

에너지 저장장치(ESS)가 차세대 전력망의 안정성에 미치는 영향

김예원, 홍세연

Supporting Information Placeholder (Highly Recommended)

ABSTRACT: 에너지 전환이 가속화되면서 태양광, 풍력 등 재생에너지의 간헐성과 전력 수요 변동으로 안정성이 도전받고 있다. 본 연구는 에너지 저장 장치(ESS)가 차세대 전력망의 안정성 향상에 미치는 영향을 고찰한다. ESS는 전기에너지를 저장하여 공급과 수요의 시차를 메우는 기술로, 주파수 조정, 피크 부하 완화, 재생에너지 출력 안정화 등을 통해 전력계통의 신뢰도를 높인다. 이 연구에서는 ESS의 개념과 원리를 소개하고 주요 ESS를 활용하면 전력 수급 불균형으로 인한 문제를 완화하고 블랙아웃 위험을 줄일 수 있으며, 전력 피크 대응 및 비상 전원 확보에도 효과적임을 확인하였다. 마지막으로 ESS 기술 발전과 안전성 향상을 통한 향후 전력망 적용 확대 전망을 제시한다.

서론 (Introduction)

전력 생산과 소비는 항상 균형을 유지해야 하며, 그렇지 않을 경우 주파수 변동이나 정전과 같은 문제가 발생한다. 그러나 전기는 다른 에너지원에 비해 저장하기 어렵기 때문에 오랫동안 생산과 동시에 소비하는 것이 일반적이었다. 최근 전 세계적으로 재생에너지 확대와 전기저장 기술 발전이 빠르게 이루어지면서, 전력 계통의 불안정성을 보완하기 위한 ESS에 대한 수요가 크게 증가하고 있다. 특히 우리나라는 탄소중립 목표와 함께 재생에너지 비중을 높이고 있으나, 날씨와 시간대에 따른 출력 변동으로 전력망 안전성 확보에 어려움을 겪고 있다. 탐구 동기는 이러한 상황에서 ESS가 차세대 전력망의 안정적인 운영에 어떤 역할을 할 수 있는지 알아보는 데 있다.

이에 본 소논문에서는 ESS의 원리와 종류를 이해하고, 현재 전력망이 직면한 안정성 문제점을 짚은 후, ESS의 역할과 실제 활용 사례를 분석하고자 한다. 궁극적으로 ESS 도입이 전력망 안정성에 미치는 영향을 고찰함으로써, 향후

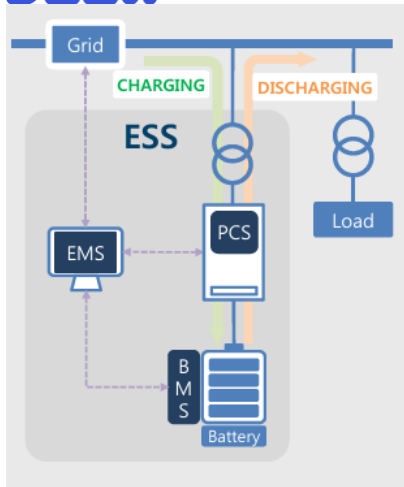
안정적인 전력 공급을 위한 ESS의 활용 방안과 전망을 제시하는 것을 목적으로 한다.

재료 및 방법 (Materials and Methods)

에너지 저장장치의 개념과 중요성

에너지 저장장치(ESS)란 생산된 전기에너지를 배터리 등 매개체를 통해 저장해 두었다가 필요할 때 공급함으로써 전력 수급 균형을 유지하는 시스템이다. ESS의 도입으로 발전소부터 송전망, 배전망 그리고 최종 수용가에 이르는 전 과정에서 에너지 활용 효율을 향상시킬 수 있다. 과거에는 전력 생산 후 곧바로 소비하는 구조였으나, ESS를 활용하며 발전과 소비의 시차를 조정할 수 있어 전력망의 유연성이 크게 높아진다. 특히 태양광, 풍력 같은 신재생에너지는 발전 출력이 예측하기 어렵고 시간에 따라 크게 변동하는데, ESS가 이러한 변동성을 완화하여 전력 품질을 높여준다. 여러 국가들이 ESS 보급을 전략적으로 지원하는 이유도 전력망 안정성과 효율성을 위해 ESS가 필수적인 미래 전력 인프라이기 때문이다.

