

전력저장시스템의 전력계통 활용 전망



윤용범
한전 전력연구원 ESS 사업단장

1. 개황

전 세계적으로 산업고도화가 진행되어 에너지 수요가 지속적으로 증가하고 있고, 화석연료의 지속적인 사용으로 CO₂ 배출량이 증대됨에 따라 심각한 기후 변화를 경험하고 있어 이에 대한 대안들이 활발히 논의되고 있다.

전력저장시스템은 생산된 전력을 저장해 필요할 때 사용함으로써 에너지의 효율적 이용과 함께 신재생에너지 활용도 제고 및 전력공급 시스템을 안정화하는 장치로서, 에너지 관리를 선도할 중요 기술로 부각되고 있다.

대용량 전력저장장치를 이용할 경우 1일 전력부하 격차 해소를 통해 부하율 향상, 피크억제 및 전력부하 평준화를 도모할 수 있다. 또한 분산전원 및 신재생에너지의 출력안정 및 전

력품질 향상을 지원할 뿐만 아니라, 전력 소비자의 비상전원 공급 및 고품질 전력공급을 지원할 수 있게 된다.

이와 같이 다양한 분야에서의 역할이 기대되는 전력저장시스템은 지속적인 기술개발과 함께 소요비용이 점차 감소할 것으로 예상되고 있어 국내외적으로 전력계통에 적용되고 있거나 진행 중에 있다. 이에 여기서는 전력저장시스템의 종류 및 특성을 우선 소개하고 전력계통에서의 대표적인 응용사례, 즉 침두 부하 조절, 주파수조정, 신재생출력완화 개념에 대하여 기술하였다.

2. 전력저장시스템 종류 및 특성

전력저장방식에 따라 크게는 물리적 저장과 화학적 저장으로 구분 할 수 있다. 대표적인 물리적 저장 방식으로는 양수발전과 압축공기저장, 플라이휠 등을 들 수 있으며, 전기에너지를 위치에너지 또는 운동에너지로 변환·저장하였다가 필요시 다시 전기에너지로 변환하여 사용한다.

그리고 화학적 에너지저장에는 리튬이온전지, NaS 전지, 플로우 전지 등이 있으며 전기에너지를 양극과 음극 간의 전하이동을 기본으로 한 화학반응을 이용하여 변환·저장하였다가 전력으로 변환하여 사용한다.

가. 양수발전

발전소의 아래와 위, 두 개의 저수지를 만들어 전력이 풍부한 시간대에 발전기를 이용하여 아래쪽 저수지의 물을 위쪽 저수지로 퍼 올렸다가 전력이 필요한 시기에 방수하여 발전한다. 오랜 기간 상업운전을 통해 신뢰성이 입증된 방식으로서 경제적 대용량 전력저장이 가능한 반면 지형적 입지제약이 수반되다는 단점이 있다.

나. 압축공기 에너지저장 장치(Compressed Air Energy Storage)

전력수요가 낮은 시간대 또는 조절 불가한 전력을 압축기를 사용하여 압축공기를 지하에 저장하고, 전력수요가 높은 시간대에 저장하였던 압축공기를 이용하여 전력을 생산하는 방식으로 전력 계통 안정화 및 효율적 운영을 위해 적용된다.

다. 플라이휠 에너지저장 시스템(Flywheel Energy Storage System)

대용량 회전체를 무 접촉 상태로 부양한 후 전기에너지를 회전에너지 형태로 저장하였다가 필요시 전력으로 변환하는 방식이다. 자기(초전도 또는 전자석)베어링, 복합재료 회전체, 회전 안정시스템, 냉각 시스템, 전력 입출력 모터시스템 등으로 구성된다.

