

# 电化学储能技术在火电厂中应用研究综述

孙浩程<sup>1</sup>, 魏厚俊<sup>2</sup>, 胡璠<sup>3</sup>, 陈曦<sup>3</sup>, 王云芳<sup>2</sup>, 韩玉鑫<sup>2</sup>, 刘畅<sup>4,✉</sup>

(1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 河北保定 071003; 2. 河南理工大学化学化工学院, 河南焦作 454003;  
3. 河北师范大学中燃工学院, 河北石家庄 050024; 4. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084)

**摘要:** [目的] 火电厂耦合电化学储能设备是新能源电力高比例渗透下提高电力系统灵活调峰能力的可行解决路线。[方法] 文章首先对电化学储能技术在火电厂中的作用和应用特点进行了介绍; 然后对电化学储能技术特性进行了总结和归纳, 对不同种类的电化学储能系统在不同应用目的和场景下适用性进行了分析, 对现阶段电化学储能技术在火电厂中的应用情况及瓶颈进行了梳理; 最后对电化学储能技术的发展方向进行展望。[结果] 分析结果表明, 虽然电化学储能技术在火电厂中的工程应用前景广阔, 但仍在运行安全性、建设维护成本、材料回收等方面存在改进空间。[结论] 运行策略优化、新型高性能材料开发以及设备安全与回收管理将成为未来阶段电化学储能技术参与火电调频应用过程中的主要发展方向。

**关键词:** 储能技术; 电化学储能; 火电厂; 自动发电控制; 发展现状

中图分类号: TK02; TM91

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)04-0063-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Research on Application of Electrochemical Energy Storage Technology in Thermal Power Plants

SUN Haocheng<sup>1</sup>, WEI Houjun<sup>2</sup>, HU Jun<sup>3</sup>, CHEN Xi<sup>3</sup>, WANG Yunfang<sup>2</sup>, HAN Yuxin<sup>2</sup>, LIU Chang<sup>4,✉</sup>

(1. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;  
2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China;  
3. College of Zhongran, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, Hebei, China;  
4. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** [Introduction] Coupling electrochemical energy storage equipment with thermal power plants is a feasible solution to improve the flexible peaking capacity of power system under the high proportion penetration of renewable energy power. [Method] The function and application characteristics of electrochemical energy storage technology in thermal power plants were introduced firstly. Then the characteristics of electrochemical energy storage technology were summarized and concluded. Meanwhile, the applicability of different types of electrochemical energy storage systems for different application purposes scenarios was analyzed. According to the current application and bottleneck of electrochemical energy storage technology in thermal power plants, the development direction of electrochemical energy storage technology is discussed. Finally, the development direction of electrochemical energy storage technology was prospected. [Result] According to the analysis results, although the electrochemical energy storage technology has a broad engineering application prospect in thermal power plants, there is still room for improvement in operation safety, construction and maintenance costs, material recovery, and other aspects. [Conclusion] Operation strategy optimization, development of new high-performance materials, and equipment safety and recycling management will become the main development directions of electrochemical energy storage technology participating in the application process of thermal power frequency modulation in the future.

**Key words:** energy storage technology; electrochemical energy storage; thermal power plant; Automatic Generation Control (AGC); development status

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-04-28 修回日期: 2022-05-13

基金项目: 河北省自然科学基金绿色通道项目“生活垃圾成分多变性对污染物生成与燃烧过程影响机制研究”(E2021203041)

## 0 引言

随着火电机组深度调峰调频需求的增加,火电机组耦合储能装置辅助其灵活调节的方式已引起了业内广泛关注。2021年7月,国家发改委、国家能源局发布的《关于加快推动新型储能发展的指导意见》已明确指出,通过耦合储能设备协同优化运行保障新能源电力高效消纳利用,能够为电力系统提供容量支撑及一定的调峰能力。

