여 태양광전원이 연계된 장거리 고압 배전선로나 부하변동이 심한 고압 배전선로에 선로전압조정장치(step voltage regulator: SVR)를 도입하여 운용하고 있다. 하지만 SVR은 미리 설정된 지연시간 이후에 탭이 동작하는 특성을 가지고 있기 때문에, 지연시간 동안에 수용가전압은 규정범위를 벗어날 가능성을 가지고 있다.[1-2]. 따라서 본 논문에서는 SVR의 탭 시 지연시간 동안 전기저장장치(Energy Storage System: ESS)에 의하여 수용가전압을 안정적으로 유지시키기 위한 전압안정화용 ESS의 Novel Operation Control Strategy 방안과 도입위치와 적정용량을 결정하는 알고리즘을 제안한다. 구체적으로 수용가전압이 규정범위를 벗어나게 되는 경우, SVR의 시지연 기간 동안 유지되는 고압측 전압 크기에 따라 ESS의 충·방전 동작을 적절하게 수행할 수 있는 최적운용방안인 ESS의 NOCS (Novel Operation Control Strategy, NOCS)와 파라메타 분석법으로 전체 운용시간 동안 ESS의 최적 도입 위치와 용량을 결정하는 방식을 제안한다. 따라서 본 논문에서 제시한 ESS의 운용 전략에 의하여 상시적으로 수용가전압을 안정화시킬 수 있는 ESS의 도입위치 및 적정 도입용량을 산정한 결과, 본 논문에서 제안한 ESS의 NOCS와 ESS의 설치위치를 결정하는 알고리즘이 계통의 전압안정화에 기여할 수 있는 방안임을 확인하였다.

2. 선로전압조정장치와 전기저장장치의 협조운용

2.1 SVR의 운용특성

태양광전원에 의하여 발생하는 전압문제를 해결하기 위한 방안중 하나인 SVR의 운용방식으로는 부하전류에 응동하여 계산된 최적송출전압에 따라 탭을 조정하는 LDC(Line Drop Compensation, LDC) 조정방식, 부하량

과 상관없이 일정한 송출 전압 값을 갖는 일정송출전압 방식 그리고 시간에 의하여 정해진 송출전압을 조정하는 프로그램방식 등이 있다[3-4]. 이 중, 참고문헌 [3]에서는 SVR 운용방식중, 부하전류 증감에 따라 송출전압을 조정하는 LDC운전 방식을 제안하여, 태양광전원에 의한 수용가 과전압현상을 해결하는 연구주제를 다루었다. 하지만 LDC 운전방식으로 SVR을 운용하여도 미리 설정된 시지연 기간 이후에 탭 동작이 이루어지는 SVR의 특성에 의하여, Fig. 1과 같이 계통에서 전압문제가 발생하는 경우, SVR의 탭(tap)이 동작하기 전까지 수용가 전압은 규정치를 벗어날 수 있다.

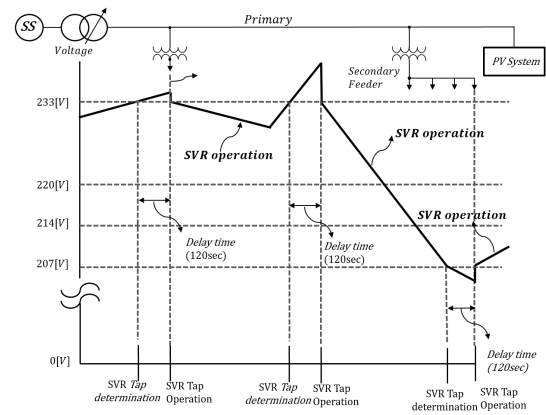


Fig. 1. Voltage regulation method by the SVR

2.2 ESS의 운용특성

최근 전압안정화용 및 주파수 조정용 등을 포함한 계통 보조서비스(Ancillary Service, AS)용도로 적용되고 있는 ESS는 Fig. 2와 같이 계통의 전압과 주파수의 특성에 따라 전력이 증·감발되도록 충·방전을 수행하여, 계통을 안정화시키는 기능을 하게 된다. 하지만, 상기의 기능으로 도입되는 ESS는 리튬이온계열의 배터리가 적용되기 때문에, 기존 연축전지 및 기계식 전압조정장치에 비하여 단가가 높다는 단점을 가지고 있다. 또한 수용가가 밀집되어 있는 배전선로에 전압안정화용으로 ESS를 적용하게 된다면, 집중부하들에 의하여 전압을 조정하기 위한 ESS의 kW 및 kWh 용량이 증가되어 도입비용이 늘어날 수 있다. 따라서 계통 보조서비스 용도로 설치되는 ESS의 도입용량을 최소화시키면서 배전계통의 수용가 전압을 안정적으로 유지시키기 위하여, 본 논문에서는 SVR과 ESS의 협조운용할 수 있는 방안을 제안한다.

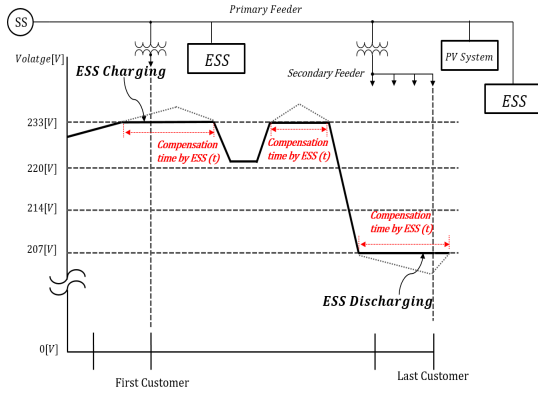


Fig. 2. Voltage Regulation by the ESS

2.3 SVR과 ESS의 협조운용 특성

따라서 본 논문에서는 ESS와 SVR의 협조운용 으로 계통의 수송가 전압을 안정적으로 유지시킬 수 있는 협조운용 방안과, SVR과 협조 운용하는 ESS의 최적 설치 위치와 적정용량 산정방안을 제안한다. 즉 ESS와 SVR 이 결합된 협조운용은 Fig 2와 같이 태양광전원이 도입 된 계통에서 부하전류가 변동하여 수송가 전압이 규정치를 초과하게 되면 SVR의 시 지연기간 동안에만 ESS가 운용되는 방식으로 신재생에너지의 간헐적 특성으로 인한 수송가의 전압문제를 기설된 SVR과 ESS의 운용에 의하여 해결하게 된다[5-6].

