

面向新型电力系统的大型储能电站 关键技术发展趋势分析与展望

李相俊, 赵珊珊, 惠东

(新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192)

摘要:近年来,我国储能集成规模从“数十兆瓦/百兆瓦级”向吉瓦级跨越式发展,部分储能本体技术在国际上形成了技术引领,储能应用模式也呈现出了大规模集中式和多点布局分散式协同发展的趋势。面向我国新型电力系统发展与建设,在分析储能技术发展现状的基础上,探讨了面向新型电力系统的吉瓦级大型储能电站应用需求,提出并展望了吉瓦级大型储能电站的规划配置、系统集成与运行控制的相关方法及应用前景。

关键词:新型储能;吉瓦级储能电站;规划配置;系统集成;运行控制;电压源型储能电站

中图分类号: TM71 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19421/j.cnki.1006-6357.2022.07.001

0 引言

我国持续增长的用电需求和日趋紧张的环境保护压力,使得优化能源结构、实现清洁低碳发展成为我国能源革命的本质要求,同时也是我国经济社会转型发展的迫切需要。国家发展和改革委员会、国家能源局印发的《“十四五”现代能源体系规划》中,明确提出了“推动电力系统向适应大规模高比例新能源方向演进”的重要战略目标。预计2025年全国非化石能源发电量比重接近40%。然而,在清洁能源高速发展的同时,波动性、随机性、间歇式能源大规模并网给电网运行从调控运行到安全控制等诸多方面带来了不利影响,极大地限制了清洁能源的有效利用。作为解决新能源发电并网问题的有效途径之一,百兆瓦级/吉瓦级大型储能电站与大规模集中式或分散式新能源发电联合应用,将随着新能源发电规模的日益增大以及各类储能技术的不断发展,成为我国清洁能源发展战略的重大关键技术。因此,在“双碳”目标下,探索并提出大型储能电站规划配置、系统集成及运行控制等理论方法与应用技术是一项富有理论和现实意义的重要研究方向。

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2400105)。
Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFB2400105)。

我国现有的十兆瓦级和百兆瓦级新型储能电站多通过某一特定类型的储能系统单元并联扩展形成一定规模,多采用集中控制结构,在一定程度上能够满足分布式新能源并网的要求^[1-2]。然而,随着吉瓦级集中式电池储能电站的构建,将给传统的电池储能电站控制架构与策略带来极大的挑战。因此,面向新型电力系统的构建与发展,重新审视传统电池储能电站的选址定容、集成拓扑、控制架构及运行控制等理论方法,提升规模化储能电站规划设计与集成配置水平,强化其多目标控制与智能协同能力,有效提升电网对新能源发电的接纳能力,改善新型电力系统安全稳定运行水平,是重要的现实需求。

为此,本文将在分析规模化电池储能电站发展现状的基础上,面向新型电力系统的发展建设,提出并展望大型储能电站的规划配置、系统集成与运行控制的解决方法。

1 大型储能电站规划与容量配置技术

1.1 大型储能电站规划整体思路

“十三五”之前,受限于技术发展及实际需求,我国的储能电站容量小、类型单一,尚未形成规模化的规划思路。“十三五”末及“十四五”初的储能电站规划,主要集中在电源侧,侧重于新能源场站的储能配比。目前,全国已有多个省(自治区、直

[引文信息]李相俊,赵珊珊,惠东.面向新型电力系统的大型储能电站关键技术发展趋势分析与展望[J].供用电,2022,39(7):2-8,24.

LI Xiangjun, ZHAO Shanshan, HUI Dong. Development trend analysis and prospect of key technologies of large energy storage station in new type power system [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39 (7): 2-8, 24.

辖市)相继出台新能源场站强制配置储能的技术文件,要求新建新能源场站配置储能占新能源装机比例为5%~20%。现有的储能电站规划思路,能够从很大程度上抑制新能源出力波动,但具体建设中存在众多新能源场站“单打独斗、各自为战”的问题,也出现“为建而建、低标准建设、建而不用”等情况,造成建设及运营的效能低,带来投资的浪费,难以支撑能源转型的发展进程。

仅仅将储能电站的建设运营下放至新能源场站是远远不够的,无法满足新型电力系统发展的内在要求。“十四五”期间,应将重点放在网侧与源侧储能的统筹规划上,部分省份已经开始试点,以青海电网为例,已经提出储能电站“四统一”的规划建设及运行管理思路。展望“十五五”,还将把负荷侧储能纳入进来,形成源-网-荷侧储能的统一规划配置框架。

1.2 大型储能电站规划配置方法探讨

现有的储能电站规划方法,存在学术层面和工程层面2条不同路线。学术层面研究主要通过设定相应目标函数,在各类约束条件下求解储能规模,常用目标函数包括投资运行成本最小、失负荷风险最小、可靠性最优、新能源消纳量最大等^[3-13]。工程层面研究

旨在分别解决某一具体需求下的储能配置需求。例如,电力电量平衡需求通常采用生产模拟软件求解,安全稳定需求则采用机电或者电磁仿真软件求解。以新能源侧储能容量测算为例,在文献[3]的基础上,本文进一步提出了新能源侧储能容量配置的流程,如图1所示。通过功能需求和目标函数的更新替代,图1所示的储能配置工作流程也可适用于用户侧储能配置,具有一定通用性。随着加快推进大型新能源发电基地建设、共享储能与电力市场化机制不断发展完善,储能配置工作流程及其标准化工作也是亟待探索和解决的关键问题。

