

# 智能电网中大规模储能技术研究

胡雪峰<sup>1,2</sup>, 杨卓<sup>3</sup>, 谭向宇<sup>4</sup>, 王达达<sup>4</sup>, 赵现平<sup>4</sup>, 高亚静<sup>2</sup>, 田雷<sup>5</sup>, 赵盛萍<sup>1</sup>

1华北电力大学云南电网公司研究生工作站, 昆明

2华北电力大学, 保定

3云南电网公司, 昆明

4云南电网电力研究院, 昆明

5昆明理工大学云南电网公司研究生工作站, 昆明

**摘要:**大规模储能系统是智能电网建设的关键一环, 被称为电力生产中发电、输电、变电、配电和用电之外的“第六环节”。本文结合智能电网发展需求, 简要介绍了各种储能系统发展现状, 重点分析了构建大规模储能系统的必要性及其发展趋势, 最后结合项目组调研情况, 对当前储能技术发展提出了建设性意见。

## 1. 引言

目前, 世界各国都在结合本国电网特点规划建设智能电网, 智能电网的目标是通过全面改造现有的电力系统, 构建高效、自愈、经济、兼容、集成和安全的下一代电网。大规模储能技术的应用是实现智能电网发展目标的关键因素, 它通过传统电力系统生产模式的基础上增加储能环节, 在负荷低谷时将电能储存起来, 负荷高峰时将存储的电能释放回电网, 将原来几乎完全“刚性”的电力系统变得“柔性”起来<sup>[1]</sup>

, 从而实现智能电网各项设定目标, 因此储能技术也被称为电力生产中发电、输电、变电、配电和用电之外的“第六环节”<sup>[2]</sup>

。大规模储能技术在智能电网中具有广阔的应用前景, 在削峰填谷、消纳风能等可再生能源发电、平稳电能输出、改善电能质量、应对突发状况对系统冲击等方面具有巨大潜力<sup>[3]</sup>。

## 2. 各种储能方式简介

储能方式分为机械储能、电磁储能和化学储能, 其中机械储能包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能; 电磁储能包括超导储能和超级电容储能; 化学储能主要是指电池储能系统, 包括铅酸电池、液流电池、钠硫电池和锂电池等。

### 2.1. 抽水蓄能

抽水蓄能电站配备上、下游两个水库, 负荷低谷电能富余时, 将下游水库的水抽到上游水库保存; 负荷高峰电能缺口时, 利用储存在上游水库中的水发电。抽水蓄能是目前存储大规模电力技术最成熟、成本效益最好的储能技术, 也是当前惟一广泛采用的大规模能量存储技术, 世界总装机容量已超过150,000MW; 缺点是其受地理条件、转化效率等方面的制约较大, 响应时间是分钟级, 应对电网负荷波动能力较差。抽水蓄能电站能够用于黑启动、控制电网频率、提供备用容量和提高火电站和核电站的运行效率等方面。

目前, 我国已建成抽水蓄能电站20余座, 不足全国总装机容量的2%, 低于一般工业化国家5%~10%的平均水平<sup>[4]</sup>。近期国家加快了相关技术研发的投入, 在建装机容量达到12,040MW, 居世界第一, 2020年我国抽水蓄能电站总装机容量将达到约6000万kW。我国单机最大的浙江仙居抽水蓄能电站于2010年12月开工建设, 将安装4台单机37.5万kW的机组, 预计2016年建成, 建成后可以为华东电网提供300万kW调峰容量。2012年6月15日, 国家863计划课题“大规模风电与大容量抽水储能在电网中的联合优化技术”启动, 将会进一步促进抽水蓄能电站在国内的发展。

### 2.2. 压缩空气储能

压缩空气储能是利用电网负荷低谷时的剩余电力压缩空气, 将空气高压密封在密封空间中, 在需要电能时, 释放高压空气推动汽轮机发电。压缩空气储能燃料消耗比调峰用燃气轮机可以减少1/3, 所消耗的燃气要比常规燃气轮机少40%, 安全系数高, 使用寿命长<sup>[5,6]</sup>

