



电池储能与清洁能源消纳

葛维春 滕云 葛延峰 编著
王顺江 李家珏 回茜



科学出版社

电池储能与清洁能源消纳

葛维春 滕云 葛延峰 编著
王顺江 李家珏 回茜

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要分析全钒液流电池的工作机理和技术特点,建立全钒液流电池模型;阐述全钒液流电池并网后的功能:平抑风电功率波动、优化电网峰谷差、提高电网安全稳定运行水平等,并介绍全钒液流电池储能系统与电网多能源协调调度技术;介绍全钒液流电池储能系统的效益分析与辅助服务机制,并给出全钒液流电池与风电联合运行系统示范工程实例。

本书可作为电力系统、新能源消纳及相关专业的参考用书,还可供从事电力系统工作的工程技术人员参考,对电网中的全钒液流电池储能系统的建设规划、优化运行等也具有指导意义。

图书在版编目(CIP)数据

电池储能与清洁能源消纳/葛维春等编著. —北京:科学出版社,2019.3
ISBN 978-7-03-059943-8

I. ①电… II. ①葛… III. ①电池-储能-研究 IV. ①TM911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 269483 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:吴兆东 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:252 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着动力电池技术的快速发展,电池储能技术的研究越来越受到能源、交通、国防等领域的重视。能源领域中储能技术的大规模应用将对现代能源生产、输送、分配和消费的所有环节产生深远的影响,有效推动我国可再生能源和能源互联网战略的实施。在多种能源接入后的电力系统中,电池储能能够在电网运行与控制的众多方面发挥作用,如调节电网功率平衡、平抑可再生能源发电功率波动、调节电网峰谷差、改善电网电能质量、提高电网稳定性及电网灵活性等。

电池储能技术是调节电能瞬时平衡的重要手段。电力系统中的电能生产与消费之间必须保持瞬时平衡,否则将出现用电负荷不能正常运行、供电系统不稳定等异常和事故。各种形式的电池储能电站在电网负荷低谷时从电网吸收电能,在电网负荷峰值时向电网输出电能。将电池储能装置用于电力调峰,所需装置应具有较大的存储容量。电池储能技术也是调节以风电为代表的大规模可再生能源发电接入电网后的消纳能力的重要手段。作为一种高效的功率控制手段,可以通过将储能系统从电网侧进行协调调度以提高电网对风电的接纳能力,并能够同时提高系统的稳定性,改善电网频率、电压甚至波形质量,进而大幅度提高可再生资源的利用水平和利用效率。电池储能技术是辅助和提升电网黑启动能力的重要手段。在电网进行黑启动过程中,电池储能能够快速稳定地为电网提供电力支撑。合理的电池储能容量、地点、荷电状态,可以为电网中的火电机组、水电机组和清洁能源发电系统提供有效的电源支持,是实现和加快电网大停电事故恢复的重要保障。

电力系统中应用的大容量储能电池主要包括全钒液流电池、锂离子电池、钠硫电池和铅酸电池等。全钒液流电池具有设计灵活、使用寿命长、充放电性能好、选址自由、低温快速启动性好、检修维护费用低及易实现规模化蓄电等其他常规电池所不具备的诸多优点。虽然全钒液流电池技术的研究开发历史比较短,但在我国的工程应用中发展迅速,具有较大的发展空间。

近年来,国内储能相关理论与技术研究、大容量工程系统开发与应用规模发展较快,但缺少全面地对电网中应用全钒液流电池储能系统进行分析的著作。本书以全钒液流电池性能及其对清洁能源消纳为核心,尽可能兼顾全钒液流电池储能技术在电网中应用的理论、技术和工程等多方面的内容,并为电网中的全钒液流电池储能系统的技术改造、建设规划、优化运行等提供理论与技术指导。

