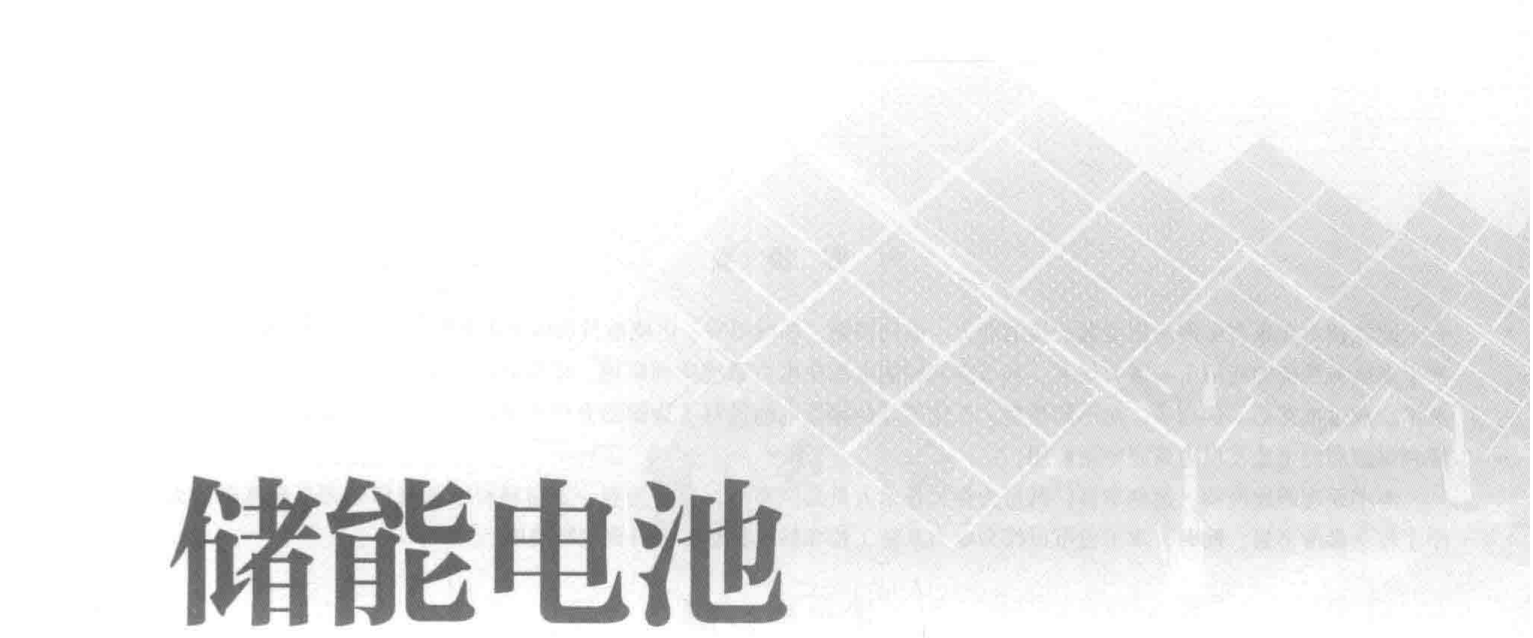


储能电池及其在电力系统中的应用

国网湖南省电力有限公司电力科学研究院
湖南省湘电试验研究院有限公司 组编
邱应军 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



储能电池及其在电力系统中的应用

国网湖南省电力有限公司电力科学研究院
湖南省湘电试验研究院有限公司 组编
邱应军 主编

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

储能技术在提高电网对新能源的接纳能力、电网调频、削峰填谷、电能质量和电力可靠性等方面起到重要的作用，在未来电力系统的应用市场潜力很大。本书围绕储能电池在电力系统中的应用，详细对比了储能电池与其他类型储能技术。通过丰富的实例列举，对不同类型、工作原理的储能电池进行了详细的介绍和解读，能够帮助读者系统性的了解和掌握储能电池在电力系统中的应用。

本书原理阐述简明，案例丰富，既可为相关技术人员提供参考，也可为有一定材料科学基础和电力系统基础的大学生作为参考书目。同时，本书也可以作为电力系统工程和材料科学工程科普读物使用。

图书在版编目（CIP）数据

储能电池及其在电力系统中的应用/邱应军主编；国网湖南省电力有限公司电力科学研究院，湖南省湘电试验研究院有限公司组编．—北京：中国电力出版社，2018.12

ISBN 978-7-5198-2607-9

Ⅰ．①储… Ⅱ．①邱… ②国… ③湖… Ⅲ．①蓄电池-应用-智能控制-电力系统-研究 Ⅳ．①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 254714 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：王　南（010-63412876）
责任校对：黄　蓓　李　楠
装帧设计：郝晓燕
责任印制：石　雷

印　　刷：北京天宇星印刷厂
版　　次：2018 年 12 月第一版
印　　次：2018 年 12 月北京第一次印刷
开　　本：787 毫米×1092 毫米　16 开本
印　　张：10.75
字　　数：185 千字
印　　数：0001-1000 册
定　　价：48.00 元

