

전기저장장치를 이용한 태양광전원이 연계된 배전계통 수용성향상 방안에 관한 연구

A Study on the Large-scale Adoption Method of Distribution System Interconnected with PV System by Energy Storage System

남 양 현* · 최 성 식* · 강 민 관* · 이 후 동* · 박 지 현* · 노 대 석*

(Yang-Hyun Nam · Sung-Sik Choi · Min-Kwan Kang · Hu-Dong Lee · Ji-Hyun Park · Dae-Seok Rho)

Abstract - If large-scale PV systems are continuously interconnected to distribution system, customer voltages could violate the allowable voltage limit($220\pm 13V$) according to reverse power flow of PV system. In order to solve these problems, this paper proposes flexible adoption evaluation algorithm of PV system in distribution system which estimates proper introduction capacity and location of ESS(energy storage system) for keeping customer voltages within allowable voltage limit based on various operating scenarios related with connecting point and capacity of PV system. And also this paper proposes modeling of ESS, SVR(step voltage regulator) and PV system using PSCAD/EMTDC S/W and analyzes characteristics of customer voltages and the adoption ability of PV system in distribution system. From the simulation results, it is confirmed that proposed algorithm is useful for large-scale adoption of PV system in distribution system to maintain customer voltages within allowable voltage limit.

Key Words : PV System, ESS, Distribution System, SVR, Customer Voltage, Large-scale adoption evaluation algorithm

1. 서 론

최근, 정부에서는 기후변화와 미세먼지 등에 의한 환경문제로 인하여 석탄 발전원의 비중을 줄이고, 태양광전원 및 풍력발전 중심의 신재생에너지전원을 확대하는 정책을 시행하고 있다. 또한, 기존의 태양광전원의 수용한계를 없애고 1MW 이하의 태양광전원을 무제한으로 접속을 허용하여, 대용량 태양광전원이 배전계통에 연계되고 있는 실정이다. 하지만, 대용량의 태양광전원이 배전계통에 도입되어 운용될 경우, 태양광전원의 급격한 출력 변동성으로 인해 배전계통 운용의 불확실성이 증가하게 된다. 특히, 낮 시간대에 태양광전원의 출력이 부하소비량보다 많을 경우, 배전계통의 역조류 현상이 발생하여, 태양광전원 연계지점의 수용가전압이 규정전압범위($220\pm 13V$)를 벗어나게 될 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 배경에서 전기저장장치(energy storage system: ESS)를 신재생에너지전원의 급격한 출력변동성에 대한 전압안정화 방안으로 활용하고, 배전계통에서 태양광전원의 수용성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-5].

따라서 본 논문에서는 대용량 태양광전원이 배전계통에 연계될 경우, 전기저장장치에 의한 태양광전원의 배전계통 수용성 향

상을 위한 평가알고리즘을 제시한다. 구체적으로, 태양광전원의 연계구간 및 용량 등의 다양한 운용 시나리오에 기반하여, 수용가의 규정전압범위 이내로 유지시키는 적절한 전기저장장치의 도입용량과 도입구간을 산정한다. 또한 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 양방향으로 유·무효전력을 제어할 수 있는 전기저장장치와 일정전압송출방식의 선로전압조정장치(step voltage regulator: SVR), 대규모의 태양광전원 등으로 구성된 복합배전계통 모델링을 제안하고, 이를 바탕으로 대용량의 태양광전원이 연계된 배전계통에서 선로조정장치 유·무에 따른 수용가전압 특성을 분석하였다. 제안한 배전계통의 수용성 평가알고리즘 및 모델링에 의하여, 수용가전압을 규정범위 이내로 유지시키는 전기저장장치의 적정 도입용량과 도입구간을 산정하여, 본 논문의 유용성을 확인하였다.

2. 태양광전원 연계 시 배전계통의 문제점 분석

대용량 태양광전원은 기후조건(일사량, 온도)에 따라 급격한 출력변동이 발생하여, 배전계통의 적절한 전압관리에 어려움을 겪고 있다. 또한, 태양광전원의 출력은 기존의 전력 조류와 달리 역방향으로 공급될 가능성이 있어서 수용가의 전압관리에 어려움을 더하고 있다[6-7]. 그림 1은 태양광전원의 연계상황에 따른 수용가의 전압변동을 나타낸 것이다. 그림 1의 a는 태양광전원이 연계되기 전의 전압변동 특성이며, 그림 1의 b는 태양광전원이 연계된 후의 전압변동 특성이다. 여기서, 그림 1의 a는 배전선로의 전압강하로 인해 수용가측 전압이 일반적으로 감소하는 특성

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education, Korea
E-mail: dsrho@kut.ac.kr

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

Received : May 3, 2018; Accepted : June 28, 2018

을 나타낸 것이고, 그림 1의 b는 대용량 태양광전원이 배전계통에 연계되어 태양광전원의 발전량에 의하여 수용가측 전압이 상승함을 나타내고 있다. 따라서, 태양광전원의 연계지점 근처의 수용가전압이 규정전압의 상한치를 벗어날 가능성이 있어, 배전계통의 전압 안정도가 저하될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 선로전압조정장치와 전기저장장치를 도입하여, 배전계통의 전압 안정도를 높이고, 태양광전원의 수용성을 향상시키는 방안이 제시되고 있다.