面对新型电力系统下对储能多时间尺度、多应用场景、多功能效能的应用需求,亟须兼顾新能源消纳、“源网荷储”一体化、市场化交易、电力系统发展规划等,开展储能规划配置技术的探索与深化研究。传统规划技术手段无法给出储能定容及选址布局的合理建议,亟须能够兼顾学术和工程路线的大型储能电站综合规划方法。但如果仅简单将上述2条路线下的目标函数放在一个求解框架下,首先导致的是模型维度高、计算速度慢甚至求解困难,难以适应大规模电力网络的计算需要。

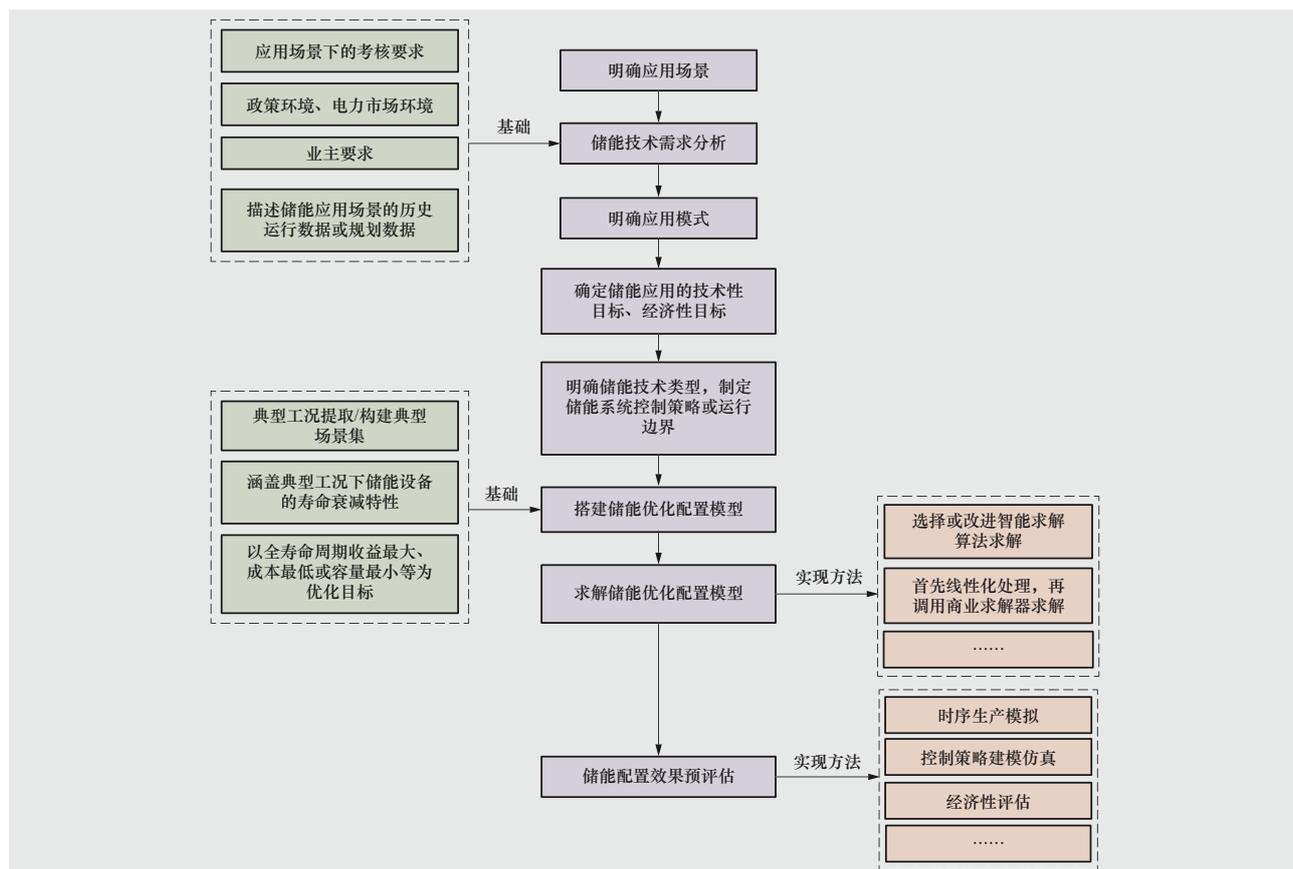


图1 储能容量配置的流程

Fig.1 Flow chart of energy storage configuration work

本文提出了面向新型电力系统发展需求的大型储能电站多层次规划配置方法（如图2所示），并已在部分省级电网开展实践。该方法从顶层向下，首先完成电力电量平衡约束计算，得出储能规划总量；其次完成安全性评价，修正储能规划总量并实现具体配置；再次完成经济性评价，进一步优化储能规划总量并展开选址布局；然后完成电站评估，对储能规划结果可行性进行测算；最终实现储能电站整体规划及选址定容。

