

마이크로그리드의 독립운영 및 연계운영에 관한 연구

A Study on the Independent Operation and Connected Operation of Microgrid

오현주¹, 박성준², 박성미³, 김춘성^{4*}

Hyun-Ju Oh¹, Sung-Jun Park², Seong-Mi Park³, Chun-Sung Kim^{4*}

〈Abstract〉

Fossil fuels are one of the various energy sources used by humans, and industrial development has been achieved by relying on fossil fuels for a long time in the past. In order to respond to the depletion of fossil fuels and climate change, the world is trying to build an eco-friendly energy ecosystem. Research on efficiency improvement using renewable energy and ESS in various ways for energy conversion is being promoted. In this paper, a microgrid for industrial complexes was designed, constructed, and demonstrated. It was operated in two modes: an independent mode that each plant generates and uses independently and a connected operation mode that allows energy sharing between factories. In the case of independent mode, PV and PCS were intermittently stopped and restarted according to the status change of SoC section of each site. But, in the case of the connected operation mode, stable power supply was confirmed through power transaction through the operation of the entire SoC. This paper presented and verified an algorithm to stably supply power to industrial complexes consisting of various consumers with different load characteristics.

Keywords : *Microgrid, Industrial Complex, Independent Operation, Connected Operation, Operation Algorithm*

1 정회원, 주저자, (재)녹색에너지연구원, 선임연구원
E-mail: okbanji42@naver.com

2 정회원, 참여저자, 전남대학교, 교수
E-mail: sjpark1@jnu.ac.kr

3 정회원, 참여저자, 한국승강기대학교, 교수
E-mail: seongmi@klc.ac.kr

4* 정회원, 교신저자, (재)녹색에너지연구원, 선임연구원
E-mail: minisung13@gei.re.kr

1 Main Author, Green Energy Institute, Senior Researcher

2 Co-author, Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Professor

3 Co-author, Dept. of Lift Engineering, Korea Lift College, Professor

4* Corresponding, Green Energy Institute, Senior Researcher
E-mail: minisung13@gei.re.kr

1. 서론

지속적인 화석연료 사용으로 기후변화 대응에 대한 각국의 노력이 활발하게 추진 중에 있으며, 친환경 에너지 산업 육성 및 기후협약 이행을 위해 미국과 EU를 중심으로 빠르게 확산하고 있다. 또한, 탄소중립, RE100 등 다국적 기업을 중심으로 글로벌 경쟁력 확보를 위한 다양한 이행 노력을 수행하고 있다.

RE100은 2050년까지 사용전력의 100%를 태양광, 풍력 등 재생에너지로만 충당하겠다는 다국적 기업들의 자발적 캠페인이지만, 사실상 신 무역 장벽으로 여겨지고 있다. 22년 7월 기준 376개사가 가입을 완료하였으며, 국내 기업도 21개사가 가입을 완료한 상태이다. 최근 삼성전자 역시 RE100 가입을 선언하면서 관련된 국내 기업에 대한 파급효과도 높아질 것으로 예상된다. 그러나, Table 1과 같이 우리나라의 경우 다른 나라와 비교하였을 때, 재생에너지 공급가격의 경우 약 40배, 태양광 발전단가의 경우 약 2~3배 차이가 있어 재생에너지 발전단가가 높은 국내에서는 극복해야 할 제약이 많이 남아있다.

이렇게 청정에너지로의 전환을 위해 다각도의 노력이 필요한 상황으로, 발전 시간의 제약이 있는 신재생에너지를 효율적으로 활용하기 위한 실증 연구가 활발하게 진행되고 있다. 급변하는 수요에 대한 안정적인 전력 공급과 에너지 효율 극대화를 위한 방법으로 소규모 지역에서 전력을 자급자족할 수 있는 전력망인 마이크로그리드가 등장했으며, 도서지역과 산업단지, 캠퍼스 등을 중심으로 빠르게 성장하고 있다. 이러한 마이크로그리드는 Table 2와 같이 계통 연계 여부에 따라 계

Table 1. Comparison of unit price by country

항 목	한국	중국	미국
재생에너지 공급가격(kWh당)	43원	1.2원	1.2원
태양광 발전단가(kWh당)	116원	42원	48원

통연계형과 독립형으로 분류된다[1][2].

