



전력산업용 에너지 저장기술 현황과 향후 과제



김 상 범
한전 전력연구원 책임연구원

1. 개 황

최근의 에너지 분야 Mega Trend는 신에너지 개발과 기존 에너지의 효율적 사용으로 함축할 수 있다. 화석

연료의 고갈에 대비하고 온실 가스를 감축하기 위함이다. 그린에너지의 대명사인 전력산업에서는 그 일환으로 스마트그리드 사업이 범국가적으로 추진되고 있다. 스마트그리드 사업은 2008년 저탄소 녹색성장을 국가

비전으로 선언한 이래 전력망, 신재생, 운송, 서비스, 소비자 등 5대 분야를 중심으로 미래 신성장동력 창출, 기후변화 대응, 에너지 효율 향상을 목적으로 진행되고 있다. 이 모든 분야의 성공을 위해서 빠져서 안되는 요소가 바로 에너지 저장장치¹⁾이다.

에너지 저장장치는 매우 다양하게 활용될 수 있다. 우선 지능형 운송 분야에서는 전기자동차의 주 에너지원 역할을 한다. 나머지 전력계통 망과 관련된 분야에서는 근본적으로 다음의 3가지 기능으로 요약할 수 있다.

첫째, 신재생에너지의 계통연계를 가능하게 해준다. 풍력, 태양 에너지 등 신재생에너지는 우리가 필요로 하지 않을 때에도 에너지가 생산되는 특징이 있고, 에너지가 남을 때 저장하여 필요할 때 사용할 수 있게 해준다.

둘째, 정전사고 예방 기능이 있다. 저장된 에너지를 비상시에 공급함으로써 무정전 전력공급이 가능하다.

셋째, 예비발전설비 규모를 저감시켜 준다. 여유가 있을 때 에너지를 저장하고 피크 부하 시 공급함으로써 예비력을 키워주는 역할을 한다.

본고에서는 이러한 장점이 있는 에너지 저장장치에 있어서 기술개발 현황을 조사하고 각 저장장치의 장단점을 파악하며, 전력산업에 적용하였을 때 기대되는 이점에 대해 살펴보고자 한다. 나아가 전력산업에서의 요구 조건과 향후 과제에 대해서도 살펴본다.

2. 현황

가. 양수발전(Pumped Hydropower)

1890년대 이탈리아와 스위스에서 처음 시도된 이래 지금까지 가장 널리 사용되고 있는 대규모 에너지 저장 기술로서 상부와 하부 두 개의 저수지를 두어 전력 여유가 있을 때 상부로 물을 이동시키고 피크 부하 때 낙차를 이용해 발전한다. 전 세계적으로 90GW 이상 설치되어 세계 총발전량의 약 3%를 차지하고 있다. 우리나라는 3.9GW 설비용량으로 전체의 약 6%에 해당한다.

하부 저수지 개념으로 강, 호수, 해양 등도 가능하며 지하 공동이나 폐광을 활용하기도 한다. 효율은 설비 노후도에 따라 70~85% 범위에 있다.

대용량화에 유리하여 경제적인 장점이 있으나 공사 기간이 길고 초기 투자비가 크며 환경 문제나 부지 선정이 쉽지 않은 문제점이 있다.

나. 압축공기 저장장치(Compressed Air Energy Storage)

압축공기와 가스 터빈 발전기를 조합하여 사용하는 시스템이다. 전력 여유가 있을 때 공기를 압축하여 지하 공동이나 폐광 등에 저장하고 피크 부하 때 연료에 혼합, 연소시켜 전기를 생산한다. 가스 터빈 발전기 중 약 2/3가 연소 전에 공기를 압축한다는 점에 착안한 것이다. 이때 연료 소비량을 40% 정도 절감 가능하다고 알려져 있다.

최초의 압축공기 저장장치는 독일 Hundorf에 1978년 290MW급이 설치되었고 1991년에는 미국 Alabama에

1) 에너지 저장은 통상적으로 전력저장을 의미한다. 다른 형태의 에너지 저장은 별다른 어려움이 없다.