라. 리튬이온전지(Lithium ion Battery)

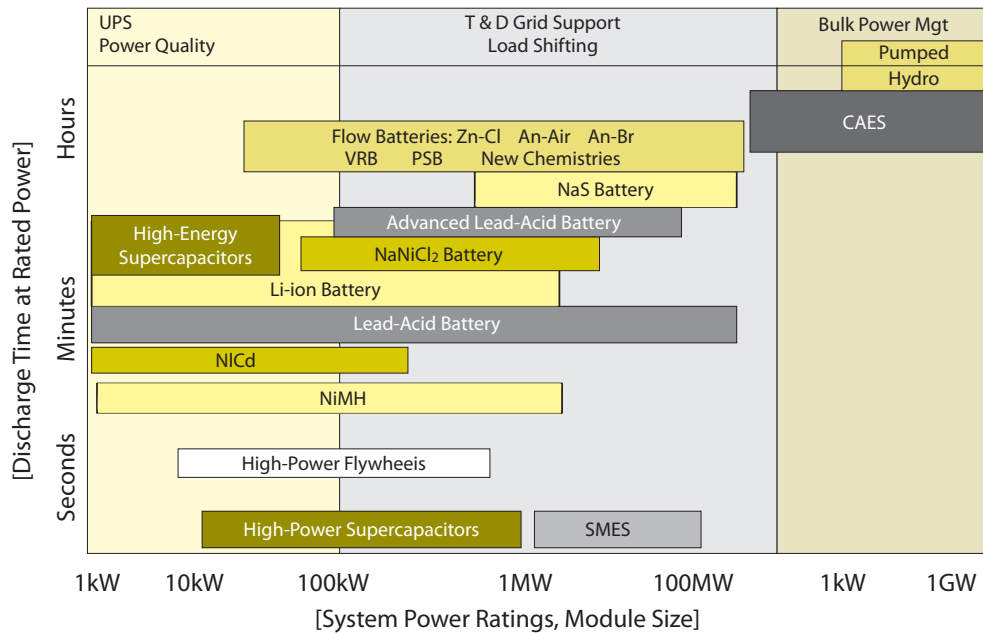
리튬이온이 분리막과 전해질을 통하여 양극(리튬산화물전극)과 음극(탄소계 전극) 사이를 이동하며 에너지를 저장하며, 출력특성과 효율이 좋으나, kWh 당 단가가 높아 주파수 조정과 같은 단기저장 방식에 유리하다.

마. NaS 전지(나트륨황 전지)

음극에 나트륨 금속을, 양극에 황 등 나트륨과 반응하여 화합물을 형성하는 물질을 사용하는 전지이다. 나트륨이온전도가 가능한 고체전해질을 사용하는 전기에너지저장장치로 단위 전지의 용량을 크게 만들 수 있어 대용량의 전지 구성에 유리하며 나트륨과 황 등 가격이 저렴한 재료를 사용하여 경제성이 우수하다.

3. 전력저장시스템의 전력계통 응용

전력저장시스템은 전력계통에서 생산된 발전력을



[그림 1] 에너지저장장치의 구분

저장하여 필요한 시점에 저장된 전력을 사용하기 위해 적용되고 있으며, 송배전망에 설치 가능한 전력저장시스템은 MW급 이상의 대규모 전력저장장치에 해당한다. [그림 1]은 전력저장장치를 정격출력에서의 방전기간 및 출력 용량에 따라 구분한 것이다.

[그림 1]에서 알 수 있는 바와 같이 다양한 전력저장장치 중에서 전력망의 요구사항을 충족시킬 수 있는 장치들은 저장밀도가 높고 장시간의 방전이 가능한 양수발전, 압축공기 에너지저장장치, 플로우 전지, NaS, 개량형 Lead-Acid, 리튬이온전지 등이 있다.

특히 전력계통에서의 전력저장장치의 적용성은 방전 주기에 따라 장주기 및 단주기적인 역할로 구분될 수 있다. 에너지저장장치의 장기적인 운영은 주로 발전과 에너지 사용의 이동(Energy time shift)이 주된 목적을 갖고 에너지원으로 활용하는 것으로, 이를 위해 일반적으로 1일에 한 주기의 긴 충전기간과 방전기간을 갖도록 수행된다. 단기적인 운영은 에너지저장장치를 전력계통에서의 전원으로서 응용하는 것으로 수초에서 수분의 기간으로 비교적 짧은 충·방전

기간을 갖도록 운영하며 하루에 많은 충·방전 주기를 갖는다.

