서부발전연구소

연료전지 최신기술동향 및 인수성능시험

2022. 7. 13.

선임전문원 신 일 수

국민행복을 창조하는
에너지기업
한국서부발전

Beyond Energy,
Create Happiness

목 차

I. 연료전지 최신기술동향

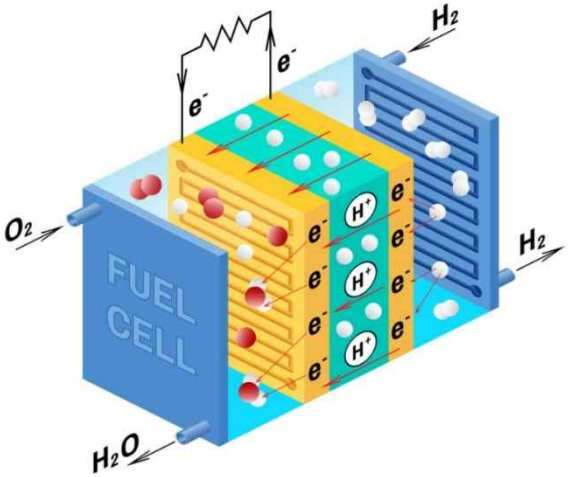
II. 연료전지 인수성능시험

III. 연료전지 성능 Case Study

I. 연료전지 최신기술동향

1. 연료전지 개요

연료전지는
수소와 산소의 화학에너지를
직접 전기에너지로 변환시키는 기술



연료전지 발전원리

Used with permission from Bloom Energy.

Component Modularity

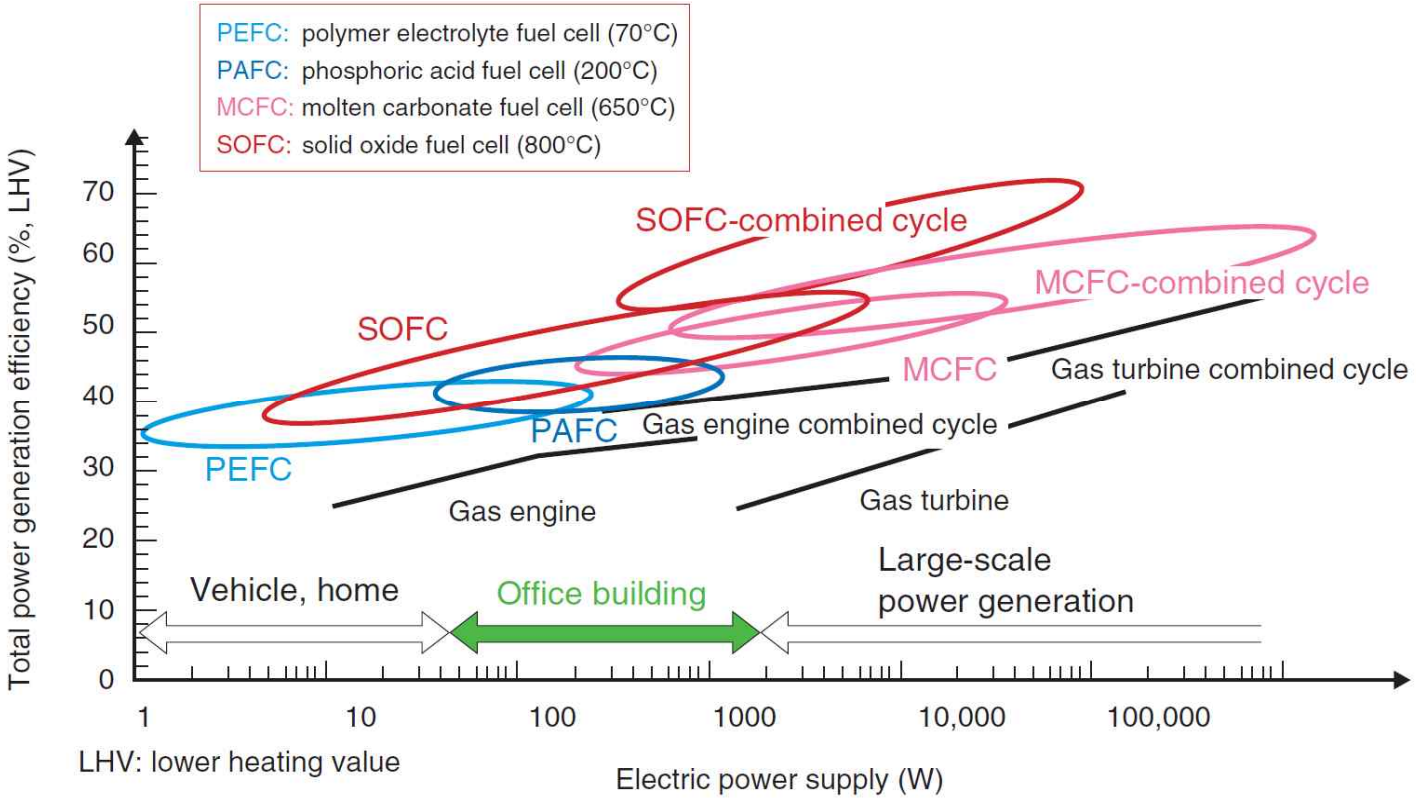
연료전지는 '전지'하면 떠올리게 되는 배터리와는 달리 **전력을 생산할 수 있는 발전설비**이다.
배터리는 전기를 이용해서 충전을 했을 때에만 사용이 가능한 저장시스템이지만 연료전지는 천연가스,
석유가스와 같은 연료와 산소의 직접 반응을 통해 전력을 생산하는 시스템이다.

