

大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析

国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组

摘要：分析了储能技术在电力系统发展和变革中的地位 and 作用，对各种类型储能技术的基本原理、技术特点、发展现状、存在的主要问题及需要突破的关键技术等进行了较全面的综述，提出了针对规模化应用储能技术的评价指标。在此基础上，分析了不同储能技术的发展和前景，并预测了其发展的路线图。

1 储能技术的定位和作用

传统能源的日益匮乏和环境的日趋恶化，极大地促进了新能源的发展，其发电规模也快速攀升。以传统化石能源为基础的火电等常规能源通常按照用电需求进行发电、输电、配电、用电的调度；而以风能、太阳能为基础的新能源发电取决于自然资源条件，具有波动性和间歇性，其调节控制困难，大规模并网运行会给电网的安全稳定运行带来显著影响。

储能技术的应用可在很大程度上解决新能源发电的随机性和波动性问题，使间歇性的、低密度的可再生清洁能源得以广泛、有效地利用，并且逐步成为经济上有竞争力的能源。

传统电网的运行时刻处于发电与负荷之间的动态平衡状态，也就是通常所说的“即发即用”状态。因此，电网的规划、运行和控制等都基于“供需平衡”的原则进行，即所发出的电力必须即时传输，用电和发电也必须实时平衡。这种规划和建设思路随着经济和社会的发展越来越显现出缺陷和不足，电网的调度、控制、管理也因此变得日益困难和复杂。

由于电网中的高峰负荷不断增加，电网公司必须不断投资输配电设备以满足尖峰负荷容量的需求，导致系统的整体负荷率偏低，结果使电力资产的综合利用率很低。为解决这些问题，传统电网急需进一步升级甚至变革。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。

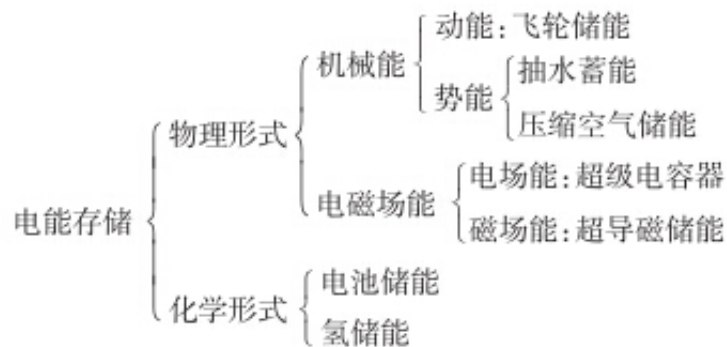
在大容量、高性能、规模化储能技术应用之后，电力将成为可以储存的商品，这将给电力系统运行所必须遵行的发电、输电、配电、用电同时完成的概念以及基于这一概念的运行管理模式带来根本性变化。储能技术把发电与用电从时间和空间上分隔开来，发出的电力不再需要即时传输，用电和发电也不再需要实时平衡，这将促进电网的结构形态、规划设计、调度管理、运行控制以及使用方式等发生根本性变革。

储能技术的应用将贯穿于电力系统发电、输电、配电、用电的各个环节，可以缓解高峰负荷供电需求，提高现有电网设备的利用率和电网的运行效率；可以有效应对电网故障的发生，可以提高电能质量和用电效率，满足经济社会发展对优质、安全、可靠供电和高效率用电的要求；储能系统的规模化应用还将有效延缓和减少电源和电网建设，提高电网的整体资产利用率，彻底改变现有电力系统的建设模式，促进其从外延扩张型向内涵增效型的转变。

2 储能技术国内外发展现状

2.1 储能技术的分类

根据能量类型的不同，储能技术基本可分为四大类别，包括基础燃料的存储(如煤、石油、天然气等)、中级燃料的存储(如氢气、煤气、太阳能燃料等)、电能的存储和后消费能量的存储(相变储能等)。本文重点分析电能存储技术，按照所存储能量的形式，可大致分为物理储能和化学储能，物理储能又可以分为机械储能和电磁场储能，如图1所示。