在众多储能技术中,电化学储能技术成熟,不受地域限制,响应精确度高,能够通过化学反应实现化学能和电能之间的转化,不受卡诺循环限制,转化效率高,在应对不可预测、多变特性、有效缓解电网剧烈波动以及保证电网可靠性等方面更具优势,是除抽水蓄能技术之外最主要的储能技术路线<sup>[1]</sup>。截至2020年底,中国已投运电化学储能项目累计装机规模达到3262.2 MW,在储能设备积累装机总容量中位居第二<sup>[2]</sup>。因此,电化学储能技术成为了调峰电厂用以改善电厂调峰能力的关键储能技术之一,尤其在无水电的地区,主要依靠火电厂与电化学储能技术来调节短时间内的能量不平衡,从而保障电网的稳定运行<sup>[3]</sup>。

虽然当前国家和地方相继出台了一系列支持储能参与火电厂调峰调频的政策,且火电储能联合调频技术路线不断被业内所认可,但在实际应用过程中还存在着许多亟需解决的关键问题,如由于储能调频执行方案不完整影响调频的有效性和质量<sup>[4]</sup>,储能系统并网后对机组的短路电流、厂用电安全、谐波等电能质量有所影响<sup>[5]</sup>,不同调频控制策略和储能系统状态预测方法对火电联合调频的经济性、回报率的影响<sup>[6]</sup>等。

基于此,文章将在梳理和归纳近年来电化学储能技术在火电厂中的应用进展基础上,对目前电化学储能技术参与火电厂调峰调频过程中存在的问题以及未来研究方向进行分析和展望,为后续火电储能联合调频技术的市场化推广提供理论支撑。

## 1 电化学储能技术在火电厂中的应用特点

电化学储能技术在火电厂中的作用主要体现在改善火电厂自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)性能方面。牛阳等<sup>[7]</sup>对电化学储能技术在参与火电厂AGC性能调节时的情况进行了研

究,结果表明,当一个全天参与AGC调频的火电机组中存在单一或混合型储能装置参与辅助调节时,能够有效提高火电厂的AGC性能,将机组的 $K_p$ 值(调节性能综合评判指标)分别从2.6264提高至4.0266和5.628。

不仅如此,由于燃煤发电机组将一次能源转换成电能需要经历一系列复杂的过程,对有功功率调节响应速度较慢,导致机组在承担AGC调节任务时,制粉系统会出现负载升高、设备磨损严重、发电煤耗增高等一系列问题<sup>[8]</sup>。因此,有相当一部分电力企业选择火电储能联合调频技术来弥补上述缺陷,具体系统方案如图1所示。在该系统中,当调度控制中心发布调频指令后,储能装置能够通过自身快速充放电来辅助机组完成调频工作。储能装置可直接接入电厂变压器,不会增加机组运行风险。此外,在火电机组进行一次调频时,储能系统可通过快速辅助调频的方式避免机组到达自身调频死区,使频率快速趋于正常值的范围<sup>[9]</sup>。同时,引进储能系统参加调频还可有效改善火电机组的AGC调节精度,提高机组运行经济性。

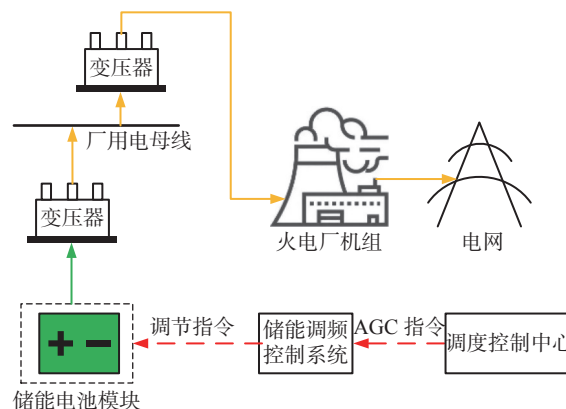


图1 储能参与辅助调频示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy storage participating in auxiliary frequency modulation

通常情况下,火电厂中储能系统应具备以下五个特点:(1)具备高可靠性、高安全性,保障电网/机组在正常或故障工况下的可靠运行,储能系统的运行及投切不影响机组本身正常运行等;(2)较高的充放电响应速度,可满足相关调频应用场景下短时大功率输出需求;(3)高循环寿命,可匹配系统频繁往复充放电需求;(4)高能量利用率,储能系统能量可用率应达到97%以上,整体能量转换效率高于90%;(5)高度集成化,占地面积小<sup>[10]</sup>。作为同时具备以上