또한, 상기의 협조운용시, ESS의 도입위치와 운용용량인 kW/kWh의 결정은 SVR의 이후 모든 구간과 분기선에 ESS를 도입하는 경우에 ESS의 최소용량을 결정하는 방식으로, 이 방식은 ESS의 동작결정용량으로부터 모든 시간대에 대하여 분석된 결과를 바탕으로 산정하게 된다.

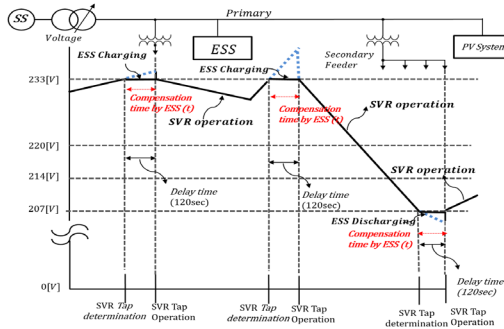


Fig. 3. Voltage Regulation by the SVR and ESS

3. 전기저장장치의 운용전략

3.1 SVR의 Tap 운용

각 시간대의 SVR Tap 위치를 결정하기 위하여, 참고 문헌 [2]에서는 SVR의 최적송출전압과 SVR의 기준전압을 비교하여 목표로 하는 탭 위치를 구하는 방법이 제시되었다[7-8]. 따라서 본 논문에서는 SVR과 ESS의 협조 운용을 위하여 SVR의 목표 탭 위치를 구하는 방식에 대하여 상기의 방법을 적용하였으며, 이를 바탕으로 탭을($Tap_c(t)$)를 구하는 결정식을 수식화하면 식 (1)과 같다.

$$Tap_c(t) = \frac{V_{sending}(t) - V_{svr}}{V_{svr} \times Tap_{int}} \quad (1)$$

여기서, $Tap_c(t)$: 목표로 하는 SVR 탭위치, $V_{sending}(t)$: 최적송출전압, V_n : SVR 기준전압(13,200V), Tap_{int} : SVR Tap 간격(1.25%), t : 시간대

따라서 상기 식으로부터 SVR 탭 위치가 산정되면 SVR의 현재 탭 위치($Tap_{svr}(t)$)와 비교 값에 따라 SVR의 탭 동작여부를 최종적으로 결정하게 되는데, 이 탭 운용 여부에 대한 조건을 식으로 표현하면 식 (2)와 같다. 여기에서, SVR 탭 동작신호 $e_k(t)$ 가 1로 되면 탭 동작이 이루어지고, 0으로 되면 탭이 운용하지 않음을 의미한다.

$$e_k(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } |Tap_c(t) - Tap_{svr}(t)| \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

여기서, $e_k(t)$: SVR의 탭 동작신호 $Tap_{svr}(t)$: 현재 운용되고 있는 SVR 탭 위치

3.2 전압안정화용 ESS의 충·방전운용에 대한

ESS의 Novel Operation Control Strategy

상기의 선로전압장치의 동작 불감대 시간동안 ESS를 동작시키기 위한 용량결정은 수송가전압이 규정치를 벗어나는 경우의 전압크기를 기준으로 ESS의 충·방전 운용에 대한 전류크기로 산정된다. 먼저 식 (3)과 같이 SVR설치 이후 임의의 구간 중에서 저압측의 수송가전압이 한 곳이라도 규정전압을 벗어나는 경우에만 ESS가 동작되도록 운용결정을 하게 된다. 즉 ESS는 수송가전압이 상한치(233V)를 벗어나게 되면 충전동작($E_{oper}(t) = 1$)으로, (207V) 하한치 이하로 유지되면 방

전동작($E_{oper}(t)=1$)으로. 운용이 결정된다. 단 고압선로 측에 설치되는 ESS의 동작을 위해서는 저압선로의 직하 수용가와 말단수용가의 전압이 측정장치에 의하여 실시간으로 데이터를 확인 할 수 있는 상태로 가정된다.

$$E_{oper}(t) = \begin{cases} -1, & V_{customer,i} \text{ if}(t) \geq 233V \\ 1, & V_{customer,i} \text{ if}(t) \leq 207V \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

여기서, $E_{oper}(t)$: ESS의 충·방전 동작결정신호
 $V_{customer,i}(t)$: i 구간의 저압측 수용가 전압,

따라서 ESS는 상기의 3.1에서 제시된 Tap동작 신호 $e_k(t)$ 가 발생하고 식 (3)으로부터 ESS가 운용이 결정되어지는 경우, 최종적으로 SVR의 Tap동작 지연시간동안 ESS가 동작하게 되는데. 이 ESS의 운용에 대한 결정식을 나타내면 식 (4)와 같고, ESS의 동작에 대한 절차를 다이어그램으로 표현하면 Fig. 4와 같다. 단, SVR의 탭이 동작하는 경우에 수용가전압이 규정치 이내를 만족하게 되면 ESS는 동작을 멈추게 된다.

$$\sigma(t) = E_{oper}(t) \times e_k(t) \quad (4)$$

여기서, $\sigma(t)$: ESS의 충·방전동작신호

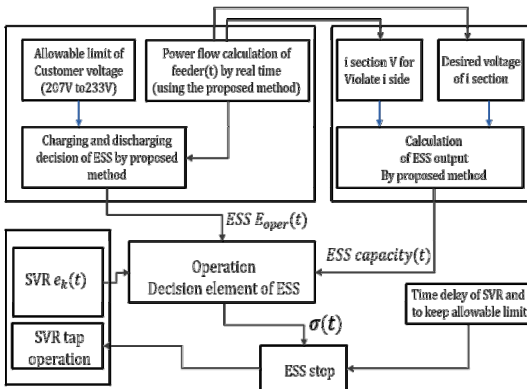


Fig. 4. NOCS method of SVR and ESS for Voltage Regulation

(1) ESS의 전압제어범위 결정

한편, 상기로부터 ESS 충·방전동작신호가 결정되면,

ESS에 의한 전압제어범위 산정해야하는데 범위의 결정 문제는 다음과 같다.