이러한 마이크로그리드를 통하여 에너지 프로슈머를 확산시키고 중앙 발전원(석탄, 원전 등)의 발전부담 경감, 전력공급 안정성 확보, 수요측 전력요금 절감이 가능하며, ESS 및 ICT 산업 등 다양한 산업들과의 시너지를 극대화할 수 있는 융복합 기술로서 신산업 관심도가 높아짐에 따라 마이크로그리드 시장도 큰 폭으로 확대될 전망이다[3].

제조업은 우리나라 산업발전의 근간이 되는 분야로 국내 전력사용량의 대부분이 산업분야에 사용하고 있다. 21년 기준 전기사용량 중 산업용 비중은 55%로 일반용 22%, 주택용 15%, 농사용 4% 등 나머지 사용 부문보다 월등히 많은 것으로 나타난다. 또한, 최근 다양한 국내외 상황으로 인한 고물가·고금리·고환율 등으로 인한 전기요금 인상 계획에 따라 산업용 전기를 사용하는 제조업 등 에너지 다소비 기업의 전기요금 부담이 늘어날 것으로 예상된다.

Table 3과 같이 산업용 전기는 계절별/시간별 차등요금을 적용하고 있어 최대부하 시간대 전력

Table 2. Classification of microgrid

구분	계통연계형	독립형
특징	평상시, 계통에 연계하여 전력을 공급하며, 비상시, 계통에서 분리되어 무정전으로 전력 공급	고립된 지역(섬, 사막 등)에 다양한 전원을 적절하게 조합하여 독립적으로 전원 공급

Table 3. Application time of industrial electricity rate by load

구 분	여름철, 봄·가을철	겨울철
	6~8월, 3~5월, 9~10월	11~2월
경부하	23:00~09:00	23:00~09:00
중간부하	09:00~10:00	09:00~10:00
	12:00~13:00	12:00~17:00
	17:00~23:00	20:00~22:00
최대부하	10:00~12:00	10:00~12:00
	13:00~17:00	17:00~20:00 22:00~23:00

사용량 절감 및 계약전력을 초과하는 사용전력에 대해 신재생에너지를 활용한 전력공급 시 사용요금의 절감이 가능하다[4].

이렇게 소규모 지역에 사용처가 밀집되어 있는 산업단지를 대상으로 하는 마이크로그리드가 오랫동안 연구되어왔으며, 신재생에너지를 활용한 에너지 공급을 통한 에너지 효율화가 가능하다. 또한, 최근 ‘재생에너지 전기공급사업자의 직접전력거래 등에 관한 고시’를 통해 직접 PPA제도를 시행하면서 사용자가 전력시장을 통하지 않고 직접 전력판매자와 계약을 맺고 전기를 거래함으로써, 신재생 활용도 향상을 기대할 수 있다.

산업단지의 경우 다양한 수요처가 밀집되어 있는 곳으로 부하특성 또한 다양하다. 다양한 부하특성으로 인해 산업단지 마이크로그리드 운영시, 수용가는 자체 설비용량 외에도 설비 추가 증설 없이 거래를 통한 안정적 전력공급이 가능하며, 일시적으로 전력을 사용하는 수용가는 특성시간 전력공급을 위한 대용량의 설비 구축의 부담을 갖게 된다. 이러한 간헐적 부하사용처는 구축된 설비를 통해 부하 사용이 없는 시간대에 거래를 통해 추가 수익이 가능하게 되며, 전력 거래 수요처는 설비 추가 증설없이 값싼 전기를 구매하여 사용할 수 있다.

본 논문에서는 산업단지를 대상으로 마이크로그리드를 설계·구축하였고, 독립운영 및 연계운영을 위한 알고리즘을 적용하여 실증 운영하였다. 산업단지 수용가의 다양한 부하특성을 기반으로 전력 거래를 통한 안정적 부하공급 효과를 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 마이크로그리드 구성

본 연구는 산업단지 내 공장 4개소 및 공용시

설 1개소를 대상으로 하며, 각 수용가별 ESS 및 PV 발전설비, 전력변환설비를 구축하였다.