前提条件的储能技术之一,以及凭借相对成熟的技术水平,电化学储能技术逐渐被纳入火电厂调频应用场景中。山西省容量为9 MW/4.5 MWh的电网级电储能联合火电调频试点项目于2019年通过了并网性能和火储联合调频测试,实现投运。该项目采用的磷酸铁锂电池技术提高了机组的AGC调节性能,并且显著改善了电网调度能力<sup>[11]</sup>。华润电力控股有限公司润达电厂于2019年2月实现1号机组和2号机组同时投运AGC,其中储能联合机组的调频性能明显优于机组单独调频,且机组的调节深度得到了明显的提高<sup>[8]</sup>。莱城电厂在2021年投资建设储能调频电站,利用电化学储能调节速度快、精度高的优势,联合火电机组实时调整发电出力,使得发电侧出力和用户侧负荷达到实时平衡,为电网提供了优质高效的AGC调频辅助服务<sup>[10]</sup>。

电化学储能技术包括锂离子电池、钠硫电池、铅蓄电池、液流电池等,不同种类的电化学储能的优点不同,因此需要针对多样化的火电厂应用需求,对电化学储能技术进行甄别。当前最常见的电化学储能技术及其适用场景如表1所示。其中,锂离子电池具有功率和能量密度高、额定电压高等特点,是高性能的储能设备,适用于调峰调频要求较高的电厂;钠硫电池和铅蓄电池可实现大容量制造,属于能量型储能设备,适用于承担削峰填谷任务的电厂;液流电池得益于特殊的电池结构,具有较高的设计灵活性,且系统自动化程度高,能够根据特定的能量和功率需求进行规划设计,因此可承担电厂的电能储存和深度调峰等任务。此外,锂离子电池与液流电池的成本较高,设计使用时更需要考虑到电厂的生产成本。

表1 电化学储能技术在火电厂项目中的应用

Tab. 1 Application of electrochemical energy storage technology in thermal power plant projects

化学储能技术分类	技术特点		火电厂中适用场景	参考文献
	优势	劣势		
锂离子电池	功率和能量密度高,额定电压高,自放电率低,绿色环保	成本高,需要保护电路防止过充或过放,安全性低	调峰调频,平滑功率曲线,削峰填谷	[12] [13]
钠硫电池	容量规模大,能量密度高,充放电效率高,寿命长,运行成本低,维护简单	安全性低,维持运行温度能耗高	削峰填谷等电力储能服务	[14]
铅蓄电池	放电电流大,电压平稳,容量规模大,安全性高,价格低廉	能量密度较小,体积大,不环保,寿命短,自放电大	削峰填谷等电力储能服务	[15] [16]
液流电池	响应速度快,充放电性能好,安全性较高,绿色环保,系统设计灵活性高	能量密度低,运行维护费用高,技术生产不稳定	大容量电能存储,辅助调峰调频	[17]

自2011年以来,我国电化学储能在火电厂的装机规模不断增加。2017年6月起,能源局发布《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》,大力鼓励先进电化学储能技术的应用与研发。自此电化学储能装机规模急剧增加(如图2所示)。据中关村储能产业技术联盟(China Energy Storage Alliance, CNESA)的统计数据,近期规划或在建的电网侧电化学储能项目的总规模超过1.4 GWh,当前电化学储能技术在火电厂中的应用已处于商业化阶段,预计未来1~2年电化学储能在火电厂中的应用还将迎来跨越式的发展<sup>[18]</sup>。

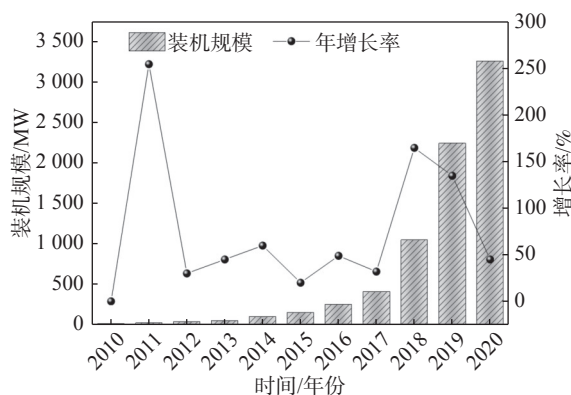


图2 截至2020年我国电化学储能累计装机规模

Fig. 2 Cumulative installed capacity of electrochemical energy storage in China by 2020