2. 연료전지 종류

구분	전해질	동작 온도 ℃	용도	특징
AFC	알카리	120	우주발사체 전원	-
PAFC	인산염	250	중형건물 (200kW)	CO내구성↑ 열병합대응
MCFC	탄산염	700	중·대형건물 (100kW~)	효율 높음, 내부개질, 열병합대응
SOFC	세라믹	1,200	소·중·대용량 발전(1kW~)	효율 높음, 내부개질, 복합발전 가능
PEMFC	이온 교화막	100	가정·상업용 (1~10kW)	저온작동, 고출력밀도
DMFC	이온 교화막	100	소형이동 (1kW이하)	저온작동, 고출력밀도

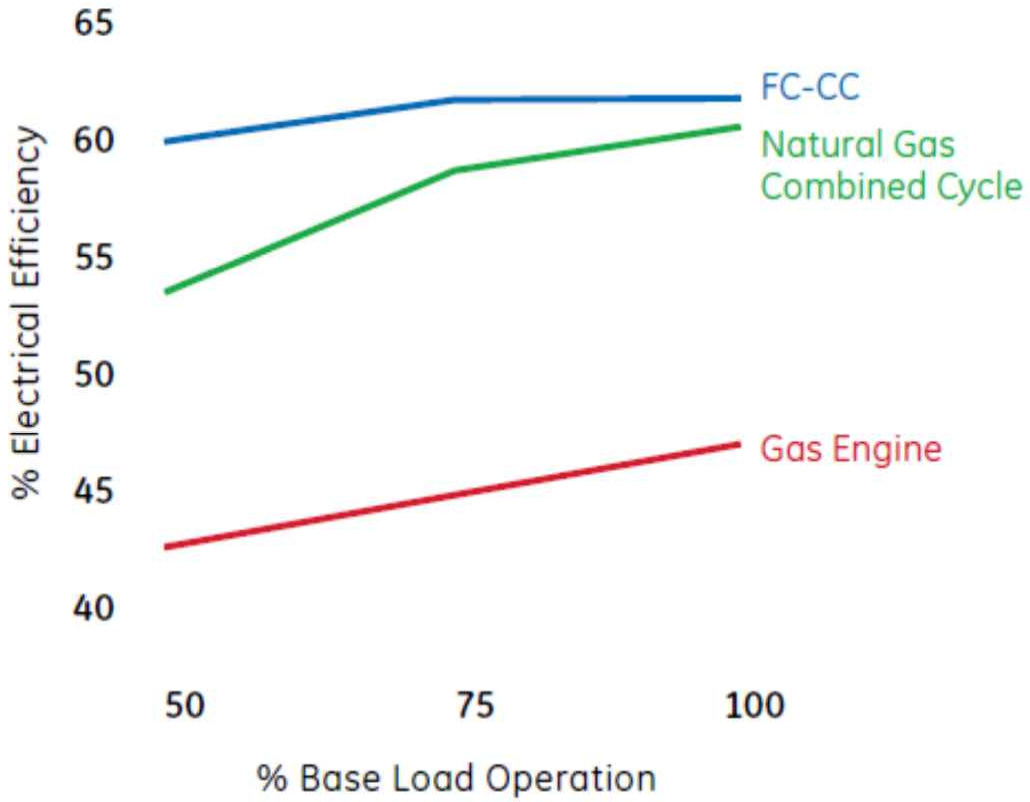
연료전지는 작동 온도와 주연료의 형태에 따라 알카리형(AFC), **인산염형**(PAFC), **용융탄산염형**(MCFC), **고체전해질형**(SOFC), **고분자 전해질형**(PEMFC) **등으로 구분된다**.

3. 연료전지 성능



연료전지는 하나의 전환과정(수소+산소 전기+물)만을 통해 전력을 생산하기 때문에
'연료연소-열에너지흡수-터빈회전-발전' 등의 여러 프로세스를 거치며 단계마다 손실이 발생하는
화력발전보다 전반적으로 높은 열효율을 나타내고 있다.

3. 연료전지 성능



Copyright of General Electric Company.

연료전지와 복합발전을 연계한 FC-CC(Fuel Cell-Combined Cycle)**은 일반복합보다 더 높은 효율을 유지할 수 있으며, 특히 저부하 구간에서 성능저하가 상대적으로 적은 특성을 가지고 있음.**

4. 발전형태에 따른 성능비교

Fuel Cost of Generation of Various Fossil-Fueled Generation Types as a Fuel Cost in $/MWh

	Heat Rate [LHV] (Btu/kWh)	Conversation Efficiency (%)	$4/ MMBtu	$6/ MMBtu	$8/ MMBtu	$10/ MMBtu	$12/ MMBtu
Existing Coal Plant (US Average)	9,609	36%	$40	$61	$81	$101	$121
Gas-Fuelled Reciprocating Engine (US Average)	8,632	40%	$38	$57	$77	$96	$115
Existing Natural Gas-fired Gas Turbine Combined Cycle (US Average)	6,913	49%	$31	$46	$61	$77	$92
Solid Oxide Fuel Cell— Simple Cycle	6,690	51%	$30	$45	$59	$74	$89
New Natural Gas-fired Gas-Turbine Combined Cycle Plant	5,503	62%	$24	$37	$49	$61	$73
GE-Fuel Cells FC-CC*	5,249	65%	$23	$35	$47	$58	$70

Copyright of General Electric Company.

5. 신재생에너지 3025 Road Map

한국서부발전은 "**서부발전 신재생에너지 3025 로드맵**"에 따라 2030년까지 6조 2,000억 원을 신재생 발전설비 확충에 투자하여 설비용량 611만 2,000kW을 달성함으로써, **신재생에너지 발전량 비중을 2030년까지 25%로 끌어올리는 목표**를 수립했다. 이는 정부의 "재생에너지 3020 계획"(2030년까지 재생에너지 비중을 20%로 확대)보다 한발 더 나아간 것이다.

