

电化学储能电站研究现状综述

贾一凡, 安海舰, 周敏刚, 张春民, 朱志遥
(西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077)

摘要: 储能电站在解决可再生能源间歇性问题和提高电力系统运行稳定性等方面发挥着重要作用。本文分别从研究现状、组成结构和控制策略等方面对国内外储能电站的研究进展进行了综述。首先, 本文介绍了储能电站的研究现状, 分别基于 CNKI 和 WOS 数据库筛选了 2012~2022 年间的两千余篇中英文文献, 采用 CiteSpace 可视化图谱分析方法, 通过关键词共现图谱以及时间线图对比了国内外学者在储能电站研究领域的相似性与异质性; 其次, 介绍了储能电站的基本结构, 重点介绍了电池组、储能变流器和能量管理系统现有的研究情况; 最后, 介绍了储能电站的控制策略, 基于储能电站辅助电网服务, 对自动发电控制、一次调频、调峰等方面的研究进行了概括。
关键词: 可视化分析; 锂电池; 储能变流器; 电池管理系统; 自动发电控制

Review of Current Research Status for Electrochemical Energy Storage Power Station

JIA Yifan, AN Haijian, ZHOU Mingang, ZHANG Chunmin, ZHU Zhiyao
(Xi'an High Voltage Apparatus Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Energy storage power station plays an important role in solving the problem of intermittency of renewable energy and improving the stable operation of power system. In this paper, the research progress of energy storage power station both at home and abroad is comprehensively reviewed from the aspects of research status, composition structure and control strategy, respectively. Firstly, the research status of the energy storage station is introduced, more than two thousand Chinese and English documents between 2012 and 2022 are screened based on CNKI and WOS databases. The similarity and heterogeneity of domestic and foreign scholars in the research field of energy storage power station are compared by keyword co-occurrence mapping and timeline mapping using CiteSpace visual mapping analysis. Then, the basic structure of the energy storage power station is introduced, with the existing research status on battery pack, energy storage converter and energy management system in particular. Finally, the control strategy of the energy storage power station is introduced and, based on the auxiliary grid service of the energy storage power station, the research in the aspects of automatic generation control, primary frequency regulation, and peak regulation is summarized.

Keywords: visual analysis; lithium battery; power conversion system; battery management system; automatic generation control

0 引言

近年来我国储能行业发展迅猛, 如何在稳步提升储能性能的同时, 大幅度降低商用成本是目前储能行业发展的重中之重^[1]。其中, 以锂离子电池、钠硫电池、液流电池为代表的电化学储能电站具有资源配置灵活、占地空间较小、可快速接受电网或综合能源系统的指令进行出力调整等优势, 在促进消

纳风电、光伏出力从而提高系统运行的经济性、灵活性中至关重要^[2]。

为了能更清楚地分析国内外对储能电站的研究现状, 本文在各大论文数据库中选择相关方向的论文, 并针对其中的作者、机构、关键词等信息使用 CiteSpace 软件以可视化图谱的方式呈现, 方便找出各国对储能电站方向的研究热点^[3]。

本文分别以“储能电站”“Energy Storage Power

Station”为主题,时间跨度 2012~2022 年,在 CNKI 数据库、WOS 核心数据库中进行检索,经筛选得到中文文献 1 489 篇,英文文献 1 417 篇,对其中的关键词进行可视化分析,揭示近几年来国内外对储能电站领域的研究方向。通过分析得出国内外学者对储能电站的研究既有相似性,又有异质性。相似性方面:国内外学者对储能电站领域研究的高频关键词均包括储能系统、电力系统、控制策略、太阳能、电动汽车等,并且各个关键词通过网络紧密地连接,孤立的节点不多,说明关联性较强。异质性方面:国内对储能电站的研究侧重于控制策略、优化配置、应用场景等,注重与电网相耦合并提供调频调峰等辅助服务;国外对储能电站的研究侧重于与可再生能源相结合提高新能源消纳能力,并对电动汽车,移动式充电站,分布式发电也有较多研究。

