



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

ESS를 이용한 저압 배전계통의
EV 수용성 향상에 관한 연구

濟州大學校 大學院

에너지응용시스템학부 電氣工學專攻

柳慶祥

2020年 8月






ESS를 이용한 저압배전계통의 EV 수용성 향상에 관한 연구

指導教授 金 豪 贊

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2020 年 6 月

柳慶祥의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長	김 시호	
委 員	이 개영	
委 員	진 영규	
委 員	노 래석	
委 員	김 호찬	

濟州大學校 大學院

2020 年 6 月

A Study on the Hosting Capacity of EV
in Low Voltage Distribution System using
ESS

Kyung-Sang Ryu
(Supervised by Professor Ho-Chan Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING

Faculty of Applied Energy System
Major of Electrical Engineering

GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2020. 8.

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vii
SUMMARY	x
1. 서 론	1
1.1 논문의 배경 및 필요성	1
1.2 논문의 목표	4
1.3 논문의 구성	6
2. 복합 저압 배전계통 전압특성 분석	7
2.1 태양광전원이 연계된 배전계통의 전압특성 분석	7
2.2 EV 증가가 제주 전력계통에 미치는 영향 분석	9
2.3 EV 및 태양광전원의 수용성 향상을 위한 배전용 ESS의 도입 방안	12
3. PSCAD/EMTDC를 이용한 복합 저압 배전계통 모델링	17
3.1 EV 부하 모델링	18
3.2 태양광전원 모델링	19
3.3 ESS 모델링	23
4. EV 수용성 향상을 위한 배전용 ESS의 제어 알고리즘	29
4.1 배전용 ESS의 제어 방안	29
4.2 복합 저압 배전계통의 전압특성 분석	31
4.3 배전용 ESS의 제어 알고리즘	35

5. 시뮬레이션 및 수용성 향상 결과 분석	42
5.1 시뮬레이션 조건	42
5.2 ESS 연계 전/후의 선로용량 및 전압 특성	45
5.3 ESS의 연계지점에 따른 선로용량 및 전압 특성	59
5.4 부하분포에 따른 선로용량, 전압 특성 및 ESS 출력용량	65
5.5 ESS의 도입용량 및 경제성 분석	75
5.6 수용성 향상 분석 및 결과 고찰	78
6. 30kW급 복합배전계통 시험장치 구현 및 시험결과 분석	82
6.1 복합 저압 배전계통 시험장치 구현	82
6.2 EV 수용성 향상에 관한 검증시험 및 분석	95
7. 결 론	107
참 고 문 헌	109
감사의 글	114

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Customer overvoltage due to PV system	7
Fig. 2.2 Voltage characteristics with and without PV system	8
Fig. 2.3 Voltage control by ESS	9
Fig. 2.4 Concept for EVC and PV system in secondary feeder	11
Fig. 2.5 Power characteristics by unidirectional power flow	13
Fig. 2.6 Power characteristics by bidirectional power flow	14
Fig. 2.7 Voltage characteristics through ESS discharging	15
Fig. 2.8 Voltage characteristics through ESS charging	15
Fig. 2.9 Strategy of power stabilization in the secondary feeder by ESS	16
Fig. 3.1 Low voltage distribution system with ESS	17
Fig. 3.2 EV load modeling	18
Fig. 3.3 load variation by time	18
Fig. 3.4 Control topology of PV system	19
Fig. 3.5 d-q transformation for three-phase voltage	21
Fig. 3.6 Inverse d-q transformation	21
Fig. 3.7 Active and reactive power set value	21
Fig. 3.8 PWM for the IGBT control	22
Fig. 3.9 Grid connected inverter	22
Fig. 3.10 ESS modeling	23
Fig. 3.11 Battery modeling	24
Fig. 3.12 DC-DC converter modeling, (a) boost mode controller, (b) buck mode controller, (c) gate pulse signal, (d) Buck/Boost Converter	24
Fig. 3.13 Overall circuitry for the converter and controls	25
Fig. 3.14 ESS charge/discharge mode	26
Fig. 3.15 ESS charge/discharge power	27
Fig. 3.16 ESS output power set-point to the DC-DC converter	27

Fig. 3.17 Buck/boost converter operation for ESS charge/discharge	28
Fig. 4.1 Voltage drop and rise issues	30
Fig. 4.2 Feeder current and voltage of LVDS (a) ESS charge, (b) ESS discharge	31
Fig. 4.3 Radial LVDS with multiple buses	32
Fig. 4.4 6-bus distribution system	33
Fig. 4.5 Voltage control of ESS	36
Fig. 4.6 ESS control algorithm	41
Fig. 5.1 LVDS model for the simulation	42
Fig. 5.2 Output pattern of PV system	44
Fig. 5.3 Load + EV pattern	44
Fig. 5.4 Determination of P_L , (a) voltage of end side bus, (b) reference value of P_L	46
Fig. 5.5 Determination of P_G , (a) voltage of section 3 with only PV system, (b) reference value of P_G	47
Fig. 5.6 Voltage and power of LVDS with EV when an ESS is not operating, (a) voltage, (b) active power	48
Fig. 5.7 Voltage and power of LVDS with EV when an ESS is operating, (a) voltage, (b) active power	50
Fig. 5.8 Voltage and power of LVDS with PV system when an ESS is not operating, (a) voltage, (b) active power	51
Fig. 5.9 Voltage and power of LVDS with PV system when an ESS is operating, (a) voltage, (b) active power	53
Fig. 5.10 Voltage and power of LVDS with EV and PV system when an ESS is not operating, (a) voltage, (b) active power	54
Fig. 5.11 Voltage and power of LVDS with EV and PV system when an ESS is operating, (a) voltage, (b) active power	55
Fig. 5.12 Power and SOC characteristics of the ESS in discharging mode	56
Fig. 5.13 Power and SOC characteristics of the ESS in charging mode	57

Fig. 5.14 Power and SOC characteristics of the ESS in charging and discharging mode	58
Fig. 5.15 System configuration by connecting ESS to Bus2	59
Fig. 5.16 Voltage and power of LVDS with EV when an ESS is connected to Bus2, (a) voltage, (b) active power	60
Fig. 5.17 Voltage and power of LVDS with PV system when an ESS is connected to Bus2, (a) voltage, (b) active power	61
Fig. 5.18 System configuration by connecting ESS to Bus5	62
Fig. 5.19 Voltage and power of LVDS with EV when an ESS is connected to Bus5, (a) voltage, (b) active power	63
Fig. 5.20 Voltage and power of LVDS with PV system when an ESS is connected to Bus5, (a) voltage, (b) active power	64
Fig. 5.21 Comparison of the performance index in charging mode	80
Fig. 5.22 Comparison of the performance index in discharging mode	81
Fig. 6.1 Test system configuration for LVDS	83
Fig. 6.2 Test system for LVDS	83
Fig. 6.3 Configuration of artificial switchgear	85
Fig. 6.4 Configuration of artificial switchgear, (a) configuration of switchgear, (b) grid simulator	86
Fig. 6.5 Configuration of the secondary feeder	87
Fig. 6.6 Real configuration of the artificial secondary feeder, (a) architecture of the secondary feeder, (b) Artificial line simulator	87
Fig. 6.7 Configuration of the artificial load	88
Fig. 6.8 Real configuration of the artificial load, (a) architecture of load, (b) artificial load simulator	89
Fig. 6.9 Operation of PV system	90
Fig. 6.10 Real configuration of artificial PV system, (a) architecture of PV system, (b) PV simulator	90
Fig. 6.11 Real configuration of artificial ESS system, (a) architecture of ESS,	

(b) real ESS	92
Fig. 6.12 Real configuration of measuring device, (a) measurement on Bus1, (b) measurement on Bus3	93
Fig. 6.13 GUI of measurement device	93
Fig. 6.14 GUI of artificial LVDS simulator	94
Fig. 6.15 Configuration of the artificial LVDS	95
Fig. 6.16 Power characteristics of LVDS with load, (a) before connection of ESS, (b) after connection of ESS	97
Fig. 6.17 Measurement of power characteristics of LVDS before connection of ESS, (a) Bus1, (b) Bus2, (c) Bus3	100
Fig. 6.18 Measurement of power characteristics of each bus after connection of ESS, (a) Bus1, (b) Bus2, (c) Bus3	101
Fig. 6.19 Disconnection of the PCS at the certain voltage	102
Fig. 6.20 Power characteristics of LVDS with PV system, (a) before connection of ESS, (b) after connection of ESS	104
Fig. 6.21 Measurement of power characteristics of each bus after connection of ESS, (a) Bus1, (b) Bus2, (c) Bus3	106

LIST OF TABLES

Table 2.1	Goal of the installation of EV and EVC in Jeju Island	9
Table 2.2	Electricity supply and demand plan of Jeju Island	10
Table 2.3	Power required to accommodate EV and PV system	12
Table 4.1	Classification of ESS operation signal	40
Table 5.1	Model parameters of the distribution system.	43
Table 5.2	Specifications of the secondary feeder	43
Table 5.3	Active power of each bus when Bus2 is lumped load (total load: 570kW)	66
Table 5.4	Voltage of each bus when Bus2 is lumped load (total load: 570kW)	66
Table 5.5	Active power of each bus when Bus2 is lumped load (total load: 513kW)	67
Table 5.6	Voltage of each bus when Bus2 is lumped load (total load: 513kW)	67
Table 5.7	Active power of each bus when PV system is concentrated on Bus2	68
Table 5.8	Voltage of each bus when PV system is concentrated on Bus2	68
Table 5.9	Active power of each bus when Bus5 is lumped load	69
Table 5.10	Voltage of each bus when Bus5 is lumped load	69
Table 5.11	Active power of each bus when PV system is concentrated on Bus5	70
Table 5.12	Voltage of each bus when PV system is concentrated on Bus5	70
Table 5.13	Active power of each bus when Bus8 is lumped load (total load: 570kW)	71
Table 5.14	Voltage of each bus when Bus8 is lumped load (total load: 570kW)	71
Table 5.15	Active power of each bus when Bus8 is lumped load (total load: 513kW)	72

Table 5.16 Voltage of each bus when Bus8 is lumped load (total load: 513kW) ...	72
Table 5.17 Active power of each bus when PV system is concentrated on Bus8	73
Table 5.18 Voltage of each bus when PV system is concentrated on Bus8 ·	73
Table 5.19 Active power of each bus when load is uniform	74
Table 5.20 Voltage of each bus when load is uniform	74
Table 5.21 Active power of each bus when PV systems are uniform	75
Table 5.22 Voltage of each bus when PV systems are uniform	75
Table 5.23 Required ESS capacity for EV charging during 3 hour	76
Table 5.24 Customer's standard facility charges according to the terms of electricity supply	77
Table 5.25 Customer's standard street facility charges according to the terms of electricity supply	77
Table 5.26 Customer's charges according to feeder length	78
Table 5.27 ESS power range to keep feeder capacity and voltage within allowable limit	79
Table 5.28 Comparison of the performance index of charging mode	80
Table 5.29 Comparison of the performance index of discharging mode	81
Table 6.1 Specification of artificial LVDS	84
Table 6.2 Specification of secondary feeder	87
Table 6.3 Specification of 3-phase load	88
Table 6.4 Specification of 30kW PCS	91
Table 6.5 Specification of 30kWh battery rack	91
Table 6.6 Model parameters of the distribution system	96
Table 6.7 Measurement voltage of each bus of LVDS when the load is connected	97
Table 6.8 Measurement power of each bus of LVDS when the load is connected	98
Table 6.9 Comparison of simulation and hardware test for the EV (total load: 30kW)	

.....	98
Table 6.10 Measurement voltage of each bus of LVDS when the PV system is connected	103
Table 6.11 Measurement power of each bus of LVDS when the PV system is connected	104
Table 6.12 Comparison of simulation and hardware test for the PV system (total PV system: 30kW)	105

SUMMARY

The Korean government actively takes actions of the energy policy, by which the capacity of RES(Renewable Energy Resource) is to increase up to 20% of all energy sources by the year 2030. Along with the Korean government policy, Jeju Special Self-Governing Province of Korea executes a policy(so called “Carbon Free Island Jeju by 2030”) of distributing 2GW of RES and converting all vehicles into EV(Electric Vehicle) by the year 2030. In Korea, the RES capacity is not only increasing but also the fast/slow charger in buildings, homes, and public places are rapidly spreading. Especially as the installation of the slow charger for the EV users in the individual customer becomes dominant in the LVDS(Low Voltage Distribution System), it begins to act as a malicious load in LVDS designed according to transformer capacity. Therefore, a special caution is required to increase the inflow rate of the EV charger in the customer not to cause a low voltage in the secondary feeder as well as not to violate the capacity limit of the pole transformer. In addition, when it comes to the increase of RES capacity in the LVDS, it also needs a caution to prevent the overvoltage in the secondary feeder.

Traditionally, in order to solve aforementioned problems, the first reinforcement action is to replace the pole transformer by a larger capacity, and to expand the secondary feeder. The second reinforcement action is to install pole transformers closer to EVs. However, the traditional approaches require time and high cost. Thus, it is understandable that the traditional approaches are not suitable for future electric networks. Therefore, this thesis proposes an innovative control algorithm of the ESS(Energy Storage System) that is to contribute to increase the capacity of EVC(Electric Vehicle Charger) in the LVDS without reinforcement of the existing facilities.

An ESS is used in various forms from the transmission system to distribution system and microgrid such as frequency regulation in distribution substations, power stabilization of fluctuating RES, peak-cut for charging at light load and discharging at heavy load, and emergency power generation, etc. In particular, the introduction of the ESS in a LVDS without voltage regulation can have a number of advantages. However, as the capacity of EV and renewable energy is continuously increased in LVDS, research is needed to increase the capacity that can be connected using existing facilities as well as voltage issues.

In the proposed control algorithm, in order to solve the problems of voltage drop/rising and feeder capacity by introducing a large number of EV chargers and RES in the LVDS, an advantage of ESS bidirectional power flow is considered at the end of the secondary feeder in order to maintain the voltage and the power within allowable limit(voltage: $220\pm 6\%$, feeder capacity: pole transformer rated capacity). The proposed control algorithm shows its ability to expand the capacity of EV up to maximum twice the capacity of the pole transformer with the various conditions while the voltage and feeder capacity are maintained with allowable limit. Its ability is assessed and discussed by the simulation consisting of an ESS, PV, EVC, and load in the environment of PSCAD/EMTDC software and hardware system.

1. 서 론

1.1 논문의 배경 및 필요성

최근 정부에서는 온실가스 저감을 위하여 2030년까지 신재생에너지원의 비중을 전체 에너지원의 20%로 확대하는 보급 사업을 적극적으로 수행하고 있다[1,2]. 이와 더불어 제주특별자치도는 “Carbon Free Island(CFI) Jeju by 2030” 계획에 따라 2030년까지 신재생에너지 2GW 보급 및 모든 자동차를 전기자동차(Electric Vehicle, EV)로 전환하는 정책을 펼치고 있다[3,4]. 이에 따라 신재생에너지, 에너지저장장치 (Energy Storage System, ESS), EV의 보급 확산을 위한 정책이 활발히 펼쳐지고 있으며 전력 산업 또한 기존의 중앙 집중식 전력공급시스템에서 수요자 중심의 분산형 전력 공급시스템으로 재편되기 위한 정책이 추진되어지고 있다[5]. EV의 경우 2010년부터 보급이 시작되어 2019년 12월 기준 약 9만대가 등록되어 가파른 성장세를 보이고 있으며, 특히 2010~2020년까지 연간 등록대수는 2배씩 성장하고 있다. 이에 발맞추어 정부는 2022년까지 친환경 자동차의 보급대수를 200만대까지 확대하는 계획을 추진 중이다[6].

신재생에너지는 기존 에너지원인 석탄과 원전 비중을 줄이고 ‘안전하고 깨끗한 에너지’를 통해 온실가스와 기후변화 등 지구의 환경문제를 해결해 나가려는 세계적 흐름에 따라 비중이 점차 확대되고 있다. 경제성 측면에서 대표적인 신재생에너지원인 태양광전원의 경우, 2018년 기준으로 태양광발전의 발전단가는 원자력에 비해 영국은 2.7배, 미국은 4.1배 낮게 나타나고 있으며, 우리나라의 경우에도 향후 10년 이내에 태양광 발전단가가 원자력 발전보다 낮아질 것으로 전망된다[7].

최근 전력계통 안정화를 위하여 핵심 장비로 각광받고 있는 ESS는 생산된 전기를 저장했다가 필요할 때 전기를 공급하여 전체 전력 사용 효율을 높이는 장치로 배터리, 전력변환장치, 에너지관리시스템 등의 제반운영 시스템으로 구성된다. 또한, ESS는 스마트그리드 운영에 필수적인 요소로 피크저감, 부하평준화, 주파수조정, 신재생연계 등에 활용되고 있으며, 스마트그리드, EV, 신재생에너지 등의 차세대 성장산업의 시장 확대를 위한 핵심 기술이다. 국내의 경우 ‘재생에너지 3020’ 계획에 따른 신재생에너지의

비중이 늘어남에 따라 계통 안정성을 위해 신재생에너지용 ESS에 대한 REC에 가중치를 부여하여 ESS의 보급을 확대하기 위한 정책을 펼치고 있으며, 탈원전 및 석탄발전의 축소로 LNG 등 고비용의 발전원 증가에 따른 전기요금 부담을 줄이기 위해 빌딩, 공장 등에서 에너지 비용 절감을 위한 ESS의 보급이 확대되고 있다[8,9].

위에서 언급한 ESS 및 신재생에너지가 전력계통에 확산됨에 따라 기존의 전력 공급자 중심의 중앙 집중형 전력 공급시스템에서 수요자 중심의 분산형 전력공급 시스템으로 전력산업이 재편될 것으로 예상된다. 태양광, 풍력 등의 신재생에너지 및 CO₂를 줄이기 위한 친환경적인 EV의 보급이 점차 확산됨에 따라 기존의 전력공급시스템의 개편은 가속화 되고, 이에 따라 가상발전소(Virtual Power Plant, VPP) 등의 전력 프로슈머간의 거래 역시 더욱 활발하게 될 것이다. 특히 기존의 전기사업자가 제공하는 전기를 소비하고 요금을 내는 수동적인 소비자가 전기를 생산하고 이웃과 거래하거나 수요관리 사업자를 통해 전력시장에 참여하는 프로슈머가 늘어남에 따라 이들을 관리하고 상위 전력 유틸리티와 거래할 가상발전소의 역할이 점차 중요해지고 있다. 또한 분산형 전력시스템의 확산을 통한 VPP가 확산될 경우 대규모 발전소와 대용량의 송전선을 기반으로 하는 중앙 집중형 전력공급시스템에 대한 의존도를 줄임과 동시에 신규 설비 투자에 지연효과 또한 기대할 수 있다. 이를 통해 중앙 집중형 전력시스템의 운용 및 유지에 드는 경제적, 기술적 부담을 줄여줄 수 있다[10].

상기와 같이 미래 배전시스템으로의 재편을 위해서 우선적으로 추진하고 있는 EV 및 신재생에너지의 보급 확산을 위해서는 계통 수용성 확보가 반드시 필요하다. 이를 위해 정부는 ‘제 8차 전력수급 기본계획’에 의해 EV 및 신재생에너지의 연계를 위한 계통 수용능력을 제고하기 위해 특고압 배전선로를 증설하고 변압기를 신설하는 등의 정책을 펼치고 있다.

그러나 이러한 정책은 22.9kV 이상의 상위 계통에 대한 대책이며 하위 계통인 저압 배전 계통에서 계통 수용성 향상을 위한 방안은 전무한 실정이다. 특히 저압배전 계통에서 각 수용가에 7kW의 용량을 갖는 완속 충전기의 보급이 EV 확대 정책에 발맞추어 급속히 증가하고 있는데, 주상변압기 용량에 따라 설계된 저압 배전계통에서 완속 충전기에 의한 EV의 충전은 계통측면에서 악성 부하로 작용할 가능성이 크다. 즉, EV의 충전은 전압조절 기능이 없는 저압선로에서 저전압을 유발할 수 있을

뿐만 아니라 주상변압기의 용량 한계로 인해 유입 비율을 늘리는 것에는 한계를 가질 수밖에 없다. 마찬가지로 전압조절 기능이 없는 저압선로에 연계된 다수의 신재생에너지의 역조류로 인해 저압계통에 과전압 현상이 발생할 수 있다. 따라서 개별 수용가로 하여금 효율성 및 편리성을 획기적으로 증가시킬 수 있는 저압 배전계통에의 EV 수용성 향상 및 태양광과 같은 신재생에너지원에 의한 과전압을 방지하는 방안을 마련하는 것은 반드시 필요하다.

저압 배전계통에서 계통 수용성을 확대할 수 있는 가장 기본적인 방법은 다음과 같다. 첫 번째는 기존 전력설비의 교체로, 전기 충전기를 모두 수용할 수 있는 용량을 가진 주상변압기로 교체함과 동시에, 저압선로 또한 더 큰 용량으로 증설하는 것이다. 두 번째는 기존 주상변압기 이하 선로구간을 나누어 주상변압기를 좀 더 촘촘히 설치하는 방안을 들 수 있다. 그러나 상기 방안들은 주상변압기 및 선로를 지속적으로 보강해야 하며, 그에 따른 설비 교체 비용이 많이 소요된다. 또한 기존의 시스템 운영자가 계통을 운영하는 방식이기 때문에 전력공급자 중심의 중앙 집중형 전력 공급시스템에서 수요자 중심의 분산형 전력공급시스템으로 재편될 미래 전력시스템에는 적합하지 않다는 문제점을 가지고 있다[11,12].

한편 ESS는 배전 변전소의 주파수 조정, 신재생에너지의 전력 평활화, 경부하 시 충전 및 중부하 시 방전을 통한 피크 컷, 비상 발전 등과의 기능을 수행하여 대규모 전력계통뿐만 아니라 도서지역의 마이크로그리드에 이르기까지 다양한 형태로 사용되고 있다[13-16]. 특히 고압계통과는 달리 저압 배전계통은 전압을 조정하지 않고 주상변압기의 고정탭에 의해 특고압(22.9kV)을 일정 전압(230V)으로 변환하여 전력을 수용가로 공급하고 있는데, 전압 조정기능이 없는 저압 배전계통에 ESS를 도입하면 전압조정 기능뿐만 아니라 수용성 향상 등 다양한 장점을 가질 수 있다. 저압 배전계통에서의 ESS 활용에 관한 연구 중, Wang 등[17]과 Marra 등[18]은 ESS를 PV(Photovoltaic) 설치 지점에 연결하여 전압 조정 방법을 제안했으며, Erdinc 등[19]은 저압 배전계통에서의 ESS, 신재생에너지, EV 스테이션의 크기 및 배치 방법을 제안하였다. Chandhari 등[20]은 저압 배전계통에 배전용 ESS가 연계 운용될 경우 그 경제적 효과를 다루었다. 그러나 저압 배전계통에서 EV 및 신재생에너지의 연계용량이 지속적으로 증가함에 따라 기존 설비의 증설 없이 능동적으로 EV 및 신재생에너지의 수용성을 향상시키면서 전압 및 선로용량 초과 등의 전력품질 문제를

동시에 해결할 수 있는 위한 연구가 필요하다.

1.2 논문의 목표

본 논문은 저압 배전계통에서 ESS를 활용하여 EV의 수용성을 극대화함과 동시에 EV의 충전 전력을 신재생에너지로 이용하는 것을 목표로 한다.

현재 우리나라는 화력, 수력, 원자력 등의 대규모 발전소에서 생산된 전력을 154~765kV로 송전하고 배전용변전소에서 전압을 22.9kV로 낮추어 고압배전선을 통해 고압 수용가에 전력을 공급하고 주상변압기를 통해 전압을 230V로 낮추어 저압 수용가에 전력을 공급하고 있다. 이 중 배전계통에 한하여 전압조정 기능을 살펴보면 22.9kV, 3상 4선식으로 이루어져 있는 고압배전계통은 배전용 변전소의 ULTC(Under Load Tap Changer)와 선로 중간 지점에 설치되어 있는 SVR(Step Voltage Regulator)을 통해 전압을 자동적으로 조정하고 필요에 따라 SVC(Static Var Compensator) 등의 무효전력보상장치를 설치하여 전압을 조정하고 있다[21]. 이에 반해 저압 배전계통은 단상 기준 10~100kVA의 용량을 갖는 13,200/230V의 주상변압기를 통해 단상 혹은 3상으로 수용가에 전력을 공급하고 있으며 고정탭을 사용하는 주상변압기의 특성상 전압조절기능을 가지고 있지 않다. 이러한 상황에서 다수의 완속 충전기에 연계된 EV에 전력을 공급할 경우, 계통에 저전압이 발생할 가능성이 있으며, 주상변압기의 용량 한계로 인해 연계될 수 있는 EV의 수도 제한적일 수밖에 없다.

한편 정부는 파리 기후변화 협약을 이행하기 위한 방안으로 2030년까지 온실가스를 37%까지 줄이기 위한 목표를 가지고 있으며, 이를 위해 친환경적인 EV의 보급 확산 정책을 펼치고 있다. 그러나 EV의 충전에 사용되는 전력을 기존의 화석연료로 이용하게 된다면 EV의 친환경적 장점은 사라지게 될 수밖에 없다[22]. 그러므로 EV의 충전에 신재생에너지를 최대한 활용하는 전원믹스를 고려해야 하나, 수용가에 설치된 EV의 충전패턴과 태양광전원으로 대표되는 신재생에너지의 발전패턴은 동일하지 않을 뿐더러 신재생에너지는 날씨에 제약을 받는 간헐적인 에너지원이기 때문에 원하는 시간대에 감발운전이 어려운 특성을 가지고 있다. 따라서 EV의 충전에 신재생에너지를 최대한 이용할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하며, 이에 대한 효과로는 온실가스

저감, 신재생에너지 보급확대에 기여, 신재생에너지 및 ESS를 활용하는 VPP의 비즈니스 모델을 통한 에너지 신산업 활성화를 기대할 수 있다.

이에 본 논문에서는 기존 설비의 증설 없이, 수용성 문제와 대표적인 신재생에너지인 태양광전원에 의한 전기자동차의 충전 문제를 해결하기 위한 목표를 달성하기 위해 ESS를 활용한다. 다수의 EV 및 태양광전원이 주상변압기 용량을 초과하여 저압 배전계통에 연계될 경우 필연적으로 저전압/과전압 및 선로용량을 초과하는 문제가 발생하게 된다. 이때 ESS를 선로 말단에 연계하고 양방향 전력 조류를 이용하게 되면, 기존의 설비의 교체 없이 연계용량을 획기적으로 증가시킬 수 있으며, EV 및 태양광전원의 연계에 따른 선로용량 초과 및 전압 문제를 모두 해결할 수 있다.

즉, 주상변압기 용량을 초과하는 EV 연계 시 발생하는 저전압 및 선로용량 문제는 말단에 연계된 ESS의 방전을 통해 양방향으로 부하에 전력을 공급함으로써 해결할 수 있다. 또한 태양광전원의 역조류에 의한 과전압 문제는 선로말단에 연계된 ESS의 충전을 통해 해결할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 주상변압기 용량을 초과하는 EV와 태양광전원에 의해 발생될 수 있는 선로용량 및 전압 문제를 해결하고 EV의 수용성을 해당 주상변압기 용량의 최대 2배까지 증가시킬 수 있는 배전용 ESS 제어 알고리즘을 제시한다.

제안한 배전용 ESS의 제어알고리즘을 검증하기 위해 우선 EV 부하, 태양광전원 및 ESS를 포함하는 저압 배전계통을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하고, 시뮬레이션 결과를 분석하여 알고리즘의 유용성을 평가한다. 또한 이를 토대로 ESS를 포함한 30kW급 복합배전계통 시험장치를 구현하고 시험을 통해 EV 및 신재생에너지의 수용성을 확인함으로써 제안한 배전용 ESS 제어알고리즘의 유용성을 입증한다.

1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 배전계통에 연계된 태양광전원에 의한 전압특성을 분석하고, 3장에서는 배전계통의 상용 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 다양한 상황에서의 시뮬레이션을 통해 제시한 알고리즘의 유용성을 확인할 수 있도록 EV, 태양광전원 및 ESS가 연계된 저압 배전계통을 모델링 한다.

한편, 4장에서는 역조류 대응 전압강하 계산이 적용된 네트워크 토폴로지 방식에 의한 전력조류 계산을 통해 태양광전원 및 EV의 충전에 의한 수용가의 과전압 및 저전압을 분석 방안을 제시한다. 또한 태양광전원에 의한 과전압 문제 및 주상변압기 용량을 초과하는 EV 충전에 의해 발생하는 문제들을 해결하기 위해 배전용 ESS가 연계된 저압 배전계통 모델을 제시하여 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지시켜 수용성을 극대화하는 배전용 ESS의 제어 알고리즘을 제시한다.

5장에서는 시뮬레이션을 통해 ESS 연계 전/후 EV를 포함한 부하 및 태양광전원 용량에 따른 저압 배전계통의 선로용량 및 전압 특성을 분석한다. 또한 ESS의 연계지점 변경에 따른 시뮬레이션을 통해 ESS의 도입 위치를 산정하고 부하 및 태양광전원의 분포를 달리하여 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지시키기 위한 ESS의 출력범위 분석한다. 그리고 EV의 동시충전 비율에 따른 ESS의 도입용량을 산정하고 이에 따른 경제성을 분석한다.

6장에서는 실 계통을 모사한 30kW급 복합 저압 배전계통 시험장치를 구현하여 ESS에 의한 EV의 수용성 향상 및 태양광전원에 의한 과전압 문제 해결방안을 실험을 통해 검증한다. 마지막으로 7장은 결론으로 연구를 통해 도출된 결과를 요약정리 한다.

2. 복합 저압 배전계통 전압특성 분석

2.1. 태양광전원이 연계된 배전계통의 전압특성 분석

정부의 신재생에너지 보급 정책에 따라 기관 및 발전사업자 중심으로 신재생에너지의 설치 용량을 확대하고 있다. 그러나 기존의 변전소에서 수용가로 흐르는 단방향 조류가 아닌, 신재생에너지의 연계로 인한 양방향 조류로 인해 다양한 문제가 발생되고 있다. 최근 실 계통상의 문제점으로는 대용량 신재생에너지에 의한 과전압으로 발생된 선로전압조정장치의 오동작, 순시과전압 (Swell), 순시전압저하 (Sag)에 의한 태양광 전원의 불안정한 운전과 인버터에 의한 고조파 발생으로 배전계통의 보호계전기 (OCGR) 오동작 문제, 태양광전원의 연계로 인한 보호기기의 오/부동작 현상을 들 수 있다[23].

특히 태양광전원 연계에 의한 수용가의 과전압 현상은 신재생에너지로 인해 발생하는 대표적인 문제라 할 수 있다. 실제 충남 천안 목천의 해비타트 마을에 설치된 30여대의 태양광전원이 저압배전선로에 연계되어 운용되는 동안, 태양광 발전에 의한 역조류로 수용가의 전압이 Fig. 2.1과 같이 240V까지 상승하는 사례가 보고되었다.

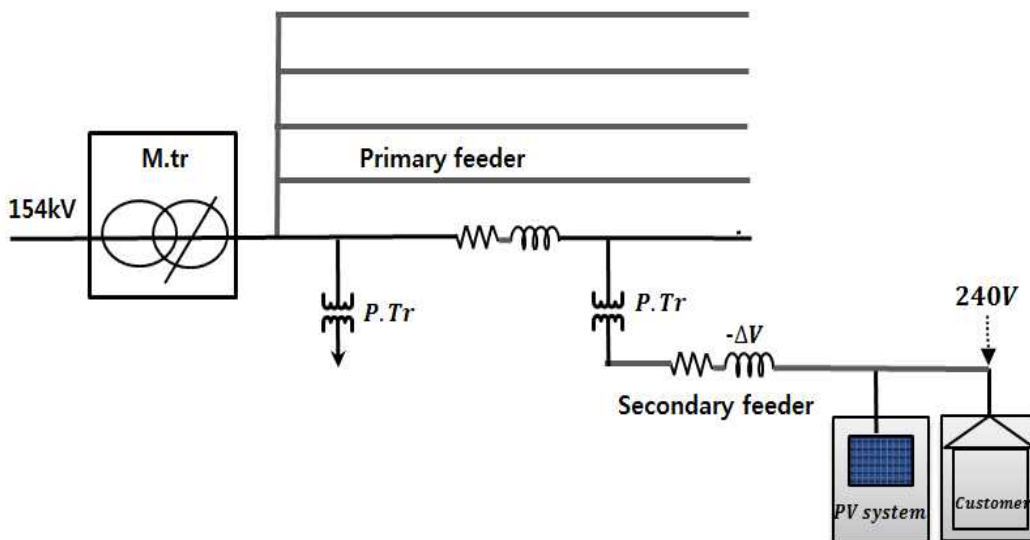


Fig. 2.1 Customer overvoltage due to PV system

태양광전원이 고압배전선로(22.9kV)에 연계될 경우, Fig. 2.2와 같이 태양광전원 출력에 의하여 배전선로의 부하전류가 변화하게 되고 선로임피던스에 의한 전압 강하분이 전압상승분으로 되어 수용가의 전압은 규정범위를 벗어나는 현상이 발생할 수 있는데 고압배전계통에서는 배전용 변전소의 ULTC와 SVR의 협조 운용을 통해 이를 해결하는 방안이 연구되고 있다[24]. 그러나 저압 배전계통의 경우 전류의 크기 및 방향에 따라 주상변압기의 탭 위치를 변경시켜주어야 하지만, 현실적으로 태양광전원의 운용 상태에 따라 고정탭을 사용하는 주상변압기의 탭 위치를 변경시키는 것은 어려운 일이다.

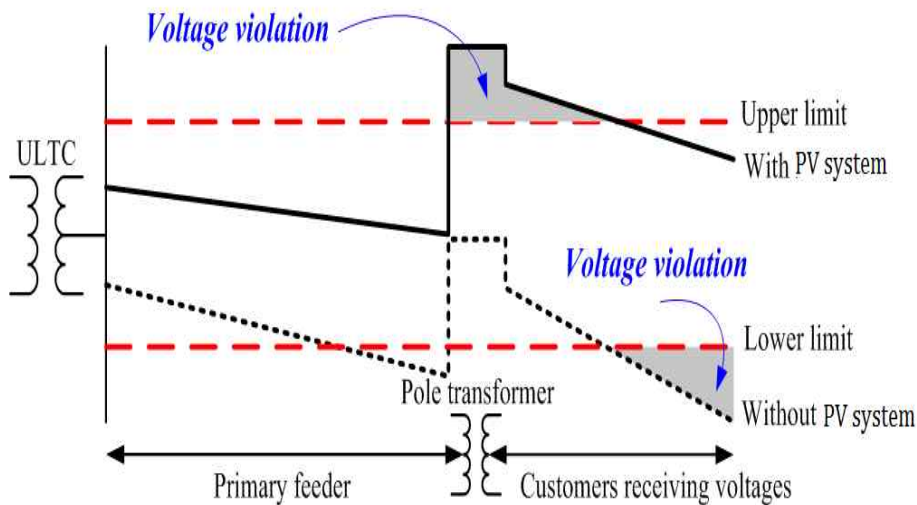


Fig. 2.2 Voltage characteristics with and without PV system

따라서 태양광전원이 저압 배전계통에 연계될 경우 역조류에 의한 과전압 현상을 방지하기 위해서는 별도의 수단이 필요하며, 이에 따라 현재 태양광전원의 출력 조정, 태양광 인버터의 무효전력 흡수에 의한 전압 보상 등에 다양한 방안이 연구되고 있다[25].

그 중 주파수 조정용, 비상발전용 등 다양하게 활용되고 있는 ESS의 경우 Fig. 2.3과 같이 전압조정기능이 없는 저압 배전계통에서 전압을 조정하기 위해 사용될 수 있다. 즉, ESS의 충전과 방전에 따른 전력의 증/감발 운전을 통해 전력 및 전압을 안정화하는 방안이 제안되어지고 있다.

