

电化学储能技术及研究进展

张海龙¹, 贾明祥¹, 井新经², 李钊¹, 杨辉¹, 付龙龙¹, 张宇博¹

(1 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2 西安西热节能技术有限公司, 陕西 西安 710054;)

A Review on Electrochemical Energy Storage Technology

ZHANG Hailong¹, JIA Mingxiang¹, JING Xinjing², LI Zhao¹, YANG Hui¹, FU Longlong¹, ZHANG Yubo¹

(1. Xian Thermal Power Engineering Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Xi'an TPRI Energy Conservation Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, China;)

摘要: 随着风能和太阳能等新能源大规模发电并网, 储能技术为解决电网大规模接纳新能源并网发电提供了有效途径, 其中电化学储能在调频领域具有无可比拟的优势。本文介绍了储能系统的作用和分类, 分析了电化学储能调频的原理, 重点介绍了锂离子电池、铅酸电池、钠硫电池、液流电池、镍镉电池、镍氢电池的原理和技术特点。对常用的电化学储能电池性能参数进行了对比, 指出了其发展方向, 为电厂选择储能电池提供参考。

关键词: 电化学储能; 新能源; 调频; 原理; 研究进展;

ABSTRACT: As the large-scale grid connection of new energy such as wind energy and solar energy storage technology provides an effective way to solve the problem of large-scale grid connection of new energy. Electrochemical energy storage has unparalleled advantages in the field of frequency modulation. The function and classification of energy storage system are introduced in this paper, and the principle of electrochemical energy storage frequency modulation is analyzed. The principle and technical characteristics of Li-ion battery, lead-acid battery, sodium sulfur battery, flow battery, nickel cadmium battery and nickel metal hydride battery are mainly introduced. The performance parameters of common electrochemical energy storage battery are compared, and its development direction is pointed out, which provides reference for the selection of energy storage battery in power plant.

KEY WORD: electrochemical energy storage; new energy; frequency modulation; principle; research progress

1 引言

大规模化石能源的开发导致气候变暖、环境污染等一系列问题, 风能、太阳能等新能源日益受到各国的青睐。早在 2014 年 7 月我国国家电网公司就提出了建设“全球能源互联网”的概念, 促进了清洁能源的开发和利用。近年来, 风能和太阳能等新能源得到了快速发展, 截至 2019 年底, 我国并网风电装机容量 2.1 亿千瓦, 同比增长 14.0%; 并网太阳能发电装机容量 2.05 亿千瓦, 增长 17.4%^[1]。风能和太阳能等清洁能源具有随机性、波动性、间歇性等特点, 随着其大规模发电并网对电网的运行带来了新的挑战, 可能造成电网功率波动、峰谷差增大, 对电网频率稳定、电压稳定、潮流控制等产生较大影响, 进一步影响电网的安全稳定运行^[2]。当电网消纳能力不足

时, 为保证系统安全稳定运行不得不采取“弃风弃光”措施, 第四次能源革命为人类可持续发展带来了机遇的同时也带来了巨大挑战。

在传统电力系统中, 发—输—变—配—用五个环节几乎同时完成, “瞬时平衡”特性成为制约电力系统发展的瓶颈。大规模风能、太阳能等新能源发电并网, 降低了电网系统的旋转惯量, 对系统调频稳定控制提出更高的要求^[3]。由于火电机组系统惯性在调频方面存在响应时滞长、爬坡速率低、跟踪指令差、调节延迟、准确性差等问题, 以火电为主的调频方式受限于其运行特性无法完全满足日益增加的调频需求^[4], 而且火电机组频繁升降负荷易造成汽轮机调门摆动、锅炉受热面承受交变热应力, 甚至导致受热面变形拉裂, 发生爆管事故, 严重威胁机组的安全、稳定

运行。

储能技术的发展为解决电网大规模接纳新能源并网发电提供了有效途径。在电网中增加储能环节,升负荷时对外输出电能,降负荷时将多余电能存储起来,减少峰谷差对频率波动造成的影响,实现功率的平滑输出,增强电网系统的调频能力^[5]。储能在调频领域具有巨大优势,美国西北太平洋国家实验室得出,其调频效果可以达到燃煤机组的二十五倍以上^[6]。在众多储能技术中,具有快速响应、调节灵活性强、在毫秒至秒级实现满功率输出、在额定功率内的任何功率点实现精准控制等特点的电化学储能技术在火电调频中得到广泛应用。

