

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250289

# 电池储能系统在电网主动支撑中的应用研究综述

默天啸<sup>1</sup>, 刘俊<sup>1</sup>, 巨胜<sup>1</sup>, 王薇<sup>2</sup>

(1. 陕西省智能电网重点实验室, 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 内蒙古电力勘测设计院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** 新能源发电的波动性与随机性易引发电网频率/电压波动, 且其机组缺乏系统惯性与主动支撑能力, 严重制约高比例新能源电网的稳定运行。储能系统凭借快速响应与灵活调控特性, 可有效提升新能源消纳能力并增强电网主动支撑性能。聚焦电池储能系统的电网支撑应用, 系统解析其技术特性与功能定位, 通过模拟同步机核心参数(有功/无功功率、惯量、阻尼), 从调频调峰、电压调节、惯量支撑、阻尼补偿等维度全面综述电池储能系统的电网主动支撑策略。针对现有研究在多元储能协调控制、动态协同控制及经济性安全性等方面存在的不足, 给出了涵盖理论创新、技术升级与市场机制创新的解决方案, 为电池储能支撑电力系统提供理论依据与技术路径。

**关键词:** 电池储能系统; 新能源发电; 电网主动支撑; 控制策略; 同步机参数

## Review on the applications of battery energy storage systems in active grid support

MO Tianxiao<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>1</sup>, JU Sheng<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Inner Mongolia Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd., Hohhot 010010, China)

**Abstract:** Renewable energy generation exhibits inherent volatility and randomness, which can easily lead to frequency/voltage fluctuations in power systems. Moreover, the lack of inherent inertia and active grid-support capabilities in renewable units poses significant challenges to grid stability under high renewable penetration. Owing to their rapid response and flexible control characteristics, energy storage systems can effectively enhance renewable energy accommodation and strengthen the active support capability of power grids. Focusing on grid-support applications of battery energy storage systems (BESSs), this paper systematically analyzes their technical features and functional roles. By emulating key parameters of synchronous generators (active/reactive power, inertia, and damping), a comprehensive overview of active grid support strategies enabled by BESSs is presented from the perspectives of frequency regulation and peaking shaving, voltage regulation, inertia support, and damping compensation. Aiming at the deficiencies in existing research regarding multi-type energy storage coordinated control, dynamic synergistic control, and economic and safety considerations, potential solutions encompassing theoretical innovation, technological advancement, and market mechanism innovation are proposed. It provides a theoretical foundation and technological pathways for BESSs in supporting power systems.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFB2408400).

**Key words:** battery energy storage system; renewable energy generation; active grid support; control strategy; synchronous generator parameters

## 0 引言

现代电力系统对电网的调频调峰需求日益增加, 伴随着“碳达峰”与“碳中和”目标<sup>[1]</sup>的提出, 老旧火电机组因减碳的要求逐步关停, 导致传统调峰调频的水电火电资源逐渐短缺。与此同时, 新型

电力系统的持续发展促使风电及光伏等新能源并网装机容量显著增加。然而, 由于风光资源具有显著的不确定性与间歇性, 且风电与光电通常通过电力电子装置接入电网, 其无法为电力系统提供传统同步发电机所具备的惯性响应, 从而导致电力系统的频率调节能力面临严峻挑战, 亟需通过技术创新与系统优化加以解决。

近年来, 储能技术得到了较大的发展。储能具

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2024YFB2408400)

有响应速度快、控制灵活以及精度高等优势。将储能接入电网, 不仅能够有效平抑新能源发电的波动性, 还能够主动支撑电网, 提供调频、调峰和调压等服务, 在电网惯量支撑和阻尼支撑等方面也展现出显著的应用潜力。因此, 储能并网被视为提升电力系统对新能源消纳能力及增强系统稳定性的一种创新性技术路径。国内外均已制定相关的储能政策以推进储能在电力系统中的应用, 并已建立了储能支撑电网的应用项目。我国于 2022 年发布新型储能总体装机规划; 美国发布《2021—2035 年锂电池国家蓝图》; 德国 2022 年年度宪法免除了与用户储能系统有关的税收; 英国制定《智能灵活资源发展战略》, 以促进储能产业的发展<sup>[2]</sup>; 欧盟通过制定《电池 2030+ 计划》, 提出了 2030 年电池产业链完全脱碳, 降低全生命周期碳足迹的战略目标, 重点资助固态电池研发、电池护照系统和锂回收技术等研究领域。根据美国能源部全球储能数据库, 列出了近年来国内外利用储能支撑电网的典型项目实例, 如表 1 所示。其中各项目均具有多种调节功能, 表中列举的应用场景仅用于表明储能电站可从多种角度支撑电力系统。此外, 关于新兴的液体空气储能及氢-电池混合储能系统, 亦有实际工程应用案例: 中国张家口示范项目利用液态空气储能, 配套北京冬奥会可再生能源电网, 2022 年投运 10 MW/50 MWh, 将风光新能源出力波动降低 40%; 德国 Enertrag Uckermark 项目, 基于氢-电池混合储能系统, 配置 30 MW 风电、10 MW 电解槽、20 MWh 锂电池的混合储能系统, 实现小时级绿氢调度与秒级调频协同。

表 1 储能电站支撑电网应用案例

国家	项目	投运时间	应用场景
中国	福建晋江储能电站试点项目	2020.01	调频、调峰
澳大利亚	Hornsedale 电池储能电站	2017.01	调压
美国	得克萨斯州电池储能系统	2020.12	惯量支撑
德国	Schwerin 电池储能项目	2014.09	阻尼支撑

目前, 国内外已开展了大量针对储能支撑电网的相关研究。文献[3]详细论述了储能系统在电网运行、电力市场、稳定和控制等领域的新模型和应用。文献[4-5]以电池储能为例, 梳理了其建模过程、系统管理模式以及并网应用。文献[6]从技术和经济角度阐述了电力系统大规模应用储能技术所面临的挑战。文献[7]从投资决策、市场策略、市场价格、市场模式和供应安全等方面, 总结了储能对电力市场的影响。文献[8]通过探讨储能系统的发展、技术特点以及相关应用, 介绍了传统储能技术以及新型储能技术的不同以及储能技术的发展趋势。文献[9]论

述了电池储能系统在电力系统调峰调频等方面的应用, 并比较了电池储能系统与其他储能系统的经济性。文献[10]从储能系统在中美两国电力系统中的应用实例出发, 在能源管理、频率调节、削峰填谷和电压调节等方面阐述了储能系统发挥的作用, 表明储能系统将成为新型电力系统的重要组成部分。文献[11-12]总结了各种时间尺度的储能技术, 分析了储能系统在新能源发电高度渗透的电力系统中的作用, 为储能容量配置提供了指导。文献[13]提出一种基于储能电池的调频策略, 提供了储能系统在支撑电网调频方面的控制方案及经验。文献[14]建立了压缩超临界二氧化碳储能模型, 此模型涵盖热力学和动力学理论, 为二氧化碳储能支撑电网服务提供了模型基础。文献[15]从削峰填谷和频率调节的角度出发, 针对电力系统不同运行工况, 设计出一种利用储能对电力系统进行调峰调频的方法。因此, 将储能接入电网、为电网提供调频调压等服务在原理上可行, 且技术上已较为成熟。

目前较为常用的储能技术主要包括机械储能、电池储能和热能储能等。其中电池储能系统(battery energy storage system, BESS)已得到较为成熟的应用, 且较为经济。BESS 支撑电网的应用较为广泛, 包括但不限于频率调节、电压调节、削峰填谷、惯量支撑及阻尼支撑等<sup>[16]</sup>, 因此本文基于 BESS 论述储能支撑电网的相关应用。首先介绍 BESS 的概念、结构、支撑电网的可行性和经济性; 其次, 基于动态响应特性, 分别从支撑电网频率调节、电压调节等方面, 深入剖析 BESS 主动支撑电网的机理与控制策略; 最后, 围绕 BESS 主动支撑新型电力系统面临的挑战及困难进行论述, 并针对性地给出了应对措施。

