

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.04.010

燃煤电厂调峰调频储能技术的研究进展

Progress on the peak load regulation, frequency regulation and energy storage technologies
for coal-fired power plants

王金星¹, 张少强¹, 张瀚文², 方旭², 宋海文¹, 张凯³, 彭雪凤¹, 赵源², 马敬邦¹
WANG Jinxing¹, ZHANG Shaoqiang¹, ZHANG Hanwen², FANG Xu², SONG Haiwen¹,
ZHANG Kai³, PENG Xuefeng¹, ZHAO Yuan², MA Jingbang¹

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大学 科技学院, 河北 保定 071003;
3. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084)

(1. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. School of Science and Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
3. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘 要: 高比例间歇性可再生能源的嵌入对燃煤电厂的灵活运行能力提出了新的要求, 储能技术作为一种调峰调频的应用技术具有不可替代性。首先, 从单一储热装置、电热转换-储热装置以及热化学转化-储热装置等 3 个方面介绍了储热技术在燃煤电厂中的研究现状, 其储热性能及系统所带来的经济性收益更值得关注。其次, 评述了蓄电技术的研究现状, 主要包括单一蓄电装置、多能互补蓄电系统以及耦合多储能技术的蓄电系统, 指出了蓄电装置的衰退性能是多种蓄电池优选的重要参考指标。最后, 简述了以抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能为代表的其他储能技术的研究现状, 说明了储能方案仍需要进一步结合储能技术的适应条件进行方案优选与组合。研究可望为后续燃煤电厂调峰调频储能技术的研发提供方向。

关键词: 燃煤电厂; 调峰调频; 储能技术; 研究进展; 蓄电装置; 可再生能源; 多能互补; 灵活调峰; 热电解耦

中图分类号: TK 229

文献标志码: A

文章编号: 1674-1951(2020)04-0064-08

Abstract: Insertion of high-proportion intermittent renewable energy has put forward new requirements for the flexible operation of coal-fired power plants. Energy storage technology, as a frequency regulation and load regulation technology, is irreplaceable. Firstly, three energy storage technologies currently applied in coal-fired power plants are introduced which are pure heat storage device, heat storage device through thermo-electric conversion and heat storage device through thermo-chemical conversion. Their heat storage performances and the economic benefits should be focused. Secondly, the current situation of electric storage devices is introduced which include pure electric storage device, multi-energy complementary electric storage system and electric storage system coupling multiple energy storage technologies. It is pointed out that performance degradation is an important index for optimization and selection of batteries. Finally, the research status of other energy storage technologies represented by pumped storage, compressed air energy storage and flywheel energy storage is summarized. These energy storage technologies need to be optimized and coupled considering adaptive conditions of other energy storage technologies. It is expected to provide a development direction for the peak load regulation, frequency regulation and energy storage technology of coal power plants.

Keywords: coal-fired power plant; peak load and frequency regulation; energy storage technology; research progress; storage battery; renewable energy; multi-energy complementation; flexible peak regulation; thermo-electric decoupling

0 引言

为应对化石能源紧张、环境恶化等问题, 近年来风电等可再生能源发电迅速发展^[1-3]。国际能源

署和世界能源理事会对全球未来能源发展的情景预测显示, 可再生能源在一次能源中的占比将进一步加大^[4]。与此同时, 大量间歇性可再生能源的嵌入对原有燃煤电厂灵活性提出了新的要求^[5-6]。为提高电网对间歇性可再生能源的消纳能力, “十三五”明确规定了燃煤电厂需要承担电网的灵活调峰

收稿日期: 2020-03-28; 修回日期: 2020-04-07

任务^[7]。

现有提高燃煤电厂灵活性的措施包括:旁路改造、电热转换、余能利用等^[8]。与之相比,储能技术能够通过降低“源”侧不确定性对“荷”侧的冲击,同时不需要以牺牲系统效率和降低能量品位为代价实现“源”侧和“荷”侧间的匹配,具有跨时空高效调节的潜力。目前应用于燃煤电厂的储能技术主要包括储热、蓄电、压缩空气储能等^[9]。其中,储热技术是储能技术中的重要发展方向之一,大容量储热参与电力系统调峰,可以提高能源系统跨时空优化配置能力,作为一种灵活可控负荷,能够改善电力系统的调节能力^[10]。蓄电技术由于其具有快速响应的优势,能够有效地提高系统调频的能力,主要表现为,蓄电装置可在电力系统过负荷引起频率升高、甩负荷引起频率降低时通过灵活充放电进行频率调节^[11-12]。在发展储热技术、蓄电技术用于增强电网调峰调频能力的同时,其他类型的储能技术也引起了学者的关注,其中包括抽水蓄能、压缩空气蓄能、飞轮储能。例如,Ciocan G D等人^[13]研究发现,抽水蓄能应用于变速机组可以对频率进行准确调节、在电网运行状态改变时迅速满足电网需求。也有学者认为,飞轮储能应用于机组具有效率高、响应快、环境友好等特点^[14-15]。由此可见,不同类型的储能技术由于其各自的运行特点,对机组适用性也有所差异。为此,针对燃煤电厂特定的调频调峰需求,仍有必要对储能类型及其运行策略进行综合评价。

