

ZHINENG DIANWANG ZHONG XUDIANCHI CHUNENG JISHU JIQI JIAZHI PINGGU

智能电网中 蓄电池储能技术 及其价值评估

李宏仲 段建民 王承民○编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



智能电网中蓄电池储能 技术及其价值评估

李宏仲 段建民 王承民 编著
李国庆 主审



机械工业出版社

前 言

储能技术已被视为电网运行过程中“采—发—输—配—用—储”六大环节中的重要组成部分。电力系统中引入储能环节后，可以有效地实现需求侧管理，消除昼夜间峰谷差，平衡负荷，不仅可以更有效地利用电力设备，降低供电成本，还可以促进可再生能源的应用，也可作为提高系统运行稳定性、调整频率、补偿负荷波动的一种手段。储能技术的应用必将在传统的电力系统设计、规划、调度、控制等方面带来重大变革。

因此近几十年来，储能技术的研究和发展一直受到各国能源、交通、电力、电信等部门的重视。在智能电网领域，蓄电池储能技术是受世人瞩目的一项关键技术。蓄电池储能技术的发展和广泛应用，将有助于打破风电、光伏发电等的接入和消纳的瓶颈问题，缓解电网巨大峰谷差造成的调峰压力，降低配套输电线路容量的投资建设需求。同时还能消除风电、光伏发电的功率波动，改善电能质量，提高电网供电可靠性。蓄电池储能技术对城市电网具有重要意义，是实现电网互动化管理的有效手段，并有利于节能减排。

目前蓄电池储能技术还有待成熟，如何评估其技术价值与经济价值，如何大规模推广应用，建立科学的价值评估体系意义重大。蓄电池储能技术价值评估体系对未来蓄电池储能技术发展、产业化也具有重要的参考价值。蓄电池储能技术的商业运行模式探讨，对蓄电池储能技术如何真正发挥作用具有前瞻意义。蓄电池储能技术及产业不是一个立即能赢利的行业，需要政府的优惠政策支持，本书对相关政策进行探讨，希望能为今后蓄电池储能技术的大规模应用提供政策理论依据。

本书由李宏仲、段建民和王承民编著，由李宏仲统稿。本书部分内容引用了上海交通大学颜志敏等同学的研究成果。本书承蒙东北电力大学校长李国庆教授主审，并提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示诚挚的感谢。

本书在编写过程中参阅了不少前辈的工作成果，在此表示感谢。本书在编写过程中，上海电力学院的众多领导、专家给予了深切的关怀，编者的许多同事、朋友与家人均为本书的编写提供了众多的帮助，在此一并向他们致以衷心的感谢。

本书受到上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金（编号：sdl10019）的资助，特此感谢！

限于编者水平，错漏之处难免，欢迎读者对书中不妥之处予以批评指正。

编 者

2012.6

目 录

前言

第 1 章 储能技术的发展及其特点	1
1.1 当前我国电力系统面临的新问题	1
1.2 储能的方式及其特点	2
1.3 不同储能方式的优缺点对比	6
第 2 章 城市电网中发展蓄电池储能技术的意义	8
2.1 城市电网中蓄电池储能装置的作用	8
2.2 城市电网建设蓄电池储能站的必要性	14
2.2.1 城市电网负荷特性	14
2.2.2 城市地区地理条件限制	16
2.3 蓄电池储能装置的应用模式	17
2.4 蓄电池储能装置的安装场景	20
2.5 小结	22
第 3 章 蓄电池储能技术特点及应用现状	23
3.1 蓄电池储能技术概述	23
3.2 锂离子电池技术性能及应用	25
3.3 镍氢电池的技术性能及应用	33
3.4 钠硫电池技术性能及应用	38
3.5 钒电池技术性能及应用	46
3.6 国外蓄电池储能电池发展现状	53
3.7 小结	54
第 4 章 储能系统的隐性价值——改善电网运行	56
4.1 储能系统接入电网对系统运行电压的影响	56
4.1.1 加装储能装置前的节点运行电压的计算	56
4.1.2 加装储能装置后的节点运行电压的计算	58
4.2 储能系统接入电网对系统网络损耗的影响	59
4.2.1 加装储能装置前的网络损耗计算	59

