

Journal of Electrochemistry

Volume 21

Issue 5 *Special Issue of Application and
Industrialization in Electrochemic*
(Editor: Professor ZHAO Jin-bao)

2015-10-28

Latest Progresses in Vanadium Flow Battery Technologies and Applications

Xiao-li WANG

Yu ZHANG

Hua-min ZHANG

Recommended Citation

Xiao-li WANG, Yu ZHANG, Hua-min ZHANG. Latest Progresses in Vanadium Flow Battery Technologies and Applications[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2015 , 21(5): 433-440.

DOI: 10.13208/j.electrochem.150747

Available at: <https://jelectrochem.xmu.edu.cn/journal/vol21/iss5/5>

This Review is brought to you for free and open access by Journal of Electrochemistry. It has been accepted for inclusion in Journal of Electrochemistry by an authorized editor of Journal of Electrochemistry.

DOI: 10.13208/j.electrochem.150747

Artical ID:1006-3471(2015)05-0433-08

Cite this: *J. Electrochem.* 2015, 21(5): 433-440

Http://electrochem.xmu.edu.cn

全钒液流电池储能技术开发与应用进展

王晓丽¹, 张宇¹, 张华民^{1,2*}

(1. 大连融科储能技术发展有限公司, 辽宁 大连 116025;

2. 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)

摘要: 大规模储能技术是实现大规模可再生能源普及应用和支撑智能电网建设的核心技术. 全钒液流电池 (Vanadium Flow Battery, VFB) 因其寿命长、安全性好、配置灵活、响应速度快、建设周期短、对环境的影响低等突出优势, 成为大规模电化学储能技术的首选. 美、日、欧等发达国家都在积极推动大型全钒液流电池技术和装备的研发. 本文重点介绍了由大连融科储能技术发展有限公司和中科院大连化学物理研究所开发的集装箱式全钒液流电池系统的测试结果, 对迄今全球最大规模的 5 MW/10 MWh 全钒液流电池系统的运行情况进行了总结, 最后指出通过进一步技术开发与规模化生产, 降低其成本、提高其可靠性和电化学性能, 是全钒液流电池技术和产业发展的主要方向.

关键词: 储能; 全钒液流电池; 集装箱

中图分类号: O646

文献标识码: A

1 储能技术研究背景与产业现状

面对能源供需格局新变化、国际能源发展新趋势, 为保障国家能源安全, 推动能源生产和消费革命已成为我国能源战略的主旋律. 以新能源、互联网、储能等技术相融合为主要标志的第三次工业革命在世界范围内悄然展开, 这不仅为世界各国经济发展带来了难得的重大机遇, 也孕育着新一轮技术和产业的竞争, 成为我国能源革命的重要力量. 国际权威资讯机构麦肯锡将储能技术定位为影响未来世界发展的 12 项颠覆技术之一, 2025 年储能技术对全球经济价值贡献将超过 1 万亿美元^[1].

美国、欧盟、日本等发达国家已经将大规模储能技术和产业前所未有地上升到战略层面加以发展, 尤其是美国, 将储能定位为实现能源新政的重要支撑性技术. 在高度电力市场化环境以及政府较全面的激励机制刺激下, 美国的储能技术和产业正快速发展, 并掀起一轮全球性市场竞争. 美国能源部 (DOE) 早在 2010 年就制定了储能产业发展规划 (《美国能源部 2011-2015 储能计划》), DOE 和其下设的先进能源研究计划署 (ARPA-E)

持续投入大量资金用于推进储能技术开发和应用示范, 使得美国储能技术开发走在世界前沿. 另外, 美国联邦能源管理委员会 (FERC) 已经颁布了多项法令, 从市场准入角度支持储能的市场应用. 尤其是第 719 号令和第 755 号法令, 要求全国的独立系统运营商 (ISOs) 对其调节和作业程序进行修订, 从而允许储能进入批发能源市场, 通过提供频率调节和其他辅助服务获得报酬. 这一系列法令使美国成为全球最成熟的电力调频服务市场, 为储能技术应用奠定了市场条件. 同时, 美国国会 2011 年出台的“可再生与绿色能源存储技术法案”, 对配套储能系统的可再生能源发电项目给予投资税减免政策. 美国“电网 2030”计划中, 大容量储能技术列为优先级最高的目标技术.

