



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](#)

박사학위논문

계통연계형 마이크로그리드의
경제성 및 기후환경 영향 연구
Economic Analysis and Environmental Impacts
of On-grid Microgrid

2019년 8월

세종대학교 대학원
기후변화협동과정
안 희 민

계통연계형 마이크로그리드의
경제성 및 기후환경 영향 연구
Economic Analysis and Environmental Impacts
of On-grid Microgrid

지도교수 전 의 찬

이 논문을 정책학 박사학위논문으로 제출합니다.

2019년 8월

세종대학교 대학원
기후변화협동과정
안 희 민

안희민의 정책학 박사학위논문을 인준함

2019년 8월

심사위원장 황 우 현 (인)

심 사 위 원 김 동 섭 (인)

심 사 위 원 김 하 나 (인)

심 사 위 원 한 기 주 (인)

심 사 위 원 전 의 찬 (인)

국문초록

재생에너지는 기후변화 대응에 효과적인 분산에너지원으로 주목받고 있으나 간헐성과 과잉 생산으로 역조류가 발생하는 단점이 있다. 분산에너지원의 전력망으로 사용되는 마이크로그리드는 태양광발전, 풍력 등 재생에너지와 에너지저장장치, 에너지관리장치로 구성된 재생에너지망의 단점을 극복할 수 있는 유효한 에너지 시스템이다. 마이크로그리드는 독립형과 계통연계형으로 분류할 수 있는데 전력계통과 연결되지 않은 독립형은 섬이나 산간 오지 등에서 많이 사용되고 있다. 전력공급의 안정화를 위하여 계통에 연결되는 계통연계형 마이크로그리드는 산업시설의 전력 수요가 늘어남에 따라 수요가 계속 확대되고 있다.

경제적 그리고 기후환경면에서 최적의 계통연계형 마이크로그리드를 도출하기 위하여 「시나리오 1(ESS 단독)」, 「시나리오 2(PV발전 추가)」, 「시나리오 3(FC발전 추가)」, 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」 등 4가지 시나리오에 대한 경제성과 기후환경에 미치는 영향을 분석하였다.

HOMER를 이용한 경제성 분석 결과, 「시나리오 4」의 순현재비용(NPC)과 균등화발전단가(LCOE), 그리고 운영비용의 경우 다른 시나리오보다 적었다. 「시나리오 4」는 재생에너지 발전 비중이 시나리오 2보다 낮고 계통에서 전력 구매 비중이 다른 시나리오보다 낮았다. 또 「시나리오 4」는 에너지요금과 수요요금을 시나리오 가운데 가장 적게 부담하고 있다. 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR) 측면에서 가장 경제성 있는 시나리오는 「시나리오 3(FC발전 추가)」으로 「시나리오 4」와 「시나리오 2」보다 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)이 크다. 「시나리오 3」이 「시나리오 2」보다 경제성이 높은 이유는 우리나라 신재생에너지공급의무화제도(RPS)에서 연료전지발전(2.0)이 태양광발전(1.5)보다 공급인증서(REC) 가중치가 높기

때문이다. 기후환경 영향 분석 결과 「시나리오 2」의 CO₂ 배출량이 가장 작다.

순현재비용(NPC)과 균등화발전단가(LCOE)가 가장 낮은 「시나리오 4」를 대상으로 민감도 분석을 시행하였다. 민감도 분석을 위하여 배출권 가격은 톤당 1만5,000원, 2만5,000원, 3만5,000원으로 적용하였으며 SMP+REC 가격은 2018년 평균가경인 kWh당 193원을 기준으로 ±50원을 적용하였다. 태양광 모듈 가격은 경제성 분석 기준년도인 2017년의 W당 500원과 장차 미래의 가격하락을 추정하여 370원과 185원을 적용하였다.

배출권 가격이 높아질수록 시나리오의 순현재비용(NPC)과 균등화발전단가(LCOE)가 높아졌으며 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)은 낮아졌다. 시나리오는 태양광발전 비중을 높이며 계통에서 구매하는 전력량의 비중을 낮추었다.

SMP+REC 가격이 낮아질수록 시나리오의 순현재비용(NPC)과 균등화발전단가(LCOE)가 높아지고 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)이 낮아졌다.

태양광 모듈 가격이 떨어질수록 시나리오의 순현재비용(NPC)과 균등화발전단가(LCOE)가 낮아졌으며 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)이 높아졌다.

주요어 : 기후변화 대응, 재생에너지, 계통연계형 산업용 마이크로그리드, HOMER, 최적화 분석, 민감도 분석

목 차

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경 및 필요성.....	1
제 2 절 연구 목적.....	4
제 3 절 연구 절차 및 내용.....	5

제 2 장 이론적 고찰

제 1 절 마이크로그리드의 정의와 특성.....	9
제 2 절 우리나라 자가발전 현황.....	27
제 3 절 전력망 설계와 경제성 분석을 위한 도구.....	34
제 4 절 선행연구 분석.....	38

제 3 장 연구 방법과 입력 자료

제 1 절 최적화 모형(HOMER).....	49
제 2 절 대상시설 선정.....	53
제 3 절 HOMER 입력 자료.....	56

제 4 장 마이크로그리드의 경제성과 기후환경 영향 분석

제 1 절 경제성 분석을 위한 시나리오의 구성.....	75
제 2 절 시나리오에 따른 마이크로그리드 경제성 분석.....	77
제 3 절 마이크로그리드 기후환경 영향.....	84

제 5 장 주요 요인의 따른 영향 분석

제 1 절 배출권 가격 변화에 따른 경제성 변화 분석.....88
제 2 절 REC 가격 변화에 따른 경제성 변화 분석.....94
제 3 절 태양광 모듈 가격 변화에 따른 경제성 변화 분석.....100

제 6 장 결 론

제 1 절 연구 요약.....107
제 2 절 연구의 시사점과 한계.....111

참고문헌.....113

부록.....129

Abstract.....150

표 차 례

<표 2-1> 마이크로그리드에 대한 정의.....	12
<표 2-2> 마이크로그리드의 기능.....	14
<표 2-3> 하와이 마우이섬 마이크로그리드의 기술.....	23
<표 2-4> 상용발전업체 설비 이용률 및 자가발전 비율 추이.....	29
<표 2-5> 연료별 상용자가발전업체의 설비용량과 발전량(2017년)....	30
<표 2-6> 신재생에너지보급통계(2017년).....	33
<표 2-7> 각종 전력망 설계 및 분석 소프트웨어와 특성.....	37
<표 2-8> 마이크로그리드의 하드웨어 기술을 다룬 연구.....	39
<표 2-9> 마이크로그리드의 소프트웨어 기술을 다룬 연구.....	42
<표 2-10> 마이크로그리드 적용 사이트에 관한 연구.....	43
<표 2-11> 마이크로그리드 제도 개선에 관한 연구.....	45
<표 2-12> 마이크로그리드의 경제성 평가에 관한 연구.....	46
<표 2-13> 마이크로그리드 참여 행위자의 행태 연구.....	47
<표 2-14> 마이크로그리드 연구 분석.....	48
<표 3-1> 대상시설 현황.....	55
<표 3-2> 대상시설의 전력부하 데이터 평균, 피크, 부하량.....	60
<표 3-3> 탄소배출권의 가격.....	62

<표 3-4> HOMER용 월별 구매 용량 입력값.....	67
<표 3-5> 전력의 국가온실가스 배출계수(2018년 승인).....	72
<표 3-6> 발전용 천연가스 요금.....	73
<표 4-1> 시나리오의 구성.....	75
<표 4-2> HOMER 분석 결과.....	77
<표 4-3> HOMER 분석 결과(LCOE, 운영비용, ROI, IRR).....	80
<표 4-4> HOMER 분석 결과(전력 생산과 소비, 연료비용).....	82
<표 4-5> HOMER 분석 결과(에너지·수요요금).....	83
<표 5-1> 민감도 분석 조건의 내용.....	87
<표 5-2> 배출권 가격 민감도 분석 조건.....	89
<표 5-3> 배출권 가격 민감도 분석 결과.....	90
<표 5-4> 배출권 가격 민감도 분석 결과(LCOE, ROI, IRR).....	91
<표 5-5> 배출권 가격 민감도 분석 결과(전력 생산·소비).....	92
<표 5-6> 배출권 가격 민감도 분석 결과(에너지·수요요금).....	93
<표 5-7> SMP+REC 가격 민감도 분석 조건의 내용.....	95
<표 5-8> SMP+REC 가격 민감도 분석 결과.....	96
<표 5-9> SMP+REC 가격 민감도 분석 결과(LCOE, ROI, IRR).....	97
<표 5-10> SMP+REC 가격 민감도 분석 결과(전력 생산·소비).....	98

<표 5-11> SMP+REC 가격 민감도 분석 결과(에너지·수요요금).....	99
<표 5-12> 태양광 모듈 가격 민감도 분석 조건의 내용.....	101
<표 5-13> 태양광 모듈 가격 민감도 분석 결과.....	102
<표 5-14> 태양광 모듈 가격 민감도 분석 결과(LCOE, ROI, IRR)---	103
<표 5-15> 태양광 모듈 가격 민감도 분석 결과(전력 생산·소비).....	105
<표 5-16> 태양광 모듈 가격 민감도 분석 결과(에너지·수요요금)---	106

그림 차례

<그림 1-1> 연구 흐름도.....	7
<그림 2-1> 가파도 마이크로그리드 구성.....	19
<그림 2-2> 사물인터넷 기반 서울대 캠퍼스 마이크로그리드.....	21
<그림 2-3> 태양광 발전 증가로 인한 전력공급의 Duck Curve.....	24
<그림 2-4> 신성이엔지 용인사업장 마이크로그리드 구성도.....	26
<그림 3-1> 대상시설의 계통연계형 마이크로그리드 구성도.....	54
<그림 3-2> HOMER용 대상시설 주중 부하 그래프.....	57
<그림 3-3> HOMER용 대상시설 주말 부하 그래프.....	57
<그림 3-4> 대상시설 부하 데이터를 입력 후 HOMER 분석결과.....	58
<그림 3-5> 2002년 이후 기대물가상승률과 2024년까지 추세선.....	61
<그림 3-6> HOMER용 태양광발전 입력 화면.....	63
<그림 3-7> HOMER용 스토리지 입력 화면.....	64
<그림 3-8> HOMER용 컨버터 입력 화면.....	65
<그림 3-9> HOMER용 Parameter 입력 화면.....	66
<그림 3-10> HOMER용 Rate Definiton 입력 화면.....	68
<그림 3-11> 2012년 2월~2019년 5월 간 육지 SMP와 REC 가격.....	69
<그림 3-12> HOMER용 Demand Rate Schedule 입력 화면.....	70

<그림 3-13> HOMER용 Reliability 입력 화면.....	71
<그림 3-14> HOMER용 연료전지 데이터 입력 화면.....	73
<그림 4-1> 시나리오 별 이산화탄소 배출량.....	86
<그림 5-1> 2015~2019년 간 배출권 가격과 추세선.....	88
<그림 5-2> 2012~2019년 간 공급인증서 가격 변화와 추세선.....	94
<그림 5-3> 1980~2050년 간 태양광 모듈 가격 하락폭.....	100

제 1 장 서 론

제1절 연구 배경 및 필요성

2015년 12월 파리에서 개최된 제21차 유엔기후변화협약(UNFCCC) 당사국 총회(COP21)에서 ‘지구온도 상승 2℃ 이하 억제’를 목표로 한 「파리협정」이 채택되었다.

파리협정에는 기후변화 대응 실천안 가운데 하나로 에너지기술이 제시되었는데 파리협정 10조(article 10)에 기후변화 완화와 적응에 관련된 기술의 중요성이 명기되었다(UNFCCC, 2015).¹⁾

기후변화 대응에 유력한 에너지 기술로 재생에너지가 주목받고 있다. IEA는 1990~2015년 동안 재생에너지 공급이 1차 에너지 공급 연평균 성장률 1.8%보다도 높은 연평균 2%씩 성장하였다고 추산하였다. IEA에 따르면 2040년까지 세계 1차 에너지 수요 증가분의 45%를 재생에너지를 통하여 충당할 전망이다(한국에너지공단, 2017; 양의석·이서진·김아름, 2018).

우리나라도 기후변화 대응하려는 전 세계적인 조류에 동참하고 재생에너지 비중을 높이고자 2017년 12월 「재생에너지 3020 이행계획안」을 발표하였다. 우리나라는 재생에너지 3020을 발표하며 2030년까지 우리나라에서 재생에너지를 발전량 기준 20%까지 확대하겠다고 천명하였다. 구체적인 방안으로 정부는 재생에너지를 지역주민 주도로 보급하고 재생에너지원 가운데 태양광과 해상풍력을 중점적으로 보급하겠다고 발표하였다(산업통상자원부, 2017). 정부의 방침에 따라 태양광발전은 2018년에 2.02GW 설치되었

1) 파리협약은 10조 2항에서 “당사국들이 기후변화대응을 수행하는데 기술이 중요하다”고 언급하고 “기존 기술의 양산과 보급 노력을 인식하고 있다”(Parties, noting the importance of technology for the implementation of mitigation and adaptation actions under this Agreement and recognizing existing technology deployment and dissemination efforts)고 적시하였다.

고 2019년에도 비슷한 수준으로 설치될 전망이다. 재생에너지의 확산에 따른 우려도 존재한다. 재생에너지는 불규칙한 기상상황에 따라 발전도 불규칙한 간헐성 문제가 있으며 과잉발전될 경우 계통에서 전력의 흐름을 교란하는 역조류를 일으킬 수 있기 때문이다.

마이크로그리드는 이러한 재생에너지의 단점을 보완할 수 있기 때문에 기후변화 대응에 효과적인 에너지 시스템 가운데 하나가 되었다. 마이크로그리드엔 태양광발전, 연료전지, 풍력 등 분산에너지원(DERs)과 에너지저장장치(ESS) 등 신재생에너지 설비 등 에너지기술이 집약되었다. 마이크로그리드에 설치되는 에너지원은 가스엔진, 열병합발전 등 이산화탄소를 대거 유발하는 발전기에서 태양광, 풍력 등 재생에너지로 전환되었다. 재생에너지의 설치비중이 높아지자 마이크로그리드는 기후변화 대응에 효과적인 에너지 시스템으로 부각되었다.

Hatziargyriou, Nikos, Hiroshi Asano, Reza Iravani and Chris Marnay(2007)에 따르면 미국 캘리포니아주와 같은 선진 국가들은 마이크로그리드를 온실가스 감축목표 달성의 수단으로 활용하고 있다.

마이크로그리드에서 재생에너지 등 분산에너지원의 비중을 높여 탄소를 저장하는 연구가 진행되었다. 계통연결형 마이크로그리드와 독립형 마이크로그리드 연구를 병행하고 마이크로그리드의 효율성과 신뢰성을 제고하고 경제적 운영·관리를 모색하였다. 마이크로그리드에 통신 기술을 접목하여 운영에 필요한 원거리통신 기반시설을 확충하고 프로토콜도 개발하였다. 마이크로그리드 운영 시뮬레이션과 실증 연구도 진행하였다(Hatziargyriou et al., 2007).

우리나라는 2009년 가파도 에너지자립섬 사업이 마이크로그리드 연구의 시작이다. 사무동, 가정, 대학 캠퍼스와 학교 건물에도 마이크로그리드가 시범적으로 설치되었다(이용봉·김정호, 2015; 이원구·김강원·김발호, 2016; 우

경태, 2016; 염병옥, 2017; 양동현, 2018; 이루다, 2018; 황우현 2016).

이처럼 세계적인 추세에 발맞춰 우리나라에도 다양한 장소에 마이크로그리드가 설치되어 연구되었지만 산업용 마이크로그리드에 대한 연구가 마흡현 살종이다. 산업용 마이크로그리드는 공장 등 생산현장 일선에 설치된다.

우리나라의 경우 산업 부문이 우리나라의 전력 수요의 절반 이상을 차지²⁾하고 있기 때문에 기후변화 대응에서 산업이 차지하는 비중이 크다. CO₂ 배출을 줄이려면 전력 수요가 많은 공장 등 산업 현장에 계통연결형 마이크로그리드를 보급할 필요가 있다. 마이크로그리드엔 여러 가지 분산에너지원과 설비를 조합할 수 있기 때문에 여러 종류의 계통연계형 마이크로그리드를 중심으로 최적의 시스템을 분석할 필요가 있다.

2) 한국전력공사(2019)의 한국전력통계에 따르면 2018년에 한국전력공사는 2018년에 5억 2,614만9,161MWh의 전력을 판매하였다. 이 가운데 산업용이 2억9299만8664MWh로 55.6%를 차지하였고 일반용이 1억1,693만3,913MWh를 기록하여 22.2%, 주택용이 7,289만 4,709MWh로 13.8%를 차지하였다.

제2절 연구 목적

태양광, 풍력 등 재생에너지는 햇빛과 바람 등 무한한 자연 에너지를 이용하기 때문에 연료비와 CO₂ 발생에 대한 걱정이 없지만 간헐성과 과잉 생산의 우려가 있다. 마이크로그리드는 재생에너지의 간헐성과 과잉 생산 우려를 해결하는 도구이다. 마이크로그리드는 계통과 분리되어 독립적으로 운영될 수 있는 장점이 있는데 재생에너지가 마이크로그리드에 설치될 경우 재생에너지를 제어할 수 있다.

마이크로그리드에 다양한 분산에너지원과 에너지설비를 설치할 수 있고 상황에 따라 경제성이 달라지기 때문에 이에 대한 분석적인 지식이 필요하다.

시나리오 분석을 위하여 분산에너지원 없이 ESS만 있는 마이크로그리드, 태양광발전시설을 추가한 마이크로그리드, 연료전지발전시설을 추가한 마이크로그리드, 태양광발전시설과 연료전지발전시설을 동시에 추가한 마이크로그리드를 설정하며 경제성과 기후환경 영향을 연구하였다.

여러 가지 상황이 반영된 연구를 위하여 태양광 모듈 가격이 변화할 때, 탄소배출권 가격이 변화할 때, 계통한계가격(SMP)+공급인증서(REC) 가격이 변화할 때를 가정하여 마이크로그리드의 경제성을 분석하였다.

이러한 분석이 선행된다면 설치비용과 시간을 절약할 수 있고 분석 결과에 따라 마이크로그리드의 설계를 달리할 수 있어 마이크로그리드의 최적점을 찾아가는 시점을 앞당길 수 있다. 아울러 기후변화 대응을 위한 마이크로그리드의 장점과 한계를 분석하여 마이크로그리드의 활용 방안과 보완책도 모색할 수 있다.

본 연구는 이러한 분석을 통하여 최적의 마이크로그리드를 도출하고 조건 변화에 따라 경제성과 기후환경 영향이 어떻게 달라지는지 분석하는 것이 목적이다.

제3절 연구 절차 및 내용

본 연구의 연구 대상시설은 경기도 용인시 처인구 소재 계통연계형 산업용 마이크로그리드이다. 공장은 필요한 전력부하의 평균 85%를 계통에서 구입하고 나머지는 대상시설에서 충당하고 있다.

통계청에 따르면, 우리나라에서 태양광으로 생산한 전력을 자가 소비하는 산업용 상용자가발전기의 용량은 약 12MW에 불과하다. 태양광 상용자가발전설비의 양이 상대적으로 적고 ESS와 공장에너지관리시스템(FEMS)을 결합한 계통연계형 마이크로그리드 실제 사례가 우리나라에서는 찾기 어려운 실정이다. 따라서 가장 경제성 있는 계통연계형 마이크로그리드를 분석하여 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

본 연구는 계통연계형 마이크로그리드의 경제성과 기후환경 영향을 분석하고 다양한 조건에서 민감도를 분석하였다. 경제성과 민감도 분석을 위한 지표로 순현재가치(NPC), 균등화발전단가(LCOE), 투자회수율(ROI), 내부수익률(IRR), 초기투자, 운용비, 순구입에너지가 이용되었다. 기후환경 영향을 위하여 이산화탄소(CO₂) 발생량을 지표로 사용하였다. 대상시설의 계통연계형 마이크로그리드 실측 데이터를 입력 자료로 활용하였다. 태양광과 연료전지 데이터, 에너지저장장치(ESS)와 컨버터 데이터, 계통 데이터, 전력품질과 LNG 가격, 기상 데이터, 사회적 할인율 등을 입력하였다. 민감도 분석을 위한 조건은 배출권 가격, 태양광 모듈 가격, 계통한계가격(SMP)+공급인증서(REC) 가격의 변화이다. 본 연구의 흐름을 <그림 1-1>에서 정리하였다.

제1장에서 연구의 배경과 필요성, 목적과 범위를 기술하고 흐름을 도식으로 제시하였다.

제2장에서 마이크로그리드에 대한 이론적 고찰하였다. 마이크로그리드를 개념 정의하고 실제 사례를 조사하였다. 마이크로그리드 관련 선행연구를

정리하며 본 논문의 차이점과 독창성을 도출하였다.

제3장에서 본 연구에서 사용하는 연구 모형을 제시하고 연구 모형을 소개하였다. 우리나라의 상용자가발전기 현황 통계를 분석하였으며 연구 모형에 입력한 데이터를 제시한 근거를 정리하였다.

제4장에서 본 연구에서 분석을 위한 시나리오를 제시하고 경제성 분석과 기후환경 영향 분석을 수행하였다. 에너지저장장치와 태양광발전, 연료전지 발전을 가상으로 다양하게 조합하여 마이크로그리드를 구성한 후 시뮬레이션 분석을 수행하였다.

제5장에서 본 연구에서 민감도 분석을 위하여 조건이 변화된 상황을 설정하고 시나리오의 경제성을 분석하였다. 분석에 사용된 시나리오는 순현재가치(NPC)와 균등화발전화단가(LCOE) 측면에서 가장 경제성이 있다고 판단된 시나리오다.

제6장에서는 계통연계형 마이크로그리드의 운영과 우리나라 에너지 정책 아래에서 시사점을 도출하였다. 본 연구의 한계를 통찰하고 향후 연구 과제를 제시하였다.

연구 목적	계통연계형 마이크로그리드의 경제성과 기후환경영향에 대한 분석 필요		
연구 대상	계통연계형 마이크로그리드		
	계통에 연결된 대상시설의 태양광 상용자가발전기와 ESS		
연구 분야	경제성	기후환경 영향	민감도
	순현재비용, 초기투자, 운영비, 균등화발전단가, 투자회수율, 내부수익율, 순구입에너지	이산화탄소 발생량	순현재비용, 초기투자, 운영비, 균등화발전단가, 투자회수율, 내부수익율, 순구입에너지
입력 및 분석 자료	대상시설의 계통연계형 마이크로그리드 실측 데이터		
	탄소배출권 가격	태양광 모듈 가격	계통한계+공급인증서 가격
	태양광, 연료전지 데이터	ESS, 컨버터 데이터	계통 데이터
	전력 품질, LNG 가격	기상 데이터	사회적 할인율
연구 방법	HOMER를 활용한 시뮬레이션, 최적화, 민감도 분석		

<그림 1-1> 연구 흐름도

제 2 장 이론적 고찰

제1절 마이크로그리드의 정의와 특성

마이크로그리드는 분산에너지원(DERs)을 수용하는 에너지시스템으로 개념 정의되었다가 재생에너지가 확산됨에 따라 마이크로그리드는 재생에너지 제어수단으로 재평가되었다. 유사시 계통과 분리되어 재생에너지의 간헐성, 과잉발전을 제어하는 수단으로 활용가능하기 때문이다.

1. 마이크로그리드의 개념

Hatziagyrou et al.(2007)은 마이크로그리드가 분산자원을 다수 설치한 전력망을 안전하고 효율적으로 운영 관리한다고 분석하였다. 그에 따르면 마이크로그리드는 “분산에너지원을 지속적이고 보다 분산적인 방법으로 조율하는 실체³⁾” 로 “계통이 받는 부담을 덜어주며 계통의 이익을 증진” 한다. 미국 에너지부(2010)는 마이크로그리드를 “명확하게 정의된 전기적 경계가 있는 상호 연결된 부하와 분산에너지 자원⁴⁾” 이라고 정의하였다. 전기적 경계란 “계통 측면에서 관리가능한 단일한 실체” 다. 미국 에너지부는 “마이크로그리드가 계통 연결형(grid-connected)이나 독립형(island-mode)으로 운용될 수 있다” 고 분석하였다.

3) 마이크로그리드를 ‘entities that coordinate DERs, in a consistently more decentralized way, thereby reducing the control burden on the grid and permitting them to provide their full benefits’ 라고 정의하였다.

4) 이 정의에 해당하는 영문은 다음과 같다. “a group of interconnected loads and distributed energy resources within clearly defined electrical boundaries that acts as a single controllable entity with respect to the grid. A microgrid can connect and disconnect from the grid to enable it to operate in both grid-connected or island-mode” 이 정의는 the Microgrid Exchange Group이 내린 정의이다. the Microgrid Exchange Group은 마이크로그리드 양산과 연구에 관하여 개별적으로 연구하는 임시조직이다.

최영준(2010)은 마이크로그리드를 “소규모의 분산에너지원과 제어 가능한 부하의 집합체로 구성하여 분산에너지원과 부하(전기, 열)를 효율적으로 운영관리하는 시스템” 이라고 정의하였다. 미국 에너지부와 마찬가지로 시각으로 마이크로그리드를 “전력회사의 상용 계통에서 독립하여 운전하거나 계통 연계 운전이 가능한 On-Site 에너지 공급시스템” 이라고 정의하였다.

정태영(2011)은 마이크로그리드를 수용가에 고품질의 전력 공급을 목적으로 둔 신재생 에너지를 포함하는 차세대 전력망으로 평가하였다. 그는 마이크로그리드를 “충분한 용량의 마이크로전원과 에너지저장장치 그리고 부하가 혼재된 소규모의 독립된 전력망” 이라고 정의하였다.

2011년 동일본 대지진 이후 발간된 논문에서도 이러한 관점이 보인다. 横山明彦(2019)는 마이크로그리드를 ‘소규모 전력네트워크’ 로 정의하였다. 그에 따르면 마이크로그리드는 외부의 대규모 전력 네트워크에 접속하여 있지만 마이크로그리드 내의 태양광발전이나 풍력발전 등 발전량에 커다란 변동이 있어도 가능한 외부에는 피해를 주지 않는다.

전력의 안정적 공급 측면이 강조된 정의도 있다. サント靖(2018)는 마이크로그리드를 “지역에서 에너지를 자급자족할 수 있도록 하여 송배전이 어떠한 이유로 중단되어도 지역의 사회 활동을 최소한 지장 없이 유지할 수 있도록 하는 것” 이라고 개념정의 하였다. Sioshansi(2019)은 “지역 기반으로 제어되는 전력시스템으로 중앙 전력망과 연결·분리되어 독립적인 섬 형태로 운영되는 전력시스템” 이라고 정의하였다. 그는 전력 시스템 혹은 전력 섬으로 운영할 수 있어야 진정한 마이크로그리드 의미에 부합하는 것이라고 평가하였다. 그는 “소규모 그리드 가운데 전력시스템 또는 전력 섬으로 운영될 수 있는 지점에 있는 여러 개의 전력시스템을 ‘진정한 마이크로그리드’, ‘친숙한 마이크로그리드’ ” 라고 썼다.

마이크로그리드에 대한 이들 정의를 종합하면 마이크로그리드는 ①독립

형 혹은 계통 연결형으로 운영되고, ②분산전원(DERs) 관리와, ③방재에 목
적을 둔 ④제어·관리 가능한 ⑤소규모 전력망이라고 정의내릴 수 있다.
<표 2-1>에서 마이크로그리드의 개념 정의를 정리하였다.

<표 2-1> 마이크로그리드에 대한 정의

분류	저자	정의	핵심어
분산자원 관리용	Hatziagyrou et al.(2007)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 분산에너지원을 지속적이고 보다 분산적 방법으로 조율하는 실체 ○ 계통이 받는 부담을 덜어주며 계통의 이익을 증진 	분산자원 관리
	미국 에너지부 (2010)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 명확하게 정의된 전기적 경계가 있는 상호연결된 부하와 분산에너지 자원 	전기적 경계 상호연결 부하 분산에너지원
	최영준 (2010)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소규모 분산에너지원과 제어 가능한 부하의 집합체 ○ 분산에너지원과 부하를 효율적으로 운영관리하는 시스템 ○ 전력회사의 상용 계통에서 독립하여 운전 ○ 계통 연계 운전이 가능한 On-Site 에너지 공급시스템 	부하의 집합체 독립운전 계통 연결 운전
	정태영 (2011)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 충분한 용량의 마이크로전원과 에너지저장장치 그리고 부하가 혼재된 소규모의 독립된 전력망 	소규모 독립
	横山明彦 (2019)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소규모 전력네트워크 	소규모
전력의안정적공급	サント靖 (2018)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지역에서 에너지를 자급자족 ○ 송배전이 중단되어도 지역의 사회 활동을 최소한 지장 없이 유지 가능 	에너지 자급자족
	Sioshansi (2019)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지역 기반으로 제어되는 전력시스템 ○ 중앙 전력망과 연결·분리되어 독립적인 섬 형태로 운영되는 전력시스템 	독립적인 섬 형태

2. 마이크로그리드의 기능

신용학(2019)는 ①최적발전계획, ②경제급전, ③자동발전제어, ④무효전력제어, ⑤수요예측, ⑥신재생 발전 예측, ⑦islanding(독립·연계 전환), ⑧전력유통을 마이크로그리드의 주요 기능이라고 분석하였다.

최적발전계획은 마이크로그리드가 보유한 분산자원과 메인 계통과의 전력 거래 가격을 고려하여 어떤 발전기를 켜고 끄며, 그때의 출력을 경제적으로 결정하는 계획이다. 경제급전은 운전 중인 발전기에 대하여 출력 배분을 어떻게 하는 것이 경제적인지 결정하는 프로그램이다. 자동발전제어는 메인 계통과 연계된 조류의 양을 일정하게 유지하거나 독립 계통의 주파수를 일정하게 유지하기 위하여, 또는 기존에 계획된 스케줄에 대한 실시간 제어를 수행한다. 무효전력제어는 이를 통해 전압이나 역률을 보상하며 수요예측은 마이크로그리드 내 부하의 수요를 예측하여 최적발전계획의 입력(input) 데이터를 제공한다. islanding은 연계선로의 출력을 0에 가깝게 만들고 절체를 수행하는 기능이다. 전력유통은 마이크로그리드와 마이크로그리드 간 전력을 유통하는 기능이다.

이러한 마이크로그리드의 기능을 수행하기 위하여 ①경제급전, ②자동발전제어, ③GF, ④상위 발전지령 추종, ⑤스케줄링, ⑥피크제어, ⑦전압제어, ⑧SOC 관리, ⑨수동제어, ⑩역률제어 컨트롤러가 필요하다. <표 2-2>에서 마이크로그리드의 기능을 정리하였다.

〈표 2-2〉 마이크로그리드의 기능

기능	용도
경제급전	○ 운전 중인 발전기에 대하여 출력 배분을 어떻게 하는 것이 경제적인지 결정하는 프로그램
자동발전제어	○ 메인 계통과 연계된 조류의 양을 일정하게 유지하거나 독립 계통의 주파수를 일정하게 유지하기 위하여, 또는 기존에 계획된 생산계획에 따라 실시간 제어를 수행
상위발전 지령추종	○ 상위 시스템에서 출력 지령을 내리면 그 값을 받아 연결된 ESS에 출력을 배분하는 기능
스케줄링	○ 사용자 입력, 혹은 최적화 결과에 의한 스케줄링 데이터 추종 제어
피크제어	○ 배전선로의 유효전력, 혹은 건물의 수전전력 등 현재의 유효전력 값이 설정된 유효전력 값을 넘어서지 않게 ESS 방전을 통하여 제한하는 기능
전압제어	○ ESS가 연결된 접속점의 전압을 제어하는 기능.
SOC 관리	○ ESS의 특성상 장기 운전 보장을 위해 SOC를 일정하게 유지하거나 필요 시 회복하는 기능
수동제어	○ 사용자가 입력한 값을 추종하여 제어하는 기능
역률제어	○ ESS 자체, 혹은 건물 등의 역률을 제어하는 기능
GF	○ 계통의 주파수에 따른 출력 보상 기능

출처: 신용학(2018)

3. 마이크로그리드의 특징

우리나라는 전기 사업을 검토할 때 경제성, 안전성과 환경성을 종합적으로 고려하도록 「전기사업법」에 규정되어 있다.⁵⁾ 마이크로그리드도 이와 같은 추세를 따르고 있다. 마이크로그리드를 통하여 에너지 효율 증대, CO₂ 저감, 공급신뢰도 향상시킬 수 있으며 운영 시스템 이용하여 경제성 향상과 시스템의 효율적 관리를 도모할 수 있다(정태영, 2011).

가. 친환경성

마이크로그리드에 재생에너지 설치가 늘어나며 마이크로그리드가 친환경적인 에너지설비로 인식되기 시작하였다. 마이크로그리드에는 가스엔진, 마이크로터빈, 스텔링엔진 등 소규모 열병합발전이 이외에도 태양광발전, 풍력 등이 설치된다(최영준, 2010). 가스엔진, 마이크로터빈, 스텔링엔진과 달리 재생에너지는 온실가스를 배출하지 않는다. 정보통신기술(ICT)의 향상도 마이크로그리드의 친환경성을 강화하였다. 인공지능을 통한 기상 예측으로 태양광발전량을 추정할 수 있게 되었고 이를 생산계획에 즉시 반영할 수 있기 때문이다.⁶⁾ 인공지능이 재생에너지의 간헐성을 극복할 단초를 제공한 셈이다.

5) 「전기사업법」 제3조(정부 등의 책무) 2항에는 “잔력수급계획을 수립할 때 전기설비의 경제성, 환경 및 국민안전에 미치는 영향 등을 종합적으로 고려하여야 한다”고 규정하였다. 3항엔 “전국전력거래소는 전력시장 및 전력계통의 운영과 관련하여 경제성, 환경 및 국민안전에 미치는 영향 등을 종합적으로 고려하여야 한다”고 규정하였다. 이들 조항은 2017년 당시 장병완 국회의원(국민의 당)이 발의한 전기사업법 일부 개정안으로 그 해 3월 21일 국회 본회의를 통과하였다.

6) 태양광발전출력예측기술은 스마트그리드 기술 가운데 하나로 마이크로그리드에도 응용된다. 일본에서는 국가프로젝트로서 2009년부터 본격적으로 개발되기 시작하였다. 일본은 전국 300곳에서 일사량과 태양광발전 설비의 발전량을 계측, 일기예보 등을 통하여 발전량을 예측하는 실증시험을 실시하였다. 하루 단위나 3~5분 정도의 태양광발전 출력 예측 기술개발이 실시되었다. 이러한 결과 단주기(20분 이하) 변동 하루 최대 저녁에 대한 비율은 전력 수요가 낮은 4~5월에는 1~2%, 장주기(20분~수 시간) 변동의 최대 변동은 전력 수요가 낮은 4~5월에 10~15%인 것으로 분석되었다(橫山明彦, 2019).

나. 안정성과 신뢰성

안정성과 신뢰성은 분산에너지원 관리에 필수요소다. 분산에너지원을 개별적으로 계통에 연결할 경우 배전 계통 운영 상의 문제가 발생하고 계통 보호에도 불리하다(최영준, 2010). 전력은 물과 같이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐른다. 이러한 차이를 ‘전위차’라고 한다. 그래서 현재 기저부하로 사용되는 원자력발전이나 화력 발전을 특정 지역에 집적하는 이유가 이 때문이다. 발전소가 집약된 곳에는 높은 전위가 발생하고 전기는 계통에 따라 전위가 낮은 곳으로 흐른다.

분산에너지원이 보급되면서 사정이 달라졌다. 분산에너지원은 소비지 인근에 설치된다. 대표적인 분산에너지원인 태양광발전의 경우 전력의 최종 소비자인 건물, 가정, 공장 등에 직접 설치되어 전류의 흐름을 바꿔 정상적인 계통운동을 방해할 수도 있다. 가정, 건물, 공장에 설치된 지붕형(roof top) 시설에서 발생한 전기가 계통을 통해 역류하는 역조류(reverse flow of power)의 문제가 발생할 수 있다. 이 경우는 계통 말단에서 전기가 과잉 생산될 경우 발생한다. 전기가 과잉생산될 경우 화력발전으로 긴급하게 전기를 생산하여 전기가 정상적으로 흐르도록 조치를 취하여야 한다.

재생에너지의 간헐성도 계통의 안정성을 해치는 요인이다. 태양광이나 풍력 등은 무한한 자연에너지를 이용하여 연료비가 들지 않고 온실가스가 발생하지 않는 장점이 있지만 자연에너지이기 때문에 불규칙하다. 태양광은 날씨와 일조량에 따라 발전량이 달라지며 풍력은 풍속, 풍량에 따라 발전량이 달라진다. 풍력은 수 분~20 분 단위, 태양광발전은 수 초 단위로 발전량이 변동한다. 송전선 등 계통의 상류 지역에 설치되는 경우가 많은 풍력은 발전량의 변동에 따라 주파수를 변동하거나 대규모 설비가 밀집된 지역에서는 송전망의 전압에도 커다란 영향을 미칠 수 있다. 배전선 등 계통의 하류에 접속된 경우가 많은 태양광은 계통을 교란할 수 있다.

계통 말단에서 발생한 과잉전류가 소비되지 않고 계통으로 흘러들어가 불규칙한 발전이 제어되지 않는다면 계통의 주파수는 변동된다. 한국의 경우 주파수가 $60 \pm 0.1\text{Hz}$ 로 관리되는데 관리 수치를 넘을 경우 계통의 전력 품질이 현저하게 떨어지게 된다(橫山明彦, 2019).⁷⁾ 이러한 문제들을 해결하고 분산전원을 적극적으로 활용하기 위하여 시스템적으로 접근한 것이 마이크로그리드이다(최영준, 2010). 열탕기, 전기차충전소, 에너지저장장치(ESS), P2G(Power2Gas)를 이용하여 불규칙하거나 과잉 생산된 전기를 소모하거나 저장하는 방식이 제시되고 있다(안희민, 2019).

다. 경제성

마이크로그리드의 경제성을 부정하는 연구는 찾기 힘들다. 대부분 마이크로그리드가 이익이 된다고 분석하고 있다. Hatzigiorgiou et al.(2007)은 “마이크로그리드가 활성화된 미래 배전네트워크의 기본 모습”이라며 “효율적으로 조율되어 운영되면 분산발전(DERs)에 전면적으로 이익을 가져다줄 것”이라고 분석하였다.

마이크로그리드가 경제성을 충족하는지 여부는 큰 고려사항이 아니다. 橫山明彦(2019)는 대학교나 군 기지에서 방재 대책으로서의 마이크로그리드를 설치할 때 비용이 도외시되는 점에 주목하였다. 그는 “재해 시 위험 회피가 비용보다 중요하다”고 분석하였다. Sioshansi(2019)는 “마이크로그리드가 복원력(resilience)을 입증할 수 있지만 중요한 것은 비용 측면에서 볼 때 복원력과 신뢰도에 대한 투자의 이득이 매우 고르지 않게 나타난다”고 분석하였다. 이어 그는 “통계적으로 희박한 확률의 상황을 완화하기 위하여 적절한 투자가 어느 정도인지를 평가하기 어렵다”며 단순히 경제학적으로

7) 역조류란 배전망 내에서 전기가 하류에서 상류로 흐르는 것을 말한다. 일본의 경우 주파수 변동이 $\pm 0.2\text{Hz}$ 이내로 유지되며 유럽은 $\pm 0.06\text{Hz}$ 이내를 유지해야만 한다고 규정되어 있는 국가가 대부분이다(橫山明彦, 2019).

평가하는 것은 별로 효과가 없다는 의견을 피력했다. 물론 마이크로그리드를 설치할 때 경제성이 중요하다는 분석이 없는 것은 아니지만 소수다. 정태영(2011)은 “마이크로그리드가 계통과 연계운전 할 경우 경제성 향상을 목적으로 운용하여야 한다”고 분석하였다.

이런 이유 때문에 마이크로그리드의 경제성을 입증하는 연구는 중요한 의미를 지닌다. 경제성이 입증되어야 마이크로그리드가 확산될 수 있기 때문이다. 본 연구가 경제성 분석을 다룬 이유도 이 때문이다.

4. 마이크로그리드의 사례

2003년 미국 동부의 블랙아웃 사태를 계기로 연구가 시작된 마이크로그리드는 유럽과 일본으로 확산되었고 최근에는 한국도 사업에 참여하고 있다. 국내외 주요 프로젝트를 살펴봤다.