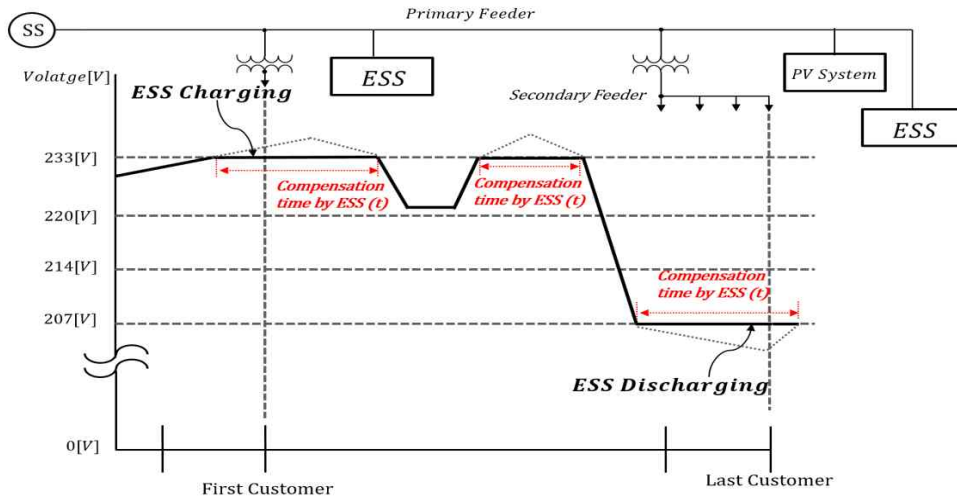


Fig. 2.3 Voltage control by ESS

2.2 EV 증가가 제주 전력계통에 미치는 영향 분석

제주도는 CFI에 따라 2030년까지 도내 모든 상용차를 EV로 전환할 계획을 가지고 있으며, Table 2.1과 같이 총 377,217대의 자동차가 친환경 EV로 교체될 예정이다. 또한 2030년까지 급속 충전기는 4,354대, 완속 충전기는 71,159대를 구축할 계획을 가지고 있다.

Table 2.1 Goal of the installation of EV and EVC in Jeju Island

구분		CFI EV 및 충전기 목표 수정안		
		2020	2025	2030
EV 도입목표	민간/공공	32,297	166,364	233,745
	렌터카	834	3,321	4,321
	택시	5,637	26,695	33,271
	버스	694	9,981	23,217
	화물	489	22,163	82,663
	합계	39,951	227,524	377,217
충전기 도입목표	급속	777	1,741	2,267
	완속	21,592	56,562	71,159
	bus	50	864	2,087
	합계	22,419	59,167	75,513

이와 같은 상황에서 EV 증가가 제주 전력계통에 미치는 영향을 분석하는 것은 안정적인 전력공급을 위해 매우 중요하다. 제 8차 전력수급계획에 따르면 2030년 경 제주도의 최대 일부하는 900~1,000MW로 전망되며, 특히 EV 충전부하 피크시간과 일반부하 피크시간이 겹칠 가능성이 있다.

그러나 Table 2.2에서 확인 할 수 있듯이 EV 전환 단계별 수준과 제주 전원구성 전망을 검토한 결과를 보면, LNG 복합화력발전소 및 제3 HVDC 해저 연계선이 완공됨에 따라 2030년의 EV 부하에 따른 전력 공급 예비율은 70%로 전력공급에는 이상이 없음을 확인할 수 있다[26].

Table 2.2 Electricity supply and demand plan of Jeju Island

구분		~2017년	~2020년	~2030년
설비용량(MW)		1,702	3,225	5,775
설비 종류	화력발전	590	735	655
	신재생발전	482	1,420	3,200
	기타설비	630	1,760	1,900
공급능력(MW)		1,120	1,760	3,017
최대전력(MW)		848	1,006	1,778
공급 예비율(%)		32	75	70
하계 공급예비율(%)		16	28	14
전력필요량 (GWh/년)	도전체	5,600	6,746	11,334
	EV	95	416	2,158
	EV 점유율(%)	1.7	6.2	19

제주도 전체 송배전계통 수준에서는 EV의 증가가 전력계통에 미치는 영향이 없다고 할 수 있으나, 저압 배전계통에 연계되는 완속 충전기의 보급에 따른 계통 영향의 경우 위와는 별개의 문제로 다룰 필요가 있다. 저압배전선로에 연계된 수용가는 주상변압기의 용량에 따라 운용되도록 설계되어 있다. 개별 수용가의 전력량은

일반적으로 3kW로 설계되어 있으며, 주상변압기는 3kW의 용량을 갖는 모든 수용가의 합산 전력량의 최소 1.2배의 용량을 갖도록 하여 안정적인 공급을 하도록 설계된다. 즉, 주상변압기 이하 모든 수용가의 최대 합산 전력량은 주상변압기 용량의 80% 정도이며, 이 때 각 수용가에 7kW의 완속 충전기가 각 수용가에 보급되어 동시에 충전할 경우 주상변압기 용량을 크게 상회할 수 있다.

Fig. 2.4는 방사상 저압배전선로에 완속 충전기 및 태양광전원이 연계된 구성도를 보여준다. 또한 Table 2.3은 기존 저압 배전계통에서 각 수용가마다 완속 충전기를 설치할 경우 필요한 전력량을 보여준다. 여기서 수용가는 주상변압기의 80% 용량을 갖도록 하고, 각 수용가에 1대의 완속 충전기가 설치되었다고 가정한다. Table 2.3에서 확인할 수 있듯이 총 300kVA의 용량을 갖는 주상변압기에 연계되어지는 수용가는 약 80가구 정도이며, 80가구 모두 7kW의 용량을 갖는 EV가 설치된다고 가정한다. 이때 DR(Demand Response)을 실시하지 않고 각 수용가에 설치된 EV가 동시에 충전할 경우, EV에만 공급되어야 하는 전력은 560kW로 300kVA 용량을 갖는 주상변압기 용량을 크게 상회하게 되며, 이를 모두 수용하기 위해서는 주상변압기를 교체함과 동시에 선로 또한 큰 용량을 갖도록 교체해야 한다. 여기에 더해 수용가가 전력을 소비할 경우에는 주상변압기의 2배 이상의 용량이 필요함을 쉽게 확인할 수 있다.

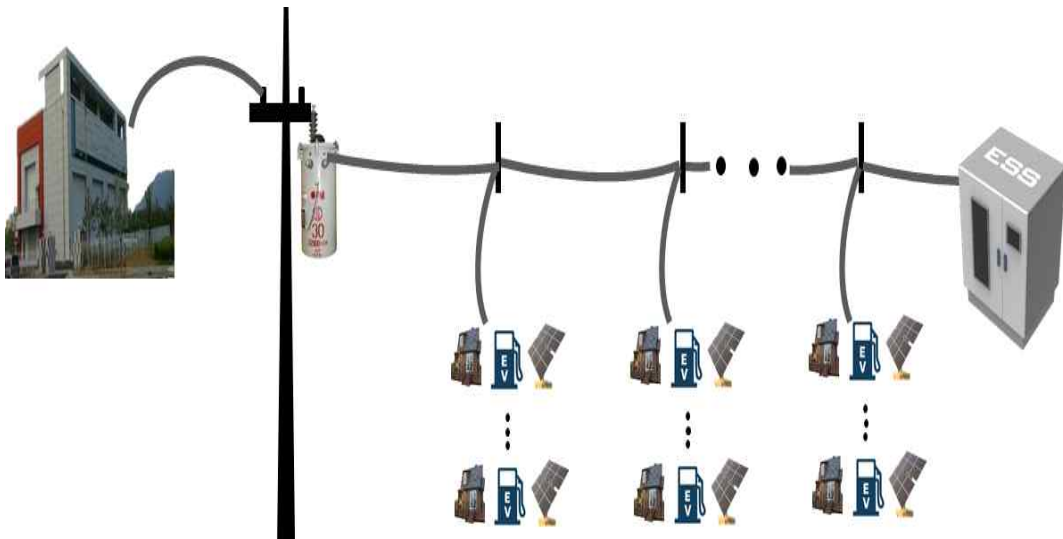


Fig. 2.4 Concept for EVC and PV system in secondary feeder

Table 2.3 Power required to accommodate EV and PV system

	용량	대수	총 용량	필요전력(kW)(부하 제외)
주상변압기	100kVA	3	300kVA	EV: 300-560 = -260
수용가	3kW	80	240kW	
완속 충전기	7kW	80	560kW	
태양광전원	3kW	80	240kW	

이를 종합해 보면, 2030년경의 제주도 전원 구성은 LNG 복합화력발전소 및 제3 HVDC 해저 연계선 추가로 인해 약 70% 정도의 공급 예비율을 확보할 수 있을 것으로 예상됨에 따라 상위 계통에서의 EV 설치에 따른 전력 공급은 이상 없음을 확인할 수 있다. 그러나, 저압 배전계통에는 완속 충전기의 구축 확산에 따른 전력용량이 주상변압기 용량을 상회하여 안정적으로 수용가에 전력을 공급할 수 있는 적절한 전원 구성 대책 방안이 필요함을 알 수 있다.

2.3 EV 및 태양광전원의 수용성 향상을 위한 배전용 ESS의 도입 방안

기존 저압 배전계통의 전력조류는 변전소에서 수용가를 향한 단방향이며 이를 기반으로 계통운영이 이루어지고 있다. 그러나 분산전원이 배전계통에 연계되는 경우에는 기존의 시스템과 달리 양방향으로 전력이 공급된다. 이러한 양방향 전력공급은 기존의 시스템에 전압상승, 전압강하와 같은 전력품질 문제를 일으킬 수 있다[27]. 그러나 역으로 계통 말단에 연계된 ESS를 이용하여 양방향으로 전력을 운용할 시에는 무정전 전원공급, 계통 수용성 향상 및 전압강하/상승에 따른 전력품질 문제점을 해결할 수 있는 긍정적인 면을 기대할 수 있다.

Fig. 2.5는 ESS가 없는 저압 배전계통에 다수의 EV가 연계될 경우의 문제점을 보여준다. EV의 충전전력이 많아질 경우 주상변압기 용량을 초과할 수 있으며, 이를 해결하기 위해서는 계통을 증설해야만 한다.

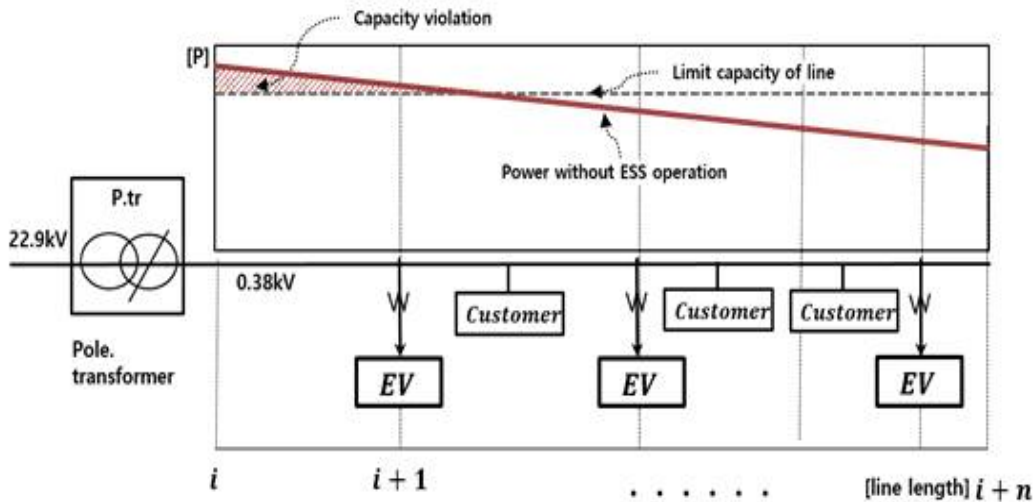


Fig. 2.5 Power characteristics by unidirectional power flow

Fig. 2.6은 EV의 수용성 향상을 위해 양방향 전력조류를 이용하는 ESS의 제어 방안을 보여준다. 구체적으로 저압선로에 연계되는 수용가 및 EV에 공급되는 전력을 주상변압기 및 ESS가 서로 분담하게 된다. 따라서 순조류만 적용했을 경우의 선로 임피던스에 의한 전압강하로 인해 저전압이 발생하는 지점에서는 ESS가 방전을 통해 역조류로 전력을 공급함으로써 전압을 상승시킬 수 있다. 또한 양방향 전력공급에 의한 저압선로의 부담을 줄임으로서 선로용량을 초과하지 않으면서 EV의 동시충진량을 증가시킬 수 있다. 즉, 저압 배전계통에서 다수의 EV가 동시에 운용되어 주상변압기 용량을 초과하는 경우, 전압 및 선로용량 문제가 발생할 수 있는데 ESS의 능동적인 대응으로 상기의 문제를 해결할 수 있다[28].

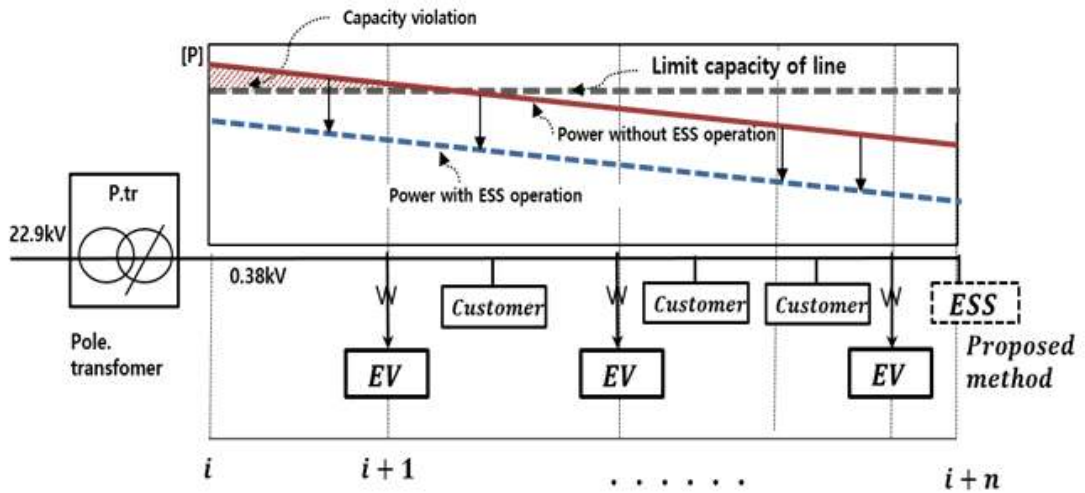


Fig. 2.6 Power characteristics by bidirectional power flow

즉 계통의 전압특성에 의하여 저압 배전계통에서 EV의 충전량 및 부하량이 많을 경우, ESS의 방전을 통해서 계통의 한계용량을 유지하고, 태양광전원의 발전량이 많은 경우에는 ESS를 충전시켜 허용치 이내로의 전압조정을 통해 계통의 선로용량 및 전압을 허용치 이내로 유지하기 위한 방안을 제시하며, 이 전략의 개념을 나타내면 Fig. 2.7 및 Fig. 2.8과 같다. Fig. 2.7은 부하량이 태양광전원 발전량보다 많을 경우 ESS의 방전을 통해 전압문제를 해결할 수 있음을 나타낸 것이고, Fig. 2.8은 태양광전원에 의해 발생된 과전압 현상을 ESS의 충전을 통해 해결할 수 있음을 보여준다.

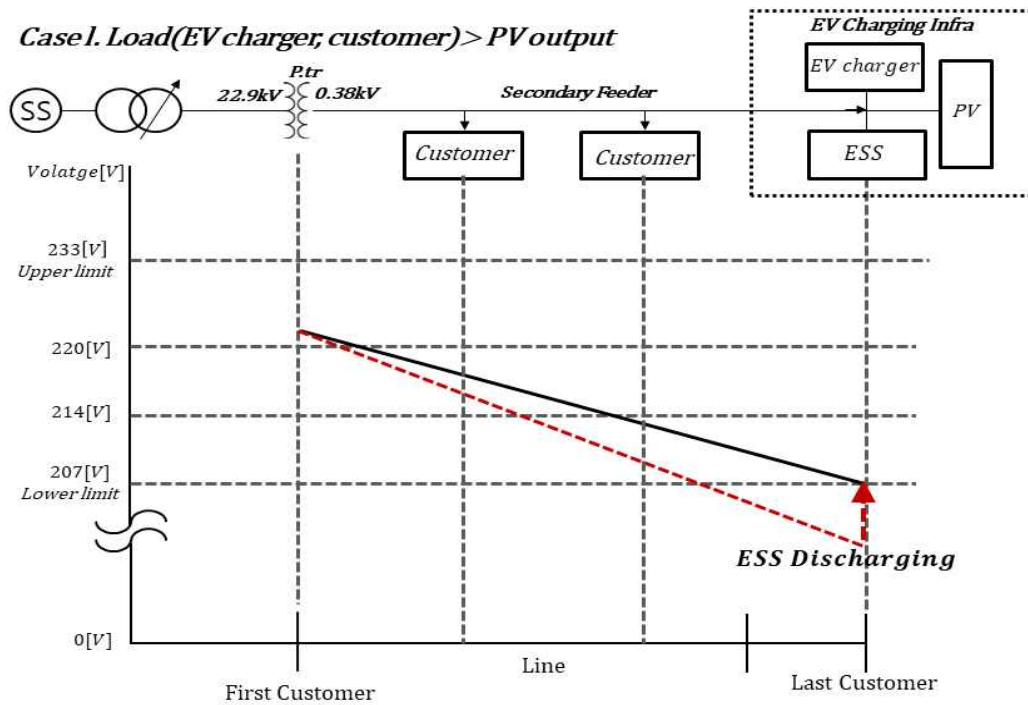


Fig. 2.7 Voltage characteristics through ESS discharging

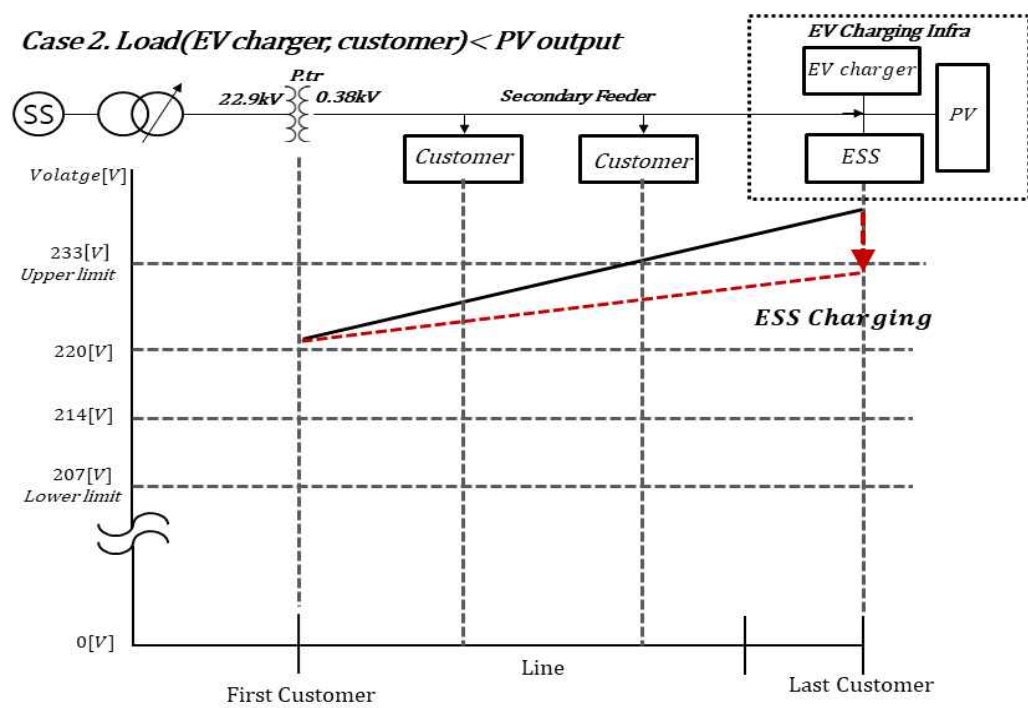


Fig. 2.8 Voltage characteristics through ESS charging

저압배전선로에 태양광전원을 포함한 전기충전시스템이 운용되는 경우, 태양광전원에 의한 발전전력을 ESS에 충전하고, EV 충전 시에는 ESS의 방전을 통해 계통전압 및 선로용량 문제를 해결하고 수용성을 극대화하기 위한 방안은 다음과 같다. Fig. 2.9와 같이 24시간 동안의 일반적인 태양광전원의 발전 패턴 및 EV의 운용패턴을 정의하면, 태양광전원에 의한 역조류로 인해 수용가 전압은 8번째 시간대부터 14번째 시간대까지 상승하게 되는 현상을 보이고, 반대로 EV와 부하 사용량이 많아지면 전압(0-2번째 시간대, 18-24번째 시간대)은 강하하게 된다. 이와 같은 상황에서 ESS를 운용하게 되면 Fig. 2.9의 ESS 연계 전/후의 그래프로부터 전압문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 태양광전원에 의한 전력을 EV 충전에 활용할 수 있다.

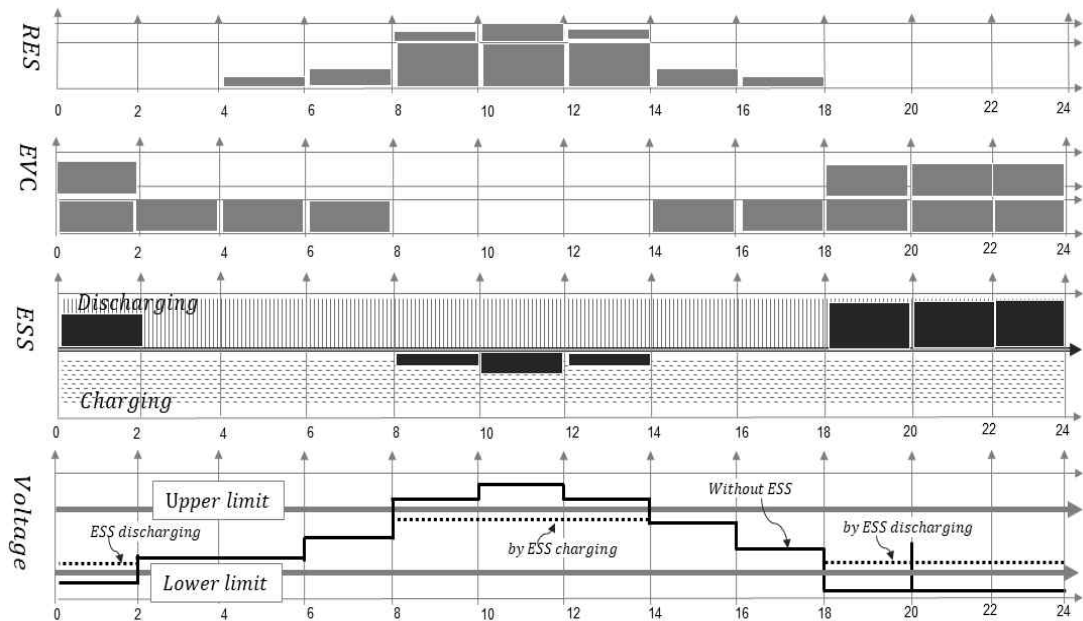


Fig. 2.9 Strategy of power stabilization in the secondary feeder by ESS

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 복합 저압 배전계통 모델링

저압 배전계통에서 ESS의 제어 알고리즘에 대한 모델 검증을 수행하기 위하여 본 장에서는 배전계통의 상용 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 EV 부하, 태양광전원 및 전압제어 알고리즘이 포함된 ESS를 모델링한다.

Fig. 3.1은 주상변압기, 선로, EV, ESS로 구성된 복합 저압 배전계통으로 ESS는 저압선로를 8개 구간으로 나누어 각각 직하지점, 중간 지점, 말단 지점에 연계할 수 있도록 구성된다. 태양광전원 및 EV가 포함된 부하는 각 버스(Bus)에 병렬로 연계되어 부하는 전력을 소모하고 태양광전원은 발전하도록 구성된다. 또한 제어를 위한 통신은 각각의 버스에서 전력 정보를 측정하여 ESS에 전달되며, ESS는 계통의 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지시키기 위해 충/방전 하도록 구성된다.

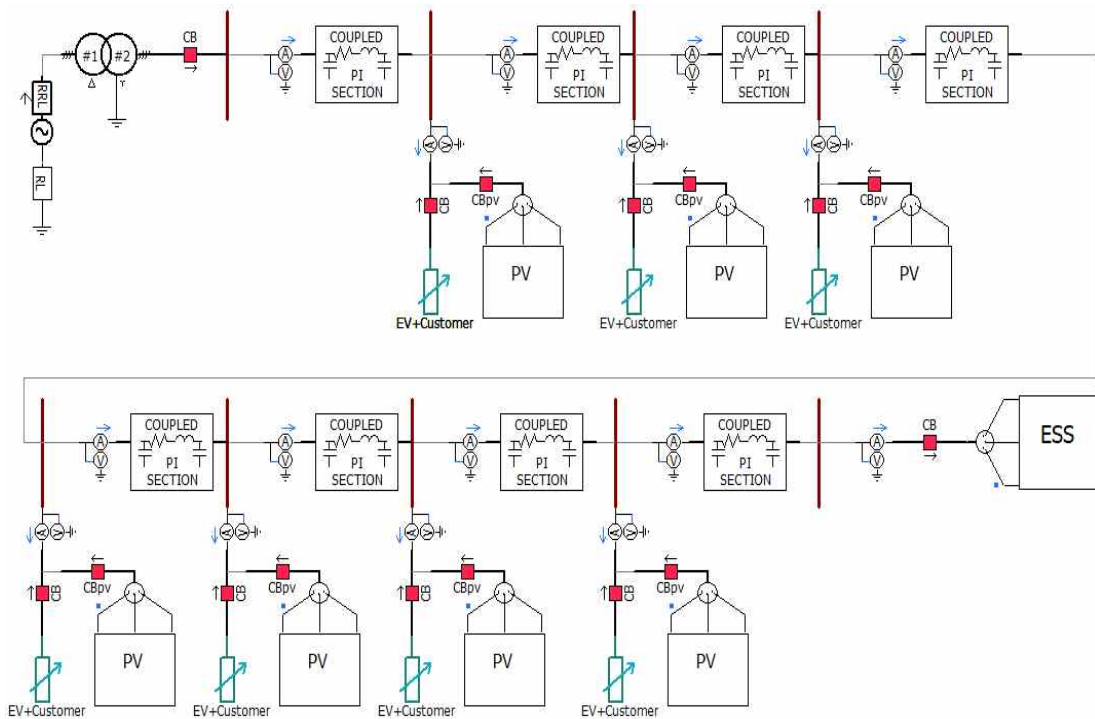


Fig. 3.1 Low voltage distribution system with ESS

3.1 EV 부하 모델링

EV는 전력을 소비하는 부하로 모델링 된다. 일반적으로 부하는 정임피던스(Constant Impedance), 정전류(Constant Current), 정전력(Constant Power) 모델로 구성된 ZIP 모델을 이용하게 된다. PSCAD/EMTDC에서는 ZIP 모델을 제공하나, 시간에 따른 부하량을 조절할 수 없는 문제점이 있다. 따라서 Fig. 3.2와 같이 저압 수용가의 전력특성을 동시에 반영하여 시간에 따른 소비전력을 부하에 걸리는 전압에 의해 계산된 저항성분으로 EV 및 부하를 모델링하고 Fig. 3.3과 같이 시간에 따른 EV의 충전전력 조절이 가능하도록 구성한다.

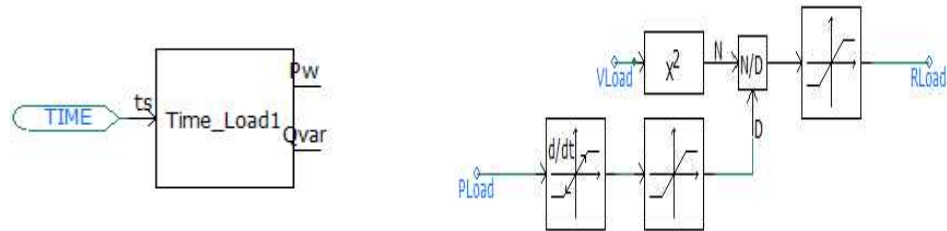


Fig. 3.2 EV load modeling

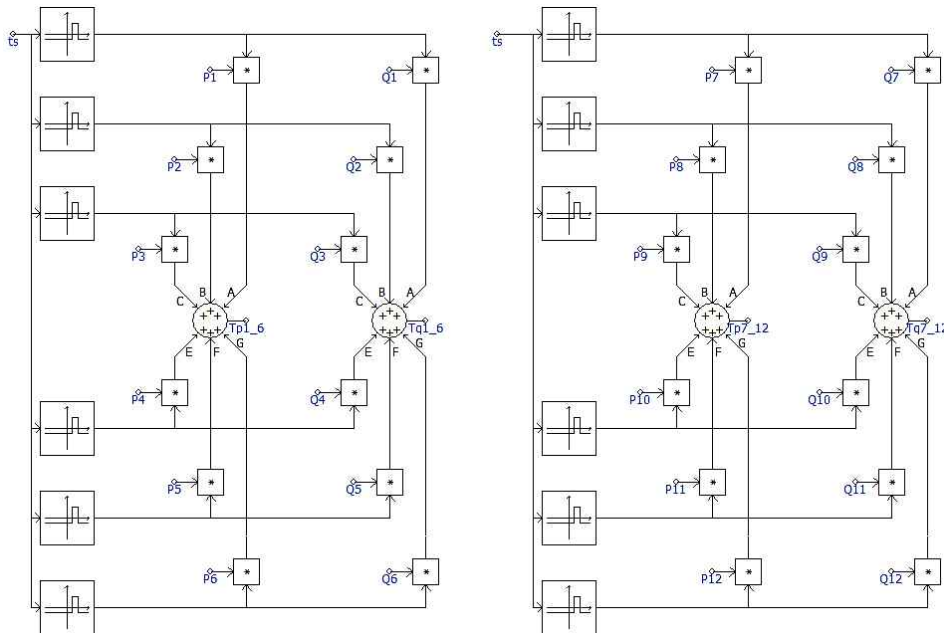


Fig. 3.3 load variation by time

3.2 태양광전원 모델링

태양광전원에 대한 전체 제어 토폴로지는 Fig. 3.4와 같다. 일반적으로 3상 인버터를 a, b, c 좌표계에서 모델링하면 교류 특성상 인버터에 접속되는 인덕턴스 전류, 전압 등이 시간에 따라 변하게 되어 동특성 해석 및 제어기 설계가 매우 어렵게 된다. 그러나 $d-q$ 좌표변환을 이용하면 시간 또는 주파수에 따라 변화하는 파라미터가 상수가 되어 제어기 설계가 용이하다. 또한 3상이 평형인 경우 영상분을 제거할 수 있어 시스템의 차수를 줄일 수 있으며, 유효전력 및 무효전력을 상호 독립적으로 제어할 수 있다[29].

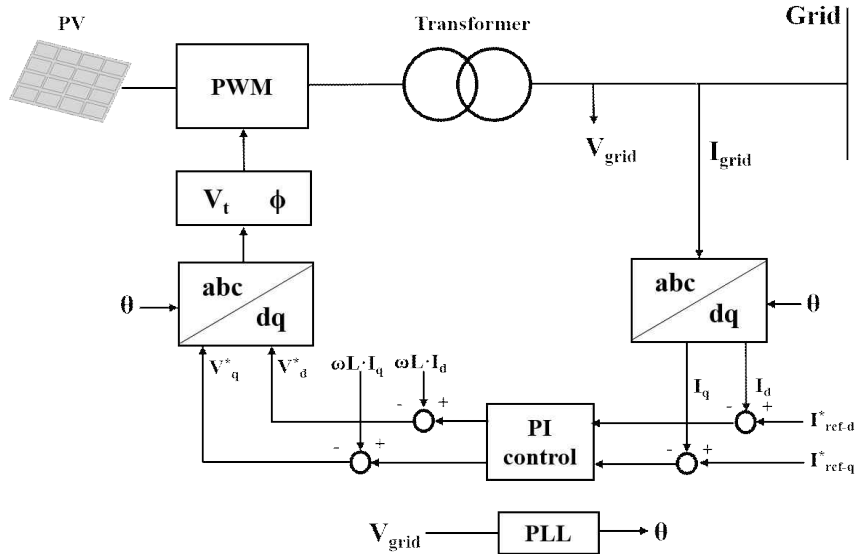


Fig. 3.4 Control topology of PV system

태양광전원용 연계형 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위하여, PI 제어기를 이용한 세부적인 전류제어는 식 (3.1)과 식 (3.2)와 같이 나타낼 수 있으며, V_d 와 V_q 는 서로 디커플링 되기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.

$$V_d = (I_{dref} - I_d) \cdot \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) - I_q \cdot \omega L + V_{sq} \quad (3.1)$$

$$V_q = (I_{qref} - I_q) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) + I_d \cdot \omega L \quad (3.2)$$

여기서, V_d 와 V_q 는 인버터 출력을 위한 $d-q$ 축 전압이고, I_{dref} 와 I_{qref} 는 인버터 출력의 d 축과 q 축 기준전류이다. 그리고 I_q 와 I_d 는 $d-q$ 동기좌표계에 의한 계통전류(직류)이고, V_{sq} 는 계통의 순시전압이다.

목표로 하는 태양광전원의 유효전력 P 와 무효전력 Q 는 식 (3.3)과 식 (3.4)와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 원하는 출력을 입력하게 되면 그에 따른 d 축과 q 축 기준전류가 생성되어 IGBT를 구동하기 위한 펄스파를 생성하게 된다.

$$P = \frac{3}{2} |V_{sq}| I_{qref} \quad (3.3)$$

$$Q = -\frac{3}{2} |V_{sq}| I_{dref} \quad (3.4)$$

한편 태양광전원의 계통연계형 인버터 모델링의 제어방식인 전류제어 알고리즘에 의하여 나온 V_d 와 V_q 는 역 $d-q$ 좌표변환을 통해 3상의 전압으로 변환되며, IGBT를 구동시키기 위한 6개의 PWM 신호로 변환된다. 식 (3.5)과 식 (3.6)은 PWM 신호를 생성하는 과정에서 태양광전원이 연계되는 지점의 전압과 위상을 동기화시키기 위한 기준이 되는 값을 위해 도입한다.

$$\phi = (\tan^{-1} \frac{V_q}{V_d}) \times \frac{180}{\pi} \quad (3.5)$$

$$V_t = \sqrt{V_q^2 + V_d^2} \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \quad (3.6)$$

여기서, ϕ 는 연계계통의 위상각이고, V_t 는 연계계통의 전압이다.

PSCAD/EMTDC를 이용한 3상의 교류 전압과 전류의 $d-q$ 변환은 Fig. 3.5와 같으며, 전류 제어기로부터 나온 d 축과 q 축 전압을 3상 교류전압으로 역변환하기 위한 모델링은 Fig. 3.6과 같다.

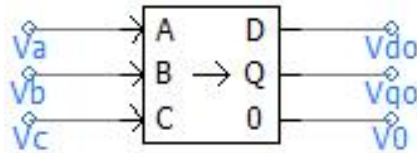


Fig. 3.5 $d-q$ transformation for three-phase voltage

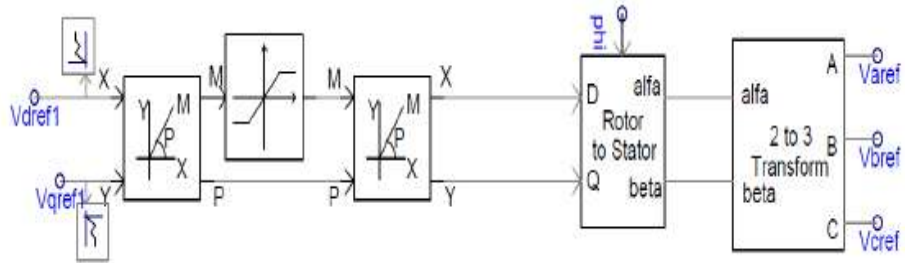


Fig. 3.6 Inverse $d-q$ transformation

Fig. 3.7은 목표로 하는 유효전력과 무효전력의 출력 값을 설정하기 위하여 식 (3.4) 및 식 (3.5)을 모델링 한 것이다

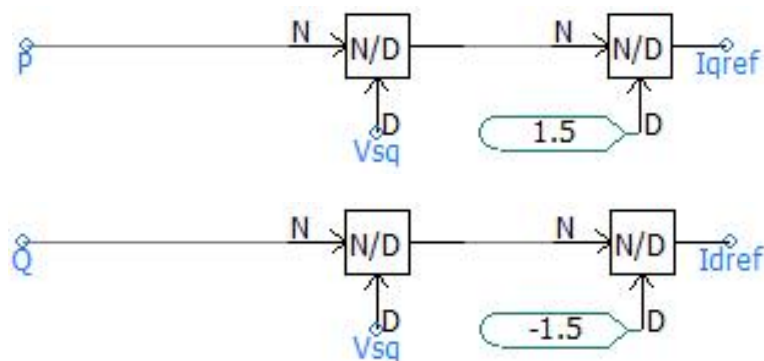


Fig. 3.7 Active and reactive power set value

Fig. 3.8은 IGBT를 구동하기 위한 6개의 PWM 신호를 생성하기 위한 모델링을 나타내며, 역변환된 3상 전압과 식 (3.5), 식 (3.6)에서 도출된 값이 이용된다.