通过分析国内外储能电站领域研究的时间趋势发现,国内对储能电站近十年的研究主要有 11 个聚类演变,分别是储能电站、锂电池、荷电状态、热失控等。其中大部分聚类每年都有较多的发文量,在时间图谱上呈连续的趋势,而“商业模式”该聚类起步时间稍晚,自 2013 年出现持续至 2022 年,“示范工程”与“荷电状态”两种聚类自 2012 年出现持续至 2021 年,2022 年并未有过多的文献。国外对储能电站近十年的研究主要由 12 个聚类演变,分别是储能、风力发电站、光伏发电、优化调度等。同国内一样,国外对储能电站研究的大部分聚类每年都有较多的发文量,而“风力发电站”“优化调度”两种聚类自 2013 年出现,分别持续至 2020、2021 年,近两年热度有所下降。通过对储能电站领域的时间趋势以及聚类成果的分析,可以看出国内外的研究成果在时间上具有连续性,大部分聚类近几年一直保持较高的热度。不同的是国内聚类成果侧重于辅助电网服务方面,国外侧重于可再生能源的利用。

通过可视化分析发现,国内外对储能电站的研究集中在辅助电网服务、风光资源消纳和移动式储能等方面,其中电化学储能电站能够在保障电网安全性、灵活性的同时提高平衡风光出力波动的能力。然而,我国电化学储能电站发展存在着以下不足:首先是电池种类参差不齐,企业生产电池的规格、容量、电压各不相同,在规模化地安装在储能电站中时难以精准检测每个电池的健康状态;其次,缺少完整的电池性能评价系统,需要构建精准的全生命周期模拟电池计算方法;最后,电化学储能发电成本约为 0.67 元/kW·h 远高于传统火电机组,应从电池材料、控制策略等角度研究如何降低成本。

因此,针对我国电化学储能电站发展中的不足,本文重点介绍实际工程中电化学储能电站的电池组、储能变流器、能量管理系统以及并网时的控制运行方式,以求对其发展提供一定参考。

1 电化学储能电站的组成结构

1.1 电化学储能电站整体结构

目前我国兆瓦级电化学储能电站为方便运维检修以及安全因素一般将集成式的电池舱布置在户外。电池舱最基本的储能单元主要由电池组,储能变流器(power conversion system, PCS)、电池管理系统(battery management system, BMS)等组成^[4]。以某电网 135 MW 储能示范工程为例,该项目中电池组由锂电池根据额定电压和额定容量约束进行串并联组成,然后通过成套的 PCS 升至指定电压等级。储能电站总容量取决于多个电池舱并联的结果,各电池舱中电池组的健康状态由其内部的 BMS 监测,相关监测数据上传至储能电站的数据中心和能量管理系统(energy management system, EMS)中,该电网调度中心可通过数据中心和 EMS 来监控其的整体运行状态。

1.2 电化学储能电站的电池组

目前国内外学者对储能电站电池技术进行了大量研究,Dunn 等^[5]介绍了可用于电网应用的钠流电池、氧化还原流体电池,以及用于商业电子的锂离子电池技术;Mahlia 等^[6]对比了多种储能技术的能量密度、效率、成本、优缺点等,并分析影响储能技术发展的因素。

1.2.1 锂电池

锂电池发展较为成熟,具有能量密度大、效率高、寿命长等优点,被广泛应用于储能电站和电动汽车之中。据起点研究院数据统计分析,2020 年世界各国锂离子电池的总出货量为 259.5 GW·h,同比增长 34%。预计到 2025 年,锂离子电池的全球出货量将达到 1.1 TW·h。

目前,尤其在电动汽车领域液态锂离子电池已进入商业应用成熟阶段。但其均采用液态电解质或半固态电解质,该类电池受环境温度变化影响较大,正如国内外电动汽车在冬季与夏季续航里程与其他时段相比严重缩短,已不能完全满足生产厂商所要求的性能、成本等其他目标。考虑到锂电池易自燃的安全性问题,以及对降低成本和更高性能的需求,国内外已加速了对全固态锂电池(solid state Lithium-ion battery, SSLBs)的研究。

