

电气工程储能系统与电网协同控制机制

游江涛

江西石磊氟材料有限责任公司 江西赣州 342600

摘要：本文系统研究了电气工程中储能系统与电网的协同控制机制。研究首先从储能系统的技术特性、电网的功能需求及协同控制的基本原理出发，构建了协同控制的理论基础。在此基础上，深入剖析了储能系统参与电网调频、平滑可再生能源功率波动以及削峰填谷与经济运行优化三大关键功能，阐明了其在提升电网稳定性、促进新能源消纳和实现经济运行中的核心价值。进而，文章提出了实现高效协同的三大关键机制：分层协同控制机制以实现全局优化与局部自治，多时间尺度协同控制机制以应对不同时间维度的需求，以及信息交互与通信支撑机制以保障系统的可靠运行。该研究旨在为构建安全、高效、清洁的现代电力系统提供系统的理论框架与技术路径，推动储能系统与电网的深度融合。

关键词：储能系统；电网；协同控制；调频

引言

随着能源结构转型和电力系统改革的深入，风能、太阳能等可再生能源的大规模并网给电网的安全稳定运行带来了严峻挑战。储能系统凭借其快速、灵活的响应特性，被视为解决这一挑战、提升电网灵活性与韧性的关键技术。然而，如何实现海量、分散的储能系统与复杂电网之间的高效协同，充分发挥其多维度价值，是当前电气工程领域面临的重要课题。因此，深入研究储能系统与电网的协同控制机制，对于保障电力系统安全、促进新能源消纳、推动能源革命具有重要的理论意义和紧迫的现实需求。

一、储能系统与电网协同控制的理论基础

(一) 储能系统的技术特性与控制模式

储能系统与电网协同控制，需理解自身技术特性、掌握多样化控制模式。其技术特性由能量转换介质和物理化学过程决定，界定了应用场景和能力边界。响应速度上，物理储能如超级电容器和飞轮储能毫秒级，适用于高频功率波动和快速频率支撑；电池储能毫秒至秒级，应对秒到分钟级功率变化；机械储能如抽水蓄能和压缩空气储能分钟级，适合调峰等大容量调节。持续放电时长方面，飞轮和超级电容器短时高功率，电池储能灵活，抽水蓄能数小时至十数小时。能量密度等是衡量关键参数。基于这些特性，有定功率控制、定电压控制、下垂控制等控制模式。理解技术特性和控制模式是设计协同控制策略的理论出发点。

(二) 电网运行对储能系统的功能需求

电网在不同时间尺度和场景有多样化挑战，转化为对储能系统的功能需求。秒级需求是维持频率和暂态电压稳定，储能需毫秒级响应，提供虚拟惯性和一次调频服务，故障时提供无功支撑。分钟级需求是跟踪出力与负荷不平衡，平滑可再生能源功率波动，减少常规机组调频压力。小时级及更长时间尺度需求是削峰填谷、能量时移和容量备用，提高机组利用效率，保障供电可靠性。这些需求是协同控制机制设计的驱动力^[1]。

(三) 协同控制的基本原理与架构

协同控制通过多层次协调架构，匹配储能系统响应能力与电网运行需求，实现整体效益最优化。核心是将储能视为可聚合调度的虚拟资源，与其他调控资源协同互动。架构分集中式、分布式和混合式。集中式有中央控制器，收集全网信息计算最优指令，但依赖通信、计算复杂、有单点故障风险。分布式各单元自主决策，可靠性和扩展性高，但只能局部最优。混合式结合两者优点，分层控制，兼顾全局优化和局部快速响应，是主流方向。协同控制需解决信息交互、优化决策和指令执行问题，目标是使储能与电网高效稳定协同运行^[2]。

二、储能系统与电网协同控制的关键功能

(一) 参与电网调频控制

参与电网调频控制是储能系统与电网协同的核心关键功能之一，其价值是利用储能毫秒至秒级快速响应能力，应对电网频率瞬时偏差，提升系统动态稳定性与频率质量。电网频率是电能质量核心指标，其稳定依赖发

电与负荷有功功率实时平衡。大型发电机组故障跳闸或负荷突增时，系统有功功率缺额致频率急降。传统由同步发电机组旋转惯量和一次调频应对，但响应慢，新能源占比增高使频率稳定问题更突出。储能系统尤其是电池储能可弥补不足，初始跌落阶段模拟同步发电机惯性响应，检测频率变化率，数十毫秒内输出有功功率提供虚拟惯性，遏制频率下降速率；频率稳定在新偏差值后，按下垂控制曲线持续提供有功功率支持，执行一次调频助频率恢复。与常规机组比，储能调频精度高、响应快、可双向调节，且调节过程几乎无额外燃料消耗与污染物排放。二次调频中，储能可接受调度中心指令精确调整出力恢复频率。参与调频使储能从被动电力消费者或生产者变为电网主动“稳定器”，增强电网应对扰动能力，是构建高比例可再生能源电力系统的关键技术支撑^[3]。