## 1 电网级 BESS 概念及支撑电网可行性分析

根据美国国家可再生能源实验室的定义, 电网级的 BESS 是一种电化学装置, 可从电网或者发电厂充电并存储起来, 在需要时放电以提供电力或其他电网服务。BESS 主要由 3 部分组成, 如图 1 所示。其中温度控制模块通过向电池模块吹入冷空气或热空气, 从而控制储能电池的温度, 保证电池储能系统正常运行; 电池储能模块由电池单元组成的电池模块构成, 是 BESS 的主体; 变流器模块用于联系直流侧的电池储能模块与交流侧的电力系统。目前已有多种储能电池技术在电网中得到实际应用, 主要包括锂离子电池、铅酸电池、钠硫电池及液流电池等<sup>[17]</sup>。根据美国全球储能数据库相关资料, 目前国内外应用电网级的电池储能项目实例中,

不同电池类型所占比重及技术参数如表 2 所示<sup>[18]</sup>。

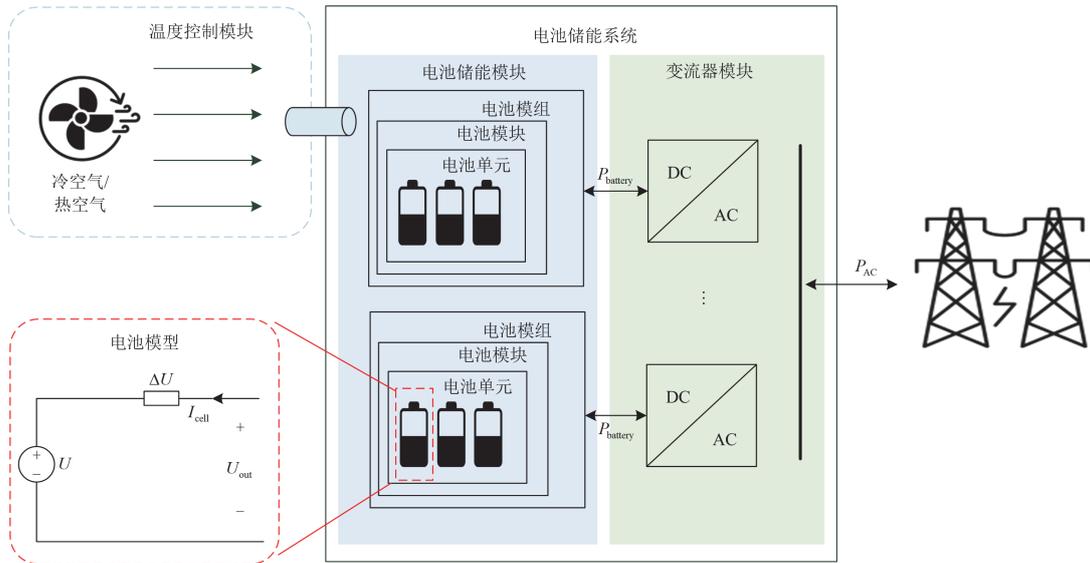


图 1 电池储能系统结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of battery energy storage system

表 2 不同储能电池技术参数

Table 2 Technical parameters of different energy storage batteries

电池类型	功率等级	响应时间	持续工作时间	转换效率/%	运行寿命/次	占比/%
锂电池	1~10 MW	秒级	1~10 min(一次调频), 30 min~4 h(二次调频), 4~8 h(调峰)	90~98	1000~10 000	97.09
铅酸电池	0~20 MW		1~5 min(一次调频), 10 min~1 h(二次调频), 1~3 h(调峰)	63~80	500~1000	1.64
钠硫电池	1 kW~10 MW		1~15 min(一次调频), 1~6 h(二次调频), 4~12 h(调峰)	75~90	4500	0.01
液流电池	1~10 MW		1~5 min(一次调频), 5 min~2 h(二次调频), 4~24 h(调峰)	65~85	12 000	0.69

BESS 的技术参数主要包括：功率等级、响应时间、持续时间、转换效率和运行寿命等。前述电网级电池储能项目实例已从实际应用层面证明电池储能主动支撑电网的可行性。在经济层面上，BESS 亦展现出显著潜力。文献[19]从阻塞成本及低储高发套利的角度出发，以钒液流电池为例，构建收益模型，论证了电池储能的经济性。文献[20]提出一种储能电站配置与运营协同优化的策略，在保证一次调频容量的前提下，将储能电站纳入电力市场，提高了储能的经济性。文献[21]从环境效益和经济效益两个方面评估二次利用电池系统，与报废处理相比，使用二次利用电池配置储能系统具有更高的环境效益，且当二次利用的 BESS 的单位容量成本低于传统 BESS 的 63.99%时，前者具有更高的经济性。文献[22]通过评估 BESS、氢储能系统和混合储能系统并网，并基于近 20 年的电价、二氧化碳储能税收以及氢储成本数据，最终案例分析表明 BESS 最具竞争力和经济性。文献[23]采用线性规划算法，将锂离子电池的工作特性、成本以及收益纳入考虑范围，证明了利用锂电池储能套利的可行性。

从技术层面出发，BESS 具有较快的响应速度，且具有良好的功率调节能力，因而在调频调压方面表现良好。在调频方面，传统火电机组响应速度慢、爬坡速率低，难以满足现代电力系统快速精准的调频要求，对于 20 MW 的调频任务，大型电池储能电站和火电机组的反应时间分别为秒级和分钟级<sup>[24-26]</sup>。在调压方面，储能发出/吸收无功功率仅占用逆变器容量，荷电状态(state of charge, SOC)不会受到影响<sup>[27-28]</sup>。为防止篇幅冗余，电池储能支撑电网的相关技术性研究及进展将在后续章节具体论述。

综上所述，电池储能支撑电网在经济性和技术性等方面均具有较大的应用价值。通过制定合理的储能配置策略以及出力策略，BESS 可在有功功率、无功功率、惯量支撑和阻尼支撑等方面支撑电网，对提升电力系统调节能力和电力系统弹性、保障电力系统安全可靠运行具有重要应用价值。

## 2 电池储能系统支撑电网有功功率

在新能源发电大规模并网的背景下，发挥 BESS 支撑电网<sup>[29-32]</sup>的作用，是提升电能质量、保

障电力系统安全稳定运行、消纳大规模新能源出力的重要技术途经。本节基于 BESS 主动支撑电网有功功率, 按照时间尺度划分, 从调频调峰两个方面的应用进行详细论述。

### 2.1 电池储能参与电力系统调频

2016 年国家能源局颁发《关于促进电储能参与“三北”地区电力辅助服务补偿(市场)机制试点工作的通知》, 表明对源荷两侧储能设备参与电网调频服务的支持<sup>[33]</sup>。美国于 2011 年将 BESS 的调频补偿机制调整为考虑调频性能的两步制补偿, 促进了美国储能市场的发展<sup>[34]</sup>。基于以上政策支持, 电池储能电站参与电力系统调频已有较多案例, 具体如表 3 所示。以澳大利亚 Hornsdale 电池储能调频项目为例, 表 4 展示了 BESS 参与调频前后系统频率波动的具体数据与调频效果量化指标, 其数据结果表明, BESS 参与系统调频能够有效改善系统频率偏差问题。图 2 表明了储能出力与频率偏差的动态耦合关系: 系统受到负荷扰动产生频率偏差, 通过系统调频死区环节和控制策略, 给出调整 BESS 出力的指令, 最后经过限幅环节, 实现支撑电力系统调频的功能。其中:  $\Delta P_L(s)$ 、 $\Delta P_b(s)$  分别为系统负荷变化量和 BESS 出力变化;  $\Delta f(s)$  为系统频率变化;  $H$  为系统惯性时间常数;  $D$  为系统阻尼常数;  $A_b(s)$  为 BESS 的传递函数;  $T_b$  为 BESS 的响应时间常数。

表 3 电池储能系统参与电网调频案例

Table 3 Examples of battery energy storage system participating in grid frequency regulation

