储能在能源安全中的作用

常乐，张敏吉，梁嘉，孙洋洲

(中海油新能源投资有限责任公司，北京100015)

摘要：世界各国在积极发展可再生能源，而很大部分可再生能源用于发电。因此“能源安全”的范畴与重心将从20世纪的以石油安全为主逐步转向21世纪的以电力安全为主。确保安全、高质量供电，同时维持电力供需平衡是电力系统面临的持续挑战。发展新能源电力为常规电力机组的变负荷能力提出新的挑战：要求电力机组具备更快的变负荷调节能力；电力机组变负荷目标的不确定性增大；电力机组负荷调节范围更大。在电力系统中采用集成储能模块是解决电力系统变负荷和新能源电力接入产生问题的有效措施。储能总的作用是实现新能源电力上网、保持电网高效安全运行和电力供需平衡。储能系统的具体功能有三种：提高电能质量、提供桥接电能、能量管理。电力储能技术有抽水蓄能技术、压缩空气储能技术、超导储能技术、超级电容器储能技术、电化学储能技术、复合储能技术。对我国发展储能产业提出以下建议：从宏观战略层面制定储能发展规划；出台利于储能技术产业化的激励政策与机制；发布储能相关技术标准和管理规范，建立储能装置回收管理机制；加强储能技术研发与示范；建立储能产业链，降低成本；探索优化商业运营模式，加快储能技术的市场化步伐。

1“能源安全”的新变化趋势

绿色低碳、节能减排已成为世界能源发展的方向，世界各国在积极发展可再生能源，其中很大部分可再生新能源用于发电。与此同时，“能源安全”的范畴与重心将有所转移——从20世纪的以石油安全为主逐步转向21世纪以电力安全为主，这种转变将带来新的挑战。石油市场的供需相对简单，而电力由于不易储存，电力市场将面临更为复杂的供需平衡挑战。此外，电力市场的供应侧将呈现多种发电技术并存的现象，随着越来越多的不稳定新能源电力(大型水电和生物质发电除外)的引入，电网的供电安全性受到威胁，防范与避免“绿色大停电”将是电力市场面临的一个新任务。

确保安全、高质量供电，同时维持电力供需平衡是电力系统面临的持续挑战。社会的用电需求是实时变化的，昼夜和季节性用电负荷存在峰谷差，而电力供需平衡的常规调节方式是通过改变发电机组的出力来适应需求变化。在役发电机组可分两类：承担基本负荷的机组(下称：基荷机组)和变负荷机组。基荷机组的出力基本维持不变，而变负荷机组的出力则随需求的变化而变化。为分析新能源电力对常规电力系统的影响，将新能源发电量视为所减少的用电负荷，此时常规发电机组需要提供的电量等于原用电负荷减去新能源机组的发电量，文中定义为“剩余负荷”。对比“原用电负荷”和“剩余负荷”曲线，可说明新能源电力对常规电力系统的影响。图1是美国Texas州某地区2005年的双周用电负荷与风力发电数据[1]。