美国各州也纷纷出台政策促进新能源产业和储能产业的发展. 尤其是加州为扩大能源储存系统的使用, 专门立法—储能法案 (AB2514)^[2]. 法案规定, 加州公共事业委员会 (CPUC) 通过了“储能采购框架和设计项目”, 确立了三大公共事业公司 (太平洋电气公司、南加州爱迪生电力公司和圣地亚哥电气公司) 到 2020 年将完成 1.325 GW 储能

采购的目标。

我国正处在能源和经济发展转型的关键时期,风能、太阳能等可再生能源正将逐步由辅助能源变为主导能源。但与此同时,风能、太阳能等可再生能源大规模装机集中并网所产生的弃风、弃光、电网调峰难度大和电网稳定性差等问题日益凸显。在这种情况下,大规模储能技术及产业的发展已经引起了我国的高度重视。尤其是近期各部委发布一系列规划、指导性文件给我国储能产业发展打了一针强心剂。国务院办公厅发布的《能源发展战略行动计划(2014-2020年)》,要求加强电源与电网统筹规划,科学安排调峰、调频、储能配套能力,切实解决弃风、弃光问题,并将大规模储能技术与分布式能源、智能电网和先进可再生能源等一起被列为九大重点创新领域。另外,随着智能电网、分布式能源的发展,储能的重要性越来越受到关注。新一轮的电改,特别是电价改革和用电侧的开放政策,都将为储能开拓出新的增长点。2015年中共中央第九号文件《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》明确指出应积极发展融合先进储能技术以促进分布式电源的快速发展,提高电网系统消纳可再生能源的能力和能源利用效率。2015年7月6日,国家发展改革委和国家能源局下发了《关于促进智能电网发展的指导意见》(发改运行[2015]1518号),储能作为构建智能电网的重要设备,要求分布式能源、储能系统与电网协调优化运行技术,平抑新能源波动性,并鼓励在集中式风电场、光伏电站配置一定比例储能系统,鼓励因地制宜开展基于灵活电价的商业模式示范。

到目前为止,研究人员已经开发了多种形式的电能储存技术^[3-5],主要可分为物理储能和化学储能两大类。物理储能技术主要有抽水储能、压缩空气储能、飞轮储能、超导储能及超级电容器。化学储能技术主要有锂离子电池、铅酸电池、液流电池、钠硫电池、金属空气电池等。根据各种应用领域对储能功率和储能容量要求的不同,各种储能技术都有其适宜的应用领域。飞轮储能、超导储能和超级电容器储能适合于需要提供短时及需要较大的脉冲功率的场合,如应对电压暂降和瞬时停电、抑制电力系统低频振荡、提高系统稳定性等;而抽水储能、压缩空气储能和化学电池储能适合于电网调峰、可再生能源集中并入等大功率、大容量的应用场合。目前世界占比最高的是抽水蓄能,

其总装机容量规模达到了127 GW,占总储能容量的99%,其次是压缩空气储能,总装机容量为440 MW,排名第三的是钠硫电池,总容量规模为316 MW。据《储能产业研究白皮书2015摘要版》^[6],2014年新增装机111.6 MW,年增长率为15%。其中,中国储能累计装机规模达84.4 MW,占全球储能装机的10%。从地域分布上看,无论在项目数量还是装机规模上,美国均占据最大比重。截至2014年底,美国已投运储能项目95个,装机规模超过357 MW。日本在装机规模上位居第二,接近310 MW,中国在项目数量上紧随美国之后,有63个项目。2014年,美国的新增装机规模最大,为34.4 MW,中国和欧洲分列二、三位,装机规模分别为31 MW和27.7 MW。

大容量储能技术已经成为新一次能源变革的重要组成部分,技术的创新、示范项目的验证、商业模式建立、产业化能力的形成是这个阶段重中之重。

2 全钒液流电池储能技术及发展现状

高安全性、生命周期的高性价比以及生命周期的低环境负荷是电力系统对大规模储能装备的最重要的3个指标。经过多年的示范比较,全钒液流电池因其寿命长、安全性好、配置灵活、响应速度快、建设周期短、对环境的影响低等突出优势越来越得到市场的认可,成为大规模电化学储能技术的首选。美、日、欧等发达国家都在积极推动大型全钒液流电池技术和装备的研发。主要的研发和生产企业有大连融科储能技术发展有限公司(下称融科储能,Rongke Power,RKP)、日本住友电工公司、德国Gildemeister公司、英国REDT公司、美国UniEnergy Technologies公司和印度IMERY公司等。

