

신재생에너지와 2차전지-전력저장 기술 연구

박주석*, 한승호**, 김준수*, 조철희*, 장보윤*, 김홍수*, 안영수*

*한국에너지기술연구원(jspark@kier.re.kr/ jskim@kier.re.kr/ byjang@kier.re.kr / hskim@kier.re.kr / ysaahn@kier.re.kr), **한국전력연구원(shhan@kepri.re.kr)

A Study on Renewable Energy and the Secondary Battery-Electricity Storage Technologies

Park, Joo-Seok*, Han, Seung-Ho**, Kim, Joon-Soo*, Cho, Chul-Hee, Jang, Bo-Yun*, Kim, Hong-Soo*, Ahn, Young-Soo*

*Korea Institute of Energy Research(jspark@kier.re.kr/ jskim@kier.re.kr/ byjang@kier.re.kr/ hskim@kier.re.kr / ysaahn@kier.re.kr)

**Korea Electric Power Research Institute(shhan@kepri.re.kr)

Abstract

This paper has reviewed the electricity storage technologies using secondary batteries especially to be applied to renewable power generations. Storage solutions will assist the approaching current issues faced by global energy market. These issues include increasing renewable energy capacity contribution, load peak shaping, and addressing intermittent renewable generation contributions to the electricity grid such as power quality, short term power fluctuations. Requirement of energy storage system was discussed through the survey for the characteristics of renewable energy such as wind, solar power generation system. In addition, the secondary battery systems such as Lead Acid(LA), Sodium Sulfur(NaS) and Vanadium Redox(VR) were studied. This paper covered the principles of these batteries and one of application cases.

Keywords : 신재생에너지(Renewable Energy), 전력저장(Electricity Storage), 축전지(Battery)

1. 서론

이제까지 많은 연구 개발을 통해, 에너지저장 시스템은 에너지 공급의 고 품질화 뿐만 아니라 안정성, 신뢰성 등을 향상시키는 다양한 이점을 제공한다고 알려져 왔다.¹⁻³⁾ 특히, 전력 발전에 있어 에너지저장기술 및 시스템은 발전 공급량과 수요량의 격차를 효과적으로 조절할 수 있는 해결책으로 제시되고 있다.³⁾ 더욱이, 생산량이 일정하지 않은 태양광, 풍력과 같은 신재생에너지를 이용한 전력 발전의 경우, 이러한 에너지저장시스템은 전력 수요공급의 균형을 조절할 수 있을 것이다. 즉, 전력수요가 적을 때에 전력을 저장하였다가, 전력 수요가 많을 때에 저장된 전력을 공급함으로써 부하조절(load leveling)이 가능한 것이다. 또한, 차세대 신재생 에너지 기술 개발은 지속적인 생산전력단가 절감을 그 목표로 하고 있으며, 이와 같은 개발 방향은 이미 풍력이나 태양광 전력생산 분야에서 입증되고 있다.^{3,4)} 이와 더불어, 미래 신재생에너지시장은 일정치 않은 전력발전 특성, 백업 전력원 확보, 수요에 대한 빠른 대응성에 대한 어려움을 예상하고 있다.⁵⁾ 따라서, 이러한 신재생에너지와 전력저장 기술의 통합(integration)은 신재생에너지의 공급량 확대, 전력공급의 안정성 등의 기술적 요구사항과 미래시장의 요구에 대한 해결책을 제공할 것이다. 신재생에너지분야의 전력저장의 적용 사례는 전 세계적으로 진행되고 있지만, 아직까지 국내에서는 관련 연구조차 이루어지고 있지 않다. 따라서, 본 보고서의 목적은 현재 진행 중인 신재생에너지를 위한 전력저장 기술들의 검토를 통해 미래 에너지 시장에 대해 적절히 대응하기 위함이다. 본 고에서는 신재생에너지전원의 특징과 전력저장의 필요성을 확인하고, 이를 위한 전력저장기술로써 연구 개발되고 있는 전지기술에 대하여 소개하였다.

2. 신재생에너지와 전력저장 기술

2.1 전력저장기술의 필요성

점차 확대보급일로에 있는 신재생에너지부문에 있어서 고급의 전력수요를 만족시키기 위해 대부분의 신재생에너지시스템은 에너지 저장 시스템을 필요로 하고 있지만, 국내 여건상 그 기대에 부응하지 못하고 있다. 본 장에서는 현재 신재생에너지를 이용한 발전시스템에 있어, 이들에 대한 문제점을 도출하고 이를 위한 하나의 해결방안으로서 전력저장시스템의 필요성을 확인하고자 한다.