ESS의 작동원리



ESS 는 배터리와 전력변환장치(PCS)를 통해 충전과 방전이 이루어진다. 충전 시에는 외부로부터 공급된 전력을 PCS 가 교류(AC)에서 직류(DC)로 변환하여 배터리에 저장한다. 방전 시에는 배터리에 저장된 DC 전기를 다시 AC 로 변환하여 전력망이나 전력 소비 장치에 공급한다. 이 과정을 통하여 ESS 는 전력 공급원의 출력 변동을 평활화하고 전압 및 주파수를 안정화하는 역할을 한다. 예를 들어, 태양광 출력이 갑자기 떨어지거나 부하가 급증하는 상황에서도 ESS 는 즉각적으로 저장된 에너지를 방출하거나 충전함으로써 순간적인 전력 수요에 대응하고 전력계통의 안정도를 높여준다. 이처럼 ESS 는 전통적인 발전원의 느린 응답성을 보완하여 전체 시스템의 신뢰성을 향상시키는 핵심 기술이다.

ESS 의 종류 및 특성 비교

ESS 는 에너지를 어떤 방식으로 저장하느냐에 따라 다양한 유형으로 나뉜다. 표 1 에서는 주요 ESS 종류를 기술 방식별로 정리하고 각 방식의 특징과 활용 분야를 비교하였다.

1. 전기화학적 저장 — 배터리 기반 ESS

ESS 중 가장 널리 활용되는 방식은 배터리를 이용한 전기화학적 저장이다. 이 방식은 화학 반응을 통해 전기를 저장하며, 여러 개의 단위 셀을 묶어 고용량의 배터리를 구성한다. 대표적인 예로는 리튬이온전지, 납축전지, 나트륨황전지(NaS) 등이 있다.

리튬이온전지는 에너지 밀도가 높고 효율이 우수해 빠른 응답 속도와 긴 수명을 가진다. 현재 전력망과 가정용 ESS 에 가장 널리 사용되는 기술이다. 납축전지는 가격이 저렴하고 구조가 단순해 오래전부터 사용되어 왔지만, 에너지 밀도가 낮아 대용량 저장에는 부적합하다. 나트륨황전지는 고온에서 작동하며, 장기간의 에너지 저장에 유리하다.

이러한 배터리형 ESS 는 전력망 주파수 조정용 시스템(한전 376MW 규모), 공장·빌딩의 피크 전력 절감용 시스템, 가정용 태양광 연계 저장장치 등 다양한 분야에 활용되고 있다.

2. 전자기적 저장 — 슈퍼커패시터 및 SMES

전자기적 저장 방식은 화학 반응이 아닌 전기장을 이용하여 에너지를 저장한다는 점이 특징이다. 대표적으로 *퍼커패시터(Super Capacitor)와 초전도자기저장장치(SMES)가 있다.

슈퍼커패시터는 매우 빠른 충·방전이 가능하며, 순간적인 전력 보상이나 전압 강하 방지에 효과적이다. 또한 반복 사용에 강해 수명이 길고 반응 속도가 매우 빠르다. SMES 는 초전도 코일에 전류를 직접 저장하여 전기를 보존하는 장치로, 응답 속도가 거의 즉각적이다. 이러한 장치들은 무정전 전원장치(UPS)나 전력 품질 보정용 보조장치로 주로 사용된다.

3. 기계식 저장 — 플라이휠, 압축공기, 양수발전

기계식 ESS 는 전기에너지를 운동에너지 또는 위치에너지 형태로 변환하여 저장한다. 이 방식에는 플라이휠, 압축공기저장장치, 양수발전이 있다.

플라이휠은 모터를 이용해 회전을 고속으로 돌려 운동에너지를 저장하는 기술로, 방전 시 회전의 운동에너지를 발전기로 되돌려 전기를 공급한다. 출력이 크고 응답 속도가 빠르지만, 방전 시간이 짧아 단기 전력 보완용으로 주로 사용된다.

압축공기저장은 잉여 전력을 사용해 공기를 압축하여 저장한 뒤, 필요할 때 공기를 팽창시켜 터빈을 돌리는 방식이다. 대규모 장주기 저장이 가능하다는 장점이 있다. 양수발전은 남는 전력으로 물을 상부 저수지로 끌어올렸다가 전력이 필요할 때 낙차를 이용해 발전하는 방식이다. 이 기술은 수명이 길고 대용량 저장에 적합하지만, 지리적 제약이 크다.

