

大规模储能技术

李建林、惠东、靳文涛 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



大规模储能技术

李建林 惠 东 靳文涛
田立亭 孙 威 修晓青 编著
马会萌 谢志佳 张克军

机械工业出版社

本书基于国内新能源发展状况,提出储能技术的应用需求;依托国内典型示范案例,介绍当前储能的应用情况;依据产业链环节划分,解析储能技术发展趋势及市场应用潜力;通过介绍储能技术类企业的核心竞争力以及能源类企业的行业发展动向,阐述储能技术实际应用能力与发展规模;根据相关政策、改革方向的全面剖析,揭示储能技术发展的趋势。本书主要读者为新能源政策的决策人、企事业单位的科技工作者,高校教师、博士和硕士研究生。

图书在版编目(CIP)数据

大规模储能技术 / 李建林等编著. —北京: 机械工业出版社, 2016.7
ISBN 978-7-111-54113-4

I. ①大… II. ①李… III. ①储能—技术 IV. ①TK02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 146826 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: 朱 历 责任编辑: 陈大立

封面设计: 付海明 责任印制: 陈大立 责任校对: 胡 颖

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·16 印张·348 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-54113-4

定价: 48.00 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

大规模储能技术在电力系统发-输-配-用各个环节均有广泛用途，备受国内外业界人士高度关注，“十三五”开局之年，国家利好政策频出，除《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》外，国家发改委、能源局也陆续颁布了《电能参与“三北”地区电网调峰辅助服务的通知》、《能源技术创新行动计划（2016—2030年）》、《关于在能源领域积极推广政府和社会资本合作模式的通知》等系列政策，极大地激励了我国储能产业化发展，百MW级储能电站已经上升到国家战略层面。

国家科技部针对储能研究的部署，主要类型的物理、化学储能技术获得了迅速发展。MW级化学储能技术已进行了多种示范运行，其中锂离子电池、铅酸电池在我国已开始商业化运行。继张北风光储输示范工程之后，陆续涌现出了一批有代表性的示范电站，辽宁卧牛石5MW级储能电站、甘肃酒泉MW级储能电站、青海15MW光储一体化电站等十余个储能电站；深圳宝清MW级储能电站、欣旺达居民园区MW级移动式储能系统在用户侧方面得到了示范应用。当前储能技术正逐步从试验示范迈向商业化推广，大规模储能系统的支撑，需重点突破高安全、低成本、长寿命、高能量转换效率的大规模储能装备等关键技术。

本书基于国内新能源发展状况，提出储能技术的应用需求；依托国内典型示范案例，介绍当前储能的应用情况；依据产业链环节划分，解析储能技术发展趋势及市场应用潜力；通过介绍储能技术类企业的核心竞争能力以及能源类企业的行业发展动向，阐述储能技术实际应用能力与发展规模；根据相关政策、改革方向的全面剖析，揭示储能技术发展的趋势。

本书共分为7章。第1章针对国内新能源发展概况和面临的主要问题，并结合我国电网在能源革命中面临的挑战，针对当前大规模集中式可再生能源的送出和消纳以及分布式可再生能源发电接入等问题分析新能源发电发展对大规模储能的应用需求。

第2章介绍了应用于大规模储能系统的几种典型储能电池，对其工作原理、主要技术、性能指标和应用范围及优缺点等进行介绍。

近年来国内外开展了多种新型储能技术的研究探索，并建成了多项大规模储能示范工程，第3章分析了国内外大规模储能及其示范项目的发展现状，从技术分类、储能类型、地域分布、应用领域等方面介绍了规模化电池储能系统的应用现状，在列举国内外典型的储能示范电站的基础上从4个不同应用领域选取国内典型储能电站进行了着重介绍。通过介绍多项储能示范电站的运营模式、所选储能技术类型、技术规格及运营效果等工程问题，以期对储能示范电站的应用模式有一个较为清晰的认识。

第4章对储能电池的产业状况进行分析。通过分析储能技术的前沿发展,以锂离子电池为例,介绍了我国锂离子电池的产业现状和其产业链。并结合当前大规模储能系统的应用,从主流电池制造、储能PCS、BMS等储能关键技术着手分析,并对主流厂商进行对比,进而分析储能电池的技术路线和发展趋势。

第5章分析国内电力储能市场,并对国内外相关的储能市场发展政策进行解读,阐述储能产业在能源互联网和电力体制改革中的新契机,分析现阶段制约储能发展的因素,指出储能技术的市场化前景和储能市场化发展路线。

第6章从储能相关的关键技术出发,基于风电、光伏等新能源有功功率存在较大的随机性,直接并入电网对电网有诸多不利影响。该章节从实际风电有功数据开始分析,对新能源功率数据进行预处理,通过数据挖掘对新能源功率数据粒度、跨度的合理选取提供理论依据,并对电池储能系统在新能源并网、电动汽车动力电池的梯次利用、电池储能系统参与电力系统辅助服务等领域的典型应用进行理论分析。