。压缩空气储能只适用于大型系统，同时建造受地穴、矿井等特殊地形条件的限制[7]。

压缩空气储能由于其储能规模大、成本低，在全球范围内有很大的发展空间。目前美国正计划在俄亥俄州建造世界上最大容量的压缩空气储能电站，总装机容量达到2700MW。我国于2003年开始压缩空气储能的研究，哈尔滨电力部门正在利用现有的地道作为贮气室进行研究。华北电力大学等国内高校正在进行压缩空气系统热力性能计算及其经济分析的研究。

随着分布式能量系统的发展以及减少储气库容积和提高储气压力的需要，8~12MW微型压缩空气储能系统已经成为当前研究的热点。

### 2.3. 飞轮储能

飞轮储能的原理是将电能通过电动机转化为飞轮转动的动能储存起来，供电时，将飞轮的动能通过发电机转化为电能输出到外部负载。飞轮储能的主要优点是高充放电率，高循环次数，响应速度快，无污染，维护简单，寿命一般为20年；缺点是成本高、能量密度较低，保证系统安全性方面的费用很高，储能损耗较高，不适合用于能量的长期存储[8]。

受益于电力电子技术、磁悬浮技术和高强度碳素纤维技术的进步，飞轮储能技术近年来发展迅速。文献[9-11]介绍，国际先进的飞轮储能系统储能效率已经达到了99.4%，可储能100kWh。2004年，巴西实现了利用超导与永磁悬浮轴承的飞轮储能，用于电压补偿。2011年，世界最大的飞轮储能系统完成安装，容量20MW，采用了当前世界最先进的碳纤维复合飞轮转子技术，吸收并释放1MW的电能仅需15分钟。

我国飞轮储能研究起步较晚，目前还只是从事系统基础研究及小容量试点。飞轮储能技术的发展正朝着大功率、高效率、低损耗和安全可靠的方向发展。

### 2.4. 电池储能

电池储能系统是指以蓄电池为能量载体与电网进行电能交换的系统。具有充电/放电工作状态转换迅速、设备维护工作量小、高度智能化等优点，可配合新能源并网，可作应急电源，亦可小范围孤网运行<sup>[12-14]</sup>。

根据所用化学物质的不同，蓄电池可以分为铅酸电池、液流电池、钠硫电池和锂电池等。铅酸电池价格低廉，技术成熟，可靠性高，占据着电池储能45%~50%的市场，但是其能量密度低、寿命短、污染环境等缺点制约了铅酸电池的发展；液流电池是目前一种前沿储能技术，克服了铅酸电池寿命短的缺点，但是其同样具有污染性；钠硫电池比能量高，可实现大电流、高功率放电，充放电效率高，但是它需要采用高性能的真空绝热保温技术来维持300~350的工作温度，安全性较差，成本太高；锂离子电池体积小、能量密度高、综合效率高、循环寿命长、无记忆效应、绿色环保，受电动汽车产业的推动，锂电池的技术和资金储备雄厚，是最具有发展前景的电池储能系统，但是锂电池需要较复杂的电源管理系统，生产成本较高。

美国电科院在2009年开展了MW级锂离子电池储能系统用于平滑风电场功率波动的示范应用，目前世界上运行的最大锂离子储能系统是A123公司投资建设的，装机容量为2MW<sup>[15]</sup>。

。2009年11月，我国成功研制出具有自主知识产权的容量为650A·h的钠硫储能单体电池，使我国成为继日本之后世界上第二个掌握大容量钠硫单体电池核心技术的国家。在日本运营的容量为4MW的全钒液流电池为当地32MW的风电场提供储能，并已运行27万次循环，世界上还没有任何其他储能技术能够实现这一要求<sup>[16]</sup>。

### 2.5. 超导磁储能

超导储能装置利用超导线圈将电磁能直接储存起来，需要时再将电磁能返回电网或其他负载。功率输送时不需要能源形式的转换，具有响应速度快、综合效率高和功率密度高等优点。超导储能装置不仅可用于调节电力系统的峰谷，而且可用于降低甚至消除电网的低频功率振荡，改善电网的电压和频率特性，同时还可用于无功和功率因素的调节以改善电力系统的稳定性。