특히 이 중 연료전지 사업은 집단에너지 사업과 연계한 발전사업, 지자체 및 공공기관 유휴부지 활용사업, 도심 및 마을형 연료전지 융복합사업, 스마트팜 연계형 연료전지 사업 등의 형태로 추진하고 있다.

II. 연료전지 인수성능시험

1. 연료전지 건설현황

PAFC(Phosphoric Acid Fuel Cell)

화성 남양1	20.24 MW	'21.06. 준공	단층형
대전 학하	6.16 MW	'21.12 준공	복층형
화성 남양2	19.80 MW	'23.02. 준공예정	복층형
안산	20.24 MW	추진 중	단층형
화성 향남	9.68 MW	추진 중	단층형

SOFC(Soild Oxide Fuel Cell)

의왕	9.9 MW	'21.08. 준공	단층형
익산 1단계	15.0 MW	'22.04. 준공	복층형
이천	9.6 MW	'22.10. 준공예정	단층형
광주 초월	9.6 MW	'23.02. 준공예정	단층형
광주 광산	8.4 MW	'23.01. 준공예정	단층형
문경	15.0 MW	'23.08. 준공예정	단층형
익산 2단계	15.0 MW	추진 중	복층형
천안	9.0 MW	추진 중	단층형
대구	3.0 MW	추진 중	단층형

화성남양(PAFC, 20.24MW)

의왕(SOFC, 9.9MW)

대전학하(PAFC, 6.16MW)

익산1단계(SOFC, 15.0MW)

2. 연료전지 인수성능시험

성능보증항목

1) 발전효율(%, 송전단, LHV 기준)
2) 발전출력(kW)
3) 용수 소모량(㎥/h)
4) 열 생산량(Gcal/h, PAFC에만 해당)

국제표준

1) Fuel Cell Power System Performance (ASME PTC 50)
2) NG Fuel Flow(ASME MFC-4M)
3) IAPWS-IF97
4) 연료전지 인수성능시험 절차서

성능시험방법

1) 성능시험은 본시험 1회 실시
2) 시험 진행 출력은 정격출력 고정
3) 시험 시작 전에 충분히 열적으로 평형상태가 유지되도록 함
4) 시험시간은 72 시간 연속으로 함

성능시험조건

1) Natural Gas Fuel
2) Continuous Base Load Operating
3) New & Clean Condition

2. 연료전지 인수성능시험

성능시험 계측방법

1) 발전출력(송전단): 전력거래용 전력량계

2) 연료소모량: NG정압기 내부 유량계

3) 용수소모량: Make-up Water 유량계

4) 열출력: DH Line Main 열량계

*위 측정 장비에 대하여 KOLAS(혹은 국외 인증기관) 인증을 받은 장비를 사용함(교정성적서 제출 필수)

성능시험 결과계산

연료전지 효율(%)=

$$= \frac{\text{평균발전량(kw)} * 100(\%)}{\text{LHV(kcal/Nm}^3\text{)} * \text{가스 사용량(Nm}^3\text{/hr)}}$$

$$= \frac{3600 * \text{평균발전량} * 100(\%)}{4.1868 * \text{LHV} * \text{가스사용량}}$$

연료전지 평균발전량(kw)=

$$= \frac{\text{종료시점 전력 적산값(Kwh)} - \text{종료시점 전력 적산값(Kwh)}}{72\text{hr}}$$

연료전지 가스 사용량(Nm^3/hr)=

$$= \frac{\text{종료시점 전력 적산값(Nm}^3\text{)} - \text{종료시점 연료 적산값(Nm}^3\text{)}}{72\text{hr}}$$

1) 연료전지 효율계산

* 발전량: 소내전력 소비량, TR & Cable Loss가 포함된 송전단 기준임.

