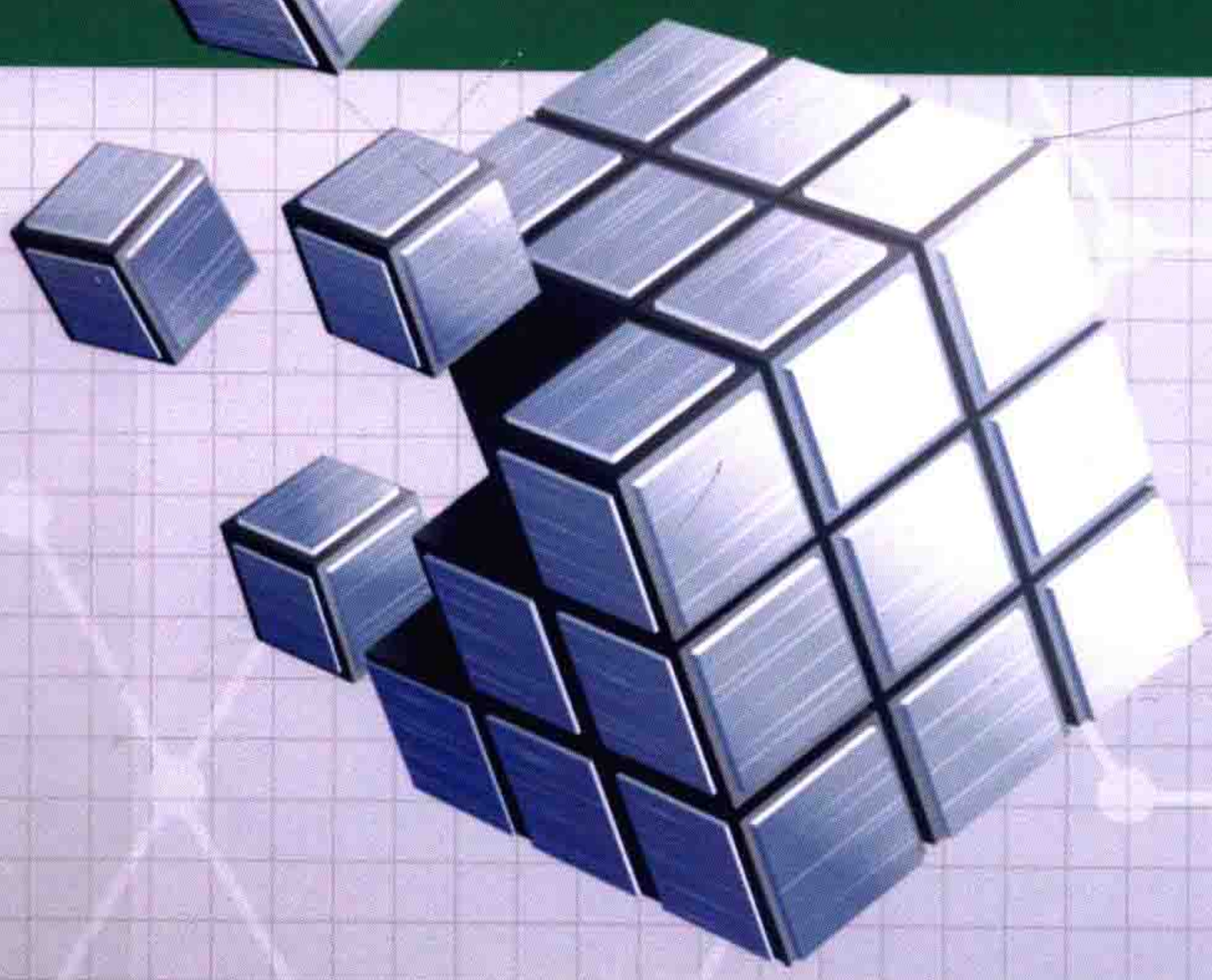
分布式电池储能系统优化配置与调度技术

FENGBUSHI DIANCHI CHUNENG XITONG YOUHUA PEIZHI YU DIAODU JISHU

饶宇飞　主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

分布式电池储能系统
优化配置与调度技术

中国电力出版社官方微信

ISBN 978-7-5198-3427-2

定价：39.00元

上架建议：电力工程

分布式电池储能系统优化配置与调度技术

主　编　饶宇飞

副主编　李朝晖　杨海晶

参　编　谷青发　滕卫军　周　宁　高东学

宋宁希　张景超　于琳琳　王　骅

李相俊　贾学翠　修晓青　王　青

鲁宗相　乔　颖　于昌海　滕贤亮

河南理工大学 藏書 图書馆

中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书系统地介绍了分布式电池储能系统的基本概念和应用技术，在此基础上，对分布式电池储能在电网中的各种应用进行了详细阐述。本书共6章，第1章介绍了国内外储能技术发展现状；第2章主要介绍常用的电池储能技术；第3～6章介绍了分布式电池储能在电网中的应用，包括分布式电池储能在电网中的优化配置、建模与仿真、布点定容与协同控制，以及多目标调度策略等。