版 权 专 有　侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

编　委　会

主　　编　邱应军

编写人员　熊　亮　刘蛟蛟



前　言

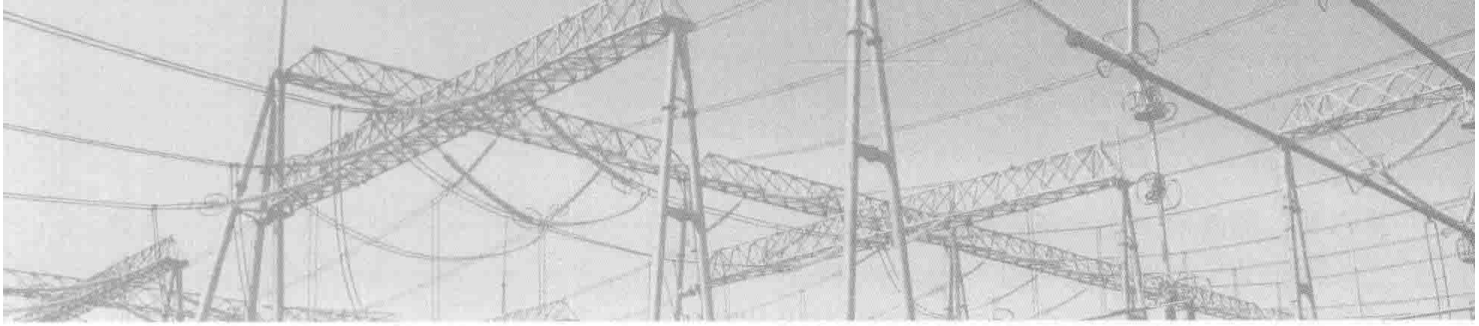
电池储能是历史悠久的电能存储方式之一，主要是将电能转化为化学能并储存起来，并根据实际应用需要可将化学能再转为电能而向外供电。在众多储能技术中，电化学储能技术进步最快，以锂离子电池、钠硫电池、液流电池为主导的电化学储能技术在安全性、能量转换效率和经济性等方面均取得了重大突破，极具产业化应用前景。整体上来说，电化学储能技术具有能量密度高、综合效率高、建设周期短、容量和功率规模适用范围广等优点。随着大容量集成技术的成熟以及综合造价的进一步降低，有望在电力系统削峰填谷、频率和电压调节、电能质量调节、系统备用以及可再生能源灵活接入等方面发挥重要的作用。

本书系统性地介绍了各种储能电池的技术特点及其在电力系统发输配用各环节的应用、国内外储能技术的发展状况和储能产业政策。全书共分六章：第一章主要介绍了智能电网对先进储能技术的需求，概述了电力系统中运用的储能技术，介绍了机械类、电气类、电化学类、热力储能和化学类五大储能类型的代表技术；第二章对储能电池进行概述，从电池结构、电极材料、储能特性和应用实例等方面，对铅酸电池、锂离子电池、液流电池、钠硫电池、燃料电池以及电池配套系统进行了详细的解读；第三章主要介绍了储能电池在发电侧的应用，首先对可再生能源发电发展与其并网的特点进行分析，进一步讨论储能电池在可再生能源发电并网中起到的作用，然后再列举储能电池在发电端应用实例并进行分析；第四章主要介绍了储能电池在配电侧的应用，讨论了储能技术在智能配电网中的关键应用，分析了储能技术在配电侧无功支持、缓解输电阻塞、延缓输配电设备扩容和变电站内的直流电源 4 个方面的应用，并列举了相关实例；第五章主要介绍了储能电池在用户侧的应用，对用户分时电价管理、容量费用管理、电能质量管理 3 个方面均作了相关介绍；第六章介绍了储能电池在分布式微电网的应用，并系统阐述了储能系统在微网中的作用及优化配置以及工程应用实例。

本书以储能电池在电力系统中的应用为出发点，从列举实例和工作原理分析入手，简明说理，力求帮读者对储能电池在电力系统中的应用范围、现状和前景有一个系统的了解，相信会对读者的工作起到很好的借鉴作用。同时，由于时间和水平的限制，书中难免有不妥之处，望广大读者不吝赐教。

编　者

2018 年 8 月



目　录

前言

第一章　智能电网与储能技术 …… 1

第一节　智能电网对储能技术的需求 …… 1

第二节　电力储能技术概述 …… 4

第三节　储能技术在电网中的应用前景 …… 16

参考文献 …… 19

第二章　储能电池概述 …… 21

第一节　铅酸电池 …… 22

第二节　锂离子电池 …… 26

第三节　液流电池 …… 38

第四节　钠硫电池 …… 47

第五节　燃料电池 …… 55

第六节　电池配套系统 …… 61

第七节　应用于电力系统的电化学储能技术比较 …… 66

参考文献 …… 67

第三章　储能电池在发电侧的应用 …… 69

第一节　可再生能源发电发展与其并网的特点 …… 69

第二节　储能电池与可再生能源发电并网 …… 73

第三节　储能电池在发电端应用实例 …… 78

参考文献 …… 93

第四章　储能电池在配电侧的应用 …… 94

第一节　智能配电网 …… 94

第二节　储能在配电侧的作用及优化配置 …… 96

第三节　储能电池在配电网的应用实例 …… 103

参考文献 …… 114

第五章　储能电池在用户侧的应用 …… 116

第一节　用户侧储能的作用 …… 116

第二节　用户侧储能的经济性分析 …… 118

第三节　储能电池在用户侧的应用实例 …… 123

参考文献 …… 131

第六章　储能电池在分布式微电网的应用 …… 133
第一节　分布式微电网 …… 134
第二节　储能系统在微电网中的作用及优化配置 …… 142
第三节　电化学电池在微电网的应用实例 …… 149
参考文献 …… 162



第一章　智能电网与储能技术

随着智能电网的发展和新能源发电的推广应用，传统电网时刻处于发电与负荷之间的动态平衡状态将被彻底打破，电网的调度、控制、管理也变得日益困难和复杂。先进高效的大规模储能技术为传统电网的升级改造乃至变革提供了全新的思路和有效的技术手段。大容量、高性能、规模化储能技术应用之后，电力将成为可以储存的商品，这将打破传统电力系统运行必须遵行的发电、输电、变电、配电、用电同时完成的固有概念，将会对电网的运行管理模式带来根本性变化，促进电网的结构形态、规划设计、调度管理、运行控制及使用方式等方面发生根本性变革。储能技术在电力系统中的应用已成为电网发展的一个必然趋势。