* 연료소모량: LHV = 9,500 kcal/Nm^3 기준, NG 성분 분석은 가스공급사 데이터적용

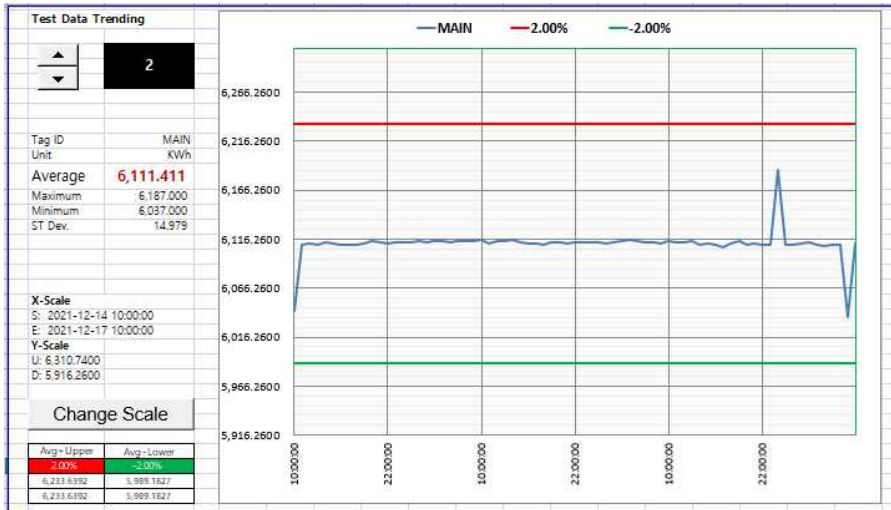
2) 용수 소모량 계산

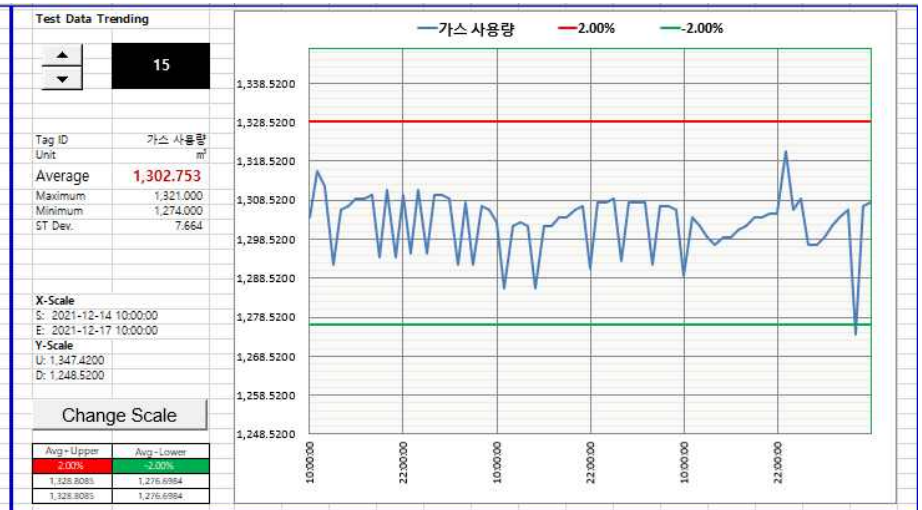
용수 소모량(m3) = 종료시점 용수 적산값(m3) - 시작지점 용수 적산값(m3)

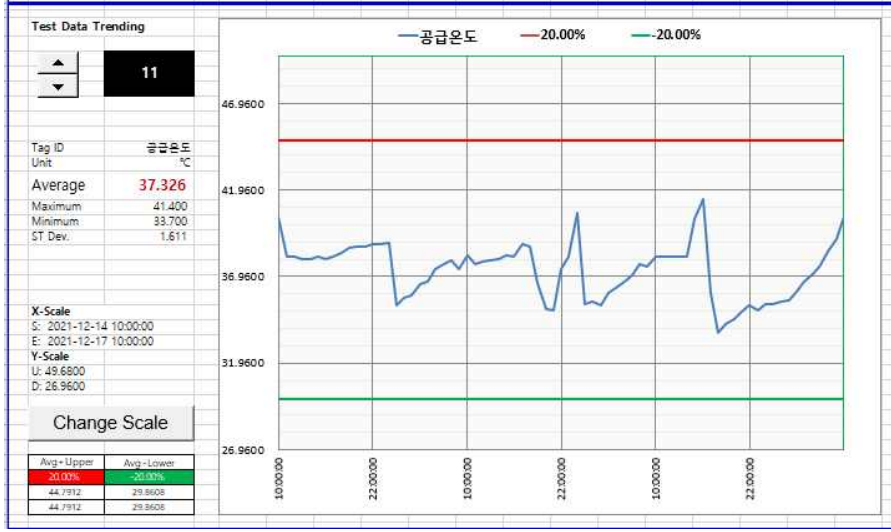
3) 열 생산량 계산

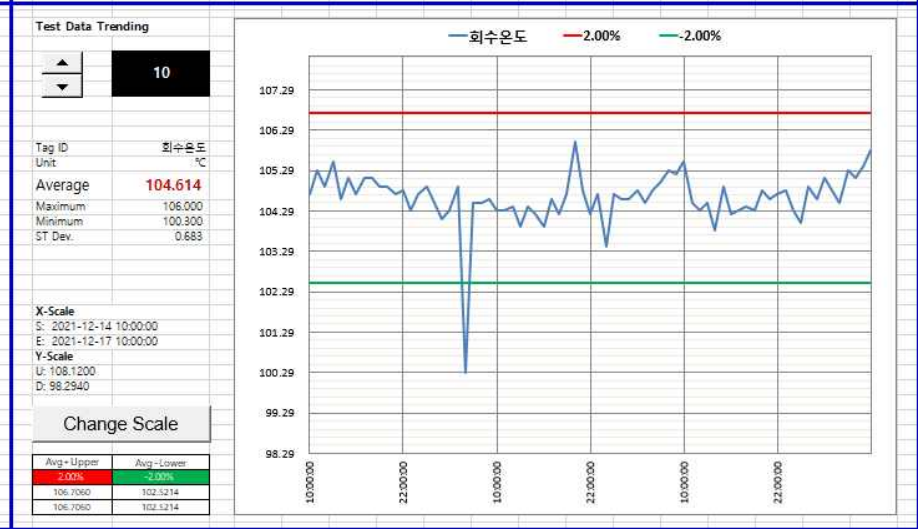
열 생산량(Gcal) = 종료시점 열 적산값(Gcal) - 시작지점 열 적산값(Gcal)

3. 인수성능시험 사례(PAFC)