截至2014年底,全钒液流电池储能项目总装机容量约为28 MW/86 MWh,2015年规划和在建项目约51 MW/215 MWh,增长势头很强^[7]。国内外的应用示范结果表明,全钒液流电池在安全性、使用寿命等方面具有其他技术不可比拟的优势。进一步提高可靠性、降低成本是实现全钒液流电池产业化的主要挑战。加快高性能、低成本关键材料的工程化技术开发、高功率密度电堆和电池系统技术是全钒液流电池开发的重要发展方向^[8]。

融科储能公司长期以来与中国科学院大连化学物理研究所(下称大连化物所)产学研紧密合

作,已在全钒液流电池关键材料、电堆、电池系统的核心技术开发等方面取得重大进展^[9].在大型可再生能源发电、分布式微电网和离网供电等领域实施了近 30 项工程应用项目,累计装机容量达 12 MW/21.0 MWh,产品已经出口到欧、美、日等发达国家,引领了全球全钒液流电池技术和产业发展.表 1 列出了由融科储能公司与大连化物所合作实施的全钒液流电池储能项目情况.

2013 年,融科储能公司与大连化物所在其开发出的 32 kW 级大功率、高功率密度电堆基础上,针对不同市场需求,率先在行业内推出集装箱式全钒液流电池定型产品.集装箱式全钒液流电池储能产品具有占地小、集成度高、运输、安装、维护简单、性价比高等优点.该产品采用标准的 20 尺

或 40 尺集装箱结构箱体,将全钒液流电池电堆、电解液输送管路、电池管路控制系统及泵等辅助部件合理布局、高度集成于箱体内,并通过专有的冷/热管理技术,实现了储能系统的自主式热管理,可直接在室外环境使用.已定型了 30 kW、60 kW、125 kW、250 kW、500 kW 不同等级的基本液流电池储能模块,模块可独立使用,也可通过灵活的组合,构建兆瓦以上级的全钒液流电池储能系统,可以满足用户各种功率和容量需求的用户.

以额定功率为 250 kW 的储能模块为例,其内外部结构如图 1 所示,由 8 个 31.5 kW 电堆采用 4 串 2 并的方式构成其功率单元,直流电压范围 DC208~325 V,交流输出电压 AC380 V,最大输出电流 AC500 A.电堆、电解液循环系统、电池管理

表 1 融科储能公司实施的部分全钒液流电池储能项目
Tab. 1 Typical VFB projects carried out by RKP

Application & Location	VFB scale	Time
Renewable Integration		
Braderup, Germany	250 kW/1 MWh	2014
Jinzhou	2 MW/4 MWh	2014
Jinzhou	3 MW/6 MWh	2013
Shenyang	5 MW/10 MWh	2012
Micro-Grid		
Ningxia (under construction)	125 kW/625 kWh	2015
Beijing (under construction)	600 kW/2400 kWh	2015
Nürnberg, Germany	60 kW/120 kWh	2015
Shenyang, EPRI	100 kW/400 kWh	2014
Dalian	100 kW /500 kWh	2013
Beijing	200 kW/800 kWh	2011
Dalian	60 kW/600 kWh	2011
Off-Grid application		
Qinghai	125 kW/1 MWh	2014
Xi'an	5 kW/50 kWh	2012
Dalian	10 kW/200 kWh	2011
Dalian	60 kW/300 kWh	2010
Dalian	4 kW/54 kWh	2011
Dalian	5.0 kW/50 kWh	2009
Tibet	5 kW/50 kWh	2009
Beijing EPRI	100 kW/200 kWh	2008

系统(BMS)等集成于一个 20 尺集装箱内,电解液承装于储罐内,置于集装箱外部.表 2 给出了 250 kW 电池模块基本参数.