110MW급이 설치된 바 있다. 이 기술은 자연적으로 형성되거나 용도가 없는 큰 지하 공간을 이용함으로써 투자비를 대폭 줄일 수 있고 대용량화에 유리한 장점이 있다.

반면에 설치 공간의 제약을 받게 되므로 수요지와 멀리 떨어진 곳에 건설할 수밖에 없는 경우가 많다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 최근에는 지상의 천연가스 용기를 이용한 압축공기 저장기술 개발이 진행되고 있다.

다. 이차전지 (Battery)

이차전지는 전기화학적으로 에너지로 저장하는 형태로써 화학적 에너지와 전기에너지의 가역적 변환이 가능한 점에서 일차전지와 구분된다. 1800년 Volta에 의해 발명된 이래 매우 다양한 전지가 지금까지 제안되고 개발되고 있다.

좋은 효율, 소규모 크기, 설치 용이성 등이 대표적인 장점이지만 아직까지 가격이 비싸거나 수명이 짧은 점이 단점이다. 현재 수십 MW 정도까지 실증사업이 진행되고 있다. 대용량화에 유리한 몇 가지 이차전지에 대하여 특성을 간단히 비교하여 표 1에 나타내었다.

■ 모듈형 전지 (Modular Battery)

모듈형 전지는 여러 개의 단전지와 이들을 기본적으로 제어하는 BMS(battery management system)를 묶어 모듈을 구성하고 이를 동작 가능한 최소 단위로 설정하여 그 조합으로 출력과 용량을 조절한다.

출력과 용량이 모듈 단위로 결정되고 시스템의 안전과 효율적 운용을 위해 단전지 단위로 상태를 감시하고 관리해야 한다.

■ 납축전지 (Lead Acid Battery)

1850년대 실용적 개발을 시작으로 상업화된 지 100년이 넘도록 오랜 기간 검증되고 산업 전 분야에 걸쳐 가장 널리 사용되고 있는 이차전지이다. 매우 저렴하고 신뢰성 있는 이차전지로서 대용량 에너지 저장장치로서의 주목을 받는 것은 당연하지만, 짧은 수명, 작은 에너지 밀도 등의 단점 해결이 향후 과제이다. 대용량급으로의 활용은 1980년대 'island' 네트워크 상태가 된 서베를린의 주파수 제어와 예비력 증강을 위한 8.5MW/8.5MWh급 운전이 최초이다. 이후 1986년 미국 캘리포니아에 10MW급, 1996년 미국 PG&G 2MW급 등의 실증운전 실적이 있다.

[표 1] 이차전지 물성 비교

특 성		전지 종류				
		납축전지	리튬이온	나트륨-황	바나듐레독스	아연-브롬
전압	V	2.04	3.6	2.08	1.4	1.82
이론 에너지 밀도	Wh/kg	110	250	780	100	430
	Wh/L	220	250	1000	120	600
수명	Year	2	5	15	5~15	-
효율	%	85	95	90	80	80
동작온도	℃	5~50	5~50	280~350	40~80	20~50
전해질		황산수용액	유기용매	Solid	바나듐 황산수용액	ZnBr ₂ 수용액
자가 방전		있음	적음	없음	있음	있음

■ 리튬전지 (Lithium Ion/Lithium Polymer Battery)

리튬 화합물을 양극으로, 리튬 혹은 흑연을 음극으로 사용하며, 리튬이온전지는 유기용매를 전해질로 사용하고 리튬폴리머 전지는 폴리머를 전해질로 사용한다.

1970년대 미국 빙햄턴 대학의 화학자 Whittingham이 처음 제안한 이래 다양한 음극 및 양극 활물질이 개발되면서 성능이 크게 향상되었다. 가볍고 에너지 밀도가 높아 휴대폰, 노트북 등 휴대기기의 소형 전원으로 광범위하게 사용되고 있으며, 최근에는 전기자동차 전원으로 개발이 활발하게 진행되고 있다. 다수의 기업에서 연구 개발하고 있어 향후 발전 가능성이 큰 이차전지로 평가 받고 있으나 아직까지 가격이 비싸고 안전성이 검증되어야 하는 문제점이 있다.

