

储能技术在电力系统中的应用

张文亮, 丘 明, 来小康

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Application of Energy Storage Technologies in Power Grids

ZHANG Wen-liang, QIU Ming, LAI Xiao-kang

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: According to the present situation of research, development and application of large-scale energy storage technologies as well as considering the regional features of energy resource distribution in China, the middle and long term development strategy of China and the pattern of “transmitting electric power from West China to East China, power exchange between South China and North China and nationwide interconnection of power grids in China”, the development trend of energy storage technology are analyzed and discussed from the viewpoints of requirement, technology and economy. During the period of 11th Five Year Plan, the State Grid Corporation of China (SGCC) will research and develop the all-vanadium redox flow batteries with capacity in 100kW grade, the sodium sulphur batteries with capacity in megawatt grade, and the superconducting magnetic energy storage systems with capacity in megajoule grade that operates in temperature range of liquid-nitrogen; speed up the construction of mixed pumped storage power stations with capacity in 10GW grade to realize the optimized configuration of power grid; enhance the capability of power regulation, transmission and transformation to solve the trans-regional imbalance between supply and demand as well as to ensure the secure and reliable operation of power grid in China and to satisfy both requirement to power quality and development of renewable energy resources.

KEY WORDS: power grids; energy storage; sodium sulphur batteries; vanadium redox batteries; superconducting magnetic energy storage; pumped hydro

摘要: 基于大规模电力储能技术的研究和应用现状, 从需求、技术和经济的角度出发, 考虑到我国能源的区域性特征、“西电东送、南北互供、全国联网”格局和国家中长期发展战略, 探讨了电力储能技术发展的趋势。“十一五”期间国家电网公司将立足研发 100 kW 级全钒液流电池、MW 级钠流电池和 MJ 级容量液氮温区运行超导储能系统, 加快建设 10 GW 级抽水蓄能混合式电站, 以优化电网配置、加强调节和输变电能力、解决跨区域供需矛盾、确保电网安全可靠运行, 并

满足人们对电能质量的要求和可再生能源发展的需要。

关键词: 电力系统; 储能; 钠硫电池; 全钒液流电池; 超导储能; 抽水蓄能

0 引言

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。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, 平滑负荷, 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^[1-7]。

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、电讯等部门的重视。电能可以转换为化学能、势能、动能、电磁能等形态存储, 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、压缩空气储能和飞轮储能; 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。各种储能技术在能量和功率密度等方面有着明显区别, 表 1 显示了不同应用场合对能量和功率密度的要求。本文着重介绍 MW 级大规模电力储能技术的研发状况和应用实例, 并基于我国能源布局和电力系统需求, 从技术和经济的层面加以分析, 探讨储能技术的未来发展方向和研究重点。

1 电力储能方式和发展现状

1.1 抽水蓄能电站

抽水储能电站投入运行时必须配备上、下游两

表 1 储能技术应用场合和技术要求
Tab. 1 A classification of applications by user type and typical parameters of energy storage

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

个水库(上、下池), 负荷低谷时段抽水储能设备工作在电动机状态, 将下水库的水抽到上游水库保存, 负荷高峰时抽水储能设备工作于发电机的状态, 利用储存在上游水库中的水发电。按上水库有无天然径流汇入分为纯抽水、混合抽水和调水式抽水蓄能电站, 建站地点力求水头高、发电库容大、渗漏小、压力输水管道短、距离负荷中心近。

抽水蓄能电站可以按照一定容量建造, 储存能量的释放时间可以从几小时到几天, 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, 其主要应用领域包括调峰填谷、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^[8-9]。

目前, 抽水蓄能电站的设计规划已形成规范。机组由早期的四机、三机式机组发展为水泵水轮机和水轮发电电动机组成的二机式可逆机组, 极大地减小了土建和设备投资。施工已采用沥青混凝土面板防渗、HT-100 高强度钢结构、斜井全断面隧洞掘进机开挖、钢岔管考虑围岩分担为压、上水库和地下厂房信息化施工等先进技术。为进一步提高整体经济性, 机组正向高水头、高转速、大容量方向发展, 现已接近单级水泵水轮机和空气冷却发电电动机制造极限, 今后的重点将立足于对振动、空蚀、变形、止水和磁特性的研究, 着眼于运行的可靠性和稳定性, 在水头变幅不大和供电质量要求较高的情况下使用连续调速机组, 实现自动频率控制。提高机电设备可靠性和自动化水平, 建立统一调度机制以推广集中监控和无人化管理, 并结合各国国情开展海水和地下式抽水蓄能电站关键技术的研究。

1.2 压缩空气储能电站

压缩空气储能电站(compressed air energy storage, CAES)是一种调峰用燃气轮机发电厂, 主要利用电网负荷低谷时的剩余电力压缩空气, 并将

其储藏在典型压力 7.5 MPa 的高压密封设施内, 在用电高峰释放出来驱动燃气轮机发电。在燃气轮机发电过程中, 燃料的 2/3 用于空气压缩, 其燃料消耗可以减少 1/3, 所消耗的燃气要比常规燃气轮机少 40%, 同时可以降低投资费用、减少排放。CAES 建设投资和发电成本均低于抽水蓄能电站, 但其能量密度低, 并受岩层等地形条件的限制。CAES 储气库漏气开裂可能性极小, 安全系数高, 寿命长, 可以冷启动、黑启动, 响应速度快, 主要用于峰谷电能回收调节、平衡负荷、频率调制、分布式储能和发电系统备用。

