

Optimization of electrical automation control strategy and energy efficiency improvement in new energy storage system

Limin Zhang

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Dali, Yunnan, 671007, China

Abstract

As new energy distribution and storage systems gain widespread adoption in power grids, they demand higher precision in electrical control and enhanced energy efficiency. This study investigates the integration architecture and parameter configuration of energy storage devices with automated control units, while optimizing strategies including state-of-charge regulation, dynamic power adjustment, and control response delay correction. A comprehensive energy efficiency evaluation framework was established, complemented by comparative energy consumption tests under typical operating conditions. The findings demonstrate that strategic adjustments to automated control policies are pivotal for efficiency improvement. These results provide technical foundations for developing control algorithms and energy-saving operational management in new energy storage systems, with significant potential for practical engineering applications.

Keywords

new energy storage; electrical automation; control strategy optimization; energy efficiency evaluation; energy storage system

新能源配储系统中电气自动化控制策略优化及能效提升

张利民

红河广源水电开发有限公司, 中国·云南大理 671007

摘要

新能源配储系统在电力系统中广泛应用, 对电气控制精度与能效水平提出更高要求, 文章研究了储能装置与自动化控制单元的集成结构与参数配置特性, 分析了荷电状态调控、功率动态调节与控制响应时延修正等策略的优化路径, 构建了能效评估指标体系并开展典型工况下的能耗对比试验, 揭示了自动化控制策略调整对能效提升的关键影响。研究结果可为新能源配储系统的控制算法设计与节能运行管理提供技术支持, 具有良好的工程应用前景。

关键词

新能源配储; 电气自动化; 控制策略优化; 能效评估; 储能系统

1 引言

在新能源高比例接入背景下, 配储系统作为调节出力波动、提升电网稳定性的关键环节, 其电气自动化控制性能直接影响系统的响应速度与能效水平。储能设备在充放电过程中涉及电压、电流、功率等多维电气参数的动态匹配, 控制策略需具备对荷电状态的实时识别与分级响应能力, 自动化控制单元的设定精度、信号采集频率及调节逻辑成为系统运行效率的核心要素。文章为提升配储系统在复杂工况下的调控性能, 需系统性优化控制参数配置、响应链路机制及能效评估路径, 构建具备工程适配性的控制优化模型, 推动自动化控制策略向精细化、高效化方向演进。

【作者简介】张利民(1999-), 男, 白族, 中国云南大理人, 本科, 助理工程师, 从事新能源配储系统中电气自动化控制策略优化及能效提升技术研究。

2 控制系统结构与关键参数识别

2.1 储能装置的电气集成方式

储能装置在配储系统中的电气集成侧重电池组、双向变流器与交流母线间的能量传输路径, 接入拓扑一般采用直流汇流母排连接电池簇, 经双向变流器完成直交流转换, 再接入系统母线形成功率调节节点^[1]。拓扑中各电气接口的额定电压等级、短路容量以及变流器的换流特性决定了控制策略的可调范围, 例如母线电压稳定区间限制了功率指令的上升斜率, 电池串并联结构影响了荷电状态的分布均匀性, 变流器的瞬态响应速度决定了可接受的控制步长。接口阻抗、滤波结构及保护装置匹配关系对指令执行的稳定性具有直接影响, 使控制策略在动作幅度与调节周期上必须与拓扑特性保持一致。

2.2 控制单元的参数设定依据

关键参数的设定需围绕储能单元、电气接口与运行工况形成统一控制逻辑, 可从以下方面确定:

(1) 电压设定值需与母线标称电压及允许波动范围匹配, 保证变流器在稳态与动态条件下均能维持安全工作地点, 使充放电模式的切换保持平稳。

(2) 电流限幅依据电池倍率性能与热管理能力确定, 控制器需设定不同 SOC 区间对应的限流阈值, 避免在高 SOC 或低温条件下产生过度电流冲击, 使电池寿命保持在可控范围。

(3) 功率调节曲线需结合负载预测与变流器响应速度制定, 通过设定最大爬升速率、最小调节步长与过冲限制, 使有功功率指令能够在扰动场景下保持可控的动态变化特性, 从而维持系统运行的能效水平与电气稳定性。

3 自动化控制策略的优化路径

3.1 荷电状态的分级调控机制

储能系统的荷电状态 (SOC) 直接影响充放电过程的安全性与控制精度, 在自动化控制中采用 SOC 分级调控机制可有效防止过充、过放或极限状态切换带来的系统波动。基于设定的上下限阈值, SOC 区间被划分为多个子区间, 每段对应不同的控制响应策略与功率输出上限^[2]。例如, SOC 在 80% 以上时控制器限制充电电流并启动涓流模式, SOC 低于 20% 时则降低放电功率并发出调度请求, 保障电池的健康状态不被破坏。各级区间可匹配不同的功率转换速率和调节步长, 使控制指令响应更具精细性。