다음 Fig. 1은 수용가의 부하 패턴을 나타낸다. 산업단지의 부하 특성은 ‘나산’, ‘우리’, ‘공용시설’과 같이 24시간 부하를 사용하는 수용가와 ‘유민’, ‘백인’과 같이 일과시간에 전력사용량이 집중되는 수용가로 구분할 수 있다. ‘유민’, ‘백인’의 경우 일과시간(9시~18시)에 부하 사용이 집중되며 그 외 시간은 사용량이 미비하다. ‘나산’, ‘우리’의 경우 24시간 꾸준한 부하 사용을 나타내며, ‘공용시설’은

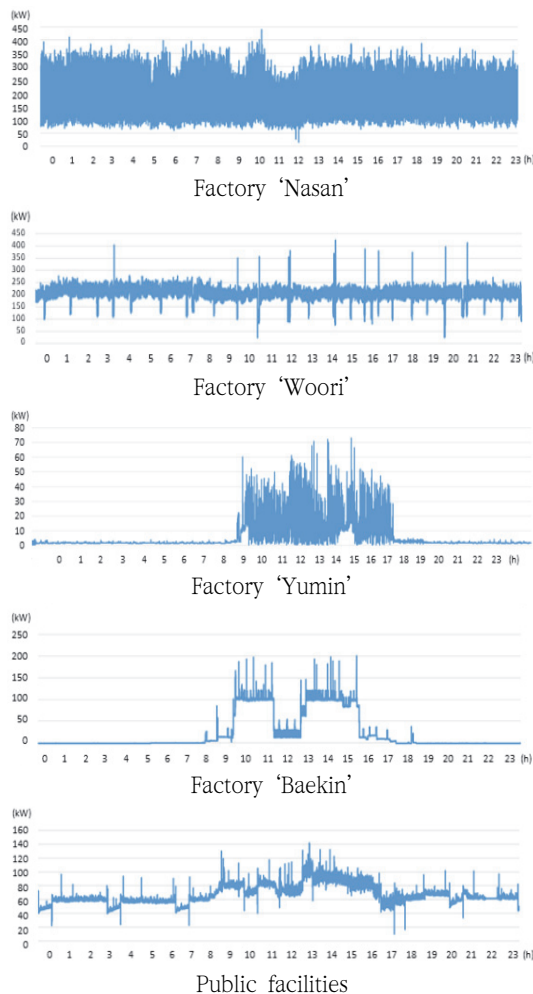


Fig. 1 Power pattern of demonstration site

24시간 부하 사용을 보이고 일과시간에 부하 사용이 증가하는 특성을 나타낸다. Table 4는 부하특성을 고려한 수용가별 설비용량을 나타낸다. 공용시설에 1.1MWh의 Main ESS를 구성하고 각 수용가별 ESS 및 PV, PCS 등 설비를 분산하여 구성하였다. 공용시설의 대용량 ESS는 전체 MG 시스템 LVDC Grid전압을 공급하며, 각 공장의 잉여전력을 흡수하여 부족한 부분으로 공급하는 역할을 수행한다.

산업단지의 경우 분산전원을 설치할 수 있는 공간적인 제약이 존재하며, 이로 인해 일반적인 설계 방법을 고려할 수 없다는 특성이 있다. 따라서 부하의 특성 및 설치공간의 공장 특성을 반영하여 전체 시스템 용량을 산정하였다.

Fig. 1은 선정 수용가의 부하특성을 나타내며, Table 4는 수용가에 설치된 설비 용량을 나타낸다. Fig. 2는 산업단지 마이크로그리드 전체 시스템 조

Table 4. Distributed resource capacity by site

사이트	PV (kWp)	ESS (kWh)	CHP (kW)	PCS (kW)	DC/DC CON*(kW)
나산	98.5	208	-	100	100
우리	46.9	110.5	-	50	50
유민	60.9	49.7	-	30	50
백인	46.9	49.7	-	30	30
공용	300	1,113	100	100	400



Fig. 2 Configuration of industrial complex microgrid

감도를 나타낸다. 각 실증사이트에는 PV, ESS, PCS 등이 각각 구축되어 있으며, 개별적으로 독립적인 운전이 가능하고, 별도의 DC망을 통해 공장 간 연계운전 및 전력 거래가 가능한 구조이다.

2.2 운전 알고리즘

산업단지 마이크로그리드의 독립운전 모드는 각 공장에 설치된 개별 설비를 통한 전력공급모드로 MG 연계망과는 독립적으로 구동되기 때문에 기준이 되는 SoC는 각 공장 ESS의 SoC가 된다. 반면, 연계운전 모드는 각 공장 간 ESS 공유에 따른 에너지 공유가 가능한 구조이며, 독립적인 제어운전 수행을 기반으로 하되, 공장의 SoC 상황에 따라 전력 거래 운전을 수행한다.