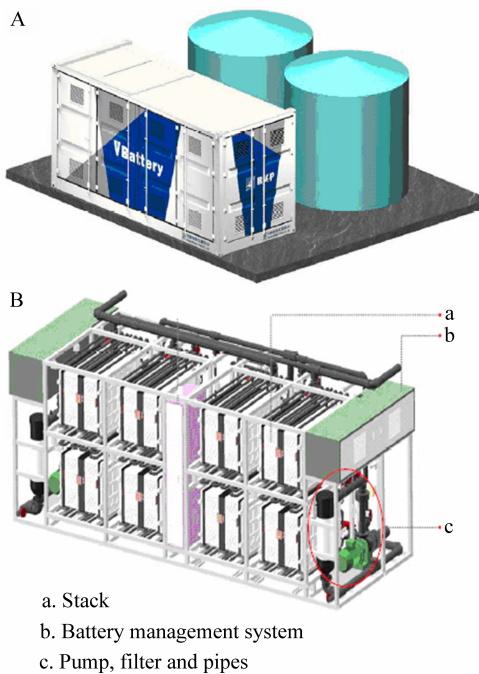


图 1 融科储能公司开发的 250 kW 全钒液流电池模块外观及内部结构示意图
Fig. 1 Appearance and structure of 250 kW VFB module developed by RKP

分别以 300 kW、275 kW、250 kW、225 kW、200 kW 和 175 kW 恒功率对 250 kW 单元储能模块充电至截止电压 322.4 V,再分别以相同的功率放电至截止电压 208 V,直流侧电池系统能量转换效率和交流侧储能系统能量转化效率(计入循环泵、换热等辅助功耗以及能量转换系统效率损失)如下表 3 所示.可见在额定功率 250 kW 条件下进行充放电,交流侧储能系统能量转化效率约为 68%,过载 20%即 300 kW 条件下充放电,交流侧储能系统能量转化效率为 65%.在所测功率区间范围内,随着放电功率的增加,直流侧电池系统能量转换效率和交流侧储能系统能量转化效率都随之下降.

将电池模块充电至 100% SOC,再分别以 300 kW、275 kW、250 kW、225 kW、200 kW、175 kW 恒功率放电至截止电压 208 V,电池模块的放电量情况如下表 4 所示.可以看出,在所测功率区间范围内,随着放电功率的增加,放电量随之降低.额定

表 2 250 kW 电池模块基本参数
Tab. 2 Specific parameters of 250 kW VFB module

Item	Parameter
Power	175 ~ 300 kW
Energy	1000 kWh (or as demanded)
DC voltage range	DC208 ~ 325 V
AC voltage	AC380 V
Max current	AC500 A
Interface	RS485, Modbus-RTU
Response time	100 ms
Dimension	8 m × 8 m × 4 m
Footprint	6.058 m × 2.438 m × 2.591 m
Space requirement	11 m × 11 m × 5 m
Maximum load-bearing	3.5 t·m ²
Temperature	-30 °C ~ 40 °C

表 3 不同功率下能量转换效率
Tab. 3 Energy efficiency under various charge/discharge powers

Power	DC-DC energy efficiency	AC-AC energy efficiency
300 kW	73%	65%
275 kW	74%	66%
250 kW	75%	68%
225 kW	76%	69%
200 kW	77%	70%
175 kW	78%	71%

功率恒功率放电至放电截止电压时,荷电状态(State of Charge,SOC)为 15%,即因为极化的原因,还有 15%的电量没有放出来.继之以低功率(如 30%额定功率)或恒电压(如恒定截止电压 208 V)的方式,可以将剩余的电量放出来.因此,在全钒液流电池使用过程中,应充分根据电池的特性进行操作模式的设置,以更充分发挥全钒液流电池的性能.

3 大规模风电接入用全钒液流电池储能系统工程项目运行情况

由大连化物所做技术支撑,融科储能公司设计、建造的迄今全球最大规模的 5 MW/10 MWh 全

率变化最大限值为 5 MW. 从下表 5 中可以看出, 储能系统未参与平滑之前, 风电场 1 分钟有功功率变化最大值为 5.6 MW, 未能满足风电并网限值要求. 利用储能系统平滑后, 风电场 1 分钟有功功率变化最大值降低至 2.56 MW, 最大限值变化满足了技术规定要求. 对比可以看出风电并网总功率平滑程度明显改善. 从测试结果可以看出, 储能系统在平滑风电场出力、抑制风电出力波动、提高

较大的偏差. 在含储能系统的风电场中, 该偏差可通过储能系统实时的储存或释放电能进行弥补. 从图 5 可以看出, 通过对储能系统的充放电调控, 风电场可以较好的实现跟踪发电计划. 图中蓝色曲线为风力发电实时功率, 绿色曲线为储能系统实时充放电曲线, 红色曲线为风电场并网总功率变化曲线. 图中纵坐标表示功率, 单位为 MW, 横坐标表示运行日期及时间.