全书侧重于基础知识和技术应用的介绍，内容紧贴当前分布式电池储能在电网中的应用热点，有利于读者迅速掌握分布式电池储能技术的发展和应用现状。

本书既可供高等院校电气相关专业的师生阅读，又可作为电力工程技术人员和研究人员的技术参考书。

图书在版编目（CIP）数据

分布式电池储能系统优化配置与调度技术/饶宇飞主编．—北京：中国电力出版社，2019.7

ISBN 978-7-5198-3427-2

Ⅰ.①分… Ⅱ.①饶… Ⅲ.①电池—储能—研究 Ⅳ.①TM911

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第148488号

出版发行：中国电力出版社

地　　址：北京市东城区北京站西街19号（邮政编码100005）

网　　址：http://www.cepp.sgcc.com.cn

责任编辑：崔素媛（010-63412392）

责任校对：黄　蓓　李　楠

装帧设计：郝晓燕

责任印制：杨晓东

印　　刷：三河市航远印刷有限公司

版　　次：2019年8月第一版

印　　次：2019年8月北京第一次印刷

开　　本：710毫米×1000毫米　16开本

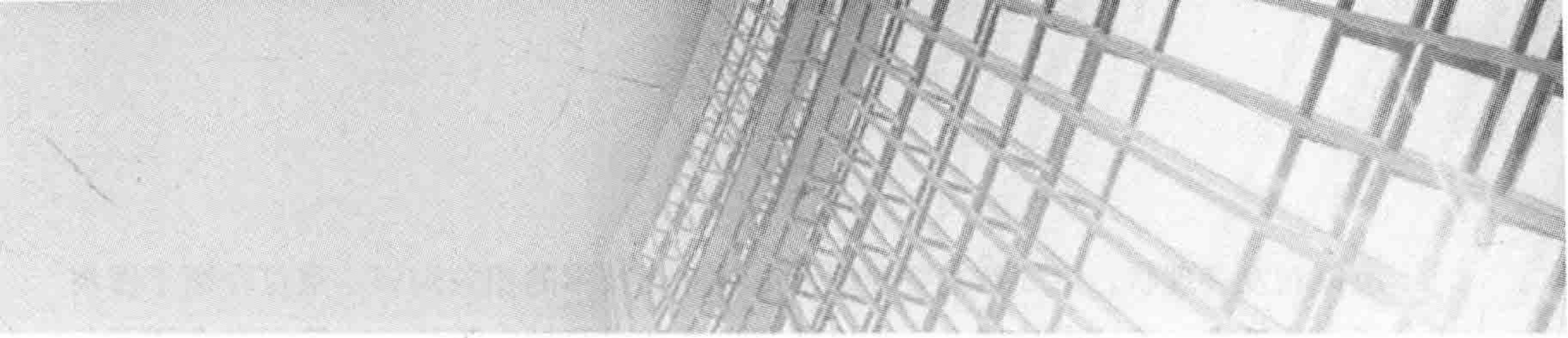
印　　张：10

字　　数：177千字

定　　价：39.00元

版 权 专 有　侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换



前　言

分布式储能是指将储能装置根据环境等因素接入负荷或配电网端。智能微电网和分布式能源系统的规模比大电网小，因此负荷波动率和故障率相对较高，分布式储能是提高其供电可靠性、改善电能质量、维持负荷平衡和保障应急供电等的必备关键技术，对于保障电网安全、提高可再生能源接入比例、提高能源利用效率、实现能源的可持续发展等均具有重大的战略意义。