단기적인 운영 전략에 해당하는 주파수 및 전압조정, 전력품질 개선, 신재생에너지원 출력변동성 개선 뿐만 아니라 피크저감, 부하평준화를 위한 장기적인 응용을 위한 에너지저장장치의 성능 기준은 각 시스템의 요구에 따라 달라진다. 일반적으로 가장 중요한 요건은 저렴한 비용과 유연한 디자인, 입증된 배터리 기술 그리고 안정적인 성능을 필요로 한다.

4. BESS에 대한 국외기술개발 동향

가. 일본

정부차원의 NEDO 프로젝트를 필두로 신재생에너지 효율 제고를 위한 연구개발을 활발히 진행 중으로 세계적으로 앞선 기술력을 보유하고 있다. 장주기 전력저장을 위한 4MW(6MWh)의 Redox-flow 전지 전력저장시스템을 도입하여 운영 중에 있다. 또한 최근

NEDO 주도로 기존 NaS/Redox Flow 시스템 외에 Ni-MH 및 LiB 전력저장시스템 개발을 추가로 진행하고 있다.

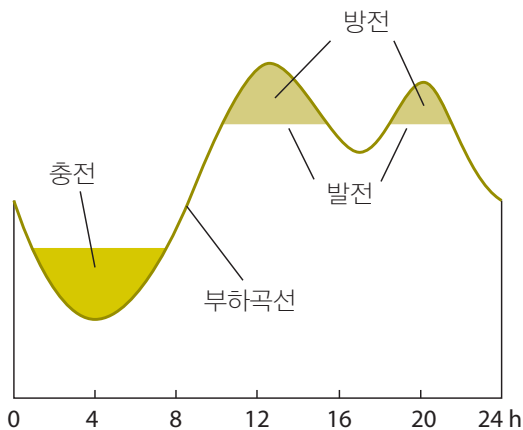
나. 미국

기초적인 원천기술은 국립연구소와 대학이 주도하고 응용기술은 국립연구소가 수행하며 이차전지의 개발은 산업체가 중심이 되어 수행 중이다. 미국 DOE의 이차전지에 대한 연구개발 지원은 배터리개발, 배터리 응용, 장기개발로 나누어 진행되고 있다. 실증연구에서는 NaS전지, PHEV 및 가정용 전력저장시스템, 리튬이온 배터리 등 다양한 종류의 배터리에 대한 적용이 진행 중이며, 특히 AEP의 경우 2020년까지 1,000MW 또는 현재 AEP 발전용량의 2.6%에 해당하는 용량의 에너지저장장치를 설치하여 계통의 신뢰성과 계통 증설 투자비용 지연 등에 활용할 계획이다.

5. 전력계통측면에서의 BESS 역할

가. 전력수요 조절(Peak shaving)

[그림 2]는 BESS에 의한 수요조절 개념을 나타내고 있다. 일반적으로 전력수요는 주간에 높고 심야시



[그림 2] 전력수요 조절 개념도

간에 낮은 특성을 보이며 이에 따라 전력도 · 소매가격도 유사한 형태를 가지게 된다. 따라서 전력저장시스템에 의하여 심야에 저장했다가 주간에 활용함으로써 전력을 경제적으로 사용할 수 있게 된다. 이때 전력저장시스템의 단기적 경제성은 주간과 심야와의 전력가격차에 의하여 결정된다.

Peak shaving을 위한 최적화 문제를 [그림 3]에 나타내고 있다. 목적함수는 방전 여부를 판단하기 위한 한계값, 즉 P_{shave} 를 최소화하는 것이다.