国家	项目	电池类型	规模
中国	浙江绿能宝电池调频项目	磷酸铁锂电池	20 MW/20 MWh
美国	马萨诸塞州电池储能电站	锂离子电池	15 MW/32 MWh
英国	National Grid EFR 项目	锂离子电池	50 MW
日本	九州电力公司电池储能项目	锂离子电池	30 MW/60 MWh
韩国	Samchully 电池储能电站	锂离子电池	50 MW/150 MWh

表 4 储能项目参与调频效果量化数据

Table 4 Quantitative data on the effect of participation of energy storage projects in frequency regulation

指标	储能参与调频前	储能参与调频后	改进幅度/%
日均频率偏差 >0.2 Hz 时长	143 min	29 min	80
最大频率偏差	0.52 Hz	0.18 Hz	65
调频响应时间	45 s	210 ms	99.5

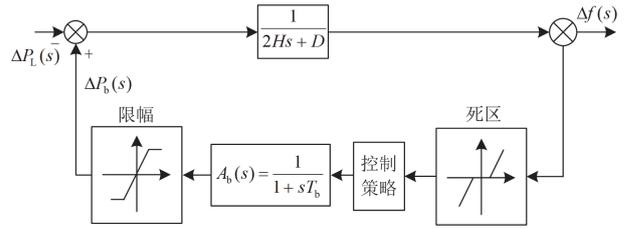


图 2 储能出力与频率偏差的动态耦合关系

Fig. 2 Dynamic coupling between energy storage output and frequency deviation

储能参与电力系统调频分为一次调频和二次调频两种方式。储能参与电力系统一次调频的机制为: 若机组一次调频后, 系统频率偏差未恢复至调频死区, 则 BESS 出力抬升电网有功功率, 使频率偏差恢复至调频死区内<sup>[35]</sup>; 若频率偏差位于调频死区内, 则储能不参与调频。储能参与一次调频原理如图 3 所示。其中:  $G$  表示发电机组有功功率-频率特性曲线;  $L_1$ 、 $L_2$  分别表示负荷变化前后的频率特性曲线;  $\Delta f_{12}$  为调频死区;  $a$  点为系统初始运行点;  $b$  点为调频后的新平衡点;  $\Delta f_0$  为频差;  $\Delta P$  为储能出力;  $c$  点为储能参与调频后的平衡点。

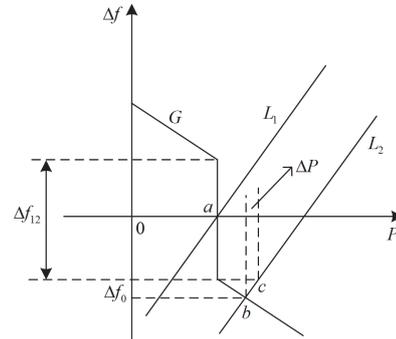


图 3 储能参与一次调频原理图

Fig. 3 Schematic diagram of primary frequency regulation with energy storage participation

储能参与电网二次调频的原理为: 机组二次调频的同时向储能下发指令, 储能接收指令后迅速出力, 从而抬升电网有功功率, 使得电网的频率偏差恢复到 0, 即达到平衡点  $d$ 。储能参与二次调频原理如图 4 所示。其中:  $G_1$ 、 $G_2$  为机组有功-频率特性曲线;  $\Delta P_1$ 、 $\Delta P_2$  分别表示 AGC 下发二次调频后机组出力以及电池储能出力。

近年来, 有关 BESS 参与电网调频的控制策略及容量配置主要根据电网一次调频和二次调频来划分。文献[36]定义频率变化加速度, 控制 BESS 的出力系数, 提高其自适应能力, 进而改善储能参与一次调频的性能。文献[37]提出一种基于动态下垂

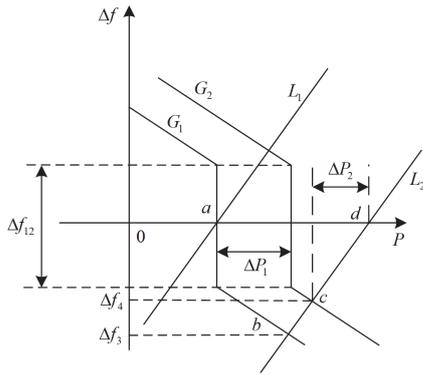


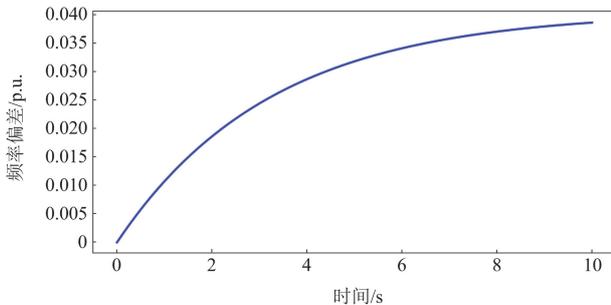
图 4 储能参与二次调频原理图

Fig. 4 Schematic diagram of secondary frequency regulation with energy storage participation

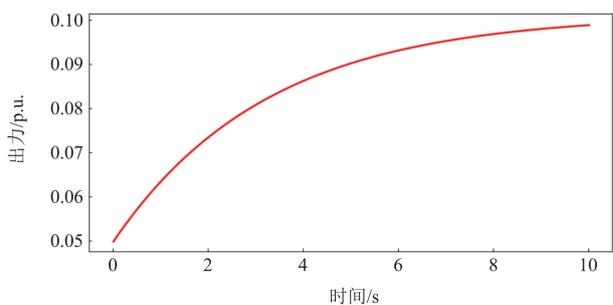
系数与动态 SOC 基点的储能一次调频控制策略。文献[38]考虑电网在不同频率区间的调频要求，综合虚拟下垂与虚拟惯性两种控制策略的优势，结合电池储能自身的容量限制，提出了一种基于虚拟负惯性的控制策略。文献[39]将储能变流器等效为带励磁及调速系统的同步电机，在整定电池储能调差系数的基础上，挖掘储能电池参与电网一次调频的特性，基于同步电机三阶模型，提出了一种 BESS 参与一次调频的控制策略。文献[40]通过挖掘电网动态特性以及 BESS 的频率响应特性，优化储能系统快速频率响应的容量配置，为多个 BESS 同时支撑电网一次调频提供了参考。文献[41]基于模型预测，设计了一种风机出力和储能电池出力共同参与一次调频的控制框架。文献[42]利用锁相环，结合电网频率偏差及差分信号，设计出一种具有良好动态支撑性能的控制策略。文献[43]建立了一种可提供阻尼、增强电网惯性的 BESS，从而降低电网的频率偏差。为了得到更好的调频效果，亦有相关文献结合惯性响应与下垂响应，挖掘其与电网频率响应特性的关系，形成一次调频的混合控制策略<sup>[44-45]</sup>，此类策略能够进一步发挥电池储能响应速度快的优势。

关于 BESS 支撑电力系统二次调频的研究也可分为两个方向<sup>[46]</sup>：一方面是 BESS 参与二次调频的经济性评估；另一方面是 BESS 参与二次调频的控制策略研究。文献[47]在复频域中分析电池储能参与二次调频的频率特性，在此基础上建立系统调节模型，生成考虑动作时机与动作深度的 BESS 控制策略。通过提出一种区域-群组-电池的三层控制架构模型，文献[48]建立了一种基于改进的动态调频容量的储能电池组的协同控制策略，不仅改善了电池 SOC 的一致性，还显著提高了二次调频的精度。文献[49-53]基于二次规划，将调频任务分发给传统机组与 BESS，提高了电网二次调频的经济性。文献[54]考虑到传统机组承担调频任务需频繁改变出力，易对机组产生磨损与老化，采用滤波的方法将频率调节信号中的高频分量交付储能电池承担，减轻了传统机组的调频压力，具备一定的经济性。文献[55]通过评估储能电池的充放电状态，利用序贯蒙特卡洛模拟法评估二次调频性能，结果表明电池储能可较大地提升调频机组的二次调频能力。