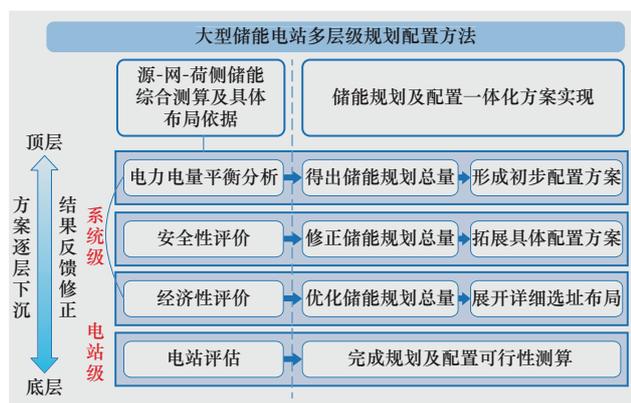


图2 面向新型电力系统的大型储能电站多层次规划配置方法
Fig.2 Multi-level planning and configuration method of large energy storage power station for new type power systems

2 大型储能电站并网运行控制技术

过去十几年来，针对不同类型与规模的电池储能电站在源、网、荷不同场景下的应用技术，国内外开展了一些理论研究与工程验证^[14-24]。表1中简要归纳了我国储能电站典型应用与主要控制技术发展历程。可知依据电源侧、电网侧、配用电侧的不同需求，储能电站控制目标、约束条件及性能指标等在不断优化和更新。且储能电站的研究规模主要以十兆瓦级和百兆瓦级为主，其研究成果将难以满足吉瓦级大型电池储能电站的应用需求，存在明显的理论研究滞后现象。面对千万千瓦级大型新能源发电基地的建设投产、新型电力系统发展建设，亟须从大型储能电站的规划设计与运营模式入手，针对其配置与集成的合理规划问题、功率与能量的动态优化问题、多时间尺度与多场景协调的智能控制问题等，开展一系列研究。上述研究将有力支撑我国吉瓦级大型电池储能电站规划设计、并网运行及多场景应用，为增加清洁能源利用率，提高系统安全稳定水平奠定坚实的基础。

表1 储能电站典型应用与主要控制技术发展历程

Table1 Typical application and main control technology development process of energy storage station

选项	2010-2011年 (第一阶段)	2012-2015年 (第二阶段)	2016-2018年 (第三阶段)	2019-2022年 (第四阶段)
跟踪火电机组发电计划		以储能提升火电机组发电调频能力为控制目标 ^[25]	以储能提升火电机组发电调频技术经济性为控制目标 ^[33]	以储能提升火电机组调频调峰综合能力为控制目标 ^[39]
平滑新能源发电出力波动	单纯平滑新能源发电出力波动 ^[23-24] (未考虑出力波动率限制)	考虑新能源发电的出力波动率，并将其作为反馈控制约束条件 ^[26]	实现综合考虑新能源发电出力波动率、跟踪计划出力的误差范围带，以及参与系统调频调压调峰、紧急功率支撑等多种应用的复合控制功能 ^[34-38]	考虑新能源发电主动支撑 ^[40-42] (一次调频、惯量、阻尼控制)、出力波动率、跟踪计划出力的误差范围带及参与系统二次调频调压、调峰等应用的不同组合或复合控制 ^[43-54]
跟踪新能源发电出力计划	以单纯跟踪计划出力的指定值为控制目标	以跟踪计划出力的误差范围带为控制目标 ^[27-28]		
参与系统调频、调压、调峰控制	具备参与系统调频、削峰填谷功能的单一功能为主	具备参与系统调频调压、调峰、紧急功率支撑等单一功能为主 ^[29-32]		
电站控制规模	兆瓦级电池储能电站(单类型电池)	十兆瓦级电池储能电站(多类型电池)	百兆瓦级多点布局储能聚合	百兆瓦级/百兆瓦时级储能电站推广
电站控制的主要约束条件	荷电状态(state of charge, SOC)、储能系统最大允许充放电能力等	SOC、储能系统最大允许充放电能力、电池充放电倍率等	SOC、储能系统最大允许充放电能力、健康状态(state of health, SOH)、电池充放电倍率、安全状态等	SOC、储能系统最大允许充放电能力、SOH、安全状态、站内区域自治、电池充放电倍率、储能系统运行经济性等
功率响应时间	≤1.5 s	≤900 ms	≤200 ms	≤200 ms
功率出力偏差	≤2%	≤1.5%	≤1.5%	≤1.5%

面向新型电力系统的构建与发展，在系统运行目标及控制精度方面，百兆瓦级和吉瓦级大型电池储能电站因其容量优势能够对电网安全稳定运行起到更多

的积极作用。针对大型电池储能电站存在的多种应用模式，面向不同时间尺度的大型储能电站典型应用需求如图3所示。如何对站内多个储能单元进行分区、

分层并实现协调控制，保证电站高精度、高速率输出，并实现兼顾储能电站在新能源并网支持、电网安全控制辅助等多时间尺度、多目标的多层次协同优化控制等，也值得进一步探索。

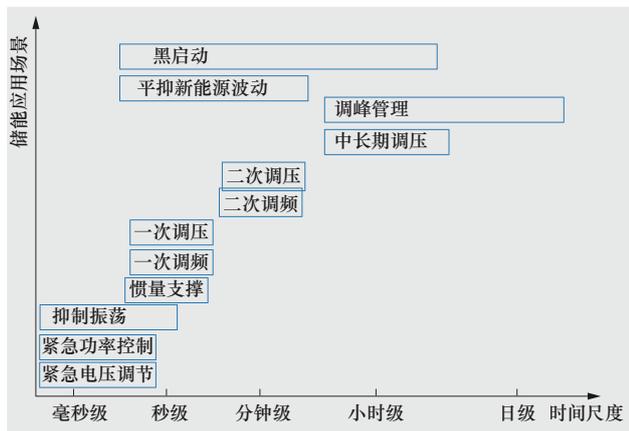


图3 面向不同时间尺度的大型储能电站典型应用需求

Fig.3 Typical application requirements for large-scale energy storage power stations with different time scales