즉, ESS의 운용이 결정되면 수용가전압을 규정치 이내로 유지시키기 위한 ESS의 전압제어범위($V_{con}(t)$)는 식 (5)와 같이 규정범위를 최대로 벗어난 수용가전압을 고압측($Upper V_{c,i}$, $Lower V_{c,i}$)으로 환산한 값과 규정전압의 상·하한치($Upper limit$: $V_{char}(t)$, $Lower limit$: $V_{dis}(t)$)를 고압측으로 환산한 값의 차에 의하여 결정된다. 여기에서 $Upper limit$ 은 충전을 위한 규정전압 $V_{char}(t)$ 를 의미하고 $Lower limit$ 방전을 위한 규정전압 $V_{dis}(t)$ 를 의미 한다.

$$V_{con}(t) = \begin{cases} |Upper V_{c,i}(t) - V_{char}(t)|, & \text{if } \sigma(t) = -1 \\ |Lower V_{c,i}(t) - V_{dis}(t)|, & \text{if } \sigma(t) = 1 \\ |calculation, & otherwise \end{cases} \quad (5)$$

$$V_{char}(t)[V] = \{233 + V_d \times f_h(t)\} \times \frac{V_{ptr}}{230} \quad (6)$$

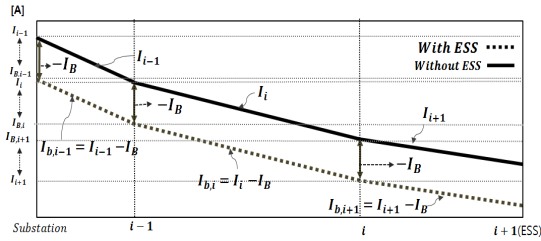
$$V_{dis}(t)[V] = \{207 + V_e \times f_h(t)\} \times \frac{V_{ptr}}{230} \quad (7)$$

여기서, $V_{con}(t)$: ESS에 의한 전압제어범위, $V_{ref}(t)$: ESS의 충·방전 동작기준전압, $Mn V_{c,i}(t)$: $Max V_{c,i}(t)$ 규정치를 벗어난 수용가전압 중 가장 큰 수용가전압을 고압측으로 환산한 값, $Mn V_{c,i}(t)$: 규정치를 벗어난 수용가전압 중 가장 작은 수용가전압을 고압측으로 환산한 값, $V_{char}(t)$: ESS의 충전을 위한 규정전압, $V_{dis}(t)$: ESS의 방전을 위한 규정전압

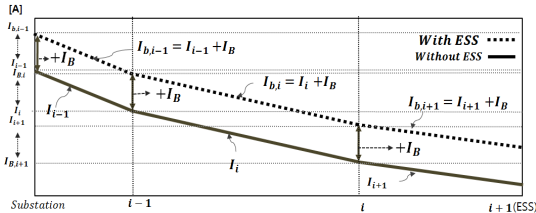
단, ESS의 동작을 위한 규정전압의 기준 상·하한치 ($Upper limit$, $Lower limit$)는 ESS설치 위치에서 가장 가까운 저압선로의 직하수용가와 말단수용가의 전압을 고압측으로 환산한 값으로 결정되는데, 직하수용가 전압은 충전을 위한 규정전압으로 적용되고 말단수용가 전압은 방전을 위한 규정전압으로 가정된다. 즉 해당 전압을 ESS 동작을 위한 고압측 규정전압으로 결정하기 위해서는 상기 식 (6), 식 (7)과 같이 대상구간의 주상변압기 탭 전압과 저압구간의 전압강하 그리고 부하율이 고려된다.

3.2 ESS의 운용용량 결정

일반적으로 ESS의 운용시 각 구간의 부하전류는 Fig. 4와 같이 ESS의 운용전류($I_B(t)$)에 의하여 배전계통에서는 그 크기만큼 감소(방전) 또는 증가(충전)하는 특성을 가지게 된다. 즉 ESS가 방전상태일 경우에는 Fig. 5(a)와 같이 ESS도입위치의 이전구간들에 대하여 ESS 전류($I_B(t)$)가 동일하게 고려되어, 각 구간의 부하전류는 ESS전류크기 만큼 감소하게 된다. ESS가 충전상태일 경우, ESS가 부하역할을 하게 되면 그림 Fig. 5(b)와 같이 송출단에서 ESS의 전류 크기만큼 전류를 더 송출하여, 각 구간의 부하전류는 ESS의 운용전류크기만큼 증가하게 된다.



(a) Current characteristic in grid in case of ESS charging mode



(b) Current characteristic in grid in case of ESS discharging mode

Fig. 5. Current characteristic in grid according to the ESS operation

따라서 ESS의 운용용량은 송출 단에서 부터 ESS의 설치구간까지의 임피던스들의 합과, 상기 식 (5)에서 결정된 ESS의 전압조정범위에 의하여, 결정된다. 단 ESS의 충·방전에 대한 운용범위는 식 (8)에서 결정된다. 단, 615V 전압강하가 발생하는 구간의 후단에 설치되는 SVR의 조건에 의하여 ESS의 운용전류는 고압배전선로의 최대정격전류 252[A]의 50%를 초과하면 안된다는 제약을 가지게 된다.

$$S_{ESS}[VA](t) = \frac{V_{con}(t)}{\sum_{i=1}^{nb} R_i + j \sum_{i=1}^{nb} X_i} \times V_{ESS}(t) \quad (8)$$

$$\text{subj.to } \frac{\text{Primary feeder}[A]}{2} > I_B = \frac{V_{con}(t)}{\sum_{i=1}^{nb} R_i + j \sum_{i=1}^{nb} X_i}$$

여기서, Z_{total} : ESS의 위치까지의 임피던스의 합, n_B : ESS의 도입구간, 구간 i 의 선로임피던스, S_{ESS} : 유·무효 전력이 고려된 ESS의 운용전력범위 V_{ESS} : ESS설치위치에서의 고압측전압. I_B :ESS의 운용 전류