本文从燃煤电厂调峰调频的储能技术出发,分别从储热应用技术、蓄电应用技术以及其他储能应用技术3个方面进行评述,着重介绍各储能应用技术的优缺点及在该领域近年来的研究进展,并结合燃煤电厂的发展需求进一步评论其发展潜力,为后续燃煤电厂调峰调频储能技术以及相关技术的研发提供参考。

1 储热技术的应用

1.1 单一储热装置

储热技术利用储热介质进行热量的储存和释放,主要用于燃煤电厂的调峰领域,其调峰机理为在低负荷时段,将不上网的低谷电力转换成热(或者高参数蒸汽),储存起来供热,增加高峰期供热能力。根据统计,我国22个火电灵活性改造试点项目中,采用储热技术进行改造的占比最大,至少有12个项目采用了储热相关技术进行改造,充分证明了储热技术参与火电厂调峰改造应用的可行性^[16]。储热技术也可用于增加顶负荷能力,其工作机理

为:将汽轮机内过剩的蒸汽热能转入到储热介质内存储起来,按储热介质可分为热水罐储能技术、相变储热技术、熔盐热储能技术以及混凝土储热技术等^[17]。火电厂热水储能技术^[18]主要用于热电厂供暖季热电解耦,作为季节性储热措施能够有效地提高供热机组的灵活运行能力,例如,蒙西电网的盛乐热电储能项目采用热水罐储能技术,打破传统“以热定电”模式,实现机组热电解耦功能,使电厂具备在最小运行方式以下进行深度调峰能力。熔盐储热技术由于工作温度高,比热容高,热稳定性好,蒸汽压力低的优势,已经在太阳能光热发电领域得到了广泛应用,如青海中控德令哈50 MW塔式熔盐储能光热电站配置熔盐储热系统,电站每年可节约标准煤4.6万t,减排CO₂约12.1万t,证明了该技术具备良好的社会经济效益^[19]。

1.2 电热转换-储热装置

电热转换-储热装置能够增强燃煤热电联产系统的“双向”调峰能力,既可提高低负荷运行能力,也能增加高峰期的顶负荷能力,其工作原理如图1所示^[20]。通过电热转换进行储热的装置主要有电极锅炉和电锅炉固体储热装置。因为不涉及燃煤热电联产系统本体设备改造,对其正常运行影响较小,可直接消耗电能,减少其对外供电,调峰深度更大。热水储热型电锅炉主要是通过电阻热水锅炉作为系统热源,在非谷电时段,蓄热水箱中的高温水通过传递热能给采暖末端,满足采暖末端的需求,达到冬季供暖蓄热节能创新的目的^[21]。北京航天控制仪器研究所142工业区采用此种模式,大大降低厂区冬季供暖运行费用,降低了污染物排放,起到了平衡电网峰谷用电的作用^[22]。熔盐储热技术已在太阳能热发电电站实现应用。太阳能是一种间歇性、不稳定性的清洁能源,太阳能-电加热联合加热熔盐系统不仅具有良好的节能减排效果,还有很好的经济性^[23]。

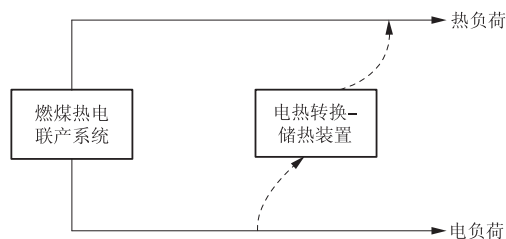


图1 电热转换-储热技术原理

Fig. 1 Principle of heat storage technology through thermo-electric conversion

1.3 热化学转化-储热装置(CaO-CaCO₃等储热罐)

利用储热技术对不连续、不稳定的热量进行跨时空限制的利用,已成为一项提高能源利用效率的

重要技术。其中热化学转化-储热技术是指利用储热材料可逆化学反应的反应热进行储存或释放热量^[24-25],其原理如图2所示。

在充热阶段,储热材料吸收热量(来自燃煤电厂高参数蒸汽),分解为2种及以上易于分离的物质;在存储阶段,将分解物分开保存,避免相互反应造成能量损失;在释热阶段,将分解物充分混合,创造适宜条件使其发生化合反应,释放存储的热能(输入燃煤电厂热力系统内)。通过对燃煤电厂高参数蒸汽能量的吸收与释放,可达到对其电负荷升降速率的调节,在满足汽轮机最小流量的条件下,也可适当降低最小电负荷。邓畅等人^[26]系统研究了氧化钙-氢氧化钙热化学储热系统中固定床反应器内温度、压力、反应速率、流动和放热功率的变化过程以及储热性能指标,为热化学转化-储热系统的设计和开发提供指导。