为此，文章提出了面向多应用需求的大型储能电站多目标能量管理思路（如图4所示）。具体为，首先建立储能机组、储能电站分层分级协同控制架构；其次，针对储能电站内多层次、多要素实时功率分配及运行协同需求，兼顾储能单元的荷电状态、健康状态、功率状态等差异化特征，提出计及一致性管控的储能电站并联机组智能充放电与自适应匹配动态组网控制技术；再次，结合电网安全稳定支撑、日内电力电量平衡、参与系统调频调压等多时间尺度、多目标控制的应用需求，计及多目标寻优和深度强化学习理论，提出储能电站时序功率与能量动态自适应智能管理方法；最终实现储能电站多时间尺度、多目标控制、多功能切换的功率控制及能量管理。

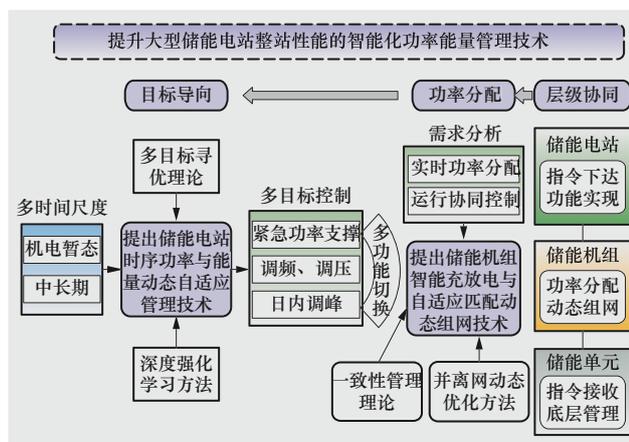


图4 面向多应用需求的大型储能电站多目标能量管理思路

Fig.4 Intelligent coordinated control and energy management of large energy storage power station for multi application requirements

3 大型储能电站系统集成与多机并联运行技术

目前，全球范围内尚未有吉瓦及以上规模集中式电池储能电站建成。而面对如此大规模的电池储能电站，其组成电池类型包括锂离子电池、液流电池、钠离子电池等，其电池单体数量将达到百万级甚至千万级，超出了常规控制架构和策略能力极限，难以兼顾储能单元暂态与稳态响应特性，且在出力精度、电池寿命优化等性能上难以满足工程实际要求。面向新型电力系统的构建与发展，可能涉及的大型储能电站集成与多机并联控制相关的关键技术难题简要归纳为3个方面。①在系统可靠性方面，按照现有储能单元扩展方式，多个储能变流器并联可能产生谐振脱网、环流等现象。对于吉瓦级集中式电池储能电站，系统集成的布局架构、电压等级、控制方式等将发生重大变化，当前电站拓扑结构将不再适用，需提高系统的功率/电压等级、创新功率变换技术，保证吉瓦级大型储能电站的运行效率、可靠性及安全经济性。②在系统动态响应特性方面，吉瓦级大型电池储能电站由若干个电池储能单元汇集而成，由于各电池储能系统单元的工作状态有所差异以及站内控制模式、集电线路等因素的影响，储能整站的动态响应特性将与各机组/单元的动态特性有较大差异，需提高多机并联出力一致性和功率响应速度。③在控制模式方面，传统的储能电站，储能变流器一般采用电流源型控制方式，难以实现对电网安全主动支撑。为实现大型储能电站惯量及短路容量支撑、主动阻尼振荡等功能，须引入电压源型储能变流器的控制与应用方式。因此，大型电压源型储能电站可采用纯电压源型储能机组并联方式，或电压源型与电流源型储能机组混合并联等不同方式。需依据不同应用模式，提升其整站并网自同步及电网安全主动支撑能力。

为此，文章提出了面向新型电力系统的大型储能电站集成与管控思路（如图5所示）。具体为，首先针对整站并网自同步，建立计及调差系数自适应调节的多机并联系统电压自同步控制模型，提出多电压源型变流器之间以及电力电子变流器与传统同步机系统之间的自同步运行策略；其次，针对整站主动支撑，提出适用于电网调频、调压及宽频振荡抑制的多时间尺度、多控制目标的稳定控制方法，攻克电压源型储能电站自同步及整站多时间尺度、多电网需求场景下的精准控制、快速响应和灵活切换难题；最终实现储能电站整站复杂场景自主同步、电网需求主动支撑、宽

频带自适应主动控制的多功能应用。

在上述过程中,实现大型储能电站智能感知与管控是关键点,主要体现在以下4个方面:①协同多机组并联的电压外环控制稳定,实现储能电站自稳定;②计及电网瞬时频率的准确实时感知以及自适应主动控制,实现储能电站自同步;③兼顾海量储能电池的荷电状态、健康状态、功率状态以及多任务目标,实现储能电站能量自管理;④融合电网及电池状态自感知、安全隐患自诊断、支撑功能自处理,实现整站智能化自治管控。