第7章在上述研究分析的基础上,结合当前新能源、煤化工、电气化交通等领域发展需求,从储能应用环节,提出相关建议项目,并对各项目进行详细阐述。

本书得到了科技部863项目(2014AA052004)、国家电网公司软科学项目(WBS:8142DG160001)、国家电网公司科技项目(DG71-15-039)、国家自然科学基金项目(51277157)资助,深表谢意。同时,感谢山西省科技厅、欣旺达电子股份有限公司相关同志的积极参与和配合。在本书编辑过程,中国电力科学研究院的徐少华、房凯、李蓓以及欣旺达电子股份有限公司的李颖、何志超等同志付出了辛勤劳动,参与了部分文字校对、版式画图、章节内容审核等工作,在此一并表示感谢。

本书行将面世,著书之初衷是否果如所求,有待通过实践验证。限于编委会成员水平,书中疏漏与谬误之处在所难免,尚祈读者不吝赐教。

目 录

前言	
第 1 章 新能源发展面临的主要问题及储能应用需求	1
1.1 国内新能源发展概况及问题	1
1.2 我国电网在能源革命中面临的挑战	3
1.2.1 大规模集中式可再生能源发电的送出和消纳	4
1.2.2 大量分布式可再生能源发电的接入	4
1.3 新能源发电发展对储能的应用需求	5
1.3.1 支撑大规模集中式可再生能源发电送出与消纳	5
1.3.2 促进分布式可再生能源发电灵活接入和高效利用	6
第 2 章 典型储能技术介绍	8
2.1 抽水蓄能	8
2.2 电化学储能	10
2.2.1 高温钠系电池	10
2.2.2 液流电池	12
2.2.3 铅炭电池	13
2.2.4 锂离子电池	15
2.3 压缩空气储能	17
2.4 储热	19
2.5 氢储能	22
2.6 飞轮和超级电容器储能	25
第 3 章 国内外储能项目概况及典型工程案例分析	27
3.1 国内外储能项目概况	27
3.1.1 全球储能项目现状	27
3.1.2 我国储能项目现状	33
3.1.3 分布式可再生能源中储能的应用	34
3.2 典型储能示范工程介绍	39
3.2.1 新能源发电应用领域	40
3.2.2 输配电及用户侧应用领域	45
3.2.3 分布式电源及微电网应用领域	47
3.2.4 电力辅助服务应用领域	53

第 4 章 储能电池产业分析	60
4.1 新能源储能电池技术发展	60
4.1.1 储能技术的前沿发展	60
4.1.2 我国锂离子电池产业概述	63
4.1.3 我国锂离子电池产业链现状	65
4.1.4 主流储能电池制造企业介绍	68
4.2 新能源储能变流器技术发展	70
4.2.1 电池储能系统 PCS 拓扑结构分析	70
4.2.2 主流 PCS 厂商介绍	77
4.3 新能源储能电池管理系统	82
4.3.1 大容量储能 BMS 发展现状	82
4.3.2 BMS 的基本功能及组成	83
4.3.3 BMS 的应用	84
4.3.4 主流电池厂商介绍	89
4.4 储能电池技术路线及趋势	91
第 5 章 电力储能市场及相关政策分析	93
5.1 国内电力储能市场分析	93
5.2 国际储能产业政策解读	95
5.3 国内储能市场化发展相关政策	99
5.3.1 分布式光伏发电相关政策	99
5.3.2 电动汽车产业促进政策	100
5.3.3 电力需求侧管理相关政策	101
5.3.4 “十三五”储能技术发展规划	102
5.3.5 储能产业政策总结	103
5.4 储能产业在能源互联网和电力体制改革中的新契机	104
5.4.1 能源互联网背景下的电力储能技术展望	105
5.4.2 电力体制改革与储能产业发展前景	113
5.5 未来国内储能应用趋势及市场分析	115
5.6 储能市场化发展路线	116
第 6 章 储能关键技术应用	118
6.1 新能源功率数据预处理	118
6.1.1 双向补齐	118
6.1.2 变权重补齐	119
6.2 新能源数据采集粒度标定	121