가. 가파도 마이크로그리드⁸⁾

제주도청은 제주도에 풍력과 태양광, 전기차, 스마트그리드를 보급하여 온실가스 배출량을 ‘0’ (Zero)으로 떨어트리는 정책인 「제주도 탄소제로 2030」을 추진하고 있다. 가파도 마이크로그리드는 이 정책을 실현하기 위한 시범 사업이었다. 가파도엔 2012년 세계 최초로 설치된 독립형 마이크로그리드가 설치되었다. 재생에너지와 에너지저장장치(ESS) 그리고 운영시스템만으로 100% 전력공급이 가능하다. 가파도의 사례는 덕적도나 울릉도와 같은 대형

8) 가파도 마이크로그리드사업과 배전급 마이크로그리드 사업은 한전이 2012년 10월~2015년 9월, 36개월간 288억원(현금 한전 74억원, 전남도 20억원)의 예산으로 수행한 ‘신재생에너지 기반 융복합 에너지시스템 및 계통연계 기술 개발’ 과제의 세부과제이다. 가파도에는 독립형 마이크로그리드가 설치되어 에너지자립성이 실증되었으며 신안군에는 배전급 마이크로그리드가 설치되어 신재생에너지 연계 배전망 통합운전이 실증되었다. 이때 확보한 기술은 ①신재생에너지와 배터리 용량 최적 설계기술, ②마이크로그리드 운영시스템(EMS)의 국제표준 EMS 플랫폼 기술, ③자동전원제어 어플리케이션 등 14종(독립형 3종, 배전급 11종)이다.

나. 신안 배전급 마이크로그리드

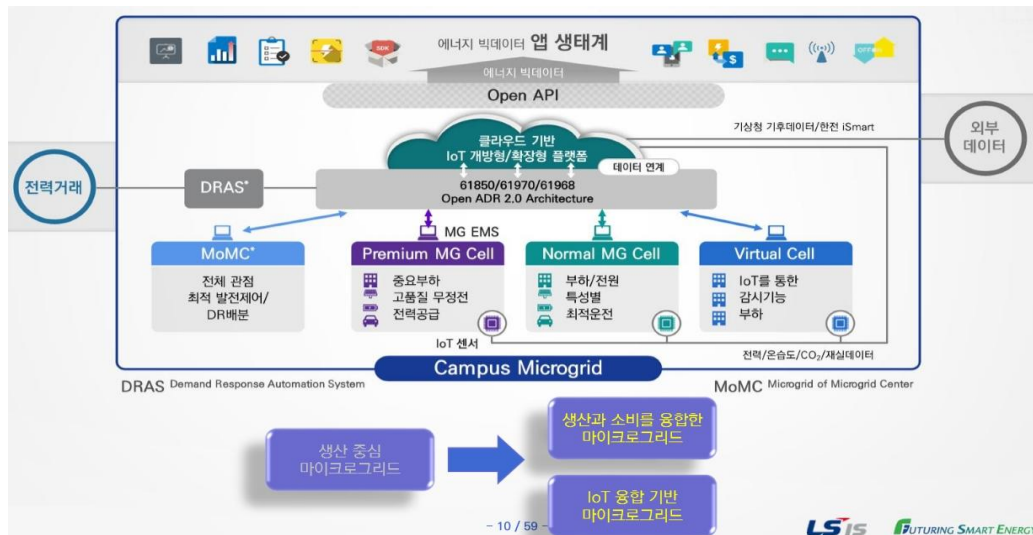
신안 배전급 마이크로그리드 사업은 신안군 관내 안좌도 등 10개 도서에 설치된 계통연결형 마이크로그리드이다. 신안 배전급 마이크로그리드의 설계 목적은 능동배전망 운영 효과 실증이다. 재생에너지 연계 시 선로에 과전압을 현상을 해소하고 재생에너지와 부하의 계통운영 측면에서 자원화 가능성을 실증하였다. 전압 제어기기 확보 차원에서 선로전압조정 제어자원인 SVR을 구축하여 실시간으로 전압제어가 가능한지 여부를 실증하고 계통에 분산 자원이 얼마나 확대되어 수용이 가능할지를 실증하였다. 이를 위하여 설치된 재생에너지는 2MW급 팔금 태양광발전소, 비금 풍력발전소이며 수용가 마이크로그리드가 구축되었다.

팔금 태양광발전소에는 1MWh BESS가 구축되었는데 계통이 고장 났을 때 단독운전으로 전력공급이 가능한지 여부를 실증하였다. 비금 풍력발전에는 STATCOM과 BESS를 설치하여 풍력 출력 안정화를 실증하고 계통 전압 안정화 자원을 구축하였다. 수용가 마이크로그리드는 디젤 발전, 태양광, 에너지 저장장치로 구축되었으며 수용가 마이크로그리드의 연계점 출력 제어 실증을 수행하였다. 신안 배전급 마이크로그리드 사업의 계통은 154kV 변전소 1개, 22.9kV D/L 3개로 구성되어 있으며 총 40MW의 재생에너지가 설치되었다. 최대부하는 21MW로 D/L 당 7MW다.

이 사업을 통하여 한국전력공사는 스마트 DMS 및 응용프로그램의 실계통 실증을 통한 성능 이력 확보, 실계통 대상 운영 노하우와 현장 커스터마이징(customizing) 기술을 확보하였다. 아울러 상태 추정 및 전압제어의 정밀도 실증을 통하여 능동적인 배전운영 기반을 확보하고 능동 배전망 운영을 통하여 분산자원 수용량 증대와 자원화 활용 가능성을 입증하였다. ESS를 활용한 단독운전 실증을 통하여 선로 보강 없는 신뢰도 증대 방안도 검증하였다(송일근, 2018).

다. 서울대 캠퍼스 마이크로그리드

서울대 캠퍼스 마이크로그리드 실증은 2015년 6월부터 2019년 5월 까지 총 4년에 걸쳐 시행되었다. 참여기관은 서울대를 비롯하여 LS산전, 한국전력 전력연구원, 나라컨트롤, 인코어드, 기초전력연구원, 대경 엔지니어링, 인하대 등 산학연 21개 기관이다. <그림 2-2>는 서울대 마이크로그리드에 관한 내용이다.



<그림 2-2> 사물인터넷 기반 서울대 캠퍼스 마이크로그리드
출처: 신용학 (2018)

사업 목표는 ①독립운전 4시간 운영기술 실증 확보, ②에너지 비용/피크 부하 20% 절감, ③빅데이터 플랫폼 구축과 분석으로 10%에너지 저감 서비스 개발, ④다중 마이크로그리드 통합 운영 시스템(MoMC) 구축, ⑤상호 운용성과 신뢰성 확보를 위한 표준화 기술 개발 등이다. 에너지를 효율적으로 운영하는 Cell 시스템 영역과 사물인터넷(IoT) 기반의 각종 서비스를 제공하는 클라우드 영역으로 구성되었다. 강의동, 연구동, 실험동, 병원, 기숙사 등 건물마다 에너지 소비 특성이 다른 것을 착안하여 건물마다의 에너지 절감 방법

을 개발하고 용도별로 모델을 실증하였다. 서울대 캠퍼스 마이크로그리드는 고객의 요구에 따라 구성을 유연하게 변경·적용 가능하도록 ①레고식 맞춤형 캠퍼스 마이크로그리드를 개발하였고, ②Cell을 최소 판매 단위와 맞춤형 솔루션으로 설정하였다. Cell은 사물인터넷(IoT)기반의 Cell 플랫폼과 캠퍼스 건물용도별 모델로 구성된다. 이때 Cell은 프리미엄 마이크로그리드 Cell⁹⁾, 노멀 마이크로그리드 Ceill, 가상 Cell(Virtual Cell)로 구성된다(신용학, 2018).

라. 하와이 마우이섬 마이크로그리드

일본 히타치는 2011년 1단계, 2015년 2단계에 걸쳐 하와이 마우이섬에서 독립형 마이크로그리드 실증 사업을 진행하고 있다. 점프스마트마우이(Jump Smart Maui)라고 불리는 이 사업에는 히타치 외에도 NREL, NEDO, 하와이 전력청, 미즈호 등이 참여하는데 히타치는 독립형 마이크로그리드에 필수적인 진일보한 배전관리시스템을 공급한다. 2011년부터 시작된 1단계 사업에는 2개의 리튬이온전지와 1개의 납축전지, 가정용 에너지저장장치(ESS) 10세트, 전기차 200대 이상, 가정용 열탕기 30세트, 200대 이상의 전기차, 급속 충전기 20대와 완속 충전기 20대를 사용하였다.

실증 목적은 태양광과 풍력 등 재생에너지 발전을 예측하여 전지 운영 일정에 반영하여 에너지 수요를 분산하는 것이다. 더불어 전력 공급과 수요 간 불균형을 개선하여 안정화시키는데 있다.

기본적으로 마우이섬에는 태양광과 풍력발전설비가 있다. 이들 발전설비는 전력생산이 날씨에 영향을 받거나 불규칙하기 때문에 일단 에너지저장

9) Premium MG Cell은 연구동, 병원 등 무정전 고품질 전력공급이 필요한 주요부하에 설치되며 Noral MG Cell은 강의동이나 기숙사 등 분산전원과 결합하여 에너지 효율화가 필요한 일반부하를 대상으로 하는 Cell이며, Virtual Cell은 분산전원이 없는 일반 부하로 구성된 Cell로 IoT 센서를 통한 분석 기반의 에너지 저감 서비스를 제공한다(신용학, 2018).

장치(ESS)에 저장하였다가 사용한다. 히타치는 각 가정에 DLC(Direct Load Control)을 설치하여 열탕기를 가동시키거나 완속충전기를 이용하여 배터리를 방전한다. 동시에 마이크로 배전관리시스템(μ DMS)을 통해 변압기 수준에서 계통의 상태를 모니터링 하는데 직류급속충전기(DCFE)를 작동시켜 변압기에서 가능한 잉여전력을 차단하고 스마트PCS를 통해 과전압을 완화한다. 이러한 노력의 결과 1단계 사업은 완수하였다.

히타치는 마이크로 배전관리시스템(DMS)와 스마트PCS를 통하여 배전망에서 발생하는 전압이 높아지는 현상을 완화할 수 있었다. 특히 스마트PCS는 자동적으로 전력을 컨트롤하여 계통으로 흘러가는 전력을 조정하였다. 히타치가 마우이섬에서 적용한 기술은 <표 2-3>을 보면 알 수 있다.

<표 2-3> 하와이 마우이섬 마이크로그리드의 기술¹⁾

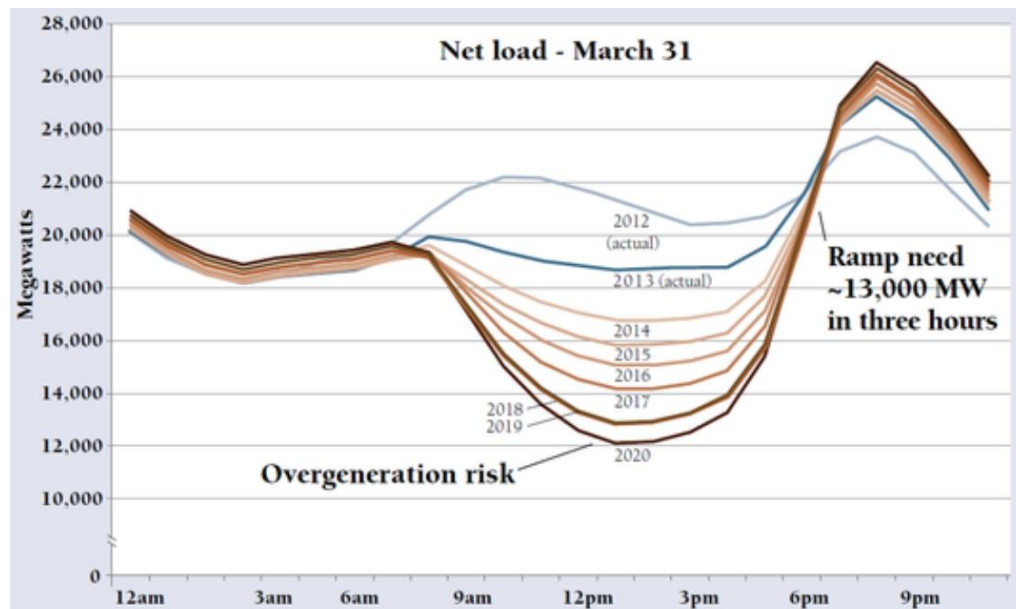
문제 발생	해법
풍력 발전량 저감	○ 전기차의 전력을 부하로 이전
재생에너지로 인한 예상치 않은 Down ramp	○ 긴급 DLC 운영
Duck Curve 이슈 (전반적인 계통 수준에서 태양광 발전이 높은 수준으로 확산)	○ V2X를 이용한 가상발전소 (EV PCS)
배전 수준에서 태양광 발전 확산	○ 과전압 완화 (Smart PCS etc.)

1) 일본 히타치는 이 사업에서 기술 솔루션을 실증하였다. 출처: 히타치 (2015)

2단계 실험은 덕 커브(Duck Curve)에 따른 램프 피크(ramp peak) 저감 실험이다. 태양광이 확산되면서 덕 커브(Duck Curve) 현상이 생기는데 이를 해결하기 위하여 보통 에너지저장장치(ESS)를 사용한다.

Waters(2018)에 따르면 덕 커브 현상이란 ①태양광발전이 이뤄지지 않는

오전과 오후에 전력수요가 급격히 늘어나거나 줄어드는 현상(ramp up)이며 ②태양광발전이 급격히 늘어난 낮 시간동안 잉여전력이 발생하는 현상을 말한다.<그림 2-3> 참조) 전자의 경우 에너지저장장치(ESS)를 사용하여 심야전력이나 낮 시간동안에 태양광발전이 생산한 전기를 저장하였다가 전력수요를 분산시킨다. 잉여전력이 발생하였을 경우 전기차 충전, 열탕기 가동 등으로 전기를 소모한다.



<그림 2-3> 태양광발전 증가로 인한 전력공급의 Duck Curve

출처: Waters (2018)

특이할 점이 하와이 마우이섬 마이크로그리드 실증에서 전기차가 에너지저장장치(ESS) 역할을 하였다는 점이다. 전기차의 에너지저장장치(ESS)는 재생에너지의 잉여전력을 저장하고 주파수 변동을 컨트롤하는데 사용되었다. 히타치는 전기차를 일터의 빌딩에서도 충전할 수 있고 긴급상황 시 빌딩으로 방전하도록 프로그래밍 하였다. 한낮에 태양광발전기가 생산한 전력을

완충한 전기차는 퇴근 후 가정으로 돌아가 방전함으로써 가정의 전력수요를 충족한다. 이런 해질녘 피크 시간대의 전력수요를 줄이며 Ramp Reak을 완화한다. 히타치는 이 실험설비를 마우이섬의 가장 큰 쇼핑몰에서 실시하였다. V2B와 V2G는 이러한 일들을 수행한 장치다. 히타치는 여기에 그치지 않고 전기차 충전소, 저장용 전지, 가정의 완속충전기를 한데 묶어 가상발전소(VPP, Virtual Power Plant)를 구성할 계획이다.

전기차를 ESS로 활용하는 V2G 기술은 2012년부터 일본 자동차 기업 도요타가 소개한 기술이다. 이 기술을 통하여 전기차는 단순한 운송수단에 머무르지 않고 전력을 저장하고 필요할 때 방전하여 사용하는 마이크로그리드의 필수 요소가 되었다.

마. 신성이엔지 용인사업장 마이크로그리드

신성이엔지 용인사업장은 한국에서 최초로 산업용 마이크로그리드를 갖춘 ‘스마트 팩토리’다. 신성이엔지의 주력사업인 클린룸에 삽입되는 FFU(Fan Filter Unit) 등을 사용하는 용인사업장은 2016년 말부터 태양광발전설비와 에너지저장장치(ESS) 도입을 시작하여 2016년 5월 마이크로그리드를 갖췄다. 용인사업장의 마이크로그리드 설비는 ①한전 계통에 바로 연결된 에너지저장장치 500kWh(PCS 250kW), ②230kW 태양광발전설비에 연결된 에너지저장장치 500kWh(PCS 250kW), ③산업부의 재생에너지 건물지원사업 지원을 받아 설치하여 공장의 LED 등에 사용되는 50kW 태양광발전설비, ④한전 계통에 바로 연결되어 생산된 전기를 판매하는 350kW 태양광발전설비로 구성되어 있다. 두 대의 ESS는 피크 저감에 사용되어 용인사업장이 지불하는 전기요금의 기본요금을 낮추는데 사용되며 350kW 태양광은 전력을 판매하여 용인사업장이 지불하는 전기요금을 줄이고 있다.

2018년 8월에 공장에너지관리시스템(FEMS) 장치를 개보수하면서 태양광발

전량을 1시간 전에 예측에 조업 스케줄에 반영하는 설비를 갖추었다. 용인사업장의 각 설비에는 소모하는 전력량을 기록하는 스마트 미터기가 달려 있으며 EPOS라고 불리는 인터페이스를 통하여 현재부하, 생산설비, 공장동, 자재창고, 제품창고의 소모 전력량을 화면을 통하여 한눈에 볼 수 있다.

신성이엔지는 용인사업장은 2019년 5월 현재 남은 전기를 활용하는 방안을 구상하고 있다. 신뢰성 DR(수요반응, Demand Response), 경제성 DR을 통하여 남은 전기를 전력거래소에 내다 파는 방식으로 수익을 얻는 방안을 구상 중이다. 이와 별도로 분당 백현동에 위치한 신성이엔지 본사 1층에는 용인사업장뿐만 아니라 증평사업장, 음성사업장의 전력수급현황을 한눈에 알 수 있는 중앙관제센터가 마련되어 있다. <그림 2-4>는 스마트 팩토리인 신성이엔지 용인사업장의 계통연계형 마이크로그리드에 대한 도식이다.



<그림 2-4> 신성이엔지 용인사업장의 마이크로그리드 구성도

출처: 신성이엔지 (2018)

제2절 우리나라 자가발전 현황

‘상용자가발전’은 전력거래소(KPX)가 사용하는 단어다. 마이크로그리드와 상용자가발전기는 유사한 개념이다. 생산한 전력을 외부에 판매하지 않고 자체 소비한다는 점이 같다. 다만 마이크로그리드는 발전과 저장, 소비를 포괄한 개념이라면 상용자가발전기는 용도가 자가소비로 지정되어 있을 뿐 ‘발전’에 초점 맞춰져 있다. 상용자가발전이 ESS를 사용하는지 여부가 확실치 않지만 개념 정의 상 생산한 전력을 매전하지 않고 소내에서 소비한다. 전력을 소내부하에 충당한다는 점은 마이크로그리드의 특징이기도 하다. 우리나라엔 마이크로그리드가 본격적으로 도입되지 않아 ‘마이크로그리드’에 관한 통계가 없는 대신 ‘상용자가발전기’에 관한 통계가 있다. 이 절에서 우리나라 상용자가발전기에 대한 통계를 통하여 우리나라의 마이크로그리드의 현황을 알아보려고 한다.

1. 화석연료 및 폐기물에 의한 자가발전 현황

상용자가발전기란 전기를 생산하여 판매할 목적이 아닌 자가용전력소비로 이용하기 위한 설비를 말한다(전력거래소, 2018). 한국전력거래소에 따르면 2017년 말 기준 우리나라 상용자가발전량이 총 발전량의 4.18%를 차지하고 있어 향후 전력수요 예측 및 전력수급계획 수립 시 중요한 변수가 될 전망이다.

상용자가발전기에 대한 조사는 1966년 한국전력공사에서 통계로 개발된 이래 작성되어 왔다. 조사대상은 2016년 말 현재 500kW 이상 상용자가발전업체이다. 2002년에는 작성기관이 한국전력공사에서 한국전력거래소로 바뀌었고 통계명칭도 2009년 상용자가발전업체조사로 바뀌었다. 상용자가발전업체조사의 분류기준은 업종, 발전형식, 생산방식, 연료이다. 연료의 경우

「2016년 신에너지 및 재생에너지 개발이용보급 촉진법 시행령」의 개정사항을 반영하여 우드칩과 목재펠릿을 새로운 연료로 2016년에 추가하였다.

전력거래소에 따르면 2017년 우리나라 총 상용자가발전설비는 39만 4,825kW다. 이 가운데 제조업이 보유한 상용자가발전설비가 97.1%를 차지하고 있다. 업종별 설비용량 점유비는 철강 75.8%, 석유화학 10.3%, 정유공장 6.5%, 비금속 1.4%이다. 2017년 총 상용자가발전량은 2,304만3,840MWh로 우리나라 총 발전량 550만3,530GWh의 4.18%를 점유하고 있다(에너지경제연구원, 2019).

2017년 제조업의 상용자가발전량은 2,276만4,716MWh로 98.7%를 점유하고 있다. 제조업 부문별 발전량 점유비를 살펴보면 철강 78.1%, 석유화학 12.2%, 정유공장 5.0%를 기록하였다. 총 39만4,825kW를 기록한 2017년 지역별 상용자가발전업체의 설비용량을 살펴보면 전남 47.0%, 경북 32.3%, 충남 10.3% 순이다. 2017년 지역별 상용자가발전업체의 발전량을 살펴보면 총 발전량인 2,304만3,840MWh 중 포스코광양제철소와 LG화학이 있는 전남 지역의 점유비가 49.0%로 가장 높았으며 포스코포항제철소가 있는 경북지역이 30.9%로 두 번째를 기록하였다. 현대제철, 한화토탈, 현대오일뱅크, LG화학이 위치한 충남의 점유비는 11.2%였다.

상용자가발전업체의 설비이용률은 2016년 60%이며 자가발전비율¹⁰⁾은 2016년 34.5%p 달한다. 전력거래소(2017)에 따르면 설비이용률은 2007년도 약 53%, 2009년도엔 50% 수준까지 감소추세를 보였으며 2010년 이후 60% 수준을 회복하다가 2013년 이후 2015년까지 다시 60% 미만으로 감소하였다(전력거래소, 2017). <표 2-4>에 사용발전업체 설비이용률과 자가발전비율 추이를 정리하였다.

10) 전력거래소는 자가발전비율을 ‘총 소비전력량 대비 자가발전량 비율’로 정의하였다. 2016년 기준 수전전력은 3만9129GWh, 자가발전량은 2만627GWh로 34.5%를 차지하고 있다.

<표 2-4> 상용발전업체 설비 이용률 및 자가발전 비율 추이

구분	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
설비 이용률(%)	53.5	57.4	50.9	59.5	61.9	61.1	55.6	56.6	57.1	60.0
자가발전비율(%)	46.7	27.5	47.5	46.6	37.4	35.8	33.9	34.1	33.0	34.5

출처: 전력거래소 (2017)

2017년 상용자가발전업체의 설비용량은 총 394만825kW이다. 이 가운데의 가장 비중이 높은 에너지원은 석탄으로 55.8%를 차지하였다. LNG가 24.5%로 다음을 이었으며 석유류가 13.4%를 차지하였다. 총 2,304만 3,840MWh의 발전량을 기록한 2017년 연료별 상용자가발전업체의 발전량을 살펴보면 석탄이 발전량의 65.8%를 차지하였으며 그 다음 LNG가 14.7%, 석유류 13.5%이다.

<표 2-5>에서 기타신재생이 0인 이유는 전력거래소가 조사를 하지 않았기 때문이다. 전력거래소(2017)는 “기타신재생이 풍력”이라며 2015년부터 풍력발전기가 조사대상에서 제외하였다. ①풍력이 상시 가동을 할 수 있는 상용자가발전기로 판단하기 어렵고 ②한국에너지공단의 신재생에너지 보급통계와 중복되기 때문이라고 이유를 제시하였다. 다음에서 신재생에너지 보급통계를 살펴보았다.

<표 2-5> 연료별 상용자가발전업체의 설비용량과 발전량(2017년)

연료	설비용량(kW)	점유비(%)	발전량(kWh)	점유비(%)
바이오가스	8,300.00	0.20	26,247.00	0.10
석유류	527,485.00	13.40	3,113,117.00	13.50
경유	-	-	-	-
B.C	-	-	-	-
저유황유	-	-	-	-
석탄	2,198,480.00	55.80	15,163,648.00	65.80
정제가스	35,000.00	0.90	235,941.00	1.00
메탄	-	-	-	-
폐기물	45,888.00	1.20	153,331.00	0.70
폐목재	0.00	0.00	0.00	0.00
화학공정열(폐열)	160,578.00	4.10	962,459.00	4.20
LNG	965,094.00	24.50	3,389,096.00	14.70
증기부생가스 폐열	-	-	-	-
기타신재생	0.00	0.00	0.00	0.00
합계	3,940,825.00	100.00	23,043,840.00	100.00

출처: 통계청

2. 신재생에너지에 의한 자가발전 현황

한국에너지공단이 2018년에 공표한 2017년 신재생에너지보급통계는 총 27개의 신재생에너지원에 대한 보급통계를 제시하고 있다. 이 가운데 정부가 중점적으로 보급정책을 펼친 태양광발전, 풍력발전, 연료전지발전을 살펴해보았다.

태양광발전의 2017년 신규 보급용량은 136만2,490kW로 전년도 90만 9,218kW보다 늘었다. 이는 전년대비 보급량이 줄어든 풍력(18만6,810→11만 3,562kW), 연료전지(4만6,787→3만2,715kW)와 다른 추세를 보여주었다. 2017년 누적보급용량 통계에 따르면 태양광발전, 풍력발전, 연료전지발전 모두 발전사업용이 대부분이었다. 이 가운데 태양광발전이 516만9,549kW로 가장 많았고 풍력발전 113만166kW, 연료전지발전 24만6,900kW 순이었다. 태양광발전과 FC발전은 가정용으로 각각 29만987kW, 1,449kW를 기록하였고 풍력발전의 경우 기타용도(7,419kW)가 차지하였다.

산업시설에 보급된 태양광발전 누적용량은 1만2,041kW이며, 풍력 430kW, 연료전지 450kW이다. 산업시설의 보급용량 순위를 살펴보면 태양광발전은 7위이며, 풍력발전은 5위, 연료전지발전은 7위를 기록하였다. 이러한 수치는 산업시설에서 태양광발전, 풍력발전, 연료전지발전의 비중이 높지 않음을 보여주고 있다.

용량별로 살펴보면 태양광발전은 50~100kW 이하가 171만1,569kW로 가장 많았고 1,000~5,000kW 이하 113만6,959kW, 5,000~1,000kW 이하 105만 9,308kW였다. 반면 풍력은 2만kW 초과에 56만1,750kW, 1만~2만kW 이하에 98만7,450kW가 몰려 대형 중심으로 보급되고 있었다. 연료전지발전은 10만~2만kW 이하 8만6,600kW, 2만kW 이하 5만8,800kW, 1,000~5,000kW 이하 5만7,440kW, 5,000~1만kW 이하 41만6,000kW로 대용량 중심이기는 하나 용량이 1,000kW부터 2만kW 초과까지 비교적 고르게 분포되어 있었다.

신재생에너지 보급통계는 용도를 발전사업용과 가정용, 공공시설, 사회복지시설, 산업시설, 상업시설, 기타로 구별하여 산출하였지만 발전사업용을 제외하고는 모두 상용자가발전기라고 확인하고 있지 않다. 그러나 발전사업용은 매진사업을 진행하며 발전사업허가증을 취득하기 때문에 발전사업용을 제외하고는 상용자가발전기라고도 해석할 수 있다.

신재생에너지 보급통계에 기록된 산업시설 누적 보급용량이 상용자가발전기라고 간주할 때 태양광, 풍력 등 재생에너지가 산업시설에서 보급될 명분이 강해진다. 온실가스가 발생하지 않으며 연료비 걱정이 없는 재생에너지가 전력수요의 절반이상을 차지하는 산업시설에 보급·확대 되어야 기후변화에 능동적으로 대처할 수 있기 때문이다.

산업시설에 재생에너지 누적 보급용량 비중이 적다는 사실을 확인됨에 따라 기후변화에 능동적으로 대응하는 재생에너지 확대에 도움이 되는 계통 연계형 산업용 마이크로그리드의 필요성이 커졌다고 볼 수 있다.

<표 2-6>에서 2017년 신재생에너지보급통계에 소개된 태양광발전, 풍력, 연료전지발전설비의 설치용량을 정리하였다.

<표 2-6> 신재생에너지보급통계(2017년)

구분	PV발전	풍력	FC발전
2017년 에너지생산량(toe)	1,516,348.811.00	462,161.67	313,302.90
2017년 발전량(MWh)	7,056,219.27	2,169,014.33	146,929.00
2017년 누적 보급용량(kW)	5,834,543.48	1,143,359.42	250,510.80
최근 3년간 신규 보급용량(kW)			
2017년	1,362,490.26	113,561.60	32,715.00
2016년	909,217.75	186,810.00	46,787.25
2015년	1,133,900.15	207,791.00	6,353.50
2017년 용도별 누적 보급용량(kW)			
가정용	290,986.69	1,053.00	1,448.75
공공시설	199,184.41	4,123.52	447.00
교육시설	89,339.79	61.80	596.00
사회복지시설	31,727.72	40.00	70.00
산업시설	12,041.43	430.00	126.00
상업시설	7,274.66	66.00	450.00
발전사업용	5,169,548.84	1,130,166.00	2,469.00
기타	34,439.93	7,419.10	473.00
합	5,834,543.48	1,143,359.42	250,510.80
2017년 용량별 누적 보급용량(kW)			
1kW 이하	10,062.37	31.50	1,025.75
1~3kW 이하	241,208.69	162.60	79.00
3~10kW 이하	37,174.39	166.92	721.00
10~50kW 이하	333,622.422	593.40	975.00
50~100kW 이하	1,711,569.20	800.00	60.00
100~500kW 이하	974,040.17	1,295.00	2,210.00
500~1,000kW 이하	1,059,307.87	4,410.00	1,000.00
1,000~5,000kW 이하	1,136,958.75	124,600.00	57,440.00
5,000~10,000kW이하	208,406.03	62,100.00	41,600.00
10,000~20,000kW이하	122,193.58	387,450.00	86,600.00
20,000kW 초과	0.00	561,750.00	58,800.00
합	5,834,543.48	1,143,359.42	250,510.80

출처: 한국에너지공단(2018)

제3절 전력망 설계와 경제성 분석을 위한 도구

계통과 마이크로그리드 등 전력망의 최적설계와 모니터링, 시뮬레이션, 경제성 분석 등을 위하여 여러 가지 소프트웨어가 사용되고 있다.

덴마크의 Aalborg대학교가 개발한 EnergyPLAN은 재생에너지 중심이지만 국가 전력망 수준을 다루고 있다. 스위스 Velasolaris가 개발한 Polysun은 마이크로그리드 중심으로 재생에너지 외에 e모빌리티, 히트펌프, 지열 등도 분석이 가능하다. 캐나다 정부가 개발한 RETScreen도 에너지 성능과 재생가능에너지와 열병합 발전 프로젝트의 타당성뿐만 아니라 에너지효율까지 분석 가능하다. 한전이 개발한 경제성평가 기반 독립형 마이크로그리드 분석 도구는 독립형 마이크로그리드의 경제성 분석을 위하여 개발되었다. 전력 전문기업 SIMENS가 개발한 PSS[®] 시리즈도 있다. 이들 소프트웨어는 계통, 송배전망을 분석한다. 미국 NREL이 개발한 HOMER는 계통연결형, 독립형 마이크로그리드 모두를 분석할 수 있는데 재생에너지, 신에너지, 디젤발전 등을 분석할 수 있어 폭넓게 사용되고 있다.

1. PSS^{®11)} 시리즈

PSS[®] 시리즈는 SIMENS가 개발한 전력 시스템 시뮬레이션과 모델링 소프트웨어군이다. ‘보다 나은 계통을 위한 스마트 도구’를 지향하는 이 소프트웨어는 변환기를 맞이한 발전산업을 위하여 개발되었다. 일간 계통 시뮬레이션과 분석 작업에 사용된다. PSS[®]는 하위에 다양한 종류의 소프트웨어가 있다. PSS[®]E는 고성능 송전계획용 소프트웨어고 PSS[®]CAPE는 컴퓨터가 보조하는 보안 시뮬레이션과 분석도구다.

11) PSS[®]를 소개하는 홈페이지는 SIMENS 사이트다.

<https://new.siemens.com/global/en/products/energy/services/transmission-distribution-smart-grid/consulting-and-planning/pss-software.html>

2. Polysun¹²⁾

스위스의 빈터투어에 위치한 velasolaris에서 개발한 폴리선은 태양광, 태양열, 지열 등 신재생에너지시스템을 설계하여 에너지 사용변화와 시스템 성능, 경제성 분석을 수행하는 소프트웨어다.(이루다, 2018) 태양광과 전기 구성품, 태양열과 기존 히팅 시스템, 히트 펌프와 지열 시스템 등 몇가지 범주로 구성되었다. 분석대상이 한정되어 있는 만큼 보다 구체적인 분석이 가능하다. 태양광과 전기 구성품에선 태양광 모듈, 인버터, 계통, 전력 소비, 배터리, e모빌리티, 발전기 등이 분석 가능하다. 히트 펌프와 지열 범주에선 공기-물 히트펌프, 물-물 히트펌프, 지열 소스 환류망(Loof), 지하수 환류망 등으로 세분되어 있다. 이 밖에도 빙축열 탱크, 냉각 시스템도 선택이 가능하다.

3. EnergyPLAN¹³⁾

덴마크의 Aalborg 대학에서 2000년대 초에 개발한 EnergyPLAN은 전력, 온열, 냉열, 산업, 수송 섹터를 포함한 국가 에너지 시스템을 시간단위로 시뮬레이션하는 프로그램이다. 국가 에너지 시스템을 다루는 것이 가장 큰 특징이다. 프리웨어로 보급되는 이 소프트웨어는 ‘진일보한 에너지시스템 분석 컴퓨터 모델’을 표방하고 있다. 다른 소프트웨어와 달리 100% 재생에너지원으로 시스템을 설계한다. 이를 개발한 Aalborg대 개발계획학과는 프로그램 보급과 함께 포럼을 운영하며 커뮤니티 형성을 목표로 하고 있다. 재생에너지국가를 지향하는 덴마크의 비전을 반영한 프로그램이라고 볼 수 있다.

12) EnergyPLAN을 소개하는 홈페이지는 POLYSUN으로 독일어와 영어로 서비스한다.
URL: <https://www.velasolaris.com/>

13) EnergyPLAN을 소개하는 홈페이지는 EnergyPLAN이다.
URL: <https://www.energyplan.eu/>

4. 전력연구원 모형

한국전력 전력연구원은 ‘경제성평가 기반 독립형 마이크로그리드 설계 프로그램’을 개발하였다. 이학주 et al.(2010)은 이 프로그램이 사용자의 설계 기본정보, 분산전원 최적조합의 우선순위와 최적배치 기능과 고장계산과 온실가스 감축량 계산 등 경제성평가 기능으로 구분된다고 밝혔다. 도서 지역이나 격오지에 적용되는 독립형 마이크로그리드 전용이다. 프로그램 상에서 마이크로그리드와 배전선로와의 연결이 가능하고 거리정보와 선로손실이 자동적으로 계산되는 특징이 있다.

이 소프트웨어는 ①사용자 설계 기본정보 개발, ②마이크로그리드 설계 개발, ③분산전원 실현성(Feasibility) 연구와 최적 조합 개발, ④분산전원 최적배치 및 네트워크 설계 개발, ⑤마이크로그리드 기술계산 개발, ⑥마이크로그리드 기술계산 개발, ⑦마이크로그리드 경제성평가 개발 기능이 탑재되어 있다.

5. HOMER¹⁴⁾

미국의 국가재생에너지연구소(National Renewable Energy Laboratory)에서 개발한 HOMER는 친근한 사용자 인터페이스가 특징이다. 독립형 마이크로그리드과 계통연결형 마이크로그리드를 구성하여 분석할 수 있다. Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables의 앞글자를 딴 명칭인 HOMER는 기본적으로 시뮬레이션(Simulation), 최적화 분석(Optimization analysis)과 민감도 분석(Sensitivity analysis)을 수행한다. 최적화 분석에선 에너지자원과 에너지설비 조합들의 순현재비용(NPC), 균등화발전단가(LCOE), 초기비용, 운영비용, 시스템 비용, ROI, IRR과 함께 에너지자원과 에너지설비의 설비용량을 제

14) HOMER를 소개하는 홈페이지는 HOMEREnergy이다.

URL: <https://www.homerenergy.com/>

시한다. 아울러 에너지원과 에너지설비의 1년 사용현황을 시각적인 그래프로 표시하기도 한다. 민감성 분석은 에너지원에 따라 가장 영향을 많이 받는 지표를 알 수 있다.

HOMER는 꾸준한 업데이트로 현재 3.12.5 버전에서는 제시하는 시스템의 순현재비용(NPC), 균등화발전단가(LCOE) 외에도 투자수익률(ROI)와 내부수익률(IRR), 온실가스 배출량(Emission)의 계산이 가능하여 기업경영의 지표로 활용할 수 있다. 더욱이 계통에 연결된 마이크로그리드를 분석할 수 있다는 장점이 있다. 이런 이유가 이 연구가 HOMER를 분석도구로 사용한 이유다. <표 2-7>에서 각종 전력망 소프트웨어를 정리하였다.

<표 2-7> 각종 전력망 설계 및 분석 소프트웨어와 특성

명칭	제작기관	주요내용
PSS® 시리즈	지멘스	○ 계통과 송배전망 중심 분석
Polysun	스위스의 민간연구소 velasolaris	○ 재생에너지, 열에너지 등 4개로 범주화하여 분석
EnergyPLAN	덴마크의 Aalborg Univ.	○ 재생에너지 중심의 국가전력망 구성
전력연구원 모형	한국전력	○ 독립형 마이크로그리드에 초점이 맞춰진 분석 도구
HOMER	미국 NREL	○ 독립형과 계통연결형 마이크로그리드 분석, 재생에너지, 신에너지, 열에너지 등 다양한 에너지원 분석 가능

제4절 선행연구 분석

1. 마이크로그리드의 하드웨어 기술에 대한 연구

마이크로그리드에서 에너지저장장치(ESS) 활용에 초점을 맞춘 연구가 있다. Testa, De Caro, la Torre and Scimone(2010)는 독립형 태양광-풍력 발전장치에 에너지저장장치(ESS)를 설치하여야 신뢰성을 향상시킬 수 있다고 밝혔다. 가정용 하이브리드 태양광-풍력-ESS 발전설비를 설계하였고 리튬이온배터리와 납축전지 등 배터리 종류별로 최적 조합을 제시하였다.

ElNozahy, Abdei-Galil and Salama(2015)는 태양광발전과 플러그인하이브리드차(PHEVs)가 보급되며 배전망에 역조류 현상이 발생하거나 전력수요가 폭증하는 등 문제가 나타났다고 지적하였다. 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하여 ESS를 활용한 다양한 경우를 시뮬레이션 하였다. 실험결과 전지에너지저장장치(BESS)를 2차 전력망에 설치하면 과부하를 완화하고 역조류를 제한할 수 있다고 밝혔다.

Gaztañaga, Landaluze, Etxeberria, Padrós, Berazaluce and Cuesta (2013)는 ESS와 중앙화된 발전소 컨트롤러를 포함하는 태양광발전소가 태양광 시스템이 계통으로 통합되는 것을 향상시키는 솔루션임을 밝혔다.

Lamberti, Calderaro, Galdi and Graditi(2016)은 몬테카를로 분석을 이용하여 태양광-ESS 발전설비의 데이터를 대규모로 분석하였다. 실제 저전압 전력망에서 태양광과 ESS의 통합이 이익임을 증명하였다. 에너지저장장치의 컨트롤이 자가소비(self-consumption)뿐만 아니라 전압 제한(voltage infringement)로 인하여 발생 가능한 태양광 단락의 위험을 줄일 수 있다.

마이크로그리드에서 전기차 활용에 초점을 맞춘 연구가 있다. Bendir, Ozpineci and Chrisian (2010)은 ESS와 태양광발전설비가 설치되고 전력 저장설비로 ‘PHEVs가 이용되는 제로에너지하우스를 실시간 데이터를 이용

하여 평가하였다. 실시간 가격제도 아래에서 ESS는 매일의 에너지 사용비용을 감소하는데 도움이 된다고 평가하였다. 계통에 전력을 보내는 태양광발전의 가격이 다르다면 낮시간 동안의 태양광발전이 비용을 보다 줄일 것이라는 결론을 내렸다.

