储能科学与技术丛书

电池储能系统调频技术

FREQUENCY REGULATION OF ELECTRIC POWER SYSTEM USING BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM

李建林　黄际元　房凯　等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

储能科学与技术丛书

电池储能系统调频技术

李建林　黄际元　房　凯　梁　亮
王明旺　惠　东　杨水丽　孙冰莹
孙　威　程　伟　李海峰　牛　萌
李　蓓　谢志佳　修晓青　靳文涛
胡　娟　杜笑天　陈远扬　庞　博
编著

机 械 工 业 出 版 社

本书通过对电池储能系统参与电力调频的可行性与价值进行分析，确定此项技术具有广阔的应用前景；研究的电池储能系统参与电力调频的协调控制问题、电池储能系统参与调频的容量配置方法，可为储能参与电力调频的示范与产业化工程夯实基础；针对典型的调频示范工程进行介绍，提出了电池储能系统替代某传统调频机组参与电力系统调频的方案设计，为电池储能系统应用于调频领域的方向、规划与建设提供了有力的支撑。

本书适合与智能电网相关的储能科研、规划、设计与运行工程师，以及高等院校从事储能与应用的教师与研究生阅读。

图书在版编目（CIP）数据

电池储能系统调频技术/李建林等编著. —北京：机械工业出版社，2018.9

（储能科学与技术丛书）

ISBN 978-7-111-60830-1

Ⅰ.①电… Ⅱ.①李… Ⅲ.①电池容量－研究 Ⅳ.①TM911

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 210524 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：付承桂 责任编辑：任 鑫

责任校对：郑 婕 张 薇 封面设计：鞠 杨

责任印制：常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 8.75 印张 · 2 插页 · 176 千字

0 001— 3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-60830-1

定价：69.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务 网络服务

服务咨询热线：010－88361066 机 工 官 网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010－68326294 机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

010－88379203 金 书 网：www.golden－book.com

封面无防伪标均为盗版 教育服务网：www.cmpedu.com

前　言

我国的调频电源主要为火电机组，通过调整机组有功出力，跟踪系统频率变化。但是火电机组响应时滞长、机组爬坡速率低，不能准确跟踪电网调度的调频指令，存在调节延迟、调节偏差和调节反向等现象。此外，火电机组频繁变换功率运行，会加重机组设备疲劳和磨损，影响机组的运行寿命。比较而言，水电机组响应较快，可以在几秒内达到满功率输出。但水电机组的建设受地理条件的限制，整体可提供的调频容量较为有限，亟须新的调频手段以满足电网调频要求。

电池储能系统响应速度快，短时功率吞吐能力强，调节灵活，可在毫秒至秒内实现满功率输出，在额定功率内的任何功率点实现精准控制。相关研究表明，持续充/放电时间为 15min 的储能系统，其调频效率约为水电机组的 1.4 倍、燃气机组的 2.2 倍、燃煤机组的 24 倍。电池储能系统与常规调频电源相结合，可有效提升电力系统调频能力，也可独立作为调频电源参与电网的调频服务，弥补大量可再生能源接入电网带来的频率偏差问题，提高电网的电能质量和系统稳定性，同时降低有害气体排放。

2016 年 6 月国家能源局下发了《国家能源局关于促进电储能参与“三北”地区电力辅助服务补偿（市场）机制试点工作的通知》，首次给予电储能设施参与辅助服务的独立合法地位。2017 年 9 月，国家发展改革委联合财政部、工业和信息化部、科学技术部和国家能源局发布《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》，指出“允许储能系统与机组联合或作为独立主体参与辅助服务交易”，储能参与电力调频辅助服务市场机制初步建立。2017 年以来，山东、新疆等多省份陆续发布并更新了电力辅助服务市场运营规则。电力调频辅助服务补偿费用持续增长。各省的新政中多次出现储能，储能在电力调频辅助服务中的重要地位逐渐凸显。