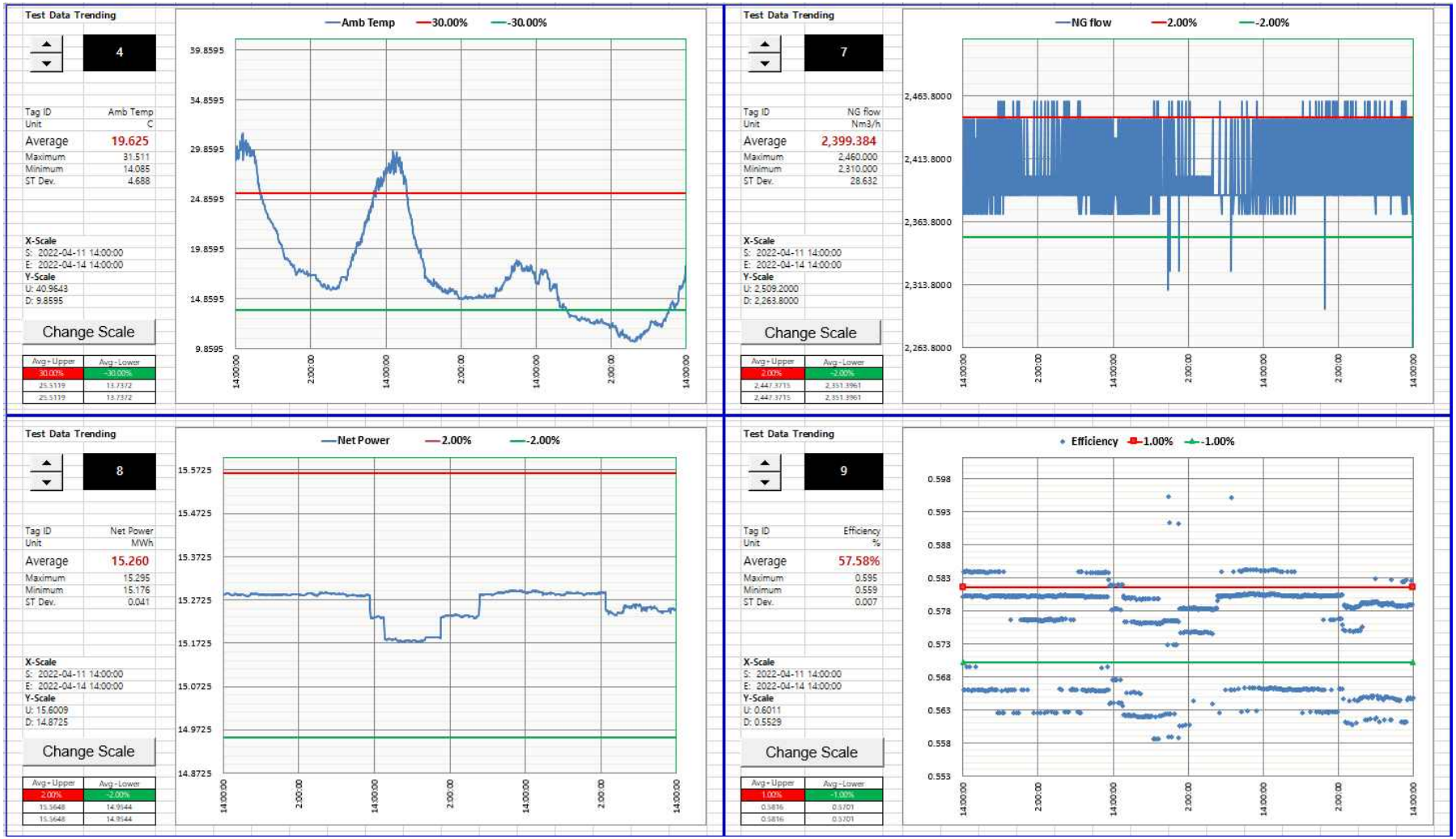








3. 인수성능시험 사례(SOFC)



3. 인수성능시험 사례

인수성능시험 I

1) 시험 일정

시험일자	시험부하
'21.12.14(화) 10:00 ~ 12.17(금) 10:00 (72hr)	정격 출력 (440kW * 14대)

2) 시험 참여: 서부발전연구소, 신재생건설사업단, 연료전지 제작사

3) 보증 항목: 발전효율(LHV 기준), 발전출력, 열생산량, 용수소모량 등

5.1.2 성능시험 결과(PAFC)

시험일자	단위	보증값	시험값	결과
발전효율(송전단)	%	≥ 38.70	43.36	만족
발전출력	kW	≥ 5,793	6,084	만족
총 발전량	kWh	≥ 417,089	438,036	만족
열 생산량	Gcal/hr	≥ 2.52	4.44	만족
총 열 생산량	Gcal	≥ 181	320	만족
용수소모량	㎥/h	≤ 3.2	0.0	만족
총 용수소모량	㎥	≤ 229	0.0	만족

인수성능시험 II

1) 시험 일정

시험일자	시험부하
'22.4.11(월) 14:00 ~ 4.14(목) 14:00 (72hr)	정격 출력 (300kW * 50대)

2) 시험 참여: 서부발전연구소, 신재생건설사업단, 연료전지 제작사

3) 보증 항목: 발전효율(LHV 기준), 발전출력, 용수소모량 등

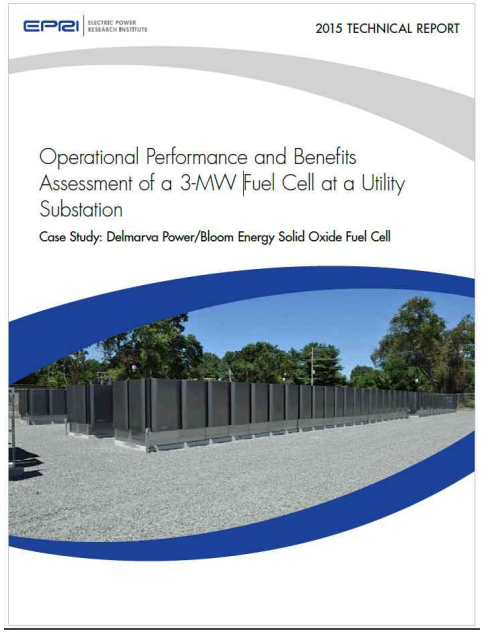
5.2.2 성능시험 결과(SOFC)

시험일자	단위	보증값	시험값	결과
총 발전량	kWh	≥ 984,204	1,077,800	만족
발전출력	kW	≥ 14,420	14,969	만족
총 연료소모량	Nm³	≤ 185,019	172,903	만족
연료소모량	Nm³/h	≤ 2,570	2,401	만족
발전효율(송전단)	%	≥ 53.7	57.44	만족