目前，储能技术在电力系统中的应用仍然处于探索和示范阶段。国内外都对储能的技术和经济性进行了调研和评估，并结合社会需求和电力系统自身属性，积极探索和实践储能技术在电力系统中应用的有效途径。储能技术在提高电网对新能源的接纳能力、电网调频、削峰填谷、提高电能质量和电力可靠性等方面的重要作用已经在国际上达成共识，在未来电网中的应用市场潜力很大，其发展趋势与各类储能技术特性和市场潜力紧密相关。

第一节　智能电网对储能技术的需求

智能电网（smart power grids，SPG），就是电网的智能化，也被称为“电网 2.0”，它是建立在集成的、高速双向通信网络的基础上，通过应用先进的传感和测量技术、设备技术、控制方法及决策支持系统技术，实现电网的可靠、安全、经济、高效、环境友好和使用安全的目标，其主要特征是自愈、激励、抵御攻击，同时提供满足 21 世纪用户需求的电能质量、容许各种不同发电形式的接入、启动电力市场以及资产的优化高效运行。

美国是最早提出智能电网的概念，也是最早将发展智能电网付诸实践的国家，经过多年的发展已积累了一些成功的经验。美国的智能电网又称统一智能电网，是指将基于分散的智能电网结合成全国性的网络体系。这个网络体系主要包括：

（1）通过统一智能电网实现美国电力网格的智能化，解决分布式能源体系的需要，以长短途、高低压的智能网络联结客户电源；

（2）在保护环境和生态系统的前提下，营建新的输电电网，实现可再生能源的优化输配，提高电网的可靠性和清洁性；

（3）系统可平衡跨州用电的需求，实现全国范围内的电力优化调度、监测和控制，从而实现美国整体的电力需求管理，以及美国跨区的可再生能源提供的平衡；

（4）美国智能电网体系的另一个核心就是解决太阳能、氢能、水电能和车辆电能的存

储，它可以帮助用户出售多余电力，包括解决电池系统向电网回售富裕电能。

实际上，美国的智能电网就是以可再生能源为基础，实现发电、输电、配电和用电体系的优化管理。图 1-1 为智能电网技术的应用示意图。

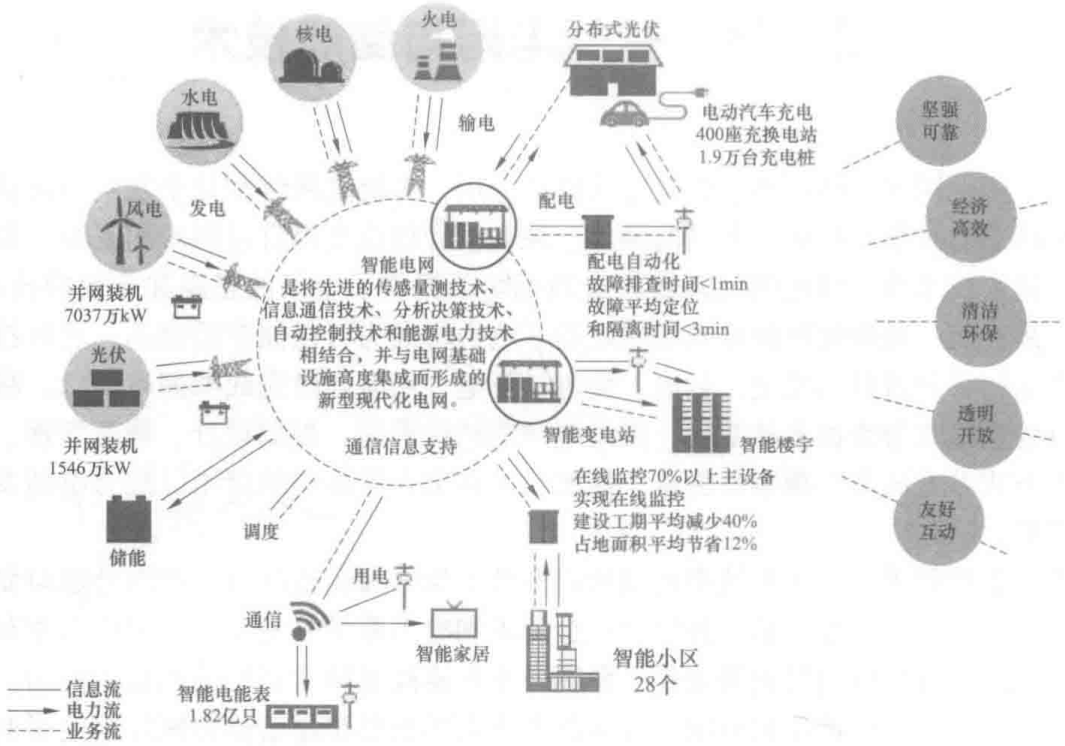


图 1-1　智能电网技术的应用示意图

2009 年 5 月 21 日，中国国家电网公司首次公布智能电网计划（Smart grid plan/Intelligent electrical network plan），其内容包括：以坚强智能电网架为基础，以通信信息平台为支撑，以智能控制为手段，包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度各个环节，覆盖所有电压等级，实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合，是坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的现代电网。预计 2020 年中国可再生能源装机将达到 5.7 亿 kW，占总装机容量的 35%，每年可减少煤炭消耗 4.7 亿 t 标准煤，减排二氧化碳 13.8 亿 t。其中，风能、太阳能等非水电的可再生能源比例将大大提高，而这些间歇性可再生能源的大规模利用将对传统电网提出挑战。储能设备在新能源并网领域的突出表现使得其将成为我国构建智能电网的重要环节。

