

储能容量对火电调频性能影响分析

李会东

国能河北沧东发电有限责任公司, 河北省沧州市, 061113;

摘要: 储能容量对火电调频性能影响显著。它能提升调频响应速度与精度, 弥补火电机组滞后性, 精准匹配频率偏差; 决定调频调节范围与持续性, 扩大等效调节范围, 维持调频持续性; 还影响火电调频经济性与机组寿命, 降低补偿费用, 延长设备使用年限。基于火电调频性能提升, 可从基于调频需求精准匹配、结合火电调节特性、基于全生命周期成本等方面设计储能容量。

关键词: 储能容量; 火电调频; 性能影响

Analysis of the Impact of Energy Storage Capacity on the Frequency Regulation Performance of Thermal Power

Li Huidong

Guoneng Hebei Cangdong Power Generation Co., LTD., Cangzhou City, Hebei Province, 061113;

Abstract: Energy storage capacity has a significant impact on the frequency regulation performance of thermal power. It can enhance the speed and accuracy of frequency modulation response, make up for the lag of thermal power units, and precisely match frequency deviations. Determine the frequency modulation adjustment range and persistence, expand the equivalent adjustment range, and maintain the frequency modulation persistence; It also affects the economic efficiency of frequency regulation in thermal power and the service life of the units, reduces compensation costs, and extends the service life of the equipment. Based on the improvement of frequency regulation performance of thermal power, energy storage capacity can be designed from aspects such as precise matching of frequency regulation demands, combination with the regulation characteristics of thermal power, and based on the full life cycle cost.

Key words: Energy storage capacity Thermal power frequency regulation Performance impact

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 05. 021

引言

在新能源高渗透率的电力系统中, 火电调频面临挑战, 储能系统的引入为提升火电调频性能提供了新途径。储能容量作为关键因素, 对火电调频的响应速度、调节范围、经济性等多方面有着重要影响。深入研究储能容量对火电调频性能的影响, 并制定合理的设计策略, 对于保障电网稳定运行、提高能源利用效率具有重要意义。

1 储能容量对火电调频性能影响

1.1 影响调频响应速度与精度

储能容量对火电调频性能的影响较为明显, 具体来说, 储能系统的快速充放电特性能够弥补火电机组的滞后性, 当电网频率波动时, 储能可立即释放或吸收功率, 从而形成一道缓冲带, 使火电机组无需频繁启动或大幅调整出力; 并且储能的双向调节能力——既能够充电吸收多余功率, 又能够放电补偿功率缺口——可精准匹配电网频率偏差, 通过与火电机组协同控制, 储能可平抑

火电出力波动, 将频率偏差控制在 0.01Hz 以内; 此外, 储能的模块设计使其功率调节步长更小, 可实现微秒级功率跟踪, 显著提升调频指令的执行精度。

1.2 决定调频调节范围与持续性

储能容量将直接决定系统可供的最大调节功率, 在新能源高渗透率场景下, 储能可补充风电、光伏的间歇性波动, 使火电参与的联合调频系统的等效调节范围扩大至传统火电的 1.5~2 倍; 同时, 储能的荷电状态管理是维持调频持续性的关键所在, 通过优化充放电策略可将储能系统循环寿命延长 6000 次以上, 并且结合火电机组的慢速调节特性, 储能可专注处理高频次小幅度的频率波动, 而火电机组负责低频次大幅度的功率调整, 从而形成快慢协同的调节体系。

2 基于火电调频性能提升的储能容量设计策略

2.1 基于调频需求精准匹配的容量基线设计

基于火电调频性能提升的储能容量设计, 需以调频

需求精准匹配为核心进行容量基线设计。

2.1.1 时空动态分布模型搭建

相关单位需建立起电网调频需求的时空动态分布模型,通过解析历史频率波动数据中的高频分量与低频分量的能量占比,结合新能源出力波动特性与负荷预测误差的统计分布规律,量化不同时间尺度下频率功率需求与持续时间的概率密度函数;在此基础上,相关单位可采用蒙特卡罗模拟方法生成典型调频场景,提取各场景下功率调节幅值、持续时间及频次的关键特征参数,基于此同步构建调节需求强度指数,该指数需综合反映调节深度(如功率变化量占额定容量比例)、调节速率(如单位时间功率变化量)及调节力度(如单位时间内调节次数)的三维约束关系,最终形成以FRDI为因变量的调节需求动态量化模型,为储能容量基线设计提供需求侧的精准约束边界。