负荷扰动下，BESS 参与电力系统调频主要分为阶跃扰动和连续波动的负荷扰动两种类型。在阶跃负荷扰动下的 BESS 支撑系统调频的响应过程为：初始阶段，惯性环节占据主导，系统快速注入功率，达到稳态阶段后，主要受比例环节控制，维持储能出力平衡。在连续波动的负荷扰动下的 BESS 支撑系统调频的响应过程为：通过动态调整充放电状态，BESS 实时跟踪负荷的连续变化，并对其进行有效补偿，从而实现负荷波动的平抑。理想情况下，两种负荷扰动下的频率响应和储能出力如图 5 所示。其中图 5(a)、图 5(b)为阶跃负荷扰动下的频率响应和储能响应；图 5(c)、图 5(d)为连续负荷扰动下的频率响应和储能响应。电气参数设置为：系统惯性时间常数为 8.0 s，阻尼系数为 1.2 p.u./Hz，比例控制增益为 2.5 p.u./Hz，阶跃负荷幅度为 0.15 p.u.，连续波动负荷设置为正弦波，幅度为 0.1 p.u.，波动频率为 0.2 Hz。



(a) 阶跃负荷扰动的系统频率响应



(b) 阶跃负荷扰动的电池储能系统响应

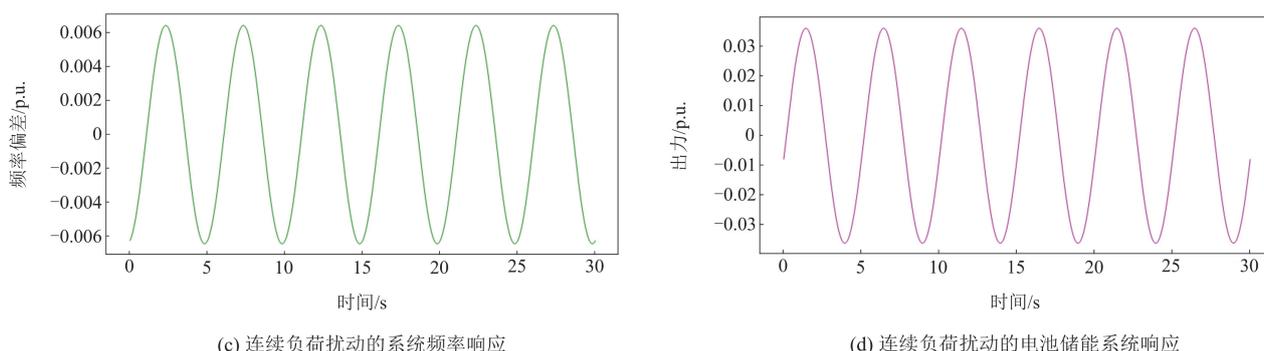


图 5 不同扰动场景下系统频率变化和电池储能系统响应

Fig. 5 System frequency variation and battery energy storage system response in different scenarios

关于参与电力系统调频的电池储能配置研究, 可从分析电力系统频率偏差出发, 明确频率变化率对电力系统的影响, 建立包含频率偏差、频率变化率等参数的数学模型, 提出面向调频需求的电池储能容量配置方法。基于上述研究路线, BESS 参与电网调频的配置方案研究按如下思路展开: 首先, 基于下垂控制等理论建立储能参与一次调频的等效数学模型, 引入 PID 控制器构建其二次调频的动态响应环节, 以此为基础计算储能的<sub>最大调频备用容量及其可支撑调频的能量上限。在此基础上, 建立综合考虑多种电源特性的系统频率响应模型, 最终以提升调频效果和储能配置经济性为目标, 根据规划目标与规划场景, 选用合适的规划方法, 如表 5 所示。</sub>

表 5 不同调频场景选用的储能规划算法

Table 5 Energy storage programming algorithms for different FM scenarios

场景特点	推荐方法
短期规划	MILP
场景复杂, 风光出力不确定	两阶段随机规划 + L-shape 方法
极端风险防控	鲁棒优化
实时调频与自适应控制	强化学习

对于包含电池储能在内的多元储能系统参与调频的容量规划方案, 可按照如下技术路线展开: 利用区域风光及负荷历史数据, 生成新能源出力 and 负荷典型场景; 结合电力系统频率变化, 利用傅里叶分解、小波变换等方式将系统频率变化划分为不同时间尺度, 分别利用小时级电池储能、秒级飞轮储能和长时熔融盐储热等不同储能方式, 基于强化学习、混合线性整数规划等算法, 规划储能容量配置。

总的来说, 目前已开展了较多 BESS 参与电力系统一、二次频率调节的研究, 但一次调频与二次调频的储能容量规划以及控制策略还相对分立, 缺

乏整体上的研究。同时考虑电网一次调频和二次调频需求, 配置储能容量, 提出整体控制策略, 是未来电池储能参与电网频率调节的重要方向。根据电池容量、充放功率、SOC 以及电池寿命优化储能参与调频的时机及深度是 BESS 参与调频的难点。

## 2.2 电池储能参与电力系统调峰

随着电池储能系统技术的不断发展, 其经济性显著提升, 已逐步具备替代传统调峰机组的能力。相较于其他储能, BESS 在响应速度和建设成本等方面展现出显著优势, 使其在电力系统调峰领域具有重要应用价值。抽水蓄能在低频场景的平准化度电成本较低, 但其初始投资高、建设周期长, 难以适应风光电站投产节奏, 在新能源渗透率较高的省份竞争性弱; 压缩空气储能的平准化度电成本相对于电池储能和抽水蓄能都较高, 约为 0.41 元/kWh, 且效率较低。BESS 参与电力系统调峰能够有效改善电力系统日负荷特性, 大大提高发电设备的利用率, 提升电力系统的运行效率。建立大规模 BESS, 在负荷低谷时吸收电能, 在负荷高峰时释放电能, 可将发用电解耦, 提高供电可靠性。

目前有关电池储能参与电力系统调峰的研究主要可分为两类: 其一, 聚焦于电池储能调峰策略的研究, 包括独立调峰策略及与其他发电装置联合调峰策略, 其技术路线如图 6 所示; 其二, 致力于优化 BESS 容量配置, 通过低储高发实现套利, 以提升 BESS 的经济性与利用率。两类研究分别从技术策略与容量优化角度出发, 为 BESS 参与调峰中的应用提供了理论支撑与实践指导。

在电池储能联合调峰方面, 文献[56]分析了电池储能与核电联合运行调峰的经济可行性, 与其他方式相比, 电池储能的初始投资更低, 收益更高。文献[57]使用 big-M 方法线性化 BESS 的容量配置问题, 将其归结为混合整数线性规划问题。文献[58]

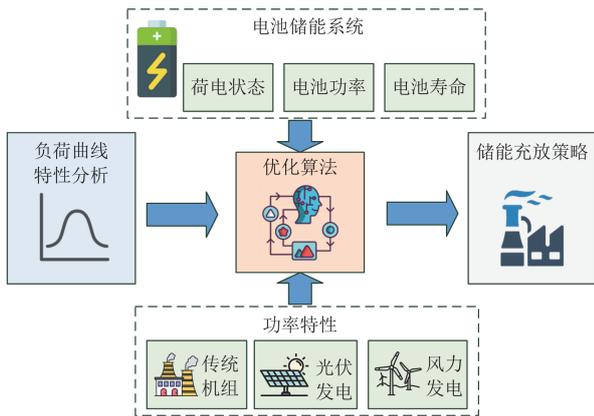


图 6 电池储能与其他发电装置联合调峰

Fig. 6 Battery energy storage combined with other power generation units for peak shifting