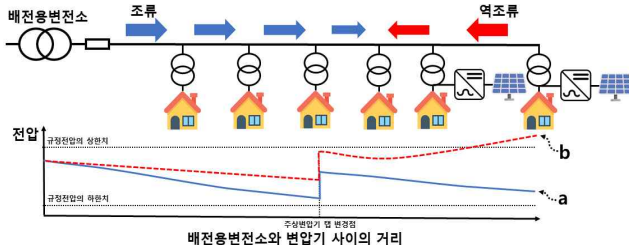


그림 1 태양광전원의 연계조건에 따른 수용가전압 특성
 Fig. 1 Customer voltages depending on connection condition of PV system

3. 전기저장장치에 의한 태양광전원의 배전계통 수용성 평가알고리즘

3.1 전기저장장치의 용량산정 알고리즘

주상변압기 2차측의 직하 및 말단 수용가전압은 식 (1)과 식 (2)와 같이 고압배전선로의 전압과 주상변압기의 1차측 탭 전압, 저압선로의 전압강하 그리고 부하율에 의하여 결정된다.

$$V_{f_c,s(n)}(t) = (V_{pri,s(n)}(t) \times \frac{230}{V_{tap}}) - V_d \times f_h(t) \quad (1)$$

$$V_{l_c,s(n)}(t) = (V_{pri,s(n)}(t) \times \frac{230}{V_{tap}}) - V_e \times f_h(t) \quad (2)$$

여기서, $s(n)$: n번째 구간, $V_{f_c,s(n)}(t)$: n번째 구간에서의 직하수용가 전압, $V_{l_c,s(n)}(t)$: n번째 구간에서의 말단수용가 전압, $V_{pri,s(n)}(t)$: n번째 구간에서의 1차측 전압, V_{tap} : 주상변압기의 1차측 탭 전압, V_d : 주상변압기부터 직하수용가까지의 저압선로 전압강하, V_e : 주상변압기부터 말단수용가까지의 저압선로 전압강하, $f_h(t)$: 부하율

ESS의 충·방전 모드의 결정은 식 (1)과 식 (2)를 바탕으로 수용가전압이 규정전압범위를 벗어나는 경우에 이루어지는데, 충·방전 동작은 식 (3)의 조건에 따라 결정된다. 즉, 수용가전압이 상한치(233V)를 초과하게 되면 ESS는 충전동작($\delta(t) = -1$)을 수행하고, 하한치(207V)를 벗어나면 방전동작($\delta(t) = 1$)이 이루어진다.

$$\delta(t) = \begin{cases} -1 & \text{if } V_{f_c,s(n)}(t) > 233V \text{ or } V_{l_c,s(n)}(t) > 233V \\ 1 & \text{if } V_{f_c,s(n)}(t) < 207V \text{ or } V_{l_c,s(n)}(t) < 207V \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, $\delta(t)$: ESS의 충·방전 동작 모드

한편 상기의 직하와 말단 수용가의 전압에서 규정전압범위를 가장 많이 벗어난 수용가전압을 주상변압기의 탭 전압과 저압선로의 전압강하, 부하율을 고려하여 고압측으로 환산하면, 식 (4)와 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{pri,max}(t) = (V_{f_c,max}(t) + V_d \times f_h(t)) \times \frac{V_{tap}}{230} \quad (4)$$

$$V_{pri,min}(t) = (V_{l_c,min}(t) + V_e \times f_h(t)) \times \frac{V_{tap}}{230} \quad (5)$$

여기서, $V_{pri,max}(t)$: 규정치를 벗어난 수용가전압 가운데에서 가장 큰 수용가전압을 고압측으로 환산한 값, $V_{pri,min}(t)$: 규정치를 벗어난 수용가전압 가운데에서 가장 작은 수용가전압을 고압측으로 환산한 값, $V_{f_c,max}(t)$: 모든 구간에 대하여 규정전압범위를 가장 큰 값으로 벗어난 직하수용가전압, $V_{l_c,min}(t)$: 모든 구간에 대하여 규정전압범위를 가장 작은 값으로 벗어난 말단수용가전압

한편, 규정전압의 상·하한치를 고려한 ESS의 충·방전 동작전압은 식 (6)과 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 수용가전압의 상·하한치와 저압수용가의 직하와 말단까지의 전압강하, 부하율을 고려하여, 저압측의 ESS 충·방전 동작전압이 결정되고, 주상변압기 탭 전압에 의하여 고압측으로 환산된다.

$$V_{ch}(t) = \{233 + V_d \times f_h(t)\} \times \frac{V_{tap}}{230} \quad (6)$$

$$V_{dis}(t) = \{207 + V_e \times f_h(t)\} \times \frac{V_{tap}}{230} \quad (7)$$

여기서, $V_{ch}(t)$: ESS의 충전 동작전압, $V_{dis}(t)$: ESS의 방전 동작전압

식 (4)와 식 (5)에서 구한 직하 및 말단 수용가를 고압측으로 환산한 값과 식 (6)과 식 (7)에서 구한 ESS의 충·방전 동작전압을 비교하여, 충전시의 ESS 전압조정범위는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있고, 방전시의 ESS 전압조정범위는 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 두 운전모드 가운데 큰 ESS의 전압조정범위를 구하면 식 (10)과 같다. 여기서, $V_{con}(t)$ 을 구하기 위하여 배전계통의 제반운용조건은 피크부하시를 기준으로 상정하고, 가능하면 최악의 시나리오를 대상으로 한다.

$$V_{con,ch}(t) = V_{pri,max}(t) - V_{ch}(t) \quad \text{if } \delta(t) = -1 \quad (8)$$

$$V_{con,dis}(t) = |V_{pri,min}(t) - V_{dis}(t)| \quad \text{if } \delta(t) = 1 \quad (9)$$

$$V_{con}(t) = \text{Max}\{V_{con.ch}(t), V_{con.dis}(t)\} \quad (10)$$

여기서, $V_{con.ch}(t)$: 충전시의 ESS 전압조정범위, $V_{con.dis}(t)$: 방전시의 ESS 전압조정범위, $V_{con}(t)$: ESS의 전압조정범위

따라서, 태양광전원이 대용량으로 배전계통에 연계되는 경우, 수용가의 규정전압 범위를 만족시키기 위한 전기저장장치의 적정 도입용량은 식 (10)에서 구한 전기저장장치의 전압조정범위까지 도입구간별로 전기저장장치의 용량을 순차적으로 증가시키며 산정한다. 즉, 규정전압 범위를 가장 많이 벗어난 수용가전압이 규정전압 범위 이내를 만족하기 위한 전기저장장치의 용량을 산정한다.

