Vanadium Redox Flow Battery 개발 및 국내 실증

한 신
(주)에이치투 대표이사

김유종
(주)에이치투 기술연구소 팀장

허지향
(주)에이치투 기술연구소 팀장

1. 개 황

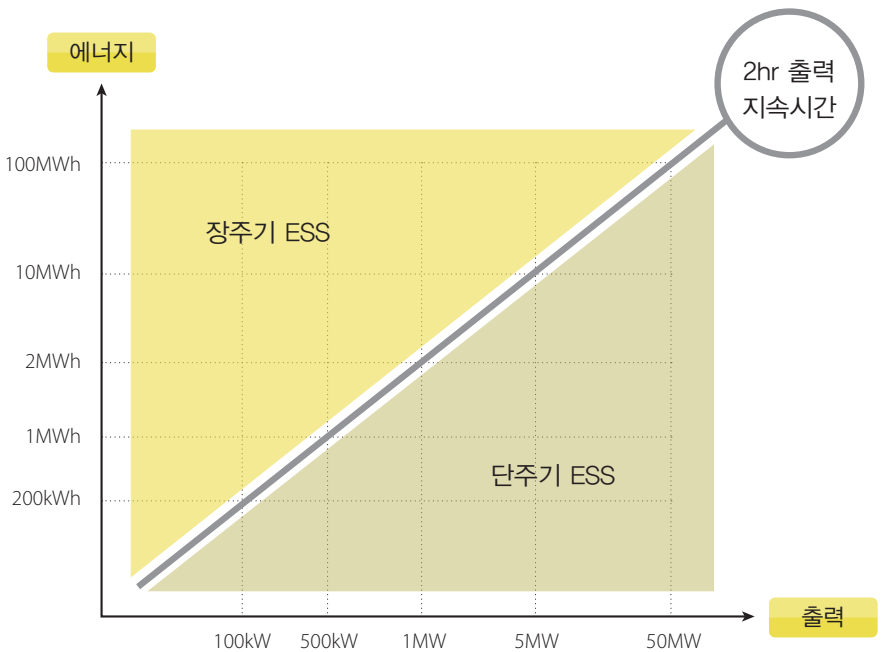
전 세계적으로 에너지 수요가 급증하고 있고 화석연료의 사용에 따른 환경오염 및 지구온난화에 대한 문제의식이 커지면서 신재생에너지가 미래의 에너지원으로 주목 받고 있다. 하지만 신재생에너지는 기후환경에 따른 출력 변동이 커서 안정적인 전력 공급이 불가능하여 전력수급 계획을 수립하는데 큰 어려움

이 있다. 에너지저장 없이 신재생에너지 발전량 비율이 10%를 상회할 경우 전체 전력망의 불안정으로 인해 전력품질에 심각한 피해를 끼치게 된다. 최근의 연구들에 따르면 전력망에 연계되는 신재생에너지 발전량 비율의 한계는 10~15%로 추정된다.

이에 대한 해결방안으로 소비되지 않은 전력을 저장하였다가 전력이 필요한 시기에 공급하는 에너지 저장장치(ESS, Energy Storage System)의 중요성이 전 세계적으로 대두되고 있다. ESS는 전력을 생산하는 발전소부터 소비자까지의 전력망계 전반에 걸쳐 다양한 용도로 사용될 수 있는데, ESS를 이용하여 경부하(야간) 때 유휴전력을 저장하고 과부하(주간) 때 사용함으로써 부하 평준화(Load leveling)를 통해 전력 운영의 최적화가 가능하다.

또한 첨두부하감소(Peak shaving)를 통해 발전사업자 측면에서는 발전소 건설비, 송배전 설치비 등의 설비 투자를 절감할 수 있고 사용자는 전력 소요비용을 줄일 수 있다. 뿐만 아니라 예비전력을 확보하여 여름 및 겨울철의 전력 피크 및 대규모의 정전 사고 등에도 효과적으로 대응할 수 있다. 특히 세계적인 추세인 스마트그리드(Smart Grid)는 현재 공급에서 수요의 단방향으로 이루어지는 전력 공급방식을 양방향으로 바꾸어 생산자와 소비자가 전력을 주고받을 수 있도록 하는 것인데, ESS는 스마트그리드의 핵심 요소로 신재생에너지 등 분산전원의 불안정한 전력 공급을 효율적으로 제어할 수 있고 가정 및 회사에서 충전된 전력을 피크 타임 때 사용하거나 전력회사에 판매가 가능하게 한다.