基于决策树算法设计了一种 BESS，为孤岛微网提供了削峰填谷策略，与传统调峰方法相比，此策略可有效缓解高峰负荷需求，且不受发电机组调度的影响。文献[59]提出了一种光伏发电和 BESS 的联合调峰算法，通过优化 BESS 和光伏发电机组出力，缓解了光伏-BESS 的可用功率问题，且较大地降低了运行成本。文献[60]提出一种簇切换的功率分配策略，用于改善集群层面的不平衡荷电状态，从而解决电池能量损耗问题，提高储能电池运行效率。文献[61]挖掘风电、光伏的负调峰特性与电网调峰的联系，构造了基于多尺度信号分解理论的 BESS 与火电机组协调调峰控制策略，充分发挥其调节能力快的优势。

另外，针对储能调峰套利，文献[62]根据时间尺度，将月级的联合优化问题分解为秒级的实时调节响应、小时级调节容量配置以及每日电池电量基线决策 3 个子问题，采用动态编码策略整合 3 个子问题，制定调峰套利策略。文献[63]兼顾电池功率、SOC 以及温度的影响，利用二进制计数法以及 union-jack 三角剖分法，将电热退化模型纳入套利收益优化框架，显著提高了系统盈利能力。

然而，上述研究未系统对比分时电价与实时电价机制对套利收益的影响。分时电价与实时电价机制的特点为：分时电价的价格按照峰谷进行划分，电价长期稳定，而实时电价动态变化；分时电价策略复杂度较实时电价低；分时电价的收益来源为固定峰谷价差，实时电价则通过捕捉实时价格波动进行套利。文献[64]基于分时电价机制，以运维成本、火电机组调峰成本和弃风成本最低为目标函数，构建了峰谷分时电价优化模型，提供了分时电价下储能参与调峰套利的相关研究思路。在实时电价机制

下，利用预测算法预测电价实时波动情况，是提高电池储能参与调峰套利收益的有效方法。将储能电池充放电效率、循环寿命成本等核心敏感性参数纳入敏感性分析，也是 BESS 参与调峰进行套利的重要研究方向。

尽管已有较多关于 BESS 套利以及联合调峰策略的研究，但一般只考虑经济性或可靠性等单一指标，如何统揽电池储能调峰经济性及可靠性等指标、如何根据负荷特性针对性地对储能以及传统机组下达调峰策略将是后续研究工作的重点，考虑分时电价和实时电价等不同市场机制对套利收益的影响也将成为后续研究的热点。

### 3 电池储能系统支撑电网无功功率

BESS 在电网稳态与暂态调压中展现出显著的应用价值。稳态运行时，BESS 可通过快速充放电特性有效调节电网电压水平，维持系统电压稳定性；暂态过程中，其毫秒级响应能力能够迅速抑制电压波动，提升电网的动态稳定性与可靠性。储能发出或吸收无功功率仅占用逆变器容量，不影响储能电池的 SOC。系统无功缺额较大而产生电压波动时，储能电池可参与电网的电压调节，改善电压质量。目前关于储能参与电网电压调节的研究主要分为储能参与电网稳态调压以及利用电池储能提升电网暂态电压稳定性两方面。

传统的稳态调压手段主要包括两种技术路径：其一，调节有载调压变压器的变比分接头以改变电压幅值；其二，采用投切并联电容器进行无功功率补偿，从而调节系统电压水平。第一种方式动态响应能力差，且频繁调节分接头易降低变压器寿命；投切并联电容器易产生弧光，运行噪声较大，易损坏补偿电容器及接触器。两种调压手段均难以实现连续调压，调节精度低，在高比例新能源电网中适用性较差。文献[65]基于 BESS，改善了光电高峰的压升及负荷高峰的压降问题。文献[66]利用在线凸优化方法，开发了一种基于代理的控制方案，BESS 可自适应跟踪电压设定值。文献[67]将 BESS 等储能系统集成到配电网中，基于前后端通信，实现步进电压调节。

直流馈入的受端电网，在区域常规机组出力不足、外受电占比较大的情况下，容易出现电压稳定性问题。目前利用 BESS 提高电网电压稳定性的研究主要集中在两方面：一是储能系统的配置问题；二是储能系统提升电压稳定性的控制策略研究。对于控制策略的研究，文献[68]应用 STATCOM 和电池储能增强电网电压稳定性，针对多机电力系统开发

了一种基于无源性的控制设计方法——互联及阻尼分配无源控制的设计方法。针对储能系统配置问题, 文献[69]通过确定 BESS 的最佳容量和位置, 提出一种可应用于增强电压稳定性的配置技术。

当前针对 BESS 与传统调压设备协同控制的研究仍存在理论空白, 后续研究重点将集中在突破多元调压资源的动态协同机制与多时间尺度解耦策略、开发适应高比例新能源场景的虚拟同步调压技术上。

#### 4 电池储能系统支撑电力系统惯量

在现代电力系统中, 新能源发电机组逐步取代传统同步发电机, 这一趋势导致电力系统的等效惯性显著降低。由于新能源机组通常通过电力电子装置并网, 缺乏传统同步发电机固有的旋转质量与惯性响应能力, 从而削弱了系统对频率波动的抵御能力, 亟需通过先进的控制策略与储能技术(如 BESS)弥补惯性缺失, 确保系统安全稳定运行。

电力系统惯性指阻碍转子转速变化的能力, 其大小一般用惯量度量。对电力系统中某一台发电机而言, 其惯量通常用额定角速度下的转子动能表示。

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (1)$$

$$J = \int r^2 dm \quad (2)$$

式中:  $E$  为转子动能;  $J$  为转动惯量;  $\omega$  为转子额定角速度;  $r$  为转动半径;  $m$  为转子质量。

惯性时间常数  $H$  可用于度量发电机惯量。惯性时间常数指额定转矩下将发电机转子从静止状态加速到额定转速所需要的时间。

$$H = \frac{E}{S_g} = \frac{J \omega^2}{2 S_g} \quad (3)$$

式中:  $S_g$  为发电机额定容量。

电力系统等效惯性时间常数  $H_{\text{system}}$  可表示为系统中所有开机机组惯性之和, 即

$$H_{\text{system}} = \sum_i^N H_i \quad (4)$$

式中:  $H_i$  为第  $i$  个机组的惯性时间常数。

电网受到干扰后的惯量支撑过程如图 7 所示。传统的惯量支撑为系统受到扰动后, 同步电机的转子释放动能提供惯量支撑, 其惯量支撑能力的强弱取决于机组容量。储能参与电网惯量支撑的方式主要是引入虚拟同步机技术控制变流器, 向系统提供虚拟惯量, 负荷通过频率特性提供惯量支撑<sup>[70-71]</sup>。文献[72]建立了一种负电阻电路模型, 利用并网锂

离子电池支撑系统惯量。文献[73]联合超级电容器与 BESS, 引入虚拟电容的概念, 以提升系统惯性。文献[74]提出一种用于确定惯量支撑的 BESS 容量的方法。文献[75]比较了各种储能系统在惯量支撑方面的适用性, 提出一种可用于确定储能容量配置的优化算法。总体而言, 目前有关 BESS 支撑系统惯量的相关研究, 包括了多种储能系统协同提供惯量支撑, 同时涵盖多种储能系统提供惯量支撑的容量配置问题。



图 7 惯量支持过程

Fig. 7 Inertia support process

#### 5 电池储能系统支撑电力系统阻尼

新能源出力的随机波动性使现代电力系统面临复杂的阻尼与稳定性问题。虽然现有虚拟同步机技术能够通过引入频率或功率偏差比例项来模拟同步发电机阻尼, 但该机制对传感器量测精度及变流器控制带宽较为敏感, 且阻尼系数通常基于经验整定, 难以在多变工况下保证最优阻尼效果。相比之下, 将电池储能深度嵌入电力系统, 利用其快速吞吐特性实现阻尼的自适应调节, 可克服上述缺陷并有效支撑系统阻尼。其工作原理如下所述。