目前, 地下储气站采用报废矿井、沉降在海底的储气罐、山洞、过期油气井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, 从而保障燃气轮机稳定运行。100MW 级燃气轮机技术成熟, 利用渠氏超导热管技术可使系统换能效率达到 90%。大容量化和复合发电化将进一步降低成本。随着分布式能量系统的发展以及减小储气库容积和提高储气压力至 10~14 MPa 的需要, 8~12 MW 微型压缩空气蓄能系统(micro-CAES)已成为人们关注的热点^[10-11]。

1.3 飞轮储能

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。谷值负荷时, 飞轮储能系统由工频电网提供电能, 带动飞轮高速旋转, 以动能的形式储存能量, 完成电能—机械能的转换过程; 出现峰值负荷时, 高速旋转的飞轮作为原动机拖动电机发电, 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。飞轮储能功率密度大于 5kW/kg, 能量密度超过 20 Wh/kg, 效率在 90%以上, 循环使用寿命长达 20a, 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 MW 级, 输出持续时间为数 min/数 h, 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。

近年来, 人们对飞轮转子设计、轴承支撑系统和电能转换系统进行了深入研究, 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。机械式飞轮系统已形成系列产品, 如 Active Power 公司 100~2000kW CleanSource 系列、Pentadyne 公司 65~1000kVA VSS 系列、Beacon Power 公司的 25 MW

Smart Energy Matrix 和 SatCon Technology 公司 315~2200kVA 系列。高温超导磁浮轴承摩擦系数达到 10^{-7} 量级,在此基础上,1 MWh 超导飞轮已于 1997 年研制成功。随着磁浮轴承的应用、飞轮的大型化以及高速旋转化和轴承载荷密度的进一步提高,飞轮储能的应用将更加广泛^[12-13]。

1.4 超导磁储能系统

超导磁储能系统(superconducting magnetic energy storage, 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(ms 级),转换效率高($\geq 96\%$)、比容量(1~10 Wh/kg)/比功率($10^4\sim 10^5$ kW/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。目前,世界上 1~5 MJ/MW 低温 SMES 装置已形成产品,100MJ SMES 已投入高压输电网中实际运行,5GWh SMES 已通过可行性分析和技术论证。SMES 可以充分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^[14-17]。

SMES 的发展重点在于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,进一步降低投资和运行成本,结合实际系统探讨分布式 SMES 及其有效控制和保护策略。

1.5 超级电容器储能

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(一般 0.5 mm 以下),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,储能量和保持时间受到限制,必须串联使用,以增加充放电控制回路和系统体积。

超级电容器历经三代及数十年的发展,已形成电容量 0.5~1000F、工作电压 12~400V、最大放电电流 400~2000A 系列产品,储能系统最大储能量达到 30 MJ。但超级电容器价格较为昂贵,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水平^[18]。目前,基于活性碳双层电极与锂离子插入式电极的第四代超级电容器正在开发中。

1.6 电池储能系统

电池储能系统主要是利用电池正负极的氧化还原反应进行充放电,表 2、3 分别显示了一些种类电池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。

表 2 电力储能系统可利用的主要电池

Tab. 2 Main battery types available to electric energy storage

电池种类	单体标称电压/V	反应式	研发机构
铅酸	2.0	负极: $Pb+SO_4^{2-} \rightleftharpoons PbSO_4+2e^-$ 正极: $PbO_2+4H^++SO_4^{2-}+2e^- \rightleftharpoons PbSO_4+2H_2O$	主要电池厂家
镍镉	1.0~1.3	负极: $Cd^{2+}-2e^-+2OH^- \rightleftharpoons Cd(OH)_2$ 正极: $2NiOOH+2H_2O+2e^- \rightleftharpoons 2Ni(OH)_2+2OH^-$	主要电池厂家
镍氢	1.0~1.3	负极: $H_2+e^- \rightleftharpoons 1/2H_2+OH^-$ 正极: $Ni(OH)_2+OH^-+e^- \rightleftharpoons NiOOH+H_2O$	主要电池厂家
锂离子	3.7	负极: $6C+xLi^++xe^- \rightleftharpoons Li_xC_6$ 正极: $LiCoO_2 \rightleftharpoons Li_{1-x}CoO_2+xLi^++xe^-$	主要电池厂家
钠硫	2.08	负极: $2Na \rightleftharpoons 2Na^++2e^-$ 正极: $\gamma S+2e^- \rightleftharpoons \gamma S^{2-}$	东京电力公司、NGK、上海电力公司
全钒液流	1.4	负极: $V^{2+} \rightleftharpoons V^{3+}+e^-$ 正极: $V^{5+}+e^- \rightleftharpoons V^{4+}$	VRB、V-Fuel Pty、住友电工、关西电力公司、中国电力科学研究院

表 3 部分电池储能系统的性能比较

Tab. 3 Comparison of different battery energy storage systems

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 MW	35~50	75~300	500~1 500	0~80	2~5
镍镉	几十 MW	75	150~300	2 500	0~70	5~20
锂离子	几十 kW	150~200	200~315	1 000~10 000	0~95	0~1
钠硫	十几 MW	150~240	90~230	2 500	0~90	—
全钒液流	数百 kW	80~130	50~140	13 000	0~80	—