近年来，超导材料实用化发展迅速，促进了超导储能的研发和应用。但是，要实现超导储能的大规模应用，还需要提高超导体的临界温度，研制出力学性能和电池性能良

好的超导线材,提高系统稳定性和使用寿命<sup>[17]</sup>

。目前世界上1~5MJ/MW低温超导磁储能装置已形成产品,100MJ超导磁储能系统已投入高压输电网实际运行,5GW h超导磁储能技术已通过可行性分析和技术论证。我国十五“863”计划启动了高温超导输电电缆、限流器、变压器以及高温超导磁储能系统等超导电力应用技术项目,取得了良好的进展。2005年11月,我国第一台直接冷却高温超导磁储能系统在华中科技大学系统动模实验室成功实现了动模试验运行<sup>[18,19]</sup>。

## 2.6. 超级电容器

超级电容器由2个多孔电极、隔膜及电解质组成。超级电容器充放电的速度快,几乎没有充放电次数以及最大放电量的限制,平均寿命可达25年以上。缺点是储能密度低于一般的化学电池,且放电时间很短。其未来的发展主要是面向电动汽车,以及电力系统中短时间、大功率负载的平滑,在电压跌落和瞬态干扰期间提高供电水平等。

国外就超级电容器方面的研究较早,美国、日本和俄罗斯的大公司一直占据着这一行业大部分市场份额,产品领域包括电动汽车、轨道交通能量回收系统、小型新能源发电系统及军用武器等方面。我国在这个行业也有了一定成果,大庆华隆电子有限公司是我国首家实现超级电容器产业化的公司;无锡力豪科技有限公司与中科院电工研究所无锡分所经过多年联合攻关,于2011年8月成功研制出基于超级电容器的动态电压恢复器;超级电容公交车方面,中国是唯一将超级电容公交车投入量产的国家。

各种储能方式特点及其优缺点比较如表1所示。

Table 1. Energy storage ways comparison  
 表 1. 各储能方式比较

储能类型	典型额定功率(MW)	放电时间	优点	缺点	适用场合	
机械储能	抽水蓄能	100-2000	1-24 h	大规模、低成本、技术相对成熟	相应速度较慢、受地形条件限制	削峰填谷、频率控制和系统备用
	压缩空气	10-200	1-24 h	大规模、低成本	受地形条件限制	削峰填谷、调频、系统备用
电磁储能	飞轮储能	0.005-1.5	1 ms-15 min	比功率大	损耗高、噪声大、低能量密度	调峰、频率控制、UPS 和电能质量
	超导磁储能	0.01-1	1 s-5 min	响应快、比功率高、效率高、损耗极低	成本高、维护困难	电能质量控制、输配电稳定、UPS
	超级电容器	0.01-1	1-30 s	相应快、比功率高	成本高、储能低	与 FACTS 结合
化学储能	铅酸电池	0.001-50	1 min-3 h	技术成熟、成本低	寿命短、有污染	电能质量、频率控制、电站备用、黑启动、可再生储能
	液流电池	0.005-100	1-20 h	寿命长、高能力、适于组合、效率高	低储能密度、有污染	电能质量、备用电源、调峰填谷、能量管理、可再生储能
	钠硫电池	0.1-100	数小时	高效率、高能密度	高成本、安全性较差	电能质量、备用电源、调峰填谷、能量管理、可再生储能
	锂电池	几千瓦至几兆瓦	数分钟至数小时	高效率、高能密度	高成本、安全性较差	电能质量、备用电源、UPS

## 3. 智能电网发展大规模储能的必要性

### 3.1. 满足可再生能源发展需要

由于风能和太阳能等新能源具有随机性、间歇性、出力变化快等特点,而且风能还具有不可预测、反调峰特性,大容量的新能源发电直接并网会对电网运行、控制及有功调度带来较大的影响,并网问题现已成为了制约可再生能源发展的瓶颈。新能源发电设备中若配有储能装置,利用储能装置秒级甚至毫秒级的有功调节能力,可以平滑新能源的输出曲线。储能系统的有功动态调节能力使其可发挥类似发电机的对电网的频率调节作用,调和电力供给与需求之间的差异。储能系统在新能源领域的另一项应用是风光储一体化发电系统,该系统可以充分利用风能和光伏在时间和地域上的天然互补性,同时配合储能系统对电能的存储和释放,改善整个风、光发电系统的功率输出特性,缓解风电、光电等可再生能源对电网的不利影响,增加电网对可再生能源的吸纳程度。2009年6月,总投资200亿元,张北成为了世