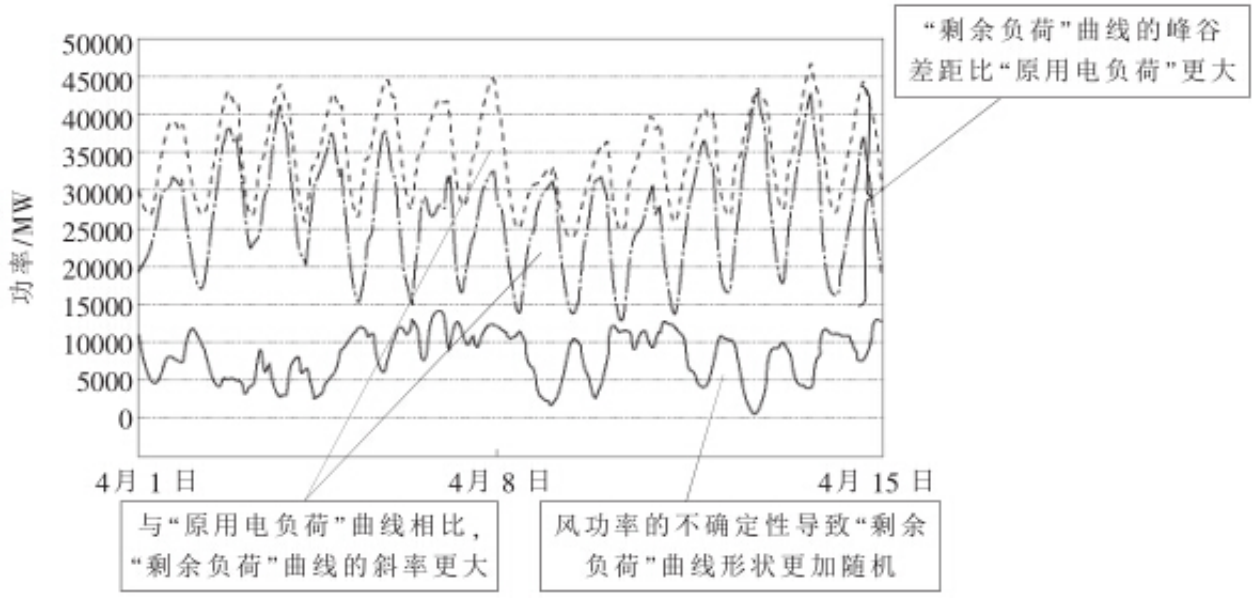

图1 新能源电力对常规电力系统的影响

----原用电负荷；—— 风功率；-·- 剩余负荷

从图1可见，发展新能源电力为常规电力机组的变负荷能力提出新要求：①与“原用电负荷”曲线相比，“剩余负荷”曲线的斜率更大，即要求电力机组具备更快的变负荷调节能力；②风功率的不确定性导致“剩余负荷”曲线形状更加随机，电力机组变负荷目标的不确定性增大；③“剩余负荷”曲线的峰谷差距比“原用电负荷”更大，意味着电力机组负荷调节范围将更大，而当用电负荷降低到一定程度时，将导致基荷机组运行于部分负荷工况，影响机组的发电效率和经济性。

在现实情况下，新能源电力的发展还将面临其他约束。以丹麦为例，该国拥有大规模的风电装机，同时采用热电联产系统供暖。在夜间，热电联产机组必须保持运转以供热，而联产所发电力已足以满足夜间较低的电力需求，这就使得大量风电无法上网，造成能源浪费[1]。

2储能在未来电力系统中的作用

常规电力系统可简化为如图2所示，系统包括集中式发电、电力输配、终端用户3个环节，系统运转模式是“即用即发”，即发电端根据用户端负荷的变化来调节发电量，此种运转模式面临着非常苛刻的变负荷要求。

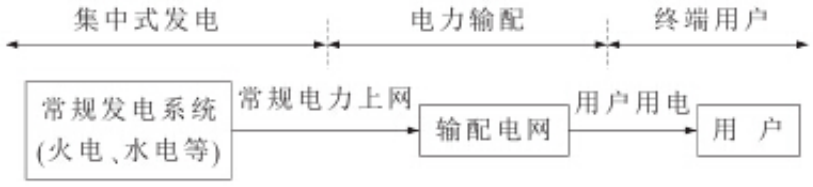

图2 常规电力系统示意图

未来的电力系统要包含可再生新能源电力，而新能源电力的大比例接入则会出现前面提到的潜在问题。如图3所示，在电力系统中采用集成储能模块是解决电力系统变负荷和新能源电力接入产生问题的有效措施。