我国的智能电网与美国智能电网在发展上虽然有本质的区别，但是发展智能微电网已经成为全球各大电网企业的共识。智能微电网是对电力服务的重新定位，它让供电商与电力消费者在电力设备设计与规划期间互相沟通成为可能，从而实现最大程度的双赢。目前大部分正在搭建的智能微电网都不能产生和储存足够用来直接并网的电力，必须通过装置连接。实际上智能电网和供电商保持稳定而复杂的关系，即通过电力的买进卖出以及与电网的连接和断开来调节电量，并为电网减压。供电商也能将智能微电网用于节能项目，在用电高峰期的时候调动备用电力。借助这些“迷你”网络，电力运营商能够拉近与学校科研单位和企业的距离，帮助其找出管理分布式输电的最佳节能方式。同时，可再生能源并

入智能微电网相对简单，并且储能功率在供电商来看也比较高。普通智能电网所需的设备太沉不方便安装，因此智能微电网就成了最简单的替代方式。

与欧美等国的智能微电网研究现状相比，我国的发展尚处于起始阶段，目前重在解决分布式发电并网问题。国内已有众多高校、科研机构和企业建设了一批以风、光为主要新能源发电形式的智能微电网示范工程，目前最主要的障碍停留在技术层面，即很难做到与常规电网同步。为了让发出的电力能够上网，电压、电频和功率都要受控制。甚至于智能微电网的设备也要符合已有的标准，以便维持电网负荷平衡。基于上述原因，储能装置就成了智能微电网最关键的组成部分。目前的储能方式都很昂贵，因此智能微电网一旦加装了储能装置，维护成本就将被推高。

随着电力需求的增长和智能电网的发展，一些新的矛盾日益突出，主要问题包括以下几个方面：

（1）系统装机容量难以达到峰值负荷需求，大规模增加装机容量不仅需要大量投资，在电力需求低谷时还会造成设备闲置；

（2）电网的输电能力难以满足用户需求；

（3）电网受到扰动后的安全稳定问题；

（4）伴随智能电网发展的新能源和可再生能源大规模并网、输送、配送以及运行、消纳的问题；

（5）管理电网高峰需求的高额成本以及用于电网基础设施建设以提高电网可靠性和智能化水平的大型投资费用。

为了解决上述一系列问题，提高现代电力系统的运行能力和供电质量，保证基于分布式发电的智能电网的进一步发展，开发使发电与用电相对独立的储能技术极为重要。

目前，储能技术已经成为智能电网中重要的一环，在电力系统各环节都可以发挥作用。一是在发电端与传统发电技术配合，提升清洁能源的并网率。在发电端，大容量储能系统可以作为发电厂的辅助服务设施，对太阳能、风电等不稳定电源起到稳压、稳流作用。二是在输配环节，储能技术可以用在变电站上起到削峰填谷的作用。这一环节的应用在美国正变得日益重要。储能技术可以作为配电网中变电站的技术升级，推迟电网的更新换代，降低成本。三是在消费环节，在“电表前”和“电表后”，都有储能技术的应用。就“电表前”而言，在美国东西海岸，尤其是东海岸地区的电网公司正在积极投资建设储能设施。因为这些地区容易受到飓风影响，储能设施可以让电网更有弹性，在对抗飓风时更稳定。就在“电表后”而言，储能设施为用户提供服务，比如特斯拉的充电墙。在美国部分地区，每天特定时间内为电动车充电有助于电网调峰，而且还会有所回报。除加州外，伊利诺伊、纽约、新泽西、德州等州也都设立了很好的激励政策，鼓励消费者在电表后设立储能或者自发电设施。表 1-1 为智能电网中储能技术应用分类。

表 1-1　　智能电网中储能技术应用分类

名称	应　用
发电系统	能源管理，负荷运行，负荷跟踪，负荷调节
输配电系统	电压控制，电能质量改善，系统可靠性提高，资产利用率提高

续表

名称	应　用
辅助服务	频率控制，旋转备用管理，备用容量管理，长期备用管理
可再生能源	可再生能源发电控制和系统集成，系统错峰发电，可再生能源储备
终端用户	不停电电源应用，穿越功率管理，外购电力优化，无功、电压支撑

电能的存储是伴随着电力工业发展一直存在的问题，其实到现在为止也没有一种非常完美的储能技术，但经过几代科学家的努力，一些比较成熟的储能技术在各行各业发挥着重要的作用。

第二节　电力储能技术概述

电能可以转换为化学能、势能、动能、电磁能等形态存储，按照存储具体方式可分为机械类、电化学类、电气类、热储能和化学类五大类型，其中前四种已经在电力系统中得到应用或有相关的示范项目。机械类储能包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能；电化学类储能包括铅酸、镍氢、镍隔、锂离子、钠硫和液流等各类二次电池；电气类储能包括超导磁、超级电容和高能密度电容储能；热储能包括熔盐储能和热电储能以及采用相变材料和热化学材料储能等；化学类储能包括合成天然气和电解水。图 1-2 为按照储能方式对储能技术进行的归类。