界第一个风光储试验基地。

文献[20,21]通过仿真研究，表明超导储能和超级电容储能系统能有效改善风电输出功率及系统的频率波动。针对这些控制方案将降低风电机组效率的缺陷，文献[22]通过对飞轮储能系统的充放电控制，实现了平滑风电输出功率、参与电网频率控制的双重目标。

### 3.2.削峰填谷，减少系统备用，提高设备利用率

电力生产要求发电、供电、用电之间必须随时保持平衡，然而白天和黑夜、不同季节间的峰谷差要求电力系统又必须配有一定的发电备用容量，随着新能源产业及社会经济的迅速发展，通过增加旋转备用来满足高峰负荷需求变得越来越困难。储能系统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，在电网负荷峰值的时候向电网输送电能，实现削峰填谷功能[23,24]，同时，还可以减少电网对发电设备的投资，提高电力设备的使用率，减小线路损耗，提高供电可靠性，创造巨大的经济效益和社会效益。

储能系统具有响应速度快、运行成本低等特点，将比火电机组更适合充当发电备用的角色。如果将来能够建设更大容量的储能站，或者在全网分散布置大量的小容量储能站，当整体储能容量达到一定规模时，就能逐步减少火电机组的旋转备用。

文献[25]通过在PSCAD下建模仿真说明了超级电容在解决分布式发电电能质量等问题方面有很好的效果。文献[26,27]研究了采用电池储能系统来提高电能质量的问题，结果表明，该储能系统能实现与系统的快速有功、无功功率交换，有效改善电压波动性，适用于解决风电并网带来的电能质量问题。

### 3.3.减缓输电压力，提升配网智能化水平

在我国许多地区，电力输送能力的增长远远跟不上电力需求增长的步伐，在高峰电力需求时输配电系统往往变得拥挤阻塞，影响系统正常运行。若把储能系统安装在输配电系统阻塞段的潮流下游，电能被存储在输配电阻塞的区段，在电力需求高峰时储能系统释放电能，从而减少输配电系统容量的要求，缓解输配电系统阻塞的情况。同时，储能系统还可以减少电力传输中的异常和干扰，解决输电稳定性阻尼和次同步谐振阻尼等问题，改善动态电压稳定性，以及减少系统低频时甩负荷量。

置于用户侧的储能系统，可增强系统的供电可靠性，改善用户的电能质量。随着智能电网的发展，微网的概念逐步得到推广。各种储能系统作为微网的分布式电源之一，通过电力电子装置在秒级甚至毫秒级快速响应，可以实现微网“永不断电”的目标。另一方面，小型的家庭式储能设备和区域性的微网储能装置，可以通过智能电表接入到周围的大中型电网中，在用电高峰时向电网供电，增加了电力用户与电网的互动。

### 3.4.促进电动汽车产业发展

近日，在海口举行的“中国国际电动汽车及充电装置、储能技术展览会”上，电网公司强调要加速充换电基础设施建设，迎接电动汽车的高速发展时期。随着电网智能化水平以及电动汽车保有量的大幅提高，电动汽车的车载电池作为可移动储能单元，丰富了电网的可控资源，对智能电网平衡大量不可控的可再生能源有着重要的作用。在用电低谷时，电动汽车和储能电站的电池可以从电网吸纳大量富余电力，用电高峰来临时，电池的电能可以反过来被电网吸收，或可以作为停电时的备用电源。把这两者有机结合在一起可以充分利用电池储能站的配套设施，可达到资源的最大利用。

### 3.5.电网应急相应的需要

在电网失电的情况下，通过传感器技术和通信与信息技术进行故障快速诊断，储能电站切换至电网紧急模式，储能装置向用电设备提供已储备的电能，起到应急供电的作用。

储能系统能够为用户提供备用电源，具有辅助设备简单，厂用电少，启动速度快等优点，为系统黑启动提供电源，提高供电可靠性和抵御自然灾害的能力。其移动性和灵活的特点尤其适用于地震洪水等自然灾害后的恢复。