또한 ESS의 운용용량을 낮추기 위하여, 고압선로의 R성분뿐만 아니라 X성분을 이용하여 전압이 보상되도록 ESS의 유·무효분은 식 (9)에 의해서 결정된다. ESS의 전력변환장치에 의하여 무효전력을 발생시키기 위해서는 일반적으로 시스템의 용량을 110% 까지 증가시켜야 하기 때문에, 본 논문에서는 ESS시스템에 의한 유무효 전력의 출력비는 9:1로 가정한다.

$$P_{ESS}[kW](t) = \frac{V_{ob}(t)}{\sum_{i=1}^{nb} R_i} \times V_{ESS} \times \alpha \quad (9)$$

$$Q_{ESS}[VAR](t) = \frac{V_{ob}(t)}{j \sum_{i=1}^{nb} X_i} \times V_{ESS} \times \beta \quad (10)$$

$$\text{Subj.to } S_{ESS} = \sqrt{P_{ESS}^2 + Q_{ESS}^2} \quad (11)$$

여기서, P_{ESS} : ESS의 충방전 유효전력 Q_{ESS} :ESS의 충방전 무효전력, α : PF=0.9 기준의 유효전력비, β : PF=0.9 기준의 무효전력비

4. 전기저장장치의 도입위치 및 도입용량 산정 알고리즘

4.1 ESS의 도입위치 및 kW 도입용량 산정 알고리즘

ESS의 도입용량은 수용가전압이 규정범위를 벗어난 만큼의 전압 크기와 규정범위를 벗어난 수용가 위치에 의하여 결정된다. 이때, 태양광전원의 도입전 수용가의 과전압현상은 Fig. 6과 같이 일반적으로 SVR의 직후구간의 수용가에서 많이 발생 하게 된다. 이에 따라 ESS는

수용가의 전압변동이 많이 발생하는 직하구간 근처에 도입 하는 게 가장 좋지만, 태양광전원이 도입되는 경우, 규정치를 벗어나는 수용가전압의 위치는 Fig. 6에서 4번째 선로와 같이 태양광전원의 연계위치에 의하여 변화하게 된다, 이에 따라 ESS의 최적 도입량을 가지는 도입 위치는 태양광전원의 위치와 용량에 의하여 SVR의 직하가 아닌 임의 구간에서 결정된다.

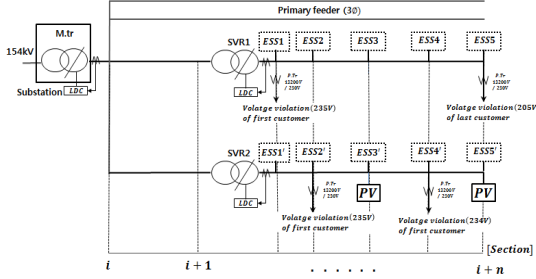


Fig. 6. Concept of Estimation for introduction site and proper capacity of ESS

따라서 본 논문에서는 전장의 ESS의 운용전류 결정 알고리즘을 바탕으로 파라메타 분석법에 의하여 ESS의 전체 운용시간 동안 도입위치를 변경해 가면서 ESS의 적정용량을 산정하는 알고리즘을 제안한다. 그리고 이에 대한 절차를 나타내면 아래와 같다.

[Step 1] SVR의 탭 위치가 결정되고 수용가전압이 상·하한치($220V \pm 13V$)를 벗어나는 경우로 판단되면, ESS는 전압조정범위에 의하여 운용전류를 결정한다.

[Step 2] SVR의 시 지연기간 동안 ESS를 운용전류가 구해지면 이번에는 모든 시간대에 대해서도 상기의 과정을 반복해나간다.

[Step 3] 전체시간대에서 구한 전류 중에서 가장 큰 전류를 해당 ESS의 도입위치에서의 운용전류로 산정하고, 이번에는 도입위치를 변경해 가면서 Step 3 과정을 반복해나간다.