考虑到当前电池储能辅助参与电力调频需求较为迫切，但专题介绍电池储能调频技术的书籍较少，特编写了本书。书中较为全面地介绍了电池储能系统参与电力调频的可行性与应用价值，明确了电池储能系统在电力调频领域的重要意义，研究了电池储能系统辅助传统机组调频的协调控制策略，提出了电池储能系统参与调频的容量配置方法，并针对典型的储能调频示范案例，探讨了电池储能系统辅助传统调频机组参与电力调频的典型设计方案，为储能参与电力调频的商业化应用与示范提供了理论依据与技术保障。

本书共分 7 章，主要从以下几个方面展开介绍：为何需要电池储能系统参与辅助调频；电池储能系统参与电力系统调频的可行性分析；国内外电池储能系统参与电网调频的典型示范工程介绍；电池储能系统参与电力系统调频服务的控制方法与经济性研究；电池储能系统参与电网调频的优化规划与运行控制；电池储能系统替代某传统调频机组参与电力系统调频的方案设计。

本书得到了国家重点研发计划项目（2017YFB0903504）、国家自然科学基金项目（51777197）、国家电网公司科技项目（2018GWJLDKY02）以及深圳市欣旺达综合能源服务有限公司项目（DGB11201700818）的大力资助，在此深表谢意。深圳市欣旺达综合能源服务有限公司的李颖等同志在本书的编写过程中提供了诸多帮助并提出宝贵意见，机械工业出版社的付承桂编辑和诸多同志也为本书出版付出了辛勤的努力，在此表示诚挚的感谢。

电池储能辅助电力系统调频技术涉及多学科、多领域的专业知识，尽管编者竭力求实，但受到水平和专业领域及时间所限，书中难免存在错误和不妥之处，恳请读者不吝赐教。

编　者

2018 年 8 月

目　录

前　言

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　背景及意义 …… 2

1.2　电池储能技术的发展现状 …… 4

1.3　电池储能调频应用研究 …… 9

1.4　电力系统频率调节 …… 13

1.4.1　电力系统频率一次调节 …… 13

1.4.2　电力系统频率二次调节 …… 14

1.4.3　发电机组类型与电力系统频率调节 …… 15

1.4.4　国内外电力系统频率指标和控制要求 …… 16

1.4.5　参与电力调频的容量要求 …… 16

1.4.6　电力系统调频与自动发电控制性能评价 … 17

1.4.7　现代电网频率调节面临的问题 …… 17

1.5　小结 …… 19

第 2 章　电池储能系统调频特性分析 …… 20

2.1　技术特性分析 …… 21

2.1.1　电池的倍率特性 …… 21

2.1.2　电池的寿命特点 …… 22

2.2　与火电机组的对比分析 …… 23

2.2.1　出力特征对比分析 …… 23

2.2.2　调节容量对比分析 …… 24

2.2.3　经济性对比分析 …… 26

2.3　调频优势分析 …… 27

2.4　调频效率分析 …… 30

2.5　效益分析 …… 31

2.5.1　电池储能系统调频的静态效益 …… 32

2.5.2　电池储能系统调频的动态效益 …… 33

2.5.3　储能系统调频的环境效益 …… 34

2.6　小结 …… 35

第 3 章　国内外电池储能系统调频案例分析 …… 37
3.1　国内典型案例…… 38
3.1.1　国家风光储输示范基地…… 38
3.1.2　南方电网宝清电池储能电站…… 39
3.1.3　北京石景山热电厂 2MW 锂离子电池储能电力调频系统 …… 39
3.2　国外典型案例…… 39
3.2.1　北美主要储能调频项目情况…… 40
3.2.2　国外电池公司相关储能项目介绍…… 42
第 4 章　电池储能系统调频规划配置技术 …… 44
4.1　选址规划…… 45
4.1.1　电池储能系统参与电网调频的选址概略…… 45
4.1.2　电池储能系统参与电力系统调频选址步骤与模型…… 47
4.1.3　电池储能系统参与电力系统调频应用的选址实例…… 49
4.2　容量优化配置…… 52
4.2.1　电池储能系统参与电网调频的容量配置概略…… 52
4.2.2　电池储能系统参与电网调频的容量优化配置方法…… 54
4.2.3　电池储能系统参与电网调频的容量配置实例…… 61
4.3　运行控制…… 69
4.3.1　电池储能系统参与电网调频的运行控制概略…… 69
4.3.2　电池储能系统参与电网调频的基本控制模式…… 71
4.3.3　考虑储能系统参与电网调频动作时机与深度的运行方法…… 77
4.3.4　电池储能系统参与电网调频的运行控制实例…… 80
4.4　小结…… 86
第 5 章　电池储能系统调频控制技术…… 88
5.1　电力系统调频服务需求概述…… 89
5.1.1　电力系统频率控制的必要性…… 89
5.1.2　电力系统调度控制系统概述…… 90
5.1.3　电力系统频率控制的挑战…… 90
5.2　调频服务的考核与补偿方法…… 91
5.2.1　我国电网频率考核方法…… 91
5.2.2　电池储能系统调频辅助服务补偿办法…… 93
5.3　自动发电控制系统…… 94
5.3.1　自动发电控制系统概述…… 94
5.3.2　自动发电系统架构…… 94
5.4　电池储能调频技术优势…… 95