Erdinc, Paterakis, Mendes, Bakirtzis and Catalão(2015)는 V2H(Vehicle to Home), V2G(Vehicle to Grid) 기능을 가진 전기차와 ESS, 재생에너지, 수요반응(DR) 제도, 다양한 전기요금과 넷미터링을 피크저감 등에 활용하는 방안을 제시하였다. 전력가격이 실시간으로 부여되고 참여자가 완전히 자신의 전력소비량을 아는 경우 총에너지가격이 줄어들었다. <표 2-8>에서 이와 같은 내용을 정리하였다.

<표 2-8> 마이크로그리드의 하드웨어 기술을 다룬 연구

분류	저자	연구내용	주제어	
하드웨어 기술	ESS	Testa et al. (2010)	○ 독립형 태양광-풍력 발전장치에 ESS를 설치하여야 신뢰성 향상.	신뢰성
		ElNozahy et al. (2015)	○ 태양광 확산에 따른 역조류 해결. ○ PHEVs에 의한 전력수요 증가를 ESS가 완화	역조류 전력수요
		Gaztañaga et al. (2015)	○ ESS는 태양광발전설비가 계통으로 통합되는 것을 향상시키는 솔루션	태양광의 계통으로 통합
		Lamberti et al. (2016)	○ 저전압 전력망에서 태양광과 ESS 통합이 이익임.	태양광과 ESS 통합
	전기차	Bendir et al. (2010)	○ 5kWh의 배터리가 탑재된 PHEVs는 제로에너지하우스의 피크전력수요 늘려	PHEV의 배터리
		Erdinc et al. (2015b)	○ V2H, V2G 기능을 가진 전기차와 ESS, RE, DR, 다양한 전기요금과 넷미터링 활용한 피크저감	피크저감

2. 마이크로그리드의 소프트웨어 기술을 다룬 연구

마이크로그리드에서 에너지관리시스템(EMS) 활용에 초점을 맞춘 연구가 있다. Elsied, Oukaour, Gualous and Hassan(2015)은 마이크로그리드와 계통(main grid)간 협력을 이끄는 에너지관리시스템(EMS)을 연구하겠다고 밝혔다. 마이크로그리드가 계통에 연결될 때 작동되는 진일보한 ESS인 AIMMS가 기존 GA보다 에너지 비용, 공해물질 배출을 최소화하고 가용 재생에너지의 산출을 최대화한다고 분석하였다.¹⁵⁾

Marcos, Storkel, Marroyo, Garcial and Lorenzo(2014)는 대규모 태양광발전소에 ESS를 설치하여 주파수의 단기적인 출렁거림(fluctuation)을 해결하기 위한 방법을 제시하였다. 배터리가 충전상태(SOC)가 되면 배터리의 주파수 상태가 최악이 되는 것을 방지하기 위한 제안을 하였다. 램프레이트 컨트롤(Ramp-rate control)을 위하여 주파수 보정이나 타임 시프트 기능이 있는 ESS를 활용할 것을 제시하였다.

De la Parra, Marcos, and García, and Marroyo(2015)는 램프레이트컨트롤(ramp rate control)을 위하여 인버터와 태양광 발전을 활용하여 충전 컨트롤(SOC control)하는 방식을 제안하였다.

마이크로그리드에서 인공지능(AI) 활용을 제안하는 연구가 있다. Datta, Senjyu, Yona, Funabashi, and Kim(2011)은 태양광 발전시스템의 주파수 출력변동을 ESS를 활용하여 해결하는 방법을 제시하였다. 이 연구는 태양광 출력을 평탄화하는 장치 없이 단순한 인공지능(Fuzzy) 기반의 주파수 컨트롤을 활용하였다. 태양광 추적기 서치 방식과 ESS 기반 전통적인 방식과 비교하였는데 단순한 인공지능 컨트롤(Fuzzy Control) 방식이 효과 있음이 입증되었다.

15) 여기서 AIMMS는 Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software의 약자며 GA는 generic algorithms의 약자다.

Datta and Senju(2013)는 자신의 2011년 연구에서 진행한 세가지 조건(평균 일광, 일광의 변화, 산출물로서 주파수 변동)에 따라 실험을 진행하며 태양광 인버터, ESS, 전기차를 조합하여 사용할 것을 제안하였다. 실험결과 만족스럽게 주파수를 컨트롤할 수 있었다.

마이크로그리드에서 알고리즘 설계에 관한 연구가 있다. 최영준(2010)은 마이크로그리드 구성에 필요한 수요 정보 분석과 분산에너지원 최적조합, GAMS를 이용한 경제성 평가 방안 등 마이크로그리드 엔지니어링 기법을 개발하였다.

정태영(2011)은 마이크로 전원의 제어 알고리즘, 마이크로그리드의 운용과 보호를 위한 시스템을 제안하였다. 이 시스템의 알고리즘을 토대로 시뮬레이션 모형과 시뮬레이터를 개발한 뒤 실증 단지를 구축하였다.

마이크로그리드에서 발전량 예측과 전망에 초점을 맞춘 연구가 있다. Pérez, Beltran, Aparicio and Rodriguez(2013)는 MPC(Model Predictive Control) 접근법을 사용하였다. 이들은 태양광발전을 ESS를 활용하여 실시간으로 관리하며 최적의 경제적 보상을 구하는 방안을 소개하였다. MPC 기법은 태양광-ESS 발전설비가 확대보급 되고 하루 혹은 시간 단위의 전력거래 시장(예컨대 DR)이 열립에 따라 각광받기 시작하였다. 날씨 예보를 착안하여 미리 태양광의 발전량을 예측한다면 전력감축의무를 어겨 과징금을부과하는 사태를 미온에 방지할 수 있다.

Paterakis, Erdinç, Bakirtzis and Catalão(2015)는 시간별 가격과 피크전력 제한 아래 하루 전에 스마트 하우스의 가전기기 최적사용 스케줄을 개발하는 DR 기반 가정용에너지관리시스템(HEMS)을 보고하였다. 빙축열 에어컨과 열탕기, 열을 사용하지 않는 세탁기와 식기세척기, 전기차, 에너지저장장치(ESS), 최종 수용가에 설치된 분산발전이 대상이다. <표 2-9>에 이와 같은 내용을 정리하였다.

<표 2-9> 마이크로그리드의 소프트웨어 기술을 다룬 연구

분류	저자	연구내용	주제어	
소프트웨어 기술	에너지관리시스템	Elsied et al. (2015)	○ 마이크로그리드와 계통 간 협력을 이끄는 에너지관리시스템(EMS)	마이크로그리드와 계통 연계
		Marcos et al. (2014)	○ Ramp-rate control을 사용하여 태양광발전-ESS의 출렁거림 해결	램프레이트 컨트롤
		de la Parra et al. (2015)	○ 인버터 활용 fluctuation 억제충전 컨트롤(SOC control) 사용	램프레이트 컨트롤
	인공지능	Datta et al. (2011)	○ 태양광 출력 평탄화 장치없이 Fuzzy 기반의 주파수 컨트롤	Fuzzy
		Datta et al. (2013)	○ 2011년 연구를 전기차가 갖춰진 MW급 태양광 실증단지로 확대	Fuzzy
	알고리즘	최영준 (2010)	○ 마이크로그리드 엔지니어링 기법 개발 후 독립형에 적용	
		정태영 (2011)	○ 마이크로 전원의 제어 알고리즘, 마이크로그리드 운용과 보호를 위한 시스템 알고리즘	
	예측전망	Pérez et al. (2013)	○ MPC 접근법을 사용 태양광-ESS 발전설비를 실시간으로 관리	MPC
		Paterakis et al. (2015)	○ 하루 전에 전력소비 최적 사용 스케줄 제시가능 DR기반 HEMS	DR기반 HEMS

3. 마이크로그리드가 적용된 사이트에 관한 연구

이병두·박대흠·정홍구(2013)는 일반적인 오피스건물에 열원장비로 냉동기와 보일러 적용을 가정하여 최적의 신재생에너지 분석을 실시하였다.

HOMER 프로그램을 이용하여 전기요금이 kWh당 1.2달러일 경우 도시가스 요금과 관계없이 계통과 태양광발전이 경제성 있음을 발견하였다.

Lan, Wen, Hong, Yu and Zhang(2015)은 투자 비용, 연료 비용과 이산화탄소 배출을 최소화하는 선박용 독립형 발전시스템을 제안하였다. 선박은 이동하기 때문에 날짜, 지역시간, 시간대, 위도와 경도가 매번 달라 육지에 고정된 태양광발전과 운영방식이 다르다.

우경태 등(2016)은 부산대 부산캠퍼스를 대상으로 캠퍼스 마이크로그리드에 의한 피크 부하 시의 교내 전력수요 해소에 따른 피크저감(Peak Shaving) 효과를 분석하였다. 분석결과 1년 동안 매시간 78.94kW의 수요 감소가 효과가 있다.

황민주(2017)는 학교의 부하 데이터를 활용하여 태양광-ESS-히트펌프 발전설비를 경제적으로 활용하기 위한 방안을 모색하였다. 특히, 태양광 잉여 전력을 활용한 ESS 충·방전, 전기 구동식 히트펌프인 EHP (Electric Heat Pump) 냉·난방 개선 및 상계 운전 알고리즘을 제안하였다. <표 2-10>에 이와 같은 내용을 정리하였다.

<표 2-10> 마이크로그리드 적용 사이트에 관한 연구

분류	저자	연구내용	주제어
사이트 적용	이병두 등. (2013)	○ 오피스 건물에 열원장비로 냉동기와 보일러 적용을 가정하여 최적의 재생에너지 분석	오피스건물
	Lan et al.(2015)	○ 태양광-디젤-ESS 선박용 독립형 발전	선박
	우경태 등. (2016)	○ 부산대 부산캠퍼스를 대상으로 캠퍼스 마이크로그리드 피크저감 효과	대학캠퍼스
	황민주 (2017)	○ 학교 부하 데이터를 활용, 태양광-ESS-히트펌프 발전설비의 경제성	학교

4. 마이크로그리드 제도 개선에 관한 연구

마이크로그리드를 전력거래에 활용하는 방안을 분석한 연구가 있다. Beltran, Bilbao Belenguer, Etxeberria-Otadui and Rodriguez(2013)는 태양광-ESS 발전설비에서 ESS를 최소화하는 방안을 연구하였다. ESS에 힘입어 태양광발전설비가 날씨 조건에 관계없이 운행될 수 있게 되었다고 평가하고 ESS의 적절한 용량을 연구하였다.

Beltran, Pérez, Aparicio and Rodriguez(2013)는 일일전기시장(intraday electricity markets)이 열린다면 태양광에서 발전한 전기를 저장하기 위하여 태양광발전설비에 설치하는 ESS를 최소한으로 줄일 수 있다고 분석하였다. 아울러 부하의 크기를 초과하는 과도한 발전에서 오는 부작용도 없을 것이라고 결론지었다.

Hanna, Ghonima, Kleissl, Tynan and Victor(2017)는 정책에 따라 사업모델이 달라지기 때문에 올바른 정책의 중요성을 강조하였다. 가스 가격이 싼 미국 캘리포니아주 남부에서 마이크로그리드를 실증한 결과 천연가스 기술이 모든 사업모델을 뒷받침함을 발견하였다. 캘리포니아에서 재생에너지에 에너지에 대한 적절한 투자가 재생에너지를 확산하였지만 에너지 제도가 가스에 유리한 현재 상황에서는 온실가스 문제를 해결하기 어려울 것이라고 전망하였다.

마이크로그리드를 활용하여 DR시장에서 수익을 구하는 방안을 분석한 연구가 있다. Erdinc, Paterakis, Pappi, Bakirtzis, and Catalão(2015)는 스마트 하우스에 추가되는 분산자원과 ESS의 크기가 수요 반응에 어떻게 영향을 미치는지 일반 집과 비교하여 연구하였다. 가정에 설치되는 분산자원과 ESS의 크기가 어느 정도면 적합한지 제시하였다. <표 2-11>에서 이와 같은 내용을 정리하였다.

<표 2-11> 마이크로그리드 제도 개선에 관한 연구

분류	저자	연구내용	키워드
제도 개선	전력거래	Beltran et al. (2013a) ○ 태양광-ESS 발전설비에서 ESS를 최소화하는 에너지전략 제시. 계통 관리와 운영의 조화	PV-ESS MG의 조화
	전력거래	Beltran et al. (2013b) ○ 일일전기시장이 열린다면 태양광 발전설비에 설치하는 ESS 최소화	일일전기 시장
	DR 시장	Erdinc et al. (2015a) ○ 스마트 하우스에 추가되는 분산 자원과 ESS의 크기가 수요반응의 영향	스마트 하우스
	BM	Ryan Hanna et al. (2017) ○ 재생에너지가 확대지만 값싼 가스 가격으로 온실가스 저감 활동이 위축됨을 지적	올바른 정책

5. 마이크로그리드의 경제성 평가에 관한 연구

최적화된 마이크로그리드에 관한 연구가 있다. Clavier, Joós, and Wong(2013)은 디젤발전이 유일한 분산에너지원인 격오지 마을에 태양광-ESS 발전설비를 설치하여 발생하는 경제적 이득을 비용편익 분석(Cost-Benefit analysis)을 통하여 제시하였다. 태양광 모듈과 ESS의 보급을 통하여 디젤발전의 가동을 줄일 수 있었다.

Kaldellis(2008)는 지중해 섬에 설치할 독립형 태양광-ESS 마이크로그리드의 재무적 타당성을 연구하였다. 실험결과 기존보다 발전비용이 42% 줄어들어 kWh당 0.18 유로의 비용이 발생한다고 분석하였다.

Kaldellis, Zafirakis, Kaldelli, and Kavadias(2009)는 태양광-ESS 시스템이 지역망(local network)의 신뢰성을 높이고 섬에서 전력발전비용을 낮추며 환경 영향 없이 고품질의 전력을 제공함을 밝혔다. 가장 효과적인 태양광-ESS 설비의 조합은 1,300~1,600kW의 태양광발전시설과 PHS(pumped hydro

storage)와 NaS(sodium-sulphur batteries) ESS가 결합된 시스템이다.

엄지영과 김용기(2019)는 HOMER를 이용하여 국내 공동주택 세대에서 활용할 수 있는 태양광발전과 연계한 가정용 ESS의 가격 조건과 요금체계, 용량 등에 따른 경제성을 분석하였다. 분석결과 낮은 전기요금, 누진요금체계와 높은 ESS 가격 조건에서는 태양광발전 연계 가정용 ESS의 경제성이 낮았다. 소용량의 저가의 가정용 ESS 개발과 가정용 시간대 별 요금체계 도입, 그리고 가정용 ESS 보조금 지원이 필요하다고 분석하였다.

마이크로그리드의 민감도 분석에 관한 연구가 있다. 임중환(2015)은 태양광발전과 같이 교체비용이 비싸거나 배터리와 같이 교체주기가 짧고 용량이 큰 구성품의 민감도가 크게 나타남을 발견하였다. 모든 구성품에 대해 순현재비용(NPC)과 균등화발전비용(LCOE) 보다는 운영비용에 대한 민감도가 현저히 높았다. 경제성 민감도가 가장 큰 구성품은 배터리였다. <표 2-12>에서 이와 같은 내용을 정리하였다.

<표 2-12> 마이크로그리드의 경제성 평가에 관한 연구

분류	저자	연구내용	키워드	
경제성 평가	최적화	Clavier et al.(2013)	○ 디젤발전 운영 격오지 태양광-ESS 발전설비 경제이득 정량화	격오지 마을
		Kaldelis et al.(2008)	○ 지중해 섬의 독립형 PV발전-ESS 마이크로그리드의 재무 타당성	지중해 섬
		Kaldelis et al.(2009)	○ 가장 효과적인 태양광-ESS의 조합은 PV 1300~1600kW이며 PHS와 NaS가 최적 솔루션	PV+ PHS+NaS
		엄지영 et al.(2019)	○ 국내 공동주택에 활용가능한 PV 발전-가정용 ESS의 가격 조건과 경제성 분석	공동주택
	민감도	임중환 et al.(2015)	○ 독립형 풍력 태양광 복합발전시스템에 대해서 경제성 분석 후 민감성 분석	독립형 풍력태양광 복합발전

6. 마이크로그리드에 참여하는 행위자의 행태에 관한 연구

Ma, Liu, Zhang, Tushar and Yuen(2018)는 게임이론을 활용하여 마이크로그리드에서 열병합발전소와 태양광발전 프로슈머와의 거래를 분석하였다. 다양한 에너지관리 프레임워크를 제안하였는데 특히 스택클버그 게임(Stackelberg game)¹⁶⁾에 기반한 최적화모델을 설계하였다. 이 모델에서 마이크로그리드 운영자(MGO)는 리더이며 태양광발전 프로슈머는 추종자이다. 양자 간 게임에서 스택클버그 균형(Stackelberg equilibrium)이 존재함이 확인되었다.

Santos, Ma, Olsen and Jorgensen(2018)은 종래의 마이크로그리드 연구가 기술 요인 탐색이나 최적화 연구에 집중되었다고 비판하고 기술, 사회, 경제 분석을 마이크로그리드 설계에 반영하여야 한다고 밝혔다. 작은 섬에 설치할 마이크로그리드를 설계하며 다양한 목적의 최적화 프레임워크에 다른 기준과 고려할 점을 제시하였다. 경제성 분석 중심의 기존 연구와 달리 거주자의 정주비용과 문화적인 측면이 고려되었다. <표 2-13>에서 이와 같은 내용을 정리하였다.

<표 2-13> 마이크로그리드 참여 행위자의 행태 연구

분류		저자	연구내용	키워드
행태	사회경제분석	Ma et al. (2016)	○ 열병합발전소와 PV 프로슈머 간 거래를 Stackelberg game 기반 최적화 모델 설계	Stackelberg game
		Santos et al.(2108)	○ 기술 사회, 경제 분석을 마이크로그리드 설계에 반영	social economic analysis

16) 이 게임의 Stackelberg Equilibrium(SE)에서 리더는 추종자들이 보내는 가장 좋은 가격에 맞는 적정 가격을 얻는다. SE는 일련의 전략이며 한 플레이어가 단독으로 전략을 바꿔 이익을 얻는 플레이어는 없다. 이런 의미에서 SE를 MGO와 프로슈머 모두로부터 나오는 전략의 조합(a strategy set is a combination of the strategies from every player, i.e.,MGO and prosumers)라고 정의내릴 수 있다.

7. 마이크로그리드 연구를 분석한 연구

Hirsch, Parag, and Guerrero(2018)은 마이크로그리드에 대한 문헌연구를 정리하였다. 이 연구에 따르면 마이크로그리드는 화석연료를 감축하고 태양광과 풍력 등 분산전원이 늘어나는 가운데 계통의 신뢰성과 복원력을 향상시키는 것으로 분석되었다. 마이크로그리드의 설치장소를 캠퍼스, 군부대, 가정, 격오지로 분류하였으며 스마트그리드와 마이크로그리드의 연계와 에너지 정책과의 공조를 강조하였다. 이 연구의 분류에 산업시설에 대한 내용이 없어 산업용 마이크로그리드에 대한 연구가 필요함을 시사하였다.

선행 연구와 비교할 때 ‘계통연결형 산업용 마이크로그리드’를 다루는 본 연구는 국내외에서 처음으로 공장의 전력소비 데이터를 기반으로 연구를 진행하였다는 특색이 있다. <표 2-14>에서 이와 같은 내용을 정리하였다.

<표 2-14> 마이크로그리드 연구 분석

분류	저자	연구내용	키워드
전반적 고찰	총괄 Hirsch et al.(2018)	<ul style="list-style-type: none"> ○ MG 연구는 분산전원이 확충되는 계통의 신뢰도와 복원력 향상에 중점 ○ 설치장소를 캠퍼스, 군부대, 가정, 격오지로 분류 	분산전원확충에 따른 계통의 신뢰성과 복원력

제 3 장 연구 방법과 입력 자료

제1절 최적화 모형(HOMER)

본 연구는 HOMER를 이용하여 경제성 분석을 실시하였다. 계통연계형 산업용 마이크로그리드에 설치된 상용자가발전기와 한전수전의 시간별-원별 실측 데이터를 HOMER에 입력하여 분석을 진행하였다.

1. HOMER와 경제성 분석

마이크로전력 최적화 모델인 HOMER는 계통 독립형과 계통 연결형 전력 시스템의 설계 평가를 간편하게 진행할 수 있는 모형이다. HOMER는 어떤 에너지원/설비가 전력시스템에 적합한지 여부, 사용할 에너지원/설비의 수나 크기에 대한 답을 시뮬레이션(Simulation), 최적화(Optimization) 분석, 민감성(Sensitivity) 분석을 통하여 제시한다. 사용자가 기술 선택, 에너지원·설비의 비용, 자원의 가용성 등이 담긴 값을 입력하면 HOMER는 이들 입력값을 이용하여 다른 시스템 체계, 에너지원/설비의 조합을 시뮬레이션하여 결과를 도출한다. 순현재비용(Net Present Cost: NPC)이 가장 낮은 마이크로그리드부터 높은 것까지 순서대로 제시한다(HOMER ENERGY, 2019).

HOMER는 평균 풍속, 일사량, 디젤 연료 가격 등 자원 가용성과 경제적 조건과 같은 요인들을 변화시킴으로써 민감도 분석이 가능하다(정민지, 2016). HOMER에서 민감도 분석은 다양한 종류의 입력값을 넣고 최적화 분석을 반복하는 방식으로 진행된다. 민감도의 정도는 자원의 가용성이나 에너지원·설비 비용으로 표시되며 전력시스템의 설계나 운영에 가장 크게 영향을 미치는 요인들을 식별한다. 동시에 민감도 분석의 결과를 활용하여 계획 수립과 정책 결정에 필요한 기술이 무엇인지에 대하여 답할 수도 있다.

시뮬레이션은 가장 작은 순현재비용(NPC)을 가장 위에 드러내고 점차 큰 순서로 아래로 나열한다. 이들 가운데 순현재비용(NPC)이 가장 작은 시스템 구성항목이 최적 설계값으로 제시된다(이병두·박대흠·정홍구, 2013) HOMER의 경제성 분석 가운데 순현재비용(NPC)의 최소값을 보여주는 함수는 식 (1)과 같다.

$$\text{Min}(NPC_i) = \text{Min} \sum_{i=1}^n \frac{(K_{i+1} + RP_{i+1} + OM_{t+1})}{(1+r)^i} \quad (1)$$

이때, r : 이자율

K_{t+i} : $t+i$ 년도의 초기 투자비

RP_{t+i} : $t+i$ 년도의 교체비

OM_{t+i} : $t+i$ 년도의 운영 유지비

HOMER의 경제성 분석 가운데 최적화 분석의 결과는 순현재비용(NPC)으로 나타낸다. 순현재비용은 프로젝트 기간 동안 발생하는 모든 비용과 수입을 할인율 적용을 통해 미래의 현금 흐름을 현재화한 것이다(이학주·채우규·정원욱·김주용, 2010). 이때 프로젝트 기간 동안 모든 가격이 같은 비율로 상승한다고 가정한다. HOMER는 순현재비용(NPC)을 프로젝트 기간 동안 구성품의 설치, 운영의 모든 비용의 현재가치에서 수익의 현재가치를 뺀 것¹⁷⁾이라고 정의하였다. HOMER는 할인계수(discount factor)에 인플레이션(inflation)¹⁸⁾을 계산하지 않고 화폐의 시간가치(the time value of money)가 계산된 할인계수를 사용한다. HOMER의 모든 비용은 원년의 금액(year

17) 이에 해당하는 HOMER Manual의 문구는 “The net present cost(or life-cycle cost) of component is the present value of all the cost of installing and operating that component over the project lifetime, minus the present value of all the revenues that is earns over the project lifetime “이다.

18) HOMER는 인플레이션이 명목 할인율(nominal discount rate) 대신 실제 할인율(the real discount rate)를 사용한 분석에서 계수화한 것이라고 설명하였다.

zero dollar)이기 때문에 프로젝트 기간 동안 연료비용과 운영관리비용이 같다. 순현재비용(NPC)과 비교할 수 있는 개념이 순현재가치(NPV)¹⁹⁾이다. HOMER는 “순현재가치와 순현재비용은 부호만 다르다²⁰⁾” 고 설명하였다.

식 (2)는 균등화발전단가(LCOE)를 계산하는 함수이다. HOMER는 LCOE를 프로그램 상에서 ‘COE’ 로 표시한다(장하나와 김수덕, 2006).

$$COE = \frac{C_{anntotal}}{E_{prim} + E_{def} + E_{gridsale}} \quad (2)$$

이때, E_{prim} : 시스템이 연간 공급 가능한 초기부하.

E_{def} : 저장후 나중에 사용이 가능한 지연부하.

$E_{gridsale}$: 연간 전력계통에 판매할 수 있는 총량.

본 연구에서는 경제성 분석을 위하여 HOMER가 제시한 순현재비용(NPC), ②균등화발전단가(LCOE), ③운영비용(Operation cost), ④초기자본(Initial cost), ⑤투자회수율(ROD), ⑥내부수익율(IRR), ⑦에너지요금, ⑧수요 요금 지표를 활용하였다.

2. HOMER와 기후환경 영향 분석

HOMER는 배출부과금 (penalty for emission)을 계산하기 위하여 식 (3)과 같은 함수를 사용한다. 본 연구에서는 배출 부과금을 배출권 가격으로 간주

19) 순현재가치(NPV)는 투자안의 현금 유출과 현금 유입의 현재가치를 다 더한 값이다. NPV>0이면 투자안이 채택되고, NPV<0이면 투자안이 기각된다. 이때, t = 기간, C_t 는 t 시점에서 현금흐름, r 은 할인율. C_0 는 현재 시점에서 투자하는 금액을 말한다.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0$$

20) 이에 해당하는 HOMER Manual의 어구는 “The net present value and the net present cost differ only in sign “이다.

하였다.

$$C_{emissions} = \frac{c_{CO_2}M_{CO_2} + c_{CO}M_{CO} + c_{UHC}M_{UHC} + c_{PM}M_{PM} + c_{SO_2}M_{SO_2} + c_{NO_x}M_{NO_x}}{1000} \quad (3)$$

이때, c_{CO_2} : 이산화탄소 배출에 대한 부과금(\$/t)

c_{CO} : 일산화탄소 배출에 대한 부과금(\$/t)

c_{UHC} : 미연탄화수소 배출에 대한 부과금(\$/t)

c_{PM} : 입자상물질(먼지)의 배출에 대한 부과금(\$/t)

c_{NO_x} : 산화질소(NO_x) 배출에 대한 부과금(\$/t)

M_{CO_2} : 연간 이산화탄소 배출량(kg/yr)

M_{CO} : 연간 일산화탄소 배출량(kg/yr)

M_{UHC} : 연간 미연탄화수소 배출량(kg/yr)

M_{PM} : 연간 입자상물질(먼지)의 배출량(kg/yr)

M_{SO_2} : 연간 아황산가스의 배출량(kg/yr)

M_{NO_x} : 연간 질소산화물(NO_x)의 배출량(kg/yr)

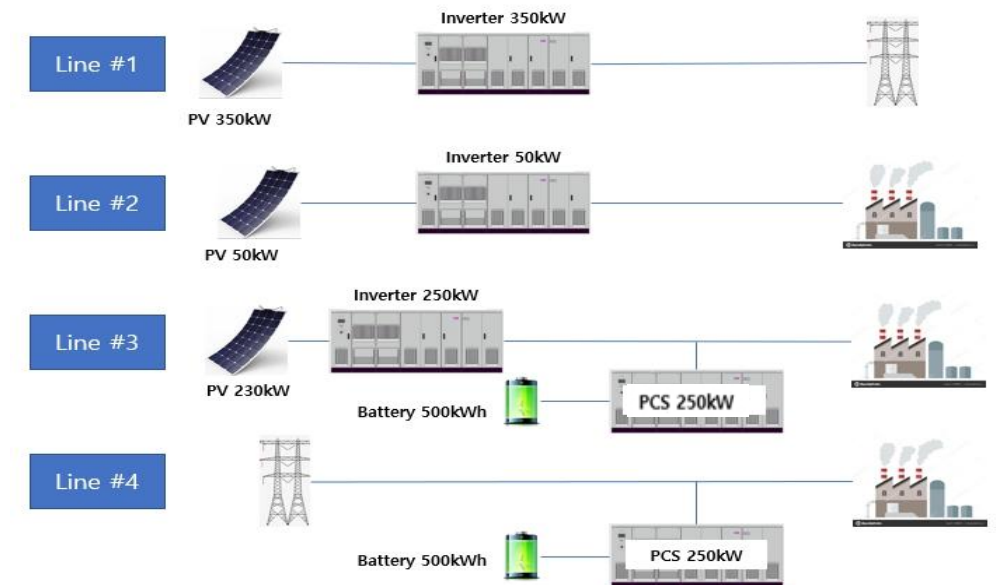
본 연구는 기후환경 영향 분석을 위하여 HOMER가 제시하는 CO_2 연료 소모량 자료를 활용하였다. 연료 소모량은 다시 총 소모량, 일일 소모량, 시간당 소모량으로 세분된다.

제2절 대상시설 선정

1. 대상시설의 개요

우리나라에는 마이크로그리드에 관한 통계가 없고, 태양광발전설비가 상용자가발전기인 산업용 마이크로그리드의 사례는 우리나라에서 연구가 보고가 아직 없다. 본 연구에서는 A공장의 대상시설이 연구대상이다. A공장은 경기도 용인시 처인구 남사면 완장리에 위치하여 있다. A공장에는 매전용 태양광발전 350kW와 소내부하용 태양광발전 230kW와 50kW이 있으며 250kW의 인버터가 부착된 리튬이온배터리형 에너지저장장치(ESS) 500kWh 두 대가 있다. 350kW 태양광발전시설은 발전사업자허가증을 등록하고 계통에 연결되어 생산한 전기를 한전에 팔고 있다. 230kW 태양광발전시설은 500kWh의 ESS에 연결되어 전력피크저감에 사용된다. 50kW 태양광발전시설도 공장 내부에 연결되어 전등 등 소내부하로 사용된다. 나머지 500kWh 리튬이온배터리형 ESS는 계통에 직접 연결되어 전기요금이 싼 야간에 전력을 저장하였다가 낮의 전력피크 시간대에 방전하여 전력피크를 줄이는데 사용된다.

이러한 설비 2016년도 말부터 산업용 마이크로그리드를 조성한 A공장은 2017년부터 기존의 한전수전 데이터와 함께 태양광발전 데이터와 에너지저장장치(ESS) 데이터를 본격적으로 축적하기 시작하였다. 연구의 대상시설은 230kW와 50kW 태양광발전시설과 500kWh ESS이다. 그체적으로 2017년 한국전력에서 구입한 전력량과 소내부하용으로 사용된 230kW, 50kW 태양광발전시설이 생산한 전력량 데이터를 본 연구에서 대상시설 데이터로 설정하고 분석하였다. 이 데이터는 계통연계용 산업용 마이크로그리드를 분석하려는 연구에 충분히 활용할 수 있고 선행연구가 없는 등 희소성을 지녔다. <그림 3-1>은 A공장의 계통연계형 마이크로그리드의 구성이다.



〈그림 3-1〉 대상시설의 계통연계형 마이크로그리드 구성도

2. 대상 시설의 계통연계형 산업용 마이크로그리드의 현황

A공장이 산업용(을) 고압A 선택Ⅱ 요금제를 사용하고 있다. 2017년 총 152만2,274kWh의 전력을 사용하였는데 이 가운데 총 131만9,312kWh를 계통을 통하여 전력을 한전으로 부터 구매하였다. A공장이 총 사용한 전력량을 금액으로 환산하면 2017년 총 1억4,690만원에 해당하는 금액²¹⁾이다. 용인사업장에 설치한 230kW와 50kW 태양광은 20만2,962kWh를 생산하였다. 이를 금액으로 환산하면 2,439만원²²⁾에 해당한다.

A공장의 부하에서 태양광발전이 차지하는 비중은 최대 27%까지 상승하였다. 태양광발전량이 A공장의 부하에서 차지하는 비중은 평균 16%다.

21) 이 금액에는 약 6,012만8,320원의 기본요금에 포함되어 있지 않다. 2017년 A공장의 전기요금의 기본요금은 2017년 최대수요 616kW×8,230원×11개월+2016년 최대전력수요 530kW×8,230원×1개월로 계산하였다. A공장의 최대수요는 2월에 갱신되어 2월부터 최대수요인 616kW가 11개월간 적용되었고 1월은 전년도 최대수요인 530kW가 적용되어 계산되었다.

22) 1억4,690만원-1억2,251만원

2017년 태양광발전량은 6월과 9월에 고점에 도달하였다. 230kW와 50kW의 태양광발전시설의 발전량은 6월 3만2,453kW, 9월 3만2,034kW를 기록(고점). 이후 강수량 증가로 인해 태양광발전량이 우하향 추세를 그렸는데 특히 7~8월에 태양광발전량이 적은 사실 주목되었다. 태양광발전의 평균발전시간은 3.1시간이다.

<표 3-1> 대상시설 현황

위치		○ 경기도 용인시 처인구 남사면 완장리 동경 127° 26 ' 30.92' 북위 37° 03 ' 07.81 "		
현 황	발전설비	○ 태양광발전설비 350kW, 230kW, 50kW ESS LIB ESS 500kWh 2대(각 인버터 250kW 설치)		
	자원 ²³⁾	○ 평균 일조시간 0.543453hr/day. 일사량 0.925304MJ/m ² /day		
	전력	계량	단위	데이터 평균값
	평균	kWh/day		23,977.64
		kW		999.07
	피크	kW		4,442.9
	부하 요인			0.22
		○ 연간평균(Scaled Annual Average): 23,977.64 kWh/day		
선 정 이 유	발전설비	○ 전력연계형 산업용 마이크로그리드가 2016년 말 구축되어 2017년 한전수전, 태양광발전량, ESS 데이터 확보 가능함		
	자원	○ 산업단지에 속하여 있음		
	전력	○ 산업시설인 공장이 소모하는 부하임		

23) 기상청 자료에는 용인 지역이 없어 인근 수원 지역 자료로 대체하였다.

제3절 HOMER 입력 자료

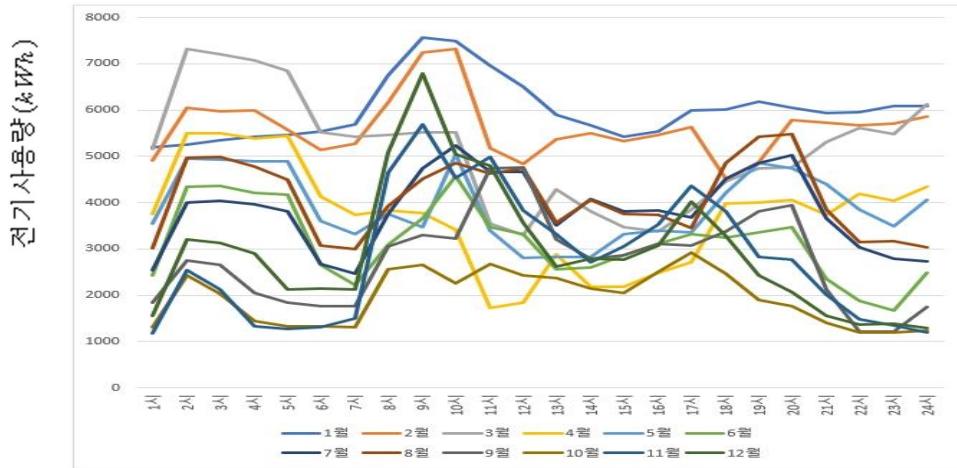
1. 대상시설의 전력수요 분석

분석에 사용된 전력부하(Electric Load)는 A공장이 제공하였다. 2017년 1년간 1시간 단위의 실측 데이터로서 한전수전 데이터와 태양광발전량 데이터로 구성되어 있다. A공장은 전력부하를 태양광발전량과 한전수전량의 합으로 정의하고 있다. A공장이 2017년에 저장해둔 태양광 230kW와 50kW의 매일의 데이터를 모아 월데이터를 만들고 1월 1일~12월 31일까지 12개월분의 월데이터를 모아 연간 데이터를 만들었다.²⁴⁾ 더불어 한전의 아이스마트(iSmart)²⁵⁾에서 A공장의 전력부하 데이터를 수집하여 A공장의 태양광발전 데이터와 합산하여 A공장의 전력부하 데이터를 작성하였다.

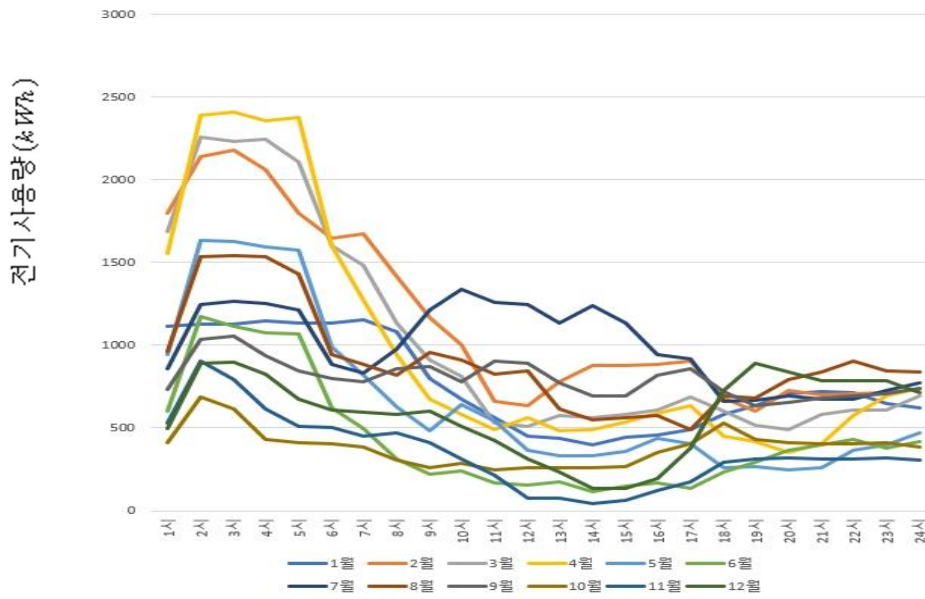
<그림 3-2>과 <그림 3-3>는 A공장의 실측데이터를 HOMER가 요구하는 데이터 사양에 맞게 각각 주중, 주말로 구분하고 각각 가로축은 월별, 세로축은 시간대별로 재구성한 데이터의 그래프다. 분석의 정확성을 위하여 A공장이 제공한 전력부하를 주중과 주말로 나누고 HOMER의 해당항목에 입력하였다. 이를 통하여 주중에 공장운영이 활발하고 주말에는 한산한 공장의 특성을 반영하였다. 실제로 A공장의 주중데이터의 각 셀의 값과 주말데이터의 각 셀의 값은 큰 차이가 났다. 주중, 주말의 전력부하 데이터를 만들기 위하여 해당 월의 일 데이터를 합산하였다.

24) A공장의 월별 데이터를 갖고 있었으나 검침일이 매월 10일이기 때문에 HOMER에 그대로 적용할 수 없었다. 엄격히 말하면 월데이터는 매월 1일부터 그날 마지막날까지의 데이터이기 때문이다.

25) 한전의 iSmart는 가입자들이 효율적인 전력사용량 관리를 통하여 전기사용량과 전기요금을 절감할 목적으로 제작되었다. <https://pccs.kepco.co.kr/iSmart/>



<그림 3-2> HOMER용 대상시설의 주중 부하 그래프



<그림 3-3> HOMER용 대상시설의 주말 부하 그래프

<그림 3-4>는 A공장의 전력부하를 입력 후 HOMER의 분석결과를 나타낸다. 좌측 하단의 ‘Show All Months...’ 라고 적힌 HOMER의 버튼을 누르면 주중과 주말 데이터를 입력할 수 있는 창이 뜬다. 이 버튼 아래는 무작위 변동성(Random Variability)라는 입력창이 있다. 입력창은 일간(Day-to-day) 변동성을 입력하는 창과 시간 간(Timestep) 변동성을 입력하는 창으로 구성되어 있다. A공장의 전력부하 데이터를 바탕으로 일간 변동성(%)과 시간 간 변동성(%)을 계산하여 각각 27.7과 22.7을 입력하였다.