尽管锂电池具有诸多优势,但国内外储能项目

大多数事故也是与锂电池储能有关。当前我国储能电站所使用的锂离子电池主要分为三元锂和磷酸铁锂两大类。其中,三元锂因热稳定性较低,并且具有自氧化性,在遭遇热失控时易析出氧气并与电解液反应,会释放包括氢气、一氧化碳、甲烷等在内的多种易燃易爆气体,从而增加了火灾的风险,具有重大安全隐患。据统计全球近十年 33 起储能电站起火,三元锂电站占比达到半数以上,其中美国加州圣迭戈县储能电站起火历经 11 天才得以扑灭。因此大量学者针对锂离子电池热失控事故进行研究,唐亮等^[7]综述了多起由锂电池引发的事故,并从全生命周期的角度提出了安全性的建议;徐亮等^[8]针对锂离子电池储能电站容易热失控的问题,提出了一种新型的监控控制策略,保障电站安全稳定运行。鉴于全球范围内锂离子电池事故及安全需求,我国已运行的锂离子电池储能项目中几乎以磷酸铁锂电池为主。

1.2.2 钠硫电池

钠硫电池具有比能量高、容量大、可回收利用和对环境友好等优点。此外,钠硫电池在运行过程中全密封,可以做到零排放,其理论能量密度可达到 $760 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$,适用于储能电站等大功率设备,其寿命也可达 15 年以上,与锂离子电池相比工作温度在 300°C 以上,不用考虑环境温度影响。

钠硫电池有诸多优势,但日本 NKG 公司在 2011 年由钠硫电池引发的火灾使得各国学者认识到其存在的安全隐患。钠硫电池的安全问题涉及材料电芯和热管理模组两个层面。在电芯层面,由于 350°C 高温下,若电解质破损熔融钠和熔融硫将直接接触,易引发火灾,并向其他单元蔓延。在模组层面,除了在每个电池的区块之间设置保护装置外,还需考虑钠硫电池充放电模式下会出现几十度的温度波动,一方面要求电池机械结构能保持稳定,另一方面模组的热管理系统必须具有稳定、准确、快速响应的能力,否则可能造成电池一直升温,破坏固体电解质造成热失控现象。为提升钠硫电池的安全性,Borodin 等^[9]研究在钠硫电池充放电过程中,可通过改善电池表面附着材料来提升电解质性能;Sudworth 等^[10]指出可通过增强封接材料的热机械稳定性来提升钠硫电池的安全性。

1.2.3 全钒液流电池

全钒液流电池具有容量大、效率高、可深度充放电、响应速度快、电解液可回收利用、不对外排放造成污染等优势,在国内外储能项目中应用广泛。目前我国全钒液流电池项目大多为几十兆瓦级,只

有一座由中国科学院主导的百兆瓦级储能项目在大连市成功并网,但由于其规模较大目前只有一期工程并网,待二期工程并网后其容量将达到两百兆瓦,为全球最大。

目前全钒液流电池成本较高,针对降低其成本的研究主要分为两个方面。1)电解液。电解液占全钒液流电池的成本接近 50%,可使用铁、锰、锌等常见金属作为电解液活性成分^[11]。同时由于电解液可循环不会被消耗的特性,由租赁公司购买电解液再进行出租的商业模式也能一定程度的降低电池成本。2)电堆。电堆决定了液流电池的功率,其成本大约占 30%,由极板、电极、隔膜等部件组成。袁治章等^[12]指出可以通过掺杂石墨烯改善隔膜结构,可以在改善导电率和功率密度的同时降低成本,通过实验分析采用此结构的能量效率提升了 13%。

1.3 储能变流器

PCS 是储能系统中的核心部件,可以进行交流变换,控制电池组的充电和放电过程进而实现对电网有功功率及无功功率的调节,还可以与 BMS 沟通获取电池的状态信息,对电池进行充放电保护确保电池安全。