4.2.2	加装储能装置后的网络损耗计算	59
4.3	实例计算	59
4.3.1	某配电网介绍	60
4.3.2	原始配电网运行现状分析	62
4.3.3	确定储能系统的安装地点	67
4.3.4	确定储能系统的安装容量	73
4.4	小结	83
第5章	储能系统应用的主要单项效益分析	85
5.1	储能系统延缓配电网扩建方面的效益评估	85
5.1.1	我国配电网存在的问题	85
5.1.2	储能装置延缓电网升级的原理	86
5.1.3	储能装置延缓电网升级的分析计算	87
5.2	储能系统在电能时移方面的成本—效益分析	88
5.2.1	NaS 储能系统的经济模型	89
5.2.2	储能系统固定成本的等年值计算	90
5.2.3	配置储能系统的时移电量计算	91
5.2.4	储能系统进行电能时移的成本—效益分析	92
5.3	储能系统减少网损的效益分析	98
5.3.1	配置储能系统的系统网损计算数学模型	99
5.3.2	实例计算	100
5.4	用户侧储能系统的成本—电费收益分析	102
5.4.1	两部制电价简介	103
5.4.2	上海市的电价体系简介	105
5.4.3	成本—电费收益分析	107
5.5	风电场中储能系统的电量时移效益分析	112
5.5.1	储能系统在风力发电系统中的作用	112
5.5.2	各种储能技术在风电场中应用前景的比较分析	113
5.5.3	风电场配置储能系统的合理容量	114
5.5.4	风电场中储能系统的效益分析	116
5.5.5	风力发电的峰谷上网电价设计方案	117
5.5.6	储能系统在风电并网中应用的成本—效益分析	118
5.6	小结	120

第 6 章 配电网中蓄电池储能装置的总价值评估	123
6.1 减少电网扩建容量的收益	123
6.2 减少电网总网损的收益	128
6.3 储能装置低储高发的套利	130
6.4 减少新能源发电所需的常规备用容量	130
6.5 减少电网可靠性成本	131
6.6 储能装置的投资成本分析	135
6.7 配电网中蓄电池储能装置的价值评估模型	136
6.8 小结	141
第 7 章 用户侧蓄电池储能装置的总价值评估	142
7.1 减少用户配电站建设容量	142
7.2 减少容量电价制度下用户的基本电费	143
7.3 减少用户的购电费用中的电量电费	144
7.4 降低配变损耗费用	145
7.5 降低停电损失费用	145
7.6 投资成本	147
7.7 总价值评估模型	148
7.8 求解方法及实例	149
7.9 小结	155
第 8 章 风电场中蓄电池储能装置的总价值评估	157
8.1 减少风电场所需备用容量	158
8.2 峰谷上网电价下的低储高发套利	160
8.3 减少风电场并网通道的建设容量	164
8.4 投资成本分析	165
8.5 总价值评估模型	165
8.6 求解方法及实例	166
8.7 小结	173
第 9 章 蓄电池储能在微电网中的经济性分析	174
9.1 微电网概述	174
9.2 微电网关键技术、标准和政策现状	188
9.2.1 微电网关键技术	188
9.2.2 微电网标准体系研究	190