**图 1 电能存储技术的分类****Fig. 1 Classification of electrical energy storage**

由于储能技术具有极高的战略地位，世界各国一直都在不断支持储能技术的研究和应用。日本NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)于2009年针对各种电池储能技术进行了详细的发展路线规划，其中尤其关注锂离子电池、钠硫电池以及新型电池等技术的发展；美国能源部也于2010年底围绕各种新型与先进电池的发展与应用发布了相关技术报告，未来20年将重点关注超级铅酸与先进铅酸电池、锂离子电池、硫基电池、液流电池、功率型储能电池以及金属空气电池、先进压缩空气储能技术等研究方向。

以下将简单介绍上述几种储能技术的基本原理、特点、发展现状、目前存在的主要问题及关键技术。

2.2机械储能

2.2.1抽水蓄能

抽水蓄能电站通常由上水库、下水库和输水及发电系统组成，上下水库之间存在一定的落差。在电力负荷低谷时段把下水库的水抽到上水库内，以水力势能的形式蓄能；在负荷高峰时段，再从上水库放水至下水库进行发电，将水力势能转换为电能。

抽水蓄能技术相对成熟，设备寿命可达30~40年，功率和储能容量规模可以非常大，仅受水库库容的限制，通常在100~2000MW之间。抽水蓄能在电力系统中可以起到调峰填谷、调频、调相、紧急事故备用、黑启动和为系统提供备用容量等多重作用。抽水蓄能的最大局限性是受地理条件的限制，必须具有合适建造上下水库的地理条件。抽水蓄能电站的关键技术主要包括抽水蓄能电站主要参数的选择、工程地质技术问题以及抽水蓄能机组技术等。

2.2.2压缩空气储能

压缩空气储能系统是基于燃气轮机技术发展起来的一种能量存储系统，其工作原理是：当电力系统的用电处于低谷时，利用富余电量驱动空气压缩机，把能量以高压空气的形式存储起来；当用电负荷处于高峰时，将储气空间内的高压空气释放出来，驱动发电机发电。

自1949年StallLaval提出利用地下洞穴实现压缩空气储能以来，国内外学者围绕压缩空气储能发电技术开展了大量的研究和实践工作，目前已有2座大型电站分别在德国和美国投入商业运行，积累了大量成熟的运行经验。

近年来，关于压缩空气储能系统的研究和开发一直非常活跃，先后出现了多种形式的压缩空气储能系统。根据压缩空气储能系统的热源不同及应用规模，可以分为：梯传统使用天然气和利用地下洞穴的大型压缩空气储能电站，单台机组规模通常在100MW级及以上；梯不使用天然气和地下洞穴的新型压缩空气储能系统，单台机组规模通常在10MW级及以下。根据压缩空气储能系统是否同其他热力循环系统耦合，可以将其分为压缩空气储能—燃气轮机耦合系统、压缩空气储能—燃气蒸汽联合循环耦合系统、压缩空气储能—内燃机耦合系统、压缩空气储能—制冷循环耦合系统等。

总体来说，目前传统使用天然气并利用地下洞穴的压缩空气储能技术已经比较成熟，效率可达70%，但存在对特殊地理条件和化石燃料的依赖问题。其他几种压缩空气储能技术尚处于研究、实验室样机示范发展阶段，目前的主要问题是储能效率较低、能量密度低，其关键技术主要包括压缩机、膨胀机、储气设备、储热装置等。

2.2.3 飞轮储能

飞轮储能的基本原理是把电能转换成旋转体(飞轮)的动能进行存储。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,将电能转化为动能;在能量释放阶段,飞轮减速,电动机作发电机运行,将动能转化为电能。