本文介绍了储能系统的作用和分类,分析了电化学储能调频的原理,重点介绍了锂离子电池、铅酸电池、钠硫电池、液流电池、镍镉电池、镍氢电池的原理和技术特点,对常用的电化学储能电池性能参数进行了对比,指出了其发展方向,为电厂选择储能电池提供参考。

2 储能系统的作用及分类

2.1 储能系统作用

储能系统的发展为解决新能源消纳问题提供了方法途径,能够实现能量的时空平移,具有响应速度快、跟踪功率能力强等特点,可以快速实现功率的双向调节,在电力系统中得到广泛应用^[7]。

储能系统在负荷低谷时将电能存储起来、负荷高峰时向电网释放电能,储能系统应用于电网中相当于给电网增加了一个缓冲环节,使“刚性”系统变的“柔软”,进而提高电网运行的安全性、灵活性和稳定性^[8]。储能系统在电网中的作用主要有平抑波动、削峰填谷、自动发电控制(AGC)调频、消纳新能源、跟踪计划出力、系统黑启动与恢复、充当备用电源等,随着储能技术的不断发展,在电力系统的应用领域将更加宽广,带来的经济效益也更加显著^[9]。

目前来看,火电机组具有容量大、速率慢的特点,而储能系统具有容量小、速率快的特点,两者联合调频弥补了双方的不足,可以满足电网调频的要求,提高机组调频收益,避免了频繁快速升降负荷对机组带来的不利影响。

2.2 储能系统分类及特点

储能系统形式多种多样,按照能量转换与存储形式可分为:机械储能、电磁储能、相变储能、电化学储能,不同储能系统的特点见表1。

表1 不同形式储能技术特点

Tab.1 Technical characteristics of different energy storage

储能形式	能量转换储存方式	特点及应用
机械储能	将电能转化为动能或势能的形式存储,主要包括飞轮储能、抽水储能、压缩空气储能。	存储容量大、技术较为成熟,但投资成本高、建设周期长、受地理条件制约,在火电机组储能调频中应用较少 ^[10] 。
相变储能	利用材料在相变时吸热或放热来实现能量的储存与释放,主要有蓄热和蓄冷两种方式。	由于相变储能材料自身的限制,在电力系统中的还未得到规模化应用 ^[11] 。
电磁储能	将电能转化成电场能或磁场能的形式存储。主要包括:超级电容和超导储能。	能量存储密度低、单位成本较高,在电力系统中尚属于探索阶段。
电化学储能	通过化学反应实现电能与化学能之间的相互转化,完成电能的存储与释放。主要包括:锂离子电池、铅酸电池、钠硫电池、液流电池、镍镉电池、镍氢电池等。	技术成熟、成本相对较低等优点在电力系统中得到了快速发展,成为当前储能产业研发和应用的重点。

电化学储能技术具有转化效率高、容量/功率规模大,配置灵活、选址容易、安装便捷等优点,作为一种新型调频调峰手段得到了快速发展。根据中关村储能产业技术联盟发布的《储能产业研究白皮书 2019》,截止 2018 年底,我国电化学储能装机容量达到 1072.7MW,同比增长 464.4%,预计将在 2022 年突破 10GW,到 2023 年接近 20GW^[12]。

电化学储能具有快速响应、精确跟踪、双向调节的特性,配合常规调频机组参与电网调频可以有效改善系统调频效果。据国外相关机构研究发现,电化学储能系统在额定功率范围内,可以做到 1 s 内以 99% 以上的调节精度跟踪功率调

节曲线,采用电化学储能系统调频的火电机组,对于一个 10 MW 的电网 AGC 指令在 1 s 内就可以完成,电化学储能的 AGC 跟踪曲线几乎与 AGC 指令曲线重合,弥补了原有火电机组 AGC 跟踪中存在的调节反向、调节偏差及调节延迟等问题^[13]。因此,火电机组配备合适容量的电化学储能系统,可以大大提高火电机组调频收益。

3 火电厂电化学储能调频的原理

我国电网的额定频率(工频)为 50Hz,当电源侧与用户侧供需不平衡时就会引起电网频率波动,自动发电控制系统通过实时调节电源侧的有功输出,保证电网频率的稳定,解决短时间内的有功不平衡问题^[14]。电网对火电机组 AGC 调频有着严格的考核标准,现有火电机组不能满足电网 AGC 调频需求时面临着巨额罚款。