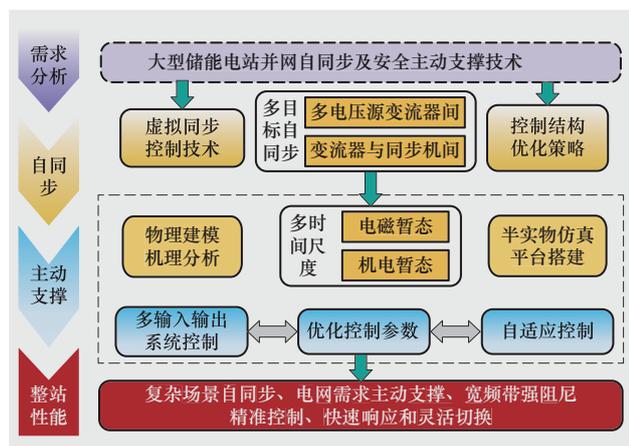


图5 面向新型电力系统的大型储能电站集成与管控思路
Fig.5 Integration and control ideas of large energy storage station for new type power systems

4 结语

本文重点分析并探讨了面向新型电力系统的吉瓦级大型储能电站的应用需求,提出并展望了吉瓦级大型储能电站的规划配置、系统集成与运行控制的关键技术与实现方法,主要归纳如下:

1) 分析并展望了面对新型电力系统发展的大型储能电站规划配置新需求、新问题,提出了大型储能电站多层次规划方法。

2) 结合不同应用场景,分析了电池储能电站运行控制技术的发展变化,探讨了吉瓦级大型储能电站运行控制面临的新问题,提出了面向多应用需求的大型储能电站多目标控制与能量管理方法。

3) 从系统可靠性、系统动态响应特性、控制模式等不同角度,分析了大型电压源型储能电站集成与多机并联面临的新难题,提出并展望了吉瓦级大型储能电站智能化控制的新思路、新方法。

本文主要侧重对电化学储能技术展开了分析与探讨,所提分析也可推广应用于其他类型的储能技术,例如先进压缩空气储能、飞轮储能、储冷储热、氢储

能、超级电容储能、重力储能等。上述不同类型的储能技术可作为功率型或能量型调节资源,将在构建新型电力系统、提高电网灵活调节能力等方面提供重要支撑,相关新型储能技术的规模化推广应用值得期待。

DU

参考文献

- [1] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望 [J]. 电网技术, 2017, 41 (10): 3315-3325.
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems [J]. Power System Technology, 2017, 41 (10): 3315-3325.
- [2] LI X J, WANG S X. Energy management and operational control methods for grid battery energy storage systems [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 7 (5): 1026-1040.
- [3] 李相俊, 马会萌, 姜倩. 新能源侧储能配置技术研究综述 [J]. 中国电力, 2022, 55 (1): 13-25.
LI Xiangjun, MA Huimeng, JIANG Qian. Review of energy storage configuration technology on renewable energy side [J]. Electric Power, 2022, 55 (1): 13-25.
- [4] 古宸嘉, 王建国, 李清涛, 等. 新能源集中并网下大规模集中式储能规划研究述评 [J]. 中国电力, 2022, 55 (1): 2-12, 83.
GU Chenjia, WANG Jianxue, LI Qingtao, et al. Review on large-scale centralized energy storage planning under centralized grid integration of renewable energy [J]. Electric Power, 2022, 55 (1): 2-12, 83.
- [5] 李诗颖, 杨晓辉. 基于双向动态重构与集群划分的光伏储能选址定容 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50 (3): 51-58.
LI Shiyong, YANG Xiaohui. Capacity and location optimization of photovoltaic and energy storage based on bidirectional dynamic reconfiguration and cluster division [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50 (3): 51-58.
- [6] 李佳明, 李文启, 鲁宗相, 等. 考虑系统灵活性的储能-输电线路扩展联合规划 [J]. 中国电力, 2021, 54 (4): 158-167.
LI Jiaming, LI Wenqi, LU Zongxiang, et al. Joint expansion planning of energy storage and transmission considering power system flexibility [J]. Electric Power, 2021, 54 (4): 158-167.
- [7] 齐晓光, 姚福星, 朱天瞳, 等. 考虑大规模风电接入的电力系统混合储能容量优化配置 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41 (10): 11-19.
QI Xiaoguang, YAO Fuxing, ZHU Tiantong, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage in power system considering large-scale wind power integration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41 (10): 11-19.
- [8] 郭威, 修晓青, 李文启, 等. 计及多属性综合指标与经济性的电网侧储能系统选址配置方法 [J]. 电力建设, 2020, 41 (4): 53-62.
GUO Wei, XIU Xiaoqing, LI Wenqi, et al. Siting and configuration methods for grid-side energy storage system considering multi-attribute comprehensive indices and economy [J]. Electric Power Construction, 2020, 41 (4): 53-62.
- [9] 朱晓荣, 鹿国微, 谢婉莹. 考虑源网荷灵活性资源的配电网储能鲁棒规划 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41 (8): 8-16, 40.
ZHU Xiaorong, LU Guowei, XIE Wanying. Robust planning of energy storage in distribution network considering source-network-load flexible resources [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41 (8): 8-16, 40.
- [10] 刘若河, 贾燕冰, 谢栋, 等. 考虑配电网消纳能力的分布式电源与储能优化配置 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42 (1): 166-172.
LIU Ruohe, JIA Yanbing, XIE Dong, et al. Optimal configuration of distributed generation and energy storage considering the consumption capacity in distribution network [J]. Power Capacitor & Reactive Power

