



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](#)

2017年 8月
碩士學位論文

2017年

8月 碩士學位論文

태양광 연계형 에너지 저장시스템에 관한 연구

염병옥

태양광 연계형 에너지 저장시스템에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

廉秉玉

태양광 연계형
에너지 저장시스템에 관한 연구

A Study on the Photovoltaics-Connected
Energy Storage System

2017年 8月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

廉秉玉

태양광 연계형
에너지 저장시스템에 관한 연구

指導教授 曹錦培

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2017年 4月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

廉秉玉

廉秉玉의 碩士學位論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 이우선 印

委員 朝鮮大學校 教授 최연옥 印

委員 朝鮮大學校 教授 조금배 印

2017年 5月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

I. 서 론	1
II. 이론적 고찰	2
1. 태양광발전 시스템의 개요	2
2. 에너지 저장시스템	8
3. 에너지 저장시스템의 구성요소	13
III. System 모델링	17
1. 태양광 발전 모델링	17
2. 에너지 저장시스템 모델링	19
IV. 태양광 연계 ESS의 운용	23
1. 태양광 연계 ESS 운용	23
2. 개선된 태양광 연계 ESS 운용	28
V. 결 론	35

참고문헌

List of Tables

Table 1 저장 매커니즘에 의한 ESS 기술의 분류	8
Table 2 ESS 기술의 원리 및 특징	9
Table 3 에너지 저장시스템 기술별 특징	14
Table 4 배터리 종류별 DOD에 따른 사이클	20
Table 5 리튬이온의 수명손실을 고려한 에너지 총 사용량	21
Table 6 우리나라 전력시장의 보조서비스 종류	27
Table 7 6가지 운용 모드의 분류	28
Table 8 시스템 사양	29

List of Figures

Fig. 1 태양전지 발전원리	3
Fig. 2 태양광 어레이의 구성	4
Fig. 3 태양광 발전시스템의 분류	4
Fig. 4 독립형 태양광 발전시스템	5
Fig. 5 계통연계형 태양광 발전시스템	6
Fig. 6 에너지저장의 기본개념	8
Fig. 7 ESS 기술 성숙도 비교	10
Fig. 8 전력저장용 ESS의 용도와 그리드에서의 위치	11
Fig. 9 에너지 저장시스템의 활용분야	12
Fig. 10 에너지 저장시스템의 구성요소	13
Fig. 11 BMS 구성도	14
Fig. 12 IGBT stack 및 PWM 파형	15
Fig. 13 EMS 모니터링 화면	16
Fig. 14 태양광 발전 모델링의 전체 구성도	18
Fig. 15 ESS 모델 구성도	22
Fig. 16 ESS의 운전 모드	23
Fig. 17 전력저장장치를 이용한 출력제어	24
Fig. 18 월평균 일 부하 패턴	25
Fig. 19 연간 부하지속시간	26
Fig. 20 전체 시스템 구성도	29
Fig. 21 운용모드 1	29
Fig. 22 운용모드 2	30
Fig. 23 운용모드 3	30
Fig. 24 운용모드 4	30

Fig. 25 운용모드 5 31
 Fig. 26 운용모드 6 31
 Fig. 27 태양광 인버터 구성 32
 Fig. 28 충·방전 실험 결과 32
 Fig. 29 모드 전환 반복 실험 결과 33
 Fig. 30 Backup 모드 실험 결과 파형 33
 Fig. 31 PV 인버터/충전 효율 34
 Fig. 32 ESS 충·방전 효율 34

ABSTRACT

A Study on the Photovoltaics-Connected Energy Storage System

Beoug-og Youm

Advisor : Prof. Geum-Bae Cho, Ph.D.

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Chosun University

Energy Storage System(ESS) is a technology for storing electrical energy produced from renewable energy sources or new renewable energy sources to use when needed. Generally, it is a system that saves the power generated by a power plant in an ESS device without passing it directly to a home or a factory, and then transfers it to a place and place where power is needed in the future to enhance energy efficiency. These energy storage technologies have recently been actively researched and related to advanced technologies, especially in developed countries, with the expansion of introduction of new and renewable energy, the efficient use of electric energy and the stabilization of power supply system.

For this reason, in this paper, We propose a new operating method for Energy storage system connected photovoltaic system. It was confirmed though normal charge/discharge test. In addition, in the backup mode., it is confirmed, that the power failure is detected and the load voltage operates normally after 16ms.

I. 서 론

에너지 저장 시스템(Energy Storage System, ESS)은 신재생 에너지원 또는 발전 설비로부터 전기 에너지를 생산하고 에너지 저장 매체에 저장해두었다 필요한 시기에 사용하기 위한 기술이다. 일반적으로 에너지 저장시스템은 발전소에서 생산된 전력을 공장이나 가정 등에 바로 전달하지 않고 에너지 저장장치에 저장했다가 추후 전력이 필요한 장소와 때에 전달하여 에너지 효율을 높이는 시스템이다. 이런 에너지 저장 기술에 대한 연구는 최근 신재생 에너지의 도입 확대, 효율적인 전기 에너지의 사용과 안정적인 전력공급 시스템에 대한 관심의 확대와 더불어 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 또한 전기 자동차 기술의 확산과 신재생 에너지의 보급 증가 그리고 화석 에너지의 고갈의 우려에 대한 주요 에너지원 생산 비용의 상승 압력으로 인해 에너지 저장시스템의 시장은 더욱 빠르게 성장할 것으로 전망된다. 특히 미국(2003년), 유럽(2006년), 인도(2012년)에서 일어난 대규모의 블랙아웃과 일본 원전 사고(2011년) 이후 전기에너지의 효율적인 사용과 전력 공급 시스템의 안전성 확보 그리고 신재생 에너지에 대하여 각국 정부의 관심이 크게 높아 졌다. 또한 최근 우리나라에서도 ESS에 대하여 관심이 높아지고 있으며, 특히 국내에서는 2011년 9월 15일에 발생한 블랙아웃 사태 때 비상발전기중 65%가 동작 하지 않았던 것이 밝혀지며 비상시 전력 공급에 대한 능력을 추가 확보하여 전력대란이 발생하였을 때 전력 계통의 정전을 최소화 하며 양수발전으로 대체하여 수급비상시 공급자원으로 활용하기 위하여 정부차원에서는 ESS의 활성화 및 도입에 힘쓰고 있다.

본 논문에서는 태양광발전 시스템과 연계된 에너지 저장시스템을 설계하고 기존의 운영 모드를 개선하기 위한 새로운 ESS 운영모드를 제안하여 연구를 수행하였다. 태양광과 연계된 에너지 저장시스템의 운용 모드는 부하 전력, 태양광 발전량 및 계통 상황에 따라 기존에는 4가지모드로 구분하여 운영된다. 따라서 본 논문에서는 계통 연계 유무, 태양광 발전 유무, 부하량의 대소, 에너지 저장 시스템의 연계 유무에 따른 세부적인 사항을 고려하여 6개의 모드 운영방식을 제안하였으며 에너지 저장 시스템의 충방전 효율, 입력전압이 높을수록 인버터의 효율이 증가됨을 확인 하였다. 향후 정부의 핵심기술 개발 및 에너지 신사업 활성화 전략 이행 계획이 발표됨에 따라 수요관리, 에너지 안보, 기상변화 대응 등 에너지 분야의 주요 현안을 효과적으로 해결하기 위한 방안으로 사료된다.

II. 이론적 고찰

1. 태양광발전 시스템의 개요

국내의 신재생에너지는 「신에너지 및 재생에너지 이용·개발·보급 촉진법」 제2조에 의해 “기존의 화석연료를 변환시켜 이용하거나 햇빛·물·지열·강수·생물유기체 등을 포함하는 재생 가능한 에너지”로 정의되었다. 수소에너지, 석탄액화가스화, 연료전지 등의 3개 분야의 신에너지와 태양광, 태양열, 풍력, 폐기물 에너지, 해양에너지, 지열, 소수력, 바이오패스 등의 8개 분야의 재생에너지로 총 11개의 분야를 신재생에너지로 지정하고 있다. 신재생에너지는 청정에너지로써 다양한 자연에너지의 특성과 이용기술을 활용하여 화석연료를 대체할 수 있으며 기존 에너지 생산시스템보다 CO₂의 방출이 적기 때문에 기후변화에 대응하기 위한 방안으로 많이 적용되고 있다. 본 장에서는 다양한 신재생에너지 중 가장 많이 적용되며 연구에서 실제 복합 적용을 실시한 태양광발전시스템의 개요를 다루고자 한다.

1.1 태양광발전시스템의 정의

태양광 발전시스템(Photovoltaic System)은 태양의 광에너지를 전력 에너지로 변환하여 공급하는 시스템이다. 태양광 발전시스템은 에너지 변환 과정에 화학적, 기계적 작용이 없으므로 시스템의 구조가 단순하고 다른 시스템에 비해 유지보수 및 점검이 용이하고 손쉬운 설치가 가능하다. 또한 시스템의 수명이 20~30년 정도로 길고 안전하며 친환경적인 발전시스템이다. 그러나 기상 조건에 따른 시스템의 발전성능의 차이가 크며 태양전지의 가격이 고가인 단점이 있다. 태양광 발전기술은 태양 빛 에너지를 전력에너지로 변환하는 기술을 말하며, 태양전지를 이용하여 설명할 수 있다. 태양전지는 p형 반도체와 n형 반도체를 접합시켜 금속전극을 앞,뒤 표면에 붙여 제작한다. 그림 1은 태양전지의 발전 원리를 나타낸 것이다. 일반적으로 태양전지는 넓은 면적의 p-n접합 다이오드이며 n형 반도체는 낮은 정공 밀도와 높은 전자 밀도를 갖으며 이로 인하여 (-)전하를 띠는 전자의 재료 안에서의 흐름은 순조롭지만 (+)전하를 띠는 정공의 재료 안에서의 흐름은 매우 어렵게 된다. p형 반도체에서는 n형 반도체와는 반대의 상

황이 나타나며 태양전지에 빛을 조사하면 과잉된 정공과 전자의 쌍이 빛에 의해 생성되고, 정공과 전자는 p-n 접합부에 존재하는 전기장의 영향으로 인해 정공은 n형 반도체에서 p형 반도체로 흐르게 되고, 전자는 p형 반도체에서 n형 반도체로 흐르게 된다. 이로 인하여 도선으로 연결되어있는 외부 회로에서 전기를 발생, 전력에너지를 생산하게 된다. 태양광 발전시스템은 주택의 지붕 등에 설치하여 빛을 받아서 전기의 생산기능을 하는 태양전지 모듈과 그 생산된 전기를 저장하는 기능을 담당하는 배터리, 전기를 직류에서 교류로 변환시키고 이를 전력계통에 연결하는 장치인 인버터, 이들을 접속하는 배선 및 접속함, 그리고 기상상태에 따라 변화하는 발전량의 제어기능을 가진 제어장치들로 구성된다. 태양광 발전시스템은 태양전지 셀을 기본으로 하여 빛에너지를 전기에너지로 변환 시키는 기능을 가진 태양전지를 구성한다. 수십 장의 태양전지 셀을 일정한 프레임에 고정시켜 구성하는 것을 태양전지 모듈, 이것을 조합하여 지상이나 지붕에 설치할 면적을 고려하여 직병렬 연결된 구조를 태양광 어레이라고 한다. 태양광 어레이의 구성은 그림 2와 같다. 인버터는 크게 사고가 발생했을 경우 계통을 보호하는 계통연계 보호 장치와 직류를 교류로 변환하는 인버터 등으로 구성 된다. 인버터는 태양전지 어레이에서 발생된 직류전력을 전력회사에서 공급받는 전력과 동일한 주파수와 전력의 교류전력으로 변환하기 위한 장치이다.

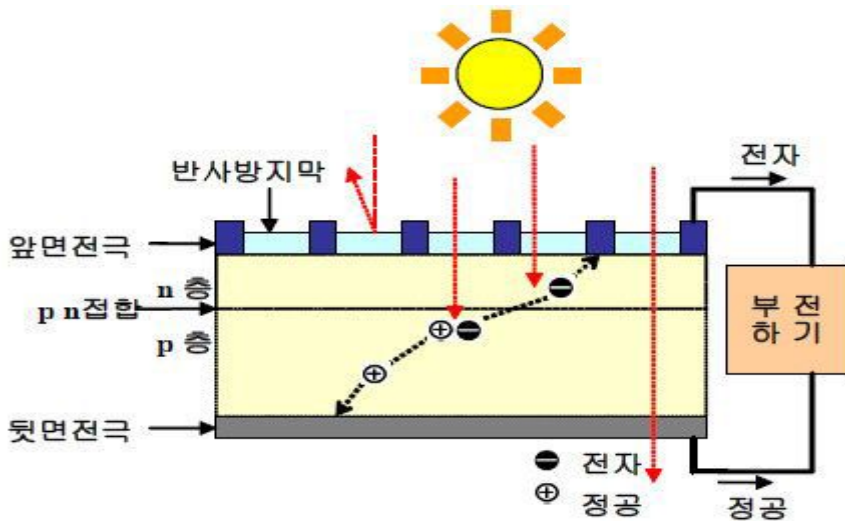


Fig. 1 태양전지 발전원리



Fig. 2 태양광 어레이의 구성

1.2 태양광발전시스템의 종류 및 특성

태양광 발전시스템은 크게 태양전지 모듈, 계통연계장치, 전력 저장장치, 태양광인버터로 구성되며, 부하의 종류 및 시스템의 구성에 따라 계통 연계형 태양광 발전시스템과 독립형 태양광 발전시스템으로 분류할 수 있다. 그림 3은 태양광 발전시스템의 분류를 나타낸다.

