

실측데이터 기반 소규모 태양광발전소 연계용 ESS 효율 분석에 관한 연구

A study on the efficiency of ESS installed in a small solar power plant based on actual data

윤금란*, 이태규*, 김정욱**★

Geum-Ran Youn*, Tae-kyu Lee*, Jeong-Uk Kim**★

Abstract

We analyzed the system efficiency of small solar power plants with 80% of total solar power plants. The data of the solar power plant with installed capacity of 100kW was collected and the correlation of the ESS efficiency according to the capacity of the PCS and the battery of each power plant was deduced. As a result, the higher the C-rate value affecting the discharge rate of the battery, The discharge efficiency of the plasma display panel is increased.

요약

본 연구에서는 전체 태양광발전소의 80%를 차지하고 있는 소규모 태양광발전소의 에너지저장장치 연계에 따른 시스템 효율을 분석하였다. 설치용량이 100kW인 태양광발전소의 데이터를 수집하고 각 발전소의 PCS와 배터리의 용량에 따른 ESS 효율의 상관관계를 도출하였으며 결론적으로 배터리의 방전속도에 영향을 미치는 C-Rate의 수치가 높을수록 ESS의 방전효율이 높아지는 것으로 나타난다.

Key words : Photovoltaic Power Plant, Energy Storage System(ESS), Efficiency, C-Rate, Charge, Discharge

1. 서론

1. 연구의 배경

최근에는 신재생에너지발전이 활발히 보급되고 전력계통에 연결되는 선로 용량이 증가하였고, 에너지저장장치(ESS)가 설치되면서 발전소의 운영 알고

리즘, 발전효율에 대한 연구들이 진행되었으며, 간헐적인 신재생에너지발전의 특징 때문에 에너지저장장치(이하 ESS)에 대한 이슈가 크게 대두되어 왔다. 실제로 한국에너지공단에서는 ESS와 태양광 발전을 연계할 경우 REC 가중치를 5.0으로 책정하였다.[1] 계통 관점에서 ESS는 신재생에너지발전

* MS course, Dept. of Energy-grid, Sangmyung University

** Professor, Dept. of Electrical Engineering, Sangmyung University

★ Corresponding author

E-mail : jukim@smu.ac.kr, Tel : +82-2-781-7602

※ Acknowledgment

Manuscript received May. 13, 2019; revised Jun. 17, 2019; accepted Jun. 26, 2019.

This work was supported by the Korea Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP)(20164030300230) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

원의 간헐성을 완화하는 효과가 있으며, 특히 봄/가을 및 동절기의 높은 야간전력 수요에 효율적이다. 태양광발전에 의해 생산된 전력은 ESS에 저장되고, 10시~16시까지 전력을 공급받아 ESS에 충전하고 전력을 충전시간 외에 방전하여 송전한다.

국내에 보급되어 있는 태양광 발전소는 설치용량 100kW 이하 급이 80% 이상을 차지하고 있으며, 현재 대부분 MW 급 태양광발전소의 경우에만 ESS를 설치 운영하고 있는 실정이다. 추후 100 kW 이하 급의 태양광 발전소 ESS 연계는 빠르게 확산될 것으로 예상되므로 소규모의 태양광 발전소의 에너지저장장치(ESS)에 대한 실측 사례 분석이 필요한 것이다. 본 연구에서는 100kW급의 16개 태양광발전소 연계형 ESS 설치 사례를 바탕으로 PCS의 용량, 배터리의 용량에 따른 ESS의 효율을 분석하고자 한다.

2. 선행연구 분석

ESS는 보급 확산에 따라 총 투자비용, 변동비 등을 선행하여 분석할 필요가 있고 태양광발전량 대비 충전량, 계통 방전 전력량 등 ESS의 경제성에 대한 분석이 요구된다. 이용봉(2015) 외는 ESS와 신재생에너지 연계에 따른 경제성 분석을 위해 태양광발전 및 풍력발전 연계 사례를 분석하였으며 ESS 보급 촉진을 위해 추가적인 정책지원이 필요함을 시사하였다.[2]