闫霆等人^[24]研究一种热化学复合吸附储热循环的储热特性以及能量品位提升性能时发现, $\text{MnCl}_2/\text{SrCl}_2/\text{NH}_3$ 作为工质不仅可以保证输出热能温度稳定,而且能大幅度地提升输出热能的温度品位。由此可见,热化学转化-储能技术是实现能源清洁转换利用有效方式之一,可调节能量供需、移峰填谷,并能最大限度地利用加热过程中的热能或余热,以及将太阳能从辅助能源最终变为一种使用方便、可靠的主要清洁能源^[27]。

综上所述,储热技术是燃煤电厂灵活调峰的有效措施之一。然而媒体目前对各种储热性能的报道以及投入回收期等经济性评价指标的分析仍有所匮乏,这也是后续工程应用方案优选参考的关键所在。

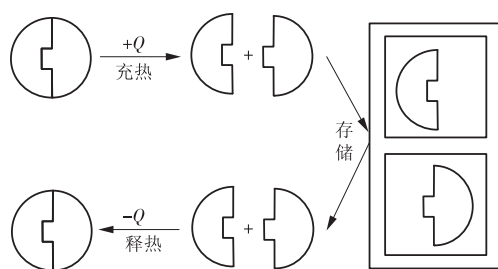


图2 热化学转化-储热技术充放热原理

Fig. 2 Charging and discharging principle of heat storage through thermo-chemical conversion

2 蓄电技术的应用

2.1 单一蓄电装置

蓄电技术具有瞬时响应及精确控制能力,在保障电力系统高质量调频服务上获得了广泛认可。例如,山西省在运容量为9 MW/4.5 MW·h的3个电储能联合火电调频试点项目运行稳定,并根据装机占比增加情况进一步增加^[28]。蓄电技术作为一种快速调频资源,在提高电网对可再生能源接纳水平方面具有重大的应用价值。例如,山西兴能电厂在300 MW机组上进行了交流电失电、事故状态、大电流启动等性能测试,认为其能够为电厂的安全提供保障^[29]。王京等^[30]研究发现采用蓄电储能系统可通过自动切换方式实现机组联合运行,同时能够保证储能系统的设备利用率。虽然依靠蓄电储能系统可以有效平衡一段时间内的能源需求和能源供应,但仅依靠单一蓄电侧调频仍然受到技术限制,其中包括高昂的投资成本^[31]。此外,如图3所示,无论是锂电池^[32]或者是铅蓄电池^[33],电池性能均存在衰退的性质,这将会加大其事故隐患。由于蓄电池的老化^[34]与运行条件^[35]存在一定的对应