铅酸电池在高温下寿命缩短,与镍镉电池类似,具有较低的比能量和比功率,但价格便宜,构造成本低,可靠性好,技术成熟,已广泛应用于电力系统,目前储能容量已达 20MW。铅酸电池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、事故照明提供动力^[19]。然而,其循环寿命较短,且在制造过程中存在一定程度的环境污染。

镍镉等电池效率高、循环寿命长,但随着充放电次数的增加容量将会减少,荷电保持能力仍有待提高,且因存在重金属污染已被欧盟组织禁用。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,系统指标往往达不到单体水平,使用寿命较单体缩短数倍甚至十几倍。大容量集成的技术难

度和生产维护成本使得这些电池在相当长的时间内很难在电力系统中规模化应用^[20]。

钠硫和液流电池则被视为新兴的、高效的且具广阔发展前景的大容量电力储能电池。钠硫电池储能密度为 140 kWh/m³，体积减少到普通铅酸蓄电池的 1/5，系统效率可达 80%，单体寿命已达 15 a，且循环寿命超过 6000 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，很适用于城市变电站和特殊负荷^[21]。液流电池已有钒-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^[22]。目前，钠硫和液流电池均已实现商业化运作，MW 级钠硫和 100 kW 级液流电池储能系统已步入试验示范阶段。随着容量和规模的扩大、集成技术的日益成熟，储能系统成本将进一步降低，经过安全性和可靠性的长期测试，有望在提高风能/太阳能可再生能源系统的稳定性、平滑用户侧负荷及紧急供电等方面发挥重要作用^[23-26]。

2 电力储能技术在电力系统中的应用实例

2.1 抽水蓄能系统

日、美、西欧等国家和地区在 20 世纪 60~70 年代进入抽水蓄能电站建设的高峰期，到目前为止，美国和西欧经济发达国家抽水储能机组容量占世界抽水蓄能电站总装机容量 55% 以上，其中：美国约占 3%，日本则超过了 10%，中国、韩国和泰国 3 个国家在建抽水蓄能电站 17.530 GW，加上日本后达到 24.650 GW，表 4 显示了近十年来投入运行的 8 个大型抽水蓄能电站的情况。

表 4 国外 8 个大型抽水蓄能电站的情况

Tab. 4 Eight large-scale pumped hypo stations in US, Japan and Europe

序号	电站	国家	装机容量/MW	投入年份
1	落基山	美国	760	1995
2	锡亚比舍	伊朗	1 000	1996
3	奥清津 II	日本	600	1996
4	葛野川	日本	1 600	1999
5	拉姆它昆	泰国	1 000	2000
6	金谷	德国	1 060	2003
7	神流川	日本	2 820	2005
8	小丸川	日本	1 200	2007

2.2 压缩空气储能电站

世界上第一个商业化 CAES 电站为 1978 年在德

国建造的 Huntorf 电站，装机容量为 290 MW，换能效率 77%，运行至今，累计启动超过 7000 次，主要用于热备用和平滑负荷。在美国，McIntosh 电站装机容量为 100 MW，Norton 电站装机容量为 2.7 GW，用于系统调峰；2005 年由 Ridge 和 El Paso 能源公司在 Texas 开始建造 Markham 电站，容量为 540 MW。在日本，1998 年施工建设北海道三井砂川矿坑储气库，2001 年 CAES 运行，输出功率 2 MW。在瑞士，ABB 公司正在开发大容量联合循环 CAES 电站，输出功率 442 MW，运行时间为 8 h，贮气空洞采用水封方式。此外，俄罗斯、法国、意大利、卢森堡、以色列等国也在长期致力于 CAES 的开发。

2.3 飞轮储能系统

1999 年欧洲 Urenc Power 公司利用高强度碳纤维和玻璃纤维复合材料制作飞轮，转速为 42 000 rad/min，2001 年 1 月系统投入运行，充当 UPS，储能量达到 18 MJ。美国波音公司 Phantom 工厂研制的高温超导磁浮轴承 100 kW/5 kWh 飞轮储能装置，已用于电能质量控制和电力调峰。部分飞轮储能装置在电力系统中的应用情况见表 5。

表 5 飞轮储能装置在电力系统中应用项目

Tab. 5 Some kinetic energy storage systems installed in power system

年份	研发机构	基本参数	技术特点	作用
不详	日本四国综合研究所	8 MWh, 储能放电各 4h, 待机 16h	高温超导磁浮立式轴承, 储能效率 84%	平滑负荷
不详	日本原子力研究所	215 MW/8 GJ	输出电压 18 kV, 输出电流 6 896 A, 储能效率 85%	UPS
不详	美国 Vista 公司	277 kWh	引入风力发电系统	全程调峰
1991	美国马里兰大学	24 kWh, 转速 11 610~46 345 rad/min	电磁悬浮轴承, 输出恒压 110 V/240 V, 全程效率 81%	电力调峰
1996	德国	5 MW/100 MWh, 转速 2 250~4 500 rad/min	超导磁浮轴承, 储能效率 96%	储能电站
2004	巴西	额定转速 30 000 rad/min	超导与永磁悬浮轴承	电压补偿

2.4 超导磁储能系统

SMES 在美国、日本、欧洲一些国家的电力系统已得到初步应用，在维持电网稳定、提高输电能力和用户电能质量等方面发挥了极其重要的作用，表 6 显示了其中一些应用实例。