9.2.3 微电网的政策现状.....	194
9.3 微电网技术经济性分析.....	195
9.3.1 微电网经济性影响因素.....	196
9.3.2 实例分析.....	197
9.4 小结.....	201
第 10 章 基于 SWOT 分析的各类蓄电池储能技术比较	202
10.1 SWOT 战略分析法.....	202
10.2 蓄电池储能技术的 SWOT 分析.....	203
10.3 小结.....	208
第 11 章 PJM 电网中蓄电池储能装置应用实例^[43]	209
11.1 储能时间和效率对套利价值的影响.....	209
11.2 地区和时间差异导致燃料和电能价格差异对套利价值的影响.....	213
11.3 大规模储能对储能套利价值的影响.....	217
11.4 小结.....	219
第 12 章 风电场的储能配置	221
12.1 风电场配制储能装置的形式.....	221
12.1.1 风电场储能装置的容量配置.....	222
12.1.2 风电场储能装置实际利用率分析.....	225
12.2 风电场上网电价.....	227
12.2.1 风电场上网电价计算方法.....	227
12.2.2 风电场配制储能装置对上网电价的影响.....	230
第 13 章 光伏发电系统的储能配置	232
13.1 储能电池与光伏发电系统的配合.....	232
13.2 太阳能光伏发电配置储能电池的容量确定.....	232
13.2.1 储能电池容量的计算.....	232
13.2.2 光伏发电系统中储能电池设计和安装注意事项.....	233
第 14 章 城市电网储能技术推广应用的远景及技术路线	234
14.1 推广应用的远景.....	235
14.2 蓄电池储能技术发展展望.....	239
14.3 小结.....	241
附表	242
参考文献	255

第 1 章 储能技术的发展及其特点

1.1 当前我国电力系统面临的新问题

安全、优质、经济是对电力系统的基本要求。近年来，随着全球经济发展对电力需求的增长和电力企业市场化改革的推行，电力系统的运行和需求正在发生巨大的变化，一些新的矛盾日显突出，主要的问题有：①系统装机容量难以满足峰值负荷的需求；②现有电网在输电能力方面落后于用户的需求；③复杂大电网受到扰动后的安全稳定性问题日益突出；④用户对电能质量和供电可靠性的要求越来越高；⑤电力企业市场化促使用户侧需要能量管理技术的支持；⑥必须考虑环境保护和政府政策因素对电力系统发展的影响。

2000 年到 2001 年初，美国加州供电系统由于用电需求的增长超过电网的供电能力，出现了电力价格大范围的波动以及多次停电事故；我国自 2002 年以来，以连续四年出现多个省市拉闸限电的状况；在世界上的其他国家和地区，也不同程度的出现了电力供应短缺的现象。系统供电能力，尤其是输电能力和调峰发电方面的发展已经落后于用电需求的增长，估计这种状况还会在一段时间内长期存在，对电力系统的安全运行将带来潜在的威胁。

加强电网建设（新建输电线路和常规发电厂），努力提高电网输送功率的能力，可以保证在满足系统安全稳定运行的前提下向用户可靠地输送电能。但是由于经济、环境、技术以及政策方面因素的制约，电网发展难以快速跟上用户负荷需求增长的步伐，同时电网在其规模化发展过程中不可避免地会在一段时间甚至长期存在结构上的不合理问题；另一方面，随着电力企业的重组，为了获得最大利益，企业通常首先选择的是尽可能提高设备利用率，而不是投资建设新的输配电设备和发电厂。因此，单靠上述常规手段难以在短时间内有效地扭转电力供需不平衡的状况。

长期以来，世界各国电力系统一直遵循着一种大电网、大机组的发展方向，按照集中输配电模式运行，在这种运行模式下，输配电系统相当于一个电能集中容器，系统中所有发电厂向该容器中注入电能，用户通过配电网络从该容器中取用电能。对于这种集中式输配电模式，由于互联大系统中的电力负荷与区域交换功率的连续增长，远距离大容量输送电能不可避免，这在很大程度上增加了电力系统运行的复杂程度，降低了系统运行的安全性。

目前，电力系统还缺乏高效的有功功率调节方法和设备，主要采用的方法是发

电机容量备用（包括旋转备用和冷备用），这使得有功功率调控点很难完全按系统稳定和经济运行的要求布置。某些情况下，即使系统有充足的备用容量，如果电网发生故障导致输电能力下降，而备用机组又远离负荷中心，备用容量的电力就难以及时输送到负荷中心，无法保证系统的稳定性。因此，在传统的电力系统中，当电力系统中出现故障或者大的扰动时，同步发电机并不总是能够快速地对应该扰动以保持系统功率平衡和稳定，这时只能依靠切负荷或者切除发电机来维持系统的稳定。但是在在大电网互联的模式下，局部扰动可能会造成对整个电网稳定运行的极大冲击，严重时会发生系统连锁性故障甚至系统崩溃。美国和加拿大 2003 年发生的大停电事故就是一个惨痛的教训。如果具有有效的有功和无功控制手段，快速地平衡掉系统中由于事故产生的不平衡功率，就有可能减小甚至消除系统受到扰动时对电网的冲击。