- Compensation, 2021, 42 (1): 166-172.
- [11] 程瑜, 黄森, 刘瑞丰. 面向配电网设备利用率提升的分布式储能优化配置 [J]. 智慧电力, 2021, 49 (8): 8-14, 22.
CHENG Yu, HUANG Sen, LIU Ruifeng. Optimal configuration of distributed energy storage for improving equipment utilization in distribution network [J]. Smart Power, 2021, 49 (8): 8-14, 22.
- [12] 汤易, 周满, 朱涛, 等. 基于成本效益最优化的含光伏发电电系统分布式储能规划 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42 (3): 188-196.
TANG Yi, ZHOU Man, ZHU Tao, et al. Distributed energy storage planning of photovoltaic power generation and distribution system based on cost-benefit optimization [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42 (3): 188-196.
- [13] 陈长青, 阳同光. 计及柔性负荷的电网储能和光伏协调规划研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (4): 169-177.
CHEN Changqing, YANG Tongguang. Research on grid energy storage and photovoltaic coordination planning with flexible load [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49 (4): 169-177.
- [14] 姜海洋, 杜尔顺, 朱桂萍, 等. 面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (19): 194-207.
JIANG Haiyang, DU Ershun, ZHU Guiping, et al. Review and prospect of seasonal energy storage for power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (19): 194-207.
- [15] 陈亚爱, 洪忆南, 周京华, 等. 级联型储能功率变换系统控制策略综述 [J]. 电气传动, 2021, 51 (7): 3-11.
CHEN Yaai, HONG Yinan, ZHOU Jinghua, et al. Summary of control strategies for cascaded energy storage power conversion system [J]. Electric Drive, 2021, 51 (7): 3-11.
- [16] CALERO F, CAÑIZARES C A, BHATTACHARYA K, et al. A review of modeling and applications of energy storage systems in power grids [J]. Proceedings of the IEEE, 8607 (99): 1-26.
- [17] LI X J, MA R, GAN W, et al. Optimal dispatch for battery energy storage station in distribution network considering voltage distribution improvement and peak load shifting [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10 (1): 131-139.
- [18] STECCA M, ELIZONDO L R, SOEIRO T B, et al. A comprehensive review of the integration of battery energy storage systems into distribution networks [J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2020 (1): 46-65.
- [19] LEON J I, DOMINGUEZ E, WU L G, et al. Hybrid energy storage systems: concepts, advantages, and applications [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2021, 15 (1): 74-88.
- [20] KIM T, OCHOA J, FAIKA T, et al. An overview of cyber-physical security of battery management systems and adoption of blockchain technology [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10 (1): 1270-1281.
- [21] IEEE. IEEE guide for design, operation, and maintenance of battery energy storage systems, both stationary and mobile, and applications integrated with electric power systems [J]. IEEE Standard, 2019 (21): 1-45.
- [22] MOROZUMI S. Japanese experience in energy storage for a distribution network with high-penetration renewable energy technology leaders [J]. IEEE Electrification Magazine, 2015, 3 (3): 4-12.
- [23] LI X J, HUI D, WU L, et al. Control strategy of battery state of charge for wind/battery hybrid power system [C] //2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. July 4-7, 2010, Bari, Italy. IEEE, 2010: 2723-2726.
- [24] LI X J, LI Y, HAN X J, et al. Application of fuzzy wavelet transform to smooth wind/PV hybrid power system output with battery energy storage system [J]. Energy Procedia, 2011 (12): 994-1001.
- [25] 本刊编辑部. 曙光初现: 储能在电力调频领域的商业探索 [J]. 中国电力企业管理, 2015 (5): 21-23.
- [26] LI X J, HUI D, LAI X K. Battery energy storage station (BESS) - based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4 (2): 464-473.
- [27] 闫鹤鸣, 李相俊, 麻秀范, 等. 基于超短期风电预测功率的储能系统跟踪风电计划出力控制方法 [J]. 电网技术, 2015, 39 (2): 432-439.
YAN Heming, LI Xiangjun, MA Xiufan, et al. Wind power output schedule tracking control method of energy storage system based on ultra-short term wind power prediction [J]. Power System Technology, 2015, 39 (2): 432-439.
- [28] 王恭, 张栋, 李相俊, 等. 考虑弃光的光储联合电站输出功率控制策略 [J]. 太阳能学报, 2019, 40 (3): 817-824.
WANG Gong, ZHANG Dong, LI Xiangjun, et al. Control strategy of photovoltaic-energy storage power generation system considering photovoltaic power curtailment [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40 (3): 817-824.
- [29] 陈满, 陆志刚, 刘怡, 等. 电池储能系统恒功率削峰填谷优化策略研究 [J]. 电网技术, 2012, 36 (9): 232-237.
CHEN Man, LU Zhigang, LIU Yi, et al. Research on optimal peak load shifting strategy of battery energy storage system operated in constant power mode [J]. Power System Technology, 2012, 36 (9): 232-237.
- [30] 胡泽春, 谢旭, 张放, 等. 含储能资源参与的自动发电控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (29): 5080-5087.
HU Zechun, XIE Xu, ZHANG Fang, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (29): 5080-5087.
- [31] 徐明, 李相俊, 贾学翠, 等. 规模化电池储能系统的无功功率控制策略研究 [J]. 可再生能源, 2013, 31 (7): 81-84.
XU Ming, LI Xiangjun, JIA Xuecui, et al. Research on reactive power control strategy for large-scale battery energy storage systems [J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31 (7): 81-84.
- [32] 黄伟, 崔屹平, 华亮亮, 等. 基于小水电及储能的主动配电网电压控制 [J]. 电力建设, 2015, 36 (1): 103-109.
HUANG Wei, CUI Yiping, HUA Liangliang, et al. Active distribution network voltage control based on the small hydropower and energy storage device [J]. Electric Power Construction, 2015, 36 (1): 103-109.
- [33] 孙冰莹, 刘宗歧, 杨水丽, 等. 补偿度实时优化的储能-火电联合AGC策略 [J]. 电网技术, 2018, 42 (2): 426-436.
SUN Bingying, LIU Zongqi, YANG Shuili, et al. A real-time optimization method of compensation degree for storage coordinated with thermal power unit in AGC [J]. Power System Technology, 2018, 42 (2): 426-436.
- [34] LI X J, YAO L Z, HUI D. Optimal control and management of a large-scale battery energy storage system to mitigate fluctuation and intermittence of renewable generations [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4 (4): 593-603.
- [35] LI X J, YAN H M. Fuzzy logic-based coordinated control method for multi-type battery energy storage systems [J]. Artificial Intelligence Review, 2018, 49 (2): 227-243.
- [36] 刘冰, 张静, 李岱昕, 等. 储能在发电侧调峰调频服务中的应用现状和前景分析 [J]. 储能科学与技术, 2016, 5 (6): 909-914.
LIU Bing, ZHANG Jing, LI Daixin, et al. Energy storage for peak shaving and frequency regulation in the front of meter: progress and prospect [J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5 (6): 909-914.
- [37] 高峰, 黄晓东, 戎晓波, 等. 储能电站综合效益评价体系设计研究 [J]. 电源技术, 2016, 40 (3): 638-641.
GAO Feng, HUANG Xiaodong, RONG Xiaobo, et al. Design of holistic benefit system of energy storage [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40 (3): 638-641.
- [38] 胡安平, 杨波, 潘鹏鹏, 等. 基于电力电子接口的储能系统惯性特征研究 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (17): 4999-5008, 5297.