홍종석(2015) 외는 전력부하의 증가와 분산전원의 확대에 따라 일반 수용가에 ESS를 설치하는 것이 경제적인 효과를 극대화 할 수 있는지에 대해 경제성 평가를 수행하였으며 ESS의 적정용량을 선정하기 위한 ESS 연간 충·방전계획 수립 모형을 생성하고 모형을 바탕으로 최적용량 선정 방안을 제시하였다. 박성준(2010) 외는 태양광 발전용 PCS 연구 동향 연구에서 소규모 태양광 발전용 PCS 특징을 자세히 기술하고 있으며 인버터의 유형별 특징을 소개하였다. 최윤석(2018) 외는 PV-BESS 시스템의 적정 PCS, 배터리 용량 산정을 위해 시뮬레이션 연구를 수행하였으며 결과적으로 1MW 규모의 태양광 발전소에서는 700kW의 PCS와 3MWh의 배터리 설치가 최적 조건임을 제시하였다. 정승국(2018) 외는 태양광 발전전력을 효율적으로 사용하기 위해 ESS 도입을 적극 권장하고 있는 시점에서 최적 ESS 도입 용량을 산정하기 위해 태양광

발전 시설의 실측 데이터를 활용하여 발전량과 도입 용량별 이용률과 수명을 분석하였다. 현재 국내 에너지저장장치에 대한 연구가 다수 수행되고 있지만 ESS의 효율을 높이기 위한 연구는 여전히 미흡한 실정이다.[3, 4, 5, 6]

II. 연구의 개요

1. 연구의 방법

본 연구의 수행방법은 아래 Fig. 1과 같다. 국내 설치용량 100kW의 16개 태양광발전소를 대상으로 실측 데이터를 취득하였다.

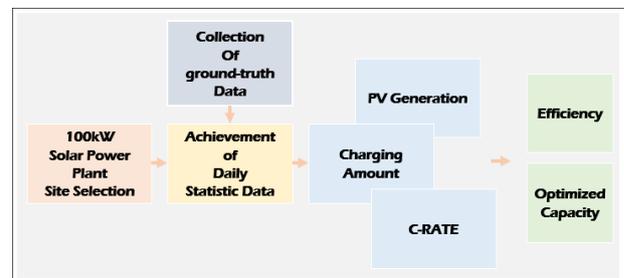


Fig 1. Flow-chart of the study.

그림 1. 연구 흐름도

신재생에너지 발전설비와 ESS의 충·방전 전력량을 제어하는 통합전력관리시스템(PMS)을 통해 2018년도 9월 1일부터 2018년도 12월 31일까지 약 4개월 동안의 데이터를 수집하였다. 실측데이터를 바탕으로 PCS의 용량, 배터리 용량에 따른 충·방전 효율을 산출하였다.

III. 본론

1. 태양광발전 연계형 ESS

태양광 연계형 ESS는 낮(10시부터 16시)동안 생산된 전기를 배터리에 충전하고 충전된 전기를 이 외 시간에 방전하는 운영원칙에 따른다. 각 발전소에 설치한 ESS 시스템은 배터리, PCS, BMS, 계통 연계시스템, 계량장치 등으로 구성되어 있다. PCS는 태양광발전으로 생산된 전력을 배터리에 충전하고 필요 시 방전하도록 제어한다. PCS 운전이력 기록은 독립적인 저장장치에 기록된다. PCS의 용량은 태양광발전에서 생산된 전력을 규정된 시간에 배터리에 저장하고, 그 이후에 계통으로 방전시

킬 수 있는 용량으로 선정하였다.

2. 대상 발전소 선정

아래 Table 1과 같이 태양광발전소를 선정하였다. 모두 설치용량이 100kW급인 소규모 태양광발전소이며 상대적으로 태양일사량이 많은 남부지역에 위치하고 있으며 소규모 태양광 발전소들이 밀집되어 있는 지역이기도 하다. 사이트는 제주가 5곳으로 가장 많았고 광주 4곳 등 총 16개의 발전소를 대상으로 선정하였다.

Table 1. PV capacity for each domestic plant.