考虑单机无穷大系统的转子运动方程为

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D\omega \quad (5)$$

式中:  $P_m$  为机械功率;  $P_e$  为电磁功率;  $D$  为系统阻尼系数。

考虑储能电池放电, 设电池出力为  $P_b$ , 则有 BESS 参与的单机无穷大系统的转子运动方程为

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - P_b - D\omega \quad (6)$$

电池放电与系统频率有关,即

$$P_b = k\omega \quad (7)$$

式中:  $k$  为正常数,与电池容量有关,则式(6)可改写为

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - (D+k)\omega \quad (8)$$

则系统阻尼可等效为  $D+k$ , 因此证明 BESS 可用于增强电力系统阻尼。目前有关电池储能为电力系统提供阻尼支撑的相关研究相对较少。文献[76]提出了一种基于 BESS 的电力系统阻尼增强方法,用于在电力系统受到扰动后,改善其动态稳定性。文献[77]提出了一种基于储能系统的电力系统稳定器与电力振荡阻尼器的复合控制结构,旨在提升新能源发电占比较高电力系统的稳定性。文献[78]对储能电池输出功率进行建模,给出了 BESS 提供阻尼支撑服务的配置方法和控制器参数设置方法。

## 6 电池储能支撑电网面临的挑战

尽管 BESS 在支撑电网应用方面能够提供调频、调压、惯量支撑和阻尼支撑等多种服务,但在实际应用中仍面临诸多挑战:首先是单一电池储能难以满足电网调频调压等多种服务的要求,需要与其他储能系统联合支撑电网;其次是 BESS 主动支撑电网多种服务的协同问题以及多参数同时协调服务问题。电池储能还存在容量、寿命、成本、安全以及环保等方面的问题。除此之外,如何维持储能电池的正常运行也是电池储能技术正面临的较大挑战。

### 1) 多元储能系统共同支撑电网协调问题

仅依靠 BESS 支撑电网可能存在容量不足等问题,难以支撑电网调频调压要求,无法在电网出现负荷波动或电力缺口时提供有效支撑。采用多元储能接入电网是解决此问题的一种思路,但多元储能系统又引入了共同支撑电网时的协调问题。以调频服务为例,不同储能类型及传统机组的调频方式在响应速度及适用性上存在差异。飞轮储能提供短时高频次的功率支持;电池储能具有快速响应、高精度控制优势,适合提供一次调频和二次调频;传统同步发电机组具有调频范围大的优势,但其响应速度慢。如何协调各种储能和设置调频参数是多元储能参与电网调频面临的主要问题。采用强化学习、分布鲁棒优化等优化算法,将调频任务合理地分配给储能电源,设置合理的目标函数,考虑功率输出限制等约束条件,建立多种调频资源协同优化模型,

是电池储能与其他电源协同参与调频的有效方法。同时,在考虑多元储能的协调问题时,还应量化经济性-可靠性的权衡关系,例如在构建风-光-储-氢多能互补微网时,利用帕累托前沿分析等手段,对各种储能资源的响应速度、可支撑时间、容量成本和调节精度进行量化,统筹规划经济性和可靠性,通过设置成本-风险弹性系数等参数,实现多元储能的协同优化与博弈决策。

### 2) BESS 主动支撑电网多种服务的协同问题

BESS 主动支撑电网时,可能同时需要提供调频和调压两种服务,考虑到其通过变流器接入电网,而电池储能能提供调频服务时,需提供的有功功率可能超过变流器容量,导致储能系统难以提供调压服务。另一方面,建立一座电池储能电站不可能只为了满足某一项服务,对于一座既能提供调频服务又能提供调压服务的储能电站而言,在某些情况下,BESS 需要在快速响应频率变化的同时,维持电压稳定,这可能导致系统需要同时进行有功与无功功率的调节,增加了系统控制的复杂度。通过强化学习或模型预测控制等方法,设计联合控制策略,使得储能系统可同时进行有功和无功功率调节,确保调频和调压任务能够协调进行。利用大数据和机器学习技术,实时预测电网负荷波动、频率和电压变化,提前进行调度优化,也是解决电池储能支撑电网服务协同问题的一种思路。

### 3) BESS 热管理、消防安全等技术问题

BESS 的热管理和消防安全是保障其安全、高效运行的核心要素,直接影响电池寿命、能量效率以及系统可靠性。BESS 热失控的机理为:电池内部短路导致局部过热,引起电池内部电解液氧化,熔融隔膜,引起火灾。热管理的目标主要有:电池组温差控制在  $5^\circ\text{C}$  以内,最高温度低于  $45^\circ\text{C}$ ,极端工况下最高温度为  $60^\circ\text{C}$ ,预警时间要大于  $30\text{ s}$ 。热管理的核心在于维持电池温度一致及抑制热失控风险,通过优化液冷系统,增强相变材料实现均温控制。消防安全的核心在于锂电池火灾的链式反应特性,传统消防手段难以应对,主要难点包括:传统灭火剂难以抑制火焰,预警信号滞后,采用多级预警机制和复合灭火方案,例如德国 Sonnen 户用储能系统采用细水雾(降温)+气溶胶(抑制复燃)组合灭火,可有效提高灭火效率。

### 4) BESS 因补贴退坡和政策调整面临的风险

尽管国家层面已相继出台了一系列旨在推动储能产业发展的政策文件,然而政策动态调整与补贴退坡机制的实施,对储能项目的经济性产生了一定的负面影响。具体而言,政策的不确定性增加了投

资风险,而补贴退坡则直接削弱了项目的收益预期,进而对储能产业的可持续发展构成挑战。中国 2023 年新型储能电价政策取消了储能容量补贴,峰谷差价套利水平下降,强制提升了配储比例,且增加了储能调度考核政策。但储能补贴退坡并非单纯利空,而是推动储能行业从“政策驱动”转向“技术-市场双轮驱动”的必然过程;国外储能政策的相关调整亦对国内储能项目造成冲击,美国本土化制造要求以及欧盟《电池 2030+计划》使得中国储能材料出口额降低,对电池储能支撑电网应用造成了不利影响,需从技术性、经济性出发,采用开发固态电池、优化阻燃电解液和开展跨省差价套利等方式,灵活应用政策,保障电池储能项目的良好发展。

### 5) SOC 平衡问题

SOC 不平衡会影响储能系统的性能、效率以及寿命。温度差异、电流分布不均、制作工艺不均和老化程度等均会导致 SOC 不平衡。可使用电感器将系统中电压较高的电池的多余能量传输到电压较低的电池上,实现 SOC 的平衡。使用独立的电池平衡器,可控制 SOC 维持在合理范围内。制定合理的电池管理策略实现 SOC 平衡,对于延长电池寿命、提高电池性能和确保安全性至关重要。

大规模新能源发电机组并网对电力系统的调节能力提出了更高的要求。电池储能技术快速发展,利用电池储能支撑电网,不仅可以缓解传统机组调峰调频压力,还可以向电网提供惯量支撑和阻尼支撑,保障电力系统安全可靠运行。本文从同步电机的 4 个重要电气参数出发,论述了电池储能在电网频率调节、削峰填谷、电压调节、阻尼支撑和惯量支撑 5 个方面的应用,论述了储能支撑电网的策略和方法。最后,针对电池储能系统在电网应用中仍需应对的若干技术挑战,提出了针对性的解决方案与优化策略。

### 参考文献

- [1] 付红军, 孙冉, 王建波, 等. “双碳”背景下受端电网火电机组增加调相功能关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 132-143.  
FU Hongjun, SUN Ran, WANG Jianbo, et al. Key technologies of adding a condenser function in thermal power units in the receiving end power grid given a background of carbon peak and neutrality[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 132-143.
- [2] 胡江溢, 杨高峰, 宋兆欧, 等. 支持新型储能发展的国际政策与中国发展模式探讨[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 469-479.  
HU Jiangyi, YANG Gaofeng, SONG Zhaoou, et al. Preliminary discussion on the supporting policies and the China's development model of the new energy storage[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 469-479.
- [3] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.  
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [4] ROUHOLAMINI M, WANG Caisheng, NEHRIR H, et al. A review of modeling, management, and applications of grid-connected li-ion battery storage systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4505-4524.
- [5] CHATZIGEORGIOU N G, THEOCHARIDES S, MAKRIDES G, et al. A review on battery energy storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 86.
- [6] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.  
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [7] OLMEZ M E, ARI I, TUZKAYA G. A comprehensive review of the impacts of energy storage on power markets[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 91.
- [8] BOICEA V A. Energy storage technologies: the past and the present[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(11): 1777-1794.
- [9] OUDALOV A, CHARTOUNI D, OHLER C, et al. Value analysis of battery energy storage applications in power systems[C]// 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, October 29-November 1, 2006, Atlanta, GA, USA: 2206-2211.
- [10] ZHANG Yingchen, VAHAN G, WANG Caixia, et al. Grid-level application of electrical energy storage: example use cases in the United States and China[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(5): 51-58.
- [11] ZHU Huan, LI Hu, LIU Gujing, et al. Energy storage in high variable renewable energy penetration power systems: technologies and applications[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(6): 2099-2108.
- [12] DUAN Chao, JIANG Lin, FANG Wanliang, et al. Data-driven distributionally robust energy-reserve-storage dispatch[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(7): 2826-2836.