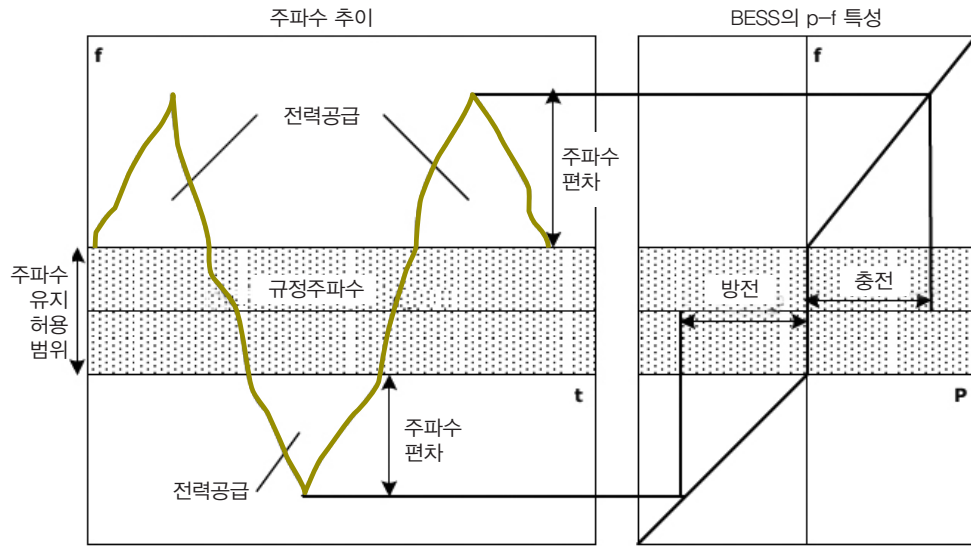
각 시간의 부하수요가 P_{shave} 보다 높은 경우 해당 장소의 전력저장장치가 초과분에 해당하는 만큼 방전을 통해 수요조절을 하는 것이다. 그리고 제약조건으로는 충 · 방전에 대한 차분방정식 및 배터리 자체의 전력 및 에너지 용량제약을 고려한다. 이 제약은 고려 방전 스케줄링 구간에서의 설치되어 있는 배터리의 과충전 (overflow) 및 과방전 (underflow)를 억제하기 위한 것이다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } P_{shave} \\
 & \text{s.t } P_B(k) = P_L(k) - P_{shave}, \quad \text{if } P_L(k) > P_{shave} \\
 & \quad P_B(k) = 0, \quad \text{if } P_L(k) \leq P_{shave} \\
 & \quad E_B(k+1) = E_B(k) - (1 + \alpha)(1 + \beta)P_B(k)\Delta T - \gamma E_B(k) \\
 & \quad P_{Bmin} \leq P_B(k) \leq P_{Bmax}, \quad E_{Bmin} \leq E_B(k) \leq E_{Bmax} \\
 & \quad E_B(m-1) = E_{B(given)}, \quad k = m_1, \dots, m_k \\
 & \text{단, } m_1, m_k : \text{방전 스케줄링 구간의 시작과 끝에 해당하는 시점} \\
 & \quad P_{Bmin}, P_{Bmax} : \text{배터리 방전 전력의 최소 및 최대값} \\
 & \quad E_{Bmin}, E_{Bmax} : \text{배터리 충전 에너지의 최소 및 최대값}
 \end{aligned}$$

[그림 3] 부하조절 최적화 모델

나. 주파수 조정

[그림 4]는 BESS의 주파수변동에 대한 응용개념을 나타낸 것으로서 전력계통주파수가 규정주파수(우리나라의 경우 60Hz)보다 높은 경우는 발전력이 전력수요보다 높다는 의미이므로 ESS 등에 의하여 전력을 흡수해야 한다. 이와는 반대로 주파수가 낮은 경우는 전력을 방출하여야 한다. 얼마나 흡수 또는 방



[그림 4] BESS 에서의 P-f 응답모델

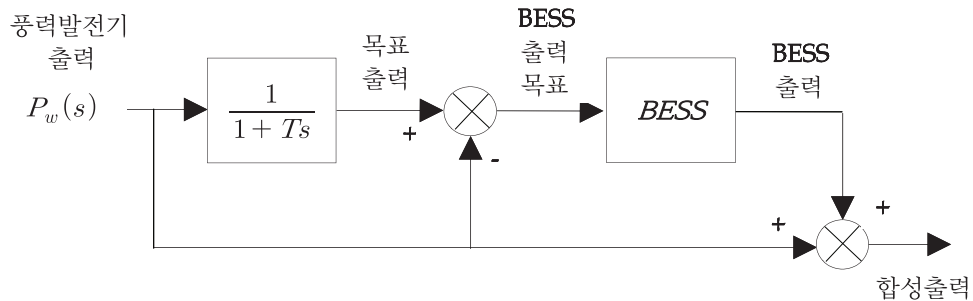
출하여야 할 것인지는 BESS의 P-f (유효전력-주파수)특성에 의하여 결정된다.