全书共9章。第1章对几种常用电化学储能电池的主要性能进行总结对比;第2章介绍电池储能技术指标和运行状态评估体系;第3章基于全钒液流电池储能模型得出全钒液流电池并网技术要求,并介绍全钒液流电池的低温启动特性、充放电特性等;第4章介绍全钒液流电池储能系统并网时可参与平抑风电功率波动、优化电网峰谷差和优化电网频率;第5章介绍全钒液流电池储能系统提高电网黑启动能力;第6章介绍全钒液流电池储能系统的无功输出特性、电池储能调压能力分析、电池储能提高小扰动稳定性以及电池储能提高系统的暂态稳定性;第7章主要介绍全钒液流电池储能系统的运行优化方法、含风储混合系统的机组组合优化、电池储能自动控制以及电网多能源协调运行控制;第8章介绍全钒液流电池储能系统的效益分析与辅助服务机制;第9章给出大连液流电池储能调峰电站示范工程和卧牛石风电场储能示范工程实例。

本书是葛维春教授及其研究团队多年来在电池储能技术与清洁能源消纳领域相关研究成果的结晶。葛维春教授一直从事清洁能源高效高质量消纳理论与技术研究,在清洁能源发电并网、多能源电力系统运行优化、高比例可再生能源电网稳定性等方面取得了一系列研究成果。本书第1章由葛延峰撰写,第2章由王顺江撰写,第3~6章由葛维春撰写,第7、8章由滕云撰写,第9章由李家珏和回茜撰写,全书由葛维春统稿。

本书的撰写得到了沈阳工业大学、国网辽宁省电力有限公司、国网内蒙古东部电力有限公司的支持,以及国网辽宁省电力有限公司科技项目(2018YF-06)的资助。

由于编者水平有限,本书难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 电池储能概述	1
1.1 几种电化学储能电池介绍	2
1.1.1 铅酸电池简介	3
1.1.2 锂离子电池简介	5
1.1.3 钠硫电池简介	10
1.1.4 液流电池简介	11
1.2 几种常用电化学储能电池主要性能对比	14
1.3 寒冷地区电池储能的特殊性	17
第 2 章 电池储能技术指标体系	19
2.1 技术指标	19
2.1.1 储能规模性指标	20
2.1.2 储能技术性指标	21
2.1.3 储能经济性指标	22
2.1.4 储能环境影响指标	23
2.1.5 储能稳定性指标	24
2.1.6 储热介质性能指标	24
2.2 电池储能的运行状态评估体系	25
2.2.1 电池储能的运行状态评估指标	25
2.2.2 电池储能指标体系评价	27
第 3 章 全钒液流电池	29
3.1 全钒液流电池原理	29
3.1.1 液流电池应用概述	29

3.1.2	全钒液流电池运行过程分析	29
3.1.3	全钒液流电池储能技术特点	30
3.2	全钒液流电池模型	31
3.2.1	全钒液流电池等效电路模型	31
3.2.2	充放电模型	33
3.3	全钒液流电池并网技术要求	34
3.3.1	并网控制方式	35
3.3.2	性能指标	36
3.4	全钒液流电池检测方法	37
3.4.1	电池单体出厂性能检测	37
3.4.2	储能电池并网参数测试	38
3.5	电池的低温启动特性	39
3.5.1	电池低温启动问题	39
3.5.2	电池低温启动效率	40
3.5.3	电池低温快速启动方法	44
3.6	电池的充放电特性	45
3.6.1	电池的充放电过程复杂性分析	45
3.6.2	电池的充电与放电特点分析	45
3.6.3	电池的充放电管理系统功能	50
第4章	全钒液流电池储能系统并网功能分析	52
4.1	全钒液流电池储能系统平抑风电功率波动	52
4.1.1	全钒液流电池储能系统平抑风电功率波动的原理	52
4.1.2	全钒液流电池储能系统与风电的配合方式	54
4.1.3	全钒液流电池储能系统平抑风电功率波动的控制策略	55
4.1.4	全钒液流电池储能系统平抑风电功率波动的能量管理	58
4.1.5	全钒液流电池储能系统平抑风电功率波动的实例分析	60
4.2	全钒液流电池储能系统优化电网峰谷差	62