(1) 신재생에너지의 특징

풍력과 태양광 에너지와 같은 신재생 에너지에 의한 전력 발전을 할 경우, 전력발전량은 기후에 영향을 크게 받는다. 따라서, 외부 전력 시스템과의 계통연계를 할 경우, 다음과 같은 문제점들이 나타난다.⁴⁻⁸⁾

- Highly variable
 - Fast fluctuation
 - No load following
 - High peaks
- (low capacity factor : 0.2Wind, 0.1PV)

즉, 신재생 에너지의 발전량이 급격하게 감소하거나 정지하게 되면, 다른 전력생산시스템을 보조 전력원으로 사용하여 보상하고 있지만, 이 또한 보조기능이 작동하기 까지 delay현상이 나타나, 결국 시스템의 전력주파수 저하현상과 전체 시스템의 안정성 저하를 가져오게 된다. 그림 1은 '60MW급 West Texas Wind Firm'의 일일 평균 풍력전력생산량을 나타낸 그림이다.⁷⁾ 그림과 같이 일년 중 최대 전력 생산량을 100 %사용했을 때를 기준으로 시스템의 전력생산량을 나타내고 있지만, 실제 생산량은 기후에 영향을 받아 일정치 않은 것을 알 수 있다.

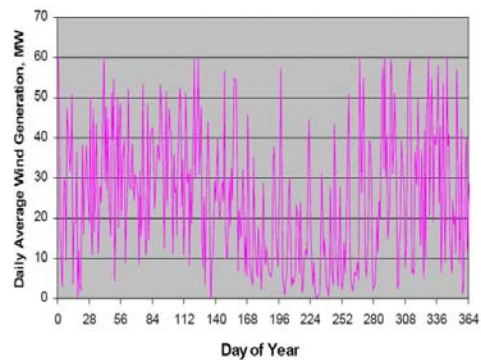


그림 1. 일일 평균 풍력전력생산량

그림 2는 시간대별 태양광전력생산량과 전력 부하를 나타낸 그림이다.⁸⁾ 그림에서 보이는 바와 같이 태양광발전은 오후를 중심으로 발전 전력의 최대값을 갖지만, 이에 대해 전력 부하는 오전과 저녁시간에 최대값을 갖는 것을 알 수 있다. 이와 같이 신재생에너지는 전력부하에 대한 대응이 약하다는 단점을 가지고 있다.

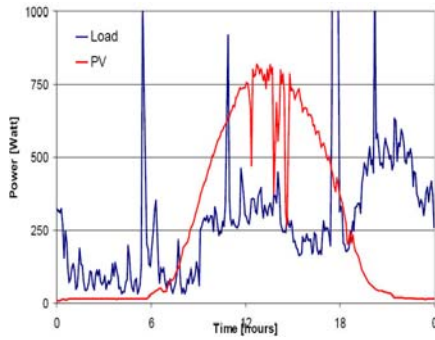


그림 2. PV의 일일 발전량과 전력 부하량

그 외에도, 발전 peak값이 매우 커서, 실제 신재생에너지 capacity factor는 풍력의 경우 20%, 태양광의 경우 10%의 낮은 효율을 나타낸다. 이와 같이 기상조건에 의해 일정하지 않은 신재생전력의 특성으로 인해 전력저장시스템의 적용성에 대한 필요성이 대두되고 있다.

(2) 전력저장기술의 적용 결과

풍력, 태양력 등의 신재생에너지를 이용한 전력발전시스템에 있어 다양한 기상조건의 변화를 비롯하여 낙도, 무인도 등, 지정학적 환경요인에 의한 문제점들을 해결하기 위해서는 고성능의 장수명을 갖는 전력저장시스템이 요구된다.

그림 3은 일본의 TEPCO(Tokyo Electric Power Company, Japan) 신에너지공원에 시범적으로 제작된 300kW급 풍력발전기와 NaS전지를 연결하여, 풍력발전량, 전지의 충방전출력 및 최종 발전출력량을 나타낸 그림이다.¹²⁾ 풍력발전량이 많은 경우, 전지는 충전을 하고, 풍력발전량이 적을 때는 반대로 방전을 하여, 최종 발전출력량을 일정하게 유지하는 전력부하조절을 통해 전력의 안정성 및 신뢰성을 확보하는 결과를 나타낸 것이다. 이와 같이 부하의 변동을 효과적으로 조절함에 있어 delay현상이 없이 빠른 충방전 특성을 갖는 전지의 중요성을 알 수가 있다.

