

에너지 저장장치의 기술현황 및 응용분야

박 종 후

(송실대 전기공학부 조교수)

1. 서론

본 논고에서는 최근에 이슈가 되고 있는 대용량 에너지 저장장치의 최근 연구 동향과, 각각의 저장장치들의 장단점 및 응용분야에 대하여 소개한다. 각각의 에너지 저장장치는 고유한 충방전 특성을 지니고 있어서 다양한 응용에 적용될 수 있는데, 현재까지는 상용화된 기술이 많지 않고 가격적인 측면에서 불리하여, 널리 적용되지 못하고 있다. 그러나 현재, 분산전원, 특히 발전제어가 불가능한 신재생 에너지원이 기존 전력망에 도입되면서 전력 시스템의 안정화를 위한 역할로 주목받고 있다. 또한 향후, 전기자동차의 보급을 통한 배터리의 대량양산을 통해서 가격적 측면에서의 불리함도 조만간 극복이 되리라고 예상하고 있다. 이 밖에, 저장장치의 종류에 따라서 빠른 동특성을 가지는 소용량 저장장치를 통한 계통의 주파수 안정화, 대용량 저장장치를 통한 계통 부하 평준화 및 피크 발전량 감소 등을 위해서 사용될 수 있다. 이러한 저장장치의 종류로는 연축전지, 리튬이온 전지, 나스전지, 레독스 플로우 전지 등이 있으며, 기계적인 에너지 형태로 저장하는 플라이휠 방식 또한 연구되고 있다. 이러한 기술은 향후 성능향상 및 가격저감 양상에 따라서 실용화 가능성이 다양하게 예상되고 있다.

2. 응용분야

에너지 저장시장이 아직은 초보 단계이기 때문에, 기존의 휴대용 소용량 저장기기 시장이 가장 보편화된 응용이지만, 근래 들어 신재생 에너지원의 사용과 전기자동차의 상용화로 인하여 대용량 저장기기의 필요성이 대두되고 있다. 특히 지능형 전력망의 등장과 함께, 전력저장장치는 신재생 에너지

원으로부터 전달받은 불안정한 에너지를 평활화하고, 전력계통에서 수요와 공급사이의 시간적 차이를 보상하기 위하여 수요가 과중되는 시간에 전력을 공급하는 등 다양한 역할을 할 것으로 예상된다^[1]. 응용범위로는, 공공설비 시스템 운전자에서부터 최종 사용자까지, 단기적으로는 주파수 조정용으로, 중·장기적으로는 에너지 저장, 피크전력 감소, 부하평준화 등과 같은 계통설비 운용 효율화에도 유용할 것으로 예상된다. 에너지저장장치의 활용 예는 다음과 같다^[2].

- 불안정한 신재생에너지원의 평활화
 - 수요와 공급의 불평형 해소
 - 분산전원 제어 및 통합
 - 전력 변압과 분배
 - 계통망과 연계된 자원 관리
 - 변압 / 배전선간 전압 관리
 - 고조파 성분의 억제
 - 전력거래 · 발전
 - 제어 / 부하추종
 - 에너지 관리
 - 부하 평준화
 - 에너지 밀도가 큰 저장장치가 적합
 - 시스템 운영자
 - 계통 주파수 제어
 - 동특성이 빠른 저장장치가 적합
 - 순동 예비력
 - 수용가 (산업)
 - 정전대비용 보조전원/순간보상/중지
 - 피크전력 감소
 - 에너지 구매 최적화
- 따라서 전체 전력 시스템의 목적과 구조에 알맞은 저장장

치의 최적 설계조건을 찾기 위해서 저장장치 기술 개발과 신 재생에너지의 향후 시장 방향 예측이 우선 되어야 할 것이다⁽³⁾. 다음 장에서는 전기화학적 전지, 슈퍼커패시터, 초전도 플라이휠 저장장치 등과 같은 에너지 저장기술을 소개한다. 또한 변용 기술로서, 전지 재사용과 도심 주변의 마이크로 양수저장장치와 같은 부가적인 에너지 저장기술에 대해서도 살펴본다.