PCS 的主要组成部分为逆变器与滤波器,滤波部分多采用对高次谐波有衰减作用的 LCL 型滤波器。根据实际的场合需要,PCS 根据变换环节的数量,可分为单级式、双级式等结构。在低压应用场合,PCS 常用的是单极式结构,其直流侧电压变化范围较窄,适用于电压随荷电状态变换较小的储能介质;若是在充放电过程中电池组电压变化较大,则需要在直流侧加装 DC/DC 变换器组成双级式结构,直流电升压后经过逆变器后流入电网,双级式结构提高了电压变换范围。

近年来对 PCS 的研究主要集中在通过改善其控制策略,来抑制风光资源并网引起的电网电压波动问题。当电网电压的供给侧和需求侧不平衡时,会使 PCS 输出的有功功率波动导致直流侧出现过电压、无功功率波动引起功率损耗、三相电流峰值过限而损坏 PCS 设备。欧明勇等^[13]指出 PCS 可通过控制输出电流平衡,抑制电网侧有功功率或无功功率波动来应对电网电压的不平衡问题;谭丽平等^[14]考虑到电网电压不平衡导致 PCS 输出功率波动,提出了限制电流峰值的控制策略,能在保障 PCS 输出功率的同时三相电流峰值不越限。

1.4 电池管理系统

BMS 是一种对电池进行管理维护的控制系统,对电池系统的使用和稳定至关重要。BMS 的主要

作用为:测定电池组的荷电状态(state of charge, SOC),持续监控电池组的电压、电流、温度等工作参数,平衡调整电池组的工作状态,延长使用寿命。

目前,大多数储能电站使用的BMS结构为模组式。将电池组分为多个模组,通过主控设备监控或对各电池模组进行动作,该结构采集效率高,能精准控制每个模组状态,一定程度上提高电站的安全性。在模组式中电池的电流、电压、表面温度等基本参数可直接测量,但是SOC需根据电池内部状态进行估计。因此选择合适的SOC估算方法对提高BMS的运行效率和稳定性至关重要。

电池的工作状态呈非线性特点,而SOC受温度、电流、使用情况等因素影响,因此如何准确估计SOC是近年来的热门研究方向。过去常用开路电压法、安时法、阻抗法估算SOC,随人工智能的发展又相继出现了一些新型方法如卡尔曼滤波、神经网络等方法。目前国内外学者针对如何准确估算电池的SOC做出了大量研究:陆秋瑜等^[15]基于电池组伏安特性计算SOC来控制电池组充放电状态,所建模型更准确地反映储能电站的物理特性;刘胜永^[16]采用无味卡尔曼滤波法估计锂电池SOC,整个过程误差控制在1%以内,并分析卡尔曼滤波精度与SOC初值、状态协方差、测量噪声协方差有关。以上关于SOC估计的各种方法多应用于几十兆瓦储能系统,而针对大型系统的SOC准确估计多采用精度较低的安时法。

2 电化学储能电站的控制运行方式

近年来,电化学储能电站发展非常迅速,为电网提供辅助服务,为电网的安全稳定运行保驾护航。我国储能电站已具备自动发电控制(automatic generation control, AGC),一、二次调频,调峰等控制方式,其中一次调频由PCS直接参与,二次调频是接受电网AGC的统一调度。

2.1 自动发电控制

电力系统的自动发电控制是实现发电侧和用电侧平衡,保证电网频率稳定以及与各个设备的交互符合调度计划。目前,我国电力系统主要是由火电机组提供调频服务,但由于传统火电机组惯性和延迟较大,调节有功功率的速度较慢,难以应对以风电、光伏出力为主的不确定性场景。与之相比,储能电站具有毫秒级调节速度,能对可再生能源引起的频率变化做出快速响应,综合调频能力可以很好满足AGC要求。

电网AGC调节主要通过协调各设备出力来保

证电网频率稳定以及调度计划能够正常执行。目前,国内典型的电化学储能电站受电网调度中心控制。在运行过程中,AGC系统通过获取电网的运行参数并进行分析处理,求解出区域控制偏差,并向储能电站的能量管理系统下发指令,由电站监控系统合理分配电池组的输出功率值并传输至PCS执行。

