

BES 전력 알고리즘 시나리오 분석



2019252015 이은호

2018147038 임재원

2020147051 장 건

2022126004 정병준

Role of Each Team Member (팀원 간 역할분담)

이은호: Data Curation, Formal analysis

임재원: Software, Resources

장건: Conceptualization, Methodology

정병준: Methodology, Validation

목차

제 1 장 서론	3
1.1. 재생 에너지의 확대	
1.2. BES 란?	
1.3. 공유 BES 의 효용	
1.4. 공유지의 비극	
제 2 장 목표	4
2.1. 시뮬레이션 평가지표	
2.2. 문제제기	
2.3. 시뮬레이션의 필요성	
제 3 장 시뮬레이션 모델	5
3.1. 시뮬레이션 가정사항	
3.2. 전력 분배 알고리즘	
3.3. 시뮬레이션에 사용한 모듈	
제 4 장 수치 실험	9
4.1. 실험 설계	
4.2. 데이터 설명	
4.3. 조건 설정	
4.4. 시뮬레이션 결과 비교	
4.5. 시뮬레이션 결과(그래프)	
제 5 장 결론	20

1. 서론

1.1. 재생 에너지의 확대

2015 파리 협정 이후 탄소 중립이 전세계적으로 중요한 안건으로 떠오르면서 전체 에너지원에서 재생에너지의 비중이 커지고 있다. 2030년까지 EU는 재생에너지를 추가로 45% 확대할 계획이며, 독일과 영국은 각각 재생에너지 비율을 80%, 95%까지 확대할 계획이라고 발표했다. 우리나라 역시 탄소 중립을 법제화했으며 '2030년 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안'에서 2030년까지 재생에너지 비중을 30.2%로 늘리겠다고 제시했다.¹

1.2. BES란

재생 에너지의 개발이 가속화되면서 에너지를 저장하여 쓸 수 있는 BES(Battery Energy Storage) 기술 역시 주목받고 있다. 재생 에너지는 날씨에 크게 영향을 받는 편이기 때문에 안정적인 전력 공급이 힘들다. 특히 태양광 에너지의 경우에는 생산량을 조절하는 것 역시 어렵기 때문에 잉여 전력이 생겼을 때 이를 저장하고 안정적으로 공급할 수 있는 storage가 필요하다. BES를 통해 발전 전력과 부하 전력 사이의 불일치로 발생하는 주파수 변화를 조정할 수 있고, 잉여 전력을 저장하거나 가격이 떨어지는 심야 시간대에 전력을 미리 구매하여 저장한 뒤 전력이 부족할 때 공급할 수 있다. 또한 지진, 해일 등의 재해로 인해 정전이 발생한 상황에서도 안정적으로 전력을 공급받을 수 있다. 전세계 BES 시장 규모는 2019년 11GWh, 2020년 20GWh를 기록했고 연평균 35%씩 성장하여 2030년에는 302GWh를 기록할 것이라고 예측된다. 정부에서도 설치 보조금 지원, 세제 혜택 등으로 BES 설치를 장려하고 있다.

1.3. 공유 BES의 효용

BES의 효용은 분명하지만 개별 가구가 설치하여 사용하기에는 초기 설치 비용이 높은 편이고 수요를 예측하여 저장 용량을 정했다고 하더라도 수요의 변동에 따라 저장 용량이 남거나 부족한 상황이 발생한다는 한계가 있다. 이러한 한계를 하나의 BES를 여럿이서 공유하는 방법으로 보완할 수 있다. 이 경우 소비자들은 초기 설치 비용을 공유하여 비용 부담을 줄일 수 있고 대용량의 Storage를 사용함으로써 더 많은 에너지를 저장할 수 있다. 또한 다른 소비자들도 저장한 에너지를 사용할 수 있어 잉여 전력을 보다 효과적으로 활용할 수 있다.²

1.4. 공유지의 비극

공유 BES의 전력은 BES의 한정된 전력을 모두가 필요할 때 쓸 수 있다는 점에서 공유 자원의 성질을 띄는데 각자 사용 후 남은 잉여 전력을 모두가 한 곳으로 모으고 미리 구매한 전력에 대해서는 비용을 나누어 부담하기 때문에 에너지 소유권의 주체를 특정하기 어렵다. 때문에 구성원들이 이기주의적 판단에 치우쳐 행동할 경우 남용이 발생할 수 있다는 특성이 있다.³ 이러한 공유지의 비극을 방지하기

¹ 장연재 외 1명, 국제 신재생에너지 정책변화 및 시장분석, 에너지경제연구원, 2022

² Awnalisa Walker 외 1명, Analysis on impact of shared energy storage in residential community: Individual versus shared energy storage, Applied Energy, 2021

³ 최충두, 공유 자원의 효율적 경영을 위한 전략적 시나리오분석, 수산경영론집, 2011

위해 본 연구에서는 작업 스케줄링 알고리즘을 활용한 전력 배분 알고리즘을 만들고 각각의 효율과 공정성을 비교해보았다.

2. 목표

본 연구는 공유형 배터리 에너지 저장장치(BES)를 여러 가구가 공유하여 사용할 때 발생하는 전력 분배 문제에 대한 효율적이고 공정한 해결책을 제시하는 것이다. 구체적으로는 다양한 전력 분배 알고리즘을 시뮬레이션하여 각 알고리즘의 효율성과 공정성을 비교하고, 이를 토대로 실제 환경에서 어떤 알고리즘이 가장 적합한지를 제안한다.

2.1. 시뮬레이션 평가지표

1) 비용 절감과 효율성

개별 가구에서 BES 를 독립적으로 사용하는 것은 초기 설치 비용이 높고, 수요 변동에 따른 저장 용량의 한계가 있다. 공유 BES 를 통해 초기 비용을 분담하고 대용량의 저장 용량을 활용함으로써 비용을 절감하고 에너지를 더 효율적으로 활용할 수 있게 된다. 효율성의 판단 기준은 각 정책 시나리오 별 전체 가구 Cost 로 한다.

2) 에너지 분배의 공정성

공유 BES 에서의 전력 분배는 이기적인 사용자의 남용을 막기 위해, 형평성과 공정성을 유지해야 한다. 각 가구에 대한 공정성 판단 기준은 BES 를 사용하지 않을 때의 가구 별 비용과 정책 별 가구 당 비용의 비율의 최소를 비교하여 판단한다.

2.2. 문제 제기

- 공유 BES 의 경우, 공유 자원의 성질을 띄며 잉여 전력을 한 곳에 모으고 필요할 때 사용 가능
- 미리 구매한 전력에 대한 비용 청구의 문제, 에너지 소유권의 주체 특정 문제 발생
- 작업 스케줄링을 활용한 전력 분배 알고리즘을 만들어 각 가구 별 효율과 공정성 비교

2.3. 시뮬레이션의 필요성

- 공유 BES 특성상 각 가구별 전기 수요를 정량적으로 파악하기 힘들
- 가구 별 전력 소비 패턴이 동적이기 때문에 최적의 분배 정책을 찾는 것은 불가능
- 시뮬레이션을 통해 여러 정책 시나리오를 비교 평가하여 수치적인 결과 기대
- 제안된 알고리즘으로 현실세계의 상황에서 구축 가능

3. 시뮬레이션 모델

3.1. 시뮬레이션 가정사항

1) 시뮬레이션에 사용된 BES 기준 및 명세서

- 사용 데이터 환경(Texas, 미국)에 맞추어 Tesla Powerwall 선정
- 여러 개의 배터리를 병렬 연결하여 하나의 BES 로 공유
- BES 는 완충 또는 방전시간: 2.8h
- charge capacity: 14kWh
- charge(discharge) rate: 5kW
- 사용 유효 기간: 10 년

PERFORMANCE SPECIFICATIONS	
AC Voltage (Nominal)	120/240 V
Feed-In Type	Split Phase
Grid Frequency	60 Hz
Total Energy	14 kWh ¹
Usable Energy	13.5 kWh ¹
Real Power, max continuous	5 kW (charge and discharge)
Real Power, peak (10s, off-grid/backup)	7 kW (charge and discharge)
Apparent Power, max continuous	5.8 kVA (charge and discharge)
Apparent Power, peak (10s, off-grid/backup)	7.2 kVA (charge and discharge)
Maximum Continuous Current	24 A
Maximum Output Fault Current	32 A
Overcurrent Protection Device	30 A
Load Start Capability	88 - 106 A LRA ²
Imbalance for Split-Phase Loads	100%
Power Factor Output Range	+/- 1.0 adjustable
Power Factor Range (full-rated power)	+/- 0.85
Internal Battery DC Voltage	50 V
Maximum Supply Fault Current	10 kA
Round Trip Efficiency	90% ^{1,3}
Warranty	10 years

¹Values provided for 25°C (77°F), 3.3 kW charge/discharge power.
²Load start capability may vary.
³AC to battery to AC, at beginning of life.