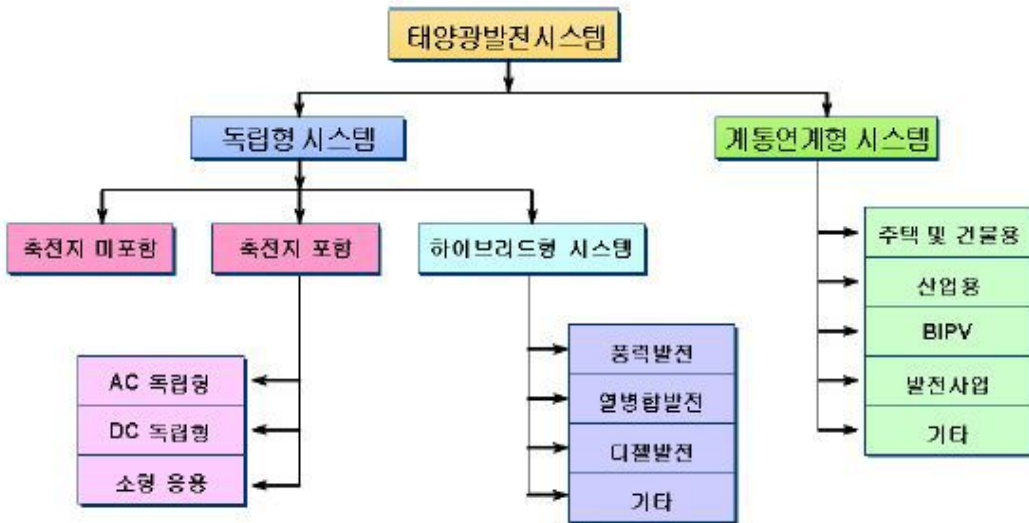


Fig. 3 태양광 발전시스템의 분류

1.2.1 독립형 태양광발전시스템

독립형 태양광 발전시스템은 태양전지, 인버터, 축전지 등으로 구성된 시스템으로써 축전지와 충전장치에 연결시켜 생산된 전력을 저장하고 사용하는 지역 전력 계통과는 완전히 분리된 발전방식이다. 독립형 시스템은 축전지의 유·무 그리고 태양광 이외의 다른 에너지원과도 연계하여 사용할 수 있는 하이브리드 시스템으로 구분할 수 있다. 주로 도서지역의 주택 또는 전기가 들어오지 않는 오지의 전력공급용이나 양수펌프, 통신, 항해 및 제어 보조도구, 안전표지 등 소규모 전력공급용으로 적용된다. 독립형 태양광 발전시스템의 태양광 축전지는 주요 구성요소로 대부분 납축전지가 사용되고 있으며 일반적으로는 수명이 길고, 가격대비 성능이 좋아야 하며 유지 보수가 용이해야 한다. 또한 효율이 높고 방전시간이 낮을수록 좋으며 에너지 밀도가 높고 무게가 가벼우며 운반이 용이한 것이 좋다. 독립형 태양광 발전시스템에서 태양광 축전지는 부하의 용도에 따라 용량 설정이 중요하며 그 외 시스템의 전류 및 전압 특성도 고려해야 한다. 그림 4는 독립형 태양광 발전시스템의 구성도를 나타낸 것이다.

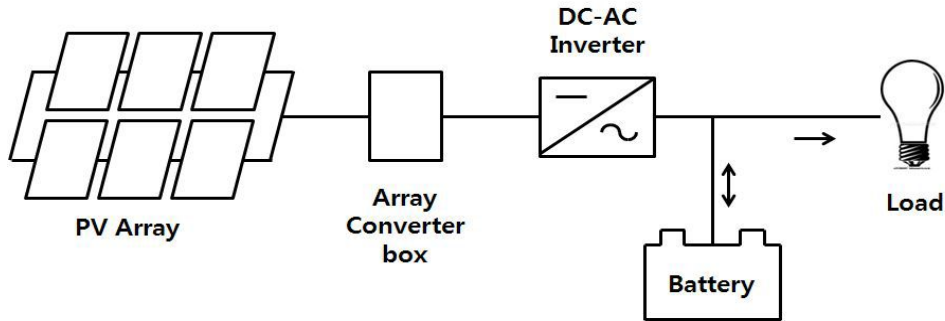


Fig. 4 독립형 태양광 발전시스템

1.2.1 계통연계형 태양광발전시스템

계통연계형 태양광 발전 시스템은 역 송전이 없는 시스템과 있는 시스템으로 나눌 수 있다. 역 송전이 있는 시스템은 태양광 발전 시스템에서 남는 전력이 발생했을 때 전력회사가 이 잉여전력을 매입하는 제도를 이용하는 것이다. 태양광 발전 시스템의 출력은 기상상태에 의해 좌우되므로 기상상태가 일정하지 않은 주택 등에서 안정된 전기를 사용하기 위하여 전력회사의 전력계통과 연계하여 운전할 필요성이 있다. 구내의 부하에 대해 태양광 발전 시스템의 출력이 부족할 경우에는 부족분이 전력회사의 배전

선에서 흘러나오며 반대로 태양광 발전 시스템의 출력 잉여전력이 생기면 전력회사의 배전선으로 역 송전 하여 전력회사가 이를 매입하게 된다. 현재, 주택용으로 사용되는 태양광 발전 시스템 방식은 대부분 역 송전이 있는 시스템이며 또한 국내에서는 적용되고 있지 않지만 정전 시 비상용 조명, 방송설비와 같은 비상용 부하에 전력공급을 하는 축전지를 설치한 시스템도 있다. 역 송전이 없는 시스템의 경우 구내의 전력부하가 항상 태양광 발전 시스템의 출력 보다 크며 역 송전 전력을 발생할 가능성이 없는 경우에 채용된다. 이 시스템에서는 태양광 발전 시스템의 남은 전력을 전력회사의 배전선으로 역 송전 시킬 수 없으므로 역방향 전류가 약간이라도 발생할 경우 운전을 정지하거나 태양광 발전 시스템의 출력을 낮출 수 있는 역 송전 방지 기능이 필요하다. 또한 <분산형 전원 배전계통 연계기술기준>에서 태양광 발전 시스템을 연계하는 전력계통의 전압구분에 따라서 설치하는 보호장치 등의 연계요건을 정하고 있다. 태양광 발전기 용량에 따라 100k초과는 고압연계, 100k 이하는 저압연계 등으로 분류된다. 그림 5는 계통연계형 태양광 발전시스템의 구성도를 나타낸다.

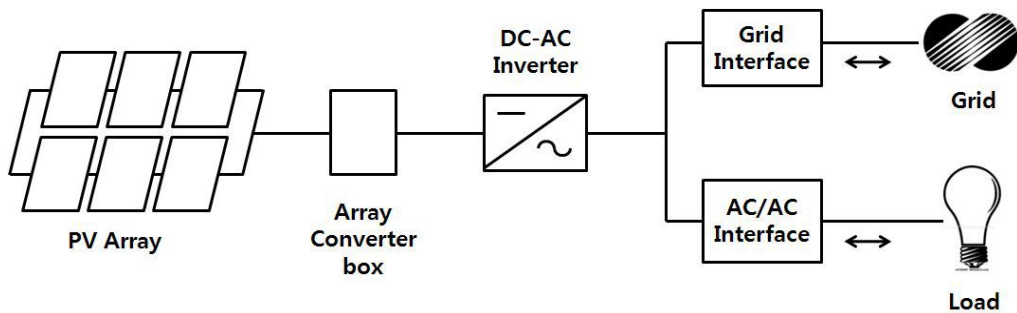


Fig. 5 계통연계형 태양광 발전시스템

2. 에너지 저장시스템

2-1 에너지 저장시스템의 기능

에너지 저장시스템(ESS, Energy Storage System)의 기능은 남은 전력과 에너지를 저장하여 필요할 때 다시 전기 에너지로 변환하여 공급할 수 있게 하는 기능을 의미한다. 에너지 저장시스템을 사용하면 간헐적인 에너지원이나 발전 비용이 낮고 수요가 적은 시점으로부터 전기를 생산하여 다른 발전 방법을 이용할 수 없거나 발전 비용이 높고 수요가 높은 시점에 전기를 사용할 수 있다. 에너지 저장시스템은 에너지 변환 과정을 이용해 잉여 전력 및 에너지를 저장하고 필요할 때 공급하도록 저장해 두는 시스템 혹은 기술로 수송용 차량, 휴대용 장치 그리고 고정 에너지원을 포함하는 다양한 적용 분야가 있다. 만약 에너지 저장시스템의 비용을 획기적으로 저감시킬 수 있다면, 전력 시스템의 운용과 설계측면에서 혁신적인 변화를 가져올 수 있다. 전력 품질 교란 문제를 제거 할 수 있으며 전기 안정성을 개선할 수 있고, 첩두부하 문제를 줄일 수 있다. 실제로 남은 전력을 더욱 효율적으로 관리하게 되면 에너지 저장시스템은 분산된 전력 공급원으로의 기능을 담당할 수 있다. 에너지 저장시스템은 그리드에서 다음과 같은 주요 기능을 수행할 수 있다. 첫 번째, 에너지 저장시스템을 통하여 신재생 에너지의 출력 변동을 조절하고 전력의 품질을 향상시켜 신재생 에너지의 그리드 통합을 용이하게 하며, 신재생 에너지의 소비와 생산의 균형을 맞추어 그리드의 전체 신뢰도를 향상 시킨다. 두 번째, 그리드의 여러 곳에 분산되어 있는 에너지 저장시스템은 에너지 보급률을 증대시켜 공급된 에너지의 품질을 향상시키고 전압과 주파수를 더욱 양호하게 제어한다. 세 번째, 송전 및 발전 시스템의 지원, 특정 가전기기 및 계량기의 소비자 측의 장비, 배전시스템의 여러 지점에 적용할 수 있다. 마지막으로 첩두부하를 저감시킬 Peak shaving이 가능하고 추가적으로 첩두부하 시간 동안에만 운전하는 화력 발전소를 대신하는 역할을 할 수 있으며 그린 하우스 가스(GHG)의 배출을 감소시키고, 발전소의 기능을 영구적으로 더 양호하게 활용할 수 있다. 그림 6은 에너지 저장시스템의 기본 개념을 나타낸다.

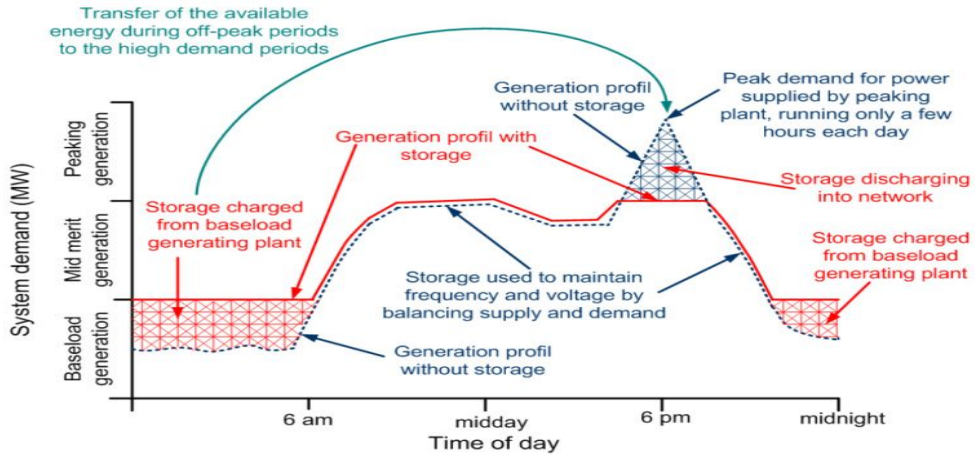


Fig. 6 에너지 저장시스템의 기본개념

2-2 에너지 저장시스템 기술의 종류

에너지의 저장 기술은 여러 가지 종류가 있다. 수 십년 이상 오래된 기술로 배터리와 양수 발전이 있으며 화학, 전자, 재료 그리고 정보 기술의 발전으로 다양하고 새로운 에너지 저장 기술들이 출현했다. 표 1에서와 같이 에너지 저장기술은 화학적, 열 및 기계적 저장을 포함한 다양한 기술 형태를 나타낸다. 에너지 저장기술의 장·단점과 종류별 원리를 정리·비교하면 표 2와 같다.