3.2 태양광전원의 배전계통 수용성 평가알고리즘

배전계통에서 태양광전원의 연계위치나 연계용량에 따라, 수용가전압이 규정전압 범위를 벗어나게 되어, 배전계통의 태양광전원 수용성이 저하될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 태양광전원의 연계구간 및 용량 등의 다양한 운용 시나리오에 기반하여, 수용가의 규정전압 범위를 만족시키는 적절한 전기저장장치의 도입용량과 도입구간을 산정하는 배전계통 수용성 평가알고리즘을 제시한다. 이에 대한 자세한 평가절차는 다음과 같다.

[Step 1] 선로의 종류, 선로의 길이, 부하량, SVR의 설치 유·무 등의 배전계통 데이터를 입력한다. 또한, 중부하시의 부하량을 고려하여 주상변압기 탭을 산정한다.

[Step 2] 전기저장장치의 kWh 도입용량($C_{ESS,s_b(n)}$) 및 태양광전원의 도입구간($s_{pv}(n)$)을 초기값으로 설정한다.

[Step 3] 태양광전원의 용량(P_{pv})을 초기값으로 설정한다.

[Step 4] 전기저장장치의 도입구간($s_b(n)$)을 초기값으로 설정한다.

[Step 5] 시뮬레이션 시간대(t)를 초기값으로 설정한다.

[Step 6] 전기저장장치의 kWh 도입용량($P_{ESS,s_b(n)}$)을 초기값으로 설정한다.

[Step 7] 시뮬레이션 시간대(t)가 최대 시간대(t_{max})보다 크면, [Step 13]으로 넘어간다.

[Step 8] 모든 수용가 구간($s_c(n)$)에 대하여, 태양광전원의 용량과 전기저장장치의 도입용량을 고려한 수용가전압을 계산하고, 모든 구간에 대하여 규정전압 범위를 가장 크게 벗어난 주상변압기 2차측 직하 수용가전압($V_{fc,max}(t)$)을 산정한다.

[Step 9] [Step 8]에서 산정한 직하 수용가전압($V_{fc,max}(t)$)이 규정전압 범위의 상한치($V_{upperlimit}$)를 벗어나지 않으면, [Step 7]로 돌아간다.

[Step 10] [Step 9]에서 산정한 직하 수용가전압($V_{fc,max}(t)$)이 규정전압 범위의 상한치($V_{upperlimit}$)를 벗어나면, 이 수용가전압이 규정 전압범위 이내에 들어오도록 ESS의 전압조정범위($V_{con}(t)$)에 상응하는 전기저장장치의 kWh 도입용량($P_{ESS,s_b(n)}$)을 산정한다.

[Step 11] 상기의 [Step 10]에서 구한 전기저장장치의 kWh 도입용량을 적분하여, 전기저장장치의 kWh 도입용량($C_{ESS,s_b(n)}$)을 산정한다.

[Step 12] 전기저장장치의 모든 도입구간에 대하여 최소의 전기저장장치 kWh, kWh 용량을 적정 도입용량으로 산정하고, 그 값을 갖는 구간을 적정 도입구간으로 결정한다.

[Step 13] 태양광전원의 연계용량이 최대용량($P_{pv,max}$)보다 작은 경우, 태양광전원의 용량을 단계별로 증가시켜 [Step 4]로 돌아간다. 한편, 모든 구간에 대하여 태양광전원을 상정하여 상기의 절차를 반복한다.

따라서 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 그림 2와 같다.

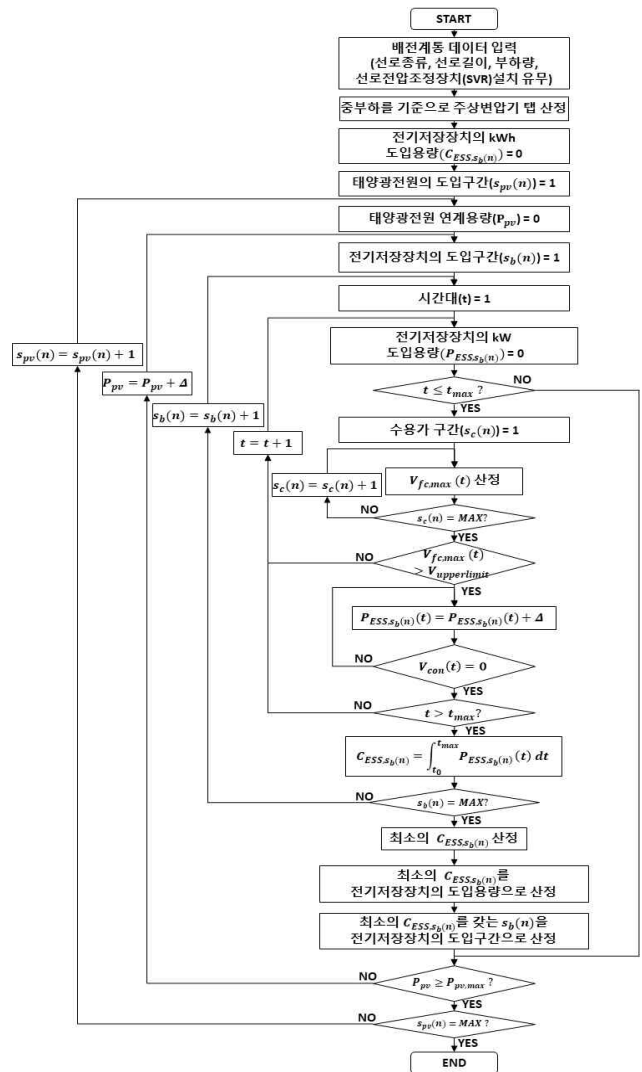


그림 2 태양광전원의 배전계통 수용성 평가알고리즘
Fig. 2 Adoption evaluation algorithm of PV system in distribution system

4. PSCAD/EMTDC에 의한 전기저장장치 및 배전계통 모델링

4.1 전기저장장치

목표로 하는 전기저장장치의 유효분과 무효분의 출력을 얻기 위하여, 전기저장장치의 출력을 결정하는 d-q축의 기준전류(I_d^* , I_q^*)를 산정해야한다. 즉, 전기저장장치의 기준 DC 링크전압과 목표전력에 의한 DC 링크전압을 비교하여 전압차를 구한 후, 이 전압차를 비례적분하면 목표로 하는 d-q축의 기준전류를 식 (11)과 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다[8].