[Tesla powerwall specification]

2) 공유 BES 운영 규정

- 6 가구가 하나의 BES 를 공유
- 각 가구당 solar energy 는 사용하고 잉여 solar energy 가 존재할 시 공유 BES 에 charge
- 공유 BES 는 전력 구매 기준가격보다 grid price 의 가격이 하회할 시 전력을 선구매후 charge
- 분배 정책에 따라 6 가구에 우선순위 부여, 각 가구의 demand 에 맞게 순차적으로 전력을 분배
- 단위시간동안 BES 내부 전력이 부족할 경우, 각 가구의 남은 전력 요구량은 해당가구가 자기부담

3) 비용 측정 방법

총비용 = (i)grid 전력 구입 비용 + (ii)BES 전력 소진 시 개별 구매 비용

i . grid 전력 구입 비용은 가구당 균등 분배

ii. BES 전력 소진 시 개별 구매 비용은 분배 알고리즘 적용 이후 개별 부담

예시) 1 가구의 청구 비용 = (grid 전력 구입 비용)/6 + (BES 전력 소진 시 개별 구매 비용)

- 전력 가격이 변동하므로 정확한 비교를 위하여 총 기간 동안의 비용을 합산하는 static pricing 사용

4) 전력 구매 기준가격(threshold for grid price)

-전력 구매 기준가격은 grid price 데이터의 중앙값으로 설정하였으며, 이 값은 \$23.28 로 산정

Price	
count	744.000000
mean	27.947932
std	12.900431
min	15.080000
25%	19.163750
50%	23.282500
75%	31.689375
max	97.530000

[grid price 분포]

5) OptQuest 로 도출한 charge capacity & charge rate

- Tesla powerwall 의 사양에 따르면 charge capacity = 2.8 * charge rate
- battery 구입 비용은 총 구매비용에서 이용기간 동안 분할하여 지불한다고 가정
- 월 단위 battery 구입비용

$$= (\text{battery 개수}) * (\text{설치비용} + \text{총기간 유지비용}) / (\text{배터리 유효기간}) * 12 = (\text{battery 개수}) * (\$10,000 + \$10,000) / 10 \text{ 년} * 12$$

설치비용 및 유지비용 출처: <https://www.forbes.com/home-improvement/solar/tesla-powerwall-solar-battery-review/>

- 목적 함수: (Total cost + 월 단위 battery 구입비용) 최소화
- 결정 변수: charge rate
- Tesla powerwall 의 사양으로 인해 charge rate 를 10kW 단위로 조정하여 산출
- 이외 변수들은 고정

BES 전력 알고리즘 시나리오 분석

Included	Simulation	Objective Value	Status	Charge Rate	Included	Simulation	Objective Value	Status	Charge Rate
<input type="checkbox"/>	3	253914	Feasible	200	<input type="checkbox"/>	4	253273	Feasible	210
<input type="checkbox"/>	7	255126.4	Feasible	190	<input type="checkbox"/>	6	253391.6	Feasible	220
<input type="checkbox"/>	4	256633.6	Feasible	180	<input type="checkbox"/>	2	253417.4	Feasible	230
<input type="checkbox"/>	8	258892.6	Feasible	170	<input type="checkbox"/>	7	253491.8	Feasible	240
<input type="checkbox"/>	2	261467.8	Feasible	160	<input type="checkbox"/>	1	253914	Feasible	200
<input type="checkbox"/>	9	265022	Feasible	150	<input type="checkbox"/>	5	253917.4	Feasible	250
<input type="checkbox"/>	5	269044.2	Feasible	140	<input type="checkbox"/>	3	254403.4	Feasible	260
<input type="checkbox"/>	6	274133.2	Feasible	130					
<input type="checkbox"/>	1	279122.8	Feasible	120					

[Opt Quest 결과]

➤ Charge(discharge) rate 최적값: 210kW

해당 charge rate 에서 capacity = 588kWh, 필요 배터리 개수: 42 개

3.2. 전력 분배 알고리즘

1) No BES

- Battery capacity 를 0 으로 설정하여 BES 역할 없이 시뮬레이션 진행
- 가구당 사용 후 남은 여분의 Solar energy 폐기

2) no algorithm (only BES)

- 알고리즘 없이 항상 1 번 집부터 차례로 전력 분배
- 각 가구당 Cost 는 균등 분배하여 청구

3) Round Robin

- 매일 돌아가며 전력 분배 우선 순위를 부여
- 첫 날에는 1-2-3-4-5-6, 다음 날에는 2-3-4-5-6-1 순으로 우선 순위 부여
- Check priority station 다음의 assign module 에서 Priority 계산 후 부여
- 우선 순위 부여 식: $(\text{MEMIDX}(\text{House Entity Set}, \text{Entity.Type}) - (\text{MOD}(\text{AINT}(\text{TNOW}/24), 6) + 1)) + 6 * (\text{MEMIDX}(\text{House Entity Set}, \text{Entity.Type}) - (\text{MOD}(\text{AINT}(\text{TNOW}/24), 6) + 1) < 0)$

4) SJF (Shortest Job First)

- 매 시간 가장 적게 발생한 수요에 전력 분배 우선 순위 부여
- hold 모듈의 queue 에서 release 순서를 (Lowest Attribute Value, Insufficient Demand)으로 설정하여 구현

5) Weighted Solar

- 매 시간 (발전량 / 수요)의 값이 가장 큰 집부터 우선 순위 부여
- Assign module 에서 Priority 를 $\text{Solar}/\text{Max}(\text{Demand}, 0.000001)$ 로 부여하여 Demand 가 0 일때의 예외처리 진행
- hold 모듈의 queue 에서 release 순서를 (Highest Attribute Value, Priority)으로 설정하여 구현

3.3. 시뮬레이션에 사용한 모듈

1) Create Module

- Entity 를 발생시키는 역할
- house 전력 demand, 태양광 발전량, 전력가격을 발생시키는 entity 생성에 활용
- Lecture note chapter 03 p.16~17

2) Assign Module

- 업무, 작업에 특정 리소스를 할당하는 역할
- Entity 에 수요, 태양광 발전량 attribute 으로 부여
- 시간 당 충전되는 용량 variable 로 부여
- BES 충전량을 변화시키거나 시간 당 충전량 및 방전량을 초기화
- Lecture note chapter 05 p.15~18

3) Record Module

- 시뮬레이션 실행 중 발생하는 이벤트, 데이터를 기록 및 추적에 사용
- Entity 진행 경로의 중간에 배치, 변화되는 수요나 발전량, BES 의 잔여량 등 기록
- Lecture note chapter 04 p.20~21

4) Decide Module

- 특정 조건에 따라 시스템이나 entity 가 어떤 행동을 취할지 결정하는 역할 수행
- 수요, BES 용량에 따라 BES 를 충전할 지 판단
- 전력 가격이 기준 이하인지 아닌지 판단
- 전력을 구매할 지 판단
- Lecture note chapter 04 p.17

5) Route 및 Station Module

- Route 모듈: 시뮬레이션 내 특정 경로 정의 및 그 경로 따라 이동하는 역할
- Station 모듈: 시뮬레이션에서 작업이 이루어지는 위치
- 수요와 발전량 생성, 태양광으로 충전, BES 로 충전, 전력 구매 등 각 공정들 분리하여 나타내기 위해 사용
- Lecture note chapter 08 p.3~11

6) Signal Module

- 다양한 시뮬레이션 객체 간의 통신과 이벤트 처리를 관리하는 역할
- SJF policy, Round Robin policy, Random policy 구현에 사용
- 한 시간마다 Hold 모듈에 release 신호 전달
- Simulation with Arena p.398~401

7) Hold Module

- 특정 이벤트의 발생을 일정 조건이 달성될 때까지 지연시키는 역할

- SJF policy, Round Robin policy, Random policy 구현에 사용
- 매 시간마다 모든 house 의 entity 를 hold, 우선 순위에 따라 재정렬될 때까지 일괄적으로 hold
- Simulation with Arena p.397~401