미국 AES에서는 주파수 조정 용도로 2009년 2MW/250kWh급 리튬이온전지 실증연구를 수행한 실적이 있다.

■ 나트륨-황 전지 (Sodium Sulfur Battery)

양극으로 나트륨 금속, 음극으로 황을 사용하는 이차전지로 1960년대 중반 포드 자동차에서 처음 제안되었다. 1970년대 오일 쇼크와 더불어 전기자동차 붐을 타고 미국과 유럽 다수의 국가가 개발하다가 점점 쇠퇴하였고, 일본만 유일하게 1980년대 초반부터 부하평준화용으로 방향을 선회하여 현재에 이르고 있다.

지구상에 풍부한 원소를 활물질로 사용하여 대량 생산 시 가격 하락 가능성이 크고 구조가 단순한 장점이 있는 반면 300℃ 이상의 온도에서 동작하는 점, 이에 따른 효율 하락 등이 단점으로 지목된다. 현재 대용량 전력 저장용으로 유일하게 상용화된 이차전지이며, 일본

NGK의 생산 능력은 2010년 기준 150MW 정도로 알려져 있다. 1995년 동경전력 주도하에 부하평준화용 실증시험을 시작하였으며, 2008년까지 미국, 프랑스, 독일, 중동 등에 걸쳐 300MW(1800MWh 해당) 이상이 설치되었다.

■ 흐름형 전지 (Flow Battery)

모듈형 전지가 단전지 단위로 폐쇄된 시스템인데 비해 흐름형 전지는 활물질이 외부 용기에 저장되어 있다가 펌프를 통해 반응 셀로 이동하여 화학 반응을 일으키는 이차전지 형태이다. 외부 용기를 바꾸어 활물질을 즉시 공급함으로써 '신속하게 충전' 한 효과를 얻을 수도 있다. 반응 면적을 넓혀서 출력을 높이고 용기 크기를 늘려 용량을 늘릴 수 있어 출력과 용량을 자유롭게 설계 가능한 특징이 있다.

■ 바나듐-레독스 (Vanadium Redox)

산화수가 +2, +3, +4, +5로 다양하게 존재하는 금속 바나듐의 산화/환원(reduction/oxidation) 반응을 이용하는 형태로 1970년대 NASA에서 처음 시도되었다.

이후 일본의 ETL(Electro-Technical Lab.), 호주의 뉴 사우스 웨일즈대학교를 중심으로 태양광 에너지저장용, 골프 카, 부하관리용(200kW/800kWh, 미쓰비시 화학/가시마기타 전력) 등으로 연구개발이 진행되었다. 호주 Pinnacle VRB, 캐나다의 VRB power systems, 일본 스미토모 전기공업 등이 대표적인 기관이다. 스미토모 전기공업은 2003년까지 최대 300kW/1.2MWh급 운전 실적이 있다.

■ 아연-브롬 (Zinc Bromine)

저렴한 금속 아연과 할로젠족 브롬을 쌍으로 하는 형태이다. 1885년 처음으로 제안되었으나 충전 중 아연극에서

덴드라이트(dendrite) 조직이 형성되는 문제점 때문에 상업화 연구는 1970년대 중반 이후로 늦어졌다. 처음 Gould사를 시작으로 Evercel에서도 1980년대에 개발한 실적이 있다. 이후 Exxon을 거쳐 ZBB까지 이어지며, ZBB는 이동식 컨테이너에 250kW/500kWh급 시스템을 구축하고 2001년 부하관리 목적으로 미국 Michigan에, 피크부하 저감 목적으로 호주 Melbourne에 설치하고 실증한 바 있다.

라. 플라이휠 (Flywheel)

전기에너지를 회전체의 운동에너지로 저장하는 기술이다. 저장 에너지는 회전수의 제곱에 비례하기 때문에 저장 밀도를 높이기 위해서 플라이휠의 회전 속도를 매우 높이는 방법을 주로 사용한다.