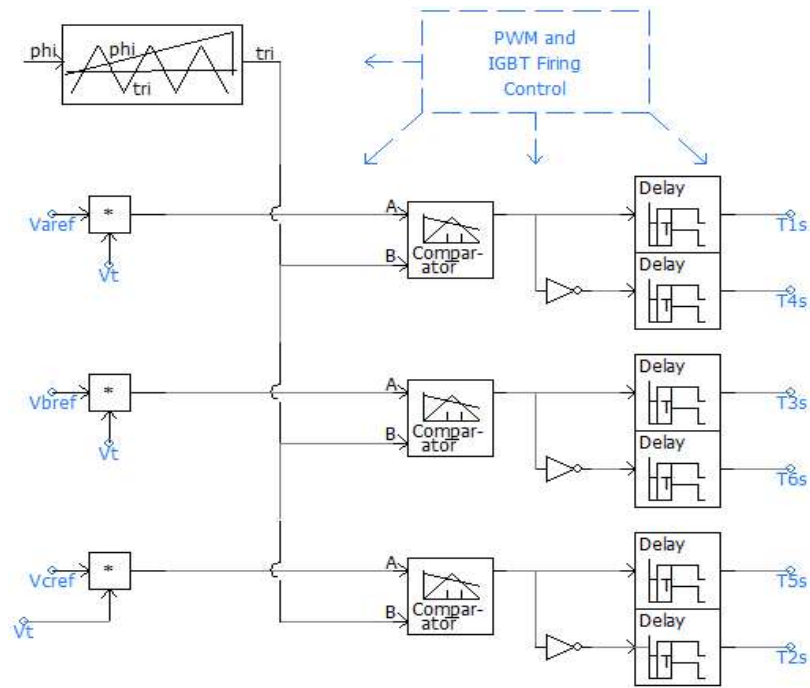


Fig. 3.8 PWM for the IGBT control

Fig. 3.9는 계통연계 인버터로서 Fig. 3.8에서 나온 6개의 PWM은 IGBT를 구동시켜 DC를 3상 AC로 변환시키고 변환된 AC 전력은 변압기를 통해 계통으로 전력을 공급한다.

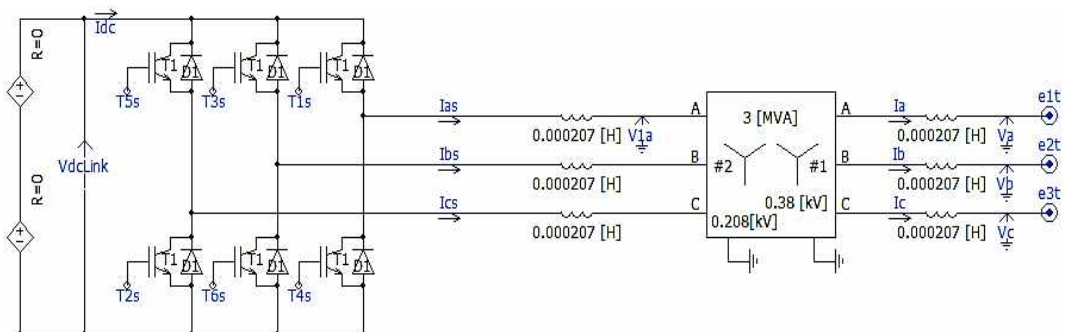


Fig. 3.9 Grid connected inverter

3.3 ESS 모델링

다수의 EV 및 태양광전원이 도입된 저압 배전계통에 연계되는 배전용 ESS는 Fig. 3.10과 같이 전력을 충/방전할 수 있는 배터리, 배터리의 전압을 승압/강압하여 배터리에 전력을 충/방전할 수 있도록 전력을 전달하는 DC-DC 컨버터 그리고 배터리의 전력을 계통에 연계하여 충/방전 전력의 지령신호에 따라 운용을 수행하는 PCS 및 변환된 전력을 계통전압과 동기화하기 위한 계통연계용 변압기로 구성된다[30].

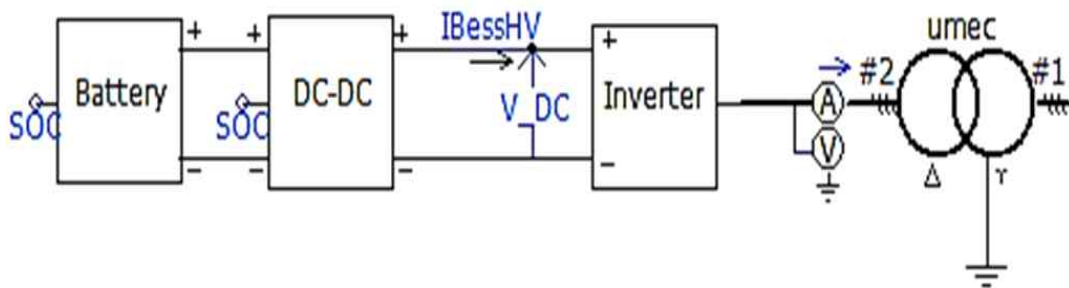


Fig. 3.10 ESS modeling

Fig. 3.11은 배터리 모델로 V_{batt} 는 배터리 단자전압, I_{batt} 는 배터리의 전류를 나타낸다. 배터리 모델에서 전압 방정식은 식 (3.7)과 같이 SOC(State Of Charge)를 이용하여 표현이 가능하며, 실제 상황에 맞게 전압, 용량 조정이 가능하다[31].

$$E = E_0 - K \cdot \frac{1}{SOC} + A \cdot e^{-B \cdot Q(1-SOC)} \quad (3.7)$$

여기서 E 와 E_0 는 무부하 전압과 배터리 전압이고, K 와 Q 는 분극전압과 배터리 용량(Ah)이다. 그리고 A 와 B 는 비선형 영역에서 충/방전 시 배터리 전압과 용량에 대한 역시정수(Ah⁻¹)를 나타낸다.

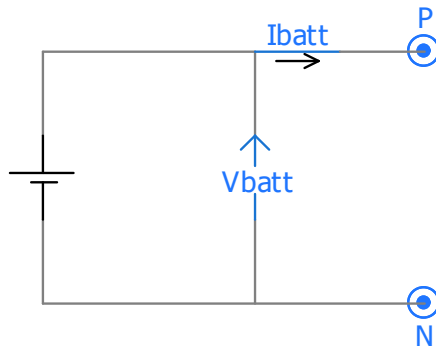


Fig. 3.11 Battery modeling

Fig. 3.12는 DC-DC 컨버터로 벅 컨버터와 부스트 컨버터로 구성된다. DC-DC 컨버터는 충전 모드에서는 Fig. 3.12(a)와 같이 벅 컨버터로 동작하고 방전 모드에서는 Fig. 3.12(b)와 같이 부스트 모드로 동작하는데 충/방전 전력값에 따라 배터리의 출력을 결정할 듀티 사이클(Ref_Boost , Ref_Buck)이 결정된다. 결정된 듀티 사이클은 Fig. 3.12(c)에서 캐리어파에 의해 벅/부스트 컨버터의 게이트 펄스파를 생성하고, 게이트 펄스파는 Fig. 3.12(d)에서 IGBT를 동작시켜 배터리를 충/방전한다.

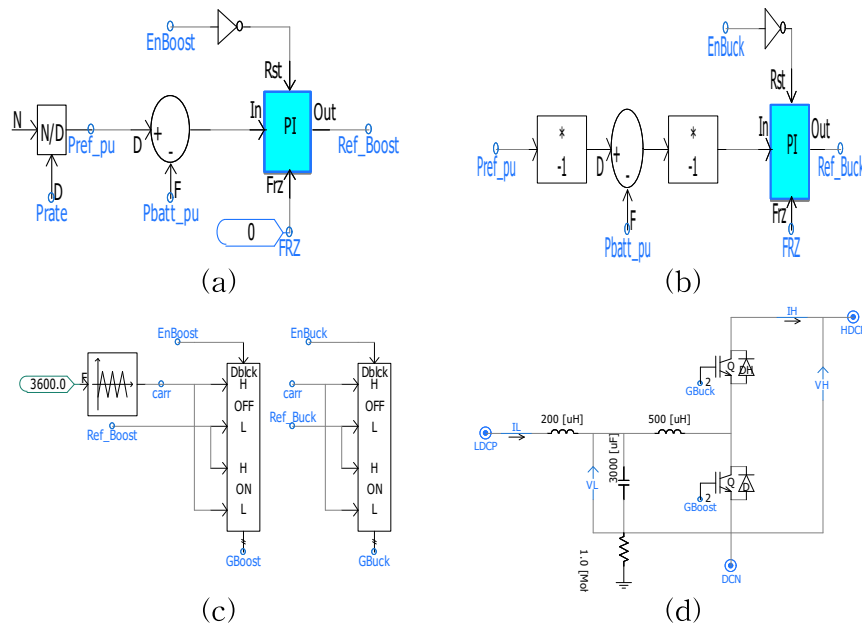


Fig. 3.12 DC-DC converter modeling, (a) boost mode controller, (b) buck mode controller, (c) gate pulse signal, (d) buck/boost converter

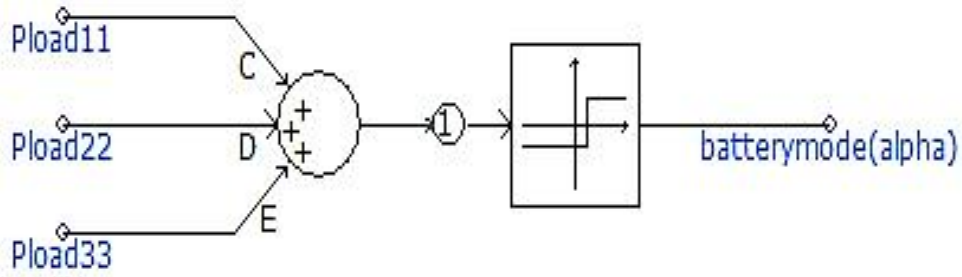


Fig. 3.14 ESS charge/discharge mode

Fig. 3.15는 ESS의 충/방전 용량 결정을 위한 모델링을 나타낸다. ESS는 모드가 결정이 되면 바로 동작하지 않고, 각 버스에서 측정된 전력의 합이 조류계산을 통해 얻은 기준값을 초과할 경우에만 동작하도록 하며 ESS의 충/방전 출력용량은 식 (3.8) 및 식 (3.9)에 의해 결정된다.

$$P_{chg} = \sum_1^n P_n - P_G - P_{grid} \quad (3.8)$$

$$P_{dischg} = \sum_1^n P_n - P_L \quad (3.9)$$

여기서 P_n 은 각 버스에서 측정된 전력의 합이고, P_{chg} 와 P_{dischg} 는 ESS의 충전과 방전용량이다. 그리고 P_G 와 P_L 는 ESS의 충전모드와 방전모드 동작을 위한 기준값이고 P_{grid} 는 계통 전력이다.

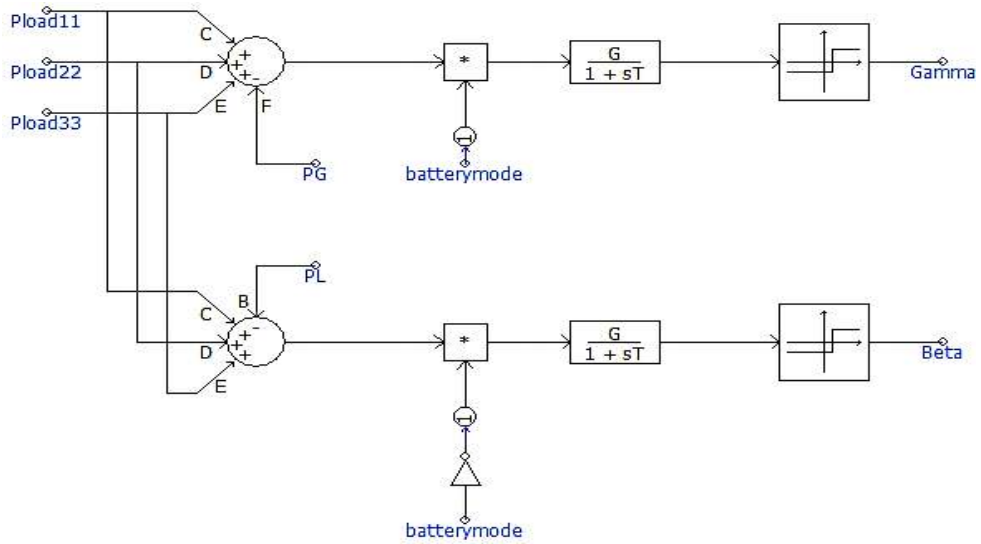


Fig. 3.15 ESS charge/discharge power

충/방전 모드 및 출력 용량이 정해지면 Fig. 3.16의 P_{ref} 는 DC-DC 컨버터로 전달이 되고, ESS는 각각의 모드에서 P_{ref} 에 따라 배터리를 충/방전 한다. 즉, 충전모드에서는 신호 $Gamma$ 가 1인 경우 P_{chg} 가 P_{ref} 가 되며 방전모드에서는 신호 $Beta$ 가 1인 경우 P_{dischg} 가 P_{ref} 가 되어 ESS는 동작하게 된다.

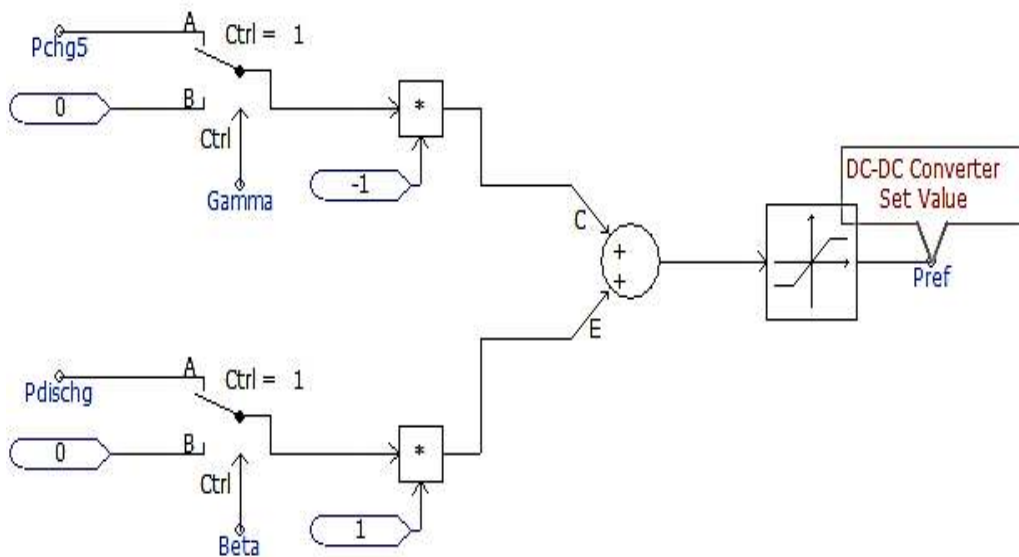


Fig. 3.16 ESS output power set-point to the DC-DC converter

ESS의 충/방전 모드 및 SOC 운용범위는 DC-DC 컨버터 내에서 이루어진다. Fig. 3.17은 DC-DC 컨버터 내의 상위 레벨 제어를 보여준다. 즉, ESS가 충전모드로 동작하는 경우 DC-DC 컨버터는 벡 컨버터로 동작하게 되고, 방전모드로 동작하는 경우에는 부스트 컨버터로 동작하게 된다. 또한 안정적인 ESS의 운용을 위해 충/방전 시 SOC 범위를 설정할 수 있도록 한다.

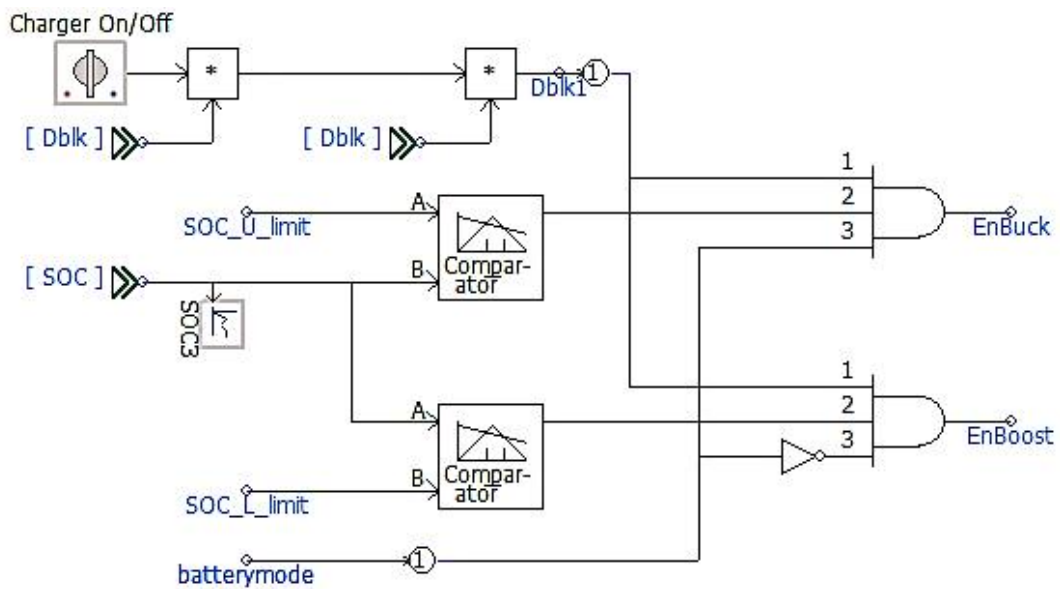


Fig. 3.17 Buck/boost converter operation for ESS charge/discharge

4. EV 수용성 향상을 위한 배전용 ESS의 제어 알고리즘

본 장에서는 EV 및 태양광전원의 용량 증가에 따라 발생할 수 있는 전압 및 선로용량 문제점을 해결하기 위해 일반적인 저압 배전계통 모델을 제안하고 이에 대한 전압특성을 분석하기 위해 네트워크 토폴리지에 기반한 조류계산 방안을 제안한다. 이를 바탕으로 EV의 연계용량이 주상변압기 용량을 초과할 시 발생할 수 있는 전력품질 문제 및 태양광전원에 의한 과전압 현상을 ESS에 의해 해결할 수 있는 배전용 ESS의 제어 알고리즘을 제시한다.

4.1 배전용 ESS의 제어 방안

저압 배전계통에서 전압은 EV를 포함한 부하 및 태양광전원의 발전 패턴에 따라 달라질 수 있다. 즉, 낮 시간동안 태양광 발전이 많을 경우 역조류에 의해 수용가에는 과전압이 발생할 수 있고, 저녁 시간대에 EV 충전이 많을 경우에는 수용가에 저전압 현상이 발생할 수 있다. 이와 같은 상황에서 ESS를 활용하여 적절한 충/방전 운용을 수행하게 된다면 전압 및 선로용량 문제를 해결함과 동시에 수용성을 향상시킬 수 있다. 따라서 본 논문은 태양광전원에 의한 전압이 상한치를 벗어날 경우 ESS를 충전시키고, EV의 전력소모에 의해 전압이 하한치를 벗어날 경우 ESS를 방전시켜 허용범위 이내로 전압을 조정하고 동시에 저압선로의 한계용량을 유지하기 위한 제어 알고리즘을 제시한다. 이 전략의 개념을 나타내면 Fig. 4.1과 같다[32,33].

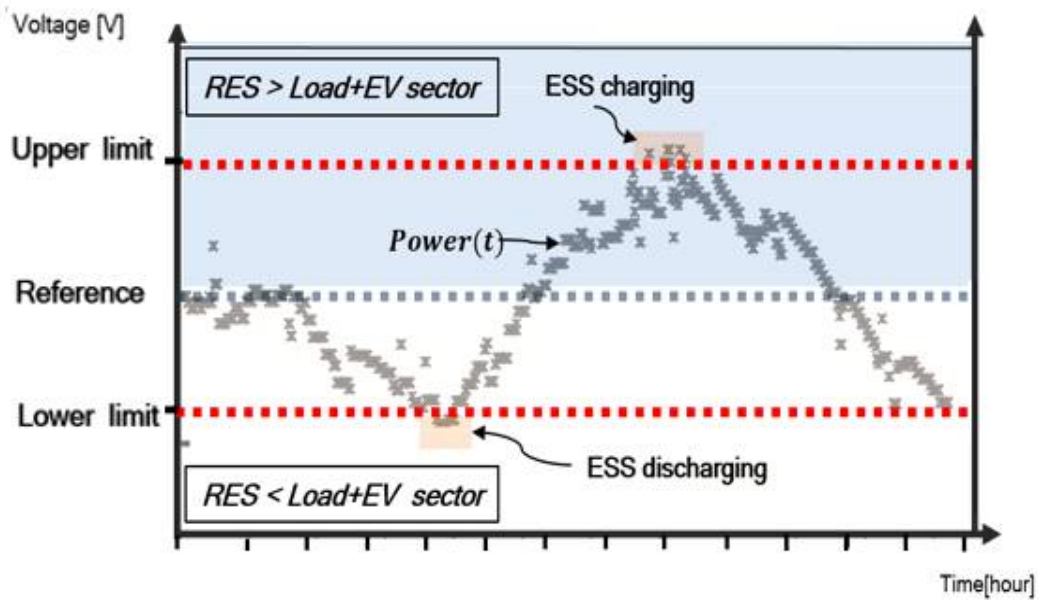
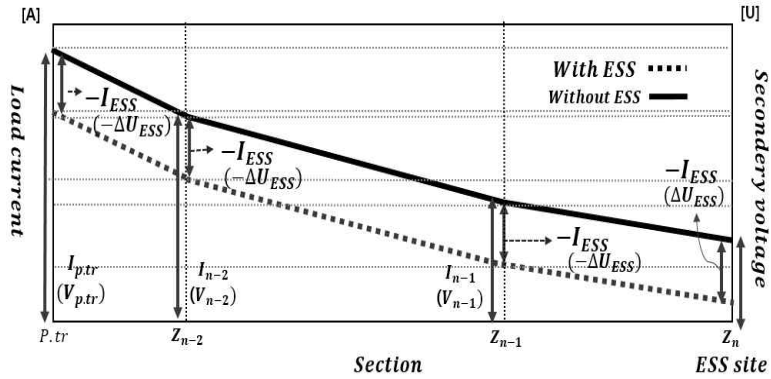
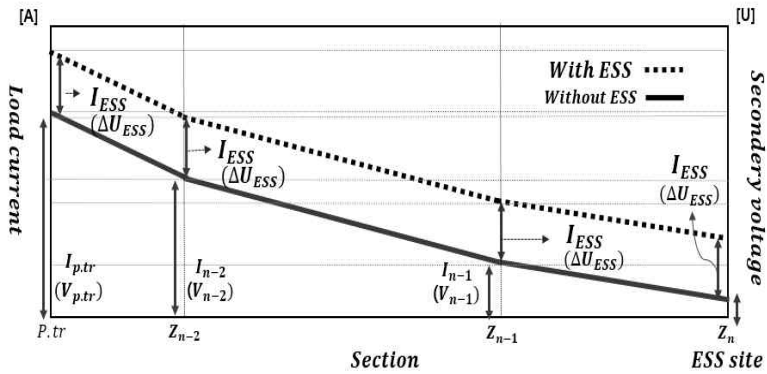


Fig. 4.1 Voltage drop and rise issues

제안한 전략을 상세하게 설명하면, 태양광전원에 의해 발생된 전력이 모두 계통 측으로 흐르게 되면 계통의 전압은 상한치($V > 233V$)를 넘어설 수 있다. 이와 같은 상황에서 계통 말단에 연계된 ESS는 충전모드로 운용되어, 계통 측으로만 흐르는 조류를 충전에 의해 분산시켜 전압을 허용치 이내로 유지시키기 위해 운용된다. Fig. 4.2(a)는 태양광 발전에 의한 전압 상승을 ESS의 충전을 통해 전압을 강하시키는 전략을 나타낸 것으로 계통전압이 감소됨에 따라 구간(수용가) 전압은 규정범위 이내로 유지하게 된다. 또한 수용가에 연계된 다수의 EV 충전 시 계통 측으로부터 모든 전력을 공급받게 될 경우 전압강하로 인해 전압은 하한치($V < 207V$)를 벗어날 수 있다. 이와 같은 상황에서 계통 말단에 연계된 ESS는 방전모드로 운용되어, 계통 측에서 공급되어지는 전력을 ESS가 분담하여 운용하게 된다. Fig. 4.2(b)는 다수의 EV의 충전에 인한 전압 강하를 ESS의 방전을 통해 전압을 허용치 이내로 상승시키는 전략을 나타낸 것으로, ESS 설치점 이전 구간들의 전압강하가 ESS가 방전하는 전력에 따라 계통전압은 상승하게 되며, 결과적으로 하한치를 벗어난 수용가 전압은 허용범위 이내로 유지된다.



(a)



(b)

Fig. 4.2 Feeder current and voltage of LVDS

(a) ESS charge, (b) ESS discharge

4.2 복합 저압 배전계통의 전압특성 분석

현재 산업현장에서 운용되고 있는 ESS는 주로 경제적 운영, peak cut 및 load shifting에 초점을 둔다[34-36]. 하지만 본 논문에서 제안하는 ESS는 저압선로에 연계 운용될 수 있는 EV 수용성을 최대한 확대함과 동시에 계통규정을 준수하도록 운용하는데 초점을 둔다.

수용성 향상을 위한 모델 계통은 Fig. 4.3과 같다. 여기에서 저압선로는 방사상 형태로 구성되며 각 구간 별로 전압강하/상승이 발생할 수 있도록 한다. 각 구간별로는 부하가 연계되어 전력을 소비하고, 태양광전원 및 EV는 부하와 동일한 지점에 연계되어 발전 및 충전을 하도록 한다. ESS의 경우에는 선로 말단에 연계되며 효율적인 운영을 위해

저압선로의 각 포인트별로 측정된 각종 정보는 통신을 통해 ESS로 전달되어 최적운용을 가능하도록 한다.

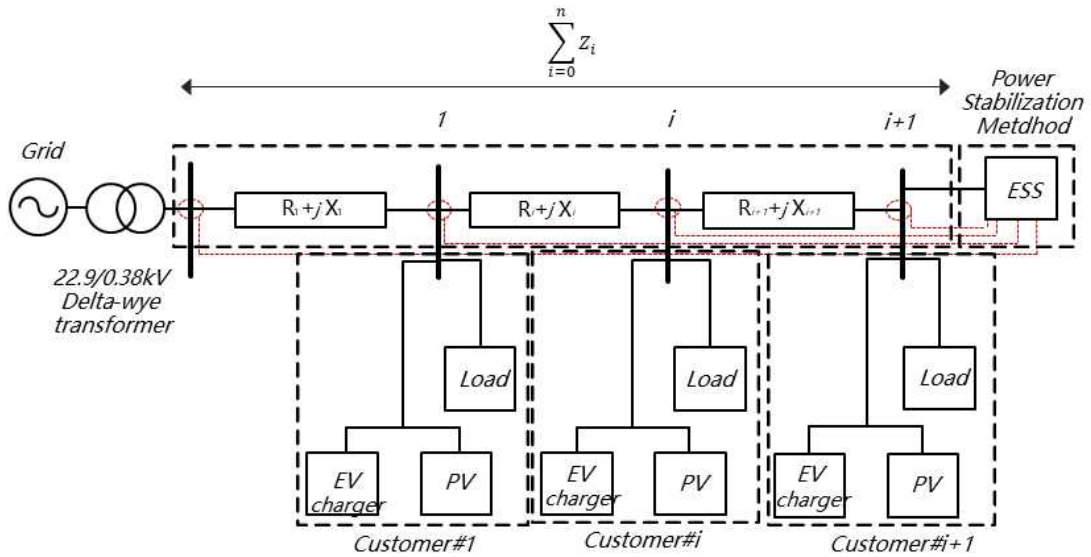


Fig. 4.3 Radial LVDS with multiple buses

저압 배전계통 모델을 바탕으로, ESS 운영을 통한 전압보상 운전을 하기 위해서는 ESS 연계 전/후의 전력조류 계산이 반드시 선행되어야 한다. 따라서 EV 및 태양광전원이 다수 연계된 저압 배전계통의 전압 특성 분석을 통해 ESS의 동작여부를 판단할 수 있도록 네트워크 토폴로지 방식에 의한 전력조류를 계산하는 방안을 사용한다.

네트워크 토폴로지 방식에 의한 전력조류 계산은 기존 수렴해를 찾는 Gauss-sidel 방법 또는 Newton Raphson 방법에 비하여, BIBC(Bus-Injection to Branch-Current)와 BCBV(Bus-Current to Bus-Voltage)라고 불리는 두 행렬을 기반으로 조류계산을 수행하는데, 태양광전원에 의한 역조류가 발생할 경우 전류의 부호만 바꿔주면 되기 때문에 실시간으로 계산해야하는 분석에서는 유리한 장점을 가진다.

Fig. 4.4는 6개의 버스로 구성된 계통 구성을 보여준다. 버스 1은 변전소 버스가 되며 버스 2부터 6은 각각 부하 버스이다. 각 선로에 대해 키르히호프의 전류법칙을 적용하면 등가 전류 모델로서 식 (4.1)과 같이 표현할 수 있다[37].

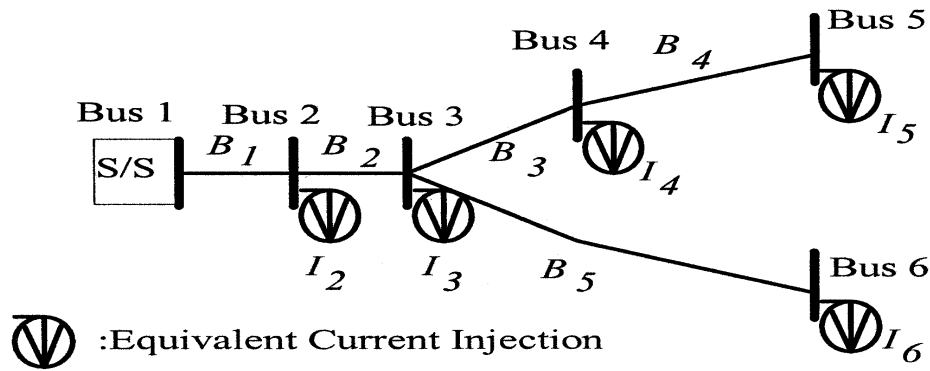


Fig. 4.4 6-bus distribution system

$$\begin{aligned}
 B_1 &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\
 B_2 &= I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\
 B_3 &= I_5 + I_6 \\
 B_4 &= I_5 \\
 B_5 &= I_6
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

식 (4.1)을 행렬의 형태로 나타내면 식 (4.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[B] = [BIBC][I] \tag{4.2}$$

여기서

$$[B] = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix}, [BIBC] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [I] = \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

이다.

m 개의 선로와 n 개의 버스로 구성된 방사상 배전 계통의 경우 BIBC 행렬의 크기는 $m \times (n-1)$ 이 된다. 또한 Fig. 4.4에서 선로 전류와 버스 전압과의 관계로부터 식 (4.4)와 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
V_2 &= V_1 - B_1 Z_{12} \\
V_3 &= V_2 - B_2 Z_{23} \\
V_4 &= V_3 - B_3 Z_{34} \\
V_5 &= V_4 - B_4 Z_{45} \\
V_6 &= V_3 - B_5 Z_{36}
\end{aligned} \tag{4.4}$$

여기서 V_i 는 버스 i 의 전압이며, Z_{ij} 는 버스 i 와 j 사이의 선로 임피던스이다.

식 (4.4)를 버스 전압 V_1 을 기준으로 다시 정리하면 식 (4.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
V_2 &= V_1 - B_1 Z_{12} \\
V_3 &= V_1 - B_1 Z_{12} - B_2 Z_{23} \\
V_4 &= V_1 - B_1 Z_{12} - B_2 Z_{23} - B_3 Z_{34} \\
V_5 &= V_1 - B_1 Z_{12} - B_2 Z_{23} - B_3 Z_{34} - B_4 Z_{45} \\
V_6 &= V_1 - B_1 Z_{12} - B_2 Z_{23} - B_5 Z_{36}
\end{aligned} \tag{4.5}$$

식 (4.5)를 행렬 형태로 나타내면 식 (4.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \tag{4.6}$$

여기서

$$[\Delta V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix}, \quad [BCBV] = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

이다.

m 개의 선로와 n 개의 버스로 구성된 방사상 배전 계통의 경우 BCBV 행렬의 크기는 $(n-1) \times m$ 이 된다.

이상의 식 (4.2)와 식 (4.6)을 3상에 대해 확장하면 행렬의 각 요소들은 a, b, c 상의 3×1 또는 3×3 의 행렬이 된다. 식 (4.2)와 식 (4.6)로부터 버스 주입 전류와 버스 전압과의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] = [DLF][I] \quad (4.8)$$

여기서

$$[DLF] = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

따라서 본 방법에 의한 조류 계산은 아래의 두식의 해를 반복적으로 계산하는 것과 같다고 볼 수 있다.

$$I_i^{(k)} = I_i^r(V_i^{(k)}) + jI_i^i(V_i^{(k)}) = \left(\frac{P_i^{sch} + jQ_i^{sch}}{V_i^{(k)}} \right)^* \quad (4.10)$$

$$[\Delta V^{(k+1)}] = [DLF][I^{(k)}] \quad (4.11)$$

이렇게 계산된 전압 편차로부터 개선된 버스 전압은 식 (4.12)와 같이 구할 수 있다.

$$V^{(k+1)} = V_1 - \Delta V^{(k+1)} \quad (4.12)$$

4.3 배전용 ESS의 제어 알고리즘

기존의 ESS 운용은 ESS 설치점의 전류와 전력상태에 따라 운용되는 방안이 제시되었다. 하지만 본 논문에서 제안하는 ESS의 운용전략은 부하가 연계된 각 지점에서 취합된 데이터를 이용하여 모든 구간의 전압 및 전력을 허용치 이내로 만족하도록 운영된다.

송전선로 및 특고압 배전선로에 사용되는 선로 임피던스는 저항 성분에 비해 인덕턴스 성분이 상대적으로 큰 특징을 갖고 있다. 따라서 전압 보상을 위해 주로

무효전력장치를 이용하지만, 저압선로는 송전 및 특고압 배전선로와는 다르게 저항 성분이 인덕턴스 성분에 비해 상대적으로 큰 특징을 갖고 있다. 따라서 무효전력 보상장치를 이용하여 전압을 보상하는 것은 그 효과도 작을뿐더러 계통의 역률을 악화시킬 우려가 있기 때문에 유효전력을 이용하여 전압을 보상하는 방안이 연구되고 있다[38]. 또한 태양광전원의 발전전력 및 EV의 소비전력은 모두 유효전력이고 ESS의 충전 및 방전 또한 유효전력만을 사용하기 때문에 본 논문에서는 ESS의 유효전력만을 사용하여 수용성을 향상시키고 전압을 허용치 이내로 유지시키는 배전용 ESS 제어 알고리즘을 제안한다.

배전용 ESS의 제어 알고리즘은 주상변압기부터 말단 구간까지 EV+중부하일 때의 전압특성과 경부하+태양광전원의 최대발전시의 전압특성을 분석한 후, 계통의 수용가능 용량을 벗어난 전력만큼 ESS로 충/방전하여 전압을 허용치 이내로 유지시키는 절차로 진행된다. 만약 상하한 전압 범위 근처에서 ESS가 충/방전 동작을 수행하는 경우 전압이 허용치를 벗어날 가능성이 있기 때문에 Fig. 4.5와 같이 상하한 전압의 여유도를 두고 ESS를 운영함으로써 안정적으로 전압이 유지되도록 한다.