现代电力系统中，用户对于电能质量和供电可靠性的要求越来越高，冲击过电压、电压凹陷、电压闪变和波动以及谐波电压畸变都不同程度地威胁着用户设备特别是敏感性负荷的正常运行。电力市场化的推行也促使电力供应商和用户一起共同寻求新的能量管理技术支持，以提高电网运行的安全性和经济性。

当一个大系统由于事故的连锁反应而导致系统瓦解，出现大面积停电时，会造成难以估计的经济损失和社会影响。规划和运行中的不确定因素和不安全因素的增加对系统的安全稳定控制提出了越来越严峻的挑战。而无论是调峰问题，还是稳定问题，其根源都在于能量的不平衡，或者说是电能的生产、输送、消费的瞬时不平衡。电能存储技术可以提供一种简单的解决电能供需不平衡问题的办法。各种形式的储能装置可以在电网负荷低谷的时候作为负荷从电网获取电能充电，在电网负荷峰值时刻改为发电机方式运行，向电网输送电能，这种方式有助于减少系统输电网络的损耗，对负荷实施削峰填谷，从而获取经济效益。如果将储能装置用于系统稳定控制，则有可能采用小容量的储能，通过快速的电能存取，实现较大的功率调节，快速地吸收“剩余能量”或补充“功率缺额”，从而提高电力系统的运行稳定性。

储能技术已被视为电网运行过程中“采—发—输—配—用—储”六大环节中的重要组成部分。系统中引入储能环节后，可以有效地实现需求侧管理，消除昼夜间峰谷差，平衡负荷，不仅可以更有效地利用电力设备，降低供电成本，还可以促进可再生能源的应用，也可作为提高系统运行稳定性、调整频率、补偿负荷波动的一种手段。储能技术的应用必将在传统的电力系统设计、规划、调度、控制等方面带来重大变革。

1.2 储能的方式及其特点

电能可以转换为化学能、势能、动能、电磁能等形态存储，到目前为止，人们

已经开发了多种形式的储能系统,按照其具体方式可分为物理、电磁、电化学和相变储能四大类型。其中物理储能包括抽水蓄能、飞轮储能和压缩空气储能;电磁储能包括超导、超级电容和高能密度电容储能;电化学储能包括铅酸、镍氢、镍镉、锂离子、钠硫和液流等电池储能;相变储能包括冰蓄冷储能等。其中适合于大规模储能的有液流储能系统技术、钠硫储能系统技术、扬水储能技术和压缩空气储能技术等。

1. 物理储能

(1) 抽水蓄能电站

在负荷低谷的时候,抽水蓄能电站的抽水储能设备工作在电动机状态,将下游的水抽到上游,将电能转换为水的势能;在负荷峰值的时候,抽水储能设备工作在发电机状态,上游的水流下,通过发电机将水的势能转换成电能。它是目前电力系统中技术最成熟、应用最广泛的储能方式。抽水蓄能主要应用领域包括削峰填谷、调频、调相、紧急事故备用、黑启动以及提供系统的备用容量,还可以提高发电端火电厂和核电站等的运行效率。抽水蓄能电站可以在电网负荷出现突然变化时,几分钟内快速响应,这是其他类型发电厂所无法比拟的,如果同风能发电、太阳能发电等联合组成小的供电网络,还可以应用在偏远地区或者孤岛上。同时,抽水蓄能电站可以根据存储电能的多少合理地设计水库的容量,在当前风能、太阳能发电及核电等大规模发展建设的情况下,抽水蓄能电站作为电网安全可靠运行的保障,成为电网不可或缺的部分。但抽水蓄能受地理位置、生态环境及建设周期(一般要4~5年)等各方面的影响较大。