ESS를 위한 기술로는 2차전지, 슈퍼커패시터, 플라이휠, 압축공기 에너지저장, 양수발전 등 다양한 기술들이 존재하는데, 플라이휠이나 슈퍼커패시터는 장수명의 장점을 가지고 있으나 방전시간 10분 이하의 짧은 시간 동안 에너지를 공급하는 용도에 최적화되어 있어 긴 시간 에너지를 저장하는 용도로는 적합하지 않다. 양수발전이나 압축공기 에너지저장은 지리적인 제약이 존재하며 초기 구축비용이 매우 높아



[그림 1] 장주기 및 단주기 ESS 구분

설치 용이성이 떨어지는 단점이 있다.

따라서 지리적 제약이 없고 다양한 용량의 설치가 가능한 2차전지 방식이 ESS를 위한 기술로 가장 주목받고 있다. 그 중에서도 바나듐 레독스흐름전지(VRFB, Vanadium Redox Flow Battery)는 수명이 2만 사이클 및 20년으로 매우 길고, 출력과 에너지를 완벽하게 독립적으로 설계할 수 있어 2시간 이상의 출력지속시간을 갖는 장주기 ESS([그림 1] 참조)용 2차전지 중 가장 유력한 기술로 거론되고 있다.

2. 현 황

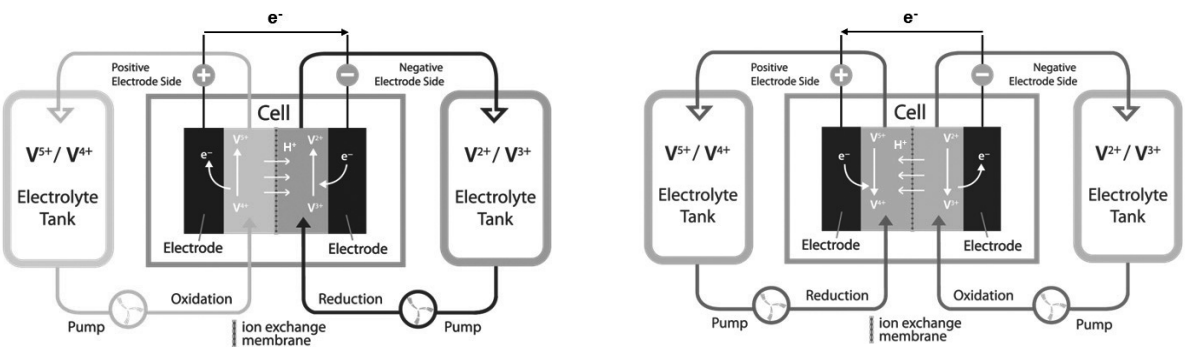
가. 레독스 흐름전지의 원리

레독스 흐름전지는 기존 2차전지와는 달리 전해액(electrolytes) 내의 활물질(active material)이 산화-환원되어 충 · 방전되는 시스템으로 전기에너지를 전해액의 화학적 에너지로 저장시키는 전기화학적 축전장치이다. 실제 전기 화학적 반응은 스택(stack)에서 일어나고 전해액을 유체펌프를 이용하여 스택 내부에 지속적으로 순환시킴으로써 작동한다. 활물질로 사용되는 레독스쌍으로는 V/V, Zn/Br, Fe/Cr, Zn/air 등이 있는데 이 중 V/V, Zn/Br 레독스쌍이 가장 널리 사용되고 있다.