2.5 超级电容器储能系统

西门子公司已成功开发出储能量达到 21 MJ/5.7 Wh、最大功率 1 MW 的超级电容器储能系统，并成功安装在德国科隆市 750 V 直流地铁配电网中，该系统由 4 800 支 2600 F/2.5 V 超级电容器组成，重量 2 t，体积 2 m³，超级电容器组储能效率为 95%。

表 6 SMES 应用实例

国家/地区	年份	应用地点	基本参数	作用
美国	1982	美国	30 MJ/10 MW	抑制系统低频振荡和支持系统电压
	1993	美国阿拉斯加电网	1.8 GJ	提高电网的供电可靠性
	2000	美国威斯康星州公用电力北方环型输电网	6×3 MJ/8 MVA	避免电压凹陷和短路故障
	2002	美国田纳西州 TVA 电管局 500 kV 输电网	8×3 MJ/8 MW	维护输电网电压稳定性
	2002	Chubu 电力公司	7.3 MJ/5 MW	提供瞬时电压补偿
日本	2003	Chubu 电力公司	1 MJ, Bi-2212	补偿瞬时电压跌落
	2006	Hosoo 电站	10 MW	提高系统稳定性和供电品质
欧洲	2002	德国 ACCEL	150 kJ, Bi-2223	用于 20 kVA UPS 系统, 与电网相连以提高电能质量, 同时发挥有源电力滤波器作用。
韩国	2001	韩国电力研究所	1 MJ/300 VA	有效维持系统稳定运行
	2006	韩国电力研究所, Hyundai 重工	3 MJ/750 kVA	提高敏感负荷的供电质量

美国 TVA 电力公司成功开发了 200 kW 超级电容器储能系统, 用于大功率直流电机的启动支撑。

2.6 电池储能系统

2.6.1 铅酸蓄电池系统

铅酸电池储能系统在发电厂、变电站充当备用电源已使用多年, 并在维持电力系统安全、稳定和可靠运行方面发挥了极其重要的作用, 表 7 显示了一些 MW 级铅酸蓄电池系统及其功能。

表 7 国外大型铅酸蓄电池系统一览表

Tab. 7 Selected lead acid battery energy storage installations

序号	铅酸电池系统名称和位置	额定功率/容量/(MW/MWh)	功能	安装时间
1	BEWAG, Berlin (德国)	8.5/8.5	热备用、频率控制	1986 年
2	Crescent, North Carolina	0.5/0.5	峰值调节	1987 年
3	Chino, California (美国)	10/40	热备用、平衡负荷	1988 年
4	PREPA, Puerto Rico (波多黎各)	20/14	热备用、频率控制	1994 年
5	Vernon, California (美国)	3/4.5	提高电能质量	1995 年
6	Metlakatla, Alaska (美国)	1/1.4	提高孤立电网稳定性	1997 年
7	ESCAR, Madrid (西班牙)	1/4	平衡负荷	20 世纪 90 年代后期
8	Herne-Sodingen (德国)	1.2/1.2	削峰、提高电能质量	20 世纪 90 年代后期

2.6.2 钠硫电池系统

东京电力公司在钠硫电池系统研发方面处于国际领先地位, 拥有较为成熟的商业化产品, 1999 年在大仁变电站设置 6 MW×8 h 系统, 2004 年 7 月又在 Hitachi 自动化系统工厂安装了目前世界上最大的钠硫电池系统, 容量 9.6 MW/57.6 MWh; 钠硫电池系统在电力系统和负荷侧成功应用 100 余套, 总容量超过 100 MW, 其中近 2/3 用于平滑负荷。2004 年, 在美

国哥伦比亚空军基地安装了 12 MW/120 MWh 钠硫电池系统, 充当备用电站。

2.6.3 液流电池系统

20 世纪 90 年代初, 英国 Innogy 公司成功开发出 5、20 和 100 kW 系列多硫化钠 / 溴液流储能电堆, 并于 2001 年和 2002 年分别在英国和美国各建造了 120 MWh 储能电站, 用于电站调峰和 UPS; 2001 年, 250 kW/520 kWh 全钒液流电池在日本投入商业运营。近十多年来, 美国、日本、欧洲等国家相继将与风能/光伏发电相配套的全钒液流电池储能系统用于电站调峰, 表 8 显示了其中一些示范应用工程。

表 8 全钒液流电池示范应用工程

Tab. 8 A summary of VRB energy storage systems supplied by VRB Power, V-Fuel Pty and SEI

序号	地点	储能系统规模	功用	研发单位	时间
1	爱尔兰风电场	2 MW×6 h	风/储发电并网		2006 年 8 月
2	美国犹他州	250 kW×8 h	削峰填谷		2004 年 2 月
3	澳洲金岛风场	200 kW×8 h	风/储/柴联合		2003 年 11 月
4	丹麦	15 kW×8 h	风力/储能发电		2006 年 6 月
5	南非	250 kW/520 kWh	应急备用	加拿大 VRB Power Systems Inc.	2002 年
6	美国南卡罗来纳州	30/60 kW×2 h	备用电源		2005 年 10 月
7	美国佛罗里达州	2×5 kW×4 h	光伏/储能发电		2007 年 7 月
8	意大利	5 kW×4 h	电信备用电源		2006 年 4 月
9	丹麦	5 kW×4 h	风力/光伏发电		2006 年 4 月
10	加拿大	10 kWh	偏远地区供电		2006 年 3 月
11	德国	10 kWh	光/储并网		2005 年 9 月
12	泰国	1 kW/12 kWh	光伏/储能应用	V-Fuel Pty Ltd	1993 年
13	日本	200 kW/800 kWh	平稳负载波动		1997 年
14	关西电力	450 kW/1 MWh	电站调峰	住友电工	1999 年
15	日本	1.5 MW/3 MWh	电能质量		2001 年
16	日本北海道	170 kW/1 MWh	风/储并用系统		2001 年

