

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230016

基于储能的电力系统安全调控方法

余鹏飞¹, 朱继忠^{1,2}, 熊小伏¹, 陈红州¹, 宋勇辉¹, 王伟¹

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;

2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: “双碳”目标下新型电力系统面临交直流系统故障耦合传播、频率与电压稳定风险上升等新的安全问题, 引入储能参与安全调控的研究已逐渐成为热点。为了更有效地挖掘储能参与安全调控的能力, 有必要对储能为电力系统提供安全支撑的场景、理论与技术方法进行梳理总结, 并在此基础上探讨后续需要重点关注的问题及研究思路。从储能对电力系统静态安全、动态安全、交直流混联电力系统安全、主动安全技术、辅助服务市场 5 个方面进行总结, 涉及储能与电网可靠性、储能与频率稳定性、储能与电压稳定性、储能与输电堵塞、储能与直流闭锁连锁跳闸防控等方面的研究进展, 指出了关注储能备用荷电状态(state of charge, SOC)、储能与其他调控资源之间多时间尺度耦合研究的重要性, 以及完善储能参与系统紧急安全调控服务市场机制的必要性, 对促进储能参与新型电力系统安全调控的研究具有一定参考意义。

关键词: 储能; 静态安全; 动态安全; 紧急安全; 辅助服务市场

Regulating & control method of power system security based on battery energy storage

YU Pengfei¹, ZHU Jizhong^{1,2}, XIONG Xiaofu¹, CHEN Hongzhou¹, SONG Yonghui¹, WANG Wei¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology

(Chongqing University), Chongqing 400044, China; 2. School of Electric Power Engineering,

South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In achieving "carbon neutrality," the new power system faces a range of security challenges. These include the emergence of coupled faults in AC and DC systems, as well as an increased risk to frequency and voltage stability. Consequently, there is a growing interest in integrating energy storage technology into security control measures. To better understand the role of energy storage in enhancing system security, it is essential to outline the relevant scenarios, theories, and technical approaches. This will provide critical support to the power system while identifying key areas of future research. This paper focuses on five key aspects: static and dynamic security of the power system, security considerations in AC/DC hybrid power systems, active security technologies, and the ancillary service market. These areas encompass the progress made in understanding the relationship between energy storage and grid reliability, frequency stability, voltage stability, transmission blockage, and DC blocking cascading trip prevention. The research highlights the significance of examining the state of charge (SOC) reserve capabilities of energy storage, investigating the multi-timescale coupling between energy storage and other regulating resources, and improving the market mechanisms to facilitate energy storage's participation in emergency security regulation services. These findings provide valuable insights for advancing the research on energy storage's role in enhancing security in the evolving power systems.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1866603).

Key words: energy storage; static security; dynamic security; emergency security; ancillary services market

0 引言

近年来极端气象事件的不断出现, 促使各国加

快推进低碳能源系统的建设, 以高比例新能源为特征的低碳电力系统中, 储能是必不可少的元素。

《国家发展改革委国家能源局关于加快推动新型储能发展的指导意见》要求大力推进电源侧储能项目建设。在“双碳”目标下, 未来十年是构建以

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1866603)

针对小扰动引起的配电网电压波动问题, 基于分布式算法的分布式控制和基于储能荷电状态 (state of charge, SOC) 等信息的协调控制方法是解决电压波动的有效方法, 可在电压调节过程中充分利用储能的容量^[13]。针对配电网电压既受无功影响也受有功引起的电压降落影响, 利用具有四象限调节能力的储能系统参与配电网电压调节, 能够进一步提升配网电压合格率; 特别是利用储能的调峰能力, 显著降低负荷高峰时段配电网与输电网之间的交互功率和峰值电压损耗^[14]。

大量研究从储能的接入位置、光储一体化、多储能协同等不同角度研究了电压调控方法。例如文献[15]通过移动储能车最大限度降低配电网的运行成本并且能够对配电网形成电压支撑。文献[16]提出一种基于电压灵敏度分析的启发式策略以确定储能的最优接入位置。文献[17]提出一种适用于低压配电网电压控制的储能控制方法, 可以利用较少的信息实现对电压质量的保障。文献[18]提出了一种解决光伏和储能接入后配电网电压波动协同调控方法。文献[19]针对配电网电压偏低的问题, 提出了一种多电池储能系统的协同控制方法。

2021年12月, 张北百兆瓦先进压缩空气储能示范项目送电成功, 顺利实现并网。该示范项目主要建设“风、光、储”一体化储能站, 建设规模为100 MW, 系统设计效率达70.4%。先进压缩空气储能技术可实现电力系统调峰、调相、旋转备用、黑启动等多个功能, 在提高电力系统区域电压稳定性方面也起到了重要作用。

1.3 储能与输电阻塞问题

能源基地和负荷中心之间的输电网络受通道制约, 高峰负荷时会产生网络阻塞问题。利用储能缓解网络阻塞的基本思想就是在不新增输电线路条件下, 在受端建设储能系统, 通过“低充高放”的方式(如图2所示), 降低高峰负荷时段通过特定输电线路的潮流, 避免网络过载, 避免或延缓输电投资^[20-21]。

新能源发电接入电网后, 对输电阻塞提出了新的挑战, 需要从技术指标、经济指标、建设指标3方面建立缓解网络阻塞的储能规划综合评价指标体系, 基于主客观相结合的方法求取各指标权重, 实现储能规划方案的综合评价^[22], 包括最高负载率、功率波动方差、峰谷差, 投资等年值、收入等年值, 施工周期、占地面积等指标。文献[23]将基尼系数引入电力线路负载均衡性评价中, 提出一种新的衡量电网均衡度的指标, 通过在电力需求侧配置储能装置, 实现网络潮流更加均衡的分布。

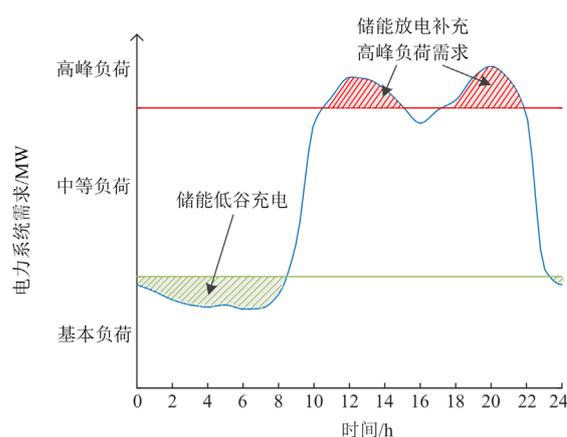


图2 储能在电网中的调峰作用

Fig. 2 Effect of energy storage on peak regulation in power grid

在受电端调节常规机组发电输出也是避免网络阻塞的方法, 但可能受常规机组爬坡能力约束, 不能及时跟踪负荷和新能源的变化来缓解网络阻塞, 此时可利用储能调峰能力进行输电阻塞管理以减少弃风, 提高输电线路利用率^[24]。通过建立反映储能成本与输电阻塞成本的优化模型, 可得到储能缓解电力系统输电阻塞的最优配置与运行方式^[25]。抑制输电阻塞的能力与储能电池的功率和容量有关, 文献[26]研究了小容量储能电池在短时间尺度下(分钟级)缓解输电阻塞的效益, 证明储能在短时功率支撑方面具有很大潜力。为了进一步提升储能用于抑制输电堵塞的效益, 文献[27]利用日前电力市场中的电价套利来产生收益, 提出了一种新的储能实时优化调度算法。