电化学储能参与 AGC 调频主要通过电池快速充放电实现,基本原理为:当机组发电量大于 AGC 指令要求时,电化学储能将多余的电能吸收存储起来,防止系统频率的上升;当机组发电量小于 AGC 指令要求时,电化学储能对外放出电能,防止系统频率的下跌,电化学储能通过调整系统内电量供需关系,使之满足有功平衡,达到调节频率的目的^[15]。

电化学储能调频系统接入火电机组高压厂用电系统,主要由电化学储能电池、双向储能变流器 PCS、高压环网装置、通信及控制系统等构成,如图 1 所示。双向储能变流器 PCS 用于控制储能电池的充放电,实现电化学储能电池与厂用电源之间的能量双向流动。控制系统根据 AGC 指令要求和机组出力情况计算自身出力设定值,当 AGC 指令大于机组出力时,控制系统发出放电指令,PCS 处于放电模式将储能电池内直流电转变为三相交流电输送至厂用电系统,PCS 接收到放电停止命令或达到电池放电截止电压时,放电过程结束;当 AGC 指令小于机组出力时,控制系统发出充电指令,PCS 切换到充电模式将厂用三相交流电转换为直流电充入储能电池中,PCS 接收到充电停止命令或达到电池充电截止电压时,充电过程结束^[13,16]。

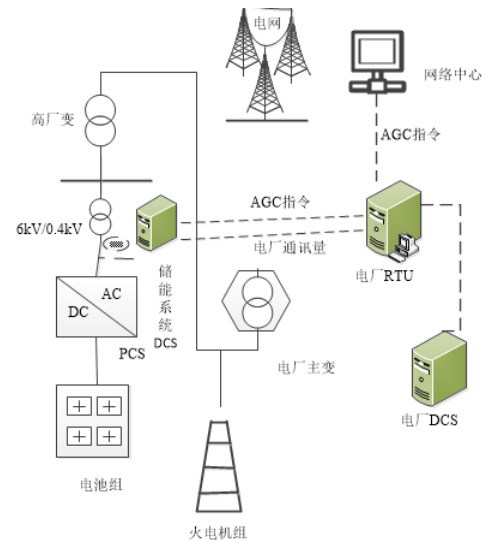


图 1 电化学储能调频原理图

Fig.1 Principle diagram of electrochemical energy storage frequency modulation

火电机组联合电化学储能调频,在挖掘自身调频能力的基础上辅助电化学储能调频可以更好的满足电网 AGC 调频的需求。电化学储能技术应用于电网调频中,一方面可以提高火电机组调频效果,增加调频收益,另一方面可以降低火电机组升降负荷速率,提高机组运行经济性、安全性、可靠性。

4 电化学储能技术

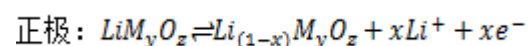
4.1 锂离子电池

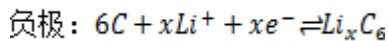
锂离子电池是指以锂离子嵌入化合物作为正极材料的电池的总称,正极材料为锂金属化合物,负极由特殊分子结构构成的碳组成,电解质为 LiPF_6 、 LiAsF_6 等有机溶液,如图 2 所示^[17]。



图 2 锂离子电池结构示意图

Fig.2 Structure diagram of Li-ion battery
锂离子电池基本电化学反应为:





式中 M 为不同的正极材料, 主要有铁、钴、锰、镍等。工作原理为: 当电池充电时, 正极的锂金属化合物电离生成锂离子和电子, 锂离子在电场力作用下从正极脱落, 穿过正负极之间的电解质和隔膜嵌入负极材料中, 由于隔膜的阻碍作用, 正极释放的电子被迫通过外电路到达电池负极, 与负极的石墨晶体和嵌入的锂离子结合形成碳化合物 Li_xC_6 ; 当电池放电时, 反应反方向进行, 锂离子从负极脱落穿过电解质嵌入正极, 锂离子在正负极之间不断脱落、嵌入形成锂离子浓度差, 实现电池的充电与放电过程^[18]。