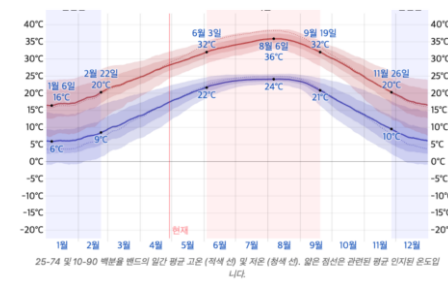
4. 수치 실험

4.1. 실험 설계

- 1) BES 유무에 따른 Total Cost 비교하여 BES 효율성 분석
- 2) 5 개 분배 정책 알고리즘의 Total Cost & 각 가구당 Cost 비교하여 효율과 공정성 분석

4.2. 데이터 설명

- Texas 가구들의 Demand, Solar, Grid Price 가 담긴 데이터 사용(출처: Pecan Street Dataport ,<https://www.pecanstreet.org/>)
- 확인한 차이를 얻기 위하여 Texas 기후 특성상 전력 사용량이 많은 시기인 8 월달 데이터를 추출하여 사용



[Texas 월별 날씨]

- 실험의 효율성을 위해 15 분 단위 데이터를 합산하여 1 시간 데이터로 집계
- Demand, Solar, Price 의 이상치 제거
- Arena Input Analyzer 를 통해 데이터의 분포를 도출, 음수값 생성방지를 위해 정규분포를 삼각분포로 대체

4.3. 조건 설정

- Initiation: T=0 에서 시작
- Termination: 텍사스의 8 월 demand 및 solar energy generation 을 사용했기 때문에 시작 이후 31 일 경과 뒤 종료
- Warm-up period: 하루로 설정
- Replications: Number of Replications 는 10 으로, Replication Length 는 30 일로 설정

4.4. 시뮬레이션 결과 비교

1. BES 유무에 따른 시뮬레이션

- 1) BES 를 제외한 시뮬레이션
- 2) BES 를 적용한 시뮬레이션 = no algorithm (only BES)

	Total cost
BES 를 제외한 시뮬레이션	\$1,022,641
BES 를 적용한 시뮬레이션	\$770,591

[Total cost 비교표]

[결과해석]

공유 BES 적용한 뒤 Total cost 24.65% 절감

공유 BES 가 비용 측면에서 효율적이라는 결론 도출

2. 분배 알고리즘에 따른 시뮬레이션

- 1) no algorithm (only BES)
- 2) Round Robin
- 3) SJF (Shortest Job First)
- 4) Weighted Solar

	Total cost
no algorithm (only BES)	\$770,591
SJF (Shortest Job First)	\$767,793
Round Robin	\$795,214
Weighted Solar	\$795,212

[Total cost 비교표]

[결과해석]

SJF 알고리즘이 알고리즘 미적용보다 Total Cost 절감

반면, Round Robin 과 Weighted Solar 의 Total cost 는 증가

SJF 가 비용 측면에서 효율적이고, Round Robin 과 Weighted Solar 는 비효율적

	house1	house2	house3	house4	house5	house6
no algorithm(only BES)	\$128,432	\$128,432	\$128,432	\$128,432	\$128,432	\$128,432
SJF (Shortest Job First)	\$124,561	\$117,188	\$116,860	\$130,999	\$138,297	\$167,307
Round-Robin	\$123,221	\$114,874	\$114,906	\$124,687	\$133,724	\$156,471
Weighted Solar	\$123,141	\$116,207	\$117,363	\$128,864	\$140,649	\$168,987

[각 가구당 cost 비교표]

[결과해석]

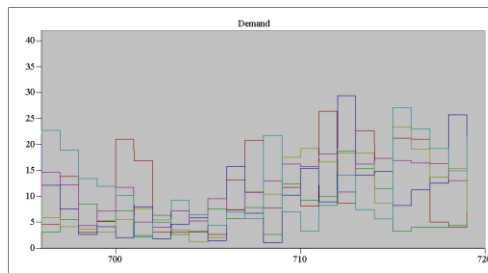
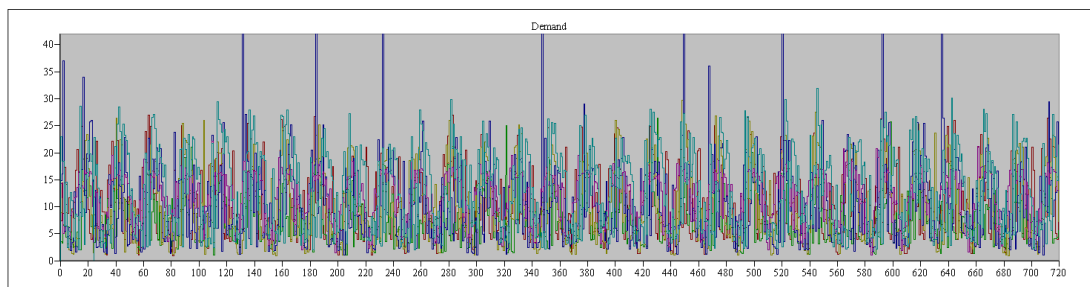
알고리즘 적용 후 공통적으로 house6 의 청구 비용이 줄린 것을 확인

반면, house2 에 청구 비용은 감소, 알고리즘 적용 이후 불공정한 것으로 도출

4.5. 시뮬레이션 결과(그래프)

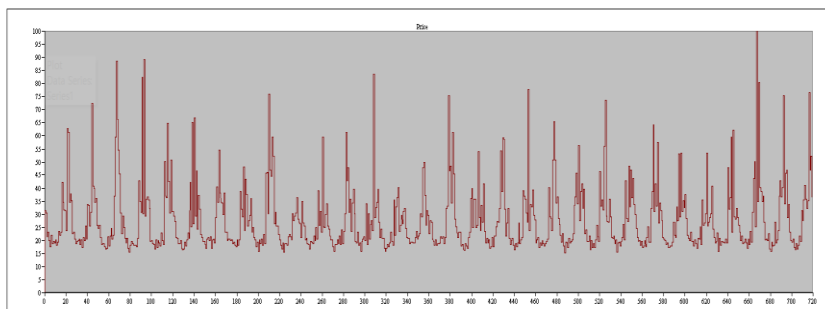
1) 공통 항목 그래프: Create 에서 발생된 Demand(전력 수요), Price(전력 가격), Solar(발전량)

- Demand

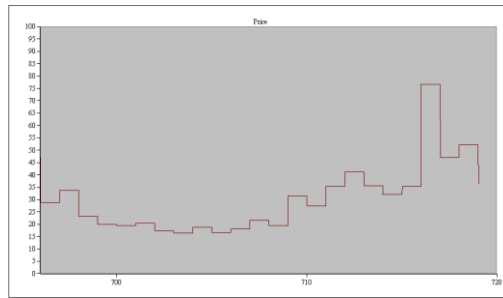


[Demand 분포, 720 시간 분포(상) 24 시간 분포(하)]

- Price

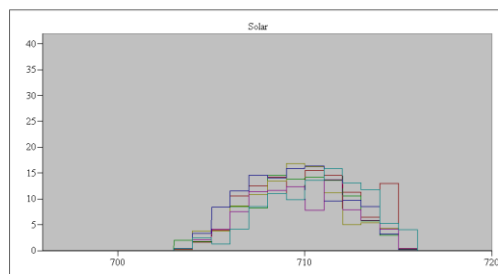
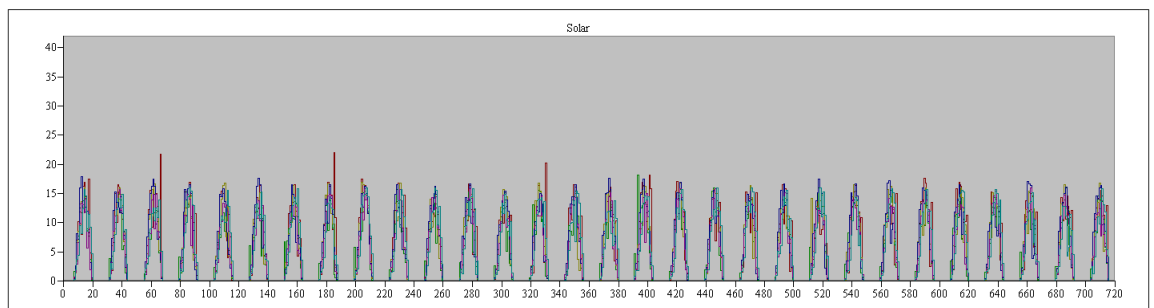


