다세대주택 옥상 PV 연계 가정용 BESS의 에너지 절감 효과 분석

엄지영¹ · 김용기^{2†}

¹한국건설기술연구원 건축에너지연구소, 전임연구원

²한국건설기술연구원 건축에너지연구소, 연구위원

Analysis of Energy Saving Effect of Residential BESS Connected to Roof-top PV in a Multi-family House

Eum Ji-Young¹ · Kim Yong-Ki^{2†}

¹Research Specialist, Department of Building Energy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Research Fellow, Department of Building Energy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

[†]Corresponding author: kimyk@kict.re.kr

Abstract

The discussion about carbon neutrality has recently spread worldwide in response to the climate crisis. In Korea, the concept of zero-energy buildings is one of the means to reduce carbon emissions in the construction sector. Photovoltaic (PV) power systems are the most commonly installed renewable energy systems in residential buildings. However, the installed PV capacity in apartment houses is limited because of difficulty in securing PV installation area and inability to process the surplus PV power. Battery energy storage systems (BESSs) are emerging as a means for the storage and reuse of surplus PV power. In this study, the energy-saving effect of a residential BESS connected to a rooftop PV system was analyzed for eight households in a multi-family house. The data of the main load power (grid supply) and PV+BESS power from households collected from August to October 2021 were analyzed. During the operation of the BESS, the surplus PV power was stored in the battery, and the PV+BESS power was continuously supplied to the load by discharging the battery regardless of the PV power time. Based on the average representative data for 6 days, the power saving rate was approximately 26.0% for the rooftop PV system and approximately 41.8% for the BESS.

Keywords: 배터리 에너지저장시스템(Battery energy storage system, BESS), 옥상 태양광발전 시스템(Roof-top photovoltaic (PV) power system), 잉여전력(Surplus power), 리튬인산철배터리(LiFePO4 battery), 제로에너지건축물(Zero energy building)

1. 서론

최근 전 세계적으로 기후위기 대응을 위한 탄소중립 논의가 확산되고 있다. 우리나라는 이러한 흐름에 적극적으로 동참하여 2020년 10월에 2050 탄소중립을 선언하였다. 2021

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.42, No.1, pp.115-125, February 2022
<https://doi.org/10.7836/kjes.2022.42.1.115>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 20 November 2021

Revised: 23 December 2021

Accepted: 3 January 2022

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

년 10월에 발표된 2050 탄소중립 시나리오¹⁾에 따르면 전환(발전) 부문의 탄소배출량 감축수단은 화력발전 대폭 축소 및 재생에너지 발전 확대 등이고, 건물 부문은 제로에너지건축물 및 그린리모델링 기반의 에너지 효율향상과 저탄소청정에너지 보급 등이다. 2018년을 기준으로 건물 부문의 온실가스 총 배출량은 산업 부문 다음으로 많은 24.6% (간접 배출량 포함)의 비중을 차지하고 있으며, 이 중 주거용 건물은 65% 비중을 차지하고 있다²⁾.

태양광(Photovoltaic; PV) 발전시스템은 주거용 건물에 가장 일반적으로 설치되는 신재생에너지 시스템이다. 현재 정부 및 지자체에서는 단독주택 및 공동주택을 대상으로 태양광 보급사업을 지원하고 있다. 공동주택 각 세대에서 지원받을 수 있는 PV 설치용량은 50 W 이상 1 kW 미만³⁾이지만 일반적으로 300 W 전후의 PV 모듈 1장을 설치한다. PV 설치용량 300 W는 세대에서 전기요금의 절감효과를 체감하기에 작은 용량으로 PV 설치용량을 늘릴 필요가 있다. 하지만, 공동주택 각 세대에서는 PV 모듈의 설치면적을 확보하기 어렵고, 면적확보가 되어도 주간 PV 잉여전력을 상계 처리할 수 없기 때문에 PV 설치용량을 늘리기는 쉽지 않다. 한국전력 공사의 송·배전용전기설비 이용규정⁴⁾에 의하면 공동주택에서의 잉여전력은 변압기를 공동으로 사용하기 때문에 상계처리가 되지 않는다. 배터리 에너지저장시스템(Battery Energy Storage System, BESS)은 PV 잉여전력의 저장과 재이용을 위한 수단으로 이용되고 있다. 가정용 BESS는 PV 발전시간대에 세대 부하에 공급되고 남은 PV 발전량을 저장하고, PV 비발전시간대 또는 PV 발전이 부하보다 적은 PV 발전시간대에 저장되어 있던 PV 발전량을 부하에 공급한다.