- HU Anping, YANG Bo, PAN Pengpeng, et al. Study on inertial characteristics of energy storage system with power electronic interface [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (17): 4999-5008, 5297.
- [39] 叶泽, 李湘旗, 姜飞, 等. 考虑最优弃能率的风光火储联合系统分层优化经济调度 [J]. 电网技术, 2021, 45 (6): 2270-2280.
- YE Ze, LI Xiangqi, JIANG Fei, et al. Hierarchical optimization economic dispatching of combined wind-PV-thermal-energy storage system considering the optimal energy abandonment rate [J]. Power System Technology, 2021, 45 (6): 2270-2280.
- [40] 姜惠兰, 蔡继朝, 肖瑞, 等. 一种提高系统频率响应特性的风储协调控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41 (7): 44-51.
- JIANG Huilan, CAI Jizhao, XIAO Rui, et al. A wind-storage coordinated control strategy for improving system frequency response characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41 (7): 44-51.
- [41] 金铭鑫, 王彤, 黄世楼, 等. 含储能型虚拟同步发电机的直驱风机并网系统自适应协调阻尼控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41 (10): 170-177, 191.
- JIN Mingxin, WANG Tong, HUANG Shilou, et al. Adaptive coordinated damping control strategy for grid-connected direct-driven wind turbine system with energy storage-based virtual synchronous generators [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41 (10): 170-177, 191.
- [42] 李欣然, 崔曦文, 黄际元, 等. 电池储能电源参与电网一次调频的自适应控制策略 [J]. 电工技术学报, 2019, 34 (18): 3897-3908.
- LI Xinran, CUI Xiwen, HUANG Jiyuan, et al. The self-adaption control strategy of energy storage batteries participating in the primary frequency regulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (18): 3897-3908.
- [43] 陈贻骛, 李培宜, 孙攀. 微机实现储能系统参与电网调频调压协调控制策略 [J]. 电工技术, 2021 (12): 150-152.
- CHEN Yiao, LI Peiyi, SUN Pan. Coordinated control strategy of energy storage system participating in frequency regulation and voltage regulation of power grid by microcomputer [J]. Electric Engineering, 2021 (12): 150-152.
- [44] 丁明, 施建雄, 韩平平, 等. 光储系统参与电网调频及调峰的综合控制策略 [J]. 中国电力, 2021, 54 (1): 116-123, 174.
- DING Ming, SHI Jianxiong, HAN Pingping, et al. An integrated control strategy for photovoltaic-energy storage system participating in frequency regulation and peak shaving of power grid [J]. Electric Power, 2021, 54 (1): 116-123, 174.
- [45] 许振宇, 石梦璇, 周建宇, 等. 基于飞轮储能的网/储协调虚拟同步机控制策略的小信号模型分析 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (20): 6236-6248.
- XU Zhenyu, SHI Mengxuan, ZHOU Jianyu, et al. Small signal model analysis of network/storage coordination virtual synchronous generator control based on flywheel energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (20): 6236-6248.
- [46] 高建瑞, 李国杰, 汪可友, 等. 考虑储能充放电功率限制的并网光储虚拟同步机控制 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (4): 134-141.
- GAO Jianrui, LI Guojie, WANG Keyou, et al. Control of grid-connected PV-battery virtual synchronous machine considering battery charging/discharging power limit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (4): 134-141.
- [47] 闫士杰, 沈千翔, 李相俊. 大功率模块化储能系统SOC优化均衡控制 [J]. 电网技术, 2021, 45 (1): 49-56.
- YAN Shijie, SHEN Qianxiang, LI Xiangjun. Optimized SOC balancing control for high power modular energy storage system [J]. Power System Technology, 2021, 45 (1): 49-56.
- [48] 王静, 刘文霞, 李守强, 等. 计及机组降损收益的电源侧电池储能调频/调峰经济效益评价方法 [J]. 电网技术, 2020, 44 (11): 4236-4245.
- WANG Jing, LIU Wenxia, LI Shouqiang, et al. A method to evaluate economic benefits of power side battery energy storage frequency/peak regulation considering the benefits of reducing thermal power unit losses [J]. Power System Technology, 2020, 44 (11): 4236-4245.
- [49] ZHU Y H, ZHAO D B, LI X J, et al. Control-limited adaptive dynamic programming for multi-battery energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10 (4): 4235-4244.
- [50] 甘伟, 郭剑波, 李相俊, 等. 面向多应用需求的分布式储能优化调度 [J]. 电网技术, 2019, 43 (5): 1504-1511.
- GAN Wei, GUO Jianbo, LI Xiangjun, et al. Distributed energy storage optimization scheduling for multiple application requirements [J]. Power System Technology, 2019, 43 (5): 1504-1511.
- [51] 李相俊, 贾学琴, 董楠, 等. 北京电网储能电站调控技术研究及应用 [J]. 供用电, 2021, 38 (6): 2-6, 28.
- LI Xiangjun, JIA Xueqin, DONG Nan, et al. Research and application of dispatching and control technology for energy storage power station in Beijing power grid [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38 (6): 2-6, 28.
- [52] 李相俊, 马锐. 考虑电池组健康状态的储能系统能量管理方法 [J]. 电网技术, 2020, 44 (11): 4210-4217.
- LI Xiangjun, MA Rui. Energy management method of energy storage system considering the SOH of battery pack [J]. Power System Technology, 2020, 44 (11): 4210-4217.
- [53] 王骅, 李相俊, 李文启, 等. 分布式储能系统对特高压直流闭锁后的紧急功率支撑方法研究 [J]. 供用电, 2021, 38 (6): 14-20.
- WANG Hua, LI Xiangjun, LI Wenqi, et al. Research on emergency power support method of distributed energy storage system after UHVDC blockage [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38 (6): 14-20.
- [54] 陈海生, 李泓, 马文涛, 等. 2021年中国储能技术研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11 (3): 1052-1076.
- CHEN Haisheng, LI Hong, MA Wentao, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021 [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11 (3): 1052-1076.