5.4.1 电池储能系统的技术特点 …… 95
5.4.2 电池储能系统物理模型 …… 96
5.5 电池储能调频控制方法 …… 100
5.5.1 基于 PI 控制器的电池储能系统控制策略 …… 100
5.5.2 基于模型预测控制方法的电池储能系统调频控制策略 …… 101
5.6 电池储能调频回报分析 …… 103
5.6.1 电池储能系统在电力市场环境下获取收益途径 …… 103
5.6.2 电池储能系统参与调频服务回报分析 …… 104
5.7 小结 …… 106
第 6 章 电池储能系统调频典型设计方法 …… 107
6.1 进行方案设计的背景与意义 …… 108
6.2 设计思想与原则 …… 109
6.3 电池储能系统调频的原理 …… 109
6.3.1 储能系统一次调频的原理 …… 109
6.3.2 储能系统二次调频的原理 …… 110
6.4 方案设计 …… 110
6.4.1 储能系统功率与容量的确定 …… 110
6.4.2 储能系统参与调频的控制策略设计 …… 112
6.4.3 电池储能系统容量控制设计 …… 114
6.5 小结 …… 115
第 7 章 电池储能调频运行评估技术 …… 116
7.1 电池储能调频控制系统的调试 …… 117
7.1.1 储能一次调频控制系统调试 …… 117
7.1.2 储能二次调频控制系统调试 …… 118
7.2 电池储能系统调频控制性能评价 …… 120
7.3 市场风险评估 …… 121
7.3.1 政策风险 …… 121
7.3.2 技术风险 …… 121
7.3.3 标准体系风险 …… 121
7.4 小结 …… 122
参考文献 …… 123

第1章 绪　论

1.1 背景及意义

集中发电、远距离输电和大电网互联的电力系统供电量占全世界总量的90%，是目前电能生产、输送和分配的主要方式。为应对日益紧迫的能源安全和环境恶化问题，我国政府于2009年11月提出“到2020年非化石能源占一次能源需求15%左右和单位GDP CO_2 排放降低40%~45%”的战略目标，确立了“加快推进包括水电、核电等非化石能源发展，积极有序做好风电、太阳能、生物质能等可再生能源的转化利用”的思路。同时，环境污染与能源紧张问题使传统火电机组的化石燃料供应面临着巨大压力，为应对这些危机，越来越多的非传统能源进入发电领域，包括风力发电、光伏发电、光热发电等。然而，因风电和光伏等可再生能源出力的波动性和不确定性，其大规模并网会给系统的安全稳定运行带来重大挑战。这些新能源通常具有间歇性、可变性等特点，功率输出变化剧烈，当装机容量增加至一定规模时，其功率波动或者因故整体退出运行，会导致系统有功出力和负荷之间的动态不平衡，造成系统频率偏差，引起电网的频率稳定性问题。如何确保电力系统频率稳定以及安全性、可靠性是当今电网亟待解决的问题之一。间歇式能源发电不但会导致调节容量需求增加，而其自身又不具备参与频率调节的功能，原有传统机组必须承担起这些新能源机组带来的频率调节任务。