또한 마찰력을 최소화하기 위해 자력으로 플라이휠을 부상시키고 진공에서 회전하도록 한다. 장점은 유지 보수가 적고 수만 사이클(20년 정도에 해당)에 이르는 긴 수명이다. 단점으로는 대기(standby) 상태에서의 에너지 손실에 따라 장기간 저장이 불리하다는 점이다.

현재 2kW/6kWh 급이 상용화되어 있어 대용량화 기술 개발이 요구된다.

마. 초전도 자기에너지 저장장치 (Superconducting Magnetic Energy Storage)

이는 초전도 코일을 흐르는 전류에 의해 발생하는 자기장 속에 에너지를 저장하는 개념이다. 임계 온도 이하인 극저온이 되면 초전도 코일의 저항은 없어지기 때문에 한 번 저장이 되면 전류가 감소되지 않아 자기에너지로 보존된다. 충전과 방전이 매우 빠르게 진행될 수 있고 저장 효율이 95% 이상으로 매우 높은 반면, 고가의 초전도체와

이를 냉각시키는 비용이 커 단기간 저장 용도로 주로 사용된다. 처음 1970년대에는 대용량 에너지 저장장치로 시도되었지만 경제성 문제로 1990년 이후에는 소형으로 가능한 전력품질 향상용으로 주로 개발되고 있다. 대용량화가 향후 과제로 남아 있다.

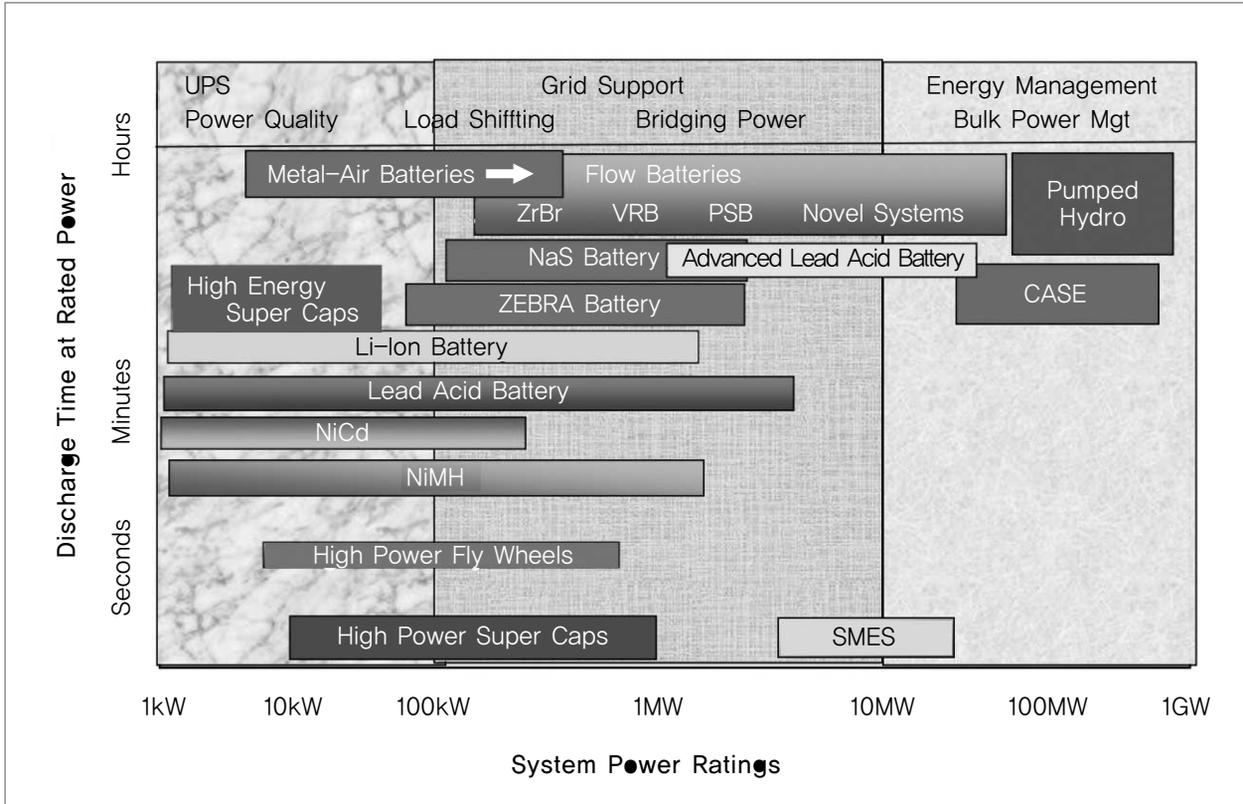
바. 전기화학 커패시터 (Electrochemical Capacitor)