分布式储能系统安装地点灵活，与集中式储能相比，减少了集中式储能电站的线路损耗和投资压力，但相对于大电网的传统运行模式，目前的分布式储能系统接入及出力具有分散布局、可控性差等特点。如何充分利用分布式储能的优点，使分布式储能更好地为电网服务，是分布式储能技术的重要研究内容之一。本书围绕分布式电池储能技术在电网中的应用问题进行介绍，具体包括分布式电池储能在电网中的优化配置、分布式电池储能系统的建模与仿真、分布式电池储能系统布点定容与协同控制以及分布式电池储能多目标调度策略等内容。内容新颖并紧扣工程实际，具有较高的理论和工程应用价值。

本书具有以下几个方面的鲜明特色：

（1）内容围绕分布式电池储能在电网中的应用进行介绍，其目的是通过分布式电池储能技术克服大规模分布式电源接入对电网造成的不利影响。内容紧扣当前研究热点和难点，具有一定的创新性。

（2）内容介绍了分布式电池储能在电网中的优化配置、分布式电池储能系统的建模与仿真、分布式电池储能系统布点定容与协同控制和分布式电池储能多目标调度策略等，内容概括了目前大规模分布式电源接入电网所带来的问题及解决方案，既突出重点，又照顾大局。

（3）内容既有大量的理论阐述，也有详细的建模分析和工程实例介绍，理论与工程应用相结合，便于读者迅速掌握分布式电池储能在电网中应用的相关知识。

本书共 6 章，第 1 章介绍了分布式储能的相关概念，国内外储能技术的有关

政策和发展现状。第 2 章主要介绍了电池储能技术的相关知识，重点介绍了锂离子电池技术、液流电池技术、全钒液流电池技术和钠电池技术。第 3 章介绍了分布式电池储能在电网中的优化配置，包括分布式电池储能在区域电网建设中的应用，分布式电池储能规划，分布式电池储能在区域电网中的配置和综合需求下的分布式电池储能优化配置等方面的内容。第 4 章介绍了分布式电池储能系统的建模与仿真，重点介绍了电池储能系统建模方法和电池储能系统的仿真元件模型，在此基础上，对含分布式电池储能的电网动态稳定性进行了仿真分析。第 5 章介绍了分布式电池储能系统布点定容与协同控制，主要包括分布式电池储能参与调峰的布点定容，分布式电池储能出力动态特性及协同控制，以及包含分布式电池储能的典型系统搭建等方面的内容，并对分布式电池储能参与调峰的布点定容进行了仿真分析。第 6 章介绍了分布式电池储能多目标调度策略，包括电池储能调度系统架构与信息交互机制，电池储能参与电网调频有功控制策略，以及广域分布式电池储能系统的协调调度策略，并对分布式电池储能多目标调度策略进行了计算分析。

本书由国网河南省电力公司电力科学研究院组织编写。饶宇飞同志担任主编，主要负责本书的策划、结构组织、内容安排，李朝晖和杨海晶同志担任副主编，负责全书的统稿工作。本书第 1 章由谷青发、滕卫军、周宁编写，第 2 章由高东学、宋宁希、张景超编写，第 3 章由于琳琳、鲁宗相、乔颖编写，第 4 章由王骅、王青、修晓青编写，第 5 章由李相俊、贾学翠、于昌海、滕贤亮编写，第 6 章由饶宇飞、李朝晖、杨海晶编写。本书编写过程中，国网河南省电力公司科技部给予了大力支持，多家储能电池厂商、变流器厂商及高等院校为资料收集提供了帮助，在此一并表示衷心的感谢！