일간 변동성의 경우 일간 변동치의 절대값 평균을 해당 월의 전력사용량 평균으로 당월의 일간 변동성을 구한다. 한해의 일간 변동성은 매월 집계된 일간 변동성의 평균이다. 시간 간 변동성의 경우 사용전력량의 평균에서 시간대별 사용전력량의 평균을 빼 값의 절대값을 취하고 절대값의 평균을 시간대별 사용전력량으로 나눈 값의 평균이다.



<그림 3-4> 대상시설 부하 데이터 입력 후 HOMER의 분석 결과

각 값을 입력하면 데이터의 일간 특성(Daily Profile), 계절 특성(Seasoned Profile), 연간 특성(Yearly Profile)을 분석한 표가 자동적으로 생성된다. 아울러 입력 데이터의 일간 평균, 평균, 피크, 부하요인이 baseline과 scaled된 상태로 구별되어 도출되었다. 맨 하단엔 scaled된 연간평균(Scaled Annual Average, 데이터 평균값)이 계산되어 나왔다. A공장의 전력부하 데이터의 scaled된 연간평균(데이터 평균값)은 2만3,977.64kWh/day이다. 여기서 scaled는 편이(bias)를 없애기 위하여 비례화한 것을 말한다.

<표 3-2>는 A공장의 전력부하 데이터에 관하여 요약하고 있다. 이때 scaled 데이터를 선택한다. A공장은 하루 평균 2만3,977.64kWh, 999.07kW의 전력을 사용하고 있었고 피크전력은 4,442.9kW였다. 부하량²⁶⁾은 0.22였다. A공장의 계약전력이 990kW임을 감안할 때 A공장은 계약전력보다 9.07kW 많은 전력을 사용하는 것으로 분석된다.

A공장의 일간 특성을 살펴보면 하루 중 가장 많이 전력을 사용하는 시간대는 오전 8시로 7,575.13kW를 사용하였다. A공장의 출근 시간은 8시 30분으로 출근 시간 30분 전에 공장의 생산설비, 냉공조기 등이 가동되기 때문인 것으로 분석된다. A공장의 계절 특성을 살펴보면 1월, 2월, 3월에 전력 사용량이 많았고 7월, 8월에 전력사용량이 다시 증가하였다가 감소하는 사실을 볼 수 있다. 연간 가장 전력 사용량이 많은 달은 1월로 평균 4,882.57kW를 사용하였다. 이는 겨울철 난방수요가 많기 때문인 것으로 분석된다. 냉방수요가 많은 8월의 A공장의 전력 사용량은 3,578.83kW로 1월보다 1,333.74kW가 많았다. 연간 특성을 나타내는 그래프(<그림 3-4> 중단의 띠그래프)를 살펴보면 전력 사용량이 1~3월에 많고 가을엔 줄어드는 모습을 확인할 수 있다.

26) 부하량(Load Factor)은 평균부하를 피크부하로 나눈 값이다.(HOMER[®] ENERGY, 2019)

<표 3-2> 대상시설의 전력부하 데이터 평균, 피크, 부하량

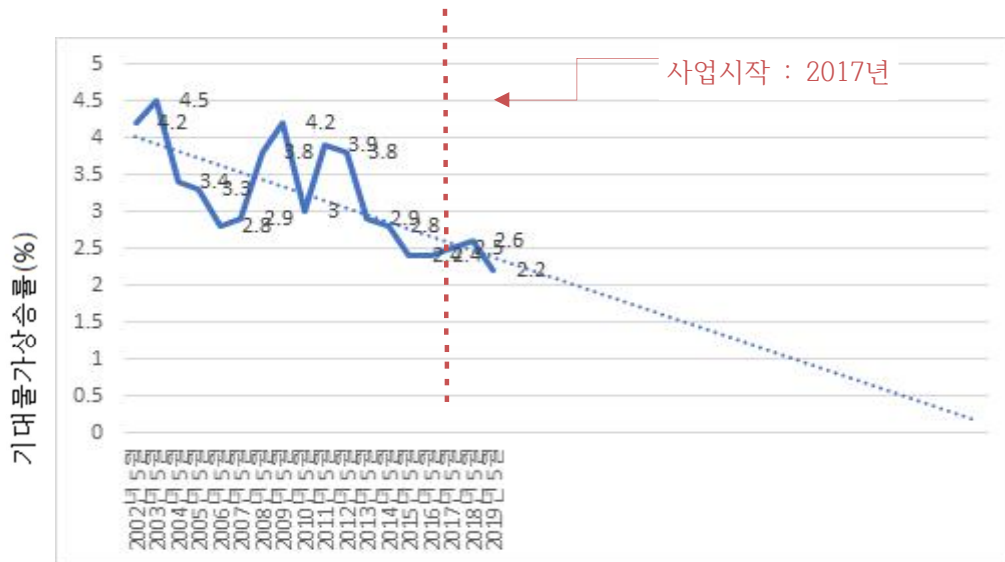
계량	단위	데이터 평균값
평균	kWh/day	23,977.64
	kW	999.07
피크	kW	4,442.9
부하량	%	22.0

2. 시뮬레이션 조건

HOMER는 경제적인 조건을 ECONOMICS 항목에서 선택할 수 있다. ECONOMICS 항목은 명목 할인율(Nominal discount rate,%), 기대물가상승률(Expected inflation rate,%), 프로젝트 수명(Project lifetime, year), 시스템 고정자본비용(=지가, System fixed capital cost, \$), 시스템 고정 O&M 비용(System fixed O&M cost, \$/yr), 통화(Currency)로 구성되어 있다.

명목 할인율 입력수치를 5.5%로 잡았다. 장병철(2010)에 따르면 5.5%는 한국개발연구원이 2007년 이후 현대까지 제시하고 있는 사회적 할인율이다. 기대물가상승률은 2.0%로 결정하였다. 한국은행의 소비자동향조사에 따르면 기대물가상승률은 다소 등락을 보이지만 2002년 5월 4.2%를 기록한 이래 2019년 5월 2.22%까지 떨어지고 있는 추세다. 2017년부터 가동을 시작한 A공장의 계통연계형 산업용 마이크로그리드의 프로젝트 수명이 25년인 점을 감안, <그림 3-5>과 같이 2027년부터 2042년까지 추세선을 그렸다. 추세선은 2002년 4.0%에서 시작하여 2042년엔 0%까지 떨어졌다. 추세선의 평균 2.0%를 기대물가상승률로 결정하였다.

시스템 고정자본비용은 지가를 의미한다. A공장의 230kW와 50kW 태양광 설비는 총 1,551㎡를 차지하고 있다. 이를 평(坪)으로 환산하면 469평이다.



<그림 3-5> 2002년 이후 기대물가상승률과 2042년까지 추세선

A공장의 부지는 평당 200만원으로 해당 태양광발전설비가 설치된 부지는 한화 9억3,000만원으로 미화로 8만 달러이다. 통화는 미국 달러(USD \$)로 설정하였다.

온실가스(EMISSION) 항목엔 Emission penalty라는 항목이 있다. Emission penalty는 배출하는 온실가스마다 배출권자가 내는 부담금이다. 이를 ‘온실가스 배출권 거래제’의 배출권으로 해석하였다. 시나리오의 배출권 가격으로 톤당 2만5,000원을 입력하였고 계통한계가격(SMP), 공급인증서(REC) 가격의 경우 2018년 데이터를 사용하였다. 배출권 가격을 톤당 2만5,000원으로 입력한 이유는 배출권 가격이 오름세인 가운데 2만5,000원을 중심으로 등락을 거듭할 것으로 전문가들이 예측하기 때문이다. <표 3-3>과 같이 연평균 가격이 2017년에 톤당 2만879원, 2018년 톤당 2만2,127원을 기록하였다. 특히 2017년 11월 24일에는 배출권 가격이 톤당 2만8,000원을 기록하였으며 2019년 3월 26일에는 톤당 2만6,200원을 기록하였다. 배출권 가격이

우상향 추세이지만 당분간 톤당 2만5,000원을 중심으로 등락을 거듭할 것으로 전문가들은 예상하고 있다.

〈표 3-3〉 탄소배출권의 가격³⁾

연도	2015년		2016년	2017년	2018년	2019년
가격(원/톤)	8,640 ¹⁾	11,007	17,179	20,879	22,127	26,200 ²⁾

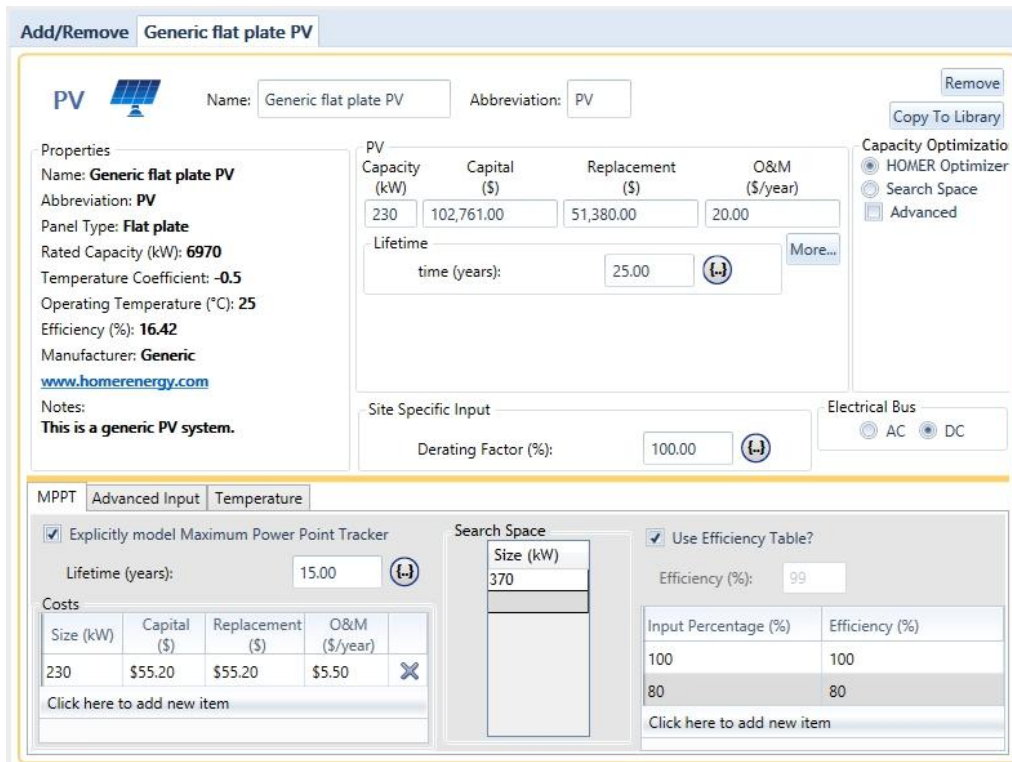
자료: 한국거래소(2019)

1) 개장첫날, 2) 3월 26일 가격, 3) 2015~2016년은 연평균

3. 태양광발전 관련 입력 자료

태양광발전설비는 HOMER에서 제공하는 태양광 모듈 데이터인 Generic flat plate PV 항목을 선택하였다. 자본(Capital), 대수선비(Replacement), 유지보수(O&M) 비용은 A공장의 실제 데이터를 입력하였다.

230kW 기준으로 자본은 10만2,761달러, 대수선비 5만1,380달러, 유지보수비 20달러/연간을 입력하였다. 수명(Lifetime)은 25년이며 Derating Factor(%)는 100%이다. Electrical Bus는 직류(DC)를 선택하였다. MPPT(Maximum Power Point Tracker)는 230kW기준 자본 55.20달러, 대수선비 55.20달러, O&M 5.50달러를 입력하였다. 수명은 15년이다. MPPT는 Search Space에 370kW를 입력하였다. MPPT의 효율 테이블을 사용하여 입력 퍼센티지(Input Percentage)와 효율성(Efficiency) 항목에 각각 100%-100%, 80%-80%를 입력하였다. Advanced Input에서 지면 반사율(Ground Reflectance)은 20%를 선택하였다. 이들 수치는 A공장에 태양광설비를 설치한 전문가의 조력을 받아 입력한 실제데이터이다. 〈그림 3-6〉는 HOMER의 태양광(PV) 화면이다.



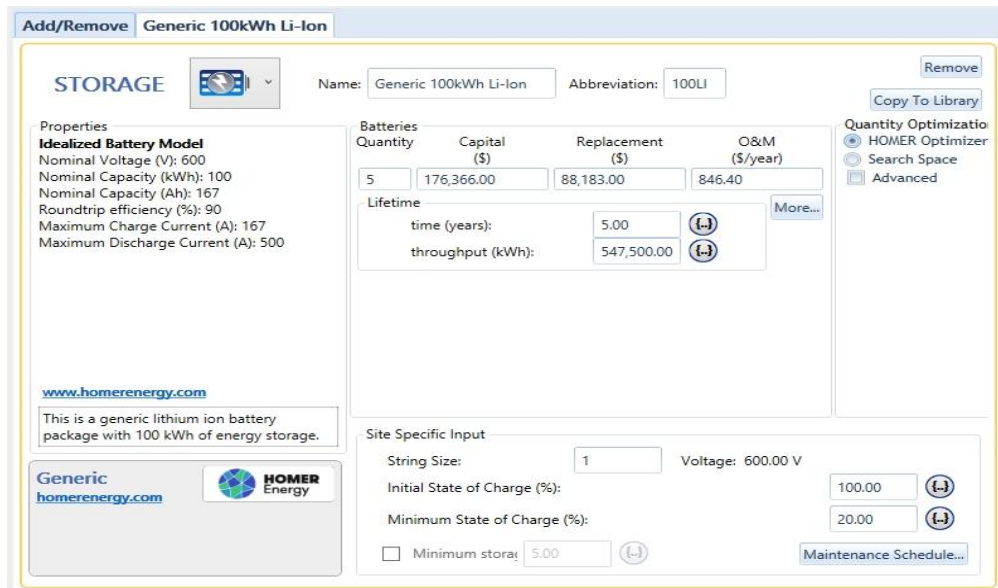
〈그림 3-6〉 HOMER용 태양광발전 입력 화면

4. 에너지저장장치(ESS, Storage) 관련 입력 자료

ESS는 HOMER에서 제공하는 Generic 100kWh Li-ion 배터리 데이터를 사용하였다. Generic 100kWh Li-ion 배터리는 배터리 단위 당 전압(Nominal Voltage) 600V, 용량(Nominal Capacity) 100kWh, 167Ah, Roundtrip efficiency 90%, 최소충전전류(Minimum Charge Current) 167A, 최대방전전류(Maximum Discharge Current) 500A이다.

태양광발전 설비와 마찬가지로 자본, 대수선비, 유지보수비는 실제 데이터값을 입력하여 5개 기준(500kWh)으로 각각 17만6,366달러, 8만8,183달러, 846.4달러를 입력하였다. 수명은 5년이며 throughput은 54만7,500kWh이다.

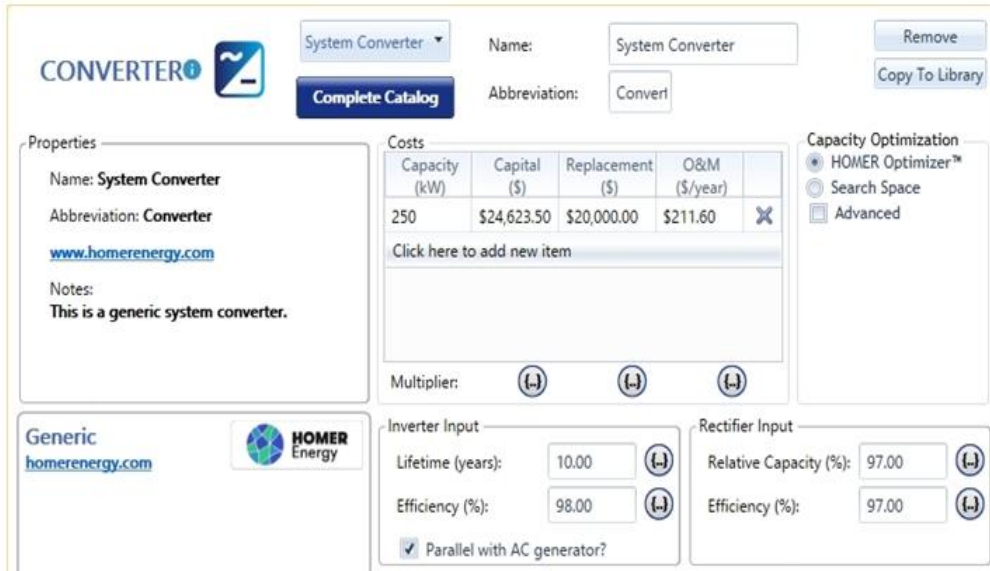
throughput은 $500\text{kWh} \times 4\text{시간} \times 365\text{일}$ 로 계산하였다. Site Specific Input으로 String Size는 1로 600V이다. 초기 충전상태(initial State of Charge)는 100%, 최소 충전상태(Minimum State of Charge)는 20%를 입력하였다. <그림 3-7>은 스토리지 데이터 입력을 위한 HOMER 화면이다.



<그림 3-7> HOMER용 스토리지 입력 화면

5, 시스템 컨버터(Converter) 관련 입력 자료

컨버터는 시스템에 부착된 시스템 컨버터(System Converter)이다. 대상시설에 실제 설치된 컨버터를 참조하여 250kW 기준으로 자본 2만4,623.5달러, 대수선비 2만 달러, 유지보수비 211.60달러를 입력하였다. HOMER의 컨버터 항목엔 인버터와 정류기(Rectifier)에 대한 항목이 있다. 인버터 입력값으로 수명 10년, 효율 98%, 정류기 입력값으로 상대용량 97%, 효율 97%를 입력하였다. 이들 데이터 모두 A공장에 직접 해당 기기를 설치한 전문가가 제공한 것이다. <그림 3-8>는 HOMER의 시스템 컨버터 입력 화면이다.

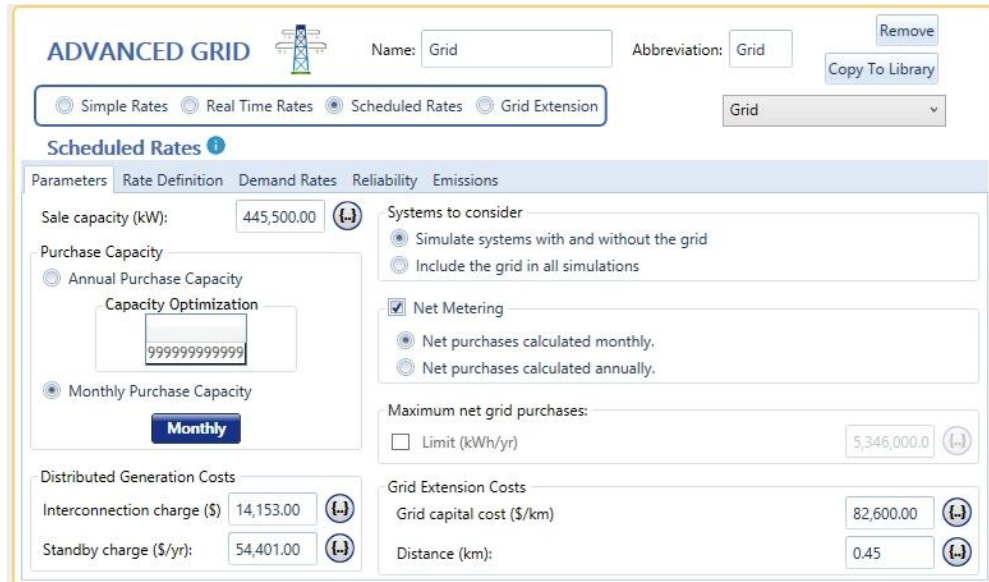


<그림 3-8> HOMER용 시스템 컨버터 입력 화면

6, 계통(Grid) 관련 입력 자료

가. Parameters 관련 입력 자료

A공장은 필요한 전력수요를 태양광발전시설과 동시에 계통에서 끌어 쓰고 있다. 전체 수요에 85%에 달하는 전력을 계통에서 구입하여 사오기 때문에 관련 요금제도 등에 관한 값을 입력하였다. A공장이 사용하는 한전의 전기요금이 계약전력 990kW, 산업용(을) 고압A 선택(Ⅱ)인 점을 감안하여 HOMER의 ADVANCED GRID 항목에서 Scheduled Rates 제도를 선택하였다. HOMER엔 Scheduled Rates 외에 Simple Rates, Real Time Rates, Grid Extension 제도를 선택할 수 있는데 한국의 전기요금제도는 아직 도입 직전의 제도들이다. Scheduled Rates 제도는 다시 Parameter, Rate Definition, Demand Rates, Reliability, Emission 등 하위항목을 두고 있다. <그림 3-9> Parameter 항목에선 계통과 A공장의 특징을 나타내는 값을 입력한다.



〈그림 3-9〉 HOMER-용 Parameter 데이터 입력 화면

HOMER가 분석을 수행하여 결과를 분석할 때 계통이 포함된 시스템과 계통이 포함되지 않은 시스템 모두의 시뮬레이션 값을 도출할 수 있도록 System to consider에서 ‘Simulate systems with and without the grid’ 를 선택하였다. Net Metering에선 ‘Net purchases calculated monthly’ 를 선택하였다. 우리나라도 미국의 넷미터링(Net Energy Metering)과 유사한 ‘전기요금상계거래제도’가 도입되어 운영 중이기 때문이다. 안희영(2016)에 따르면 한국도 미국의 넷미터링 제도와 유사한 요금상계거래 제도를 2005년 4월 도입하여 현재까지 운영하고 있다. Net Metering의 하위 선택지는 월 단위(monthly)와 연 단위(annually) 정산으로 나뉘는데 안희영(2016)이 우리나라의 전기요금상계제도가 월 단위 정산이라고 확인하였다.

Grid Extension Cost는 A공장의 실제 데이터를 참고하여 Grid capital cost로 8만2,600달러/km, 거리(Distance) 0.45km를 입력하였다. 분산발전비용

(Distributed Generation Costs)도 실제 데이터를 참조하여 연결비용 (Interconnection charge 11만4,153달러, 대기 요금(Standby charge) 54,401달러/yr)을 입력하였다. 대기 요금은 A공장이 내는 기본요금으로 간주하고 여기에 해당하는 원화를 달러화로 계산하여 입력하였다. 구매 용량(Purchased Capacity)은 Monthly Purchase Capacity를 선택하여 A공장의 월별 구매 용량을 입력하였다. 해당하는 값은 <표 3-4>와 같다.

<표 3-4> HOMER용 월별 구매 용량 입력값

(단위:kW)

월	1월	2월	3월	4월	5월	6월
용량	162,382	166,612	154,867	119,444	131,330	118,398
월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
용량	138,932	146,640	117,391	72,231	92,376	101,667

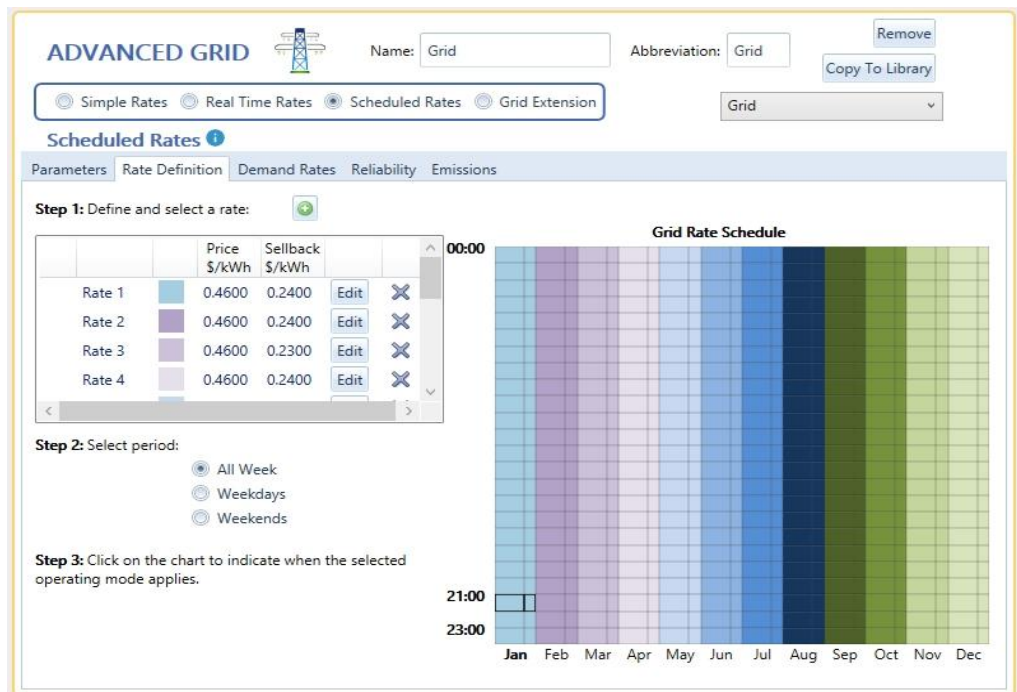
나. Rate Definition 관련 입력 자료

Rate Definition은 정의에 따른 효율(rate)을 입력하는 창과 이를 그림으로 보여주는 Grid Rate Schedule 화면으로 구성되어 있다. 효율을 입력하는 창은 가격(\$/kWh)과 되파는값²⁷⁾(sellback, \$/kWh)으로 구성되어 있다.

A공장은 2018년 12월 440만9,600원의 기본요금을 지불하였다. 이 가격을 8,320원으로 나눠 이에 해당하는 미화 0.46 달러를 입력하였다. 매진 (sellback)엔 2018년 계통한계가격(SMP)+공급인증서(REC) 가격에 해당하는 값들을 입력하였다. A공장의 태양광발전설비가 지붕 위에 위치한 점을 감안하여 현행 제도대로 공급인증서(REC)에 가중치 1.5를 곱하여 주었다.

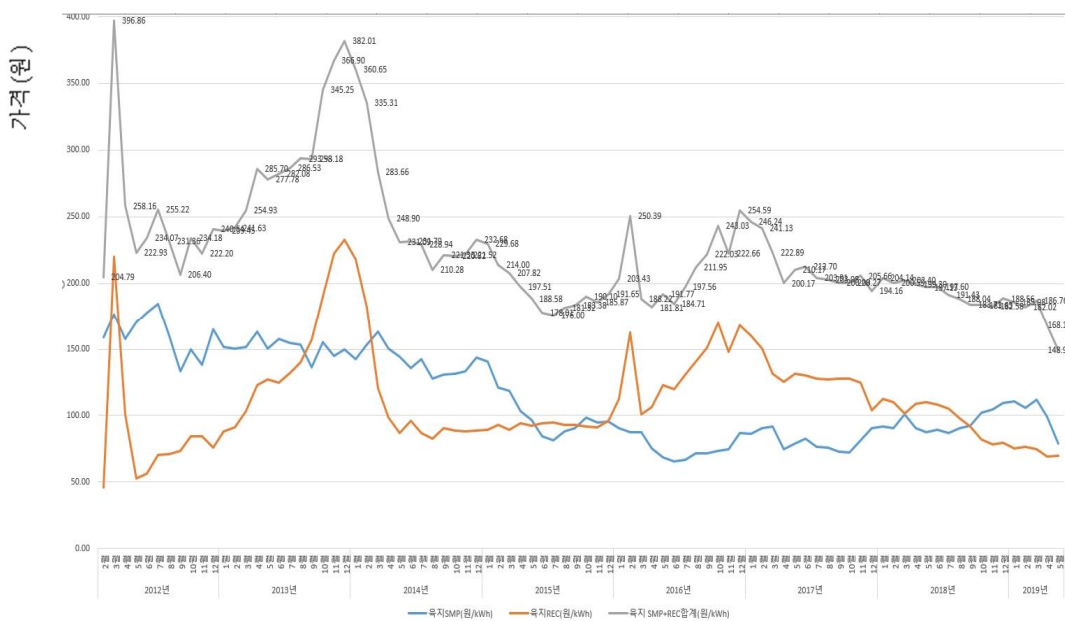
27) 우리나라는 산업통상자원부 고시 제2018-56호에 따라 신재생에너지발전이 생산한 전기를 한전이 구입한다. 이 고시에 따라 한전은 「신재생 및 LNG발전 전력구입계약 업무처리지침」을 마련하고 신재생에너지발전사업자들이 생산한 전력을 구입한다.(한국전력공사(2019), 『신재생 및 LNG발전 전력구입계약업무처리지침,』 나주: 한국전력공사

우리나라의 현행 신재생에너지요금체계에서 태양광-ESS 설비의 경우 건물 위에 설치할 경우 가중치 1.5를 공급인증서(REC)에 곱해주거나 하루 중 오전 10시~오후 4시까지 시간대의 발전량에 가중치 5를 선택할 수 있다. 후자를 선택할 경우 태양광발전설비 100kW가 생산하는 발전량에 대하여 가중치 1.2, 100~3,000kW의 생산하는 발전량에 대하여 가중치 1.0, 3,000kW 이상의 태양광설비가 생산하는 발전량에 대하여 가중치 0.7을 곱하여야 한다. 시뮬레이션 분석을 할 경우 HOMER가 제시하는 적정 태양광발전설비의 용량이 3,000kW를 초과할 수 있기도 하고 아닐 수도 있는데 이러한 경우를 모두 HOMER의 분석값에 반영할 수 없기 때문에 연구의 편의를 위하여 가중치 1.5를 시간대에 상관없이 일괄적으로 곱하는 요금제도를 선택하여 적용하였다. <그림 3-10>는 A공장에 연결된 계통의 Rate Definition 분석을 위한 HOMER 화면이다. 월별로 12등분하여 Rate1~Rate 12를 마련하였다.



<그림 3-10> HOMER용 Rate Definition 입력 화면

HOMER에 입력하는 SMP와 REC 가격을 2018년 데이터를 사용하였다. <그림 3-11>은 2012년 2월~2019년 5월 간 육지 SMP와 REC 가격에 대한 그래프이다. SMP와 REC 가격은 전력거래소에서 구하였다. REC 가격은 2017년 말 급락하는 반면 SMP는 상승세를 타고 있다. REC 급락의 폭이 커서 SMP 가격의 상승이 REC 하락폭을 상쇄하지 못하고 전반적으로 SMP+REC 가격이 하락하고 있다. 게다가 2018년 3월을 기점으로 SMP와 REC 가격이 한 차례 역전되었고 2018년 9월 다시 역전되었기 때문에 최신 추세를 반영할 필요가 있었다.

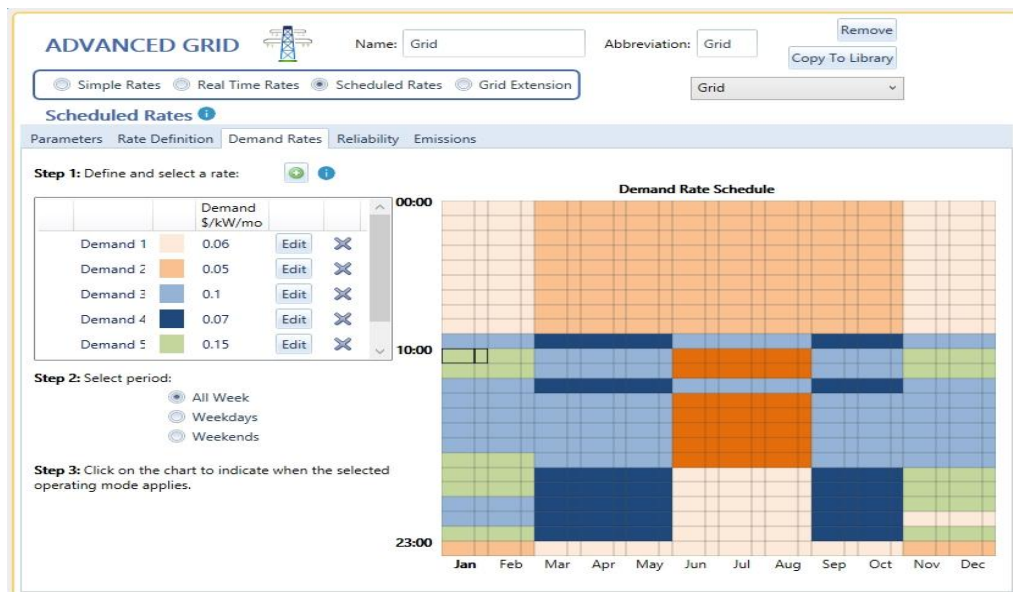


<그림 3-11> 2012년 2월~2019년 5월 간 육지 SMP와 REC 가격

다. Demand Rates 입력 자료

Demand Rates는 우리나라 전기요금의 전력량 요금에서 산업용에 적용되는 계시별 요금제의 요율을 반영하였다. A공장은 산업용(을) 고압A 선택

(II) 전기요금제를 사용하고 있어 해당하는 전력량요금을 원화로 환산하여 HOMER에 입력하였다. 산업용(을) 고압A 선택(II)에 해당하는 전력량 요금은 부하시간대와 계절에 따라 총 9가지이다. 경부하 시간대의 여름철(6~8월) 전력량 요금은 55.2원/kWh이며, 봄·가을철(3~5월, 9~10월) 55.2원/kWh, 겨울철(11~이듬해 2월) 63.1원/kWh이다. 중간부하의 경우 여름철 109.0원/kWh, 봄·가을철 78.6원, 겨울철 109.2/kWh원이다. 최대부하의 경우 여름철 191.1/kWh원, 봄·가을철 109.3원/kWh, 겨울철 166.7원/kWh이다. 이를 달러화로 환산하여 입력한 결과는 <그림 3-12>와 같다.



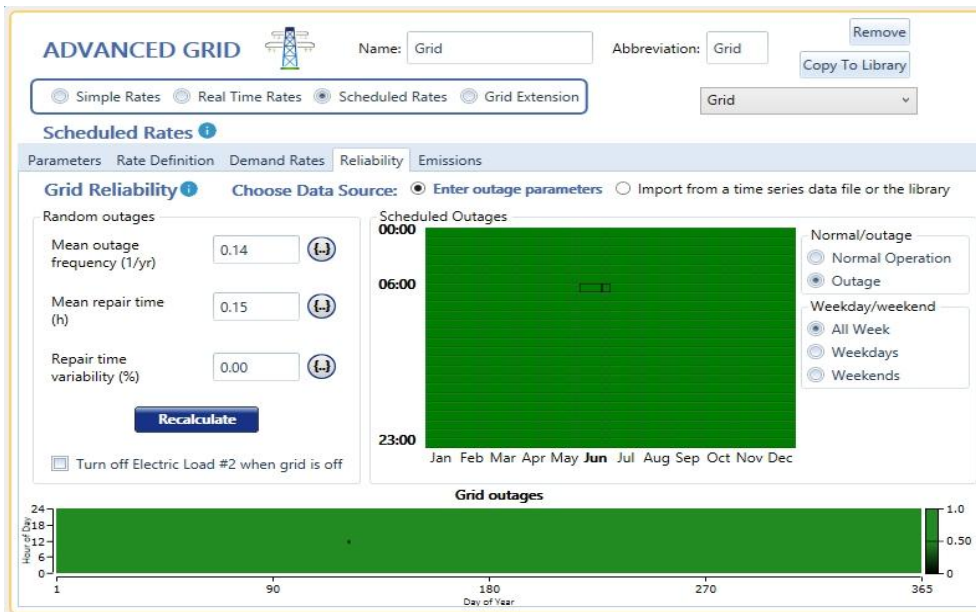
<그림 3-12> HOMER용 Demand Rate Schedule 입력 화면

라. Reliability 관련 입력 자료

Grid Reliability는 계통의 신뢰도에 관한 것으로 연간 평균 정전 횟수 (Mean outages frequency, 회/yr), 연간 평균 수리 시간(Mean repair time, h/yr), 수리 시간 변동성(Repair time variability, %)를 입력한다. 전력품질 데이터는 해당데이터를 입력하였는데 보편성 확보를 위하여 2015년 전국

평균값을 입력하였다. 입력된 연간 평균 수리 시간은 0.14시간(8.84분/호), 평균 정전 횟수는 0.15회(0.144회/호), 수리 시간 변동성 0%이다.

<그림 3-13>는 용인시 처인구의 정전데이터를 입력한 HOMER의 Grid Reliability에 관한 화면이다.



<그림 3-13> HOMER용 Reliability 입력 화면

마. 온실가스 관련 입력 자료

온실가스(Emission)에서는 분석대상이 된 마이크로그리드의 온실가스 배출량을 계산하기 위하여 온실가스 배출계수를 입력한다. HOMER에는 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO), 미연탄화수소(Unburned Hydrocarbon), 입자상물질(Particulate Matter), 아황산가스(SO₂), 질소산화물(NO_x)의 입력창이 있다. 단위는 모두 g/kWh이다. 국가온실가스종합정보센터(GIR)는 ‘2018년 승인 국가온실가스 배출·흡수 계수’를 홈페이지에 게시하고 있다. <표 3-5>는 배출계수이다. 소비단의 CO₂ 계수를 입력하였다.

〈표 3-5〉 전력의 국가온실가스 배출계수(2018년 승인)

부문	항목	온실가스	배출계수	단위
간접배출량	발전단	CO ₂	0.4401	tCO ₂ /MWh
		CH ₄	0.0034	kg CH ₄ /MWh
		N ₂ O	0.0082	kg N ₂ O/MWh
	소비단	CO ₂	0.4567	tCO ₂ /MWh
		CH ₄	0.0036	kg CH ₄ /MWh
		N ₂ O	0.0085	kg N ₂ O/MWh

출처: 국가온실가스정보센터(2018)

바. 연료전지(FC)발전 관련 입력 자료

제4장에서 A공장의 계통연결형 산업용 마이크로그리드에 HOMER에서 제공하는 연료전지(FC)발전을 가상으로 연결하여 분석하였다. 연료전지발전을 분석에 추가한 이유는 태양광발전과 비교하기 위함이다. 연료전지는 HOMER에서 제공한 Generic 250kW Fuel Cell 데이터를 사용하였다. 용량은 250kW이고 천연가스(LNG)를 연료로 사용한다. 초기가격은 75만 달러이며 대수선비는 62만5,000달러, 운영관리비는 5,000달러/op.hour이다. 수명은 5만 시간이다. 연료전지 발전에 사용되는 LNG 가격은 m³당 0.51달러이다. LNG 가격은 한국공사가 공개한 2018년 발전용 천연가스 요금 연평균 단가에 해당하는 금액을 달러화로 환산한 수치다. LNG 가격은 〈표 3-6〉에서 정리하였다. 〈그림 3-14〉은 연료전지 데이터 입력을 위한 HOMER 화면이다.

Add/Remove Generic 250kW Fuel Cell

GENERATOR Name: Generic 250kW Fuel Cell Abbreviation: FC Remove

Copy To Library

Properties
 Name: Generic 250kW Fuel Cell
 Capacity: 250 kW
 Fuel: Natural Gas
 Fuel curve intercept: 0 m³/hr
 Fuel curve slope: 0.210 m³/hr/kW

Emissions
 CO (g/m³ fuel): 0.2
 Unburned HC (g/m³ fuel): 0
 Particulates (g/m³ fuel): 0

Optimization
 Simulate systems with and without this generator
 Include in all systems

Generic **homerenergy.com** **HOMER Energy**

Generator Cost
 Initial Capital (\$): 750,000.00
 Replacement (\$): 625,000.00
 O&M (\$/op. hour): 5.000

Electrical Bus
 AC DC

Site Specific **Fuel** Maintenance Schedule

Minimum Load Ratio (%): 0.00

Heat Recovery Ratio (%): 60.00

Lifetime (Hours): 50,000.00

Minimum Runtime (Minutes): 0.00

<그림 3-14> HOMER용 연료전지 데이터 입력 화면

<표 3-6> 발전용 천연가스 요금

구분		2017년		2018년	
		일반발전사업	집단발전사업	일반발전사업	집단발전사업
원 /Nm ³	원료비	467.04	453.02	546.78	1,532.60
	공급비	60.06	60.06	58.22	58.22
	합계	527.10	513.08	605.00	590.82
원 /GJ	원료비	10,725.99	10,404.00	12,691.60	12,362.44
	공급비	1,379.29	1,379.29	1,351.27	1,351.27
	합계	12,105.28	11,783.29	14,042.87	13,713.71

출처: 한국가스공사(2019)

사. Emission penalty와 REC, 태양광 모듈 가격 변동

2018년의 SMP와 REC 가격 데이터를 이용하여 시뮬레이션 분석을 진행하였다. 최근 REC 가격이 하향 추세인데 본 연구가 가상으로 분석하는 시뮬레이션 분석인만큼 최근의 추세를 반영하기 위하여 2018년 SMP와 REC 데이터를 사용하였다. Emission penalty는 전문가의 의견에 따라 배출권 가격을 톤당 2만5,000원으로 잡았다. 민감도 분석을 위한 배출권 최저가격은 톤당 1만5,000원이고 최고가격은 톤당 3만5,000원으로 정하였다.