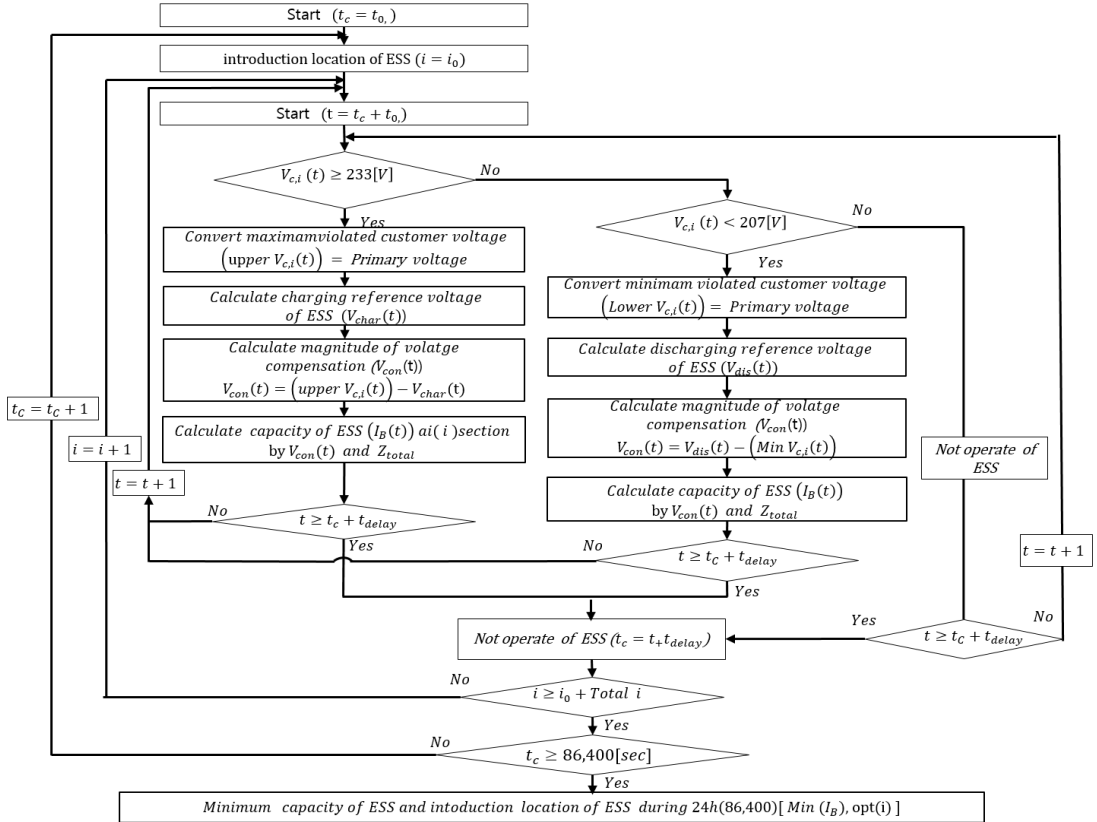


Fig. 7. location determination and capacity estimation Algorithm of ESS

[Step 4] 이번에는 Step 3의 과정을 통해 산정된 운용 전류들 중에서 가장 작은 운용전류를 ESS의 적정 도입용량($Min S_{ESS}$)으로 결정하고, 이 도입위치를 최종적으로 ESS의 도입위치($opt i$)로 결정한다. 단, 무효전력이 고려된 ESS의 적정 도입용량 VA로 표현 되지만 ESS의 도입용량은 PF=1로 기준하여 kW로 재 환산하며, 이 절차들을 순서도로 표현하면 그림 Fig. 7과 같다.

4.2 ESS의 kWh용량 산정알고리즘

계통에서 전압안정화용으로 운용되는 ESS의 도입용량은 상기의 kW 도입용량 뿐만 아니라 충·방전 운용시간을 고려된 kWh 도입용량도 동시에 결정된다. 일반적으로 ESS의 kWh는 충전시간과 방전시간 중에서 가장 큰 시간대가 적용되어 해당 시간동안의 운용되는 용량으로 산정된다. 하지만 계통의 부하전류에 대해서는 정확한 예측이 불가능 하여, ESS가 지속적으로 충전동작 또는 방전 동작만을 수행하는 경우, Fig. 8과 같이 완전 충전상태가 되거나 완전 방전상태에 도달하게 된다.

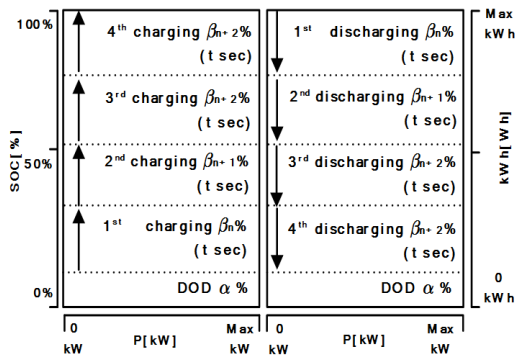


Fig. 8. Capacity characteristic of ESS according to continuously charging and discharging

따라서 본 논문에서는 Fig. 9와 같이 대상기간 동안 ESS의 동작에 따른 누적 충·방전 운용시간에 의하여 ESS의 kWh용량을 산정하는 방식을 제안하며, 이들의 관계는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 ESS의 충전시간과 방전시간은 동일 기준으로 운용된 누적치를 적용한다.

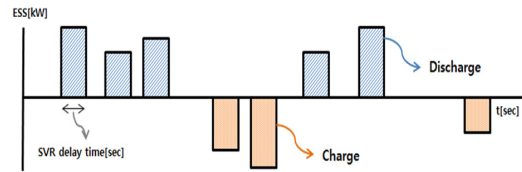


Fig. 9. Concept of ESS operation at the daily ESS

$$Ph_{ESS} [kwh] = \left[\int_{t_o}^{t_s} ESS_{dis}(t) + \int_{t_o}^{t_s} ESS_{char}(t) \right] \times S_{ESS} \times 100 / DOD [\%] \quad (10)$$

여기서, Ph_{ESS} : ESS의 kWh도입용량, $ESS_{dis}(t)$: ESS의 방전운용시간, $ESS_{char}(t)$: ESS의 충전운용시간, S_{ESS} :역률 1인경우의 ESS의 kW도입용량

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 Novel Operation Control Strategy에 의한 SVR과 ESS의 운용특성

(1) 시뮬레이션 조건

NOCS방식이 적용된 SVR과 ESS의 운용특성에 대하여 정확도 및 신뢰성을 검증하기 위하여, Fig.10과 같이 6개의 구간으로 이루어진 고압선로의 말단에 태양광전원을 연계하고, 3번째 구간에는 SVR과 ESS를 도입하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 중부하시를 기준으로 615V의 전압강하를 초과하는 구간부터는 주상변압기의 변압기는 12600 /230 Tap을 적용하였다.

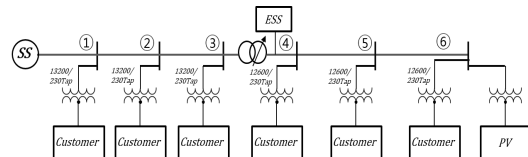


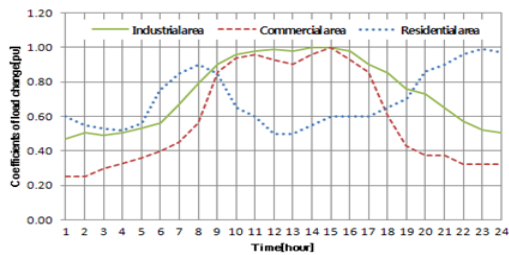
Fig. 10. Configuration of primary feeder

한편 ACSR-160[mm]의 선종을 채택한 배전선로는 총 31[km]의 공장을 6개 구간으로 나누어지며, 이에 대한 상세 데이터는 Table 1에서 나타내었다. 또한 태양광전원과 수용가부하에 대해서도 실제계통과 동일한 패턴으로 모의하기 위하여 Fig. 11와 같이 주거지역을 가정한 부

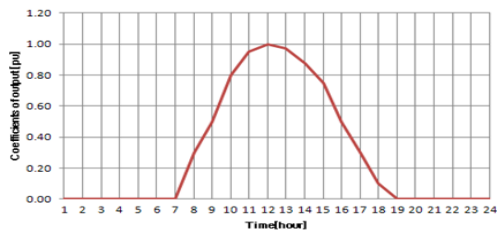
하폐턴과, 가을철 일조량을 기준으로 한 태양광전원의 출력패턴을 시뮬레이션 상에 적용하였다.