限于编者水平，书中难免存在缺点和不足之处，恳请读者提出宝贵的意见和建议。

编　者

2019 年 6 月

目　　录

前言

第 1 章　概论 …… 1

1.1　分布式储能概念 …… 1

1.2　国内外储能相关政策 …… 2

1.2.1　国外储能发展政策 …… 2

1.2.2　中国储能发展政策 …… 3

1.3　国内外储能技术发展现状 …… 4

1.4　国内外储能技术应用案例 …… 6

1.4.1　国外储能技术应用案例 …… 6

1.4.2　国内储能技术应用案例 …… 9

第 2 章　电池储能技术 …… 13

2.1　锂离子电池技术 …… 13

2.1.1　锂离子电池发展历程 …… 13

2.1.2　锂离子电池工作原理 …… 14

2.1.3　锂离子电池关键材料 …… 16

2.1.4　锂离子电池的技术指标 …… 22

2.1.5　锂离子电池的应用 …… 25

2.1.6　锂离子电池的未来发展 …… 29

2.2　液流电池技术 …… 30

2.2.1　液流电池原理及发展历程 …… 30

2.2.2　液流电池的效率与影响因素 …… 33

2.2.3　液流电池的关键材料 …… 35

2.2.4　液流电池经济和技术指标及展望 …… 36

2.3　全钒液流电池技术 …… 37

2.3.1　全钒液流电池原理及发展历程 …… 37

2.3.2 全钒液流电池关键材料 …… 39
2.3.3 全钒液流电池应用 …… 40
2.4 钠电池技术 …… 42
2.4.1 钠电池原理及发展历程 …… 42
2.4.2 钠硫电池 …… 43
2.4.3 钠—空气电池 …… 44
2.4.4 钠离子电池 …… 45
第3章 分布式电池储能在电网中的优化配置 …… 47
3.1 分布式电池储能在区域电网建设中的应用 …… 47
3.1.1 多约束下的传统电网规划建设方法 …… 47
3.1.2 储能延缓电网建设的可行性分析 …… 51
3.1.3 储能延缓电网建设的容量分析 …… 53
3.2 分布式电池储能规划 …… 55
3.2.1 分布式电池储能系统布点与容量 …… 55
3.2.2 参与调峰的分布式电池储能选址定容 …… 55
3.3 分布式电池储能在区域电网中的配置 …… 56
3.3.1 区域负荷优化下的分布式电池储能配置 …… 56
3.3.2 提高新能源消纳的分布式电池储能配置 …… 58
3.3.3 辅助服务下的分布式电池储能配置 …… 59
3.4 综合需求下的分布式电池储能优化配置 …… 61
3.4.1 二次调频服务下的分布式电池储能配置 …… 61
3.4.2 考虑电网安全支撑的分布式电池储能配置 …… 64
第4章 分布式电池储能系统的建模与仿真 …… 67
4.1 电池储能系统建模方法 …… 67
4.1.1 常用建模方法简介 …… 67
4.1.2 电池储能系统输出特性影响因素分析 …… 68
4.2 电池储能系统的仿真元件模型 …… 69
4.2.1 电池储能系统模型 …… 69
4.2.2 电池储能系统的模型验证 …… 77
4.2.3 仿真模型与实际出力对比分析 …… 80
4.2.4 基于 DIgSILENT 的电池储能系统仿真模型 …… 84
4.3 含分布式电池储能的电网动态稳定仿真 …… 85

4.3.1 暂态稳定分析 …… 85
4.3.2 分布式储能高效聚合方法 …… 88
第5章 分布式电池储能系统布点定容与协同控制 …… 91
5.1 分布式电池储能参与调峰的布点定容 …… 91
5.1.1 布点定容数学模型 …… 91
5.1.2 电池储能系统参与调峰的选址定容优化求解 …… 95
5.2 算例分析 …… 98
5.2.1 参数设置 …… 98
5.2.2 仿真分析 …… 101
5.2.3 结论 …… 104
5.3 分布式电池储能出力动态特性及协同控制 …… 104
5.3.1 强直弱交格局电网安全稳定分析 …… 104
5.3.2 直流故障扰动下特高压联络线功率波动峰值变化机理 …… 106
5.3.3 不同直流故障下的联络线功率波动 …… 112
5.3.4 大区间振荡模式下联络线功率波动机制 …… 114
5.3.5 省间振荡模式对联络线功率波动影响机制 …… 115
5.4 分布式电池储能的典型系统搭建 …… 118
第6章 分布式电池储能多目标调度策略 …… 122
6.1 电池储能调度系统架构与信息交互机制 …… 122
6.1.1 系统架构 …… 122
6.1.2 典型运行方式 …… 123
6.1.3 储能调度系统主站层 …… 123
6.1.4 就地监控层 …… 128
6.1.5 系统通信 …… 128
6.2 电池储能参与电网调频有功控制策略 …… 129
6.2.1 电池储能调频特性分析 …… 129
6.2.2 考虑调频资源的协调控制策略 …… 130
6.2.3 电池储能参与电网调频有功功率控制策略 …… 132
6.2.4 计及电池储能支撑能力的时序调峰策略 …… 133
6.2.5 电池储能系统平抑新能源发电功率波动策略 …… 136
6.3 广域分布式电池储能系统的协调调度策略 …… 139
6.3.1 优化目标 …… 140

6.3.2 常规火电机组模型 …… 141
6.3.3 风电机组约束 …… 142
6.3.4 系统约束 …… 142
6.3.5 电池储能系统约束 …… 144
6.3.6 计算实例 …… 145