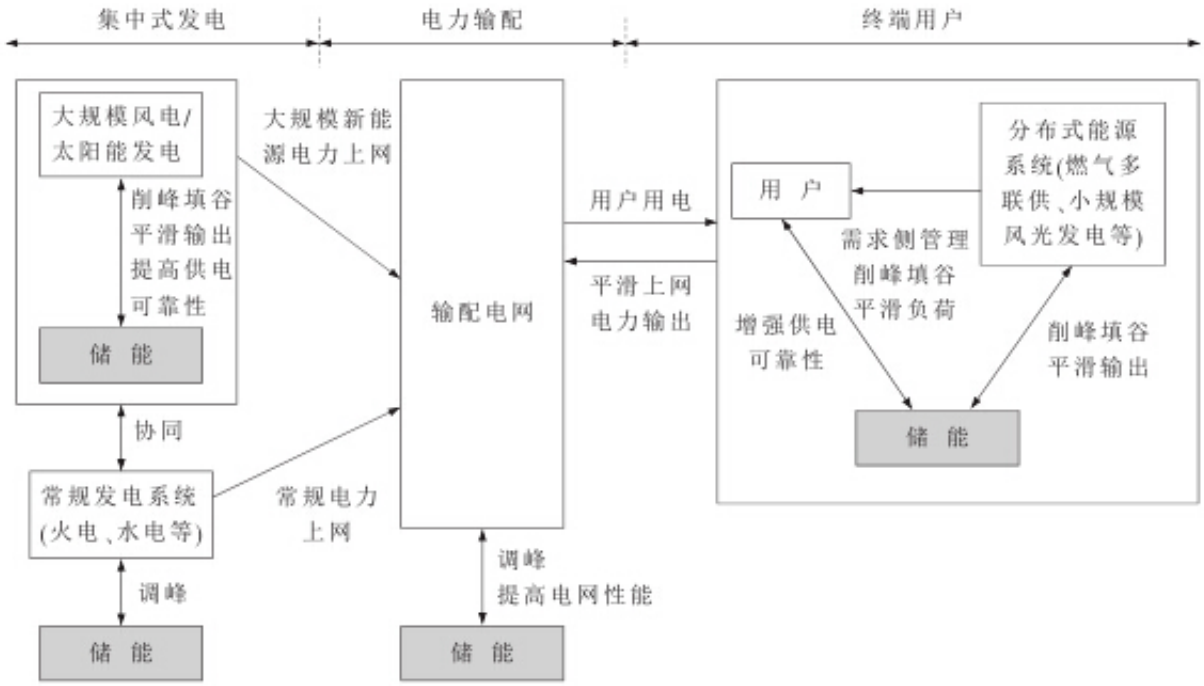

图 3 集成储能技术的未来电力系统示意图

储能可作用于电力系统的不同环节，总体的作用是实现新能源电力上网、保持电网高效安全运行和电力供需平衡。针对不同环节，储能的作用有所区别：①在大规模新能源发电环节，储能系统有利于削峰填谷，使不稳定电力平滑输出；储能系统通过功率变换装置，及时进行有功/无功功率吞吐，保持系统内部瞬时功率的平衡，维持系统电压、频率和功角的稳定，提高供电可靠性。②在常规能源发电环节，储能系统可替代部分昂贵的调峰机组，实现调峰的功能，还能解脱被迫参与调峰的基荷机组，提高系统效率。③在输配电环节，储能系统能起到调峰和提高电网性能的作用。在电网环节设置合适规模的储能站，可以增强电网的抗冲击能力，提高调解幅度，更好地实现供需平衡。④设置于终端用户的储能系统则通过电力储放来提高供电可靠性，尤其在发生非预期停电等事故情况下；可进行需求侧管理，即在分时计价的地区，在低价“谷电”时刻买入网电充入储能设备，在高价“峰电”时刻释放储能设备中的电力，实现既节约用户电费花销，又能削峰填谷、平滑用电负荷，在一定程度可缓解电网调节压力。常规的终端用户只是电力的消费者，而随着分布式能源系统的推广，未来的终端用户也是电力的供应者，用户和电网之间存在双向能量流动。当终端用户存在剩余电力上网时，也会出现大型新能源发电机组的电力波动问题，因此，设置于终端用户的储能系统还将起到提高分布式电源电能上网质量、平滑输出等作用。