두 모드는 시간대별 스케줄링 운전을 통하여 오전 9시부터 오후 18시까지를 기본으로 하며, SoC는 10~90% 범위로 운전한다. 실증 대상지 '우리'의 경우 타 사이트와 별개로 리튬인산철 배터리를 사용하였다. 리튬 인산철의 경우 잦은 충방전에 대한 온도특성은 리튬이온에 비하여 우수하지만, SoC 변동의 선형성을 고려하여 20~80% 운영 범위로 달리 설정하였다.

2.2.1 독립운전 제어

Fig. 3은 독립운전 모드의 제어블록도를 나타낸다. 각 공장의 SoC에 따라 전력변환설비의 가용용량 내에서 운전을 수행한다. Table 5에서 독립운전 모드는 SoC 10% 미만일 때 PV가 PCS 지령치보다 작을 경우 PCS를 정지, SoC≥30% 도달했을 때 정상기동으로 복귀한다. SoC가 90% 초과하였을 경우, PV를 정지하며, SoC≤70% 도달했을 때 정상기동 복귀한다. 정상기동 복귀 시간은 산업단지 수용가의 부하특성에 의하여 선정되었으며, Gain과 함께 추후 부하 변화에 따른 가변성을 확보하였다.

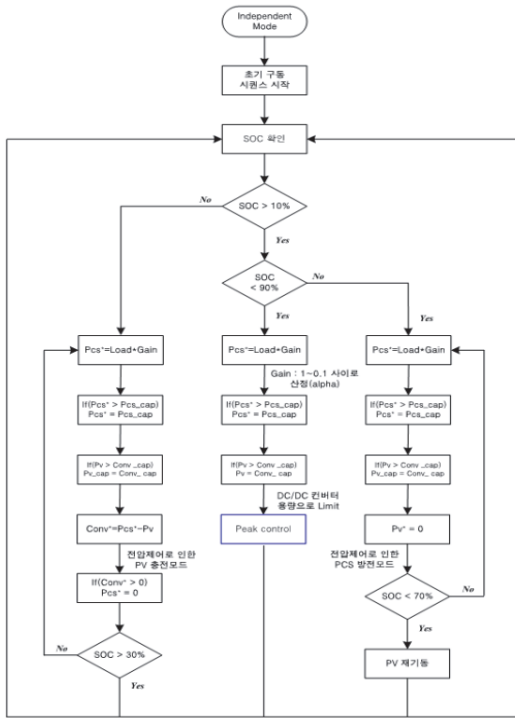


Fig. 3 Algorithm of independence operation

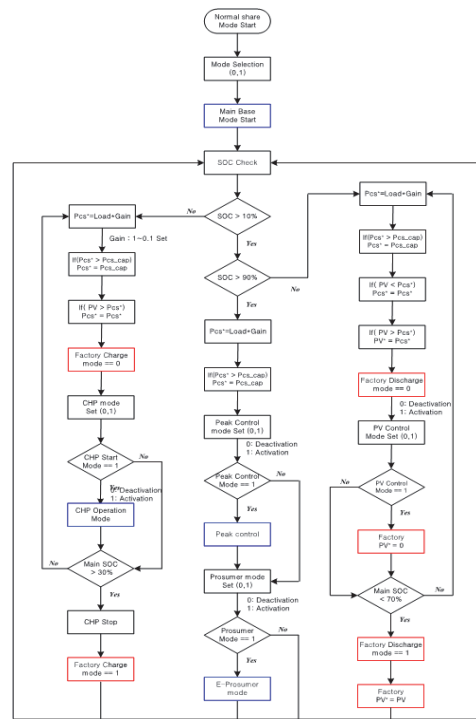


Fig. 4 Algorithm of connected operation

Table 5. Independence operation control

SoC	운전상태
SoC < 10	- PV(PCS일 때, PCS 정지 - SoC ≥ 30도달 후, 정상기동 (PCS 재기동)
10 ≤ SoC ≤ 90	- 정상기동
SoC > 90	- PV 정지 - SoC ≤ 70도달 후, 정상기동 (PV 재기동)

정상동작 구간에서 PCS의 출력은 부하량에 대응하여 Load×Gain(0.5)에 의해 변동되나, 피크제어가 적용되면 미리 설정된 피크값이나 용량, 피크 시간대에 대응하여 정격출력이 적용된다[5].