（二）平滑可再生能源功率波动

平滑可再生能源功率波动是储能系统的重要协同功能，可解决风能、太阳能等可再生能源的间歇性和波动性问题，提升其并网友好度与电能可利用性。风力和光伏发电输出功率受自然条件制约，随机性强、难预测。短时间内，云层遮挡或风速骤变会使光伏或风电场出力剧烈波动，威胁电网安全稳定运行。储能系统与可再生能源场站配合部署，能“削峰填谷”平抑功率波动。其控制逻辑为：可再生能源出力高于计划值或峰值时，储能系统吸收多余电能；低于计划值或骤降时，快速放电补充缺额，维持总输出功率稳定。协同控制常采用基于功率波动率或移动平均算法的策略，如设定目标波动率上限，超出范围时储能系统介入调节。经储能系统平滑后，输出功率曲线更平缓、可预测，降低对电网的冲击，减少对传统调频电源的依赖，增强可再生能源发电在电力市场的竞争力，使其更易被电网接纳和调度。从深层次看，储能系统将可再生能源的“不可控”转化为“可控”，为其向主力能源转变提供关键技术保障。

（三）削峰填谷与经济运行优化

削峰填谷与经济运行优化是储能系统在电网中实现能量转移和价值创造的核心功能，目的是利用电价时间差异和负荷特性，通过充放电操作降低电网运行成本、提升资产利用效率和投资回报。电力系统负荷一天内有明显峰谷特性，高峰时需启动高成本、高排放调峰机组，增加发电成本且给电网设备造成压力。储能系统可有效解决此难题，在夜间低谷时吸收电能储存，日间高峰时向电网放电，起到“削峰”“填谷”作用，拉平负荷曲线、降低峰谷差。其经济效益多方面：减少高峰调峰机

组运行，降低发电燃料成本；减轻输配电设备高峰负载压力，延缓设备升级改造投资；储能所有者可利用峰谷电价差套利。宏观上，储能系统还可参与电力市场辅助服务获取收益。其充放电策略需基于复杂优化算法，综合考虑电价、负荷预测等因素，实现全生命周期收益最大化。因此，削峰填谷是基于市场信号的智能化经济调度行为，是储能系统实现商业价值、促进电网经济运行的关键途径^[4]。

三、储能系统与电网协同控制的实现机制

（一）分层协同控制机制

分层协同控制机制是实现大规模、分布式储能系统与复杂电网高效互动的核心架构，其基本原理是按照空间范围和控制目标的不同，将复杂的控制任务分解到不同层级，各层级各司其职、协同配合，从而实现全局优化与局部自治的统一。该机制包含顶层控制中心和多个底层局部控制器。顶层控制中心如电网调度中心，负责全局、慢时间尺度优化决策。它依据电网运行状态、负荷与可再生能源出力预测、市场电价信息，通过全局优化算法制定各区域或集群储能系统宏观控制目标，以较长周期功率计划或调节区间下发，如指定某储能集群未来一小时总充电电量和放电功率范围。底层局部控制器部署在储能电站、集群或含储能微电网层面，执行顶层指令、处理本地快速动态问题。它接收顶层宏观指令，结合本地实时测量信息及储能单元荷电状态，通过本地控制策略将宏观指令分解为具体充放电指令。电网局部扰动时，底层控制器可依据本地信息自主快速响应，保证局部系统稳定。这种分层架构将全局优化计算与通信压力集中在上层，快速响应需求分散到下层，实现“集中决策”与“分布自治”互补。顶层确保整体运行经济性与安全性，底层保证控制实时性与可靠性。通过分层协同，分散的储能系统可整合为虚拟电厂，参与电网运行调控。

（二）多时间尺度协同控制机制

多时间尺度协同控制机制是应对电网在不同时间维度上多样化需求的关键，其核心在于将储能系统的控制行为按照响应速度和作用时长进行分解，形成一个从毫秒到小时级无缝衔接、协调配合的控制序列。这种机制确保了储能系统能够同时承担暂态稳定、动态调节和能量管理等多重角色。在毫秒到秒级的时间尺度上，控制目标是维持电网的暂态稳定。这一层级的控制通常是本地自治的，不依赖于上层通信。储能系统通过内置的快速控制器，实时监测电网频率或电压的瞬时变化，模