锂离子电池具有体积小、循环性能好、效率高、充放电电流倍率大、能量密度高等优点, 在通信、航天、电力等领域得到了广泛的应用, 是目前世界上应用最广泛的电池。

根据极端材料不同, 锂离子电池主要分为: 锰酸锂、钴酸锂、钛酸锂、磷酸铁锂、三元锂等电池, 不同锂离子电池特点如表 2 所示。

表 2 不同锂电池特点

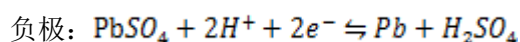
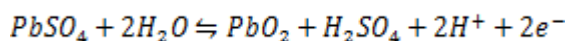
Tab.2 Types and characteristics of lithium battery

类型	特点
锰酸锂电池	耐高温性能差、循环寿命低
钴酸锂电池	成本较高、安全性较差
钛酸锂电池	单位容量价格高
磷酸铁锂电池	安全性更高、成本更低
三元锂电池	能量密度高和电压水平高, 一致性优秀, 充放电倍率较高, 但安全性较差。

4.2 铅酸电池

铅酸电池由正极板 (二氧化铅)、负极板 (铅)、隔板 (超细玻璃纤维棉)、电解液 (稀硫酸) 组成^[19], 铅酸电池化学反应方程式为:

正极:



电池充电时, 正极的硫酸铅与水反应生成二氧化铅、硫酸分子、氢离子、电子, 电子通过外

电路到达负极, 与硫酸铅发生反应生成铅原子和硫酸; 电池放电时, 反应逆向进行, 负极的铅与硫酸反应生成硫酸铅并释放两个电子, 电子从外电路流入正极, 与二氧化铅和硫酸反应, 生成水和硫酸铅^[20], 如图 3 所示。

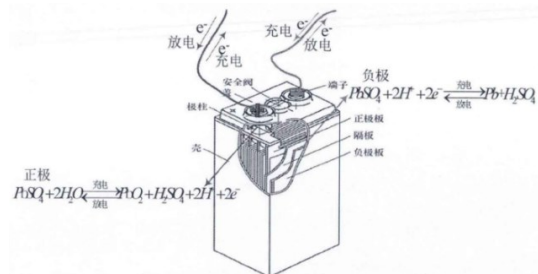


图 3 铅酸电池结构图

Fig.3 Structure diagram of lead-acid battery

铅酸电池适合温度变化范围小、充放电慢的场合, 由于其具有可靠性好、技术成熟、生产成本低的特点, 在电力系统中得到广泛应用, 常用于备用电源、事故电源等。然而铅酸电池循环寿命低、不能深度放电, 过充易产生气体, 并且铅对环境影响大, 如果电池放电很深, 其相对较短的寿命会急剧下降, 其低能量密度和短寿命周期阻碍了其进一步大规模使用。

为解决铅酸电池在高倍率充放电 (HRPSOC) 状态下负极因硫酸盐化而失效导致其循环寿命急剧降低的问题, 在不改变铅酸电池结构的前提下, 在负极铅中加入一定比例的碳材料, 碳材料自身的高导电性提高了负极活性物质利用率, 抑制了硫酸铅晶体的生长, 改善了负极不可逆硫酸盐化问题, 提高了电池在 HRPSOC 状态下的循环寿命, 通常将这种负极含有功能性碳添加剂的铅酸电池称为铅炭电池。铅炭电池在充放电功率、循环使用次数、充电速度等方面都显著提高。在负极中加入少量碳材料对制备工艺影响较小, 铅炭电池可以利用现有的铅酸电池生产设备进行生产, 实现大规模商业化应用^[21], 目前主要用于电动车、不间断电源等领域。

4.3 钠硫电池

钠硫电池于 1967 年由美国福特公司发明, 具有高比功率和高比能量、循环寿命长、成本低、运行稳定、维护量少以及无自放电等特性。钠硫电池由正极 (熔融的液态硫)、负极 (熔融的液态钠)、电解质 (beta—氧化铝陶瓷)、隔膜、

外壳构成,如图4所示^[22]。

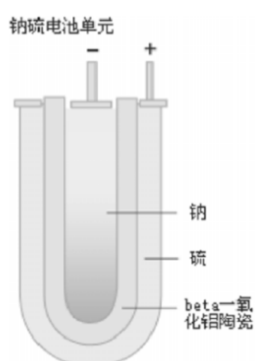
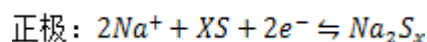
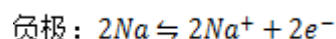