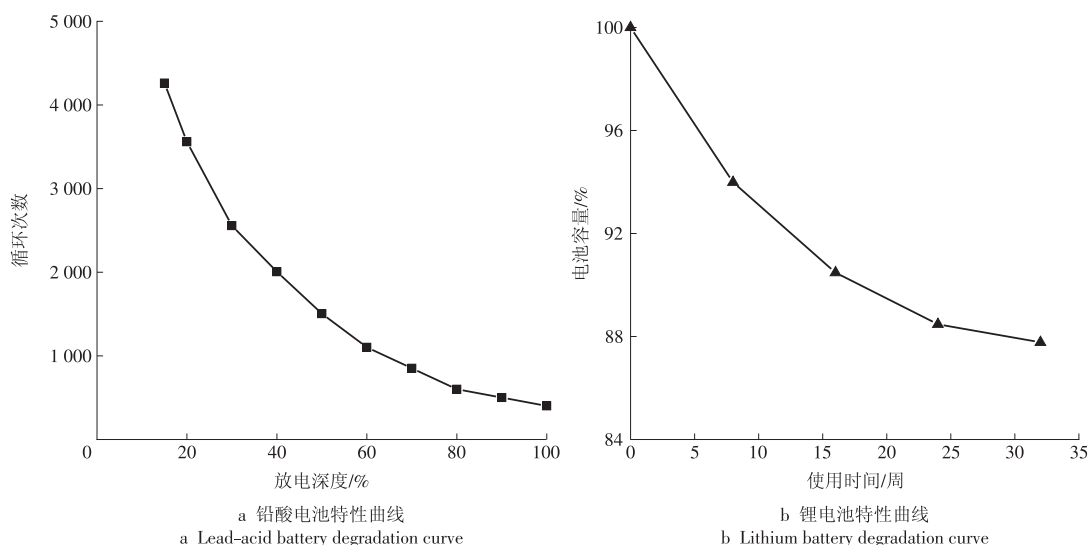


图3 蓄电池衰退特性曲线

Fig. 3 Battery degradation curve

性,深入探讨蓄电池的运行策略是该领域经济性评价重点考虑的问题之一。

2.2 多能互补蓄电系统

由于可再生能源具有随机性和不稳定性,且不同可再生能源发电可实现周期互补,如何获得连续、稳定的电能输出是制约其发展的重要问题。目前多能互补蓄电系统更多的是针对间歇性可再生能源间的互补性进行的储能设计,尤其是利用蓄电装置快速响应电负荷需求的特点,其中蓄电池在整个发电系统中主要起储能和稳压作用,同时也具有能量调节和平衡负载的作用^[36]。CHEN Qun 等人^[37]将蓄电池用于燃煤电厂、燃煤热电联产以及风电组成的系统中,研究发现增设蓄电池明显增加系统适应间歇性风电的能力,其原理如图4所示。随着多能互补独立电力系统的发展,解决了我国偏远地区以及无电力海岛的供电问题,为了提高供电可靠性和电能质量,独立电力系统一般都要采用蓄电储能技术^[38-39]。因此在多能互补蓄电系统中,不仅需要考虑各供电“源”测的互补性,还需要兼顾蓄电池的性能以及储放电能运行策略。

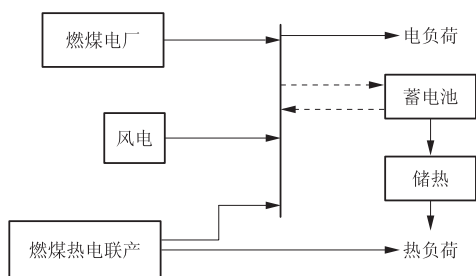


图4 多能互补蓄电系统原理

Fig. 4 Principle of multi-energy complementary electric storage system

2.3 耦合多储能技术的蓄电系统

在新能源电力系统中,储能技术应用于电力调峰、抑制新能源电力系统所带来的波动性、提高电力系统运行稳定性和提高电能质量,能够有效地吸收或释放功率,实现“削峰填谷”^[40]。特别是在为

解决风光互补发电的间歇性、波动性以及发电量与用电负荷不匹配的问题方面,相对于单一蓄电装置,耦合多储能技术的蓄电系统结合不同的储能技术在响应时间、容量规模、技术成熟度及成本等方面各有特点,可以更有效地满足用电系统的技术性和经济性要求^[41]。

常见的储能可分为功率型储能和能量型储能,关于耦合多储能系统,它的功率分配和容量配置对整个电网系统的技术性和经济性有着重要的影响。黄先进等^[42]针对压缩空气储能与超级电容混合系统展开研究(如图5a所示),结果表明混合系统储能容量大、充放电速度快、响应速度快,具有更高的调节能力。但目前压缩空气储能受地质条件影响大而飞轮储能和超级电容充放电持续时间长、成本高,导致整个系统应对功率的能力不足,技术仍有待完善。对于风光互补发电系统的微电网,李瑞民等^[41]提出一种由压缩空气储能、锂电池和超级电容器组成的混合储能系统(如图5b所示)。通过分析3种储能装置的原理和输出特性,建立其详细的数学模型,采用二次移动平均滤波法分配3种储能的功率,在连续性运行和系统供电可靠性等约束条件下,优化配置储能的容量,通过实际的案例计算验证了该混合储能系统的优越性以及提出的功率分配和容量优化配置方法的有效性。李冲等^[43]认为铅酸蓄电池和飞轮、超级电容器或超导储能都具有互补性,把铅酸蓄电池和超级电容器或者铅酸蓄电池和飞轮储能混合使用,可以优化铅酸蓄电池的充放电过程,延长铅酸蓄电池的使用寿命、提高系统的能量转化效率、经济性能和技术性能等,对于独立风光互补发电系统的优化设计有着积极的作用。但该种能源利用形式仍有一些技术问题需要重点考虑。例如,Sharma R K等人^[44]提出将燃料电池、锂电池和超级电容3种储能装置耦合于风光互补发电系统,研究表明燃料电池运行环境要求相对苛刻,造价很高,使得该项技术仍处于探索阶段。

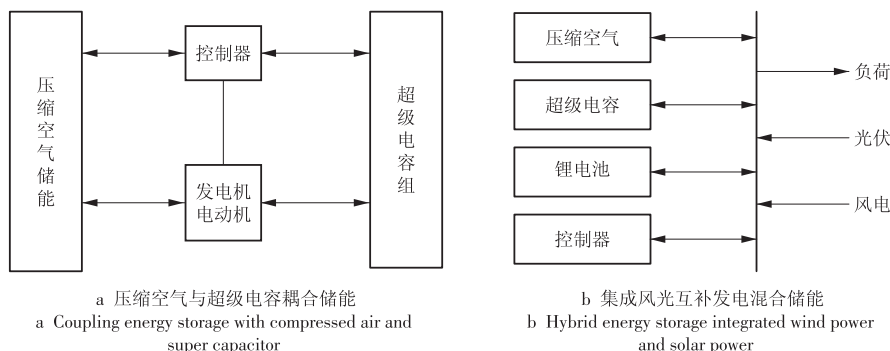


图5 耦合多储能技术的蓄电实例系统

Fig. 5 Examples of electric storage system coupling multi-energy storage technologies