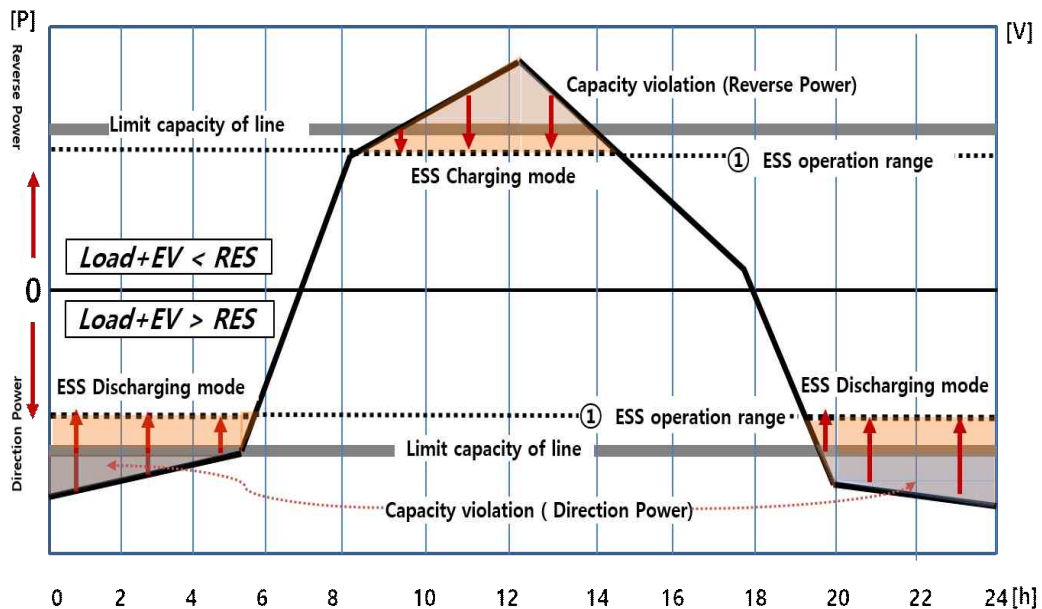


Fig. 4.5 Voltage control of ESS

한편 배전용 ESS의 제어 알고리즘에서 충/방전 모드, 동작시점 및 운용용량 결정은 각 부하가 연계된 버스에서 측정된 데이터를 기반으로 결정되며, ESS는 설정된 SOC 범위 이내에서 안정적으로 운영하도록 구성된다. 이를 위해 각 모드별로 5개의 알람신호가 알고리즘에 포함되며 상세한 알고리즘 운용절차는 다음과 같다.

[Step 1] ESS 운용을 위한 기준값 산정

ESS의 방전운용을 위해 우선 주상변압기 이하 각 구간별 부하 분포에 따라 선로용량이 초과하지 않는 범위 이내에서 전압이 하한치(0.94PU)가 될 때까지 부하를 균일하게 증가시킨다. 이 때 어느 한 구간의 전압이 하한치에 도달할 때 모든 구간의 합산 전력을 구하고 이 값은 ESS 방전운용 시작시점을 알리는 기준값(P_L)이 된다. 또한 ESS의 충전운용을 위해 각 지점에 연계된 태양광전원의 분포에 따라 선로용량이 초과하지 않는 범위 이내에서 전압이 상한치(1.06PU)가 될 때까지 발전량을 증가시킨다. 이 때 어느 한 구간의 전압이 1.06PU가 되면, 모든 구간에서 측정된 전력을 더한다. 이 값은 ESS 충전운용 시작시점을 알리는 기준값(P_G)이 된다.

[Step 2] ESS의 충/방전 모드 결정

ESS의 모드를 결정하기 위해서는 측정 지점에서 전력조류의 방향을 우선 결정해야 한다. 알고리즘에서는 조류의 방향이 계통에서 부하측이면 양수, 부하측에서 계통측이면 음수로 정한다. ESS의 충/방전 모드는 식 (4.13)과 같이 각 포인트에서 측정된 유효전력을 모두 합산한 값에 따라 결정된다. 즉, 합산한 값이 양수이면 부하의 전력 소모량이 발전전력보다 많다는 것을 의미하고, 계통 전압은 하한치 이하로 떨어질 가능성이 있기 때문에 ESS는 신호 $\alpha(t)$ 가 1이 되어 방전모드로 대기한다. 만약 합산한 값이 음수이면 위와는 반대로 발전전력이 부하의 전력 소모량보다 많다는 것을 의미하고, 계통 전압은 상한치를 벗어날 가능성이 있기 때문에 $\alpha(t)$ 는 0이 되어 ESS는 충전모드로 대기한다.

$$\alpha(t) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n P_i(t) \geq 0 \\ 0, & \sum_{i=1}^n P_i(t) < 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

[Step 3] ESS의 전압조정 기능을 위한 용량 결정

충/방전 모드가 결정되면, ESS의 동작 시점 및 용량을 결정해야 한다. 먼저, 방전모드에서 ESS의 동작 시점은 [Step 1]에서 구한 P_L 에 따라 정해진다. 합산 전력이 P_L 에 도달하면 식 (4.14)와 같이 신호 $\beta(t)$ 는 활성화되어 ESS는 방전운용을 시작된다. 만약 $\beta(t)$ 가 비활성화 된 경우, 즉 $\beta(t)$ 가 0이면, ESS는 방전모드 상태에서 대기한다.

$$\beta(t) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n P_i \geq P_L \\ 0, & \sum_{i=1}^n P_i < P_L \end{cases} \quad (4.14)$$

다음으로 ESS의 방전 용량은 식 (4.15)와 같이 취합된 각 구간별 부하 전력의 합과 P_L 을 이용하여 결정된다.

$$P_{dis_ref}(t) = \left\{ \sum_{i=1}^n P_i(t) - P_L \right\} \times \beta(t) \quad (4.15)$$

여기서, P_{dis_ref} 는 ESS 방전 출력 기준값이다.

충전모드에서 ESS의 동작 시점은 기준값(P_G)에 따라 결정된다. 충전모드에서는 식 (4.16)과 같이 각 지점의 태양광전원에 의한 발전용량의 합이 기준값에 도달하게 되면 신호 $\gamma(t)$ 는 활성화 되어 ESS는 충전을 시작한다. 만약 $\gamma(t)$ 가 비활성화 된 경우, 즉 $\gamma(t)$ 가 0이면, ESS는 충전모드인 상태로 대기하게 된다. 다음으로 ESS의 충전용량은 방전모드와 같은 절차로 진행된다.

$$\gamma(t) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n P_i \geq P_G \\ 0, & \sum_{i=1}^n P_i < P_G \end{cases} \quad (4.16)$$

ESS의 충전 용량은 식 (4.17)과 같이 취합된 각 구간별 태양광전원의 발전전력 합과 기준값 P_G 와 비교를 통해 결정되며, P_{grid} 는 계통 상황에 따라 변경될 수 있다.

$$P_{chg_ref}(t) = \left\{ \sum_{i=1}^n P_i(t) - P_G - P_{grid} \right\} \times \gamma(t) \quad (4.17)$$

여기서, P_{chg_ref} 는 ESS 충전 출력 기준값이고, P_{grid} 는 ESS 충전 시 계통으로부터 받는 전력값이다.

[Step 4] ESS의 충/방전 운용

ESS의 모드 및 충/방전 용량이 결정되면 ESS는 선로용량 및 전압을 허용치 이내로 유지하기 위해 전력을 계통으로 보내거나 흡수함으로써 EV의 수용성을 극대화하고 태양광전원의 역조류에 의해 발생된 과전압을 허용치 이내로 유지시킨다.

[Step 5] SOC 상태에 따른 ESS의 동작여부 결정

본 단계에서는 충/방전 모드에서 SOC를 파악하여 ESS의 동작 지속여부를 결정한다. 즉, 충전모드에서 유효전력 흡수로 인해 ESS의 SOC가 상한 설정값을 초과하게 되면 식 (4.18)과 같이 신호 $\delta(t)$ 가 활성화 되어 ESS는 동작을 멈추게 된다. 또한 방전모드에서 유효전력 방출로 인해 ESS의 SOC가 하한 설정값 미만이면 식 (4.19)와 같이 신호 $\eta(t)$ 가 활성화 되어 ESS는 정지한다.

$$\delta(t) = \begin{cases} 1, & SOC > 90\% \\ 0, & SOC \leq 90\% \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\eta(t) = \begin{cases} 1, & SOC < 10\% \\ 0, & SOC \geq 10\% \end{cases} \quad (4.19)$$

Table 4.1은 ESS의 제어 알고리즘에서 사용되는 5개의 신호가 각각의 상태에서 어떻게 작용하는지를 보여주며, ESS의 충/방전 모드, 운용시점, 용량 등이 신호에 따라 동작하게 된다.

Table 4.1 Classification of ESS operation signal

Classification	α	β	γ	δ	η
Charging mode	1	-	-	-	-
Discharging mode	0	1	-	-	-
ESS charging Operation	1	-	1	-	-
ESS discharging Operation	0	1	-	-	-
Stop at SOC > 90%	-	-	-	1	-
Stop at SOC < 10%	-	-	-	-	1

상기에서 언급한 절차들을 바탕으로 EV 충전 및 태양광전원의 발전으로 인한 전력이 주상변압기가 수용할 수 있는 용량을 초과하는 상황에서 ESS의 충전 및 방전을 통해 수용성을 극대화하기 위한 배전용 ESS의 제어 알고리즘을 나타내면 Fig. 4.6과 같다.

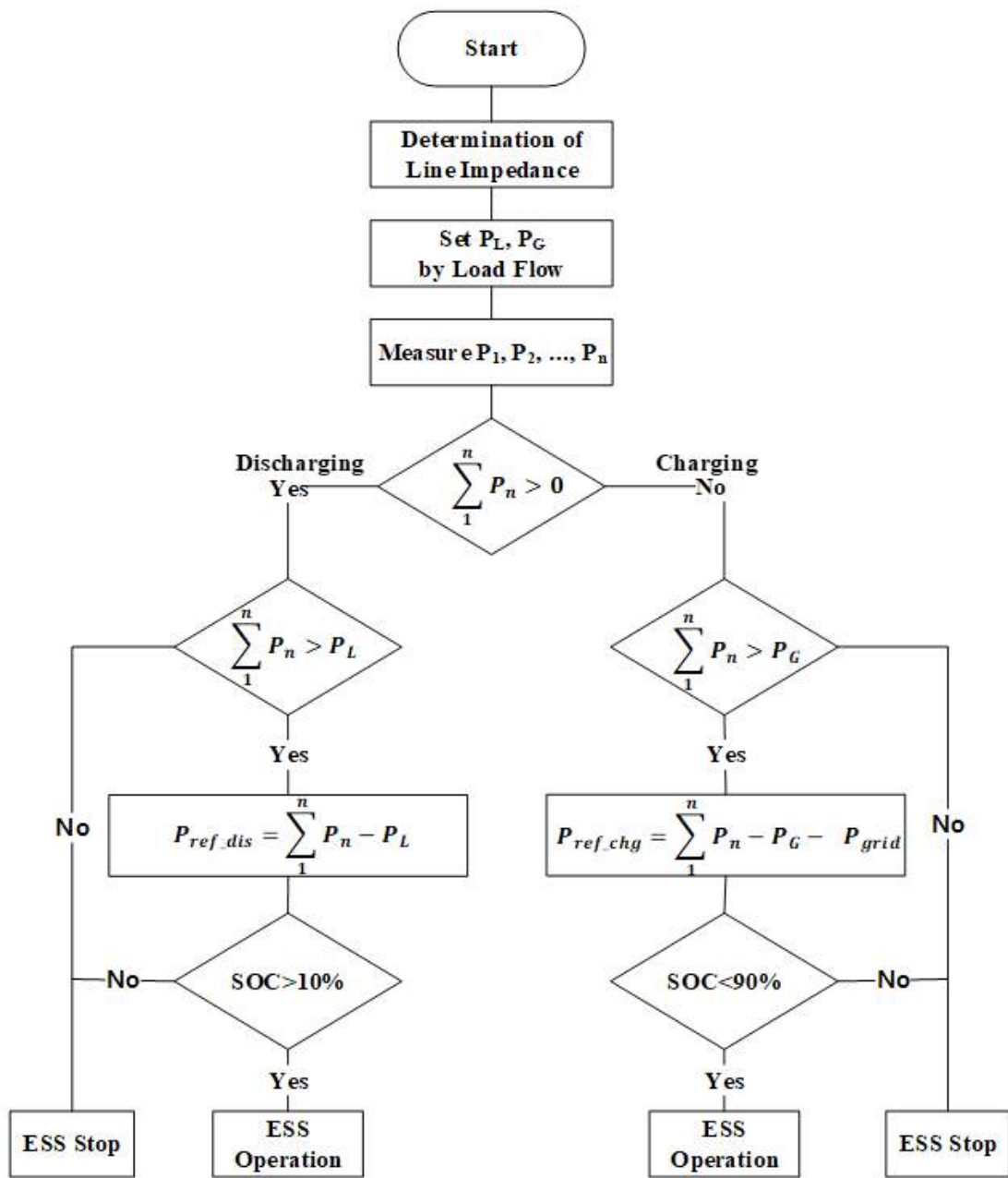


Fig. 4.6 ESS control algorithm

5. 시뮬레이션 및 수용성 향상 결과 분석

5.1 시뮬레이션 조건

시뮬레이션을 위한 계통은 Fig. 5.1과 같이 방사형 형태로 8개의 구간으로 이루어져 있으며, 각 2~8번 구간에는 EV를 포함한 부하와 태양광전원이 연계된다. 또한 Table 5.1과 같이 주상변압기 용량은 3상 300kVA로 설정하고 부하의 용량은 0~570kW 및 태양광전원의 발전용량은 0~240kW까지 변동하도록 구성한다. M. Shukla 등[39]은 일반적인 배전계통에서 고정된 X/R 에서 부하역률 변동 시 전압변동은 크지 않다는 것을 보였다. 따라서 시뮬레이션에서는 주상변압기 용량을 초과하는 상태에서 EV는 유효전력을 이용하여 충전하기 때문에 역률은 1로 설정한다.

선로 임피던스는 Table 5.2와 같이 실제 계통 특성을 반영하기 위하여 변대 직하부터 말단 부하가 연계된 8번 버스까지는 $0.248\Omega/\text{km}$ 의 임피던스 값을 갖는 95mm^2 케이블을 이용하고, 말단 부하와 ESS의 연계 선로는 보다 많은 전력을 수용할 수 있는 $0.196\Omega/\text{km}$ 의 임피던스 값을 갖는 120mm^2 케이블을 적용한다.

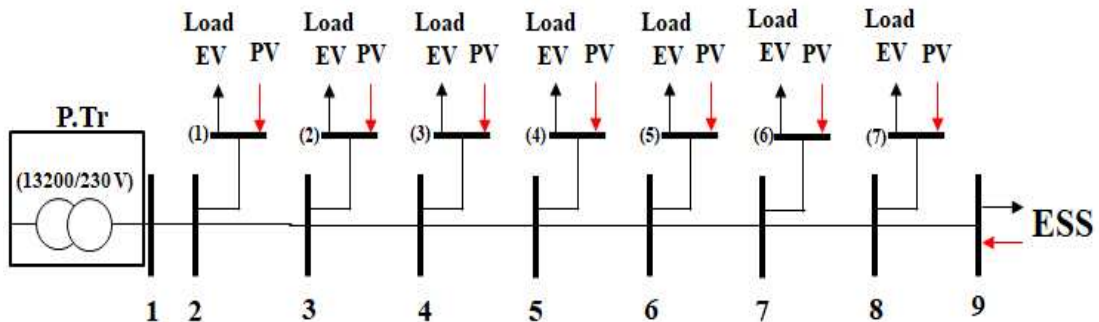


Fig. 5.1 LVDS model for the simulation

Table 5.1 Model parameters of the distribution system

Category	Contents
Pole Transformer	300KVA, 13200/230V
Rated Voltage	220V
PF	1
Line Impedance 1	OW-95mm ² Z=0.248+j0.0852Ω/km
Line Impedance 2	OW-120mm ² Z=0.196+j0.0980Ω/km
Load (customer, EV)	0~570kW
PV system	0~240kW
ESS Output	0~320kW

Table 5.2 Specifications of the secondary feeder

Section Number		1	2	3	4	5	6	7	8
Line Impedance	R (Ω/km)	0.248	0.248	0.248	0.248	0.248	0.248	0.248	0.196
	X (Ω/km)	0.085	0.085	0.085	0.085	0.08	0.085	0.085	0.098
Length(m)		60	60	60	60	60	60	60	10

시뮬레이션에서 각 버스에 연계된 부하 및 태양광전원은 시간에 따라 동일하게 변동되도록 한다. 경부하 및 중부하 시 EV 충전을 동시에 고려할 경우 모든 구간 전력의 합은 0~570kW로 변압기 용량의 1.9배까지 변동하도록 한다. 태양광전원의 경우 일반적인 수용가에 설치되는 용량은 3kW임을 고려하고, 각 수용가 마다 3kW 태양광 발전이 설치되어 있다고 가정하여 0~240kW까지 변동하도록 한다. 말단에 연계된 ESS는 제어 알고리즘에서 미리 계산되어진 충/방전 운용 기준값(P_L , P_G)을 초과하였을 경우에 동작하도록 한다.

다수의 EV 및 태양광전원이 연계된 저압 배전계통의 수용성 향상을 위한 부하 및

태양광전원 출력패턴은 다음과 같다. 우선 Fig. 5.2는 시뮬레이션에 사용되어진 태양광 출력 패턴을 나타내며 낮 시간대에 최대 발전이 되도록 한다.

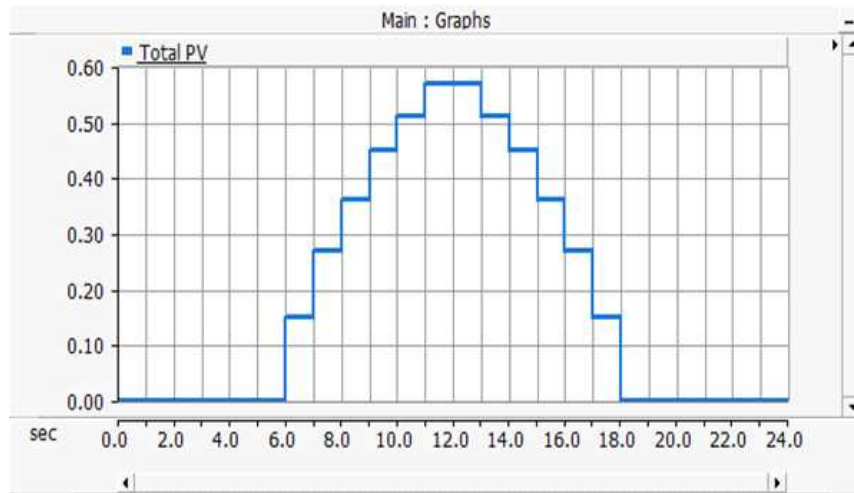


Fig. 5.2 Output pattern of PV system

Fig. 5.3은 EV 및 부하 패턴을 나타낸다. 부하는 일반 수용가를 가정하여 오전 시간 및 저녁 시간에 최대 부하를 적용하고, EV는 요금제로 인해 밤 시간대에 주로 운용되기 때문에 이를 적용하였고, 이때 EV 및 부하의 최대 소비전력은 주상변압기 용량의 1.9배인 570kW가 되도록 한다.

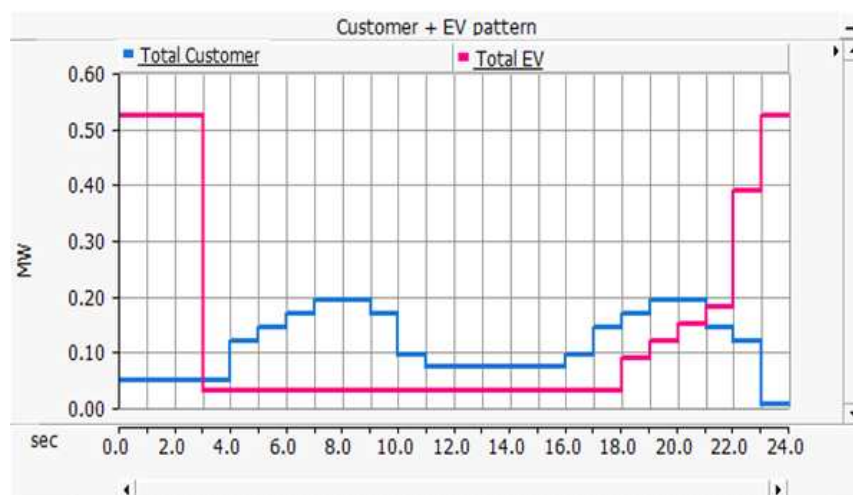


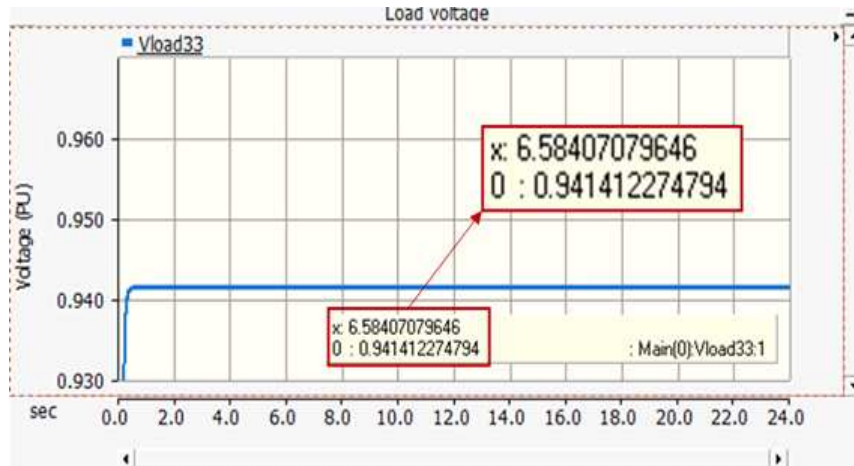
Fig. 5.3 Load + EV pattern

5.2 ESS 연계 전/후의 선로용량 및 전압 특성

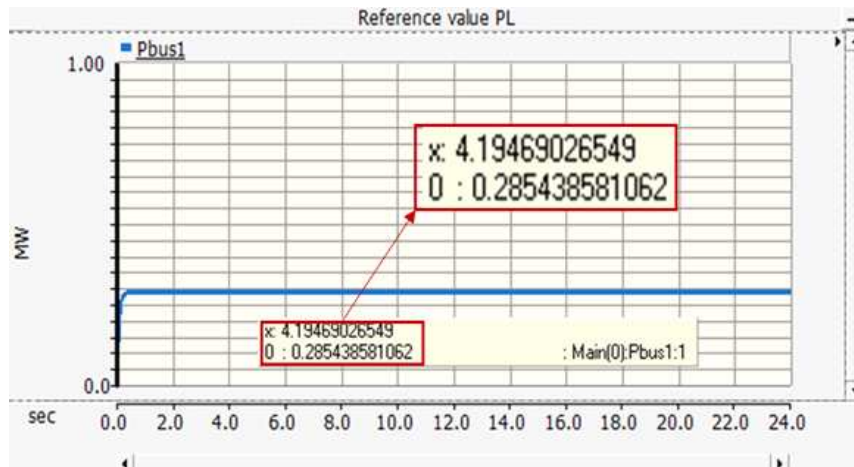
5.2.1 배전용 ESS 운영 시점 결정

저압 배전계통의 전압은 부하 및 태양광전원의 출력에 따라 변동하게 된다. 즉, 부하가 소비하는 전력이 증가하면 전압은 허용치 이하가 될 수 있고, 태양광 발전이 증가하면 전압은 허용치를 상회할 수 있다. 따라서 전압을 안정화시키기 위해 ESS의 충/방전 운용 시점을 결정하는 것은 중요하며, 다음과 같은 과정을 통해서 운용시점이 결정된다.

ESS의 방전 운용 기준값 P_L 은 ESS가 연계되지 않은 상태에서 결정된다. P_L 의 경우, 알고리즘의 [Step 1]에 따라 저압 배전계통에서 각 지점의 부하를 동일하게 점진적으로 증가시켜 전압이 하한치(207V)에 도달하는 시점의 부하 합산 전력으로 결정된다. Fig. 5.4(a)는 태양광 발전은 없는 상태에서 부하 증가에 따른 말단 지점의 전압이 하한치에 도달한 것을 나타내고, 이때의 합산 부하전력은 Fig. 5.4(b)에서 285.43kW이다. 따라서 ESS의 방전 운용 P_L 은 시뮬레이션 결과 값에 약 20%의 여유도를 적용하여 240kW로 결정된다.



(a)

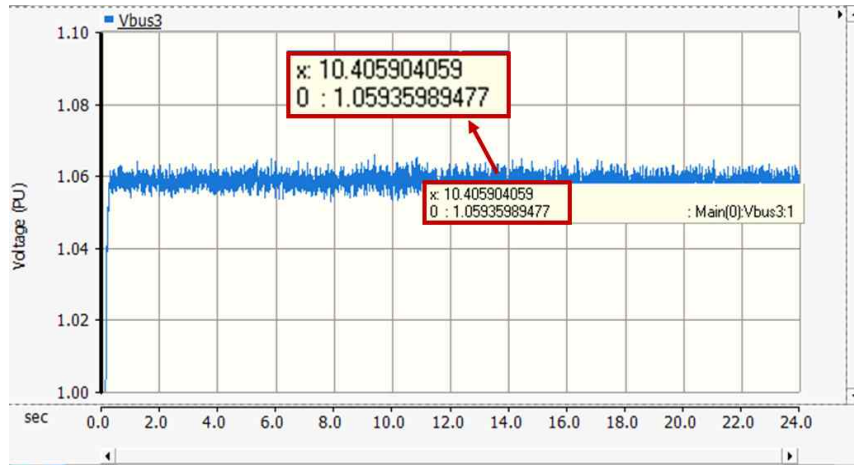


(b)

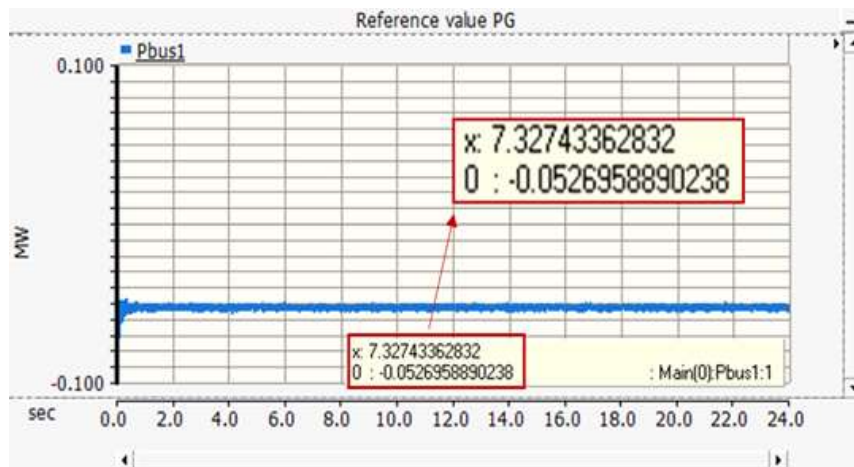
Fig. 5.4 Determination of P_L ,

(a) voltage of end side bus, (b) reference value of P_L

충전 운용 기준값 P_G 또한 방전 운용 기준값과 마찬가지로 ESS가 연계되지 않은 상태에서 결정된다. P_G 의 경우, [Step 1]에 따라 각 지점에 연계된 태양광전원의 출력을 동일하게 점진적으로 증가시켜 전압이 상한치(233V)에 도달하는 시점의 합산 전력으로 결정된다. Fig. 5.5(a)는 부하가 없는 상태에서 태양광 발전의 증가에 따른 말단 지점의 전압이 상한치에 도달한 것을 보여주고, 이때의 합산 전력인 P_G 값은 Fig. 5.5(b)에서 -52.69kW이다. 따라서 ESS의 충전 운용 기준값은 시뮬레이션 결과 값에 약 20%의 여유도를 적용하여 -40kW로 결정된다.



(a)



(b)

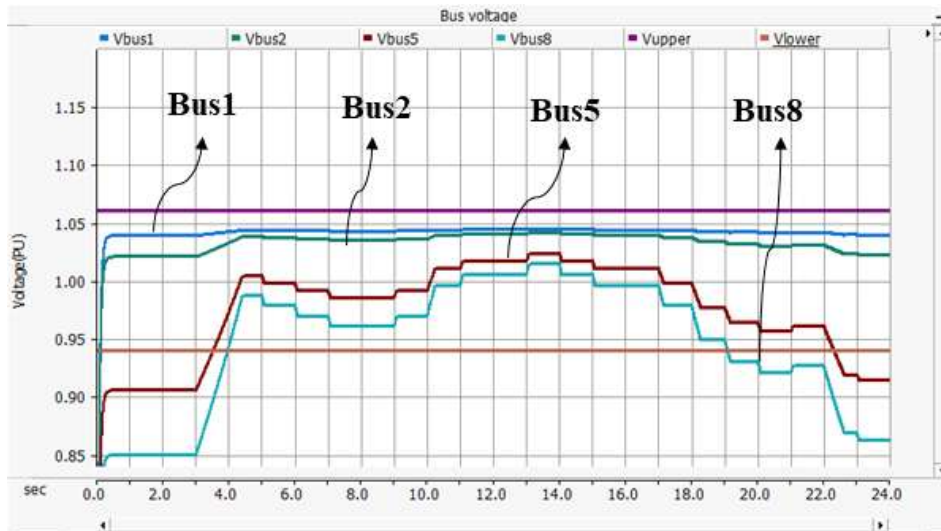
Fig. 5.5 Determination of P_G ,

(a) voltage of section 3 with only PV system, (b) reference value of P_G

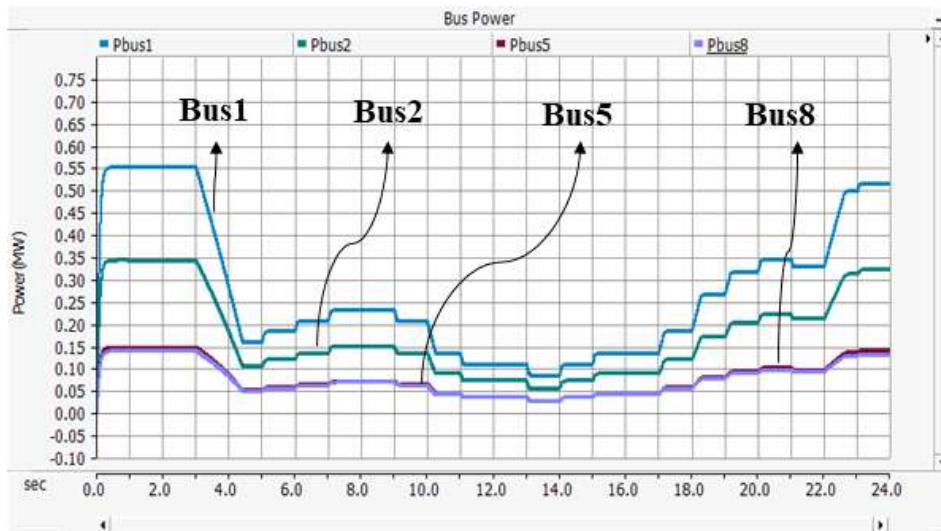
5.2.2 EV를 포함한 부하 및 ESS 운용에 의한 선로용량 및 전압 특성

Fig. 5.6은 ESS가 연계되지 않은 상태에서 EV를 포함한 부하를 변압기 용량의 1.9배까지 운용할 경우의 각 버스 전압 및 선로용량을 보여준다. 우선 Fig. 5.6(a)를 통해 부하용량을 변압기 용량의 1.9배까지 증가시키더라도 Bus1 및 Bus2의 전압은 항상 허용치를 만족함을 알 수 있다. 그러나 말단 지점인 Bus8의 경우 전압이 약 0.85PU 이하로 감소하여 허용치를 크게 벗어남을 알 수 있다. 또한, Table 5.1에서 선로용량은 300kW이지만, Fig. 5.6(b)에서 ESS 연계 전, Bus1에서 측정된 전력이

500kW이상임을 확인할 수 있다. 따라서 부하 용량이 변압기 용량을 초과할 경우 전압 및 선로용량이 허용치를 크게 벗어남을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.



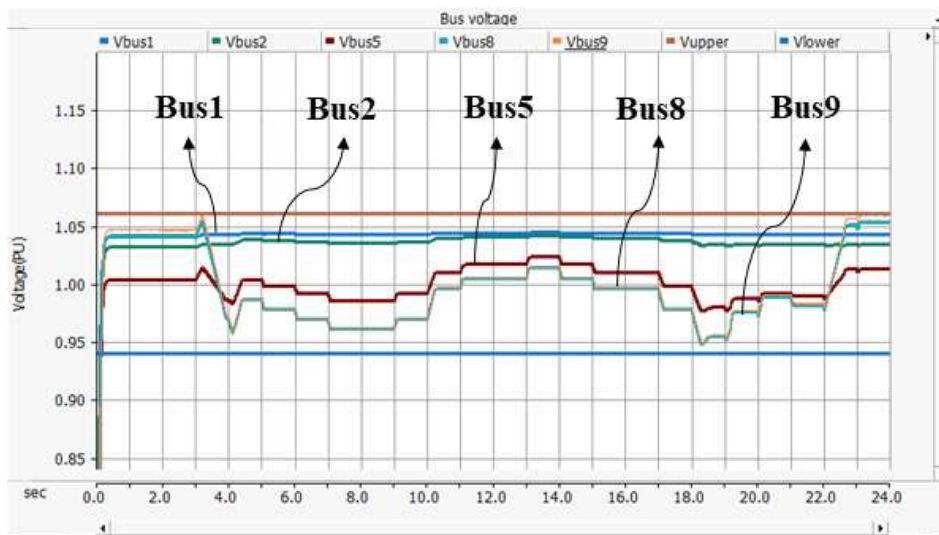
(a)



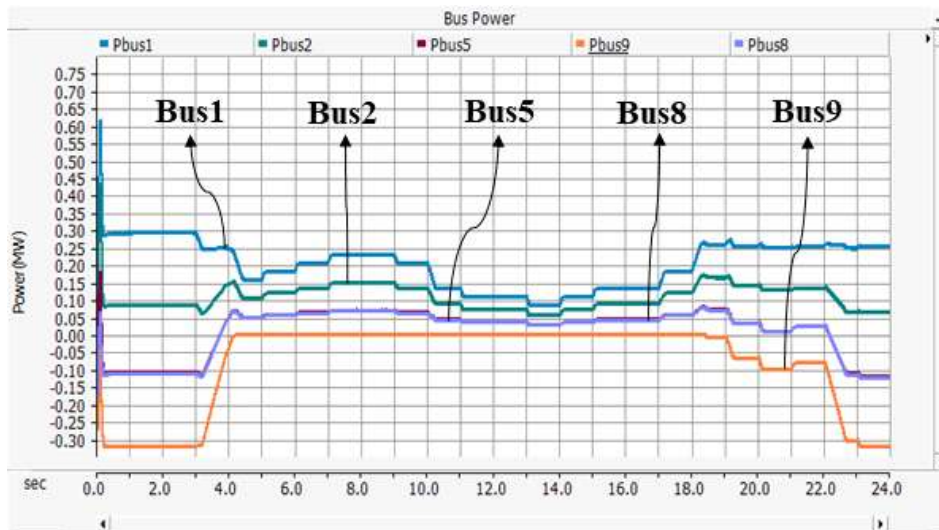
(b)

Fig. 5.6 Voltage and power of LVDS with EV when an ESS is not operating,
(a) voltage, (b) active power

Fig. 5.7은 저압선로 말단에 ESS를 연계 후, 위와 동일한 조건하에서 시뮬레이션을 수행했을 경우의 각 버스 전압 및 선로용량을 보여준다. 계통 말단에 연계된 ESS가 방전을 통해 계통에 역조류가 흐르면 전압은 상승하게 된다. Fig. 5.7(a)는 제어 알고리즘이 적용된 배전용 ESS의 적절한 방전 운용을 수행한 결과를 보여주며, EV를 포함한 부하의 소비전력이 변압기 용량의 1.9배인 570kW일지라도 모든 버스 전압이 허용치 이내임을 보여준다. 또한 Fig. 5.7(b)로부터 변대 직하부터 말단 부하까지 각 버스에서 측정된 전력이 변압기 정격용량인 300kW 이하임을 확인할 수 있다. 말단에 연계된 ESS에서 공급하는 전력은 300kW를 초과하나, 이는 ESS 연계선로의 용량이 기존의 선로보다 더 많은 전류를 허용하는 선로를 사용하였기 때문에 해당 구간의 선로를 제외하면 모든 구간에서 측정된 전력은 시뮬레이션 조건에서 제시한 범위를 벗어나지 않는다. 이를 통해 부하 용량이 변압기 용량의 최대 1.9배에 이를지라도 제어 알고리즘에 의한 ESS의 방전운용을 통해 전압을 허용치 이내로 만족시킴과 동시에 선로용량을 변압기의 정격용량 이하로 유지할 수 있음을 확인할 수 있다.