6.2.1	持续变动状态识别算法	122
6.2.2	功率持续变动三角形	123
6.2.3	灰色关联决策	124
6.2.4	小结	125
6.3	新能源数据挖掘中的跨度选取	125
6.3.1	出力数据自相关分析	125
6.3.2	光伏电站出力数据的相似日聚类	126
6.3.3	基于最适样本容量估计的跨度确定	128
6.4	储能系统的典型应用	130
6.4.1	储能系统在智能电网中的应用	130
6.4.2	储能系统在不同电压等级配电网中的应用	131
6.4.3	储能系统应用于平抑光伏电站的出力波动	134
6.4.4	储能系统应用于提高光伏电站的调度能力	143
6.4.5	储能系统应用于增强光伏电站无功支撑能力	152
6.4.6	储能系统应用于延缓输电走廊扩容	157
6.4.7	辅助风电功率部分“削峰填谷”控制	173
6.5	计及政策激励的退役动力电池储能系统梯次应用	180
6.5.1	动力电池梯次利用研究现状	180
6.5.2	退役动力电池梯次利用流程与成本	182
6.5.3	退役动力电池梯次利用的经济性	184
6.5.4	退役动力电池储能系统算例分析	185
6.5.5	政策激励下退役动力电池在用户侧梯次利用分析	186
6.5.6	小结	188
6.6	储能系统参与辅助服务	188
6.6.1	辅助服务的定义及分类	188
6.6.2	储能系统参与电网 AGC 调频	190
6.6.3	参与黑启动	197
第 7 章	储能产业化关键技术及项目建议	202
7.1	储能产业化关键要素	202
7.2	储能产业化关键项目	203
7.2.1	基础前瞻类	203
7.2.2	应用开发类	216
7.2.3	新能源电动汽车类	222
7.2.4	关键技术及工程示范	228
	参考文献	241

第 1 章 新能源发展面临的主要问题 及储能应用需求

我国新能源种类主要有：太阳能、风能、生物质能、核能、地热能和潮汐能。新能源主要利用方式是发电。电力是重要的能源载体，在国民经济发展中扮演着核心角色。进入 21 世纪以来，风电和太阳能发电已经进入大规模开发利用的新阶段。

1.1 国内新能源发展概况及问题

至 2014 年底，我国电力总装机容量达 13.6 亿 kW，居世界第一位。我国电力能源结构如图 1-1 所示，其中火电装机容量为 9.16 亿 kW（煤电 82 524 万 kW，气电 5 569 万 kW），占比 67%。

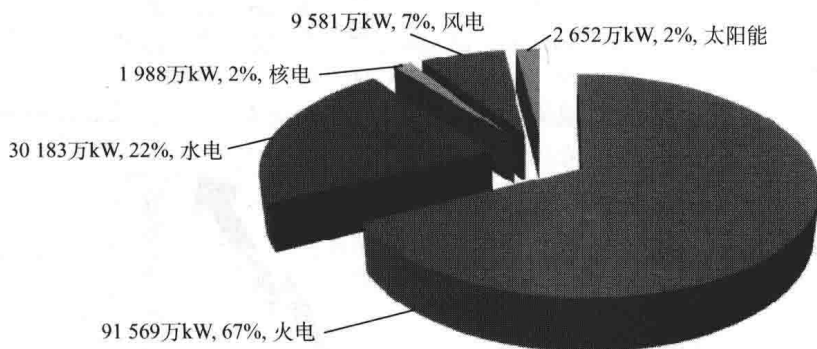


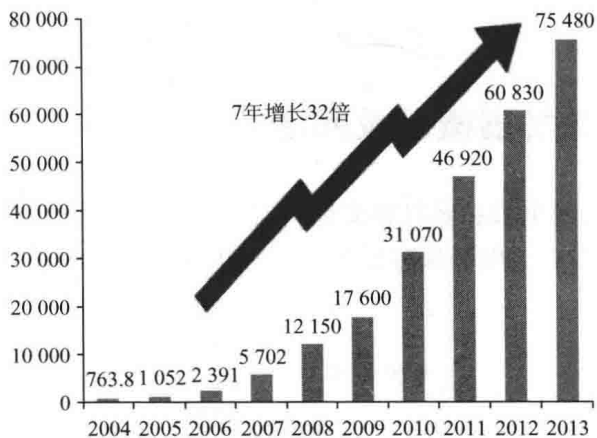
图 1-1 我国电力能源结构（至 2014 年底）

我国是全球新能源并网规模最大、发展最快的国家。至 2014 年底，我国风电并网容量达 9 581 万 kW，太阳能并网容量达 2 652 万 kW，新能源装机超过 1.2 亿 kW，占全国总装机的 9%。2014 年风电发电量为 1 563 亿 kW·h，已达到中等发达省份的用电量水平。如图 1-2 所示，在过去几年里，我国的风电和光伏发电得到了迅猛的发展。