선행연구인 Kim et al.⁵⁾의 연구에서는 아파트 세대의 발코니 PV와 연계한 BESS의 실증결과를 분석하였으나, BESS의 배터리용 부하연결선과 계통연결선이 별도로 구분되어 BESS의 이용률이 저조하였다. Eum et al.⁶⁾의 연구에서는 PV 발전량 공급 우선순위와 배터리 충전원을 변수로 하여 발코니 PV와 연계한 BESS의 운전모드를 실험 및 분석하였고, 일부 기능의 추가를 제안하였다. 본 연구에서는 선행연구를 보완하여 저층형 공동주택인 다세대주택의 각 세대를 대상으로 옥상 PV 연계 BESS를 실증하여 세대 전력사용량의 절감효과를 분석하고자 한다.

2. 실증 방법

2.1 실증 개요

실증 장소는 경기도 고양시 일산동구에 위치한 8세대 규모의 다세대주택 1개동으로 세부 정보는 Table 1과 같다. PV는 다세대주택 옥상에 남서향과 경사각 15°로 세대당 1.2 kW씩 8세대에 총 9.6 kW의 용량이 설치되었다. 옥상 PV 모듈은 L사의 단결정 실리콘 재질인 400 W 용량의 모듈(모델명 LG425N2T-V5, 최대출력 전압 41.5 V, 최대출력 전류 10.25 A, 개방전압 49.7 V, 단락전류 10.86 A, 모듈효율 19.3%)로 세대당 3장이 직렬로 연결되었다. 가정용 BESS는 리튬인산철 배터리팩과 하이브리드 인버터, PMS (전력관리시스템; Power Management System), 자동소화장치 등으로 구성되었다. 리튬인산철 배터리팩은 용량 4.1 kWh (용량 80 Ah, 공칭전압 51.2 V)로 각형 리튬인산철 배터리셀과 BMS (배터리관리시스템; Battery Management System) 등의 부품들로 조립된 것이다. 리튬인산철 배터리는 삼원계 리튬이온 배터리와 비교하여 수명주기가 길고, 안전성이 높

으며, 내구성이 우수하다는 특징이 있다. 하이브리드 인버터는 PV 인버터와 배터리 인버터의 기능을 갖춘 용량 1 kW (PV 입력전압 30 ~ 140 V, 배터리 입력전압 40 ~ 58 V)의 All-In-One 제품이다. 이 하이브리드 인버터의 특이점은 배터리용 부하연결선과 계통연결선을 별도로 구분하지 않고 1개의 플러그로 통합한 것이다. 부하 및 계통연결선인 플러그는 세대 내 콘센트에 연결되며, PV 발전량 및 배터리 발전량을 세대 분전반에 공급할 수 있고, 비상시 계통 전력량을 배터리에 공급하여 배터리를 충전할 수 있다. 즉, 가정용 BESS의 부하는 세대 전체 전력량인 수전량이다. Fig. 1은 실증 장소의 옥상에 설치된 PV 모듈과 가정용 BESS의 사진이다.

Table 1 Information of a Multi-family House in Goyang-si

	Category	Picture	
Location	Ilsandong-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do		
Direction	Northwest		
Number of Floor	4		
Number of households	8		
Area of household (m ²)	92.56		
Type of households	Bilateral symmetry		
		(Back side)	(Right side)