目前，在我国各大区域电网中，大型水电与火电机组是主要的调频电源，通过不断地调整调频电源出力来响应系统频率变化。但是，它们各自具有一定的限制与不足，影响着电网频率的安全与品质。例如，火电机组响应时滞长、机组爬坡速率低，不适合参与较短周期的调频，有时甚至会造成对区域控制误差的反方向调节；参与一次调频的机组受蓄热制约而存在调频量明显不足甚至远未达到一次调频调节量理论值的问题；参与二次调频的机组爬坡速率慢，不能精确跟踪调度自动发电控制（Automatic Generation Control，AGC）指令；一次、二次调频的协联配合也尚需加强；提供调频服务不仅加剧了机组设备磨损，而且增加了燃料使用、运营成本、废物排放和系统的热备用容量等，调频的质量和灵活性也不能满足电力系统对提高电能质量的要求；各火电机组性能不同其响应速率也不同，造成调节效果千差万别，因此若需增加系统调节容量，也并非大量增加调频火电机组为好。水电机组虽然响应较快，可以在几秒钟内达到满功率输出，但是水电机组受到地理条件和季节变化的限制，水电集中在我国西南多山多水地区及沿海地区，水电机组增减出力受到河流状况的影响，这意味着水电机组整体可提供的调频容量极为受限，也会影响机组对控制信号的响应。

随着高渗透率风电和光伏的大规模并网，现有调频容量不足的问题日益突出，亟须新的调频手段出现。要提高电网的频率稳定性，就必须提高区域的AGC控制

性能，即要提高机组对 AGC 信号的响应能力，包括响应时间、调节速率和调节精度等指标。在新能源大量接入以及传统机组存在发展局限性的情况下，电池储能技术以其快速、精确的功率响应能力成为新型调频辅助手段的关注热点。研究表明，电池储能系统（Battery Energy Storage System，BESS）可在 1s 内完成 AGC 调度指令，几乎是火电机组响应速度的 60 倍；同时，少量的储能还可有效提升以火电为主的电力系统整体调频能力。大规模电池储能系统响应速度快，短时功率吞吐能力强，且易改变调节方向，与常规调频电源相结合，可作为辅助传统机组调频的有效手段。电池储能系统的快速响应与精确跟踪能力使得其比常规调频方式高效，可显著减少电网所需旋转备用容量；由于电池储能系统参与调频而节省的旋转备用容量可用于电网调峰、事故备用等，因此能够进一步提高电网运行的安全性与可靠性。除了技术上的优势外，电池储能系统在参与电网调频的应用中，不仅能够节省电力系统的投资和运行费用，降低煤耗，提高静态效益，而且由于其响应快速，运行灵活，可以满足系统运行的调频需求而产生动态效益。

在国外，电池储能技术的各方面已经逐步发展成熟，尤其是美国、智利、巴西和芬兰针对大规模电池储能系统参与电力调频已开展了理论研究与示范验证。在我国，电池储能技术参与电网调频的研究与示范尚属起步与借鉴阶段。从国内目前投建的储能示范工程来看，电池储能系统参与电力调频已逐渐被业界认识和重视起来，虽然目前还未开展更深入的研究与示范应用工作，但储能技术参与电力调频将是未来智能电网必须关注的重要科学问题。

我国在大容量储能技术应用于电力系统调频的理论分析与研究开展得比较少，应用示范也属于起步阶段。虽然国外的储能技术已趋于成熟，但由于其网架结构、能源结构与我国相差甚远，因此亟须探索符合我国电网特点的储能参与电力调频技术，加大储能在我国调频辅助领域中的必要性与价值分析、基础理论研究以及示范研究的力度，利用储能更好地服务于电力调频，服务于新一代“坚强”、“智能”电网。

未来，电池储能技术将在高效运作的电网中发挥重要作用，可保证在用电需求高峰时电能的可利用性，提高电网的可靠性，并且有效地平衡供求波动。近年来，利用大规模电池储能系统取代常规发电机组进行调频，已受到业界的关注。电池储能技术的“快速响应”特性令其作为电网调峰与调频等辅助服务手段，能够满足电网的稳定性和可靠性要求。