Table 1 저장 매커니즘에 의한 ESS 기술의 분류

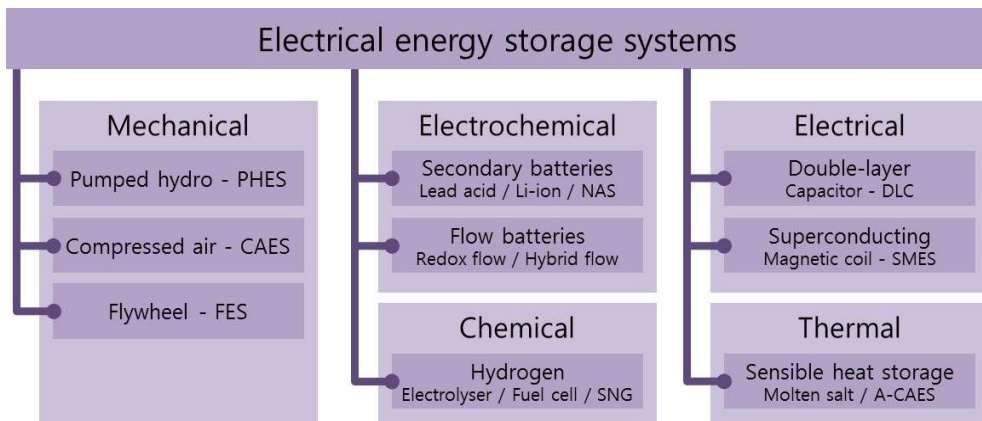
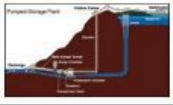
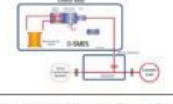








Table 2 ESS 기술의 원리 및 특징

종류	작동 원리 및 특징
 Pumped hydro storage	<ul style="list-style-type: none"> • 원리 : Off-peak load 시, 물은 높은 곳에 저장, Peak load시, 저장된 물을 이용하여 발전 • 장점 : 대용량 저장에 우수, 성숙된 기술로 높은 안전성, 75~80%의 효율 • 단점 : 지리적 제약, 지질에 따른 설계의 어려움, 대규모로 초기 투자비용이 큼
 Superconducting Magnetic Energy Storage	<ul style="list-style-type: none"> • 원리 : 초전도 코일에 직류전류를 흘려 자기에너지 형태로 저장하는 시스템 • 장점 : 높은 변환효율(>95%), 빠른 응답시간, 저에너지 손실 • 단점 : 고비용, 낮은 에너지 밀도
 LIB(리튬이온전지)	<ul style="list-style-type: none"> • 원리 : 리튬이온이 양극과 음극을 오가며 전위차 발생 • 장점 : 높은 에너지 밀도, 높은 에너지 효율, 폭넓은 적용 • 단점 : 안전성·수명 미검증, 높은 비용
 NaS(나트륨 황 전지)	<ul style="list-style-type: none"> • 원리 : 300~350°C의 온도에서 용융상태의 나트륨 이온이 전해질을 이동하면서 전위차 발생 • 장점 : 높은 에너지 밀도, 낮은 비용, 대용량화 용이 • 단점 : 높은 생산비용, 소재부족과 높은 방전율, 300~350°C에서의 운영/유지/안전성, 낮은 에너지 효율
 RFB(레독스 흐름 전지)	<ul style="list-style-type: none"> • 원리 : 전해액 내 이온들의 산화-환원 전위차를 이용하여 전기 에너지를 충·방전 • 장점 : 저비용, 대용량화 용이, 장시간 사용 가능, 과부하에 강하여 전극/전해질 계면반응으로 고출력 가능 • 단점 : 낮은 에너지 밀도, 낮은 에너지 효율
 CAES(압축공기저장시스템)	<ul style="list-style-type: none"> • 원리 : Off-peak load 시, 공기를 동굴이나 지하에 압축, Peak load시, 압축된 공기를 가열하여 터빈을 돌리는 방식 • 장점 : 대규모로 장시간 저장 가능, 가스발전에 비해 약 60% 가스 절감, 정지에서 가동까지 적은 시간 소요, 낮은 발전단가 • 단점 : 초기 구축 비용 과다, 지리적 제약, 화석연료 사용 불가피
 Super Capacitor(슈퍼 캐패시터)	<ul style="list-style-type: none"> • 원리 : 전극과 전해이온사이에 형성된 electric double layer(EDL)로 이루어진 두 직렬 capacitor에 에너지를 저장 • 장점 : 높은 출력밀도, 긴 수명, 높은 효율, 안정성 • 단점 : 낮은 에너지밀도, 높은 비용, 출력시간이 짧고 용량의 한계가 있음
 Flywheel(플라이휠)	<ul style="list-style-type: none"> • 원리 : 전기에너지를 회전하는 운동에너지로 저장했다가 다시 전기에너지로 변환 • 장점 : 높은 에너지효율, 긴 수명, 단위용량당 저비용 • 단점 : 초기 구축비용 과다, 낮은 에너지밀도, 베어링이 미치는 영향이 큼, 투자효율성 검증의 어려움

2-3 에너지 저장장치 기술의 성숙도

Ibrahim and Ilinca는 에너지 저장장치를 구현하는 다양한 기술의 성숙도를 그림 7와 같이 크게 3단계로 구분했다.

(1) Developing 단계: R&D가 활발히 진행되는 단계로써 기술 구현에 대한 가능성 검증은 거쳤으나, 상업화의 가능성에 대한 수준까지는 발전하지 못한 상태로 볼 수 있다. 한편으로는 가까운 미래의 상업화에 대한 잠재력의 가능성을 지닌 상태의 기술로 구성되었다고 생각할 수 있다. 이 단계에는 용융 탄산염연료전지(MCFC)와 같은 초저온에너지 저장(CES), 금속 공기 전지(Metal-air), Fuel cell 등의 기술이 속해 있다.

(2) Developed 단계: 기술적으로 상당 수준 발전되었으며 상업화도 가능할 수 있는 기술의 수준을 보이는 단계로 볼 수 있다. 하지만 실질적으로는 대용량 제품을 구동, 생산하기에는 아직 검증이 필요하다. 시장에서의 기술에 대한 경쟁력과 신뢰성에 대하여 더 많은 검증 단계를 거쳐야 한다. 이 단계에서는 HT-TES, PSB, VRB, CAES, 아연-브롬 레독스 전지(ZnBr), 니켈-카드뮴 전지(NiCd), NaS, Li-ion 등이 있다.

(3) Mature단계: 양수발전(PHS), Lead-acid처럼 개발된지 100년 이상 오래된 기술이 속해 있는 단계이다.

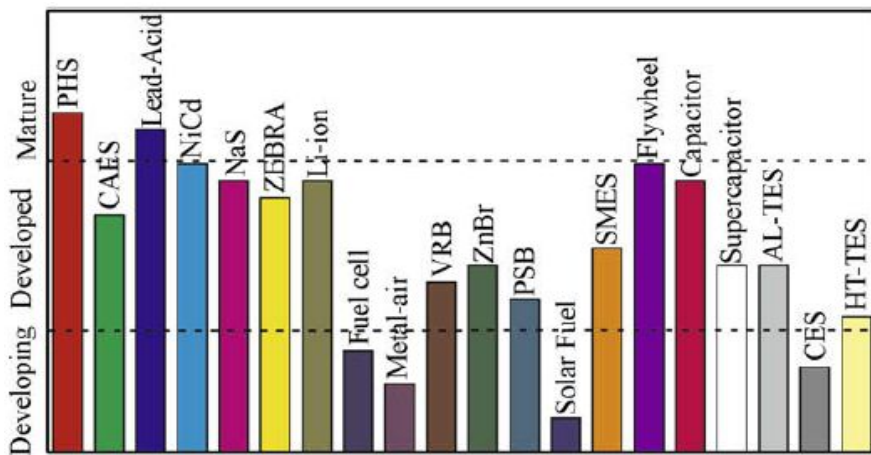


Fig. 7 ESS 기술 성숙도 비교

2-4 에너지 저장장치 기술의 활용분야

에너지 저장시스템은 비상전원공급장치(UPS), T&D Deferral(송배전 투자절감), Peak Shifting, 주파수 조정, 수용가 태양광 발전 시스템 및 재생에너지 연계 등으로 설치 운영된다.

에너지 저장시스템의 발전서비스 이용은 전력시장에서 전력판매 제공을 위하여 사용될 수 있으며 전력계통의 발전기와 연계하여 발전자원으로 활용할 수 있다. 또한 전기를 필요로 할 때 공급할 수 있어 피크전력 조절을 통한 전력계통의 운영효율을 높이는 역할을 한다. 송전망 서비스로는 송배전망에 연계하여 안정적인 운영을 위하여 전력설비의 다양한 역할을 에너지 저장 시스템이 대체하므로 신규 설비투자를 지연시키고 전력계통의 신뢰성 및 안정성을 높일 수 있다. 수용가 측면에서 에너지 저장 시스템을 이용하면 소비성향에 대한 전력 계통의 품질 및 신뢰성 저하 방지 역할을 수행할 수 있다. 특히 주파수를 조정하고, EV 충전과 신재생에너지 발전에 따른 전기의 수요와 공급을 조절하여 전력망의 신뢰도를 향상하는 기능을 수행한다. 그리고 에너지저장시스템을 이용하여 무정전 전원장치로서 상용전원에서 발생할 수 있는 전원 장애를 극복하며 안정적인 전원 공급을 가능하도록 한다. 또한 수용가에서 에너지저장시스템을 설치하여 활용할 경우 사용자의 필요에 따라 자체적인 공급으로 전력사용을 능동적으로 할 수 있으며 전기요금 절감할 수 있다. 그림 8은 그리드에서 전력저장용 ESS의 용도와 그리드에서의 위치를 나타내고 있다.

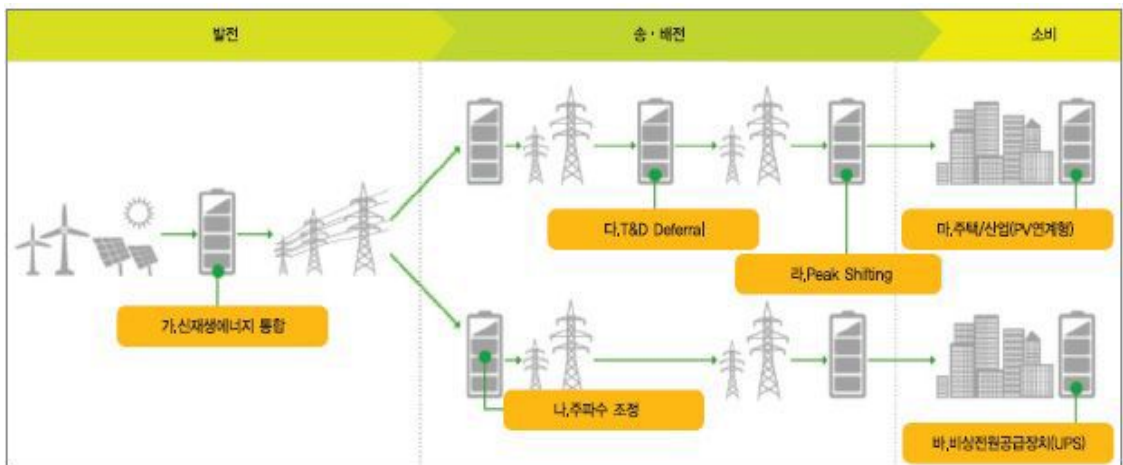
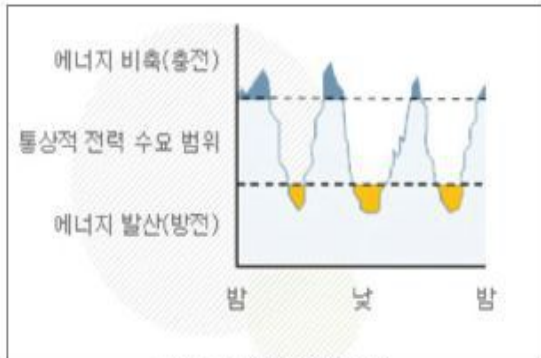
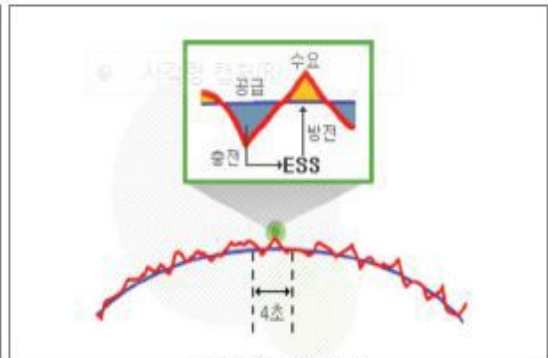