3. 저장장치

현재 개발 중인 대표적인 에너지 저장 기술을 살펴보면 다음과 같다.

3.1 플라이휠

플라이휠 에너지 저장장치(Flywheel Energy Storage, FES)는 고속으로 디스크를 회전시키면서 짧은 시간동안 에너지를 저장한다. 플라이휠은 모터에 의해서 전기에너지를 기계에너지로 변환하여 충전하고, 방전 시에는 다시 기계적 에너지에서 전기적인 것으로 변환하여 주는 발전기와 함께 동작한다. 구조는 그림 1과 같다. 효율을 높이기 위하여 모터와 고정자 사이의 마찰을 제거하기 위한 초전도 부양 기술이 적용된다. 뛰어난 응답특성을 이용하여, 플라이휠 저장시스템은 전력계통의 주파수 조절에 활용될 수 있다. 그러나 비용이 높고, 에너지 밀도가 낮다는 단점이 있으므로, 상업화되기 위해서는 이러한 문제를 개선하여야 할 것이다⁽⁴⁾.

3.2 리튬이온 전지

리튬이온(Li-ion) 전지는 화학적 저장장치의 하나로서, 방전될 때는 음극에서 양극으로 리튬이온이 이동하고 충전될 때는 반대로 작동하여 재충전이 가능하도록 한 전지의 한 종류이다⁽⁶⁾. 그림 2는 전지의 내부 구조와 이온의 흐름을 나타낸다. 리튬이온전지는 화학적 구성과 물리적 구조에 따라, 성능, 가격, 안전 특성이 다양하게 나타난다. 현재, 비용이 높

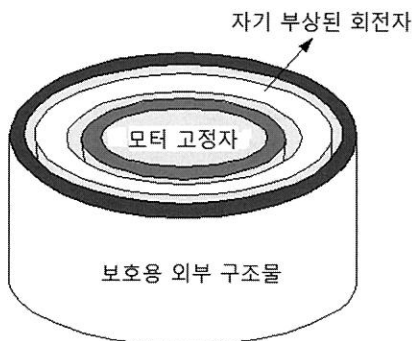


그림 1 자기적으로 부상되어 있는 플라이휠 시스템의 구성⁽⁵⁾

고, 가열되거나 과충전 될 경우 전지의 온도가 급상승하거나 균열이 생겨 폭발할 수 있는 안전문제가 있으므로, 전지기술과 더불어 다양한 배터리 관리 기술이 개발 되고 있다. 동특성 및 효율이 좋고, 에너지 밀도도 높아서 가장 다양한 응용 범위가 예상되는 저장장치이다.

3.3 NaS 전지

나트륨-황 (NaS) 전지는 전해액 형태의 금속전지 중 하나이다 (그림 3). 이 전지는 에너지 밀도가 높고, 수명이 길며, 재료비용이 저렴하다. 그러나, 동작온도가 300-350℃로 높아서 주변 가열장치가 필요하다. 지금은 일본회사인 NGK에