4.2.1	电网调峰需求分析	62
4.2.2	全钒液流电池储能系统提高低谷时段的风电消纳能力	63
4.2.3	全钒液流电池储能系统削峰填谷的控制策略	64
4.3	全钒液流电池储能系统优化电网频率	67
4.3.1	系统调频需求分析	67
4.3.2	全钒液流电池储能系统功率-频率调频特性分析	70
4.3.3	全钒液流电池储能系统与传统电源联合一次调频	73
4.3.4	全钒液流电池储能系统辅助电力系统二次调频	81
第5章	全钒液流电池储能系统提高电网黑启动能力	84
5.1	全钒液流电池黑启动	84
5.1.1	黑启动过程	84
5.1.2	全钒液流电池储能系统与黑启动发展	85
5.2	全钒液流电池黑启动方法	87
5.2.1	黑启动关键技术	87
5.2.2	全钒液流电池储能系统在黑启动过程中的运行方式	88
5.2.3	全钒液流电池的风储火系统的运行特性分析	88
5.3	风储联合发电系统黑启动关键技术及优化策略	91
5.3.1	风储联合发电系统黑启动的特点	91
5.3.2	风储联合发电系统黑启动关键技术	92
5.3.3	风储联合发电系统黑启动协调优化策略	94
5.4	典型风储联合发电系统黑启动	100
5.4.1	典型风储联合发电系统黑启动方案	100
5.4.2	典型风储联合发电系统黑启动仿真及电气校验	102
第6章	全钒液流电池储能系统提高电网安全稳定运行水平	108
6.1	全钒液流电池储能系统的无功输出特性	108
6.1.1	电池-变流器拓扑结构及模型电路	108
6.1.2	变流器对全钒液流电池储能系统无功输出特性的控制	109

6.2	全钒液流电池储能系统调压能力分析	110
6.3	全钒液流电池储能系统提高小扰动稳定性	113
6.3.1	全钒液流电池储能系统小扰动的分析方法	113
6.3.2	全钒液流电池储能系统的控制系统	114
6.3.3	小扰动目标函数	115
6.4	全钒液流电池储能系统提高系统的暂态稳定性	118
6.4.1	基于附加频率响应的全钒液流电池储能系统并网控制策略	118
6.4.2	全钒液流电池储能系统容量与暂态稳定性	120
第7章	全钒液流电池储能系统与电网多能源协调调度技术	122
7.1	全钒液流电池储能系统的运行优化	122
7.1.1	全钒液流电池储能系统的数学模型	122
7.1.2	全钒液流电池储能系统的运行优化策略	123
7.2	含风储联合发电系统的机组组合优化	127
7.3	全钒液流电池储能系统 AGC 运行控制	131
7.3.1	全钒液流电池储能系统参与电网 AGC 运行控制	131
7.3.2	全钒液流电池储能系统 AGC 运行控制方法	137
7.3.3	小结	140
7.4	电网多源协调运行控制	140
7.4.1	电网多源协调控制	140
7.4.2	风储联合发电系统的协调调度	143
7.4.3	全钒液流电池储能系统与风力发电出力互补分析	146
7.4.4	小结	149
第8章	全钒液流电池储能系统效益分析与辅助服务机制	150
8.1	全钒液流电池储能系统效益分析及容量配置	150
8.2	全钒液流电池储能系统调频服务效益分析	152
8.2.1	全钒液流电池储能系统参与电网调频的成本计算模型	152
8.2.2	全钒液流电池储能系统参与电网调频的运行效益计算	154

8.3	全钒液流电池储能系统辅助服务定价策略	155
8.4	全钒液流电池储能系统效益分析	160
8.5	广域协调有功优化控制	162
8.5.1	广域协调有功优化控制的日前发电计划	162
8.5.2	广域协调有功优化控制的日内协调调度	164
8.5.3	小结	167
第9章	全钒液流电池储能系统工程设计及示范	169
9.1	大连液流电池储能调峰电站工程设计	169
9.1.1	大连液流电池储能调峰电站工程平面规划设计	170
9.1.2	大连液流电池储能调峰电站的电气系统设计	171
9.1.3	大连液流电池储能调峰电站的辅助系统设计	175
9.1.4	小结	177
9.2	卧牛石风电场储能示范工程	178
9.2.1	储能电站的系统方案设计	178
9.2.2	储能电站的功能分析	182
9.2.3	小结	185
参考文献	187