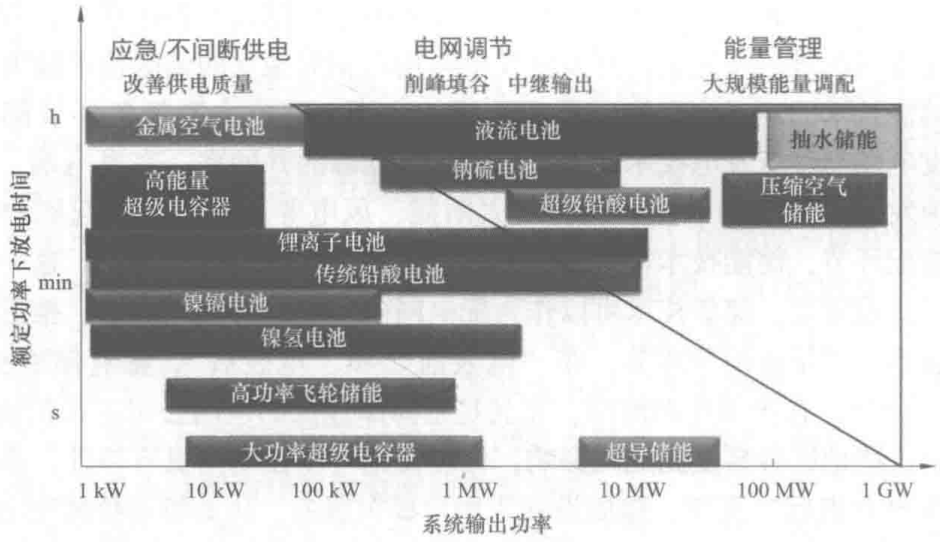


图 1-2　储能技术分类

各类储能技术的成熟程度不同，在电力系统中的应用程度也不同。有的技术已经非常成熟，如抽水蓄能已经成为电力系统中最常用也最可靠的储能方式，电气类和电化学类储能技术虽然已经得到一定的应用，但是仍然需要进一步的发展，而热力储能和化学类储能技术在电力系统中的应用潜力仍然在探索阶段。图 1-3 为不同储能技术功率等级及其技术成熟度，图 1-4 为储能技术在电力系统中不同应用模式所需的功率和响应时间需求。表 1-2简单比较了用于电力系统的主要储能技术，本节将对应用在电力系统中的储能技术

进行简要的介绍和比较。

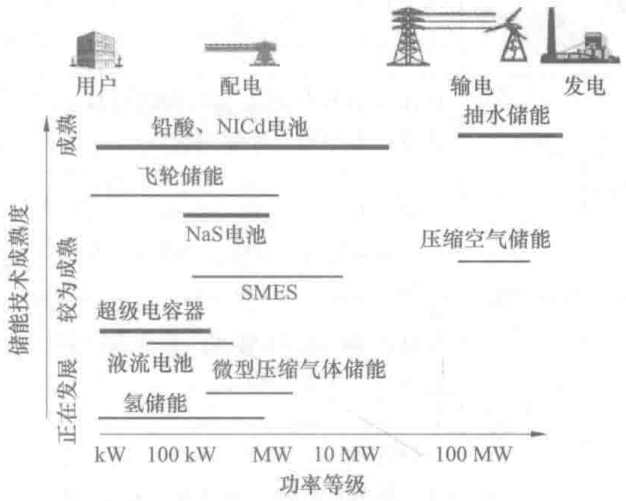


图 1-3　储能技术功率等级及其技术成熟度

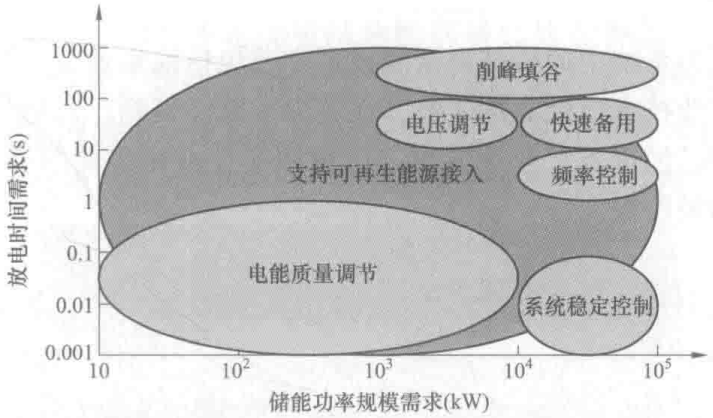


图 1-4　储能应用模式功率与放电时间需求

表 1-2　　应用于电力系统的主要储能技术比较

储能类型		额定功率等级	响应时间	技术特点	应用场合
机械储能	抽水蓄能	100~2000MW	4~10h	适于大规模储能，技术成熟。响应慢，不易选址	日负荷调节，频率控制和系统备用
	压缩空气	10~300MW	6~20h	适于大规模储能，技术成熟。响应慢，不易选址	调峰、调频，系统备用，风电储备
	飞轮储能	5kW~10MW	1s~15min	响应快，比功率高。寿命短，成本高、噪声大	调峰、频率控制，UPS 和电能质量
电磁储能	超导储能	10kW~50MW	1ms~5min	响应快，比功率高。成本高、维护困难	输配电稳定、抑制振荡、UPS 和电能质量
	超级电容	10kW~1MW	1~30s	响应快，寿命长，比功率高。储能量低，成本高	可应用于定制电力以及 FACTS

续表

储能类型		额定功率等级	响应时间	技术特点	应用场合
电化学储能	铅酸电池	5kW～100MW	1～20h	技术成熟，成本低。比能量比功率低，寿命短，环保问题	电能质量、电站备用、黑启动及 UPS/EPS
	液流电池			响应快，寿命长，效率高。可深放，安全性好，环保。功率密度稍低	电能质量、备用电源、调峰填谷、能量管理、可再生能源系统稳定及 EPS
	钠硫电池	100kW～100MW		比能量与比功率高，寿命长。高温运行，安全问题	电能质量、备用电源、调峰填谷、能量管理、可再生能源系统稳定及 EPS
	锂电池			比能量高，单体寿命长，自放电小。成组寿命低、成本高，安全问题	电能质量、备用电源及 UPS

一、机械类储能

目前，应用在电力系统中的机械类储能技术主要包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能。其中，抽水蓄能技术已经非常成熟，在电力系统中得到广泛应用。压缩空气储能技术成熟度较高，目前已经进入产业化阶段。飞轮储能技术相比前两者，技术成熟度不高，仍然处于产业化的初级阶段。