2021年, 法国电网运营商(Réseau de Transport d'Électricité, RTE)启动了系统级的电池储能自动化管理项目 Ringo, 允许在可再生能源发电高峰期间储存多余的电力, 并在发电高峰时段过后释放。该项目在3个关键位置总共安装了32 MW/100 MWh的电池储能系统, 大约相当于4万户家庭1h的电能消耗量, 项目总投资约8000万欧元。将大规模电池系统作为“虚拟输电线”, 以缓解网络拥堵, 避免新建线路和弃掉可再生能源电力, 实现了安全与经济的协同。

如上所述, 储能支撑电力系统静态安全方面主要特点如图3所示。

高比例新能源电力系统中尖峰潮流和小扰动事件发生的频次较高, 频率和电压问题突出, 研究表明储能解决这类问题具有优势。储能应用于这些场景时, 在调控方面没有难以解决的技术问题, 更多研究是建立技术、经济一体化模型来确定储能的容

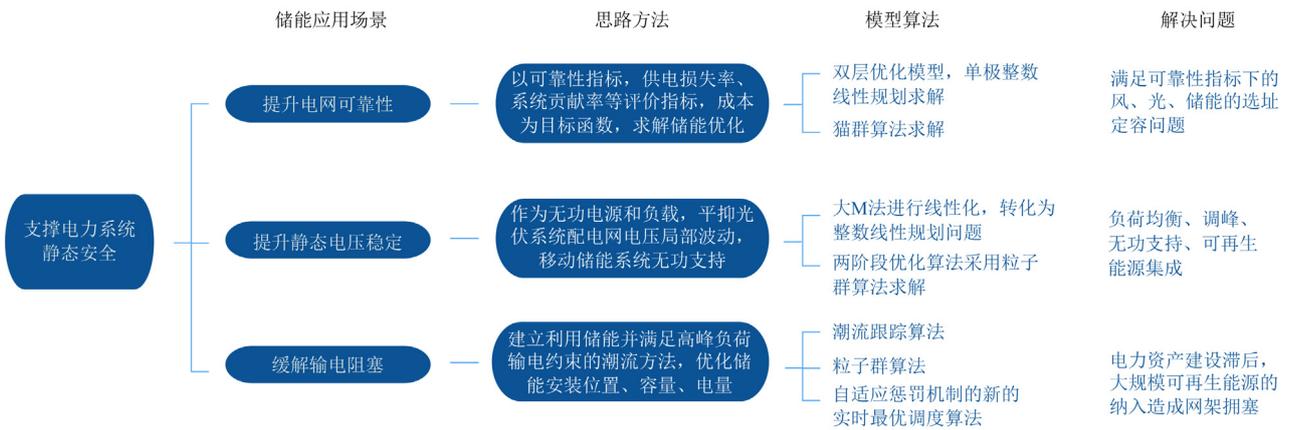


图3 储能支撑电力系统静态安全

Fig. 3 Energy storage supports static security of power systems

量、位置及调用决策。后续研究应注重储能拥有者参与短时静态安全服务的随机性影响、获利机制、储能设施托管服务等技术与商业模式的耦合问题。

2 储能支撑电力系统动态安全的方法

2.1 储能改善频率稳定性

电网的频率稳定性是衡量电网结构强度、发电和需求平衡状况的关键指标。光伏和风电机组比例的提升，会导致电力系统的惯性降低。系统惯性越小，在不平衡功率扰动冲击下的频率变化率越高，频率稳定问题越突出。考虑到风电、光伏机组的可调功率储备不足，选择储能提供快速的有功调节支撑，是实现频率快速恢复的有效手段。

调节资源的快速响应可有效减小电网在紧急事件发生期间的频率偏差和频率变化率(rate of change of frequency, ROCOF)。如图4所示，频率响应时间包含延迟时间和爬坡时间；由于响应速度和爬坡限制，传统机组通常需较长时间才能达到输出功率的

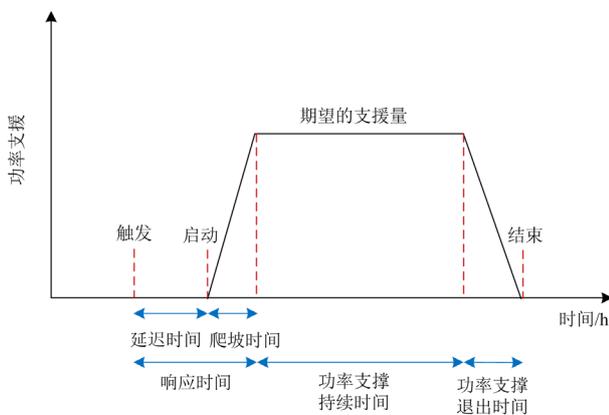


图4 响应时间示意图

Fig. 4 Response time settings

指令值。近年来因新能源比重的提升，不少电网的频率响应需求时间远远低于传统机组响应时间，如表1所示^[28]。

表1 不同国家快速频率响应需求对比

Table 1 Comparison of fast frequency response demand in different countries

国家/地区	响应时间/s	持续时间	支援功率/MW
英国	1	15 min	1~50 MW
爱尔兰	2	8~10 s	—
澳大利亚	0.5~1	6 s	—
美国得州	0.25	15 min	>0.1 MW
加拿大魁北克	1.5	9 s	—
北欧	0.7/1/1.3	短: 5 s 长: 30 s	>0.1 MW

2.1.1 电网频率稳定响应时间

由表1可知，1 s左右的响应时间对于传统机组来说很难实现。

储能由于其快速充放电特性，可在数十毫秒内提供快速有功功率注入，以模拟电力系统的自然惯性响应^[29]。部分储能的放电功率和响应时间如表2所示，响应时间可以低到100 ms以内^[30]。

表2 适用于快速频率响应的储能种类

Table 2 Energy storage tech suitable for fast frequency response

类型	最大功率/MW	响应时间/ms	放电时间尺度
飞轮	400	<4	<15 min
锂电池	>50	<40	min~h
液流电池	50	<40	s~h
先进铅酸	40	<40	s~h
超级电容	50	10~20	ms~h

2.1.2 基于储能的频率稳定性提升方法

相较于同步发电机，新能源电源通过电力电子装置并网且与系统处于解耦运行状态，不能主动响

应系统频率变化, 尤其光伏发电是没有旋转物体的, 本质上不具备惯性^[31]。但是光伏的虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)可以基于光储发电系统的虚拟惯量控制策略, 通过检测系统频率与蓄电池的荷电状态, 短时调节蓄电池储备能量为系统提供惯性支持, 实现虚拟同步功能^[32]。

风力发电以发电机转子为媒介实现能量转化, 由于风机转子转速有更大的变化范围, 所以理论上风机的惯量支撑能力比同步机更强^[33]。但实际上, 永磁直驱风机通过换流器与电网相连, 与系统完全解耦, 因而无法提供惯量; 双馈异步风机虽然与系统直接相连, 但转子受电力电子换流器控制, 与电网弱耦合^[34], 只能提供少许惯性响应。