표 1. 국내 6개 발전소의 설치용량

Plant Name	Location	Capacity[kW]
A	Cheong-ju	100
B	Ik-san	100
C	Gwang-ju	100
D	Nam-won	100
E	Nam-won	100
F	Dang-jin	100
G	Je-ju	100
H	Je-ju	100
I	Je-ju	100
J	Je-ju	100
K	Je-ju	100
L	Gwang-ju	100
M	Gwang-ju	100
N	Eu-sung	100
O	Mok-po	100
P	Gwang-ju	100

3. PCS와 Battery 구성

국내 16개 발전소의 PCS, Battery 설치용량 현황은 다음과 같다. 발전소 A, B, C의 경우 해외 P사 50kW 용량의 PCS를 사용하였으며 약 97%의 제품 효율을 갖는다. 발전소 D, E는 상대적으로 용량수치가 높은 I사 100kW PCS로 효율은 약 96% 수준, 그 외 나머지 발전소는 K사의 PCS를 설치하였다. 배터리의 경우 16개 발전소 모두 국내 S사 배터리를 사용하였으며 발전소 A, B, C, F는 205kWh 용량 D, E 발전소는 각각 274kWh, 411kWh 용량의 배터리가 설치되었다. 상세현황은 아래 Table 2와

같다. PCS는 배터리의 충전 시와 방전 시의 특성을 변환 보완하기 위한 전력변환장치이며 일반적으로 교류를 직류로 변환하는 컨버터와 직류를 교류로 변환하는 인버터의 역할을 수행한다. 본 연구의 대상인 태양광발전소에 도입된 배터리의 경우 리튬이온 셀로 구성되어 있으며 BMS에 의해 하루 총 5시간의 방전 스케줄로 운영되고 있다.

Table 2. PCS/Battery specification for each plant.

표 2. 각 태양광발전소의 PCS와 Battery 상세

Category	PCS	Battery
Plant	Capacity[kW]	Capacity[kWh]
A	50	205
B	50	205
C	41	205
D	100	275
E	100	411
F	80	205
G	100	274
H	100	274
I	100	274
J	100	274
K	100	274
L	80	205
M	80	205
N	100	274
O	100	274
P	100	274

4. 배터리의 C-Rate

C-Rate은 배터리의 충·방전 시 배터리의 사용시간을 표기하기 위한 단위로 사용되며 1C의 C-Rate을 정격으로 갖는 1Ah의 배터리는 1시간동안 1A의 전류를 공급함을 뜻한다. 따라서 배터리의 충전 및 방전속도는 C-Rate에 의해 결정된다.

예를 들어 C-Rate에 따른 배터리의 사용시간은 아래 Table 3과 같다.[7]

본 연구에서 선정한 16개의 발전소는 아래 Table 4와 같은 정격 C-Rate을 갖고 있다. 각 발전소의 배터리 용량과 정격 C-Rate 값을 통해 배터리 사용시간을 알 수 있으며 그에 따른 일일 충·방전 효율을 산정할 수 있다.

Table 3. Battery Discharge Time for each C-Rate.

표 3. C-Rate에 따른 배터리 사용시간

C-Rate	Discharge Time	Battery
1C	1h	1Ah (1,000mAh)
0.5C	2h	
0.2C	5h	
0.1C	10h	

Table 4. C-Rate for each plant.

표 4. 각 태양광발전소의 C-Rate

Plant	C-Rate[C]
A	0.24
B	0.24
C	0.20
D	0.36
E	0.24
F	0.39
G	0.36
H	0.36
I	0.36
J	0.36
K	0.36
L	0.39
M	0.39
N	0.36
O	0.36
P	0.36

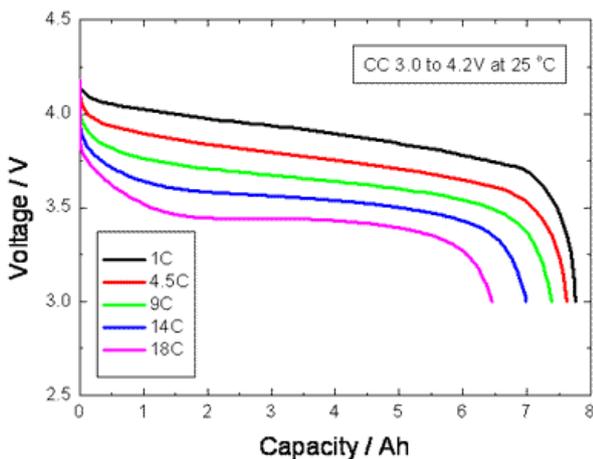


Fig. 2. Capacity vs Voltage Compare.