BES 전력 알고리즘 시나리오 분석



[Price 분포- 720 시간 분포(상), 24 시간 분포(하)]

- Solar energy



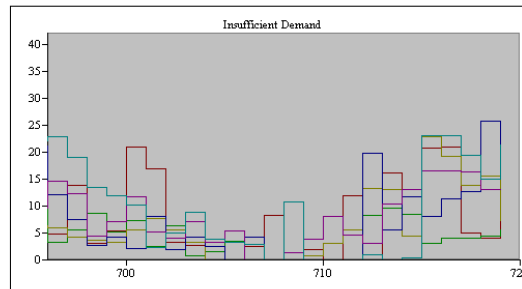
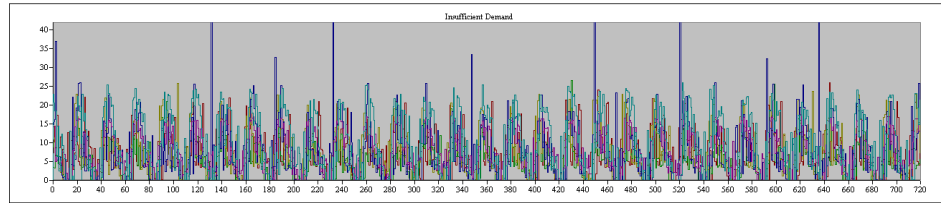
[Solar energy 분포- 720 시간 분포(상), 24 시간 분포(하)]

2) 알고리즘별 결과 그래프

1. No BES

- Insufficient Demand

BES 전력 알고리즘 시나리오 분석



[Insufficient Demand 분포 - 720 시간 분포(상), 24 시간 분포(하)]

Report

Counter

Count	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
BES Discharge 1	0.00	0.00	0.00	0.00
BES Discharge 2	0.00	0.00	0.00	0.00
BES Discharge 3	0.00	0.00	0.00	0.00
BES Discharge 4	0.00	0.00	0.00	0.00
BES Discharge 5	0.00	0.00	0.00	0.00
BES Discharge 6	0.00	0.00	0.00	0.00
Buy Amount 1	4277.90	111.93	4155.00	4616.00
Buy Amount 2	3208.60	59.39	3078.00	3372.00
Buy Amount 3	4441.70	58.00	4356.00	4555.00
Buy Amount 4	4671.00	87.48	4500.00	4952.00
Buy Amount 5	5407.60	46.07	5310.00	5516.00
Buy Amount 6	6685.60	104.83	6440.00	6917.00
Charge amount when cheap	0.00	0.00	0.00	0.00
Cost 1	140598.40	3,746.48	135633.00	149547.00
Cost 2	118667.40	2,530.78	114042.00	126485.00
Cost 3	163057.60	3,268.68	155040.00	169175.00
Cost 4	170807.10	2,811.27	162800.00	175724.00
Cost 5	192121.90	3,851.88	186237.00	202547.00
Cost 6	237388.10	4,886.64	227454.00	247043.00
Cost when cheap	0.00	0.00	0.00	0.00
Leftover 1	601.20	41.66	529.00	721.00
Leftover 2	896.10	23.35	856.00	944.00
Leftover 3	708.70	41.02	609.00	769.00
Leftover 4	896.80	35.29	837.00	972.00
Leftover 5	20.7000	5.28	10.0000	30.0000
Leftover 6	687.60	28.67	609.00	746.00
Solar Charge 1	0.00	0.00	0.00	0.00
Solar Charge 2	0.00	0.00	0.00	0.00
Solar Charge 3	0.00	0.00	0.00	0.00
Solar Charge 4	0.00	0.00	0.00	0.00
Solar Charge 5	0.00	0.00	0.00	0.00
Solar Charge 6	0.00	0.00	0.00	0.00
Total Cost Counter	1022640.50	15,436.81	991394.00	1061303
Total Cost when insufficient	1022640.50	15,436.81	991394.00	1061303
Total Demand Counter	42000.00	220.74	41577.00	42543.00
Total Demand when insufficient	28692.40	156.53	28224.00	28926.00
Total Discharge Amount	0.00	0.00	0.00	0.00
Total Generated Solar Counter	16789.50	69.49	16627.00	16943.00
Total Solar Charge	0.00	0.00	0.00	0.00

Time Persistent

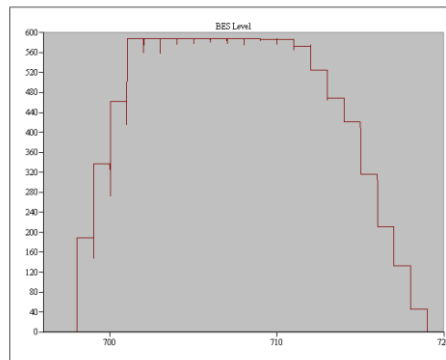
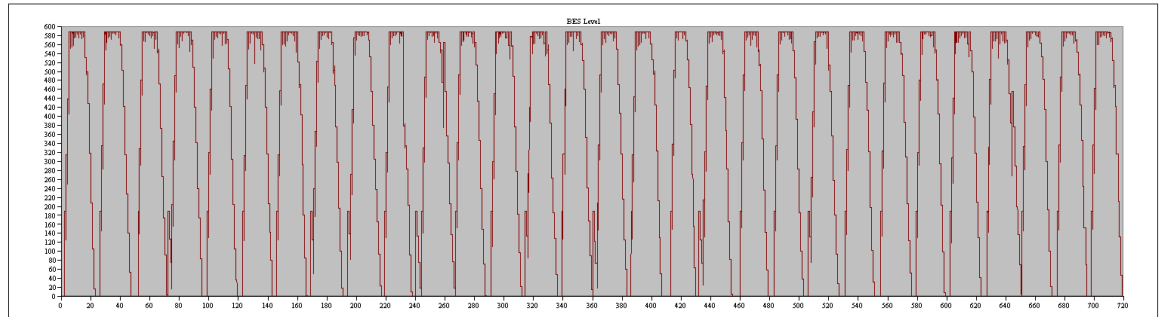
Variable	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
BES Level	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Charge per hour	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Price	28.2629	0.27	27.7957	29.0376	15.0476	221.20
None	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Demand 1	10.1894	0.19	9.8564	10.6917	1.0003	346.96
Demand 2	7.6383	0.10	7.3816	7.9437	1.0189	34.1765
Demand 3	9.9811	0.11	9.8252	10.2522	1.0012	74.1571
Demand 4	10.2414	0.14	10.0226	10.7203	1.0108	185.25
Demand 5	12.1419	0.06	12.0087	12.2627	1.1345	27.9005
Demand 6	13.1173	0.14	12.7230	13.3596	2.0020	37.6862
Insufficient Demand 1	6.4953	0.16	6.2524	6.9846	0.00	346.96
Insufficient Demand 2	4.3923	0.09	4.7987	5.2215	0.00	34.1765
Insufficient Demand 3	6.7657	0.09	6.6349	6.9438	0.00	73.9359
Insufficient Demand 4	7.0876	0.13	6.8505	7.4973	0.00	179.85
Insufficient Demand 5	8.2631	0.07	8.1208	8.4205	0.00	24.2020
Insufficient Demand 6	10.0225	0.15	9.6578	10.3915	0.00	37.6862
Solar 1	4.6568	0.03	4.5771	4.7292	0.00	33.3566
Solar 2	4.0676	0.02	4.0023	4.1110	0.00	32.8586
Solar 3	4.3423	0.05	4.2522	4.5134	0.00	50.5211
Solar 4	4.5632	0.03	4.5156	4.6095	0.00	19.6510
Solar 5	3.9274	0.04	3.8489	4.0032	0.00	15.9993
Solar 6	4.1735	0.05	4.0782	4.3222	0.00	15.9998

[Report]