表 5 储能系统投产前后风电场有功功率变化最大限值
Tab. 5 Output power fluctuation ratio of wind farm before and after VFB energy storage system installation

Wind farm capacity/50 MW	Output power fluctuation ratio in 10 min/MW	Output power fluctuation ratio in 1 min/MW
Maximum limit	16.67	5.00
Without VFB	6.81	5.60
With VFB	5.53	2.56

风电供电可靠性方面作用比较明显.

图 4 为 2015 年 4 月 9 日储能电站在执行平滑出力功能时的实时运行曲线. 可以看出, 全钒液流储能电站具有良好的平滑功能.

2) 提高风电场跟踪计划发电能力

参照电网调度部门对常规发电机组的调度模式, 向风电场下发计划发电出力曲线有助于提高风力发电厂的可调度性. 但相对于常规的火力发电机组, 风电场出力具有较大的波动性和随机性. 即使根据风电场功率预测数据而制定的计划, 发电曲线与风电场实际发电输出功率曲线间也存在



图 5 储能电站在执行计划发电功能时的实时运行曲线
Fig. 5 Schedule tracking function by VFB energy storage system

上述功能的实现可以有效地提高风电场输出功率的可控性, 使风电场更加适应电力系统调度的运行需要, 可作为有效电源来进行调度管理. 从而切实提高电网对于风电的接纳能力和增加风电场的并网发电小时数, 提高风电资源利用效率, 实现能源多样化, 实现节能减排.

3) 风场弃风限出力情况下储电, 增加风场收益

在系统安全约束、调峰能力不足或处于故障及紧急状态的状况下, 电网调度机构对风电场下发弃风限出力指令. 此时, 储能系统可以在能量管理系统的调度下, 与风电场自动发电控制系统配合, 对储能系统进行充电, 在解除限出力指令后, 储能系统向电网放电, 实现减少弃风, 增加风电场收益的目的, 提高风能资源利用效率.

4) 暂态有功出力紧急响应、暂态电压紧急支撑功能

5 MW/10 MWh 储能系统具备在过载 120%情况下的长期运行能力, 过载能力达到额定输出功率的 150%, 用于满足风电场并网点处的暂态有功出力紧急响应和暂态电压紧急支撑功能需求.



图 4 储能电站在执行平滑出力功能时的实时运行曲线
Fig. 4 Wind smoothing function by VFB energy storage system

5)接受电网调度,参与电网调频

储能电站实现了与辽宁省电力公司调度中心之间的遥信、遥测、遥调、遥控功能. 辽宁省电网调度中心可以根据电网运行需求,对储能电站系统进行实时调度,参与电网调频、平衡负荷. 从图 6 中可以看出,全钒液流电池储能电站充放电响应



图 6 储能电站接受调度参与调频的响应情况
Fig. 6 Frequency regulation response with VFB energy storage system ordered by grid dispatch center

速度快,从零功率至满功率响应时间大约为 2 s. 同燃煤火力发电机组相比,具有更高的调频效率.

6)接受电网调度,参与电网调峰、削峰填谷

如图 7 所示,储能电站可以接受辽宁省电网调度中心调度,参与电网削峰填谷,可以有效提高



图 7 储能电站接受调度参与电网调峰的情况
Fig. 7 Peak shaving response with VFB energy storage system ordered by grid dispatch center

电网对风力发电的接纳能力,有利于可再生能源发电健康有序发展,促进节能减排.

2014 年,融科储能公司在 5 MW/10 MWh 全钒液流电池储能电站项目基础上,基于新研制的集装箱式电池产品,在国电和风位于锦州北镇的



图 8 融科储能公司研制的 2 MW/4 MWh 集装箱式全钒液流电池储能系统吊装及现场安装照片
Fig. 8 Photographs showing the RKP's 2 MW/4 MWh containerized VFB system developed by PKP (A) and the field installation of the system (B)

风电场安装了一套 2 MW/4 MWh 集装箱式全钒液流电池储能系统 (如图 8 所示). 该系统相比于第一代产品占地节省 34%,安装周期大幅缩短,维护运营更加简便.