2.2.2 연계운전 제어

Fig. 4는 연계운전 모드의 제어블록도를 나타낸다. 공용시설 ESS의 SoC에 따라 전력변환설비의 가용용

Table 6. Connected operation control

SoC	운전상태
SoC < 10	- PV(PCS일 때, PCS 정지 - SoC ≥ 30도달 후, 정상기동
10 ≤ SoC ≤ 90	- 정상기동
SoC > 90	- PV 정지 - SoC ≤ 70도달 후, 정상기동

량 내에서 운영을 수행한다. 전력 거래는 개별 공장의 발전전력과 배터리 방전전력의 합이 PCS를 통한 공급 전력과 배터리 충전전력의 합보다 큰 경우 잉여전력이 발생하여 전력 거래가 가능한 조건이 된다.

Table 6과 같이 연계운전 모드의 경우, SoC가 10% 미만이고 PV가 PCS 지령치보다 작을 경우 PCS를 정지, SoC ≥ 30% 도달했을 때 정상기동으로 복귀한다. SoC가 90% 이상일 경우, PV를 정지하

며, $SoC \leq 70\%$ 도달했을 때 정상기동 복귀한다.

연계운전 모드의 경우, 공용시설 ESS의 SoC를 기준으로 모든 공장이 연계되어 기동되므로 공용 시설의 운전모드와 다른 공장의 운전모드는 상이한 특성을 갖는다.

연계운전 모드에서는 각 공장의 잉여전력을 공용시설에서 흡수하거나 부족전력을 공급하기 때문에 독립운전 모드와는 다르게 개별 공장의 SoC에 따라 PV를 제한하거나, 충방전을 위한 배터리 DC/DC 컨버터의 용량의 제한하여 기동하지 않고 부하량에 의한 지령치 생성 후 인버터의 정격 범위 내에서 운전을 수행한다. 공용시설 ESS SoC를 고려하여 용량을 제한하여 운영한다. 각 개별공장의 ESS SoC 활용범위를 초과하는 용량에 대해서는 공용시설 ESS에서 수용 가능하므로 독립운영에 비해 더 많은 용량의 활용범위를 갖는다.

2.3 운영 결과

Fig. 5는 공용시설의 독립운전에 따른 PCS 출력량, PV 출력량, SoC값, 부하량 결과 파형을 나타낸다. 공용시설의 경우, 24시간 일정 부하를 띄며, 간헐적으로 설비 기동에 따른 부하 증가가 있는 사이트이다.

PCS 출력파형에서 볼 수 있듯이 부하에 따라 $Load \times Gain(0.5)$ 의 지령치가 인가되고 있으므로 부하특성과 PCS 출력 특성 곡선이 동일한 특성으로 나타나는 것을 볼 수 있다.

또한, PCS를 통한 전력공급량에 비해 많은 태양광 발전량으로 인하여 오전 11시 SoC 최대값 도달에 따른 PV 정지를 통한 발전량을 제한하였으며, SoC Limit값(70%) 도달에 따라 PV 재기동을 통해 SoC가 다시 상승하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 실증 대상지 ‘우리’의 독립운전에 따른 결과 파형을 나타낸다. 위 공장은 재활용 플라

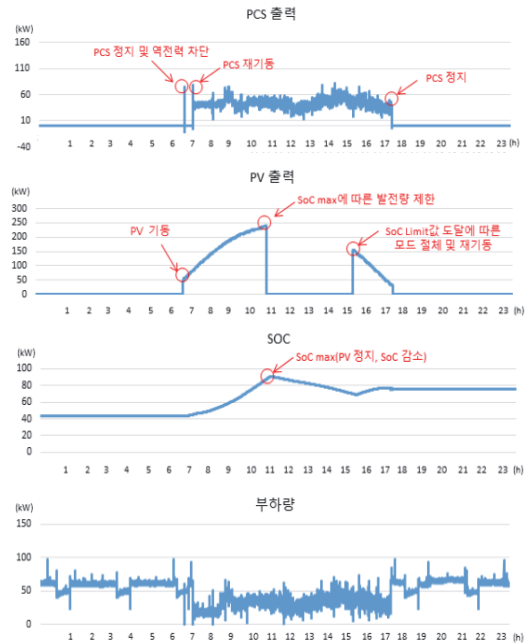


Fig. 5 Waveform of Independence operation (Public facility)