컴퓨터 메모리 백업용으로 1979년 처음 개발된 이래 많은 기업에서 제조되고 있으며, Electric Double Layer Capacitor(EDLC), Super Capacitor, Ultra Capacitor 등 다양한 이름으로 불리고 있다. 통상의 커패시터와 달리 유전체가 필요 없고 수 나노미터 정도의 매우 얇은 반대극의 전기이중층에 전하를 축적할 수 있어 단위 부피당 대면적 확보로 일반 커패시터보다 큰 용량을 저장할 수 있다.

이차전지에 비해 에너지 밀도는 작지만 사이클 수명이 수만에 이를 정도로 길다. 또한 효율이 80~95% 정도로 매우 높으며 방전 시간이 짧은 대신 응답 속도가 빨라 전력품질용으로 주로 사용된다.

3. 국내 현황

우리나라는 리튬계 소형 전지 분야에 있어서 2011년 세계 최대 생산국으로 발돋움할 정도로 세계적 기술을 보유하고 있다. 그러나 전력산업용 대용량 이차전지 기술 개발은 상대적으로 열악한 편이다. 1992년 'G7 과제'로 (주)유공, 자동차부품연구원 등이 전기자동차용 25kWh급 NaS 전지 개발을 시도하였으나 전기자동차 붐의 쇠퇴로 곧 중단되었다. 1998년에는 전기연구원,



[그림 1] 에너지 저장기술별 특징과 용도

이화전기공업 등이 납축전지를 이용한 1MW급 전력 저장용 전지시스템을 개발하였으나 상업화 운전으로까지는 진행되지 못하였다.

2008년부터 다시 정부차원에서 신형 전지를 이용한 대용량 전력저장장치에 관한 연구기획이 시작되었고, 2010년에는 지식경제부에서 이차전지 경쟁력 강화 방안으로 전기자동차 및 에너지 저장 용도의 중대형 전지 개발을 위해 2020년까지 18.9조 원의 재원을 투자하기로 방침을 정한 바 있다.

그 일환으로 2011년 KEPCO 주관의 신재생에너지 연계형 대용량 리튬전지 실증연구, POSCO 주관의 Na-base 이차전지 개발연구가 시작되었다.

4. 전력산업에서의 용도와 경제성

앞서 에너지 저장기술의 특징을 살펴보았듯이 각 기술별로 장점과 단점이 두드러짐을 알 수 있다. 이는 필요한 목적에 가장 부합하는 에너지 저장기술이 존재한다는 점을 시사한다. 그림 1은 다양한 에너지 저장 기술별로 출력과 방전 시간 특성을 보인 것이다. 출력 기준으로 1~100kW 범위는 비상전원(UPS) 또는 전력 품질(PQ) 용도, 100kW~10MW 범위는 부하평준화 등 계통지원 용도, 10MW 이상의 초대용량(Bulk Power)은 에너지 관리 용도로 대략 구분할 수 있다. 플라이휠, 전기화학 커패시터는 전력품질 용도에 적합하며, 이차전지는 전력품질과 계통지원 용도 두 가지에 걸쳐 적용될 수 있음을 알 수 있다. 양수발전이나 압축공기 저장