尽管储能电站可以对系统功率波动做出快速响应,但参与AGC服务需要电池组短时间内频繁充放电,可能加速电池组老化影响循环次数,进而造成经济损失。目前,国内学者对提升AGC控制策略经济性的研究主要集中在以下两方面:1)采用不同的算法改进储能电站跟踪AGC指令,以降低储能单元的功率损耗,提升系统经济性;2)采用深度学习的方法,研究电池单元荷电状态、健康状态(state of health, SOH)、循环次数等参数下的系统经济性、效率问题。

严干贵等^[17]提出了一种由BMS跟踪AGC的调节策略,该策略可使电池储能系统参与电力系统调频的经济效率达到最大化,合理优化充放电增加电池循环次数;蔡鑫雷等^[18]为了克服跟踪AGC过程中电池组充放电次数过多影响循环次数的问题,提出基于天牛须搜索算法的电池组跟踪AGC指令控制策略,相比传统方法搜索次数减少了34.49%。

2.2 一次调频

储能电站参与一次调频是依据电力系统中并网点的频率,若出现频率波动则通过PCS机组控制电池组出力,来稳定系统频率。当供给侧出力大于需求侧,系统频率上升时,储能电站存储电能;反之,储能电站输出电能至电网。一次调频要求储能系统能够快速响应,一般控制在毫秒级,当电网频率出现扰动时,储能电站根据系统频率偏差,采用下垂控制模式动态调整有功出力参与一次调频。

为了保证电网在供需不平衡时频率的稳定,李欣然等^[19]同时考虑电网调频与储能电站的调节关系,提出影响电池储能调节模式的关键参量和调频特性评价指标;邓睿等^[20]在下垂控制中采用恒定的下垂系数,但没有考虑电池SOC对储能输出功率的影响;刘辉等^[21]为扰动对系统频率的影响,新增虚拟惯性控制策略。

上述研究聚焦于使用不同的控制策略参与电网一次调频,但多是将储能系统作为一个整体进行能量调度,缺少对电站内部电池组串并联关系的详细建模。实现了控制策略的优势互补,但没有从调频系数方面考虑当电池SOC偏低或偏高时储能系统调频功率不足的问题。基于以上研究,张嘉诚等^[22]考虑储能单元的SOC、SOH,并采用可变下垂控制和虚

拟惯性控制相配合的方式,对储能系统内部电池簇进行优先投切判断;吴启帆等^[23]提出在储能调频阶段通过调频系数对系统频率进行控制,在调频死区阶段采用合适的储能SOC恢复出力的控制策略。

2.3 调峰

根据电力系统要求^[24-27],调峰要求设备具有削峰填谷的作用,而储能电站启动灵活,响应迅速已在大量实际工程中参与电力系统调峰。现阶段储能电站参与调峰的方式主要为火电与储能联合深度调峰,已有10余个省份出台了几十兆瓦级储能电站参与调峰的技术标准。例如重庆市石柱县200 MW级储能电站示范工程,在担任调峰作用的同时能促进新能源消纳。

在调峰辅助服务市场上,储能系统能否最终得到推广和应用,根本的因素在于储能投入的经济性^[28-31]。考虑到投资成本,如何合理地配置容量成为目前储能电站建设的重要因素之一。李慧秀等^[32]建立储能配置-运行双层优化模型,上层为配置问题,下层为运行模拟问题,通过差分进化算法求解成本最小问题;吴俊玲等^[33]为减少弃风弃光损失,提出通过储能电站参与调峰来增加风光利用率的策略,并使用遗传算法计算储能电站选址点和容量,增加储能电站后使系统弃风量下降62.2%。

3 结语

电化学储能电站是实现“双碳”战略目标的有力保障,其规模化发展是建设现代化电力系统的必然结果。本文对电化学储能电站的研究现状、组成结构、控制策略等方面进行了综述,得出如下结论:

1)我国面向“双碳”战略目标,运用数字化、智能化技术建立了电化学储能标准体系,并与新型电力系统深度融合,提高了电网供电可靠性以及配置优化;

2)电化学储能电站一般采用户外集装箱式电池舱布置方案,并由电池组、PCS、BMS等组成。其中PCS是储能系统中的核心部件,可以进行交直流变换,实现对电网功率的调节;BMS负责监控电池SOC、SOH状态,对剩余电量进行良好估计;

3)在频率调节方面,电化学储能电站可以通过AGC、一次调频实现供给侧和需求侧平衡,保证电网安全稳定运行,也可以参与辅助调峰服务,起到削峰填谷的作用。

电化学储能是构建我国新型电力系统的重要支柱,是“源网荷储”的关键技术环节,是消纳可再生能源的必要手段。我国重视电力储能发展,截至

2024年9月,已投运的电力储能装机规模(含抽水蓄能)达到111.49 GW,同比增长48%,其中以电化学储能为主的新型储能装机超过50 GW。电化学储能电站对电力系统至关重要,但对于其未来发展应注意:

1)以构建新型电力系统为导向,推动新型储能技术创新。关注国内外储能前沿技术,金属-空气电池、固态锂离子电池等,提前布局前瞻性的研究工作。加快研发电力系统储能专用的长寿命、低成本、高安全性的电化学储能技术;

2)如今锂离子电池储能在新型储能中占比超过90%,而其存在的“热失控”问题是电化学储能电站的首要安全隐患,因此设计时应考虑锂电池热失控及灭火的情况,验证储能电站消防系统可靠性;

3)针对电化学储能电站中电池组建立智能化动态网络,更准确地监测电池充放电电压、电流以及荷电状态,避免出现过充过放现象,增加电池循环寿命;