## 2 电化学储能在火电厂中的应用瓶颈

为完善电化学储能技术在火电厂的应用,需要及时发现其运行过程中的缺陷与瓶颈,并进行有针对性的改善。

火电机组与电化学储能装置联合调频方案的安全性与可靠性不容忽视。电化学储能作为辅助调频装置能够在一定程度上改善火电机组自身调频效率低和运行经济性不佳等问题<sup>[19]</sup>,但其设备由于充放电频繁、自身性能缺陷以及运营管理不规范等问题,在实际应用中频频出现安全事故<sup>[20]</sup>。据不完全统计,2011—2021年之间,全球共发生约50起储能电站起火爆炸事故,约一半的储能电站起火爆炸发生在充电或充电后休止中。针对储能电站的安全问题,目前应对措施仍以加大安全检测力度和监管力度为主。通过对其进行安全性能的检测,可以有效避免安全问题的发生。在检测过程中,需要针对储能调频系统对机组的短路电流、厂用电安全、谐波等电能质量的影响进行评估和计算,通过对评估计算数据的分析来判断储能调频系统对机组安全性能的影响。2021年以来,国家发改委、国家能源局和中电联先后针对电化学储能电站制定了新的安全制度设计和技术要求。2021年底,国务院安委会办公室印发《电化学储能电站安全风险隐患专项整治工作方案》,要求对已建成和在建电化学储能电站逐家检查到位,并督促其坚持做好建章立制等长效工作,以此来提升电化学储能电站本质安全水平。

调频方案的确定和执行是影响火电厂利用储能技术辅助调频性能和质量的主要因素。在实践过程中,运用不同的调控方案与储能设备接入方案可以使调频效果出现显著差别。如江苏镇江储能电站对储能机组采取了主动控制策略,充分利用其快速调节优势,解决了用电高峰期电力缺口以及电网平衡控制等问题<sup>[21]</sup>。当储能设备采用优先调节策略参与调峰时,可将其充放电深度视为调峰深度<sup>[22]</sup>。若为保证储能设备的使用寿命,以及保证机组运行的经济性,则可考虑优先使用机组进行调节的策略<sup>[23]</sup>。在储能设备的接入策略方面,母线直接接入方案相比于发电机端接入方案造价更低,安全性更高<sup>[19]</sup>。因此,一直以来,调峰电厂的控制策略优化研究都是行业内的工作重点,也是当前仍需深入探索的方向之一。

电化学储能设备的发展与应用还受到建设、运行以及维护过程中高成本的限制。结合储能系统运行、充电状态等指标的预测,对火电储能联合系统控制策略进行调整,可以更好地提高系统的经济性。其次,对火电机组深度调峰进行具体分析,也可以提高火电储能联合项目的经济性。例如在常规调峰和深度调峰两个不同调峰过程中,不同的辅助调峰设备所带来的经济性影响也不同,需要选择更具实用性的调控方案和策略,来达到减少调峰成本的目的。王志平等研究发现当机组进行深度调峰时,选择其他类型电源如核电、水电等弃电调峰经济性不佳,此时选用锂离子电池可在成本方面具有较大优势<sup>[24]</sup>。此外,还可以通过建立需求响应模型,对用户需求量进行分析,采取分时电价来引导用户改变用电行为,从而优化负荷曲线,达到减轻系统调峰压力、减轻储能投资成本的效果。蓄电池的寿命问题也是导致其在火电厂中应用成本高的原因之一。除技术方面外,机组参与调频服务的调节里程和中标价格以及全年参与调频服务的时间也是影响机组经济性的重要因素<sup>[25]</sup>。因此,基于项目运行边界条件的经济性测算也尤为重要。