概括而言，对应于不同的适用场合储能系统的功能有3种：①提高电能质量；②提供桥接电能；③能量管理。提高电能质量包括维持系统暂态稳定性和频率、电压调节等，该类功用需要储能设备快速反应(1s之内)，对储能设备放电持续时间(能量维度)的要求在分钟量级。提供桥接电能是指在电能消失或者不同电能来源之间的转换过程中，提供过渡电能的能力，应用场合为电力应急储备、变负荷、电力系统故障等，该类功用需要储能设备的反应时间在秒到分钟范围内，对放电持续时间的要求可长达小时量级。能量管理则对应着长时间内的能量转移，应用场合包括电网削峰填谷、终端用户电力管理等等，该类功用对放电持续时间的要求长达几个小时。

在电力系统中引入储能模块，在不同时间点进行电能吞吐，相当于在电力系统中添加了一个可调节维度，最终实现整个系统的高效、低成本和可靠运行。此外，电力储能在离网孤岛终端的使用也是其重要的应用场合，通过设置适当规模的电力储能装置，在用电低谷时充电、用电高峰时放电，会降低离网孤岛终端所需匹配的发电能力/容量，同时使发电机组维持运行在稳定工况，提高整个系统的能量效率和经济性能，图4说明了其原理。

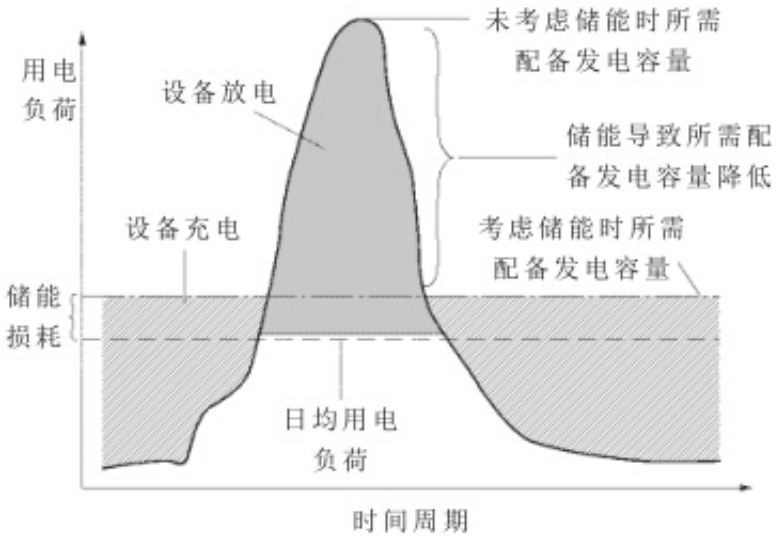

图 4 储能设备降低孤岛发电装机容量的原理

3电力储能技术的内涵、分类与应用

从本质上而言，电力储能是将电能在t1时刻、a1地点充入，在t2时刻、a2地点释放，因而，电力储能技术可解决电能供需在时间和空间上不匹配的矛盾，是提高能源综合利用效率的有效手段。

电力储能技术有多种类型，可按照适用场合和电能转化类型等分类。按照后者，因电能可转换为势能、动能、电磁能、化学能等形态存储，电力储能技术可分为物理、电磁和电化学3种类型。物理储能包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能；电磁储包括超导储能和超级电容器储能；电化学储能包括铅酸、镍镉、锂离子、钠硫和液流等电池储能。