（一）抽水蓄能

抽水蓄能是在电力系统中得到最为广泛应用的一种储能技术，非常适合用于电力系统调峰和用作长时间备用电源的场合，如调峰填谷、调频、调相、紧急事故备用、黑启动和提供系统的备用容量，还可以提高系统中火电站和核电站的运行效率。抽水蓄能配备上、下游两个水库，负荷低谷时段抽水蓄能设备工作在电动机状态，将下游水库的水抽到上游水库保存，负荷高峰时抽水蓄能设备工作于发电机状态，利用储存在上游水库中的水发电。建站地点要求水头高，发电库容大，渗漏小，压力输水管道短，距离负荷中心近。

抽水蓄能电站比锂离子电池有更好的投资效益比。因为锂离子电池的价格现在仍然比较贵。从蓄能的观点看，抽水蓄能电池也许比锂离子蓄能电池在充放电过程中要多损失一些能量。锂离子电池的充放电效率可以做到 85%～90%，抽水蓄能只有 75%～80%。但是抽水蓄能电站不仅可以吸收光伏发电加风电发出的电力，而且可以多接收来自天空的“天落水”增加发电能力。所以抽水蓄能的“蓄能”效益，实际上比锂离子还高。抽水蓄能电站和太阳能、风能相结合，专门保证高峰用电的供应，从电力的调配上最为合理。因为水能发电的最大优势在于随时可以发电和停机，启动和关闭闸门都比较容易。但限制抽水蓄能电站更广泛应用的重要制约因素是地理位置受限程度大、建设工期长、工程投资较大。

我国抽水蓄能电站面临高速发展契机。在运规模 2849 万 kW，在建规模达 3871 万 kW，预计到 2020 年，运行总容量将达 4000 万 kW。截至 2017 年 11 月底，国家电网的抽水蓄能电站在运、在建规模分别为 1916、2175 万 kW。而一般工业国家抽水蓄能装机占比在 5%～10%，其中日本 2006 年抽水蓄能装机占比即已经超过 10%。中国抽水蓄能电站的

建设起步较晚，一度被认为建设速度落后，占全国电力总装机的比重太少。其开发建设的主体，主要是国家电网公司、南方电网公司两家电网企业，多为两家公司独资或控股投资建设。近年来，中国“弃风、弃光”等新能源消纳难题一直突出，业内呼吁建设抽水蓄能电站来解决电力系统调峰能力不足问题。2016 年，国家能源局发布《水电发展“十三五”规划》强调了对抽水蓄能电站的规划。“十三五”期间，全国新开工常规水电和抽水蓄能电站各 6000 万 kW 左右；新增投产抽水蓄能电站 1697 万 kW；2020 年，抽水蓄能装机容量达到 4000 万 kW。

2017 年 12 月 22 日，河北易县、内蒙古芝瑞、浙江宁海、浙江缙云、河南洛宁、湖南平江抽水蓄能电站工程开工动员大会在北京召开，6 座抽水蓄能电站开始建设。按计划，这 6 座电站全部将在 2026 年前竣工投产。其中，易县抽水蓄能电站的装机容量为 120 万 kW，工程投资 80.22 亿元。电站投产后，将以 500kV 线路接入河北南部电网。内蒙古芝瑞抽水蓄能电站装机容量也为 120 万 kW，工程投资 83.08 亿元，工程完工后将以 500kV 电压接入蒙东电网。浙江缙云抽水蓄能电站，在六座电站中装机容量最大、投资额最高，其装机容量为 180 万 kW，投资 103.9 亿元。宁海抽水蓄能电站的装机则为 140 万 kW，投资 79.5 亿元。截至目前，中国抽水蓄能电站装机容量已居世界第一，在运规模 2849 万 kW，在建规模达 3871 万 kW，预计到 2020 年，运行总容量将达 4000 万 kW。其中，截至 2017 年 11 月底，国家电网的抽水蓄能电站在运、在建规模分别为 1916、2175 万 kW。图 1-5 为重庆蟠龙抽水蓄能电站三维透视图和抽水蓄能工作原理图。表 1-3 列出了国外 8 个

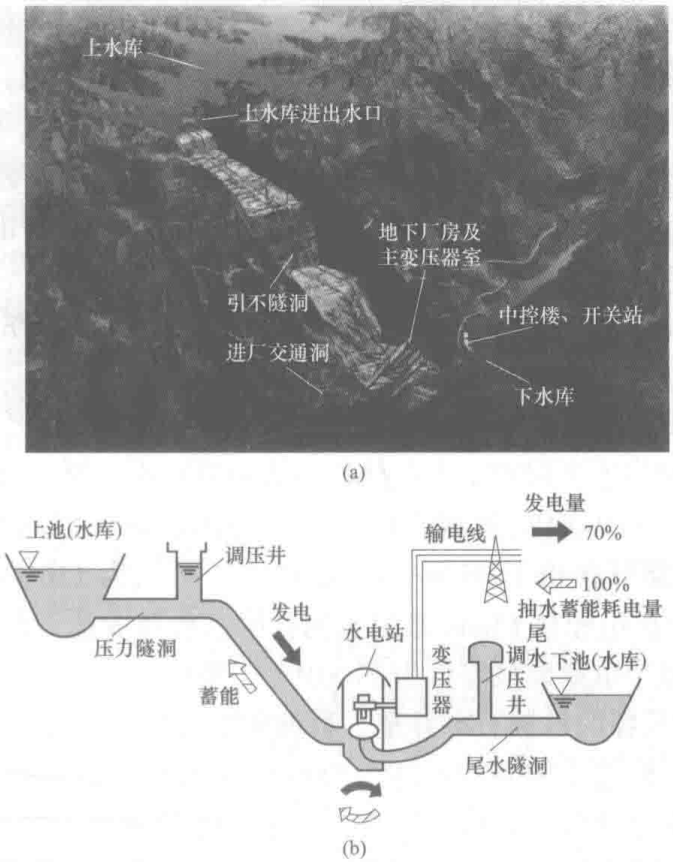


图 1-5　重庆蟠龙抽水蓄能电站三维透视图和抽水蓄能工作原理图

（a）重庆蟠龙抽水蓄能电站三维透视图；（b）抽水蓄能工作原理图

大型抽水蓄能电站的情况。

表 1-3　　国外 8 个大型抽水蓄能电站的情况

序号	电站	国家	装机容量（MW）	投入时间（年）
1	落基山	美国	760	1995
2	锡亚比舍	伊朗	1000	1996
3	奥清率Ⅱ	日本	600	1996
4	葛野川	日本	1600	1999
5	拉姆它昆	泰国	1000	2000
6	金谷	德国	1060	2003
7	神流川	日本	2820	2005
8	小丸川	日本	1200	2007