为了提供比一次调频更快的频率响应能力, 研究表明由储能、高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)换流器等静态元件均能提供快速频率响应(fast frequency response, FFR)^[35-36]。

目前, 电池-超级电容混合储能系统是调频辅助服务中最具发展潜力的混合技术之一^[37], 在其功率控制策略方面, 已有许多相关研究成果, 主要包括: 基于规则的功率分配策略^[38]和基于功率波动性质的分配策略^[39]。其中, 基于规则的功率分配策略依据历史运行经验与专家信息库设定功率分配策略^[40], 在特定应用场景中具有较好效果。

基于储能的频率稳定提升控制方法主要分为定额输出、下垂控制和虚拟惯量控制。其中, 定额输出是指到达触发条件后, 直接或分轮次输出恒定功率; 下垂控制是指传统 P-f 下垂控制, 作为一次调频; 虚拟惯量控制则可采用基于频率的惯性控制(frequency-based inertial control, FBIC)或基于摆动方程的惯性控制(swing-equation-based inertial control, SEBIC)。

FBIC 通常是储能作为商用的惯性控制方法, 图 5 为 FBIC 方法框图^[41]。FBIC 有两个控制分支: 基于频率变化率的上分支控制和基于频率偏差设计的下分支下垂控制。“If” 块表示根据测量的系统频率偏差确定是否启用 FBIC 的阈值。在频率事件开始时, 基于 ROCOF 的项占主导地位, 而当系统频率接近其最低点时, 基于下垂的项占主导地位。

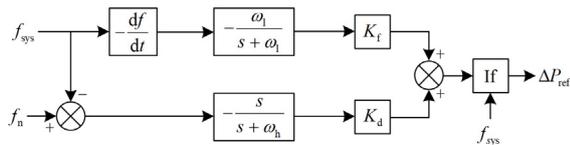


图 5 基于频率的惯量控制
Fig. 5 Frequency-based inertial control

SEBIC 方法包括虚拟惯性控制、虚拟同步发电机(VSG)、虚拟同步机(virtual synchronous machine, VSM)、同步逆变器, 通过控制储能系统的功率转换系统来模拟其机电瞬态行为^[42]。图 6 为 SEBIC 的流程图, 储能系统与 SEBIC 的“功角”在频率事件期间被动增加, 以受控方式释放储能系统内的能量, 并实现惯性响应。许多研究和示范项目证明了储能用在 SEBIC 方法中的有效性。文献[43-44]实现了一种自校正 VSM, 使储能系统为自治电力系统提供动态频率支持, 在保持最佳惯性和下垂常数的同时, 将 ROCOF 降至最低。

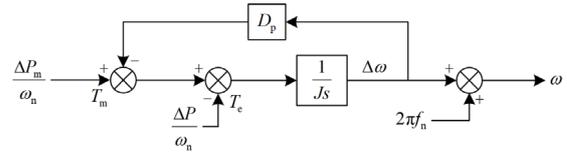


图 6 基于摆动方程的惯性控制
Fig. 6 A swing-equation-based inertial control

2.1.3 支持频率稳定的储能应用案例

案例 1^[44]: 澳大利亚 Hornsdale Power Reserve 储能项目, 采用 Tesla 锂离子电池, 可在小于 150 ms 内将放电功率升至 100 MW, 可预防出现低频减载事件或减少低频减载切去的负荷规模。2017 年 12 月, 澳大利亚维多利亚州 Loy Yang 机组跳闸, 频率降低至 49.8 Hz, 140 ms 后 1000 km 外的 Tesla 储能系统快速反应输出 7.3 MW 功率, 延缓了频率下跌。

案例 2^[45]: 澳大利亚 2018 年 8 月 25 日昆士兰一新南威尔士联络线停运, 在澳大利亚国家电力市场范围内, 除了昆士兰地区, 其他区域频率均降低, 储能进入快速频率响应模式。当系统频率到达最低点 49.12 Hz 时, 储能的响应功率为 84.3 MW。后续南澳大利亚州与维多利亚州解列, 南澳大利亚州频率快速反弹, 电网频率升至 50.15 Hz, 储能则转为充电模式。

2.2 储能提升暂态电压稳定性

2.2.1 储能参与暂态电压稳定性控制的模型和方法

为了证明储能的暂态电压支撑能力, 文献[46]通过对故障期间有功、无功的跟踪并实施状态反馈控制, 验证了可解决短期(秒级)电压稳定问题, 证明了储能可以有效地对抗感应电动机、定速感应发电机和过励磁限制器对短期电压稳定造成的不利影响。文献[47]通过研究暂态电压稳定机理建立了暂态过程中电压稳定裕度评估量化模型, 进而得出一种用于提升暂态电压稳定性的光-储联合协调控制策略, 提高了系统的暂态电压稳定性。

大量的分布式储能为配网侧电压稳定提供了帮助。文献[48]提出了一种新的分布式电池储能协调控制算法，由控制中心向各单元发送充电或放电信号，很大程度地改善了电压偏差、频率偏差和功率因数。文献[49]评估了几种并联无功加固方案，并选择了分布式超导磁储能系统作为首选方案，以提高该地区的电压稳定性。文献[50]提出了一种基于混合储能相互协调的暂态电压稳定控制策略，通过使用超级电容器来优先响应电压的暂态波动，实现快速吸收直流侧的不平衡功率。

当系统受到大的扰动时，电压在调整过程中可能会因为系统的负阻尼特性而出现长时间的振荡。文献[51]通过在储能控制环节引入虚拟电阻来对系统阻尼进行调整，进而达到抑制系统暂态电压振荡的效果。

在新能源通过远距离直流输送场景下，受端故障情况下电压稳定问题凸显。与传统的 Statcom 相比，功率型储能具有四象限调节能力，可快速、大幅输出无功，有助于抑制电压崩溃。

尽管无功功率补偿可以改善电网的电压分布，但过度的功率补偿也会使系统承受电压不稳定所带来的风险^[52-53]。基于储能的就地功率协调补偿控制可以减少电网的无功潮流，减少远方发电机的无功输入量，从而避免电压崩溃情况的发生^[54]。

储能参与维持暂态电压稳定过程中，选择合适的控制方法十分重要。传统的控制方法(例如 PI 比例积分)具有一定的局限性，这类方法的鲁棒性较差，易受到不确定因素的干扰，当系统阻尼不足时可能会发生电压振荡。新的控制方法(如双闭环的滑

模控制、模型预测控制等)将是未来一段时间的重点研究方向。文献[55]提出了光伏高渗透率配电网有功功率/无功功率协调控制方法，通过长短时间尺度上滚动优化求解有功/无功出力，提高了电压调控的动态性能。文献[56]中增加了实时反馈矫正环节，通过对各个可调控设备进行反馈矫正，减少投切次数，降低损耗，可提高协调优化的精度。在引入储能作为电压的动态调控资源后，如何优化算法、节省计算时间、提高调控实时性和预测准确率将是一个值得研究的新问题。