第1章　概　　论

我国能源生产和消费总量均已居世界前列，且持续增长；同时，我国已向国际社会庄严承诺，2020年非化石能源比重达到15%，单位GDP的CO_2排放量比2005年降低40%～45%。既保障经济快速发展中的能源安全，同时又兑现温室气体减排的国际承诺，是我国能源发展的重大战略任务。但我国在能源供给和利用上还存在结构不合理、利用效率低、可再生能源开发利用比例低、能源安全利用水平有待进一步提高等问题，发展“安全、高效、低碳”的能源技术势在必行。分布式电池储能可以从根本上解决分布式电源接入和负荷快速增长给电力系统的运行与规划带来的问题。

1.1　分布式储能概念

储能是指通过介质或设备把能量存储起来，需要时再释放出来的过程。储能是实现分布式可再生能源应用的重要技术。利用储能可以实现平滑可再生能源波动、跟踪调度输出、调峰调频等功能，使可再生能源发电稳定可控输出。储能是实现分布式可再生能源大规模接入电网的必然选择，同时也是智能微电网的重要技术之一。

分布式储能是指将储能装置根据环境等因素接入负荷或配电网端。智能微电网的规模比大电网小，因此负荷波动率和故障率相对较高，分布式储能是提高供电可靠性、改善电能质量、维持负荷平衡和保障应急供电等的必备关键技术，对于保障电网安全、提高可再生能源接入比例、提高能源利用效率、实现能源的可持续发展等均具有重大的战略意义。

分布式储能安装地点灵活，与集中式储能比较，减少了集中式储能电站的线路损耗和投资压力，但相对于大电网的传统运行模式，分布式储能具有分散布局、可控性差等特点。目前，分布式储能的应用场景主要集中于用户侧、分布式电源侧和配网侧三个方面。

1.2 国内外储能相关政策

1.2.1 国外储能发展政策

目前，在不同的国家分布式储能应用的重点各不相同，储能系统在国内的应用还处于“试点建设，应用探索”阶段。由于市场需求、成本及体制政策的限制，国内已建、在建或规划的多为示范工程。国外的储能产业由于相关政策较为完善，初步进入商业化应用和快速发展阶段。大规模储能技术在美国、日本、欧盟等发达国家和地区已上升到战略层面，在政府规划、技术创新、政策扶持等综合性措施激励下，国际储能技术和产业正在复制风能和太阳能的发展路径，将在近几年内实现大规模产业化，掀起新一轮全球性竞争。

美国在金融危机之后，已将大规模储能技术定位为振兴经济、实现能源新政、保障国家能源和资源安全的重要支撑性技术，从行政立法、技术革新、政策制定、市场准入等角度全方位地保障储能产业发展，并在电力基础设施建设中大范围示范推广。

美国能源部（Department of Energy，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与旗下先进能源研究计划署（Advanced Research Projects Agency-Energy，ARPA-E）持续投入了大量资金用于推进储能技术的开发和应用示范，使得美国储能技术开发走在了世界前列。另外，美国联邦能源管理委员会（Federal Energy Regulatory Commission，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FERC于2008年颁布的第719号法令和第755号法令，要求全国的独立系统运营商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。这一系列法令使得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需求技术。

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。为了促进以加州为中心的能源储存系统应用，加州专门立法-储能法案（AB2514），并且其公共事业委员会（California Public Utilities Commission，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1.325GW储能采购的目标。此外，非营利性的公共事业公司（包括能源服务供应商和社区电力合作社）需要采购年最大负荷1%的储能。同时，美国加州在2008年将储能纳入“自发电激励计划（Self-Generation Incentive Program，SGIP）”的资助范围，资助储能项目发展。

日本将储能定位为“弃核”后能源战略的保障技术，通过补贴方式推动储能市场应用。日本在福岛核泄漏事故后，将新能源和可再生能源作为保障能源安全的重要战略。为解决快速增长的新能源发电并网需求和灾害环境下的离网用电需求，储能的发展被提高到了国家战略层次。日本产经省先后出台了“革新的能源及环境战略”“电力事业主体进行可再生能源电力调节的特别措施法”等文件，明确了将要大力发展分布式及可再生能源发电，支持蓄电池、燃料电池等储能技术研发，并给予安装家用储能系统的住户、企业资金支持。2015年1月，将补助的范围扩展到工业和电网侧储能，并逐渐降低对新能源和可再生能源的补贴，转而提高对储能的补贴。