III. Fuel Cell Performance Case Study

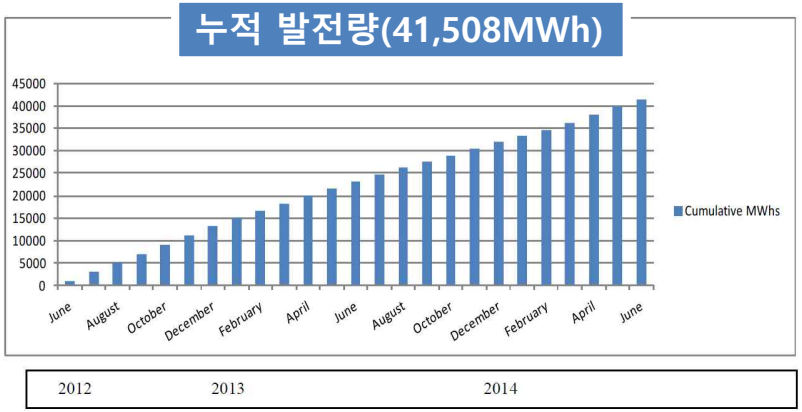
1. Fuel Cell Performance Case Study

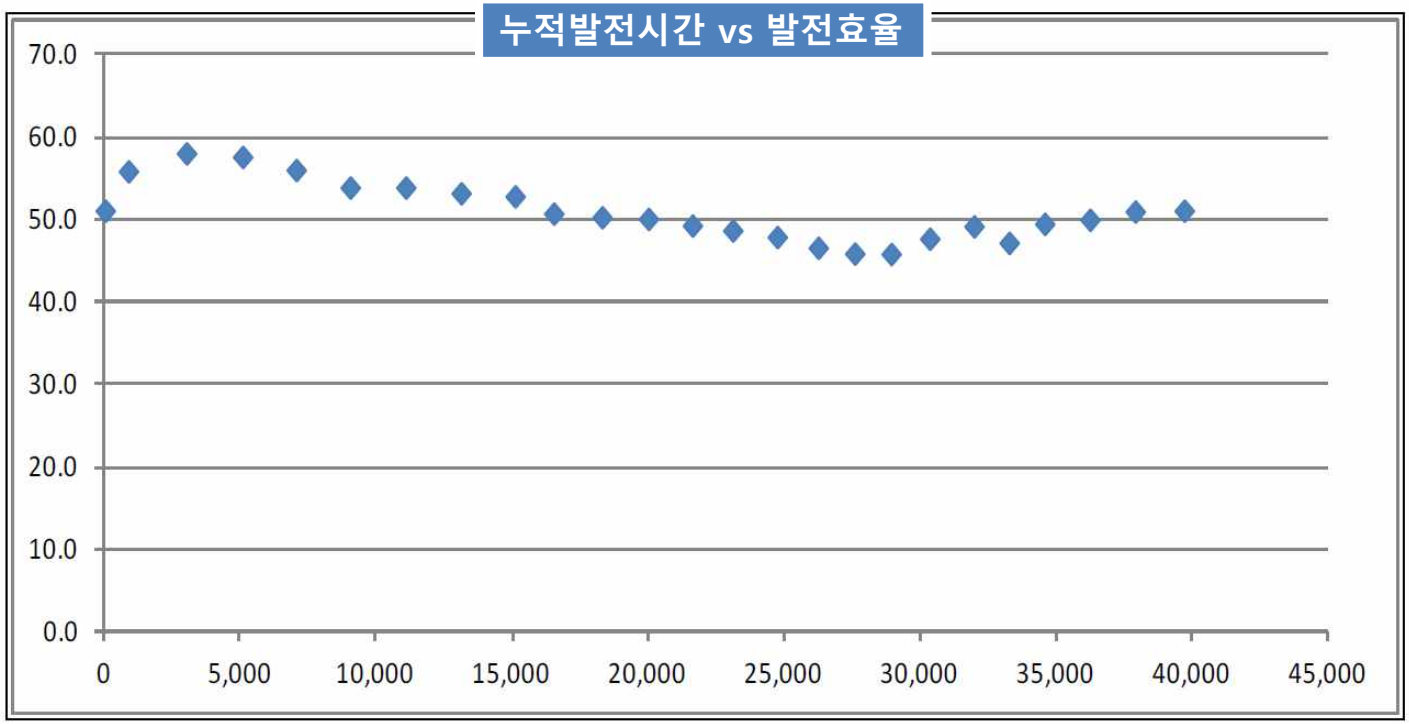
3MW급 연료전지의 24개월 간 실제 운영데이터를 취득한 후 연료전지 성능열화 등을 분석함(EPRI 2015 Technical Report)



- Electricity production: 41,508 MWh
- Cumulative heat rate: 7,345 Btu/kWh HHV (high heating value) (approximately 46.5% HHV)
- Average capacity factor: 78.3%
- Average availability: 99.13%
- Average grid/trip events: 2.7/month
- Beginning-of-life efficiency: 58.1% LHV (lower heating value) in June 2012; 51.1% LHV in June 2014 (Note: some fuel cell stacks were upgraded during the reporting period).