그림 2. Capacity와 Voltage간의 관계

C-Rate는 전지의 충·방전 시 다양한 사용조건 하에서의 전류값 설정 및 전지의 가능 사용시간을 예측하거나 표기하기 위한 단위로서, 충·방전율에 따른 전류값의 산출은 충전 또는 방전전류를 전지

정격용량의 단위를 뺀 값으로 나누어 충·방전 전류값을 산출한다.

$$C\text{-Rate (A)} = \text{충} \cdot \text{방전전류(A)} / \text{전지의 정격용량}$$

IV. 실험결과

1. 태양광 발전량 비교

2018년 9월 1일부터 12월 31일까지 취득한 실측 데이터를 바탕으로 각 발전소의 4개월간의 태양광 발전량을 비교하였다. 결과는 아래 Table 5와 같고 Fig. 3에 도식화하였다. 9월에는 광주광역시에 위치한 P발전소의 발전량이 가장 많은 것으로 나타났다. 16개 발전소의 9월 평균 발전량은 250[kWh]였으며 상대적으로 제주에 위치한 I발전소의 발전량이 가장 적었다. 10월에도 마찬가지로 P발전소가 가장 많은 발전량을 나타내었고 I발전소의 발전량이 가장 적은 것으로 나타났다. 10월 평균 발전량은 281[kWh]로 9월에 비해 다소 많았다. 11월과 12월에는 목포시에 위치한 O발전소의 발전량이 가장 많았고 11월을 제외한 9, 10, 12월에 I발전소의 발전량이 가장 적은 것으로 나타났다. 특히 12월의 I발전소 태양광 발전량은 평균에 비해 약 34% 낮은 수치를 보였다. 4개월간 총 발전량은 P 발전소에서 가장 많았고 평균 총 발전량에 비해 20% 많았다. 결과적으로 태양광발전소의 발전효율은 P 발전소가 가장 높았고 I 발전소에서 가장 낮은 것으로 나타났다.

Table 5. Monthly PV generation comparison.

표 5. 각 태양광발전소의 월별 발전량 비교

Cat	Total PV Generation [kWh]							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Sep	235	290	247	254	240	231	262	259
Oct	276	310	251	260	268	251	303	299
Nov	247	243	194	197	242	210	267	261
Dec	259	247	202	189	228	195	216	188
T	1016	1090	894	900	978	886	1049	1007

Cat	Total PV Generation [kWh]							
	I	J	K	L	M	N	O	P
Sep	203	240	224	251	221	261	276	301
Oct	232	257	257	307	299	294	291	345
Nov	242	254	254	283	272	238	316	314
Dec	143	154	153	244	233	255	306	239
T	820	905	889	1084	1025	1048	1189	1199

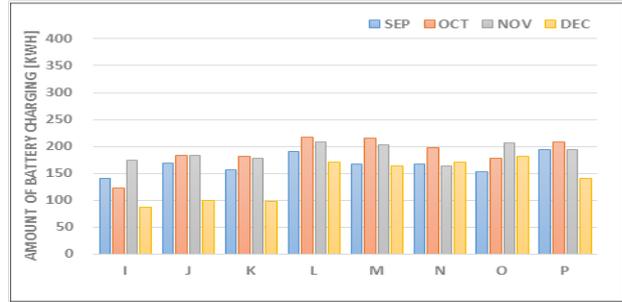
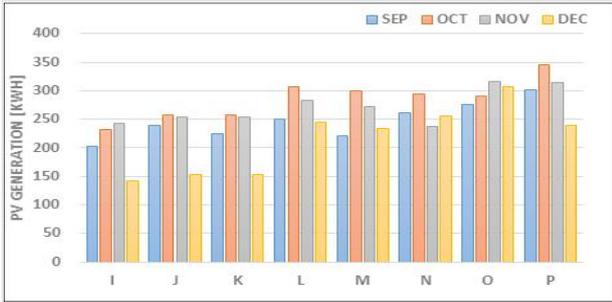
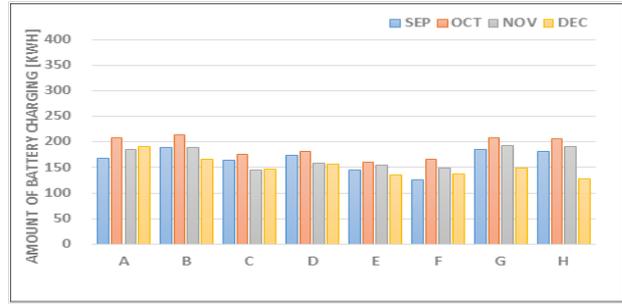
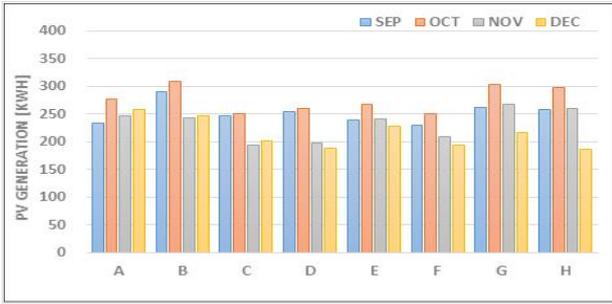