除安全问题的改善、运行策略的创新以及运行成本的控制等方面的瓶颈外,蓄电池的合理回收利用也是不可忽视的问题。为解决国内没有系统性的电池回收产业这一现状,国家应制定统一的大容量蓄电池回收标准,引导企业采取科学合理的方法进行回收与再利用。

## 3 电化学储能技术在火电厂中的应用展望

伴随着“碳达峰、碳中和”目标的提出,大量新能源电力嵌入电网,火电机组所承担的调峰调频任务将越来越重,从当前电化学储能技术经济性和容量来看,还不能满足长远的调峰调频需求<sup>[26]</sup>。因此,电化学储能技术在火电厂中的应用规模势必将在中远期阶段实现稳步攀升,并在规模化应用过程中不断实现使用成本的下降。就目前电化学储能技术及应用发展趋势而言,其主要集中在储能及电源系统的运行控制策略优化、新型高性能储能材料的开发、安全管理规则的完善以及废弃设备回收制度的规范等几个方面。

当电化学储能技术在火电厂中得到规模化的应用时,系统控制策略研究仍然是火电与电化学储能联合调频电厂的工作重点。在火电机组发电侧,电化学储能主要凭借其自身快速精准的充放电控制特性来辅助机组完成调峰调频任务,同时针对具有不同特点的机组与负荷条件,选取如储能调节优先、机组调节优先、储能主动控制等不同的调控策略以及不同类型的电化学储能设备来应对调节需求和控制运行成本。与此同时,结合电化学储能设备充放电状态、循环寿命与容量衰减的调节策略将有助于进一步提高系统技术经济性<sup>[27]</sup>。

储能材料的发展是电化学储能技术广泛应用的关键。研究表明,开发低成本、原料广泛的电化学储能电极材料来突破核心原材料储备量和高成本的限制,及开发高性能电极材料以解决工作温度、运行安全性等问题已成为储能技术主要的研发方向之一。近年来,上电电力材料实验室<sup>[28]</sup>针对储能材料进行了系统的研究,开发出了新型聚阴离子正极材料、硫掺杂黑磷-二氧化钛复合负极材料,提高了锂离子电池的倍率性能以及循环稳定性与安全性。Sun等<sup>[29]</sup>利用生物质废弃物为原材料制备出高稳定性的多孔碳作为电化学电极材料,有效降低了电化学储能设备的材料成本,且生物质废弃物可不受原料开发的限制,同时得到了回收再利用,符合循环经济要求。梁明会等<sup>[30]</sup>设计并制备了碳包覆锌纳米粒子的复合材料,研究表明使用其作为电极材料可使电池的循环性能得到大幅提高,一定程度上提高了电池安全性,为电化学储能材料的研发提出了新的研究方向。

为保证电化学储能在火电厂中的安全利用,设备的安全管理与清洁回收利用不容忽视。当前是火电与电化学储能联合调频应用的快速发展阶段,同时也是制定安全管理标准,建立健全设备安全管理体系和废弃电池回收体系的重要窗口期。因此,国家及相关主管部门出台相关标准、规则来规范电化学储能系统的运行是保证储能安全、电厂机组安全的必要措施。此外,为保证电化学储能设备废弃后在不污染环境的同时可得到重复利用,应对电池制造工艺予以优化,并且建立健全废弃电池回收体系,引导行业绿色发展<sup>[31]</sup>。

## 4 结论

文章主要针对电化学储能技术在火电厂的应用现状以及发展趋势进行了梳理,具体结论如下:

1) 电化学储能技术与火电厂耦合辅助调峰调频已成为火电调频及储能技术应用的重要研究方向之一。

2) 现阶段电化学储能虽然发展迅速,但仍受到运行安全性较差、建设维护成本高以及回收污染难以控制等问题的限制。

3) 系统运行控制策略的优化、新型高性能储能材料开发以及储能设备的安全与回收管理等方面将是未来阶段的主要研究方向。

### 参考文献:

- [1] 李辰. 电化学储能技术分析 [J]. 电子元器件与信息技术, 2019, 3(6): 74-78. DOI: 10.19772/j.cnki.2096-4455.2019.6.020.  
LI C. Analysis of electrochemical energy storage technologies [J]. *Electronic Component and Information Technology*, 2019, 3(6): 74-78. DOI: 10.19772/j.cnki.2096-4455.2019.6.020.
- [2] 王冰, 王楠, 李娜, 等. 面向大规模新能源并网的电化学储能产业政策研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2021(4): 1-5, 23. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2021.04.001.  
WANG B, WANG N, LI N, et al. Study on electrochemical energy storage industry policies for large scale new energy integrated power system [J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2021(4): 1-5, 23. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2021.04.001.
- [3] 栗峰, 郝雨辰, 周昶, 等. 电网侧电化学储能调度运行及其关键技术 [J]. 供用电, 2020, 37(6): 82-90. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2020.06.013.  
LI F, HAO Y C, ZHOU C, et al. Dispatching operation and key technologies analysis of electrochemical energy storage on grid side [J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(6): 82-90. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2020.06.013.
- [4] 陈亮辉. 火电厂储能调频的应用前景综述 [J]. 科技与创新, 2021(1): 109-110, 113. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2021.01.040.  
CHEN L H. Overview of the application prospects of energy storage frequency modulation in thermal power plants [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2021(1): 109-110, 113. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2021.01.040.
- [5] 安坤, 田政, 赵锦, 等. 浅析电化学储能电站建设中存在的安全隐患及解决措施 [J]. 电器与能效管理技术, 2020(10): 107-113. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2020.10.016.  
AN K, TIAN Z, ZHAO J, et al. Analysis on potential safety hazards and solutions in construction of electrochemical energy storage power station [J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2020(10): 107-113. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2020.10.016.
- [6] 牟爱政, 彭博伟, 张连垚, 等. 储能系统应用于火电厂调频经济性评价的研究 [J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(5): 479-485, 492. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2019.05.013.