현재 우리나라에는 7 개의 양수발전소가 운영 중이며, 이 방식은 전력망의 비상 예비력 확보나 신재생 잉여전력 장기 저장에 널리 활용되고 있다.

4. 열에너지 저장 — 축열 및 축냉 시스템

열에너지 저장 방식은 전기에너지를 열 또는 냉기 형태로 변환하여 저장하는 기술이다. 이 방식은 전기를 직접 저장하지 않고, 에너지의 형태를 바꾸어 저장한다는 점이 특징이다.

예를 들어 축열 시스템은 남는 전력으로 물이나 용융염을 가열해 저장했다가 필요할 때 난방이나 발전용으로 다시 사용하는 방식이다. 반면 축냉 시스템은 심야 전력으로 얼음을 만들어 두었다가 낮 시간대의 냉방 수요가 높을 때 사용한다.

이러한 열에너지 저장은 태양열 발전소의 열저장탱크나 대형 건물의 빙축열 냉방 시스템 등에 적용되며, 에너지 비용 절감과 전력 피크 완화 효과를 동시에 얻을 수 있다.

5. 화학에너지 저장 — 수소 기반 ESS

마지막으로 화학에너지 저장(Power-to-Gas) 방식은 전기를 수소나 합성가스 등 화학 연료 형태로 전환하여 저장하는 기술이다. 이 방식의 대표적인 예가 수소 연료전지다.

잉여 전력을 이용해 물을 전기분해하면 수소를 얻을 수 있고, 이 수소를 저장해 두었다가 필요할 때 연료전지를 통해 다시 전기로 변환할 수 있다. 이 과정은 탄소를 배출하지 않으며, 대용량·장기 저장이 가능하다는 장점이 있다. 다만,

전기→수소→전기의 변환 과정에서 효율이 낮다는 한계도 존재한다.

현재 이 기술은 풍력 잉여 전력으로 수소를 생산하는 그린수소 프로젝트, 수소 터빈 발전 연계 시스템, 계절 간 전력 저장 기술 등으로 확장되고 있다. 또한 미래의 수소경제 인프라와 결합되어, 장기적인 에너지 저장 수단으로 주목받고 있다.

위 표에서 보듯, 리튬이온 배터리 기반 ESS 는 효율성과 응답성이 뛰어나 전력망부터 가정용까지 폭넓게 활용되고 있다. 반면 양수발전과 압축공기 저장은 매우 대용량의 에너지 장주기 저장에 유리하지만 입지 조건 등의 제약이 있다. 슈퍼커패시터와 플라이휠은 순간 출력과 빈번한 사이클에 적합하여 주파수 제어 등에 쓰인다. 이처럼 각기 다른 ESS 기술들은 저장 용량, 지속 시간, 출력 특성이 상이하며, 전력망의 안정화를 위해서는 용도에 맞는 적절한 ESS 기술을 선택하거나 복합적으로 활용하는 것이 중요하다.

결과 (Results)

1. 차세대 전력망의 문제점: 불안정성 요인

현대 전력망은 수요와 공급의 실시간 균형에 크게 의존한다. 그러나 수요 측면에서는 시간대나 계절에 따른 변동으로 부하 편차가 크고, 공급 측면에서도 발전소 고장이나 송전 장애, 자연재해 등 다양한 요인이 전력 공급에 영향을 미친다. 특히 재생에너지 비중이 높아질수록 출력의 간헐성으로 전력계통 주파수와 전압이 불안정해질 수 있다. 예를 들어, 바람이 멈추거나 구름으로 인해 태양광 발전 출력이 급격히 떨어지면 전력 공급 부족으로 계통 주파수가 하락하고, 반대로 낮 시간대 태양광이 과잉 생산되면 주파수가 상승하여 발전량 제한이나 출력 제어가 필요해지는 상황이 발생한다.

이런 급격한 변동은 전력 품질을 저하시킬 뿐 아니라 대장전(블랙아웃)의 위험까지 높일 수 있다.