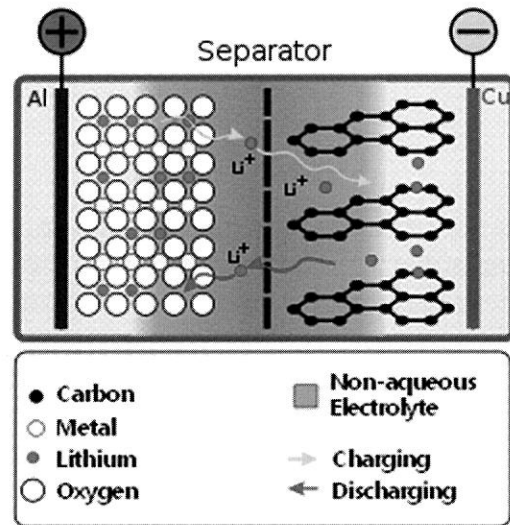


그림 2 리튬이온 전지의 동작 형태⁽⁷⁾

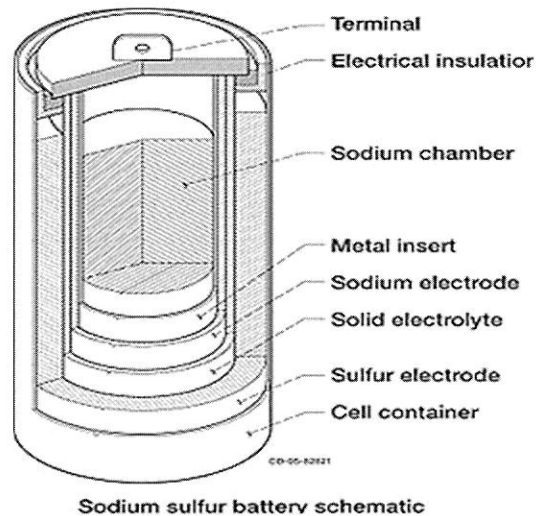


그림 3 황산나트륨(NaS) 전지의 구조, 단면도 (NASA John Glenn Research Center)⁽⁸⁾

의해서 상업화되고 있다. 가장 먼저 대용량 시스템의 실증테스트에 성공한 전지로서, 리튬 이온 전지가 상용화될 때까지 시장을 주도할 것으로 예상된다.

3.4 산화-환원 흐름 전지

산화-환원 흐름 (Redox flow) 전지는 화학에너지를 전기에너지로 바꾸는 전기화학적 반응을 위하여, 전해질이 이동하여 충전이 가능하도록 한 전지이다. 전해질은 외부탱크에 저장되어 있다가, 주로 그림 4에 나타난 것과 같은 형태의 반응로 공간에 투입된다⁽⁹⁾. 플로우 전지는 전기적 형태로 충전하지 않고, 마치 오일펌프처럼 전해질 액체 상태로 탱크에 운반되어 물리적 형태로 충전한다. 가장 잘 알려진 플로우 전지의 예는 바나듐을 기반으로 한 바나듐 레독스(산화-환원) 흐름 전지이다. 에너지량은 전해질의 양으로, 출력전력은 스택 크기에 따라 결정되기 때문에, 특히 대용량에서 에너지 저장과 방전전력을 서로 독립적으로 설계하는 것이 가능하다. 또한

일반적으로 15년 이상의 긴 수명을 가지는 높은 견고함과 신뢰성이 장점이다. 단점은 펌프, 센서, 제어장치와 본체 전지를 동작하기 위한 2차적 기기 등, 주변장치가 복잡하다는 것이다. 또한 이 전지는 일반 전지와 비교했을 때 수용 공간이 증가해서 부피당 에너지 밀도가 비교적 낮다.

3.5 슈퍼커패시터

슈퍼커패시터는 이중막으로 구성 되어있는 전기화학적 에너지 저장장치이다. 슈퍼커패시터는 전기 이중층 커패시터 (Electric Double-Layer Capacitors EDLCs)라고도 불리는데 두 개의 얇은 분리막의 표면적을 넓힘으로서, 넓은 표면에 많은 전자를 함유하게 만든 것이다 (그림 5). 최근에 나노기술과 결합하여 표면적을 극대화 하는 기술이 개발되고 있어, 향후 높은 성능향상이 기대되는 저장장치이다. 현재는 화학적 저장장치에 비해서 전력밀도는 높으나 에너지 밀도가 낮은 편이다.