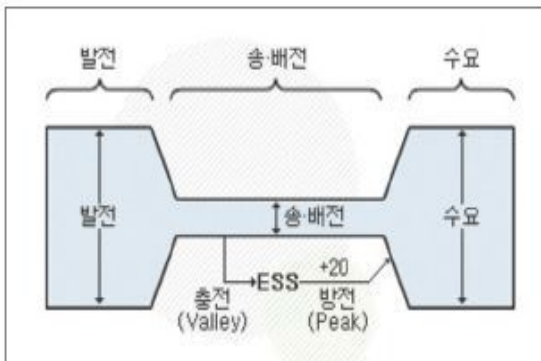
Fig. 8 전력저장용 ESS의 용도와 그리드에서의 위치



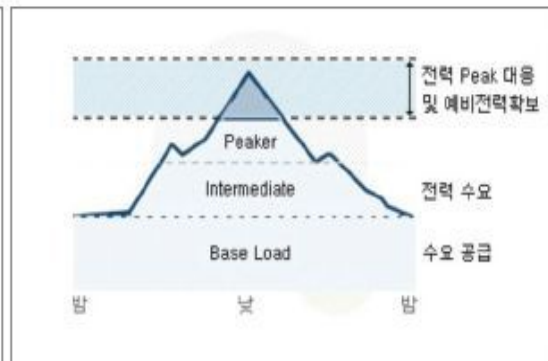
(a) 신재생에너지 통합



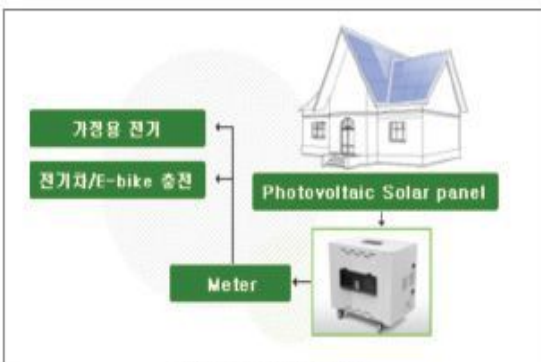
(b) 주파수 조정



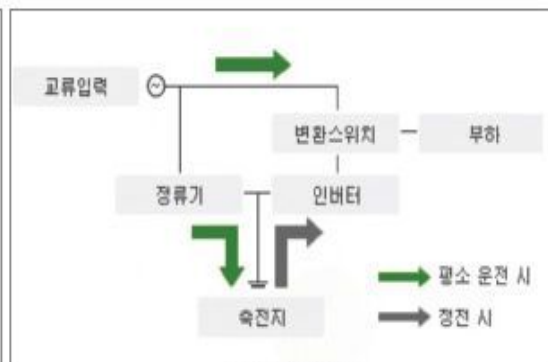
(c) T&D Deferral



(d) Peak Shifting



(e) 주택, 산업용



(f) UPS

Fig. 9 에너지 저장시스템 기술의 활용분야

3. 에너지 저장시스템의 구성요소

에너지저장시스템의 기본 구성은 제어장치, 변환장치, 저장장치로 이루어져 있다. 배터리방식의 에너지저장장치는 배터리의 충·방전 제어 및 상태관리를 위한 배터리 관리 시스템(BMS, Battery Management System)과 배터리 시스템을 기본으로 하고, 추가적으로 생산된 전력의 전압과 주파수를 부하 및 계통의 특성에 맞게 변환하여 관리하기 위한 전력변환장치와 에너지저장시스템을 모니터링하여 제어하기 위한 에너지관리 시스템, 혹은 전력관리시스템으로 구성된다. 그림 10은 에너지 저장시스템의 구성요소를 나타내고 있다.

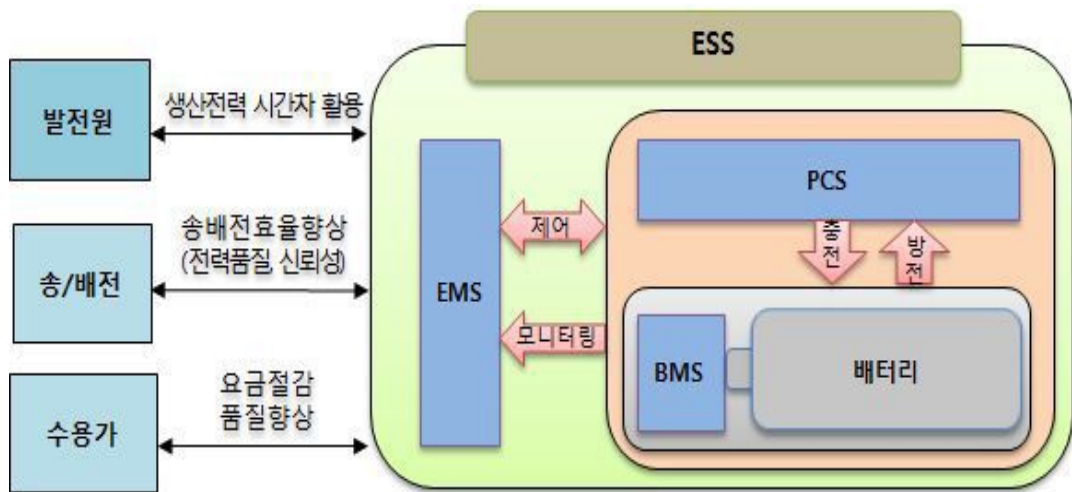


Fig. 10 에너지 저장시스템의 구성요소

에너지 저장 시스템의 핵심장치인 배터리는 PCS를 통하여 전력을 공급 받고 에너지를 저장해 두었다가 필요한 때에 방전하는 역할을 수행한다. 또한 최대의 성능으로 배터리를 사용할 수 있도록 관리 및 제어하는 배터리 관리시스템이 필요하다. 배터리 관리시스템은 배터리의 충전상태에 대한 정보를 제공하여 과방전 및 과충전 방지, 셀보호, 수명 예측 등 효율적으로 배터리를 사용하기 위하여 제어 및 관리 기능을 수행한다. 또한 전력을 실제 사용 가능하도록 하는 특성을 변환시켜주는 전력 변환 장치가 필요하다. PCS는 발전원에서 생산된 전력을 배터리에 저장 또는 방전하여 사용하기 위한 전기의 특성(AC/DC, 주파수, 전압)을 변환하는 시스템이다. EMS는 배터리 상태 및 PCS 상태에 대하여 모니터링과 PCS를 제어하는 역할을 수행한다.

3.1 BMS

배터리 관리 시스템은 에너지 저장 시스템의 주파수, 전압, 역률, 전류 등 모니터링 기능을 수행하고 관리기능으로는 온도, SOH(State Of Health), SOC(State Of Charge) 등이 있으며 배터리의 충·방전 제어기능을 수행한다. 또한 배터리 Cell의 전압 및 온도 상태를 주기적으로 확인 가능하며, 전류제어(과전류, 과전압 감지 후 회로 차단) 및 셀 모듈 발란싱 을 통해 최적화된 안정적인 전력공급을 제공한다. 그림 11은 BMS 구성도를 나타내고 있다. 표3은 에너지 저장시스템의 기술별 특징을 나타내고 있다.

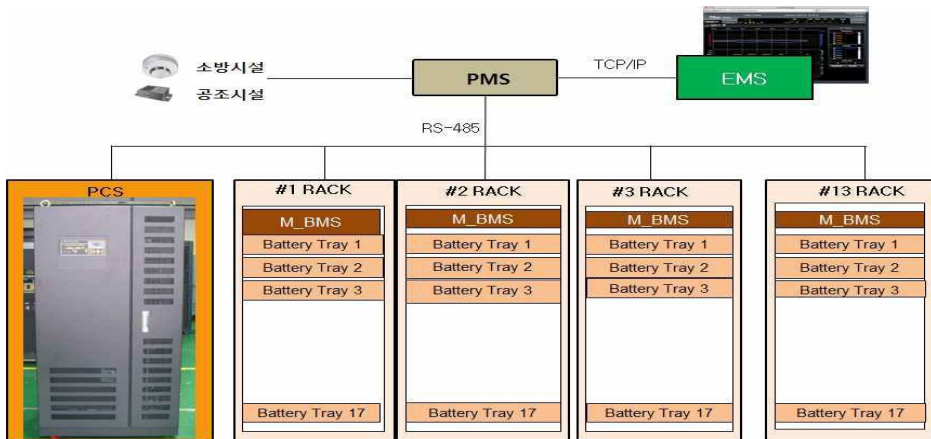


Fig. 11 BMS 구성도

Table 3 에너지 저장시스템 기술별 특징

Function		System BMS	Rank BMS	Module BMS
Measurement	Rack Voltage / Current	-	○	-
	Cell Voltage / Temp	-	-	○
	Module Voltage	-	-	○
Calculation	SOC Estimation	○	○	-
	SOH Estimation	○	○	-
	Power Prediction	○	○	-
	Impedance Calculation	○	○	-
Control	Switching Control	-	○	-
	Cell Balancing	-	○	○
Communication	CAN	○	○	○
	Rs-485 or MODbus-TCP/IP	○	-	-

3.2 PCS

전력변환 장치는 계통의 교류전력을 배터리에 필요한 직류전력으로 변환하고 태양광 및 배터리의 직류전력을 계통의 교류전력으로 변환하는 양방향 변환기이며 에너지저장 시스템에 비상시 강제차단기능, 충·방전 전력 제어기능을 가지고 있다. 또한 에너지관리시스템/배터리관리시스템과 통신 기능 및 전력망과의 계통 연계기능이 있으며 정전시 주파수, 전류, 전압 등 보호기능 및 비상전원 공급기능이 있다. 동작모드를 전력 상황에 따라 설정하여 효율적인 운영이 가능하다. 그림 12는 3상 전력변환장치의 스위칭 소자인 IGBT스택과 PWM 파형을 나타내고 있다.

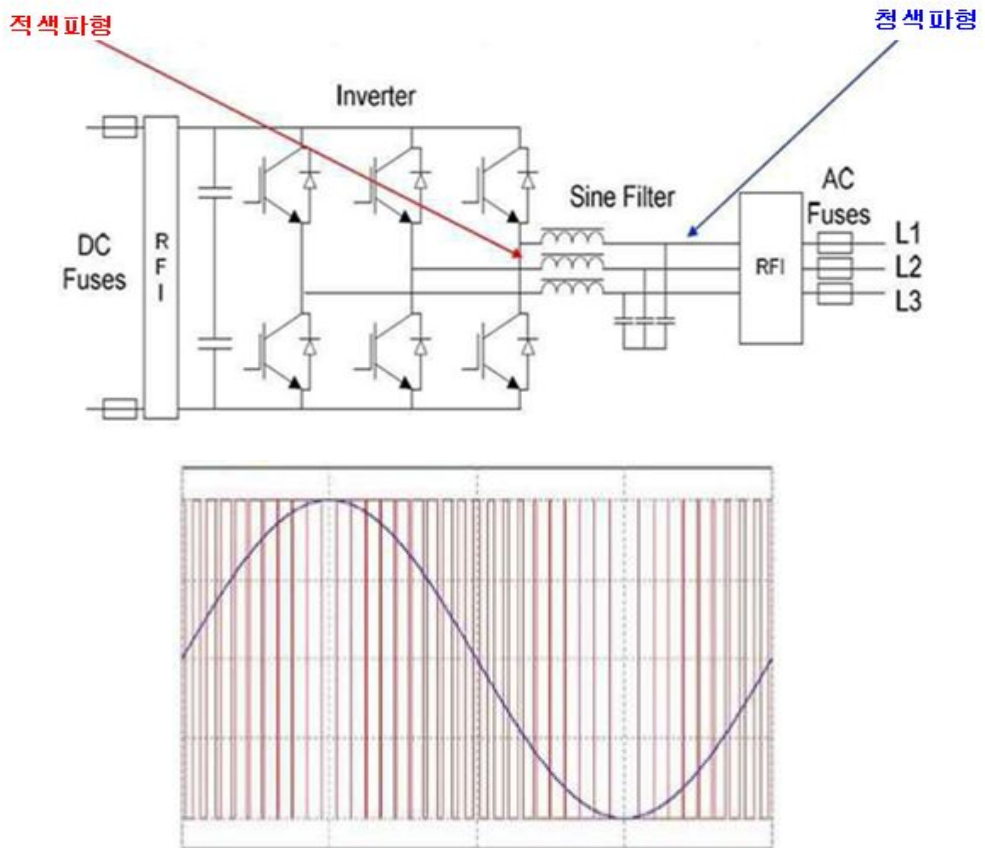


Fig. 12 IGBT stack 및 PWM 파형

3.3 EMS

에너지 관리시스템은 수집된 전력 데이터를 기반으로 하여 에너지 관리 서비스 제공하여 전력변환장치, 배터리 등의 운전 모드 및 운전 상태 감시에 의한 제어시행이 가능하다. 또한 순시전력, 역률, 전류, 전압의 충·방전 상태 확인이 가능하며 시스템 제어 및 운영성과 이력 조회가 가능하다. 그림 13은 에너지 관리 시스템의 모니터링 화면을 나타낸다.