实际运行中, 控制策略需与 SOC 变化趋势动态绑定, 避免静态区间切换带来的控制死区或频繁波动。控制单元需接入实时 SOC 计算模块, 通过基于开路电压估算法与库仑计量法的融合算法提升估算准确度, 并以更新频率不低于 1 Hz 的方式反馈至主控系统。不同等级的 SOC 响应模式需在控制逻辑中设定清晰的状态判别门限与延迟保持时间, 防止短时电压波动引起错误判断。此分级策略可配合 PCS 对外功率曲线, 实现多工况下荷电均衡与系统能效的动态协同。

3.2 功率输出的动态调节策略

新能源配储系统在运行过程中面临负载快速变化和电源波动叠加的问题, 自动化控制策略需具备基于短时预测的有功功率调节能力。调节逻辑以当前负载功率变化斜率、储能 SOC 水平与变流器调节速率为输入因子, 结合滞后补偿机制实时修正输出目标值, 形成连续可调的功率控制指令^[3]。调节核心依据负载预测差值构造动态响应函数, 使输出功率随负载变化方向提前调整, 避免超调与响应滞后。储能单元在控制周期内按变流器可调功率与当前 SOC 状态设定最大输出区间, 调度逻辑根据预测负载趋势分配目标值与调节步长, 构成柔性功率调节区。

功率调节函数形式如下:

$$P_{out}(t) = P_{ref}(t) + K_p \cdot [P_{load}(t) - P_{ref}(t)] + K_d \cdot \frac{d}{dt} [P_{load}(t) - P_{ref}(t)]$$

其中, $P_{out}(t)$ 表示系统输出功率, $P_{ref}(t)$ 为参考功率轨迹, $P_{load}(t)$ 为预测负载功率, K_p 为比例调节系数,

K_d 为微分调节系数。该函数中第一项为参考基准, 第二项实现当前偏差补偿, 第三项提供变化趋势修正, 使调节动作在负载突变前实现前馈调整。控制系统设定调节周期为 0.5~1 秒, 在每一周期内更新预测量与功率指令, 结合 SOC 状态修正允许输出幅度, 使输出响应既能快速贴合负载变化, 又不引起电池过充或过放风险。

3.3 控制响应的时延修正方法

配储系统中自动化控制链条包含指令生成、通信上传、边缘节点解析及执行多个环节, 各节点之间存在不同程度的延迟累积, 影响整体响应时间与调节精度^[4]。针对链路延迟问题, 在控制逻辑中引入前馈控制模块, 根据负载预测量与储能剩余调节能力提前生成功率修正指令, 使输出行为领先于实际扰动, 提升响应前置能力。前馈模块基于滚动时间窗机制持续更新预测量, 与当前状态融合生成提前校正量, 并按控制周期注入功率调节指令通道中。

在控制数据回传与执行环节, 引入时间戳同步机制对反馈数据进行纠偏处理, 防止因数据上传延迟导致系统判断滞后。时间戳由边缘节点统一采样生成, 主控单元依据时间误差模型进行动态平滑插值, 补偿反馈延迟带来的误差累积。对于控制执行端, 设定指令保持缓存区, 在通信中断或异常信号下, 依据上一个有效控制帧维持短时功率稳定, 避免输出跳变。通过构建基于同步校时与数据插补的双重时延修正结构, 系统在复杂通信环境下仍能维持有效的闭环控制性能, 增强整体控制链的鲁棒性与时效性。

4 能效评估指标与提升方法

4.1 功率波动下的能耗测试方案

日内负载受气象条件、用电行为和启动规律影响, 在不同时间段呈现周期性波动, 需要构建逐时能耗采集流程以获得准确的能效评价数据。测试方案以固定采样周期记录母线功率、储能充放电功率以及变流端输出功率, 并以 5 分钟为最小记录粒度构成逐时能耗序列。能耗统计需包含储能实际输出电量、充放电能量偏差、电能输出比和负载因数等指标, 通过逐时积分获得日内能量流向结构, 为后续能效分析提供基础数据。采集系统需配置独立计量通道, 避免不同模块的采样偏差叠加影响整体能耗记录。