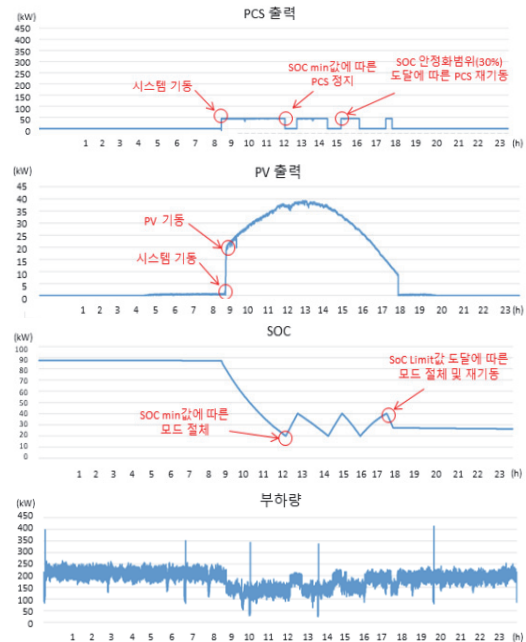


Fig. 6 Waveform of independence operation (Factory 'Woori')

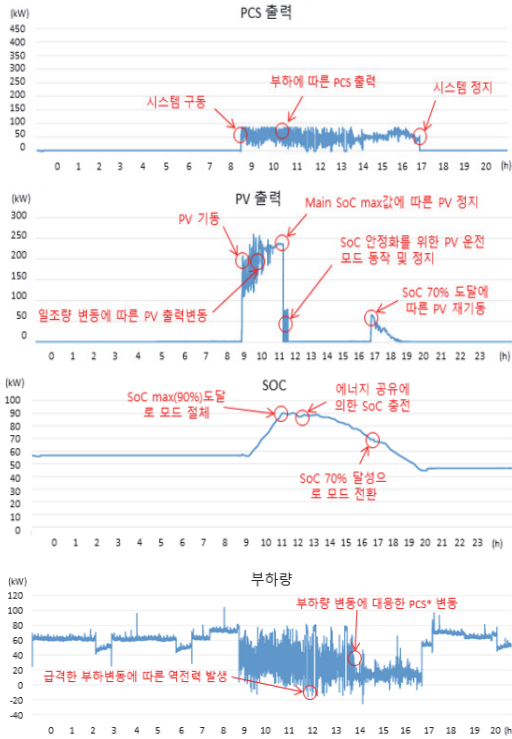


Fig. 7 Waveform of connected operation (Public facility)

스틱을 녹이는 작업을 주로 수행하며, 24시간 부하 형태를 띄고, 지속적으로 200~400kWh의 전력소비량을 갖는다. 설치된 PCS 정격보다 높은 범위의 부하가 사용되기 때문에 PCS 정격에 준하는 출력이 지속되는 특징을 보인다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 17시 SoC min값에 따라 PCS를 통한 전력공급이 중지되며, PCS 정지 이후 태양광 발전에 의해 SoC가 상승하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 공용시설의 연계운전 결과를 나타낸다. 공용시설은 한전계통과 동일한 DC계통 유지를 위한 전압제어를 수행하므로 전체 시스템 안정화를 담당한다.

PV 출력량 역시 오전 11시 SoC max에 의해 PV 기동을 정지하지만, DC/DC 출력 및 SoC 파

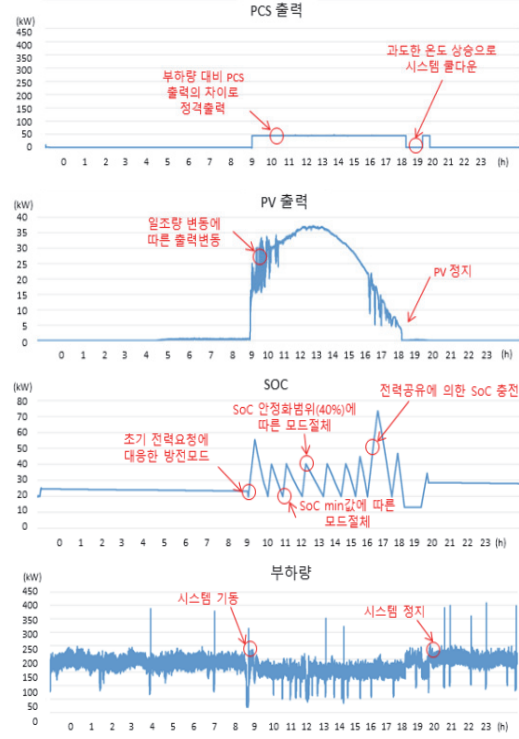


Fig. 8 Waveform of Connected operation (Factory 'Woori')

형에서 보는 바와 같이 타 공장과의 전력 거래로 인한 충·방전 제어를 확인할 수 있다.