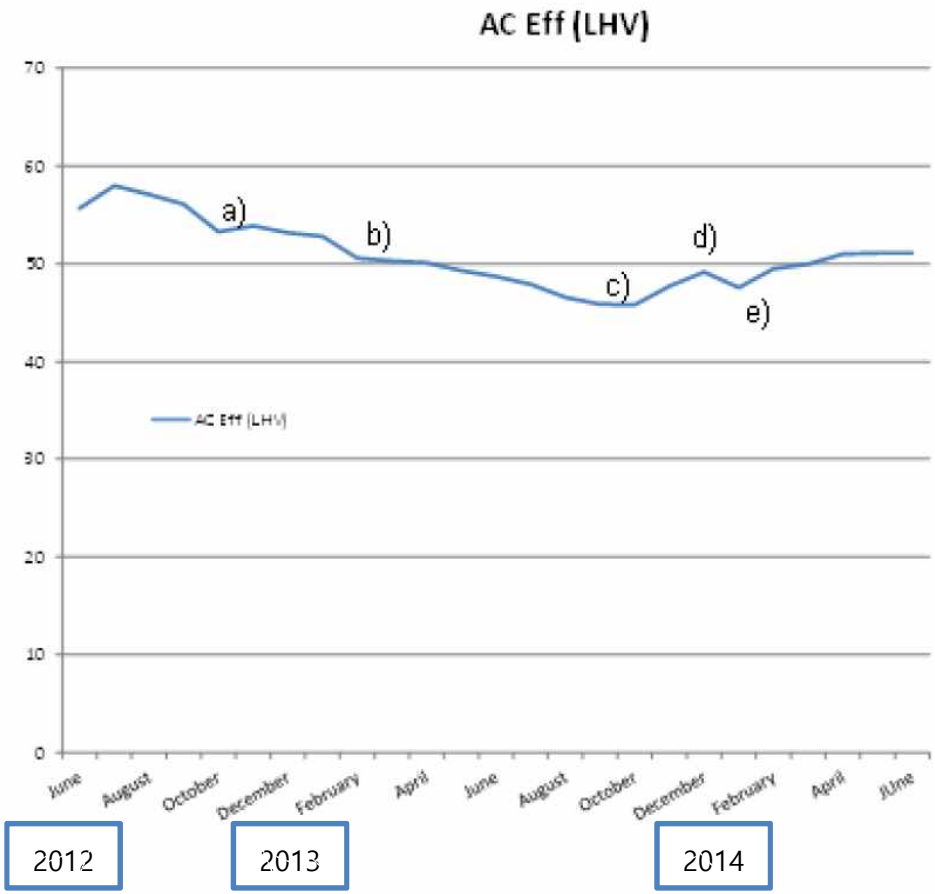
1. Fuel Cell Performance Case Study





1. Fuel Cell Performance Case Study

송전단 기준 발전효율



a) Bloom discovers gas quality issues at the site; results in step-function change in efficiency

b) Unexpected cold weather freezes water lines

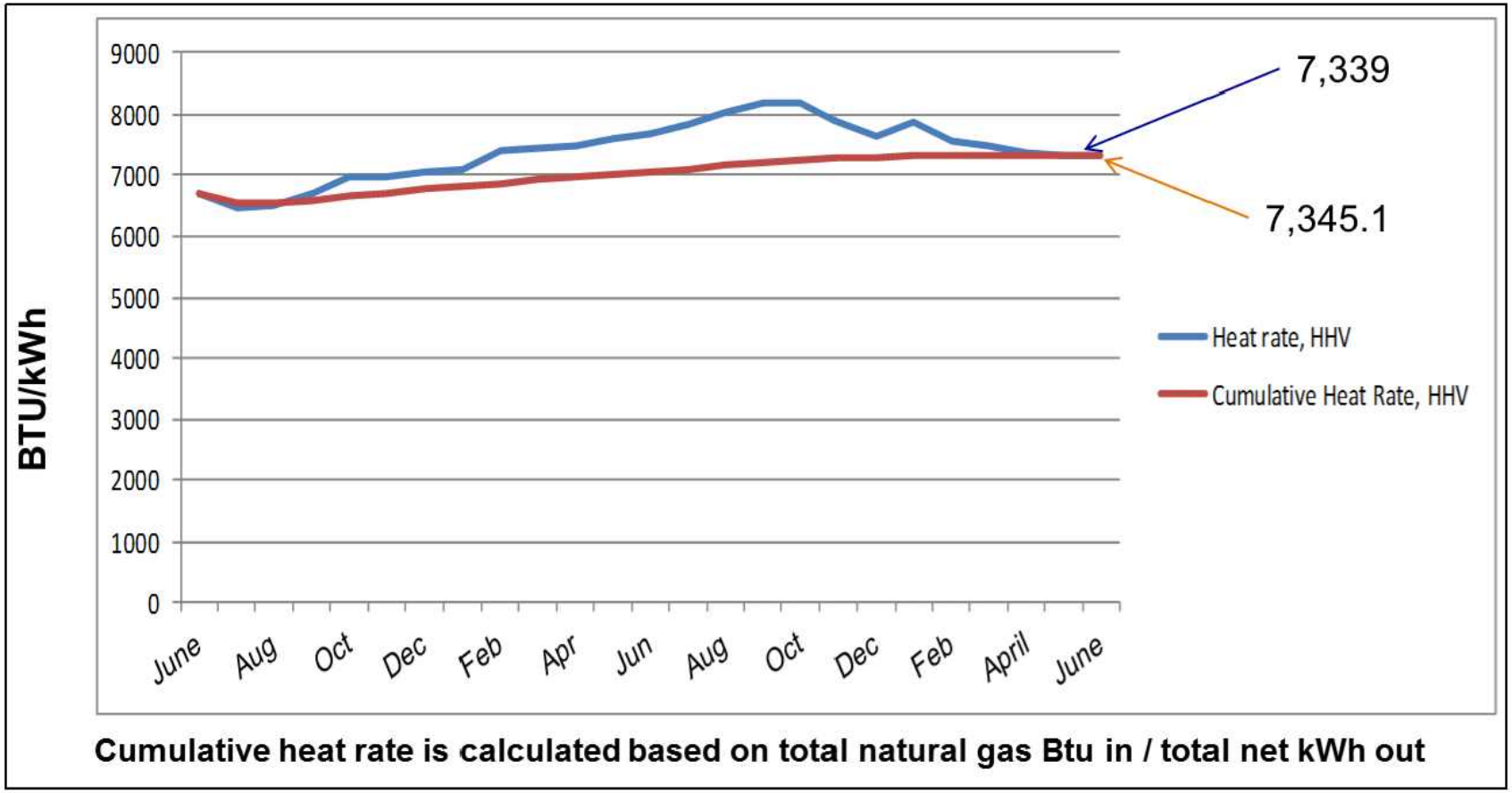
c) Decline due to high ethane concentration in natural gas

d) Efficiency begins to improve after fuel cell system /software upgrades

e) Cold weather in early 2014 causes utility's natural gas pressure sags which impacted performance