(a)

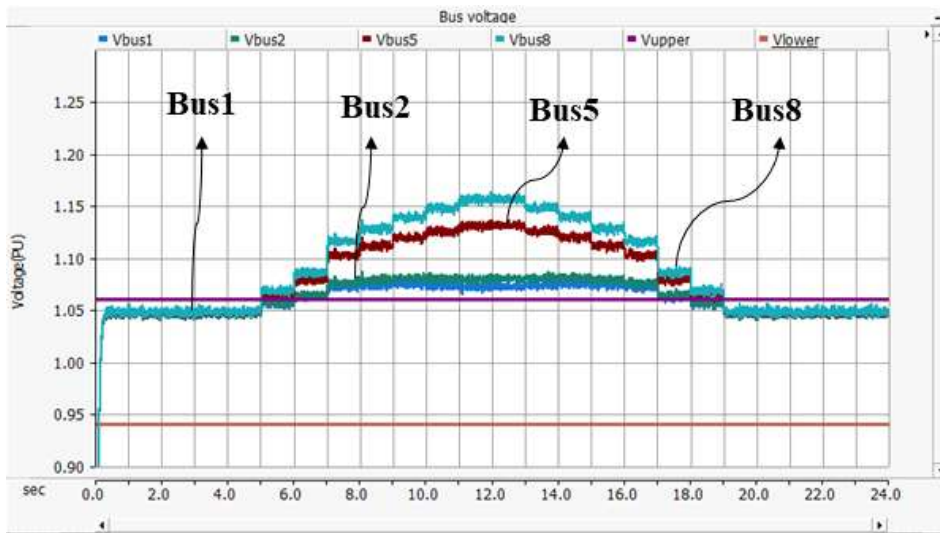


(b)

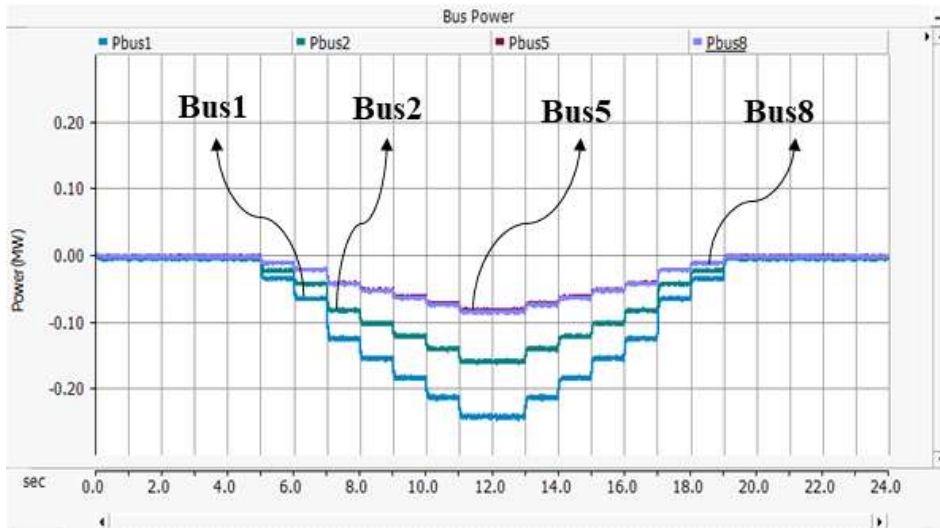
Fig. 5.7 Voltage and power of LVDS with EV when an ESS is operating, (a) voltage, (b) active power

5.2.3 태양광전원 및 ESS 운용에 의한 선로용량 및 전압 특성

Fig. 5.8은 ESS가 연계되지 않은 상태에서 각 구간에 연계된 태양광 발전 용량의 합이 0~240kW까지 경우의 각 버스의 전압 및 선로용량을 보여준다. 우선 Fig. 5.8(a)에서 태양광 발전 시 역조류에 의한 영향으로 모든 버스의 전압이 허용치를 초과하고, 특히 저압 배전계통 말단 지점인 Bus8의 전압의 경우 1.15PU까지 치솟아 허용치를 크게 벗어남을 알 수 있다.



(a)

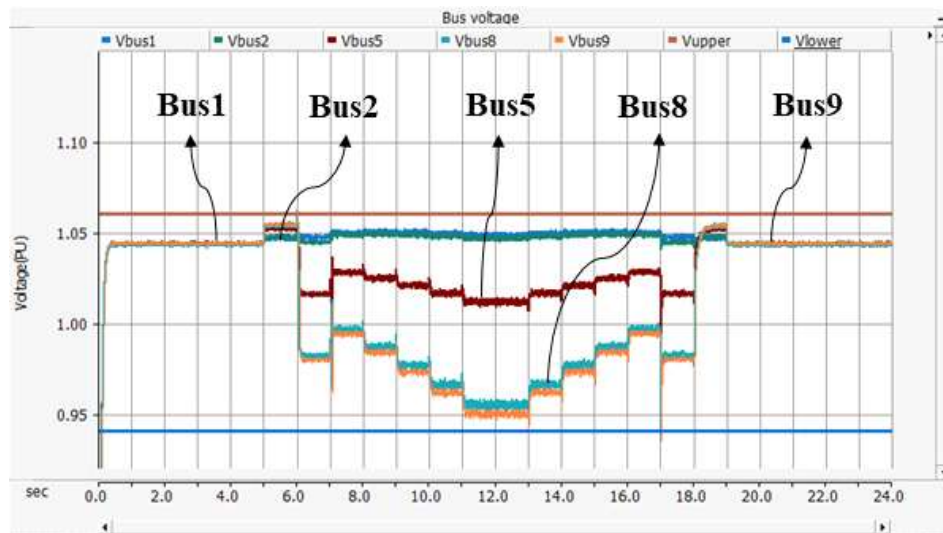


(b)

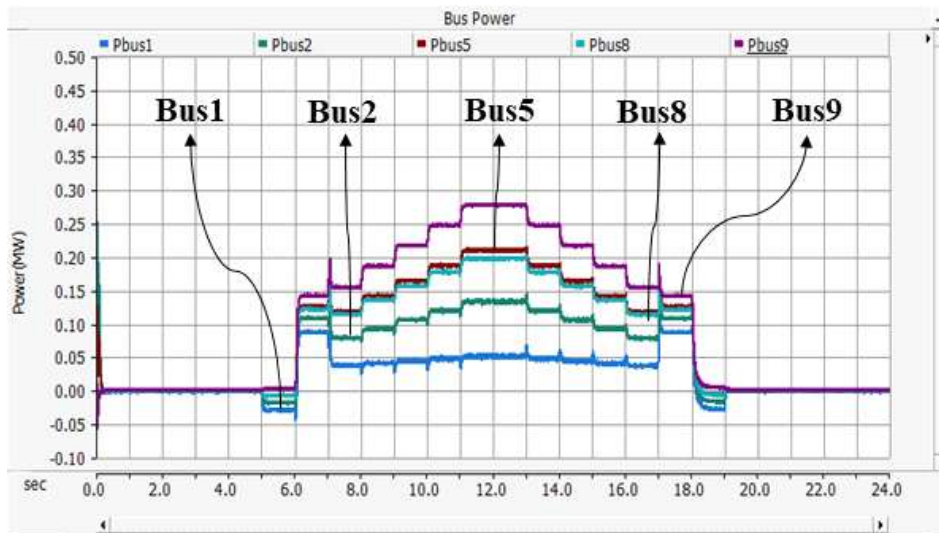
Fig. 5.8 Voltage and power of LVDS with PV system when an ESS is not operating, (a) voltage, (b) active power

Fig. 5.9는 저압선로 말단에 ESS를 연계 후, 위와 동일한 조건하에서 시뮬레이션을 수행했을 경우의 각 버스 전압 및 선로용량을 보여준다. 계통 말단에 연계된 ESS가 충전을 통해 태양광전원에 의한 발전전력을 흡수하게 되면 ESS는 부하로 작용하여 전압은 강하하게 된다. Fig. 5.9(a)는 제어알고리즘이 적용된 배전용 ESS의 적절한 충전 운용을 수행한 결과로 모든 버스 전압이 허용치를 만족함을 보여준다. 이와 같은 결과는 태양광전원에 의한 발전 전력이 Bus5를 기준으로 주상변압기 측과 ESS 측으로 전달되어 말단 지점의 역조류가 순조류로 바뀌어 전압이 상승하지 않도록 하기 때문이다.

또한 Fig. 5.9(b)는 각 버스에서 측정된 전력을 나타내며, 변대 직하부터 말단 부하까지 각 버스에서 측정된 전력이 변압기 정격용량인 300kW 이내에 들어움을 확인할 수 있다.



(a)

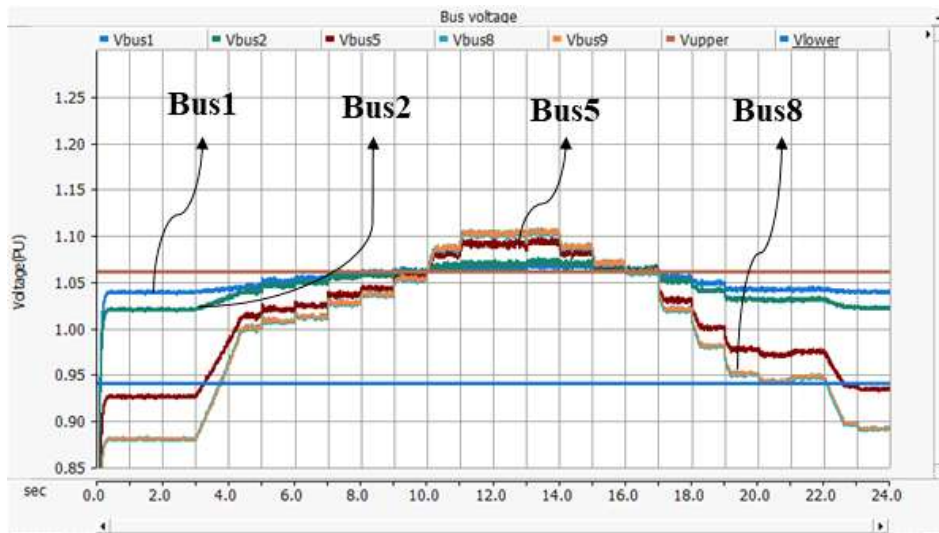


(b)

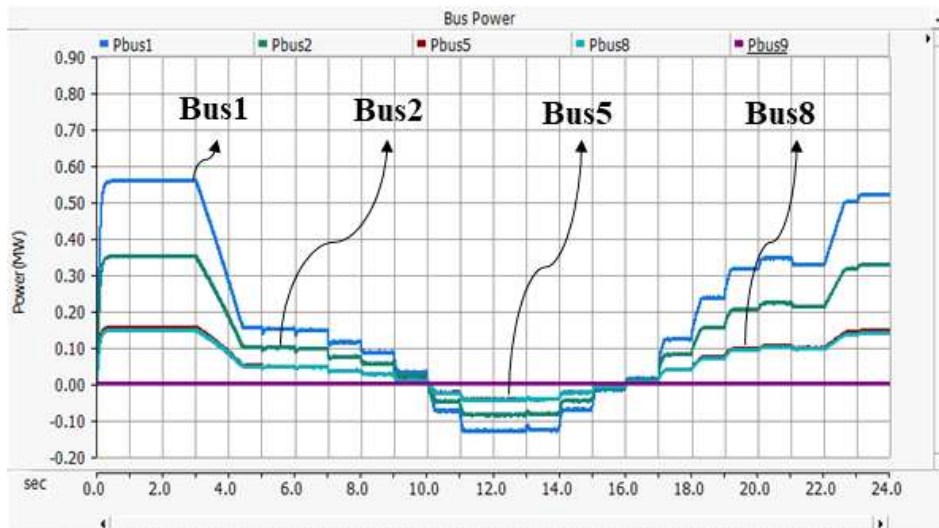
Fig. 5.9 Voltage and power of LVDS with PV system when an ESS is operating, (a) voltage, (b) active power

5.2.4 EV 및 태양광전원 연계 시 저압 배전계통의 선로용량 및 전압 특성

Fig. 5.10은 ESS가 연계되지 않은 상태에서 EV를 포함한 부하 및 태양광 발전을 동시에 고려할 경우의 각 버스의 전압 및 선로용량을 보여준다. 우선 Fig. 5.10(a)에서 EV를 포함한 부하의 소비전력이 주상변압기 용량을 1.9배까지 증가시킬 경우 Bus8의 전압이 하한치를 벗어나고, 태양광 발전이 부하 소비전력보다 많은 낮 시간대에는 모든 Bus의 전압이 상한치를 크게 벗어남을 알 수 있다. 선로용량의 경우 Fig. 5.10(b)에서 전기충전기가 운용되는 밤 시간대에 Bus1과 Bus2에서 측정된 전력이 500kW를 초과하여 주상변압기 용량을 크게 상회함을 확인할 수 있다.



(a)

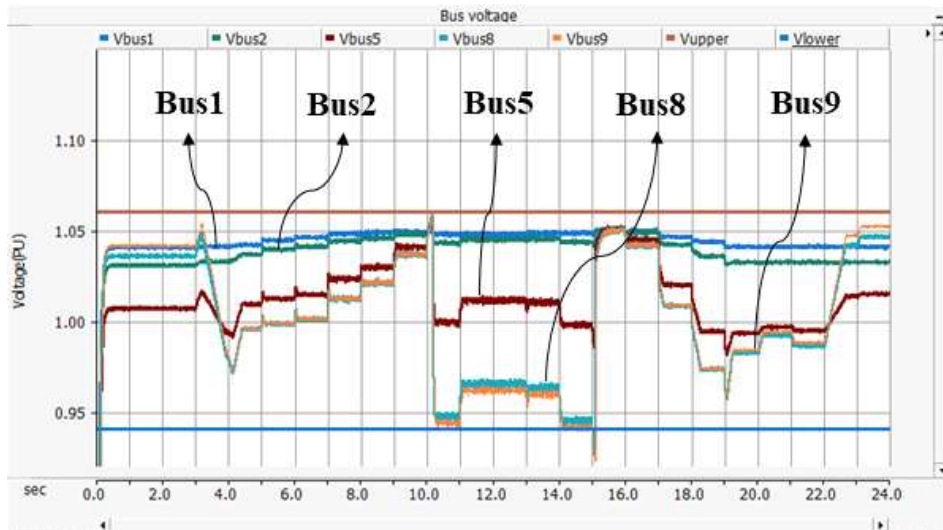


(b)

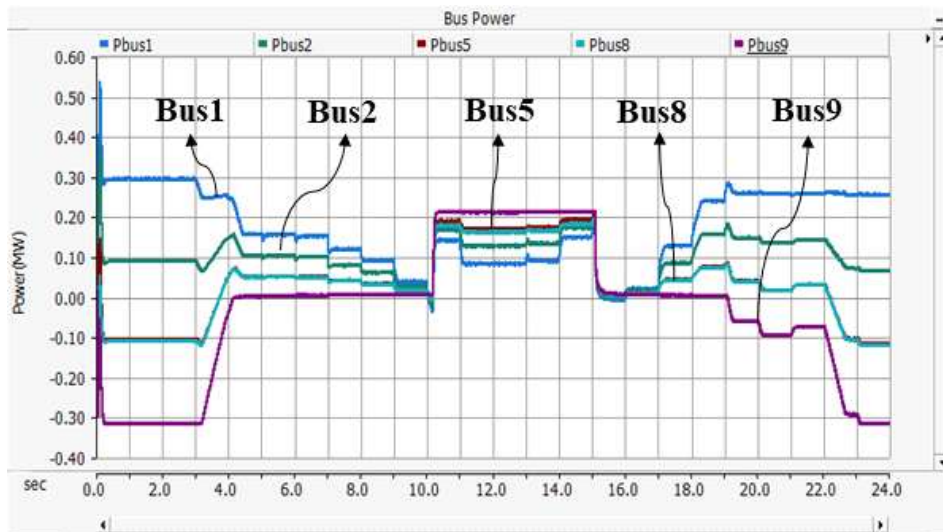
Fig. 5.10 Voltage and power of LVDS with EV and PV system when an ESS is not operating, (a) voltage, (b) active power

Fig. 5.11은 저압선로 말단에 ESS를 연계 후, 위와 동일한 조건하에서 시뮬레이션을 수행했을 경우의 각 버스 전압 및 부하로 들어가는 전력 특성을 보여준다. 계통 말단에 연계된 ESS는 부하 및 태양광 발전이 P_L , P_G 값을 초과하게 되면 알고리즘에 따라 충전 및 방전을 통해 선로용량 및 전압을 허용치 이내로 유지시켜 준다. Fig. 5.11(a)는

제어 알고리즘이 적용된 배전용 ESS의 적절한 충/방전 운용에 의한 시뮬레이션 결과를 보여주며, 모든 버스 전압이 허용치 이내임을 보여준다. 또한 Fig. 5.11(b)를 통해서 확인할 수 있듯이 변대 직하부터 말단 부하까지 각 버스에서 측정된 전력이 변압기 정격용량인 300kW 이내에 들어옴을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5.11 Voltage and power of LVDS with EV and PV system when an ESS is operating, (a) voltage, (b) active power

5.2.5 ESS 운용 특성 분석

Fig. 5.12는 EV를 포함한 부하가 연계된 상태에서 ESS 방전 시의 유효전력, 무효전력, SOC 특성을 보여준다. 방전 모드 시에 ESS는 유효전력만 출력하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 ESS는 계통 전압 조정을 위해 무효전력이 아닌 유효전력이 이용된 것을 확인할 수 있다. 또한 ESS의 SOC는 80%에서 40%로 감소하여 정상범위 내에서 동작함을 확인할 수 있다.

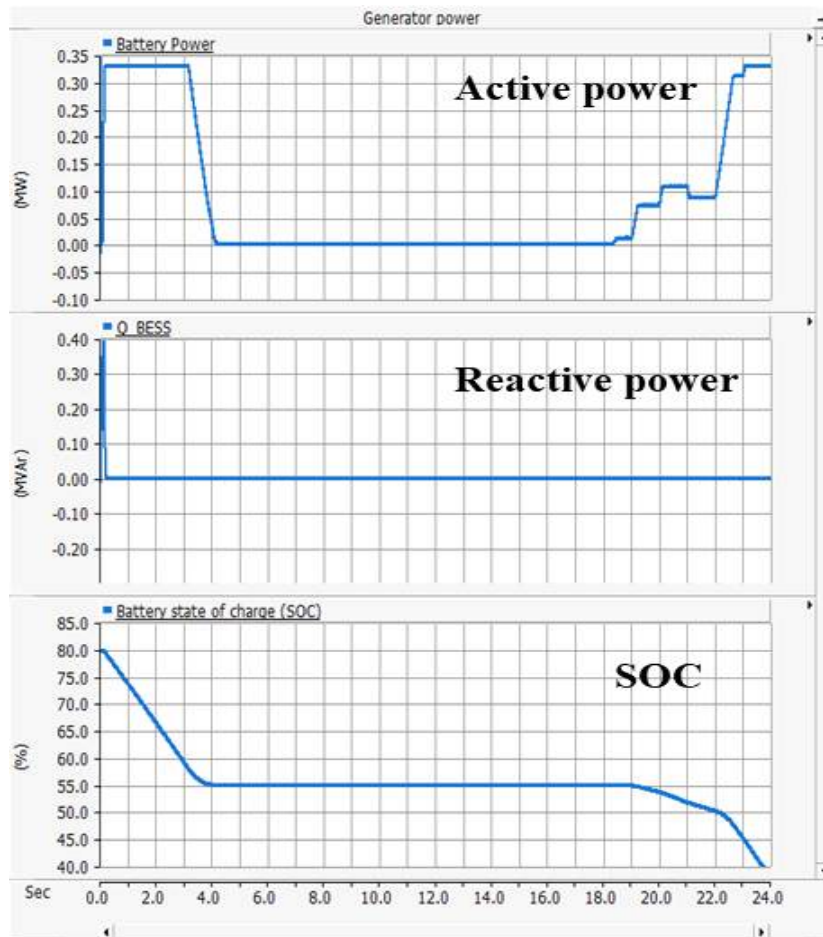


Fig. 5.12 Power and SOC characteristics of the ESS in discharging mode

Fig. 5.13은 태양광전원이 연계된 상태에서 ESS 충전 시의 유효전력, 무효전력, SOC 특성을 보여준다. 충전 모드 또한 방전 모드와 마찬가지로 ESS는 유효전력만 흡수하는 것을 확인할 수 있으며 무효전력은 0으로 제어가 됨을 알 수 있다. 이를 통해 ESS는

상한치를 벗어나는 계통 전압을 조정하기 위해 유효전력만 이용한 것을 확인할 수 있다. 또한 ESS의 SOC는 30%에서 75%로 증가하여 정상범위 내에서 동작함을 확인할 수 있다

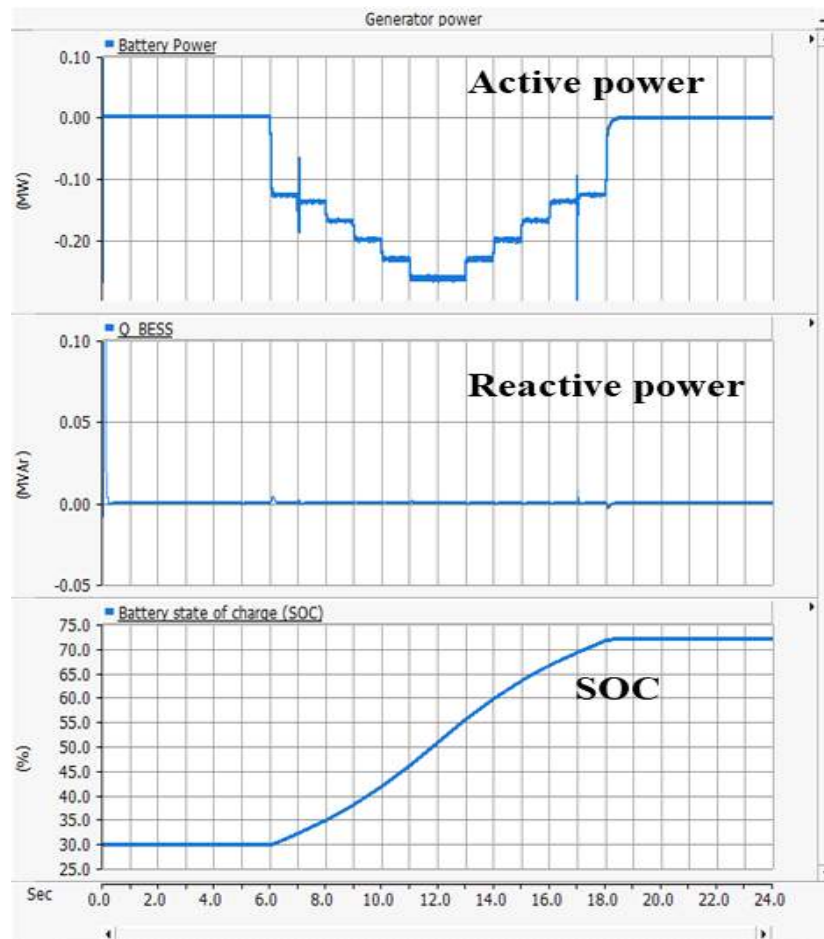


Fig. 5.13 Power and SOC characteristics of the ESS in charging mode

Fig. 5.14는 EV를 포함한 부하 및 태양광전원이 모두 연계된 상태에서 ESS 충/방전 시의 유효전력, 무효전력, SOC 특성을 보여준다. 알고리즘에 따른 충/방전 모드에서 ESS는 계통의 전압 및 선로용량을 유지시키기 위해 유효전력만 이용하는 것을 확인할 수 있으며 무효전력은 0으로 제어가 됨을 알 수 있다. 또한 ESS의 SOC는 80%에서 50% 사이에서 충전 및 방전하여 정상범위 내에서 동작함을 확인할 수 있다.

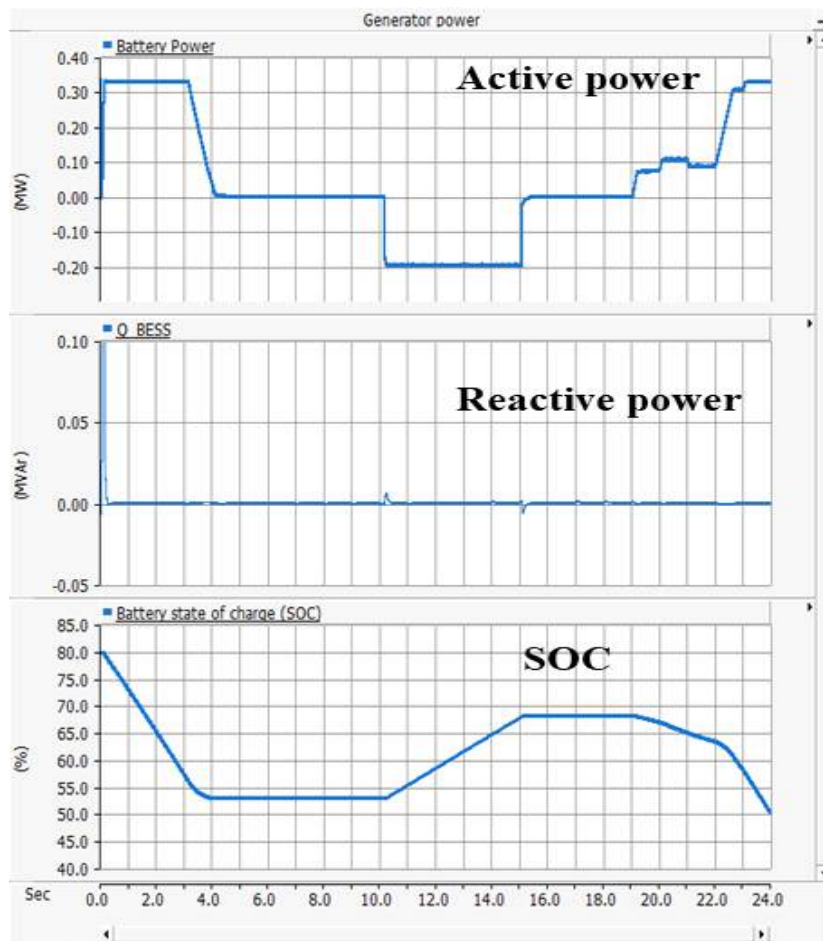


Fig. 5.14 Power and SOC characteristics of the ESS in charging and discharging mode

5.3 ESS의 연계지점에 따른 선로용량 및 전압 특성

본 절에서는 ESS의 연계지점 변경에 따른 충/방전 운용 시, 부하 및 태양광전원 변동에 따른 선로용량 및 전압 특성을 분석한다. 이때 시뮬레이션을 위한 모델 파라미터는 Table 5.1과 동일하며, 각 구간 별 연계된 부하 및 태양광전원의 용량은 동일하게 적용한다.

5.3.1 변대 직하 지점에 ESS 연계

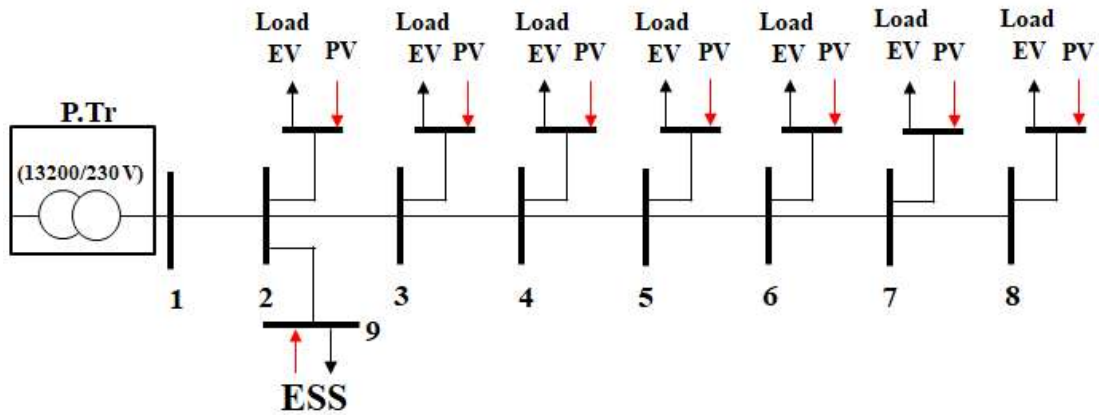
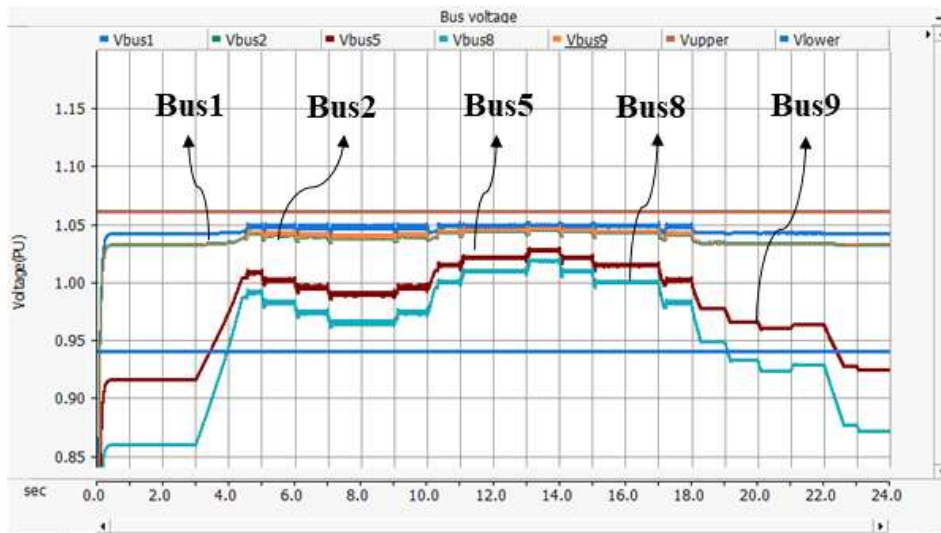
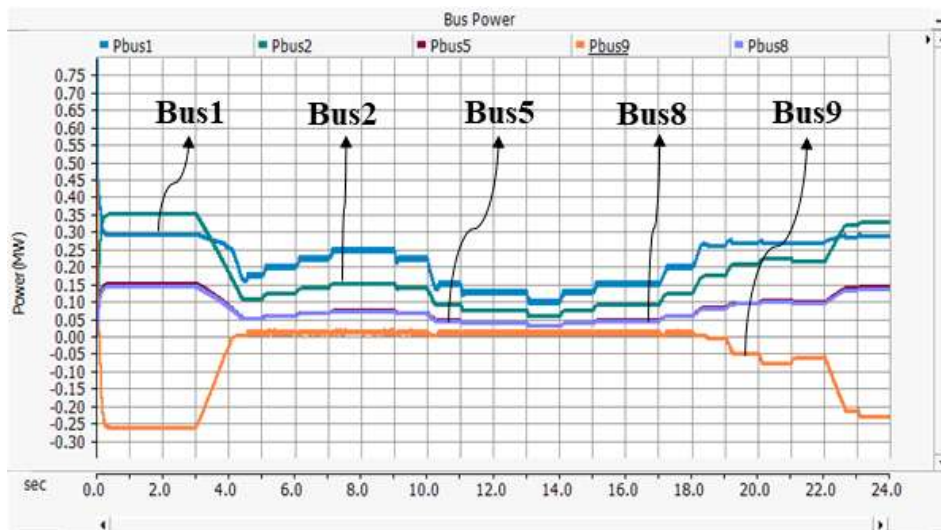


Fig. 5.15 System configuration by connecting ESS to Bus2

Fig. 5.15는 ESS를 변대 직하 지점에 연계한 것을 나타내며, 이 경우, 양방향 조류에 의한 전압 상승/강하의 및 선로용량 증대 효과를 기대할 수 없다. Fig. 5.16은 0~570kW의 부하를 연계 하였을 경우의 시뮬레이션 결과로서 각 버스에서 측정된 전압 및 유효전력을 보여준다. 전압의 경우 Fig. 5.16(a)에서 Bus5 및 Bus8에서 측정된 전압이 하한치를 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5.16(b)를 통해 Bus2에서 측정된 유효전력이 상한치를 초과함을 알 수 있으며, 이는 주상변압기 및 ESS가 부하에 필요한 전력을 Bus2를 통해 공급한다는 것을 보여준다. 따라서 변대 직하 지점에 ESS를 연계할 경우, 부하는 주상변압기 용량을 초과해서 운용될 수 없기 때문에 ESS에 의한 수용성 향상 효과를 기대할 수 없음을 확인할 수 있다.



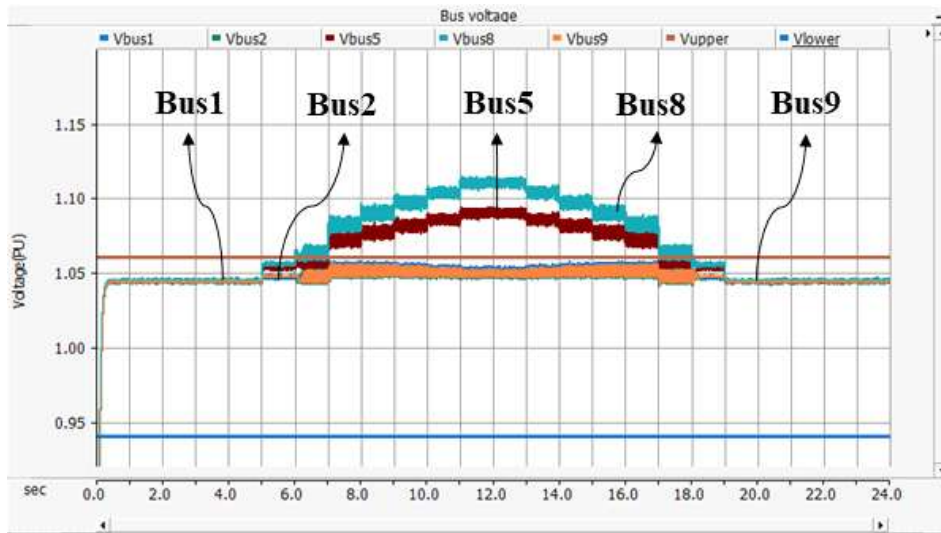
(a)



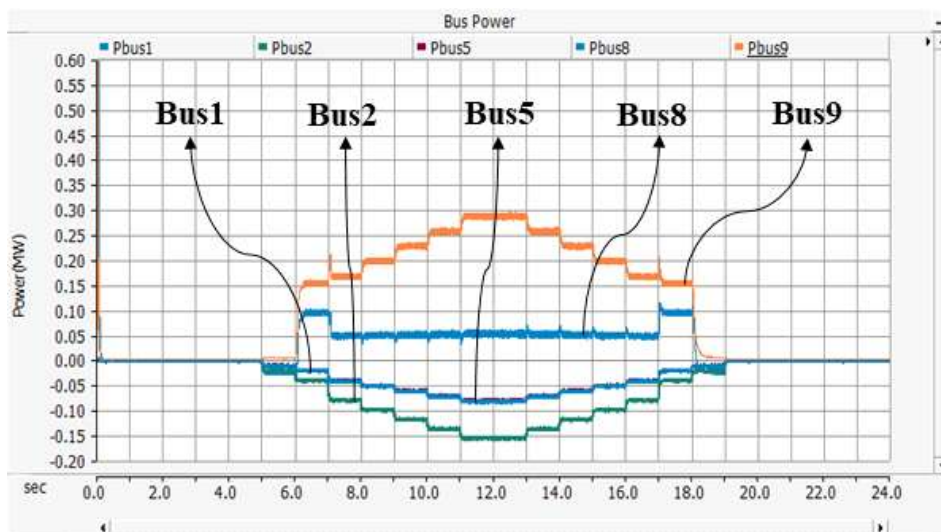
(b)

Fig. 5.16 Voltage and power of LVDS with EV when an ESS is connected to Bus2, (a) voltage, (b) active power

Fig. 5.17은 0~240kW의 태양광전원을 연계 하였을 경우 ESS의 충전운용에 의한 시뮬레이션 결과로서 각 버스에서 측정된 전압 및 유효전력을 보여준다. 전압의 경우 Fig. 5.17(a)에서 Bus5 및 Bus8에서 측정된 전압이 상한치를 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 주상변압기 직하에 ESS를 연계할 경우, 태양광 발전에 의한 역조류로 인해 발생하는 과전압 현상을 방지할 수 없음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5.17 Voltage and power of LVDS with PV system when an ESS is connected to Bus2, (a) voltage, (b) active power

5.3.2 선로 중간 지점에 ESS 연계

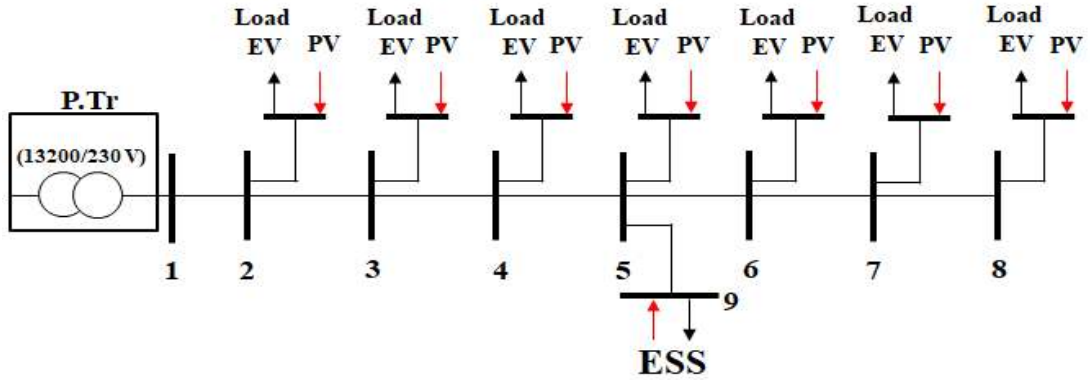
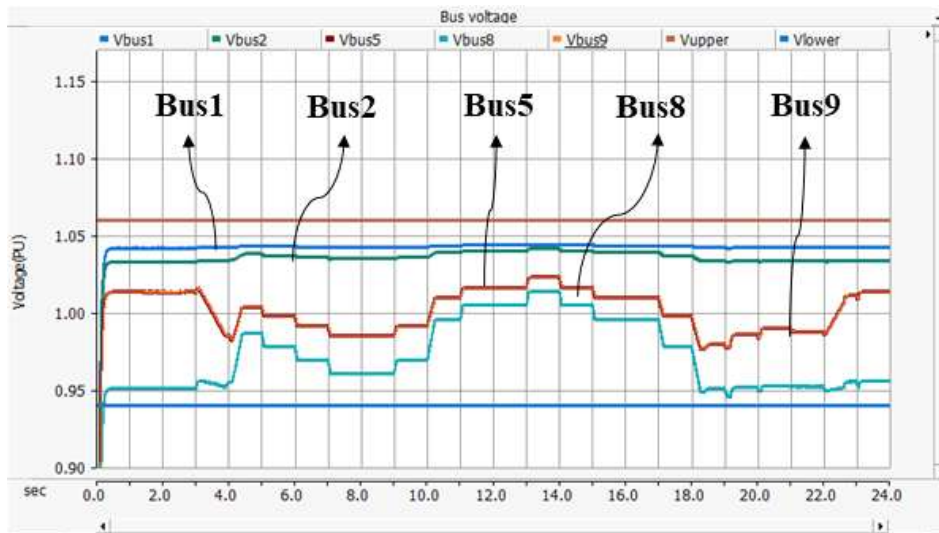
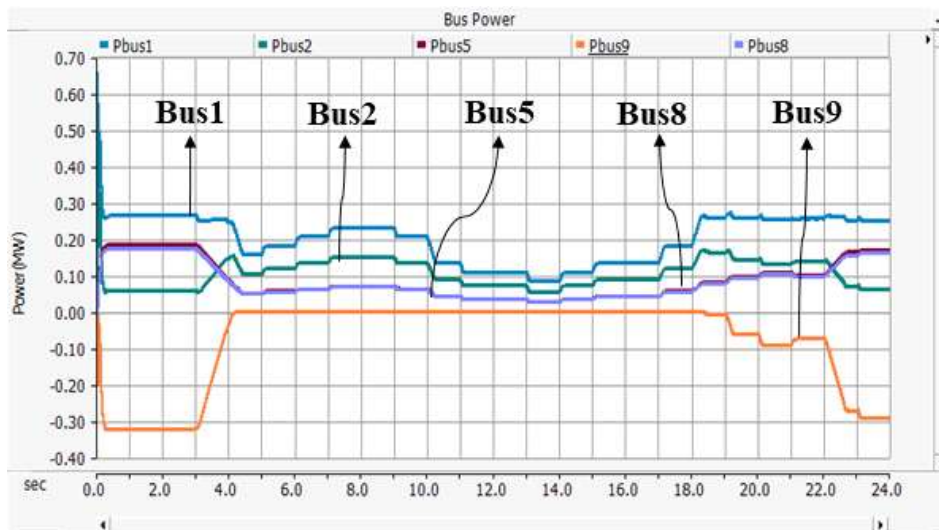


Fig. 5.18 System configuration by connecting ESS to Bus5

Fig. 5.18은 ESS를 선로 중간 지점인 Bus5에 연계한 것을 보여준다. Fig. 5.19는 0~570kW의 부하를 연계 하였을 경우의 시뮬레이션 결과로서 각 Bus에서 측정된 전압 및 유효전력을 보여준다. 전압의 경우 ESS를 직하 지점에 연계한 결과와는 다르게 570kW의 부하까지 수용할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5.19(b)를 통해 Bus1~Bus8에 연계된 부하의 총 소비 전력이 570kW일지라도 각 버스에서 측정된 유효전력이 모두 300kW 이하로 주상변압기 용량보다 작음을 확인할 수 있다. 따라서 중간 지점에 ESS를 연계할 경우, 부하는 주상변압기 용량의 1.9배까지 수용성을 확대할 수 있어 말단에 ESS를 연계하여 운용할 경우와 동일한 효과를 기대할 수 있다.