2.1.2 分层控制功率分配

相关单位可基于上述动态量化模型的数据结构设计分层控制功率分配策略,其大致包括三个层级:在底层控制层面,主要采用模型预测控制框架,构建火电与储能联合调频的滚动优化模型,以调频指令跟踪误差最小化为目标函数,引入储能荷电状态的约束条件,再通过离散化处理将连续控制问题转化为有限时域内的线性规划问题,求解得到火电与储能的最优功率分配序列;在中层协调层面,主要设计基于SOC反馈的功率修正机制,当储能的SOC接近临界阈值时,可动态调整火电频率功率的补充系数,确保储能系统始终具备双向调节能力。

2.2 结合火电调节特性的动态容量优化

2.2.1 约束定义

结合火电调节特性的动态容量优化是至关重要的部分,相关单位需建立火电机组调节特性的多时间尺度数学描述,包括汽轮机阀门开度响应延迟、锅炉燃烧系统惯性及主蒸汽压力与功率的耦合约束,通过状态空间方程刻画出火电出力调节的动态过程;基于此,针对储能系统还需定义其功率与能量的约束关系,即最大充放电功率与可用容量的非线性耦合特性,并引入荷电状态的软约束条件以避免过充过放;在此基础上,同步搭建起火电与储能联合调频的混合动态模型,将火电的慢速调节特性与储能的快速响应特性通过互补约束条件进行耦合,从而形成以调频指令跟踪误差最小化为目标函

数、以火电调节速率限制与储能SOC范围为约束条件的优化问题框架,该模型具备动态更新能力,能够根据火电机组实际运行数据(如阀门磨损程度、锅炉效率衰减等)在线修正参数,以保证容量优化边界条件的实时准确性。

例如,某300MW火电机组与100MW/50MWh储能系统组成联合调频系统,该系统在实际运行中严格遵循动态容量优化逻辑,通过精准的约束定义与分层控制实现调频性能跃升。该300MW火电机组的多时间尺度数学模型明确包含汽轮机阀门开度响应延迟特性,其高压调门从指令发出到实际开度稳定存在2秒延迟,这一参数通过连续三个月的真机测试数据标定;锅炉燃烧系统惯性表现为炉膛温度变化滞后燃料量调整约45秒,主蒸汽压力与输出功率的耦合系数经实验测定为0.78MPa/MW,即功率每变化10MW对应主蒸汽压力波动0.78MPa,相关单位通过状态空间方程将这些特性转化为“出力调节时间常数 ≥ 30 秒”的约束条件。针对配套的100MW/50MWh储能系统,其功率与能量约束关系被定义为最大充放电功率 ± 100 MW与可用容量50MWh的非线性耦合,即当SOC处于30%-70%区间时可满功率运行,低于20%或高于80%时功率线性衰减至0,这种软约束设计通过电池管理系统的充放电曲线编程实现;联合构建的混合动态模型将火电“调节速率 $\leq 2\%$ 额定功率/分钟”与储能“响应时间 ≤ 50 毫秒”的特性通过互补约束耦合,例如当调频指令变化量超过火电1分钟内最大调节量6MW时,超出部分自动由储能承担,模型会每日采集机组的阀门磨损量(通过振动传感器数据计算)与锅炉效率衰减值(基于排烟温度与氧量分析),实时修正汽轮机延迟时间与锅炉惯性参数,使约束边界始终与设备实际状态匹配。