2.2.2 提升电压稳定性的储能应用案例

美国 Entergy 公司在 2002 年即在其运营系统内，安装了 2 台 8 MVA 的超导磁储能系统，用于保证电压稳定。可实现当 $U > 1.10$ p.u. 时，储能在额定范围内吸收无功；当 U 为 $0.9 \sim 0.97$ p.u. 时，储能在额定范围内发出无功；当 $U < 0.90$ p.u. 时，过载运行，系统可发出最高 2.3 倍额定无功^[49]。

在密歇根州，通过在福特-密歇根工厂配置储能系统来平衡太阳能发电厂的间歇性输出功率，以消除快速的电压和功率波动^[57]。

在夏威夷州，一个 15 MW 的储能系统为 30 MW 风电场提供爬坡、可再生能源容量巩固和电压支持^[58]。

2016 年，南澳大利亚由于风暴导致停电后，安装了 100 MW/129 MWh 储能电池系统，旨在解决该地区电力短缺的问题，同时降低可再生能源间歇性带来的电压稳定风险，管理夏季峰值负荷^[59]。

如上所述，储能有助于提升电力系统的动态安全性，已有研究的主要特点如图 7 所示。



图 7 储能支撑电力系统动态安全

Fig. 7 Energy storage supports dynamic power system security

在储能参与频率、电压稳定控制过程中, 已有研究均证明了其有效性。但故障扰动的强度和持续时间、系统的备用调节资源等多种因素决定了频率和电压的变化趋势, 因而提出了不同的储能支撑需求。然而, 储能受 SOC 限制, 支撑功率和支撑时间有限, 现有研究对扰动场景与储能支撑能力的关联分析与建模还不够。

3 储能提升交直流混联电网安全性的措施

近年来, 随着高压直流输电技术的不断成熟, 我国已经形成全世界规模最大、电压等级最高的交直流混联复杂电网的局面^[60]。大型交直流混联电网具有直流占比高、容量大, 可控性强、脆弱和耦合的特点, 带来了全新的问题与挑战。例如多换流站同时换相失败、直流系统单极、双极闭锁等连锁故障^[61-63]; 电力电子设备接入直流网络后与系统中其他组成部分发生谐振, 引起交互失稳现象^[64]; 系统发生故障时面临的过电流^[65]和过电压威胁^[66]等。

储能技术在交直流微电网中的应用研究较多。文献[67]以实时调控时间尺度为脉络, 在分钟级、秒级、毫秒级 3 个时间尺度上, 针对“源—网—荷—储”实时协同调控进行研究, 提出了含储能的交直流混联微电网的多时间尺度实时协同调控方法, 但这类方法不能用在高压交直流混联大电网中。文献[68]在介绍规模化储能调峰、调频、调压、频率稳定和紧急状态恢复关键技术的基础上, 针对高压交直流混联电网中多馈入直流换相失败的问题, 给出了储能参与特高压直流双极闭锁等紧急故障稳定控制与紧急恢复的思路和方法, 指出了交直流受端系统应用储能电池组提升系统安全性的技术路径。文献[69]研究了储能电站对提升交直流混联系统稳定性的作用, 分析了储能电站不同容量、接入位置、控制策略等对系统稳定性指标的影响, 验证了储能电站改善了交直流混联系统稳定性。

储能紧急功率支撑提高直流闭锁后受端系统的稳定性^[70]。

1) 储能降低交流输电线路潮流峰值

在直流闭锁后, 潮流会向交流输电线路转移, 潮流峰值可能超过其静稳极限, 导致交流输电线路功率振荡, 线路失步解列。直流闭锁后, 储能可类似于解决输电堵塞问题, 减小交流输电线路功率变化量, 降低交流输电线路潮流峰值, 从而保障系统稳定。

2) 储能避免多回直流线路闭锁

直流闭锁会导致有功功率不平衡, 特高压交直流系统将会采取稳控措施。在此期间, 通过储能放电减少受端负载压力, 抬高受端电压。同时受端电

网的功率缺额减少, 频率偏差减小。电压和频率的恢复有助于避免其他直流线路闭锁。

4 储能用于电力系统主动安全调控方法

电力系统主动安全调控是应对极端灾害、保障故障冲击下电网稳定的重要手段。主动调控包括事前风险预测、调控资源储备、调控预案构建等多个环节, 通过主动备灾调控, 可提升电网韧性、备灾、故障恢复等需求。

文献[71-72]考虑移动储能设备在城市配电网中的优化配置以增强电网韧性, 但移动储能仅适用于电压等级较低、装机容量较小的城市配电网, 对输电线路的故障防御作用有限。文献[73]建立了故障前防御—攻击过程模拟—故障后防御 3 阶段规划模型进行韧性规划, 但其场景适应性需要完善。在多样化储能资源应用方面, 文献[74]提出了一种考虑热电联产机组(combined heat and power, CHP)参与备用容量配置的综合能源系统优化调度模型。进一步, 文献[75]利用热储能装置来实现 CHP 机组热电解耦, 从而提升 CHP 机组的备用供给灵活性。文献[76]在实时机组组合与备用配置问题中考虑了电池储能装置的作用。文献[77-78]将电动汽车作为一种电池储能用于缓解系统运行备用压力。文献[79]在日前备用优化模型中考虑了燃气机组与储能的调节作用, 并进一步分析了灵活性资源的供需匹配对系统边际电价的影响机理。前述针对不同储能资源作为备用均限定在某些特定场景, 尚缺乏针对系统中大量差异化储能资源参与备灾的统一协同建模研究。

文献[80]研究了在主动配电网(active distribution network, ADN)中储能装置提供运行备用容量的决策方法。利用多分布式发电及储能在负荷恢复中的聚集特性^[81], 可以为关键负载提供应急电源, 防止自然灾害和恶意攻击造成的停电。

文献[82]建立了基于场景优化与鲁棒优化的日前机组组合与备用配置协同优化模型。这种确定性的备用配置方法难以考虑随机因素的特征, 备用决策结果通常过于保守或乐观。在考虑不确定性因素条件下, 文献[83]给出了考虑储能备用配置与风光荷不确定性等随机因素的综合能源系统机会约束经济调度模型。

文献[84]使用风险约束随机调度(risk-constrained stochastic scheduling, RSS)模型考虑微网风险, 通过预调度实现负载均衡并保证了电压约束。文献[85]提出了实时平衡阶段的数据驱动概率特征, 确保了储能调度可行性。文献[86]提出了一种灾前两阶段随机规划方法, 利用逐步对冲算法求解移动储能的配

置数量与位置。

已有研究对储能作为配电网的备用电源、黑启动支撑进行了较深入研究，但对储能支撑大电网安全的研究尚需深化。由于故障风险具有一定的随机性，如何既降低备用成本又做到故障后有足够的储能参与紧急安全调控是一个具有挑战性的难题，考虑随机因素的主动防御的理论和策略还不完善，尚需要针对各种故障场景从确定性与随机性两个方面开展深入研究。

5 储能系统参电力辅助服务市场方法

辅助服务市场是储能发挥作用的重要载体。国内外已经有大量商业化储能项目应用于辅助服务领域，美国 PJM 市场储能调频系统安装量超过了 200 MW。英国在 2017 年 7 月确立了智能灵活能源系统发展战略，为电池储能加入电力市场做好了铺垫。德国和日本同样利用高电价的经济优势和政策补贴引导电池储能投资，澳大利亚的电池储能则主要与分布式光伏组合实现清洁能源供应，美国电池储能发展的重心也放在了市场机制方面^[87]。