(2) 飞轮储能

在负荷低谷时,电网中富余的电能带动飞轮旋转,以动能的形式存储能量,完成电能—机械能的转换过程;在负荷峰值的时候,高速旋转的飞轮作为原动机带动发电机旋转发电,经功率变换器输出电流和电压,完成机械能—电能转换的释放能量过程。

飞轮储能系统由高速飞轮、轴承支撑系统、电动机/发电机、功率变换器、电子控制系统和真空泵、紧急备用轴承等附加设备组成。飞轮储能功率密度大于5kW/kg,能量密度超过20Wh/kg,效率在90%以上,循环使用寿命长,工作温区为-40~50℃,无噪声,无污染,维护简单,可连续工作,积木式组合后可以实现兆瓦级,输出持续时间为几分钟至几个小时。飞轮储能具有储能密度大、效率高、建设周期短、寿命长、高储能、充放电快捷、充放电次数无限、瞬时功率大、响应速度快、维护费用低、环境污染小、深放电、不受地理环境限制等特点,可以在很大程度上解决新能源发电的随机性、波动性问题,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。飞轮储能的缺点是放电时间短,只能放电几十秒至数分钟,而且设备成本高,部件更换昂贵。飞轮储

能正向高转速、高温超导方向发展。飞轮储能主要用于不间断电源 (Uninterrupted Power Supply, UPS) / 应急电源 (Emergency Power System, EPS)、电网调峰和频率控制。

(3) 压缩空气储能

在负荷低谷的时候, 电网中富余的电能用来压缩空气, 并将其存在高压罐中; 在负荷峰值的时候将压缩空气释放出来, 驱动燃气轮机发电。压缩空气储能系统可以用于冷启动、黑启动; 因其响应速度快, 主要用于峰谷电能回收调节、负荷平衡、频率调制、分布式储能和发电系统备用。

第一座压缩空气储能电站建于德国 Huntorf, 于 1978 年投入使用, 其主要功能是作为紧急备用电力或平衡负荷, 此系统能够在 2h 内供应 290MW 的电力。第 2 座压缩空气储能电站建于 1991 年, 位于美国亚拉巴马州, 它把压缩空气存储在地下深度为 450m 的废盐矿中, 该系统可以为 110MW 的燃气轮机连续提供 26h 的压缩空气。日本于 1998 年开工建设北海道三井砂川储气库, 并于 2001 年投入使用, 输出功率为 2MW。此外, 加拿大、英国、法国等国也长期致力于压缩空气储能的开发研究, 而我国目前处于研究阶段, 尚无此应用。压缩空气储能的优点是发电时的燃料消耗比调峰用燃气轮机组减少了 1/3, 所消耗的燃气要比常规燃气轮机少 40%, 建设投资和发电成本低于抽水蓄能电站, 安全系数高, 寿命长; 缺点是其能量密度低, 并受地理环境 (如岩层等地形条件) 的限制。随着分布式能源在电网中比例的增大, 小型化压缩空气库和提高储能压力是未来的发展方向。

2. 电磁储能

(1) 超导储能系统

超导储能系统 (Superconductor Magnetics Energy Storage, SMES) 利用由超导线制成的线圈, 将电网供电励磁产生的磁场能量存储起来, 在需要时再将存储的能量送回电网或作它用。

超导储能系统通常包括置于真空绝热冷却容器中的超导线圈、深冷和真空泵系统以及作为控制用的电力电子装置。电流在由超导线圈构成的闭合电感中不断循环, 不会消失。

超导储能与其他储能技术相比具有显著的优点: ①由于可以长期无损耗存储能量, 能量返回效率很高; ②能量的释放速度快, 通常只需几秒钟; ③采用 SMES 可使电网电压、频率、有功和无功功率容易调节。高温超导技术和电力电子技术的发展促进了超导储能装置在电力系统中的应用, 在 20 世纪 90 年代已被应用于风力发电系统。SMES 快速的功率吞吐能力和较为灵活的四象限调节能力, 使得它可以有效地跟踪电气量的波动, 提高系统的阻尼。各种研究表明, SMES 装置在改善风电场稳定性方面具有优良的性能。