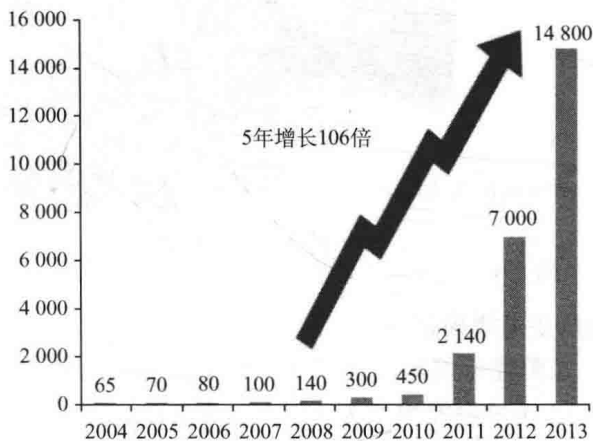
根据规划，到 2020 年，风电、光伏发电装机规划容量将分别达到 2 亿 kW 和 1 亿 kW；到 2050 年，新能源发电并网装机容量将达到 20 亿 kW 以上，将成为中国第二大主力电源。

我国经济发展情况与一次能源呈现逆向分布格局。煤炭资源主要集中在华北、西北地区，其中华北地区占 48.9%，西北地区占 30.0%，其他地区占 21.1%；水能资源主要集中在西部的云、贵、川、渝及藏地区，占全国的 66.7%；90%的石油资源分布在西北、华北、东北地区和海洋大陆架；天然气资源主要分布在四川、西北和海洋大陆架地区；陆上风能资源 90%以上分布在“三北”地区（东北、西北、华北北部），在我国

规划建设八个千万千瓦级风电基地中，除江苏、山东外，其他六个都分布在“三北”地区；太阳能资源集中在西藏、青海、新疆、甘肃及宁夏等省、自治区。从经济发展情况看，东部沿海的辽、京、津、冀、鲁、苏、浙、沪、粤、闽及琼等11个省市、自治区经济相对比较发达，且人口集中，GDP、人口和用电量分别占全国的58%、38%和55%；但这些地区能源资源十分贫乏，水能资源比重不到8%，煤炭资源比重只有10%左右，同时东部地区存在土地资源紧缺，环保空间小，大规模建设火电厂困难较大等问题。



a) 我国风电并网容量 (单位: 万 kW)



b) 我国光伏发电并网容量 (单位: 万 kW)

图 1-2 我国新能源发电发展过程

我国各省份电力需求水平与其经济总量水平相一致，即经济总量越高的省份，其电力需求也相对较高，图 1-3 为 2014 年各省、自治区的用电量。我国负荷中心与经济中心的分布基本吻合，主要分布在华北、华东以及南方地区。

新能源比重大的丹麦、德国、美国和西班牙等国家，其新能源主要以分布式或分散式接入电网，集中式大规模接入情况较为少见。由于风光资源和电力负荷的分布情况，我国风能发电以大规模集中开发远距离送出为主要利用形式，光伏发电存在大规模