[표 2] 전력산업에서의 응용 분야와 편익

적용 분야		요구시간 (h)	편익* (\$/kW)	비고
전원공급 (Electric Supply)	부하 이동 (Time-shift)	2~8	400~700	buy low – sell high, peak shave
	발전설비 투자회피 (Supply Capacity)	4~6	359~710	투자 회피/자연 효과
계통지원 (Grid Support)	송전 안정화 (Transmission Support)	0.001	192	전압강하, 전압 불안정 해소
	혼잡비용 경감 (Transmission Congestion Relief)	3~6	31~141	congestion charge 회피
	설비개선 연기 (T&D Upgrade Deferral)	3~6	759~1,079	90th percentile 기준
	변전소 비상전원 (Substation On-site Power)	8~16	1,800~3,000	구내 비상전원 (기준 납축전지 대체)
보조서비스 (Ancillary Service)	부하추종 (Load Following)	2~4	600~1,000	—
	조정서비스 (Area Regulation)	0.25~0.5	785~2,010	주파수 유지, damping 방지효과
	공급 예비력 (Supply Reserve)	1~2	57~225	spinning, supplemental, backup
	전압제어 (Voltage Support)	0.25~1	400	무효전력보상
신재생에너지 (Renewables Integration)	에너지이동 (Energy Time-shift)	3~5	233~389	신재생에너지 공급-수요 일치화
	용량 균일화 (Capacity Firming)	2~4	709~915	일정한 전력공급
	풍력 계통병입(단주기) (Wind Generation Integration)	0.003~0.25	500~1,000	출력변동 감소, 품질향상
	풍력 계통병입(장주기) (Wind Generation Integration)	1~6	100~782	출력변동 감소, 부족분 보충 등
수요자 (End User)	TOU (Time-of-use Cost Management)	4~6	1,226	실시간 buy low – sell high
	수요전력 요금 경감 (Demand Charge Management)	5~11	582	—
	신뢰성 향상 (Service Reliability)	0.08~1	359~978	무정전 공급
	전력품질 향상 (Power Quality)	0.003~0.016	359~978	품질 안정

* 미국 캘리포니아 주 기준. 장치 수명은 10년으로 가정.

[표 3] 에너지 저장장치의 경제성 비교

저장기술	비용		저장 시간 (h)	총비용* (\$/kW)
	(\$/kW)	(\$/kWh)		
양수발전 (1,000MW)	1,500~2,000	100~200	10	2,500~4,000
압축공기	지하(100~300MW)	590~730	102	600~750
	지상(10~20MW)	700~800	200~250	1,000~1,800
이차전지 (10MW)	납축전지	420~660	330~480	1,740~2,580
	나트륨-황	450~550	350~400	1,850~2,150
	흐름 전지	425~1,300	280~450	1,545~3,100
플라이휠 (10MW)	3,360~3,920	1,340~1,570	0.25	3,695~4,313
초전도 자기에너지	200~250	650,000~860,000	0.003	350~489
전기화학 커패시터	250~350	20,000~30,000	0.03	300~450

* 전력변환장치(power conditioning system)까지 포함한 비용.

장치는 수백 MW 이상의 대규모 에너지 관리 용도에 적합함을 보여준다.

좀 더 상세하게 응용 가능한 분야와 그 편익에 대하여 표 2에 정리하였다. 전원공급, 계통지원, 보조서비스, 신재생에너지, 수요자 관점 등 18개 세부 분야에 활용이 예상된다. 이를 통해 요구되는 방전 시간을 고려하여 가장 경제적인 저장기술을 선택할 수 있을 것이다. 이는 미국 캘리포니아 주를 기준으로 작성된 것이다. 미국의 전력 산업 상황과 우리나라 여건은 매우 다르기 때문에 이를 그대로 우리나라에 적용하기에는 어려움이 있다. 바꾸어 표현하면 우리나라의 실정에 적합한 자료를 구축하는 것도 앞으로의 숙제라 할 수 있다.