3.6 저장장치 비교

표 1은 저장장치의 적용에 따른 성능 비교를 나타낸 것이다. 모든 저장기기는 내부 기생저항(equivalent series resistance, ESR)이 있기 때문에, 충·방전시 기기 안에서 전류도통에 의한 전력 손실이 발생한다. 따라서 저항의 크기에 따라 효율이 결정된다. 또한, 이 저항은 충·방전 반응속도를 제한하는 역할도 한다. 이를 종합해보면, 저항의 크기가 작을수록 효율이 높아지고 동특성이 빨라지며, 저항이 커지면 그 반대가 된다. 그러나 일반적으로 동특성이 향상되어 전력밀도가 높아지면, 에너지 밀도는 감소하는 경향이 나타난다. 바나듐 흐름 전지는 NaS 전지와 마찬가지로 대용량으로의 사용이 적합하며, 정부의 기술 로드맵에 의하면, 장기간의 실증 테스트를 통해 지금으로부터 적어도 5년 이후에 상용화

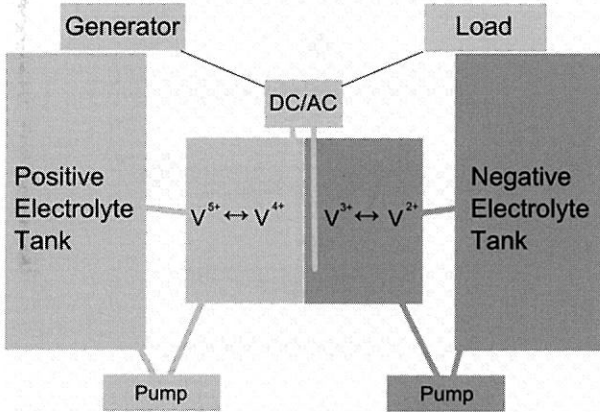


그림 4 바나듐 redox-flow 전지의 도표⁽⁹⁾

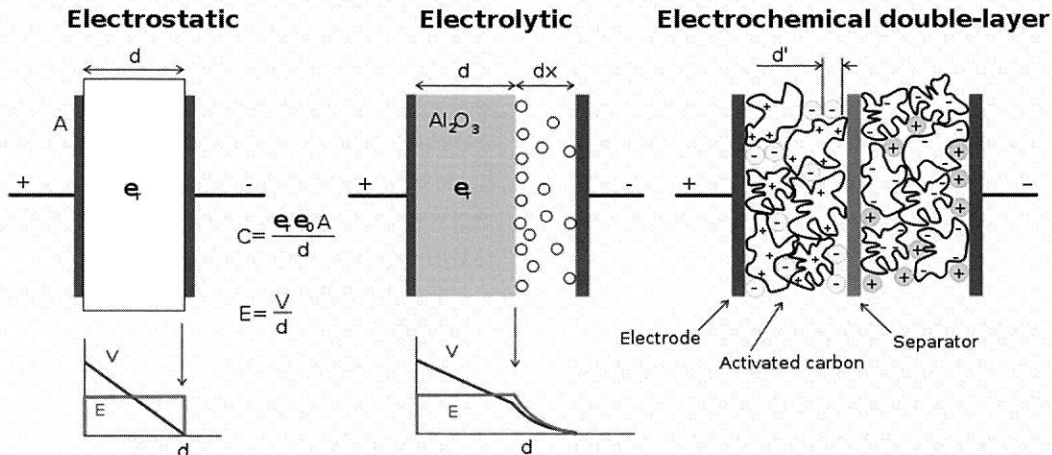


그림 5 정전기형 (일반), 전해질형 (높은 커패시턴스) 그리고 전기화학적 (슈퍼커패시터) 구조변형을 통한 저장장치의 발달과정⁽¹⁰⁾

표 1 주요 에너지 저장장치의 특성 비교 ⁽¹¹⁾

구분	기술현황	효율(%)	밀도(Wh/kg)	전력밀도(W/kg)	충방전 회수(cycles)	자가방전율
양수	성숙	65-80	0.3	-	>20년	매우낮음
CAES(지하)	상업화	45-50	10-30	-	>20년	-
NaS	"	70	120	120	2000	-
리튬이온	"	70-85	100-200	360	500-2000	중간
리튬폴리머	"	70	200	250-1000	>1200	중간
니켈수소	"	50-80	60-80	220	<3000	높음
연축전지	"	70-80	20-35	25	200-2000	낮음
EDLC	"	95	<50	4000	>50000	매우높음
바나듐 흐름전지	Demo	80	25	80-150	>16000	매우낮음
플라이휠	강철	95	5-30	1000	>20000	매우높음
플라이휠	폴리머	95	>50	5000	>20000	매우높음

될 것으로 보고 있다.