Table 1. Data of Primary feeder

Section NO.	Impedance		Length (km)	Power Factor	Load [MW]	PV system (MW)
	R (Ω /km)	X (Ω /km)				
1	0.182	0.391	3	0.9	0.2~0.8	0
2	0.182	0.391	4	0.9	0.2~0.8	0
3	0.182	0.391	3	0.9	0.2~0.4	0
4	0.182	0.391	10	0.9	0.6~1.6	0
5	0.182	0.391	8	0.9	0.8~1.8	0
6	0.182	0.391	3	0.9	0.4~2.0	0~1.6



(a) Load characteristic of customer



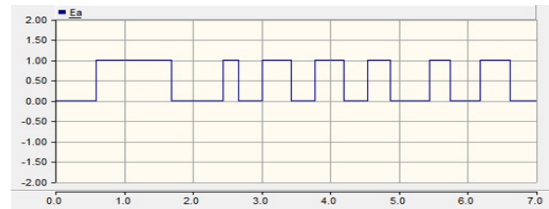
(b) Output characteristic of PV system

Fig. 11. Output pattern of customer power and PV

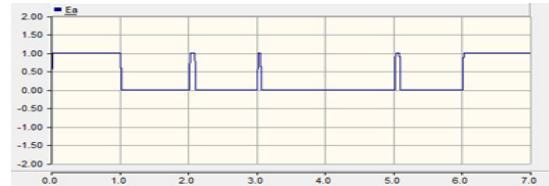
(2) SVR과 ESS의 운용특성

본 논문에서 제안한 Novel Operation Control Strategy를 이용하여 SVR과 ESS의 운용에 대하여 신뢰성을 검증하기 위하여, 상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 PSCAD/EMTDC를 이용하여 SVR과 ESS의 동작특성을 분석하였다. 구체적으로 수용가 전압이 규정치를 초과하는 경우, ESS와 SVR은 Fig. 12의 (a)와 (b)와 같이 SVR의 tap동작신호와 ESS의 운용신호가 발생하게 되면 Fig. 13과 같이 SVR의 Tap이 동작하기 전 까지인 시지연 기간 동안에만 ESS가 운용됨을 확인 하였다. 따라서 상기의 시뮬레이션 결과로부터 본 논문에서 제시한 SVR과 ESS의 Novel Operation Control Strategy의 유용함을

알 수 있었다.



(a) Operation signal of SVR



(b) Operation signal of ESS

Fig. 12. Operation characteristic of SVR and ESS

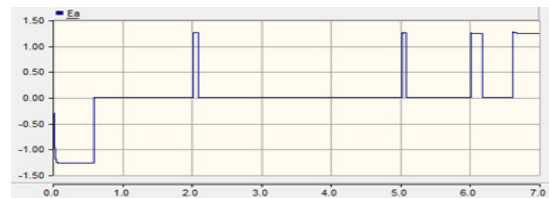


Fig. 13. Charging and discharging operation characteristic of ESS

5.2 ESS의 도입위치 및 적정 도입용량 산정

(1) ESS의 도입위치 및 적정 도입용량 산정을 위한 실 계통 조건

ESS의 도입위치와 이에 따른 적정용량을 결정하기 위하여, 본 논문에서는 Fig. 14와 같이 배전선로는 9개의 구간과 9개의 분기선과 ACSR-160[mm]과 ACSR-95[mm]를 적용한 각 구간의 선중, 36.8[km]의 공장으로 가정하여 시뮬레이션 분석을 수행한다. 또한 태양광전원은 7번, 8번, 9번 구간의 분기선에 연계되고, SVR과 ESS는 5번 구간에 도입되는 것으로 가정한다. 실제 수용가전압에 따른 ESS의 운용용량을 결정하기 위하여, 저압측의 직하수용가 전압은 주상변압기의 내부전압 강하분(1.2%)과 인입선의 전압강하분(2%)을 상정하고, 말단 수용가 전압은 주상 변압기의 내부 전압 강하분, 저압 배전선로의 전압강하분(4%), 인입선의 전압강하분을 고려한다. 이에 대한 계통 및 부하에 대한 상세 데이터는 Table 2과 같다.

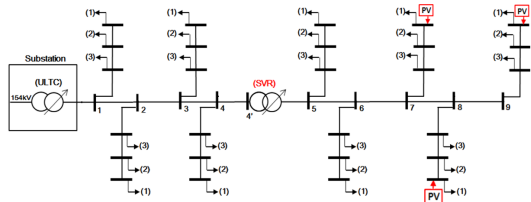


Fig. 14. Configuration of primary feeder with PV system

Table 2. Real data of primary feeder

[1PU: 10MVA]

N no	Section Impedance		L (km)	B no.	B L (km)	Section Impedance		Load (PU)	PV (MW)
	R	X				R	X		
	Ω/km								
1	0.182	0.391	2	1/2/3	0.5/0.5/ 0.5	0.403	0.408	0.0032+ j0.0015	0
2	0.182	0.391	2	1/2/3	0.5/0.5/ 0.5	0.403	0.408	0.0063+ j0.0031	0
3	0.182	0.391	4	1/2/3	0.5/0.5/ 0.5	0.403	0.408	0.0032+ j0.0015	0
4	0.182	0.391	2	1/2/3	0.5/0.5/ 0.5	0.403	0.408	0.0063+ j0.0031	0
5	0.182	0.391	3.3	1/2/3	1/1/1	0.403	0.408	0.0241+ j0.0114	0
6	0.182	0.391	4	1/2/3	0.8/0.8/ 0.8	0.403	0.408	0.0202+ j0.0101	0
7	0.403	0.408	8	1/2/3	0.8/0.8/ 0.8	0.403	0.408	0.0111+ j0.0054	0~2.6
8	0.403	0.408	4	1/2/3	0.8/0.8/ 0.8	0.403	0.408	0.0111+ j0.0054	0~0.8
9	0.403	0.408	7.6	1/2/3	0.8/0.8/ 0.8	0.403	0.408	0.0221+ j0.0107	0~0.5

※ Main : N: section, L: Length, B :Branch

본 논문에서는 전기저장장치의 도입위치 및 적정 도입용량을 산정하기 위하여, 4장에서 제시한 과 ESS의 도입위치 및 도입용량을 산정하는 알고리즘을 바탕으로 고압계통에 태양광전원 도입된 경우, ESS의 도입위치와 적정 도입용량에 대해서 시뮬레이션 평가를 수행하였다. ESS의 용량산정에 있어서 고압계통에 연계된 태양광전원의 최대출력과 도입지점은 Table 3과 같이 가정 된다.