（二）压缩空气储能

压缩空气储能（Compressed-Air Energy Storage，CAES）是利用非峰时电能压缩空气并贮存在水库、地下洞穴或地上管道或容器里，当需要电能时，加热压缩空气使其膨胀，导入汽轮发电机发电。压缩空气蓄能电站有许多优点：通过改进电网负荷率，提高经济性，同时使系统中大型发电机组的负荷波动减小，提高可靠性。和抽水蓄能电站相比，压缩空气储能站址选择灵活，不需建造地面水库，地形条件容易满足。压缩机由电网供电的电动机驱动，因此汽轮机的输出功率全部用于发电，其发电功率是常规燃气轮机电站的 3 倍。同时由于大量能量储存在空气和燃料中，与抽水蓄能电站相比，有很高的能量密度。压缩空气蓄能电站在压缩空气瞬间即可使用，在无照明的条件下也可以启动而且启动快，3min 即可从空载达到额定出力，提高了系统的灵活性，适于作旋转备用。压缩空气蓄能电站可以积木式地组装，可以实现模块化。一座 220MW 的电站可用 25～50MW 的小型压缩空气蓄能电站积木式地逐年扩建发展。

地下 CAES 是最经济有效的，蓄能能力达到 40MW，发电时间在 8～26h。选择这类电站的位置需要证实该位置的地质构造是否能保证空气储存的完整性。地上 CAES 通常要比采用地下 CAES 小很多，发电容量为 3～15MW，发电时间为 2～4h，相比较更容易选址但建设费用更高，主要因为地上储能系统日益增加的额外成本。第一个投入商用的 CAES 是 1978 年建于德国的一台 290MW 机组；1991 年，美国的阿拉巴马州建成了第二台商用 CAES，它把压缩空气储存在地下 450m 的废盐矿中，可以为 110MW 的汽轮机连续提供 26h 的压缩空气，这台机组能在 14min 之内并网；第三台商业运行的 CAES，于 2011 年在美国俄亥俄州起建，整个电站装机容量为 2700MW，共 9 台机组，压缩空气储存在一个现有的位于地下 2200 英尺深的石灰石矿井里。目前随着分布式电力系统的发展，人们对于 8～12MW微型压缩空气储能系统开始关注。2009 年压缩空气储能被美国列入未来十大技术，德、美等国有示范电站投入运营，如 1978 年德国亨托夫投运的 290MW 的压缩空气蓄能电站，美国电力研究协会（EPRI）研发的 220MW 的压缩空气蓄能电站。总体而言，目前尚处于产业化初期，技术及经济性有待观察。2018 年，全球首个液态空气储能工厂在英

国诞生。这个液态空气储能工厂名为 Pilsworth，坐落于曼彻斯特，由英国专门研究储能系统的 Highview Power 公司负责运营，Highview Power 公司和伯明翰大学共同开发了这项液态空气储能技术，双方共同拥有 33 项专利，造价成本比其他大型电池都要便宜且更耐用。

图 1-6 为以压缩空气储能作为储能站的风电场工作示意图。为了让风力发电厂在无风状态下仍旧正常工作，电力公司需要达到实用规模的能量储存，一种解决办法是利用风能压缩空气并储存在容器或者地下洞穴，而后利用这些储存的空气带动发电机。图 1-7 为压缩空气储能原理图。