$$I_d^* = (Kp + \frac{Ki}{s})(V_{DC-p}^* - V_{DC-p}) \tag{11}$$

$$I_q^* = (Kp + \frac{Ki}{s})(V_{DC-q}^* - V_{DC-q}) \tag{12}$$

여기서, I_d^* : d축 기준전류, I_q^* : q축 기준전류, V_{DC-dq^*} : 기준 DC 링크전압, V_{DC-dq} : 목표 DC 링크전압

또한, 기준전류가 음의 값을 가질 때 전기저장장치를 충전시키고, 양의 값을 가질 때 전기저장장치를 방전시키기 위하여, 전류 제어 알고리즘에 적용하여 인버터 출력을 위한 d-q축 전압을 구하면, 식 (13)과 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_d = (I_d^* - I_d)(Kp + \frac{Ki}{s}) - I_q \times \omega L + V_{sq} \tag{13}$$

$$V_q = (I_q^* - I_q)(Kp + \frac{Ki}{s}) - I_d \times \omega L \tag{14}$$

여기서, V_d , V_q : d-q축 전압, I_{dq^*} : 인버터 출력의 기준전류, I_d , I_q : 계통전류의 d-q축 전류, V_{sq} : 계통의 순시전압

따라서, 상기의 식 (13), 식 (14)에 의하여 정전류원으로 충·방전을 수행할 수 있는 전기저장장치를 모델링하면 그림 3과 같다.

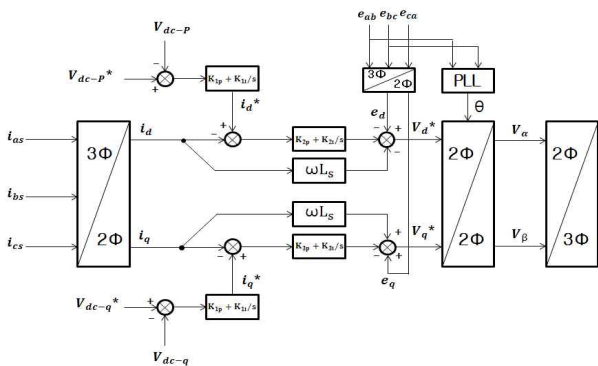


그림 3 전기저장장치의 모델링
Fig. 3 Modeling of ESS

여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다. 그리고 양방향인버터의 출력전압은 역 좌표변환과정에서 위상고정회로(Phase Locked Loop: PLL) 방식을 적용하여 계통전압과 위상을 동기화시킨다.

4.2 선로전압조정장치

선로전압조정장치의 제어부를 모델링하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, A부분은 목표로 하는 전압(Vset)과 선로전압 조정장치의 2차측 전압(Vmeans)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 설정한다.

상기에서 구한 오차를 통해, 선로전압조정장치의 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 탭 위치를 선택하여 선로전압조정장치의 2차측 전압을 일정하게 송출하는 것이다.

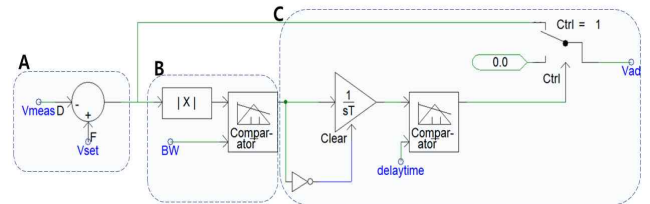


그림 4 SVR의 제어부 모델링
Fig. 4 Modeling of control section in SVR

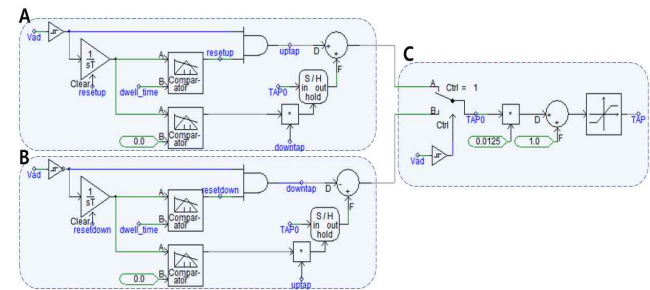


그림 5 SVR의 탭 동작 제어 모델링
Fig. 5 Modeling of tap control in SVR

4.3 태양광전원

태양광전원용 계통연계용 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위해, PI제어기를 이용하여 전류제어 알고리즘을 모델링하면 그림 6과 같다. 여기서, 인버터의 전류 제어부는 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.

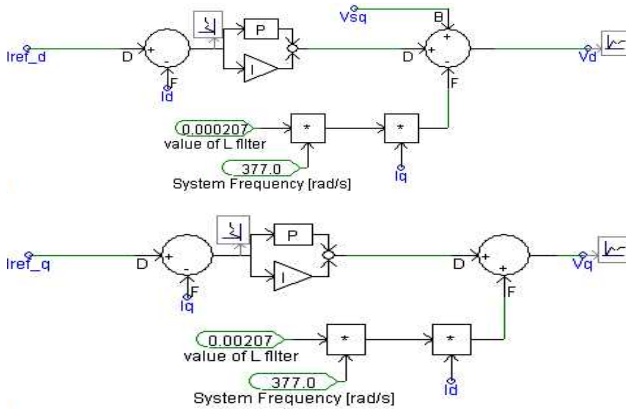


그림 6 태양광전원의 전류제어모델링
Fig. 6 Modeling of current control in PV system

상기의 모델링에서 구한 V_d 와 V_q 는 d-q 좌표변환을 통해 3상의 전압으로 변환되며, IGBT를 구동시키기 위한 6개의 신호로 사용되는 PWM을 모델링하면, 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