第 1 章 电池储能概述

为有效应对化石能源过度消耗与生态环境恶化所导致的能源和环境问题,许多国家都在积极寻找能够替代传统能源的新能源,如风能、太阳能与生物质能等。然而在实际工程中,电能的生产、输送、消费流程中的连续性会造成能源利用过程中的瓶颈,如在用电低谷时风电产能过剩导致的“弃风”现象,将严重阻碍能源产业的发展。对中国这样一个能源生产和消费大国来说,储能产业的兴起,不仅有望解决能源储存的问题,也能在一定程度上起到削峰填谷的作用。因此,大力发展储能产业,既是社会节能减排的要求,也是能源支撑国民经济发展的需要。

随着各种类型电能存储技术的不断发展,考虑到电网应对大规模风电接入的需要,可以将大容量储能系统引入电力系统中。储能系统作为一种行之有效的功率控制手段,可以从电源侧提高风电的接入品质,而且可以通过广域协调调度提高电网侧对风电的接纳能力,具有广阔的应用前景^[1]。

在储能技术快速发展的同时,利用大规模储能装置参与电网调频备受关注。基于系统调频响应时间与储能装置响应时间的比较可知,适合的储能类型有电池(如铅酸电池、锂离子电池、液流电池和钠硫电池)、超级电容、飞轮储能和抽水蓄能等^[2]。国内以张北国家风光储输示范工程、深圳宝清电池储能电站和北京石景山热电厂锂离子电池储能调频系统等大容量储能示范工程为代表。

现阶段储能系统的成本较高,如果只是简单从技术控制层面考虑利用储能参与调频,可能会引起储能系统利用不充分、经济性欠佳等问题,造成资源浪费。因此,需要针对各储能装置的特性,构建适用于系统调频的储能装置数学模型,并建立储能装置能量管理模型,实现储能装置的合理规划与协调运行,最大程度利用储能装置满足系统调频性能和经济性要求。风电具有强波动性和不确定性,随着风电渗透率的增加,风电并网给电网的规划、运行、保护、调度等方面带来了严峻的挑战,同时目前风力发电机组对电网不表现惯性,使得电网调频压力尤为突出,在一定程度上严重影响风电并网并导致弃风现象的发生。因此,为突破间歇式电源并网瓶颈并改善电网频率指标,有必要

引入新的辅助调频手段,而储能的快速响应特性使其在参与电网调频方面具有优势。

本章将对铅酸电池、锂离子电池、钠硫电池、液流电池等几种储能电池的反应原理、电池模型进行简单介绍,对几种储能电池的主要性能进行总结对比,并对寒冷地区储能电池的特殊性进行介绍。

1.1 几种电化学储能电池介绍

目前,储能产业受到前所未有的高度关注,应用储能技术可以实现:①电网系统削峰填谷,解决供电和用电矛盾;②提高电网系统的可靠性和安全性,减少备用电源需求及停电损失^[3];③作为用户侧辅助电源,提高电能质量和供电稳定性,保障电网安全、稳定运行;④作为分布式发电及微电网的关键技术,稳定系统输出、作为备用电源、提高调度灵活性、降低运行成本、减少用户电费。储能技术的发展应用将对现代化的能源生产、输送、分配和利用产生深远的影响和发挥重要的作用。

从广义上讲,储能即能量存储,即通过一种介质或者设备,把一种能量形式用同一种能量形式或者转换成另一种能量形式存储起来,基于未来应用需要以特定能量形式释放出来的循环过程。从狭义上讲,储能技术是针对电能进行存储的技术,是利用化学或物理的方法将产生的电能储存起来的技术措施。根据所转化的能源类型不同,目前主要的电能储存形式可分为机械储能(如抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能等)、电化学储能(如铅酸电池、锂离子电池、镍氢电池、钠硫电池、液流电池等)、化学储能(如电解、燃料电池等)、电磁储能(如超导电磁储能、超级电容等)和相变储能(储热、储冷、采用相变材料和热化学材料储能)等。

在目前已经获得实际应用或者第三方测试验证的各种大规模储能技术中,抽水蓄能和压缩空气储能相对成熟,适合 100MW 以上级别的储能系统;钠硫电池、全钒液流电池、锂离子电池、超级铅酸电池和飞轮储能已经开始运用于兆瓦级别的应用中,而在百千瓦及以下级别的应用中,大多数储能技术都能够满足需求。近年来,储能技术已经发展成为未来智能电网的必要组成部分。