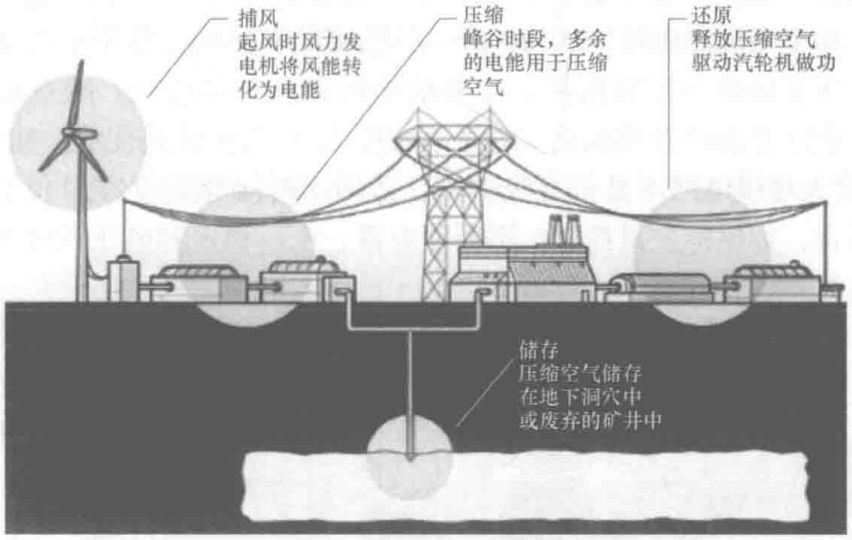


图 1-6　压缩空气储能作为储能站的风电场工作示意图

自 2003 年以来，我国也投入到 CAES 的研究中，目前华北电力大学正在进行压缩空气蓄能系统热力性能计算及其经济性分析的研究；在存储空间选择上，我国哈尔滨电力相关部门也在进行利用现有的地道作为贮气室的研究；还有的科研机构在进行海底式气缸研究。清华大学电机系在大规模物理储能方面取得重大科研突破。由卢强、梅生伟教授领导的科研团队在安徽省芜湖市建成了世界上首套“500kW 非补燃压缩空气储能发电示范系统”，实现了百千瓦级的储能和发电实验，验证了回热式压缩空气发电技术方案的可行性和有效性。该示范系统成功将多级空气压缩、高压气体存储、循环式热回收、纯空气透平驱动和最优控制发电等多项关键技术和装置进行有机集成，可实现大规模电能存储和冷热电三联供的功能，具有零碳排、高效率、运行灵活和响应迅速等优点，为建设智能电网提供关键技术支撑。2014 年 11 月，该示范系统建成投产，凭借最大化回收并利用空气压缩热这一技术优势，所建示

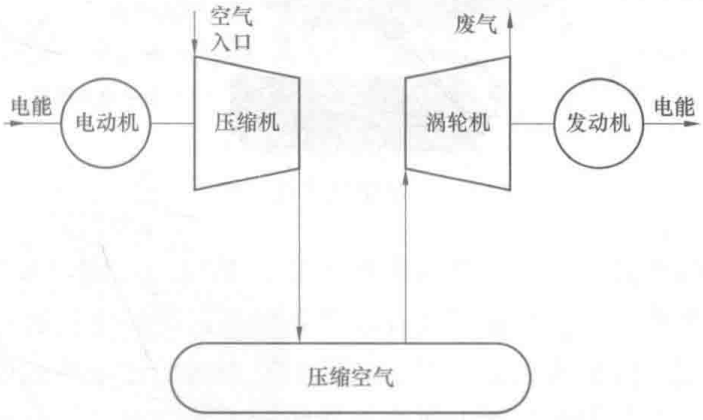


图 1-7　压缩空气储能原理

范系统总体电能存储效率与国外大型补燃式储能电站相当，标志着我国在大规模储能技术领域已经处于国际领先水平。

（三）飞轮储能

飞轮储能的原理是电能转换成旋转物体的机械能，然后进行能量存储。在储能阶段，通过电动机拖动飞轮，使飞轮本体加速到一定的转速，将电能转化为机械能；在能量释放阶段，电动机作发电机运行，使飞轮减速，将机械能转化为电能。图 1-8 为飞轮储能系统结构图。为减少损耗，飞轮储能系统运行于真空度较高的环境中，现代飞轮储能系统都是由一个圆柱形旋转质量块和通过磁悬浮轴承支撑的机构组成，其特点是没有摩擦损耗、风阻小、寿命长、功率密度是电池的 5~10 倍、对环境没有影响，几乎不需要维护，适用于电网调频和电能质量保障，是目前最有发展前途的储能技术之一。缺点是能量密度比较低，保证系统安全性方面的费用很高，在小型场合还无法体现其优势，对需要数 kWh 或 MWh 能量储存的大规模电网不是很有吸引力，适用于时间和容量方面介于短时储能和长时储能之间的场合，如电能质量控制、不间断电源、电压稳定和电压调峰方面，目前，主要应用于为蓄电池系统作补充。

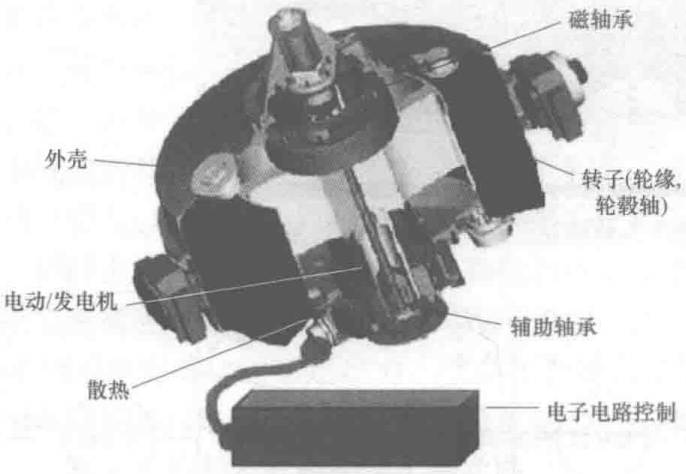


图 1-8　飞轮储能系统结构图

近年来，飞轮转子设计、轴承支撑系统和电能转换系统都被各国的研究机构进行了深入研究。高强度碳素纤维和玻璃纤维材料、大功率电力电子变流技术、电磁和超导磁悬浮轴承技术极大地促进了储能飞轮的发展。目前，美国、英国及德国等工业强国在飞轮储能系统的研究与开发上取得了很大进展，开始由实验室研究转向试运行与实际应用，并向产业化、市场化方向发展。在美国，现代飞轮储能电源商业化产品开始推广，风险投资的大量介入，飞轮储能技术获得了成功应用。风电、太阳能发电本身所固有的随机性、间歇性特点，决定了其在能源系统所占比例增长和大规模应用，必定会对电网调峰和体系平安运转带来明显影响，必须要有先进的储能手艺作支持。飞轮储能技术发展到一定程度后，能在很大程度上解决新能源发电的随机性、波动性问题，可以实现新能源发电的平滑输出，有效调节新能源发电引起的电网电压、频率及相位的变化，使大规模风电和太阳能发电方便可靠地并入常规电网，减少温室气体排放。

我国飞轮储能技术的研究刚刚起步，近几年研究主要集中在两个方面：一是飞轮储能系统的基础研究，包括整机系统及各组件等关键技术的研究；二是飞轮储能系统的应用研究，这主要包括在电力调峰、航天航空、混合动力车及不间断电源等领域的应用研究。随着新材料的应用和能量密度的提高，飞轮储能下游应用逐渐成长，处于产业化初期。