飞轮储能具有功率密度很高、能量转换效率高、使用寿命长、对环境友好等优点,缺点主要是储能能量密度低、自放电率较高。

目前,中小容量的飞轮储能系统已实现商品化,大容量的飞轮储能系统也已进入工业试运行阶段。

飞轮储能的关键部件包括高速、高储能密度飞轮,高可靠性、长寿命、低损耗轴承,高速电机及其控制系统等。

2.3 电化学储能

电化学储能是通过化学反应将化学能和电能进行相互转换以存储能量的技术。电池是能量转换的主要载体。电池的类型很多,其内部材料体系和电化学反应机理各异,但是,它们内部的核心结构却基本相同,都是由正极、负极、隔膜和电解质组成。电池内部电势较高的一极称为正极,电势较低的一极称为负极。在充电过程中,电池正极上的活性材料发生氧化反应,失去电子。同时,阳离子通过电解质在电场的作用下向负极移动。失去的电子沿着外电路流向负极,并在负极上与负极活性材料结合,发生还原反应。电池的放电过程与充电过程正好相反。

电化学储能作为电能存储方式的一个重要分支,其特点在于功率和能量可根据不同应用需求灵活配置,响应速度快,不受地理等外部条件的限制,适合大规模应用和批量化生产。但这种储能技术目前存在的主要问题是电池的使用寿命有限、成本高,这也是电化学储能技术目前需要重点突破的方向。

不同的电池类型有各自的特点,这就为大规模储能应用的不同需求提供了多样化的选择,目前研究得较多的主要有锂离子电池、钠硫电池、全钒液流电池、钠/氯化镍电池、铅酸电池、镍氢电池、锂硫电池、锂空气电池等。

传统的电化学电池以铅酸电池为代表,具有150多年的发展和应用历史,是目前备用电源领域应用规模最大的电池类型,其技术和产业发展已非常成熟。随着电动汽车以及大规模储能产业的兴起,铅酸电池技术也有了新的发展,典型代表有铅碳电池。

随着可再生能源发电的快速发展,对大规模储能技术提出了更高要求,出现了以钠硫电池和全钒液流电池为代表的针对大规模储能应用而开发的电池。钠/氯化镍电池则是在钠硫电池的基础上发展起来的。随着便携电子产品的发展,出现了镍氢电池和锂离子电池,目前这种电池的产业发展已相对成熟。随着当前电动汽车的发展,锂离子电池在材料和制造工艺上有了很大的发展。这也促进了锂离子电池技术的进步,为大规模储能应用奠定了坚实的技术基础和产业基础。此外,为满足电动汽车未来发展需求而开发的锂硫电池和锂空气电池,也有可能成为未来大规模储能应用中潜在的或备选的技术。

最近,美国麻省理工大学一个研究团队提出了一种新的化学储能技术,研究出液态金属电池。实验室的研究结果表明,这种电池具有成本低、寿命长、效率高、储能密度大的优点,可望满足电网能量存储的要求。这项技术目前在国际上得到了广泛关注。

2.4 电磁场储能

2.4.1 超导磁储能系统

超导磁储能系统是利用超导线圈通过变流器将电网能量以电磁能的形式存储起来,需要时再通过变流器将存储的能量转换并馈送给电网或其他电力装置的储能系统。超导磁储能系统主要组成单元包括超导储能磁体、低温系统、电力电子变流系统和监控保护系统。超导磁储能系统是一种利用超导体(线圈)直接存储电磁能的系统,在超导状态下超导线圈无焦耳热损耗,其电流密度比一般常规线圈高1至2个数量级,因此具有响应速度快、转换效率高(不小于95%)、功率密度高等优点,可以实现与电力系统的实时大容量能量交换和功率补偿。

超导磁储能系统不仅可用于解决电网瞬间断电对用电设备的影响,而且可用于降低和消除电网的低频功率振荡,改善电网的电压和频率特性,进行功率因数的调节,实现输配电系统的动态管理和电能质量管理,提高电网应对紧急事故和稳定性的能力。

超导磁储能目前存在的主要问题如下：一是目前超导材料成本仍然很高；二是用于产生超导态低温条件的冷却装置等关键设备还没有完全实现国产化；三是还存在超导磁体的失超保护等关键技术问题，尚需深入研究和解决。