在调频应用领域，电池储能系统将比传统的火电调频电厂、抽水蓄能电站具有更大的优势。对电池储能系统参与电力系统调频技术的研究具有重要的意义，这也是对电池储能系统参与电力系统调频进行容量配置和设计控制策略的基础。

2016 年 6 月，国家能源局发布了《关于促进电储能参与“三北”地区电力辅助服务补偿（市场）机制试点工作的通知》（以下简称“通知”），确立了储能参

与调峰调频辅助服务的主体地位，提出在按效果补偿原则下，加快调整储能参与调峰调频辅助服务的计量公式，提高补偿力度。《通知》还从效用角度综合考量储能的容量与质量，在政策设计上更具合理性和可持续性，标志储能发展正式进入快车道。

1.2 电池储能技术的发展现状

据不完全统计，截至 2016 年底，我国投运储能项目累计装机规模 24.3GW，同比增长 4.7%。其中电化学储能项目的累计装机规模达 243MW，同比增长 72%。2016 年我国新增投运电化学储能项目的装机规模为 101.4MW，同比增长 299%，发展势头迅猛，如图 1-1 所示。从应用技术类型来看，截至 2015 年年底的储能项目统计情况，锂离子电池是最为常用的技术类型，约占所有项目的 66%，其次是铅蓄电池（铅炭），约占 15%，液流电池占 13%。2016 年我国新增投运的电化学储能项目几乎全部使用锂离子电池和铅蓄电池，这两类电池的新增装机占比分别为 62% 和 37%。

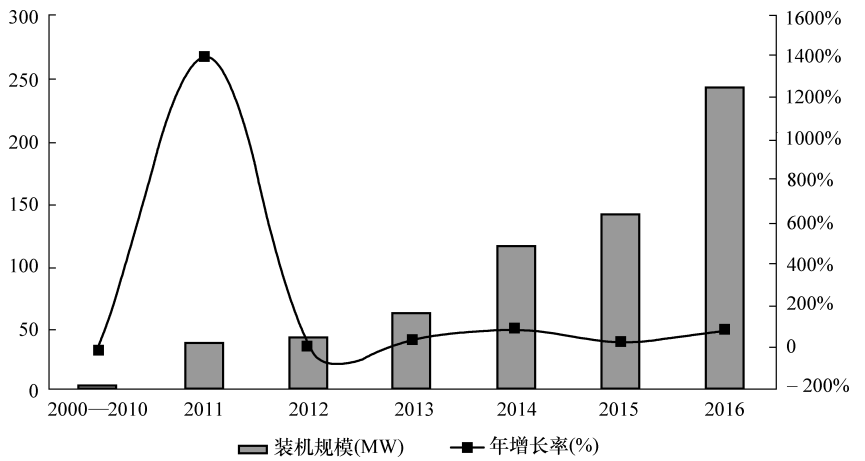


图 1-1　截至 2016 年我国电化学储能累计装机规模

根据国际可再生能源署（IRENA）日前发布“电力储存与可再生能源——2030 年的成本与市场”报告，到 2017 年年中全球储能装机容量为 176GW，其中 169GW 为抽水蓄能（占 96%）；3.3GW 为热能储存（1.9%）；1.9GW 为电池储能（1.1%）；1.6GW 为机械储能（0.9%），其他为 0.1%。尽管抽水蓄能仍占绝对优势，但是未来其成本下降空间有限，而各类电池储能成本可望下降 50% ~60%。预计 2030 年抽水蓄能装机将小幅增至 235GW，而电池储能将快速攀升至 175GW。

电池储能作为电能存储的重要方式，其特点在于应用灵活，响应速度快，不

受地理条件限制，适合大规模应用和批量化生产。蓄电池种类众多，各具优点，因此在电网中的应用较其他储能更为灵活。各类蓄电池虽在运行机理和技术成熟度都存在差异，但一般较易实现大规模储能，储能效率为60%～90%，这取决于相应的电化学性质和服务周期。目前，实际应用于电力领域的电池储能技术，除了传统铅酸电池，还有几种新兴电池诸如锂离子电池、全钒氧化还原液流电池以及钠硫电池等。