3.1抽水蓄能技术

抽水蓄能系统要求配备上下游两个水库，负荷低谷时段设备工作在电动机状态，将下游水库的水抽到上游水库；负荷高峰时设备工作于发电机状态，利用储存在上游水库中水的势能发电。建站地点力求发电库容大、渗漏小、压力输水管道短等。抽水储能电站可以建造为不同容量，能量释放时间可从几小时到几天，综合效率在70%~85%之间。抽水储能是在电力系统中应用最为广泛的一种储能技术，其应用领域包括削峰填谷、调频、调相、紧急事故备用、黑启动和提供备用容量等[2~4]。考虑到未来海上风电等新能源大规模利用，可依托特定的地理条件，如选择三面环山的海湾作为水库坝址，围海建立大型抽水蓄能电站。

抽水蓄能是目前唯一达到GW级的储能技术，其不足之处是需要占用大量土地和水资源，但因技术成熟等优势，仍然是首选的电力储能方式。

3.2压缩空气储能技术

压缩空气储能技术(CAES)通常匹配燃气轮机使用，利用负荷低谷时的剩余电力压缩空气，并储藏在高压密封设施内，在用电高峰将其释放参与燃气轮机发电。在燃气轮机发电过程中，燃料转化的大部分轴功被用于压缩空气，采用CAES的系统因减少了空气压缩耗能，其燃料消耗要比常规燃气轮机少，同时也降低了压缩机投资。目前，储气站采用报废矿井、沉降在海底的储气罐、山洞、废弃油气藏和新建储气井等多种模式，其中最理想的是水封恒压储气站，能保持输出恒压气体，保障燃气轮机的稳定运行[2, 5, 6]。

CAES技术响应速度快，主要用于削峰填谷、平衡负荷、频率调制和发电系统备用等。未来对CAES技术的改进围绕减小储存压缩空气场地对周边环境的影响和降低化石燃料消耗等方面[1]。

3.3飞轮储能技术

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。在负荷低谷时，飞轮系统消耗电能，带动飞轮高速旋转，以动能的形式储存能量，完成电能—机械能的转换；当负荷高峰时，高速旋转的飞轮作为原动机拖动发电机发电，完成机械能—电能转换的能量释放过程。

飞轮储能能量效率在90%以上，使用寿命长达20年，工作温区为-40~50°C，无噪声，无污染，维护简单，可连续工作，模块式组合后可以达到兆瓦级。

输出持续时间为数分~数小时，主要用于不间断电源/应急电源、电网调峰和频率控制等[2, 7~9]。

3.4超导储能技术

超导储能系统(SMES)利用超导体制成的线圈储存磁场能量，功率输送时无需能源形式的转换，具有响应速度快(毫秒级)、转换效率高(≥96%)

、比容量(1~10W · h/kg)/比功率(104~105kW/kg)大等优点，可以实现与电力系统的实时大容量能量交换和功率补偿。SMES在技术方面相对简单，没有旋转机械部件和动密封问题。SMES可以满足输配电网电压支撑、功率补偿、频率调节、提高系统稳定性和功率输送能力的要求[2, 10, 11]。

SMES的发展重点是基于高温超导涂层导体研发适于液氮温区运行的MJ级系统，解决高场磁体绕组力学支撑问题，并与柔性输电技术相结合，进一步降低成本，结合实际系统探讨分布式SMES及其有效控制和保护策略[2]。

3.5超级电容器储能技术

超级电容器根据电化学双电层理论研制，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，电荷将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，加之采用特殊电极结构，电极表面积成万倍增加，从而产生极大的电容量。但由于电介质耐压低，存在漏电流，储能量与保持时间受限，必须串联使用，以增加充放电控制回路和系统体积。

超级电容器历经多年发展，已形成系列产品，系统最大储量达30MJ。超级电容器价格较高，在电力系统中多用于短时间、大功率的负载平滑和电能质量高峰值功率场合，如大功率直流电机的启动支撑、动态电压恢复器等，在电压跌落和瞬态干扰期间提高供电质量[2, 12]。