REC 가격의 변동폭을 ± 50 으로 정한 이유는 2012년 2월~2019년 5월 간 SMP와 REC 가격 동향을 그래프로 그려서 추세선을 살펴보았을 때 ± 50 원이 적합하다고 판단했기 때문이다. 특이할 점은 태양광(PV)발전, 연료전지(FC)발전에 부여하는 REC 가중치를 분석에 반영하였다는 점이다. 산업부는 태양광발전에 가중치 1.5와 연료전지발전에 가중치 2를 부여한다. 이를 입력 데이터에 반영하여 시뮬레이션 분석을 시행하였다.

태양광 모듈 가격은 2017년 가격이 W당 500원이며 2030년 370원(USD 0.32) 2050년 185원(USD 0.16)으로 잡았다. 2017년 가격을 W당 500원으로 결정한 이유는 500원이 A공장이 2017년 구매한 태양광발전설비의 실제 가격이기 때문이다. 2030년과 2050년의 태양광 모듈 금액은 독일 프라운호퍼 연구소가 2015년에 발간한 보고서「Current and Future Cost of Photovoltaics」를 참조하였다.

제 4 장 마이크로그리드의 경제성과 기후환경 영향 분석

제1절 시나리오의 구성

실제 데이터를 바탕으로 대상시설의 적절한 전원 구성을 알아보고자 시나리오를 마련하여 분석하였다. 시나리오는 분산에너지원의 종류에 따라 세분되었다. HOMER는 순현재비용(NPC)이 가장 낮은 순서대로 구성요소의 설비용량, 운영비용, 초기자본과 함께 LCOE, ROI, IRR 등 경제성 지표와 이산화탄소 배출량 등 기후환경 영향 지표를 제시한다. 시나리오를 HOMER에 입력하면 해당 지표를 볼 수 있다. <표 4-1>에서 시나리오 조건과 구성을 반영한 이름을 정리하였다.

<표 4-1> 시나리오의 구성

시나리오의 구성	시나리오 이름
시나리오 1 (ESS 단독)	○ 한전 계통에 연결되어 있으며 분산에너지원 없이 에너지저장장치(ESS)만 설치된 마이크로그리드
시나리오 2 (PV발전 추가)	○ 한전 계통에 연결되어 있으며 ESS와 태양광(PV)발전설비가 설치된 마이크로그리드
시나리오 3 (FC발전 추가)	○ 한전 계통에 연결되어 있으며 ESS와 연료전지(FC)발전설비가 설치된 마이크로그리드
시나리오 4 (PV발전·FC발전 추가)	○ 한전 계통에 연결되어 있으며 ESS와 태양광(PV)발전설비, 연료전지(FC)발전설비가 설치된 마이크로그리드

○ 시나리오 1(ESS 단독)

LIB ESS 단독 마이크로그리드 시나리오는 에너지원이 한전 계통에서 구입하는 전력이며 에너지설비로 리튬이온배터리 에너지저장장치를 사용하는

마이크로그리드다. 태양광이나 연료전지 등 분산에너지원(DERs)이 없는 것이 특징이다. 에너지원이 없지만 계통을 통하여 공급받는 전력이 화력발전, 천연가스발전 등으로 생산되기 때문에 이산화탄소 발생량이 분석결과에 반영된다.

○ 시나리오 2(PV발전 추가)

태양광발전 LIB ESS 마이크로그리드 시나리오는 에너지원으로 한전 계통과 태양광발전을 사용하고 LIB ESS를 에너지설비로 사용하는 마이크로그리드이다. 태양광발전은 연료비용이 들지 않고 온실가스가 배출되지 않는 장점이 있다. 사용된 태양광모듈은 결정질 실리콘 태양광 모듈이다.

○ 시나리오 3(FC 추가)

연료전지발전 LIB ESS 마이크로그리드 시나리오는 에너지원으로 한전 계통과 연료전지를 사용하고 ESS를 에너지설비로 사용하는 마이크로그리드이다. 연료전지발전을 본 연구의 시나리오에 추가한 이유는 우리나라 정부가 중점적으로 지원·육성하기 때문이다. 분석에 사용된 연료전지발전은 가정용 가스배관을 통하여 공급되는 LNG에서 개질(reform) 방식으로 수소를 얻는다. LNG 개질과정에서 일산화탄소(CO)와 온실가스인 이산화탄소(CO₂)가 발생한다. 분석에 사용된 연료전지의 용량은 250kW이다.

○ 시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)

태양광발전 연료전지발전 시나리오는 에너지원이 한전 계통, 태양광발전, 연료전지발전 등 3종류이며 LIB ESS가 에너지설비로 활용된다. 분석에 사용된 연료전지의 용량은 250kW급이며 태양광모듈은 결정질 실리콘이다.

제2절 시나리오에 따른 마이크로그리드 경제성 분석

시나리오 별 경제성 분석을 실시하였다. 앞 절에서 소개한 조건을 기입하여 HOMER가 제시한 순현재비용(NPC)이 가장 적은 데이터를 채택하였다. 순현재비용(NPC)이 적은 시나리오는 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」로 순현재비용(NPC)은 5,180만 달러이다.

「시나리오 2(PV발전 추가)」와 「시나리오 3(FC발전 추가)」의 순현재비용(NPC)은 각각 6,140만 달러, 6,090만 달러로 비슷한 수준이다. 순현재비용(NPC)이 가장 많은 시나리오는 「시나리오 1(ESS 단독)」로 7,030만 달러이다. 「시나리오 1(ESS 단독)」은 순현재비용(NPC)이 가장 많지만 초기자본이 88만8,206달러로 가장 적다. 「시나리오 3(FC발전 추가)」은 초기자본이 170만 달러로 시나리오 2(PV발전 추가) 225만 달러보다 적었으며 순현재비용(NPC)이 가장 적은 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」의 경우 초기자본이 317만 달러로 가장 많았다. 초기자본이 많다는 의미는 마이크로그리드 구축비용이 저렴하다는 의미이다. <표 4-2>을 보면 초기자본이 적다고 순현재비용(NPC)이 적은 것만은 아님을 알 수 있다.

<표 4-2> HOMER 분석 결과

시나리오	PV 발전 (kW)	FC 발전 (kW)	LIB ESS (kWh)	시스템 컨버터 (kW)	계통 (km)	NPC(\$)	초기 자본(\$)
시나리오1 (ESS 단독)	-	-	100	17.4	0.45	70.3×10^6	888,306
시나리오2 (PV발전 추가)	2,959	-	100	379		61.4×10^6	2.25×10^6
시나리오3 (FC발전 추가)	-	250	200	243		60.9×10^6	1.7×10^6
시나리오4 (PV발전·FC발전 추가)	3,292	250	100	649		51.8×10^6	3.17×10^6

시나리오 별 균등화발전단가(LCOE)와 운영비용, 투자수익률(ROI), 내부수익률(IRR)을 분석하였다. 균등화발전단가(LCOE)의 높고 낮음은 계통과 마이크로그리드를 운영하는 정부와 지자체의 관심사다. 균등화발전단가(LCOE)가 낮다는 의미는 마이크로그리드의 설치, 운영, 폐쇄 전 과정에서 조달하는 비용이 낮음을 의미한다. 정부나 지자체는 균등화발전단가(LCOE)가 낮은 마이크로그리드를 선호한다. 운영비용은 마이크로그리드 소유자의 관심사다. 운영비용이 적을수록 소유자의 비용이 줄어든다. 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)은 마이크로그리드 투자자의 관심사다. 투자자들은 높은 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)을 제시하는 마이크로그리드에 관심을 갖는다.

균등화발전단가(LCOE)가 가장 낮은 시나리오는 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」로 0.335달러이다. 「시나리오 3(PV발전 추가)」과 「시나리오 4(FC발전 추가)」는 균등화발전단가(LCOE)가 각각 0.413달러, 0.411달러로 서로 비슷하였다. 「시나리오 1(ESS 단독)」은 0.484달러로 시나리오 가운데 균등화발전단가(LCOE)가 가장 높았다. 운영비용도 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」가 가장 적어 293만 달러를 기록하였다. 「시나리오 2(PV발전 추가)」와 「시나리오 3(FC발전 추가)」는 운영비용이 각각 356만 달러로 동일하며 「시나리오 1(ESS 단독)」은 운영비용이 418만 달러로 가장 많았다.

투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)이 가장 높은 시나리오는 「시나리오 3(FC발전 추가)」으로 각각 60.9%, 73.3%이다. 「시나리오 2(PV발전 추가)」와 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」는 투자회수율(ROI)이 각각 35.9%, 37.6%이며 내부수익률(IRR)은 각각 40%, 41.6%이다. 「시나리오 1(ESS 단독)」은 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)이 각각 -116.4%, n/a이다.

투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR) 관점에서 보면 시나리오 3(FC발전 추

가)이 가장 경제성이 있으나 균등화발전단가(LCOE)와 운영비용 관점에서는 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」가 가장 경제성이 있다.

「시나리오 3(FC발전 추가)」의 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)이 높은 이유는 신재생에너지공급의무화제도(RPS 제도)에서 연료전지발전이 공급인증서(REC) 가중치 2.0을 받기 때문인 것으로 분석된다. 태양광발전이 받는 공급인증서 가중치는 건축물 위에 설치된 경우 1.5이다. 연료전지발전의 가중치가 태양광발전의 가중치보다 높기 때문에 연료전지발전을 설치한 「시나리오 3(FC발전 추가)」의 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)이 높을 수 밖에 없다. 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」도 「시나리오 3(FC발전 추가)」와 마찬가지로 250kW 연료전지를 설치하였지만 연료전지발전이 생산하는 전력의 비중이 23.3%로 「시나리오 3(FC발전 추가)」의 24.2%보다 낮다. 같은 연료전지발전을 설치하였지만 전력 생산 비중이 「시나리오 3(FC발전 추가)」가 높기 때문에 「시나리오 3(FC발전 추가)」의 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)이 가장 높은 것으로 분석된다.

「시나리오 2(PV발전 추가)」와 「시나리오 3(FC발전 추가)」는 균등화발전단가(LCOE)와 운영비용이 비슷하다. 「시나리오 3(FC발전 추가)」의 균등화발전단가(LCOE)는 0.411로 시나리오 2(PV발전 추가) 0.413보다 약간 낮아 「시나리오 3(FC발전 추가)」이 「시나리오 2(PV발전 추가)」보다 균등화발전단가(LCOE) 측면에서 경제성이 있다고 분석된다. 운영비용은 양 시나리오가 동일하다.

「시나리오 1(ESS 단독)」은 균등화발전단가(LCOE)와 운영비용 관점에서 경제성이 가장 낮았다. ESS는 전력을 저장하는 신재생설비이기 때문에 전력을 생산하는 다른 시나리오에 비하여 균등화발전단가(LCOE)와 운영비용 측면에서 경제성이 낮다고 분석된다. <표 4-3>에 시나리오 별 균등화발전단가(LCOE), 운영비용, 투자회수율(ROI), 내부수익률(IRR)을 정리하였다.

<표 4-3> HOMER 분석 결과(LCOE, 운영비용, ROI, IRR)

시나리오	LCOE(\$)	운영비용(\$)	ROI(%)	IRR(%)
시나리오1 (ESS 단독)	0.484	4.18×10^6	-116.4	n/a
시나리오2 (PV발전 추가)	0.413	3.56×10^6	35.90	40.00
시나리오3 (FC발전 추가)	0.411	3.56×10^6	60.90	73.30
시나리오4 (PV발전· FC발전 추가)	0.335	2.93×10^6	37.60	41.60

시나리오 별 전력 생산 및 소비 비중, 재생에너지 비중과 연료비용도 서로 다르다. 「시나리오 1(ESS 단독)」은 필요 전력의 100%를 계통에서 구매하여 충당하고 소내부하용으로 100% 소비한다. 「시나리오 2(PV발전 추가)」는 15.1%의 전력을 태양광발전에서 충당하며 계통에서 84.90%의 전력을 계통에서 구입한다. 소비는 소내부하용으로 99% 소비하며 매전 비중은 1.01%이다. 「시나리오 3(FC발전 추가)」은 생산 전력의 24.20%를 연료전지발전에서 충당하고 75.80%의 전력을 계통에서 구입한다. 소내부하에서 98%의 전력을 소비하며 매전하는 전력의 비중은 1.95%이다.

「시나리오 2(PV발전 추가)」와 「시나리오 3(FC발전 추가)」에서 차이점이 있다면 「시나리오 2(PV발전 추가)」가 계통에서 구입하는 전력의 비중이 84.9%인데 비하여 「시나리오 3(FC발전 추가)」은 계통에서 전력을 구입하는 비중이 75.8%로 「시나리오2(PV발전 추가)」보다 상대적으로 낮은 점이다. 이는 태양광발전보다 연료전지발전이 전력을 보다 많이 생산함을 의미한다. 태양광발전은 자연의 무한한 에너지인 태양광을 이용하여 연료비용이 들지 않는 반면 연료전지발전은 연료비용을 지불하여야 한 점을

제외한다면 연료전지발전이 태양광발전보다 전력을 생산한다는 장점이 있음을 보여준다.

연료전지발전은 태양광발전보다 전력을 많이 생산하지만 연료비를 추가로 지불해야하는 단점이 있다. 「시나리오 3(FC발전 추가)」의 경우 전력 생산을 위하여 연간 23만2,613달러의 연료비용을 지불하여야 한다. 반면 「시나리오 2(PV발전 추가)」는 별도의 연료비용이 필요하지 않다. 이는 연료전지발전의 경제성이 연료비의 높고 낮음에 따라 달라질 수 있음을 시사하고 있다. 연료전지발전의 연료인 LNG 가격이 떨어지면 시나리오 3(FC발전 추가)의 경제성이 개선되겠지만 LNG 가격이 상승하면 시나리오 3(FC발전 추가)의 경제성은 악화된다.

발전기가 태양광발전과 연료전지발전 두 가지인 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」에선 계통에서 구입하는 전력의 비중이 다른 시나리오보다 더욱 낮아져 62.1%를 기록하였다. 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」는 태양광발전에서 전체 발전의 14.6%의 전력을 생산하고 연료전지발전에서 23.3%의 전력을 생산한다. 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」도 연료전지 발전을 운영하기 때문에 연료비가 필요하여 매년 연료비용으로 연간 23만 4,549달러를 지불한다. 이를 통하여 생산된 전력은 93.9%가 자가소비에 사용되고 나머지 6.09%의 전력이 매전 된다.

계통연계형 마이크로그리드의 프로젝트 기간이 25년이기 때문에 연료비용이 투입 여부는 경영자의 마이크로그리드 선택과 운영전략에 영향을 미친다. 장기적으로 LNG 가격이 상승할 것으로 예측될 경우 「시나리오 2(PV발전 추가)」를 경영자는 선호할 것이고 그렇지 않을 경우 연료전지발전이 설치된 시나리오를 선호할 것이다. 매전으로 얻는 이득을 중시 여기는 경영자는 연료비용이 「시나리오 3(FC발전 추가)」보다 많이 들더라도 시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)를 선택할 것이다. <표 4-4>에 정리하였다.

<표 4-4> HOMER 분석 결과(전력 생산과 소비, 연료비용)

시나리오	생산(%)			소비(%)		연료 비용 \$/yr
	PV 발전	FC발전	계통구매	소내 부하	매전	
시나리오 1 (ESS 단독)	-	-	100	100	0.00	-
시나리오 2 (PV발전 추가)	15.10	-	84.90	99.00	1.01	-
시나리오 3 (FC발전 추가)	-	24.20	75.80	98.00	1.95	232,613
시나리오 4 (PV발전· FC발전 추가)	14.60	23.30	62.10	93.90	6.09	234,549

순구입에너지비용이 가장 낮은 시나리오는 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」로 순구입에너지가 526만525kWh이다. 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」는 연간 에너지요금으로 9만6,793달러를 지불하고 연간 수요요금으로 377.97달러를 지불한다. 「시나리오 2(PV발전 추가)」는 시나리오 3(FC발전 추가)보다 순구입에너지가 88만3,366kWh 많다. 「시나리오 2(PV발전 추가)」의 연간 에너지요금은 13만6,638달러이며 연간 수요요금은 417.30달러이다. 「시나리오 3(FC발전 추가)」의 연간 에너지요금은 12만1,856달러이며 연간 수요요금은 409.24달러이다. 이는 연료전지발전이 태양광발전보다 전력을 많이 생산하기 때문으로 분석된다. 「시나리오 1(ESS 단독)」은 가장 많은 전기요금을 지불한다. ESS가 전력을 저장만하지 생산하지 않기 때문이다. 「시나리오 1(ESS 단독)」은 연간 에너지요금으로 16만1,018달러, 연간 수요요금으로 447.93달러를 지불한다.

요약하면 태양광, 연료전지 등 신재생에너지발전원이 없이 ESS가 단독으로 설치된 계통연계형 마이크로그리드인 「시나리오 1(ESS 단독)」은 계통

에서의 순구입에너지가 875만979kWh로 가장 크다. 시나리오 1(ESS 단독)에 태양광발전을 설치한 「시나리오 2(PV발전 추가)」의 계통에서의 순구입에너지가 742만5,988kWh로 「시나리오 1(ESS 단독)」보다 132만4,991kWh의 전력 순구입에너지를 줄일 수 있다. 태양광 발전 대신 연료전지를 설치한 「시나리오 3(FC발전 추가)」의 순구입에너지는 662만2,622kWh로 「시나리오 1(ESS 단독)」보다 212만8,357kWh의 순구입에너지를 줄일 수 있고 태양광발전 마이크로그리드보다 80만3,366kWh의 순구입에너지를 줄일 수 있다. 순구입에너지를 가장 줄일 수 있는 계통연계형 마이크로그리드는 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」로 「시나리오 1(ESS 단독)」보다 349만466kWh, 「시나리오 2(PV발전 추가)」보다 216만5,475kWh, 「시나리오 3(FC발전 추가)」보다 136만2,109kWh의 순구입에너지를 줄일 수 있다. <표 4-5>에 에너지요금 및 수요요금을 정리하였다.

<표 4-5> HOMER 분석 결과(에너지·수요요금)

시나리오	순구입에너지 (kWh)	피크수요 (kWh)	연간 에너지요금 (\$/yr)	연간 수요요금 (\$/yr)
시나리오 1 (ESS 단독)	8,750,979	4,443	161,018	447.93
시나리오 2 (PV발전 추가)	7,425,988	4,443	136,638	417.30
시나리오 3 (FC발전 추가)	6,622,622	4,200	121,856	409.24
시나리오 4 (PV발전·FC발전 추가)	5,260,513	4,198	96,793	377.97

제3절 마이크로그리드 기후환경 영향

계통에서 구입하는 전력량만 생각한다면 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」를 선택하는 것이 합리적이지만 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」의 이산화탄소 배출량은 「시나리오 2(PV발전 추가)」보다 높다. 이산화탄소 배출량의 크기를 줄이는 일이 계통에서 전력을 구입하는 비용보다 중요하다면 「시나리오 2(PV발전 추가)」를 선택하는 것이 합리적이다. 이번 절에서 이와 같은 내용을 다루었다.

시나리오 별 기후환경 영향을 분석하기 위하여 기후환경 영향을 이산화탄소(CO₂) 배출량으로 계산하였다. 이산화탄소는 대표적인 온실가스 기체이다. 온실가스는 지표에서 받아들인 열을 적외선으로 우주 공간에 방출하지 않고 대기의 온도를 높이는 기체다. 온실가스 기체의 양이 지나치게 많아 온실가스 효과가 크면 지구의 온도가 올라간다(김주화, 2000). 대기에서 이산화탄소의 농도는 점점 증가하고 있다. 지구 대기에서 이산화탄소의 농도는 1958년 315ppm(parts per million)이었지만 2019년 5월 11일 415.26ppm을 기록하였다(Dockrill, 2019). 전력 소비에 의한 이산화탄소 배출량은 식 (4)와 같이 산정한다.

$$CO_2emissionamount = EF_{CO_2} \times Q_{electricity} \quad (4)$$

이때, EF_{CO_2} : 소비단의 CO₂ 배출계수

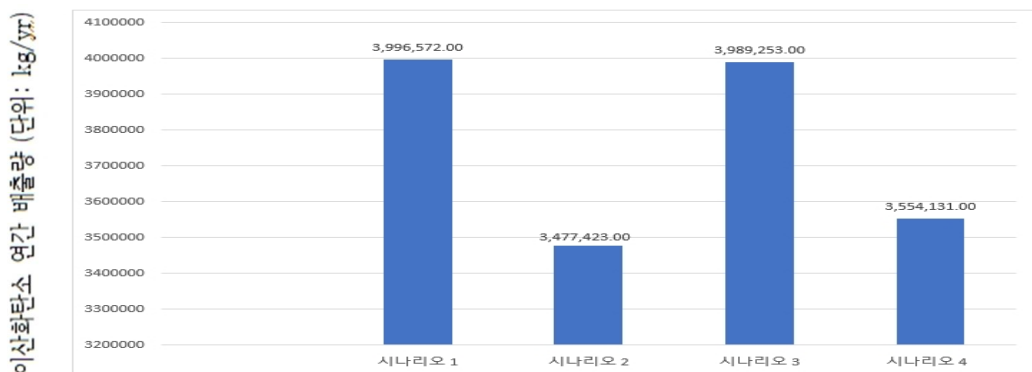
$Q_{electricity}$: 전력소비량

<그림 4-1>에 따르면 「시나리오 1(ESS 단독)」이 이산화탄소 배출량이 연간 399만6,572kg으로 가장 많다. 「시나리오 2(PV발전 추가)」가 이산화탄소 배출량이 가장 적다. 「시나리오 2(PV발전 추가)」의 이산화탄소 배출

량은 연간 347만7,423kg이다. 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」의 이산화탄소 배출량은 355만4,131kg이다. 「시나리오 1(ESS 단독)」과 「시나리오 3(FC발전 추가)」은 이산화탄소 발생량이 다른 시나리오에 비해 높은 수준이다. 「시나리오 1(ESS 단독)」은 연간 399만6,572kg의 이산화탄소를 배출하고 있으며 「시나리오 3(FC발전 추가)」은 연간 398만9,253kg의 이산화탄소를 배출한다.

계통에는 석탄발전, 가스발전 등 이산화탄소를 배출하는 에너지원은 물론 이산화탄소는 없지만 방사능 폐기물을 발생하는 원자력발전, 자연의 무한한 에너지를 사용하여 이산화탄소를 배출하지 않는 재생에너지 등이 전력을 공급한다. 이와 같은 이유 때문에 태양광발전과 연료전지발전 등 신재생에너지를 사용하지 않은 「시나리오 1(ESS 단독)」이 이산화탄소를 배출하는 것으로 분석된 이유는 계통에서 전력을 공급하는 에너지원이 배출한 이산화탄소 때문으로 분석된다. 「시나리오 1(ESS 단독)」이 「시나리오 3(FC발전 추가)」보다 이산화탄소를 더 많이 배출한다는 분석에서 계통에서 전력을 100% 구입하는 것보다 일부(24.2%)를 연료전지발전에서 충당하고 나머지를 계통에서 구입(75.8%)하는 방법이 이산화탄소를 적게 배출한다는 추론이 가능하다(〈표 4-4〉 참조). 이는 연료전지발전이 계통보다 이산화탄소를 적게 배출함을 의미한다. 또 하나 주목할 만한 사실은 태양광발전을 추가할 경우 이산화탄소 배출량이 확연히 낮아진다는 점이다. 〈표 4-4〉에 따르면 태양광발전 비중이 「시나리오 2(PV발전 추가)」에서 15.1%, 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」에서 14.6%를 차지한다. 이 경우 이산화탄소 배출량이 태양광발전이 없는 「시나리오 1(ESS 단독)」과 「시나리오 3(FC발전 추가)」보다 적어 태양광발전이 이산화탄소 배출량을 줄이는 것으로 파악된다. 태양광발전이 이산화탄소 배출량을 줄이고 있다는 사실은 「시나리오 2(PV발전 추가)」와 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」만을 분석할 경

우에도 나타난다. 「시나리오 2(PV발전 추가)」의 태양광발전 비중이 15.1%으로 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」보다 불과 0.5% 많음에도 이산화탄소 배출량이 가장 적다. 「시나리오 3(FC발전 추가)」과 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」를 분석하여도 태양광발전이 이산화탄소 배출량을 줄이는 주요 요인이라는 점이 분석된다. 「시나리오 3(FC 발전 추가)」과 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」는 연료전지발전을 동일하게 250kW를 설치하였지만 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」의 이산화탄소 배출량이 「시나리오 3(FC발전 추가)」보다 적다. 이는 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」에 태양광발전이 설치되어 있기 때문인 것으로 분석된다. 이러한 결과는 경제성보다 이산화탄소 배출량을 고려한다면 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」보다 「시나리오 2(PV발전 추가)」를 선택하여야 함을 의미한다. 즉, 기후환경 영향 측면에서는 시나리오 2(PV발전 추가)가 다른 시나리오보다 이산화탄소 배출량이 적다. <그림 4-1>은 시나리오의 이산화탄소 배출량을 보여주는 그래프이다. 그래프에서 태양광발전시설이 설치된 「시나리오 2(PV발전 추가)」와 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」의 이산화탄소 배출량이 태양광발전이 없는 「시나리오 1(ESS 단독)」과 「시나리오 3(FC발전 추가)」보다 이산화탄소 배출량이 적음을 <그림 4-1>에서 볼 수 있다.



<그림 4-1> 시나리오 별 이산화탄소 배출량

제 5 장 주요 요인의 영향 분석

「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」는 순현재비용(NPC)과 균등화발전단가(LCOE), 운영비용이 가장 낮은 시나리오다. 민감도 분석을 위하여 시나리오4를 선정하였다.

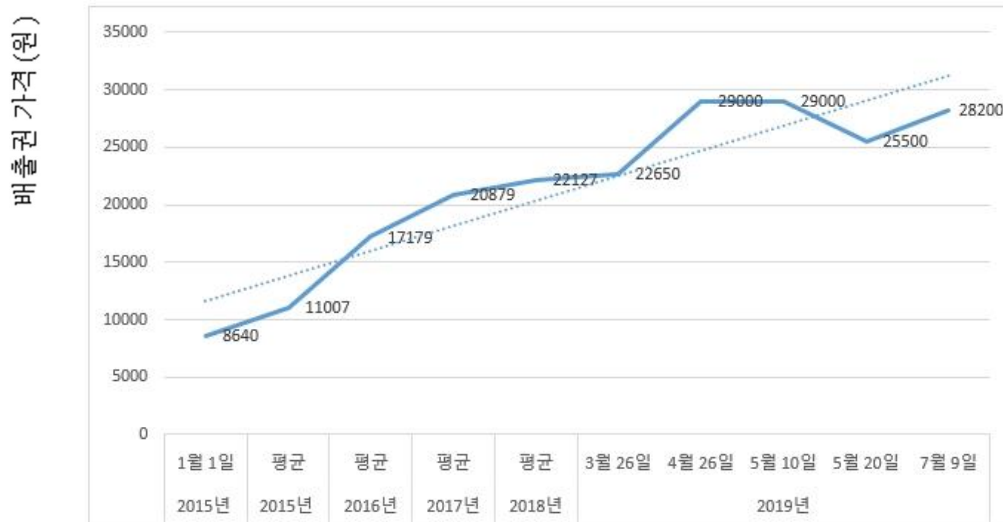
민감도 분석은 시나리오의 조건을 변동하여 시뮬레이션 분석을 수행하는 방식으로 진행된다. 변동되는 조건은 주요요인으로 배출권의 가격, 계통한계가격(SMP)+공급인증서(REC)의 가격, 태양광 모듈의 가격을 선정하였다. <표 5-1>에서 민감도 분석을 위한 조건을 기술하였다.

<표 5-1> 민감도 분석 조건의 내용

민감도	분석	조건
배출권	15,000원/t	<ul style="list-style-type: none"> ○ SMP+REC 가격: 193원/kWh ○ 태양광 모듈 가격: 500원/W
	25,000원/t	
	35,000원/t	
SMP + REC	243원/kWh	<ul style="list-style-type: none"> ○ 배출권 가격: 2만5,000원/t ○ 태양광 모듈 가격은 500원/W
	193원/kWh	
	143원/kWh	
태양광 모듈	500원/W	<ul style="list-style-type: none"> ○ 배출권 가격: 2만5,000원/t ○ SMP+REC 가격: 193원/kWh
	370원/W	
	185원/W	

제1절 배출권 가격 변화에 따른 경제성 변화 분석

한국거래소에 따르면 배출권 시장이 개장한 2015년 1월 12일에 톤당 8,640원이었다. 2015년 평균 가격은 톤당 1만1,007원이며 2016년 평균 가격은 1만7,179원이다. 2017년 평균 가격은 톤당 2만879원을 기록하였고, 2018년 평균 가격은 2만2,127원이다. 2019년 들어서도 상승세가 이어져 2019년 3월 26일엔 종가 기준으로 2만6,650원을 기록하였다. 4월 26일에 2만9,000원을 처음 기록한 뒤, 5월 10일에는 2만9,000원 기록을 갱신하였다. 이후 상승세가 꺾여 5월 20일 톤당 2만5,500원으로 낮아졌다가 7월 9일 2만8,200원을 기록하였다. 전문가들은 이러한 배출권 가격의 변동성을 바탕으로 배출권의 적정가격이 2만5,000원이고 이 가격을 중심으로 등락할 것이라고 예측하였다. <그림 5-1>은 배출권 가격과 추세선을 그린 그래프이다.



<그림 5-1> 2015~2019년 간 배출권 가격과 추세선

이러한 근거로 2만5,000원을 기준 배출권 가격으로 설정하였다. 민감도 분석을 위하여 전문가 의견을 참고하여 기준 배출권 가격에 $\pm 10,000$ 원을 적용하여 1만5,000원, 3만5,000원을 추가로 설정하였다.

본 연구에서 민감도 분석을 위한 배출권 가격의 범주를 톤당 1만5,000원, 톤당 2만5,000원, 톤당 3만5,000원으로 적용하였고 계통한계가격(SMP)+공급인증서(REC) 가격은 193원/kWh, 태양광 모듈 가격은 500원/W로 설정하였다. <표 5-2>는 이 절에서 수행한 분석 조건을 요약한 표다.

<표 5-2> 배출권 가격 민감도 분석 조건

조건	분석	조건
배출권	15,000원/t	<ul style="list-style-type: none"> ○ SMP+REC 가격: 193원/kWh ○ 태양광 모듈 가격: 500원/W
	25,000원/t	
	35,000원/t	

HOMER는 배출권 가격이 톤당 2만5,000원일 때와 톤당 3만5,000원일 때 구성요소 설치용량을 같게 추천하였다. 톤당 2만5,000원, 톤당 3만5,000원일 때 태양광발전의 설비용량은 3,292kW, 연료전지발전 250kW, LIB ESS 100kWh, 시스템 컨버터 649kW였다. 태양광발전의 설치용량이 3,292kW일 경우 초기자본이 같지만 순현재비용(NPC)은 달랐다. 초기자본은 317만 달러이며 순현재비용(NPC)은 배출권 가격이 톤당 2만5,000원일 경우 5,180만 달러, 배출권 가격이 톤당 3만5,000원일 경우 톤당 5,240만 달러다. 배출권 가격이 톤당 1만5,000원일 경우 태양광발전 설치용량은 3,025kW로 다른 구간과 달랐다. 배출권 가격이 오를수록 마이크로그리드에 설치된 태양광발전 설비용량과 마이크로그리드의 순현재비용(NPC)이 상승하였다.

이는 태양광발전 설비가 이산화탄소를 배출하지 않기 때문에 배출권 가격이 많이 설치하는 것이 마이크로그리드 사업자에게 유리하기 때문이기 때문이다. 즉, 배출권가격이 오를수록 마이크로그리드에 태양광발전을 설치하는 것이 경제성을 개선할 수 있는 요인으로 분석된다. 또, 배출권 가격

상승이 마이크로그리드 운영에 음(-)의 영향을 주고 있다. 이는 배출권 가격이 오를수록 순현재비용(NPC)가 상승하는 점에서 근거를 찾을 수 있다. <표 5-3>에 이러한 내용을 기술하였다.

<표 5-3> 배출권 가격 민감도 분석 결과

배출권 가격	PV 발전 (kW)	FC 발전 (kW)	LIB ESS (kWh)	시스템 컨버터 (kW)	계통 길이 (km)	NPC(\$)	초기 자본(\$)
15,000원/t	3,025	250	100	649	0.45	51.3×10^6	3.05×10^6
25,000원/t	3,292	250	100	649		51.8×10^6	3.17×10^6
35,000원/t	3,292	250	100	649		52.4×10^6	3.17×10^6

배출권의 가격이 상승할수록 마이크로그리드의 균등화발전단가(LCOE)도 상승하였다. 배출권 가격이 톤당 1만5,000원일 때 균등화발전단가(LCOE)는 0.332달러, 톤당 2만5,000원일 때 0.335달러, 톤당 3만5,000원일 때 0.338달러이다. 균등화발전단가(LCOE)의 상승은 경제성이 둔화됨을 의미한다.

배출권 가격이 상승할수록 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)도 떨어졌다. 배출권 가격이 톤당 1만5,000원일 때 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)은 각각 40.4%, 44.5%였지만 배출권 가격이 톤당 2만5,000원일 때 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)이 각각 37.6%, 41.6%로 떨어졌다. 배출권 가격이 톤당 3만5,000원일 때 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)은 37.8%, 41.9%로 배출권 가격이 톤당 2만5,000원일 때보다 소폭 올랐지만 배출권 가격이 톤당 1만5,000원일 때보다 여전히 낮은 수준이어서 배출권 가격이 마이크로그리드의 경제성에 음(-)의 관계임을 뒷받침해 주고 있다. <표 5-4>에서 이와 같은 내용을 확인할 수 있다.

<표 5-4> 배출권 가격 민감도 분석 결과(LCOE, ROI, IRR)

배출권 가격	LCOE(\$)	운영비용(\$)	ROI(%)	IRR(%)
15,000원/t	0.332	2.91×10^6	40.40	44.50
25,000원/t	0.335	2.93×10^6	37.60	41.60
35,000원/t	0.338	2.26×10^6	37.80	41.90

배출권 가격이 상승할수록 태양광발전의 비중이 높아졌고 그만큼 계통에서 구매한 전력의 비중이 낮아졌다. 태양광발전이 이산화탄소를 배출하지 않기 때문에 마이크로그리드의 경제성 확보를 위하여 태양광발전의 설치량을 늘리고 가동률을 높였기 때문인 것으로 분석된다. 배출권 가격이 톤당 1만5,000원일 때 태양광발전이 생산하는 전력의 비중은 14.5%이고 톤당 2만5,000원일 때 14.6%였다. 배출권 가격이 톤당 3만5,000원일 때 태양광발전이 생산하는 전력의 비중은 14.9%로 상승하였다.

배출권 가격이 오를수록 시나리오의 전력생산에서 태양광발전 비중이 상승하였지만 연료전지발전이 생산하는 전력의 비중은 변함이 없었으며 계통에서 구입하는 전력의 비중은 줄었다. 연료전지발전 비중은 배출권가격 변화와 상관없이 23.3%로 변함이 없었다. 계통에서 구매하는 전력의 비중은 배출권 가격이 톤당 1만5,000원일 때 62.2%였고 배출권 가격이 톤당 2만5,000원, 톤당 3만5,000원일 때 62.2%였다. 배출권 가격이 오를수록 전력생산에서 태양광의 비중이 상승하고 있는데 반하여 연료전지발전의 비중은 변함이 없기 때문에 마이크로그리드가 계통에서 전력을 구입하는 비중을 줄이는 것으로 분석된다.

전력생산에서 태양광발전의 비중이 높아지자 전력판매, 즉 매전의 비중도 높아졌다. 매전의 비중이 높아지면 마이크로그리드는 그만큼 경제성을 확보

할 수 있다. 배출권 가격이 오를수록 소내부하로 사용하는 전력의 비중이 94%에서 93.9%로 낮아졌으며 매전 비중은 6.05%에서 6.09%로 높아졌다.

연료전지발전을 위한 연료비용은 배출권 가격이 상승 여부와 관계없이 연간 23만4,549달러로 변함이 없었다. 배출권 가격에 따른 연료전지발전의 전력생산 탄력성이 0인 이유는 연료비용 부담 때문인 것으로 파악된다. 연료전지발전은 전력생산량 측면에서 태양광발전보다 유리한 장점이 있지만 태양광발전보다 고가인데다가 연료를 꾸준히 공급하여야하는 단점 때문에 탄력적으로 운영하기 어려운 점을 확인할 수 있다. <표 5-5>엔 이와 같은 내용이 반영되어 있다.

<표 5-5> 배출권 가격 민감도 분석 결과(전력 생산·소비)

배출권 가격	생산(%)			소비(%)		연료 비용 \$/yr
	PV발전	FC발전	계통구매	소내 부하	매전	
15,000원/t	14.50	23.30	62.20	94.00	6.05	234,549
25,000원/t	14.60	23.30	62.10	93.90	6.09	234,549
35,000원/t	14.90	23.30	62.10	93.90	6.09	234,549

배출권 가격이 오를수록 순구입에너지는 527만5,931kWh에서 526만513kWh로 줄었고 연간 에너지요금도 9만7,077달러에서 9만6,793달러로 줄어들었다. 연간 수요요금도 마찬가지로 378.23달러에서 377.97달러로 줄었다. 이는 배출권 가격이 오름에 따라 태양광발전 비중이 높아져 계통에서 구입하는 전력량이 줄었기 때문인 것으로 분석된다. 요컨대 배출권 가격이 오를수록 마이크로그리드에서 이산화탄소 배출이 없는 태양광발전의 활용 비중을 높이기 때문에 계통에서 구입하는 순구입에너지량이 줄어든다고 분석할 수 있다. <표 5-6>에 이와 같은 내용이 반영되어 있다.

<표 5-6> 배출권 가격 민감도 분석(에너지·수요요금)

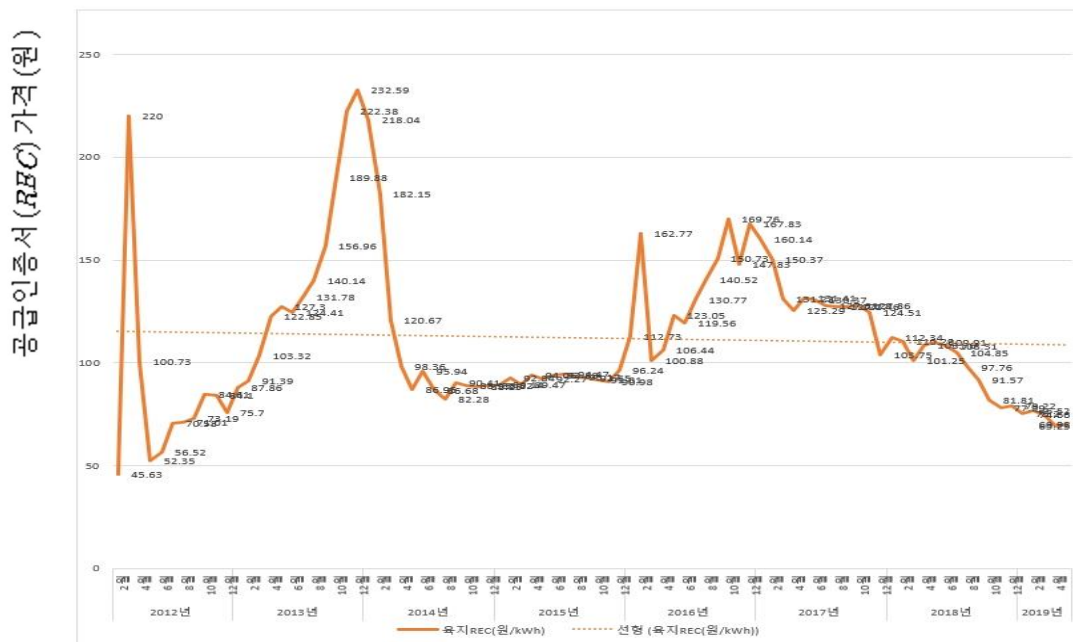
배출권 가격	순구입에너지 (kWh)	피크수요 (kWh)	연간 에너지요금 (\$/yr)	연간 수요요금 (\$/yr)
15,000원/t	5,275,931	4,198	97,077	378.23
25,000원/t	5,260,513	4,198	96,793	377.97
35,000원/t	5,260,513	4,198	96,793	377.97

배출권 가격이 오르면 태양광발전설비와 연료전지발전이 설치된 계통연계형 마이크로그리드 활용이 유리하다고 결론을 내릴 수 있다. 이러한 점은 향후 기후 온난화를 유발하는 이산화탄소 배출량을 줄이기 위한 노력의 일환으로 배출권 가격을 높이 책정하는 정책이 집행될 경우 태양광발전설비와 연료전지발전이 설치된 계통연계형 마이크로그리드를 설치하여 정책 목표를 달성할 수 있음을 보여준다. 연료전지발전이 일정 수준의 전력을 공급하고 태양광발전이 전력공급을 배출권 가격에 따라 전력을 탄력적으로 공급하여 계통연계형 마이크로그리드의 경제성을 확보할 뿐만 아니라 이산화탄소 배출량을 줄여 기후변화 대응에 효과적으로 활용될 수 있음을 시사하고 있다.