欧洲将储能技术作为能源领域的战略新兴产业进行支持。欧洲能源委员会指出“一部分传统火电厂将被分布式发电、可再生能源、需求管理系统及储能所代替，并在电网的近期、中期及长期的研究计划中，将能量储存和电能质量的保证放在重要研究地位。”一些欧洲国家已经开始把储能技术作为能源领域的战略新兴产业进行支持。欧盟电网近期发布了“欧洲储能创新图谱”报告，对欧洲14个国家的储能研究、开发与示范项目进行了统计分析。在过去5年，这些国家公共投资和受到欧盟委员会直接资助的项目总数达到391个，总投资额为9.86亿欧元。

1.2.2 中国储能发展政策

中国已从国家战略层面认识到储能的重要性，但尚无具体的政策，也没有在电网中大规模使用储能。我国正处在能源和经济发展转型的关键时期，可再生能源发电比重快速增加，但风能、太阳能等可再生能源大规模装机与并网对电网的可靠性、电网调峰、燃煤机组能效等方面影响日益凸显，使得电网中的弃风、弃光现象十分严重。在这种情况下，大规模储能技术及产业的发展已经引起了政府部门和相关科研人员的高度重视，尤其是近期各部委发布一系列规划、指导性文件给储能产业的发展起到了促进作用。

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、储能等配套能力，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列为九大重点创新领域。作为影响未来能源大格局的前沿技术，储能在我国正获得关注。

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。《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。《国家新型城镇化规划（2014—2020）》指出要推进新能源示范城市建设和智能微电网示范工程建设，发展智能电网，支持分布式能源的接入，以及居民和企业用电的智能管理，这些都将给储能带来发展机会。

中国分布式储能支持政策的制定要符合中国的国情，体现中国电力系统的特点和发展方向，还要结合中国储能技术研发和应用现状以及未来的发展趋势。综合储能政策的问题，大规模储能发展政策措施主要集中在建立主管职能部门、完善管理体制、出台激励政策3个方面。中国分布式储能政策的创新主要从宏观政策、电价机制、技术标准和推动示范与应用4个方面入手。

总体看，美国的储能政策较全面且具有连续性，电力市场化程度高，美国储能应用市场将可能最先爆发。日本和欧盟均已开始对储能系统的安装提供直接经济补贴，以刺激市场的启动。我国储能虽被国家作为战略性的发展方向，储能产业也得到了长足发展，但目前关于储能相关政策都是框架性、指导性文件，没有具体实施细则和补贴政策，所以市场驱动力略显不足，商业模式也尚待完善。

1.3 国内外储能技术发展现状

储能的技术类型有多种，适于可再生能源发电和智能微电网的电力储能技术，包括抽水蓄能、压缩空气储能、铅酸电池、锂离子电池、钠硫电池、液流电池、超级电容器、飞轮储能和超导储能等。近年来，随着可再生能源发电和智能电网技术及应用的快速发展，电力储能技术及其应用也得到了快速发展。就当前各类电力储能技术的发展水平而言，总体上讲，面临成本高和技术不够成熟两方面的问题。因此，除了抽水蓄能，其他电力储能技术还没有实现大规模应用。

在分布式可再生能源应用中，储热技术可以用于太阳能热储存、微型燃气轮机发电余热储存、电力调峰热储存等，通过储热实现能源的梯级利用，从而提高

能源利用效率。根据储热原理可以把储热技术分为显热储热、潜热储热和化学储热三大类。就现存的各种储能技术而言，每种储能技术都有它的优势和不足。近年来，世界各国都很重视对储能领域的投资，其中截至2014年底，全球储能项目累计装机规模为845.3MW，2014年新增装机111.6MW，年增长率15%，其中，中国储能累计装机规模达84.4MW，占全球储能装机的10%。

美国拥有全球近一半的储能示范项目，2013年投运了几个装机规模较大的项目，如AES（美国爱依斯电力公司）位于Dayton市的40MW调频项目、毛伊岛10MW风电场项目等，使其全球装机规模首次超越日本，位居第一。欧洲近几年计划大力推动可再生能源发电，德国、英国、法国、西班牙等国相继在2013年开展了若干项目，涉及输配、智能城市、海岛微电网等领域，特别是德国目前已有30MW的储能项目获得补贴。日本储能项目装机容量仅次于美国，仅NGK公司的装机量就超过了300MW。