양극과 음극 모두 바나듐을 사용한 레독스 흐름전지를 바나듐계 레독스 흐름전지(VRFB)라고 하며, VRFB의 기본적인 구조 및 충 · 방전 원리는 [그림 2]와 같다. 전지의 충전 시에 스택 내부의 양극에서는 바나듐 4가 이온이 5가 이온으로 산화되고, 스택 내부의 음극에서는 바나듐 3가 이온이 2가 이온으로 환원되며 방전 시에는 이와 반대로 양극에서는 환원 반응, 음극에서는 산화 반응이 일어난다.

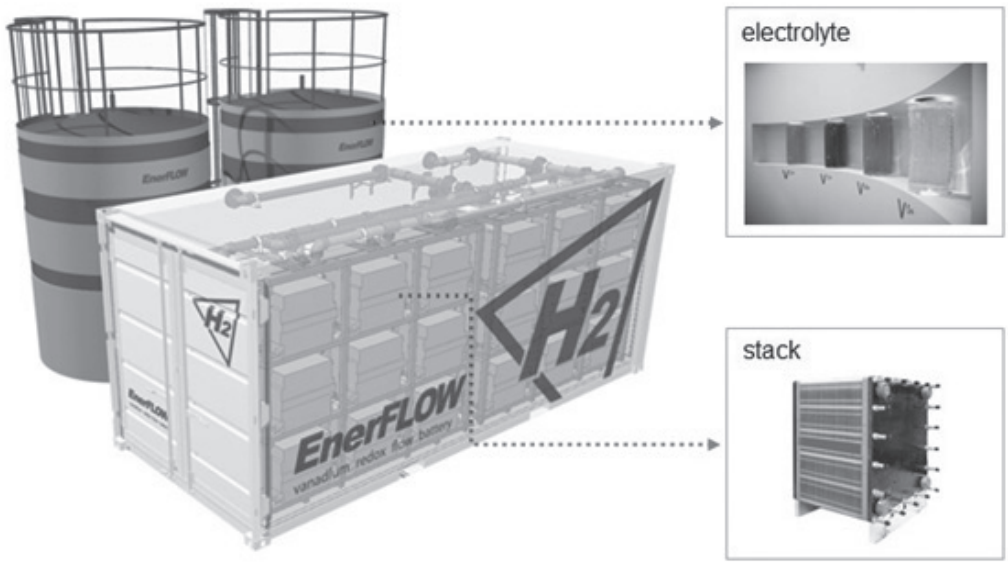
VRFB는 크게 스택과 전해질, 그리고 전해질을 순환시키기 위한 펌프로 구성된다. 스택은 전기화학적 반응이 일어나는 곳으로 전체 시스템의 출력은 스택의 크기와 개수에 의해 결정된다. 에너지는 양극과 음극의 전해질에 저장되므로 전지의 에너지 용량은 전해질 탱크에 담긴 전해질의 양에 의해 결정된다. 즉 VRFB는 전지의 출력과 용량을 서로 독립적으로 설계할 수 있어 출력/용량에 대한 요구가 다양한 ESS에 매우 적합하다. 특히 대용량 VRFB의 경우 [그림 3]과 같이 고출력을 위해 수 십 개의 스택을 컨테이너 등에 적층하고, 에너지저장을 위한 양극 및 음극 전해질은 각각 별도의 탱크에 보관하도록 설계하는 것이 일반적이다.

VRFB는 여타 2차전지와 비교하였을 때 대용량에서 매우 높은 가격 경쟁력을 가진다. [그림 4]는 VRFB와 다른 일반적인 2차전지 간의 초기투자비용을 비교한