BES 전력 알고리즘 시나리오 분석

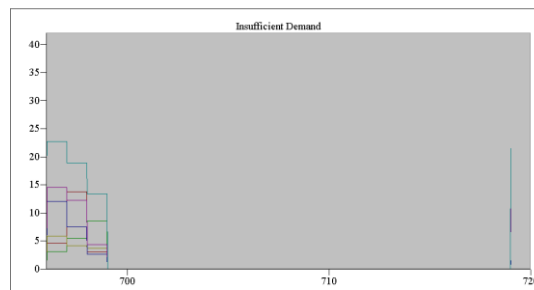
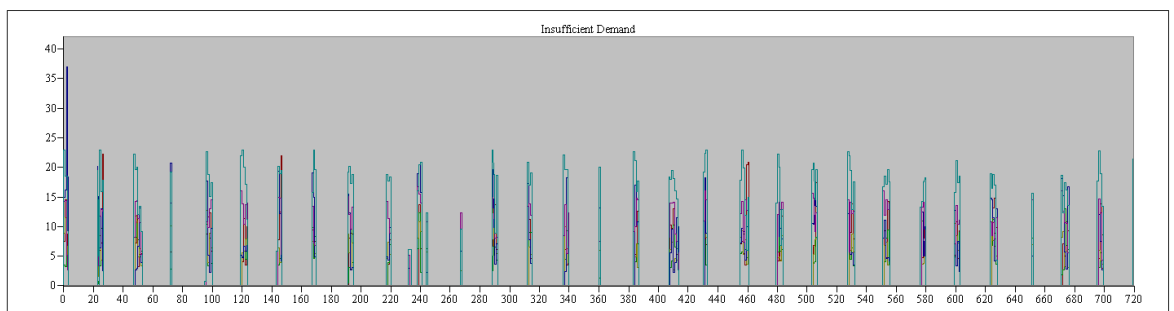
2. no algorithm (only BES)

- BES level



[BES level 분포 - 720 시간 분포(상), 24 시간 분포(하)]

- Insufficient Demand



BES 전력 알고리즘 시나리오 분석

[Insufficient Demand 분포 - 720 시간 분포(상), 24 시간 분포(하)]

- Report

Counter											
Count	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average							
BES Discharge 1	3778.00	108.74	3523.00	3891.00							
BES Discharge 2	2883.80	69.81	2769.00	3034.00							
BES Discharge 3	4234.30	66.16	4157.00	4413.00							
BES Discharge 4	4120.30	118.34	3880.00	4513.00							
BES Discharge 5	4562.90	30.26	4481.00	4613.00							
BES Discharge 6	5059.80	113.31	4815.00	5318.00							
Buy Amount 1	867.30	75.31	725.00	1021.00							
Buy Amount 2	630.90	33.29	540.00	704.00							
Buy Amount 3	649.00	30.82	588.00	730.00							
Buy Amount 4	981.50	61.52	855.00	1152.00							
Buy Amount 5	1330.00	44.44	1224.00	1400.00							
Buy Amount 6	2153.40	87.72	1906.00	2315.00							
Charge amount when cheap	27287.70	409.24	26738.00	28635.00							
Cost 1	28336.20	2,057.08	23703.00	31971.00							
Cost 2	21572.60	984.74	18935.00	23522.00							
Cost 3	22501.20	959.26	20441.00	24832.00							
Cost 4	33792.80	1,914.74	30177.00	38320.00							
Cost 5	45226.40	1,435.48	42354.00	47507.00							
Cost 6	72903.50	2,461.87	66402.00	76706.00							
Cost when cheap	546258.40	10,754.14	531628.00	580411.00							
Leftover 1	517.49	31.75	442.00	596.00							
Leftover 2	609.99	22.22	553.00	654.00							
Leftover 3	562.50	40.86	475.00	655.00							
Leftover 4	588.20	30.17	520.00	649.00							
Leftover 5	13.3000	3.02	6.0000	20.0000							
Leftover 6	173.29	20.21	129.00	230.00							
Solar Charge 1	73.3000	16.23	40.0000	112.00							
Solar Charge 2	241.80	16.36	197.00	282.00							
Solar Charge 3	119.10	17.90	83.0000	163.00							
Solar Charge 4	262.70	16.80	219.00	296.00							
Solar Charge 5	6.0000	2.63	1.0000	11.0000							
Solar Charge 6	441.70	21.09	409.00	485.00							
Total Cost Counter	770591.10	5,745.68	760021.00	784508.00							
Total Cost when insufficient	224332.70	7,876.48	204097.00	239468.00							
Total Demand Counter	42000.00	220.74	41577.00	42543.00							
Total Demand when insufficient	6612.10	278.13	5899.00	7227.00							
Total Discharge Amount	24639.10	326.00	24191.00	25701.00							
Total Generated Solar Counter	16789.50	69.49	16627.00	16943.00							
Total Solar Charge	1144.60	55.62	1051.00	1278.00							

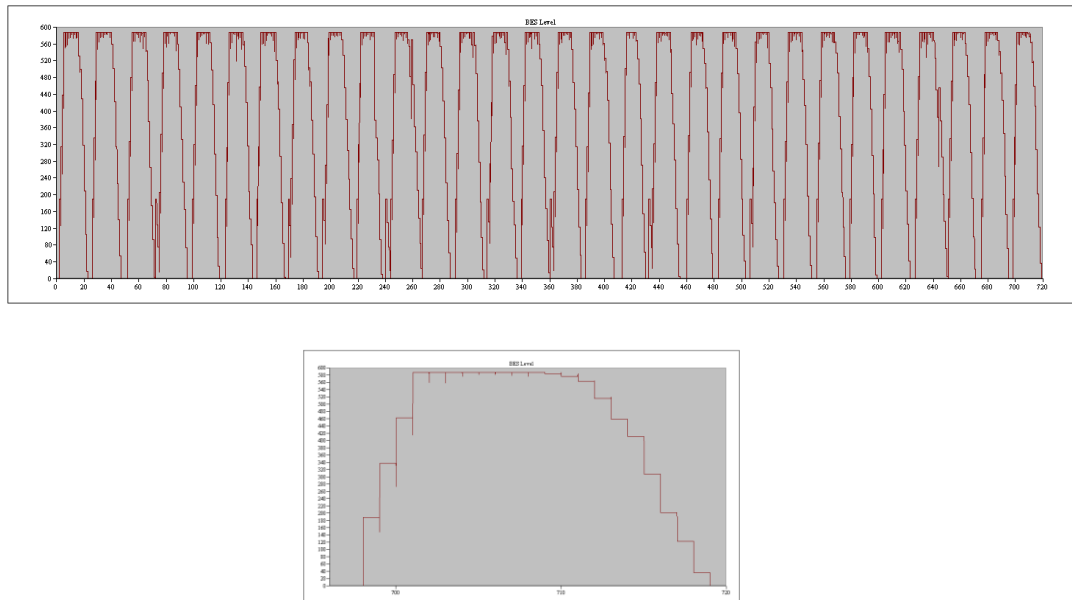
Time Persistent						
Variable	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
BES Level	376.41	2.56	371.68	383.83	0.00	589.00
Charge per hour	0.01914252	0.00	0.01778799	0.02107479	0.00	29.4860
Price	28.2629	0.27	27.7957	29.0376	15.0476	221.20

Usage						
None	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Demand 1	10.1894	0.19	9.8564	10.6611	1.0000	346.96
Demand 2	7.8383	0.10	7.3816	7.9437	1.0189	34.1765
Demand 3	9.9811	0.11	9.8252	10.2622	1.0012	74.1571
Demand 4	10.2414	0.14	10.0226	10.7203	1.0128	185.25
Demand 5	12.1419	0.06	12.0087	12.2627	1.1345	27.9005
Demand 6	13.1173	0.14	12.7230	13.3596	2.0020	37.6862
Insufficient Demand 1	1.6572	0.14	1.4005	1.9385	0.00	176.86
Insufficient Demand 2	1.3111	0.07	1.1139	1.4765	0.00	18.7391
Insufficient Demand 3	1.3118	0.06	1.1645	1.4827	0.00	17.7121
Insufficient Demand 4	1.9776	0.13	1.6854	2.2829	0.00	38.1523
Insufficient Demand 5	2.0931	0.07	1.9235	2.1938	0.00	20.6972
Insufficient Demand 6	3.9262	0.15	3.4794	4.2187	0.00	24.3515
Solar 1	4.6568	0.03	4.5771	4.7292	0.00	33.3506
Solar 2	4.0676	0.02	4.0023	4.1110	0.00	32.8586
Solar 3	4.3423	0.05	4.2522	4.5134	0.00	50.5211
Solar 4	4.5632	0.03	4.5156	4.6595	0.00	19.6510
Solar 5	3.9274	0.04	3.8489	4.0032	0.00	15.9993
Solar 6	4.1735	0.05	4.0782	4.3222	0.00	15.9998

[Report]