综上所述,掌握各蓄电装置运行特性及衰退规律是优化系统运行策略的重要内容。更值得关注的是,蓄电技术适用条件也是方案优选关键性因素之一。

3 其他储能技术的应用

除上述储热和蓄电技术外,其他储能技术可将燃煤电厂的电能在电需求低谷时转换为水的势能(抽水蓄能)、空气的内能(压缩空气储能)以及飞轮动能(飞轮储能)等,在电需求峰值时又将其转换为电能,达到燃煤电厂调峰的目的,同时能量转换过程的响应时间也决定着储能技术辅助调频的能力。

3.1 抽水蓄能

抽水蓄能同样能够在低负荷时吸收能量(电能转化为势能)在高负荷时释放能量(势能转化为电能),可实现电能的有效存储,进而有效调节电力系统生产、供应、使用,保持了三者之间的动态平衡关系^[45]。抽水储能电站的工作原理为(如图6所示),负荷低谷时段抽水储能设备工作在电动机状态,将下游水库的水抽到上游水库保存(以水的势能),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^[46]。另外,虽然我国水能资源丰富,但地区分布极不平衡,为应用于调峰填谷、调频、调相、紧急事故备用以及提供系统的备用容量,需要根据容量的需要进行抽水储能电站的构建^[47-48],为此掌握抽水储能电站的变工况特性尤为重要。此外,抽水蓄能过程中蓄能效率和发电效率也是设计抽水储能电站容量的重要参考因素。

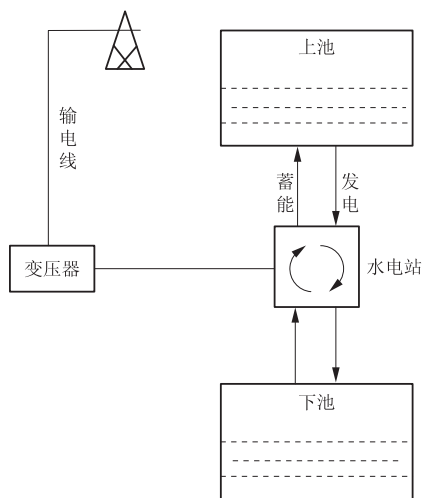


图6 抽水蓄能原理

Fig. 6 Principle of pumped storage

3.2 压缩空气储能

压缩空气储能运行维护相对方便、响应快、综合效率高,是应用于燃煤电厂调峰调频具有竞争性

的方案^[49]。压缩空气储能系统通过消耗电能将空气进行压缩储存,在释能阶段将高压空气释放通过膨胀机做功发电,是一种新型大规模电力储能系统,在很多领域都具有广泛的应用价值^[50-51]。根据压缩空气储能系统的存储容量可分为大型、小型和微型系统。按照辅助燃烧特征也可分为传统压缩空气储能系统(D-CAES)和先进绝热压缩空气储能系统(A-CAES)^[52]。D-CAES主要包括压缩机、储气室、透平机组、冷却器、燃烧室、发电机组及控制系统,其原理如图7所示。与D-CAES相比,A-CAES系统增加了蓄热环节,在储能期间压缩机压缩空气,通过换热器把热量传递给储热介质,再将储热介质收集起来存在蓄热器高温罐内,空气则进入储气室等待做功。在释能期间高压空气先流经换热器吸热,再进入透平做功,带动发电机发电,储热介质在高低温罐中被循环利用^[48]。与D-CAES相比,A-CAES虽然发电量偏低,但该系统采用绝热压缩技术,通过回收压缩热代替燃烧室,很适合用于可再生能源发电系统与电网的整合。然而由于系统复杂,成本较高,且受到压缩机的材料限制^[53],至今没有商业运行的A-CAES电厂。

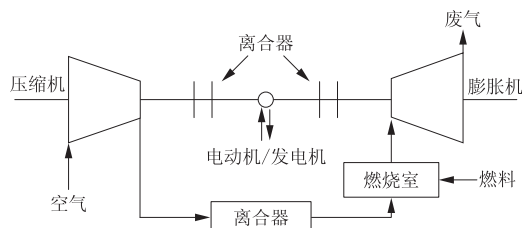


图7 传统压缩空气储能系统原理

Fig. 7 Principle of traditional compressed air energy storage system

3.3 飞轮储能

飞轮储能的基本原理是同时调整绕定轴旋转的刚体转速来决定其获得和释放能量。现有飞轮储能主要指电能与飞轮动能之间的双向转化,其特征为飞轮与电机同轴旋转,通过电力电子装置控制飞轮电机的旋转速度,实现升速储能、降速释放的功能。供电系统的平均电源容量可达到数百兆瓦,由于容量大、工作时间短,一般采用大型飞轮储能发电机组实现供电^[54],以减少对公共电网的冲击。应用于托卡马克电源的飞轮储能发电系统是一种典型的高功率脉冲电源(典型脉冲宽度为毫秒到秒),其特点是电动机与发电机独立设置。20世纪50年代,瑞士Oerlikon公司设计了飞轮电池驱动巴士,其飞轮电池储能可达到32 MJ(直径1.6 m),续航为1 200 m^[55]。与众多储能方式对比,飞轮储能技术的经济优势应用领域在电能质量和调频,其放