과거 전력망에서는 이러한 변동에 대응하기 위해 화력발전소나 수력발전소의 출력 조정으로 주파수를 유지해왔다. 그러나 화력발전은 출력 조정 시 효율이 떨어지고, 수력은 지리적 한계로 추가 확대가 어렵다. 무엇보다 이들 기존 발전기의 출력 변경에는 수 초에서 수 분의 시간이 걸려 부하변동에 즉각적으로 대응하기 어렵다. 즉, 전통적 전력망은 유연성 부족으로 인해 수급 불일치 상황에서 잉여 전력을 버리거나 부족한 전력을 제때 공급하지 못해 비효율과 안정성 저하 문제가 있었다. 전력 피크 수요에 대비하여 막대한 예비 발전용량을 놔두는 것도 경제적 손실을 초래한다.

2. 전력망 안정화를 위한 ESS의 역할

ESS는 위에서 언급한 문제들을 해결하기 위한 게임 체인저로 부상하고 있다. 빠른 응답성과 유연성을 지닌 ESS는 수요와 공급 사이의 불균형을 해소하고 전력망에 버퍼 역할을 제공한다. 구체적으로 ESS가 전력망 안정성에 기여하는 핵심 역할은 다음과 같다.

주파수 조정 및 전압 안정화: 전력계통의 주파수는 공급 전력과 수요 전력의 균형으로 결정되는데 ESS는 실시간으로 충방전을 조절하여 계통 주파수는 60Hz 부근에서 안정적으로 유지한다. 공급 부족 시에는 즉각 방전하여 주파수 하락을 막고, 공급 과잉 시에는 충전하여 주파수 상승을 억제한다. 그 응답속도는 기존 발전기의 수분대에

비해 0.2초 이내로 월등히 빨라 긴급 상황에서도 전력 품질을 지켜준다. 이를 통해 대규모 발전기 탈락이나 부하 급변에도 정전 예방에 큰 도움이 된다. ESS를 활용하면 발전기의 예비전력 확보를 위해 출력 여유를 둘 필요 없이 화력발전을 100% 효율로 운전할 수 있어 경제성도 높아진다.

피크 부하 완화: 전력 수요가 최고조에 달하는 피크 시간대에는 발전 설비 용량을 초과하지 않도록 예비력을 가동하거나 수요관리를 해야 한다. ESS는 비피크 시간대의 남은 전력을 저장했다가 피크 시 방전함으로써 최대부하를 감소 시킨다. 이를 통해 전력 수요곡선의 첨두를 깎아 전력 공급 능력 내에서 수요를 맞출 수 있게 된다. 또한 피크 저감으로 전기요금 절감 효과가 있어, 일부 산업체와 건물에서는 ESS를 설치해 계약전력을 낮추고 비용을 아끼는 사례도 늘고 있다. 나아가 피크 부하 완화는 송배전 설비의 과부하를 예방하여 설비 투자 연기 효과도 가져온다.

재생에너지 출력 변동 흡수: ESS는 태양광·풍력 발전과 직접 연계되어, 발전 출력의 간헐성을 보완하는 데 핵심 역할을 한다. 태양광 발전소에 ESS를 설치하면, 햇빛이 강할 때 잉여 전력을 저장했다가 해가 진 후 방출하여 야간 전력공급에 활용할 수 있다. 풍력 발전의 경우 바람 세기에 따라 출력이 출렁이는데 ESS가 실시간으로 출력 변동분을 흡수함으로써 출력곡선을 평탄화하고 일정한 전력을 인근 그리드에 공급한다. 이처럼 ESS는 재생에너지 발전의 출력 예측 불확실성을 완화하여, 재생에너지 확대에도 전력망 안정성을 유지하도록 돕는다. 실제로 ESS 도입이 재생에너지



출력제어 횟수를 줄이고 전력손실을 최소화한 사례들이 보고되고 있다.

비상 전원 및 블랙스타트: 대규모 정전 상황이나 천재지변 등으로 전력계통이 다운되었을 때, ESS는 비상 전원으로 중요한 역할을 한다. 대형 배터리 ESS는 정전 직후 수 초 내로 중요 설비에 전력을 공급하여 2차 피해를 방지할 수 있으며 필요하면 블랙스타트용 전원으로 활용되어 발전소 재가동에 최소한의 전력을 제공한다. 병원, 데이터센터 등 중요 시설에는 UPS 기능을 하는 ESS가 설치되어 있어, 순간 정전에도 데이터 손실이나 의료장비 셧다운을 막고 있다. 이처럼 ESS는 전력망 복원력을 높여주는 안정망으로 작동한다.