在能效评价方面, 逐时数据需构建统一的指标体系, 不同负载区间的能量利用率需与系统运行模式关联, 使评估结果能够反映储能系统在波动场景下的调节适配性。对应指标包括单位输出电能的等效能量消耗量、储能充放电能量损失量及系统低谷调节量等参数, 以区分不同运行策略对能量利用的差异影响。各指标需对应统一的计算周期、采样来源与滤波规则, 使测试结果具备可比性, 并可与后续控制策略优化进行联动分析。

4.2 损耗构成的动态跟踪与分解

配储系统中的能量在各功能模块间转换过程中不可避免地产生损耗, 需构建分项清晰、动态更新的能耗追踪机制,

对变流损耗、线路损耗与储能转换损耗进行逐时分解^[5]。损耗计算以功率差分为基础，设定等间隔采样周期，测量各节点功率输入与输出数值，形成时间序列结构。变流器输入为直流侧功率，输出为交流侧功率，线路功率以端点电压电流为测量依据，储能单元转换损耗以充放电期间的电能差表示。损耗跟踪数据经滤波处理后统一归档，便于周期内异常波动诊断与控制策略关联分析。

系统中任一模块的瞬时损耗功率定义为：

$$P_{loss}(t)=P_{in}(t)-P_{out}(t)$$

其中， $P_{loss}(t)$ 表示某模块在时刻的损耗功率， $P_{in}(t)$ 表示该模块输入功率， $P_{out}(t)$ 表示输出功率。

在给定运行周期内的累计能量损耗可表示为：

$$E_{loss}=\sum_{t=1}^T [P_{in}(t)-P_{out}(t)] \cdot \Delta t$$

其中， E_{loss} 为总能耗损失， T 为采样周期数， Δt 为每个采样间隔时间长度。该公式用于测定各模块在完整运行周期内的总能耗偏差量，所有变量均基于自动化采集系统提供的实时功率数据。将分项损耗结果与运行工况数据叠加处理，可识别高频动态工况下的主要能耗来源，为控制策略设定中限流幅度、电压参考值与响应周期的参数压缩提供数据支持。

4.3 控制优化后的能效对比分析

能效对比需要在相同的运行周期与工况下采集优化前后的能耗数据，以评估控制策略调整对能量利用结构的改善效果。测试周期选取典型负载波动日，将储能系统的逐时输出电量、变流器损耗量、线路功率损失和总能量输入量作为核心评价数据，构建统一的对比框架。优化前运行以固定功率调节曲线与静态 SOC 阈值为基准，优化后运行采用动态调节策略与时延修正结构，使系统在波动负载下具备更高的响应精度。逐时能量统计可反映储能单元参与调节的深度以及单位能量的使用效率。

为呈现控制策略优化前后在典型运行周期内的能耗差异，可构建统一的数据对比表作为评价依据，如下表 1：

表 1 控制策略优化前后典型能耗对比数据表

指标名称	优化前	优化后
储能系统输出电量 (kWh)	186	214
储能转换损耗 (kWh)	42	31
变流器损耗 (kWh)	27	21
线路损耗 (kWh)	14	11
系统总能量输入量 (kWh)	298	277

优化后储能输出电量增加，系统总能量输入量减少，说明单位能耗下降。各项损耗均有不同程度降低，控制策略优化提升了整体能效。

5 结语

研究基于典型新能源配储系统的运行特性，构建了自动化控制结构识别与关键参数设定机制，提出了荷电状态分级控制、有功功率动态调节及控制链路时延修正策略，构成完整的控制策略优化路径。通过构建能耗测试流程、损耗构成跟踪模型与典型数据对比分析体系，明确控制优化后系统在变流损耗、储能转换损耗及总能量输入量等维度表现出结构性下降，能效水平明显提升。研究结果表明，控制策略的调节精度与响应效率对配储系统的能源利用结构具有决定性影响，在负荷波动与新能源出力不稳定场景下尤为明显。后续可结合实际调度场景引入 AI 算法对控制策略进行自适应重构，进一步拓展能效提升空间。

参考文献

- [1] 王建鹏. 新能源发电系统的电气自动化控制策略研究[J]. 电气技术与经济, 2025, (03): 342-344+351.
- [2] 洪睿齐. 人工智能技术在电气自动化控制中的应用[N]. 山西科技报, 2025-02-27(B06).
- [3] 吴涛. 智能化技术在电气工程自动化控制中的运用探讨[J]. 时代汽车, 2024, (09): 44-46.
- [4] 吴伟. 高比例新能源接入的源网荷储系统耦合匹配技术研究[J]. 水电与新能源, 2024, 38(01): 26-30.
- [5] 黄逸瑶, 王梦怡. 基于政策驱动的新能源侧配储经济性系统动力学研究[J]. 北京邮电大学学报(社会科学版), 2023, 25(06): 20-34.