Fig. 13 EMS 모니터링 화면

Ⅲ. System 모델링

1. 태양광 발전 모델링

태양광 발전 전력의 출력을 예측하기 위해서는 태양광 모듈의 효율, 설치면적, 설치 각도, 설치지역 등을 고려해야 한다. 식 (1)은 태양광 모듈의 설치 각도와 태양의 위치의 관계를 이용하여 경사면의 일사량을 나타낸다.

$$I_s = I_{CT} \sin(\alpha - 90) \cos(90 - (\beta + \beta_{PV})) \quad (1)$$

여기서 α 와 β 는 태양의 방위각과 고도, β_{PV} 는 태양광 모듈의 설치 각도를 나타낸다. 태양광 모듈의 용량을 산정하기 위하여 모듈 면적과 광전변환 효율을 적용한 기본적인 태양광 모듈의 용량 산정 식은 다음 식 (2)와 같다.

$$P_{solar} = I_s A \eta_{con} \quad (2)$$

여기서 η_{con} 는 광전변환 효율이고, A는 모듈의 면적으로 기본단위 m^2 로 나타낸다. 태양전지의 모듈의 광전변환 효율 η_{con} 의 식은 다음 식 (3)과 같다.

$$\eta_{con} = \frac{P_{max}}{I_{st} A} \quad (3)$$

여기서 P_{max} 는 표준상태에서의 최대출력, I_{st} 는 표준상태의 일사량($1000 \pm 50 W/m^2$)을 나타낸다. 용량 산정 후에 정확한 출력의 예측을 위하여 변환효율의 영향에 미치는 요소들을 고려해야 한다. 태양광 출력에 영향을 미치는 요소로는 배선, 인버터 효율, 온도, 모듈의 오염도 등이 있으며, 태양광 예측 발전량은 다음 식 (4)와 같다.

$$P_{solar} = I_s A \eta_{con} \eta_{temp} \eta_{inv} \quad (4)$$

여기서 η_{temp} 는 모듈의 온도에 따른 효율 이며 η_{inv} 는 인버터의 효율을 나타낸다.

계절별 온도에 따른 출력효율을 고려하기 위해 온도특성은 월별에 따른 평균 온도를

이용해 효율을 계산한다. 모듈 표면온도 PV_{temp} 는 외기온도와 발전시간 내의 평균온도 차이를 이용한다. 평균온도 차이를 20°C 로 선정하며 외기온도는 기상청의 지역별 온도를 사용한다. 온도특성을 고려한 효율(η_{temp})은 다음 식 (5)와 같ek.

$$\eta_{temp} = 1 + k(PV_{temp} - PV_{st}) \quad (5)$$

여기서 k 는 온도 보정 계수 이고, PV_{tem} 는 모듈표면의 온도, PV_{st} 는 표준상태의 모듈 표면 온도(25°C)를 나타낸다. η_{inv} 는 인버터 효율의 평균 효율 계수이며 0.94를 적용한다. 태양에너지는 대기 중의 에어로솔, 오존, 가스 등의 감쇠성분에 의하여 1차적으로 에너지가 감쇠되고, 구름을 투과하며 다시 감쇠하게 된다. 또한 대기과 대지사이의 다중반사 그리고 지표면에서의 산란에 의해 태양에너지가 감쇠된다. 이러한 감쇠성분을 지나서 태양광 패널에 도달하게 되면 태양의 설치각도와 태양의 위치에 의해 출력이 결정되게 된다. 온도, 태양광 셀의 효율 등의 요소가 출력에 영향을 미치며 최종적으로 m^2 당 에너지를 발전하게 된다. 그림 14는 태양광 발전 모델링의 전체 구성도를 보여준다.

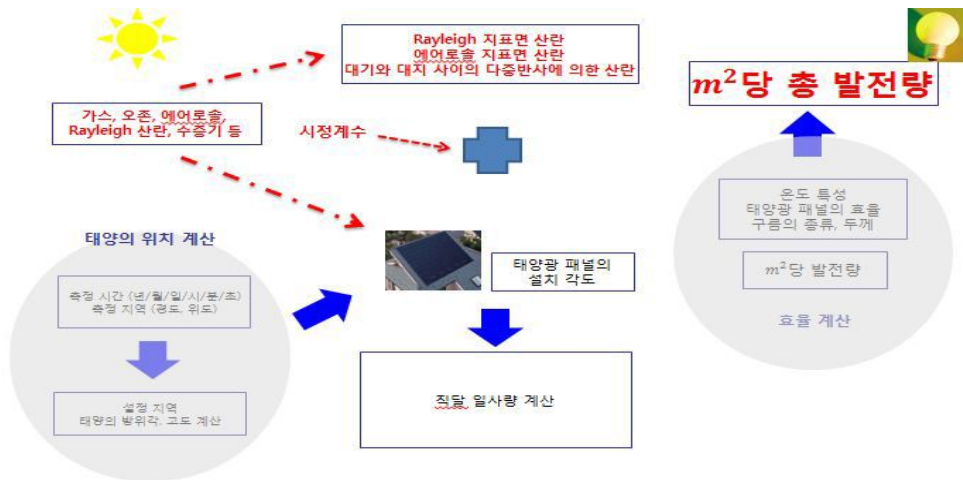


Fig. 14 태양광 발전 모델링의 전체 구성도

2. 에너지 저장시스템 모델링

에너지 저장시스템은 압축 공기, 회전에너지 등을 이용하여 대규모 전력을 저장하거나 충·방전을 반복적으로 할 수 있는 배터리를 대형화 하는 설비를 말한다. 스마트그리드 도입에 의한 신재생 에너지원의 증가, 최근 삶의 질 향상과 소득의 증대에 따른 부하수요의 증대와 전력시장 및 전력계통 운영의 유연성이 요구됨에 따라서 ESS의 필요성이 증대되고 있다. ESS는 용도에 따라서 단주기와 장주기로 나눌 수 있다. 단주기 ESS는 급속한 주파수 조정 및 전력의 변동 등에 사용되고, 속응성이 빨라 순간 대응이 가능하도록 하는 고출력 전지가 필요하게 된다. 장주기 ESS는 부하평준화 등의 목적으로 1시간이상 지속가능하거나 심야전력을 저장했다가 피크 부하 시 사용하는 ESS를 말한다. 따라서 ESS를 이용한 전력부하의 평준화를 통하여 피크 부하를 분산할 수 있고 이를 통해 발전소의 설비 투자를 절감할 수 있다. 또한 신재생에너지원의 출력변동을 완화시키며 ESS의 투입으로 고장에 따른 정전피해를 감소시킬 수 있고 전기품질을 향상시킬 수 있다. 다양한 ESS의 구성 모듈 중 경제성이 좋고, 환경 친화적인 배터리형태의 ESS가 유망한 새로운 산업으로 떠오르고 있다. 배터리 형태에는 리튬이온, 황산화 나트륨, 산화납 등이 있다.

2.1 에너지 저장장치 상태 모델

에너지 저장 시스템 모델링은 상태 모델과 동작 모델로 구성되며 동작 모델은 연계 지점에서 ESS 충·방전 동작을 나타내고 충·방전 수행 후에는 상태 모델에서 동작 수행에 따른 잔량을 나타낸다. 먼저 Fouad의 모델을 기본으로 하여 ESS 상태모델의 모델링을 진행한다. Fouad의 ESS모델은 충전의 경우에는 효율 1의 이상적인 모델로 보고, 방전의 경우에는 ESS를 구성하고 있는 배터리 모듈의 특성을 고려하며 ESS 구성모듈의 종류에 따라서 효율을 적용 시킨다. 다음 식(6), (7)은 충·방전에 따른 t시간에서의 기본적인 에너지 저장장치의 상태모델을 나타낸다.

$$\text{충전} : E_{i+1} = E_i + U_i P_i \eta, \quad (U_i > 0) \quad (6)$$

$$\text{방전} : E_{t+1} = E_t + U_t \frac{P_t}{\eta}, \quad (U_t < 0) \quad (7)$$

여기서 E_t 는 t 간에서의 ESS 잔량(Wh), P_t 는 t 시간에서의 ESS 출력, U_t 는 충·방전 상태계수를 나타낸다. η 는 ESS 효율로 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며, ESS에서 고려할 효율로 수명손실, 변환효율, 시스템 효율을 적용시킨다.

$$\eta = \frac{E_0}{E_i} \quad (8)$$

여기서 E_0 : ESS배터리 출력, E_i : ESS입력

ESS 구성모듈의 사이클에 따른 손실을 나타내는 것을 수명손실이라 하며, 2차전지 효율의 하나인 자가 방전은 무시하여 진행한다. 리튬이온의 경우 다른 전지(NIMH:15%/월)에 비교하여 3~5%/월로서 우수한 특성을 지니며 또한 긴 시간 진행되지 않기 때문에 무시하여도 무방하다고 판단된다. 모델 구성 시 필요한 요소로는 ESS를 구성하는데 배터리의 특성상 필요한 단위 모듈의 충·방전 수명과 관련된 효율이 있다. 여기서 사이클이란 배터리가 충전과 방전을 한번 씩 경험한 경우를 말하며, 배터리 초기 용량의 60~80%로 충전 될 경우에 수명이 다했다고 판단한다. 배터리의 고유 특성에 따라 Cycle Life는 다르게 나타나며 표 4는 배터리 종류별 DOD(Depth of Discharge)에 따른 사이클을 정리한 표를 나타낸다.

Table 4 배터리 종류별 DOD에 따른 사이클

Component	$N_{100}(1000*\text{cycles})$	$N_{80}(1000*\text{cycles})$	$N_{33}(1000*\text{cycles})$
Li-ion	2.8 - 3.0	3.0 - 4.0	7.0 - 8.0
NaS	3.0 - 5.0	5.0 - 7.0	7.0 - 10
NiCd	0.3 - 0.5	1.0 - 1.5	4.8 - 6.0
PSB	9.0 - 10	9.0 - 10	9.0 - 10
ZnBr	1.5 - 2.5	2.5 - 3.0	4.0 - 5.0

Na : 20 - 25°C 상황에서 DOD가 a%일 경우의 Cycle Life

표 4의 사이클과 DOD의 관계를 이용하여 다음 식(9)과 같이 Cycle에 따른 1회 방전

시 배터리의 수명손실을 나타낼 수 있다.

$$P_{C_{Loss}} = \frac{1}{1000 \times cycles} \quad (9)$$

수명손실과 시스템 효율을 적용시킨 ESS의 t+1시간에서의 충/방전 상태는 다음 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{충전: } E_{t+1} = E_t + U_t[(P_t^{ESS}) \cdot \eta_{system}], \quad (U_t > 0) \quad (10)$$

$$\text{방전: } E_{t+1} = E_t + U_t\left[\frac{(P_t^{ESS})}{\eta_{system}} + (P_{C_{Loss}})\right], \quad (U_t < 0)$$

여기서 η_{system} 은 시스템 효율, P_t^{ESS} 는 연계점에서 충·방전량이다.

표 5는 리튬이온의 수명손실을 고려하여 에너지의 총 사용량을 나타낸다. 표 5를 보면 전반적으로 DOD를 작게 하였을 때 높은 사이클이 나타난 것을 알 수 있다. 하지만 수명동안 사용한 에너지양을 고려한다면, DOD를 작게 하는 경우가 배터리의 수명이 끝날 때 까지 많은 양의 에너지를 사용한다고 보기에 적합하지 않다.

Table 5 리튬이온의 수명손실을 고려한 에너지 총 사용량

Component	N ₁₀₀	N ₈₀	N ₃₃
Cycle Life	3.0 × 1000 = 3000	4.0 × 1000 = 4000	9.0 × 1000 = 9000
사용량 (Wh)	100W*1=100	100W*0.8=80	100W*0.33=33
총 사용량(kWh)	100*3000=300	80*4000=320	33*9000=297

표 5에서 DOD에 대한 사이클을 적용시켜 수명이 끝날 때까지 사용한 에너지양을 보면 DOD가 100%인 경우 총 사용량은 300kWh, 80%인 경우 320kWh, 33%인 경우 297kWh로 나타난다. DOD가 80%인 경우에 사용량이 가장 많이 나타났으며 이는 배터리의 수명이 끝날 때까지 사용하는 에너지의 총량이 꼭 비례하는 것은 아님을 DOD를 작게 하고 cycle life을 높임에 따라 나타낸다. 따라서 효율적인 ESS를 사용하기 위해서는 DOD를 고려해야 한다는 것을 알 수 있다.

2.2 ESS 동작 모델

ESS의 충·방전 모델은 계통 연계 지점에서의 충·방전 상태에 따른 동작을 수행하도록 하는 부분으로 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{충전: } P_t^{ESS} = U_t \frac{(P_t)}{\eta_{conversion}}, \quad (U_t > 0) \quad (11)$$

$$\text{대기: } P_t^{ESS} = P_t^{ESS}, \quad (U_t = 0)$$

$$\text{방전: } P_t^{ESS} = U_t P_t \eta_{conversion}, \quad (U_t < 0)$$

여기서 P_t^{ESS} 는 연계 지점에서의 충·방전량이며 $\eta_{conversion}$ 은 변환효율을 나타낸다. ESS의 동작 특성에 따라서 상태계수 U_t 가 결정되며 대기, 방전, 충전동작을 하게 된다. 또한 상태계수를 부등호로 설정하여서 충·방전 속도를 조절한다. ESS는 리튬이온 전지로 구성 되어 있으며 운용 환경유지를 위하여 공조 설비가 필요하다. 따라서 이에 따른 효율을 추가시키고 ESS모델에 적용시키지 않으며 계통 연계 지점에서 하나의 부하설비로 적용시켜 진행한다.