2.4.2 超级电容器储能

超级电容器是近年来受到国内外研究人员广泛关注的一种新型储能元件。按照储能原理可以分为双电层电容器和法拉第准电容器两大类，其中，后者目前通常被称作电化学电容器。

双电层电容器的基本原理是利用电极和电解质之间形成的界面双电层来存储电能。当电极和电解质溶液接触时，由于库伦力、分子间力或者原子间力的作用，使固液界面出现稳定的、符号相反的两层电荷，称为界面双电层。双电层电容器的储能是通过使电解质溶液进行电化学极化来实现的，因此，这种电容器工作时并没有发生电化学反应。

法拉第准电容器是在电极表面或体相中的二维或准二维空间上，进行电活性物质欠电位沉积，产生化学吸脱或氧化还原反应，产生与电极充电电位有关的电容。对于法拉第准电容器，其存储电荷不仅包括存储在双电层上的电荷，而且包括电解质溶液中离子在电极活性物质中由于氧化还原反应而存储于电极中的电荷。

超级电容器具有充放电速度快、功率密度高、循环使用寿命长、环境友好、工作温度范围宽等优点。这种电池目前的主要问题是能量密度低、成本高。

关键技术主要包括电极材料及电解质溶液关键材料技术、电压均衡技术等。

2.5 熔融盐蓄热储能

熔融盐蓄热储能是利用熔融盐使用温区大、比热容高、换热性能好等特点，通过传热工质和换热器加热熔融盐将热量存储起来，需要时再通过换热器、传热工质和动力泵等设备将存储的热量取出以供使用的储能方法。

熔融盐蓄热储能主要应用在太阳能热发电系统中。由于中国太阳能资源丰富的西部地区受地理条件、气候特征的限制，存在低温下的熔融盐工质保温等技术难题，因此熔融盐蓄热储能的发展和应用具有相当大的不确定性，主要问题包括熔融盐工质的选用和熔融盐蓄热关键设备的制造。

3 大规模储能技术的评价指标

储能技术能否在电力系统中得到推广应用，取决于是否能够达到一定的储能规模等级、是否具备适合工程化应用的设备形态，以及是否具有较高的安全可靠性和技术经济性。

未来广泛应用于电力系统的储能技术，至少需达到兆瓦级/兆瓦时级的储能规模。目前，抽水蓄能、压缩空气储能和电化学电池储能可达到兆瓦级/兆瓦时级的储能规模，而飞轮储能、超导磁储能及超级电容器等功率型储能技术很难达到兆瓦时级。具体来说，抽水蓄能和大型压缩空气储能可达到数百兆瓦级/数百兆瓦时级；电池储能和不采用地下洞穴和天然气的新型压缩空气储能能够达到兆瓦级/兆瓦时级。因此，抽水蓄能、压缩空气储能和电池储能等能量型储能技术是大规模发展储能技术的首选。

储能系统能否以设备形态运用于电力系统是决定其能否得到大规模推广应用的重要因素。也就是说，投入应用的储能系统应易于批量化和标准化生产，便于控制与维护，可以作为电力系统中的一类设备，而不是以工程形态出现。在众多储能方式中，电池储能是契合设备形态需求较好的一种储能技术。

安全与可靠始终是电力系统运行的基本要求，兆瓦级/兆瓦时级规模的储能系统对其安全与可靠性提出了更高的要求。能否在此规模及更大规模下安全、可靠地运行，将是评价一种储能技术能否大规模应用的指标之一。储能系统的安全问题与储能系统本身的材料体系、结构布局以及系统设计中所考虑的安全措施等因素相关。

技术经济性是衡量储能技术能否得到推广应用的另一个根本性因素。以下分析不同类型储能的技术水平和经济成本。

3.1 技术水平

要评判一种储能技术是否能够得到推广应用，首先应看该技术在主要技术指标上能否实现突破。

转换效率和循环寿命是2个重要参数，它们影响储能系统的总成本。抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、超级电容器储能、液流电池储能等具有较长的循环寿命；超导磁储能、钠硫电池储能、锂离子电池储能等具有较高的转换效率；铅碳电池作为在传统铅酸电池基础上发展起来的新型铅酸电池，也有望在循环寿命上实现较大的突破。