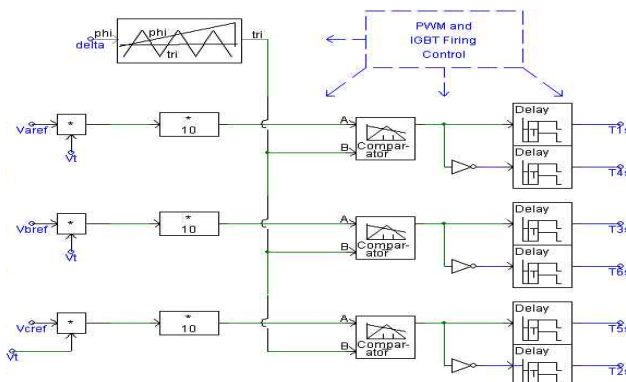


그림 7 태양광전원의 PWM 모델링
Fig. 7 Modeling of PWM in PV system

한편, 계통연계용 인버터를 모델링하면 그림 8과 같고, PWM 으로부터 나온 6개의 스위칭 신호에 의하여 태양광전원에서 생성된 DC 출력을 120° 의 위상차를 갖는 3상의 AC출력으로 변환시킨다.

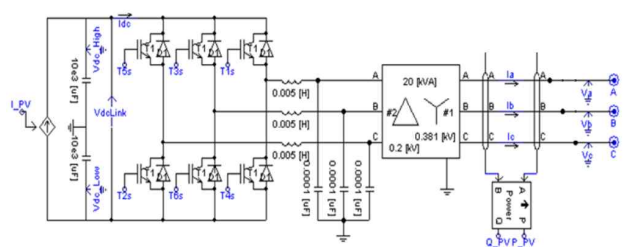


그림 8 계통연계용 인버터의 모델링
Fig. 8 Modeling of grid connected inverter

전기저장장치를 이용한 태양광전원이 연계된 배전계통 수용성향상 방안에 관한 연구

4.4 전체 배전계통

상기의 내용을 바탕으로 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 전기저장장치, 태양광전원 및 선로전압조정장치 등으로 구성된 전체 배전계통을 모델링하면 그림 9와 같다. 여기서 A 부분은 배전용 변전소, B부분은 선로전압조정장치, C부분은 수용가 부하, D부분은 태양광전원, E부분은 전기저장장치를 나타낸 것이다.

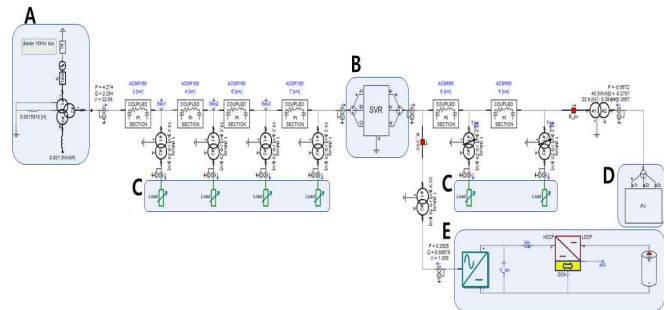


그림 9 전체 배전계통 모델링
Fig. 9 Modeling of entire distribution system

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서는 태양광전원의 연계구간 및 용량 등의 다양한 운용 시나리오에 기반하여, 수용가전압의 규정범위를 유지하기 위한 전기저장장치의 도입용량과 도입구간을 산정하기 위하여, 표 1과 같은 시뮬레이션 조건을 상정하였다. 여기서, 배전선로는 6개 구간으로 나누고, 1번~4번 구간의 선종은 ACSR-160[mm], 5번~6번 구간의 선종은 ACSR-95[mm]를 상정하고, 정임피던스 부하와 역률은 0.9로 상정하였다. 저압측의 전압강하 분담률은 주상변압기의 전압강하분(2%)과 저압 배전선로 전압강하분(4%), 인입선 전압강하분(2%)으로 상정하였다.

표 1 시뮬레이션 조건
Table 1 Simulation conditions

구간	선로 임피던스		선로 길이 [km]	시간대 별 부하 변동분 [MVA]	역률
	R[Ω/km]	X[Ω/km]			
1	0.18	0.39	3	0.48~1.12	0.9
2	0.18	0.39	4	0.48~1.12	0.9
3	0.18	0.39	6	0.51~1.19	0.9
4	0.18	0.39	7	0.51~1.19	0.9
5	0.4	0.48	6	0.51~1.19	0.9
6	0.4	0.48	5	0.51~1.19	0.9

한편, 배전용 변전소의 송출전압은 13,200[V]의 일정값으로 상정하였으며, 주상변압기의 1차측 탭은 1~4번 구간은 13,200,

5~6번 구간은 12,600을 적용하였다. 또한 SVR의 설치위치는 5% 전압강하지점인 5번 구간으로 상정하고, 현장에서 사용하고 있는 일전전압송출방식(13,200[V])을 채택하였다. 태양광발전량과 일 부하 곡선은 그림 10과 같이 대표적인 산업용 부하를 고려하였 다[9-10].

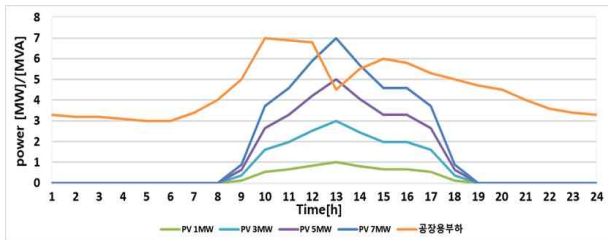


그림 10 일 부하 및 태양광 발전량
Fig. 10 Daily load and PV output

5.2 SVR이 미설치된 배전선로의 수용가전압 특성분석

여기서는 SVR이 고압배전선로에 설치되지 않은 경우에 대하여, 태양광전원의 연계위치와 연계용량에 따라 수용가전압의 변동특성을 파악하고, 규정 전압범위를 벗어나는 경우, 이를 적절하게 유지하기 위한 전기저장장치의 도입위치 및 용량을 산정한다. 먼저, 태양광전원의 연계지점을 말단인 6번 구간으로 상정하고,