제2절 REC 가격 변화에 따른 경제성 변화 분석

2018년을 기준으로 공급인증서(REC) 가격이 kWh당 ± 50 원 변동된 상황으로 나누어 시나리오의 민감도를 분석하였다.

공급인증서 가격 기준을 2018년으로 설정한 이유는 가격이 우하향하는 최신 추세를 반영하기 위함이다. <그림 5-1>에서 확인할 수 있듯이 2017년엔 REC가격이 평행선을 그렸으나 2018년엔 하락세를 시현하였다. 공급인증서 하락세는 2019년에도 계속되고 있다.



<그림 5-2> 2012~2019년 5월간 공급인증서 가격 변화와 추세선

공급인증서 가격 변동폭을 ± 50 원으로 결정한 이유는 신재생에너지공급 의무화제도(RPS제도)가 도입된 2012년에서 2019년 5월까지 공급인증서(REC)의 가격 변화와 추세선을 그래프로 그린 결과 공급인증서(REC) 가격

이 kWh당 100원을 약간 상회하는 지점에서 완만히 하강하고 있었기 때문이다. 이러한 사실을 바탕으로 전문가의 조언을 얻어 공급인증서 가격 변동을 ±50원으로 결정하고 분석에 적용하였다.

공급인증서 가격 변동을 적용한 결과 SMP+REC가격 조건을 kWh당 243원, 193원, 143원으로 도출하였다. 이때 배출권 가격은 톤당 2만5,000원이며 태양광 모듈 가격은 W당 500원이다. <표 5-7>은 이 절에서 수행한 분석 조건을 요약한 표이다.

<표 5-7> SMP+REC 가격 민감도 분석 조건의 내용

조건	분석	조건
SMP + REC	243원/kWh	<ul style="list-style-type: none"> ○ 배출권 가격: 2만5,000원/t ○ 태양광 모듈 가격은 500원/W
	193원/kWh	
	143원/kWh	

SMP+REC 가격이 하락할수록 태양광발전의 설비용량도 줄었다 SMP+REC 가격이 kWh당 243~193원일 때 태양광발전 3,292kW가 설치되었는데 kWh당 143원일 때 태양광발전 2,903kW 설비를 HOMER가 순현재비용(NPC)가 가장 낮다고 제시하였다. 이 때 연료전지발전 설비용량과 LIB ESS 설비용량이 변함이 없었다. 마이크로그리드의 순현재비용(NPC)은 SMP+REC 가격이 kWh당 243~193원일 때 5,180만 달러였으나 kWh당 143원일 때 5,300만 달러로 증가되었다. 초기자본은 SMP+REC 가격이 kWh당 317만 달러였으나 kWh당 143원일 때 299만 달러로 감소하였다. 초기자본이 줄어든 이유는 설치할 태양광발전 설비용량이 줄었기 때문으로 분석된다. <표 5-8>에 이와 같은 내용이 정리되어 있다.

이러한 분석은 SMP+REC 가격이 낮아질수록 계통연계형 마이크로그리드

의 규모가 작아짐을 의미한다. 계통한계가격(SMP)은 유가와 연동된 시장가격이지만 공급인증서(REC)는 보조금(subsidary)이다. 보조금 규모가 내려갈수록 마이크로그리드 경영자가 설비를 확장할 유인(incentive)이 없어지기 때문에 규모도 작아지는 것으로 분석된다.

<표 5-8> SMP+REC 가격 민감도 분석 결과

SMP+REC 가격	PV 발전 (kW)	FC 발전 (kW)	LIB ESS (kWh)	시스템 컨버터 (kW)	계통 (km)	NPC(\$)	초기 자본(\$)
243원 /kWh	3,292	250	100	649	0.45	51.8×10^6	3.17×10^6
193원 /kWh	3,292	250	100	649		51.8×10^6	3.17×10^6
143원 /kWh	2,903	250	100	620		53.0×10^6	2.99×10^6

SMP+REC 가격이 떨어질수록 마이크로그리드의 경제성이 낮아졌다. 이는 균등화발전단가(LCOE), 운영비용, 투자회수율(ROI), 내부수익률(IRR) 지표에서 확인할 수 있다. SMP+REC 가격이 낮아지자 균등화발전단가(LCOE)가 0.335달러에서 0.353달러로 높아졌고, 운영비용은 293만 달러에서 301만 달러로 높아졌다. 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)은 각각 37.6%에서 37.4%, 41.6%에서 41.4%로 낮아졌다. 경제성 지표인 균등화발전단가(LCOE)와 운영비용이 높아지고 투자회수율과 내부수익률이 낮아진 이유는 공급인증서(REC)라는 보조금이 줄어들었기 때문으로 분석된다.

주목할 점은 SMP+REC가 kWh당 243~193원 구간보다 kWh당 193~143원 구간에서 경제성 지표의 변동성이 크다는 점이다. 이는 신재생에너지공급의 무화제도에서 공급인증서에 가중치를 곱하여 신에너지와 재생에너지설비

사업자에게 자원되기 때문인 것으로 분석된다.

현행 제도에서 태양광발전은 공급인증서(REC) 가중치 1.5를 받고 있고 연료전지발전은 REC 가중치 2.0을 받고 있다. 가중치는 REC에 곱하여진다. SMP+REC가 kWh당 243~193원 구간보다 kWh당 193~143원 구간에서 마이크로그리드 경제성 변동폭이 큰 이유는 가중치 때문으로 추론된다. REC 가격이 작아질수록 가중치의 효과가 줄어들어 마이크로그리드의 경제성이 줄어든 것으로 분석된다. <표 5-9>에 이에 관한 내용이 나타나 있다.

<표 5-9> SMP+REC 가격 민감도 분석(LCOE, ROI, IRR)

SMP+REC 가격	LCOE(\$)	운영비용(\$)	ROI(%)	IRR(%)
243원/kWh	0.335	2.93×10^6	37.6	41.6
193원/kWh	0.335	2.93×10^6	37.6	41.6
143원/kWh	0.353	3.01×10^6	37.4	41.4

SMP+REC 가격이 떨어져 마이크로그리드의 경제성이 하락하자 연료비용이 들지 않는 태양광발전 비중이 높아지고 연료비 부담이 있는 연료전지발전의 비중이 하락하였다. 계통에서 구입하는 전력량도 늘어났다. SMP+REC 가격이 243~193원에서 143원으로 하락하자 태양광발전의 비중은 14.6%에서 14.8%로 늘어났고 계통 구매 비중도 62.1%에서 64.1%로 늘어났다. 연료전지발전의 비중은 23.3%에서 21.1%로 낮아졌다.

SMP+REC 가격이 kWh당 193원에서 kWh당 143원일 때로 변화하였을 때 전력 생산 비중이 변화한 이유는 공급인증서(REC)에 곱하여지는 가중치 때문으로 분석된다. 같은 가중치라 하더라도 공급인증서(REC)의 가격이 높을 경우와 낮을 경우의 결과값이 마이크로그리드에 미치는 영향이 다르다. 공급인증서(REC) 가격이 낮을수록 마이크로그리드의 경제성에 공헌하는 가중

치의 영향이 줄어들어 마이크로그리드 경영자는 연료비용이 투입이 필요 없는 태양광발전의 비중을 높이고 연료비용 지출이 필요한 연료전지발전의 비중을 줄일 수 밖에 없다. 대신 OECD 국가 가운데 전기료가 상대적으로 값싸다고 평가되는 계통에서 전력의 구입 비중을 늘렸다. 태양광발전의 비중을 높이고 연료전지발전의 비중을 낮추고 계통에서 구입하는 전기의 양을 높이니 자연히 연료비용 지출이 줄어든다. 이를 반영하여 HOMER는 연료비용이 연간 23만4,549달러에서 20만5,525달러로 준 결과를 제시하였다.

SMP+REC 가격이 낮아질수록 매전의 비중이 줄어들고 소내부하에서 사용하는 전력의 비중이 높아졌다. 매전의 경우 6.09%에서 3.28%로 비중이 낮아졌으며 소내부하로 전력을 소모하는 비중이 93.9%에서 96.7%로 확대되었다. 태양광발전 설비용량이 SMP+REC 가격이 kWh당 2,903kWh로 kWh당 243~193원일 때보다 389kWh 줄었기 때문으로 분석된다. 전력생산량이 낮아지는 전력 소비량도 낮아진다고 분석할 수 있다. <표 5-10>에 이와 같은 내용이 정리되어 있다.

<표 5-10> SMP+REC 가격 민감도 분석 결과(전력 생산·소비)

SMP+REC 가격	생산(%)			소비(%)		연료 비용 \$/yr
	PV발전	FC발전	계통구매	소내 부하	매전	
243원/kWh	14.6	23.3	62.1	93.9	6.09	234,549
193원/kWh	14.6	23.3	62.1	93.9	6.09	234,549
143원/kWh	14.8	21.1	64.1	96.7	3.28	205,525

SMP+REC 가격이 낮아짐에 따라 연료비가 들지 않는 태양광발전의 비중이 높아졌음에도 불구하고 마이크로그리드의 순구입에너지는 늘어났다. 계통에서 구매하는 전력이 늘어났기 때문이다. <표 5-10>에서 확인할 수 있듯

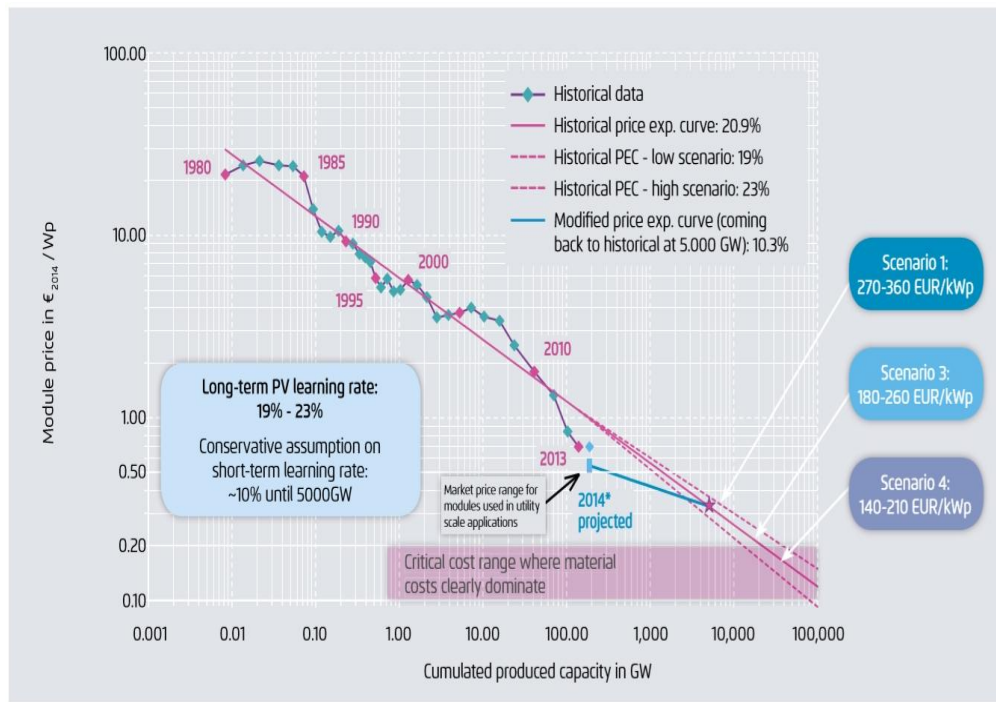
이 SMP+REC 가격이 kWh당 193원에서 kWh당 143원으로 변할 때 계통에서 구매하는 전력의 비중은 62.1%에서 64.1%로 늘어났다. 이에 따라 순구입에너지는 SMP+REC 가격이 kWh당 193원일 때 526만513kWh인데 kWh당 143원일 때 554만9256kWh로 낮아졌다. 이에 따라 연간 에너지요금도 9만 6,793달러에서 10만2,106달러로 늘었고 연간 수요요금도 377.97달러에서 378.97달러로 늘었다. <표 5-11>에 이와 같은 내용을 확인할 수 있다.

<표 5-11> SMP+REC 가격 민감도 분석(에너지·수요요금)

SMP+REC 가격	순구입에너지 (kWh)	피크수요 (kWh)	연간 에너지요금 (\$/yr)	연간 수요요금 (\$/yr)
243원/kWh	5,260,513	4,198	96,793	377.97
193원/kWh	5,260,513	4,198	96,793	377.97
143원/kWh	5,549,256	4,198	102,106	378.35

제3절 태양광 모듈 가격 변화에 따른 경제성 변화 분석

Agora Energiewende(2015)에 따르면 결정질 실리콘 태양광 모듈의 가격은 2014년 경 W당 USD 0.46달러였으며 2050년 USD 0.16달러로 예측된다. 태양광 모듈 가격은 2014년부터 2050년까지 연평균 2.79% 하락한 것으로 나타났다. <그림 5-3>는 독일 프라운호퍼 연구소가 예측한 태양광 모듈의 가격하락폭이다.



<그림 5-3> 1980~2050년 간 태양광 모듈 가격 하락폭

출처: Agora Energiewende(2015)

이를 바탕으로 계산한 결과 2030년 모듈 가격이 USD 0.32달러임을 추산하였다. 이런 과정을 통하여 민감도 분석에 적용한 태양광 모듈 가격을 W당 500원, W당 370원, W당 185원으로 결정하였다. 이때 사용된 결정질 실

리콘 태양광 모듈과 250kW급 연료전지발전이 사용되었다. 배출권 가격의 조건은 톤당 2만5,000원이며 SMP+REC 가격은 kWh당 193원이다. <표 5-12>에 이와 같은 내용을 정리하였다.

<표 5-12> 태양광 모듈 가격 민감도 분석 조건의 내용

조건	분석	조건
태양광 모듈	500원/W	<ul style="list-style-type: none"> ○ 배출권 가격: 2만5,000원/t ○ SMP+REC 가격: 193원/kWh
	370원/W	
	185원/W	

태양광 모듈 가격 변화에 따라 HOMER가 순현재비용(NPC) 계산을 통하여 제시한 시나리오의 구성요소의 설비용량을 분석하였다. 태양광 모듈 가격이 변화에 따라 가장 크게 변하는 마이크로그리드 구성요소는 태양광발전 설비이다. 태양광 모듈이 W당 500원일 때 태양광발전 용량은 3,292kW, 태양광 모듈 가격이 W당 370원일 때 태양광발전 용량은 3,142kW으로 소폭 줄었다. 태양광 모듈 가격이 W당 185원일 경우, 태양광발전 용량은 6,878kW로 급등하였다. 태양광 모듈 가격이 W당 185원일 때 태양광발전의 비중이 크게 늘어난 이유는 마이크로그리드 경영자가 연료비용을 아끼기 위하여 태양광 모듈을 추가로 설치하였기 때문으로 분석된다. 태양광 모듈 가격이 현격히 낮아졌기 때문에 태양광발전 비중을 확대하여도 여전히 낮은 수준의 순현재비용(NPC)을 유지할 수 있기 때문인 것이다.

태양광 모듈 가격이 하락할수록 순현재비용(NPC)이 줄었다. 태양광 모듈 가격이 W당 500원일 때와 185원일 때 순현재비용(NPC)은 각각 5,180만 달러, 5,060만 달러였다. 이 때 연료전지발전 설비용량과 LIB ESS의 설비용량의 경우 변화가 없었는데 순현재비용(NPC)이 태양광 모듈 가격에 민감한

것으로 분석된다.

태양광 모듈 가격이 W당 370원에서 185원으로 급등하여 태양광발전 설비용량이 두 배 이상 늘어났음에도 불구하고 초기자본도 감소하지 않고 줄었다. 태양광 모듈 가격이 W당 500원일 때 초기자본이 317만 달러이다. 태양광 모듈 가격이 W당 185원일 때는 초기자본이 되려 280만 달러로 줄었다.

이를 바탕으로 태양광 모듈의 가격이 하락되면 마이크로그리드에서 태양광발전의 비중이 높아지고 경제적 지표도 개선될 것이라고 예측할 수 있다. <표 5-13>에 이를 정리하였다.

<표 5-13> 태양광 모듈 가격 민감도 분석 결과

태양광 모듈 가격	PV 발전 (kW)	FC 발전 (kW)	LIB ESS (kWh)	시스템 컨버터 (kW)	계통 길이 (km)	NPC(\$)	초기 자본(\$)
500원/W	3,292	250	100	649	0.45	51.8×10^6	3.17×10^6
370원/W	3,142	250	100	646		51.0×10^6	2.71×10^6
185원/W	6,878	250	100	619		50.6×10^6	2.8×10^6

태양광 모듈 가격이 변화함에 따라 균등화발전단가(LCOE), 운영비용, 투자회수율(ROI), 내부수익률(IRR) 등 경제적 지표가 개선되었다. 태양광 모듈 가격이 떨어짐에 따라 시나리오의 균등화발전단가(LCOE)와 운영비용은 하락하였다.

균등화발전단가(LCOE)는 태양광 모듈 가격이 W당 500원, 370원, 185원일 때 각각 0.335달러, 0.329달러, 0.326달러로 개선됐으며 운영비용도 293만 달러, 291만 달러, 288만 달러로 낮아졌다. 투자회수율(ROI)과 내부수익률

(IRR)은 태양광 모듈 가격이 W당 370원일 때 가장 높았다. 이 경우 투자회수율(ROI) 58.2%, 내부수익률(IRR) 62.3%이었다. 이는 태양광 모듈 가격이 W당 500원일 때보다 상대적으로 하락하였지만 태양광설치용량이 비슷한 수준을 유지하기 때문인 것으로 분석되었다.

태양광 모듈 가격이 W당 185원일 때 태양광발전 설치용량이 6,878kW로 두 배 늘어나자 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)이 각각 56%, 60.1%로 태양광 모듈 가격이 W당 500원일 때보다 큰 폭으로 늘어났다. 태양광 모듈 가격이 W당 500원일 때 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)은 각각 37.6%, 41.6%였는데 태양광 모듈 가격이 W당 185원일 경우에는 각각 56% 60.1%였다. 이는 태양광 모듈 가격 하락이 마이크로그리드의 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)을 대폭 개선함을 보여주고 있다. <표 5-14>에서 이를 정리하였다.

<표 5-14> 태양광 모듈 가격 민감도 분석 결과(LCOE, ROI, IRR)

태양광 모듈 가격	LCOE(\$)	운영비용(\$)	ROI(%)	IRR(%)
500원/W	0.335	2.93×10^6	37.6	41.6
370원/W	0.329	2.91×10^6	58.2	62.3
185원/W	0.326	2.88×10^6	56.0	60.1

태양광 모듈 가격이 변화하여도 전력 생산에서 연료전지발전이 차지하는 비중이 소폭 감소하였다. 대신 태양광발전의 비중이 증가하였으며 계통에서 구매하는 전력의 비중이 줄었다. 태양광 모듈 가격이 W당 500원일 때 발전에서 태양광발전이 차지하는 비중은 14.6%이고 W당 370원일 때 15.1%, W당 185원일 때 15.8%였다.

연료전지발전은 태양광 모듈 가격이 W당 500~370원일 때 23.3%였고 W당 185원일 때 23.2%였다. 태양광 모듈 가격이 내려감에 따라 발전에서 연료전지가 차지하는 비중이 소폭 내려갔지만 연료비용은 동일하였다. 시나리오의 연료비용은 태양광 모듈 가격의 변화에 상관없이 연간 234,549달러였다. 연료전지발전 비중이 변화가 없는 것은 시나리오의 발전전략이 부하추종(Load Following)이기 때문인 것으로 추론된다. 부하추종 전략은 필요한 부하만큼만 전력을 생산한다. 계통에서 전력을 구매하는 비중은 태양광 모듈 가격이 W당 500원일 때 62.1%, W당 370원일 때 61.6%, W당 185원일 때 61%였다. 이를 통하여 태양광 모듈 가격이 내려갈 수록 계통연계형 마이크로그리드에서 태양광발전의 비중이 높아진다는 점을 분석할 수 있다.

태양광 모듈 가격이 떨어질수록 전력을 소내부하로 쓰는 전력의 비중이 줄어들고 매전이 늘어났다. 태양광 모듈 가격이 W당 500원, 370원, 185원으로 내려갈 수록 전력을 소내부하를 위하여 사용하는 비중이 각각 93.9%, 93.8%, 93.6%로 줄었다. 대신 전력을 판매(매전)하는 비중은 6.09%, 6.18%, 6.42%로 커졌다. 태양광발전은 연료비가 들지 않기 때문에 소내부하로 사용하는 것보다 매전하는 것이 현행 우리나라 전기요금 체계에서 유리하기 때문인 것으로 분석된다. 실제로 태양광발전에서 생산한 전력을 매전할 경우 공급인증서에 가중치 1.5를 곱하기 때문에 전력을 소내부하로 사용하는 것보다 매전하는 것이 유리하다.

이러한 점은 계통연계형 마이크로그리드가 확산되는데 걸림돌로 작용될 수 있다. 마이크로그리드는 자가생산한 전력을 ESS에 저장하였다가 소내부하로 자가소비하는 에너지 시스템이다. 즉, 전력을 자급자족한다(サント靖, 2018). 따라서 마이크로그리드가 확산되려면 생산된 전력을 매전하기 보다 소내부하로 사용하면 보다 이익이 될 수 있는 제도가 필요하다. 신재생에너지공급의무화제도와 전기요금 등 현행 우리나라 전력 제도는 매전이 자가

발전보다 이익이 남는다. 이러한 점이 개선되어야 계통연계형 마이크로그리드가 확산되고 전력을 자급자족하는 비중이 높아질 것으로 분석된다. 태양광 모듈 가격이 내려갈 수록 변화되는 전력 생산과 소비 비중을 <표 5-15>에 정리하였다.

<표 5-15> 태양광 모듈 가격 민감도 분석 결과(전력 생산·소비)

태양광 모듈 가격	생산(%)			소비(%)		연료 비용 \$/yr
	PV 발전	FC 발전	계통 구매	소내 부하	매전	
500원/W	14.60	23.30	62.10	93.90	6.09	234,549
370원/W	15.10	23.30	61.60	93.80	6.18	234,549
185원/W	15.80	23.20	61.00	93.60	6.42	234,549

태양광 모듈 가격이 떨어짐에 따라 마이크로그리드의 순구입에너지의 크기도 줄었다. 태양광 모듈 가격이 W당 500원일 때 W당 370원일 때, W당 185원일 때 순구입에너지는 각각 526만513kWh, 521만6,727kWh, 514만 6,649kWh로 떨어졌다. 태양광 모듈 가격이 W당 370원일 때 태양광발전 설치용량이 3,142kW로 W당 500원일 때보다도 적은데도 태양광 모듈 가격이 W당 500원 일 때 14.6%보다 태양광모듈 가격이 W당 370원일 때 15.1%로 태양광발전 비중이 높다. 태양광 모듈가격이 W당 185원일 때 태양광발전의 비중은 더욱 높아져 15.8%를 기록하였다.

마이크로그리드의 발전에서 태양광발전의 비중이 계속 높아짐에 따라 순구입에너지가 계속 줄었다. 태양광 모듈 가격이 W당 500원일 때 순구입에너지는 526만513kWh이며 W당 370원일 때 521만6,727kWh, W당 185원일 때 514만6,649kWh이다. <표 5-16>에서 이와 같은 내용을 확인할 수 있다.

<표 5-16> 태양광 모듈 가격 민감도 분석 결과(에너지·수요요금)

태양광 모듈 가격	순구입에너지 (kWh)	피크수요 (kWh)	연간 에너지요금 (\$/yr)	연간 수요요금 (\$/yr)
500원/W	5,260,513	4,198	96,793	377.97
370원/W	5,216,727	4,198	95,987	380.08
185원/W	5,146,649	4,198	94,698	375.46

제 6 장 결 론

제1절 연구 요약

현재 공급인증서(REC)의 가중치는 태양광발전의 경우 1.5, 연료전지발전의 경우 2.0이며 배출권 가격은 톤당 2만5,000원이다, 태양광 모듈 가격은 W당 500원, SMP+REC 가격은 kWh당 193원에 거래되고 있다. 이러한 상황에서 시나리오들 가운데 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」가 순현재비용(NPC)이 가장 낮았다.

「시나리오 1(ESS 단독)」은 순현재비용(NPC)이 7,030만 달러이고 「시나리오 2(PV발전 추가)」와 「시나리오 3(FC발전 추가)」은 각각 6,140만 달러, 6,090만 달러로 비슷하였다. 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」는 5,180만 달러였다. 「시나리오 2(PV발전 추가)」엔 2,959kW의 태양광 모듈이 설치되어 있으며 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」엔 3,292kW의 태양광 모듈과 250kW의 연료전지가 설치되어 있어 후자에 태양광발전과 연료전지발전이 동시에 설치된 만큼 순현재비용(NPC)이 낮은 것으로 분석된다. 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」는 균등화발전단가(LCOE)와 운용비용 측면에서도 다른 시나리오를 앞섰다.

「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」는 재생에너지 발전 비중이 14%로 14.8%를 기록하는 「시나리오 2(PV발전 추가)」보다 작고 계통에서 전력을 구매하는 비중이 62.1%로 「시나리오 2(PV발전 추가)」 84.9%, 「시나리오 3(FC발전 추가)」 75.8%보다 작다. 따라서 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」는 에너지요금과 수요요금을 시나리오 가운데 가장 적게 내고 있다.

투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR) 측면에서 가장 경제성 있는 시나리오는 「시나리오 3(FC발전 추가)」이다. 「시나리오 3(FC발전 추가)」이 「시

나리오 2(PV발전 추가)」보다 투자회수율(ROD)과 내부수익률(IRR)이 높은 이유는 우리나라 신재생에너지공급의무화제도(RPS 제도)에서 연료전지발전이 공급인증서(REC) 가중치를 2.0을 받아 건축물 위에 설치된 경우 1.5를 받는 태양광발전의 가중치보다 높기 때문으로 분석된다. 이는 정책 목적에 따라 신재생에너지원에 부여되는 공급인증서(REC) 가중치의 크기를 달리하여야 함을 시사한다. 현 정부는 「재생에너지 3020」 정책을 발표하며 태양광과 풍력 중심의 재생에너지 확대 정책을 펼치는 동시에 「수소경제」를 주제로 공장의 공정 중 발생하는 부생수소의 활용과 동시에 연료전지와 수소차의 확산을 꾀하고 있다. 현 정부가 태양광발전과 연료전지발전의 보급을 동시에 추진한다면 공급인증서(REC) 가중치를 적절히 조절하여 태양광발전과 연료전지발전의 경제성을 동일하게 확보할 필요가 있다.

「시나리오 2(PV발전 추가)」는 이산화탄소 발생량이 가장 적어 기후환경 영향 측면에서 가장 유리한 마이크로그리드다. 이는 태양광발전 설비가 화석연료를 소모하지 않아 이산화탄소를 배출하지 않으며 발전하기 때문인 것으로 분석된다. 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」의 이산화탄소 발생량은 「시나리오 2(PV발전 추가)」 다음이다. 「시나리오 1(ESS 단독)」과 「시나리오 3(FC발전 추가)」은 전반적으로 높은 수준의 이산화탄소 발생량을 보여주었다. 신재생에너지원이 없는 「시나리오 1(ESS 단독)」의 이산화탄소 배출량이 가장 많았다. 전력 수급을 전적으로 계통에 의존하는 「시나리오 1(ESS 단독)」에서 이산화탄소 배출량이 가장 많다는 분석에서 계통에 전력을 공급하는 화석연료 이용 발전원이 연료전지발전보다 이산화탄소를 더 많이 배출한다는 사실을 추론할 수 있었다.

「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」가 현행 제도와 상황에서 시나리오 가운데 순현재비용(NPC)과 균등화발전단가(LCOE)가 가장 낮은 마이크로그리드이지만 상황이 변화될 때 가치평가가 달라졌다. 배출권 가격의 상승,

SMP+REC 가격의 하락, 태양광모듈 가격이 변화되는 상황에서 시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)의 민감도를 분석하였다.

배출권 가격이 톤당 1만5,000원, 2만5,000원, 3만5,000원일 때 시나리오의 순현재비용(NPC)과 균등화발전단가(LCOE)는 높아졌다. 같은 조건에서 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)의 경우 하향세였다. 이는 배출권 가격이 오를수록 시나리오의 경제성이 낮아짐을 의미한다. 배출권 가격이 오름에 따라 순구입에너지의 양이 낮아졌다. 이는 태양광발전의 비중이 높아졌기 때문이다. 연료전지발전의 경우 비중이 동일하였다. 이는 태양광발전이 시나리오의 경제성에 영향을 끼치고 있음을 보여준다.

태양광발전이 시나리오의 경제성에 영향을 끼친다는 분석은 태양광 모듈 가격의 변화되는 상황에서도 확인되었다. 태양광발전 비중이 높아지자 시나리오의 경제성이 개선되었다. 태양광 모듈의 가격이 W당 500원, 370원, 185원으로 떨어질 때 시나리오의 순현재비용(NPC)과 균등화발전단가(LCOE)는 낮아졌고 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)은 개선되었다. 이때 시나리오의 태양광발전 비중은 태양광 모듈 가격이 하락함에 따라 확대되었다. 주목할 점은 태양광 모듈 가격이 W당 370원일 때보다 W당 185원일 때 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)이 동일하게 2.2%p씩 떨어졌다는 점이다. 태양광 모듈 가격이 W당 370원일 때 시나리오는 태양광발전이 3,142kW인 반면 W당 185원일 때 태양광 모듈이 6,878kW로 두 배 이상 늘었기 때문으로 분석된다.

SMP+REC 가격이 kWh당 243원, 193원, 143원으로 낮아질수록 시나리오의 순현재비용(NPC), 균등화발전단가(LCOE)는 높아진 반면 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)이 낮아졌다. 전력을 공급할 때 연료전지발전 비중이 낮아지는 대신 계통 구매 비중이 확대되었다. 태양광발전 비중이 높아졌지만 태양광발전 설비용량이 작아져 SMP+REC 가격이 kWh당 143원일 때 태양

광발전 설비용량은 SMP+REC 가격이 kWh당 193원일 때보다 389kW 적다. 전력을 계통에서 구매하는 비중이 높아짐에 따라 순구입에너지의 양도 높아졌다. SMP+REC 가격이 낮아질수록 순구입에너지의 양은 높아졌다. 이는 태양광발전의 보급을 적정한 수준에서 유지하려면 SMP+REC 가격 변동에 하한선이 있어야함을 보여준다. 현재 SMP+REC 가격이 하향세인데 태양광발전 보급을 염두에 둔다면 정책당국자는 SMP+REC 가격이 떨어지는 한계점을 설정하여야 한다.

종합하면 현재 「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」가 가장 경제성과 기후환경 영향에서 유력한 마이크로그리드지만 향후 배출권 가격 및 SMP+REC 가격, 태양광 모듈 가격의 변화에 따라 경제성이 달라질 수 있다. 정책 당국자는 변화하는 상황을 적절히 통제하여 정책 목표를 달성할 필요가 있다.

제2절 연구의 시사점과 한계

국내 최초로 산업시설의 실제 전기부하 데이터를 바탕으로 계통연결형 산업용 마이크로그리드에 대한 경제성 분석과 기후환경영향에 미치는 영향을 분석하였다.

그간 HOMER를 이용한 마이크로그리드 분석이 분산에너지원과 에너지저장장치(ESS) 등 재생에너지설비의 최적 구성 분석에 머물거나 에너지자립섬 등 독립형 마이크로그리드 분석에 머물렀기 때문에 계통에 대한 실제 데이터를 수집·반영하여 계통연결형 마이크로그리드 연구에 활용한 연구는 국내에선 사례가 없다. 아울러 투자회수율(ROI)과 내부수익률(IRR)을 도출하여 경제성을 분석한 일도 본 연구의 장점이다. 이러한 본 연구의 결과는 계통연계형 마이크로그리드 확산의 토대가 될 전망이다.

「시나리오 4(PV발전·FC발전 추가)」는 경제성 측면에서 다른 시나리오를 가장 앞섰고 기후환경 영향 측면에선 「시나리오 2(PV발전 추가)」 다음으로 적게 이산화탄소를 배출하는 것으로 분석되었다. 이는 현행 신재생에너지무공급제도(RPS 제도)가 연료전지발전에 유리하게 설정되어 있음을 시사한다. 연료전지의 공급인증서(REC) 가중치가 2.0이고 태양광발전의 경우 가중치가 1.5로 이러한 차이가 시나리오의 경제성에 영향을 미쳤다. 더불어 공급인증서(REC) 가중치가 높은 수준이어도 공급인증서(REC)의 가격이 낮아지면 경제성이 하락하는 사실도 분석되었다. 연료전지의 경우 가중치 2.0을 받아 공급인증서 가격이 오를 경우 두 배를 받을 수 있지만 공급인증서(REC) 가격이 하락하는 국면에선 경제성 하락을 가속화하여 연료전지발전을 적용한 마이크로그리드의 경제성을 낮추는 요인이 되었다. 이는 공급인증서(REC) 가중치 결정이 정책 목표에 맞게 설정되어야 함을 시사한다.

본 연구의 한계를 살펴보면 연료전지발전에 필요한 연료를 LNG 개질을 통해서만 한정할 것을 들 수 있다. 수소를 LNG 개질로 확보하지 않고 수전

해 설비를 이용하여 확보한다면 연료전지발전이 포함된 시나리오의 경제성이 LNG 개질 사례보다 낮아질 수 있다. 향후 연료전지 발전을 포함한 마이크로그리드 연구를 수행할 때 연료전지의 연료인 수소를 확보하는 방법을 다양화하여 분석을 진행한다면 본 연구의 한계를 보완할 수 있을 것이다.

민감도 분석에 가스가격 동향을 포함하지 않은 것도 아쉬운 점이다. 화석 에너지는 지정학적 혹은 국제정치경제적인 역학에 좌우되기 때문에 예측이 쉽지 않은 상황이다. 가스업계에서는 수요 증가로 2020년에 가스대란을 우려하고 있는 현실인 만큼 향후 연구에 가스가격 변동을 포함한다면 보다 현실성이 높은 연구가 될 수 있다.

연구 과정에서 시뮬레이션 결과에 큰 영향을 주는 것으로 ESS의 수명, 전력품질, 운영관리(O&M) 비용, 데이터의 일간 내지 시간별 변동성임을 알게 되었다. HOMER 분석의 정밀성을 높이기 위하여 이 분야를 다룬 연구가 보다 많이 진행되어야 할 것으로 분석된다.

이러한 한계에도 불구하고 계통연계형 산업용 마이크로그리드 연구는 전 세계적으로 초창기이기 때문에 본 연구가 가치있다고 평가해도 과언이 아니다. 이 분야의 연구가 천착된다면 우리나라 재생에너지 보급을 높일 수 있을 뿐만 아니라 수출 전략상품으로 계통연계형 산업용 마이크로그리드를 키워나갈 수 있을 것이라고 분석한다.

참고문헌

- 김동섭·이수홍(1996), “태양전지의 반사방지막,” 『한국결정성장학회지』, Vol.6(1), pp.98~106.
- 김동섭·남정규·최용우(2016), “국내 태양광 발전 기술/사업 동향 및 현안,” 『한국신재생에너지학회 학술대회논문집』, 광주 김대중컨벤션센터.
- 김동완(2014), “가파도 계통의 분산형 전원설비 개선 방안 연구,” 석사학위논문, 제주대학교, 제주.
- 김주화(2000), “온실효과에 관한 연구 동향,” 석사학위논문, 연세대학교, 원주.
- 김창섭(2018), “새 정부에서의 ‘에너지전환’ 에너지생태계에의 영향,” 이완근(Chairman), 『신성이엔지 마이크로그리드 심포지움』, 신성이엔지, 신성이엔지 본사 사옥.
- 김하나(2017), “에너지-물 상호의존성: 한국의 에너지원별 물 이용 집약도의 시사점,” 『환경정책』, 25(4), pp.213~239.
- 국가온실가스종합정보센터(2018), 『2018년 승인 국가 온실가스 배출·흡수계수』 세종, 환경부
Retrieved from <http://www.gir.go.kr/home/index.do?menuId=36>
- 노경섭(2017), 『제대로 알고 쓰는 논문 통계분석: SPSS & AMOS 21』, (7쇄), 서울: 한빛아카데미, 2018.

산업통상자원부(2017), 『제8차 전력수급계획』, 세종, 산업통상자원부.

산업통상자원부(2017), 『재생에너지 3020 이행계획(안)』, 세종, 산업통상자원부.

サント靖(2018), 신성이엔지譯, 『스마트그리드의 기본과 구조 에너지 산업의 현황과 과제, 미래를 전망하다 차세대 전력망』, 신성이엔지, 2014.

송일근(2018), “기후변화대응 가사도 MG 및 4차 전력산업,” 이완근(Chairman), 『신성이엔지 마이크로그리드 심포지움』, 신성이엔지, 신성이엔지, 신성이엔지 본사 사옥.

서형주(2018), “바이오중유산업의 환경·사회·경제성 효과 분석,” 박사학위논문, 세종대학교, 서울.

Sioshansi(2019), 김선교譯, 2019, 『에너지전환 전력산업의 미래,』(김선교譯),(2판), 서울: 이모션 미디어, 2016.

신용학(2018), “서울대 캠퍼스 마이크로그리드 구축 및 사례,” 이완근(Chairman), 『신성이엔지 마이크로그리드 심포지움』, 신성이엔지, 신성이엔지 본사 사옥.

안남성(2018), “미래 에너지산업에서의 권력의 이동,” 이완근(Chairman), 『신성이엔지 마이크로그리드 심포지움』, 신성이엔지, 신성이엔지 본사 사옥.

안종보(2018), “마이크로그리드 제어 및 보호 기술,” 이완근(Chairman), 『신성이엔지 마이크로그리드 심포지움』, 신성이엔지, 신성이엔지 본사 사옥.

안희민(2019), 기술정책 관점에서 바라본 발전용 연료전지 사업. 김연규(편), 『한국의 에너지전환: 관점과 쟁점』, (제1판, pp.375~415), 서울: 한울 아카데미.

안희민(2015년7월22일), “교황, 파리기후회의 온난화 해결방안 기대,” 에너지경제.

Retrieved from http://m.ekn.kr/section_view.html?no=149315#_enliple

_____ (2015년12월13일), “오늘은 역사적인 날…UNFCCC 파리협정서 채택,” 에너지경제.

Retrieved from <http://www.ekn.kr/news/article.html?no=188755>.

_____ (2018년4월5일), “미일독영 1인당 전력소비 줄어드는데 한국만 늘어,” 데일리한국.

Retrieved from

<http://daily.hankooki.com/lpage/economy/201804/dh20180405215304138060.htm>

안희영(2016), “미국의 넷미터링 논란과 제도 개선 추이,” 전기저널, 479, pp.24~33.

양의석·이서진·김아름 (2018), “2018년 세계 에너지수요 전망 분석,” 『세계 에너지시장 인사이트』, 제18-43호. pp.3~17, 에너지경제연구원.

엄지영, 김용기(2019), “HOMER를 이용한 PV 연계 가정용 ESS의 경제성 분석,” 『한국산학기술학회논문지』, 제20권 제2호 36~42pp.

여민주(2015), “에너지와 육류 소비에 의한 우리나라 환경 영향 추이와 예측,” 박사학위논문, 이화여자대학교, 서울.

에너지경제연구원(2019), 『2018 지역에너지 통계연보』, 울산, 에너지경제연구원.

오용(2011), “태양광/연료전지 하이브리드 시스템의 전기특성과 최적 운전
을 위한 경제성 평가에 관한 연구,” 박사학위논문, 동신대학교, 나주.