- MOU A Z, PENG B W, ZHANG L Y, et al. Study on application of energy storage system to economic evaluation of power plant frequency regulation [J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2019, 35(5): 479-485,492. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2019.05.013.
- [7] 牛阳, 张峰, 张辉, 等. 提升火电机组AGC性能的混合储能优化控制与容量规划 [J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(10): 38-45,83. DOI: 10.7500/AEPS20150724003.
- NIU Y, ZHANG F, ZHANG H, et al. Optimal control strategy and capacity planning of hybrid energy storage system for improving AGC performance of thermal power units [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(10): 38-45,83. DOI: 10.7500/AEPS20150724003.
- [8] 张涛. 储能电池技术参与火电厂AGC调频的应用 [J]. *中国电机*, 2019(5): 94-95.
- ZHANG T. Energy storage battery technology participates in the application of AGC frequency modulation in thermal power plants [J]. *China Electric Power*, 2019(5): 94-95.
- [9] 袁春峰, 刘锴慧, 张帆, 等. 火电机组一次调频技术研究进展综述 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(3): 1-8. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.001.
- YUAN C F, LIU K H, ZHANG F, et al. Review on the research progress of primary frequency modulation technology for thermal power units [J]. *Southern Energy Construction*, 2022, 9(3): 1-8. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.001.
- [10] 陈国勇, 刁云鹏, 于晓辉, 等. 火力发电厂储能调频电池系统设计 [J]. *吉林电力*, 2021, 49(4): 21-24. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5306.2021.04.005.
- CHEN G Y, DIAO Y P, YU X H, et al. Battery system design of energy storage frequency modulation project in thermal power plant [J]. *Jilin Electric Power*, 2021, 49(4): 21-24. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5306.2021.04.005.
- [11] 中国储能网新闻中心. 山西兆光电厂9 MW/4.5 MWh电储能联合调频项目顺利投运 [EB/OL]. (2018-12-19) [2022-04-28]. <http://www.escn.com.cn/news/show-694948.html>.  
China Energy Storage Network News Center. 9 MW/4.5 MWh electric energy storage joint frequency modulation project of Shanxi zhaophotoelectric plant was put into operation [EB/OL]. (2018-12-19) [2022-04-28] <http://www.escn.com.cn/news/show-694948.html>.
- [12] 孟祥飞, 庞秀岚, 崇锋, 等. 电化学储能在电网中的应用分析及展望 [J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(增刊1): 38-42. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2019.0196.
- MENG X F, PANG X L, CHONG F, et al. Application analysis and prospect of electrochemical energy storage in power grid [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(Supp. 1): 38-42. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2019.0196.
- [13] SHAHJALAL M, SHAMS T, ISLAM M E, et al. A review of thermal management for Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 39: 102518. DOI: 10.1016/J.EST.2021.102518.
- [14] 胡英瑛, 吴相伟, 温兆银. 储能钠硫电池的工程化研究进展与展望——提高电池安全性的材料与结构设计 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(3): 781-799. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0139.
- HU Y Y, WU X W, WEN Z Y. Progress and prospect of engineering research on energy storage sodium sulfur battery-Material and structure design for improving battery safety [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(3): 781-799. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0139.
- [15] 缪平, 姚祯, LEMMON J, 等. 电池储能技术研究进展及展望 [J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(3): 670-678. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0059.
- MIU P, YAO Z, LEMMON J, et al. Current situations and prospects of energy storage batteries [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(3): 670-678. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0059.
- [16] HUANG J H, YAN L, BIN D, et al. An aqueous manganese-lead battery for large-scale energy storage [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(12): 5959-5967. DOI: 10.1039/D0TA01484B.
- [17] 鲍文杰. 典型液流电池储能技术的概述及展望 [J]. *科技资讯*, 2021, 19(28): 33-39. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2110-5042-1911.
- BAO W J. Overview and prospect of typical flow battery energy storage technology [J]. *Science & Technology Information*, 2021, 19(28): 33-39. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2110-5042-1911.
- [18] 刘畅, 李德鑫, 吕项羽, 等. 储能电站商业运营模式探索及经济性分析 [J]. *电器与能效管理技术*, 2020(10): 16-20. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2020.10.003.
- LIU C, LI D X, LÜ X Y, et al. Business model research and economic analysis of energy storage power station [J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2020(10): 16-20. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2020.10.003.
- [19] 刘瑞龙. 火力发电厂电气一次系统的设计总结性分析 [J]. *城市建设理论研究: 电子版*, 2014(17): 1101-1102.
- LIU R L. Design summary analysis of electrical primary system of thermal power plant [J]. *Theoretical Research on Urban Construction: Electronic Version*, 2014(17): 1101-1102.
- [20] 王轶禹, 马世俊, 皮俊波, 等. 关于国调直调电厂“两个细则”的讨论 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(16): 174-179,186. DOI: 10.7500/AEPS20180301006.
- WANG Y Y, MA S J, PI J B, et al. Discussion on two rules for power plants directly dispatched by state grid electric power dispatching and control center [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(16): 174-179,186. DOI: 10.7500/AEPS20180301006.
- [21] 李官军, 胡安平, 杨婷, 等. 电池储能电站即插即用运行控制技术研究 [J]. *电测与仪表*, 2021, 58(2): 59-67. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2021.02.010.
- LI G J, HU A P, YANG T, et al. Research on the control technologies of battery energy storage power station for plug and play operation [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(2): 59-67. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2021.02.010.
- [22] 崔杨, 周慧娟, 仲悟之, 等. 考虑火电调峰主动性与需求响应的含储能电力系统优化调度 [J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1674-1683. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20200440.
- CUI Y, ZHOU H J, ZHONG W Z, et al. Optimal dispatch of power system with energy storage considering deep peak regulation initiative of thermal power and demand response [J].