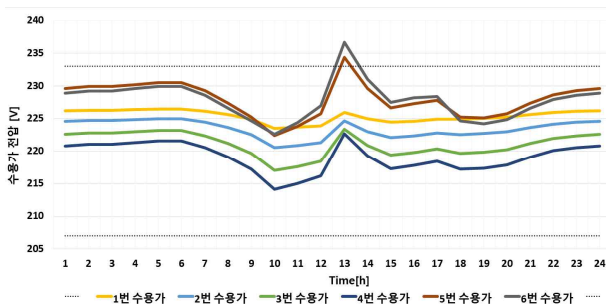


그림 11 3MW 태양광전원 연계 시 수용가전압 특성
Fig. 11 Customer voltages with 3MW PV system

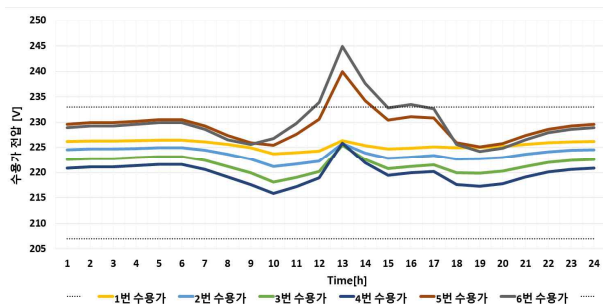


그림 12 5MW 태양광전원 연계 시 수용가전압 특성
Fig. 12 Customer voltages with 5MW PV system

태양광전원의 용량을 단계적으로 증가시키면서 직하지점의 수용가전압을 분석하면 그림 11~그림 13과 같다. 이 그림에서와 같이, 태양광전원이 연계되면 수용가전압이 과전압 현상에 의하여 규정전압 범위를 벗어날 가능성을 확인하였고, 태양광전원의 용량이 증가될수록 규정전압범위를 벗어나는 폭은 증가됨을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 선로 말단에 연계된 태양광전원의 역조류가 경부하시의 전압상승을 초래하여, 수용가전압이 큰 폭으로 규정전압 범위를 벗어나게 되는 것이다.

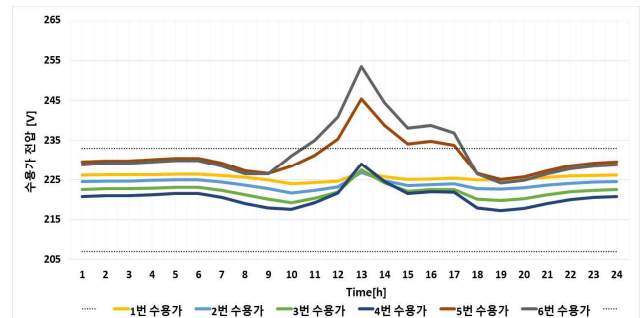


그림 13 7MW 태양광전원 연계 시 수용가전압 특성
Fig. 13 Customer voltages with 7MW PV system

따라서 상기에서 제한한 알고리즘에 따라 수용가의 규정전압 범위를 만족시키는 전기저장장치의 용량을 산정하면 표 2~표 4와 같다. 여기서, 태양광전원의 연계용량을 단계적으로 증가시키면, 전기저장장치의 도입용량도 증가됨을 알 수 있었다. 즉, 태양광전원의 연계용량이 3[MW]이면 전기저장장치의 적정 kW 도입용량은 1[MW]이고, kWh 도입용량은 1[MWh]이며, 태양광전원의 연계용량이 7[MW]이면 전기저장장치의 kW 도입용량은 5[MW]이고, kWh 도입용량은 14.2[MWh]로 산정되었다.

표 2 3MW 태양광전원 연계 시 전기저장장치 도입용량

Table 2 Introduction capacity of ESS with 3MW PV system

구간	시간 [h]	부하 [MVA]	PV [MW]	ESS 연계 전 수용가전압 [V]	ESS 연계 후 수용가전압 [V]	ESS kW 도입용량 [MW]	ESS kWh 도입용량 [MWh]
6	13	4.5	3	236.7	232.6	1	1

표 3 5MW 태양광전원 연계 시 전기저장장치 도입용량

Table 3 Introduction capacity of ESS with 5MW PV system

구간	시간 [h]	부하 [MVA]	PV [MW]	ESS 연계 전 수용가전압 [V]	ESS 연계 후 수용가전압 [V]	ESS kW 도입용량 [MW]	ESS kWh 도입용량 [MWh]
6	12	6.8	4.2	233.9	232.7	0.3	4.7
6	13	4.5	5	244.9	232.7	3	
6	14	5.5	4.1	237.6	232.8	1.2	
6	16	5.8	3.2	233.5	232.7	0.2	

표 4 7MW 태양광전원 연계 시 전기저장장치 도입용량

Table 4 Introduction capacity of ESS with 7MW PV system

구 간	시간 [h]	부하 [MVA]	PV [MW]	ESS 연계 전 수용가전압 [V]	ESS 연계 후 수용가전압 [V]	ESS kW 도입용량 [MW]	ESS kWh 도입용량 [MWh]
6	11	6.9	4.6	235.1	232.6	0.6	14.2
6	12	6.8	5.9	240.9	232.6	2	
6	13	4.5	7.0	253.5	232.7	5	
6	14	5.5	5.7	244.4	232.9	2.8	
6	15	6	4.6	238.1	232.8	1.3	
6	16	5.8	4.6	238.8	232.7	1.5	
6	17	5.3	3.7	236.9	232.9	1	