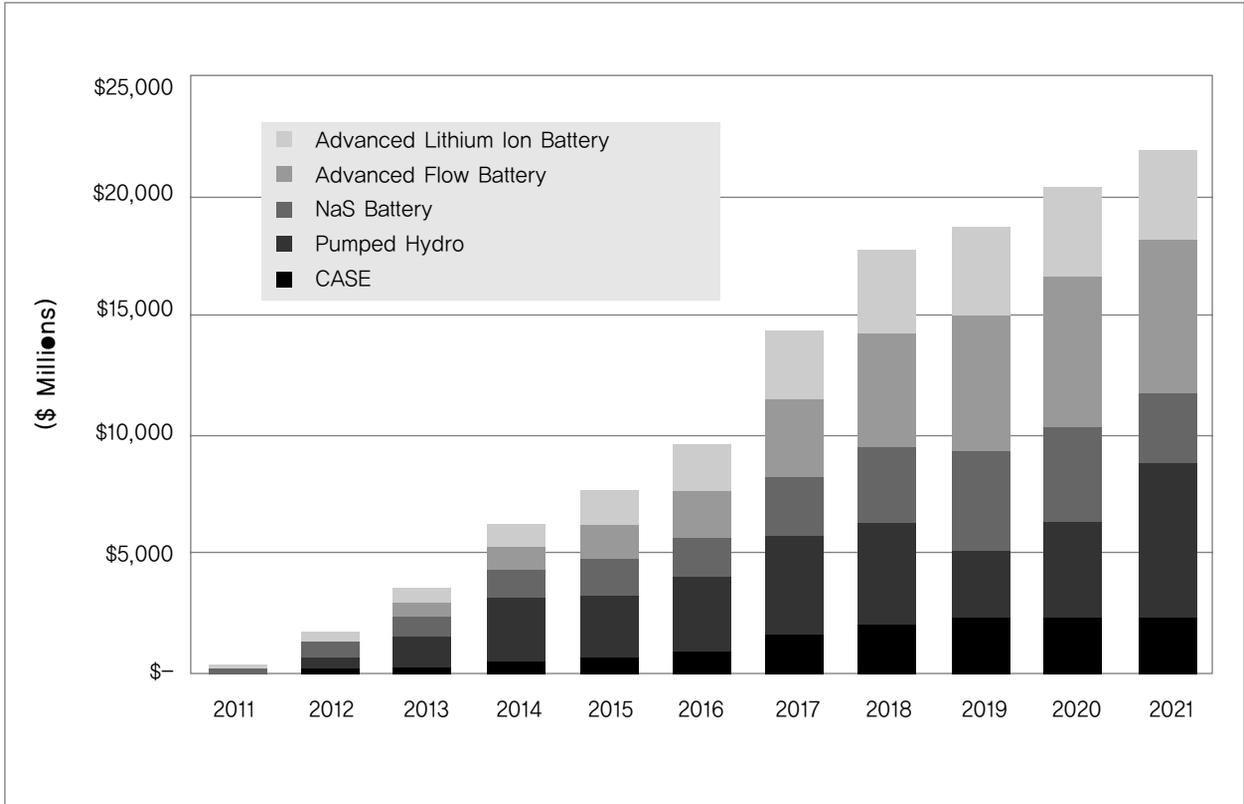
한편, 각각의 에너지 저장기술에 대한 설치비용은 표 3에 요약하였다. 초전도 자기에너지 저장장치와 전기화학 커패시터는 단위 용량 비용은 매우 높으나 단위 출력

비용은 가장 낮은 것을 알 수 있다.

따라서 단시간 고출력이 필요한 전력품질용으로 가장 적합할 것이라 추정되고 있다.

양수발전이나 압축공기 저장장치는 단위 용량 비용이 가장 우수함을 알 수 있고, 이차전지는 그 중간에 위치하여 수십 MW, 수십 MWh 영역에서의 응용에 유리하다. 전력변환장치를 포함한 총비용에서도 양수발전을 제외하고는 용량 및 출력에 따른 경제성 우열에 별다른 차이가 없다.