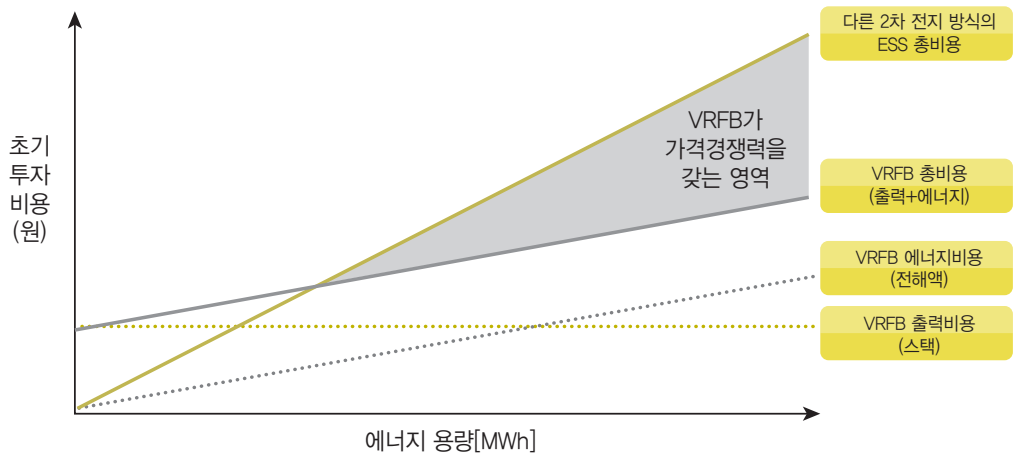


[VRFB 충전과정] [VRFB 방전과정]

[그림 2] VRFB의 기본적인 구조 및 충 · 방전 과정



[그림 3] 대용량 VRFB의 구성요소



[그림 4] VRFB의 장주기 ESS에 대한 가격경쟁력

것인데, 그림에서 보는 바와 같이 일정한 출력을 갖는 ESS를 가정하였을 때 에너지 용량을 늘림에 따라 일반적인 2차전지는 초기투자비용이 일정하게 비례하여 증가하나, VRFB의 경우 출력비용은 그대로 유지되고 에너지 비용만 증가하는 것을 알 수 있다.

VRFB의 에너지 용량을 결정하는 전해질의 가격이 스택의 가격에 비해 상대적으로 저렴하므로 출력 대비 큰 에너지 용량이 필요한 장주기 ESS 시장에서 높은 가격 경쟁력을 갖는다. 또한 어떤 2차전지보다 긴 수명을 가지고 있기 때문에 총 수명 주기 비용 측면에서도 가장 높은 가격 경쟁력을 보인다. 이러한 VRFB의 여러 장점 및 가격 경쟁력 때문에 VRFB는 ESS 및 스마트그리드를 위한 최적의 대용량 2차전지로 주목받고 있다.

나. 국내외 VRFB 기술개발 현황

VRFB의 원천기술은 1985년 호주의 UNSW (University of New South Wales)의 Skyllas-Kazacos 교수팀이 개발하였으며 최근 들어 대용량 에너지 저장 장치의 필요성이 증가함에 따라 전 세계적으로 활발한 연구가 진행되어 현재는 5~10개 정도의 회사가 VRFB를 상업화하였다. 최근 세계적인 연구의 큰 흐름은 VRFB의 효율 향상을 통한 원가 절감과 MWh급의 대형 VRFB 개발 및 실증 경험을 쌓는 것이다.

1) 해외 VRFB 기술 개발 현황

VRFB에 대한 연구개발 및 상용화가 이루어지고 있는 나라는 일본, 중국, 독일, 미국, 호주 등이다. 일본, 중국의 경우 원천기술 라이선스를 바탕으로 VRFB 개발에 가장 먼저 뛰어든 국가로서 수 MWh급의 VRFB 개발 실적 및 10년 이상의 운용 실적을 확보하고 있다. 특히 일본의 경우 2013년 1MW/5MWh의 VRFB ESS의 실증을 마쳤고 같은 해 국가 주도의 '대형 축전시스템 긴급실증사업'을 통해 약 2,000억 원의 사업비를 확보하여 현재 일본 홋카이도지역의 신재생에너지 발전 품질 향상을 목적으로 세계 최대 규모의 15MW/60MWh VRFB ESS를 설치 중이다.

중국도 2011년 Zhangbei 지역에서 4MW/8MWh의 VRFB를 실증한 바 있으며, 2012년에는 중국과학기술원을 통한 독자 기술개발의 결과로 5MW/10MWh의 VRFB ESS를 구현하기도 하였다. 또한 최근 신재생 에너지 발전 비율을 2035년까지 55~60%로 확대하는 것을 발표한 독일의 경우에도 십 년 이상 VRFB의 개발 및 실증이 이루어지고 있으며, 2013년에는 독일 북부의 Pellworm 지역 마이크로그리드 구현을 위해 200kW/1.6MWh의 VRFB ESS를 설치하여 운영 중에 있다.