4)因地制宜,根据当地电网特色进行合理的定容选址,并在发电侧构建“源网荷储”一体化结构,在用户侧保障电能质量可靠稳定,切实解决可再生能源消纳问题。

参考文献

- [1] 李建林,屈树慷,周毅,等. 双碳目标下储能电站相关技术分析[J]. 电器与能效管理技术, 2021(11): 8-14.
LI Jianlin, QU Shukang, ZHOU Yi, et al. Technology analysis on energy storage power station under double Carbon target[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(11): 8-14.
- [2] 郑国松,海建康,胡炜,等. 电化学储能电站安全技术研究进展[J]. 电工技术, 2024(12): 41-43.
ZHENG Guosong, HAI Jiankang, HU Wei, et al. Research progress of safety technology for electrochemical energy storage station[J]. Electric Engineering, 2024(12): 41-43.
- [3] 司徒雪,董鑫,张晓晴,等. 基于CiteSpace的国内外土壤污染治理研究进展和发展动态分析[J]. 现代化工, 2024, 44(9): 17-23.
SI Jiaxue, DONG Xin, ZHANG Xiaoqing, et al. CiteSpace based analysis on research progress and development trend of global soil contamination control[J]. Modern chemical industry, 2024, 44(9): 17-23.
- [4] 李建林,牛萌,王上行,等. 江苏电网侧百兆瓦级电池储能电站运行与控制分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 28-35.
LI Jianlin, NIU Meng, WANG Shangheng, et al. Operation and control analysis of 100 MW class battery energy storage station on grid side in Jiangsu power grid of China[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 28-35.
- [5] DUNN B, KAMATH H, TARASCON J M. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices[J]. Science, 2011, 334(6058): 928-935.
- [6] MAHLIA T M I, SAKTISAHDAN T J, JANNIFAR A, et al. A review of available methods and development on energy storage; technology update[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014(33): 532-545.
- [7] 唐亮, 尹小波, 吴候福, 等. 电化学储能产业发展对安全标准的需求[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2645-2652.
- TANG Liang, YIN Xiaobo, WU Houfu, et al. Demand for safety standards in the development of the electrochemical energy storage industry[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2645-2652.
- [8] 徐亮. 锂电池储能电站防消一体化系统设计及控制策略[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 478-483.
- XU Liang. Design and control strategy of integrated system of early warning and fire protection for Lithium-ion batteries energy storage power station[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(5): 478-483.
- [9] BORODIN O, REN XM, VATAMANU J, et al. Modeling insight into battery electrolyte electrochemical stability and interfacial structure published as part of the accounts of chemical research special issue energy storage: complexities among materials and interfaces at multiple length scales[J]. Accounts of Chemical Research, 2017, 50(12): 2886-2894.
- [10] SUDWORTH J L. High - temperature battery systems[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1996, 354(1712): 1595-1611.
- [11] GUR T M. Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage[J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(10): 2696-2767.
- [12] 袁治章, 刘宗浩, 李先锋. 液流电池储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2944-2958.
- YUAN Zhizhang, LIU Zonghao, LI Xianfeng. Research progress of flow battery technologies[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2944-2958.
- [13] 欧名勇, 王逸超, 刘文军, 等. 电网电压不平衡下储能变流器的控制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(7): 93-101.
- OU Mingyong, WANG Yichao, LIU Wenjun, et al. Control strategy of power conversion system under unbalanced grid voltage[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 93-101.
- [14] 谭丽平, 谭鑫, 王立娜, 等. 电网电压不平衡下考虑电流峰值限制的储能变流器协调控制策略[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 111-118.
- TAN Liping, TAN Xin, WANG Lina, et al. Coordinated control strategy of power conversion system considering current peak limit under unbalanced grid voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 111-118.
- [15] 陆秋瑜, 胡伟, 郑乐, 等. 多时间尺度的电池储能系统建模及分析应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 86-9.
- LU Qiuyu, HU Wei, ZHENG Le, et al. Modeling and analysis of battery energy storage systems in multi-time scales application[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 86-93.
- [16] 刘胜永. 基于风/光伏发电系统的储能系统建模与控制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [17] 严干贵, 刘莹, 段双明, 等. 电池储能单元群参与电力系统二次调频的功率分配策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 26-34.
- YAN Gangui, LIU Ying, DUAN Shuangming, et al. Power distribution strategy for battery energy storage unit group participating in secondary frequency regulation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 26-34.
- [18] 蔡新雷, 董锴, 孟子杰, 等. 基于优化动态分组技术的电池储能电站跟踪 AGC 指令控制策略[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1475-1481.
- CAI Xinlei, DONG Kai, MENG Zijie, et al. AGC command tracking control strategy for battery energy storage power station based on optimized dynamic grouping technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1475-1481.
- [19] 李欣然, 黄际元, 李培强, 等. 考虑电池储能仿真模型的一次调频特性评估[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2135-2141.
- LI Xinran, HUANG Jiyuan, LI Peiqiang, et al. Performance evaluation of primary frequency regulation considering battery energy storage model[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2135-2141.
- [20] 邓睿. 电池储能技术在电力系统调频中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [21] 吴林林, 刘辉, 高文忠, 等. 大容量电池储能参与电网一次调频的优化控制策略研究[J]. 华北电力技术, 2017(3): 32-38.
- WU Linlin, LIU Hui, GAO Wenzhong, et al. Research on the optimal control strategy of large capacity battery energy storage for primary frequency modulation[J]. North China Electric Power, 2017(3): 32-38.
- [22] 张嘉诚, 夏向阳, 邓子豪, 等. 储能电站安全参与电网一次调频的优化控制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(2): 19-27.
- ZHANG Jiacheng, XIA Xiangyang, DENG Zihao, et al. Optimal control strategy for energy storage power station in primary frequency regulation of power grid[J]. Electric Power, 2022, 55(2): 19-27.