3. Round Robin

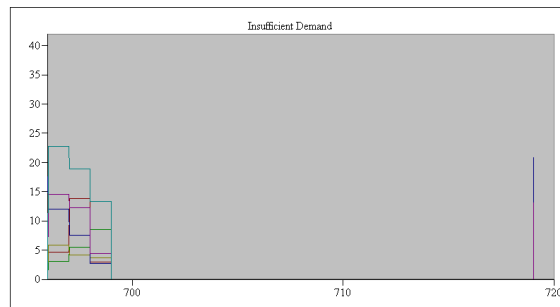
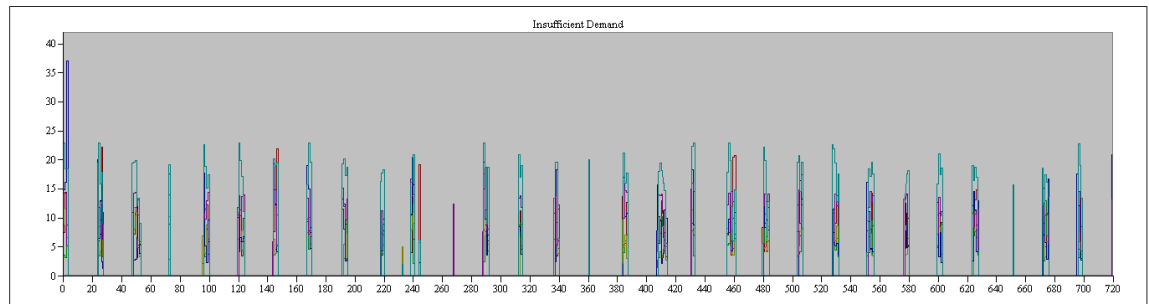
- BES level



[BES level 분포 - 720 시간 분포(상), 24 시간 분포(하)]

BES 전력 알고리즘 시나리오 분석

- Insufficient Demand



[Insufficient Demand 분포 - 720 시간 분포(상), 24 시간 분포(하)]

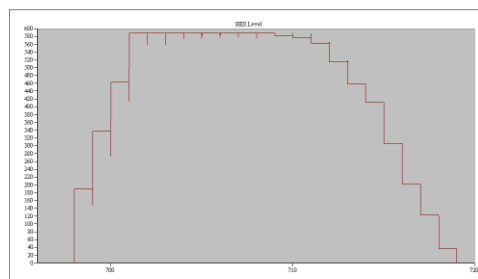
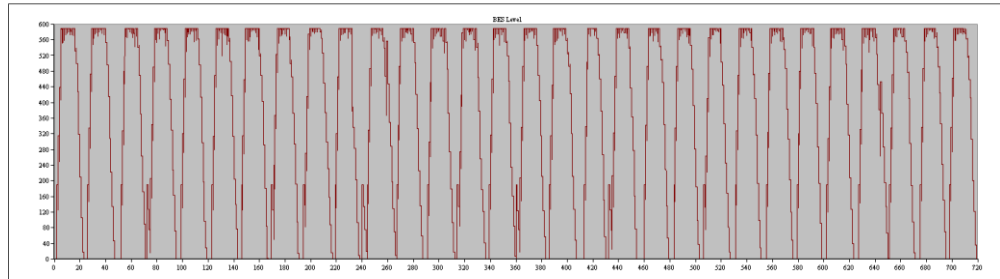
- Report

Counter					Time Persistent					
Count	Average	HalfWidth	Minimum	Maximum	Variable	Average	HalfWidth	Minimum	Maximum	Minimum
BES Discharge 1	2652.26	102.07	2195.00	2957.54	BES Level	376.01	2.82	371.15	383.35	0.00
BES Discharge 2	2893.90	68.41	2674.00	2968.00	Charge per hour	0.02142979	0.00	0.01941785	0.02363927	0.00
BES Discharge 3	4178.20	75.53	4082.00	4375.00	Price	28.2629	0.27	27.7957	29.0375	15.0476
BES Discharge 4	4187.60	130.08	3838.00	4538.00	Usage					
BES Discharge 5	4615.30	41.07	4535.00	4693.00	None					
BES Discharge 6	5254.20	112.87	5057.00	5501.00	Demand 1	10.1894	0.19	9.8584	10.8911	1.0003
Buy Amount 1	681.70	70.12	850.00	1134.00	Demand 2	7.6383	0.10	7.3816	7.9437	1.0189
Buy Amount 2	702.40	35.24	627.00	784.00	Demand 3	9.9811	0.11	9.8252	10.2622	1.0012
Buy Amount 3	888.60	38.38	831.00	947.00	Demand 4	10.2414	0.14	10.0226	10.7203	1.0128
Buy Amount 4	963.80	65.57	873.00	1168.00	Demand 5	12.1419	0.06	12.0087	12.2627	1.1345
Buy Amount 5	1283.20	53.69	1126.00	1371.00	Demand 6	13.1173	0.14	12.7230	13.3596	2.0020
Buy Amount 6	1878.40	78.59	1740.00	2128.00	Insufficient Demand 1	1.4932	0.10	1.2953	1.7137	0.00
Charge amount when cheap	27079.30	419.52	26533.00	34001.00	Insufficient Demand 2	1.0941	0.05	0.9751	1.2181	0.00
Cost 1	32852.50	1.920	28962.00	36304.00	Insufficient Demand 3	1.0912	0.06	0.9823	1.2347	0.00
Cost 2	24558.00	1.617	22522.00	28743.00	Insufficient Demand 4	1.5123	0.10	1.3305	1.8006	0.00
Cost 3	24538.20	1.676	21717.00	29602.00	Insufficient Demand 5	1.9359	0.08	1.6967	2.0705	0.00
Cost 4	34319.40	1.899	30870.00	40019.00	Insufficient Demand 6	2.9378	0.11	2.5857	3.1663	0.00
Cost 5	42356.20	1.675	38587.00	45607.00	Solar 1	4.6568	0.03	4.5771	4.7292	0.00
Cost 6	66012.50	2.377	58453.00	69946.00	Solar 2	4.0676	0.02	4.0023	4.1110	0.00
Cost when cheap	542208.50	11.080	526797.00	575941.00	Solar 3	4.3423	0.05	4.2522	4.5134	0.00
Leftover 1	219.40	28.73	273.00	378.00	Solar 4	4.5632	0.03	4.5156	4.6595	0.00
Leftover 2	528.60	18.11	486.00	563.00	Solar 5	3.9274	0.04	3.8489	4.0032	0.00
Leftover 3	534.90	33.35	444.00	594.00	Solar 6	4.1735	0.05	4.0782	4.3222	0.00
Leftover 4	629.30	31.78	548.00	685.00						
Leftover 5	14.5000	3.49	7.0000	21.0000						
Leftover 6	277.30	25.73	206.00	321.00						
Solar Charge 1	240.80	29.18	187.00	287.00						
Solar Charge 2	314.00	19.55	280.00	363.00						
Solar Charge 3	145.70	15.85	113.00	178.00						
Solar Charge 4	228.40	18.75	191.00	273.00						
Solar Charge 5	5.0000	2.19	1.0000	11.0000						
Solar Charge 6	348.20	19.55	301.00	399.00						
Total Cost Counter	767793.49	8.234	756362.00	791266.00						
Total Cost when insufficient	225584.99	7.961	205325.00	241995.00						
Total Demand Counter	42000.00	220.74	41577.00	42543.00						
Total Demand when insufficient	6838.19	204.71	5919.00	7283.00						
Total Discharge Amount	24611.49	329.13	24127.00	25681.00						
Total Generated Solar Counter	16789.59	69.49	16627.00	16943.00						
Total Solar Charge	1281.90	58.99	1159.00	1432.00						

[Report]

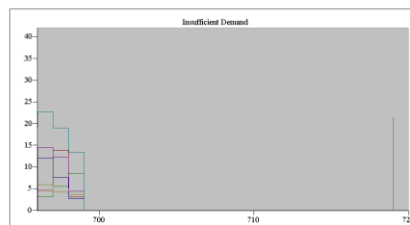
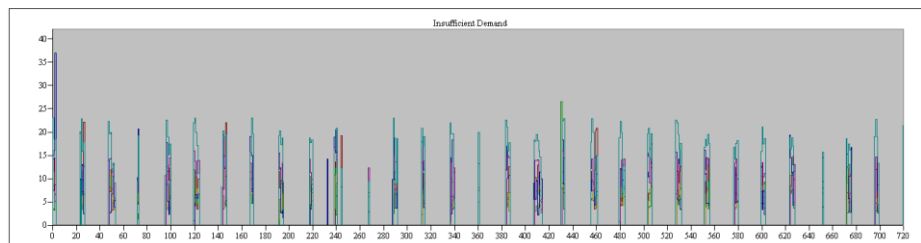
3. SJF (Shortest Job First)