中国储能项目近两年发展较快，分别在可再生能源并网、微电网及分布式发电、电动汽车等领域部署了一些储能项目。从应用上看，按装机容量分，储能在可再生能源并网领域的比例最高，占51%；电力输配、微电网及分布式发电和辅助服务也是应用的重点领域，分别占19%、8%和16%。随着越来越多的示范项目已在中国运行，预计到2020年，中国储能市场规模将达到约136.97GW，占2020年全国发电总装机量1800GW的7.6%。储能技术在分布式可再生能源接入与智能电网技术等领域的大规模应用仍存在诸多挑战。

目前，一些影响储能技术规模化应用的重大技术瓶颈还有待解决。抽水蓄能技术进一步的攻关重点在于大型抽水蓄能电站选址技术，高坝工程技术，高水头大容量水泵水轮机技术，新型发电机技术，智能调度与运行控制技术等。压缩空气储能技术的进一步攻关重点在于高温储热技术、新一代液化空气储能技术、超临界压缩空气储能技术等。飞轮储能的技术攻关重点在于高强度复合材料技术、高速低损耗轴承技术、高速高效发电/电动机技术、飞轮储能并网功率调节技术和真空技术等。

化学电池储能中关键材料制备与批量化和规模化需进一步取得突破，包括电解液、离子交换膜、电极、模块封装、密封等。超级电容器高性能材料和大功率模块化技术以及超导储能中新型超导材料、液氮与200K温区超导材料技术、超导限流—储能系统等装备技术均尚需进一步突破。储热技术中低品位热能的储存和利用比较成熟，如储热供暖、热水供应以及冰储制冷等，高品位储热以及高效余热回收利用是今后的发展方向。其中高温储热技术和深冷储冷技术在可再生能

源发电和节能中具有巨大应用需求，目前这些技术还存在储热材料与储热器的相容性问题、储热器的优化传热问题、成本及安全性问题等。研究开发新型宽温域储热材料、新型高效储热装置和储热系统的优化配置与管理是解决这些问题的关键。

1.4 国内外储能技术应用案例

1.4.1 国外储能技术应用案例

国外储能技术的应用主要是结合分布式发电技术和微电网技术来开展的，在进行国外储能技术应用案例分析时，将会对相关的分布式发电技术和微电网技术进行介绍，从而便于读者从整体结构上了解国外储能技术的应用案例。

1. 美国储能技术应用案例

美国分布式能源发电技术和微电网技术的相关研究工作，主要是由美国电力可靠性技术协会（Consortium for Electric Reliability Technology Solutions，CERTS）来进行指导的。由于 CERTS 具有先进的技术水平，CERTS 除了为美国分布式能源发电和微电网提供相关技术指导之外，也引领着世界分布式能源发电技术和微电网技术的发展。

为推动微电网技术的工业化应用，在 CERTS 的微电网方案的基础上，由美国电力公司（American Electric Power，AEP）出资，CERTS 在俄亥俄州首府哥伦布的 Dolan 技术中心建立了微电网技术应用示范平台。整个示范工程包含三条馈线，其中馈线 C 为常规线路，直接与负荷相连；馈线 B 包含一台 60kW 的燃气轮机、电池储能系统及可控负荷；馈线 A 包含两台 60kW 的燃气轮机、电池储能系统及负荷。该平台为分布式电源接入电网运行及对敏感负荷高质量供电问题的研究提供了支撑。整个微电网系统结构如图 1-1 所示。

作为美国清洁能源研究的重要部门，美国国家可再生能源实验室（National Renewable Energy Laboratory，NREL）也对分布式能源发电技术和微电网技术进行了深入研究。NREL 实验室构建了一个包含电网模拟器、光伏、风机、微型燃气轮机、蓄电池储能等设备在内的微电网系统。其中，200kW 的电网模拟器可实现电压 0～480V，频率 0～400Hz 的交流电网模拟；交流母线允许多达 15 台清洁能源发电设备同时并入；系统有一电压范围为 0～600V 的直流母线，可允许同时接入 10 台直流清洁能源设备。NREL 构建的微电网系统能够允许三套独