2019 年，我国电网企业发布了《关于促进电化学储能健康发展的指导意见》，确立了电池储能参与电力市场的主体地位。文件中明确电网侧为了提供辅助服务投资建设的电池储能设施可以计入电网有效资产，由输配电价对投资成本进行疏导，能够缓解经营压力。

5.1 储能参与的辅助服务

现已开展的辅助服务市场种类主要包括：调峰、调频、调压和备用 4 种。电化学储能的快速响应特性使其可参与所有辅助服务。

储能参与备用辅助服务主要作为旋转备用。文献[88]考虑了多种响应速度的备用，电池储能可以增强电网安全性和提升电能质量^[89]。

值得注意的是，电池储能提供的同一项服务，对于不同买方有不同的表现形式，削峰填谷对电网而言表现为缓解调峰压力^[90]，对新能源而言表现为存储超发电量^[91]，对用户而言表现为错峰用电^[92]。从市场的角度来看，以上 3 个价值可以通过能量市场中的分时价格信号体现，市场统一采购并提供。当然，这些服务也可由发电侧、用电侧主体与电池储能商签订使用协议而自行购买。具体选择哪种模式，是电池储能市场设计中待探讨的问题。

5.2 储能参与辅助服务市场的主要模式

文献[93]研究了分布式电池采用聚合器协调运行的模式，提出了电池储能系统参与能量市场和辅助服务市场的优化决策模型，通过该模型确定分布

式电池的运行方式和报价策略。文献[94]提出了储能参与现货电能量-调频市场交易的总体架构，以电网侧储能电站为独立的竞价主体，构建了双层市场交易决策模型。

对于储能应用于发电系统场景，文献[95]基于可再生能源和电池储能系统参与套利和辅助服务市场，以最小化成本为目标函数，利用最优潮流技术对模型进行求解，实现了对包含储能的各种类型电源的调度。文献[96]提出了一种基于需求紧俏度的调频辅助服务补偿机制，反映实时调频性能的评价模型和指标，用以引导调频资源积极参与电网实时调节，针对性地提出了此市场机制下的火储联合调度策略。文献[97]在考虑风电和结算价格不确定性的基础上，提出了一种多阶段随机模型，得到风电结合电池储能参与电力市场的最优运行方式。文献[98]则研究了抽水蓄能和大型蓄电池储能系统的性价比问题。

调动储能参与辅助服务市场的积极性，关键在于提高其参与辅助服务市场的收益。文献[99]提出了一种云储能租赁机制，以降低风电的投标偏差惩罚并提高云储能聚合商的收益。文献[100]对比分析了电动汽车和电池储能系统提供辅助服务的经济性，以净现值作为比较两种投资方案的基础，对两种情况下的收益进行了分析。

文献[101]提出了一种燃煤机组配电池储能系统的接入方案和控制策略，该方案在两台 330 MW 机组实施，性能测试和运行结果表明，该方案显著提升了机组的调频性能，有效降低了中压抽汽亚临界机组对联合调频的影响，具有良好的经济效益。文献[102]针对西北电网的调峰瓶颈及障碍，基于省间调峰辅助服务市场平台，提出了采用虚拟电池储能调峰等适宜西北地区负荷特性及新能源消纳需求的“源-网-荷”联动调度模式及交易机制。文献[103]在电力现货市场背景下分析了新能源配置电池储能的应用模式和盈利方法，给出了现货市场条件下应用电池储能的政策建议。

6 储能参与电网紧急安全支撑的特点及存在的问题

如前所述，在电网遭受扰动冲击的不同阶段储能均可发挥重要的安全支撑作用，但还存在以下问题需要深入研究。

1) 储能未纳入电力系统紧急调控统一模型

在交直流混联电力系统中，利用储能提供动态无功/电压支撑，降低直流闭锁概率，同时通过储能

实现过负荷控制,降低交直流系统连锁跳闸发生概率,可以做到故障后果可控。

针对这些典型场景尚需深入研究储能 在交直流混联电力系统中主动协同控制的机理、模型,解决防控资源事前配置的时机决策、需量决策以及成本疏导问题。

2) 第二道防线中储能的调用问题

我国大电网的“三道防线”对保障电力系统安全稳定运行起到了重要作用,需要明确储能 在“三道防线”中的位置并加以深入研究。

在电网故障发生后的第一道防线中,继电保护系统切除故障设备。如果网络故障未导致电源损失或负荷脱网,此时系统频率并未改变,基于频率变化的储能控制不会动作。但故障后系统中的潮流会发生改变,电压也可能发生改变,需要启动对潮流和电压的快速调节。

由于大量分布式储能尚未纳入电网安全调控系统,储能并不受控。应研究包含分布式储能的新型电网安全防控体系,增加基于系统控制需求的储能控制模式,及时响应电网第二道防线需求。

3) 储能参与电力系统紧急调控的激励问题

由于电网故障发生具有随机性,如何随机聚集足量的储能并实现广域协同动作,既是一个技术问题又是一个经济问题,尚需从多方面开展技术经济研究。

尽管国内外已对辅助服务市场进行了深入研究,储能可参与调频等辅助服务,但在激励储能按电网风险预测实施紧急状态转换、充放电备用、紧急安全服务市场定价、交易等方面尚需深入研究。

7 结语

随着低碳能源系统的建设和储能材料的突破,储能必将大规模应用于新型电力系统中。

本文从储能保障新型电力系统安全需求出发,总结了储能参与电力系统安全调控的应用路径,指出了尚需重点研究的方向,主要结论如下。

1) 储能用于电力系统静态安全调控是可行的,已解决了控制模式、相关选址定容的优化决策问题。后续研究应注重储能所有者参与静态安全调控服务的随机性影响、获利机制、储能设施托管等问题。

2) 储能具有响应速度快、布局灵活等优势,对于暂态频率稳定、暂态电压稳定均具有重要支撑作用。已研究建立的储能功率-频率下垂控制策略、虚拟惯量控制模式、四象限控制模式,在频率、电压稳定控制中具有良好的效果;由于扰动冲击事件的不确定性,且暂态过程中需要的调节功率较大,须

进一步研究如何利用确定性和随机性建模方法实现在扰动发生前聚集足够的储能资源参与紧急调控。

3) 由于储能对系统扰动事件发生后的协同调控作用与储能的事前预留充放电能力相耦合,因此应关注扰动前后储能与场景的耦合关系,采用一体化建模等措施实现支撑能力最大化。

4) 大规模复杂电网故障扰动后的紧急控制要求参与调控的资源响应速度快、调控灵活,现有频率辅助服务市场无法满足这一需求,有必要加强第二道防线的储能应用技术研究,完善储能在辅助服务市场中参与紧急安全服务的市场机制。