3.6电化学储能技术

电化学储能是指铅酸、镍氢、镍镉、锂离子、钠硫和液流等电池储能。电池储能系统是利用电池正负极的氧化还原反应进行充放电，表1为部分电池储能系统目前达到的性能指标[2, 13~22]。

表 1 部分电池储能系统的性能指标

电池种类	比能量/(Wh·kg^{-1})	比功率/(W·kg^{-1})	循环寿命/次	充放电效率,%	自放电/(%·月$^{-1}$)
铅 酸	35~50	75~300	500~1500	≤80	2~5
镍 镉	40~75	150~300	300~2000	≤70	5~20
锂离子	150~200	200~315	1000~5000	≤95	0~1
钠 硫	150~240	90~230	1000~5000	≤90	
全钒液流	80~130	50~140	>10000	≤80	

注：此表中各指标数值为文献中出现过的数值的汇总。

铅酸电池在高温下寿命缩短，具有较低的比能量和比功率，但价格便宜、可靠性好、技术成熟，在电力系统正常运行时为断路器提供合闸电源，在发电厂、变电所供电中断时发挥独立电源的作用，为继保装置、拖动电机、通信、事故照明提供电力。但铅酸电池在制造过程中可能存在环境污染。

镍镉电池循环寿命长，但随着充放电次数的增加容量会减少，荷电保持能力仍有待提高，因存在重金属污染已被欧

盟组织限用。

锂离子电池比能量/比功率高、自放电小、环境友好，但由于工艺和环境温度差异等因素的影响，电池的系统指标往往达不到单体水平。大容量集成的技术难度和生产维护成本是锂离子电池在电力系统中规模化应用的阻碍。近年来，锂离子电池在电动车领域越发流行，各大汽车公司纷纷推出锂离子电动车产品，电动车装载的锂离子电池退役后，可将其应用于电力系统固定式储能，在降低总使用成本的同时，也实现锂离子电池的梯级利用。

钠硫电池储能密度高，体积可减少到普通铅酸蓄电池的1/5，系统效率可达80%以上，单体寿命已达15年，且循环寿命最高可达5000次，便于模块化制造、运输和安装，建设周期短，可根据用途和建设规模分期安装，适用于城市变电站和特殊负荷。

液流电池有钒/溴、全钒、多硫化钠/溴等多个体系，高性能离子交换膜的出现促进了其发展。液流电池电化学极化小，能够100%深度放电，储存寿命长，额定功率和容量相互独立，可以通过增加电解液的量或提高电解质的浓度达到增加电池容量的目的，并可根据设置场所的情况自由设计储藏形式及随意选择形状。

3.7复合储能技术

每种电力储能技术均有其优势与劣势，然从实际应用角度出发，单一的储能技术很难同时满足能量密度、功率密度、储能效率、使用寿命、经济成本等多种要求，若将两种或两种以上性能互补的储能技术相结合，组成“复合储能”，则有可能实现较好的总体性能。在电力应用中，要满足系统的稳定控制、电能质量改善和削峰填谷等不同时间尺度上的需求，可以将飞轮储能、超导储能或超级电容器等功率密度高、储能效率高、循环寿命长的技术，与铅酸电池、液流电池或钠硫电池等能量密度高但受制于电化学反应过程的技术相结合，以最大程度地发挥各种储能技术的优势。日本Wakkanai在建的5MW并网光伏示范项目拟采用1.5MW钠硫电池和1.5MW超级电容器的复合储能技术[9]。

4讨论与建议

4.1从更高的系统层次讨论储能技术

储能技术只是电力系统调节的诸多可选方案之一，最终的选择需要权衡利弊、系统比较。与储能类似功能的方案还包括：①按照电力需求的变化，改变发电机组出力、缩减新能源发电量等电力供给侧调节方案；②按照电力供应的变化，调节电力需求、增加新负荷等电力需求侧调节方案，而储能技术则兼具供给侧与需求侧的双重作用。每种方案对应的成本和收益不同，甚至对同一种方案，在不同情景下所呈现的利弊效果也可能不同。因此，在新能源电力不断增加的电力系统中，选择何种方案将对应一个“系统总成本最小”的数学优化问题。