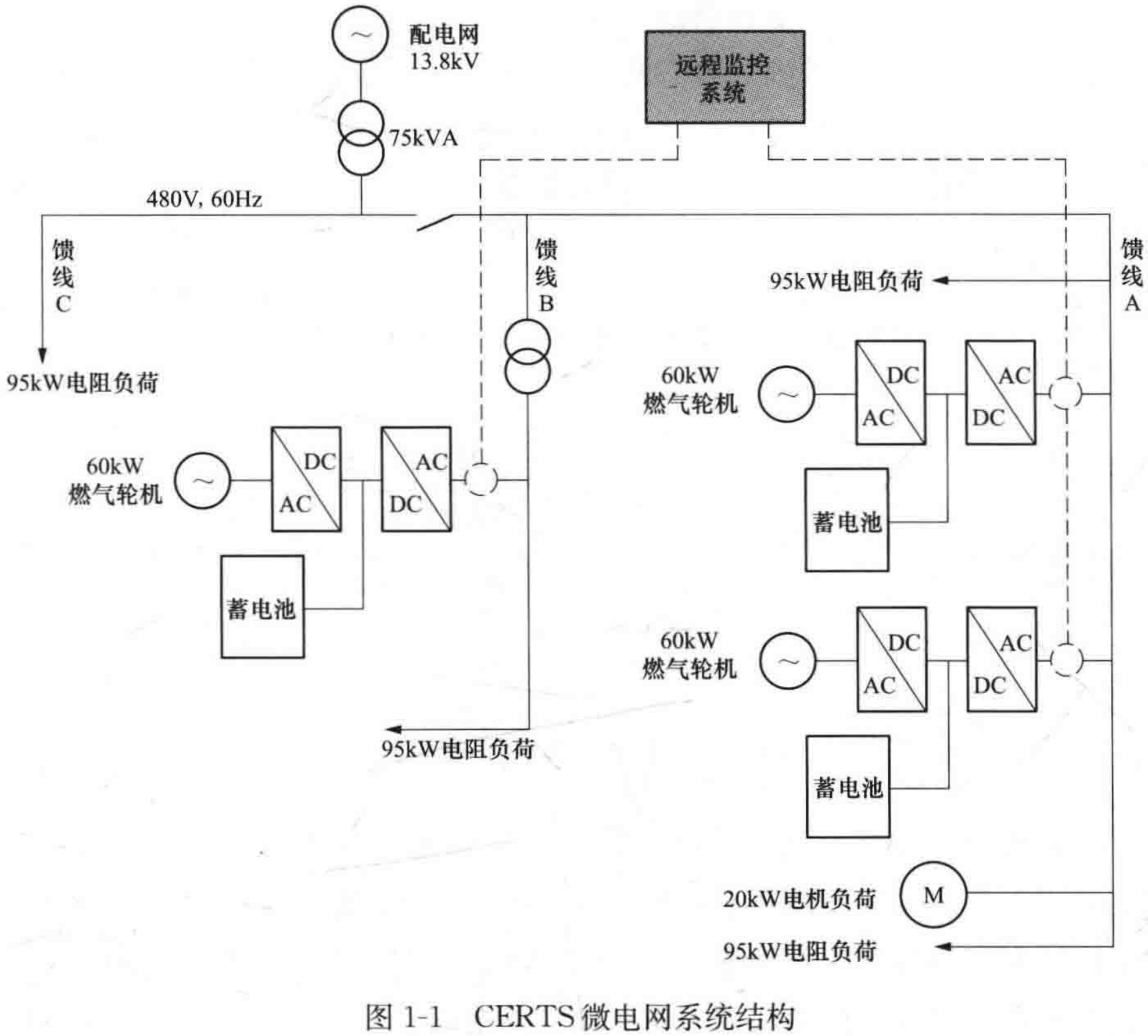


图 1-1 CERTS 微电网系统结构

立系统同时运行，相关研究人员可以进行分布式发电系统和微电网系统的可靠性测试和技术研究。

NREL 构建的微电网系统结构如图 1-2 所示。

2. 欧洲储能技术应用案例

与美国储能技术应用现状相似，欧洲在储能技术应用研究时也将储能技术与分布式能源发电技术和微电网技术相结合，从而提高分布式能源发电和微电网系统的稳定性。为此，欧盟提出了以“能源、环境和可持续发展”为指导思想的欧盟第五研究框架（1998—2002）、第六研究框架（2002—2006）和第七研究框架（2007—2013），分别资助“微网：大规模分布式电源接入低压电网研究”和“多微网结构与控制”项目，以减少可再生能源发电对电网安全稳定运行的影响。

为了提高分布式能源的接入比例，雅典国立大学建立了 NTUA（National Technical University of Athens）微电网系统，该微电网为单相 230V、50Hz 系