- [13] 李建林, 卢冠铭, 游洪灏, 等. 基于改进 LADRC 的构网型储能调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 142-154.  
LI Jianlin, LU Guanming, YOU Honghao, et al. Frequency regulation control strategy for grid-forming energy storage based on improved LADRC[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 142-154.
- [14] LIU Xiaoming, LIU Jun, ZHAO Yu, et al. Dynamic modeling of gasbag-structured compressed supercritical carbon dioxide energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2025, 16(3): 2251-2254.
- [15] LI Xin, YANG Zeguo, GUO Panfeng, et al. An intelligent transient stability assessment framework with continual learning ability[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(12): 8131-8141.
- [16] LAWDER M T, BHARATKUMAR S, PAUL W C. Battery energy storage system (BESS) and battery management system (BMS) for grid-scale applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(6): 1014-1030.
- [17] 齐成元. 考虑多元储能的综合能源系统协同规划研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.  
QI Chengyuan. Collaborative planning of intergrated energy system considering multiple energy storage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [18] 中国电力企业联合会. 《2024 年上半年电化学储能电站行业统计数据》[EB/OL]. [2024-09-10]. [https://cpnn.com.cn/news/xwtt/202409/t20240910\\_1735441.html](https://cpnn.com.cn/news/xwtt/202409/t20240910_1735441.html)
- [19] LEOU R C. An economic analysis model for the energy storage systems in a deregulated market[C] // 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, November 24-27, 2008, Singapore, Singapore: 744-749.
- [20] 刘凡, 李凤婷, 张高航, 等. 计及循环寿命和运营策略的风电汇集区域储能电站优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 127-139.  
LIU Fan, LI Fengting, ZHANG Gaohang, et al. Optimal configuration of storage power stations in a wind power gathering area considering cycle life and operation strategy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 127-139.
- [21] WANG Weijun, LI Chen, HE Xiaobo, et al. Economic evaluation of the second-use batteries energy storage system considering the quantification of environmental benefits[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 98.
- [22] ALONSO A M, COSTA D, MESSAGIE M, et al. Techno-economic assessment on hybrid energy storage systems comprising hydrogen and batteries: a case study in Belgium[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 52: 1124-1135.
- [23] MILIARAKIS S, TSAKANIKAS A. Assessing the economic feasibility of li-ion batteries storage systems for electricity arbitrage: a case study of the Greek energy market[J]. Next Research, 2025, 2(1).
- [24] STROE D, KNAP V, SWIERCZYNSKI M, et al. Operation of a grid-connected lithium-ion battery energy storage system for primary frequency regulation: a battery lifetime perspective[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1): 430-438.
- [25] CHEN Shuaixun, ZHANG Tian, GOOI H B, et al. Penetration rate and effectiveness studies of aggregated BESS for frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 167-177.
- [26] GHATUARI I, SENTHIL K N. Controller design and optimal sizing of battery energy storage system for frequency regulation in a multi machine power system[J]. Energy Reports, 2024, 12: 4757-4776.
- [27] 黄珂琪. 电池储能参与电网电压调节的控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.  
HUANG Keqi. Research on control strategy of battery energy storage participating in power network voltage regulation[D]. Changsha: Hunan University, 2022.
- [28] 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.
- [29] DHANAMJAYULU C, NYAMATHULLA S. A review of battery energy storage systems and advanced battery management system for different applications: challenges and recommendations[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 86.
- [30] LI Shujuan, XU Qingshan, HUANG Jiyuan. Research on the integrated application of battery energy storage systems in grid peak and frequency regulation[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 59.
- [31] GARCÍA-PLAZA M, CARRASCO J, ALONSO-MARTÍNEZ J, et al. Peak shaving algorithm with dynamic minimum voltage tracking for battery storage systems in microgrid applications[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 20: 41-48.
- [32] 李建林, 袁晓东, 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.
- [33] 国家能源局.《关于促进电储能参与“三北”地区电力辅助服务补偿(市场)机制试点工作的通知》[EB/OL]. [2016-06-18]. [https://www.gov.cn/xinwen/2016-06/18/content\\_5083393.html](https://www.gov.cn/xinwen/2016-06/18/content_5083393.html)
- [34] 张志, 邵尹池, 伦涛, 等. 电化学储能系统参与调峰调频政策综述与补偿机制探究[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(5): 71-77, 84.  
ZHANG Zhi, SHAO Yinchi, LUN Tao, et al. Synchronization of line fault recording data and fault location based on least square method[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(5): 71-77, 84.
- [35] 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): 3829-3826.  
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): 3829-3826.
- [36] 梁继业, 袁至, 王维庆, 等. 基于电池储能系统的综合自适应一次调频策略[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(7): 2322-2334.  
LIANG Jiye, YUAN Zhi, WANG Weiqing, et al. Comprehensive adaptive primary frequency control strategy based on battery energy storage system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(7): 2322-2334.
- [37] 李东东, 陈治廷, 徐波, 等. 考虑一次调频死区的风储协同调频机理分析及死区参数优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(4): 38-47.  
LI Dongdong, CHEN Zhiting, XU Bo, et al. Mechanism analysis and optimal dead zone parameter of wind-storage combined frequency regulation considering primary frequency regulation dead zone[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(4): 38-47.
- [38] 邓霞, 孙威, 肖海伟. 储能电池参与一次调频的综合控制方法[J]. *高电压技术*, 2018, 44(4): 1157-1165.  
DENG Xia, SUN Wei, XIAO Haiwei. Integrated control strategy of battery energy storage system in primary frequency regulation[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(4): 1157-1165.
- [39] 刘闯, 孙同, 蔡国伟, 等. 基于同步机三阶模型的电池储能电站主动支撑控制及其一次调频贡献力分析[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(15): 4854-4865.  
LIU Chuang, SUN Tong, CAI Guowei, et al. Third-order synchronous machine model based active support control of battery storage power plant and its contribution analysis for primary frequency response[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(15): 4854-4865.
- [40] ALCAIDE-GODINEZ I, BAI Feifei, SAHA T K, et al. Contingency reserve evaluation for fast frequency response of multiple battery energy storage systems in a large-scale power grid[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2023, 9(3): 873-883.
- [41] CIRIO D, CONTE F, GABRIELE B, et al. Fast frequency regulation from a wind farm-BESS unit by model predictive control: method and hardware-in-the-loop validation[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(4): 2049-2061.
- [42] SHANG Lei, DONG Xuzhu, LIU Chengxi, et al. Fast grid frequency and voltage control of battery energy storage system based on the amplitude-phase-locked-loop[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(2): 941-953.
- [43] HAMBISSA T, BIRU G, GHANDHARI M. Analysis of fast frequency control using battery energy storage systems in mitigating impact of photovoltaic penetration in Ethiopia-Kenya HVDC link[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2024, 156.
- [44] OBAID Z A, CIPCIGAN L M, MUHSSIN M T, et al. Control of a population of battery energy storage systems for frequency response[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 115.
- [45] MITSUGI Y, SHIGEMASA T, TERAZONO T, et al. Control hardware-in-the-loop simulation on fast frequency response of battery energy storage system equipped with advanced frequency detection algorithm[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(6): 5541-5551.
- [46] HERNANDEZ J C, BUENO P G, SANCHEZ-SUTIL F. Enhanced utility-scale photovoltaic units with frequency support functions and dynamic grid support for transmission systems[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2017, 11(3): 361-372.
- [47] HE Li, TAN Zhuangxi, LI Yong, et al. A coordinated consensus control strategy for distributed battery energy storages considering different frequency control demands[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024, 15(1): 304-315.
- [48] 谭庄熙. 电池储能参与电网调频的综合协同控制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.  
TAN Zhuangxi. Research on the integrated cooperative control method of battery energy storage participating in grid frequency regulation[D]. Changsha: Hunan University, 2022.
- [49] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 基于灵敏度分析的储能