2014 年,与德国博世集团(BOSCH)合作,在德国北部风场建造了 250 kW/1 MWh 全钒液流电池储能系统. 用于 Braderup 微电网的功率平滑,整个风电场规模为 18 MW,储能电池的功能是减少风电场的弃风,尽可能实现风电的就地消纳,通过有效的储存增大风电上网交易,参与电网的辅助服务.

4 总 结

近几年大量的示范应用项目的实施积累了丰富的设计、运行和维护经验,我国的全钒液流电池储能技术和产业已走在世界的前列. 示范结果表明,全钒液流电池在安全性、使用寿命和环境友好等方面具有其他技术不可比拟的优势. 但由于全钒液流电池储能技术的研究开发时间较短、国家对全钒液流电池储能技术缺乏有力持续的经费支

持,使其目前成本偏高(3500~4500 ¥·kWh⁻¹),制约了全钒液流电池储能技术的推广应用.通过进一步的技术开发与规模化生产,降低其成本、提高其可靠性的空间很大,通过提高全钒液流电池电化学的性能,在3~5年内,对于1 MW/5 MWh的储能系统,其成本可以降低到2500 ¥·kWh⁻¹.由于全钒液流电池电解液可再生重复使用,所以其使用寿命是永久性的.因此,长期使用的角度看,全钒液流电池储能技术是大规模储能的最有效选择之一.

参考文献(References):

- [1] McKinsey&Company. Estimated potential economic impact of technologies from sized applications in 2025 [EB/OL]. [2013-07-22]. http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/disruptive_technologies.
- [2] Secretary of State. Assembly bill No. 2514 [EB/OL]. [2010-09-29]. http://www.leginfo.ca.gov/pub/09-10/bill/asm/ab_2501-2550/ab_2514_bill_20100929_chaptered.pdf.
- [3] Dunn B, Kamath H, Tarascon JM. Electrical energy storage for the grid: A battery of choices[J]. Science, 2011, 334 (6058): 928-935.
- [4] Yang Z G, Zhang J L, Kintner-Meyer MCW, et al. Electrochemical energy storage for green grid[J]. Chemical Reviews, 2011, 111(5): 3577-3613.
- [5] Paul D, Erik E, Brendan K, et al. The role of energy storage with renewable electricity generation, technical report, 2010, NREL/TP-6A2-47187[R/OL]. <http://www.osti.gov/bridge>.
- [6] China Energy Storage Alliance (中关村储能产业技术联盟). White paper on energy storage 2015 (Abstract): 15-16 [EB/OL]. http://www.cnesa.org/index/service_rh_detail?sid=55765412b1fd37c3038b4575&type=3
- [7] Wang X L (王晓丽), Zhang Y (张宇), Li Y (李颖), et al. Vanadium flow battery technology and its industrial status [J]. Energy Storage Science and Technology(储能科学与技术), 2015, 4(5): 458-466.
- [8] Zhang H M (张华民), Wang X L (王晓丽). Development and application Status of energy storage technologies [J]. Energy Storage Science and Technology(储能科学与技术), 2013, 2(3): 200-207.

Latest Progresses in Vanadium Flow Battery Technologies and Applications

WANG Xiao-li¹, ZHANG Yu¹, ZHANG Hua-min^{1,2*}

(1. Dalian Rongke Power Co. Ltd., Dalian 116025, Liaoning, China;

2. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: With virtues of high safety, long cycle life, friend environment and state of charge easy monitoring, vanadium flow battery has become an effective technique for large scale energy storage. United States, Japan, Europe and other developed countries are actively promoting the developments of vanadium flow battery technology and related equipments. In this paper, the performance of containerized vanadium flow battery, which was newly developed by Rongke Power (RKP) and Dalian Institute of Chemical Physics, was introduced. The operation data of 5 MW/10 MWh vanadium flow battery energy storage station was displayed. Finally, it is pointed out that reducing the cost, improving the durability and reliability are the key issues to achieve the commercialization of energy storage.

Key words: energy storage; vanadium flow battery; containerized