Table 3. Introduction condition of PV system

PV output Type	PV output of Section[7-3]	PV output of Section[8-3]	PV output of Section [9-3]
Case 1	2600kW	800kW	500kW

* Main [Section-branch]

(2) ESS의 도입위치 및 적정 도입용량 산정

5.1의 (2)에서 검증된 제어방식을 바탕으로 ESS의 도

입위치 및 적정용량을 산정하기 위하여, 실 계통조건에서 전체 시간대에 대하여 SVR의 동작특성에 따른 ESS의 운용시간과 용량에 대한 특성을 분석한다. 구체적으로 태양광전원과 수송가전원의 출력 및 부하는 상기 Fig. 11에서 제시한 패턴을 적용하고, 분석을 위한 계통조건은 상기의 실 계통조건을 적용하여, 본 논문에서 제시한 도입위치 및 도입용량 산정 알고리즘에 의하여 ESS의 도입위치 및 적정용량을 산정한다. 제안한 전략에 의하여 시뮬레이션을 수행한 결과 Fig. 15와 같이 전체시간대에 대하여 SVR의 Tap 동작 지역시간동안 ESS는 6회 정도 운용하였고, 용량은 0.8MVA에서 1.6MVA로서, 최대용량은 방전시에 1.6MVA정도 될을 알 수 있었다. 단, 고압계통의 역률에 의하여 ESS의 최대 유효전력은 1.44MW 무효전력은 0.7MVA정도로 운용된다. 단, 전체시간대에 대하여 ESS의 도입용량은 PF=1로 기준하여 1.6MVA를 kW로 재환산한 값인 1.6MW로 산정된다.

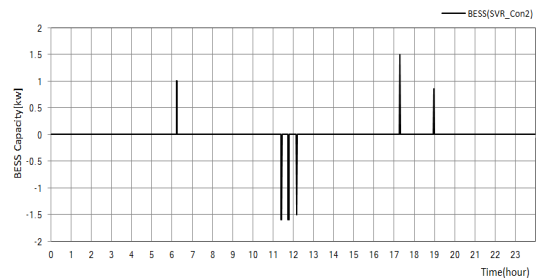


Fig. 15. Capacity characteristic of ESS by the NOCS

상기에서 전체시간대에 대하여 ESS의 도입용량을 산정하였으면, 이번에는 ESS의 도입위치를 변경해가면서 전체시간대 에서의 ESS의 도입용량을 산정한다. 모든 도입위치에서의 ESS의 도입 용량에 대한 특성을 분석하면, ESS의 최소 도입용량은 Fig. 16과 같이 7번 간선의 2번 분기선에서 0.38MW로 결정 된다. 즉 7번 간선의 2번 분기선에 ESS가 도입되었을 때 운용된 용량과 초기 도입위치에서의 ESS도입용량과 크기를 비교해보면 초기 1.6MW에서 0.38MW로서 약 1/4정도 용량이 줄어듬을 알 수 있었다, 따라서, 본 논문에서 제시한 파라미터 분석법에 의한 위치 및 용량결정 알고리즘의 유용성을 가짐을 확인하였다. 또한 논문에서 제안한 알고리즘에 의하여 ESS의 도입위치와 도입용량을 산정한다면, 적은 ESS의 용량으로도 배전계통의 수송가전압을 안정적으로 유지시킬 수 있음을 알 수 있었다.

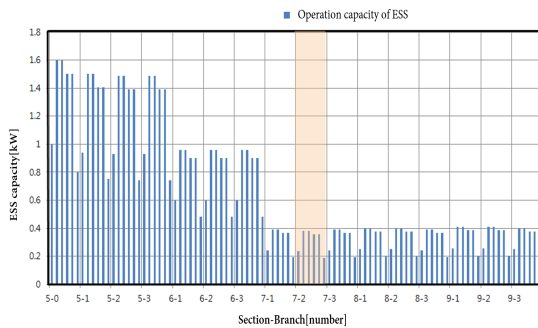


Fig. 16. Determination of ESS kW capacity based on the variable installation site

5.3 ESS의 kWh 도입용량 산정

실 계통에 도입되는 ESS의 용량은 kW용량 뿐 만 아니라 kWh로도 산정되기 때문에 본 논문에서는 ESS의 kWh 산정 방식을 제안하고, 이를 바탕으로 상기에 결정된 ESS의 kW도입용량과 누적 충·방전 운용시간을 고려하여 kWh용량을 산정한다. 본 논문에서 제시한 알고리즘을 바탕으로 ESS의 kWh용량을 산정한 결과, Table 4와 같이 제안한 SVR의 시지연 동작시간에 운용되는 kWh 도입용량은 83.6kWh (0.2h)로 산정되어, 단주기동안에 운용되는 ESS의 kWh용량은 충·방전패턴에 따라 kW도입용량보다 줄어들 수 있음을 됴을 알 수 있다. 따라서, 계통의 전압안정화를 위하여 SVR과 ESS를 조합하여 운용하는 경우, 계통조건에 의하여 설치위치를 고려하고, 운용에 따른 충·방전패턴을 정확히 분석한다면, 일반적으로 ESS에 의해서만 전압안정화를 수행하는 경우보다는 용량이 줄어들어 도입비용에 대한 경제성을 가질 수 있을 수 있음을 확인하였다.