이상의 역할들을 통합하면 ESS는 궁극적으로 전력망의 안정성과 유연성을 종합적으로 강화하는 장치이다. 따라서 ESS를 적절히 활용하면 전력 낭비와 계통 손실을 줄이고 전력 공급의 안정성을 향상시킬 수 있다.

그림 2: 에너지 저장장치(ESS) 도입에 따른 전력 수요곡선 변화 (피크 완화 효과) 예시. 파란색이 ESS를 활용하여 피크전력을 낮춘 경우이며, ESS가 없을 때의 수요 피크(노란색)에 비해 최대 부하가 감소하고 부하곡선이 평탄해졌음을 알 수 있다.

3. ESS 도입 사례 분석

(1) 국내 사례: 주파수 조정용 ESS 사업

우리나라는 대규모 ESS를 전력망 주파수 조정에 성공적으로 활용한 대표적인 사례를 보유하고 있다.

한국전력공사는 2014년부터 2017년까지 세계 최대 규모인 376MW의 주파수조정용 ESS 설비를 전국 변전소 13곳에 구축하였다. 이 사업을 통해 한전은 그동안 화력 및 수력발전기가 담당하던 1차 및 2차 주파수 조정 역할을 부분적으로 ESS로 대체하였다. 그 결과, 발전기가 출력 조정에 소요하던 수 초~수 분의 지연을 0.2 초 미만의 응답속도로 단축시켜 계통 주파수 유지 성능을 크게 향상시켰다. 실제로 2014년 시범사업 당시 대형 발전기 고장으로 주파수가 급격히 떨어지는 상황에서 ESS가 즉각 최대 출력으로 방전, 계통 주파수를 안정 범위 내로 회복시키는 데 성공하였다. 한전은 ESS 도입으로 연간 약 620억 원의 전력구입비 절감 효과도 얻을 것으로 추산하였다. 이는 주파수 유지를 위해 효율이 낮은 예비 발전기를 돌릴 필요가 줄어들었기 때문이다.

이 사업의 성공으로 국내 배터리·PCS 등 관련 산업도 활성화되어, ESS 참여 기업들이 축적한 기술을 바탕으로 해외 수출을 이뤄내는 등 파급효과가 컸다. 또한 한전의 주파수조정 ESS 운영 경험은 이후 신재생에너지 연계형 ESS, 피크저감용 ESS, 비상전원용 ESS 등 다양한 분야로 확장되었다. 현재는 계통안정화용 ESS로 범위를 넓혀 에너지전환 시대에 안정적인 전력 운영을 위한 핵심 인프라로 자리매김하고 있다. 국내 사례는 ESS가 전력망 안정화에 실질적으로 기여하고 경제성도 확보할 수 있음을 보여준 좋은 본보기라 할 수 있다.

(2) 국외 사례: 호주의 대용량 그리드 ESS

ESS 의 전력망 안정화 효과를 보여주는 국제적 사례로 호주 남부지역의 Hornsdale Power Reserve 를 들 수 있다. 2017 년 호주 빅토리아주의 한 석탄화력 발전소가 갑작스럽게 트립(고장 정지)하여 순간적으로 560MW 에 달하는 발전 용량이 계통에서 이탈한 사고가 있었다. 이때 Tesla 가 구축한 100MW/129Wh 규모의 Hornsdale ESS(Tesla Big Battery)가 몇 백 밀리초 이내에 7.3MW 의 전력을 즉각 방전하여 하락하는 계통 주파수를 방어했다. ESS 의 이 빠른 대응 덕분에 주변 지역은 추가적인 정전을 피하면서, 그 사이 기존 가스터빈 발전기들이 출력을 올릴 시간을 벌 수 있었다. 결과적으로 대정전 위기를 모면하고 전력 안정화에 크게 기여한 것이다. Hornsdale ESS 는 이후로도 남호주 지역에서 빈번한 전압 강하나 주파수 편차를 줄여주어 전력망 긴급보조 서비스로 활약하고 있다. 또 전력도매시장 가격이 급등할 때 저장했던 전력을 방출하여 전력가격 완화 효과도 입증되었다. 이 사례를 대용량 배터리 ESS 가 전통 발전소보다 유연하고 빠르게 동작하여 전력망 신뢰도를 높일 수 있음을 세계에 알린 계기가 되었다.