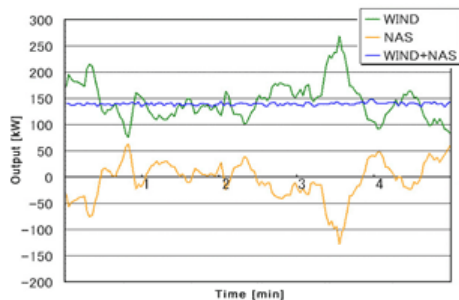


그림 3. 풍력발전기와 NaS전지를 이용한 시스템의 풍력발전량, 전지충방전량 및 최종발전량

그림 4는 풍력발전에 의한 전력주파수와 Flywheel을 설치하여 측정된 전력주파수 특성을 나타낸 그림이다.⁷⁾ Flywheel을 이용하여 출력주파수를 1%미만으로 안정화하는 것을 알 수 있다. 따라서 이와 같이, 전력저장기술은 peak shaping을 통해서 최종 전력의 주파수 및 전압 안정성을 얻을 수 있으며, 전력의 품질을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

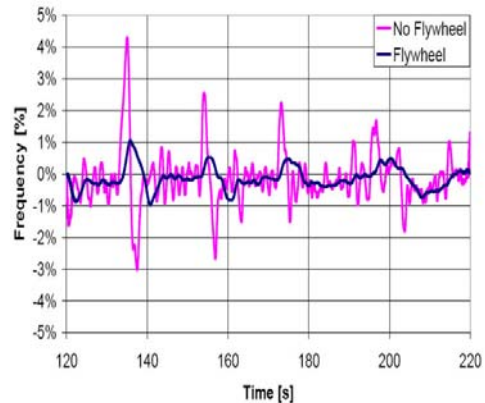


그림 4. 풍력발전 및 flywheel을 사용한 전력 주파수 특성

지금까지 미국, 일본, 북구 유럽 각국의 풍력, 태양광 발전기술과 결합한 전력저장시스템의 설치 사례를 통해, 신재생에너지를 이용한 전력발전시스템에 있어서는 가장 기본적인 전력부하조절(load leveling)의 경우나 또는 peak-shaping을 이용한 고 품질의 안정적인 전력(stable voltage, frequency)생산을 위해서도, 고성능 장수명의 전력저장시스템의 채용이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

2.2 이차전지와 전력저장기술

신재생에너지를 위한 전력저장시스템은 전력 용량에 따라 다양하게 개발되고 있다. 그림 5는 전력용량에 따른 에너지저장시스템을 나타낸 그림이다.⁹⁾ 1 MW이하의 독립운전형 발전의 경우 주로 flywheel을 사용하며, 100MW이상의 대규모 plant형 발전시설은 압축 공기를 이용하는 CAES가 사용된다. 대부분의 MW급 전력생산에 사용되는 저장 방식은 대용량축전지를 사용하고 있으며, 주로 연축전지, Redox Flow, 그리고 NaS전지가 적용되고 있다.^{6,9)} 본 장에서는 이들 수십 MW급 축전지의 원리에 대해 설명한다.

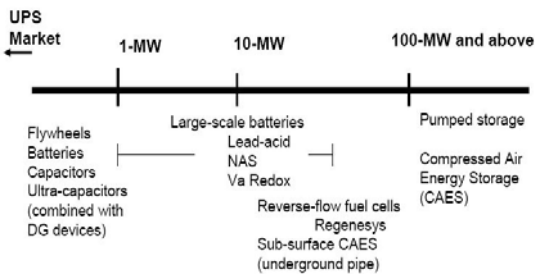


그림 5. 발전 용량에 따른 에너지저장기술

일본에서는 통상산업성(현 경제산업성)의 공업기술원이 제1차 석유파동이후 1978년부터 1993년도까지 이루어진 에너지절약기술개발계획(moonlight 계획)의 하나로서 “신형 전지 전력저장 시스템개발”이 1980년도부터 시작되어 Na-S 전지, Redox-flow, 전지 등의 신형 이차전지가 개발되었다. 또 통신용의 백업 전원으로 이용되어 온 연축전지를 전력저장용으로 개량한 사이클용 셀-연축전지가 있다.