Fig. 3. Monthly PV generation comparison.
그림 3. 태양광발전소의 월별 발전량 비교

Fig. 4. Monthly amount of charging comparison.
그림 4. 태양광발전소의 월별 충전량 비교

2. 배터리 충전량 비교

태양광 발전에 따른 배터리 충전량은 아래 Table 6과 같이 9월에는 태양광발전 효율이 가장 높았던 P발전소의 충전량이 최대였고 당진에 위치한 F발전소의 충전량이 가장 적었다. 10월부터 11월에는 L발전소의 충전량이 가장 많았고 12월에는 A발전소가 가장 많은 것으로 나타났다. 4개월간의 총 배터리 충전량은 L발전소에서 가장 많았고 전체 평균에 비해 16% 많았다. 배터리 충전효율이 가장 낮았던 발전소는 I발전소이며 평균대비 77%의 성능을 보였다. 배터리의 월별 충전 경향은 아래 Fig. 4과 같다.

Table 6. Monthly amount of charging comparison.
표 6. 각 태양광발전소의 월별 충전량 비교

Cat	Total PV Generation [kWh]							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Sep	168	189	164	173	145	127	185	182
Oct	209	213	175	182	160	165	207	206
Nov	185	188	146	158	155	150	194	190
Dec	192	166	147	156	136	137	148	128
T	754	757	633	668	596	579	734	706

Cat	Total PV Generation [kWh]							
	I	J	K	L	M	N	O	P
Sep	141	170	156	191	167	168	153	195
Oct	123	184	181	218	215	198	179	208
Nov	174	184	177	208	204	165	206	194
Dec	87	99	97	171	163	170	182	141
T	524	637	612	787	749	700	719	738

3. 배터리 방전량 비교

배터리의 방전량을 분석한 결과를 Table 7에 정리하였으며 Fig. 5를 통해 도식화하였다. 9월과 10월에는 P발전소의 방전량이 많은 것으로 나타났으며 11월과 12월에는 O발전소의 방전량이 많았다. 반면 전체 방전량은 L발전소에서 가장 많은 것으로 나타났다. L발전소는 대체로 전체 발전소의 평균 월별 방전량에 비해 11%~14% 높게 나타났다.

Table 7. Monthly amount of discharging comparison.
표 7. 각 태양광발전소의 월별 방전량 비교

Cat	Total PV Generation [kWh]							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Sep	168	189	164	173	145	127	185	182
Oct	209	213	175	182	160	165	207	206
Nov	185	188	146	158	155	150	194	190
Dec	192	166	147	156	136	137	148	128
T	754	757	633	668	596	579	734	706

Cat	Total PV Generation [kWh]							
	I	J	K	L	M	N	O	P
Sep	141	170	156	191	167	168	153	195
Oct	123	184	181	218	215	198	179	208
Nov	174	184	177	208	204	165	206	194
Dec	87	99	97	171	163	170	182	141
T	524	637	612	787	749	700	719	738