3 我国能源的布局及电力系统的特点和需求

3.1 我国能源特点

我国能源具有以下特点:

(1) 化石能源呈逐年下降趋势, 但以煤炭为主。

表 9 显示了我国国土资源部对一次能源结构比例的统计数据, 可以看出, 化石能源在整个 20 世纪所占的份额均在 93% 以上, 其中煤炭能源占主要

表 9 我国一次能源构成状况

Tab. 9 Primary energy structure in China

年份	能源结构					
	化石合计/%	煤/%	石油/%	天然气/%	水电+核电/%	非水能的可再生能源/%
1970	96.5	80.9	14.7	0.92	3.53	—
1980	96.0	72.2	20.7	3.1	4.0	—
1990	94.9	76.2	16.6	2.1	5.1	—
1995	93.9	74.6	17.5	1.8	6.1	—
2000	93.2	66.1	24.6	2.5	6.8	—
2005	93.4	69.6	21.1	2.7	6.6	—
2020	85	55	22	8	8	7
2050	70	40	20	10	15	15

部分,2050年化石能源份额将减至70%以下,水电、核电和可再生能源的份额将增加到30%以上。21世纪上半叶,随着我国能源可持续发展体系的逐步完善,人们已经普遍认识到必须最大限度地提高能源生产与利用效率。

(2) 资源分布区域性特征明显。

我国已探明煤炭储量为6044亿t,其中70%分布在山西、陕西和内蒙古;可开发的水电资源为1923.3TWh,99.4%分布在中、西部地区,其中65%分布在四川、云南和西藏;石油资源890亿t,主要分布在东、西部地区;天然气资源 $20 \times 10^{13} \text{m}^3$,主要分布在新疆、青海和四川。从能源分布可见,东部地区京、津、冀、鲁、苏、沪、浙、闽、粤是我国经济最发达和发展速度最快的地区,其人口占全国的34.89%,GDP占全国的54.04%,但其煤炭和水电资源却只占全国的8%和0.3%,是全国最严重缺乏能源资源的地区。而西部11个省、区人口占全国的25.25%,GDP占全国的17.32%,却拥有大量的水电和煤炭资源。东西部能源资源分布不均,富煤、贫油、少气、多水力的能源资源特点决定了我国特有的电力系统结构。

3.2 我国电力系统的特点

目前,我国燃煤发电量约占总发电量的75%,火力发电站多数靠近煤炭资源比较丰富的西北部地区;水力发电量约占23%,大多集中在西、南部地区;核电、太阳能发电和风力发电等非水能可再生能源发电量约占2%;电力资源和负荷分布不均的现状使得长距离输电成为必要。电能需求量日益增长,据统计,2010、2020年我国装机容量将达到550GW和800GW。为了改善电能质量并提高电力系统的稳定性和可靠性,要求电力系统各部分电气紧密连接,电力系统向更大规模方向发展。

我国现已形成华北、东北、华东、华中和西北5个跨省区电网以及新疆、青海和西藏3个独立省网,电压等级包括110、220、500、800kV(西北为110、330、750kV),并实现了华中与华东超高压直流的跨大区异步互联网,建成了三峡至华东和正在建设三峡至南方电网的30GW的超高压直流输电系统,投入运行葛(洲坝)沪(上海)、三(峡)常(州)、三(峡)广(东)、三(峡)沪(上海)、天(天生桥)广(东)、贵(州)广(东)I回、II回等7个超高压直流输电工程和灵宝直流背靠背输电工程。预计到2020年底,中国还将建成覆盖华北、华中、华东地区的特高压交流同步电网,建成 $\pm 800 \text{kV}$ 向家坝—上海、锦屏—苏南、溪洛

渡—浙西等特高压直流工程15个,总输送容量达94.40GW。上述工程为大区内保持同步电网、大区间实现直流异步互联奠定了良好基础,基本形成了“西电东送、南北互供、全国联网”的格局。

3.3 我国电力系统现实需求

目前,我国电力系统应做到以下几点:

(1) 确保大电网的安全性和可靠性。

我国电网覆盖面积大,结构薄弱,各种一次能源的分布与负荷的密度极不均匀,且电源远离负荷中心,装机容量与输电跨度比小,系统的稳定性和安全性受到严重挑战。然而,现有系统中储能容量仅占总装机容量的1.7%左右,远没有达到合理水平,且尚未建立用于瞬态电能质量管理和电力系统功率调节/补偿的快速大容量储能系统,只能依靠继电保护和自动装置切机,被动达到稳定,因此,很难从根本上避免大面积停电事故。近20年来,我国由于系统失稳造成的大停电事故已达140余起,每次损失数千万元乃至数亿元。因此,迫切需要建立起以多点储能装置支撑的系统,有效地支持电网的系统电压和频率,消除由于电网互联和负荷突变而形成的区域振荡,实现输/配电系统的动态管理和电能质量管理,提高电网暂态稳定性。