2) 국내 VRFB 기술 개발 현황

국내에서는 2010년을 전후로 본격적인 연구 개발이 시작 되었으며 현재는 에이치투(H2), OCI, 한국에너지기술연구원 등이 VRFB의 상용화를 위한 연구를 활발히 수행하고 있다. 국내의 경우 VRFB 개발 역사가 짧은 만큼 전극, 분리막과 같은 핵심 소재 기술이 해외에 비해 크게 뒤쳐져 있었으며 대부분의 연구가 소형 VRFB 시스템 구현 단계에 머물러 있었고 실증 사례 또한 많지 않았다.

2013년도에 에이치투가 독자기술로 개발하여 설치에 성공한 50kW/100kWh VRFB ESS[그림 5]가 국내 기술로서는 유일한 VRFB ESS 실증 사례라고 할 수 있다. 앞으로 열릴 ESS 시장의 본격적인 진출을 위해

[그림 5] 50kW/100kWh VRFB ESS 설치사진(충남, 공주)

서는 VRFB의 핵심 소재 기술 개발과 더불어 MWh급의 실증이 필수적으로 요구될 것으로 판단된다.

3. 전 망

가. 대규모 풍력발전단지를 위한 ESS 구축

일반적으로 풍력발전기는 까다로운 계통 연계 조건을 갖는다. 송배전 업체가 설정한 일련의 연계 조건들을 만족시키지 못할 경우 풍력발전기는 연결된 계통에 심각한 불안정성을 초래할 수 있기 때문이다. 풍량의 급격한 변동이나 예측 못한 사고에 따른 대규모 풍력발전기의 갑작스러운 탈락, 예측된 수요를 뒷받침 하지 못하는 풍력발전기의 낮은 출력 등은 계통에 심각한 문제를 일으킬 수 있으며 이와 같은 문제는 특히 대규모 풍력발전단지에서 더욱 심각하게 나타날 수 있다. 또한 대규모 풍력발전단지를 위한 송배전 설비는 발전기의 최대 출력을 기준으로 설계되어야 하기 때문에 대규모 풍력단지의 경우 송배전 설비에 막대한 투자가 필요하게 된다.

이와 같은 풍력발전의 문제점을 근본적으로 해결하기 위하여 풍력발전기와 ESS를 연계 운용하는 연구와 실증 사업이 일본, 중국, 독일 등지에서 활발하게 이루어지고 있다. 우리나라에서는 2019년 완공을 목표로 서남해 2.5GW 해상풍력발전단지 건설사업을 추진하고 있는데, 단순히 풍력발전기에 대한 연구개발뿐만 아니라 풍력발전단지를 효과적으로 설치, 운용하기 위한 ESS의 개발 및 운용방법에 대한 연구가 뒷받침 되어야만 본 사업을 성공적으로 완료할 수 있을 것이다.

VRFB ESS는 '풍력+ESS'에 대해 이미 일본, 중국 등에서 최대 8MWh급의 VRFB ESS를 통해 풍력발전 연계에 대한 실증이 진행된 바 있으며, 이를 통해 풍력발전에 매우 적합한 대용량 ESS임을 입증한 바 있다. 대규모 풍력발전단지에 대해 VRFB ESS를 이용할 경우 표와 같은 대표적인 4가지의 응용분야를 통해 풍력발전의 발전품질 및 계통연계성을 향상시키는 것이 가능하다.