目前在分布式发电系统中, SMES 储能单元常用于孤岛型的风力发电系统和

光伏发电系统，随着风力发电向规模化、产业化发展，以及装置成本的降低，SMES也会在并网型风电系统中大量应用。超导储能今后主要的研究方向是：变流器和控制策略，降低损耗和提高稳定性，开发高温超导线材（HTS），失超保护技术等。

此外，超导储能技术还可以用于配电网的电压支撑、功率补偿、频率调节，以及提高系统稳定性和功率输送能力中。

（2）超级电容储能系统

超级电容器根据电化学双电层理论研制而成，可提供强大的脉冲功率，充电时处于理想极化状态的电极表面，电荷吸引周围电解质溶液中的异性离子，使其附于电极表面，形成双电荷层，构成双电层电容。由于电荷层间距非常小（一般0.5mm以下），加之采用特殊电极结构，使电极表面积成万倍的增加，从而产生极大的电容量。在很小的体积下达到法拉级的电容量；无需特殊的充电电路和控制放电电路；和电池相比，过充、过放都不对其寿命构成负面影响；从环保的角度考虑，它是一种绿色能源；超级电容器可焊接，因而不存在电池接触不牢固等问题；由于电介质耐压低，存在漏电流，其储能量和保持时间受到限制；和铝电解电容器相比，它内阻较大，因而不可以用于交流电路，必须串联使用，以增加充放电控制电路和系统体积。在电力系统中多用于短时间、大功率的负荷平衡和调节电能质量、高峰值功率等场合。

3. 电化学储能

电池储能主要是通过电池正负极的氧化还原反应来进行充放电。蓄电池储能系统（BESS）由电池、直—交逆变器、控制装置和辅助设备（安全、环境保护设备）等组成，目前在小型分布式发电系统中应用最为广泛。根据所使用化学物质的不同，蓄电池可以分为铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池、锂离子电池等。

传统的蓄电池储能存在着初次投资高、寿命短、对环境有污染等诸多问题。值得注意的是，锂离子电池是近年来兴起的新型高能量二次电池，由日本索尼公司在1992年率先推出。以其工作电压高、体积小、储能密度高（ $300 \sim 400 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^3$ ）、无污染、循环寿命长（每次放电不超过储能的80%时可充3000次）等特点而受到人们的重视和欢迎。此外，锂离子电池的充放电转化率高达90%以上，这比抽水蓄能电站的转化率高，也比氢燃料电池的发电率（80%）高。目前分布式发电系统采用蓄电池储能时较多的还是采用传统的铅酸电池，种种优点使得锂离子电池在未来的分布式发电储能中将发挥越来越重要的作用。近年来开发的其他新型蓄电池还有钠硫电池、钒电池等。

除了应用于分布式发电系统以外，蓄电池储能在电力系统中还用来调峰和频率控制。为了提高电网抵御停电事故的能力，美国阿拉斯加电网安装了1台可提供峰值达26.7MW电力的在线蓄电池储能系统。该系统耗资3000万美元，可使系统大

停电的可能性减小 60% 以上。

表 1-1、表 1-2 中分别显示了常见电池储能系统的基本特性和由它们构成的储能系统目前已达到的性能指标对比。

表 1-1 常见电池储能系统的特性与应用场合

储能类型	典型额定功率	额定容量	特点	应用场合
铅酸电池	5kW~50MW	几分钟~几小时	技术成熟，成本低，寿命短，环保问题	电能质量调节、电站备用、黑启动
液流电池	5kW~100MW	1~20h	寿命长，可深放，适于组合，效率高，环保性好；但能量密度稍低	电能质量调节、备用电源、调峰填谷、能量管理、可再生能源储能、EPS
钠硫电池	100kW~100MW	数小时	比能量和比功率高。高温条件、运行安全问题有待改进	电能质量调节、备用电源、调峰填谷、能量管理、可再生能源储能、EPS
锂离子电池	100~170W	几分钟~几小时	比能量高。成组寿命、安全问题有待改进	电能质量调节、备用电源、UPS