《能源发展“十三五”规划》中指出,能源发展的主要任务就是实施多能互补集成优化工程,加强终端供能系统统筹规划和一体化建设;利用大型综合能

源基地风能、太阳能、水能、煤炭、天然气等资源组合优势,推进风光水火储多能互补工程建设运行;实施电能替代工程,在新能源富集地区利用低谷富余电实施储能供暖,提高能源利用效率,减少煤炭消耗,改善空气质量。

综上所述,储能产业有着十分广阔的发展前景,符合国家节能减排的产业政策 and 生态文明发展的总体要求。研究储能技术路线,构建储能技术评价指标体系,重点关注储热技术发展,为储能及储热产业的发展提供技术支持,对推进能源行业供给侧结构性改革具有重要的指导意义。

目前,电化学储能技术繁多,可灵活选择安装地点,受到了电力系统的广泛关注。铅酸电池具有放电时电动势较稳定,工作电压平稳、使用温度及使用电流范围宽、能充放电数百个循环、储存性能好、造价低的特点。锂离子电池具有工作电压高、储能密度高、充放电效率高、循环寿命长、无污染等特点。钠硫电池属于中温绿色二次电池,具有容量大、体积小、能量储存和转换效率高、寿命长、不受地域限制等优点,非常适合电力储能。

液流电池是一种大容量电池储能装置,储能功率已达到兆瓦级水平。液流电池主要包括全钒液流电池、锌/溴液流电池和多硫化钠/溴液流电池。其中全钒液流电池系统组装设计灵活、易于模块组合、响应速度快、输出功率高、使用寿命长、循环寿命高、环境友好,因此各国都将其作为重点开发的一种电池储能技术。

当前,电化学储能在世界范围内建成了不同电池储能技术的应用示范工程^[4],如表 1.1 所示。

表 1.1 电池储能电站示范工程

建成时间	电池类型	国家	容量	研发单位	用途
2006	全钒液流电池	加拿大	2MW/12MW·h	加拿大 VRB 公司	风储联合发电
2011	锂离子电池	中国	6MW/36MW·h	比亚迪股份公司、中航锂电有限公司等	分布式储能研究
2012	全钒液流电池	中国	5MW/10MW·h	大连融科储能技术发展有限公司	新能源消纳以及调峰调频

1.1.1 铅酸电池简介

法国人普兰特于 1859 年发明了铅酸电池,经过一百多年的发展,铅酸

电池在理论研究、产品种类、电气性能等方面都得到了长足的进步,无论是在交通、通信、电力、军事还是在航海、航空等领域,铅酸电池都起到了不可或缺的作用。根据铅酸电池结构与用途的区别,将铅酸电池分为四大类:启动用铅酸电池、动力用铅酸电池、固定型阀控密封式铅酸电池以及其他类,包括小型阀控密封式铅酸电池、矿灯用铅酸电池等。

铅酸电池主要由极板、隔板、电解液、外壳构成。极板是蓄电池的核心部分,形状大多呈长方形。工厂先将铅卷冲压成网状的格栅,再在格栅上涂上俗称“铅膏”的活性物质。正极涂二氧化铅,负极涂海绵状纯铅,蓄电池的充放电就是依靠极板上的活性物质与电解液中硫酸的化学反应来实现的。通常整个蓄电池包含6个极板组,每个极板组由数片正负极板组成,负极板数量比正极板多一片,使每片正极板都处于两片负极板之间,使得两边电极板放电均匀。隔板使用绝缘材料,放在相邻的正、负极板之间,防止正、负极板接触发生短路,市面上一一般采用塑料隔板,极板沉浸在电解液中,与电解液产生化学反应。电解液用纯硫酸与纯蒸馏水按一定比例混合而成,一般工业用的硫酸与自来水不能用作电解液,否则会损坏极板。

在铅酸电池中,正极板为二氧化铅,负极板为铅,电解液为硫酸溶液。将其正、负极板插入电解液中,正、负极板与电解液相互作用,在正、负极板间就会产生约2.1V的电势。电池在完成充电后,正极板为二氧化铅,负极板为海绵状铅。放电后,在两极板上都产生细小而松软的硫酸铅,充电后又恢复为原来物质。铅酸电池在充电和放电过程中的可逆反应理论比较复杂,目前公认的是“双硫酸化理论”。该理论的含义是:铅酸电池在放电后,正、负电极的有效物质和硫酸发生反应,均转变为硫酸化合物(硫酸铅),充电时又会转化为原来的铅和二氧化铅。其具体的化学反应方程式为