对于一些重要负荷或者供电可靠性很差的部分地区，在发生事故失去主网电源或者输配电设备检修时需要孤网运行，孤网容量较小，要求备用电源必须相应速度快，储能电站是最适合孤网供电的备用电源。

#### 4.大规模储能技术发展展望

1)由于不同的储能技术在额定功率下的放电时间不同,因此应用在电网不同的地方时,应该选择合适的储能方式。当用于电能质量改善、电网频率稳定及UPS时,应选择响应快速、放电时间短的电池,例如超级电容器、飞轮储能等;当用于供电的连续性、缓冲或者备用电源时,则选择能放电数秒到数分钟的相应的短时储能方式;当用于电网的削峰填谷或者风能、太阳能等新能源的并网储能时,则选择能够大规模储能,且自放电小的储能方式,例如抽水蓄能、压缩空气储能等;在地理条件受限制的时候,可以选择钠硫电池、液流电池等。

2)就目前的储能技术发展水平看,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、环境特性以及成本等性能指标,如果将两种或以上性能互补性强的储能技术相结合,组成复合储能,则可以取得良好的技术经济性能。在电网应用中,要实现系统的稳定控制,电能质量改善和削峰填谷等多时间尺度上的功率平准控制,可以将超导储能、飞轮储能或超级电容器等功率密度、高储能效率高以及循环寿命长的储能技术与铅酸电池、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储能技术相结合,以最大程度地发挥各种储能技术的优势,降低全寿命周期费用,提高系统经济性。

3)目前的大容量储能技术主要是抽水蓄能和压缩空气储能。有条件的地方可以因地制宜建设抽水蓄能电站,用于电力系统调峰,或作为可再生能源发电厂的调频备用,减小其发点波动性对系统的影响。考虑到我国海上风电资源大规模开发利用的前景,如选择三面环山的海湾作为水库的坝址,围海建立大型抽水蓄能电站;或选择一些条件好的废弃矿井、洞穴,修建压缩空气储能电站,与当地的大型风电场或光伏电站相结合,为这些可再生能源电站的稳定运行提供支持,增加可再生能源发点的容量可信度,使其称为具有一定可预测性和可调度性的稳定电源。

#### 5.总结

大规模储能技术对现阶段电网的影响是变革性的,电力系统发、输、变、配、用各个环节都将受益于相关技术的进步。智能电网建设将会促进储能技术的发展,相关科技日新月异是可以预见的。结合储能技术发展遇到的问题,在此提出促进储能技术发展的建议:

1)合理规划,优先在电网关键节点建设储能设施。大规模储能建设投资高,为充分发挥其经济效益,应优先在窝电严重区域、频繁缺电区域及枢纽变电站配置储能系统。

2)积极推动储能技术标注体系的建立。国家应加速出台有关新能源及储能设施建设的标准体系和相关规章制度,企业及科研机构也要积极参与建立储能标准,抢占产业发展主导权。

3)建设示范工程,加速成熟储能技术产业化。技术欠成熟储能技术,如超导储能、飞轮储能、压缩空气储能等,安排储能示范项目,为未来大规模应用积累技术数据和运行经验;技术成熟技术,如抽水蓄能、电池储能、超级电容器储能等,加速实现产业化,促进其健康有序发展。

4)加速储能价格机制的建立。政府和电网公司应分别从政策和技术层面,加快出台峰谷电价、储能电价,使的储能设施建设能尽快收回投资,增进企业发展储能技术的积极性。

5)培养家庭及工商业错峰用电的习惯和意识。私人电动汽车晚上充电、高耗能企业夜间生产等活动习惯,将使得储能概念深入人心,同时促进了低碳社会发展。

#### 参考文献 (References)

[1]A.C.Ferreira, L.M.Souza and E.H.Watanabe.Improving power quality with a variable speed synchronous condenser.In-ternational Conference on Power Electronics, Machines and Drives,4-7 June 2002: 456-460.