图4 钠硫电池结构示意图

Fig.4 Structure diagram of sodium sulfur battery

钠硫电池是一种在高温情况下工作的二次电池,一般工作温度在 300℃ 以上,正负电极均处于熔融状态,固态陶瓷电解质可以达到一定高程度的离子电导率,钠离子透过氧化铝陶瓷与硫之间发生可逆反应,实现电能的储存与释放,反应方程式为:



放电时,负极的液态钠在陶瓷材料界面内氧化成 Na^+ , Na^+ 通过固体电解质到达正极,与被还原的液态硫反应形成 Na_2S_x ,随着放电过程的进行, Na_2S_x 与剩余的液态硫反应生成多硫化钠;充电过程与放电过程相反,多硫化钠被氧化为 S,从而将能量存储在电池中^[23]。

钠硫电池是一种高比能量蓄电池,其理论比能量为 760Wh/kg,实际已大于 150Wh/kg,是铅酸电池的 3-4 倍,且具有使用寿命长、能量和功率密度大、效率高等优点,适合于大规模储能系统应用。日本的 NGK 公司是全球唯一具备批量生产的能力的公司,美国、日本、德国、法国等国家已经建立了多个大容量储能电站用于对新能源的调峰调频。但钠硫电池需在高温下运行,若 β -氧化铝陶瓷破裂形成短路,将造成很大的安全事故,正、负极活性物质具有一定的腐蚀性,电池对固体电解质、电池结构和操作条件的要求严格,限制了钠硫电池在电力系统中大规模使用。为解决上述问题,目前已研发出室温下操作的、低成本的、安全性更好的室温钠硫电池

(RT Na-S),不过电池的性能还有待进一步提高,目前在全球范围内钠硫电池应用范围仅次于锂离子电池,已建成 200 多座储能电站。对于功率型储能系统和能量型储能系统,钠硫电池均具有良好的适应性;然而由于其成本高、国内技术尚不成熟,目前在国内暂不具备大规模应用的条件。

4.4 液流电池

液流电池通过可溶性电对的氧化还原反应实现能量存储与释放,主要由正负电极、电解液、离子交换膜、储液罐、泵等组成,如图5所示^[24]。电解液是液流电池的储能物质,分别储存在正极、负极的电解液储罐中,电池内正极、负极之间由离子交换膜隔开,电池工作时,正负极储液罐内的电解液由各自的泵送入正负极反应室参与化学反应,通过电解液循环流动,实现电能和化学能的相互转化。充电时,电池将电能转化为化学能储存在电解液中;放电时,电池将储存在电解质溶液中的化学能转化为电能,供负载使用^[25]。

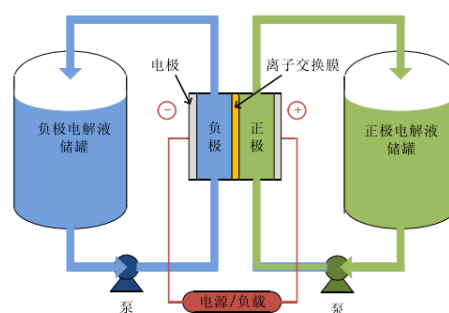


图5 液流电池结构示意图

Fig.5 Structure diagram of flow battery

液流电池不同于使用固体材料或气体材料做电极的二次电池,其含能物质是电解液中的活性物质,这个特性使得液流电池的容量不再受制于电极物质,只要循环的电解液足够多,理论上容量也会无限扩展。液流电池还具有循环使用寿命长、可靠性安全性高、配置灵活等特点,非常适用于大规模储能场合。液流电池的主要缺点是储液罐占地面积大、能量密度低、泵消耗额外能量、电池工作时对工作温度的要求较高。

液流电池主要有锌溴液流电池、多硫化钠溴液流电池、全钒液流电池以及铁铬液流电池。锌溴液流电池和多硫化钠溴液流电池因其具有一

定的毒性及运行成本较高,在电网的应用受到了限制。全钒液流电池具有寿命长、规模大、响应速度快、安全可靠等突出优势,在电站调峰、光电储能系统、风电储能系统以及不间断电源和应急电源等领域到的广泛应用,中国的普能公司已经获得了相关的技术,并开展了商业化应用。全钒液流电池也存在价格高、腐蚀性大、 V^{5+} 的氧化性强等缺点,但是随着储能技术的完善与材料工艺的推进,其在大容量储能领域具有显著的优势,具有广阔的发展与应用前景。铁铬液流电池具有价格便宜、循环寿命长、腐蚀性小、效率高、环境适应性强、安全性高等优点,而且铁铬混合电解液避免了电池充放电过程中活性离子的交叉污染,电解液还能循环利用,避免了资源浪费和环境污染,在电网调频、削峰填谷等领域极具竞争优势,是一种具有很大发展潜力的大规模储能技术。目前,国家电投集团科学技术研究院有限公司正在建设国内首座百千瓦级铁-铬液流电池储能示范电站,示范项目将于 2020 年完成调试并投入运行。