그림 15는 ESS 모델링의 시스템 구성도를 나타내며 연계 지점에서는 ESS의 동작에 따른 P_t^{ESS} 만큼의 충·방전이 이루어지고, ESS의 잔량 상태인 E 가 결정된다.

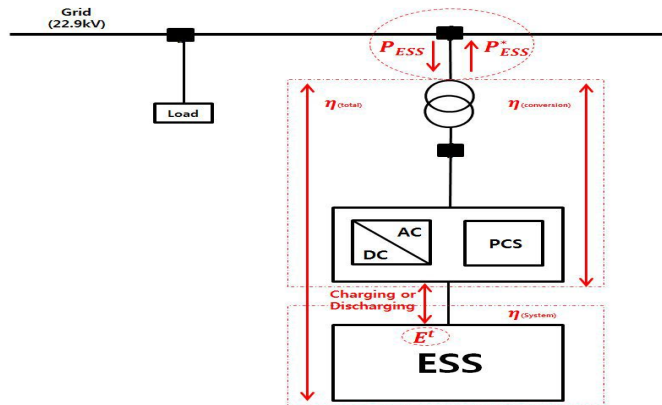


Fig. 15 ESS 모델 구성도

IV. 태양광 연계 ESS의 운용

1. 태양광 연계 ESS 운용

에너지 저장장치의 운전모드는 인버터, 배터리의 사양 및 설계 등에 따라 다양한 모드로 운영되며 각 모드는 부하의 전력과 태양광 발전량 및 계통 상황에 따라서 운영된다. 태양광의 발전여부와 그 발전량의 전력량에 따라서 운영방식이 바뀌게 되고, 사용되는 부하의 사용량에 따라서 배터리의 충·방전의 모드가 변경된다. 일반적으로 사용되는 에너지 저장장치는 에너지 저장장치의 전력변환 장치 용량보다 부하의 사용량이 크기 때문에 계통전기를 사용하는 모드는 4가지로 구분되며, 그림 16에 나타내었다.

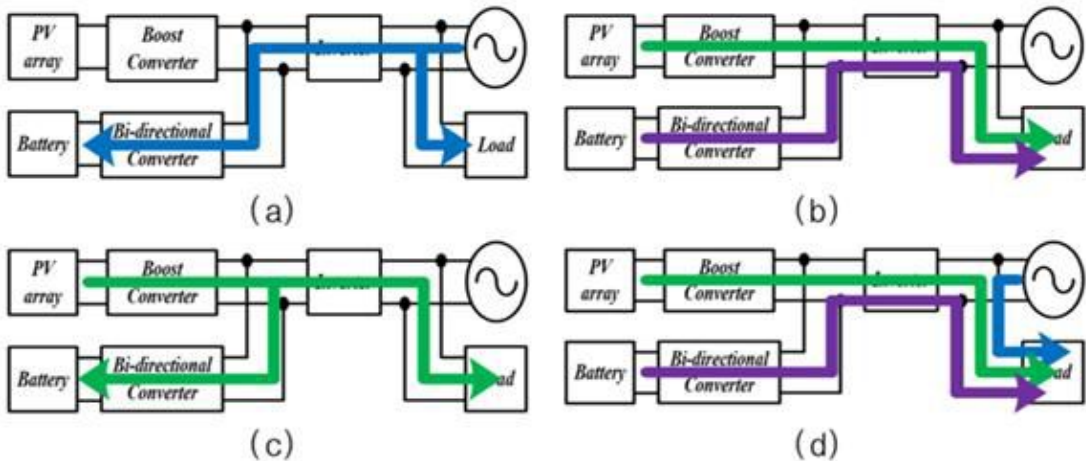


Fig. 16 ESS의 운전 모드

- 1) MODE 1 : 태양광발전 전력이 없으며 부하 소비 전력보다 계통 전력이 높은 모드로 계통 전력이 부하로 전달되며 남는 전력은 배터리를 충전한다.
- 2) MODE 2 : 태양광발전 전력이 있으며 부하 소비 전력보다 계통 전력이 낮은 모드로 태양광발전으로 생성된 에너지는 부하로 전달되며 부족한 에너지는 배터리로부터 공급받으며 배터리에 남는 용량이 부족하게 되면 계통에서 공급을 받는다.

- 3) MODE 3 : 태양광 발전 전력이 있으며 부하 소비 전력보다 계통 전력이 높은 모드로 부하는 태양광 발전 전력을 전부 부하로 전달하며 남은 태양광 에너지를 배터리에 충전하고 배터리의 완충 시 계통으로 공급한다.
- 4) MODE 4 : 태양광 발전 전력이 있으며 계통 전력이 있지만 둘의 합은 부하 소비 전력보다 낮은 모드로 배터리에 저장되어 있는 에너지를 이용하여 부하를 분담한다.

1.1 ESS를 적용한 태양광 출력변동성 저감

태양광발전의 단점 중에 하나로는 출력의 불규칙성에 있다. 에너지 저장시스템을 출력단에 설치할 경우에 출력의 변동성을 저감시킬 수 있다. 전력망에는 다양한 에너지원이 연계되어 대용량 에너지 저장장치는 각각의 발전출력을 대상으로 운영되는 것 보다 송전망에서의 전체적인 출력변동을 기준으로 제어를 하는 것이 더욱 효율적이다. 그림 17은 전력저장장치를 이용한 출력제어를 나타내고 있다.



Fig. 17 전력저장장치를 이용한 출력제어

1.2 비용 절감을 위한 ESS 적용

태양광발전의 비용 절감은 경제적인 전력계통에서의 운영에 가장 큰 부분을 차지한다. 태양광발전의 효율개선에 의한 비용 절감은 기 설치된 태양광발전에서는 효율향상에 한계가 있다. 비용 절감은 전력계통 운영의 측면에서 가장 경제적인 전원의 구성으로 운영하는 것이다. 이를 위해서는 저렴한 태양광 발전기를 365일 1년 동안 출력의 변동 없이 일정한 운전으로 전력을 공급하는 것이다. 하지만, 소비자의 전력수요는 일정하지 않은 패턴을 나타내기 때문에 태양광 발전기들로만 전력계통을 운영 하는 것은 전력계통의 특성상 불가능하다. 그림 18은 월평균 일 부하 패턴을 나타내고 있다.

이같이 변하는 전력수요에 대응을 하기 위해 기저발전기와 첨두발전기로 구분하여 운영한다. 첨두발전기는 LNG발전기와 석유발전기로 구성이 되고 급격하게 감소하거나, 증가하는 첨두부하영역의 수요를 담당한다. 또한 수요가 높은 주간의 부분을 야간의 수요가 낮은 부분으로 이동시키는 부하이동(Load Shifting)을 통하여 최적의 상태로 전력계통을 운영하여야 한다.

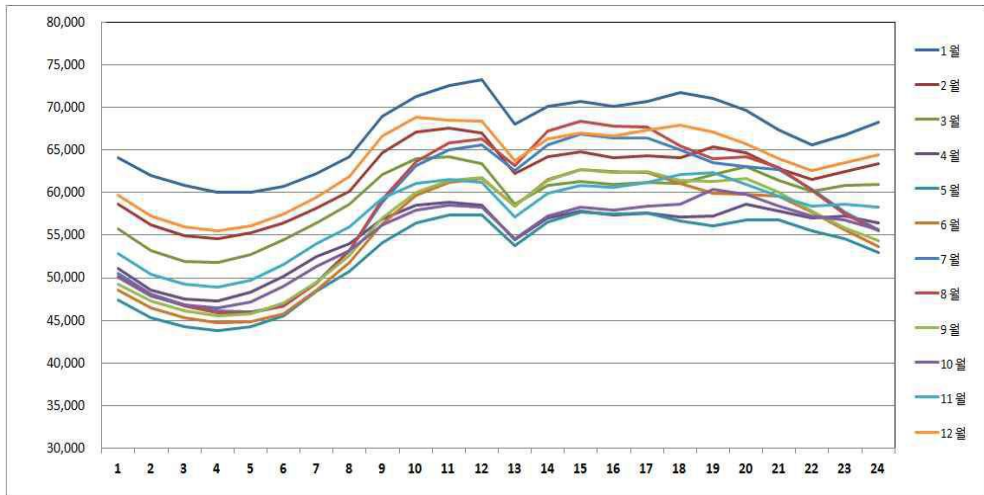


Fig. 18 월평균 일 부하 패턴

1.3 침두부하저감을 위한 에너지저장장치 활용

안정적인 전력계통 운영과 증가하는 전력수요에 대응하기 위하여 정기적으로 전원계획을 수립하며 운영하고 있다. 침두발전기의 이용을 억제하고 기저발전기의 이용률을 높이는 것이 이상적이지만, 전력계통을 기저발전기만으로 운영한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 전력계통은 예상치 못한 부하의 급격한 변동과 같은 불확실성에 대한 대비가 필요하며 발전기의 특성상 기저발전기는 전력계통의 불확실성 대비에 적절하지 않다. 전력계통 변화에 추종하기 위하여 부하 운전능력과 빠른 기동특성이 우수한 침두 발전기들이 전원구성에 일정비율이 포함되어야 한다. 하지만 연간 300시간 미만으로 운영되는 침두부하 발전기를 위하여 비싼 운영비와 많은 구축비의 문제가 있다. 그림 19는 연간 부하지속시간을 나타내고 있다.

또한 에너지 저장시스템의 활용을 통하여 기저부하의 수요가 낮은 구간에서 에너지 저장시스템을 충전하며 에너지 저장시스템을 침두부하가 발생하는 특정시간에 방전하여 부하이동과 유사하게 침두부하를 저감 할 수 있다. 이로 인하여 송배전망에 대한 투자를 회피 또는 지연할 수 있으며 에너지저장시스템을 전력계통에 필요로 하는 규모로 건설해 침두발전기에 대하여 대규모 투자를 회피할 수 있다.

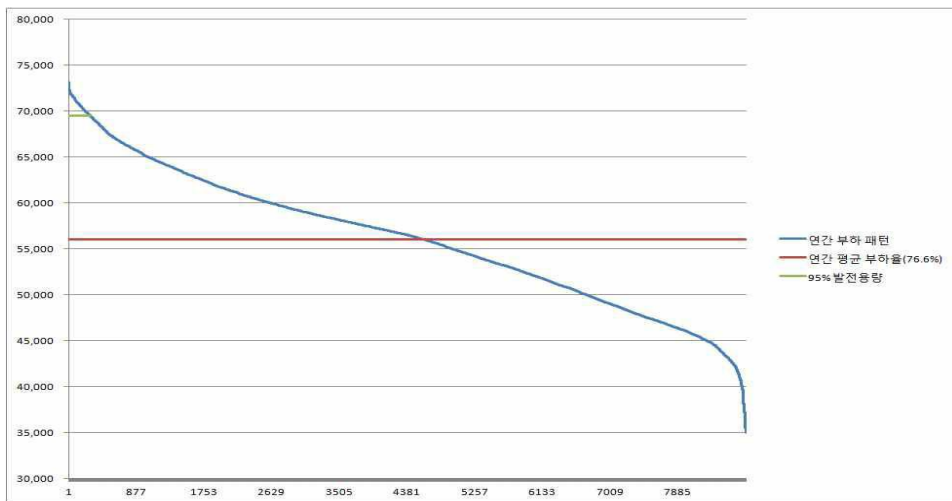


Fig. 19 연간 부하지속시간

1.4 전력계통의 안정적 운영을 위한 에너지 저장장치 활용

안정적인 전력계통 운영은 수급의 균형을 맞추어 변화하는 수요에 대하여 전원을 확보하여야 하며 예상하지 못한 사고에 대비하는 안정도 여유도 항상 고려하여야 한다. 정전의 상황에서 또한 최소화된 피해를 위한 방안도 준비되어야 한다. 안정적인 전력계통의 운영을 위하여 전력계통 보조서비스를 제공하며 크게 주파수 유지를 위한 4개의 보조서비스 항목과 대규모 정전이 발생하였을 시 빠른 복구를 위한 1개 항목으로 구성된다. 표 6은 우리나라 전력시장의 보조서비스 종류를 나타낸다.