表 1-2 部分电池储能系统的性能对比

电池种类	功率上限	比容量/ (Wh/kg)	比功率/ (W/kg)	循环 寿命/次	充放电 效率 (%)	自放电/ (%/月)
铅酸	数十兆瓦	35~50	75~300	500~1 500	0~80	2~5
镍氢	几十兆瓦	75	150~300	≥2 500	0~70	5~20
锂离子	几十兆瓦	150~200	200~315	≥2 500	0~95	0~1
钠硫	十几兆瓦	150~240	90~230	≥4 500	0~90	—
全钒液流	数百千瓦	80~130	50~140	≥10 000	0~80	—

4. 相变储能

相变储能是利用相变材料相变时吸收大量潜热并保持温度恒定的特点而进行的。如在电网谷值时，将电能转变成热能，在相变储能元件中存储起来，在电网峰值时用来加热水、供暖等。在电力系统中主要用于电力调峰。

1.3 不同储能方式的优缺点对比

目前各种储能方式应用研究现状和相关储能技术的优、缺点见表 1-3、表 1-4。

第 1 章 储能技术的发展及其特点

表 1-3 各种储能技术的研究及应用现状一览表

	储能类型	典型功率	典型能量	优势	劣势	应用方向
物理储能	飞轮储能	5kW~1.5MW	15s~15min	大容量	低能量密度	调峰, 频率控制, 电能质量调节
	抽水储能	100~2 000MW	4~10h	大功率, 大容量, 低成本	场地要求特殊	日负荷调节频率控制和系统备用
	压缩空气	100~300MW	6~20h	大功率, 大容量	场地要求特殊	调峰发电厂, 系统备用电源
电磁储能	超导储能	10kW~1MW	5s~5min	大容量	低能量密度, 高成本	UPS, 电能质量调节, 电网稳定性
	超级电容	1~100MW	1s~1min	长寿命, 高效率	低能量密度	电能质量调节, 输电稳定性
电化学储能	铅酸电池	1kW~50MW	1min~3h	低投资	寿命短	电能质量调节, 可靠性, UPS
	钠硫电池	100kW~100MW	min~h 级	高能量密度, 高成本	运维复杂	调峰、备用电源、电能质量调节
	液流电池	5kW~100MW	1~20h	大容量, 长寿命	低能量密度	电能质量调节, 可靠性, 备用电源
	锂离子电池	100kW~10MW	min~h 级	高能量密度、污染小	造价高	调峰、备用电源

表 1-4 各种储能技术优缺点

储能方式	优点	缺点
抽水储能	反应迅速, 运行可靠	受地理位置影响大, 建设费用高
压缩空气储能	燃料消耗少, 安全系数高, 寿命长	能量密度低, 受地形条件限制
飞轮储能	储能密度大、效率高、寿命长、瞬时功率大、响应速度快、维护费用低、环境污染小、深放电、不受地理环境限制	放电时间短, 设备成本高
超导储能	能量返回率高, 能量释放速度快	设备成本高
蓄电池储能	工作电压高、体积小、储能密度高、循环寿命长, 充放电效率高, 设备成本低	有污染
超级电容器储能	能量密度高, 充放电循环寿命长, 能量储存寿命长	设备成本高

第 2 章 城市电网中发展蓄 电池储能技术的意义

随着我国经济的飞速发展，很多经济发达地区的城市电网也逐步形成以受端系统为主要特征的大容量、大机组、超高压、负荷高度密集的受电网络，电网内部电气联系较为紧密。随着城市电网的高速发展，调峰成为供电部门面临的一个重大问题，必须借助于储能技术和相关储能设备，而目前能实现容量较大的储能技术主要有抽水蓄能、压缩空气储能和蓄电池储能，前两者对地理条件有着特殊的要求，而蓄电池储能的适用范围广，适合应用在北京、上海、广州等大都市电网中。

各种储能技术在能量和功率密度等方面有着明显区别，表 2-1 显示了不同应用场合对蓄电池储能的能量和功率密度的要求。

表 2-1 不同应用场合对蓄电池储能的能量和功率密度的要求

设备类型	用户类型	功率等级	能量等级
便携式设备		1~100W	Wh
运输工具	汽车	25~100kW	100kW·h
	火车、轻轨列车	100~500W	500kW·h
	潜艇	1~20MW	10MW·h
静止设备	家庭	1kW	5kW·h
	小型工业和商业设施	10~100W	25kW·h
	配电网	MW	MW·h
	输电网	10MW	10MW·h
	发电站	10~100MW	10~100MW·h