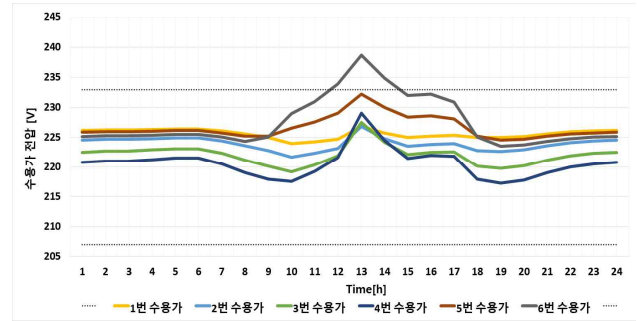


그림 16 7MW 태양광전원 연계 시 수용가전압 특성

Fig. 16 Customer voltages with 7MW PV system

5.3 SVR이 설치된 배전선로의 수용가전압 특성분석

여기서는 SVR이 고압배전선로에 설치된 경우에 대하여, 태양광전원의 연계위치와 연계용량에 따라 수용가전압의 변동특성을 파악하고, 규정 전압범위를 벗어나는 경우, 이를 적정하게 유지하기 위한 전기저장장치의 도입위치 및 용량을 산정한다. 먼저, 5.2 절의 시뮬레이션과 동일하게 태양광전원의 연계지점과 태양광전원의 용량을 상정하고, 이에 대한 직하지점의 수용가전압을 분석하면 그림 14~그림 16과 같다. 여기서 그림 14와 같이, 3[MW]의 태양광전원이 계통에 연계된 경우, 모든 수용가전압이 규정전압 범위를 만족함을 알 수 있었다. 한편, 그림 15와 그림 16에서

와 같이, 태양광전원이 연계되면 수용가전압이 과전압 현상에 의하여 규정전압 범위를 벗어날 가능성을 확인하였고, 태양광전원의 용량이 증가될수록 규정전압범위를 벗어나는 폭은 증가됨을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 선로 말단에 연계된 태양광전원의 역조류가 경부하시의 전압상승을 초래하여, 수용가전압이 큰 폭으로 규정전압 범위를 벗어나게 되는 것이다.

따라서 상기에서 제한한 알고리즘에 따라 수용가의 규정전압 범위를 만족시키는 전기저장장치의 용량을 산정하면 표 5와 표 6과 같다. 여기서, 태양광전원의 연계용량을 단계적으로 증가시키면, 전기저장장치의 도입용량도 증가됨을 알 수 있었다. 즉, 태양광전원의 연계용량이 5[MW]이면 전기저장장치의 적정 kW 도입용량은 0.8[MW]이고, kWh 도입용량은 0.8[MWh]이며, 태양광전원의 연계용량이 7[MW]이면 전기저장장치의 적정 kW 도입용량은 2.8[MW]이고, kWh 도입용량은 4.2[MWh]로 산정되었다.

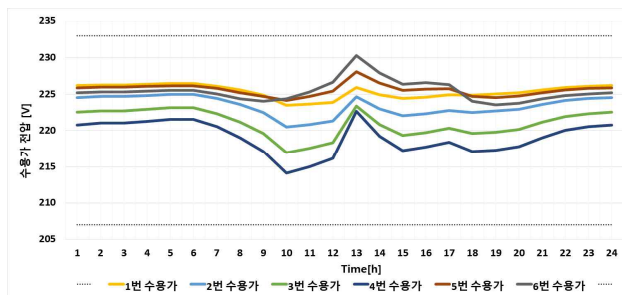


그림 14 3MW 태양광전원 연계 시 수용가전압 특성

Fig. 14 Customer voltages with 3MW PV system

표 5 5MW 태양광전원 연계 시 전기저장장치 도입용량

Table 5 Introduction capacity of ESS with 5MW PV system

구 간	시간 [h]	부하 [MVA]	PV [MW]	ESS 연계 전 수용가전압 [V]	ESS 연계 후 수용가전압 [V]	ESS kW 도입용량 [MW]	ESS kWh 도입용량 [MWh]
6	13	4.5	5	234.5	232.8	0.8	0.8

표 6 7MW 태양광전원 연계 시 전기저장장치 도입용량

Table 6 Introduction capacity of ESS with 7MW PV system

구 간	시간 [h]	부하 [MVA]	PV [MW]	ESS 연계 전 수용가전압 [V]	ESS 연계 후 수용가전압 [V]	ESS kW 도입용량 [MW]	ESS kWh 도입용량 [MWh]
6	12	6.8	5.9	233.9	232.8	0.5	4.2
6	13	4.5	7	238.7	232.8	2.8	
6	14	5.5	5.7	234.8	232.9	0.9	

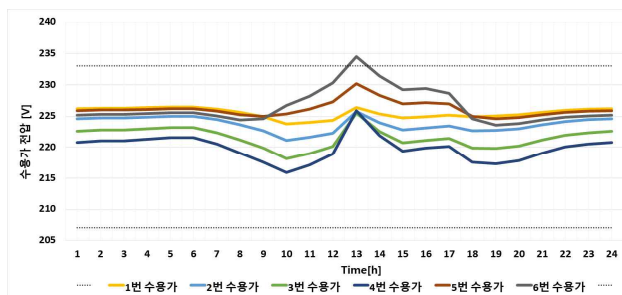


그림 15 5MW 태양광전원 연계 시 수용가전압 특성

Fig. 15 Customer voltages with 5MW PV system

5.4 SVR 유·무에 따른 비교분석

상기의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 SVR의 유·무에 따른 ESS의 도입용량을 비교하면 표 7과 같다. 즉, 태양광전원의 연계용량

표 7 SVR 유·무에 따른 전기저장장치의 도입용량
Table 7 Introduction capacity of ESS depending SVR installation

SVR 설치 유·무	SVR 미설치			SVR 설치		
태양광전원 연계용량	3[MW]	5[MW]	7[MW]	3[MW]	5[MW]	7[MW]
ESS의 kW 도입용량 [MW]	1	3	5	0	0.8	2.8
ESS의 kWh 도입용량 [MWh]	1	4.7	14.2	0	1	4.2