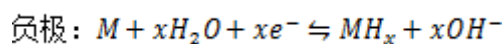
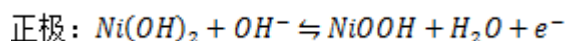
4.5 镍镉电池

镍镉电池是以金属镉或镉氢氧化物作为阴极,氢氧化镍作为阳极,氢氧化钾水溶液作为电解质的碱性蓄电池。当对镍镉电池充电时,会在阳极上面产生氢氧化镍,在阴极上面产生金属镉,因而在两极间形成了电位差;将镍镉电池的阳极和阴极两端外接负载放电时,阴极端产生带负电的电子经由外接负载流向阳极,因此提供能量供外部负载消耗。

镍镉的优点是“结实”、价格便宜;缺点是镉金属对环境有污染,电池容量小,寿命短。镍镉电池具有记忆效应,每次充电都须先放电,只有将电池中的余电放净后再进行充电才能保持电池的充电量。因此,在电力系统调频中应用很少^[26]。

4.6 镍氢电池

镍氢电池主要由正极(氢氧化镍)、负极(储氢合金)、电解液(氢氧化钾)、隔膜组成,其化学反应为:



式中, M 和 MH 分别表示金属物质和储氢合金。充电时,正极的氢氧化镍被氧化成镍氧化物,负极的金属物质还原成储氢合金;放电时,正极的镍氧化物被还原成氢氧化镍,负极的储氢合金氧化成金属物质^[19]。

镍氢电池具有较高的结构稳定性、功率密度高、寿命周期长等特点,电池密闭性好免维护,具备优良的耐过充和耐过放能力,被广泛应用于便携式电动工具、零售类电子器件、混合动力汽车和军事装备等多个领域。镍氢电池也具有比能量相对较低(对锂离子电池而言)、自放电性能较差、循环寿命一般、原材料成本较高(与锂离子电池相比,价格优势不明显)等诸多缺点,使其在与锂离子电池的市场竞争中处于劣势地位,综合考虑成本、效率等因素,在电力系统中,镍氢电池不具备大规模应用条件。

5 电化学储能技术对比及发展方向

5.1 电化学储能技术对比

火电机组联合电化学储能调频目的在于实时跟踪 AGC 指令,减少控制偏差,提高调频效果,减少电网对 AGC 调频的考核,增加调频收益。因此,对参与 AGC 调频的储能电池的循环寿命、充放电速率、电池容量有较高要求,同时还要考虑电池的安全性、功率密度及成本、充放电效率等因素来进行储能电池的选择。镍镉电池和镍氢电池不具备在火电厂储能调频中大规模应用的条件,锂离子电池、铅酸电池、钠硫电池、液流电池性能参数如表 3 所示。

表 3 电化学储能技术性能参数
Tab.3 The parameters of electrochemical energy storage

项目	锂离子	铅酸	钠硫	液流
功率等级	10MW	50MW	10MW	100MW
比容量 (Wh/g)	130-200	30-60	100-250	15-85
响应时间	10ms-1.5s	ms-s	ms-s	20ms-1s
充放电效率 (%)	90-98	63-80	75-90	65-85
自放电率 (%/月)	0-1	2-5	0	0
循环寿命 (次)	2000-10000	500-4000	2000-4	2000-160
	00		500	00

成本 (元/kWh)	2500-450	800-1800	2000-3	2000-600
	0		000	0
安全性	较好	很好	较差	较好

目前火电厂储能调频应用最广的是锂离子电池，技术成熟且近年来成本不断降低，国内以自主研发成熟度高的磷酸铁锂电池为主，三元锂电池是将来重点发展的方向，提高三元锂电池的安全性能是将来研究的重点。