拟同步发电机的惯性响应或执行一次调频功能，在数百毫秒内快速注入或吸收功率，以阻尼系统振荡，防止频率崩溃或电压失稳。在秒级到分钟级的时间尺度上，控制目标是平滑功率波动和进行二次调频。这一层级的控制通常由局部或区域控制器负责。它接收来自可再生能源场站的功率波动数据或来自调度中心的自动发电控制（AGC）信号，在几秒到几分钟内调整储能系统的输出功率，以平滑可再生能源的出力曲线，或响应区域控制误差（ACE），将系统频率恢复至额定值。在分钟级到小时级的时间尺度上，控制目标是实现经济运行和能量管理。这一层级的控制通常由顶层调度中心负责。它基于对负荷、可再生能源出力及电价的长期预测，以15分钟或更长的时间为周期，制定储能系统的充放电计划，执行削峰填谷、能量时移、参与现货市场等经济性调度策略。这三个时间尺度的控制并非孤立运行，而是紧密耦合的。例如，小时级的充放电计划为分钟级的调频预留了可用的调节容量和SOC范围；而分钟级的调频行为又会影响储能系统的实时SOC，这需要被反馈到小时级的计划制定中进行滚动修正。

（三）信息交互与通信支撑机制

信息交互与通信支撑机制是储能系统与电网协同控制的神经网络和血脉，其可靠性、实时性和安全性直接决定了整个协同控制系统能否有效运行。一个健全的通信机制必须能够支撑分层架构和多时间尺度控制下复杂的信息交互需求。从通信架构上看，它需要覆盖从底层储能单元到顶层调度中心的所有环节。底层储能单元与本地控制器之间，通常采用工业以太网、CAN总线等有线通信方式，或Zigbee、Wi-Fi等无线通信方式，确保控制指令和状态数据的毫秒级传输。局部控制器与顶层调度中心之间，则主要依赖电力专网或公用互联网，通过光纤、微波等通信介质进行数据传输。通信协议的选择至关重要，需要兼顾实时性、互操作性和安全性。在控制层，IEC 61850标准被广泛应用于变电站和储能电站内部，它定义了统一的信息模型和通信服务，实现了不同厂商设备间的互操作。在调度层，IEC 60870-5-104或IEC 61850-90-5等协议用于实现调度中心与厂站之间的远程数据采集和控制。随着物联网技术的发展，MQTT（消息队列遥测传输）等轻量级协议也开始应用于海量分布式储能的数据汇聚。信息交互的内容也极其丰富，包括上行数据和下行指令。上行数据主要是各类量测信息，如电网的频率、电压、功率潮流，以及储能系统的SOC、充放电功率、健康状态（SOH）等。下行指令则

是各级控制器下发的控制命令，如功率设定值、充放电模式切换、启停指令等。为了保障通信的可靠性，需要采用冗余网络配置、链路自愈等技术。为了保障实时性，需要为不同优先级的业务划分不同的通信带宽和通道。而为了应对日益严峻的网络安全挑战，必须建立纵深防御的安全体系，包括数据加密、身份认证、访问控制、入侵检测等措施，防止恶意攻击导致控制系统瘫痪或被恶意操控。一个高效、安全、可靠的通信支撑机制，是实现储能系统与电网深度融合、协同互动不可或缺的技术基础^[5]。

结语

电气工程领域中，储能系统与电网的协同控制机制已成为提升电网稳定性、灵活性和经济性的关键手段。通过参与调频、平滑可再生能源功率波动以及削峰填谷与经济运行优化等核心功能，储能系统不仅增强了电网应对各类扰动的能力，还有效促进了可再生能源的大规模接入和高效利用。在实现机制上，分层协同控制机制确保了大规模储能系统的有序管理和全局优化，多时间尺度协同控制机制则满足了电网在不同时间维度上的多样化需求，而信息交互与通信支撑机制则为这一切提供了可靠的神经网络和血脉。展望未来，随着技术的不断进步和成本的持续降低，储能系统将在电网中扮演更加重要的角色，为构建安全、高效、清洁、低碳的现代电力系统提供强有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 贺惺. 交直流混合电网中分布式储能协同控制方法研究 [D]. 湖南大学, 2020.
- [2] 杜健, 王德顺, 冯鑫振, 等. 考虑储能SOC的微网接口变流器VSG协同控制 [J]. 江苏电机工程, 2020, 039 (003): 128-135.
- [3] 王力成, 邓宝华, 王润泽, 等. 一种基于知识-数据混合驱动算法的电网频率协同控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (23): 11.DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212350.
- [4] 王浩丞, 白秉堃, 张勇军, 等. 工业微电网中混合储能系统与负载电机协同控制 [J]. 冶金自动化, 2022 (3): 72-79.
- [5] 汪洋叶, 赵力航, 常伟光, 等. 基于模型预测控制的虚拟电厂储能系统能量协同优化调控方法 [J]. 陕西电力, 2021, 049 (007): 16-22.