Fig. 8은 실증 대상지 '우리'의 연계운전에 따른 결과를 나타낸다. 17시 설비 온도상승에 의한 시스템 정지상황을 제외하고 시스템 운영중 SoC에 의한 PCS 운전 정지·재기동 상황은 발생하지 않았다. 연계운전을 통해 전체 ESS 용량 활용이 가능함에 따라 설비의 정지없이 전력이 안정적으로 공급됨을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 산업단지 내 공용시설 및 실증 공장 4개소에 DC기반 마이크로그리드를 설계 및

Table 7. Operation result of 'Woori'

운전모드	PCS 정지·재기동 횟수(회)	PCS 정지시간(분)
독립운전	3회	165분
연계운전	1회 (설비 온도상승으로 인한 시스템 정지)	43분

구축하고, 독립 및 연계운전 실증을 다루었다. 실증사이트는 전력데이터 분석을 기반으로 PV, ESS, PCS 등 전력변환설비를 설계 및 구축하였으며, 별도의 DC망을 구성하였다.

MG 운영은 각 개별 공장에 자체적으로 발전된 전력을 개별 공장별로 사용하는 독립운전 모드와 각 공장간 ESS 공유에 따른 에너지 공유가 가능한 연계운전 모드로 실증 운영하였다.

독립운전 모드의 경우, 각 공장 ESS의 SoC 구간별 상태변화에 따라 PV와 PCS를 간헐적으로 정지·재기동을 함으로써, 에너지 효율적인 활용이 어려웠던 반면, 연계운전 모드의 경우, 전체 ESS의 SoC 운영을 통하여 전력 거래를 통한 정지·재기동 최소화로 인해 수용가에 안정적으로 전력을 공급할 수 있었다.

Table 7은 독립운전과 연계운전 결과에 따른 PCS 정지·재기동 횟수 및 정지시간을 나타낸다. 독립운전의 경우 시스템 운전시간 동안 3회의 정지·재기동을 통해 165분 동안 PCS를 통한 전력공급이 어려웠으나, 연계운전의 경우 설비 온도상승에 의한 시스템 정지로 인해 1회, 43분간의 휴지기간이 있었다.

연계운전의 경우 해당 수용가의 구축설비 외에도 전체 ESS를 활용함에 따라 ESS의 SoC 변화에 따른 설비의 정지·재기동 없이 수용가에 안정적으로 전력이 공급됨을 확인하였다.

본 논문에서는 SoC 재기동 범위(70%) 및 부하 특성 Gain(0.5)에 따른 결과를 도출하였으며, 향후

추가 연구를 통해 재기동 범위와 Gain값 수정을 통한 산단별 최적 제어를 수행할 예정이다.

사 사

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20213030160080, 에너지 소비대체율 50% 달성을 위한 신재생에너지 기반 융복합형 마을단위 마이크로그리드 실증 기술개발).

참고문헌

- [1] Sang-Wook Lee, June-ho Park, Power Allocation Method for Multiple ESS Control Considering SOC Balancing in Microgrids. KIEE, Vol.66, No.2, pp.292-299, 2017.
- [2] Geumhwan Bahng, A study on Eco-friendly Optimization of Renewable Energy in Microgrid System Design. Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.35, No.10, 2021.
- [3] Hak-Ju Lee, Sung-Wook Hwang, Wook-Won Kim, Chan-Hyeok Oh, Ji-Song Hong, A Study on the Development of Operation System for Campus-type Multi-microgrids. KIEE, Vol.69, No.3, pp.161-167, 2020.
- [4] Hye-jin Lee, Jeong-Won Choi, Calculation of Photovoltaic, ESS Optimal Capacity and Its Economic Effect Analysis by Considering University Building Power Consumption, KSIC, Vol.21, No.5, pp.207-217, 2018.
- [5] Jong-Cheol Kim, Chun-Sung Kim, Hyun-Ju Oh, Sung-Jun Park, Research on industrial complex the independent MG operation algorithm for DC based. KIPE General Meeting & Autumn Conference, pp. 127-128, 2021.