[2]鄂宝民,黄旭,庞立军等.先进储能技术在环渤海风电发展中的应用前景分析[A].第十三届中国科协年会第15分会场-大规模储能技术的发展与应用研讨会论文集[C],天津,2011.

[3]T.F.Garrity.Getting smart.IEEE Power and Energy Magazine,2008, 6(2): 38-45.

[4]骆妮,李建林.储能技术在电力系统中的研究进展[J].电网与清洁能源,2012, 28(2): 71-78.

- [5]D.J.Swider.Compressed air energy storage in an electricity system with significant wind power generation.IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 95-102.
- [6]S.S.Lee, Y.M.Kim, J.K.Park, et al.Compressed air energy storage units for power generation and DSM in Korea.Seoul:IEEE Power Engineering Society General Meeting, 24-28 June 2007: 1-6.
- [7]魏增福, 郑金.应用于智能电网的储能技术[J].广东电力,2010, 23(11): 22-27.
- [8]管俊, 高赐威.储能技术在抑制风电场功率波动方面的研究综述[J].电网与清洁能源, 2011, 27(4): 48-53.
- [9]张雪莉, 李建宁, 李赢.储能技术的发展及其在电力系统中的应用[J].建筑电气电器应用, 2012, 6(2): 50-57.
- [10]胡春雨, 陈强, 李武峰等.大容量电池储能技术在风电中的应用[A].第十三届中国科协年会第15分会场——大规模储能技术的发展与应用研讨会论文集[C], 天津, 2011.
- [11]王文亮, 秦明, 刘卫.大规模储能技术在风力发电中的应用研究[A].经济发展方式转变与自主创新——第十二届中国科学技术协会年会[C], 福州, 2010.
- [12]孔令怡, 廖丽莹.电池储能系统在电力系统中的应用[J].电气开关, 2008, 5: 61-64.
- [13]程路, 白建华, 贾德香等.国外风电并网特点及对我国的启示[J].中外能源, 2011, 16(6): 30-33.
- [14]刘怡, 陆志刚, 雷金勇等.电池储能系统在智能电网中的应用[A].第十三届中国科协年会第15分会场——大规模储能技术的发展与应用研讨会论文集[C], 天津, 2011.
- [15]俞振华.大容量储能技术的现状与发展[J].中国电力企业管理, 2009, 7: 26-28.
- [16]张翼.电力储能技术发展和应用[J].江苏电机工程, 2012,31(4): 81-84.
- [17]樊冬梅, 雷金勇, 甘德强.超导储能装置在提高电力系统暂态稳定性中的应用[J].电网技术, 2008, 32(18): 82-86.
- [18]罗承先.世界促进风电产业发展最新动向[J].中外能源,2012, 17(5): 32-39.
- [19]纪尚昆.超导技术在智能电网中的应用[J].广西电业, 2010,1: 115-117.
- [20]石新春, 张玉平, 陈雷.一种基于超级电容器储能的光伏控制器的实现[J].现代电子技术, 2008, 31(21): 133-136.
- [21]梁振峰, 杨晓萍, 张婷.分布式发电技术及其在中国的发展[J].西北水电, 2006, 1: 51-53.
- [22]H.A.Mohd, M.Toshiaki and T.Junji.Stabilization of power system including nd generator by fuzzy logic-controlled super-conducting magnetic energy storage.Knala: Proceedings of In-ternational Conference on Power Electronics and Drives Sys-tems, 2005: 1611-1616.
- [23]于大洋, 宋曙光, 张波等.区域电网滇东汽车充电与风电协同调度的分析[J].电力系统自动化, 2011, 35(14): 24-29.
- [24]Energy Storage Association.Energy storage technologies and applications, 2008.
- [25]张华民, 周汉涛, 赵平等.储能技术的研究开发现状及展望[J].能源工程, 2005, 3: 1-5.
- [26]M.G.Molina, P.E.Mcrcado.Control design and simulation of DSTATCOM with energy storage for power quality improvement.Caracas: IEEE Power Engineering Society Transmission& Distribution Conference and Exposition, 15-18 August 2006:1-7.
- [27]A.Taguchi, T.Imayoshi, T.Nagafuchi, et al.A study of SMES control logic for power system stabilization.IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2343-2346.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/92952.html>