(2) 加强区域电网峰谷负荷的自调节性。

电力负荷存在白天高峰和夜间低谷的周期性变化,负荷峰谷差往往达到发电出力的30%~40%,近年来存在迅速递增的趋势,如夏季空调制冷负荷就已接近华中、川渝电力负荷的1/3,华东达28.7%,京津唐达28.9%。电网峰谷差给发电和电力调度造成困难。因缺乏调峰电源,许多省、区高峰时段不得不拉闸限电。建立既经济又反应快速的调峰电站和大规模储能系统,以便将低谷电能转化为高峰电能,是实现发电和用电间解耦及负荷调节的有效途径,也是推动电力工业市场化的前提。

(3) 提高输变电能力,解决跨区域供需矛盾。

我国经济社会发展对能源的依赖性较高,2001年终端用户能源消费支出1.25万亿元,占GDP总量的13%,而美国仅为7%。尽管核电技术已经引进,全国联网格局基本形成,但电力供需地域性矛盾依然严峻,京津唐、长江三角洲和珠江三角洲三大负荷地区现有的电力并不能满足实时需要,据2005年统计,全国缺电量高达30GW。在增加发电容量的同时,充分利用储能系统、最大限度地提高现有设备输变电能力、经济高效地利用电能是解决

问题的根本所在。

(4) 增加供电可靠性, 改善用户电能质量。

在电力系统发生突发事件和电网崩溃时, 为防止医院、消防、通信、银行等重要负荷区电力中断, 储能设备将充当 UPS/EPS 提供动力, 可为电网恢复争取时间, 避免损失扩大。同时, 可以与电力电子变流技术相结合, 实现高效的有功功率调节和无功控制, 快速平衡系统中由于各种原因产生的不平衡功率, 减小扰动对电网的冲击, 改善用户电能质量。

(5) 满足可再生能源系统的需要。

我国风电装机容量为 764MW, 2020 年时将达到 30 GW, 而光伏发电将达到 1 GW, 可再生能源在我国未来的能源结构中占有极其重要的位置。风能、太阳能等可再生能源发电具有不稳定和不连续的特点, 并网容量和电网容量相比较小时对系统冲击不大, 利用电网控制与配电技术能够保证电网安全稳定运行。当风电、光电容量所占比例超过 10%后, 对局部电网将产生明显冲击, 严重时会引起大规模恶性事故。因此, 研发高效储能装置及其配套设备, 与风电/光伏发电机组容量相匹配, 支持充放电状态的迅速切换, 确保并网系统的安全稳定已成为可再生能源充分利用的关键。

表 10 显示了各种电力储能技术及其潜在的应
表 10 应用于电力系统的储能技术

Tab. 10 Comparison of energy storage technologies for power system

储能类型	额定功率	反应时间	效率/%	应用方向
机械储能	抽水蓄能 100~2000 MW	4~10 h	60~70	能量管理, 频率控制和系统备用
	CAES 100~300 MW	6~20h	40~50	调峰发电厂、系统备用电源
	Micro-CAES 10~50 MW	1~40h	—	调峰
电磁储能	飞轮储能 5 kW~5 MW	15 s~15 min	70~80	调峰、频率控制、UPS/EPS、电能质量控制
	SMES 10 kW~20 MW	Ms~15 min	80~95	输配电系统暂态稳定性、提高输电能力、电能质量管理、UPS
电化学储能	电容器 1~100 kW	1 s~1 min	70~80	电能质量调节、输电系统稳定性
	超级电容器	—	—	与柔性交流输电技术相结合
	铅酸电池 1 kW~50 MW	1 min~3 h	60~70	电能质量控制, 系统备用电源, 黑启动, UPS/EPS
先进电池技术, 如 NaS、Li 等	1 kW~10 MW	1 min~数 h	70~80	平滑负荷、备用电源
	液体电池 10 kW~100 kW	1~20 h	—	分布式、可再生能源系统稳定性、用户侧平滑负荷、备用电源

用领域。通过研究和探索, 将不同容量的储能系统卓有成效地应用于电力系统发、输、变、配、用电各个环节, 将全面提升我国电力系统的运行效率、可靠性、电能质量和资产价值。

4 我国电力系统储能技术的应用状况、研发方向和重点

4.1 储能技术应用现状

到目前为止, 我国 9 个省、区、市已建成 11 座抽水蓄能电站, 装机容量约为 5.7 GW(其中 0.6 GW 供香港), 占全国装机容量的 1.8%。表 11 显示了已建和“十一五”期间在建的抽水蓄能电站, 待全部电站建成投入使用后, 除湖北、拉萨外, 可调峰的水电(包括抽水蓄能电站在内)约占电网总容量的 3%~7%。目前, 我国已对 CAES、SMES、飞轮和电池储能等方式的关键技术开展了研究, 但还没有在电力系统中进行实际应用。