- BES level



[BES level 분포 - 720 시간 분포(상), 24 시간 분포(하)]

- Insufficient Demand



[Insufficient Demand 분포 - 720 시간 분포(상), 24 시간 분포(하)]

BES 전력 알고리즘 시나리오 분석

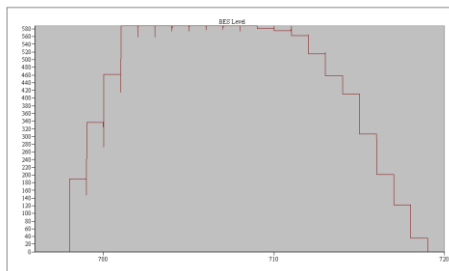
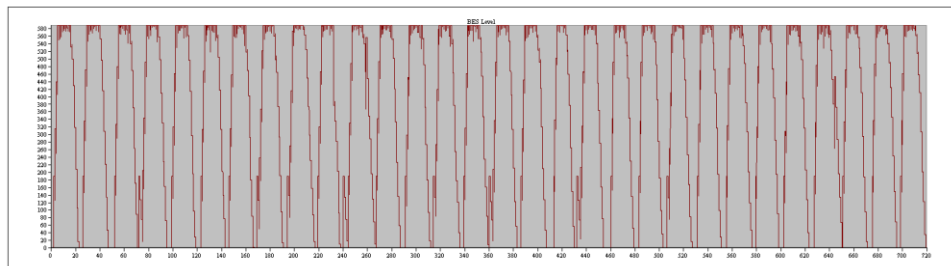
- Report

Counter						Time Persistent					
Count	Average	HalfWidth	Minimum	Maximum	Average	Variable	Average	HalfWidth	Minimum	Maximum	Minimum
BES Discharge 1	3709.10	97.85	3474.00	3895.00		BES Level	373.93	2.73	355.39	381.77	0.00
BES Discharge 2	2844.50	69.19	2740.00	2937.00		Charge per hour	0.00468171	0.00	0.00323390	0.00561435	0.00
BES Discharge 3	4221.60	73.59	4136.00	4442.00		Price	28.2629	0.27	27.7957	29.0375	15.0476
BES Discharge 4	4029.10	121.33	3744.00	4472.00		Usage					
BES Discharge 5	4584.50	38.40	4517.00	4667.00		None					
BES Discharge 6	5045.70	116.76	4805.00	5313.00		Demand 1	10.1894	0.19	9.8564	10.6917	1.0003
Buy Amount 1	939.50	79.16	910.00	1102.00		Demand 2	7.6383	0.10	7.3816	7.9437	1.0189
Buy Amount 2	665.80	36.16	583.00	751.00		Demand 3	9.9811	0.11	9.8252	10.2622	1.0012
Buy Amount 3	659.70	35.81	562.00	734.00		Demand 4	10.2414	0.14	10.0226	10.7203	1.0128
Buy Amount 4	1063.20	73.57	917.00	1231.00		Demand 5	12.1419	0.06	12.0087	12.2627	1.1345
Buy Amount 5	1310.20	53.59	1150.00	1385.00		Demand 6	13.1173	0.14	12.7230	13.3596	2.0020
Buy Amount 6	2186.00	81.85	1911.00	2313.00		Insufficient Demand 1	1.4146	0.11	1.2362	1.7042	0.00
Charge amount when cheap	28157.40	424.71	27506.00	29511.00		Insufficient Demand 2	1.0374	0.05	0.9134	1.1669	0.00
Cost 1	30816.10	2,308.48	27006.00	35113.00		Insufficient Demand 3	1.0316	0.06	0.8775	1.1524	0.00
Cost 2	23242.50	1,172.08	19899.00	25514.00		Insufficient Demand 4	1.6143	0.11	1.3923	1.9206	0.00
Cost 3	22915.20	1,154.28	19550.00	24936.00		Insufficient Demand 5	1.9763	0.08	1.7327	2.0955	0.00
Cost 4	37593.80	2,364.90	32764.00	42536.00		Insufficient Demand 6	3.2139	0.12	2.8363	3.4272	0.00
Cost 5	44352.20	1,739.88	39045.00	48851.00		Solar r	4.6568	0.03	4.5771	4.7292	0.00
Cost 6	73382.00	2,354.51	66423.00	77224.00		Solar 1	4.0676	0.02	4.0023	4.1110	0.00
Cost when cheap	983672.10	11,116.84	848498.00	997924.00		Solar 2	4.2423	0.05	4.2522	4.5124	0.00
Leftover 1	511.00	32.42	434.00	593.00		Solar 3	4.5632	0.03	4.5156	4.6595	0.00
Leftover 2	832.30	24.35	795.00	911.00		Solar 4	3.9274	0.04	3.8489	4.0032	0.00
Leftover 3	699.60	41.53	600.00	786.00		Solar 5	4.1735	0.05	4.0782	4.3222	0.00
Leftover 4	825.40	39.58	765.00	988.00							
Leftover 5	19.6000	4.78	10.0000	30.0000							
Leftover 6	603.80	31.10	530.00	687.00							
Solar Charge 1	78.8000	14.87	44.0000	113.00							
Solar Charge 2	54.4000	12.35	24.0000	77.0000							
Solar Charge 3	11.4000	4.89	2.0000	20.0000							
Solar Charge 4	62.3000	10.48	36.0000	87.0000							
Solar Charge 5	9.9000	0.79	0.00	3.0000							
Solar Charge 6	73.6000	9.96	48.0000	93.0000							
Total Cost Counter	795213.80	9,880.04	762427.00	897108.00							
Total Cost when insufficient	231541.80	8,441.35	209162.00	247828.00							
Total Demand Counter	42090.00	220.74	41977.00	42543.00							
Total Demand when insufficient	6795.40	299.88	6039.00	7439.00							
Total Discharge Amount	24434.50	339.34	23954.00	25551.00							
Total Generated Solar Counter	18789.50	60.49	18627.00	18943.00							
Total Solar Charge	281.60	37.68	194.00	343.90							

[Report]

4. Weighted Solar

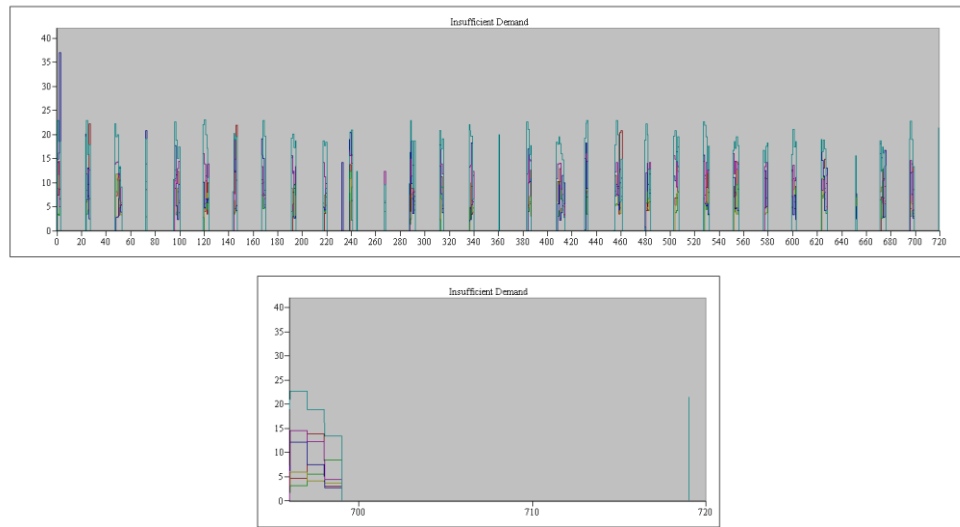
- BES level



[BES level 분포 - 720 시간 분포(상), 24 시간 분포(하)]

BES 전력 알고리즘 시나리오 분석

- Insufficient Demand



[Insufficient Demand 분포 - 720 시간 분포(상), 24 시간 분포(하)]