进入21世纪后，以钠硫电池、液流电池、锂离子电池和铅碳电池为代表的电化学储能技术相继取得关键技术突破，其为储能载体至今在全世界范围内一共实施了200多个兆瓦级以上示范工程，展现出了巨大的应用潜力。由于化学储能具有能量转换效率高、系统设计灵活、充放电转换迅速、选址自由等诸多优势，被认为是未来大规模储能技术发展的主要方向。

1. 锂离子电池

锂离子电池（Lithium－ion Battery）在充电时，锂离子从正极脱嵌，穿过电解质和隔膜，嵌入到负极材料之中，放电时则相反。锂离子电池具有单体电压水平高、比能量大、比功率大、效率高、自放电率低、无记忆效应、对环境友好等特点，是具有实现规模化储能应用潜力的二次电池。

1）应用领域。近年来，锂离子电池各项关键技术尤其是安全性能方面的突破以及资源和环保方面的优势，使得锂离子电池产业发展速度极快，在新能源汽车、新能源发电、智能电网、国防军工等领域的应用越来越受到关注。大规模锂离子电池可用于改善可再生能源功率输出、辅助削峰填谷、调节电能质量以及用作备用电源等。随着锂离子电池制造技术的完善和成本的不断降低，锂离子电池储能将具有良好的应用前景。

2）技术成熟度。对电极新型化学材料的研究是锂离子电池技术的研究重点，国际上锂离子电池重要部分（如电极、电解液和隔膜）的关键材料都有很大程度的改进和提高。锂离子电池负极材料主要是石墨，电解液和隔膜的选择比较单一，主要通过正极材料名称区分锂离子电池类型。其中，正极的改进经历了从较昂贵的钴酸锂到较便宜、较稳定的磷酸铁锂和锰酸锂的变化。磷酸铁锂以其结构稳定、成本低、安全性能好、绿色环保等优势成为近年来研究的热点。此外，具有较高充放电速率的纳米磷酸铁锂技术（美国A123公司）及钛酸锂技术（Altair Nano公司）的研究已取得突破，并实现了商业化运作。

国内锂离子电池产业的发展得益于手机、笔记本电脑市场的蓬勃发展，随着新材料技术的突破与制造工艺技术的进步，以及电动交通运输工具的兴起与推广，推动了锂离子电池技术的商业化发展。

3）产业化进程。目前已实现产业化的锂离子电池包括钴酸锂电池、锰酸锂电池、磷酸铁锂电池和三元材料电池等，主要参数见表1-1。

表 1-1　产业化锂离子电池参数

	钴酸锂电池	锰酸锂电池	磷酸铁锂电池	三元材料电池
比能量/(Wh/kg)	130～150	80～100	90～130	120～200
比功率/(W/kg)	1300～2500	1200～2000	900～1300	1200～3000
循环次数	500	1000	3000	3000
安全性	差	良	优	良
单体一致性	优	优	差	优
效率（%）	≥95	≥95	≥95	≥95
支持放电倍率/C	10～15	15～20	10	10～15
成本/(元/kWh)	3000～3500	2000	2500～3000	3000～3500

当前已趋于成熟的小型锂离子电池产业，多服务于小型电器、电动工具以及电动交通工具，而规模化储能型锂离子电池的研发规模距离产业化还有一定距离，正逐渐成为当前电池产业领域关注的焦点。目前，中国、美国、日本等国家均已建成了兆瓦级锂离子电池储能应用示范项目。

2. 全钒氧化还原液流电池

氧化还原液流电池（Redox Flow Battery）简称液流电池，最早由美国航空航天局（NASA）资助设计，1974 年由 Thaller H. L. 公开发表并申请了专利。30 多年来，多国学者通过变换氧化－还原电对，提出了多种不同的液流电池体系，如铈钒体系、全铬体系、溴体系、全铀体系、全钒体系等。

在众多液流电池体系中，由于全钒氧化还原液流电池（Vanadium Redox Flow Battery，VRB）系统的正、负极活性物质为价态不同的钒离子，可避免正、负极活性物质通过离子交换膜扩散造成的元素交叉污染，优势明显，是目前主要的液流电池产业化发展方向。