铅酸电池以成本低、技术成熟、可靠性高等优点最早应用于电力系统领域。铅酸电池负极加入高电容活性炭材料制成的铅炭电池在循环寿命、功率密度等方面有所提高，性价比较高。在现有工艺基础上进一步提升铅酸电池的技术水平，延长循环寿命是将来发展的重点方向。

钠硫电池能量密度高、可进行大容量配置，然而 β —氧化铝陶瓷管的制备技术仅被极少数公司所掌握，其运行时的高温环境存在安全隐患，随着常温钠硫电池技术发展和成本降低，将来可在调频领域得到进一步应用，高导电率的 β —氧化铝陶瓷管的制备技术、提高钠硫电池的安全性、降低其生产成本是将来研究的重点。

液流电池最适合大规模储能，大规模、低成本、寿命长、效率高是液流电池的发展方向和目标。全钒液流电池得到了重点研究，在美国、德国、意大利等多个国家已投入产业化应用，后续的研究重点在于如何降低其高昂成本。铁铬液流电池大幅度降低了液流电池的成本，目前处于示范项目阶段，为储能领域带来一种新的技术创新和突破，将来具有很大的发展潜力。

通过上述分析，具备关键性能优势的锂离子电池在未来一段时间仍是储能调频应用领域的的首选。铅炭电池、常温钠硫电池、全钒液流电池、铁铬液流电池随着技术的不断发展和性能不断提升将在储能调频领域得到进一步发展。

5.2 电化学储能发展路线图

截止 2018 年底，在全球电化学储能装机容量中，锂离子电池占比高达 86.3%，铅酸电池、钠硫电池、液流电池占比如图 6 所示，锂离子电池占据绝对主导地位。

锂离子电池在目前仍是火电厂储能调频系

统的首选，铅酸（炭）电池作为锂离子电池的有效补充；全钒液流电池、铁铬液流电池是未来五年发展的重点方向，建设 100MW 级示范电站；钠硫电池是长期发展的方向，突破液态金属电池的关键技术，实现钠硫电池的国产化，降低其生产成本。

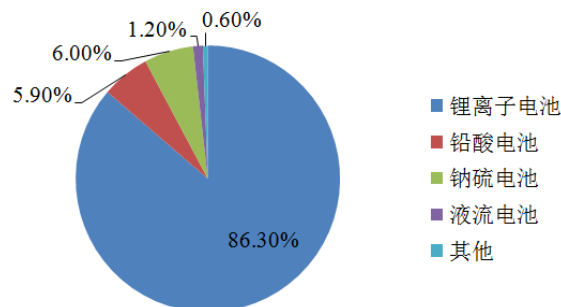


图 6 2018 年底全球电化学储能装机容量
Fig.6 Installed capacity of global electrochemical energy storage by the end of 2018

5.3 动力电池梯次利用

近年来，在国家政策的支持下新能源汽车得到了大力发展，截止 2019 年底，全国新能源汽车保有量达到 381 万辆。当新能源汽车的“心脏”——动力电池容量下降至 70%~80%额定容量时，将无法满足电动汽车要求而被迫退役，其使用寿命一般在 3~5 年，到 2025 年动力电池退役量将达到 90GW·h，如此大量的电池废弃不但浪费了其潜在使用价值而且对环境产生严重威胁。将退役的动力电池应用在对电池性能要求低的场合，充分发挥电池的剩余价值，实现电池的梯次利用，成为目前研究的热点，动力电池的梯次利用目前已应用电力系统储能、通信基站备用电源、小型分布式家庭储能等领域。

电动汽车退役的动力电池性能可满足电力系统储能的要求，通过动力电池的梯次利用可以大幅降低电力储能系统的成本，优化储能配置，具有较好的环境、生态、社会效益。目前动力电池梯次利用主要是锂离子电池，尤其是磷酸铁锂电池和三元锂电池，退役后的磷酸铁锂电池具有较好的一致性、较好的循环特性，在大规模储能梯次利用是可行的；三元锂电池在循环寿命、安全性方面比磷酸铁锂电池差，其性能衰减、安全状态变化规律需要进行深入研究，梯次利用前景需要进一步考量。

动力电池梯次利用的关键在于全生命周期追溯,对电池使用情况进行追踪、筛查重组、性能评估、寿命预测、风险管控,形成一套动力电池梯次利用体系,将区块链技术应用到动力电池梯次利用中是将来发展的一个重点方向。