Fig. 1 Pictures of roof-top PV modules and residential BESSs by household

2.2 분석 방법

다세대주택 옥상 PV와 연계한 가정용 BESS의 실증 결과를 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 세대에 개별적으로 디지털 전력량계를 설치하였다. 디지털 전력량계는 D사의 분전반 전력 측정기(모델명 PM-P110-WE, 최대허용용량 50 A, 통신방식 Wi-Fi)와 태양광 발전량 측정기(모델명 PM-B400-W, 최대허용용량 10 A, 2,200 W, 통신방식 Wi-Fi)이다. 분전반 전력 측정기는 분전반에 설치되어 세대 전체 사용전력을 계측하였다. 태양광 발전량 측정기는 BESS의 출력단 플러그에 연결되어 세대에 공급되는 PV와 BESS 출력전력을 계측한다. 계측한 세대별 사용전력과 PV+BESS 출력전력은 1분 단위로 클라우드 서버에 수집 및 저장되고 원격으로 확인 및 다운로드가 가능하다.

Fig. 2 Pictures of realtime electric power meters

가정용 BESS는 안전을 위해 SOC (충전율; State of Charge)가 10 ~ 90%로 설정되었고, 세대 기저부하를 고려하여 출력전력이 200 W로 고정되었다. 그리고 배터리의 완전 방전을 방지하기 위해 배터리는 SOC가 10%에 도달하면 운전이 멈추고, 5%에 도달하면 PV 발전전력 또는 계통 전력으로 충전된다. 가정용 BESS의 기본 운전모드는 배터리가 완충되지 않은 상태를 기준으로 Table 2와 같이 크게 4가지로 구분된다. PV 발전전력이 200 W를 초과할 경우, PV 발전전력은 세대와 배터리로 공급된다. PV 발전전력이 200 W일 경우는 세대에 우선적으로 PV 발전전력이 공급된다. PV 발전전력이 200 W 미만일 경우, 세대는 PV 발전전력과 배터리 방전전력으로 200 W를 공급받는다. PV 발전이 없는 경우는 배터리에 저장되었던 PV 잉여전력으로 세대에 200 W가 공급된다. 단, 배터리가 완전히 방전 또는 충전이 된 상태에서는 배터리의 운전이 멈추기 때문에 PV 발전전력의 크기와 무관하게 전체 PV 발전전력이 일반 PV 단독 운전처럼 세대 부하와 계통으로 공급된다.

Table 2 Operation modes of residential BESS

Condition	Operation	Schematic diagram
PV > 200 W	PV → Load & Battery	
PV = 200 W	PV → Load	
PV < 200 W	PV & Battery → Load	
PV = 0	Battery → Load	

본 연구에서는 다세대주택 8세대를 대상으로 2021년 8월 중순부터 10월 중순까지 PV의 단독 운전과 PV 연계 BESS의 운전을 구분하여 PV와 BESS의 일간 운전특성과 BESS 활용에 따른 전력사용량의 절감 효과를 분석하고자 하였다. 분석에는 디지털 전력량계로 수집한 세대별 메인 전력량(수전량)과 PV+BESS 출력량의 데이터가 활용되었다. 날씨정보는 기상청⁷⁾에서 제공하는 과거 일평균운량과 일강수량 정보를 활용하였다.

3. 실증 결과

3.1 옥상 PV의 일간 운전특성 분석

단독 운전을 위한 옥상 PV 시스템은 옥상에 설치된 세대별 PV 모듈과 PV 인버터로 구성된다. PV 인버터는 배터리 인버터의 기능을 차단하여 PV 인버터의 기능만으로 BESS의 하이브리드 인버터가 활용되었다. PV의 단독 운전은 PV 발전시간대에 한하여 PV를 발전하고, 세대에 공급되고 남은 PV 발전량을 계통에 공급한다. Fig. 3은 2021년 8월부터 10월까지의 기간 중 날씨가 좋은 특정 일자와 세대의 일간 전력사용량과 PV 발전량을 그래프로 정리하여 PV의 운전특성을 표현한 것이다. 날씨와 계절에 따라 차이가 있지만 공통적으로 PV는 6시부터 19시 사이에 발전되었고, PV 최대 발전전력은 남중시간에 0.86 kW에서 1.05 kW 사이로 계측되었다. 세대 메인 전력량은 계통으로부터 공급받는 전력량으로 실제 세대에서 사용한 전력량에 PV 발전량이 반영된 것이다. PV 발전시간대에서 확인되는 음(-)의 전력사용량은 세대에 공급되고 남은 PV 전력량이 세대 밖의 계통으로 역전송되는 것을 의미한다. PV 최대 잉여전력은 0.7 kW에서 1.2 kW 사이로 계측되었다. 그리고 PV 발전시간대가 아닌 0시부터 6시까지 그리고 19시부터 24시까지의 PV 비발전시간대에는 계통의 전력을 공급받아 세대에서 사용하였다. Table 3은 Fig. 3의 일간 PV 발전량과 전력사용량, PV 잉여 전력량을 표로 정리한 것이다. 날씨가 좋은 특정 6일의 일간 평균 PV 발전량은 5.9 kWh였고, 전력사용량은 7.6 kWh, 그리고 잉여 전력량은 3.2 kWh로 계산되었다.