表 11 我国抽水蓄能电站统计数据
Tab. 11 Pumped hypo stations installed in China

地区	已建电站	机组容量/MW	在建电站	机组容量/GW
华北地区	河北岗南	11	山东泰安	1.00
	河北潘家口	270	山西西龙池	1.20
	北京十三陵	800	河北张河湾	1.00
华南地区	广州	2 400	—	—
华东地区	浙江溪口	80	浙江桐柏	1.20
	浙江天荒坪	1 800	—	—
	安徽响洪甸	80	安徽琅琊山	0.60
	江苏沙河	100	江苏宜兴	1.00
华中地区	湖北天堂	70	—	—
西部地区	拉萨羊卓雍湖	90	—	—

4.2 我国电力储能技术的发展方向和研发重点

图 1 显示了各种储能技术的功率等级及其目前的技术成熟度, 具体方式的选择需考虑实际用途、额定功率、桥接时间、技术成熟度、系统成本、环

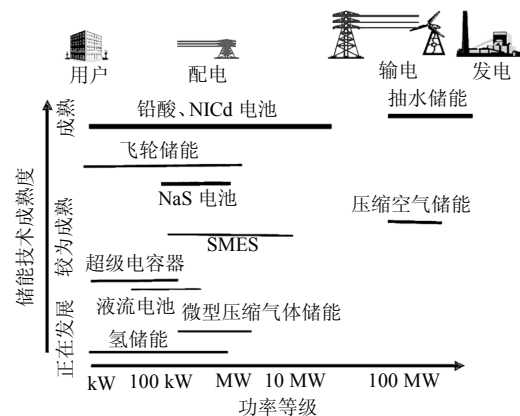


图 1 储能技术功率等级及其技术成熟度

Fig. 1 Technical capability and commercial availability of energy storage types

境条件等多种因素。针对我国电力系统的现实需要，并从国家发展战略、国家中长期科技规划和城市电网可持续发展大计综合考虑，2007年国家电网公司提出了“能源转换关键技术研究—储能关键技术研究”框架，并进行了周密部署，“十一五”期间将以电力储能技术前期研究和共性问题研究为基础，以先进储能装置和电网接入系统关键技术研究为主攻方向，以示范工程为成果展示平台，以前瞻性研究为储能技术可持续发展的驱动力，通过自主创新掌握电力储能系统的核心技术，并推动实际工程的应用。

国内电力储能技术的应用、研究与开发表现出以下3个特征：

(1) 以可再生能源系统应用为切入点，开发100 kW级全钒液流和MW级钠流电池储能系统，逐步替代铅酸电池系统，为区域电网平滑负荷、提高配电网供电可靠性、UPS等应用奠定基础。

由于全钒液流电池正、负极活性物质均为钒，只是价态不同，可以避免正、负极活性物质通过离子交换膜扩散造成的元素交叉污染，成本低、寿命长，已成为液流电池体系中主要的商用化发展方向之一。自1995年起，我国就开始了全钒液流电池的研究，已成功开发出10 kW级储能系统，转换效率大于80%，最大输出功率超过25 kW，并建立了电池实验室模型，在电极设计、溶液制备、浓度控制、导电塑料成型及批量生产、公用管道设计、电池组装配和调试等方面积累了丰富经验，国产化全氟磺酸离子膜有望取代进口离子膜材料，这为自主研发大容量储能系统奠定了条件。2008年，中国电力科学研究院将研发用于风电场的100 kW级储能系统，并考核其运行的可靠性和耐久性。

钠流电池能量密度高，维持300°C左右运行温度的技术难题已得到解决，但目前价格较高，推广应用主要障碍源于国外企业的技术垄断。通过国产化来降低成本，实现大容量储能系统的应用，成本将接近铅酸电池系统。目前，上海电力公司正着手50 kW~1 MW不同容量等级钠硫电池系统的研制，用于UPS/EPS，力图掌握大尺寸电解质陶瓷管等核心部件制备技术，建立标准和规范，并实现模块化、规模化生产。

(2) 以液氮温区运行SMES研究为重点，开发分布式储能系统，提高我国大电网暂态稳定性，抑制低频振荡，增加高压线路的输电能力。

在大电网互联的模式下，当系统中出现故障或者大扰动时，同步发电机并不总是能够足够快地响应扰动以保持系统功率平衡和稳定。SMES的ms级响应、大容量功率/能量传递决定了其在提高大电网动态稳定性方面是无可替代的：SMES在系统发生故障或受到扰动时能够快速吸收/发出功率，减小和消除扰动对电网的冲击，消除互联电力系统中的低频振荡，抑制同步振荡和谐振，并在扰动消除后缩短暂态过渡过程，使系统迅速恢复稳定状态，提高系统运行的可靠性。

在“九五”和“十五”期间，我国已先后研制成功25 kJ~1 MJ SMES系统，目前1 MJ SMES正处于并网调试中，但低温超导SMES制冷系统较复杂，技术要求高，而铋系高温超导SMES通常采用制冷机冷却，稳定裕度低。为进一步改善SMES性能、降低成本并提高其经济性，中国电力科学研究院正在分阶段、有重点地开展第二代高温超导带材——钇钡铜氧(YBa₂Cu₃O₇)涂层导体SMES储能单元构造、低损耗快速功率变换及其控制策略、模块化系统集成、动态建模与仿真、分布式储能系统规划及其与电网匹配运行等关键技术的探索性研究，通过示范推动SMES的实际应用，确保大电网的安全、可靠运行。