电时间为分秒级,总投资约 900 欧元/kW,是锂电的 75%,年化循环(1 000 次/年)成本为 200 欧元,为锂电的 50%^[56]。飞轮储能技术发展面临超级电容器和高功率电池的技术竞争,解决其工程应用中的关键技术在于提高技术经济性能,进而获得更多的储能市场份额。

综上所述,技术经济性仍是评价储能技术重要指标之一。为进一步对储能技术评估与优选以及多储能技术有机结合,需重点考虑其适用条件和投资成本。

4 结束语

储能技术是燃煤电厂调峰调频技术之一,其跨时空调节的特点展现出不可替代的优势。目前应用于燃煤电厂的储能技术主要包括储热、蓄电以及其他储能技术。由于储能技术自身的特点以及燃煤电厂特定的需求,目前耦合储能应用技术的方式并不统一,甚至对于同一类储能技术的选择,现有工程应用中仍未能达共识性结论。储能装置的运行特性以及针对燃煤电厂制定的运行策略是优选燃煤电厂调峰调频储能技术的 2 个关键性因素,然而目前尚未见有成果报道,成为了该领域深挖储能应用技术潜力的瓶颈问题之一。为此,储能技术的性能研究以及其工程示范应用有望成为后续燃煤电厂调峰调频储能技术研发的焦点。

参考文献:

- [1] YUAN J, SUN S, SHEN J, et al. Wind power supply chain in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014(39):356-369.
- [2] ZHANG Y, TANG N, NIU Y, et al. Wind energy rejection in China: Current status, reasons and perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 66: 322-344.
- [3] ERSHAD A M, BRECHA R J, HALLINAN K. Analysis of solar photovoltaic and wind power potential in Afghanistan[J]. *Renewable Energy*, 2016, 85: 445-453.
- [4] 白建华, 辛颂旭, 刘俊, 等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14):3699-3705.
BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14):3699-3705.
- [5] EDMUNDS R, DAVIES L, DEANE P, et al. Thermal power plant operating regimes in future British power systems with increasing variable renewable penetration[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 105:977-985.
- [6] BROUWER A S, BROEK M, SEEBREGTS A, et al. Operational flexibility and economics of power plants in future low-carbon power systems[J]. *Applied Energy*, 2015, 156:107-128.
- [7] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. 电力发展“十三五”规划(2016—2020 年)[EB/OL]. (2016-11-08 [2017-06-10]). <http://www.chinapower.com.cn/focus/20161108/64097.html>.
- [8] 王锋, 马国伟, 柳磊. 火电机组灵活性改造锅炉技术方案的分析[J]. *宁夏电力*, 2018(5):61-64.
WANG Feng, MA Guowei, LIU Lei. Analysis of flexible boiler technical transformation scheme for thermal power plant[J]. *Ningxia Electric Power*, 2018(5): 61-64.
- [9] 高春辉, 肖冰, 尹宏学, 等. 新能源背景下储能参与火电调峰及配置方式综述[J]. *热力发电*, 2019, 48(10):38-43.
GAO Chunhui, XIAO Bing, YIN Hongxue, et al. Summary of energy storage peak participation in thermal power shaping and allocation modes under new energy background[J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(10): 38-43.
- [10] NAVARRO J P J, AVVADIAS K C K, QUOILIN S, et al. The joint effect of centralised cogeneration plants and thermal storage on the efficiency and cost of the power system[J]. *Energy*, 2018, 149: 535-549.
- [11] TISHKOV A I, KONOPLEV Y V, SHEVTSOV I V, et al. Development of a combined electric power storage device[J]. *Russian Aeronautics*, 2019, 62(2), 321-325.
- [12] HARUNA H, HORIBA T, ITOH S, et al. Large-format lithium-ion batteries for electric power storage[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(16), 7002-7005.
- [13] CIOCAN G D, TELLER O, CZERWINSKI F. Variable speed pump turbines technology[J]. *Upb Scientific Bulletin*, 2012, 74:33-42.
- [14] DHAND A, PULLEN K. Review of battery electric vehicle propulsion systems incorporating flywheel energy storage[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2015, 16(3), 487-500.
- [15] GAYATHRI N, SEROY N, KAR I. Smoothing of wind power using flywheel energy storage system[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2017, 11(3), 289-298.
- [16] 韩逸飞. 与如日中天的储电行业形成鲜明反差储热产业亟待走出低谷[N]. *中国能源报*. 2020-03-09(9).
- [17] 张勇. 热储能在火电厂灵活性改造中的应用[EB/OL]. (2019-02-27) [2020-03-20]. <http://news.bjx.com.cn/html/20190227/965483.shtml>
- [18] MCDANIEL B, KOSANOVIC D. Modeling of combined heat and power plant performance with seasonal thermal energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2016(7): 13-23.
- [19] 鞠放. 青海中控德令哈 50 MW 光热电站 2 月运行数据再