Table 3 Daily operation characteristic data of roof-top PV

Household	Date	Weather (mean cloud amount/ d, rainfall/d)	PV electrical energy (kWh/d)	Load electrical energy (kWh/d)	Surplus electrical energy (kWh/d)
E	2021.08.10. (Tue)	4.5, 0 mm	5.5	8.5	3.6
B	2021.08.16. (Mon)	3.8, 0 mm	5.1	7.7	2.4
D	2021.09.14. (Tue)	2.4, 0 mm	6.2	9.0	2.7
H	2021.09.14. (Tue)	2.4, 0 mm	6.2	7.0	3.4
G	2021.09.30. (Thu)	2.0, 0 mm	6.1	8.9	3.1
E	2021.10.17. (Sun)	0.0, 0 mm	6.3	4.4	4.1
Average	-	2.5, 0 mm	5.9	7.6	3.2

Fig. 3 Daily operation characteristics of roof-top PV

3.2 옥상 PV 연계 BESS의 일간 운전특성 분석

옥상 PV와 연계한 BESS의 운전은 PV 단독 운전에서 차단되었던 배터리 관련 기능이 모두 사용되었다. BESS는 세대에 공급되고 남은 PV 발전량을 배터리에 저장하고, PV 발전시간대와 관계없이 배터리를 방전하여 세대에 잉여 전력량을 공급한다. Fig. 4는 날씨가 좋은 특정 일자와 세대의 일간 전력사용량과 PV+BESS 출력량을 그래프로 정리하여 PV와 BESS의 운전특성을 표현한 것이다. 공통적으로 세대 전력사용량은 음(-)의 값이 거의

Fig. 4 Daily operation characteristics of BESS connected to roof-top PV

없는 것으로 보아 세대 밖의 계통으로 역전송되는 PV 잉여 전력량이 거의 발생하지 않았고, PV+BESS 출력량은 시간과 관계없이 일간 일정하게 세대에 공급되는 것으로 확인되었다. PV 비발전시간대인 0시부터 6시까지와 19시부터 24시까지의 PV+BESS 출력량은 배터리에 저장되었던 PV 잉여 전력량의 방전 전력량을 의미한다. Fig. 4의 (a)는 오전 PV 발전시간대에 PV 발전량이 세대에 공급되는 동시에 배터리에 충전되었고, 13시 30분쯤에 배터리가 완충된 것을 보이고 있다. 배터리 완충 이후 시간부터는 세대 전력사용량이 크기 때문에 세대 밖으

로 역전송되는 것 없이 세대에서 PV+BESS 출력량이 모두 사용되었고, 18시부터는 배터리 방전이 시작되었다. Fig. 4의 (e)는 14시에 배터리가 완충되었고, 14시부터 18시 사이에는 세대 전력사용량이 PV 발전량보다 작아 잉여 전력량이 계통으로 공급되었으며, 18시부터는 배터리가 방전이 된 것으로 확인된다. 배터리 완전 충·방전의 시작시간은 전일의 PV 발전량, 세대 전력사용량 등의 영향을 받는다. Table 4는 Fig. 4의 일간 PV+BESS 출력량과 전력사용량, PV 잉여 전력량을 표로 정리한 것이다. 날씨가 좋은 특정 6일의 일간 PV+BESS 출력량은 4.8 kWh였고, 전력사용량은 6.3 kWh, 그리고 잉여 전력량은 0.3 kWh로 계산되었다.