储能设备的配置需要在更高的系统层次进行集成考虑，而不应局限在某一特定的单元模块。对于某一发电单元，其所发电力可能呈现不稳定的时变曲线，尽管储能技术可平滑该单元的功率输出，但在更高的系统范围内，有可能出现单元A匹配的储能设备在放电的同时，单元B匹配的储能设备正在充电，这意味着设备冗余、成本增加、效率损失。

从系统层次来讲，多个不稳定单元的叠加集成有可能对应着一个相对平滑的输出或负荷曲线，这会减少整个系统层次的储能需求，提高整个系统的效率和经济性。

未来的电力系统将集成包括储能在内的多种系统调节技术，而其中的每个储能设备都将是一个共有资源，服务于整体电力系统，并非系统中的某特定单元。

4.2对我国发展储能产业的建议

电力安全是国家能源安全的重要组成，储能是保证电力安全、低碳、高效供给的重要技术，是支撑新能源电力大规模发展的重要技术，也是未来智能电网框架内的关键支撑技术。对我国发展储能产业提出以下建议：

①从宏观战略层面制定储能发展规划。发展储能产业，需要国家宏观层面的支撑，从顶层设计阶段就纳入总体发展规划，并且和与之发展密切相关的行业规划相匹配，如新能源和智能电网发展规划等，以形成统一步伐向前推进。

②出台利于储能技术产业化的激励政策与机制(如峰谷电价、投资补贴、税收抵扣等)，引导社会资金向储能产业倾斜，使得储能项目投资能够获得回报。我国目前只有少数地区制定了分时电价，缺少国家层面的峰谷电价政策。在当前的储能技术水平与发展规模下，现阶段的储能项目难以实现经济回报。政府可借鉴欧、美、日等国，制定我国的国

家峰谷电价政策和储能相关的投资与税收优惠政策，鼓励电力企业积极应用储能技术。

③发布储能相关技术标准和管理规范，建立储能装置的回收管理机制。政府应规范和出台电网企业对新能源电力接收的技术标准和大容量储能站的设计、建设和运行监测管理标准，解决新能源发电和电网管理之间的矛盾，推动电力企业主动采用储能技术。同时，为避免储能装置的二次污染并实现储能系统的循环梯级利用，应配套建立储能装置的回收管理机制。

④加强储能技术研发与示范。我国储能技术发展落后于应用需求，政府应加强对储能技术研发与示范的资金支持力度，鼓励原始创新，探索开发适合中国实际情况的储能技术与产业化路径。一是支持储能技术基础研究，及时提出并解决问题，实现自主知识产权，进行科技储备；二是在基础研究之上，开展不同类型的示范项目，鼓励多元技术路线，通过实践检验筛选有前景的储能技术。政府应加大对关键原材料技术创新的支持力度，特别是核心关键膜材料的生产设备与工艺流程，鼓励拥有自主知识产权，以实现低成本国产化膜的技术研发和产业化发展，打破国外的技术垄断。

⑤建立储能产业链，降低成本。扩大储能和相关配套技术的产业规模，发挥规模效应并实现材料与设备的本土化，提高储能应用的经济竞争力。

⑥探索优化商业运营模式，加快储能技术的市场化步伐。储能可为未来的能源系统带来诸多好处，这已逐步得到认可，然而储能所伴随的成本与收益如何在各方利益相关者之间分配和流动，尚需进一步讨论研究。在一定程度上，可参考目前仓储业的商业运营模式，分析评估其在储能商业进程中的可借鉴程度。

参考文献：

[1]DENHOLM P，ELA E，KIRBY B，et al.The role of energy storage with renewable electricity generation[EB/OL].http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47187.pdf.