2.1 城市电网中蓄电池储能装置的作用

蓄电池储能站可以为电网提供高峰电力，减少系统峰谷差，将系统价值低、多余的低谷电能转换为价值高、必需的高峰电能。蓄电池储能站启停迅速，具有调峰填谷、调频以及快速跟踪、备用、无功调节、黑启动等辅助服务功能，其运行灵活、可靠，在保证电网安全、稳定运行中发挥着重要作用，是城市电网重要的保安电源，同时具有节能与环保等显著的社会经济效益。

1. 调峰填谷，提供备用容量，保障电网安全稳定运行

电网运行的特点之一就是发电、供电和用电瞬时同时完成，不能大规模、长时间存储。而用电负荷总是有高有低，不可能是均衡的。峰谷差大已成为电网运行中最突出的问题之一，蓄电池储能站可以调峰填谷，改善部分火电机组的运行条件，变压荷运行稳定出力运行，从而降低火电厂的运行费用和发电成本，减少运行事故。

我国电网中绝大部分的调峰只能依靠常规电厂来承担，其中绝大部分要由燃煤电厂负担，增加煤耗，给电网安全、稳定运行带来隐患，蓄电池储能站的调峰填谷作用，可大大降低系统峰谷差，提高系统供电保证率，减小拉闸限电次数和时间，同时改善系统火电、核电机组的运行条件，使这些机组能基本上保持在高效率区稳定运行，在运行过程中不必频繁增减出力或开停机组，从而降低单位煤耗，节约燃料消耗，保证电网安全、稳定运行。

蓄电池储能站启停迅速，改变工况容易，且调节方便，其响应速度以秒为单位，而大型煤电机组从冷态到满载需要5~8h，所以蓄电池储能站是很好的事故备用电源。将蓄电池储能站作为热备用容量，来应付不可预见的发电或负荷需要，可以节省火电备用机组启动费用，并减少热能机组低出力时的运行费用。

2. 调频和调压，改善电能质量

频率是电力系统重要的质量指标之一。按照我国规定的电网频率要求，电力电网周波应控制在 $50 \pm 0.2\text{Hz}$ 。西欧的一些电力系统规定，正常时频率误差不大于 $\pm 0.1\text{Hz}$ ，随着电力系统的发展，对频率的要求必然更趋严格。

电力系统调频问题实质上是正常运行时有功功率的平衡问题。调频对于电网十分重要，无论是最高还是最低负荷运行都要求保持周波稳定，由于系统负荷时刻都在变化，有时变化剧烈，使得系统频率变化较大。为此，电网所选择的调频机组必须具备反应灵敏的特点，及时调整出力，适应负荷瞬时变化。蓄电池储能站无机械部件，仅通过电力电子器件的控制来调节输入/输出功率，具有非常好的负荷跟踪控制性能，而普通大型火电机组的增荷速度每分钟仅为额定出力的1%~2%，远不能满足系统负荷剧烈变化时爬坡的要求，蓄电池储能站具有启停迅速、运行灵活可靠，且能大范围调整其工作出力的特点，可对电力系统负荷的瞬间及短时间变化做出迅速反应，能适应负荷急剧增长和下降的变化，很好地满足系统负荷急剧变化趋势，提高电网频率合格率，保持电网的频率稳定。

电力系统中无功不足或者过剩，会造成电网电压的波动，这不仅会影响供电质量、损坏用电设备，还会直接影响电力系统的安全可靠运行。所以当系统中无功不足时，常需设置调相机，或将同步发动机改作调相运行以增发无功出力，补充系统无功不足。随着电网容量的扩大，对无功容量的要求也与日俱增。电网无功不足，会造成系统电压下降，无功多余时，会造成系统电压上升，直接威胁着电网的供电质量和安全运行，蓄电池储能电站采用电力电子器件进行整流/逆变，使得储能站