(a)

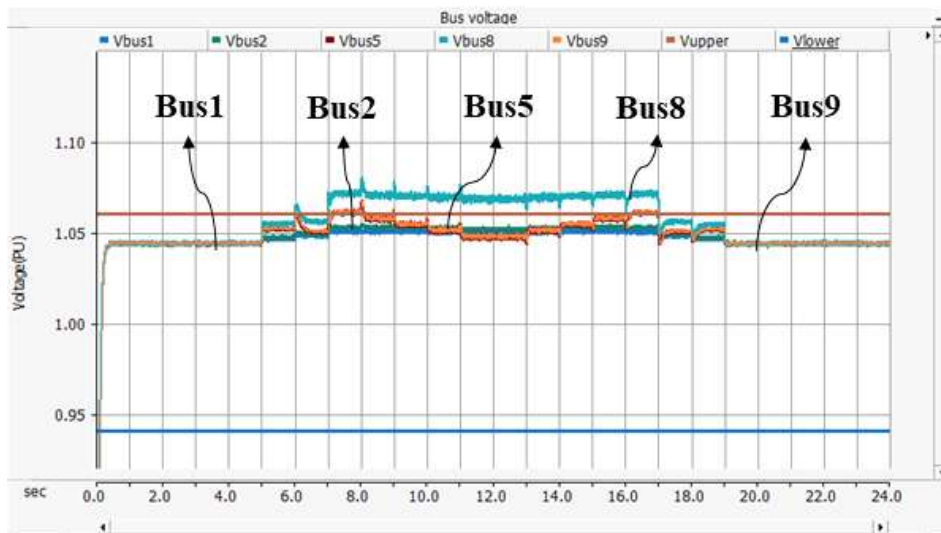


(b)

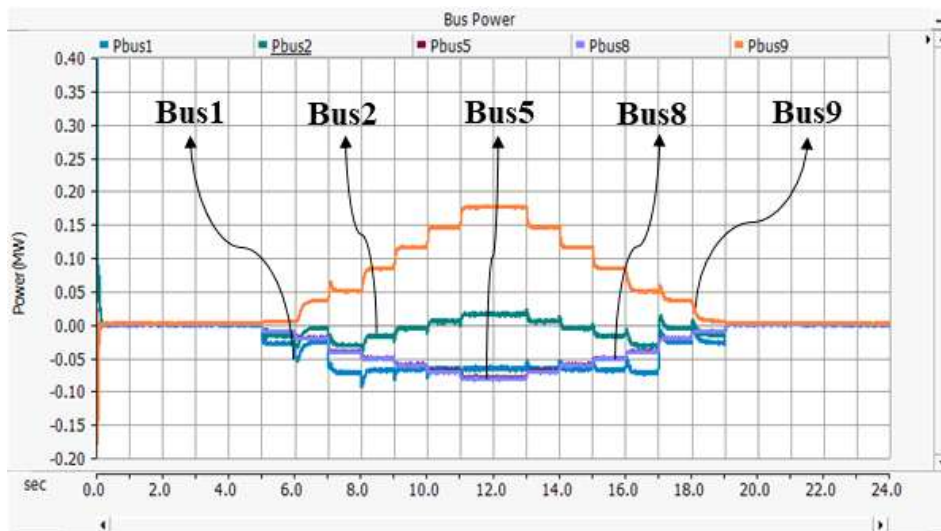
Fig. 5.19 Voltage and power of LVDS with EV when an ESS is connected to Bus5, (a) voltage, (b) active power

Fig. 5.20은 0~240kW의 태양광전원을 연계 하였을 경우의 시뮬레이션 결과로서 각 버스에서 측정된 전압 및 유효전력을 보여준다. 전압의 경우 Fig. 5.20(a)에서 Bus8의 전압이 상한치를 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 선로용량의 경우 Fig. 5.20(b)를 통해 주상 변압기 직하부터 말단 부하까지 각 버스에서 측정된 유효전력이 300kW를 초과하지 않음을 확인할 수 있다. 이는 말단에 연계된 태양광 및 중간 지점에 연계된

태양광에서 생산된 전력이 중간 지점에 연계된 ESS를 충전하는데 사용되어지며, 직하 지점에 연계된 태양광 발전은 주상변압기 측으로 흐르기 때문이다. 따라서 각 버스에서 측정된 유효전력은 허용치인 300kW를 초과하지 않는다. 그러나 Fig. 5.20(a)에서 확인할 수 있듯이 전압의 경우 허용치를 만족하지 못하기 때문에, 계통 말단에 ESS를 연계하는 경우에 비해 효과를 기대할 수 없음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5.20 Voltage and power of LVDS with PV system when an ESS is connected to Bus5, (a) voltage, (b) active power

5.4 부하분포에 따른 선로용량, 전압 특성 및 ESS 출력용량

본 절에서는 ESS는 말단 지점에 연계한 상태에서 부하분포에 따른 시뮬레이션 결과를 분석한다. 즉, 저압 배전계통의 부하는 조건에 따라 주상변압기 직하, 중간, 말단 지점에 집중될 수 있으며, 혹은 고르게 분포할 수 있다. 따라서 부하분포에 따라 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지시키기 위한 ESS의 출력량을 결정하는 문제는 중요하다.

시뮬레이션을 위한 모델 파라미터는 Table 5.1과 동일하며, 각각의 Case에서 총 부하 소비량 및 태양광 발전량은 각각 570kW 및 240kW로 산정한다. 또한 부하 분포 및 태양광전원 분포 산정 시 집중 부하는 총 부하의 50%, 나머지 부하는 각 25%로 산정하여 시뮬레이션을 수행하고 ESS의 출력에 따른 선로용량 및 전압 특성을 분석한다. 시뮬레이션 결과 분석 시 Bus1 ~Bus9에서 측정된 전압은 모두 허용치인 $220\pm 6\%$ 를 유지해야 하며, Bus1 ~Bus8에서 측정된 유효전력은 주상변압기 용량인 300kW를 초과하지 않아야 한다.

5.4.1 주상변압기 직하에 부하 및 태양광전원이 집중될 경우

Table 5.3은 주상변압기 직하에 부하가 집중되었을 때의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 직하에 연계된 부하는 570kW의 50%인 285kW이고 중간 지점 및 말단에 연계된 부하는 각각 25%인 142.5kW 이다. Table 5.3에서 말단에 연계된 ESS의 방전 출력은 Case 1의 경우 -260kW이고, Case 2의 경우는 -270kW이다. 따라서 ESS의 방전 출력을 줄일 경우 Bus1에서 측정된 유효전력의 크기는 주상변압기 용량보다 점점 더 커지게 되며, 또한 ESS의 방전 출력을 증가시킬 경우에는 Bus9에서 측정된 전압의 크기가 상한치를 점점 더 초과하게 된다.

이를 통해 570kW의 EV를 포함한 부하가 주상변압기 직하에 집중될 경우, ESS의 방전을 통해 선로용량 및 전압을 허용치 이내로 유지하지 못함을 확인할 수 있다.

Table 5.3 Active power of each bus when Bus2 is lumped load

(total load: 570kW)

Power(kW)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	319	31	-110	-259	-260
Case 2	300	12	-130	-279	-270

Table 5.4 Voltage of each bus when Bus2 is lumped load

(total load: 570kW)

Voltage(PU)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	1.041	1.030	1.020	1.057	1.062
Case 2	1.041	1.031	1.027	1.070	1.075

Table 5.5 및 Table 5.6은 부하전력의 합인 570kW의 90%를 적용할 경우의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 이 때 주상변압기 직하에 연계된 부하는 256.6kW이고, 중간 및 말단 지점에 연계된 부하는 각각 128.25kW이다. Table 5.5 및 Table 5.6에서 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지시키기 위한 ESS의 가용 출력은 $-240\text{kW} < \text{ESS} < -220\text{kW}$ 임을 확인할 수 있다. 부하가 직하에 집중될 경우 부하의 총 합이 570kW일 경우에는 ESS를 연계하더라도 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지할 수 없으며, 총 부하가 90%인 513kW일 경우, ESS의 출력이 $-240\text{kW} < \text{ESS} < -220\text{kW}$ 일 때 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지할 수 있다. 따라서 변대 직하에 부하가 집중될 경우 513kW까지는 ESS에 의해 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 5.5 Active power of each bus when Bus2 is lumped load
(total load: 513kW)

Powre(kW)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	299	41	-87	-219	-220
Case 2	290	32	-96	-229	-230
Case 3	280	22	-106	-239	-240

Table 5.6 Voltage of each bus when Bus2 is lumped load
(total load: 513kW)

Voltage(PU)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	1.041	1.031	1.017	1.047	1.050
Case 2	1.041	1.031	1.021	1.053	1.057
Case 3	1.041	1.032	1.024	1.060	1.064

Table 5.7 및 Table 5.8은 주상변압기 직하에 태양광전원이 집중되었을 때의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 직하에 연계된 태양광전원은 240kW의 50%인 120kW이고 중간 지점 및 말단에 연계된 부하는 각각 25%인 60kW 이다. Table 5.7 및 Table 5.8에서 말단에 연계된 ESS의 충전 전력은 109~222kW이다.

Table 5.7 및 Table 5.8에서 확인할 수 있듯이 주상변압기 직하에 태양광전원이 집중될 경우, 선로용량은 모든 Case에서 허용치를 만족하나, 전압의 경우, Case 1의 Bus5에서 측정된 전압이 상한치를 초과함을 알 수 있으며, Case 5에서 Bus9의 전압이 하한치를 미만임을 확인할 수 있다. 즉, 주상변압기 직하에 태양광전원이 집중될 경우 ESS의 충전 전력이 $109\text{kW} < \text{ESS} < 222\text{kW}$ 일 때 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지할 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 변대 직하에 태양광전원이 집중될 경우 240kW까지 ESS에 의해 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 5.7 Active power of each bus when PV system is concentrated on Bus2

Power(kW)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	-132	-9	50	109	109
Case 2	-120	1	60	119	119
Case 3	-32	88	147	201	200
Case 4	-19	102	159	212	211
Case 5	-7	115	168	223	222

Table 5.8 Voltage of each bus when PV system is concentrated on Bus2

Voltage(PU)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	1.051	1.055	1.060	1.043	1.041
Case 2	1.051	1.055	1.056	1.036	1.033
Case 3	1.049	1.050	1.022	0.972	0.968
Case 4	1.050	1.051	1.018	0.963	0.955
Case 5	1.510	1.520	1.012	0.952	0.941

5.4.2 주상변압기 중간지점에 부하 및 태양광전원이 집중될 경우

Table 5.9 및 Table 5.10은 저압선로의 중간지점에 부하가 집중되었을 때의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 중간 지점에 연계된 부하는 570kW의 50%인 285kW이고 직하 지점 및 말단에 연계된 부하는 각각 25%인 142.5kW이다. Table 5.9 및 Table 5.10에서 말단에 연계된 ESS의 방전 출력은 Case 1의 경우 -330kW, Case 4의 경우는 -290kW이다.

Table 5.9 및 Table 5.10에서 확인할 수 있듯이 저압선로의 중간 지점에 부하가 집중될 경우, ESS의 출력이 $-330\text{kW} < \text{ESS} < -290\text{kW}$ 일 때 전압 및 선로용량을 허용치

이내로 유지할 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 선로 중간에 부하가 집중될 경우 570kW까지 ESS에 의해 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 5.9 Active power of each bus when Bus5 is lumped load

Power(kW)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	257	113	-176	-329	-330
Case 2	268	123	-167	-319	-320
Case 3	288	143	-148	-299	-300
Case 4	299	153	-139	-289	-290

Table 5.10 Voltage of each bus when Bus5 is lumped load

Voltage(PU)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	1.041	1.033	0.995	1.565	1.062
Case 2	1.041	1.032	0.991	1.049	1.055
Case 3	1.041	1.031	0.984	1.036	1.041
Case 4	1.041	1.031	0.980	1.028	1.034

Table 5.11 및 Table 5.12는 저압선로의 중간지점에 태양광전원이 집중되었을 때의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 중간지점에 연계된 태양광전원은 240kW의 50%인 120kW이고 직하 및 말단에 연계된 태양광전원은 각각 25%인 60kW이다.

Table 5.11 및 Table 5.12에서 확인할 수 있듯이 저압배전선로의 중간지점에 태양광전원이 집중될 경우, Case 1에서 Bus5의 전압이 상한치를 초과하고 Case 5에서 Bus9의 전압이 하한치 미만임을 확인할 수 있다. 따라서 중간지점에 태양광전원이 집중될 경우 ESS의 충전 전력이 150kW<ESS<253kW 일 때 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지할 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 5.11 Active power of each bus when PV system is concentrated on Bus5

Power(kW)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	-89	-27	93	151	150
Case 2	-78	-17	104	161	160
Case 3	-16	77	197	244	243
Case 4	27	89	208	254	253

Table 5.12 Voltage of each bus when PV system is concentrated on Bus5

Voltage(PU)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	1.051	1.054	1.063	1.033	1.030
Case 2	1.050	1.053	1.058	1.024	1.022
Case 3	1.050	1.050	1.023	0.946	0.952
Case 4	1.049	1.048	1.019	0.944	0.940

5.4.3 주상변압기 말단지점에 부하 및 태양광전원이 집중될 경우

Table 5.13 및 Table 5.14는 저압선로의 말단지점에 부하가 집중되었을 때의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 말단 지점에 연계된 부하는 570kW의 50%인 285kW이고 직하 지점 및 중간지점에 연계된 부하는 각각 25%인 142.5kW 이다. Table 5.13 및 Table 5.14에서 말단에 연계된 ESS의 방전 출력은 Case 1의 경우 -280kW이며 이 경우 전압이 허용치를 벗어나고 Bus1에서 측정된 선로용량 또한 허용범위를 벗어난다. 따라서 570kW의 용량을 갖는 부하가 말단에 집중될 경우, ESS의 방전을 통해 선로용량 및 전압을 허용치 이내로 유지하지 못함을 확인할 수 있다.

Table 5.13 Active power of each bus when Bus8 is lumped load
(total load: 570kW)

Power(kW)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	300	12	-130	-280	-280

Table 5.14 Voltage of each bus when Bus8 is lumped load
(total load: 570kW)

Voltage(PU)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	1.041	1.031	1.027	1.070	1.075

Table 5.15 및 Table 5.16은 최대부하 용량인 570kW의 90%를 부하에 적용한 시뮬레이션 결과를 보여 준다. 이 때 저압배전선로 말단에 연계된 부하는 256.6kW이고, 직하 및 중간 지점에 연계된 부하는 각각 128.25kW이다. Table 5.15 및 Table 5.16에서 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지시키기 위한 ESS의 가용 출력은 $-240\text{kW} < \text{ESS} < -220\text{kW}$ 임을 확인할 수 있다. 따라서 부하가 말단에 집중될 경우 부하의 총 합이 570kW일 경우에는 ESS를 연계하더라도 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지할 수 없으며, 총 부하가 90%인 513kW일 경우 ESS의 출력이 $-240\text{kW} < \text{ESS} < -220\text{kW}$ 일 때 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지할 수 있다.

Table 5.15 Active power of each bus when Bus8 is lumped load
(total load: 513kW)

Power(kW)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	301	41	-87	-219	-220
Case 2	291	32	-96	-229	-230
Case 3	281	22	-106	-239	-240

Table 5.16 Voltage of each bus when Bus8 is lumped load
(total load: 513kW)

Voltage(PU)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	1.041	1.031	1.017	1.046	1.050
Case 2	1.041	1.031	1.021	1.053	1.057
Case 3	1.041	1.032	1.024	1.060	1.064

Table 5.17 및 Table 5.18은 저압선로 말단에 태양광전원이 집중되었을 때의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 말단에 연계된 태양광전원은 240kW의 50%인 120kW이고 직하 및 중간지점에 연계된 태양광전원은 각각 25%인 60kW이다.

Table 5.17 및 Table 5.18에서 확인할 수 있듯이 저압선로 말단에 태양광전원이 집중될 경우, 선로용량은 모든 Case에서 허용치를 만족하나, 전압의 경우, Case 1의 Bus5에서 측정된 전압이 상한치를 초과함을 알 수 있었으며, Case 5에서 Bus9의 전압이 하한치를 초과함을 확인할 수 있다. 따라서 저압배전선로 말단에 태양광전원이 집중될 경우 ESS의 충전 전력이 160kW<ESS<283kW 일 때 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지할 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 5.17 Active power of each bus when PV system is concentrated on Bus8

Power(kW)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	-81	-19	40	161	160
Case 2	-49	12	72	191	190
Case 3	-5	56	116	232	231
Case 4	32	92	151	264	263
Case 5	57	119	172	285	283

Table 5.18 Voltage of each bus when PV system is concentrated on Bus8

Voltage(PU)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	1.050	1.053	1.060	1.046	1.043
Case 2	1.050	1.052	1.048	1.023	1.021
Case 3	1.050	1.051	1.032	0.993	0.989
Case 4	1.050	1.049	1.018	0.966	0.962
Case 5	1.049	1.048	1.008	0.942	0.940

5.4.4 부하 및 태양광전원이 균등하게 분포할 경우

Table 5.19 및 Table 5.20은 저압선로의 각 지점에 고르게 부하가 분포되었을 경우의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 균등 부하 시 부하의 총합인 570kW를 3등분하여 직하 지점 중간 지점 및 말단에 연계된 부하는 각각 190kW이다. Table 5.19 및 Table 5.20에서 말단에 연계된 ESS의 방전 출력은 Case 1의 경우 -280kW, Case 4의 경우는 -330kW이다.

Table 5.19 및 Table 5.20에서 확인할 수 있듯이 저압배전선로의 균등 부하 시, ESS의 출력이 $-330\text{kW} < \text{ESS} < -280\text{kW}$ 일 때 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지할 수

있음을 확인할 수 있다.

Table 5.19 Active power of each bus when load is uniform

Power(kW)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	301	107	-86	-280	-280
Case 2	290	97	-95	-289	-290
Case 3	259	67	-124	-319	-320
Case 4	250	58	-133	-329	-330

Table 5.20 Voltage of each bus when load is uniform

Voltage(PU)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	1.041	1.031	0.995	1.025	1.030
Case 2	1.041	1.031	0.999	1.032	1.037
Case 3	1.041	1.033	1.010	1.052	1.058
Case 4	1.041	1.033	1.014	1.059	1.064

Table 19 및 Table 20은 저압선로의 각 지점에 고르게 태양광전원이 분포되었을 경우의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 태양광전원의 총 발전량은 240kW이고, 직하 지점 중간 지점 및 말단에 80kW씩 각각 연계된다.

Table 19 및 Table 20에서 확인할 수 있듯이 저압배전선로의 각 지점에 태양광전원이 고르게 분포될 경우, Case 1에서 Bus5의 전압이 상한치를 초과하고 Case 5에서 Bus9의 전압이 하한치를 초과함을 확인할 수 있다. 따라서 태양광전원이 각 지점에 고르게 분포할 경우 ESS의 충전 전력이 $139\text{kW} < \text{ESS} < 250\text{kW}$ 일 때 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지할 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 5.21 Active power of each bus when PV systems are uniform

Power(kW)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	-101	-20	61	140	139
Case 2	-47	35	115	191	191
Case 3	-24	57	139	212	211
Case 4	-12	68	149	223	222
Case 5	24	107	185	253	250

Table 5.22 Voltage of each bus when PV systems are uniform

Voltage(PU)	Bus1	Bus2	Bus5	Bus8	Bus9
Case 1	1.051	1.054	1.060	1.040	1.039
Case 2	1.051	1.052	1.041	1.003	0.991
Case 3	1.050	1.050	1.031	0.984	0.980
Case 4	1.050	1.050	1.027	0.972	0.973
Case 5	1.049	1.048	1.014	0.942	0.940

5.5 ESS의 도입용량 및 경제성 분석

시뮬레이션을 통해 ESS를 저압 배전계통 말단에 연계할 경우 EV의 동시 충전전력은 최대 570kW이다. 이 때 ESS의 도입용량은 EV의 배터리 용량 및 일일 동시 충전율에 따라 달라진다. Table 5.23은 28kWh의 배터리 용량을 갖는 EV를 기준으로 20%에서 100%까지 충전하기 위해 필요한 ESS의 용량을 보여준다.

Table 5.23에서 저압 배전계통의 개별 수용가에 연계된 EV 대수는 총 80대로 동시 충전 시, 주상변압기 용량의 1.9배인 570kW가 필요하다. 그 중 ESS 제어 알고리즘으로부터 산출된 주상변압기의 공급 전력은 240kW로, ESS는 나머지만 330kW의 전력을 방전을 통해 EV에 공급하게 된다. 이 때 개별 EV의 SOC는 20%라

가정할 때 100%까지 충전하기 위해서는 약 3시간동안 충전해야 하며, 이때 필요한 ESS의 용량은 $330\text{kW} \times 3\text{hour} = 990\text{kWh}$ 이다.

Table 5.23 Required ESS capacity for EV charging during 3 hour

EV charging (kW)	Rate (%)	P.Tr (kW)	ESS (kW)	ESS capacity (kWh)
570	100	240	330	990
513	90	240	273	819
456	80	240	216	648
399	70	240	159	477
342	60	240	102	306

한편, 글로벌 배터리 기반 ESS의 가격은 2020년 현재 388\$/kWh이며, 신재생에너지 연계용 및 전기차용 ESS의 수요 증가로 인해 2025년까지 연평균 약 7%씩 가격이 하락하여 282\$/kWh일 것으로 예상된다[40].

저압 배전계통에 연계되는 EV의 수용성을 확대하기 위해 필요한 ESS의 비용은 도입용량과 비례하며, Table 5.23과 같이 EV의 동시 충전 비율, 충전시간, 주상변압기의 분담정도 등에 따라 변동될 수 있다. 만약 저압 배전계통에 연계된 전기자동차가 모두 동시 충전할 경우 시 2025년 ESS의 가격을 적용하여 990kWh의 ESS 설치를 위해서는 279,180\$의 재원이 필요하며, 한화로는 약 3억 3천만원이다. 일반적인 EV 충전을 고려하여 동시 충전율이 60%이면 306kWh의 ESS 설치가 필요하며 이때 소요되는 재원은 86,292\$로 한화로는 약 1억원이다.

ESS의 설치비용에 따른 경제성은 ESS를 설치하지 않고 선로를 새로 신설하기 위한 비용과 비교를 통해 산출될 수 있다. 주상변압기 용량을 초과하는 EV가 계통에 연계되기 위해서는 주상변압기 및 선로를 신설할 수밖에 없으며, 때에 따라서는 고압 가공 선로를 끌어와야 하는 경우도 발생한다.

선로를 신설할 경우 한전에서 제시한 전기 공급약관에 따른 표준시설 부담금을

납부해야 한다. Table 5.24는 표준시설 부담금으로 저압, 고압 또는 특고압으로 구분되며, 배전선로 공사발생 유무 및 공사내역에 관계없이 신설 또는 증설분 계약전력에 대하여 비용 부담을 나타낸다. 또한, 고객은 지중이나 가공으로 공급을 받고자 할 경우 공급방식에 따라 지출 비용이 달라지는데, Table 5.25와 같이 거리시설 부담금이 추가로 신설거리 또는 추가거리에 따라 적용될 수 있다[41].

Table 5.24 Customer's standard facility charges according to the terms of electricity supply

구 분	기본시설부담금	가공공급
저 압	매계약에 대하여 계약전력 5kW까지	220,000
	계약전력 5kW초과 분의 1kW에 대하여	66,000
고압 또는 특고압	신 증설계약전력 1kW에 대하여	17,000

Table 5.25 Customer's standard street facility charges according to the terms of electricity supply

구 분	거리시설부담금	전압	가공공급	
			단상	삼상
신설거리 부담금	기본거리를 초과하는 신설거리 매 1m에 대하여	저압	39,000	43,000
		고압 또는 특고압	43,000	
추가거리 시설부담금	기본거리를 초과하는 추가거리 매 1m에 대하여	저압	5,000	
		고압 또는 특고압	10,000	

상기의 방법에 따라 Table 5.24 및 Table 5.25를 바탕으로 300kVA의 용량에 대한 저압선로 500m 신설에 따른 금액을 산정하면 약 5천 7백만원으로 동시 충전율을 60% 및 100% 고려한 ESS의 설치비용과 비교했을 때 선로 신설 비용이 저렴함을 알 수 있다. 그러나 저압선로가 연계된 고압선로의 용량이 한계에 도달하면 고압선로를 새로 끌어와야 하는 경우가 발생하는데, 이 때 소요되는 고압선로 신설 비용은 Table 5.25에 따라 1km당 약 5천 3백만원이 소요된다.

Table 5.26은 1km당 소요되는 고압 가공선로의 공급 비용을 포함한 총 부담금을

나타낸다. 1km의 고압선로 신설을 고려한 총 비용은 1억 1천만원으로 60%의 동시 충전을 고려한 ESS의 설치비용과 비교했을 때 ESS를 설치하는 것이 경제적이다. 100%의 동시 충전을 고려할 경우의 ESS는 고압선로의 길이가 5.2km 이상이 되면 더 경제적임을 알 수 있다.

Table 5.26 Customer's charges according to feeder length

길이(m)	고압 가공공급 비용 포함 총 부담금(단위: 천원)
1,000	53,000+57,000 = 110,000
3,000	159,000+57,000 = 216,000
5,000	265,000+57,000 = 322,000
5,200	275,600+57,000 = 332,600

5.6 수용성 향상 분석 및 결과 고찰

5.6.1 시뮬레이션 결과 분석

ESS가 연계된 저압 배전계통에서 EV를 포함한 부하의 수용성 향상 및 태양광전원에 의한 과전압 문제를 해결하기 위해 5.2~5.4절까지 다양한 시뮬레이션을 수행하였다. 우선 5.2절에서는 선로 말단에 ESS 연계 전/후의 EV 및 태양광전원 운용에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 제안한 배전용 ESS의 제어 알고리즘에 따라 모든 버스의 전압 및 선로용량을 만족시킴으로서 EV를 포함한 부하의 경우 주상변압기 대비 1.9배까지 수용성을 확대시키고 태양광전원의 경우 전압을 허용치 이내로 유지하여 과전압 문제를 해결할 수 있었다.

5.3절에서는 ESS의 연계지점 변경에 따른 수용가 전압 및 선로용량에 대한 특성분석이 이루어졌으며, ESS를 변대 직하에 연계하였을 경우에는 수용성 향상 효과를 기대할 수 없었고, 중간 지점에 ESS를 연계하였을 경우에는 수용성 향상 측면에서 부하는 1.9배까지 수용성을 확대할 수 있었으나, 태양광전원의 경우는 과전압 문제가 발생하였다.

한편 5.4절에서는 ESS를 선로 말단에 연계한 상태에서 EV를 포함한 부하 및 태양광전원의 분포를 달리하여 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지하기 위한 ESS의 출력용량을 분석하는 시뮬레이션을 수행하였다. 선로용량 및 전압을 안정적으로 유지시키기 위한 ESS의 충/방전 출력은 부하 및 태양광전원의 분포도에 따라 변동됨을 확인하였다. 따라서 ESS의 구성요소 중 PCS의 출력용량은 분포도에 따라 다르게 설정해야 함을 확인할 수 있었다. 또한 부하의 경우 직하 집중과 말단 집중 시 최대 용량인 570kW일 경우, 허용치를 만족할 수 없었으며, 부하 용량의 90%로 낮출 경우 ESS 방전을 통해 허용치를 만족할 수 있음을 확인하였다. Table 5.27은 부하 및 태양광전원의 분포에 따른 전압 및 선로용량을 허용치 이내로 유지시키기 위한 ESS의 출력범위를 보여준다.

Table 5.27 ESS power range to keep feeder capacity and voltage within allowable limit

분포/kW	부하 : 570kW	태양광전원 : 240kW
직하 집중	-260 ~ -250 (90%)	109 ~ 222 (100%)
중간 집중	-330 ~ -290 (100%)	150 ~ 253 (100%)
말단 집중	-220 ~ -240 (90%)	160 ~ 283 (100%)
균등	-330 ~ -280 (100%)	139 ~ 250 (100%)

5.5절에서는 EV의 배터리 용량 및 일일 동시 충전율에 따른 ESS의 도입용량을 결정하고, ESS 설치비용과 선로 증설 비용의 비교를 통해 경제성을 분석하였다. 그 결과 100%의 동시 충전을 고려할 경우의 ESS는 신설되는 고압선로의 길이가 5.2km 이상이 되면 경제성을 가짐을 확인하였다.

5.6.2 ESS 연계 전/후의 전력변동 성능 분석

본 절에서는 ESS 연계 전/후의 전력이 선로의 정격용량에 얼마나 가깝게 유지되는지를 평가하기 위해 전력변동 성능을 RMSE(Root Mean Square Error)를

통해 분석하였다. 전력변동 성능은 주상변압기의 정격용량과 가장 심각한 전력변동을 나타내는 Bus1에서 측정된 전력 데이터를 사용하여 식 (5.1)에 따라 계산된다.

$$SE(P_1, P_{rated}) = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (P_{1,t} - P_{rated})^2}{N}} \quad (5.1)$$

여기서 P_1 은 부하가 주상변압기 용량을 초과하는 상태에서 가장 심한 변동 특성을 갖는 전력 데이터이고, P_{rated} 는 주상변압기의 정격용량(300kVA)을 나타낸다.

Fig. 5.21 및 Table 5.28은 저압 배전계통에서 태양광 발전에 따른 충전 모드 시 ESS 연계 전/후의 전력변동 성능을 나타내며, ESS 연계 후의 성능지수가 ESS 연계 전보다 나은 지표를 나타냄을 확인할 수 있다.

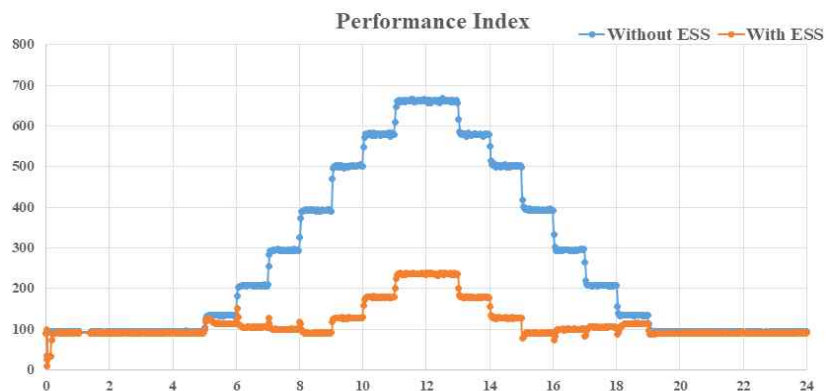


Fig. 5.21 Comparison of the performance index in charging mode

Table 5.28 Comparison of the performance index of charging mode

Classification	Before operating ESS	After operating ESS
Performance index value	16.41	10.78

Fig. 5.22 및 Table 5.29는 저압 배전계통에서 EV를 포함한 수용가의 전력변동에 따른 방전 모드 시 ESS 연계 전/후의 전력변동 성능을 나타내며, ESS 연계 후의 성능지수가 ESS 연계 전보다 나은 지표를 나타냄을 확인할 수 있다.



Fig. 5.22 Comparison of the performance index in discharging mode

Table 5.29 Comparison of the performance index of discharging mode

Classification	Before operating ESS	After operating ESS
Performance index value	32.98	19.95

6. 30kW급 복합배전계통 시험장치 구현 및 시험결과 분석

본 장에서는 저압 배전계통에서 EV를 포함하는 수용가 및 태양광전원의 수용성을 확인하기 위해 모의 선로, 모의 부하, 수배전반 및 그리드 시뮬레이터를 이용하여 실 저압 배전계통을 모사하고, PV 시뮬레이터 및 ESS의 운용을 통해 수용성 방안을 검증한다.

6.1 복합 저압 배전계통 시험장치 구현

본 절에서는 EV를 포함한 부하, 태양광이 연계된 저압 배전계통에서 ESS의 연계로 인한 선로용량 및 전압 특성을 분석하기 위해 실 저압 배전계통을 모사할 수 있는 시험장치를 설계 및 구현한다.