(1) 연축전지의 원리

그림 6에 전력저장에 이용되고 있는 밀폐형 연축전지의 구조를 나타내었다. 밀폐형 연축전지는 양극으로서 PbO₂, 음극으로서 Pb를 사용하고 전해질로서는 묽은 황산을 사용하고 있다. 연축전지의 충·방전시 일어나는 화학반응식은 다음과 같다

충전	방전
양극: $PbO_2 + 4H^+ + SO_4^{2-} + 2e^-$	\longleftrightarrow $PbSO_4 + 2H_2O$
음극: $Pb + SO_4^{2-}$	\longleftrightarrow $PbSO_4 + 2e^-$
전지 반응: $PbO_2 + 2H_2SO_4 + Pb$	\longleftrightarrow $2PbSO_4 + 2H_2O$

충전이 진행되면서 축전지가 과충전 상태로 되는 경우에는, 양극에서 산소가스가 발생하고 음극에서는 수소가스가 발생하지만, 밀폐형 납축전지는 외부로 가스방출을 억제하기 위해 양극에서 발생하는 산소가스를 음극에서 반응하여 흡수하도록 하며, 또한 음극을 전기화학적 방전상태로 해서 수소가스발생을 억제하게 하므로서 전해액의 감소를 줄이고 있는 점이 특징이다. 그런데 현재 백업용으로 사용하고 있는 밀폐형 납축전지의 수명이 아무리 길다하여도 350~500 사이클 정도에 불과하기 때문에 전력저장용으로 사용하기에는 부족하다. 따라서 기존의 밀폐형 납축전지를 기본으로 하는 충방전 사이클

특성이 우수한 장수명 납축전지를 개발하고자 하는 노력이 이루어지고 있다. 연축전지에서 일어나는 주된 열화요인은 활성물질의 미세화 현상과 음극물질의 황화현상, 전해액의 감소 때문이다.

또한 밀폐형 납축전지를 이용한 전력저장 시스템에서는 충전전류를 단계마다 변화시켜 충전을 하는 다단식 충전방법을 채택하여 충전시간의 단축을 도모하고 있다.

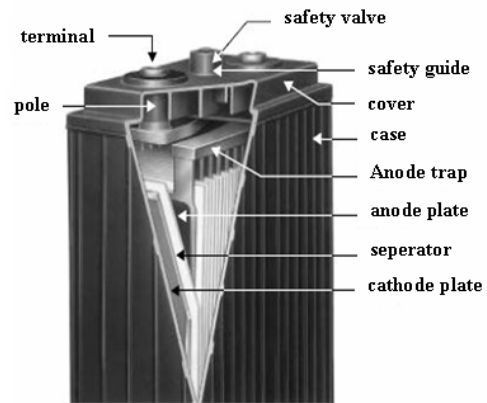


그림 6. 밀폐형 연축전지의 구조

밀폐형 납축전지의 특징은 다음과 같다.

- ① 방전깊이 70%에서 3,000회 이상의 장수명을 갖는다.
- ② 모듈구조가 난연성이기 때문에 고온이라도 가연성 가스를 방출할 위험이 없어 안전성이 우수하다.
- ③ 밀폐형이기 때문에 전해액의 감소를 억제하기 위해 유지보수가 필요 없다.

(2) NaS 전지의 원리

나트륨-유황전지는 음극으로 Na, 양극으로 S를 사용하고, 전해질로서 Na 이온전도성을 갖는 고체전해질 β-알루미나 세라믹스를 사용하고 있다. Na-S 전지의 충방전에 의한 화학반응식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

충전	방전
양극: $xS + 2e^-$	\longleftrightarrow S_x^{2-}
음극: $2Na$	\longleftrightarrow $2Na^+ + 2e^-$
전지 반응: $2Na + xS$	\longleftrightarrow Na_2S_x

그림 7에 Na-S 전지의 단전지 구조와 모듈 구조를 나타내었다. 표 2에 나트륨-유황전지의 모듈 규격을 나타내었다. 활성물질인 Na와 S 및 생성물인 Na_2S_x 를 용융상태로 유지하기 위한 동작온도는 약 300°C 이다. 그림에서 보듯이 동작온도를 유지하기 위해 단전지를 집합화하여 단열용기에 배열하여 모듈로서 사용하며 전지의 충방전시 발생하는 발열을 이용한다.