오용진·이연찬·임진택·최재석·윤용범·장병훈·조성민·정민수(2014), “몬테카를로
방법을 이용한 풍력발전기 및 ESS를 고려한 전력계통 신뢰도 평가,”
『대한전기학회 학술대회 논문집』, Vol.2014, No.7

오용진·이연찬·최재석·임진택(2016), “에너지저장장치와 결합한 WTG를 포함
하는 전력계통의 Capacity Credit 평가 및 ESS 적정규모 평가방안,”
『전기학회논문지』, Vol.65 No.6

横山明彦(2019), 신성이엔지譯, 『새로운 스마트그리드 전력자유화 시대의 네
트워크 비전, 일본전기협회 신문부, 2015.

우경태·김형태·이성우·김태현·신한솔·이창화·김욱(2016), “HOMER를 이용한
캠퍼스 마이크로그리드의 Peak shaving 효과 분석,” 대한전기학회
학술대회 논문집, pp.84~85.

윤용범(2018), “마이크로그리드 개념과 시장전망,” 이완근(Chairman), 『신
성이엔지 마이크로그리드 심포지움』, 신성이엔지, 신성이엔지 본사
사옥.

이명주 (2017), “한국형 제로에너지 공동주택의 최적화모형 연구,” 박사학
위논문, 세종대학교, 서울.

이병두·박대흠·정홍구, (2013), “HOMER를 이용한 오피스건물의 신재생에너
지 최적설계 적용성 검토,” 『대한설비공학회 학술대회발표논문집』.

- 이보배(2012), “전력수요 예측을 이용한 가파도 신재생에너지 발전설비 조성방안 연구,” 석사학위논문, 제주대학교, 제주.
- 이성호(2018), “에너지자립섬의 마이크로그리드 최적화 연구,” 정책학박사 학위논문, 세종대학교, 서울.
- 이원욱·안희민(2015), 『미래에너지백과사전』, 서울: KPBooks.
- 이일우(2018), “마이크로그리드 소프트웨어/통신 기술,” 『신성이엔지 마이크로그리드 심포지움』, 신성이엔지, 신성이엔지 본사 사옥.
- 이철용(2016), 『신재생에너지 공급인증서(REC) 가격 예측 방법론 개발 및 운용』, 서울: 에너지경제연구원.
- 이학주·채우규·정원욱·김주용(2010). “경제성평가 기반의 독립형 마이크로그리드 설계 프로그램 개발,” 『조명·전기설비학회논문지』 24권 10호.
- 임종환(2015), “신재생복합발전시스템의 각 구성품 교체비용변화에 따른 용량 및 경제성 민감도 분석,” 『대한기계학회 논문집』 8권 39(1)호,
- 장병철(2010), “공공투자사업 평가의 사회적 할인율 추정에 관한 연구,” 석사학위논문, 서울시립대학교, 서울.
- 장하나·김수덕(2006), “도서지역 신재생복합 전력시스템 보급 타당성 분석,” 『자원환경경제연구』 15권 4호.
- 전의찬·사재환·이성호·김찬규(2004), “고정배출원에서의 이산화탄소 배출계수 개발,” 『한국대기환경학회 학술대회논문집』

- 전의찬(2016), “대기환경 개선과 온실가스 감축을 고려한 화력발전 대안,” 『전기저널』, No.475, pp.48-52.
- 전력거래소 전력계획처(2017), 『상용자가발전업체조사 2016』, 나주: 전력거래소.
- 정민지(2016), “HOMER를 이용한 도서지역 에너지시스템 최적화 설계와 경제성 분석,” 공학석사논문, 서울과학기술대, 서울.
- 정부합동(2015), 『광복 70주년 전력산업성장추이』, 서울: 정부합동.
- 정태영(2011), “지능형 전력망 구축을 위한 마이크로그리드 시스템의 설계와 운용,” 공학박사학위논문, 경북대학교, 대구.
- 최영준(2010), “마이크로그리드 섬 운전 상황을 고려한 최적 설계 엔지니어링 기법에 대한 연구,” 박사학위논문, 명지대학교, 서울.
- 한국가스공사(2019), 『발전용 천연가스 요금,』 대구: 한국가스공사
Retrieved from <http://www.kogas.or.kr/portal/contents.do?key=2017>
- 한국에너지공단(2017), 『IEA, 전세계 재생에너지 보급현황 발표,』 용인: 한국에너지공단.
Retrieved from
http://www.energy.or.kr/web/kem_home_new/energy_issue/mail_vol68/pdf/issue_171_03_02.pdf
- 한국에너지공단(2018), 『신재생에너지센터의 보급통계 2017,』 울산: 한국에너지공단
- 한국전력공사(2019), 『2019년 1/4분기 주요사업 현황,』 나주: 한국전력공사.

한국전력공사(2019), 『신재생 및 LNG발전 전력구입계약 업무처리
지침,』 나주: 한국전력공사

한국전력공사(2019), 『한국전력통계,』 나주: 한국전력공사.

Retrieved from

[http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=310&tblId=TX_31002_A019&
vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=310_31002&seqNo=&lang_mode=ko&langua
ge=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE](http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=310&tblId=TX_31002_A019&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=310_31002&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE)

한기주(2007), “배출권 거래제도의 내용과 특성,” 『환경정보』,Vol.29
No.369, pp.17-21.

황민수(2017), “학교 부하패턴 기반의 PV 경제운전을 위한 ESS 적정 용량
산정 및 운영방안 연구,” 전기공학박사논문, 숭실대학교, 서울.

황우현·최태일·양충호·서정일·홍준희(2014), “스마트그리드 스테이션 기반의
스마트시티 구축 방안,” 『대한전기학회 학술대회 논문집』, 강원도 평
창군 용평리조트.

황우현·김주성·양충호·김기호·정혜진·이장무(2016), “스마트그리드 기반의 스
마트시티 모형과 구축 전략,” 『대한전기학회 학술대회 논문집』, 강원
도 평창군 용평리조트.

황우현·홍웅기·김동식·홍준희(2017), “스마트그리드 기술 기반의 제주
Carbon Free Island 구축 전략,” 『2017년도 대한전기학회 창립 70주년
기념 하계학술대회 논문집』, 부산 BEXCO.

Agora Energiewende(2015), 『Current and Future Cost of Photovoltaics:
Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and
LCOE of Utility Scale PV System』, Fraunhofer ISE.

- Beltran Hector, Endida Bilbao, Enrique Belenguer, Ion Etxeberria-Otadui, Pedro Rodriguez(2013), “Evaluation of Storage Energy Requierments for Constant Production in PV Power Plants,” *IEEE Transactions on industrial electronics*, Vol.60, No.3, pp.1225~1234.
- Beltran, Hector, Emilio Pérez, Néstor Aparicio and Pedro Rodriguez (2013), “Daily Solar Energy Estimation for Minimizing Energy Storage Requirements in PV Power Plannts,” *IEEE Transactions on sustatinable energy*, vol.4,No.2, April.
- Bendir, A., B. Ozpineci, and J. E. Chrisian(2010), 『The Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicle Interaction with Energy Storage and Solar Panels on the Grid for a Zero Energy House』 *IEEE*,
- Bifaretti, S., S. Cordiner, V. Mulone, V. Rocco, J.L. Rossi and F. Spagnolo (2017), “Grid-Connected Microgrids to Support Renewable Energy Sources Penetration,” *Energy Procedial* 105.
- Bitaraf, Hamideh(2018), “Microgrid for Commercial and Industrial (C&I) sites,” 『3rd International Hybrid Power Systems Workshop』, May 9th, Tenerife, Spain.
- Chang, Liuchen and Haibo Xu(2014). “Economic Analysis and Optimal Disign on Microgrids with SS-PVs for Industrial Applications,” 『2014 Tianjin Symposium on Microgrids』, Nov. pp.13~14.
- Clavier, Juan Géza Joós, and Steve Wong(2013), “Economic Assessment of the Remote Community Microgrid: PV-ESS-Diesel Study Case,” 『26th IEEE Canadian Conference of Electricl And Computer

Engineering(CCECE)』 .

Dan T. Ton and Merrill A. Smith(2010), “The U.S. Department of Energy’ s Microgrid Initiative,” *The Electricity Journal*, vol.25, Issue 8.

Datta, Manoj., Tomonoby Senjyu, Atsushi Yona, Toshihisa Funabashi, and Chul-Hwan Kim(2011), “A Frequency-Control Approach by Photovoltaic Generation in a PV-Diesel Hybrid Power System,” 『IEEE Transaction on energy conversion』 , vol.26, No.2, June.

Datta, Manoj and Tomonoby Senjyu(2013), “Fuzzy Control of Distributed PV inverters/Energy Storage Systems/Electric Vehicles for Frequency Regulation in a Large Power System,” *IEEE Transations on smart grid*, vol.4, NO.1, March.

De la Parra, I. J. Marcos, and M. García, and L. Marroyo(2015), “Control strategies to use the minimum energy storage requirement for PV power ramp-rate control,” *Solar Energy* 111, pp.332~343.

Desta and Alemayehu Addisu(2017), “Energy Supply and Demand Side Management in Industrial Microgrid Context,” Est École Doctorale. Université Paris, Paris.

Dockrill(2019.5.13), “It’ s Official: Atmospheric CO₂ just Exceeded 415 ppm for the first time in Human History,” Science alert.

Retrieved from

<https://www.sciencealert.com/it-s-official-atmospheric-co2-just-exceede-d-415-ppm-for-first-time-in-human-history>.

ElNozahy, M. S., Tarek K. Abdei-Galil and M.M.A. Salama(2015),

“Probabilistic ESS sizing and scheduling for improved integration of PHEVs and PV systems in residential distribution systems,” *Electric Power Systems Research* 125, pp.55~66.

Erdinc, Ozan, Nikolaos G. Paterakis, Iliana N. Pappi, Anastasios G. Bakirtzis, and João P.S. Catalão(2015), “A new perspective for sizing of distributed generation and energy storage for smart households under demand response,” *Applied Energy*, 143, pp.26~37.

Erdinc, Ozan, Nikolaos G. Paterakis, Tiago D. P. Mendes, Anastasios G. Bakirtzis and João P. S. Catalão(2015), “Smart household operation considering bi-directional EV and ESS utilization by real-time pricing-based DR,” *IEEE Transactions on smart grid*, vol., 6, no.3, May pp.1281~1291.

Elsied, Moataz, Amrane Oukaour, Hamid Gualous, Radwan Hassan(2015), “Energy management and optimization in microgrid system based on green energy,” *Energy* 84, pp.139~151.

Emura, Frank(2015), 『Hitachi’ s Smart Energy Activities: World Wide case studies』 , Tokyo, HITACHI.

Gaztañaga, Haizea, Joseba Landaluze, Ion Etxeberria, Asun Padrós, InIGO Berzaluce and David Cuesta(2013), 『Enhanced Experimental PV Plant Grid-Intergration with a MW Lithium-Ion Energy Storage System』 , IEEE.

Hatziargyriou, N, H. Asano, R, Iravani and C. Marnay(2007), “Microgrid: An Overview of Ongoing Research, Development, and Demonstration Projects,” *IEEE power & energy magazine*, July/August, pp.78~94.

Hanna, Ryan, Mohamed Ghonima, Jan Kleissl, George Tynan, and David G. Victor(2017), “Evaluating Business models for microgrids: Interactions of technology and policy,” *Energy Policy* 103, pp.47~63.

Hirsch, Adam, Yael Parag, and Josep Guerrero(2018), “Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues,” *Renewable and Sustainable Energy Review* 90, pp.401~411.

HOMER[®] ENERGY(2019), 『HOMER[®] Pro Vsesion 3.12.5 User Manual.』

IRENA(2015), 『THE POWER TO CHANGE, solar and wind cost reduction potential to 2025』 , Abudabi: IRENA.

IPCC(2014), 『CLIMATE CHANGE 2014 Synthesis Report』 , IPCC.

Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

_____(2018), 『Global Warming of 1.5°C Special Report』 , IPCC.

Retrieved from <https://www.ipcc.ch/sr15/>

Kaldellis, J.K.(2008), “Cost benefit analysis of a Photovoltaic-energy storage electrification solution for remote islands,” *Renewable Energy*, pp.1299~1311.

Kaldellis, J.K, D. Zafirakis, E.I. Kaldelli, and K. Kavadias,(2009), “Optimum sizing fo photovoltaic energy storage system for autonomous small islands,” *Electrical Power and Energy Systems* 32, pp.24~36.

Kaldunski, Ben(2014), “An Economic Analysis of Solar PV Microgrids: Are They a Cost-Effective Option for Solar Deployment in Madison?,” Report Prepared for WIDRC. University of Wisconsin-Madison, Nelson Institute for Environmental Stdudies.

Retrieved from

[https://www.wisconsindr.org/library/presentations/BKaldunski_WIDRC%20Microgrid%20Report%20\(10.10.14\).pdf](https://www.wisconsindr.org/library/presentations/BKaldunski_WIDRC%20Microgrid%20Report%20(10.10.14).pdf)

- Lamberti, Francesco, Vito Calderaro, Vincenzo Galdi and Giorgio Graditi (2016), “Massive data analysis to assess PV/ESS integration in residential unbalanced LV networks to support voltage profiles,” *Electric Power Systems Research* 143, pp.206~214.
- Lan, Hai, Shuli Wen, Ying-Yi Hong, David C. Yu and Lijun Zhang(2015), “Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system,” *Applied Energy* 158, pp.26~34.
- Li, Han et al.(2017), “Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables,” *Protection and Control fo Modern Power Systems*, pp.2~12.
- Ma, Li, Nian Liu, Jianhua Zhang, Wayes Tushar, Chau Yuen(2018) “Energy Management for Joint Operation of CHP and PV Prosumers Inside a Grid-Connected Microgrid: A Game Theoretic Approach,” *IEEE Transations on industrial informatics*, vol.12, NO.5, October, pp.1930~1942.
- Marcos, J, O. Storkël, L. Marroyo, M. Garcial and E. Lorenzo(2014), “Storage requirements for PV power ramp-rate control,” *Solar Energy* 99, pp.28~35.

- Mohammed, Omar Hazem, Yassine Amirat, Mohamed Benbouzid and Adel Elbast(2014), “Optimal Design of a PV/Fuel Cell Hybrid Power System for the City of Brest in France” , *IEEE ICGE*, pp.119~123.
- Hatziargyriou, Nikos. Hiroshi Asano, Reza Iravani and Chris Marnay (2007), “Microgrid,” *IEEE power & energy magazine*, July/August. pp.78~94.
- Nazir, R, H.D. Laksono, E. p. Waldi, E. Ekaputra, and P. Coveria(2014), “Renewable Energy Sources Optimization: A Micro-Grid Model Design,” *Energy Procedia* 52, pp.316~327.
- Paterakis, Nikolaos G., Ozan Erdinç, Anastasios G. Bakirtzis and João P.S, Catalão(2015), “Optimal Household Appliances Scheduling Under Day-Ahead Pricing and Load-Shaping Demand Respose Strategies,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol.11, no.6, December, pp.1509~1519.
- Pérez, Emilio, Hector Beltran, Néstor Aparicio and Pedro Rodriguez(2013), “Predictive Power Control for PV Plants With Energy Storage,” *IEEE Transactions on sustainable energy*, Vol.4, No.2, April.
- NY Prize(2015), 『Accessing the Benefits and Costs of Developing a Microgrid: Model User’ s Guide』 , IEC.
- Santos, Athila Quaresma, Zheng Ma, Casper Gellert Olsen and Bo Norregaard Jorgensen(2018), “Framework for Microgrid Design Using Social, Economic, and Technical Analysis,” *Energies*, 11.

- You, Shi, Yi Zong, Henrik W. Binder, Yu Cai, Jin Lin and Younghua Song (2014), “Optimal Dispatch of an Industrial Microgrid with a Mixed Portfolio of Distributed Energy Resources,” 『Proceedings of 7th International Conference on PV-Hybrids and Mini-Grids』, DTU Library. HA.
- Shrivastwa, Ritu, Ahmad Hably, Kaouthar Melizi, Seddik Bacha(2019), “Understanding Microgrids and Their Future Trends,” 『IEEE International Conference on Industrial Technology(ICIT 2019)』, 2 Melbourne, Australia.
- Testa, Antonio, Salvatore De Caro, Rosanna la Torre, T. Scimone(2010), “Optimal Design of Energy Storage Systems for Stand-Alone Hybrid Wind/PV Generators, Internation Symposium on Power Electronics,” 『Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion Conference (SPEEDAM 2010)』
- UNFCCC(2015), 『Paris Agreement』, UNFCCC.
Retrieved from
https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.
- Waters, Carlos(2018.5.9.), “This “duck curve” is solar energy’ s greatest challenge, “ Vox.
Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=YYLzss58CLs>
- Wouters, Carmen(2015), “Towards a regulatory framework for microgrids-The Singapore experience,” *Sustanalbe Cities and Society* 15, pp.22~32.

Xiaoling, Jin(2015), “Comprehensive benefits analysis and economic evaluation of microgrid,” *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. Vol.4, No.3, July, pp.255~260.

Zaheeruddin(2015), “Renewable energy management through microgrid central controller design: An approach to integrate solar, wind and biomass with battery,” *Energy Reports* 1, pp.156~163.

부 록

부록 차례

부록 1. 대상시설의 전기부하(주중).....	133
부록 2. 대상시설의 전기부하(주말).....	135
부록 3. HOMER 모형의 입력자료.....	137
부록 4. 대상시설의 경제성 및 기후환경 영향 분석.....	142
부록 5. 시나리오 별 경제성 분석.....	143
부록 6. [민감성 분석①]배출권 가격 톤당 1만5천원, 3만5천원.....	145
부록 7. [민감성 분석②]SMP+REC 가격 kWh당 243원, 143원.....	146
부록 8. [민감성 분석③]태양광 모듈 가격 W당 370원 185원.....	147
부록 9. 시나리오의 CO ₂ 배출량.....	148
부록 10. 시나리오의 CO ₂ 배출량과 분산발전 및 계통 비중.....	149

부록 1. 대상시설의 전기부하(주중)

	1월	2월	3월	4월	5월	6월
1시	5,195.85	4,918.32	5,160.45	3,759.22	3,553.00	2,426.94
2시	5,258.59	6,058.52	7,320.35	5,493.55	4,954.92	4,347.75
3시	5,340.84	5,983.17	7,213.08	5,496.48	4,937.89	4,361.43
4시	5,430.08	5,997.06	7,067.64	5,391.29	4,900.08	4,219.46
5시	5,456.72	5,582.16	6,843.53	5,440.63	4,888.76	4,172.92
6시	5,546.30	5,148.36	5,513.51	4,132.64	3,605.03	2,662.22
7시	5,693.86	5,277.80	5,423.47	3,736.02	3,328.78	2,220.42
8시	6,754.68	6,163.06	5,467.10	3,839.18	3,754.05	3,097.22
9시	7,575.13	7,237.36	5,513.08	3,769.71	3,479.71	3,657.40
10시	7,486.23	7,314.51	5,510.33	3,422.21	5,050.07	4,576.52
11시	6,964.17	5,174.46	3,546.60	1,732.23	3,401.07	3,480.54
12시	6,500.06	4,841.96	3,303.20	1,848.68	2,807.45	3,324.89
13시	5,904.12	5,364.03	4,293.14	2,889.19	2,829.15	2,559.53
14시	5,676.41	5,506.02	3,804.44	2,188.94	2,835.42	2,594.62
15시	5,415.48	5,328.93	3,467.28	2,172.87	3,315.36	2,859.85
16시	5,530.16	5,464.58	3,384.30	2,479.41	3,394.87	3,112.52
17시	5,986.47	5,632.92	3,841.77	2,705.49	3,359.04	3,327.10
18시	6,003.65	4,517.79	4,460.89	3,982.26	4,219.67	3,236.97
19시	6,183.10	4,880.70	4,739.74	3,997.21	4,849.33	3,362.23
20시	6,049.30	5,786.30	4,754.80	4,065.40	4,739.97	3,469.91
21시	5,944.61	5,724.04	5,311.28	3,739.36	4,397.70	2,345.24
22시	5,952.56	5,676.84	5,613.86	4,194.65	3,841.43	1,871.04
23시	6,096.50	5,709.12	5,474.48	4,036.93	3,485.84	1,672.33
24시	6,084.96	5,866.27	6,126.27	4,336.62	4,051.66	2,493.31

	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1시	2,546.51	3,012.86	1,836.48	1,309.05	1,168.64	1,555.85
2시	3,996.58	4,962.93	2,745.84	2,421.90	2,549.69	3,204.66
3시	4,035.68	4,997.21	2,662.12	2,036.5	2,121.30	3,130.06
4시	3,967.94	4,785.44	2,049.21	1,446.18	1,327.14	2,900.98
5시	3,818.10	4,490.37	1,847.02	1,337.59	1,271.20	2,132.32
6시	2,678.90	3,069.30	1,772.46	1,330.35	1,316.91	2,137.68
7시	2,464.83	3,004.04	1,758.34	1,318.01	1,491.46	2132.11
8시	3,756.57	3,919.04	3,047.17	2,552.53	4,654.82	5,074.49
9시	4,748.55	4,508.25	3,302.43	2,647.46	5,686.10	6,786.67
10시	5,236.31	4,846.47	3,228.08	2,254.98	4,527.99	5,035.79
11시	4,666.91	4,618.61	4,739.51	2,679.99	4,982.12	4,789.94
12시	4,661.62	4,748.37	4,754.11	2,432.42	3,840.05	3,560.02
13시	3,501.83	3,556.59	3,199.64	2,362.84	3,327.17	2,626.07
14시	4,069.02	4,051.89	2,783.88	2,143.19	2,704.31	2,784.71
15시	3,808.67	3,764.45	2,856.42	2,057.24	3,052.81	2,763.56
16시	3,840.64	3,743.11	3,108.27	2,495.14	3,536.61	3,068.61
17시	3,687.68	3,450.80	3,066.12	2,927.87	4,355.63	4,014.87
18시	4,513.47	4,854.64	3,375.04	2,473.90	3,819.82	3,284.97
19시	4,853.72	5,425.25	3,810.99	1,904.94	2,835.76	2431.93
20시	5,024.25	5481.10	3,951.85	1,764.93	2,760.40	2,062.79
21시	3,657.92	3,851.06	2,133.37	1,406.83	2,011.24	1,554.61
22시	3,038.42	3,142.02	1,208.18	1,193.25	1,475.60	1,367.50
23시	2,784.85	3,164.59	1,223.27	1,186.49	1,347.33	1,389.15
24시	2,723.98	3,032.69	1,751.84	1,235.22	1,200.47	1,292.96

부록 2. 대상시설의 전기부하(주말)

	1월	2월	3월	4월	5월	6월
1시	1,115.02	1,795.37	1,688.59	1,552.25	942.31	600.51
2시	1,129.26	2,140.66	2,256.57	2,386.91	1,633.77	1,170.76
3시	1,129.78	2,175.89	2,230.39	2,409.01	1,623.70	1,115.15
4시	1,144.78	2,061.18	2,240.98	2,354.41	1,596.19	1,077.55
5시	1,131.01	1,799.56	2,109.25	2,375.19	1,574.02	1,065.80
6시	1,131.33	1,646.32	1,601.23	1,601.20	989.29	622.66
7시	1,153.86	1,670.75	1,482.29	1,274.51	816.59	499.16
8시	1,082.74	1,416.18	1,134.24	943.35	624.60	312.42
9시	796.81	1,169.57	913.32	673.84	481.11	217.18
10시	672.06	1004.40	813.60	580.44	639.82	242.35
11시	564.82	659.19	532.11	491.78	542.76	167.97
12시	453.41	631.01	511.10	562.56	365.81	157.29
13시	437.03	781.37	573.85	485.13	334.60	172.07
14시	394.50	875.97	560.40	491.67	334.80	115.98
15시	446.55	875.16	583.82	532.37	359.61	146.83
16시	457.04	881.66	606.68	588.90	437.45	166.39
17시	488.35	901.10	684.58	635.02	404.57	133.20
18시	581.02	677.84	599.60	450.79	257.40	230.77
19시	633.78	602.54	514.06	419.87	267.19	295.73
20시	708.98	728.40	488.99	351.97	248.27	364.22
21시	719.36	701.76	579.75	404.20	261.13	394.55
22시	714.53	703.62	609.70	573.88	367.68	428.40
23시	648.97	710.96	608.73	691.50	395.74	379.57
24시	617.99	734.36	692.14	737.38	470.53	416.59

	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1시	855.30	963.57	731.82	411.26	531.14	499.27
2시	1,243.70	1,536.71	1,034.14	689.29	902.87	891.28
3시	1,264.54	1,542.22	1,056.24	612.07	793.57	899.01
4시	1,253.39	1,531.24	936.82	431.03	617.41	826.89
5시	1,215.68	1,431.35	846.68	408.00	512.29	675.74
6시	886.05	941.26	795.81	406.06	501.98	608.09
7시	831.66	885.64	780.35	386.60	448.57	592.09
8시	975.10	817.56	859.92	304.60	469.68	583.66
9시	1,214.40	958.20	871.63	262.54	412.25	602.91
10시	1,340.25	911.25	777.88	286.84	309.39	512.04
11시	1,259.85	827.05	901.73	245.37	216.03	426.37
12시	1,246.92	847.46	888.61	258.62	73.77	309.10
13시	1,133.02	611.88	771.99	259.40	78.10	235.83
14시	1,240.17	548.36	692.09	256.32	40.39	135.47
15시	1,134.06	559.06	696.60	266.45	61.16	131.74
16시	944.49	574.89	818.26	350.65	120.28	195.86
17시	914.59	491.45	859.76	401.55	175.39	376.25
18시	662.13	694.90	719.60	526.73	295.03	728.00
19시	664.70	681.66	636.22	431.93	310.00	892.91
20시	694.76	790.59	655.46	411.68	320.89	835.43
21시	675.95	838.29	676.93	404.10	313.66	785.51
22시	671.24	903.14	692.36	401.11	312.64	782.52
23시	728.42	841.81	706.44	408.88	320.53	785.31
24시	772.06	837.53	738.62	383.41	303.14	714.45

부록 3. HOMER 모형의 입력자료

구분	입력자료																								
전력부하	<ul style="list-style-type: none"> 하루평균전력량(scaled) 23,977.64kWh/day, 평균전력 999.07kW, 피크전력 4,442.9kW 																								
시뮬레이션 조건	<ul style="list-style-type: none"> 명목 할인율 입력수치: 5.5%, 기대물가상승률:2%, 프로젝트 수명: 25년, 시스템 고정자본비용: 80,000달러, 배출부담금: 톤당 15,000원(12.98달러), 톤당 25,000원(21.28달러), 톤당 35,000원(30.28달러) 여유전력: 정상전력 10%, 피크전력 10%, 태양광변동성 20%. 																								
일사량	<ul style="list-style-type: none"> NASA 데이터 : Scaled 연평균 4.06kWh/m²/day 																								
태양광	<ul style="list-style-type: none"> (230kW기준) ① 자본 \$10,271.00, 대수선비 \$51,380.00 ② 자본 \$73,600.00, 대수선비 \$36,800.00 ③ 자본 \$36,800.00, 대수선비 \$18,400.00 운영유지비 20.00달러, 수명 25년, Derating Factor 100% Electrical Bus: 직류(DC), MPPT (230kW기준): 자본 55.20달러, 대수선비 55.20달러, 운영관리비 5.50달러, 수명 15년, 370kW설치 지면 반사율 20% 																								
배터리	<ul style="list-style-type: none"> (500kW기준) 자본 176,366.00달러, 대수선비 88,183.00달러 유지보수비 846.40달러, 수명 5년, throughput 547,500kWh 초기충전상태: 100%, 최소충전상태 20% 																								
시스템 컨버터	<ul style="list-style-type: none"> (250kW기준) 자본 24,623.50달러, 대수선비 2,000달러, 유지보수비 211.60달러 인버터: 수명 10년. 효율 98%, 정류기: 상대용량 97%, 효율 97% 																								
계통	<ul style="list-style-type: none"> (parameter) simulate systems with without the grid Net purchases calculated monthly, 거리: 0.45km Grid capital cost: 82,600.00달러, 분산발전비용: 연결비 114,153달러, 대기료 54,401.00달러/yr 구매용량 : A공장의 월별 전력구매량 <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>월</th> <th>1월</th> <th>2월</th> <th>3월</th> <th>4월</th> <th>5월</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>용량</td> <td>162,382.8</td> <td>166,612.1</td> <td>154,867.6</td> <td>119,444.3</td> <td>131,330.2</td> </tr> <tr> <th>월</th> <th>7월</th> <th>8월</th> <th>9월</th> <th>10월</th> <th>11월</th> </tr> <tr> <td>용량</td> <td>138,932.4</td> <td>146,640.2</td> <td>117,391.6</td> <td>72,231.29</td> <td>92,376.73</td> </tr> </tbody> </table>	월	1월	2월	3월	4월	5월	용량	162,382.8	166,612.1	154,867.6	119,444.3	131,330.2	월	7월	8월	9월	10월	11월	용량	138,932.4	146,640.2	117,391.6	72,231.29	92,376.73
월	1월	2월	3월	4월	5월																				
용량	162,382.8	166,612.1	154,867.6	119,444.3	131,330.2																				
월	7월	8월	9월	10월	11월																				
용량	138,932.4	146,640.2	117,391.6	72,231.29	92,376.73																				

(다음 페이지에 계속)

(앞페이지에서부터 계속)

구분	입력																																																																																																																																
계통	<p>○ (Rate Definition)</p> <p>2018년 SMP+REC×가중치1</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rate1</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.17</td> <td>Rate7</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.16</td> </tr> <tr> <td>Rate2</td> <td>0.17</td> <td>Rate8</td> <td>0.16</td> </tr> <tr> <td>Rate3</td> <td>0.17</td> <td>Rate9</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>Rate4</td> <td>0.17</td> <td>Rate10</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>Rate5</td> <td>0.16</td> <td>Rate11</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>Rate6</td> <td>0.16</td> <td>Rate12</td> <td>0.16</td> </tr> </tbody> </table> <p>2018년 SMP+REC×가중치1.5 (태양광발전)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rate1</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.22</td> <td>Rate7</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>Rate2</td> <td>0.21</td> <td>Rate8</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>Rate3</td> <td>0.21</td> <td>Rate9</td> <td>0.19</td> </tr> <tr> <td>Rate4</td> <td>0.21</td> <td>Rate10</td> <td>0.19</td> </tr> <tr> <td>Rate5</td> <td>0.21</td> <td>Rate11</td> <td>0.18</td> </tr> <tr> <td>Rate6</td> <td>0.21</td> <td>Rate12</td> <td>0.18</td> </tr> </tbody> </table> <p>2018년 SMP+REC×가중치2.0 (연료전지발전)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rate1</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.26</td> <td>Rate7</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>Rate2</td> <td>0.26</td> <td>Rate8</td> <td>0.24</td> </tr> <tr> <td>Rate3</td> <td>0.25</td> <td>Rate9</td> <td>0.23</td> </tr> <tr> <td>Rate4</td> <td>0.26</td> <td>Rate10</td> <td>0.22</td> </tr> <tr> <td>Rate5</td> <td>0.26</td> <td>Rate11</td> <td>0.21</td> </tr> <tr> <td>Rate6</td> <td>0.25</td> <td>Rate12</td> <td>0.22</td> </tr> </tbody> </table> <p>2018년 SMP+REC×가중치1.5와 2.0의 평균(PV+FC 융합설비)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rate1</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.24</td> <td>Rate7</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.23</td> </tr> <tr> <td>Rate2</td> <td>0.24</td> <td>Rate8</td> <td>0.22</td> </tr> <tr> <td>Rate3</td> <td>0.23</td> <td>Rate9</td> <td>0.21</td> </tr> <tr> <td>Rate4</td> <td>0.24</td> <td>Rate10</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>Rate5</td> <td>0.23</td> <td>Rate11</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>Rate6</td> <td>0.23</td> <td>Rate12</td> <td>0.21</td> </tr> </tbody> </table>	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값	Rate1	0.46	0.17	Rate7	0.46	0.16	Rate2	0.17	Rate8	0.16	Rate3	0.17	Rate9	0.15	Rate4	0.17	Rate10	0.15	Rate5	0.16	Rate11	0.15	Rate6	0.16	Rate12	0.16	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값	Rate1	0.46	0.22	Rate7	0.46	0.20	Rate2	0.21	Rate8	0.20	Rate3	0.21	Rate9	0.19	Rate4	0.21	Rate10	0.19	Rate5	0.21	Rate11	0.18	Rate6	0.21	Rate12	0.18	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값	Rate1	0.46	0.26	Rate7	0.46	0.25	Rate2	0.26	Rate8	0.24	Rate3	0.25	Rate9	0.23	Rate4	0.26	Rate10	0.22	Rate5	0.26	Rate11	0.21	Rate6	0.25	Rate12	0.22	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값	Rate1	0.46	0.24	Rate7	0.46	0.23	Rate2	0.24	Rate8	0.22	Rate3	0.23	Rate9	0.21	Rate4	0.24	Rate10	0.20	Rate5	0.23	Rate11	0.20	Rate6	0.23	Rate12	0.21
	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값																																																																																																																											
	Rate1	0.46	0.17	Rate7	0.46	0.16																																																																																																																											
	Rate2		0.17	Rate8		0.16																																																																																																																											
	Rate3		0.17	Rate9		0.15																																																																																																																											
	Rate4		0.17	Rate10		0.15																																																																																																																											
	Rate5		0.16	Rate11		0.15																																																																																																																											
	Rate6		0.16	Rate12		0.16																																																																																																																											
	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값																																																																																																																											
	Rate1	0.46	0.22	Rate7	0.46	0.20																																																																																																																											
Rate2	0.21		Rate8	0.20																																																																																																																													
Rate3	0.21		Rate9	0.19																																																																																																																													
Rate4	0.21		Rate10	0.19																																																																																																																													
Rate5	0.21		Rate11	0.18																																																																																																																													
Rate6	0.21		Rate12	0.18																																																																																																																													
\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값																																																																																																																												
Rate1	0.46	0.26	Rate7	0.46	0.25																																																																																																																												
Rate2		0.26	Rate8		0.24																																																																																																																												
Rate3		0.25	Rate9		0.23																																																																																																																												
Rate4		0.26	Rate10		0.22																																																																																																																												
Rate5		0.26	Rate11		0.21																																																																																																																												
Rate6		0.25	Rate12		0.22																																																																																																																												
\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값																																																																																																																												
Rate1	0.46	0.24	Rate7	0.46	0.23																																																																																																																												
Rate2		0.24	Rate8		0.22																																																																																																																												
Rate3		0.23	Rate9		0.21																																																																																																																												
Rate4		0.24	Rate10		0.20																																																																																																																												
Rate5		0.23	Rate11		0.20																																																																																																																												
Rate6		0.23	Rate12		0.21																																																																																																																												

(다음 페이지에 계속)

(앞페이지에서부터 계속)

구분	입력																																																																																																																																
계통	<p>○ (Rate Definition)</p> <p>2018년 SMP+(REC-50원)×가중치1</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rate1</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.13</td> <td>Rate7</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.12</td> </tr> <tr> <td>Rate2</td> <td>0.13</td> <td>Rate8</td> <td>0.12</td> </tr> <tr> <td>Rate3</td> <td>0.13</td> <td>Rate9</td> <td>0.11</td> </tr> <tr> <td>Rate4</td> <td>0.13</td> <td>Rate10</td> <td>0.11</td> </tr> <tr> <td>Rate5</td> <td>0.12</td> <td>Rate11</td> <td>0.11</td> </tr> <tr> <td>Rate6</td> <td>0.12</td> <td>Rate12</td> <td>0.12</td> </tr> </tbody> </table> <p>2018년 SMP+(REC-50원)×가중치1.5 (태양광발전)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rate1</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.15</td> <td>Rate7</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.14</td> </tr> <tr> <td>Rate2</td> <td>0.15</td> <td>Rate8</td> <td>0.14</td> </tr> <tr> <td>Rate3</td> <td>0.15</td> <td>Rate9</td> <td>0.13</td> </tr> <tr> <td>Rate4</td> <td>0.15</td> <td>Rate10</td> <td>0.12</td> </tr> <tr> <td>Rate5</td> <td>0.15</td> <td>Rate11</td> <td>0.12</td> </tr> <tr> <td>Rate6</td> <td>0.15</td> <td>Rate12</td> <td>0.13</td> </tr> </tbody> </table> <p>2018년 SMP+(REC-50원)×가중치2.0 (연료전지발전)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rate1</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.18</td> <td>Rate7</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.16</td> </tr> <tr> <td>Rate2</td> <td>0.18</td> <td>Rate8</td> <td>0.16</td> </tr> <tr> <td>Rate3</td> <td>0.17</td> <td>Rate9</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>Rate4</td> <td>0.17</td> <td>Rate10</td> <td>0.14</td> </tr> <tr> <td>Rate5</td> <td>0.17</td> <td>Rate11</td> <td>0.13</td> </tr> <tr> <td>Rate6</td> <td>0.17</td> <td>Rate12</td> <td>0.14</td> </tr> </tbody> </table> <p>2018년 SMP+(REC-50원)×가중치1.5와 2.0의 평균(PV+FC 융합설비)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rate1</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.17</td> <td>Rate7</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>Rate2</td> <td>0.17</td> <td>Rate8</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>Rate3</td> <td>0.16</td> <td>Rate9</td> <td>0.14</td> </tr> <tr> <td>Rate4</td> <td>0.16</td> <td>Rate10</td> <td>0.13</td> </tr> <tr> <td>Rate5</td> <td>0.16</td> <td>Rate11</td> <td>0.13</td> </tr> <tr> <td>Rate6</td> <td>0.16</td> <td>Rate12</td> <td>0.13</td> </tr> </tbody> </table>	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값	Rate1	0.46	0.13	Rate7	0.46	0.12	Rate2	0.13	Rate8	0.12	Rate3	0.13	Rate9	0.11	Rate4	0.13	Rate10	0.11	Rate5	0.12	Rate11	0.11	Rate6	0.12	Rate12	0.12	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값	Rate1	0.46	0.15	Rate7	0.46	0.14	Rate2	0.15	Rate8	0.14	Rate3	0.15	Rate9	0.13	Rate4	0.15	Rate10	0.12	Rate5	0.15	Rate11	0.12	Rate6	0.15	Rate12	0.13	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값	Rate1	0.46	0.18	Rate7	0.46	0.16	Rate2	0.18	Rate8	0.16	Rate3	0.17	Rate9	0.15	Rate4	0.17	Rate10	0.14	Rate5	0.17	Rate11	0.13	Rate6	0.17	Rate12	0.14	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값	Rate1	0.46	0.17	Rate7	0.46	0.15	Rate2	0.17	Rate8	0.15	Rate3	0.16	Rate9	0.14	Rate4	0.16	Rate10	0.13	Rate5	0.16	Rate11	0.13	Rate6	0.16	Rate12	0.13
	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값																																																																																																																											
	Rate1	0.46	0.13	Rate7	0.46	0.12																																																																																																																											
	Rate2		0.13	Rate8		0.12																																																																																																																											
	Rate3		0.13	Rate9		0.11																																																																																																																											
	Rate4		0.13	Rate10		0.11																																																																																																																											
	Rate5		0.12	Rate11		0.11																																																																																																																											
	Rate6		0.12	Rate12		0.12																																																																																																																											
	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값																																																																																																																											
	Rate1	0.46	0.15	Rate7	0.46	0.14																																																																																																																											
Rate2	0.15		Rate8	0.14																																																																																																																													
Rate3	0.15		Rate9	0.13																																																																																																																													
Rate4	0.15		Rate10	0.12																																																																																																																													
Rate5	0.15		Rate11	0.12																																																																																																																													
Rate6	0.15		Rate12	0.13																																																																																																																													
\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값																																																																																																																												
Rate1	0.46	0.18	Rate7	0.46	0.16																																																																																																																												
Rate2		0.18	Rate8		0.16																																																																																																																												
Rate3		0.17	Rate9		0.15																																																																																																																												
Rate4		0.17	Rate10		0.14																																																																																																																												
Rate5		0.17	Rate11		0.13																																																																																																																												
Rate6		0.17	Rate12		0.14																																																																																																																												
\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값																																																																																																																												
Rate1	0.46	0.17	Rate7	0.46	0.15																																																																																																																												
Rate2		0.17	Rate8		0.15																																																																																																																												
Rate3		0.16	Rate9		0.14																																																																																																																												
Rate4		0.16	Rate10		0.13																																																																																																																												
Rate5		0.16	Rate11		0.13																																																																																																																												
Rate6		0.16	Rate12		0.13																																																																																																																												