其次，在具体应用中，影响储能系统比能量的储能设备体积和质量也是应该考虑的因素。体积能量密度影响占地面积和空间，质量能量密度则反映了对设备载体的要求。在对土地资源要求不高的场合，如风电场，能量密度不是主要考虑的因素，在这种情况下，具备频繁充放电切换响应能力的全钒液流电池体系就可以胜任；但在电动汽车及城市商业设施等土地资源紧张的应用场合，能量密度的大小就是重要的必须考虑的因素。锂离子电池和钠硫电池具有较好的比能量密度，其他化学电池次之，而超导磁储能、超级电容器、飞轮储能在这方面的性能则偏低。

3.2 经济成本

在现有电价机制和政策环境下，单就储能技术的成本而言，远不能满足商业化应用的要求。以风电应用为例，配套的储能设施单位千瓦投资成本几乎都超出了风电的单位千瓦投资成本，同时，大规模储能系统的应用还要考虑相应的运行维护成本。因此，所关注的规模化推广的储能技术必须具备经济前瞻性，也就是说应该具备大幅降价的空间，或者从长期来看具有一定的显性经济效益，否则很难推广普及。对于隐性经济效益，由于缺乏具体实例，目前暂时无法给出定量的分析结论。对于显性经济效益分析，如果大规模储能系统应用于削峰填谷，可以采用峰谷电价差收益与单位循环寿命造价两者之间的差值关系来衡量储能技术的经济性。单位循环寿命造价由单位千瓦时储能系统造价、储能系统全周期循环的寿命损耗、储能系统的能量转换效率、储能系统运营成本以及储能系统外围平衡费用等构成。

初步估算，当储能系统的初始投资降至1500元/(kW·h)及以下时，全周期循环寿命可达5000次以上，峰谷电价差达到0.5元/(kW·h)或更高时，可以达到盈亏点。如果是针对新能源接入，以风电为例，则其显性经济效益可以通过因配置储能系统而减小的弃风量所带来的风电场发电收益与单位循环寿命造价两者之间的差值关系来衡量。

对于液流电池，随着国产化进程包括对国外公司的收购，预计全钒液流电池的成本在2015年可降至8000元/kW，全周期寿命可大于15000次，而每千瓦时的成本会随着容量规模的增大而下降得更快，预期目标为600~1000元/(kW·h)。近2年锂离子电池成本下降较快，随着技术进步和规模化应用，2015—2020年的预期目标为初始成本降至

1500元/(kW·h)，全充放电循环寿命不小于5000次。铅酸电池具有产业链完整、回收价值高、原材料丰富等优势，因此铅碳电池等新型铅酸电池一旦技术成熟，预期未来在经济性上将具备一定的优势。对于钠硫电池，考虑到生产厂家很少，不利于形成竞争格局，因此很难判断其成本的变化趋势，预计短期内价格不会有太大的降幅。

4 大规模储能技术发展及应用路线图

根据以上对大规模储能技术发展及应用前景的分析，以及适合规模化应用的储能技术评价指标和选择依据的分析，本文总结出了大规模储能技术在中国发展及应用的路线图，如图2所示。