参考文献

- [1] 中关村储能产业技术联盟(CNESA)[EB/OL]. <http://www.cnesa.org/>.
- [2] 美国能源局储能数据库(统计数据截至 2020.11)[EB/OL]. <https://www.sandia.gov/ess-ssl/global-energy-storage-database-home/>.
- [3] XU Yixing, SINGH C. Power system reliability impact of energy storage integration with intelligent operation strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1129-1137.
- [4] 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S].
- [5] DING Tao, LI Chunzhu, LIU Xiyuan, et al. Optimally allocating energy storage for active distribution networks to reduce the risk under N-1 contingencies[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(2): 1518-1527.
- [6] 侯慧, 徐焘, 肖振锋, 等. 基于重力储能的风光储联合发电系统容量规划与评价[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 74-84.
- [7] HOU Hui, XU Tao, XIAO Zhenfeng, et al. Optimal capacity planning and evaluation of a wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 74-84.
- [8] MITRA J. Reliability-based sizing of backup storage[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2010, 25(2): 1198-1199.
- [9] MITRA J, VALLEM M. Determination of storage required to meet reliability guarantees on island-capable microgrids with intermittent sources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2360-2367.
- [10] BAHRAMIRAD S, REDER W, KHODAEI A. Reliability-constrained optimal sizing of energy storage system in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2056-2062.
- [11] KEMPENER R, BORDEN E. Battery storage for renewables: market status and technology outlook[J]. International Renewable Energy Agency, 2015, 32.

- [11] AGGREKO P. Younicos recommissions notrees 36 MW battery plant[EB/OL]. (2017-12-12) [2021-03-01]. <https://www.aggreko.com/en/news/2017/global-news/december/younicos-recommissions-notrees-36-mw-battery-plant>.
- [12] WANG Sheng, HUI Hongxun, DING Yi, et al. Operational reliability evaluation of urban multi-energy systems with equivalent energy storage[J]. *Transactions on Industry Applications*, 2023, 59(2): 2186-2201.
- [13] WANG Y, TAN K T, PENG X Y, et al. Coordinated control of distributed energy-storage systems for voltage regulation in distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(3): 1132-1141.
- [14] LI Xiangjun, MA Rui, GAN Wei, 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): 9-19.
- [15] ABDELTAWAB H, MOHAMED Y. Mobile energy storage scheduling and operation in active distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(9): 6828-6840.
- [16] GIANNITRAPANI A, PAOLETTI S, VICINO A, et al. Optimal allocation of energy storage systems for voltage control in LV distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(6): 2859-2870.
- [17] ZARRILLI D, GIANNITRAPANI A, PAOLETTI S, et al. Energy storage operation for voltage control in distribution networks: a receding horizon approach[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 26(2): 599-609.
- [18] SUGIHARA H, YOKOYAMA K, SAEKI O, et al. Economic and efficient voltage management using customer-owned energy storage systems in a distribution network with high penetration of photovoltaic systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(1): 102-111.
- [19] WANG L, LIANG D, CROSSLAND A, et al. Coordination of multiple energy storage units in a low-voltage distribution network[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(6): 2906-2918.
- [20] World Energy Council. Five steps to energy storage[R]. London: World Energy Council, 2020.
- [21] BHATTACHARJEE S, SIOSHANSI R, ZAREIPOUR H. Benefits of strategically sizing wind-integrated energy storage and transmission[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(2): 1141-1151.
- [22] 程鑫, 龚贤夫, 周姝灿, 等. 缓解网络阻塞的储能规划综合评价[J]. *高电压技术*, 2021, 47(7): 2624-2635.
- CHENG Xin, GONG Xianfu, ZHOU Shucan, et al. Comprehensive evaluation for energy storage planning to relieve network congestion[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(7): 2624-2635.
- [23] 娄素华, 吴耀武, 李婷婷, 等. 基于需求侧储能提升电网均衡度的特性分析[J]. *电力科学与技术学报*, 2013, 28(3): 39-44.
- LOU Suhua, WU Yaowu, LI Tingting, et al. The characteristics analysis of improving power grid balance by ESS allocated in demand side[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2013, 28(3): 39-44.
- [24] VARGAS L, BUSTOS-TURU G, LARRAÍN F. Wind power curtailment and energy storage in transmission congestion management considering power plants ramp rates[C] // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, CO, USA.
- [25] PRAJAPATI V, MAHAJAN V. Congestion management of power system with integration of renewable resources and energy storage system[C] // 2018 IEEE 8th Power India International Conference (PIICON), December 10-12, 2018, Kurukshetra, India.
- [26] EPRI. Use of energy storage to increase transmission capacity[R]. Palo Alto: CA, USA, Technical Report, 2011.
- [27] KHANI H, DADASH Z M, HAJIMIRAGHA A. Transmission congestion relief using privately owned large-scale energy storage systems in a competitive electricity market[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(2): 1449-1458.
- [28] MENG L, J ZAFAR, KHADEM S K, et al. Fast frequency response from energy storage systems—a review of grid standards, projects and technical issues[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 1566-1581.
- [29] RAKHSHANI E, RODRIGUEZ P. Inertia emulation in AC/DC inter-connected power systems using derivative technique considering frequency measurement effects[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5): 3338-3351.
- [30] LI X, WANG S. A review on energy management, operation control and application methods for grid battery energy storage systems[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, early access.
- [31] SONI N, DOOLLA S, CHANDORKAR M C. Improvement of transient response in microgrids using virtual inertia[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(3): 1830-1838.
- [32] 张祥宇, 杨黎, 朱晓荣, 等. 光储发电系统的虚拟转动惯量控制[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(9): 109-115.
- ZHANG Xiangyu, YANG Li, ZHU Xiaorong, et al. Virtual rotational inertia control of PV generation system with energy storage devices[J]. *Electric Power Automation*