4. 저장장치의 부가적인 이슈

4.1 이차전지의 재사용

에너지 저장장치 시장을 확장하기 위하여, 최근에 정부 및 업계에서는 리튬이온 전지의 가격을 낮추는 노력을 하고 있다. 전지 자체에 대한 연구뿐만 아니라, 전기자동차가 상용화된 이후의 저장장치 초기 비용 감소를 위해 전지의 재활용이 연구되었다. 플러그인 하이브리드/전기 자동차의 전지는 전력/에너지 저장용량이 초기성능의 70%-80% 정도로 감소했을 때 폐기되는데, 이는 계통연계용으로서 충분히 사용가능하므로, 재사용(reuse)/ 재판매(resell)/ 재조립(refabricate) 될 수 있다⁽¹²⁾. 예를 들면, 회수된 전지는 주택의 보조전력이나 소규모 상업 건물에 사용될 수 있다. 이차전지의 재사용은 사용자에게 초기 비용부담을 낮추면서 전지의 총 수명을 증가시켜 주게 된다.

미 에너지성 산하 신재생에너지 연구소(NREL)에서는 플러그인 하이브리드/전기 자동차의 비용을 절감하여 시장을 더욱 빠르게 확산시키기 위하여, 전기자동차의 리튬이온 전지를 재사용하는 방식의 실효성을 예측하고 설계하는 '리튬이온 재사용 프로젝트'를 시작하였다. 연구 결과, 전지 초기 비용이 28%까지 줄어들 것으로 예측하였다⁽¹²⁾. 그림 6은 NREL 이차전지 재활용 프로젝트의 사업진행 과정을 나타낸다.

4.2 도시 내 양수 발전과 복사 냉각시스템

대용량 에너지 저장 시스템의 대안으로서, 도시 내에서의 양수발전용 에너지 저장시스템을 생각할 수 있다. 이 시스템은 전통적인 대용량의 양수저장 수력발전 시스템이 도시지역의 건물 위로 작게 나누어진 전력저장 형태이다. 개념적인 전



그림 6 전기자동차 전지 재활용사업 ⁽¹²⁾

체 그림은 그림 7에 나타나 있다 ⁽⁴⁾. 양수 저장고는 도심의 높은 건물 옥상에 설치되고, 비수 시간대의 낮은 가격의 전기에너지로 물을 높은 위치로 끌어올린 후 이용한다. 저장된 물은 최대 수요 시간에 터빈으로 방출되어 전기를 발생시킨다. 이 소형 양수 저장 시스템은 도심 내에 위치하므로 송전시설이 불필요하며, 환경문제 또한 현저히 감소하는 특징이 있다. 고층 빌딩의 화재 시, 소방차의 사다리 높이에 한계가 있으므로, 이를 이용하면 화재진압을 용이하게 할 수도 있다. 기타, 태양광에너지와 혼합 설치하여 냉각효과를 통한 발전효과 극대화도 가능하다. 이를 정리하면 다음과 같다.

- 기존 양수발전과 비교시, 송전설비 및 송전손실 감소
- 환경파괴 저감
- 우기 시, 자동적 물 저장
- 낮 시간, 옥상 열 유입 방지
- 화재시나 일반급수 및 비상급수용
- 태양광 수냉식 발전을 통한 효율극대화 (수상발전)