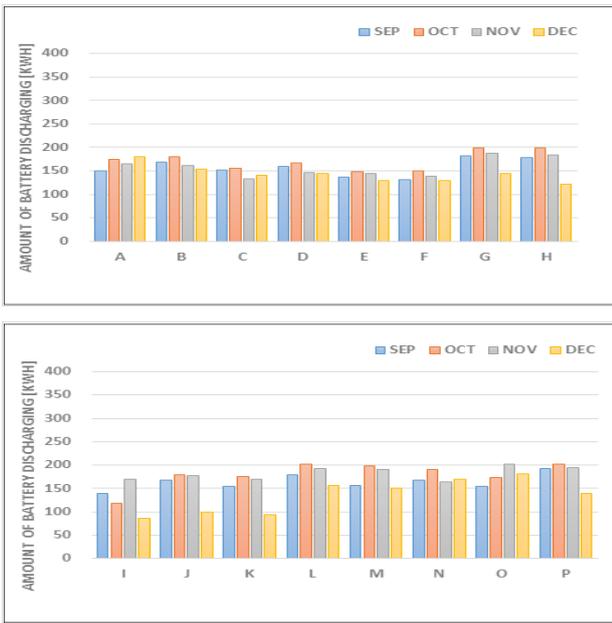


Fig. 5. Monthly amount of discharging comparison.
그림 5. 태양광발전소의 월별 방전량 비교

4. ESS 효율 비교

태양광발전 연계형 ESS의 효율은 배터리 충전효율과 배터리의 방전효율에 의해 산정된다. 각 발전소의 충·방전효율을 Table 8에 정리하였으며 Fig. 6는 각 발전소의 ESS 효율을 비교한 그래프이다. 결론적으로 B 발전소의 효율이 약 71%로 가장 높은 것으로 나타났다. 효율이 가장 낮은 C 발전소에 비해 약 14% 높은 수치이다. 전체 발전소의 ESS

효율은 약 66%였으며 효율은 B-D-L-M-E 순으로 높았다.

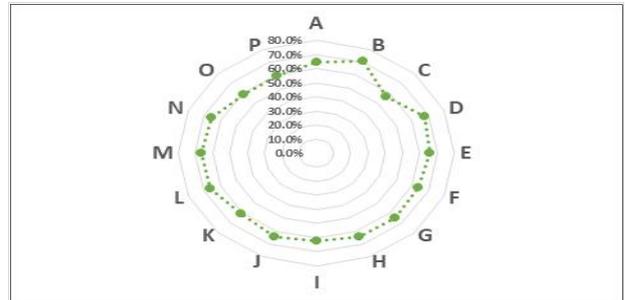


Fig. 6. Efficiency of ESS comparison.
그림 6. 발전소별 ESS 효율 비교

5. C-Rate에 따른 ESS의 충·방전효율 관계

ESS 시스템의 PCS 용량, 배터리 용량에 따른 C-Rate과 각 발전소의 발전량, 충전량, 방전량을 바탕으로 산정한 충전효율, 방전효율의 관계는 Fig. 7과 같이 나타났다. 먼저, 각 발전소의 C-Rate과 충전효율의 경우 두드러지는 상관관계를 찾을 수 없었다. 충전효율은 태양광발전소에 설치한 PCS의 변환효율 등을 함께 고려할 필요성이 있는 것으로 보인다. 반면, 방전효율의 경우 설치된 PCS, 배터리에 따른 C-Rate과 일정수준의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 결과적으로 C-Rate이 높을수록 방전효율이 높아지는 것으로 나타났다. 다만, 데이

Table 8. Efficiency of charging/discharging for each plant.
표 8. 각 태양광발전소의 충/방전 효율

Cat	Efficiency of charging	Efficiency of discharging
A	69.97%	92.70%
B	76.40%	92.59%
C	60.48%	94.10%
D	72.23%	93.62%
E	73.56%	89.39%
F	67.12%	95.64%
G	67.47%	96.45%
H	67.09%	95.89%
I	63.77%	97.37%
J	65.85%	97.23%
K	64.49%	95.05%
L	72.68%	91.56%
M	71.57%	92.58%
N	65.82%	99.36%
O	59.74%	99.02%
P	61.05%	97.51%



Fig. 7. Charging/Discharging Efficiency according to the C-Rate.
그림 7. C-Rate에 따른 충·방전효율

터를 취득한 발전소 사이트 수가 부족하며 실측데이터 기반의 결과 분석으로 인한 오차 등을 보완할 필요성이 있으며 취득 데이터 수가 많아질수록 상관관계가 명확해질 것으로 판단된다.