Table 4 Daily operation characteristic data of BESS connected to roof-top PV

Household	Date	Weather (mean cloud amount/d, rainfall/d)	PV+BESS electrical energy (kWh/d)	Load electrical energy (kWh/d)	Surplus electrical energy (kWh/d)
H	2021.08.07. (Sat)	3.3, 0 mm	5.5	7.8	0.2
A	2021.08.16. (Mon)	3.8, 0 mm	4.6	5.5	0.1
A	2021.08.17. (Tue)	5.5, 9.3 mm	4.2	7.2	0.0
H	2021.08.17. (Tue)	5.5, 9.3 mm	4.2	8.1	0.2
C	2021.09.15. (Wed)	0.6, 0 mm	5.3	3.9	0.9
C	2021.09.18. (Sat)	2.3, 0 mm	4.8	4.9	0.2
Average	-	3.5, 2.7 mm	4.8	6.3	0.3

3.3 옥상 PV 연계 BESS의 전력사용량 절감율 분석

옥상 PV와 연계한 BESS의 전력사용량 절감효과는 PV와 BESS의 미설치과 설치 시의 일간 전력사용량으로 분석되었다. PV 단독 설치 시의 일간 전력사용량은 Table 3의 특정 6일간 평균 전력사용량인 7.6 kWh를 활용하였고, PV 연계 BESS 설치 시의 일간 전력사용량은 Table 4의 특정 6일간 평균 전력사용량인 6.3 kWh를 활용하였다. PV와 BESS 미설치 시의 일간 전력사용량은 계측된 특정 6일간 평균 PV 발전량 또는 PV+BESS 출력량과 잉여 전력량으로 세대에서 사용한 PV 발전량 또는 PV+BESS 출력량을 추정하여 실제 일간 평균 전력사용량의 합계로 계산되었다. PV 미설치 시의 일간 평균 전력사용량은 10.2 kWh였고, PV 연계 BESS 미설치는 10.7 kWh로 계산되었다. Fig. 5는 시스템 미설치를 기준으로 PV 단독 운전과 PV 연계 BESS 운전에서 따른 일간 평균 전력사용량의 절감율을 그래프로 표현한 것이다. PV를 단독으로 운전하였을 경우 일간 전력사용량은 약 26.0%가 절감되었고, PV 연계 BESS의 운전은 약 41.8%의 절감효과를 보였다.

추가적으로 평균 운량과 전력사용량 절감율의 관계를 통해 전기요금의 절감효과를 검토하였다. Fig. 6은 운전설비별 평균 운량 대비 특정 6일간의 일간 전력사용량 절감율을 분산형과 추세선으로 표현한 것이다. 월 평균 운량은 기상청 기상자료개방포털⁸⁾에서 제공하는 서울의 월 평균 운량 정보를 활용하였다. 월별 전력사용량 절감율은 Fig. 6에서 계산한 평균 운량과의 선형 관계식으로 계산하였다. 연간 월별 전력사용량의 평균 절감율은 PV 단독 운전 시 17.7%이고, BESS와 함께 운전할 경우 33.1%이다. 2020년 연 평균 월간 전력사용량은 전력대

이터 개방 포털시스템의 가구 평균 전력사용량 정보에 따르면 전국 239.1 kWh, 서울 243.0 kWh이다⁹⁾. 전국 평균 월간 전력사용량을 기반으로 전력사용량 절감율을 적용하면 PV 단독 운전 시의 전력사용량은 188.5 kWh이고, PV 연계 BESS는 153.19 kWh이다. 월간 전기요금은 주택용(저압)으로 한국전력공사에서 제공하는 전기요금계산기¹⁰⁾를 활용하여 계산하였다. 세대에서 납부해야 하는 월간 전기요금은 시스템 미설치 시 28,520원이었고, PV 단독 운전은 15,840원, PV 연계 BESS 운전은 12,230원이었다. 시스템 미설치를 기준으로 월간 전기요금 절감율은 PV 단독 운전 시 약 44.5%, PV 연계 BESS 운전은 57.1%로 산출되었다. 세대에서는 BESS의 활용으로 PV 잉여 전력량을 사용하여 일간 및 월간 전력사용량과 전기요금을 절감할 수 있었다.