2.2.2 分层控制

在联合调频动态模型构建基础之上,相关单位需设计分层控制的滚动优化算法:上层控制可采用模型预测控制框架,以当前时刻为起点,在预测时域内对调频指令进行离散化处理,同时结合火电与储能的动态约束条件,求解满足调节需求的最小储能功率分布序列,并将火电出力调整量限制在安全运行范围之内;在中层控制层面,主要引进SOC反馈调节机制,基于设计的滑膜控制律动态调整储能功率分配比例,当SOC接近预设上限时,可优先利用火电承担调频任务以降低储能充电功率,反之则增加储能放电功率以补充火电调节不足的问题;在下层控制层面,需要将优化得到的功率分配指令转换

为火电机组阀门开度指令与储能变流器的脉冲宽度调制信号,通过闭环控制确保实际功率跟踪误差小于额定功率的 1%。

例如,上层控制采用模型预测控制框架,以当前时刻的电网频率 49.98Hz 为起点,将未来 15 分钟的调频指令按 1 秒间隔离散为 900 个数据点,结合火电“单次调节不超过 3MW”与储能“单次调节不超过 5MW”的动态约束,通过线性规划求解得到储能功率分配序列,例如在第 10 秒指令要求增加 8MW 功率时,序列会分配储能承担 5MW、火电承担 3MW,且火电的 3MW 调整被限制在其安全调节范围($\pm 5\%$ 额定功率即 $\pm 15\text{MW}$)内。中层控制引入 SOC 反馈调节机制,当储能 SOC 达到 78% (预设上限 80%) 时,滑膜控制律会将储能功率分配比例从 60% 降至 30%,优先让火电承担 70% 的调节任务,如原本需调节 10MW 时,储能仅出力 3MW 而火电出力 7MW;当 SOC 降至 22% (预设下限 20%) 时,比例则提升至 80%,储能承担 8MW 而火电承担 2MW,以此维持储能的双向调节能力。下层控制将优化后的功率指令转换为具体操作信号,对于火电,将 3MW 的功率增加指令转换为高压调门开度增加 1.2° 的电信号(基于阀门流量特性曲线);对于储能,将 5MW 的放电指令转换为变流器脉冲宽度调制信号的占空比调整至 38%,通过闭环控制实时比对实际输出功率与指令值,使两者偏差始终控制在 0.3MW 以内,即小于额定功率的 1%。

2.3 基于全生命周期成本的容量经济性平衡

2.3.1 全生命周期框架

基于全生命周期成本的容量经济性平衡控制具有重要意义,相关单位在基于火电调频性能提升的储能容量设计环节,需要构建涵盖储能系统初始投资、运行维

护、性能衰减以及残值回收在内的全生命周期成本动态核算框架;对于初始投资层面,需将其分解为电池本体、功率转换系统、热管理系统以及安装工程的分项成本,并研究学习曲线效应的修正系数以反映技术进步对成本的长期影响;运行维护成本则需区分为固定成本和可变成本,建立起与充放电循环次数相关联的模型,将可变成本转化为与储能容量利用率相关的动态变量;性能衰减成本需要基于电池老化模型,量化容量衰减率与内阻增长率,并结合调频市场收益损失函数计算经济损耗;残值回收成本则需要充分考虑电池退役后的梯次利用价值和回收处理费用,通过市场调研数据建立起残值率与电池健康状态的预测关系,最终形成 LCC 模型。

3 结束语

总体来说,储能容量在提升火电调频性能中扮演着关键角色,从影响调频响应速度、调节范围到经济性与机组寿命,全方位展现了其重要性。在容量设计上,基于调频需求精准匹配、结合火电调节特性以及考虑全生命周期成本等策略,为合理确定储能容量提供了科学依据。未来,应持续优化设计策略,以适应不断变化的电力系统需求,推动火电调频与储能技术的协同发展。

参考文献

- [1] 崔赞,张慧芳,孙志毅. 同源调频(频率)方式下火电一次调频技术的研究与应用[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(06): 137-138.
- [2] 王浩燃,刘怀照,沈志广,等. 辅助火电机组调频的储能控制技术应用及实践[J]. 电器与能效管理技术, 2025, (04)
- [3] 钟慧楠. 分时段多目标火电发电机组调峰调频控制技术研究[J]. 科技资讯, 2025, 23