Upgrades were performed to address higher levels of ethane in the natural gas supply

1. Fuel Cell Performance Case Study



Cumulative heat rate is calculated based on total natural gas Btu in / total net kWh out

1. Fuel Cell Performance Case Study

24개월 동안 열효율(HHV기준)은 최고값 50.79 %, 최저값 41.68 %를 기록하였음. 연료전지의 열효율 변화는

1) 천연 가스 연료의 에탄 농도가 예상보다 높아 연료 전지의 연료 처리 시스템에 대한 제어 소프트웨어 조정과 하드웨어 업그레이드가 필요했고, 2013년 10월 이후 업그레이드가 진행되면서 플랜트 열소비율의 개선됨

2) 2013년 2월 및 2014년 초의 극심한 동결 기상 조건은 SOFC 스택의 열 사이클에 영향을 미치고 성능저하로 이어짐. 또한 천연가스 압력이 15psi 이하로 저하되면 일부설비가 트립됨.

3) 천연 가스 규제 문제로 인해 연료가 부족하여 2014년 초에 불필요한 트립과 열사이클이 발생하여 출력 성능에 영향을 미침. 이러한 가스 문제는 현장의 결빙 조건으로 인해 악화됨

4) 24개월 간 평균 발전출력은 정격의 78.3%로 분석됨. 앞서 논의한 천연 가스 구성 문제와 추운 날씨가 평균출력 저하에 영향을 줌.

5) 2013년 4분기 이후 시스템 및 연료 전지 스택 업그레이드로 인해 플랜트 열소비율이 향상되고 있는 추세이며, 2014년 6월 말 현재 발전소 열효율은 다시 46.49 %로 개선됨

2. EPRI Q&A

On September 12, 2012, EPRI hosted the first project webinar, at which funders and participants met online to receive an update and ask questions about the project. The question-and-answer portion of the webinar yielded several insights into the details of plant operation and performance, and is transcribed below.

Q: Bloom reported 97% capacity factor. What caused it to be less than 100%? Were there forced outages or were they planned?

A: The actual availability of Bloom Energy Server is in excess of 99% where less than 1% is based on grid outages and power quality events. In a grid-parallel configuration the units have to

disconnect in case of an outage or power quality event on the grid in compliance with IEEE 1547. The 97% capacity factor is due to a combination of grid events, some slight variation in output based upon maintenance, commissioning activities, and testing.

Q: Was there any maintenance required? If so, how much and who did the maintenance?

A: There has been some routine maintenance such as water purification filters, desulfurization bed canisters, and cabinet and blower air filter replacements. Currently Bloom employees do all of the maintenance.

Q: I would like to know more about the remote monitoring done at Bloom's facility. What do they watch at the remote monitoring location? Do they have monitoring and control capabilities?

A: At Bloom's Remote Monitoring Control Center (RMCC), Bloom monitors performance of each system and can control each system with granularity down to the fuel cell stack. Bloom monitors system performance (both output and efficiency) as well as any deviations from normal operations. They also monitor systems to conduct proactive maintenance. Bloom can completely control the systems, from start-up through full output, remotely from its RMCC.

Q: How is load on the Bloom System controlled?

A: The Bloom system is a generation unit which runs continuously as a base load solution. There are integrated controls within the system that optimize output and efficiency across all the fuel cell modules. Manual control is done remotely through the Bloom Energy RMCC.

Q: Does the fuel cell plant respond to load demand changes? Are these units base loaded—in other words they don't follow minor load changes?

A: The Brookside installation is a base load installation, thus runs 24/7. They are not configured to load follow at this time.

Q: What is the installed cost of the 3 MW? Does Bloom Energy own the servers? Or Delmarva? Or are they leased? To what extent does Delmarva control operation and maintenance of the Bloom Energy Servers?

A: Unfortunately we cannot comment on the cost without a non-disclosure agreement in place between us. We are happy to execute and discuss further if there's a particular business case we'd like to explore. Bloom operates and performs all maintenance of the unit.

Q: Are there any plans to utilize waste heat?

A: Bloom Energy Servers utilize the waste heat *internally* to create a higher electrical efficiency. We currently do not have any plans to use the waste heat externally. External use of waste heat often requires highly customized, complex installations to match thermal output with thermal load. Current customers have asked for an all-electric solution to maximize electrical efficiency.

Q: What are the ramp rates for the Bloom Energy units both up and down, in addition to start/restart timing for the individual units as well as the connected banks of units?

A: During normal operation the Bloom Energy Servers can ramp up and down very quickly, in a matter of seconds. At complete cold start, the system may take hours to ramp up.

Q: What is the cost to generate electricity at the Brookside Fuel Cell site?

A: The cost of electricity (COE) of a fuel cell unit includes the following components:

1. Installed capital costs in $/kW and related capital carrying charge : NA
2. Non-fuel operation and maintenance (O&M) costs: NA
3. Fuel Costs: The plant's heat rate in HHV x the cost of natural gas fuel at the site.

If the cost of natural gas is $6/MMBtu and the heat rate is 7,339 Btu/kWh the cost of fuel is $44/MWh.

Items that can affect the COE include an investment tax credit for fuel cells, which is currently 30%; taxes; depreciation; and finance charges.

감사합니다.
Q&A