模开发和分布式利用并举的状况。我国已规划八个千万千瓦级风电基地。

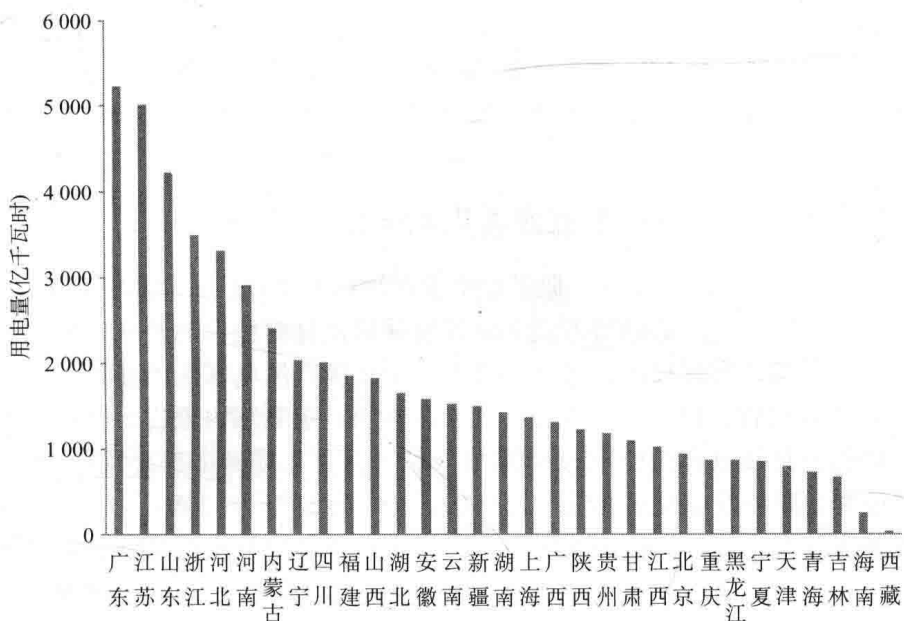


图 1-3 2014 年各省、自治区用电量

由于风能、太阳能资源的波动性和间歇性，以及新能源发电装备中电力电子元件的弱电网适应性，新能源安全稳定运行和有效消纳问题非常突出：一是新能源大规模脱网事故频发，仅 2011 年就发生 50 万 kW 以上风电脱网事故 8 起，风电机组脱网 3 800 余次，损失电力 487 万 kW；脱网事故造成电网有功功率缺额，引发系统频率降低，危及电网运行安全；二是弃风/弃光现象严重，2012 年和 2013 年全国弃风电量分别达到 208 亿 kW·h 和 162 亿 kW·h，约占当年风电总发电量的 20%和 10%，个别省区的风电平均利用小时数一度降低到 1 400 h，与设计值 2 100 h 相差巨大。在同等资源条件下，我国风电利用小时数远低于欧美国家。在弃风严重区域，由于无法保证风电项目投运后的经济性，已有超过 4 000 万 kW 具备建设条件的风电延缓建设。新能源并网安全和有效消纳已成为制约我国新能源可持续发展的主要瓶颈。

1.2 我国电网在能源革命中面临的挑战

长期依赖化石能源带来的能源安全、环境保护和气候变化已成为全球化问题。为了应对这些危机，新一轮以电为中心，以新能源大规模开发利用为特征的能源变革正在世界范围内蓬勃兴起。

2005 年以来，我国以风能和太阳能为主的可再生能源发电得到迅速发展。至 2015 年底，我国风电累计装机容量达 1.45 亿 kW，光伏累计装机容量达到 4 318 万 kW。大规模及分布式可再生能源的开发和利用促进了我国电力生产和消费方式的变革。未来的智能电网，是网架坚强、广泛互联、高度智能和开放互动的“能源互联网”。智能电

网与新能源技术、智能技术、信息技术和网络技术的全面融合，推动着“第三次产业革命”的到来。

随着可再生能源发电比例的不断提高，我国电网正面临诸多挑战。电网应积极应对可再生能源发电带来的挑战，对其开发和利用进行强有力的支撑，承载“第三次工业革命”。

1.2.1 大规模集中式可再生能源发电的送出和消纳

我国风能和太阳能资源丰富，但多集中于西部和北部地区，远离中东部负荷中心。在我国风电以大规模能源基地的方式集中开发并网，目前已启动了甘肃酒泉、新疆哈密、内蒙古东西部、吉林和江苏等多个“千万千瓦级”风电基地的建设；光伏累计装机容量排名前5位的省、自治区为青海、甘肃、新疆、宁夏和内蒙古，其中青海光伏累计装机容量约占总装机容量的20%。按照我国“可再生能源中长期发展规划”，2020年我国风能和太阳能发电装机将分别达到2亿kW和5000万kW。

我国新能源富集地区本地消纳能力有限，大规模集中开发的风能、太阳能发电需要输送到区域电网甚至跨区域电网进行消纳。可再生能源发电的送出问题已成为制约其发展的主要因素之一。由于当地电网的调峰能力严重匮乏，可再生能源开发与电网消纳能力的矛盾日益突出，加之输送通道建设滞后影响，一些地区的弃风率已超出20%。按照国家电网公司规划，将通过以特高压电网为骨干网架的坚强智能电网，向东中部负荷中心地区大规模、远距离输电，在全国范围实现可再生能源发电资源的共享。

依据我国风能、太阳能资源的特性，风电场的利用小时数为2000~3000h，光伏电站的利用小时数为1200~2000h。单纯输送可再生能源发电，难以保障特高压输电线路的利用率和经济性。目前通过可再生能源发电同传统电源打捆的方式改善可再生能源发电输出特性，提高输电通道的利用率。如在建的新疆哈密—郑州±800kV高压直流输电工程确定了“主送风电、火电调峰”的组合方式。该种利用火电、水电等传统电源调节能力进行综合互补的方式，某种程度上损失了传统电源的利用小时数，而且传统电源的调峰能力在一定条件下（冬季供热或汛期）受到限制，难以保障可再生能源的送出，这种方式只能缓解可再生能源的送出和消纳问题。另外，为可再生能源发电配套火电等电源，削弱了利用可再生能源发电减少环境影响的作用。电网需要更加清洁和灵活有效的方法，以促进大规模可再生能源的送出与消纳。

1.2.2 大量分布式可再生能源发电的接入

我国可再生能源发电呈现大规模、远距离、高电压和集中接入特点的同时，分布式发电，尤其是分布式光伏发电近年来得到了大的发展。2015年我国新增太阳能光伏发电1374万kW，其中分布式光伏新增208万kW。

分布式电源的接入使配电网变成有源电网，对配电网规划、并网管理、运行和经营服务等提出了很大的挑战。需要建设技术领先，结构优化，布局合理，高效灵活，

具备故障自愈能力的智能配电网，适应分布式电源和微电网加快发展的需要。

分布式电源的接入，使用户具备了供电者和消费者的双重角色，用户的冗余电力将出售给电网，用户侧分布式电源经聚合后还可参与电网的运行调度。电能的自由流动需要在用户和电网之间建立双向的信息互动平台、智能化的管理平台、灵活的电价机制和有效的激励措施。