6.1.1 저압 배전계통 시험 장치 모듈

ESS를 활용한 저압 배전계통에 연계되는 태양광전원 및 부하의 수용성 향상에 따른 전압 특성을 구체적으로 해석하기 위하여, 주상변압기를 모의한 연계장치 모듈, 저압측을 방사상 계통으로 다 구간을 모의한 선로 장치 모듈, 수용가를 모의한 부하장치 모듈, 모의 태양광전원 및 ESS로 구성된 30kW급 복합 저압 배전계통 시험장치 설계도는 Fig. 6.1과 같다.

구체적으로 모의장치 구성은 모의 수배전반과 직렬로 연결된 3개의 모의 배전선로와 수용가부하를 이용하여 주상변압기 이하 저압선로를 3개의 구간으로 나누어 직하, 중간, 말단 부하를 구성하고 그리고 태양광전원을 모사할 수 있는 장치를 각 지점에 연결한다. ESS는 말단 부하 지점에 병렬로 연결한다. 이에 대한 부하 및 태양광전원의 수용성을 검증하기 위한 복합 저압 배전계통 시험장치는 Fig. 6.2와 같다.

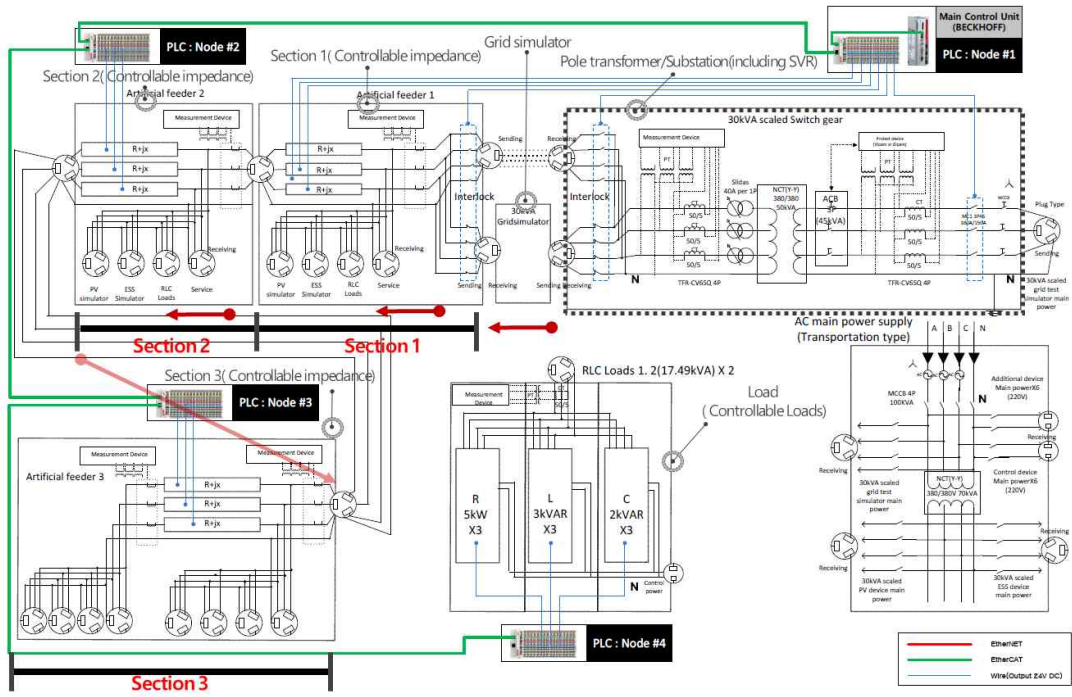


Fig. 6.1 Test system configuration for LVDS

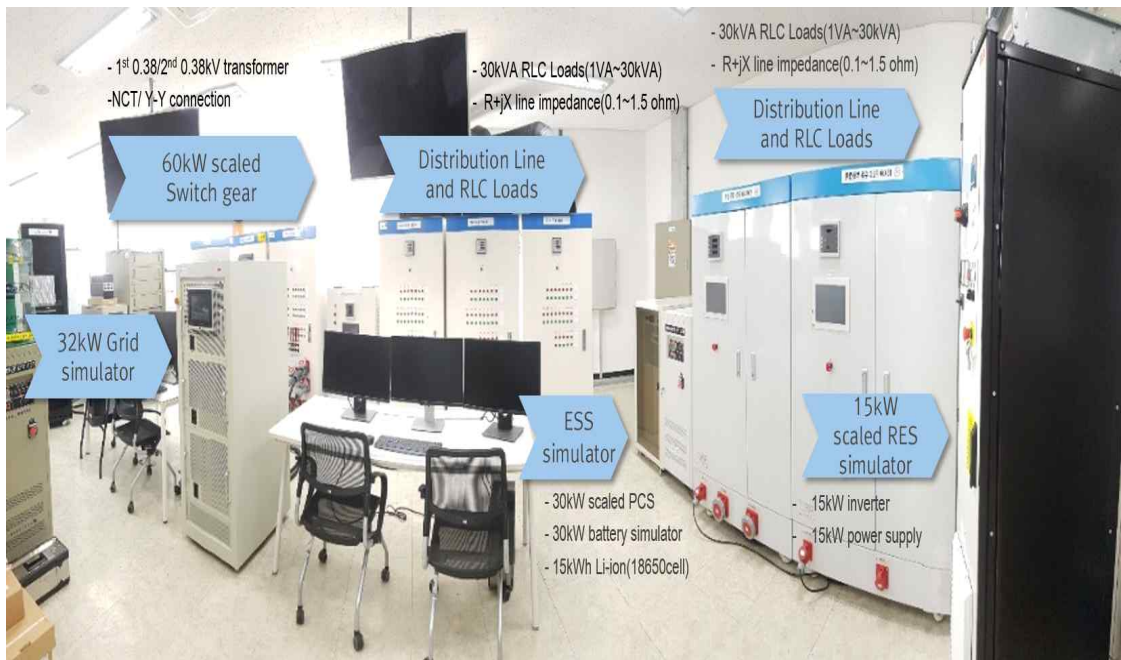


Fig. 6.2 Test system for LVDS

한편, ESS를 이용한 EV의 수용성 향상 방안을 검증하기 위한 저압 배전계통 시험장치의 전체 사양은 Table 6.1과 같다.

Table 6.1 Specification of artificial LVDS

설비명	KIER-ESIL-PED30A
정격 용량 (kVA)	30kVA
설비 구성	
배전용수배전반 사양	수배전반 1EA (30kVA급 Slidac 1Set)
시험용 ESS 사양	30kW PCS/30kW BT simulator 30kWh ESS
시험용 태양광전원 사양	태양광전원 2EA (10kW)
시험용 선로 사양	시험용 선로 3EA (45kVA급 선로/R+jX가변조정)
시험용 부하 사양	시험용부하 3EA (15kVA 부하 3EA)
정격 교류 전류 (A)	80
정격 교류 전압 (V)	380

(1) 주상변압기를 모의한 연계장치 모듈

주상변압기를 모사할 수 있는 모의 수배전반은 Fig. 6.3과 같이 380V 3상4선식으로 전압조정용 모터드라이브와 슬라이닥스로 구성된 20kVA 변환장치를 각상에 적용하여 전압을 조정할 수 있도록 구성한다. 또한 주상변압기를 포함한 배전용 변전소까지 모의할 수 있도록 하기 위해 전위보호기기 및 후비보호기기를 모사할 수 있는 보호장치(디지털보호계전기와 ACB)를 적용하여, 실제 계통과 동특성을 가질 수 있도록 모의한다.

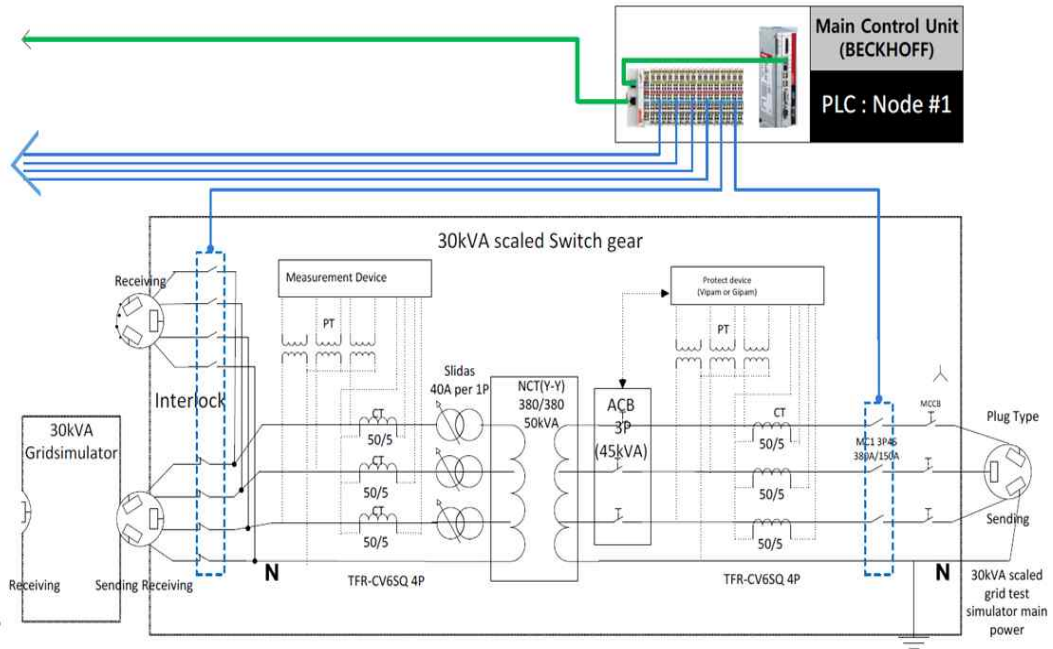
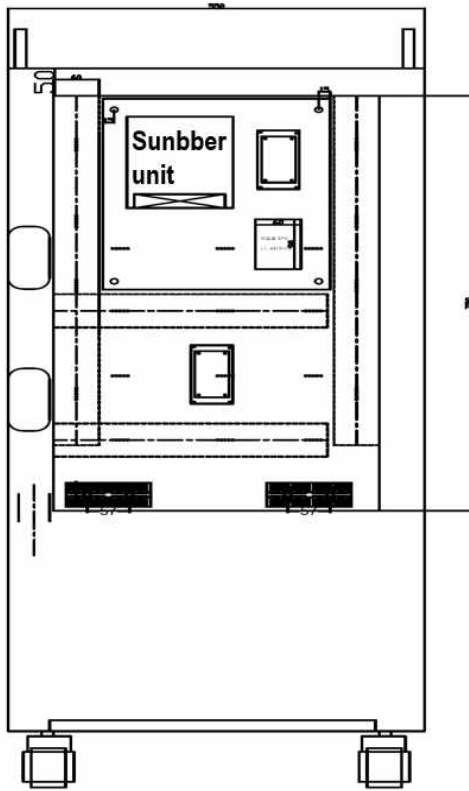


Fig. 6.3 Configuration of artificial switchgear

(2) 계통특성모사를 위한 계통외란 시뮬레이터 모듈

계통특성모사를 위한 계통외란 시뮬레이터 모듈은 Fig. 6.4와 같이 계통전원의 전력품질특성을 발생 시킬 수 있는 장치로서, 연계장치 모듈로부터 전력을 공급받는 인입부와, 저압배전선로 모듈과 연계되어 각종 전력외란을 발생시키는 인출부로 나누어져 배전계통의 정상상태, 과도상태. 전력품질에 대한 다양한 현상을 모사할 수 있다 이 중 ESS의 제어에 의한 수용성 가능여부를 판단하기 위한 기능으로 시뮬레이터 모듈을 사용하기 위하여, 기설계통의 주상변압기가 가지는 용량을 제한전력으로 설정하여 제한전력 이상으로 출력이 불가능하도록 한다. 또한 주상변압기는 종류에 따라 내부 전압강하율에 따른 출력전압이 상이하기 때문에 출력전압을 원하는 값으로 입력할 수 있도록 적용하여 본 논문에서 제안한 ESS를 연계 운영하는 경우, 수용성 여부를 판단하기 위한 기능을 갖도록 한다.



(a)



(b)

Fig. 6.4 Configuration of artificial switchgear,
(a) configuration of switchgear, (b) grid simulator

(3) 저압배전선로를 모의한 선로장치 모듈

모의 선로장치는 실제 저압 배전계통의 선로 임피던스를 고려하여 설계된다. 즉 모델링에서와 같이 저항(R)성분과 리액턴스(X)성분으로 구성된 모의 선로장치를 Fig. 6.5와 같이 구현한다. 여기서, Table 6.2와 같이 저항은 상당 0.1 Ω 단위로 최대 2.1 Ω 까지 가변이 가능하고, 리액턴스는 상당 j0.1 Ω 단위로 1.1 Ω 까지 MC(Magnetic Contactor)에 의하여 가변된다. 또한 저압 배전계통의 방사상 특성을 반영하기 위하여 Fig. 6.5와 같이 3개의 구간으로 구성하고, 각 선로의 인입부와 인출부에는 각각 태양광전원, ESS 그리고 EV 부하 등이 다양하게 연계될 수 있도록 Fig. 6.6과 같이 구성한다.

Table 6.2 Specification of secondary feeder

	종류	범위	비고
3 phase	R	0(by-pass) ~ 2.1Ω 조정 가능(step: 0.1Ω)	21 step
	L	0(by-pass) ~ jX1.1Ω 조정 가능(step: jX0.1Ω)	11 step

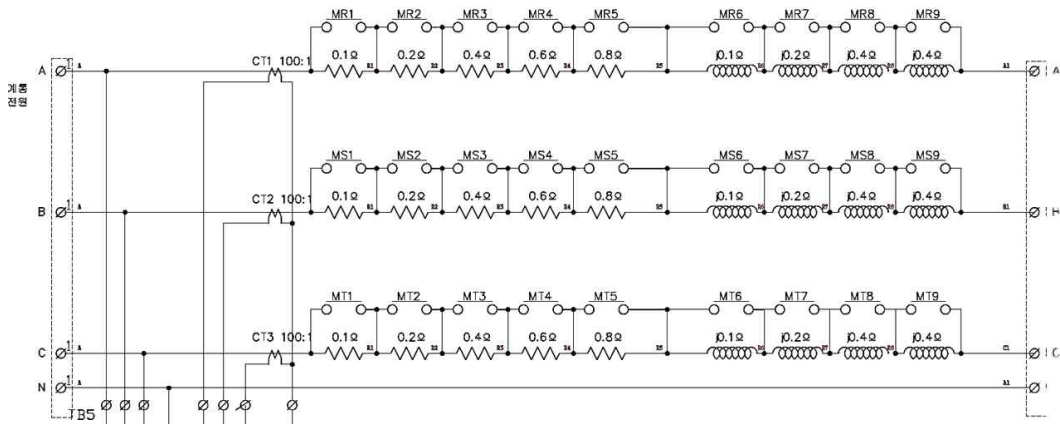


Fig. 6.5 Configuration of the secondary feeder

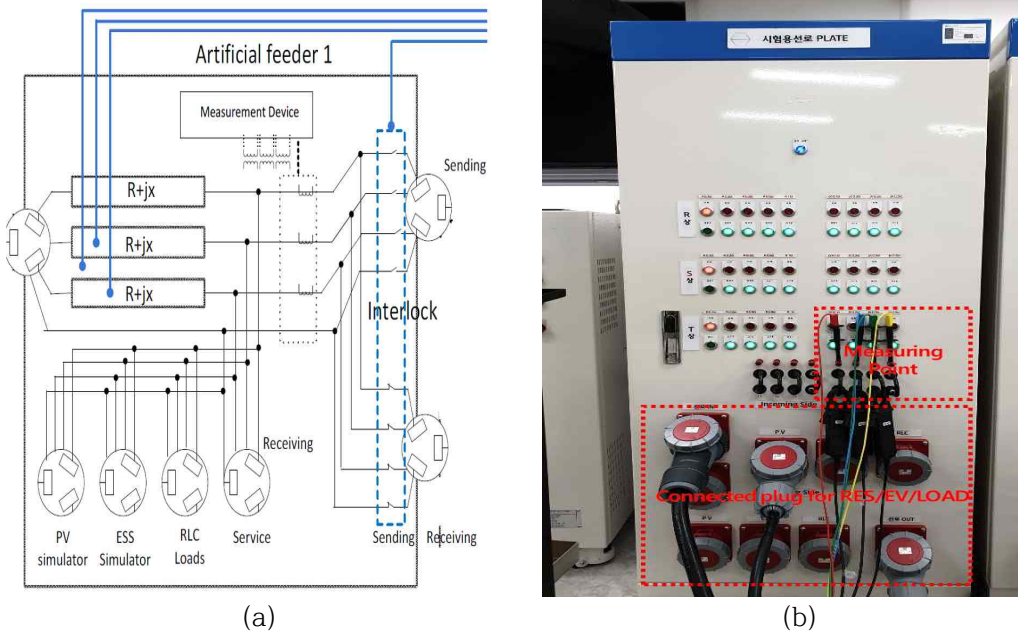


Fig. 6.6 Real configuration of the artificial secondary feeder,
 (a) architecture of the secondary feeder, (b) Artificial line simulator

(4) 저압 배전계통 전용 모의 부하장치

저압 배전계통 전용 모의 부하장치 모듈은 수용가 및 EV의 충전특성을 모사하기 위하여, 정임피던스 부하(Constants Z)인 저항, 유도성, 용량성 부하를 이용하여 구성한다. 구체적으로, 각 부하장치 모듈은 3상으로 구성되며 각 선로의 후단에 연계된다. 또한 Table 6.3과 같이 저항성부하는 상당 5kW로 구성하여 33W 단위로 최대 15kW까지 가변되며 용량성 부하와 유도성 부하는 상당 4kVAR로 구성하여 33VAR 단위로 12kVAR까지 가변 할 수 있도록 구성한다. Fig. 6.7은 저항성 부하를 이용한 모의부하장치 모듈의 구성도이며, Fig. 6.8은 실제 저압 배전계통 시험설비에 적용된 장치를 나타낸다.

Table 6.3 Specification of 3-phase load

상 구분	부 하	내 용	비 고
3 phase	R	0~15kW 조정 가능(step: 단상 33W)	
	L	0~12kVAR 조정 가능(step: 단상 33VAR)	
	C	0~12kVAR 조정 가능(step: 단상 33VAR)	

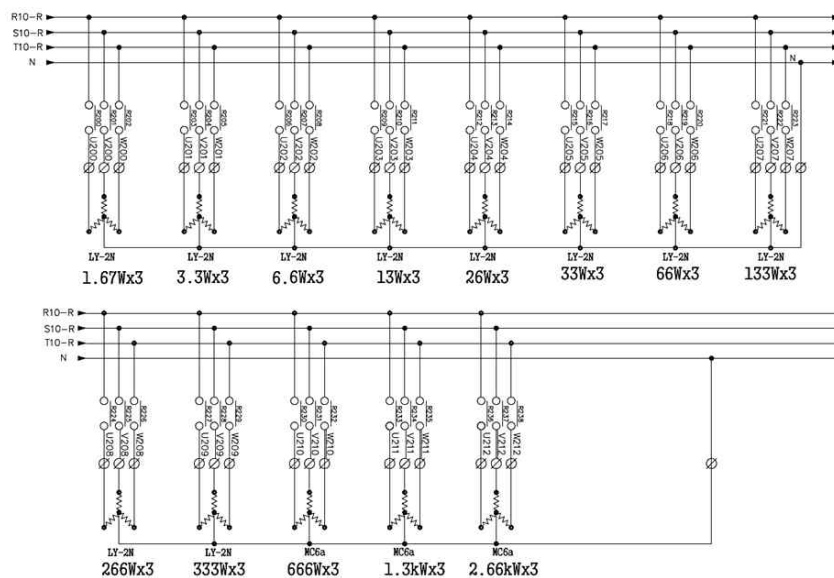


Fig. 6.7 Configuration of the artificial load

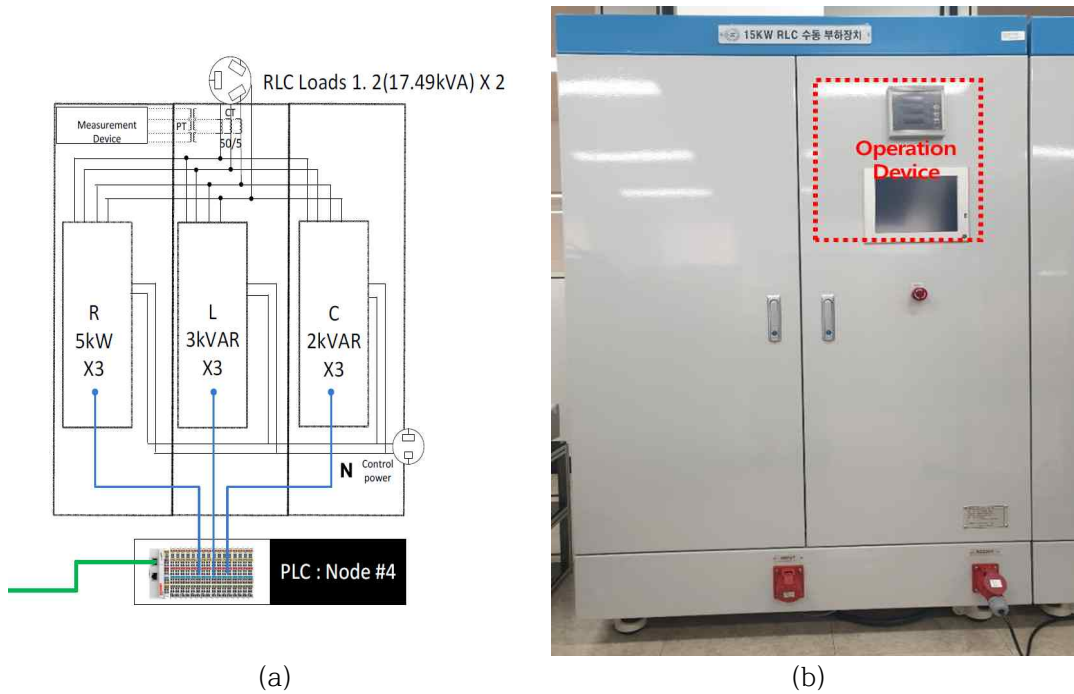


Fig. 6.8 Real configuration of the artificial load,
 (a) architecture of load, (b) artificial load simulator

6.1.2 저압 배전계통 전용 모의 태양광전원 장치 모듈

태양광전원 장치 모듈은 DC Amplifier와 태양광전용 인버터로 구성된다. 상기 모듈은 Fig. 6.9와 같이 성능 환경변수인 일사량 $I_r(k)$ 와 온도 $T_e(k)$ 의 값에 따라 변동되는 전압, 전류의 특성을 고려하여 DC Amplifier의 출력을 제어할 수 있도록 구성된다. 또한, 태양광전원 장치 모듈의 연산장치내의 주요 기능을 담당하는 블록과 이에 연계된 장치의 특성이 고려되어 T_1 (초기상태), T_2 (환경데이터) 그리고 T_3 (태양광 운영패턴)의 주기로 운영되도록 Multi-rate system으로 구성된다.

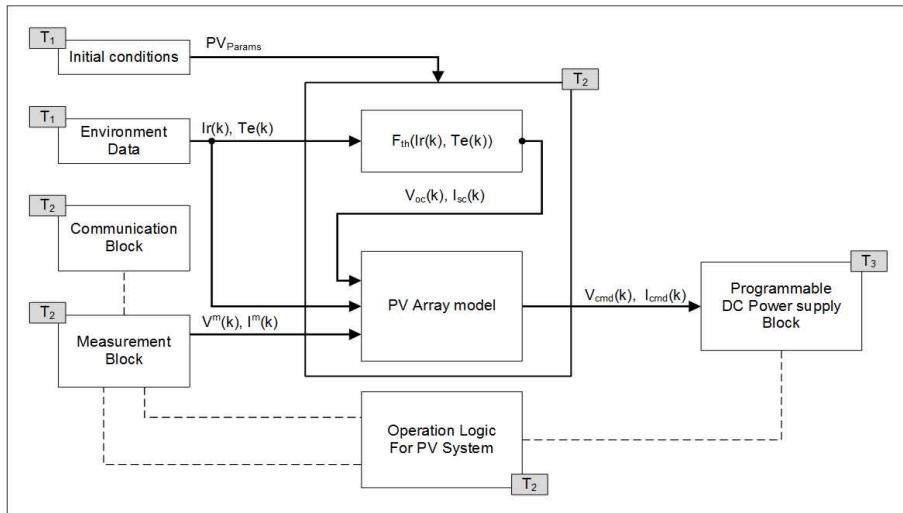


Fig. 6.9 Operation of PV system

상기에서 언급한 운영방식에 의하여 DC Amplifier와 태양광전원 전용 인버터시험설비로 구성된 저압 배전계통 전용 모의 태양광전원 장치 모듈은 Fig. 6.10과 같다.

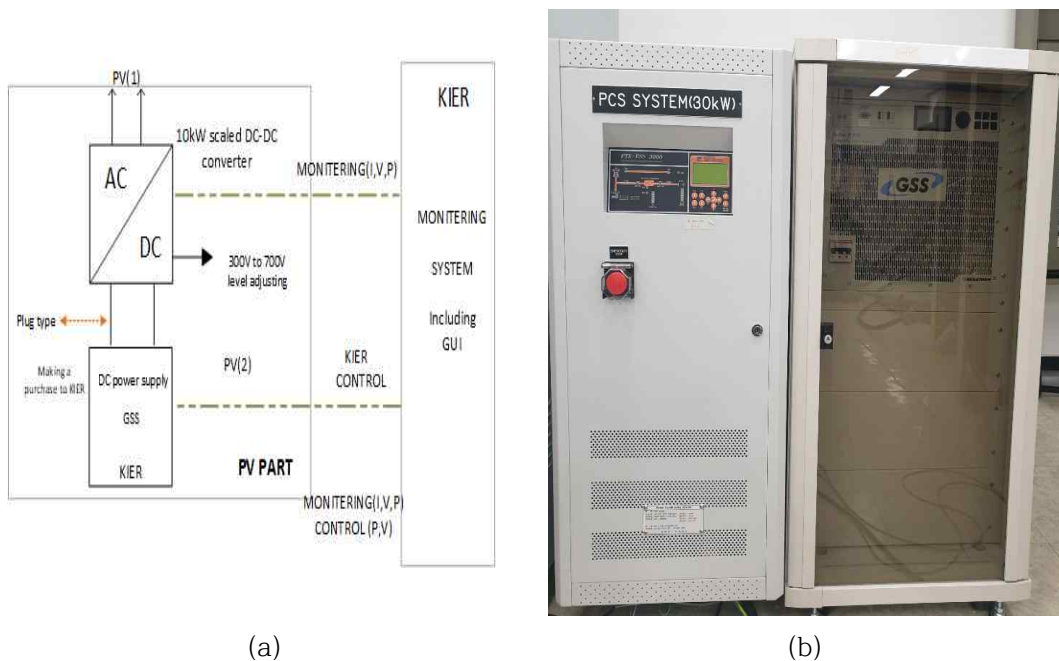


Fig. 6.10 Real configuration of artificial PV system,
(a) architecture of PV system, (b) PV simulator

6.1.3 저압 배전계통 전용모의 ESS 장치 모듈

수용성 향상을 위한 배전용 ESS의 제어 알고리즘 검증을 위하여, 저압 배전계통 시험설비에 적용되는 ESS는 유효전력(P)을 조절할 수 있는 30kW PCS(Power Conditioning System)와 30kWh 리튬이온 배터리로 구성된다. 여기서 PCS와 배터리는 실제 현장에서 ESS를 운용하기 위하여 사용하는 상용제품을 사용하였으며, 각각의 사양은 Table 6.4 및 Table 6.5와 같다.

Table 6.4 Specification of 30kW PCS

구분	사양
정격출력(kW)	30
효율(AC/DC or DC/AC)	단방향 효율 94% 이상
역률	0.95 이상
출력전류 THD	3% 이하
상시 전압변동률	3% 이하
순시 전압변동률	3% 이하

Table 6.5 Specification of 30kWh battery rack

구분	사양
정격용량(kWh)	30
출력	660V, +/-66A 1ch
입력	3상4선식, 380V, 60Hz
정밀도	< $\pm 0.1\%$ 이하
통신	RS232 & USB Interface

본 시험설비에 적용된 저압 배전계통에서 EV 및 태양광전원의 수용성 향상을 위한 ESS의 구성도와 실제 장치 모듈은 Fig. 6.11과 같다.

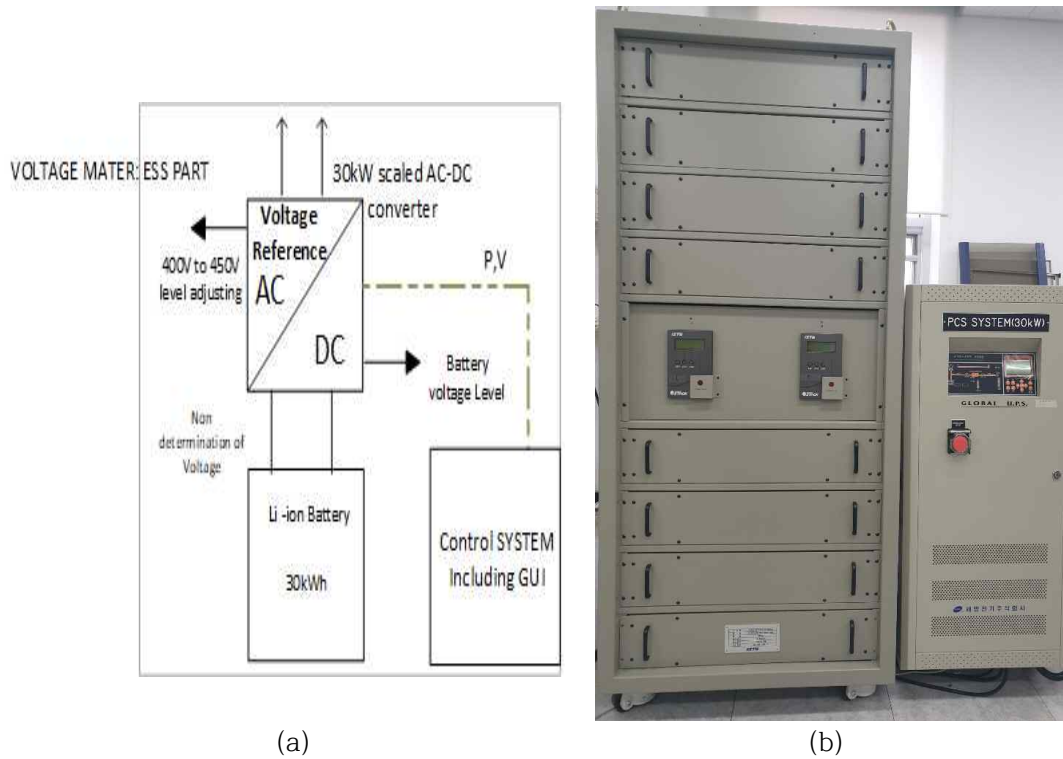


Fig. 6.11 Real configuration of artificial ESS system, (a) architecture of ESS, (b) real ESS

6.1.4 저압 배전계통 전용 측정 장치

ESS의 운영을 통한 EV 및 태양광전원의 수용성을 검증하기 위하여 실시간 데이터의 정확한 모니터링 및 분석이 가능한 저압 배전계통 전용 측정 장치는 시험 시 전압, 전류, 위상 등을 측정하고, 데이터를 실시간으로 저장하여 시험특성을 정확히 분석할 수 있다. 그리고 본 장치는 이동형 형태로 Fig. 6.12와 같이 2대를 제작하였으며, 분석 프로그램은 Fig. 6.13과 같이 구성되어 시험분석을 정확히 수행할 수 있도록 한다.

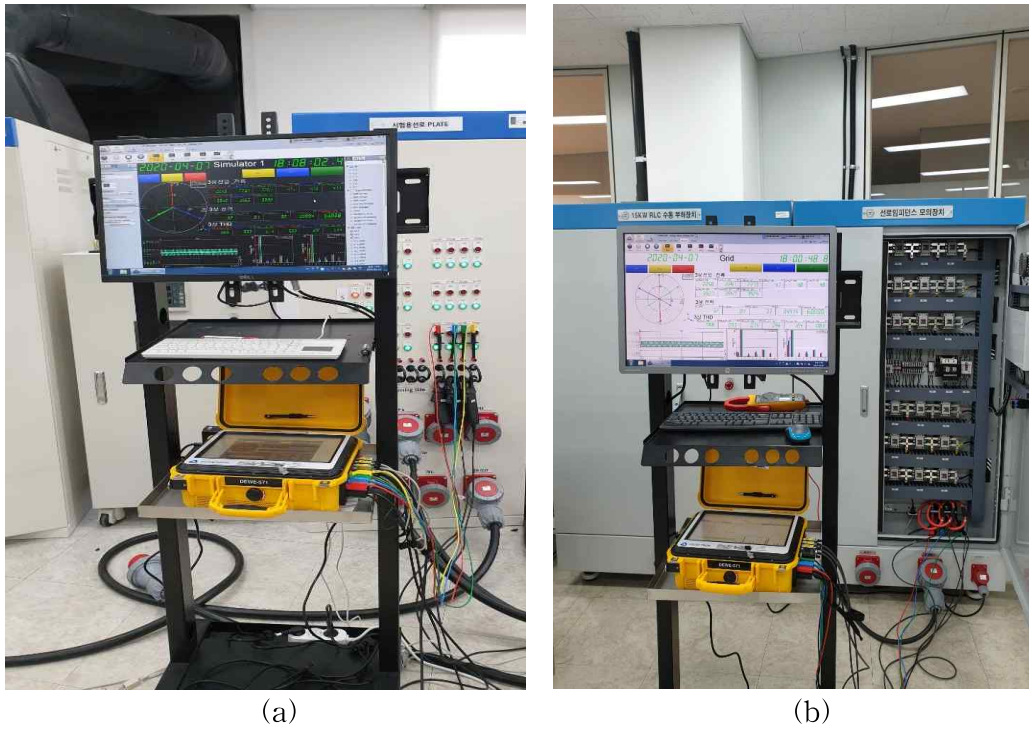


Fig. 6.12 Real configuration of measuring device, (a) measurement on Bus1, (b) measurement on Bus3

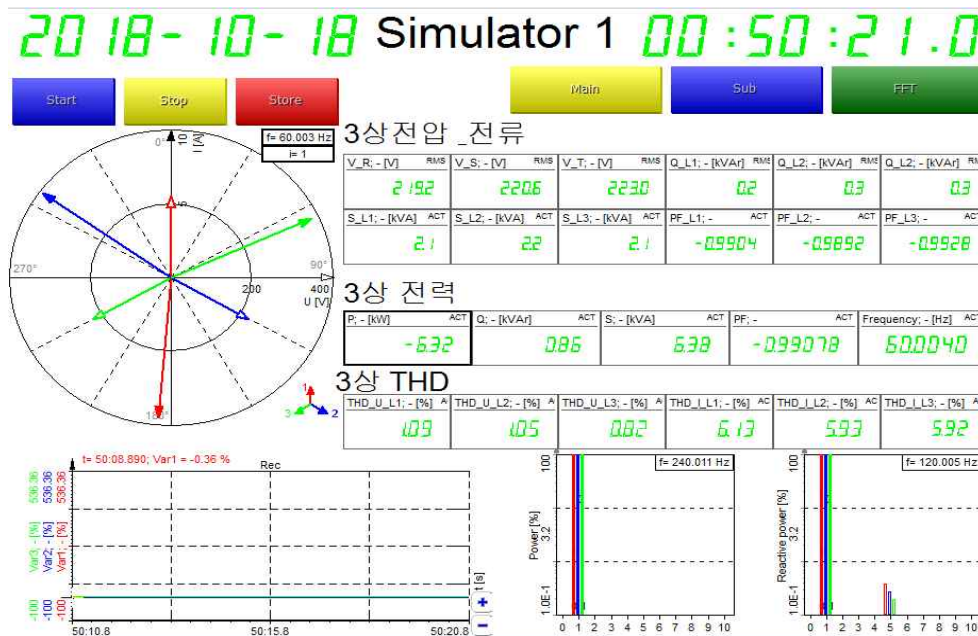


Fig. 6.13 GUI of measurement device

6.1.5 저압 배전계통 시험설비의 제어 및 운영관리 프로그램

저압 배전계통 시험설비의 제어 및 운영관리 프로그램은 Fig. 6.14와 같이 시험평가 시 전력을 계측하고 부하 및 선로 조정 기능을 수동적 혹은 자동적으로 수행하여, 안정적인 시험환경을 제공할 수 있는 GUI(Graphic User Interface)로 구성된다. 구체적으로 본 운영관리 프로그램은 시험 시 각 구간의 전력특성을 모니터링 할 수 있는 기능을 가지고 있으며, 모든 설비에 대해서 실시간으로 제어가 가능하다. 또한 모의 부하 장치 모듈에 대하여 시간마다 소비 전력을 가변할 수 있기 때문에 EV를 포함한 수용가 부하패턴을 모의할 수 있다. 그리고 ESS 모듈에 대해서도 통합 프로그램 내에서 실시간 제어를 통해 충/방전 및 정지가 가능하도록 한다.