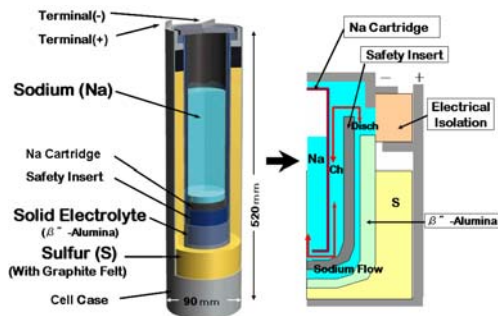


그림 7. NaS 단전지 구조

정상적 동작을 하는 경우에는 가열할 필요가 없지만, 초기 가동에는 전기히터로 가열을 해야 한다. 모듈의 출력과 용량이 크기 때문에 비교적 대규모 전력저장 시스템에 적합하다. Na-S 전지의 특징은 다음과 같다.

- ① 에너지 밀도가 높다.(≥3배, 납축전지밀도)
- ② 사이클의 수명이 길다.(5,000회 충방전 가능)
- ③ 비교적 대규모 전력저장 시스템에 적합하다.

또한 사용물질 가운데 나트륨이나 유황은 어느 것이나 소방법에 의한 위험물로 지정되어 있으며, 전지설치건물에 대해서는 일반 건축법에 적용을 받도록 되어 있어 설치장소에 문제가 없다.

(3) Redox-Flow 전지의 원리

레독스 후로우(Redox-Flow)란 이름의 유래는 환원(reduction), 산화(oxidation) 반응을 일으키는 물질을 순환(flow) 시키는 것에서 유래한다. 이 전지의 셀 내부는 이온교환막으로 양극과 음극으로 나뉘어져 각각 원자가가 다른 바나듐을 묶은 황산에 용해시킨 전해액이 들어있다. 이 전해액이 전지 셀 내부를 순환하는 경우에 바나듐 이온의 원자가가 변화함으로써 충방전이 이루어진다. 충방전에 의한 화학반응은 다음과 같다.

	충전	방전	
양극 :	$\text{V}^{5+} + \text{e}^-$	\longleftrightarrow	V^{4+}
음극 :	V^{2+}	\longleftrightarrow	$\text{V}^{3+} + \text{e}^-$
전지 반응 :	$\text{V}^{5+} + \text{V}^{2+}$	\longleftrightarrow	$\text{V}^{4+} + \text{V}^{3+}$

그림 8에 레독스 후로우전지의 구성과 셀 스택부의 구조를 나타내었다. 단위 셀에서의 전압은 약 1.4V 정도로 낮기 때문에 단위 셀을 100개씩 적층한 스택을 구성하여 사용한다. 또한 양극 측과 음극 측의 전해액은 스택부와 분리할 수가 있기 때문에 전해액을 설치공간에 적당하게 배치할 수가 있으며 펌프에 의해 셀 스택부로 공급할 수가 있다. 단 충방전할 때에 셀 스택부가 발열을 하기 때문에 수냉 또는 공랭식의 냉각시스템이 필요하다. 레독스 후로우 전지의 특징은 다음과 같다.

- ① 전지반응이 바나듐 이온의 원자가 변화에 의존하기 때문에 수명이 길다. (12,000회 충방전 가능)
- ② 셀과 탱크부를 분리할 수가 있어 설치장소에 적합하게 제작할 수가 있다.
- ③ 펌프, 냉각장치 등의 가동부분이 필요하기 때문에 보수, 유지가 필요하다.
- ④ 바나듐 이온 멤브레인의 교환이 필요하다.

레독스 후로우 전지는 환경측면에서 본다면 CO_2 등의 배기가스가 발생하지 않는데다, 바나듐 전해액은 반영구적으로 사용할 수가 있어 친환경적이라 할 수가 있다.