(1) 正极反应:



(2) 负极反应:



(3) 总反应:



从以上的化学反应方程式中可以看出,铅酸电池在放电时,正极的活性物质二氧化铅和负极的活性物质铅都与硫酸电解液反应,生成硫酸铅,在电化学上把这种反应称为“双硫酸盐化反应”。在蓄电池放电刚结束时,正、负极活

性物质转化成的硫酸铅是一种结构疏松、晶体细密的物质,活性程度非常高。在蓄电池充电过程中,正、负极疏松细密的硫酸铅在外界充电电流的作用下会重新变成二氧化铅和铅,蓄电池又处于充足电的状态。

铅酸电池采用均衡充电和浮充充电两种充电方式来保证电池的放电时间和使用寿命。均衡充电的特点是恒流,目的是快速补充电能,同时当个别蓄电池电压有偏差时,可消除偏差,趋于平衡。这种充电方式普遍用于汽车点火系统或蓄电池频繁放电的工作模式。为了平衡蓄电池自放电造成的容量损耗,需要对蓄电池进行一种连续的、长时间的恒电压充电,这种充电模式就是浮充充电。目前,通信电源和大功率不间断电源的充电系统基本具备均充转浮充功能和温度补偿功能,可很好地保护蓄电池。铅酸电池的缺点是比能量(单位重量所蓄电能)小,十分笨重,对环境腐蚀性强,循环使用寿命短,自放电大,不易过放电。

1.1.2 锂离子电池简介

锂离子电池是近年来兴起的新型高能量二次电池。该电池可重复充电的特性,使其迅速成为移动电话、笔记本电脑等便携式电子设备的原动力。同时也让这些电子设备的重量和体积明显减小,使用时间相应延长。

锂离子电池实际上是一种锂离子浓差电池,正、负电极由两种不同的锂离子嵌入化合物组成。其正极材料必须有能够接纳锂离子的位置和扩散路径,目前应用性能较好的正极材料是具有高插入电位的层状结构的过渡金属氧化物和锂的化合物,如 Li_xCoO_2 、 Li_xNiO_2 以及尖晶石结构的 LiMn_2O_4 等,这些正极材料的插锂电位都可以达到 4V 以上。负极材料一般用锂碳层间化合物 Li_xC ,其电解质一般采用溶解有锂盐 LiPF_6 、 LiAsF_6 的有机溶液。典型的锂离子蓄电池体系由碳负极(焦炭、石墨)、正极钴酸锂(Li_xCoO_2)和有机电解液三部分组成^[5]。

锂离子电池工作原理如图 1.1 所示,锂离子电池在充电条件下, Li^+ 从正极材料中脱嵌而出,正、负极两侧电解液出现浓度差,从高浓度侧(正极侧)通过隔膜达到低浓度侧(负极侧)并嵌入负极材料中。负极处于富锂态,正极处于贫锂态,同时电子的补偿电荷从外电路供给碳负极,保证负极的电荷平衡。放电时则相反,从负极脱嵌经电解液和隔膜嵌入正极,在正、负极之间来回移动。因此,人们又形象地把锂离子电池称为“摇椅电池”或“摇摆电池”。

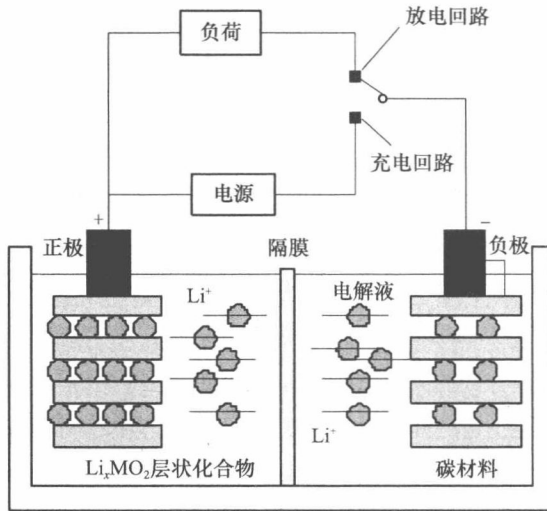
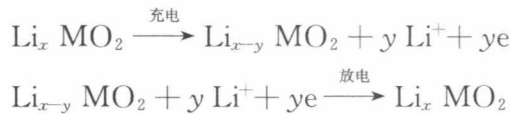