- High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1674-1683. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20200440.
- [23] 钱仲豪, 王谦, 李伟伦, 等. 考虑电化学储能的主动配电网分层分区运行调度 [J]. 科技通报, 2021, 37(4): 78-82. DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2021.04.015.
- QIAN Z H, WANG Q, LI W L, et al. Hierarchical partition operation and regulation of active distribution network considering electrochemical energy storage [J]. Bulletin of Science and Technology, 2021, 37(4): 78-82. DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2021.04.015.
- [24] 王志平, 陈洪溪, 章义发, 等. 火电厂灵活性深度调峰改造技术及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- WANG Z P, CHEN H X, ZHANG Y F, et al. Technology and application of in-depth peak regulation for thermal power units [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2020.
- [25] 罗星岩. 大规模电池储能系统智能控制策略研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021. DOI: 10.27322/d.cnki.gsgyu.2021.000310.
- LUO X Y. Research on intelligent control strategy of large-scale battery energy storage system [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021. DOI: 10.27322/d.cnki.gsgyu.2021.000310.
- [26] 王华卫, 张平. 350 MW级火电机组与电储能联合调频系统设计研究 [J]. 电工技术, 2019(6): 61-63, 117. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2019.06.025.
- WANG H W, ZHANG P. Design and research on joint frequency modulation system for 350 MW grade thermal power unit and energy storage [J]. Electric Engineering, 2019(6): 61-63, 117. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2019.06.025.
- [27] 罗佑坤, 乔志园, 辛晟. 南方电网电池储能技术应用及发展机会探讨 [J]. 水电与新能源, 2020, 34(9): 16-20. DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.09.005.
- LUO Y K, QIAO Z Y, XIN S. Application and development opportunities of the battery energy storage technology in China southern power grid [J]. Hydropower and New Energy, 2020, 34(9): 16-20. DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.09.005.
- [28] 朱晟, 彭怡婷, 闵宇霖, 等. 电化学储能材料及储能技术研究进展 [J]. 化工进展, 2021, 40(9): 4837-4852. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-0745.
- ZHU S, PENG Y T, MIN Y L, et al. Research progress on materials and technologies for electrochemical energy storage [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(9): 4837-4852. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-0745.
- [29] SUN F, WANG L J, PENG Y T, et al. Converting biomass waste into microporous carbon with simultaneously high surface area and carbon purity as advanced electrochemical energy storage materials [J]. Applied Surface Science, 2018, 436: 486-494. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.067.
- [30] 梁明会, 王焕, 尹艳艳, 等. 金属氧化物纳米复合材料电化学储能应用研究进展 [J]. 金属功能材料, 2020, 27(6): 1-14. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-8192.202000105.
- LIANG M H, WANG H, YIN Y Y, et al. Research advances on the application of metal oxides based nanocomposites in electrochemical energy storage [J]. Metallic Functional Materials, 2020, 27(6): 1-14. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-8192.202000105.
- [31] 黄进, 曾恬静, 董敏慧, 等. 废铅蓄电池管理现状、问题与完善回收体系的建议——以湖南省为例 [J]. 环境保护, 2021, 49(6): 48-51. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2021.06.012.
- HUANG J, ZENG T J, DONG M H, et al. Management status and problems of waste lead-acid batteries and suggestions for improving the recycling system: take Hunan province for example [J]. Environmental Protection, 2021, 49(6): 48-51. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2021.06.012.

## 作者简介:



孙浩程

孙浩程 (第一作者)

2000-, 男, 河北沧州人, 本科在读, 主要研究方向为火电机组灵活调峰及系统建模参数优化设计(e-mail)1132201356@qq.com。

## 魏厚俊

2001-, 男, 江苏徐州人, 本科在读, 主要从事电化学储能方面研究工作(e-mail)358737709@qq.com。

## 胡望

2002-, 年, 男, 浙江杭州人, 本科在读, 主要研究方向为火电机组灵活调峰及系统建模参数优化设计(e-mail)2508448322@qq.com。

## 陈曦

2002-, 男, 吉林长春人, 本科在读, 主要研究方向为火电机组灵活调峰及系统建模参数优化设计(e-mail)510093999@qq.com。

## 王云芳

2001-, 女, 河南驻马店人, 本科在读, 主要从事电化学储能方面研究工作(e-mail)2190475289@qq.com。

## 韩玉鑫

2002-, 女, 河南平顶山, 本科在读, 主要研究方向太阳能制氢及电化学储能技术(e-mail)1687157824@qq.com。



刘畅

刘畅 (通信作者)

1989-, 女, 辽宁大连人, 助理研究员, 中国科学院大学博士, 主要从事可再生能源多能互补及储能技术研究工作(e-mail)liuchang\_2017@sina.cn。

(编辑 叶筠英)