Fig. 5 Electrical energy saving rates in case of PV only and BESS connected to PV

Fig. 6 Variations of electrical energy saving rates with the mean cloud amount by PV only and BESS connected to PV

4. 결론

본 연구에서는 다세대주택 1개동 8세대를 대상으로 옥상 PV 연계 BESS의 활용에 따른 전력사용량의 절감효과를 실증결과를 토대로 분석하였다. 실증 운전기간은 8월 중순부터 10월 중순까지의 2개월이며, 날씨가 좋은

특정일과 특정세대의 12일간의 평균 수전량과 PV+BESS 출력량을 분석하였다.

- (1) 세대별 1.2 kW 옥상 PV 단독 운전 시 날씨가 좋은 주간에는 잉여전력량이 상당히 발생하며, 발생한 잉여전력은 계통으로 역 전송되었다. 옥상 PV 연계 BESS의 운전 시, PV 잉여 전력량은 배터리에 저장되어 거의 발생하지 않았고, PV 발전시간대와 관계없이 하루 중 일정하게 세대에 공급되어 수전량을 최소화 하였다.
- (2) 다세대주택 세대당 1.2 kW 옥상 PV를 설치할 경우, 날씨가 좋은 특정 6일간의 평균 전력사용량은 PV 설치 후 약 26.0% 절감되었고, PV 연계 4.1 kWh급 BESS 설치 후에는 잉여전력량을 최소화하여 약 41.8%가 절감되었다. 실증 운전기간 12일간의 평균 운량과 평균 전력사용량 절감율의 관계를 통해 계산한 가구당 월간 평균 전기요금 절감율은 PV 단독 운전의 경우 44.5%이고, PV 연계 BESS 운전의 경우는 57.1%에 달하였다. 따라서 상계처리가 안 되는 공동주택에서는 일정 용량 이상의 PV 설치시 BESS가 잉여전력 최소화 및 전기요금 절감측면에서 필요하다는 것을 알 수 있다. 추후 PV 연계 가정용 BESS가 보급된다면 공동주택 세대 내 에너지자립률 향상을 통해 제로에너지건축물 보급에 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20172410104720).

REFERENCES

1. Ministries of Korea Government, 2050 Carbon Neutrality Scenario Plan, 2021.
2. 2050 Carbon Neutrality Committee, 2050 Carbon Neutrality Scenario, 2021.
3. Seoul Metropolitan Government, Mini Photovoltaic Power Plant Application/Supplier. 2020. <http://solarmap.seoul.go.kr/mini/minisolarRequest15.do>. last accessed on the 27th October, 2021.
4. Korea Electric Power Corporation (KEPCO), Regulations on the Use of Electrical Equipment for Transmission and Distribution, 2021.
5. Kim, C., Eum, J., and Kim, Y., Analysis of Energy Saving Effect of the Residential BESS Connected to the Balcony-PV in Apartment Houses, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 40, No. 3, pp. 21-31, 2020.
6. Eum, J. and Kim, Y., Analysis on Operation Modes of Residential BESS with Balcony-PV for Apartment Houses in Korea, Sustainability Vol. 13, No. 1, p. 311, 2021.
7. Korea Meteorological Administration (KMA), Past Observation, 2021. <https://www.weather.go.kr/w/obs-climate/land/past-obs/obs-by-day.do>. last accessed on the 27th October, 2021.
8. Open MET Data Portal System of Korea Meteorological Administration (KMA), Synoptic Meteorological Observation, 2021. <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36>. last accessed on the 9th November 2021.
9. Open Power Data Portal System of Korea Electric Power Corporation (KEPCO), Household Average Power

- Consumption, 2021. <https://bigdata.kepco.co.kr/cmsmain.do?scode=S01&pcode=000171&pstate=L&redirect=Y>. last accessed on the 9th November 2021.
10. Korea Electric Power Corporation (KEPCO), Electric Rates Calculation, 2021. <https://cyber.kepco.co.kr/ckepco/indexnfl.jsp>. last accessed on the 9th November 2021.