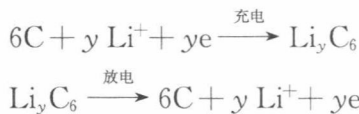
图 1.1 锂离子电池工作原理示意图

锂离子电池的电化学表达式为

(1) 正极反应:



(2) 负极反应:



式中, M 为 Co、Ni 等。

由于电池储能难以采用常规物理模型对其进行详细的描述, 储能系统的建模应基于其应用场景, 简单的模型无法体现电池特性, 过于复杂的模型又会大大增加控制策略的求解与应用的复杂度, 现在系统中应用较多的建模方法是根据电池内部的动态特性和外特性表现对其进行等效电路建模。等效电路模型是通过电气元件, 如电压源、电容、电阻、电感等组成电路网络模拟电池对外的暂态/稳态特性, 具有建模方法简单、参数辨识容易、精度高、便于消除模型不确定性因素、易数学解析、普遍适用性强等优势, 是电气工程、机械动力等领域应用最广泛的建模方法。锂离子电池等效电路模型如图 1.2 所示。

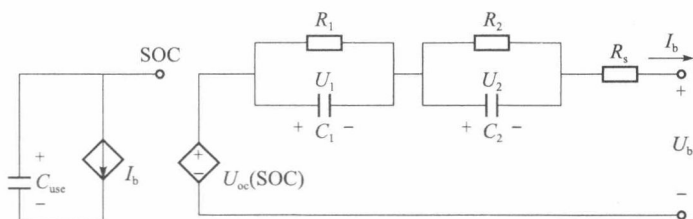


图 1.2 锂离子电池等效电路模型

图 1.2 中, U_b 为锂离子电池负载端电压, U_{oc} 为锂离子电池开路电压 (open circuit voltage, OCV), 是荷电状态 (state of charge, SOC) 的非线性函数, 由可控电压源表示, R_s 为电池的欧姆电阻, 两个 RC 环节分别表示电池运行中的电化学反应极化和浓差极化过程, 相应的数学模型为

$$\begin{cases} U_b = U_{oc} - U_1 - U_2 - U_s \\ \dot{U}_1 = -\frac{1}{R_1 C_1} U_1 + \frac{I_b}{C_1} \\ \dot{U}_2 = -\frac{1}{R_2 C_2} U_2 + \frac{I_b}{C_2} \\ SOC = SOC(0) - \int_0^t \frac{I_b \eta}{C_{use}} dt \end{cases} \quad (1.1)$$

此数学模型属于二阶微分方程, 基本输入量为电流, 输出量为电池端电压, 其中初始荷电状态给定, 初始极化电压为 0, 也可由输出功率得到相应的电流、电压。

模型的验证如下: 基于所建立的数学模型在 MATLAB/Simulink 中建立相应的仿真模型, 并对相应的模型进行验证。

电池参数: 容量 $40\text{A}\cdot\text{h}$, 额定电压 3.2V , 最大充电电流 40A 。

图 1.3 为锂离子电池开路电压与荷电状态之间的关系曲线。从图中可以看出, 锂离子电池开路电压与荷电状态存在较明显的拟合关系, 可以通过拟合函数对电池下一时刻的开路电压值进行估计和预测。针对该电池的拟合函数如下:

$$\begin{aligned} OCV = & -0.7644\exp(-26.6346\text{SOC}) + 3.2344 + 0.4834\text{SOC} \\ & - 1.2057\text{SOC}^2 + 0.9641\text{SOC}^3 \end{aligned} \quad (1.2)$$

(1) 设置不同的放电倍率, 在不同放电倍率下分析锂离子电池端电压与电池容量的关系, 如图 1.4 所示。从图中可以看出, 锂离子电池在高放电倍率下到达截止电压时所放出的容量不同, 放电倍率越小, 放出的电量越多。