나. 태양광발전과 연계한 하이브리드 발전 체계 구축

VRFB 진입이 유력할 것으로 보이는 또 다른 시장은 디젤 발전을 대체하기 위한 태양광발전과 ESS를

풍력발전을 위한 VRFB ESS 응용분야

구분	응용분야	출력지속시간		설명
		최소	최대	
1	신재생에너지 time-shift (장주기)	3시간	5시간	– Off-peak 때 발전된 전력을 발전 즉시 판매하지 않고 ESS에 저장한 후, 전력단가가 높은 on-peak 시간 때에 판매하여 수익을 창출함
2	신재생에너지 capacity firming (장주기)	2시간	4시간	– 전력수요가 많은 시간대에 신재생에너지의 출력품질을 안정화하여 전통적인 발전용량의 필요성을 줄이고 신재생에너지의 capacity credit을 높임
3	풍력발전 계통연계 (장주기)	1시간	6시간	– 풍력발전의 수분~수시간 출력변화를 감소시킴(load following) – 송전 병목문제 해결 – 갑작스러운 풍력발전량 부족을 위한 백업 – 풍력발전량의 전력수요량 초과상황을 감소시킴
4	풍력발전 계통연계 (단주기)	10초	15분	– 풍력발전의 순간적인 출력변화를 감소시킴

연계한 하이브리드 발전 시장이다. 전력시설이 부족한 동남아시아와 아프리카를 중심으로 중앙 전력망과 연계되지 않는 지역이 다수 존재하며 현재 이들 지역에서 주로 이용되고 있는 전력원은 디젤발전기이다. 뿐만 아니라 국토가 넓고 인구 밀도가 낮아 중앙 전력망을 연결하는 것에 비용이 많이 소모되는 미국, 호주 등의 외딴 지역에도 디젤 발전원은 널리 사용되고 있다. 국내에서는 육지에서 멀리 떨어져 있고 인구가 적은 섬에서 디젤발전기를 이용하여 전력을 생산하고 있다.

하지만 디젤발전기는 지속적으로 연료를 공급해주어야 한다는 문제점을 가지고 있다. 일반적으로 중앙 전력망과 닿지 않는 곳은 운송망도 좋지 않으므로 디젤 연료 공급에 많은 비용이 소모되며 연료의 도난 방지에도 상당한 자원이 소모된다. 이와 같은 이유로 인하여 외딴 지역의 디젤발전 비용은 도시에서의 비용의 2~3배에 달하게 된다.

디젤발전기의 높은 발전 비용 문제를 해결하고 온실가스 배출로 인한 환경 문제를 해결하기 위하여 태양광발전으로 디젤발전을 대체하고자 하는 움직임이 활발하게 생겨나고 있다. 특히 최근 들어 태양광의 발전 단가가 급격하게 낮아지면서 태양광발전의 경제성은 점점 더 증가하고 있다. 태양광발전으로 디젤발전을 대체할 때 가장 큰 관건은 발전량이 외부 환경에 매우 민감하다는 점이다. 외부 전력망과 연결되지 않은 독립형 발전의 경우 일몰 이후 및 부조기간에 대한 대비책이 필수적이다.

태양광발전으로 인한 전력의 불안정성을 해소하기 위하여 ESS와 연계한 하이브리드 발전이 해결책이 될 수 있다. 발전된 전기의 일부를 ESS에 저장해 두었다가 발전이 이루어지지 않을 경우 ESS에 저장된 전기를 공급하는 방식으로 외부 환경에 관계없이 일정한 품질의 전기를 공급할 수 있다.

미국 EPRI에 따르면 태양광발전 연계용 ESS는 4시간 가량의 에너지를 저장할 수 있어야 하며 4,000 사이클 이상, 15년 이상의 매우 긴 수명을 요구한다. Sandia Report에서도 이와 같은 용도로 3~5시간 가량의 에너지를 저장할 수 있는 ESS가 필요하다고 언급한 바 있다. VRFB는 다른 2차전지에 비하여 수명이 매우 길고 kWh당 총 수명주기비용이 가장 낮기 때문에 태양광발전과 연계한 하이브리드 발전용 ESS로 가장 적합한 기술이라고 할 수 있다.

향후 급격하게 성장할 것으로 기대되는 하이브리드 발전 시장에서의 경쟁력 확보를 위하여 태양광과 VRFB를 이용한 시스템을 구축하여 실증 경험을 축적하고 관련 운용 기술을 확보하는 것이 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

1. Electricity Energy Storage Technology Options, EPRI, 2010
2. Energy Storage for the Electricity Grid, Sandia National Laboratories, 2010