(다음 페이지에 계속)

(앞페이지에서부터 계속)

구분	입력																																
계통	○ (Rate Definition) 2018년 SMP+(REC+50원)×가중치1																																
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rate1</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.21</td> <td>Rate7</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>Rate2</td> <td>0.21</td> <td>Rate8</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>Rate3</td> <td>0.21</td> <td>Rate9</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>Rate4</td> <td>0.21</td> <td>Rate10</td> <td>0.19</td> </tr> <tr> <td>Rate5</td> <td>0.21</td> <td>Rate11</td> <td>0.19</td> </tr> <tr> <td>Rate6</td> <td>0.21</td> <td>Rate12</td> <td>0.20</td> </tr> </tbody> </table>	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값	Rate1	0.46	0.21	Rate7	0.46	0.20	Rate2	0.21	Rate8	0.20	Rate3	0.21	Rate9	0.20	Rate4	0.21	Rate10	0.19	Rate5	0.21	Rate11	0.19	Rate6	0.21	Rate12	0.20
	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값																											
	Rate1	0.46	0.21	Rate7	0.46	0.20																											
	Rate2		0.21	Rate8		0.20																											
	Rate3		0.21	Rate9		0.20																											
	Rate4		0.21	Rate10		0.19																											
	Rate5		0.21	Rate11		0.19																											
	Rate6		0.21	Rate12		0.20																											
	2018년 SMP+(REC+50원)×가중치1.5 (태양광발전)																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rate1</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.28</td> <td>Rate7</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.27</td> </tr> <tr> <td>Rate2</td> <td>0.28</td> <td>Rate8</td> <td>0.26</td> </tr> <tr> <td>Rate3</td> <td>0.28</td> <td>Rate9</td> <td>0.26</td> </tr> <tr> <td>Rate4</td> <td>0.28</td> <td>Rate10</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>Rate5</td> <td>0.28</td> <td>Rate11</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>Rate6</td> <td>0.27</td> <td>Rate12</td> <td>0.25</td> </tr> </tbody> </table>	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값	Rate1	0.46	0.28	Rate7	0.46	0.27	Rate2	0.28	Rate8	0.26	Rate3	0.28	Rate9	0.26	Rate4	0.28	Rate10	0.25	Rate5	0.28	Rate11	0.25	Rate6	0.27	Rate12	0.25	
\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값																												
Rate1	0.46	0.28	Rate7	0.46	0.27																												
Rate2		0.28	Rate8		0.26																												
Rate3		0.28	Rate9		0.26																												
Rate4		0.28	Rate10		0.25																												
Rate5		0.28	Rate11		0.25																												
Rate6		0.27	Rate12		0.25																												
2018년 SMP+(REC+50원)×가중치2.0 (연료전지발전)																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rate1</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.35</td> <td>Rate7</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.33</td> </tr> <tr> <td>Rate2</td> <td>0.35</td> <td>Rate8</td> <td>0.32</td> </tr> <tr> <td>Rate3</td> <td>0.34</td> <td>Rate9</td> <td>0.32</td> </tr> <tr> <td>Rate4</td> <td>0.34</td> <td>Rate10</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>Rate5</td> <td>0.34</td> <td>Rate11</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>Rate6</td> <td>0.34</td> <td>Rate12</td> <td>0.31</td> </tr> </tbody> </table>	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값	Rate1	0.46	0.35	Rate7	0.46	0.33	Rate2	0.35	Rate8	0.32	Rate3	0.34	Rate9	0.32	Rate4	0.34	Rate10	0.30	Rate5	0.34	Rate11	0.30	Rate6	0.34	Rate12	0.31	
\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값																												
Rate1	0.46	0.35	Rate7	0.46	0.33																												
Rate2		0.35	Rate8		0.32																												
Rate3		0.34	Rate9		0.32																												
Rate4		0.34	Rate10		0.30																												
Rate5		0.34	Rate11		0.30																												
Rate6		0.34	Rate12		0.31																												
2018년 SMP+(REC+50원)×가중치1.5와 2.0의 평균(PV+FC 융합설비)																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> <th>\$/kWh</th> <th>가격</th> <th>되파는값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rate1</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.31</td> <td>Rate7</td> <td rowspan="6">0.46</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>Rate2</td> <td>0.31</td> <td>Rate8</td> <td>0.29</td> </tr> <tr> <td>Rate3</td> <td>0.31</td> <td>Rate9</td> <td>0.29</td> </tr> <tr> <td>Rate4</td> <td>0.31</td> <td>Rate10</td> <td>0.28</td> </tr> <tr> <td>Rate5</td> <td>0.31</td> <td>Rate11</td> <td>0.27</td> </tr> <tr> <td>Rate6</td> <td>0.31</td> <td>Rate12</td> <td>0.28</td> </tr> </tbody> </table>	\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값	Rate1	0.46	0.31	Rate7	0.46	0.30	Rate2	0.31	Rate8	0.29	Rate3	0.31	Rate9	0.29	Rate4	0.31	Rate10	0.28	Rate5	0.31	Rate11	0.27	Rate6	0.31	Rate12	0.28	
\$/kWh	가격	되파는값	\$/kWh	가격	되파는값																												
Rate1	0.46	0.31	Rate7	0.46	0.30																												
Rate2		0.31	Rate8		0.29																												
Rate3		0.31	Rate9		0.29																												
Rate4		0.31	Rate10		0.28																												
Rate5		0.31	Rate11		0.27																												
Rate6		0.31	Rate12		0.28																												

(다음 페이지에 계속)

(앞페이지에서부터 계속)

구분	입력자료																
계통	○ (Demand Rates)																
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>\$/kW/mo</th> <th>수요</th> <th>\$/kW/mo</th> <th>수요</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>수요1</td> <td>0.06</td> <td>수요4</td> <td>0.07</td> </tr> <tr> <td>수요2</td> <td>0.05</td> <td>수요5</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>수요3</td> <td>0.1</td> <td>수요6</td> <td>0.17</td> </tr> </tbody> </table>	\$/kW/mo	수요	\$/kW/mo	수요	수요1	0.06	수요4	0.07	수요2	0.05	수요5	0.15	수요3	0.1	수요6	0.17
	\$/kW/mo	수요	\$/kW/mo	수요													
	수요1	0.06	수요4	0.07													
수요2	0.05	수요5	0.15														
수요3	0.1	수요6	0.17														
○ (Reliability) 평균정전빈도: 0.14건/yr, 평균소리시간 0.15시간 수리시간변동성 0%																	
○ (Emission) CO ₂ 456.70g/kWh																	
연료전지	○ (250kW기준) 자본 750,000달러, 대수선비 625,000달러, 운영관리비 5,000달러/op.hour, 수명 50,000시간																
LNG	○ 발전용 천연가스 가격: 2018년 일반발전사업자용 \$0.51/Nm ³																

부록 4. 대상시설의 경제성 및 기후환경 영향 분석

대상시설				A공장			
태양광	용량		kW	230			
	자본/총액		\$	102,761.00	103,916.92		
배터리	용량		kWh	500			
	자본/총액		\$	176,366.00	425,916.92		
시스템 컨버터	용량		kW	208			
	자본/총액		\$	20,514.45	40,234.24		
계통	자본/총액		\$	51,323.00	65,554,566.66		
전시스템	자본/총액		\$	1,151,053.25	68,287,962.05		
NPC			\$	68.3×10^6			
LCOE			\$	0.469			
운영비용			\$/yr	4.04×10^6			
초기자본			\$	1.15×10^6			
재생에너지 비중			%	3.62			
ROI / IRR			%	97.30	106.10×10^6		
탄소배출량 (CO ₂)			kg/yr	3,859,803.00			
생산	태양광		kWh/y	%	324,097.00	3.69	
	계통구매				8,451,507.00	96.3	
소비	AC부하	양	비중	kWh/yr	%	8,751,171.00	99.80
	매전					18,038.00	0.206
과잉전력을			kWh	%	223.00	0.0025	
미충족 부하					668.00	0.0076	
용량 부족					1,215.00	0.0139	
한전 구입 판매 전력	구입에너지		kWh	8,451,507.00			
	판매에너지		kWh	18,038.00			
	순구입에너지		kWh	8,433,469.00			
	피크수요		kW	4,443.00			
	에너지요금		\$	3,879,395.88			
			\$/yr	155,175.83			
	수요 요금		\$	11,004.53			
\$/yr			440.18				

부록 5. 시나리오 별 경제성 분석

시나리오			시나리오 1(ESS 단독)		시나리오 2(PV발전 추가)				
태양광	용량	kW	-		2,959				
	자본/총액	\$	-	-	1,322,246.06	1,326,519.25			
연료 전지	용량	kW	-		-				
	자본/총액	\$	-	-	-	-			
배터리	용량	kWh	100.00		100.00				
	자본/총액	\$	35,273.20	85,183.38	35,273.20	85,183.38			
시스템 컨버터	용량	kW	17.40		379.00				
	자본/총액	\$	1,709.54	3,352.85	37,372.48	73,297.28			
계통	자본/총액	\$	51,323.00	67,983,008.45	51,323.00	57,849,641.17			
전시스템	자본/총액	\$	888,305.74	70,283,747.03	2,246,303.55	61,363,677.00			
NPC		\$	70.30M		61.4 × 10 ⁶				
LCOE		\$	0.484		0.413				
운영비용		\$/yr	4.18M		3.56 × 10 ⁶				
초기자본		\$	888,306		2.25 × 10 ⁶				
재생에너지 비중		%	0.000850		14.80				
ROI / IRR		%	-116.4	n/a	35.90	40.00			
탄소배출량 (CO ₂)		kg/yr	3,996,572.00		3,477,423.00				
생산	태양광	kWh / y	%	0.00	0.00	1,352,402.00	15.10		
	FC			-	-	-	-		
	계통구매			8,750,979.00	100	7,614,240.00	84.90		
연료 소모				-		-			
연료 비용		\$/yr		-		-			
소비	AC부하	양	비중	kWh / yr	%	8,751,053.00	100	8,751,298.00	99.00
	매전			0.00	0.00	89,286	1.01		
과잉전력을		kWh	%	0.00	0.00	0.00	0.00		
미충족 부하				786.00	0.009	541.00	0.00620		
용량 부족				786.00	0.009	1,113.00	0.0127		
한전구입관매전력	구입에너지	kWh	8,750,979.00		7,614,240.00				
	판매에너지	kWh	0.00		188,252.00				
	순구입에너지	kWh	8,750,979.00		7,425,988.00				
	피크수요	kW	4,443.00		4,443.00				
	에너지요금		\$	4,025,450.26		3,415,954.34			
			\$/yr	161,018.01		136,638.17			
수요 요금		\$	11,198.18		10,432.39				
		\$/yr	447.93		417.30				

시나리오				시나리오 3(FC발전 추가)		시나리오 4 (PV발전·FC발전 추가)	
태양광	용량	kW		-		3,292	
	자본/총액	\$		-	-	1,470,651.36	1,475,404.15
연료 전지	용량	kW		250.00		250.00	
	자본/총액	\$		750,000.00	6,753,903.49	750,000.00	6,786,049.50
배터리	용량	kWh		200.00		100.00	
	자본/총액	\$		70,546.40	170,366.77	35,273.20	85,183.38
시스템 컨버터	용량	kW		243.00		64900	
	자본/총액	\$		23,933.53	46,939.95	63,887.40	125,300.00
계통	자본/총액	\$		51,323.00	51,710,271.31	51,323.00	41,292,818.17
전시스템	자본/총액	\$		1,695,802.93	60,891,097.78	3,171,223.76	51,820,895.98
NPC		\$		60.9 × 10 ⁶		51.80 × 10 ⁶	
LCOE		\$		0.411		0.335	
운영비용		\$/yr		3.56 × 10 ⁶		2.93 × 10 ⁶	
초기자본		\$		1.7 × 10 ⁶		3.17 × 10 ⁶	
재생에너지 비중		%		0.00		14.00	
ROI / IRR		%		60.90	73.30	37.60	41.60
탄소배출량(CO ₂)		kg/yr		3,989,253.00		3,554,131.00	
생산	태양광	kWh /y	%	-	-	1,372,319.00	14.60
	FC			2,171,924.00	24.20	2,190,000	23.30
	계통구매			6,797,033.00	75.80	5,828,152.00	62.10
연료 소모				456.104 m ³	1,250 m ³ /day	459,900 m ³	1,260 m ³ /day
				52.1 m ³ /hour		52.5 m ³ /hour	
연료 비용		\$/yr		232,613		234,549	
소비	AC부하	양	비중	kWh /yr	%	8,751,296.00	98.00
	매전					174,372.00	1.95
과잉전력율				0.00	0.00	0.00	0.00
미충족 부하		kWh		543.00	0.0062	178.00	0.002
용량 부족				1,066.00	0.0122	774.00	0.0088
한전 구입 판매 전력	구입에너지	kWh		6,797,033.00		5,828,152.00	
	판매에너지	kWh		174,372.00		567,638.00	
	순구입에너지	kWh		6,622,622.00		5,260,513.00	
	피크수요	kW		4,200.00		4,198.00	
	에너지요금	\$		3,046,424.44		2,419,836.15	
		\$/yr		121,856.98		96,793.44	
수요 요금	\$		10,231.07		9,449.14		
	\$/yr		409.24		377.97		

부록 6. [민감성 분석①] 배출권 가격 톤당 1만5천원, 3만5천원

배출권 가격 민감도 분석 결과				배출권 1만5000원 SMP+REC 2018년 193원 GRID+LIB+PV+FC (LF)		배출권 3만5000원 SMP+REC2018년 193원 GRID+LIB+PV+FC	
태양광	용량	kW	3,025		3,292		
	자본/총액	\$	1,351,641.46	1,356,009.64	1,470,651.36	1,475,404.15	
연료 전지	용량	kW	250		250		
	자본/총액	\$	750,000.00	6,786,049.50	750,000.00	6,786,049.50	
배터리	용량	kWh	100.00		100		
	자본/총액	\$	35,273.20	85,183.38	35,273.20	85,183.38	
시스템 컨버터	용량	kW	649.00		649		
	자본/총액	\$	63,879.39	125,284.28	63,887.40	125,300.00	
계통	자본/총액	\$	51,323.00	41,410,690.35	51,323.00	41,292,818.17	
전시스템	자본/총액	\$	3,052,205.85	51,330,622.31	3,171,223.76	52,352,041.57	
NPC		\$	51.3 × 10 ⁶		52.4 × 10 ⁶		
LCOE		\$	0.332		0.338		
운영비용		\$/yr	2.91 × 10 ⁶		2.26 × 10 ⁶		
초기자본		\$	3.05 × 10 ⁶		3.17 × 10 ⁶		
재생에너지 비중		%	13.8		14.0		
ROI / IRR		%	40.4	44.5	37.80	41.90	
탄소배출량(CO ₂)		kg/yr	3,559,228		3,554,131.00		
생산	태양광	kWh /yr	%	1,356,587.00	14.50	1,372,319.00	14.90
	FC			2,190,000	23.3	2,190,000.00	23.30
	계통구매			5,839,313.00	62.2	5,828,152.00	62.10
연료 소모				459,900	1,260	459,900m ³	1,260m ³ /day
					52.5		52.5m ³ /hour
연료 비용		\$/yr	234,549		234,549		
소비	AC부하	양	비중	kWh	%	8,751,661.00	94.00
	매전			563,382.00	6.05	567,638.00	6.09
과잉전력을				0	0	0.00	0.00
미충족 부하		kWh	%	178	0.002	178.00	0.002
용량 부족				774	0.0088	774	0.0088
계통	구입에너지	kWh	5,839,313.00		5,828,152.00		
	판매에너지	kWh	563,382.00		567,638.00		
	순구입에너지	kWh	5,275,931.00		5,260,513.00		
	피크수요	kW	4,198.00		4,198.00		
	에너지요금		\$	2,426,928.23		2,419,836.15	
			\$/yr	97,077.13		96,793.44	
수요 요금		\$	9,455.68		9,449.14		
		\$/yr	378.23		377.97		

부록 7. [민감성 분석②] SMP+REC 가격 kWh당 243원, 143원

SMP+REC 가격 민감도 분석				배출권 2만5000원 SMP+REC 2018년 243원 GRID+LIB+PV+FC (LF)		배출권 2만5000원 SMP+REC 2018년 143원 GRID+LIB+PV+FC (LF)	
태양광	용량	kW	3,292.00		2,903.00		
	자본/총액	\$	1,470,651.36	1,475,404.15	1,227,666.74	1,301,372.77	
연료 전지	용량	kW	250.00		250		
	자본/총액	\$	750,000.00	6,786,049.50	750,000.00	5,984,136.25	
배터리	용량	kWh	100.00		100		
	자본/총액	\$	35,273.20	85,183.38	35,273.20	85,183.38	
시스템 컨버터	용량	kW	649.00		620		
	자본/총액	\$	63,887.40	125,300.00	61,112.45	119,857.59	
계통	자본/총액	\$	51,323.00	41,292,818.17	51,323.00	43,498,469.48	
전시스템	자본/총액	\$	3,171,223.76	51,820,895.98	2,994,978.03	53,009,051.99	
NPC		\$	51.8 × 10 ⁶		53 × 10 ⁶		
LCOE		\$	0.335		0.353		
운영비용		\$/yr	2.93 × 10 ⁶		3.01 × 10 ⁶		
초기자본		\$	3.17 × 10 ⁶		2.99 × 10 ⁶		
재생에너지 비중		%	14.00		14.20		
ROI / IRR		%	37.60	41.60	37.4	41.4	
탄소배출량 (CO ₂)		kg/yr	3,554,131.00		3,451,944.00		
생산	태양광	kWh /yr	%	1,372,319.00	14.6	1,348,685.00	14.80
	FC			2,190,000.00	23.3	1,919,000.00	21.10
	계통구매			5,828,152.00	62.1	5,846,202.00	64.10
연료 소모				459,900m ³	1,260m ³ /day	402,990m ³	1,104m ³ /day
				52.5m ³ /hour		46m ³ /hour	
연료 비용		\$/yr	234,549		205,525		
소비	AC부하	양	비중	kWh	%	8,751,661.00	93.90
	매전			/yr		567,638.00	6.09
과잉전력을				0.00		0.00	0.00
미충족 부하		kWh	%	178.00	0.002	178.00	0.002
용량 부족				774.00	0.0088	774	0.0088
한 전 구 입 관 매 전 력	구입에너지	kWh		5,828,152.00		5,846,202.00	
	판매에너지	kWh		567,638.00		296,947.00	
	순구입에너지	kWh		5,260,513.00		5,549,256.00	
	피크수요	kW		4,198.00		4,198.00	
	에너지요금	\$			2,419,836.15		2,552,657.54
		\$/yr			96,793.44		102,106.30
수요 요금	\$			9,449.14		9,458.67	
	\$/yr			377.97		378.35	

부록 8. [민감성 분석③] 태양광 모듈 가격 W당 370원, 185원

태양광모듈 민감성 분석 결과				태양광 370.4원/W SMP+REC 2018년 193원 GRID+LIB+PV+FC (LF)		태양광 185.20원/W SMP+REC 2018년 193원 GRID+LIB+PV+PV+FC (LF)	
태양광	용량	kW	3,142		6,878		
	자본/총액	\$	1,005,513.00	1,010,050.09	1,100,452.94	1,110,383.90	
연료 전지	용량	kW	250.00		250		
	자본/총액	\$	750,000.00	6,786,049.50	750,000.00	6,786,049.50	
배터리	용량	kWh	100.00		100		
	자본/총액	\$	35,273.20	85,183.38	35,273.20	85,183.38	
시스템 컨버터	용량	kW	646.00		619		
	자본/총액	\$	63,580.44	124,697.97	60,949.54	119,538.08	
계통	자본/총액	\$	51,323.00	40,959,245.67	51,323.00	40,422,048.25	
전시스템	자본/총액	\$	2,705,778.44	51,015,776.06	2,798,087.47	50,566,309.33	
NPC		\$	51 × 10 ⁶		50.6 × 10 ⁶		
LCOE		\$	0.329		0.326		
운영비용		\$/yr	2.91 × 10 ⁶		2.88 × 10 ⁶		
초기자본		\$	2.71 × 10 ⁶		2.8 × 10 ⁶		
재생에너지 비중		%	14.40		15.10		
ROI / IRR		%	58.2	62.3	56.0	60.1	
탄소배출량 (CO ₂)		kg/yr	3,538,307.00		3,517,243.00		
생산	태양광	kWh /y	%	1,416,999.00	15.10	1,488,508.00	15.80
	FC			2,190,000	23.3	2,190,000.00	23.2
	계통구매			5,793,504.00	61.60	5,747,380.00	61.00
연료 소모				459,900m ³	1,260m ³ /day	459,900m ³	1,260m ³ /day
				52.5m ³ /hour		52.5m ³ /hour	
연료 비용		\$/yr	234,549		234,549		
소비	AC부하	양	비중	kWh /yr	%	8,751,661.00	93.8
	매전			576,776.00	6.18	600,732.00	6.42
과잉전력율		kWh	%	0.00	0.00	0.00	0.00
미충족 부하				178.00	0.002	178.00	0.002
용량 부족				774	0.0088	774	0.0088
한전 구입 판매 전력	구입에너지		kWh	5,793,504.00		5,747,380.00	
	판매에너지		kWh	576,776.00		600,732.00	
	순구입에너지		kWh	5,216,727.00		5,146,649.00	
	피크수요		kW	4,198.00		4,198.00	
	에너지요금		\$	2,399,694.64		2,367,458.46	
			\$/yr	95,987.79		94,698.34	
	수요 요금		\$	9,501.92		9,386.46	
\$/yr			380.08		375.46		

부록 9. 시나리오의 CO₂ 배출량

(단위: kg/yr)

CO ₂ 배출량		시나리오 1 (ESS 단독)	시나리오 2 (PV발전 추가)	시나리오 3 (FC발전 추가)	시나리오 4 (PV발전· FC발전 추가)
배출권	15,000원/t	3,996,572	3,475,106	3,989,253	3,559,228
	25,000원/t	3,996,572	3,477,423	3,989,253	3,554,131
	35,000원/t	3,996,572	3,477,423	3,989,253	3,554,131
S M P + R E C	243원/kWh	3,996,572	3,477,423	3,989,253	3,554,131
	193원/kWh	3,996,572	3,477,423	3,989,253	3,554,131
	143원/kWh	3,996,572	3,477,423	3,980,075	3,451,944
태양광 모델	500원/W	3,996,572	3,477,423	3,989,253	3,554,131
	370원/W	3,996,572	3,446,293	3,989,253	3,538,307
	185원/W	3,996,572	3,427,664	3,989,253	3,517,243

부록 10. 시나리오의 CO₂ 배출량과 분산발전 및 계통 비중

(단위: kg/yr, %)

CO ₂ 배출량		시나리오 1 (ESS 단독)	시나리오 2 (PV발전 추가)	시나리오 3 (FC발전 추가)	시나리오 4 (PV발전-FC발전 추가)
배출권 가격	톤당 15,000원	3,996,572.00	3,475,106.00	3,989,253.00	3,559,228.00
	PV (FC) 비중	0.00 %	15.2 %	(24.4) %	14.5 (23.3) %
	계통 비중	100 %	84.8 %	75.6 %	62.2 %
	톤당 25,000원	3,996,572.00	3,477,423.00	3,989,253.00	3,554,131.00
	PV (FC) 비중	0.00 %	15.10 %	(24.20) %	14.00 (23.30) %
	계통 비중	100 %	84.90 %	75.80 %	62.10 %
	톤당 35,000원	3,996,572.00	3,477,423.00	3,989,253.00	3,554,131.00
	PV (FC) 비중	0.00 %	15.10 %	(24.20) %	14.6 (23.3) %
S M P + R E C 가격	kWh당 243원	3,996,572.00	3,477,423.00	3,989,253.00	3,554,131.00
	PV (FC) 비중	0.00 %	15.1 %	(24.4) %	14.6 (23.3) %
	계통 비중	100 %	84.9 %	75.6 %	62.1 %
	kWh당 193원	3,996,572.00	3,477,423.00	3,989,253.00	3,554,131.00
	PV (FC) 비중	0.00 %	15.10 %	(24.20) %	14.00 (23.30) %
	계통 비중	100 %	84.90 %	75.80 %	62.10 %
	kWh당 143원	3,996,572.00	3,477,423.00	3,980,075.00	3,451,944.00
	PV (FC) 비중	0.00 %	15.10 %	(24.00) %	14.80 (21.10) %
태양광 모듈 가격	W당 500원	3,996,572.00	3,477,423.00	3,989,253.00	3,554,131.00
	PV (FC) 비중	0.00 %	15.10 %	(24.20) %	14.00 (23.30) %
	계통 비중	100 %	84.90 %	75.80 %	62.10 %
	W당 370원	3,996,572.00	3,446,293.00	3,989,253.00	3,538,307.00
	PV (FC) 비중	0.00 %	15.90 %	(24.20) %	15.10 (23.30) %
	계통 비중	100 %	84.10 %	75.80 %	61.60 %
	W당 185원	3,996,572.00	3,427,664.00	3,989,253.00	3,517,243.00
	PV (FC) 비중	0.00 %	16.5 %	(24.20) %	15.80 (23.20) %
계통 비중	100 %	83.5 %	75.80 %	61.00 %	

Abstract

Economic Analysis and Environmental Impacts of On-grid Microgrid

Ahn, Hee min

Cooperative Course for Climate Change

The Graduate School

Sejong University

Renewable energy is attracting attention as a distributed energy resource that is effective in coping with climate change, but there is a disadvantage that reverse current may occur due to intermittent and over-production. Microgrid can be classified as standalone and grid-connected. Stand-alone type, which is not connected to power system, is widely used in urban areas and remote mountainous areas. The microgrid is an effective energy system that can overcome the shortcomings of renewable energy network consisting of photovoltaic, wind power, energy storage system(ESS) and energy management system(EMS). As the demand for electric power in industrial facilities increases, it is urgent to introduce and expand grid-connected microgrids to stabilize the grid and minimize the investment of enterprises.

Since the on grid microgrid project is 25 years long, it is necessary to adapt the future value as differentiated by situation changed to the current value and

analyze it. HOMER computes the discount rate to present the net present cost(NPC) by reducing the future value to the present.

The analysis of the actual load data of the target facilities in 2017 was used to analyze the economical efficiency of on grid microgrid and its effect on the climate and environmental impacts. The scenario was constructed to derive an economically ideal microgrid : 「Scenario 1(ESS only)」, 「Scenario 2(PV added)」, 「Scenario 3(FC added)」, and 「Scenario 4(PV·FC added)」.

As a result of the economic analysis, 「Scenario 4(PV·FC added)」 was lower than net present cost(NPC), LCOE and operating cost. 「Scenario 4 (PV·FC added)」 is lower than 「Scenario 2(PV added)」 in renewable energy usage, but the proportion of purchasing electric power from the grid is lower than other scenarios. 「Scenario 4(PV·FC added)」 has the lowest energy and demand purchasing rate among the scenarios.

The most economical scenarios in terms of ROI and IRR are 「Scenario 3(FC added)」 and 「Scenario 4(PV·FC added)」. ROI and IRR of 「Scenario 4(PV·FC added)」 are higher than that of 「Scenario 2(PV added)」. Because it is the FC generation receives the REC weight of 2.0 in RPS system in Korea as PV generation receiving the REC weight of 1.5. As a result of climate environmental impact analysis, 「Scenario 2(PV added)」 had the lowest CO₂ emission.

Sensitivity analysis was performed on 「Scenario 4(PV·FC added)」 which has the highest economic efficiency. For the sensitivity analysis, the emission credits price was divided into 15,000 won, 25,000 won and 35,000 won per ton, and the SMP + REC price was divided into 243 won, 193 won and 143 won per kWh. Photovoltaic module prices were also divided into 500 won, 370

won, and 185 won per W.

The higher the price of emission credits, the higher the net present cost(NPC), LCOE, and ROI and IRR of 「Scenario 4(PV·FC added)」. 「Scenario 4(PV·FC added)」 increases the proportion of PV power generation and reduces the amount of electricity purchased from the grid.

As the proportion of PV power generation increases, the economic efficiency of 「Scenario 4(PV ·FC added)」 is improved. As the price of PV modules fell, the net present cost(NPC) and LCOE of 「Scenario 4(PV·FC added)」 decreased and ROI and IRR increased. The lower the SMP + REC price, the higher the net present cost(NPC), LCOE, and ROI and IRR for 「Scenario 4(PV·FC added)」. As the SMP + REC price is lowered as well as the economics of PV power generation and FC power generation decline, the amount of purchased energy to purchase power from the grid has increased.

Keywords : Climate change countmeasure, on grid Industrial microgrid, Renewable Energy, Homer, Optimization, Sensivity

감사의 글

이 논문을 쓰게 된 결정적인 계기는 다섯 살 난 아들 준혁의 눈을 깊게 바라 본 이후였습니다. 아들의 맑은 두 눈에 거짓말을 할 수 없었고 동시에 아버지로서 아들이 살아갈 미래가 걱정되었습니다.

논문의 시작은 아들에 대한 사랑이었지만 논문을 완성으로 이끌어 주신 것은 성모님의 전구와 하느님의 인도라고 생각합니다. 이 논문은 하느님 아버지의 것이지 저의 능력으로 쓴 것이 아닙니다. 고해성사를 볼 때 “교회가 기후변화 대응에 뜻이 있지만 실천은 형제님 같은 전문가가 나서 주어야 한다”는 사제 말씀이 계셨습니다. 저는 이 일을 하느님이 주신 소명으로 여기고 묵묵히 따랐을 뿐입니다. 인간으로서 저는 의심, 불안, 고통 등으로 스스로와 가족, 하느님을 괴롭히는 미천한 하느님의 종임을 고백합니다. 저의 지도사제이신 김석원 파트리치오 신부님과 「사랑이 피는 기도모임」 이유경 마리안나 회장님의 영적 지도가 없었더라면 저 안희민 토마스모어는 모래밭에 떨어진 쪽정이에 지나지 않았을 것입니다.

논문을 완성하는데 많은 분이 도와주셨습니다. 가장 큰 도움을 주신 분은 이완근 신성이엔지 회장님이십니다. 이완근 회장님께서서는 태양광산업에 대한 열정이 가장 크신 분입니다. 젊은 저도 회장님이 보여주시는 태양광에 대한 아이디어와 의지, 인내, 수완을 감탄하는 마음으로 보며 영감을 얻으려고 노력합니다. 이완근 회장님 아니 계셨더라면 데이터를 구할 수 없을 뿐더러 연구를 진행하지 못하였을 것입니다. 이완근 회장님께서서는 끊임없는 격려와 신의로 저와 이 논문에 물적, 정신적 생기를 불어 넣어 주셨습니다.

본 논문이 학술저작물 다운 틀을 갖추는데는 전의찬 교수님의 지도 덕분입니다. 교수님께서서는 기자출신의 성질 급한 제자를 다독이고 때론 다그치며 인내심을 갖고 저를 학문의 길로 인도하여 주셨습니다. 이완근 회장님과

전의찬 교수님이 이 논문이 완성되는데 가장 큰 공로자라는 사실을 지면을 통하여 삼가 밝히며 다시 한번 감사의 말씀을 올립니다.

이지선 신성이엔지 대표님과 김동섭 신성이엔지 재생에너지부문 사장님께도 감사의 말씀을 드립니다. 이지선 대표님께서도 고집스러운 저의 회사 생활을 묵묵히 지지하여 주셨습니다. 고집불통인 저를 받아주셔서 감사할 따름입니다. 태양광 분야에서 세계적인 학자이신 김동섭 사장님께서도 ‘행동하는 지식인’의 전형을 보여주셨습니다. 김동섭 사장님의 반경을 헤아릴 수 없는 활동범위와 태양광에 대한 깊은 지식은 제가 보고 배울 표본입니다. 지근거리에서 보고 배울 수 있어 영광입니다.

크리스천으로서 신뢰감과 동질감을 주시는 기획부문의 고경환 상무님께도 감사의 말씀드립니다. 신앙심 깊은 고경환 상무님이 제가 속한 전략기획팀의 상위 부서 기획부문의 장이신 점은 제가 마음이 어려울 때마다 흔들리지 않고 제 일을 수행한 원동력이었습니다. 재생에너지부문 사업관리팀 윤홍준 상무님, 기술연구소 이은주 이사, 신옥윤 이사님께도 감사의 말씀을 드립니다.

제가 속한 신성이엔지 기획부문의 전략기획팀 김신우 팀장님과 사업관리팀 박강연 차장, 기술연구소의 홍근기 부장, 민용기 부장, 강성민 사원과 늘 밝을 얼굴로 맞아주는 조원경 차장, 대학 후배로 묵묵히 자기 길을 가는 이민영 차장과 조성훈 과장에도 감사의 말 남깁니다. 이 분들의 동료애가 제게 큰 힘이었습니다.

이완근 회장님께서 조직한 신성이엔지 스마트그리드 연구팀에서 같이 활동한 인코어드의 최종웅 대표와 권영한 신성이엔지 고문, 이성호 박사님께도 감사의 말씀 드립니다. 박경선 전 부사장님께도 감사의 말씀 드립니다. 이 분들의 고견 덕분에 전력설비와 스마트그리드, 마이크로그리드에 대한 저의 부족한 식견을 채웠습니다.

저를 항상 사랑하여 주시는 기자 선배이신 송찬영 부장님과 정희정 선배, 후배 조진수 기자, 박준영 기자, 황대영 기자에게도 고맙다는 말 전합니다. 사회 생활을 기자로 시작하고 에너지 부문에 기자로써 발을 들여 놓아 희망과 상처, 의지 모두를 가슴에 새겼고 지금은 기자직을 떠난 저이지만 우리나라와 사회가 건강하려면 언론이 바로 서야한다는 생각은 변하지 않았습니다. 이제부터는 기자가 아닌 한명의 연구자요 학자로서 살아가지만 ‘정론직필’ 기자정신에 바탕으로 학술활동을 펼치겠다는 말을 남깁니다.

대학원 원우 서형주 박사, 김정환 원우회장, 조성흠 박사님께도 감사의 말씀을 드립니다. 본 논문의 심사를 맡아주신 김하나 세종대 교수님과 한기주 박사님, 황우현 단장님께 감사의 말씀 드립니다. 특히, 김하나 교수님께서 학문적인 통찰력을 높여주셨고 황우현 단장님께서 논문 심사위원장을 맡아주시며 연구의 등대가 되어 주셨습니다. 대학원 시절 통계 강의를 진행하신 차재형 교수님께도 감사의 말씀 드립니다. 통계에 대한 저의 관심과 올바르게 도출된 수치가 세상을 바르게 이끌 것이라는 저의 믿음은 변하지 않았습니다.

석사 때 지도교수이신 김영작 교수님과 지금은 불자가 된 후배 풍타오 르비엣남, 최철휴에게도 감사의 말 남깁니다. 김영작 교수님께서 가르쳐주신 ‘원칙에 충실함’은 지금도 저의 행동 준칙이 되고 있습니다.

에너지전환에 뜻을 같이하는 김성진 박사님, 김소희 총장님, 이소영 변호사님, 임은정 교수님께도 감사의 말씀 올립니다. 저는 이 분들과 함께 『한국의 에너지전환: 관점과 쟁점』이라는 책을 발간하며 저술 작업을 같이 하였습니다. 지금 서로 바빠 만나기 쉽지 않지만 한사람의 자연인으로 사회 활동에 지칠 때 여러분들을 생각하며 견디는 힘을 얻고 있습니다. 다시 한번 모여 즐거운 시간을 갖는 날을 기대합니다. 아울러 이 책에 기고를 할 수 있게 하여주신 김연규 한양대 교수님께도 감사의 말씀드립니다.

안남성 총장님과 정재훈 한수원 사장님, 최재석 교수님, 이진식 전당장님
께도 감사의 말씀 드립니다. 안남성 총장님께서 제게 시스템 다이내믹스
의 모델링 분석을 가르쳐 주셨습니다. 청강생 신분으로 수업을 들었지만 귀
한 자료를 주시며 가르쳐 주셨기 때문에 잊지 않고 또 다른 논문으로 살려
낼 것을 약속드립니다. 정재훈 한수원 사장님과 이진식 국립아시아문화전당
전당장님께도 감사의 말씀을 드립니다. 먼발치로 뵈고 있지만 고위공직자로
써의 정재훈 사장님과 이진식 국립아시아문화전당 전당장님의 활동은 제가
배울 귀감입니다.

저의 멘토이신 최갑홍 성균관대 교수님께도 감사의 말씀 드립니다. 최갑
홍 교수님은 제가 ‘학자같은 기자’ 라고 격려하여 주신 분이십니다. 최갑
홍 교수님의 치밀하고 체계적인 사고는 여전히 제가 범접하지 못할 부분이
며 최갑홍 교수님 덕에 전지산업에 눈을 떠서 제가 전지산업유공자로 산업
부 장관상을 수상하고 본 논문에서 태양광발전과 에너지저장장치(ESS)가 결
합된 마이크로그리드를 다룰 수 있었습니다.

이원욱 국회의원님께도 지면을 빌려 감사의 뜻 전합니다. 국회의원으로써
신재생에너지 분야에 천착하시는 이원욱 국회의원님은 저와 「미래에너지
백과사전」이라는 책을 공저하기도 하였습니다. 미흡한 제가 바쁘다는 핑계
로 자주 뵈지 못하였지만 동지인만큼 인연을 이어가도록 하겠습니다.

사랑하는 나의 가족에게 무한한 감사의 말씀 드립니다. 박사 과정 났으며
생긴 스트레스를 받아 준 저의 아내 김윤미 엘리자벳과 아버지, 어머니, 장
모님과 김윤호 형님과 김승호 처남, 정정웅 처외숙부께도 감사드립니다. 특
히 매사에 넉넉하도 대범하며 인내심 많은 저의 안사람이 없었다면 저는
제풀에 지쳐 논문을 완성하지 못하였을 것입니다. 준혁이가 아직 5살로 어
려 혼자 육아하기 어려운 가운데서도 내조한 안사람에게 다시 한번 감사의
말을 남깁니다. 아버지와 어머니는 제가 큰 걱정 없이 사회생활과 공부에

매진할 수 있도록 환경을 마련하여 주셨습니다. 자기 일밖에 모르는 장남이지만 지켜보아주셔서 감사합니다. 장모님께도 감사의 말씀 올립니다. 사위가 아직 미성숙하여 실수도 잘못도 많이 하지만 안사람보다 더 큰 포용력으로 안아주시어 감사드립니다. 그리고 우리 김윤호 형님께도 감사드립니다. 형님과 함께 마음 편히 레이스 경주 관람가고 싶다는 생각을 논문 작성하며 자주하였습니다. 우리 김승호 처남에게도 고맙다는 말 남깁니다.

그리고 나의 유일한 혈육인 여동생 안희진 박사와 매제 권대기 박사, 미국에 계시는 외숙부 내외분과 승언이와 상욱이에게도 감사의 마음을 전합니다. 여동생과 매제는 줄기세포 분야에서, 상욱이는 의학계에서, 승언이는 외식업에 종사하며 오히려 오빠, 형인 저보다 왕성한 활동으로 각자의 분야에서 재원으로 성장하고 있습니다. 늦깎이 박사가 된 오빠이자 형도 인내와 성실로 생명을 얻겠다는 말 남깁니다.

저를 묵묵히 지지해준 고3 친구 승목, 용석, 재구, 덕주, 홍재, 형식, 형빈, 신기, 지훈, 희재에게도 고맙다는 말을 남깁니다. “사회가 혼탁해도 희민같은 사람 한명 있어야하지 않겠냐” 고 격려해준 이승목, 나와 안사람 결혼 증인을 서 준 조용석, 우리의 영원한 반장 이재구, 탁월한 저술활동을 자랑하는 장신기 박사, 든든한 이덕주와 장형식과 이홍재, 한 식견하는 멋진 친구 김형빈 변호사 모두 저의 든든한 한평생을 만나는 친구들입니다.

마지막으로 제 아들의 대부인 김문석 요셉 베르나르도 형제님께도 감사의 말씀드립니다. 김문석 형제님은 한국에서 병역을 마치고 미국으로 다시 건너가 화학공학을 전공할 예정입니다. 김문석 형제님이 만든 소재와 원부자재로 하늘을 나는 태양광전기차를 상상합니다. 그날이 오도록 저도 기여하겠습니다.

저의 좌우명은 성경 구절인 “인내로 성실을 얻고 의인은 성실로 산다”입니다. 이 어귀를 등대로 삼아 우리나라의 동량지재가 되겠습니다.