- 电池参与二次调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 224-233.
- LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Battery energy storage control strategy in secondary frequency regulation considering its action moment and depth[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 224-233.
- [50] 崔红芬, 杨波, 蒋叶, 等. 基于模糊控制和 SOC 自恢复储能参与二次调频控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 68-76.
- CUI Hongfen, YANG Bo, JIANG Ye, et al. Strategy based on fuzzy control and self adaptive modification of SOC involved in secondary frequency regulation with battery energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 68-76.
- [51] MERCIER P, CHERKAOUI R, OUDALOV A. Optimizing a battery energy storage system for frequency control application in an isolated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1469-1477.
- [52] OUDALOV A, CHARTOUNI D, OHLER C. Optimizing a battery energy storage system for primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1259-1266.
- [53] ASTERO P, EVENS C. Optimum operation of battery storage system in frequency containment reserves markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4906-4915.
- [54] PRAJAPATI P, PARMAR A. Multi-area load frequency control by various conventional controller using battery energy storage system[C]//2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), April 7-8, 2016, Nagercoil, India: 467-472.
- [55] 陈沛, 张新松, 郭晓丽, 等. 考虑 AGC 指令随机特性的火-储混合电站二次调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 168-177.
- CHEN Pei, ZHANG Xinsong, GUO Xiaoli, et al. Secondary frequency regulation of a hybrid coal-fired generator and BESS power station considering random characteristics of AGC instructions[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 168-177.
- [56] CHEN Xiaojiao, HUANG Liansheng, LIU Junbo, et al. Peak shaving benefit assessment considering the joint operation of nuclear and battery energy storage power stations: Hainan case study[J]. Energy, 2022, 239.
- [57] INAOLAJI A, WU Xuan, ROYCHOWDHURY R, et al. Optimal allocation of battery energy storage systems for peak shaving and reliability enhancement in distribution systems[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 95.
- [58] SU Hao, FENG Donghan, ZHAO Yi, et al. Optimization of customer-side battery storage for multiple service provision: arbitrage, peak shaving, and regulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2559-2573.
- [59] UDDIN M, ROMLIE M F, ABDULLAH M F, et al. A novel peak shaving algorithm for islanded microgrid using battery energy storage system[J]. Energy, 2020, 196.
- [60] RANA M M, ROMILE M F, ABDULLAH M F, et al. A novel peak load shaving algorithm for isolated microgrid using hybrid PV-BESS system[J]. Energy, 2021, 234.
- [61] LI Xining, LYU Lixing, GENG Guangchao, et al. Power allocation strategy for battery energy storage system based on cluster switching[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(4): 3700-3710.
- [62] WANG Shangxing, LI Xiangjun, HAO Yuchen. Coordinated peak regulation control strategy of BESS and thermal power units in high proportion new energy power system[C] // 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference, November 23-25, 2020, Chengdu, China: 579-584.
- [63] KUMTEPELI V, HESSE H C, SCHIMPE M, et al. Energy arbitrage optimization with battery storage: 3D-MILP for electro-thermal performance and semi-empirical aging models[J]. IEEE Access, 2020, 8: 204325-204341.
- [64] 李艳梅, 任恒君, 张致远, 等. 考虑储能系统调度与风电消纳的峰谷分时电价优化模型研究[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4141-4149.
- LI Yanmei, REN Junheng, ZHANG Zhiyuan, et al. Optimization model of peak-valley time-of-use electricity prices considering energy storage system dispatching and wind power consumption[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4141-4149.
- [65] ZERAATI M, GOLSHAN M E H, GUERRERO J M. Distributed control of battery energy storage systems for voltage regulation in distribution networks with high PV penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3582-3593.
- [66] ZHAO Tianqiao, PARISIO A, MILANOVIC J V. Distributed control of battery energy storage systems in distribution networks for voltage regulation at transmission-distribution network interconnection points[J]. Control Engineering Practice, 2022, 119.
- [67] YU Peng, WAN Can, SONG Yonghua, et al. Distributed control of multi-energy storage systems for voltage regulation in distribution networks: a back-and-forth communication framework[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 1964-1977.

- [68] KANCHANAHARUTHAI A, CHANKONG V, LOPARO K A. Transient stability and voltage regulation in multimachine power systems Vis-à-Vis STATCOM and battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2404-2416.
- [69] MEJIA-RUIZ G E, PATERNINA M P, SEVILLA F R, et al. Fast hierarchical coordinated controller for distributed battery energy storage systems to mitigate voltage and frequency deviations[J]. Applied Energy, 2022, 323.
- [70] ZHANG Dong, SHAFIULLAH G M, DAS C K, et al. Optimal allocation of battery energy storage systems to improve system reliability and voltage and frequency stability in weak grids[J]. Applied Energy, 2025, 377.
- [71] 李雪萍, 王自力, 陈燕东, 等. 基于虚拟惯量模糊自适应的新能源逆变器频率主动支撑策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 25-37.  
LI Xueping, WANG Zili, CHEN Yandong, et al. Active frequency support strategy for new energy inverters based on virtual inertia fuzzy adaptive control[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 25-37.
- [72] DAI Yunteng, PENG Qiao, LIU Tianqi, et al. Negative resistor-based equivalent circuit model of lithium-ion battery energy storage system for grid inertia support[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(11): 15217-15230.
- [73] SU Jialei, LI Kang, ZUO Wei. A power allocation strategy for hybrid energy storage system with virtual inertia support[C] // 2024 IEEE 15th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), June 23-26, 2024, Luxembourg, Luxembourg: 1-5.
- [74] OKAFOR C E, FOLLY K A. Sizing of battery energy storage system (BESS) for inertia response support[C] // 2022 IEEE PES/IAS PowerAfrica, August 22-26, 2022, Kigali, Rwanda: 1-5.
- [75] NIU Decun, FANG Jingyang, YAU W, et al. Comprehensive evaluation of energy storage systems for inertia emulation and frequency regulation improvement[J]. Energy Reports, 2023, 9: 2566-2576.
- [76] HASAN A K, HAQUE M H, AZIZ S M. Application of battery energy storage system to improve damping of a simple power system[C] // 10th International Conference on Electrical and Computer Engineering, December 20-22, 2025, Dhaka, Bangladesh: 117-120.
- [77] XIONG Linyun, GUO Shiwei, HUANG Sunhua, et al. Optimal allocation and sizing of ESSs for power system oscillation damping under high wind power penetration[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 153.
- [78] ZHU Yongli, LIU Chengxi, SUN Kai, et al. Optimization of battery energy storage to improve power system oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1015-1024.

收稿日期: 2025-03-20; 修回日期: 2025-07-12

作者简介:

默天啸(2002—), 男, 博士研究生, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用、可再生能源并网; E-mail: motianxiao@stu.xjtu.edu.cn

刘俊(1982—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行分析和控制、电力系统稳定性、电力系统并行计算、可再生能源并网、HVDC 和 FACTS 技术。E-mail: eeliujun@mail.xjtu.edu.cn

(编辑 魏小丽)