Table 6 우리나라 전력시장의 보조서비스 종류

구분	응동시간	확보량	비고
GF (Governor Free)	순시	1,500MW	±0.2Hz 변동시 응동
AGC (Automatic Generation Control)	급정지시 후 순시		5분간 응동
대기예비전력	급정지시 후 10분 이내	1MW	해소시까지 출력 유지
대체예비전력	급정지시 후 120분 이내	1,500MW	해소시까지 출력 유지
자체기동	-	-	발전기의 자체기동 능력

전력계통의 안정도는 크게 위상각안정도, 전압안정도로 구분할 수 있다. 전압안정도는 부하의 급증, 상정 사고, 발전기의 탈락 등 전력계통의 외란 시 전력계통의 적정 전압을 유지하는 정도를 의미하며 위상각안정도는 부하의 급증, 상정 사고, 발전기의 탈락 등 전력계통의 외란 시 전력계통이 동기 위상각을 유지하는 정도를 의미한다. 전력계통은 항시 위상각안정도와 전압안정도가 안정된 범위에서 운전되어야 한다. 그러나 부하의 급증, 상정 사고, 발전기의 탈락 등 전력계통이 안정한 영역을 벗어나 운전하게 되면 대규모 정전과 같은 상황을 맞이하게 된다. 전력 수급시스템의 설계가 아무리 잘 갖추어져 있더라도 결코 완벽할 수는 없다. 비상전원의 가장 큰 역할은 정전을 미연에 방지하며 발생하더라도 피해를 최소화하는 것이다. 우리나라는 다른 국가에 비하여 정전으로 인한 피해에 대하여 소비자들의 인식이 낮다. 하지만 2011년에 발생한 순환정전을 통하여 정전으로 인하여 경제적 손실과 사회적 혼란을 경험한 바 있다. 이와 같이 전력공급이 중단된 상황에서 에너지저장시스템의 충전된 전력을 이용하면 비상발전기와 같은 백업전원의 역할을 수행할 수 있다.

2. 개선된 태양광 연계 ESS 운용

2.1 운용모드

에너지 저장시스템의 운전 모드는 아래와 같이 부하, 태양광 과 계통의 전력 운용에 따라 여러 가지 경우의 수가 있다. 하지만 각 경우의 모드 중 실제 운전할 수 없는 경우를 제외하면 아래와 같이 총 6가지의 모드로 구성될 수 있다. 그림 20은 전체 시스템 구성도를 나타내고 있으며, 6가지의 운용모드는 표 7과 같고 시스템에 사용되는 기기별 용량은 표8과 같이 나타내었다. 그림 20은 논문에 제안된 6가지의 모드운용을 위한 시스템 구성도이다.

Table 7 6가지 운용 모드

그리드	태양광	부하	배터리	사용전력/설명	모드
ON	ON	큼	충전	배터리충전안함.계통전력사용 (단 배터리가 극소량일 때는 그리드로부터 충전가능)	
			방전	태양광+배터리방전. 계통전력사용안함 (태양광+배터리전력보다부하가클경우계통 전력최소사용)	MODE1
		작음	충전	남는태양광전력배터리충전및계통에전송	MODE2
			방전	배터리방전하지않음.태양광전력계통에전송	
	OFF	큼	충전	배터리충전안함. (단,배터리가극소량일때는그리드로부터충전 가능)	
			방전	배터리방전. 계통전력사용안함 (배터리전력보다부하가클경우계통전력최소 사용)	MODE3
		작음	충전	배터리충전안함. 계통전력사용	
			방전	배터리방전. 계통전력사용안함	MODE3
OFF	ON	큼	충전	배터리충전안함. 로드전력공급	
			방전	태양광+배터리방전.	MODE4
		작음	충전	배터리충전(태양광전력충전)	MODE5
			방전	배터리방전하지않음.태양광전력배터리충전	
	OFF	큼	충전	배터리충전안함. 로드전력공급	
			방전	배터리방전(로드전력공급)	MODE6
		작음	충전	배터리충전안함. 로드전력공급	
			방전	배터리방전(로드전력공급)	MODE6

Table 8 시스템 사양

항목	용량
배터리용량	10kWh
DC/DC컨버터	4kW 전력 생산 가능
양방향 DC/DC 컨버터	4kW 충·방전
양방향 DC/AC 컨버터	4kW 전력 변환
입계부하	4kW 소비 전력

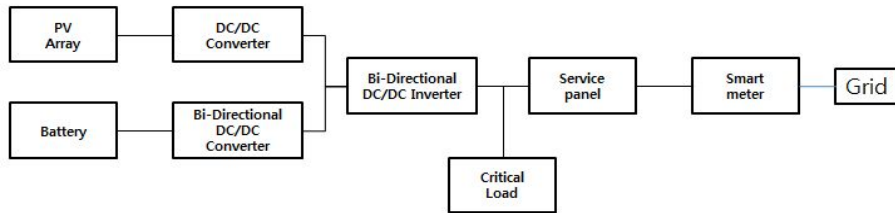


Fig. 20 전체 시스템 구성도

- 1) MODE 1 : 태양광 발전 전력이 부하의 사용량보다 적게 발전되는 경우 배터리의 전력을 사용해 부하 전력의 사용량을 보충하는 모드이다. 만약 이 모드에서 배터리 전력의 부족으로 방전할 수 없게 되면 계통의 전원으로 부하의 전력을 보충할 수 있다.

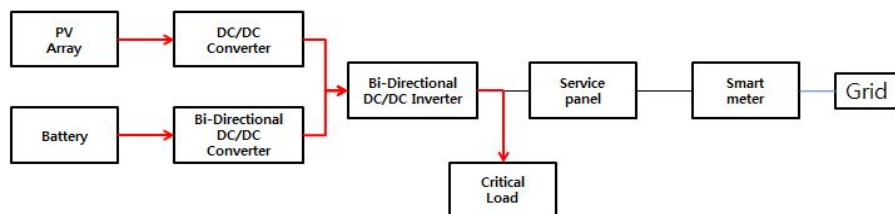


Fig. 21 운용모드 1

- 2) MODE 2 : 태양광 발전 전력이 부하의 사용량보다 많이 발전되는 경우 계통 혹은 배터리로 발전 전력을 보내는 모드이다. 계통의 가격과 배터리의 충전양에 따라 전력의 흐름을 선택할 수 있다.

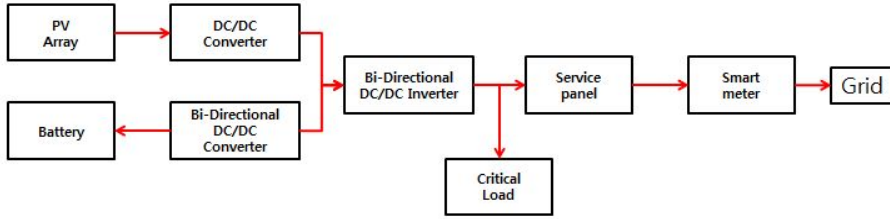


Fig. 22 운용모드 2

3) MODE 3 : 태양광 발전 전력이 없으며 배터리 전력만으로 부하 전력을 방전하여 소비하는 모드이다. 만약 이 모드에서 배터리 용량의 부족으로 더 이상 방전 능력이 되지 않게 되면 계통에서 부하의 소비전력을 가져올 수 있다.

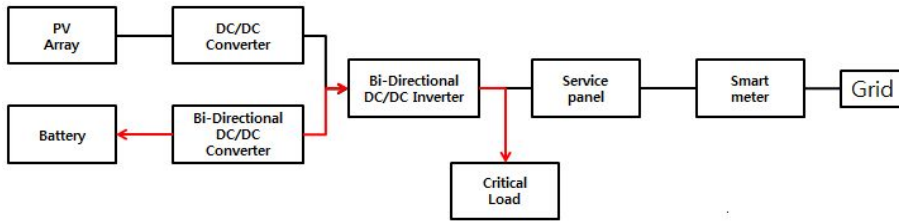


Fig. 23 운용모드 3

4) MODE 4 : 부하의 사용량보다 적게 발전되는 경우 배터리의 전력을 사용하여 부하전력의 사용량을 보충하는 모드이다. 만약 이 모드에서 배터리 전력의 부족으로 방전할 수 없을 경우 부하는 태양광 발전 전력만큼만 전력을 사용할 수 있다. 계통이 정전인 백업모드는 항상 계통의 상태를 감지하고 있어야 하며, 계통 복귀 시 모드1, 모드2, 모드 3의 모드로 변경된다.

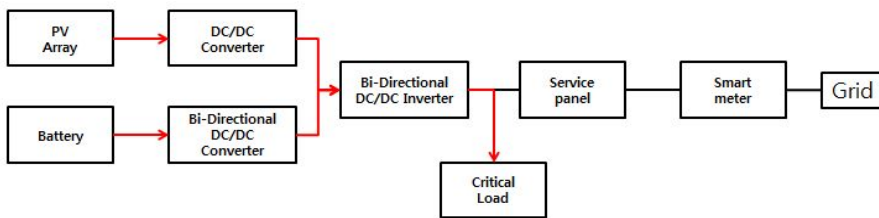


Fig. 24 운용모드 4

5) MODE 5 : 태양광 발전 전력이 부하의 사용량보다 많이 발전되는 경우, 남은 전력으로 배터리를 충전하는 모드이다. 배터리가 모두 충전되었을 경우의 태양광 발전 전력은 부하의 사용 전력에 따라서 발전 전력을 제한한다.

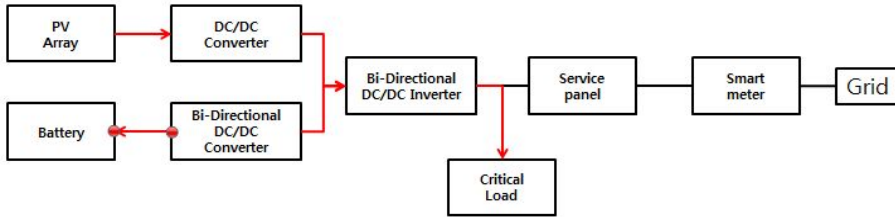


Fig. 25 운용모드 5

6) MODE 6 : 태양광 발전 전력이 없으며 배터리 전력만으로 부하전력을 소비하는 모드이다. 만약 이 모드에서 배터리 전력의 부족으로 더 이상 방전 능력이 되지 않게 되면 더 이상 부하의 소비 전력을 공급할 수 없다.

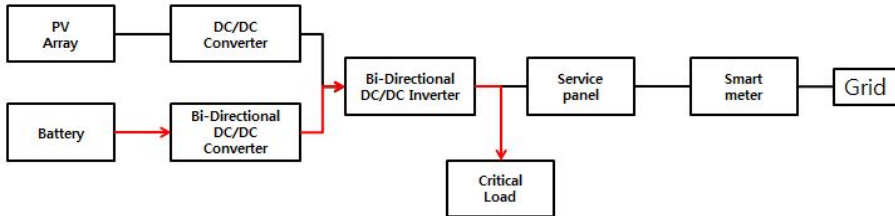


Fig. 26 운용모드 6

2.2 실험 결과 고찰

태양광 인버터 실험을 위한 구성은 그림 27와 같이 구성하였고, 성능실험을 진행하였다. 태양광 어레이는 시뮬레이터를 연결하고 계통연계는 출력전압을 120V/240V로 설정 하였다. 부하는 부하장치를 각 모드별로 연결하여 실험을 수행하였다.

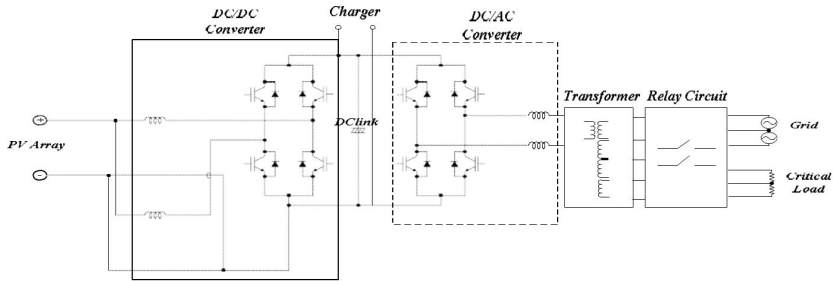


Fig. 27 태양광 인버터 구성

2.2.1 충·방전 실험

충·방전 실험은 배터리의 충·방전 변환이 제대로 동작되는지를 확인하는 실험으로 그림 28은 ESS 장치의 충·방전 실험의 결과를 파형으로 나타낸다. 배터리 충전할 때 계통의 전류 사용량을 확인하며 방전 지령에 대한 전환 및 충·방전 실험의 결과를 확인하였다.

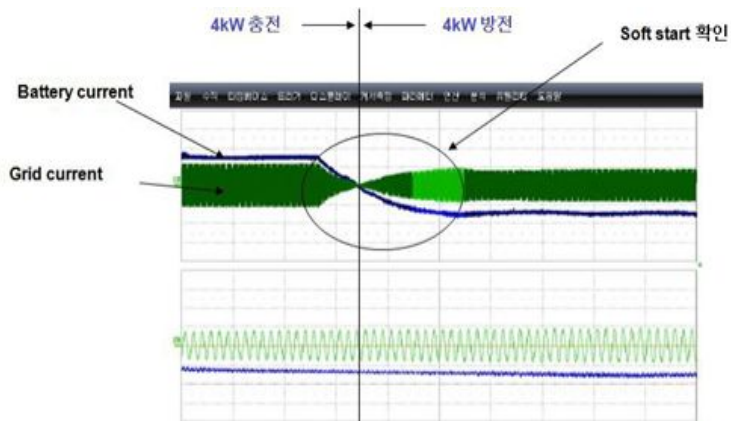


Fig. 28 충·방전 실험 결과

2.2.2 모드 전환 반복 실험

모드 전환 반복 실험은 계통이 정상상태에서 제품의 정상동작여부를 확인하고 계통 이상으로 정전 시 Backup 모드로 제품이 정상 전환이 되는지 증명하고 Backup 모드로 운전 시 다시 계통이 정상상태가 되면 Backup 모드에서 다시 Grid-tie 모드로 복귀 기능을 반복하는지에 대한 실험이다. 그림 29는 ESS의 모드 전환 반복 실험에 따른 결과를 파형으로 나타내며 계통의 상태에 따른 모드 전환 성능을 확인하였다.