[2]张文亮，丘明，来小康 .储能技术在电力系统中的应用[J].电网技术，2008，32(7)：1-9.

[3]SCHOENUNG S M，BURNS C.Utility energy storage applica-tions studies[J].IEEE Transactions on Energy Conversion，1996，11(3)：658-665.

[4]LU Ning，CHOW J H，DESROCHERS A A.Pumped-storage hydro-turbine bidding strategies in a competitive electricity market[J].IEEE Transactions on Power Systems，2004，19(2)：834-841.

[5]SWIDER D J.Compressed air energy storage in an electricity system with significant wind power generation[J].IEEE Trans-actions on Energy Conversion，2007，22(1)：95-102.

[6]LEE S S，KIM Y M，PARK J K，et al.Compressed air energy storage units for power generation and DSM in Korea[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting，Tampa，USA，2007：1-6.

[7]UEMURA S，NOMURA S，SHIMADA R.Stabilization of elec-tric power system using the variable speed flywheel generator[C]//Proceedings of the Power Conversion Conference，Nagaoka，Japan，1997：215-218.

[8]RUTBERG P G，GONCHARENKO R B，KASHARSKY E G，et al．About prospects of application of the flywheel stabilizer of frequency in a power system[J].Pulsed Power Plasma Science，2001(2)：998-999.

[9]唐西胜 .立足于智能电网需求，积极推动储能技术发展[J].高科技与产业化，2010(5)：49-51.

[10]REHTANZ C.Systemic use of multifunctional SMES in electric power systems[J].IEEE Transactions on Power Systems，1999，14(4)：1422-1427.

[11]TAGUCHI A，IMAYOSHI T，NAGAFUCHI T，et al.A study of SMES control logic for power system stabilization[J].IEEE Transactions on Applied Superconductivity，2007，17(2)：2343-2346.

[12]MADAWALA U K，THRIMAWITHANA D J，KUIARATNA N.An ICPT-supercapacitor hybrid system for surge-free

power transfer[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics，2007，54(6)：3287-3297.

[13]JIA Y，SHIBATA R，YAMAMURA N，et al. A study on electric power smoothing system for lead-acid battery of stand-alone natural energy power system using EDLC[C]//Power Conver-sion Conference，Nagoya，Japan，2007：236-242.

[14]SUZUKI I，SHIZUKI T，NISHIYAMA K.High power and long life lithium-ion battery for backup power sources[C]//The 25th International Telecommunications Energy Conference，Yoko-hama，Japan，2003：317-322.

[15]KAMIBAYASHI M，NICHOLS D K，OSHIMA T.Development update of the NAS battery[C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition，Yokohama，Japan，2002：1664-1668.

[16]HAWKINS J M，ROBBINS T P.A field trial of a vanadium energy storage system[C]//The 23th International Telecom-munications Energy Conference，Edinburgh，UK，2001：652-656.

[17]OHTAKA T，IWAMOTO S.Possibility of using NAS battery sys-tems for dynamic control of line overloads[C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition，Yoko-hama，Japan，2002：44-49.

[18]SASAKI T，KADOYA T，ENOMOTO K.Study on load fre-quency control using redox flow batteries[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting，Denver，Colorado，US-A，2004：580-586.

[19]严俊，赵立飞.储能技术在分布式发电中的应用[J].华北电力技术，2006(10)：19-22.

[20]张宇，俞国勤，施明融，等.电力储能技术应用前景分析[J].华东电力，2008，36(4)：91-93.

[21]叶锋.新能源发电的储能技术[J].农村电气化，2008(7)：50-51.

[22]各种各样蓄电池性能比较[EB/OL].(2004-03-22).http://in-fo.auto-a.hc360.com/HTML/001/002/009/15788.htm.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/91206.html