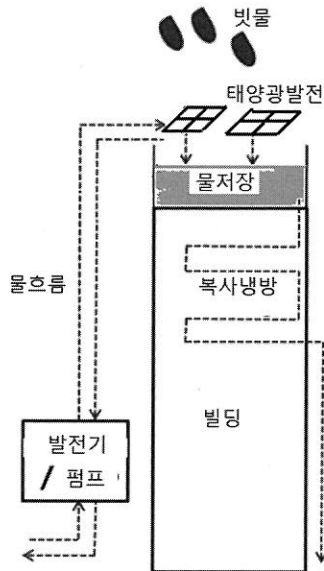


그림 7 도심지역의 양수발전 개념도

상업용/주거용 빌딩에 양수 발전 시스템과 함께 복사냉각이 적용될 수 있다. 복사냉각이란 빌딩 내부의 차가운 표면을 통해 복사와 대류의 조합된 효과로 건물 냉각을 수행하는 것을 말한다. 특히 물을 이용한 이동매질 냉각시스템은 hydraulic radiant cooling system(HRC 시스템)이라 불리며, 온도의 상대개념으로 냉돌이라고 볼 수 있다^[13]. HRC 냉각시, 옥상에 저장된 물을 이용하여 냉각이 가능하다. 냉각 시스템은 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 물은 복사 냉각을 위해 벽/바닥에 공급
- 온돌과 병용하여 사용
- 공기 대류만으로 이루어진 시스템보다 복사 냉각 시스템이 더 고효율임^[4, 13].

5. 결론

본 논고에서는 계통연계 등에 활용 가능한 대용량 에너지 저장장치의 개발 현황과 각각의 장단점을 비교, 소개하였다. 최근에 특히 신재생에너지 연구의 활성화와 분산전원을 포함하는 지능형 전력망 구축을 위해, NaS, 리튬이온, 산화-환원 흐름전지 같은 전기화학적 저장장치 뿐 아니라, 플라이휠과 같은 기계적 저장장치 및 슈퍼커패시터 같은 물리화학적 저장장치까지 다양한 저장소자들이 개발되고 있다. 저장장치는 불안정한 신재생 에너지원의 전력전달을 안정화 시키고, 피크 발전량 감소와 부하 평준화, 그리고 설비망의 주파수 안정화와 송전손실 감소 및 높은 전력품질을 유지하는 등, 향후 지능형 전력망을 위한 필수적인 요소로 자리매김할 것으로 예상된다. ■

참고 문헌

- [1] 정재현, 노의철, 김홍근, 전태원, "마이크로그리드의 에너지 저장장치", 전력전자학회지, 15권, 2호, 2010년 4월, pp. 43-46.
- [2] Ralph Masiello, "Electricity Storage Policy Issues", 2009
- [3] Joung-Hu Park, "Modern Energy-Storage Technologies for Smart Grid Power Systems," *LS cable technical review*, 2010.11.
- [4] 스마트그리드를 위한 전력저장기술, 기초전력연구원, 2011. 5
- [5] <http://ceramics.org/ceramicstechnology/materials-innovations/arra-to-fund-megawatt-energy-storage-flywheels/>
- [6] www.wikipedia.com
- [7] Cepheiden, de.wikipedia, creative commons
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/NAS_battery
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Vanadium_redox_battery
- [10] <http://www.maxwell.com>
- [11] Sergio Vazquez, Srdjan M. Lukic, Eduardo Galvan, Leopoldo G. Franquelo, and Juan M. Carrasco, "Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 57, NO. 12, DECEMBER 2010, pp. 3881-3895.
- [12] Jeremy Neubauer, Ahmad Pesaran, "PHEV/EV Li-Ion Battery Second-Use Project," National Renewable Energy Laboratory, AABC 2010.
- [13] Helmut E. Feustel, Corina Stetiu, "Hydronic radiant cooling - preliminary assessment," *Energy and Buildings* 22, 1995, pp. 193-205.

〈필자 소개〉



박종후(朴鍾厚)

1975년 8월 26일생. 1999년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학). 2004년~2005년 Virginia Tech(Visiting Scholar). 2006년~2007년 반도체공동연구소 선임연구원 및 연수연구원.

2007년~2009년 서울대 정보기술사업단 박사후 연구원. 2009년~현재 숭실대 전기공학부 조교수.