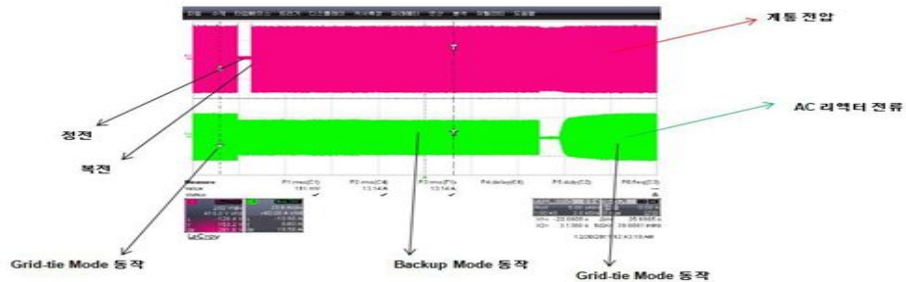


Fig. 29 모드 전환 반복 실험 결과

2.2.3 Backup 모드 실험

Backup 모드 실험은 태양광이 발전을 하고 있는 상태에서 부하의 전력을 소비하고 있을 때, 계통의 정전이 발생할 때 부하의 출력 전류, 전압 파형과 Backup 모드 전환 기능의 시간을 측정하여 기능의 정상동작을 확인하는 실험이다. 그림 30은 Backup 모드 실험 결과의 파형을 나타내며, 정전이 감지된 시점부터 16ms이후에 정상적인 부하전압이 출력됨을 알 수 있었다.

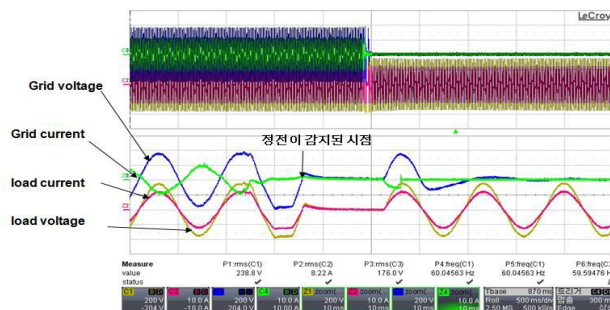


Fig. 30 Backup 모드 실험 결과 파형

2.2.4 효율 측정 실험

효율 측정 실험은 DC/DC 컨버터와 PV 인버터의 효율을 측정하는 실험이다. 그림 36은 효율을 측정한 결과이다. 입력전원을 가변하여 10~100%까지의 전력에서의 각각의 효율을 측정하며 95.7%의 최대효율을 확인하였고, 입력 DC전압이 상승할수록 효율이 상승함을 알 수 있었다.

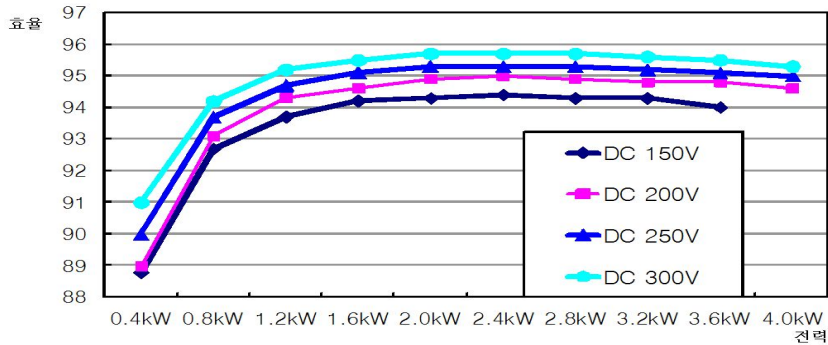


Fig. 31 PV 인버터/충전 효율

2.2.5 에너지 저장장치 전체 효율

ESS의 전체 시스템 효율을 측정결과는 그림 32와 같다. 태양광 어레이와 ESS 전체의 계통을 연결하여 충·방전의 각 모드에서 입·출력에 대하여 효율을 측정하였다. 계통에 연결하여 제품의 효율을 측정해본 결과 방전 2.4kW 일 때 최대 효율은 90.91%임을 알 수 있었다.



Fig. 32 ESS 충·방전 효율

IV. 결 론

태양광 에너지원의 배전계통의 연계 수준이 나날이 증가하고 있다. 전력계통 운영자의 입장에서는 태양광 에너지원의 발전 특성상 배전계통 내에 발생하는 전력품질의 저하 문제가 관심사이다. 에너지저장시스템(ESS)은 생산된 전력을 계통에 저장하고 전력이 가장 필요한 때에 공급하여 에너지 이용 효율을 높이는 시스템이다. 신재생에너지 발전전력의 불안정한 공급에 대비할 뿐 아니라 생산된 전력 에너지를 저장하고 필요할 때 사용함으로써 부하평준화를 통하여 수요관리자원으로써의 역할을 수행할 수 있으며 주파수조정, 피크분산을 통하여 송전선 건설비, 발전소 건설비 등의 설비투자를 절감할 수 있다. 이는 에너지의 이용 효율을 향상시키고 전 세계적인 신재생에너지원의 확대정책에 관해 전력공급 시스템 및 신재생에너지원 활용도 제고를 안정화시킬 수 있는 기술이다. 따라서 태양광 에너지원을 사용하는 발전 사업자들에게 있어 ESS는 출력 평활회로를 통해 계통의 안정도를 높이는 것이 필수적이다. 이 때, 출력 평활화를 얼마나 더 효율적으로 수행하느냐에 따라 ESS의 운영비용의 저감과 장기적인 유지 보수를 결정하는 중요한 요인으로 이에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다.

본 논문에서는 태양광 발전시스템과 에너지 저장시스템을 연계하여 계통의 안정도를 높이고 전력피크 쉐어링, 출력 변동 저감을 위한 6가지 모드를 제안하였다. 태양광발전 시스템에서 ESS 운영 시 초기에는 누설전류에 인한 태양광 전원의 차단으로 인하여 계통전원 전력을 사용하여 전기사용량이 증가하고, BMS 와 PCS, 태양광 모듈의 연동 간의 문제로 인하여 장애가 발생하고 태양광 발전시스템의 운영 중단에 따른 에너지 발전량의 손실 등의 문제가 발생한다. 하지만 연구를 통한 장애이력의 요소를 개선하며 에너지 저장관리시스템이 안정화됨에 따라서 태양광발전시스템 발전의 시간적 한계점인 심야전력을 사용할 때나 기상상태의 한계점인 흐린 날 등 전기사용이 필요할 때 에너지저장시스템에 저장된 전력을 사용함으로써 태양광의 단점을 보완하여 생산된 에너지의 발전량이 증가함을 알 수 있었다. 또한 충·방전 실험을 통하여 정상동작 여부를 확인하였으며, Backup모드에서는 정전이 감지되고 16ms 이후에 부하 전압이 정상적으로 동작됨을 확인하였다.

본 논문에서 연구된 ESS 설계 모델링은 향후 정부의 대규모 보급 사업과 신재생에너지 연계 에너지 저장시스템 사업에 적용 되는 ESS 핵심 기술의 설계에 적용 될 것으로 사료 된다.

참고문헌

- [1] A. Poullikkas, "A Comparative Overview of Large-scale Battery Systems for Electricity Storage", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.27, pp.778-788, 2013.
- [2] C. J. Rydh, and B. A. Sand , "Energy Analysis é of Batteries in Photovoltaic Systems. Part II: Energy Return Factors and Overall Battery Efficiencies", *Energy Conversion & Management*, Vol.46, pp.1980-2000, 2005.
- [3] 이강연, 정병호, 조금배, 백형래, 정해덕, "BESS 를 적용한 계통연계형 PV 시스템의 운전특성에 관한 연구," *한국태양에너지학회 논문집*, Vol. 26, No. 2, 2006.
- [4] California Energy Commission (CEC), "Comparative Costs of California Central Station Electricity Generation", CEC-200-2009-07SF. Sacramento, CA: CEC, 2010.
- [5] A. H. Mohsenian-Rad, V. Wong, J. Jatskevich, and R. Schober, "Optimal and autonomous incentive-based energy consumption scheduling algorithm for smart grid" *Innovative Smart Grid Technologies, ISGT*, 2010.
- [6] Mohamed Daowd, Noshin Omar, Peter Van Den Bossche, and Joeri Van Mierlo, "Passive and Active Battery Balancing Comparison Based on MATLAB Simulation", *7th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC'1*, 2011.
- [7] Y. Kuo, T. Liang, J. Chen, "Novel maximum power point tracking controller for photovoltaic energy conversion system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 48, No. 3, pp. 594-601, June, 2001.
- [8] A. Thomas. Stuart, and Wei Zhu, "Fast Equalization for Large Lithium Ion Batteries", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol.24, pp.27-31, 2009.

- [9] O. Waszynczuk, "Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems," IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-102, No. 1, pp. 3031-3037, Sep. 1983.
- [10] D. Bhatnagar, V. Loose, "Evaluating Utility Procured Electric Energy Storage Resources: A Perspective for State Electric Utility Regulators", SAND2012-9422. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- [11] T. Remus, L. Marco, R. Pedro, "Grid converters for photovoltaic and wind power systems," WILEY, 2011.
- [12] K. S. Choi, Y. K. Ahn, Y. C. Park, W. C. Park, H. M. Seo, K. M. Jung, and K. H. Seo, "Architectural design of home energy saving system based on realtime energy-awareness," Proceedings of the 4th International Conference, pp. 1-5, 2009.
- [13] D. Connolly, H. Lund, P. Finn, B. V. Mathiesen, and M. Leahy, "Practical Operation Strategies for Pumped Hydroelectric Energy Storage (PHES) Utilizing Electricity Price Arbitrage", Energy Policy (39), pp. 4189-4196, 2011
- [14] C. Y. Leong, A. R. Ramli, and T. Perumal, "A rule-based framework for heterogeneous subsystems management in smart home environment," IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 55, 2009, pp. 1208-1213.
- [15] J. P. Barton, and D. G. Infield, "Energy Storage and Its Use with Intermittent Renewable Energy", IEEE Transactionson Energy Conversion, Vol.19, pp.441-448, 2004.
- [16] K. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: An algorithm for rapidly changing atmosphere conditions," Proc. Inst. Electr. Eng., Vol. 142, No. 1, pp. 59-64.
- [17] A. A. Akhil, G. Huff, A. B. Currier, B. C. Kaun, D. M. Rastler, S. B. Chen, A. L. Cotter, D. T. Bradshaw, W. D. Gauntlett, "(forthcoming) DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA", 2013.

- [18] S. West, and P. T. Krein, "Switched-Capacitor Systems for Battery Equalization", IEEE Modern Techniques and Technology (MTT 2000)", Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists, pp.57 - 59, 2000.
- [19] J. Gow, C. Manning, "Controller arrangement for boost converter systems sourced from solar photovoltaic arrays or other maximum power sources," Proc. Inst. Electr. Eng. Electr. Power Appl., Vol 147, No. 1, pp.15-20, Jan. 2000.
- [20] 홍성준 "3kW태양전지 및 계통연계 에너지 저장시스템", 과학기술연합대학원, 2015
- [21] 이육진 "10kWh급 태양광 에너지저장시스템 실증연구", 경북대학교, 이육진
- [22] 박종복 "PV system 기반 최적의 계통연계를 위한 에너지저장시스템 연구", 동신대학교, 2015
- [23] 박경락 "PV시스템 연계 가정용 ESS의 설계 및 운용에 관한 연구", 창원대학교, 2015
- [24] 오준석 "신재생에너지원이 연계된 배전계통의 전력품질 향상을 위한 ESS의 전력", 충북대학교, 2016
- [25] 장정원 "에너지 저장 시스템 운전조건에 따른 태양광 연계 모니터링 연구", 우석대학교, 2015
- [26] 최재훈 "에너지 저장장치의 기술 경제적 가치 분석", 서강대학교, 2013
- [27] 이영훈 "에너지저장시스템(ESS)에 의한 에너지 절감 효과에 관한 연구", 한양대학교, 2016
- [28] 박성원 "태양광 발전이 도입된 상황에서 ESS를 이용한 배전계통 안정화에 관한 연구", 가천대학교, 2013