으로는 BESS 출력과 풍력발전기 출력이 합성되어 전력계통에 전력을 공급하게 된다.

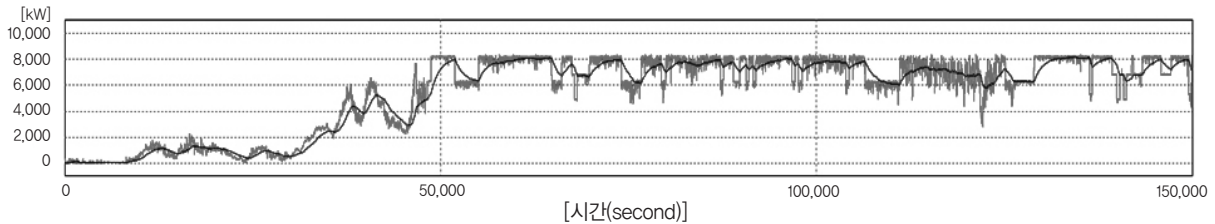
다. 신재생 출력완화

[그림 5]는 BESS에 의한 풍력발전기 출력완화 모델을 나타낸 것이다. 완화하고자 하는 목표출력은 풍력발전기 출력과 1차시 지연함수의 곱에 의하여 결정되게 된다. 이와 같이 하여 얻어진 목표출력과 풍력발전기 출력차가 BESS의 출력목표가 되며 BESS의 동작특성에 의하여 출력이 결정되게 된다. 최종적

[그림 5]와 같은 모델을 이용하여 풍력발전기 용량이 9,000kW이고 BESS 용량이 4,000kWh, 시정수 (T)가 1,200s인 경우의 모의결과를 [그림 6]에 나타내었다. 급격한 변동은 풍력발전기 출력을, 완만한 변동은 합성출력을 나타내고 있는데 합성출력의 변동폭이 풍력발전기의 자체 출력변동율에 비하여 대폭적으로 감소하는 것을 알 수 있다.



[그림 5] 신재생 출력 완화 모델




[그림 6] 풍력발전기 출력 및 합성출력

6. 향후 전망

지속적인 경제발전과 생활수준 향상에 따라 에너지에 대한 중요성은 더욱 높아질 것으로 전망된다. 특히 전력은 사용의 편리성으로 인하여 일상생활에서의 의존도는 더욱 증가할 것으로 예상된다. 그러나 전력은 생산과 소비가 동시에 이루어져야 한다는 특수성을 가지고 이에 대한 경제적 기술적 운용체제를 필요로 하게 된다.

이에 대하여 대표적 전력저장설비라 할 수 있는 양수 발전은 전력수요가 낮은 심야에 펌핑했다가 전력수요

가 높은 주간에 발전함으로써 안정적이고도 경제적인 전력공급에 기여하고 있다. 이와 더불어 최근에는 배터리에 의한 충·방전 및 전력변환 기술의 급속한 발전과 함께 대형화가 가능해짐에 따라 주야간 전력부하이전을 비롯하여 신재생출력안정화, 주파수 조정 등에 활용하고 있거나 실증연구가 활발히 이루어지고 있다.

향후 이러한 전력저장시스템이 전력계통에서 보다 효과적으로 활용되기 위해서는 우리나라 전력계통의 향후 환경변화를 면밀히 분석하고 이를 바탕으로 다양한 분야에서의 전력저장시스템의 적정역할 도출이 필요하다. 

참고문헌

1. 한전 경제경영연구원, '전력회사의 중대형 ESS 활용을 위한 사업모델 개발 및 경제성 평가연구', 2014.1
2. 한전 전력연구원, '신재생에너지 연계형 MW급 리튬이차전지시스템 운용기술개발', 2013.6
3. Muhammad Khalid and Andrey V. Savkin, 'Model Predictive Control Based Efficient Operation of Battery Energy Storage System for Primary Frequency Control', 2010 11th Int. Conf Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, 7-10th Dec, 2010
4. Xiaojuan Han, Fang Chen, Xiwang Cui, Yong Li and Xiangjun Li, 'A Power Smoothing Control Strategy and Optimized Allocation of Battery Capacity Based on Hybrid Storage Energy Technology', energies, ISSN 1996-1073
5. 'DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA', SANDIA REPORT, July 2013