- Report

Counter						
Count	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average		
BES Discharge 1	3752.70	108.72	3498.00	3967.00		
BES Discharge 2	2865.40	67.62	2749.00	3006.00		
BES Discharge 3	4209.40	67.54	4131.00	4296.00		
BES Discharge 4	4088.00	118.70	3829.00	4473.00		
BES Discharge 5	4519.90	31.83	4451.00	4582.00		
BES Discharge 6	5002.40	116.81	4777.00	5291.00		
Buy Amount 1	890.50	75.86	759.00	1043.00		
Buy Amount 2	648.00	32.31	564.00	716.00		
Buy Amount 3	670.90	32.32	603.00	758.00		
Buy Amount 4	1010.80	66.14	877.00	1196.00		
Buy Amount 5	1367.90	50.51	1238.00	1459.00		
Buy Amount 6	2204.70	85.90	1931.00	2360.00		
Charge amount when cheap	28157.40	424.71	27556.00	29511.00		
Cost 1	29195.80	2,070.93	25029.00	32732.00		
Cost 2	22262.40	978.41	19654.00	23987.00		
Cost 3	23417.60	1,059.93	20961.00	26015.00		
Cost 4	34918.60	2,069.97	31193.00	39989.00		
Cost 5	46704.00	1,612.93	43197.00	49106.00		
Cost 6	75041.60	2,494.40	67444.00	78818.00		
Cost when cheap	563672.10	11,119.84	548409.00	597924.00		
Leftover 1	520.70	32.47	438.00	598.00		
Leftover 2	843.60	27.90	803.00	932.00		
Leftover 3	695.90	43.12	594.00	767.00		
Leftover 4	823.30	40.21	759.00	912.00		
Leftover 5	19.7000	4.82	10.0000	30.0000		
Leftover 6	592.10	31.60	508.00	632.00		
Solar Charge 1	70.7000	15.66	41.0000	112.00		
Solar Charge 2	44.9000	12.89	8.0000	69.0000		
Solar Charge 3	11.4000	4.16	2.0000	19.0000		
Solar Charge 4	64.2000	11.67	33.0000	86.0000		
Solar Charge 5	0.9000	0.79	0.00	3.0000		
Solar Charge 6	93.0000	12.28	69.0000	124.00		
Total Cost Counter	795212.10	5,879.37	782428.00	807105.00		
Total Cost when insufficient	231540.00	8,441.28	209181.00	247828.00		
Total Demand Counter	42000.00	220.74	41577.00	42543.00		
Total Demand when insufficient	6792.80	291.62	6033.00	7437.00		
Total Discharge Amount	24437.80	339.22	23956.00	25553.00		
Total Generated Solar Counter	16789.50	69.49	16627.00	16943.00		
Total Solar Charge	285.10	38.36	196.00	347.00		

Time Persistent						
Variable	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
BES Level	373.93	2.73	368.89	381.77	0.00	588.00
Charge per hour	0.00468171	0.00	0.00323390	0.00561435	0.00	24.6415
Price	28.2629	0.27	27.7957	29.0375	15.0476	221.20

Usage						
None	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Demand 1	10.1894	0.19	9.8564	10.6917	1.0003	346.96
Demand 2	7.6383	0.10	7.3816	7.9437	1.0189	34.1765
Demand 3	9.9811	0.11	9.8252	10.2622	1.0012	74.1571
Demand 4	10.2414	0.14	10.0226	10.7203	1.0128	185.25
Demand 5	12.1419	0.06	12.0087	12.2627	1.1345	37.9005
Demand 6	13.1173	0.14	12.7230	13.3596	2.0020	37.6862
Insufficient Demand 1	1.3553	0.11	1.1561	1.5751	0.00	176.86
Insufficient Demand 2	1.0110	0.05	0.8775	1.1142	0.00	18.7391
Insufficient Demand 3	1.0491	0.05	0.9415	1.1883	0.00	17.7121
Insufficient Demand 4	1.5381	0.10	1.3356	1.8107	0.00	38.1523
Insufficient Demand 5	2.0627	0.09	1.8659	2.1961	0.00	20.6972
Insufficient Demand 6	3.2718	0.13	2.8666	3.4967	0.00	24.3515
Solar 1	4.6568	0.03	4.5771	4.7292	0.00	33.3506
Solar 2	4.0676	0.02	4.0023	4.1110	0.00	32.8586
Solar 3	4.3423	0.05	4.2522	4.5134	0.00	50.5211
Solar 4	4.5632	0.03	4.5156	4.6595	0.00	19.6510
Solar 5	3.9274	0.04	3.8489	4.0032	0.00	15.9993
Solar 6	4.1735	0.05	4.0782	4.3222	0.00	15.9998

[Report]

5. 결론

분배 정책	Total Cost	house1	house2	house3	house4	house5	house6
No Capacity	\$1,022,641	\$136,403	\$119,337	\$160,039	\$171,457	\$188,532	\$241,739
No Algorithm	\$770,591	\$128,432	\$128,432	\$128,432	\$128,432	\$128,432	\$128,432
SJF	\$795,214	\$124,561	\$117,188	\$116,860	\$130,999	\$138,297	\$167,307
Round-Robin	\$767,793	\$123,221	\$114,874	\$114,906	\$124,687	\$133,724	\$156,471
Weighted Solar	\$795,212	\$123,141	\$116,207	\$117,363	\$128,864	\$140,649	\$168,987

효율성

- 각 분배 정책에 따라 전체 가구의 Total Cost로 비교
- 효율성: No Algorithm > Round-Robin > Weight Solar > SJF > No Capacity

공정성

- No Capacity(=No BES)의 각 가구의 비용과 정책 별 각 가구의 비용의 비율을 대응되게 비교하여 최소 비율이 가장 큰 정책을 가장 공정한 정책

	No_Algorithm	SJF	Round_Robin	Weight_Solar
house1	7971	11842	13182	13262
house2	-9095	2149	4463	3130
house3	31607	43179	45133	42676
house4	43025	40458	46770	42593
house5	60100	50235	54808	47883
house6	113307	74432	85268	72752

< No Capacity(기준) – 정책: No BES 의 각 가구별 비용(기준)에서 각 정책 별 가구별 비용을 뺀 값 >

- No Algorithm의 경우는 house2 에서 음수 값이 BES 없을 때(기준) 보다 비용이 더 나오는 상황이 발생하므로 공정성 비교에서 후 순위로 배치

	SJF	Round_Robin	Weight_Solar
house1	1.095070	1.106979	1.107698
house2	1.018338	1.038851	1.026935
house3	1.369493	1.392782	1.363624
house4	1.308842	1.375099	1.330527
house5	1.363240	1.409859	1.340443
house6	1.444883	1.544944	1.430518

< No Capacity(기준) / 정책: No BES 의 각 가구별 비용(기준)에서 각 정책 별 가구별 비용을 나눈 값 >

```
min(round(final_reult1['Weight_Solar'], 3))
```

1.027

```
min(round(final_reult1['SJF'], 3))
```

1.018

```
min(round(final_reult1['Round_Robin'], 3))
```

1.039

- 공정성: Round-Robin > Weight-Solar > SJF > No Algorithm

➔ 위 분석 결과를 통해 Round-Robin 분배 정책을 현실에서 적용할 수 있다고 판단된다. Round-Robin 분배 정책은 자원을 순환하면서 할당하기 때문에 각 자원이 균등하게 활용될 수 있다. 이는 시스템의 효율성을 향상시키고 자원의 낭비를 최소화할 수 있다. 또한 여러 작업을 병렬로 처리하는 데 적합한 방법으로 구현과 유지보수가 비교적 용이하다. 이는 현실에서의 시스템 구현 및 업데이트 과정에서 시간과 비용을 절감할 수 있는 장점으로 이어진다.

[한계점]

- 데이터의 지역적 특성상 Texas 라는 미국 데이터이기에 현 한국에 도입하기는 불가능
- 한국 평균 가구의 전력 소비량은 하루 4kW 인 반면 데이터는 시간당 4kW 를 쓰는 구간도 빈번히 발생
- BES 가 비용 측면에서 효율적임을 시뮬레이션을 통해 알 수 있으나, SJF 를 제외한 전력 분배 알고리즘들은 적용 전보다 비효율적임을 확인함
- 공정성 측면에서 전력 분배 알고리즘들이 공정하지 못하다는 것을 확인

[개선방안]

- 1 시간 단위가 아닌 세분화된 단위의 데이터로 작업 요함
- Weighted Solar 알고리즘 내 계산식에서 정밀한 계수 값을 구한 뒤, 이를 적용하여 각 가구가 잉여 태양광 발전에 공정하게 개선