- 创新高[N].中国能源报,2020-02-08(3,5).
- [20]王金星.大型燃煤热电联产系统研究现状和展望[J].华北电力大学学报(自然科学版),2019,46(6):90-98.
WANG Jinxing. Research status and prospect of large coal-fired combined heat and power system[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(6): 90-98.
- [21]张伟程.电锅炉水蓄热技术的应用实例[J].暖通空调,2008,38(6):87-90.
ZHANG Weicheng. Application example of water thermal storage by electrical boiler[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(6): 87-90.
- [22]李香玉.蓄热电锅炉节能环保实例浅析[J].节能与环保,2016(9):66-68.
LI Xiangyu. Energy saving and environmental protection of thermal storage electric boiler[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2016(9): 66-68.
- [23]李九如,董喜欣,陈巨辉,等.太阳能 & 谷电加热熔盐蓄热系统特性[J].哈尔滨理工大学学报,2017,22(1):80-85.
LI Jiuru, DONG Xixin, CHEN Juhui, et al. The characteristic of molten heat salt storage system utilizing solar energy combined with valley electric [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(1): 80-85.
- [24]闫霆,王如竹,李廷贤.热化学复合吸附储热循环的理论及实验[J].化工学报,2016,67(S2):312-317.
YAN Ting, WANG Ruzhu, LI Tingxian. Theoretical analysis and experiment of thermochemical composite sorption heat storage cycle[J]. CIESC Journal, 2016, 67(S2): 312-317.
- [25]马小琨,徐超,于子博,等.基于水合盐热化学吸附的储热技术[J].科学通报,2015,60(36):3569-3579.
MA Xiaokun, XU Chao, YU Zibo, et al. A review of salt hydrate-based sorption technologies for long-term thermal energy storage (in Chinese) [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(36): 3569-3579.
- [26]邓畅,潘智豪,闫君,等.氧化钙-氢氧化钙热化学储热系统放热数值分析[J].储能科学与技术,2018,7(2):248-254.
DENG Chang, PAN Zhihao, YAN Jun, et al. Numerical study on exothermic process of a $\text{CaO}-\text{Ca}(\text{OH})_2$ thermochemical heat storage system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(2): 248-254.
- [27]吴娟,龙新峰.热化学储能的研究现状与发展前景[J].现代化工,2014,34(9):17-21,23.
WU Juan, LONG Xinfeng. Research status and prospects for thermochemical energy storage [J]. Modern Chemical Industry, 2014, 34(9): 17-21, 23.
- [28]中国储能网新闻中心.山西兆光电厂9 MW/4.5 MW·h电储能联合调频项目顺利投运[EB/OL]. [2018-12-19]. <http://www.escn.com.cn/news/show-694948.html>.
- [29]杜慧文.300 MW火电机组一次调频的应用研究[C]//全国发电机组调峰调频及电网协调技术交流研讨会论文集,2010.
- [30]王京,马洪波,郭太平.储能技术在山西电力系统调频领域的应用[J].无线互联科技,2017(18):129-130.
WANG Jin, MA Hongbo, GUO Taiping. Application of energy storage technology in frequency modulation field of shanxi power system [J]. Wireless Internet Technology, 2017(18): 129-130.
- [31]MEHDI J, GAUCHIALKHAN K. Deterministic models of Li-ion battery aging: It is a matter of scale [J]. Journal of Energy Storage, 2018, 20(12): 67-77.
- [32]DUBARRY M, DEVIE A. Battery durability and reliability under electric utility grid operations: Representative usage aging and calendar aging [J]. Journal of Energy Storage, 2018, 18: 185-195.
- [33]郭自强.铅酸蓄电池的经济寿命[J].船电技术,2014,34(2):2-15.
GUO Ziqiang. Economical cycle life for lead-acid Batteries [J]. Marine Electric Technology, 2014, 34(2): 2-15.
- [34]LUCU M, LMARTINEZ E, GANDIAGA I, et al. A critical review on self-adaptive Li-ion battery ageing models [J]. Journal of Power Sources, 2018, 401: 85-101.
- [35]邵忠卫,李国良,刘文伟.火电联合储能调频技术的研究与应用[J].山西电力,2016(6):62-66.
SHAO Zhongwei, LI Guoliang, LIU Wenwei. Research and application of bess-aided thermal power frequency-regulation technology [J]. Shanxi Electric Power, 2016(6): 62-66.
- [36]李忠实.风光互补发电控制系统不同负载对蓄电池控制电压的影响[D].天津:天津大学,2005.
- [37]CHEN Qun, ZHAO Tian. Heat recovery and storage installation in large-scale battery systems for effective integration of renewable energy sources into power systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 122: 194-203.
- [38]MOHOD S W, AWARE M V. Battery energy storage to strengthen the wind generator in integrated power system [J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2011, 9(1): 23-30.
- [39]曾杰.可再生能源发电与微网中储能系统的构建与控制研究[D].湖北:华中科技大学,2009.
- [40]尚志娟,周晖,王天华.带有储能装置的风电与水电互补系统的研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(2):99-105.
SHANG Zhijuan, ZHOU Hui, WANG Tianhua. Research of complementary system for wind power with energy storage devices and hydro power [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 99-105.