이 외에도 미국 캘리포니아주에서는 태양광 과잉으로 인한 출력 제한 문제를 해결하고자 다수의 대규모 BESS(Battery ESS)를 변전소에 설치하여 저녁 피크시간대 공급에 활용하고 있다. 유럽 독일 역시 재생에너지 비중 증가로 인한 주파수 불안정을 막기 위해 가상발전소(VPP) 형태로 가정용·산업용 ESS 를 묶어 계통보조서비스를 운용 중이다. 이러한 해외 사례들은 각기 환경은 다르지만 공통적으로 ESS 가

차세대 전력망의 안정성을 높이는 핵심 솔루션임을 보여준다.

토의(Discussion), 결론(Conclusion)

탐구 결과, 에너지 저장장치(ESS)는 다양한 방식으로 차세대 전력망의 안정성을 크게 향상시킬 수 있음이 확인되었다. ESS 는 전력 생산과 소비 시점을 분리함으로써 수요-공급 불균형을 해소하고, 주파수 유지와 전압 안정화 등 전력 품질 향상에 기여한다. 실제 사례에서 보았듯이, ESS 도입으로 개류모 발전기 고장 시에도 계통을 신속히 안정화하고, 피크 부하를 낮춰 블랙아웃 위험을 감소시키며, 재생에너지의 간헐적 출력을 효율적으로 관리하여 전력망 신뢰도를 높일 수 있었다. 또한 ESS 는 비상시 백업 전원 역할을 통해 중요 시설의 안전을 지키고 전력계통의 복원력을 강화해준다.

한편, ESS 기술의 종류별 특성을 비교한 결과 각 방식마다 장단점이 있으므로, 향후 전력망에는 용도에 맞는 최적의 ESS 조합이 적용될 것으로 전망된다. 예를 들어 리튬이온 배터리는 단기 응답이 필요한 빈번한 조정에, 플로우 배터리나 압축공기 저장은 장주기 에너지 공급에, 슈퍼커패시터는 순간적인 펄스 보완에 적합하게 사용될 수 있다. 또한 양수 발전과 같은 전통 대규모 저장기술과 최신 배터리 ESS 의 하이브리드 운영도 고려되고 있다.

향후 전망으로, ESS 산업은 기술 발전과 함께 더욱 확대될 것이다. 특히 안정성과 경제성 향상이 핵심 과제인데, 배터리 화재 예방을 위한 안전 관리 기준 강화와 사용 후 배터리 재활용 등이 추진되고 있다. 아울러 수소 에너지 저장, 고체전지 등 차세대 ESS



기술의 연구도 활발하여, 에너지 저장 효율을 높이고 비용을 낮추는 혁신이 기대된다. 정부와 공공기관의 지속적인 지원 정책과 전력시장 제도의 정비(예: ESS 전용 요금제, 보조서비스 시장 참여 등)를 통해 ESS는 스마트그리드의 핵심 요소로 정착할 것이다. 요컨대, 에너지 전환 시대에 ESS는 전력망 안정성과 운용 효율을 높이는 게임 체인저로서의 역할을 이미 입증하였으며, 앞으로 그 중요성은 더욱 커질 것으로 예상된다.

REFERENCES

- 산업통상자원부 보도자료, 「에너지저장장치(ESS)의 국내 최대 시장, 주파수조정 사업 2 단계 완료」, 2016.02.25.
- 위대용, 전기신문, 「(해설) ESS 376MW, 한전이니까 가능했다」, 2017.11.07.

- 한국화재보험협회 웹진 85 호, 최명영, 「리튬이온 에너지 저장장치(ESS)의 안전관리」, 2018.
- Element Korea 매거진, 「ESS 에너지 저장장치란? 구조와 활용 알아보기」, 2025.07.
- 삼성 SDI 뉴스룸, 「[배터리 101] ESS 의 다섯 가지 종류」, 2024.09.27.
- TechFocus 테크포커스, 「재생에너지 저장 기술 현황 및 ESS 시장 전망」, 2024.04.
- Works in Progress Magazine, Malcolm North, “The beauty of batteries”, 2023.08.
- 기타: 에너지경제연구원 보고서 , LG 에너지솔루션 자료 등.