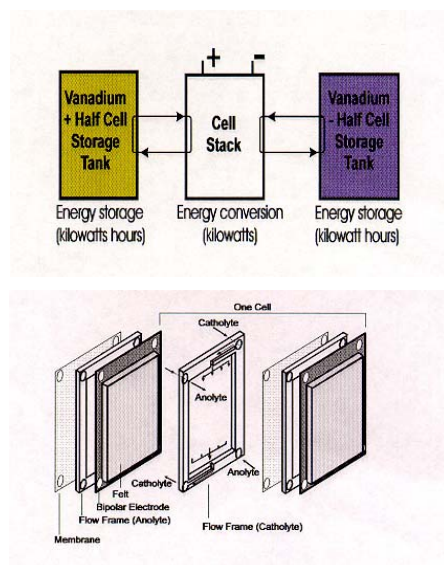


그림 8. Redox Flow전지의 구성과 셀 스택부 구조

(4) 기타 전력저장 시스템

축전지 이외의 전력저장방법으로는 오래전부터 사용해온 양수발전시스템이 있다. 본 시스템은 강의 상부와 하부에 두개의 조정지를 갖고 야간의전력을 이용하여 하부에서 상부로 물을 끌어 올려 주간에 전력 피크시에 수력발전을 하여 전력을 생산하므로써 부하평준화를 이룩하고 있다. 대규모 부하평준화가 가능하지만 설치할 수 있는 장소는 산간 지대 일부에 한정되어 있다는 단점이 있다. 그 이외 전지로서 Li 이온전지를 이용한 전력저장시스템이 있다. 이 전지는 에너지밀도는 높지만 안전성 확보 등의 문제가 있어 연구단계에 있다.

(5) 운전 사례

그림 9는 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)의 의뢰로 2001년 일본의 Hachijo섬에 있는 500kW급 풍력발전소와 이곳에 설치된 400 kW급 NaS 전지시스템의 사진이다. 일본 동경전력에서는 이런 시스템 연구를 통해 전력계통 안정화 및 신뢰성 연구를 비롯하여 대용량 모듈전지의 제조단계에 대한 평가 등이 이루어졌다. 현재 NaS 전지는 야간에 충전되고 주간에 풍력발전력의 부하변동을 조절함으로써 전력평준화 역할을 수행하고 있다.



그림 9. Hachijo섬에 설치된 풍력발전과 NaS 전지

표 1과 표 2는 설치된 풍력발전소와 NaS전지의 설치 사양에 대한 것이다.

표 1. Hachijo섬에 설치된 풍력발전소 설치사양

Output	500 kW
Tower Height	44 m
Blade Diameter	38.4 m
Number of Blades	3 blades
Wind Speed Nominal	14 m/s

표 2. Hachijo섬에 설치된 NaS 전지 설치사양

Output	400 kW
Capacity	3,000 kWh
Voltage	DC 464 V
Current	DC 463 A
Number of cells	2,560 cells

3. 결론

신재생에너지를 이용한 전력발전특성을 조사하여, 이를 위한 전력저장시스템의 필요성을 확인 하였다. 또한, 수십 MW급 전력발전을 위한 대용량 2차전지에 대한 원리 및 적용사례를 살펴보았다. 기후 변화에 따라 발전전력량이 일정하지 않은 신재생에너지를 사용한 전력발전은 부하전력조절을 통한 전력평준화, peak shaping을 통한 전력안정화 등의 고 품질 전력 생산을 위해 전력저장장치가 필수적이며, 이를 위한 다양한 2차전지가 개발되었다. 하지만, 차세대 신재생에너지전력생산 plant는 전력저장시스템 외에도 관련 제어 시스템과 실시간 부하 컨트롤 기술 등 다양한 기술들이 복합적으로 개발되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. Applications of Energy Storage to Enhance Wind Generation, DOE Energy Storage Program Peer review Meeting, 2004
2. Handbook of Energy Storage for Transmission and distribution Applications, EPRI-DOE, 2004
3. Gerard Thissen, Electricity storage and Renewables, Electricity Storage Association
4. Review of Advanced Electricity Storage Technologies Programme, Department of the Environment and heritage Austrian

GreenHouse Office, 2005

5. Ali Nourai, Comparison of the Costs of Energy Storage Technologies for T&D Applications, 2004.
6. Review of Electrical Energy Storage Technologies and Systems and of their Potential in the UK, UK Department of trade and Industry, 2004
7. Energy Storage : The Missing Link in the Electricity Value Chain, Energy Storage Council White Paper, 2002
8. Sheldon S. Williamson, S. Chowdaray Rimmalapuram, and Ali Emadi, Electrical Modeling of Renewable Energy Sources and Energy Storage Devices, J. Power Electronics, vol4, No 2, 2004
9. S. Hubert, F. Mattera, P. Malbranche, INVESTIRE network-investigation of storage technologies for intermittent renewable energies in Europe, J. Power Sources, 2003
10. Toshio HORIE, Yasuhito ISHIDA, Hideaki FUJIOKA, "New Trends in Power Storage Systems", NTT Building Technology Institute 2004.
11. Makoto Kamibayashi, "Advanced Sodium Sulfur(NAS) Battery System", TEPCO Annual report 2002