- [41] 李瑞民, 张新敬, 徐玉杰, 等. 风光互补系统中混合储能容量优化配置研究[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(3): 512-522.
- LI Ruimin, ZHANG Xinjing, XU Yujie, et al. Research on optimal configuration of hybrid energy storage capacity for wind-solar generation system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(3): 512-522.
- [42] 黄先进, 郝瑞祥, 张立伟, 等. 压缩空气与超级电容混合储能系统能量控制策略[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(4): 56-62.
- HUANG Xianjin, HAO Ruixiang, ZHANG Liwei, et al. Energy management of the hybrid energy storage system based on super-capacitors and compressed air [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(4): 56-62.
- [43] 李冲, 郑源, 周发州, 等. 储能技术在独立风光互补发电系统中的应用及展望[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2011(4): 21-27.
- LI Chong, ZHENG Yuan, ZHOU Fazhou, et al. Application of energy storage technology in independent wind-solar power supply system and prospects [J]. Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2011(4): 21-27.
- [44] SHARMA R K, MISHRA S. Dynamic power management and control of PV PEM fuel cell based standalone AC/DC microgrid using hybrid energy storage [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 526-538.
- [45] 靳亚东. 我国抽水蓄能电站的现状与发展前景分析 [C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会, 2019.
- [46] 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.
- ZHANG Wenliang, QIU Ming, LAI Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids [J]. Power Grid Technology, 2008, 32(7): 1-9.
- [47] SCHOENUN S M, BURNS C. Utility energy storage applications studies [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1996, 11(3): 658-665.
- [48] LU N, CHOW J H., DESROCHERS A A. Pumped-storage hydro-turbine bidding strategies in a competitive electricity market [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, Ontario, 2003.
- [49] 秦朝葵, 袁兢. 压缩空气储能技术发展现状与应用前景 [J]. 上海煤气, 2017(6): 35-41.
- QIN Chaokui, YUAN Jing. Development status and application prospects of compressed-air energy storage technology [J]. Shanghai Gas, 2017(6): 35-41.
- [50] 何青, 刘辉, 张军良, 等. 压缩空气储能系统单耗分析模型及其应用 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2015, 42(5): 74-79.
- HE Qing, LIU Hui, ZHANG Junliang, et al. Analysis model for fuel specific consumption of compressed air energy storage and its application [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2015, 42(5): 74-79.
- [51] 张新敬, 陈海生, 刘金超, 等. 压缩空气储能技术研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2012, 1(1): 26-40.
- ZHANG Xinjing, CHEN Haisheng, LIU Jingchao, et al. Research progress of compressed air energy storage system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2012, 1(1): 26-40.
- [52] 路唱, 何青. 压缩空气储能技术最新研究进展 [J]. 电力与能源, 2018, 39(6): 861-866.
- LU Chang, HE Qing. Recent research progress in compressed air energy storage technology [J]. Electricity and Energy, 2018, 39(6): 861-866.
- [53] 何青, 贾明祥, 康浩强, 等. 绝热压缩空气储能系统 Aspen Plus 软件自定义蓄热器模块设计及应用 [J]. 热力发电, 2018, 47(2): 114-119, 137.
- HE Qing, JIA Mingxiang, KANG Haoqiang, et al. Design and application of custom regenerator module in aspen for adiabatic compressed air energy storage system [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 114-119, 137.
- [54] ZAJAC J, ZACEK F, LEJSEK V, et al. Short-term power sources for Tokamaks and other physical experiments [J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82(4): 369-379.
- [55] RUPP A, BAIER H, MERTINY P, et al. Analysis of a flywheel energy storage system for light rail transit [J]. Energy, 2016, 107: 625-638.
- [56] ZAKERI B, SYRI S. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 569-596.

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

王金星(1985—), 男, 河北唐山人, 讲师, 工学博士, 博士后, 从事燃煤热电联产机组灵活性改造及储热优化设计研究方面的工作(E-mail: wangruoguang860928@126.com)。

张少强(1998—), 男, 河南柘城人, 从事储热蓄电运行优化策略研究方面的工作(E-mail: 1596204086@qq.com)。

张瀚文(1997—), 男, 湖北宜昌人, 从事应用于电厂蓄电调频及蓄电侧优化策略研究方面的工作(E-mail: 1462609463@qq.com)。

方旭(1997—), 男, 云南玉溪人, 从事风电、光伏以及燃煤机组多能互补系统优化。(E-mail: 1050374243@qq.com)。

赵源(1997—), 男, 黑龙江绥化人, 从事风电、光伏以及蓄电调节系统优化研究方面的工作(E-mail: 1303681384@qq.com)。