收稿日期: 2022-04-20; 修回日期: 2022-05-10

作者简介:

李相俊 (1979—), 通信作者, 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为大规模储能技术、新能源与分布式发电、新型电力系统运行与控制技术。

赵珊珊 (1983—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大规模储能技术、电力系统规划与运行技术。

惠东 (1968—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为大规模储能技术。

(下转第 24 页 continued on page 24)

Research on modeling and dynamic networking coordinated control method of off-grid wind-storage-load systems

LI Hanning¹, LI Xiangjun¹, WANG Xiangjin², LIN Da², LIU Min²

(1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy and Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Off-grid wind power systems have received extensive attention due to their broad development prospects. However, the actual operation of the fan far from the high-voltage bus will be affected by the line. In order to improve the system stability, this paper establishes a hybrid energy storage system with voltage source energy storage and current source energy storage operating in parallel, then forms an off-grid wind-storage-load system structure with the DFIG wind turbine and load, also the control strategy of the system is given. A model is built in the MATLAB/Simulink simulation environment. By comparing the influence of voltage source energy storage and hybrid energy storage on system stability, and testing the ability of the system to respond to the output and load fluctuation of wind power generation system, the effectiveness of the dynamic networking method and control strategy proposed is verified, and the stable operation of off grid wind load storage system is realized.

Key words: wind-storage-load system; voltage source energy storage; hybrid energy storage; off-grid; DFIG wind turbine; cable

(上接第 08 页 continued from page 08)

Development trend analysis and prospect of key technologies of large energy storage station in new type power system

LI Xiangjun, ZHAO Shanshan, HUI Dong

(State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy and Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In recent years, the scale of energy storage (ES) integration in China has developed by leaps and bounds from "tens of megawatts/100 megawatts" to gigawatts. Some ES ontology technologies have formed leadership in the world, and the ES application mode also shows the trend of large-scale centralized and multi-point layout decentralized collaborative development. Facing the development and construction of China's new type power system, based on the analysis of the development status of ES technology, this paper discusses the application requirements of gigawatt level large ES power station for the new type power system, and puts forward and prospects the relevant methods and application prospects of planning and configuration, system integration and operation control for gigawatt level ES power station.

Key words: new type energy storage; GW level energy storage power station; planning and configuration; system integration; operation control; voltage source energy storage power station