分布式电源的接入还促进了电能与其他能源进行融合和转换，以实现多种能源的互补和高效利用。电力、天然气、热能、氢能和生物质能等多种一次和二次能源将在用户侧得到综合利用，联合提供用户所需的终端用能服务。智能电网需要同互联网、物联网进行深度融合，构建“能源互联网”，为用户提供社会公共服务及能源共享的平台。

1.3 新能源发电发展对储能的应用需求

对于火电、水电和核电等传统发电过程而言，虽然电能难以大规模储存，但一次能源是可以储存的，因而电能的输出是可控的。以风电和太阳能发电为代表的新能源发电与传统发电的本质差异在于，一次能源即风能、太阳能是不可储存的，其发电功率输出只能是在一次能源约束下的可控。而一次能源风能、太阳能的随机波动性决定了风电、太阳能发电的随机波动性，当大规模新能源电力接入电网以后，电力系统需要在随机波动的负荷需求与随机波动的电源之间，实现能量的供需平衡，这样将使电力系统结构、运行控制方式发生根本性变革。高比例新能源发电电力系统的基本特征是，必须具备同时响应负荷侧和电源侧功率随机波动的能力，以保证电力系统的能量供需平衡与运行稳定。大规模新能源电力安全高效利用可从电源、电网与负荷三个方面入手解决。2015年4月，国家电网公司发布了《国家电网公司促进新能源发展白皮书》，响应新一轮电改。白皮书指出，2015—2020年，电源侧、负荷侧和电网侧对全国新增风电装机消纳的贡献度将分别为15%、52%和33%。

储能技术在增强电源的灵活调节能力，提高电网的安全稳定和可靠性，提高负荷的可控性方面都具有显著的作用。储能技术是高比例新能源发电的必要支撑技术，其改变现有电力系统供需瞬时平衡的传统模式，在大规模新能源发电的利用中将发挥重要作用。

1.3.1 支撑大规模集中式可再生能源发电送出与消纳

面对大规模可再生能源发电的远距离送出和消纳问题，电网公司一方面通过加强网架结构，改善调控手段等方式促进可再生能源的利用；另一方面期望可再生能源发电具备或接近常规电源的特性，使其成为可调度，可预测，可控制的电源。

首先电网需要从规划运行层面，统筹各类资源的特性，增强协调调度能力，实现电力供给和需求的平衡，并全面保障系统的安全稳定运行。随着可再生能源发电比例的提高，电网的可调度资源相对减少。借助储能可大大提高电力系统的灵活性，为可

再生能源发电的送出和消纳提供以下支持。

(1) 在电网规划层面, 利用储能技术的灵活性实现可再生能源发电、本地消纳和外送走廊的协调。

(2) 通过多点布局储能和多类型储能的协调配合, 满足电网的暂态及静态运行约束, 提高电网对可再生能源发电的接纳能力。

(3) 降低可再生能源发电输出的变化范围, 提高输电走廊的利用率。

(4) 参与系统 AGC, 减少电网调峰调频压力, 促进对可再生能源发电的消纳。

(5) 阻尼系统振荡、参与电压控制, 提高互联电网的稳定性。

其次, 储能可以从发电侧改善可再生能源发电的输出特性, 减少其不确定性, 并向常规电源的特性靠近。在可再生能源发电侧配置储能可以起到以下作用:

(1) 平滑间歇式波动电源的输出功率, 降低间歇电源出力波动对电能质量的影响。

(2) 跟踪计划发电, 使间歇式电源发电场可以作为系统中的可调度电源。

(3) 在风电、光伏等间歇式电源发电输出功率受限条件下吸收多余风电或光伏能量, 减少弃风、弃光, 提高间歇式电源利用小时数。

(4) 为可再生能源发电机组提供暂态功率支持, 提高其故障穿越能力。

1.3.2 促进分布式可再生能源发电灵活接入和高效利用

应对大量分布式电源接入带来的配电网运行管理问题、用户互动需求以及多能源的互补高效利用, 需要灵活高效的设备, 增强配电网的管理能力, 使电力供应变得灵活, 并满足用户对电能的个性化和互动化需求。储能可为分布式电源接入提供重要的支持:

(1) 抑制分布式电源的功率波动, 减少分布式电源对用户电能质量的影响。

(2) 为未来可能出现的直流配电网及直流用电设备的应用提供支持。

(3) 增强配电网潮流、电压控制及自恢复能力, 促进配电网对分布式发电的接纳。

(4) 提供时空功率和能量调节能力, 提高配电设施利用效率, 优化资源配置。

微电网能够实现自我控制、保护和管理, 是分布式电源接入和利用的重要形式。

储能是微电网中的必要元件, 在微电网的运行管理中发挥重要作用:

(1) 实现微电网与电网联络线功率控制, 满足电网的管理要求。

(2) 作为主电源, 维持微电网离网运行时电压和频率的稳定。

(3) 为微电网提供快速的功率支持, 实现微电网并网和离网运行模式的灵活切换。

(4) 参与微电网能量优化管理, 兼顾不同类型分布式电源及负荷的输出特性, 实现微电网经济高效运行。

分布式电源的接入还促进了电能与其他能源进行融合和转换, 以实现多种能源的互补和高效利用。电力、天然气、热能、氢能和生物质能等多种一次和二次能源将在用户侧得到综合利用, 联合提供用户所需的终端用能服务。在多能源互补和综合利用中, 多种形式的储能为各类型能源的灵活转换提供了媒介, 如相变储能、热储能、冷热电联供系统中的应用。电动汽车的推广应用, 也将电网和交通网紧密联系在一起,

电动汽车可视为移动分布的储能单元在电网中发挥重要作用。

目前,用于大规模可再生能源并网消纳及分布式能源发展的储能技术,主要包括物理储能技术,如抽水蓄能、压缩空气、飞轮储能和超导磁存储;化学储能技术,如钠硫电池、锂离子电池、铅酸电池和液流电池等。实际上,单一储能技术无法完全适应电力系统的全部需求。在上述应用中,对储能的技术需求主要体现在功率等级、作用时间和响应速度等方面的差异。依据储能在电力系统作用时间尺度,将储能划分为三个时间尺度的应用,见表1-1。

电力系统中储能技术的分类及选择应结合电力系统的需求及储能本身的技术特性,找出契合点,明确不同储能本体技术的应用空间。针对储能在的功率等级和作用时间是储能基本技术特征的体现;储能的作用时间是不同于电力系统传统即发即用设备的最主要标志,是储能技术价值最重要的体现。

表1-1 储能在电力系统作用时间尺度的划分

时间尺度	应用场景	运行特点	对储能的技术要求	重点关注的储能类型
分钟级以下	辅助一次调频、提供系统阻尼和电能质量	动作周期随机 ms级响应速度 大功率充放电	高功率 高响应速度 高存储/循环寿命 高功率密度及紧凑型的设备形态	超级电容器 超导磁储能 飞轮储能
分钟至小时级	平滑可再生能源发电、跟踪计划出力、二次调频和提高输配电设施利用率	充放电转换频繁 s级响应速度 可观的能量	高安全性 一定的规模(MW/MW·h以上) 高循环寿命(万次以上) 便于集成的设备形态	电化学储能
小时级以上	削峰填谷、负荷调节	大规模能量吞吐	高安全性 大规模(100 MW/100 MW·h以上) 深充深放(循环寿命5 000次以上) 资源和环境友好 成本低	抽水蓄能 压缩空气 储氢 储热

在新能源电力系统中,要求储能技术要同时具有大容量储能能力和快响应能力,从当前储能技术发展情况来看,一种储能技术很难同时满足这两种需求,需要同时采用多种储能技术,配置多元的储能电源,彼此间协调控制、综合规划,最大限度发挥储能电源的效用。因此,如何合理地建立各种储能电源的运行模型,如何优化地整合利用现有各种储能技术及提出更为先进的储能新方法,使含高比例风电的电力系统能够稳定、高效地运行,是有待深入研究的课题。

第2章 典型储能技术介绍

随着我国国民经济的快速发展，储能技术的应用范围还在拓广、拓宽，研究储能技术与产业在我国的发展现状，适时解决发展中存在的问题，并把握产业未来发展方向和趋势，对于推动我国能源、交通和机械等行业整体发展，有十分重要的意义。近年来，随着政策和市场对储能及相关产业关注度的加强，各种储能技术在我国得到了不同程度的发展。

储能技术按照原理可分为三大类，分别是物理储能（包括抽水储能、飞轮储能和压缩空气储能等）、化学储能（包括铅酸电池、镍系电池、锂系电池、液流电池、钠硫电池和锌空电池等）和电磁储能（包括超级电容器、超导储能等）。

2.1 抽水蓄能

抽水蓄能电站通常由上水库、下水库和输水发电系统组成，上下水库之间存在一定的落差。抽水蓄能电站利用电力负荷低谷时系统难以消耗的电能把下水库的水抽到上水库内，以水力势能的形式蓄能；在系统负荷高峰时段，再从上水库放水至下水库进行发电，将水力势能转换为需要的电能，为电网提供高峰电力。图 2-1 为抽水蓄能电站工作原理。因此，抽水蓄能电站不是真正意义上的发电电源，而是电力系统的能量转换器。在电力系统的负荷低谷，抽水蓄能电站可将电网的“低谷电能→电动机旋转机械能→水泵抽水→水力势能→水轮机旋转机械能→发电机组发电→高峰电能”，在负荷高峰通过输电线路发送至电网。