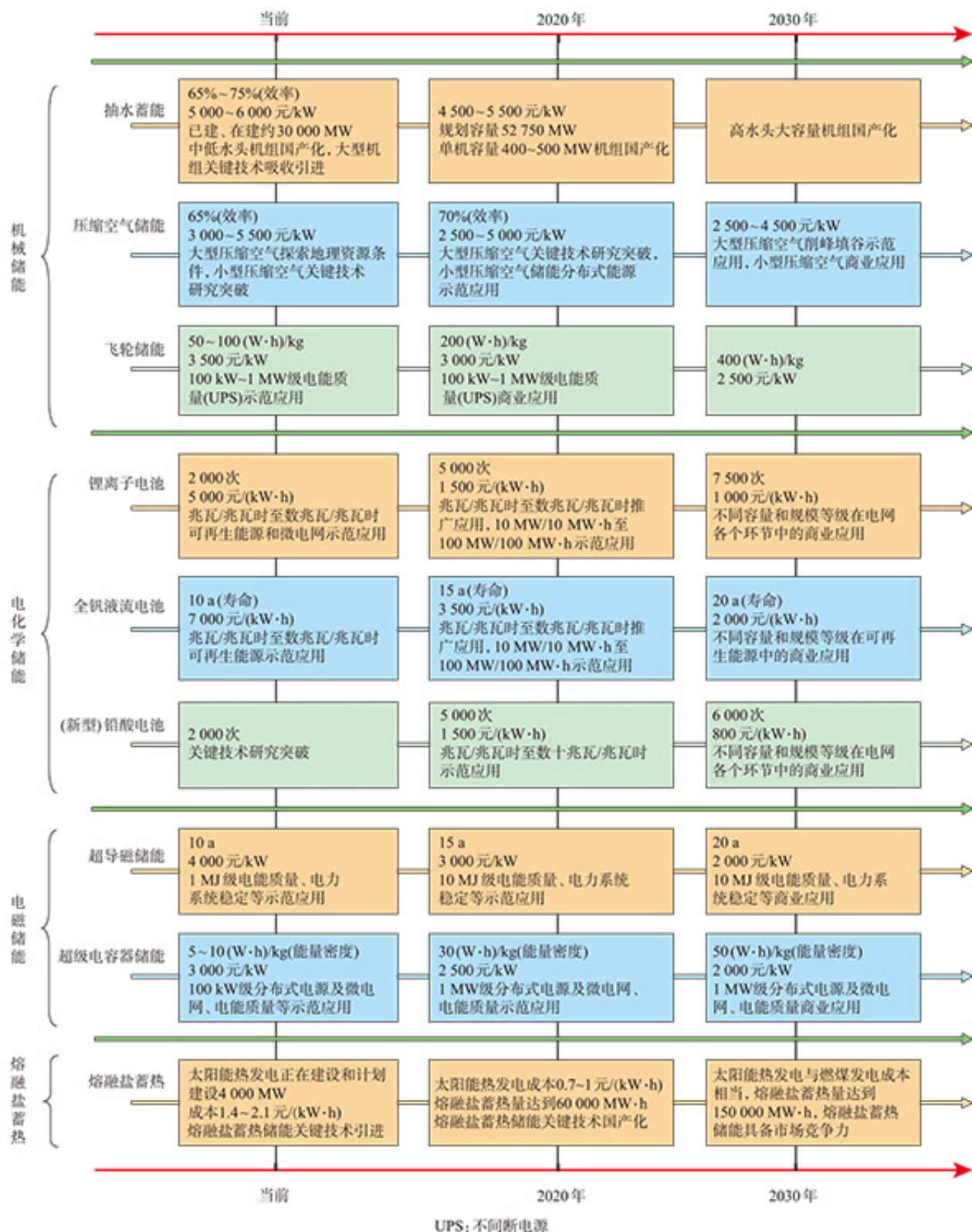


图 2 大规模储能技术在中国发展及应用的路线图

Fig. 2 Roadmap for development and application of large-scale energy storage technologies in China

对于抽水蓄能技术, 国内抽水蓄能电站的土建设计和施工技术已经处于世界先进水平, 机组的设备国产化进程正在加快, 设备安装水平也在大幅度提高。因此, 从技术、设备和材料等方面来看, 已经不存在制约国内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。从路线图上看, 中国短期内还无法掌握高水头、大容量抽水蓄能机组的制造技术, 但从国内抽水蓄能电站的资源储备情况来看, 只有少数几个电站涉及高水头、大容量机组设备制造技术, 绝大部分电站的机组设备都在技术成熟范畴之内。