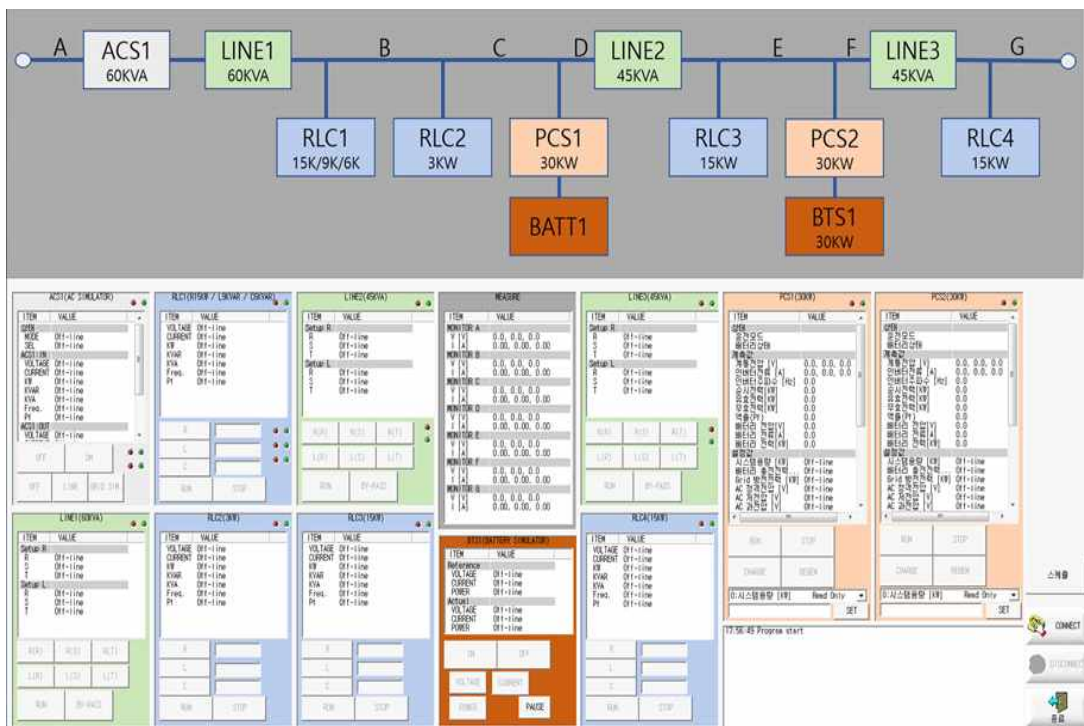


Fig. 6.14 GUI of artificial LVDS simulator

6.2 EV 수용성 향상에 관한 검증시험 및 분석

수용성 향상을 위한 시험모델 계통은 Fig. 6.15와 같다. 여기에서 저압선로는 3개의 구간으로 구성되고 각각의 구간에 계측장치가 포함된 부하 및 태양광전원 장치가 연계된다. ESS의 경우에는 선로 말단에 연계되어 충/방전을 통해 수용성을 검증하며, 측정 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 전용 측정장치를 이용하여 계측한다.

5장의 시뮬레이션 결과는 ESS를 말단에 연계 했을 때 가장 효과가 좋게 나타남을 보여준다. 따라서 본 실험에서도 ESS는 말단에 연계하여 수용성 실험을 진행하며 부하 및 태양광전원은 각 구간별로 동일한 크기를 갖도록 한다.

실험에 앞서 ESS 연계 전 수배전반의 출력전압은 1%의 주상변압기 내부전압강하를 고려하여 228V로 설정한다. ESS를 연계한 후 그리드 시뮬레이터는 수배전반 출력에 연결되며 용량은 15kVA 이상을 부하에 공급할 수 없도록 하고, 선로에 연계된 각각의 부하용량은 수용성 검증을 위해 10kW로 총 부하용량은 전원의 2배인 30kW로 설정한다. 태양광전원의 경우 각각 8kW로 발전하도록 하여 총 발전용량은 24kW로 설정한다. 저압선로는 16SQ를 사용하고 각 구간의 길이는 60m를 설정하여 0.3Ω을 적용한다[28]. 이에 대한 사양은 Table 6.6과 같다.

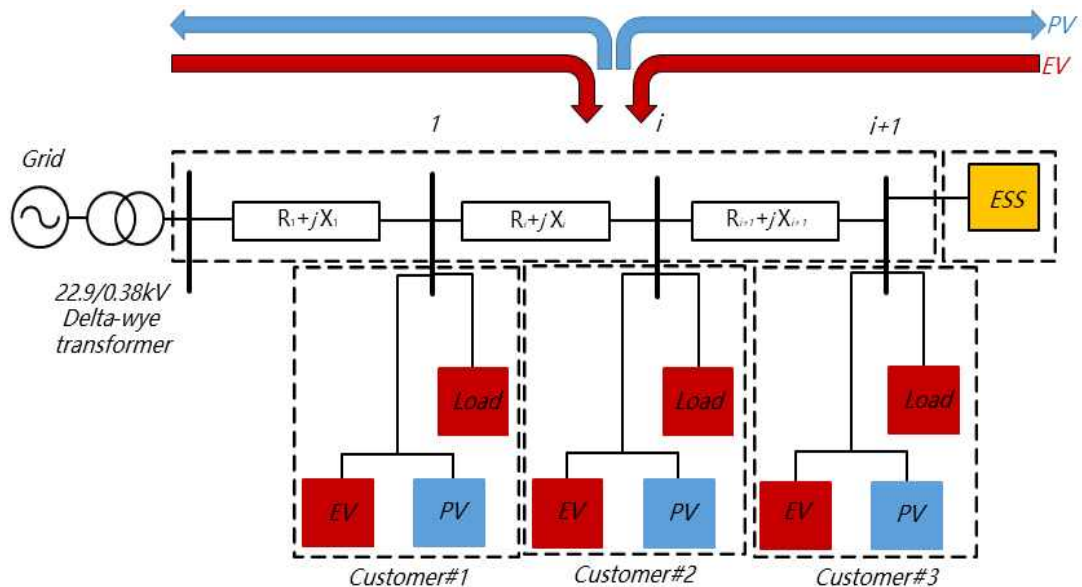


Fig. 6.15 Configuration of the artificial LVDS

Table 6.6 Model parameters of the distribution system

Category	Contents
Grid simulator	15KVA, 228V
PF	1
Line Impedance	OW-16mm ² Z=1.47+j0.092Ω/km
Load simulator (customer. EV)	30kW
PV simulator	24kW
ESS output	15kW

6.2.1 부하 연계 시 ESS 연계 전/후의 선로용량 및 전압 특성

Fig. 6.16에서 파란색 실선은 ESS가 연계되지 않은 상태에서 EV를 포함한 부하를 변압기 용량의 2배로 운용할 경우의 각 버스 전압 특성을 보여준다. Table 6.7은 각 수용가 버스에서 측정된 전압을 보여주며 ESS 연계 전, 부하용량을 변압기 용량의 2배까지 증가시키더라도 Bus1의 전압은 허용치를 만족함을 알 수 있다. 그러나 Bus2의 전압은 203.9V, Bus3의 전압은 198.3V로 측정되어 허용치를 크게 벗어남을 알 수 있다. 또한, 선로용량은 설정값인 15kW 이하를 만족하여야 하나, Table 6.8에서와 같이 Bus1에서 측정된 전력이 29.8kW, Bus2에서 측정된 전력이 20.3kW가 되어 설정값을 크게 벗어남을 알 수 있다. 따라서 부하 용량이 변압기 용량을 초과하여 운용될 경우 전압 및 선로용량이 허용치를 크게 벗어남을 실험을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 6.16의 빨간색 실선은 동일한 조건하에서 저압선로 말단에 ESS를 연계 후 15kW를 방전하였을 경우, 각 버스의 전압을 나타내며, ESS 연계 전 하한치를 벗어났던 전압이 모두 허용치를 만족함을 알 수 있다. 이는 계통 말단에 연계된 ESS의 방전에 의한 역조류가 전압강하분을 상승분으로 바꾸기 때문이며, 모든 버스에서 측정된 전력

또한 설정값인 15kW 이내를 만족함을 Table 6.8을 통해 확인할 수 있다.

따라서 부하 용량이 변압기 용량의 최대 2배에 이를지라도 ESS의 방전운용을 통해 전압을 허용치 이내로 만족시킴과 동시에 선로용량을 변압기의 정격용량 이하로 유지할 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있다.

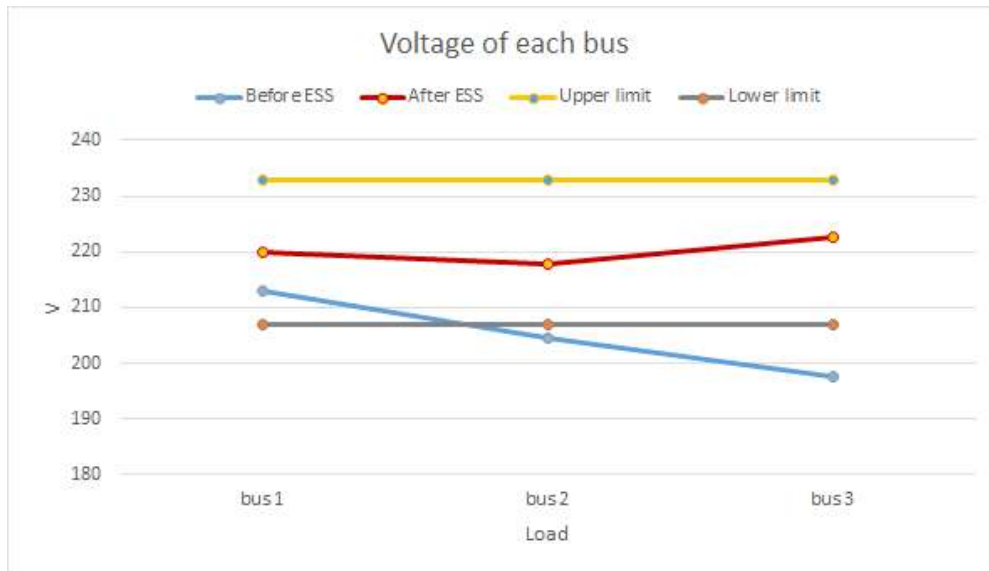


Fig. 6.16 Power characteristics of LVDS with load, (a) before connection of ESS, (b) after connection of ESS

Table 6.7 Measurement voltage of each bus of LVDS when the load is connected

	Before connection of ESS(V)	After connection of ESS(V)
Bus1	212.9	220.0
Bus2	204.5	217.8
Bus3	197.7	222.6

Table 6.8 Measurement power of each bus of LVDS when the load is connected

	Before connection of ESS(kW)	After connection of ESS(kW)
Bus1	29.8	14.9
Bus2	20.3	4.9
Bus3	9.9	5.0

Table 6.9는 부하가 연계된 상태에서 ESS 연계 전/후의 시험장치에 의한 실험과 동일한 조건에서 시뮬레이션에 의해 도출된 전압을 나타낸다. 시뮬레이션의 데이터 유효성은 실제 시험장치를 이용한 실험에 의한 데이터와 비교함으로써 검증될 수 있는데, Table 6.9에서 ESS 연계 전/후의 시뮬레이션 및 시험장치에 의한 전압 데이터의 오차는 1% 미만으로 시험장치를 통한 결과가 시뮬레이션 결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

Table 6.9 Comparison of simulation and hardware test for the EV
(total load: 30kW)

	Simulation		Hardware test	
	Before connection of ESS	After connection of ESS	Before connection of ESS	After connection of ESS
Bus1	213.3	221.1	212.9	220.0
Bus2	203.4	218.5	204.5	217.8
Bus3	198.3	221.1	197.7	222.6

Fig. 6.17 및 Fig. 6.18은 부하의 소비전력이 주상변압기의 2배일 때 전용 측정 장치를 이용하여 ESS 연계 전/후 각 버스에서 측정된 전력 특성결과를 보여준다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6.17 Measurement of power characteristics of LVDS before connection of ESS, (a) Bus1, (b) Bus2, (c) Bus3



(a)



(b)



(c)

Fig. 6.18 Measurement of power characteristics of each bus after connection of ESS, (a) Bus1, (b) Bus2, (c) Bus3

6.2.2 태양광 연계 시 ESS 연계 전/후의 선로용량 및 전압 특성

태양광전원의 경우 부하와는 달리 수용성을 2배가 아닌 1.6배로 하여 실험을 진행한다. 그 이유는 전원전압이 228V로 상한 전압인 233V까지 5V정도의 여유밖에 없기 때문이다.

태양광전원은 DC power supply와 PCS로 구성되는데 PCS 제품 특성상 역조류에 의한 PCS 전압이 241V를 넘어가게 되면, PCS 자체 설정에 의해 과전압으로 인식하여 Fig. 6.19와 같이 계통에서 분리된다. 따라서 각 버스에 8kW의 태양광전원을 연계하여 실험할 경우 값을 측정할 수 없기 때문에 ESS 연계 전 태양광전원 연계에 의한 전압 및 전력 특성값은 전력조류계산에 의한 값을 이용하며, ESS 연계 후 태양광전원 연계 전압 및 전력 특성값은 실험을 통해 얻는다.

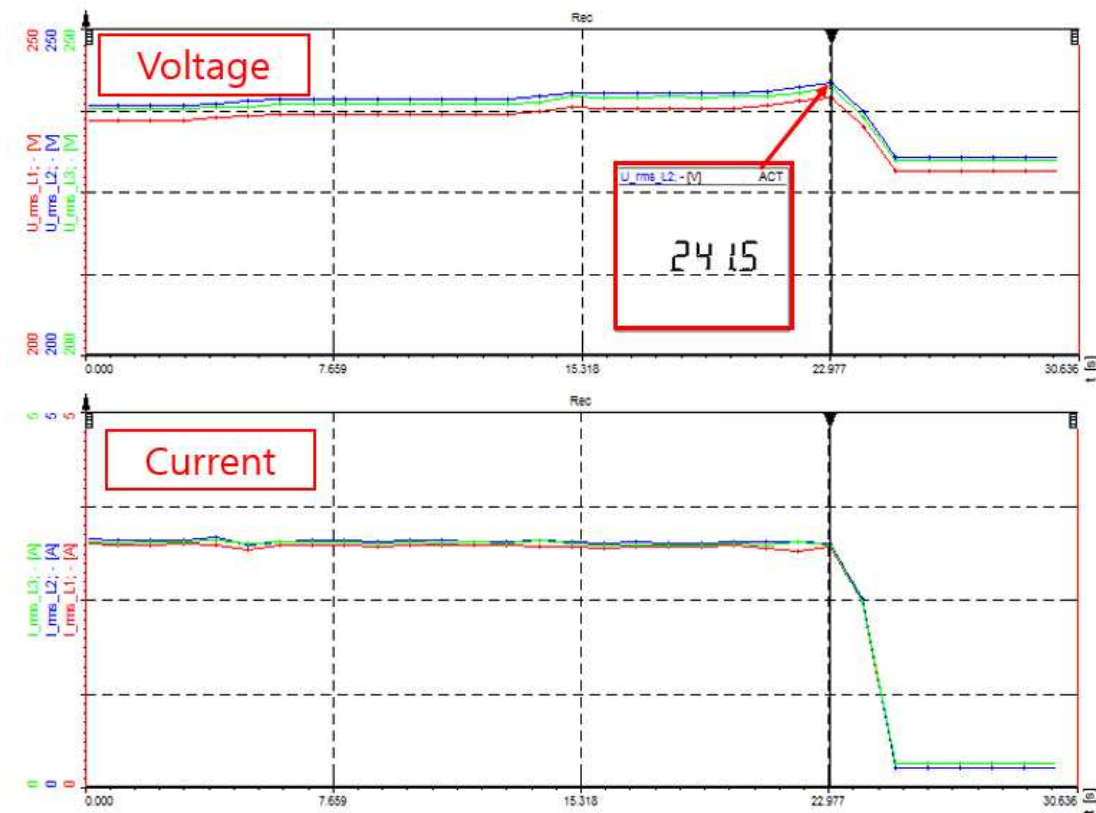


Fig. 6.19 Disconnection of the PCS at the certain voltage

시뮬레이션 및 실험에 의한 결과는 Fig. 6.20과 같다. Fig. 6.20에서 파란색 실선은 ESS가 연계되지 않은 상태에서 태양광전원 용량을 변압기의 1.6배로 운용할 경우의 각 수용가 버스의 전압 특성을 보여준다. Table 6.10은 ESS 연계 전/후의 각 버스에서 측정된 전압을 보여주며 ESS 연계 전 태양광전원 용량이 변압기 용량의 1.6배일 경우 모든 버스의 전압이 상한치를 초과함을 알 수 있다. 또한, 선로용량은 설정값인 15kW 이하를 만족하여야 하나. Table 6.10에서와 같이 Bus1 및 Bus2에서 측정된 전력이 각각 23.4kW, 15.7kW로 설정값인 15kW를 초과함을 알 수 있다. 따라서 태양광전원에 의한 발전 용량이 변압기 용량을 초과하여 운용될 경우 전압 및 선로용량이 허용치를 크게 벗어남을 실험을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 6.20의 빨간색 실선은 위와 동일한 조건하에서 ESS를 선로 말단에 연계한 후 충전 운용에 의한 실험을 수행했을 경우의 각 버스 전압을 보여주며 ESS 연계 전 상한치를 벗어났던 전압이 모두 허용치 이내로 들어옴을 알 수 있다. 이는 태양광전원으로 인한 전압상승분을 계통 말단에 연계된 ESS의 충전 운용을 통해 상쇄시키기 때문이며, 이때 Table 6.11과 같이 각 버스에서 측정된 전력을 살펴보면 모든 버스에서 측정된 전력이 설정값인 15kW 이내를 만족함을 확인할 수 있다.

따라서 태양광전원 용량이 변압기 용량의 최대 1.6배에 이를지라도 ESS의 충전운용을 통해 전압을 허용치 이내로 만족시킴과 동시에 선로용량을 변압기의 정격용량 이하로 유지할 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있다.

Table 6.10 Measurement voltage of each bus of LVDS when the PV system is connected

	Before connection of ESS(V)	After connection of ESS(V)
Bus1	238.2	230.4
Bus2	242.9	231.0
Bus3	246.5	228.2

Table 6.11 Measurement power of each bus of LVDS when the PV system is connected

	Before connection of ESS(kW)	After connection of ESS(kW)
Bus1	23.4	8.8
Bus2	15.7	9.1
Bus3	7.9	7.1

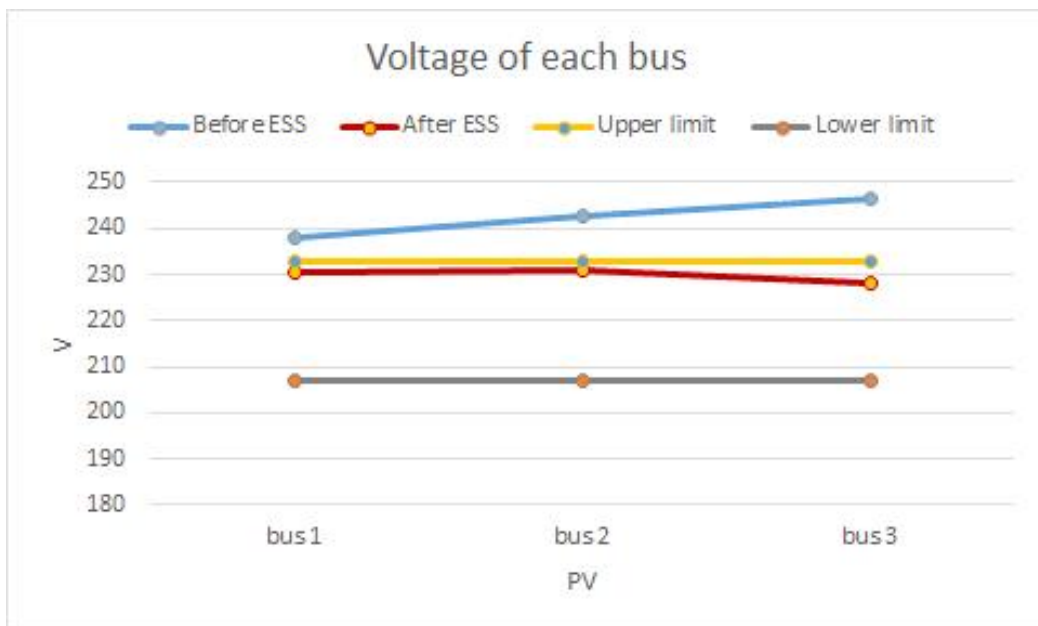


Fig. 6.20 Power characteristics of LVDS with PV system, (a) before connection of ESS, (b) after connection of ESS

Table 6.12는 태양광전원이 연계된 상태에서 ESS 연계 전/후의 시험장치에 의한 실험과 동일한 조건에서 시뮬레이션에 의해 도출된 전압 데이터를 보여준다. ESS 연계 전 태양광전원의 역조류로 인한 과전압 현상은 ESS 연계 후 모두 허용치 이내로 유지되며, 시뮬레이션 및 시험장치에 의한 데이터의 오차는 1% 미만으로 시험장치와 시뮬레이션에 의한 결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

Table 6.12 Comparison of simulation and hardware test for the PV system
(total PV system: 30kW)

	Simulation		Hardware test	
	Before connection of ESS	After connection of ESS	Before connection of ESS	After connection of ESS
Bus1	238.2	231.8	238.2	230.4
Bus2	242.9	232.2	242.9	231.0
Bus3	246.5	229.1	246.5	228.2

Fig. 6.21은 태양광전원의 발전전력이 주상변압기 용량의 1.6배일 때 전용 측정 장치를 이용하여 ESS 연계 전/후 각 버스에서 측정된 전력 특성결과를 보여준다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6.21 Measurement of power characteristics of each bus after connection of ESS, (a) Bus1, (b) Bus2, (c) Bus3

7. 결 론

본 논문에서는 저압 배전계통에서 주상변압기와 ESS의 양방향 전력공급 방식에 의한 협조운영을 통해 EV의 수용성을 극대화하고, 태양광전원의 역조류로 발생하는 과전압 현상을 해결하기 위한 방안을 제시하였다. 이를 위해 배전용 ESS의 제어 알고리즘을 제시하여 다수의 EV 및 태양광전원이 연계된 저압 배전계통에서 모든 버스의 전압 및 선로용량을 허용범위 이내로 유지시키면서 기설계통의 설비를 교체하지 않고 EV의 연계용량을 주상변압기 용량의 최대 2배까지 증가시키고, 태양광전원에 의한 과전압 문제를 해결 할 수 있음을 시뮬레이션 및 하드웨어 실험을 통해 확인하였다. 이에 대한 결과는 다음과 같다.

(1) 저압 배전계통에서 EV의 충전량 및 부하량이 많을 경우, ESS의 방전을 통해서 EV가 연계된 각 버스의 선로용량 및 전압을 허용치 이내로 유지시키고, 태양광전원의 발전량이 많은 경우에는 ESS의 충전 운용을 통해 전압을 허용치 이내로 유지시키기 위한 배전용 ESS의 제어 알고리즘을 제시하였다.

(2) ESS를 선로말단에 연계 후 시뮬레이션 결과를 통해 EV 및 수용가의 소비 전력이 주상변압기 용량을 초과할 경우, 제어 알고리즘에 의한 ESS의 방전을 통해 양방향으로 전력을 공급함으로써 주상변압기 용량의 1.9배까지 수용성 향상이 가능함을 확인하였다.

(3) 태양광전원의 역조류로 인해 발생하는 과전압 현상을 제어 알고리즘에 의한 ESS의 충전운용을 통해 해결할 수 있음을 확인하였다.

(4) ESS의 연계 위치를 변경하여 주상변압기 직하에 연계할 경우, ESS는 주상변압기와 동일한 방향으로만 충/방전하기 때문에 EV의 수용성 향상 효과 및 태양광전원의 과전압 문제를 해결할 수 없음을 확인하였다.

(5) ESS의 연계 위치를 선로 중간에 ESS를 연계할 경우 EV 및 부하의 소비전력에 수용성은 ESS를 말단에 연계하였을 경우와 동일하였으나, 태양광전원의 경우, 각 버스 전압이 허용치를 초과함을 확인하여, 선로말단에 ESS를 연계하였을 경우의 효과가 가장 좋음을 확인하였다.

(6) EV 및 태양광전원의 분포에 따른 시뮬레이션을 수행한 결과, EV의 수용성 및 태양광전원의 과전압 문제를 해결하기 위한 ESS의 충전 및 방전 출력범위는 각 Case에 따라 다르게 설정해야 함을 확인하여 ESS의 구성요소 중 PCS의 출력용량 산정 시 분포도를 고려해야 함을 확인하였다.

(7) 저압 배전계통의 전압을 제어하기 위해 EV의 소비전력, 태양광전원의 발전전력 및 선로 임피던스의 특성을 반영하여 ESS의 유효전력에 의한 전압제어 방안을 제안하였으며, 시뮬레이션 결과를 통해 효과를 입증하였다.

(8) 복합 모의배전계통을 구성하여 수용성을 시험장치로 검증한 결과 EV를 포함한 부하의 경우 주상변압기 용량의 2배까지 연계가 가능하고 태양광전원은 1.6배까지 연계될 수 있음을 확인하였다.

(9) 저압 배전계통에서 수용가의 전력소비 패턴과 태양광전원의 발전패턴은 다르기 때문에 ESS를 활용하여 태양광전원으로 생산된 전력을 EV의 충전에 활용함으로써, 친환경적인 EV의 사용이 가능함을 확인하였다.

EV의 수용성 향상을 위해 본 연구가 활용될 경우 대규모 발전소와 송전선을 기반으로 하는 중앙집중형 전력공급시스템에 대한 의존도를 줄임과 동시에 신규 설비 투자를 지연시켜 경제적, 사회적, 기술적 부담을 줄일 수 있다. 이를 통해 각 가정에서 EV를 충전할 경우에는 저압 배전계통의 선로 추가 증설 없이 효과적으로 활용될 수 있으며, 부가적으로 계통에 사고 발생 시 선로 말단에 연계된 ESS의 독립적인 운영을 통해 사고 복구 동안 수용가에 효과적인 전력공급이 가능하리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 산업통상자원부, *제 3차 에너지기본계획*, 2019.
- [2] M.S. Park, M. Barrett and T.G. Cassarino, “Assessment of future renewable energy scenarios in South Korea based on costs, emissions and weather-driven hourly simulation,” *Renewable Energy*, vol. 143, pp. 1388-1396, 2019.
- [3] Y.C. Park, D.S. Kim, J.C. Huh and Y.G. Kim, “New and renewable energy policies of Jeju Island in Korea,” in *Proceedings of the World Renewable Energy Congress-Sweden*, Linköping; Sweden, pp. 2466-2453, May 2011.
- [4] 제주특별자치도, *카본프리 아일랜드 제주 2030 수정 보완 계획*, 2019.
- [5] 산업통상자원부, *제 8차 전력수급기본계획*, 2017.
- [6] Y.H. Kim, J.W. Lim, G.Y. Park and O.T. Lim, “Electric vehicle market and battery related technology research trends”, *Transactions of Korean Hydrogen and New Energy Society*, vol. 30, pp. 362-368, August 2019.
- [7] I.W. Lee, H.G. Seo, S.J. Jang, C.H. Cho and Y.H. Chung, “Analysis of renewable energy generation costs and economic ripple effect according to the 8th basic plan for long-term electricity supply and demand,” *Reviews of Accounting and Policy Studies*, vol. 24, pp. 191-212, 2019.
- [8] 박성준, 박성미, 이정환, “ESS 활용과 관련 PCS 기술현황,” *대한전기학회 전기의세계*, 제66권, 제1호, pp. 12-18, 2017.
- [9] S.K. Han and E.J. Kim, “A study on the impact analysis of power demand for ESS and smartgrid,” *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 68, no. 2, pp. 100-105, 2019.
- [10] Y.H. Cho, S.Y. Baek, W.Y. Choi and D.Y. Jeong, “A development of VPP platform for the efficient utilization of distributed renewable energy resources,” *Journal of Information Systems*, vol. 27, pp. 95-114, 2018.

- [11] S. Lavrijssen, M. Anna and T. Ana, “The changing world of the DSO in a smart energy system environment: Key issues and policy recommendations,” *TILEC Discussion paper*, no. 2018-015. Nederland, pp. 1 - 98, December 2016.
- [12] H. Behzad, S. Majid and T. Payam, “Stochastic-based optimal charging strategy for plug-in electric vehicles aggregator under incentive and regulatory policies of DSO,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 4, pp. 3234-3245, 2019.
- [13] R. Hemmati and H. Saboori, “Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications—A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 11-23, 2016.
- [14] Z. Matiha, S. Pavlos, D.H. Niko, C. Tomislav and S. Davor, “Review of energy storage allocation in power distribution networks: Applications, methods and future research,” *IET Generation Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 3, pp. 645 - 652, 2016.
- [15] Y.S. Ko, “A study on the application cases analysis of ESS(Energy Storage System) to electric power system,” *Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 1, pp. 53-58, 2016.
- [16] J.W. Shim, Y. Cho, S. Kim, S.W. Min and K. Hur, “Synergistic control of SMES and battery energy storage for enabling dispatchability of renewable energy sources,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, no. 3, pp. 5701205 - 5701205, 2013.
- [17] Y. Wang, K.T. Tan, X.Y. Peng and P.L So, “Coordinated control of distributed energy-storage systems for voltage regulation in distribution networks,” *IEEE Transactions on Power Delivery*. vol. 31, no. 3, pp. 1132 - 1141, 2016.
- [18] F. Marra, G. Yang, C. Træholt, J. Østergaard and E.A. Larsen, “Decentralized storage strategy for residential feeders with

- photovoltaics,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 974 - 981, 2014.
- [19] O. Erdinc, A. Tascikaraoglu, N.G. Paterakis, I. Dursun, M.C. Sinim and J.P.S. Catalão, “Optimal sizing and siting of distributed generation and EV charging stations in distribution systems,” in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Torino, Italy, 26 - 29, pp. 1-6, September 2017.
- [20] K. Chaudhari, A. Ukil, K.N. Kumar, U. Manandhar and S.K. Kollimalla, “Hybrid optimization for economic deployment of ESS in PV-integrated EV charging stations,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 1, pp. 106-116. 2018.
- [21] 송길영, *최신 송배전공학*, 동일출판사, 2013.
- [22] 이승문, 김기환, 이성재, *전기자동차 충전시스템에서의 신재생에너지 활용 방안 연구*, 에너지경제연구원, 2019.
- [23] C.H. Kim, O.S. Park, B.T. Lee and D.S. Rho, “Optimal algorithms for voltage management in distribution systems interconnected with new dispersed sources,” in *2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, Seoul, Korea, pp. 1-4, 2009.
- [24] D.S. Rho, K.S. Kook and Y.P. Wang, “Optimal algorithms for voltage management in distribution systems interconnected with new dispersed sources,” *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 192-201, 2011.
- [25] D. Rho, H. Kita, J. Hasegawa and K. Nishiya, “A study on the optimal voltage regulation methods in power distribution systems interconnected with dispersed energy storage and generation systems,” *Proceedings 1995 International Conference on Energy Management and Power Delivery EMPD '95*, vol. 2. pp. 702-707, 1995.
- [26] 전력거래소 제주지사, *제주지역 EV 및 풍력설비 확대 정책에 따른 계통 영향 연구*, 2016.

- [27] X. Liang, "Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 2, pp. 855–866, 2017.
- [28] K.S. Ryu, D.J. Kim, Y.H. Yang, H.S. Ko, B.Y. Kim and H.C. Kim, "An Innovative Operation Strategy of ESS for Capacity Expansion of Renewable Energy and Customer Load with Electric Vehicle Chargers in Low Voltage Distribution Systems," *Energies*, vol. 12, pp. 1–22, 2019.
- [30] PSCAD/EMTDC, *Three-Phase Battery Energy Storage System*, Reversion 1; Powered by Manitoba Hydro. International Ltd. Canada, 2019.
- [31] O. Tremblay, L.A. Dessaint and A.I. Dekkiche, "A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles," in *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Arlington, USA, pp. 284 - 289, September 2007.
- [32] D.J. Kim, K.S. Ryu, H.S. Ko and B.Y. Kim, "Optimal operation strategy of ESS for EV charging infrastructure for voltage stabilization in a secondary feeder of a distribution system," *Energies*, vol. 13, pp. 1–23, 2020.
- [33] B.K. Kim, Y.H. Nam, H.S. Ko, C.H. Park, H.C. Kim, K.S. Ryu and D.J. 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.
- [34] M.C. Falvo, U. Grasselli, M.A. Manganelli and Modesto. "Small scale ESS for LV prosumers: An economic feasibility and sensitivity analysis" in *Proceedings of the IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Rome, Italy, pp. 950 - 955, June 2015.
- [35] S.M. Muyeen, M.H. Ali, R. Takahashi, T. Murata and J. Tamura "Wind generator output power smoothing and terminal voltage

- regulation by using STATCOM/ESS,” in *Proceedings of the IEEE Lausanne Power Tech*, Lausanne, Switzerland, pp. 1232 - 1237, July 2007.
- [36] S. Elham and J. Shahram, “Cost reduction and peak shaving through domestic load shifting and DERs,” *Energy*, vol. 124, no. 1, pp. 146 - 159, 2017.
- [37] K. Murari and N. P. Padhy, “A network-topology-based approach for the load-flow solution of AC - DC distribution system with distributed generations,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 3, pp. 1508-1520, 2019.
- [38] F.J. Zimann, A. Batschauer, M. Mezaroba and F. Neves, “Energy storage system control algorithm for voltage regulation with active and reactive power injection in low-voltage distribution network,” *Electric Power Systems Research*, vol. 174, 2019.
- [39] M. Shukla and A. Sekar, “Study of the effect of X/R ratio of lines on voltage stability,” *Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory*, Morgantown, WV, USA, pp. 93-97, 2003.
- [40] 하나금융그룹, *국내 에너지저장장치(ESS) 현황 및 전망*, 2019.
- [41] 권필준, “친환경 가동보용 전원공급 시스템의 운용방안에 관한 연구”, *한국기술교육대학교 석사 학위논문*, 2020.

감사의 글

많은 분들의 도움을 받아 4년 6개월 동안의 박사학위 과정을 무사히 마치게 되었습니다. 그동안 힘들었던 마음도 있었지만, 어렵고 불편한 일들을 기꺼이 같이 견뎌 주신 마음들이 있었기에 이 자리까지 올 수 있지 않았나 생각합니다. 묵묵히 희생주시고 기다려 주신 모든 분들께 이 지면을 빌려 감사의 인사를 드립니다.

30대 후반의 늦은 나이에 학위를 시작한 저에게 따뜻한 격려와 가르침으로 아낌없는 지도를 통해 무사히 학업을 마칠 수 있도록 도와주신 김호찬 교수님께 글로 표현하지 못할 감사의 마음을 드립니다. 그리고 대학원 생활 동안 많은 가르침을 주시고 면밀하게 논문의 심사를 맡아주신 김세호 교수님, 이개명 교수님, 진영규 교수님, 김일환 교수님, 김호민 교수님께 깊이 감사드립니다. 또한 부족한 제자의 학위심사를 위해 먼 길을 마다하지 않고 진심어린 조언 및 지도를 해주신 노대석 교수님께도 깊은 감사의 마음을 드립니다.

서로 기댈 수 있는 존재가 되었던 친구 병기와 재범이 그리고 학위에 많은 도움을 주신 김대진 선임님과 양현이에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 인생의 선배로서 소중한 조언을 아끼지 않으셨던 우리 전력시스템연구팀의 고희상 박사님, 김찬수 박사님, 박철호 박사님께도 깊이 감사드립니다.

오랜 시간동안 묵묵히 뒷바라지 해주시고 응원해주신 아버지, 어머니, 형, 큰 누나, 작은 누나 내외 및 장인어른, 장모님을 비롯한 처가 식구들에게 감사의 말을 전합니다. 그리고 박사학위는 저 혼자 노력으로 받는 것이 아니라 가장 많이 고생하고 헌신해준 저의 아내 오수지와 항상 밝고 씩씩하게 자라준 소중한 우리 주안이, 가은이와 함께 받는 거라 생각하며 사랑한다는 말을 전합니다.

마지막으로 지면으로 언급하지 못했지만, 저를 아끼고 격려해 주셨던 모든 분들께도 진심으로 감사하다는 말씀을 전합니다. 더욱 정진하며 바른 모습으로 한층 성장해 기대에 부응하도록 노력하겠습니다.