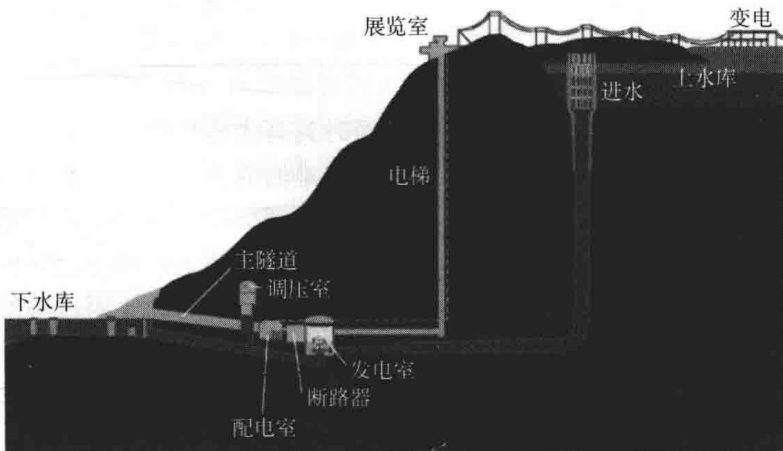


图 2-1 抽水蓄能电站工作原理示意

抽水蓄能规模可以达到数百兆瓦，效率可达70%左右，建设成本为3 500~4 000元/kW。抽水蓄能电站是目前技术最成熟的、应用最广泛的大规模储能技术，具有规模大、寿命长和运行费用低等优点。抽水蓄能电站的缺点主要是其建设需要地理资源条件，由此涉及相关生态环保问题。例如，在站址的选择上需要有水平距离小、上下水库高度差大的地形条件，岩石强度高、防渗性能好（的）地质条件，以及充足的水源保证发电用水的需求。另外，还有上下水库的库区淹没问题，水质的变化以及库区土壤盐碱化等一系列环保问题需要考虑。

总体来看，目前抽水蓄能技术已经比较成熟，而日本在高水头、大容量机组技术方面领先。中国抽水蓄能电站的土建设计和施工技术均处于世界先进水平，机组的设备国产化进程正在加快，设备安装水平正在大幅度地提高。从技术、设备和材料等方面来看，已经不存在制约中国抽水蓄能电站快速发展的因素。抽水蓄能电站的技术路线主要体现在机组设备国产化制造方面。中国短期内还没掌握高水头、大容量抽水蓄能机组的制造技术，但从中国抽水蓄能电站的资源储备情况看，只有少数几个蓄能电站涉及高水头、大容量设备制造技术，绝大部分抽水蓄能电站机组设备属于技术成熟范畴。

1960—2009年的50年间，全球抽水蓄能装机规模增长近40倍，年均增长率7.8%。目前在建与拟建抽水蓄能电站的装机容量仍相当可观，2009年底，全球抽水蓄能电站为1.38亿kW。装机容量超过1 000万kW的国家有日本（2 546万kW）、美国（2 216万kW）和中国（1 455万kW）。日本、美国及西欧各国，抽水蓄能发展较快，部分国家的抽水蓄能机组容量占电力装机总容量的比重达10%左右，其中，奥地利23.6%，日本10.7%，瑞士9.7%。

我国抽水蓄能电站建设起步较晚，20世纪60年代末才开始现代抽水蓄能技术的研究工作。80年代开始，中国第一座混流式大型蓄能电站（十三陵）的设计研究工作，90年代先后建成了广蓄一期（1 200 MW）、十三陵（800 MW）和天荒坪（1 800 MW）等中国第一批大中型抽水蓄能电站。21世纪初，我国抽水蓄能电站建设迎来了建设高潮，截止到2012年底，已建成23座，装机容量2 031万kW，装机比重约1.8%；在建12座，装机容量1 544万kW；已建、在建装机容量合计3 600万kW。

从我国智能电网建设的需要，以及辅助风电、太阳能光伏等可再生能源运行，配合“西电东送”、“西气东输”、“三北”送电、特高压送电和核电运行等方面考虑，抽水蓄能电站建设可提高风电和太阳能资源等可再生能源的利用和消纳，减少化石燃料的消耗，减轻风电间歇性出力对电网的不利影响；有利于实现全国资源的优化配置，可较好解决由于核电在基荷运行带来的调峰问题，提高核电的发电量与经济效益；有利于促进中国可再生能源的发展，实现节能减排，促进低碳经济发展；有利于保障电网的安全稳定经济运行。

根据中国抽水蓄能电站中长期需求的合理规模发展趋势分析，中国抽水蓄能电站主要布局在风电资源开发相对集中的东北、华北和西北等地区，以及沿海经济发达、电力负荷较大和核电布局较为集中的山东、广东、浙江和福建等地。2020年我国抽水