이제 표 2, 3을 근거로 설치 총비용과 (장치 수명과 유지 보수 비용을 추가로 고려하면 더 정확함) 분야별 편익을 비교함으로써 에너지 저장장치의 경제성 여부를 어느 정도 가늠해 볼 수 있다. 아직까지는 경제성을 확보하기가 쉽지 않아 보인다. 미국 EPRI도 전력회사 및 소비자



[그림 2] 에너지 저장기술 시장 전망 (출처: Pike Research)

모두의 편익을 감안할 때 전력산업에 대량으로 도입되기 위해서는 에너지 저장장치 시스템 가격이 150\$/kWh ~250\$/kWh 범위에(저장장치 단독으로는 100\$/kWh 이내) 진입해야 한다고 예상하였다.

우리나라처럼 전력계통망이 매우 안정적으로 운영되는 경우 그 분기점은 더욱 떨어질 것이 자명하다. 하지만, 급증하는 시장 요구에 맞추어 향후 기술 향상과 더불어 대량 생산에 따른 에너지 저장장치의 현저한 가격 하락이 예상된다. 나아가 하나의 저장장치로 여러 가지 기능을 할 수 있도록 운영 전략을 도출한다면 전력산업에 광범위하게 보급되는 시점을 더욱 앞당길 수 있을 것으로 예상된다.

5. 시장 전망 및 향후 과제

전력산업에서의 대용량 에너지 저장장치 시장은 급속히 신장할 것이 예상된다.

그림 2에서와 같이 Pike Research는 향후 10년간 220억 달러(약 25조 원) 시장으로 성장할 것으로 내다 보았다. 그중 50%가 신재생에너지 대응, 31%는 부하 평준화/첨두부하 완화, 12%는 요금차익, 7%는 송배전 설비투자 지연 목적으로 각각 활용될 것으로 전망했다.

이와 같은 시장 성장 배경에는 고성능이면서 경제성 있는 저장기술이 확립될 것이라는 전제가 깔려 있다. 전력저장장치 확대 보급에 있어서 가장 중요한 덕목은

경제성일 수밖에 없다. 전력이 다른 에너지에 비해 매우 저렴하기 때문이다.

따라서 향후 에너지 저장장치의 기술개발에 있어서 경제성이 최우선으로 고려되어야 한다. 저장장치의 가격 뿐만 아니라 수명, 효율, 유지보수 비용 등을 포함한 전체 비용을 최소화하는 방향이어야 할 것이다.

제작 주체는 저렴하게 제작하는 기술이 중심이 되고, 활용하는 주체는 장수명, 고효율로 운영하는 기술을 확립 하는 것이 에너지 저장장치 시장 확대와 더불어 단기간 내 전력산업 고도화를 이루는 길이라 판단된다.

오늘날 우리는 휴대폰과 스마트폰으로 인해 정보통신의 유비쿼터스 시대에 살고 있다. 이는 소형 에너지 저장 장치의 기술적인 뒷받침이 있기 때문에 가능한 것이다. 이제 전력의 유비쿼터스 시대가 열리고 있다. 언제 어디

서나 고품질의 전력을 저렴하게 사용할 수 있는 시대가 머지않았다. 이를 위해서는 값싸고 신뢰성 있는 에너지 저장장치 개발이 필수적이다.

우리나라는 이미 소형 이차전지 분야에서 세계적인 기술력을 갖추고 있다. 이를 바탕으로 정부와 산학연이 연계되어 중대형 에너지 저장장치 개발에 적극 나서고 있는 만큼 조만간 신성장동력 창출과 함께 세계 시장을 주도할 것으로 기대되고 있다.

나아가 첨단 기술개발에도 관심을 기울여 지속적으로 세계를 선도할 밑거름도 준비하여야 할 것이다. 금속-공기 전지, 상온형 NaS 전지, Ultrabattery 등 한 단계 진보된 형태뿐만 아니라 2009년 MIT 10대 유망기술 중 하나인 액체전지와 같이 획기적인 형태의 에너지 저장 장치가 후보군으로 대두되고 있다. KEA