V. 결론 및 고찰

국내 신재생에너지 산업의 보급 확산 정책에 따라 ESS의 보급도 점차 확산되어 왔다. 전체의 약 80%를 차지하는 소규모 태양광발전소에 ESS를 도입하는 사례가 점차 확대될 것으로 예상되며 발전소의 효율적인 운영을 위한 방안으로 최대의 태양광발전량과 최적의 ESS 용량을 산정하는 것이 매우 중요할 것이다. 최적 용량을 산정하기 위한 방안으로 본 연구에서는 실제 16개 100kW 용량의 태양광발전소 사이트를 선정하고 데이터를 수집하여 일정기간 실측 데이터를 기반으로 ESS 설비와 효율의 상관관계를 도출하였다. 결론적으로 ESS의 방전효율은 C-Rate과 확률적 상관관계가 있는 것으로 보여지며, 방전효율을 높이기 위해 태양광 발전소의 PCS 용량과 Battery의 용량을 적절한 비율로 산정하여 C-Rate에 따른 방전속도를 높이는 것이 효율을 향상하게 된다. 본 연구의 결과는 향후 에너지저장장치(ESS) 효율에 관한 실측 연구에 활용될 수 있으며 특히 실제 사례를 바탕으로 도출한 결과임에 의미가 있다. 연구대상 발전소 사이트 수가 한정적이므로 명확한 상관관계를 도출하기 위해 향후 최대한 많은 사이트의 실측 데이터를 분석하여 충전효율에 대한 연구를 수행하여 최적의 ESS 설치법을 도출할 수 있을 것으로 보인다.

References

- [1] Dept. of Global Strategy Division, "Weekly Brief Issues of Energy," Korea Energy Corporation, vol.149, 2016.
- [2] Y. B. Lee, J. H. Kim, "Economic Feasibility of Energy Storage System connected with Solar/Wind Power Generation," *Journal of Energy Engineering*, vol.24, no.3, pp.74-81, 2015. DOI: 10.5855/ENERGY.2015.24.3.074
- [3] J. S. Hong, H. S. Chae, J. P. Moon, "Calculation

of ESS Capacity of Industrial Customer through Economic Analysis," *KIEE*, vol.64, no.4, pp.273-276, 2015. DOI: 10.5370/KIEEP.2015.64.4.273

[4] S. J. Park, S. M. Park, J. H. Lee, "ESS utilization and related PCS technology status," *Journal of the world of electricity*, vol.66, no.1, pp.12-18, 2017.

[5] Y. S. Choi, S. Y. Na, "A Study on the Optimal Operation According to Appropriate PCS and Battery Capacity Estimation of PV-BESS System," *KIEE*, vol.67, no.9, pp.1174-1180, 2018. DOI: 10.5370/KIEE.2018.67.9.1174

[6] S. K. Jung, J. J. Lee, "A Study on the Optimal ESS Establishment Capacity by analyzing Annual Data of Solar Power," *Proceedings of the Korean Institute of Communication Sciences Conference*, pp.648-649. 2018.

DOI: 10.3390/en11040741

[7] MIT Electric Vehicle Team, "A Guide to Understanding Battery Specifications," *MIT*, 2008.

BIOGRAPHY

Geum-Ran Youn (Member)



2015 : Graduated from Computer Software Department of Sejong Cyber University.
2017 : Sangmyung Energy Grid Department Master's Cours.
2012~present : Representative director of Synerzen Co., Ltd.

Tae-Kyu Lee (Member)



2016 : BS degree in dept. of Energy-grid, Sangmyung University.
2017~2018 : Researcher in Green-Energy Laboratory.
2018 : MS course in dept. of Energy-grid, Sangmyung University.

Jeong-Uk Kim (Member)

1987 : BS degree in Control and instrumentation Engineering, Seoul National University.

1989 : MS degree in Electrical & Electronic Engineering, KAIST.

1993 : PhD degree in Electrical & Electronic Engineering, KAIST

2010~Present : Professor, Sangmyung Univ.