正、负极活性物质均为液体的全钒电池具有其他固相化学电池所不具备的特性与优势，但因全钒电池仍存在环境温度适用范围窄、能量转换效率不高等问题尚未普及推广。其特点简述如下：

1）能量与功率独立设计，输出功率取决于电堆体积，储能容量取决于电解液储量和浓度，易扩容、易维护。

2）活性物质存放于电堆之外的液罐中，自放电率低，理论储存寿命长。

3）响应速度快，支持充放电频繁切换以及深度放电。

4）安全系数稳定，支持正、负极电解液混合，且电解液可重复循环使用。

5）特有的液路管道结构，导致支路电流损耗显著，影响储能系统效率。

根据全钒电池运行特性，其应用领域多涉及辅助削峰填谷、改善新能源功率输出、不间断电源（UPS）及分布式电源等场合，如图 1-2～图 1-5 所示。



图 1-2　日本 SEI LCD 工厂
1.5MWh 储能系统用于削峰填谷

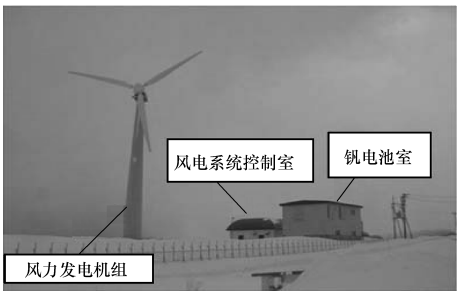


图 1-3　日本 SEI 北海道 Tomari 170kW×6h
储能系统用于改善新能源功率输出



图 1-4　美国南卡罗来纳州空军基地 30kW×2h 雷达 UPS



图 1-5　奥地利 Cellstrom 10kW×10h 光伏－全钒电池储能电站（用于分布式电源）

3. 钠硫电池

钠硫电池（Sodium Sulfur battery，简称 NaS）是一种以金属钠为负极、硫为正极、陶瓷管 $\beta''-Al_2O_3$ 为电解质隔膜的二次电池。在一定工作条件下，钠离子透过电解质隔膜与硫之间发生的可逆反应，形成能量的释放和储存。钠硫电池原材料丰富，能量密度和转换效率高；但因钠和硫两种元素的大量聚集存在安全隐患，且其运行温度高达 280～350℃，启停周期较长，同时因垄断造成成本高且降价空

间小，因此尚未推广普及。图 1-6 所示即容量为 180Ah 的 NaS 电池单体实物照片。

目前钠硫电池储能系统已经成功应用于平滑可再生能源发电功率输出、削峰填谷、应急电源等领域。

1）平滑可再生能源发电功率输出的应用如图 1-7 所示。



图 1-6　钠硫单体电池 180Ah



图 1-7　日本 Wakkanai 1.5MW 钠硫电池/5MW 光伏电站

2）削峰填谷。通过在用电需求小于发电量时储存多余电能，而在用电需求大于供给时释放已储存电能的手段，钠硫电池储能系统可以有效解决因供需不平衡而造成的电力紧张现象，从而实现削峰填谷，提高现有设备利用率。

4. 铅酸电池

铅酸电池的电极主要由铅及其氧化物制成，电解液是硫酸溶液。铅酸电池在负荷状态下，正极主要成分为二氧化铅，负极主要成分为铅；放电状态下正负极的主要成分均为硫酸铅。铅酸电池存储容量一般为 1kW～10MW，铅酸电池的标称电压为 2.0V，比能量为 25～30Wh/kg，比功率为 150W/kg，工作温度为 －20～40℃，最大放电电流为 200A，每月自放电率为 4%～5%，铅酸电池在放电深度为 80% 时的循环次数约为 2000 次，使用寿命为 3～20 年，电池原理为氧化还原，充放电方法为恒流，最佳工作温度为 －20～60℃。可用于容量备用电源、输配电/电网支持/削峰填谷、黑启动。铅酸电池原材料丰富、价廉、技术成熟，但是存在铅污染，电池成本高且循环使用寿命短等问题。

其技术特点如下：

1）较低的比能量和比功率。

2）可平抑几分钟至几小时内的中频波动部分。

3）成本高且循环使用寿命短。

其应用场合如下：

1）电能质量。

2）频率控制。