- [23] 吴启帆, 宋新立, 张静冉, 等. 电池储能参与电网一次调频的自适应综合控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3829-3836.
- WU Qifan, SONG Xinli, ZHANG Jingran, et al. Study on self-adaptation comprehensive strategy of battery energy storage in primary frequency regulation of power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3829-3836.
- [24] 车彬, 张泽龙, 杨燕. 考虑V2G储能特性与负荷需求响应的主动配电网低碳鲁棒调度[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 29-39.
- CHE Bin, ZHANG Zelong, YANG Yan. Research on the low-carbon robust dispatch of active distribution networks considering storage characteristics of V2G and load demand response[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 29-39.
- [25] 阿力马斯别克·沙肯别克, 袁铁江, 梅生伟. 风电—氢储能与煤化工本地多能耦合系统监控系统设计与实现[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(1): 152-158.
- Alimasibieke SHAKENBIEKE, YUAN Tiejia, MEI Shengwei. Design and achievement on the monitoring system of wind power-hydrogen storage and coal chemical multi-function coupling system[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 152-158.
- [26] 陆海洋, 王翀, 任铁强, 等. 直流侧直挂储能拓扑结构及控制策略研究[J]. 浙江电力, 2023, 42(1): 39-45.
- LU Haiyang, WANG Chong, REN Tieqiang, et al. Research on topology structure and control strategy of direct-hanging energy storage on the DC side[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(1): 39-45.
- [27] 王兆强, 韩思雨. 基于飞轮储能技术的直驱式风电调频系统研究[J]. 东北电力技术, 2024, 45(8): 23-27.
- WANG Zhaoqiang, HAN Siyu. Research on direct drive wind power frequency modulation system based on fly-wheel energy storage technology[J]. Northeast Electric Power Technology, 2024, 45(8): 23-27.
- [28] 王若谷, 解振学, 常小强, 等. 一种基于混合储能改善跟踪光伏发电出力特性方法的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(2): 126-133.
- WANG Ruogu, XIE Zhenxue, CHANG Xiaoqiang, et al. Research on method for improving tracking photovoltaic power generation output characteristics based on hydrogen and battery hybrid energy storage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(2): 126-133.
- [29] 岳大为, 赵文体, 袁行行, 等. 计及电-氢混合储能的孤岛直流微电网可靠性评估[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 27-35.
- YUE Dawei, ZHAO Wenti, YUAN Hanghang, et al. Reliability evaluation of islanded DC microgrid considering electric-hydrogen hybrid energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 27-35.
- [30] 胡迎迎, 李强, 张琳娜, 等. 基于模糊层次分析法-TOPSIS的多元化储能典型场景适用性评估[J]. 电测与仪表, 2024, 61(6): 126-132.
- HU Yingying, LI Qiang, ZHANG Linna, et al. Applicability evaluation of diversified energy storage typical scenarios based on fuzzy analytic hierarchy process-TOPSIS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6): 126-132.
- [31] 窦真兰, 张春雁, 杨海涛, 等. 模块化多电平电池储能系统功率控制与均衡策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(3): 155-162.
- DOU Zhenlan, ZHANG Chunyan, YANG Haitao, et al. Research on the power control and equalization strategy of the modular multilevel battery energy storage system[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 155-162.
- [32] 李秀慧, 崔炎. 考虑调峰调频需求的新能源电网储能优化配置[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(11): 3594-3602.
- LI Xiuhui, CUI Yan. Optimal allocation of energy storage in renewable energy grid considering the demand of peak and frequency regulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(11): 3594-3602.
- [33] 吴俊玲, 张彦涛, 秦晓辉, 等. 减少弃风损失的储能容量和布局优化研究[J]. 电力建设, 2016, 37(6): 24-30.
- WU Junling, ZHANG Yantao, QIN Xiaohui, et al. Study on energy storage capacity and layout optimization by reducing wind power curtailment loss[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(6): 24-30.

作者简介:

贾一凡(1999—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为储能电站容量配置优化。E-mail: 812450711@qq.com。

安海舰(1994—), 男, 工程师, 主要研究方向为新能源检测技术。

周敏刚(1975—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为高电压与绝缘技术。

张春氏(1994—), 男, 工程师, 主要研究方向为综合能源系统运行优化。

朱志遥(2002—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统运行优化。