Table 4. kwh introduction capacity of ESS

	kW	kWh / h
ESS introduction capacity	380kW	83.6kWh / 0.2h

6. 결론

논문에서는 SVR의 시 지연 기간동안 최전기저장장치(Energy Storage System: ESS)에 의하여 수용가전압을 안정적으로 유지시키기 위한 전압 안정화용 ESS의 운용전략과 파라미터 분석법에 의하여 ESS의 도입위치

와 적정용량을 결정하는 알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서 제안한 ESS의 Novel Operation Control Strategy에 의하여 SVR과 ESS의 운용에 따른 수용가전압특성을 분석한 결과 수용가전압이 규정치를 초과하는 경우, SVR의 동작하기 전까지 발생하는 전압문제를 ESS가 해소하여, 저압측 전압은 지속적으로 규정치 이내로 유지됨을 알 수 있었다.
- (2) 또한 본 논문에서 제시한 파라미터 분석법에 의한 위치 및 용량결정 알고리즘을 바탕으로 SVR과 연계된 ESS의 도입위치와 도입용량을 결정한다면, 적은 ESS의 용량으로도 배전계통의 수용가전압을 안정적으로 유지시키는데 기여할 수 있음을 확인하였다.
- (3) 따라서 계통의 전압안정화를 위하여 SVR과 ESS를 조합하여 운용하는 경우, 계통조건에 의하여 설치위치를 고려하고, 운용에 따른 충·방전패턴을 정확히 분석한다면, 일반적으로 ESS에 의해서만 전압안정화 하는 경우보다는 용량이 줄어들어 도입비용에 대한 경제성을 가질 수 있을 수 있음을 확인하였다.

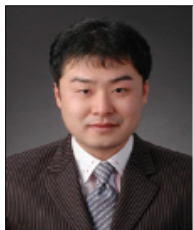
References

- [1] 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
- [2] Miyoung Kim, Hara, R.; Kita, H., "Design of the Optimal ULTC Parameters in Distribution System With Distributed Generations", *Power Systems, IEEE Transactions*, pp. 297-305, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.2004830>
- [3] Byungki Kim, Seungtaek Oh, Daeseok Rho, Eynsang Kim, Younpeel Wang "A Study on the Control Method of Customer Voltage Variation in Distribution System with PV Systems", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2015.10.3.838>
- [4] Byung-Ki Kim, Seung-Taek Oh, Jae-Bum Park, Seong-jo Ji, Soo-Young Park, Gi-Yeong Kim, Dae-Seok Rho, "Optimal Operation Method of Step Voltage Regulation Primary Feeder with PV Systems", *The 20th International Conference on Electrical Engineering*, pp. 366-371, 2014.

- [5] C. Chen, "The Effect of Voltage Control to Efficiency and Operation of Electric Distribution Systems", Ph.D. Thesis, University of Texas at Arlington (1982)
- [6] Daeseok Rho, "Optimal Operation Method for Voltage Regulator in Primary Feeder with Distributed Generators", *Journal of KAIS*, Vol. 12, No. 6, pp. 2698-2706, 2011. 6
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.6.2698>
- [7] C. Chen, "The Effect of Voltage Control to Efficiency and Operation of Electric Distribution Systems", Ph.D. Thesis, University of Texas at Arlington (1982)
- [8] Lin C. E., Shiao Y. S., Huang C. L. and Sung P., "Design Consideration and Economical Evaluation Battery Energy Storage System", 92 IEEE PESSummer Meeting, Paper # 92 SM 431-7 PWRs, Washington, July 1992
- [9] Chae-Hyun Jung,, Sung-Min Han, Jong-Gyun Baek, Kook-Joo Lee, Chang-Hyun Park, Jun-Beom Kwon, A Study on Development of the High-Power Low-Loss Waveguide Circulator for Ka-band Millimeter-Wave Seeker, *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)*, vol. 17, no. 6, pp. 83-88, Dec. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.6.83>

김 병 기(Byungki Kim)

[정회원]



- 2008년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업(공학사)
- 2012년 2월 : 동대학원 전기전자통신공학과 졸업(공학석사)
- 2015년 8월 : 동대학원 전기전자통신공학과 졸업(공학박사)
- 2016년 10월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원/선임연구원 재직중

<관심분야>

배전시스템 운용, 분산전원 연계, 전력품질 해석

유 경 상(Kyung-Sang Ryu)

[정회원]



- 2007년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업(공학사)
- 2013년 2월 : 동대학원 전기전자통신공학과 졸업(공학석사)
- 2017년 12월 : 제주대학교 전기공학과 박사수료
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원/연구원 재직중

<관심분야>

배터리 운용관리시스템, EMS, 분산전원 연계기술, 배전계통 신뢰성평가

김 대 진(Dae-Jin Kim)

[정회원]



- 2007년 2월 : 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학과 졸업(공학사)
- 2009년 9월 : 동대학원 메카트로닉스공학과 졸업(공학석사)
- 2009년 9월 : 동대학원 박사과정 재학중
- 2009년 8월 ~ 2014년 6월 : 대우조선해양 풍력연구소
- 2010년 6월 ~ 2013년 12월 : 독일 Dewind 풍력제어시스템
- 2014년 7월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원/선임연구원 재직중

<관심분야>

제어시스템설계 및 Power-Hardware-In-Loop Simulator

장 문 석(Moon-Seok Jang)

[정회원]



- 1984년 2월 : 한양대학교 기계공학과 졸업(공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사)
- 1994년 2월 : 동대학원 기계공학과 졸업(공학박사)
- 1994년 8월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원/책임연구원 재직중

<관심분야>

마이크로그리스 시스템, 에너지관리시스템 운용

고 희 상(Hee-Sang Ko)

[정회원]



- 1996년 2월 : 제주대학교 전기공학과 졸업(공학사)
- 2000년 2월 : Pennsylvania State 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
- 2006년 12월 : Univ. of British Columbia 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(공학박사)
- 2006년 12월 ~ 2007년 7월 : 캐나다 PowerTech Lab. 연구원
- 2000년 3월 ~ 2013년 3월 : 삼성중공업 풍력발전사업부 파트장
- 2013년 4월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원/선임연구원 재직중

<관심분야>

마이크로그리스 시스템, 에너지관리시스템 운용, 전력계통 안정도, 제어시스템 설계

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 졸업(공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원

- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과 정교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석