6 结论

1、火电机组联合电化学储能调频满足了电网调频需求,火电厂应根据自身需求选择合适的储能电池,可采取多种电池组合方式,弥补各种电池之间的不足,并可通过电池梯次利用方式降低投资成本,提高经济性。

2、锂离子电池是电化学储能系统的首选,铅酸(碳)电池作为重要补充,液流电池是近期发展的重点方向,钠硫电池需要攻克其中关键技术实现国产化。

3、不同类型电池存在各自优缺点,目前各类电池重点研究方向为:

(1)降低锂离子电池成本、三元锂电池的安全性差的研究。

(2)铅酸(碳)电池循环寿命低、自放电率高、电极材料改性的研究,提高其在储能领域竞争力。

(3)钠硫电池 β —氧化铝陶瓷管的制备技术及安全性差的研究,实现国产化。

(3)液流储能电池关键材料(如电解液、离子交换膜、电极材料等)及电池结构的研究,提高电池可靠性和耐久性,降低其生产成本。

参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 2019 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京, 2019.
- [2] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.
- [3] 陈国平,李明节,许涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):20-27.
- [4] 陈铭,刘尧,吕泉,等. AGC 机组分群控制策略[J]. 电网技术,2013,37(3):868-873.
- [5] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动

化,2007,31(19):100-107.

- [6] 张立,牟法海,周中锋,等. 电池储能参与发电厂 AGC 调频技术与经济分析[J]. 电工技术,2018(08):76-78.
- [7] 陈天宇,张粒子,马历. 储能参与的 AGC 市场出清优化建模新方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):79-84.
- [8] 李雷,杨春,谢晓峰. 我国储能产业发展现状_机遇与挑战[J]. 化工进展, 2011(30):748-754.
- [9] GUNAR B, MICHAEL K. Application of energy storages system minimizing effects of fluctuating feed-in of photovoltaic systems .CIRED Seminar 2008:Smart Grids for Distribution, Frankfurt, 2008:1-3.
- [10] 巩俊强,邓浩,谢莹华. 储能技术分类及国内大容量蓄电池储能技术比较[J]. 中国科技信息,2012(9): 139-140.
- [11] 王永川,陈光明,张海峰,等. 相变储能材料及其实际应用[J]. 热力发电,2004(11):10-13.
- [12] 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书 2019[R]. 北京,2019.
- [13] 张平. 火电与电储能联合调频方法的研究[J]. 通信电源技术,2018,35(10):31-33.
- [14] 王斐斐,涛储. 能系统辅助火电机组联合 AGC 调频技术的应用[J]. 电工电气,2018(9):34-37.
- [15] 黄任飞. 钛酸锂电池在兆瓦级储能系统中的应用分析[J]. 储能科学与技术,2015,4(3):290-294.
- [16] 巴黎明,冯沛,赵璐璐,等. 电储能与燃煤发电机组联合调频响应[J]. 分布式能源,2016,1(2):44-49.
- [17] 程兴婷. 铅酸电池与锂离子电池的建模与参数辨识方法研究[D]. 湖南大学,2015.
- [18] Divya K C, stergaard J. Battery energy storage technology for power systems-An overview[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(4):511-520.
- [19] 肖亚宁. 电化学电池储能系统统一等效建模及其应用[D]. 湖南大学,2016.
- [20] 廖斯达,贾志军,马洪运,等. 电化学应用(I)——铅酸蓄电池的发展及其应用[J]. 储能科学与技术,2013,5(2): 14-521.
- [21] 张浩,吴贤章,相佳媛,等. 超级铅蓄电池研究进展[J]. 电池工业,2012, 17(3):171-175.
- [22] 李辰. 电化学储能技术分析[J]. 电子元器件与信息技术,2019,6(24):74-78.
- [23] OSHIMA T, KAJITA M, OKUNO A. Development of sodium-sulfur batteries[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2010, 1(3): 269-276.
- [24] 陈维. 液流电池储能单元辅助电网功率控制仿真研究[D]. 华中科技大学,2012.
- [25] 瞿海妮,马廷灿,戴炜轶,等. 液流电池技术国际专利态势分析[J]. 储能科学与技术,2016,5(6):926-934.
- [26] 周海生. 轨道车辆镍镉电池特性研究和 SOC 估算[D]. 哈尔滨工业大学,2019.

作者简介:

张海龙(1989-),男,山东滨州人,硕士,工程师,主要研究方向为燃煤机组技术监督及电站锅炉优化运行。