(3) 加快建设GW级抽水蓄能混合式电站，满足大电网调峰和紧急事故备用的现实需要。

为了优化电源结构，保证电网安全，改善电能质量，我国抽水蓄能电站的建设和规划设计工作正在全国范围内蓬勃展开。抽水蓄能电站的运行正逐渐向双日或周季调节过渡，并通过技术创新提高转换效率、增加运行灵活性。为提高经济效益，潘家口、响洪甸、佛磨、双沟和天堂等电站融水利、水电、抽水蓄能于一体，选择混合模式开发实现电站的新建和扩建，促进了社会经济协调发展、环境保护和资源的节约利用。

5 结束语

电力储能技术正朝着转换高效化、能量高密度化和应用低成本化方向发展，通过试验示范和实际运行日趋成熟，在电力系统中发挥出调峰、电压补偿、频率调节、电能质量管理等重要作用，确保了系统安全、稳定、可靠的运行。基于我国能源分布特点，国家电网已基本形成“西电东送、南北互供、全国联网”的格局。为确保大电网的安全性和可靠

性、加强区域电网峰谷负荷的自调节性、提高输电能力、解决跨区域供需矛盾、增加供电可靠性、改善用户电能质量并满足可再生能源系统的需要,将以开发 100 kW 级全钒液流、钠流电池储能系统和液氮温区运行 SMES 为重点,加快建设 10GW 级抽水蓄能混合式电站,实现电力系统的优化配置和电网的可持续发展。

参考文献

- [1] Bhargava B, Dishaw G. Application of an energy source power system stabilizer on the 10 MW battery energy storage system at Chino substation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(1): 145-51.
- [2] Kyung S K, McKenzie K J, Liu Y L, et al. A study on applications of energy storage for the wind power operation in power systems [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montréal Québec, Canada, 2006.
- [3] Billinton R B. Reliability considerations in the utilization of wind energy, solar energy and energy storage in electric power systems[C]. International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Stockholm, Sweden, 2006: 1-6.
- [4] Billinton R B. Impacts of energy storage on power system reliability performance[C]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Saskatchewan, Canada, 2005: 494-497.
- [5] Cipcigan L M, Taylor P C. Investigation of the reverse power flow requirements of high penetrations of small-scale embedded generation [J]. Renewable Power Generation, 2007, 1(3): 160-166.
- [6] Faias S, Sousa J, Castro R. Contribution of energy storage systems for power generation and demand balancing with increasing integration of renewable sources: application to the Portuguese power system [C]. European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2007: 1-10.
- [7] Jewell W T. Electric industry infrastructure for sustainability: climate change and energy storage[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, USA, 2007.
- [8] Schoenung S M, Burns C. Utility energy storage applications studies [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(3): 658-665.
- [9] Lu N, Chow J H, Destrochers A A. Pumped-storage hydro-turbine bidding strategies in a competitive electricity market[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Ontario, Canada, 2003.
- [10] Swider D J. Compressed air energy storage in an electricity system with significant wind power generation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 95-102.
- [11] 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.
- [12] Uemura S, Nomura S, Shimada R. Stabilization of electric power system using the variable speed flywheel generator[C]. Proceedings of the Power Conversion Conference, Nagaoka, 1997: 215-218.
- [13] 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.
- [14] Rehtanz C. Systemic use of multifunctional SMES in electric power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(4): 1422-1427.
- [15] Taguchi A, Imayoshi T, Nagafuchi T, et al. A study of SMES control logic for power system stabilization[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2343-2346.
- [16] Kamolyabutra D, Mitani Y, Tsuji K. Power system stabilizing control and current limiting by a SMES with a series phase compensator [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2001, 14(1): 1753-1756.
- [17] Dechanupaprittha S, Hongesombut K, Watanabe M, et al. Stabilization of tie-line power flow by robust SMES controller for interconnected power system with wind farms[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2365-2368.
- [18] Madawala U K, Thrimawithana D J, Nihal K. An ICPT-supercapacitor hybrid system for surge-free power transfer[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3287-3297.
- [19] Yan J, Oti K, 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 Conversion Conference, Nagoya, 2007: 236-242.
- [20] 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, Brazil, 2003: 317-322.
- [21] 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.
- [22] Hawkins J M, Robbins T P. A field trial of a vanadium energy storage system[C]. The 23th International Telecommunications Energy Conference, Edinburgh, Scotland, 2001: 652-656.
- [23] Ohtaka T, Iwamoto S. Possibility of using NAS battery systems for dynamic control of line overloads[C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002: 44-49.
- [24] Skyllas-Kazacos M, Menictas C. The vanadium redox battery for emergency back-up applications[C]. The 19th International Telecommunications Energy Conference, Melbourne, Australia, 1997: 463-471.
- [25] Sasaki T, Kadoya T, Enomoto K. Study on load frequency control using Redox flow batteries[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Denver, Colorado, USA, 2004: 580-586.
- [26] Lone S A, Mufti M D. Integrating a Redox flow battery system with a wind-diesel power system[C]. International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth-2006, New Delhi, India, 2006: 1-6.

收稿日期: 2008-02-28。

作者简介:

张文亮(1954—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事高压技术和电磁兼容等方面的研究, E-mail: wlzhang@epri.ac.cn;

丘明(1970—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事超电力、低温功率电子学和储能技术等方面的研究, E-mail: qiuming@epri.ac.cn;

米小康(1959—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事储能、电动汽车能源供给和高压技术等方面的研究, E-mail: laixk@epri.ac.cn。

(责任编辑 王金芝)