- Equipment, 2017, 37(9): 109-115.
- [33] ATTYA A B T, HARTKOPF T. Control and quantification of kinetic energy released by wind farms during power system frequency drops[J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(3): 210-224.
- [34] 李少林, 秦世耀, 王瑞明, 等. 大容量双馈风电机组虚拟惯量调频技术[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 145-150, 156.
LI Shaolin, QIN Shiyao, WANG Ruiming, et al. Control strategy of virtual inertia frequency regulation for large capacity DFIG-based wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4) 145-150, 156.
- [35] GREENWOOD D M, LIM K Y, PATSIOS C, et al. Frequency response services designed for energy storage[J]. Applied Energy, 2017, 203: 115-127.
- [36] European Commission. Commission Regulation (EU) 2016/1447: establishing a network code on requirements for grid connection of high voltage direct current systems and direct current-connected power park modules[Z]. 2016.
- [37] BAHLOUL M, KHADEM S K. Impact of power sharing method on battery life extension in HESS for grid ancillary services[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1317-1327.
- [38] KIM Y, RAGHUNATHAN V, RAGHUNATHAN A. Design and management of battery-supercapacitor hybrid electrical energy storage systems for regulation services[J]. IEEE Transactions on Multi Scale Computing Systems, 2016, 1(3): 12-24.
- [39] 闫群民, 刘语忱, 董新洲, 等. 基于 CEEMDAN-HT 的平抑光伏出力混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 43-53.
YAN Qunmin, LIU Yuchen, DONG Xinzhou, et al. Hybrid energy storage capacity optimization configuration for smoothing PV output based on CEEMDAN-HT[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 43-53.
- [40] 闫群民, 董新洲, 穆佳豪, 等. 基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 11-19.
YAN Qunmin, DONG Xinzhou, MU Jiahao, et al. Optimal configuration of energy storage in an active distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 11-19.
- [41] WANG X, GAO W, SCHOLBROCK A, et al. Evaluation of different inertial control methods for variable-speed wind turbines simulated by fatigue, aerodynamic, structures and turbulence (FAST)[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(12): 1534-1544.
- [42] TORRES M, LOPES L. Virtual synchronous generator: a control strategy to improve dynamic frequency control in autonomous power systems[J]. Energy and Power Engineering, 2013, 2: 32-38.
- [43] TORRES L, LOPES L, MORÁN T, et al. Self-tuning virtual synchronous machine: a control strategy for energy storage systems to support dynamic frequency control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 833-840.
- [44] 曾辉, 孙峰, 邵宝珠, 等. 澳大利亚 100 MW 储能运行分析及对中国的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 86-92.
ZENG Hui, SUN Feng, SHAO Baozhu, et al. Analysis of Australian 100 MW energy storage operation and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 86-92.
- [45] Report from Aurecon Company. Hornsdale power reserve: year 1 technical and market impact case study[EB/OL]. <https://www.aurecongroup.com/markets/energy/hornsdale-e-power-reserve-impact-study>.
- [46] JALALI A, ALDEEN M. Short-term voltage stability improvement via dynamic voltage support capability of ESS devices[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 13(4): 4169-4180.
- [47] 鲍建, 杨沛豪, 何昭辉, 等. 新能源混合储能提高高电压穿越能力研究[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 79-86.
BAO Jian, YANG Peihao, HE Zhaohui, et al. Research on improving high voltage ride through capability of new energy hybrid energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 79-86.
- [48] LEE S J, KIM J H, KIM C H, et al. Coordinated control algorithm for distributed battery energy storage systems for mitigating voltage and frequency deviations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(3): 1713-1722.
- [49] KOLLURI S. Application of distributed superconducting magnetic energy storage system (D-SMES) in the energy system to improve voltage stability[C] // 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 02CH37309), January 27-31, 2002, New York, NY, USA: 838-841.
- [50] 常晓勇. 功率型储能系统在直流微电网运行控制中的关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
CHANG Xiaoyong. Research on key technologies of power-type energy storage systems in DC micro-grid operation and control[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [51] NI F, GUO Y, LI C. Superconducting magnetic energy storage for seamless mode switching in a DC microgrid[C] // 2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices

- (ASEMD), October 16-18, 2020, Tianjin, China.
- [52] JALALI A, ALDEEN M. Risk-based stochastic allocation of ESS to ensure voltage stability margin for distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 1267-1277.
- [53] JALALI A, ALDEEN M. Placement and operation of STATCOM-storage for voltage stability enhancement of power systems with embedded wind farms[C] // IEEE Innovative Smart Grid Technology-Asia, November 28-December 1, 2016, Melbourne, VIC, Australia: 948-953.
- [54] CUFFE P, SMITH P, KEANE A. Capability chart for distributed reactive power resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 15-22.
- [55] 张颖, 季宇, 唐雪峰. 基于 MPC 含分布式光伏配电网有功功率—无功功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 140-146.
ZHANG Ying, JI Yu, TANG Yunfeng. Coordinated control of active and reactive power for distribution network with distributed photovoltaic based on model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 140-146.
- [56] 任佳依, 顾伟, 王勇, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1397-1407.
REN Jiayi, GU Wei, WANG Yong. Multi-time scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1397-1407.
- [57] Xtreme power install PV system at fords Michigan assembly plant, 2018[EB/OL]. https://www.pv-tech.org/news/project_focus_detroit_edison_xtreme_power_install_pv_system_at_fords_michig.
- [58] DOE global energy storage database, 2018[EB/OL]. <http://www.energystorageexchange.org/projects>.
- [59] Tesla power pack to enable large scale sustainable energy to south Australia, 2018[EB/OL]. https://www.tesla.com/en_AU/blog/Tesla-powerpack-enable-large-scale-sustainable-energy-south-Australia.
- [60] 汤未, 于溯, 郑涛, 等. 基于交直流保护协同配合的交直流碰线保护新方案[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 41-50.
TANG Wei, YU Su, ZHENG Tao, et al. A Novel protection scheme of AC and DC line-touching based on coordination of AC and DC protection[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 41-50.
- [61] 赵彤, 吕明超, 娄杰, 等. 多馈入高压直流输电系统的异常换相失败研究[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 705-711.
ZHAO Tong, LÜ Mingchao, LOU Jie, et al. Analysis on potential anomalous commutation failure in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 705-711.
- [62] SHAO Yao, TANG Yong. Fast evaluation of commutation failure risk in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 646-653.
- [63] WANG Feng, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Decreasing the frequency of HVDC commutation failures caused by harmonics[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(2): 215-221.
- [64] FENG X G, LIU J J, LEE F C. Impedance specifications for stable DC distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(2): 151-157.
- [65] YANG J, FLETCHER J E, O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 59(10): 3827-3837.
- [66] WANG H, CAO J, HE Z, et al. Research on overvoltage for XLPE cable in a modular multilevel converter HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 31(2): 683-692.
- [67] 郭天宇. 交直流混联的多能微网多时间尺度实时协同调控方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
GUO Tianyu. Research on multi-time scale real-time coordinated operation and control method of AC/DC hybrid multi-energy microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [68] 李建林, 王剑波, 葛乐, 等. 电化学储能电站群在特高压交直流混联受端电网应用技术研究综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 51-61.
LI Jianlin, WANG Jianbo, GE Le, et al. Review on application technology of electrochemical energy storage power station group in ultra high voltage AC/DC hybrid receiver power grid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 51-61.
- [69] 段洁琼. 储能接入对交直流混联系统稳定性影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
DUAN Jieqiong. Research on influence of energy storage access on stability of AC/DC hybrid system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [70] 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.
- [71] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 台风灾害下基于 V2G 的城市配电网弹性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 130-139.

- YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Chaohong, et al. Vehicle-to-grid based resilience promotion strategy for urban distribution network under[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(12): 130-139.
- [72] 王钰山, 邓晖, 王旭, 等. 考虑台风时空演变的配电网移动储能优化配置与运行策略[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(9): 42-51.
- YU Yushan, DENG Hui, WANG Xu, et al. Optimal configuration and operation strategy of mobile energy storage in distribution network considering spatial-temporal evolution of typhoon[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(9): 42-51.
- [73] ALGUACIL N, DELGADILLO A, ARROYO J M. A trilevel programming approach for electric grid defense planning[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 41: 282-290.
- [74] THORIN E, BRAND H, WEBER C. Long-term optimization of cogeneration systems in a competitive market environment[J]. *Applied Energy*, 2005, 81(2): 152-169.
- [75] ZHOU Y, HU W, MIN Y, et al. Integrated power and heat dispatch considering available reserve of combined heat and power units[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 10(3): 1300-1310.
- [76] POZO D, CONTRERAS J, SAUMA E E. Unit commitment with ideal and generic energy storage units[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(6): 2974-2984.
- [77] 吴巨爱, 薛禹胜, 谢东亮, 等. 电动汽车参与运行备用的能力评估及其仿真分析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(13): 101-107.
- WU Juai, XUE Yusheng, XIE Dongliang, et al. Evaluation and simulation analysis of reserve capability for electric vehicles[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(13): 101-107.
- [78] 吴巨爱, 薛禹胜, 谢东亮. 电动汽车聚合商对备用服务能力的优化[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(9): 75-81.
- WU Juai, XUE Yusheng, XIE Dongliang. Optimization of reserve service capability made by electric vehicle aggregator[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(9): 75-81.
- [79] 王蓓蓓, 仇知, 丛小涵, 等. 基于两阶段随机优化建模的新能源电网灵活性资源边际成本构成的机理分析[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(4): 1348-1359.
- WANG Beibei, QIU Zhi, CONG Xiaohan, et al. Mechanism analysis of flexible resources' marginal price in new energy grid based on two-stage stochastic optimization modeling[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(4): 1348-1359.
- [80] QIN M, CHAN K W, CHUNG C Y, et al. Optimal planning and operation of energy storage systems in radial networks for wind power integration with reserve support[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10(8): 2019-2025.
- [81] LIU F, CHEN C, LIN C, et al. Utilizing aggregated distributed renewable energy sources with control coordination for resilient distribution system restoration[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(2): 1043-1056.
- [82] TANG Z, LIU Y, WU L, et al. Reserve model of energy storage in day-ahead joint energy and reserve markets: a stochastic UC solution[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 12(1): 372-382.
- [83] 杨瑞琳, 李可然, 刘俊勇, 等. 考虑储能参与备用配置的园区综合能源系统日前经济调度模型[J]. *电力建设*, 2022, 43(12): 103-111.
- YANG Ruilin, LI Keran, LIU Junyong, et al. Day-ahead economic dispatch model of park integrated energy system considering reserve allocation of energy storage[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(12): 103-111.
- [84] MANSOURLAKOURAJ M, NIAZ H, LIU J J, et al. Optimal risk-constrained stochastic scheduling of microgrids with hydrogen vehicles in real-time and day-ahead markets[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 318: 128452.
- [85] TOUBEAU J F, BOTTIEAU J, DE GRÈVE Z, et al. Data-driven scheduling of energy storage in day-ahead energy and reserve markets with probabilistic guarantees on real-time delivery[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 36(4): 2815-2828.
- [86] ZHANG Q, WANG Z, MA S, et al. Stochastic pre-event preparation for enhancing resilience of distribution systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 152: 111636.
- [87] ARTEAGA J, ZAREIPOUR H, AMJADY N. Energy storage as a service: optimal pricing for transmission congestion relief[J]. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 2020, 7: 514-523.
- [88] AKHAVAN-HEJAZI H, MOHSENIAN-RAD H. Optimal operation of independent storage systems in energy and reserve markets with high wind penetration[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(2): 1088-1097.
- [89] 李建林, 袁晓冬, 郁正纲, 等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(8): 15-24.
- LI Jianlin, YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, et al. Comments on power quality enhancement research for power grid by energy storage system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(8): 15-24.
- [90] ELLIOTT R T, FERNÁNDEZ-BLANCO R, KOZDRAS K, et al. Sharing energy storage between transmission

and distribution[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 152-162.

[91] 时帅, 吴慧娴, 黄冬梅, 等. 考虑复杂海洋气候条件影响的海上风电场储能容量配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 172-179.
SHI Shuai, WU Huixian, HUANG Dongmei, et al. Energy storage capacity configuration of an offshore wind farm considering the influence of complex ocean climate conditions[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 172-179.

[92] 赵乙潼, 王慧芳, 何奔腾, 等. 面向用户侧的电池储能配置与运行优化策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(6): 121-128.
ZHAO Yitong, WANG Huifang, HE Benteng, et al. Optimization strategy of configuration and operation for user-side battery energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6):121-128.

[93] LIU K, CHEN Q, KANG C, et al. Optimal operation strategy for distributed battery aggregator providing energy and ancillary services[J]. Journal of Modern Power System and Clean Energy, 2018, 6(4): 722-732.

[94] 李国庆, 闫克非, 范高锋, 等. 储能参与现货电能量-调频辅助服务市场的交易决策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 45-54.
LI Guoqing, YAN Kefei, FAN Gaofeng, et al. Transaction decision-making of energy storage stations participating in the spot energy and frequency modulation ancillary service market[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 45-54.

[95] SOUVIK R, ANUJ B, KUMAR S N, et al. Simultaneous optimization of renewable energy based pumped storage scheme in energy and ancillary services market under deregulated power sector[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2018, 35(5): 5033-5043.

[96] 刘佳婕, 贾燕冰, 陈浩, 等. 考虑实时调频需求的辅助服务市场机制及调度策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1269-1278.
LIU Jiajie, JIA Yanbing, CHEN Hao, et al. Research on market mechanism and scheduling strategy of ancillary services considering real-time frequency regulation requirements[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1269-1278.

[97] HEREDIA F J, CUADRADO M D, CORCHERO C. On optimal participation in the electricity markets of wind power plants with battery energy storage systems[J]. Computers & Operations Research, 2018, 96: 316-329.

[98] ZEJNEBA T, REINHARD H, AMELA A, et al. Economics of electric energy storage, the case of Western Balkans[J]. Energy, 2022, 238.

[99] 张巍, 缪辉. 基于云储能租赁服务的风储参与能量-调频市场竞价策略研究[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3840-3852.
ZHANG Wei, MIAO Hui. Bidding strategies of wind power and energy storage participating in energy and frequency regulation market based on cloud energy storage leasing services[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3840-3852.

[100] ALDIK A, AL-AWAMI A T, SORTOMME E, et al. A planning model for electric vehicle aggregators providing ancillary services[J]. IEEE Access, 2018, 6: 70685-70697.

[101] 毛庆汉. 储能联合火电机组参与调频辅助服务市场的工程应用[J]. 电气技术, 2021, 22(7): 103-108.
MAO Qinghan. Engineering application of battery energy storage system coordinated with thermal power unit in regulating ancillary service market[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(7): 103-108.

[102] 薛晨, 任景, 马晓伟, 等. 面向高比例新能源消纳的西北调峰辅助服务市场机制及实践[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 19-28.
XUE Chen, REN Jing, MA Xiaowei, et al. Mechanism of peak regulation auxiliary electricity market in the presence of high-penetration renewable energy and its practice in northwest China[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 19-28.

[103] 裴善鹏, 林华, 王炎, 等. 电力现货市场背景下的山东新能源储能应用模式研究[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 30-38.
PEI Shanpeng, LIN Hua, WANG Yan, et al. Study on application mode of new energy storage in Shandong under the background of power spot market[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 30-38.

收稿日期: 2023-01-05; 修回日期: 2023-07-18

作者简介:

余鹏飞(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为储能参与的安全规划、电力系统调度与电力市场; E-mail: ypf883@hotmail.com

朱继忠(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为综合智慧能源系统优化运行与控制; E-mail: zhujz@scut.edu.cn

熊小伏(1962—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、智能电网与智能变电站技术、新能源并网故障分析、电网风险评估与气象灾害预警、储能应用。E-mail: cqquxf@vip.sina.com

(编辑 张颖)