对于压缩空气储能技术，常规压缩空气储能技术已经比较成熟，但存在对大型储气室、化石燃料依赖等问题，必须在地形条件和供气有保障的情况下才可能得到大规模应用，未来发展主要是探索适宜建设压缩空气储能电站的地理资源。不采用地下洞穴和天然气的新型压缩空气储能系统结构简单，功能灵活，能够摆脱传统压缩空气储能系统对特殊地形的依赖，可以用于备用电源和分布式供能系统等，未来可开展相应的示范应用，对其功能、性能等作进一步探索、验证和评估。另外，根据国家工商联储能专委会《储能产业白皮书2010》的预测，由于常规压缩空气储能系统已商业运行30多年，其设计、加工、安装和运行均比较成熟，其成本在未来短期内大幅下降的可能性很小，将保持在2500~5500元/kW的水平。

对于电化学电池储能技术，根据前面的分析，传统铅酸电池和镍氢电池很难满足以可再生能源发电为代表的大规模储能应用的需求。钠硫电池、钠/氯化镍电池、锂硫电池和锂空气电池的应用前景还不明确。而锂离子电池、全钒液流电池和铅碳电池等新型铅酸电池在未来的10~20年间将逐步满足电力系统的要求，并进入广泛的工程示范应用阶段，技术路线图给出了这3种电池储能当前、2020年和2030年的寿命与成本预期目标。

对于飞轮储能、超导磁储能和超级电容器等功率型储能技术，未来的发展目标主要是不断提高能量密度以及降低成本，技术路线图中重点给出了其能量密度的预期目标。

对于熔融盐蓄热储能技术，其未来发展和应用前景与太阳能热发电密切相关。目前的太阳能热电站一般都采用蓄热和化石能源发电互补的方式实现24h连续运行，其中，熔融盐蓄热维持满负荷发电运行的时间在3~8h。对于一个50MW的槽式太阳能热电站，维持太阳下山后连续发电7.5h需要的蓄热量大约是1000MW·h。按照这种配置方式，结合中国太阳能热发电的相关发展规划，技术路线图给出了熔融盐蓄热在国内太阳能热电站中的应用情况：在2020年熔融盐蓄热量将达到60000MW·h，在2030年将达到150000MW·h，届时，熔融盐蓄热及太阳能热发电也将开始具备市场竞争力。

综上所述，从技术路线图可看出：在近10年内，中国大规模储能技术仍然主要依靠抽水蓄能；在未来10~20年间，电化学储能中的锂离子电池、液流电池和铅酸电池将逐渐发挥重要作用并进入商业应用阶段，飞轮储能将在改善电能质量方面实现商业化应用；到2030年，超导储能将在改善电能质量、增强电力系统稳定性方面得到商业化应用，超级电容器储能将在改善电能质量、微电网方面得到商业化应用；不采用地下洞穴和天然气的新型压缩空气储能将在储能领域占一席之地，大型压缩空气储能将在具备地理条件的地区获得示范应用，而熔融盐蓄热也将和太阳能热发电一起开始具备市场竞争力。

5结论

1)储能技术是未来能源结构转变和电力生产消费方式变革的战略性支撑技术，可以解决可再生能源发电的间歇性和随机波动性问题，缓解高峰负荷供电的需求，提高现有电网设备的利用率和电网运行效率；还可以用来应对电网的突发性故障，提高电能质量，满足经济社会发展对优质、安全、可靠供电的要求。

2)目前，大容量储能技术除抽水蓄能技术相对成熟外，其他储能方式大多处于实验示范阶段甚至起步研究阶段，尚有诸多关键技术问题亟待突破。

3)规模等级、设备形态、技术水平、经济成本是评价储能技术能否得到推广应用的主要评价指标。

从技术角度来看，储能技术的长寿命、低成本、高安全性是目前更为关注的问题。

4)综合考虑各种因素，电化学电池储能和新型压缩空气储能是具有广泛应用前景和值得重点关注的储能技术类型。其中，锂离子电池、全钒液流电池、铅碳电池和其他新型电池是应该重点攻关的大容量储能技术类型。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/89991.html>