이 3[MW]이면 SVR이 설치되는 경우, 전기저장장치의 적절한 kW 도입용량은 1[MW]에서 0[MW]로 감소되며, kWh 도입용량도 1[MWh]에서 0[MWh]로 감소됨을 알 수 있었다. 또한, 태양광전원의 연계용량이 5[MW]이면 적절한 kW 도입용량은 3[MW]에서 0.8[MW]로, kWh 도입용량은 4.7[MWh]에서 1[MWh]로 감소되며, 태양광전원의 연계용량이 7[MW]이면, 적절한 kW 도입용량은 5[MW]에서 2.8[MW]로, kWh 도입용량은 14.2[MWh]에서 4.2[MWh]로 감소됨을 알 수 있었다. 따라서, SVR이 배전계통에 설치되면, 설치되지 않은 경우보다 ESS의 적절한 도입용량이 감소됨을 알 수 있었다. 이것은 SVR의 일정전압송출방식에 의하여 태양광전원의 역조류에 의한 수용가의 과전압현상을 어느정도 해소시켜, 배전계통에서 태양광전원의 수용성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 배전계통에 연계되는 대용량 태양광발전의 원활한 도입을 위하여, 배전계통의 수용가전압을 규정전압범위 이내로 유지시키는 전기저장장치의 적절한 도입용량과 도입위치를 산정하는 배전계통 수용성 평가 알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 대용량의 태양광전원이 배전계통에 연계되면, 경부하시 태양광전원에서 공급하는 역조류가 전압상승을 초래하여, 규정전압 범위를 벗어날 가능성을 확인하였고, 태양광전원의 용량이 증가될수록 규정전압범위를 벗어나는 폭은 증가됨을 알 수 있었다.
- (2) 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용하여, SVR의 유·무에 따른 ESS의 도입용량을 비교하면, 태양광전원의 연계용량이 3[MW]이면 SVR이 설치되는 경우, 전기저장장치의 적절한 kW 도입용량은 1[MW]에서 0[MW]로 감소되며, kWh 도입용량도 1[MWh]에서 0[MWh]로 감소됨을 알 수 있었다. 또한, 태양광전원의 연계용량이 5[MW]이면 적절한 kW 도입용량은 3[MW]에서 0.8[MW]로, kWh 도입용량은 4.7[MWh]에서 1[MWh]로 감소되며, 태양광전원의 연계용량이 7[MW]이면, 적절한 kW 도입용량은 5[MW]에

서 2.8[MW]로, kWh 도입용량은 14.2[MWh]에서 4.2[MWh]로 감소됨을 알 수 있었다.

- (3) SVR이 배전계통에 설치되면, 설치되지 않은 경우보다 ESS의 적절한 도입용량이 감소됨을 알 수 있었다. 이것은 SVR의 일정전압송출방식에 의하여 태양광전원의 역조류에 의한 수용가의 과전압현상을 어느 정도 해소시켜, 배전계통에서 태양광전원의 수용성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20163010012310, No.20172410100030)로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] V. Vai, E. Gladkikh, M. C. Alvarez-Herault, B. Raison and L. Bun, "Study of low-voltage distribution system with integration of PV-battery energy storage for urban area in developing country", *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, 2017*, pp. 1-6.
- [2] O. M. Akeyo, V. Rallabandi and D. M. Ionel, "Multi-MW solar PV pumping system with capacity modulation and battery voltage support", *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), San Diego, CA, 2017*, pp. 423-428.
- [3] J. Wang, S. Hashemi and C. Trøholt, "Active and reactive power support of MV distribution systems using battery energy storage", *2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Toronto, ON, 2017*, pp. 382-387.
- [4] M. Zeraati, M. E. H. Golshan and J. M. Guerrero, "A Consensus-Based Cooperative Control of PEV Battery and PV Active Power Curtailment for Voltage Regulation in Distribution Networks", *in IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017.09, pp. 1-1. (DOI: 10.1109/TSG.2017.2749623)
- [5] V. Vai, E. Gladkikh, M. C. Alvarez-Herault, B. Raison and L. Bun, "Study of low-voltage distribution system with integration of PV-battery energy storage for urban area in developing country", *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems*

Europe (EEEIC/I&CPS Europe), Milan, 2017, pp. 1-6.

- [6] C. Kim, O. Park, B. Lee and D. Rho, "Optimal algorithms for voltage management in distribution systems inter-connected with new dispersed sources", *2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Seoul*, 2009, pp. 1-4.
- [7] Kyung-Hee Jung, Hoyong Kim and Daeseok Rho, "Determination of the installation site and optimal capacity of the battery energy storage system for load leveling", in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 11, no. 1, pp. 162-167, Mar 1996.
- [8] Jong-Yong Wang, Byung-Ki Kim, Jea-Bum Park, Byung-Mok Kim and 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, 5.
- [9] "Analysis of End-User's Electric Power Consumption Trend Using Load Curve", *The Korea Energy Agency*, pp. 53-57, 2007. 03
- [10] Son Hak-sig, Kim In-su, Park Yong-uk and Jae-Chul Kim, "An analysis of the End-User electric power consumption trends using the load curve during international conflict", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 165-167, 2004.

저 자 소 개



남 양 현 (Yang-Hyun Nam)

2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과(공학사), 2016년 9월~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학 석사과정 재학 중
 <관심분야> 배전계통 운영, 신재생에너지, 마이크로그리드



최 성 식 (Sung-Sik Choi)

2010년 5월 : 한국기술교육대학교 정보통신공학부(공학사), 2014년 8월 : 동대학원 전기공학과(공학석사), 2015년 2월~현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중
 <관심분야> 배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드, 품질해석, ESS



강 민 관 (Min-Kwan Kang)

2005년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과(공학사), 2007년 2월 : 동대학원 전기공학과(공학석사), 2016년 9월~현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중
 <관심분야> 신재생에너지, 전력계통, 마이크로그리드



이 후 동 (Hu-Dong Lee)

2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과(공학사), 2016년 9월~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 전기공학 석사과정 재학 중
 <관심분야> 배전계통, 분산전원, 마이크로그리드



박 지 현 (Ji-Hyun Park)

2017년 2월 : 청주대학교 태양광에너지공학과(공학사), 2017년 9월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학중
 <관심분야> 신재생에너지, 전력계통, 마이크로그리드



노 대 석 (Dae-Seok Rho)

1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과(공학사), 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과(공학석사), 1997년 3월 : 일본 북해도대학교대학원 전기공학과(공학박사), 1987년 3월~1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원, 1999년 3월~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수
 <관심분야> 전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석