

火电机组与储能联合调频协调控制策略研究

郝连庆

大唐鲁北发电有限责任公司, 山东 滨州 256600

[摘要]随着“双碳”目标在全国范围内的深入推进,在电力系统中,风能、太阳能等作为波动性可再生资源的占比不断上升,而系统转动惯量降低,调频调节压力增大,这些问题都亟待解决。传统的火电机组虽然具有较强的能量支撑,但是会受限于锅炉燃烧惯性以及汽轮调节的滞后性,难以满足现代电力系统对调频响应速度的实际需求。而储能系统凭借着其毫秒级的响应特性,成为调频领域的理想方案,但其能量容量约束会限制其独立参与长时间调频的能力。因此,在火电机组和储能联合下的调频协调控制具有更大的潜力,能够发挥两者各自的优势,相互补充,这对保障电网频率的稳定性以及系统安全运行有重要意义。

[关键词]火电机组; 储能; 调频协调; 电网频率; 调频调节压力; 成本核算

DOI: 10.33142/hst.v9i3.19338

中图分类号: TM621.6

文献标识码: A

Research on Coordinated Control Strategy of Combined Frequency Regulation between Thermal Power Units and Energy Storage

HAO Lianqing

Datang Lubei Power Generation Co., Ltd., Binzhou, Shandong, 256600, China

Abstract: With the deepening of the "dual carbon" target nationwide, the proportion of wind energy, solar energy and other volatile renewable resources in the power system continues to rise, while the system's moment of inertia decreases and the pressure of frequency regulation increases. These problems urgently need to be solved. Although traditional thermal power units have strong energy support, they are limited by the inertia of boiler combustion and the lag of turbine regulation, making it difficult to meet the practical needs of modern power systems for frequency response speed. The energy storage system, with its millisecond level response characteristics, has become an ideal solution in the field of frequency regulation, but its energy capacity constraints will limit its ability to independently participate in long-term frequency regulation. Therefore, frequency regulation coordination control under the joint operation of thermal power units and energy storage has greater potential, which can leverage their respective advantages and complement each other, which is of great significance for ensuring the stability of power grid frequency and the safe operation of the system.

Keywords: thermal power units; energy storage; FM coordination; grid frequency; frequency modulation to regulate pressure; cost accounting

引言

当前,我国电网电源的结构正在发生根本性变革,高比例的可再生能源并网会导致系统转动的惯性逐步减小。其频率的稳定性也面临着较大的挑战,火电机组虽然具有较强的调节能力,但是也由于机组自身的爬坡速度和机械惯性,难以满足精细化现代调频的要求。因此本研究将进一步探讨火电机组和储能联合作用下,是否能够发挥储能的最高响应速率,弥补火电调节的滞后性。同时,我们要提升调频精度和稳定性,确保火电机组的稳定运行,减缓运行损耗,为构建安全高效且具有经济性的电力系统提供技术支撑。

1 概述我国电力系统频率控制现状及挑战

随着我国应对气候变化“碳达峰、碳中和”战略目标的推进,电力系统正在经历由高转动惯量向高比例电子设备接入的这一改革。从新能源角度上看,大规模的风电光伏都有显著的波动性和随机性,这就会导致电网等效惯量持续下降,调频的难度逐步增加。单一的火电机组调频模式最大的问题是受限于自身的物理特性,存在响应滞后,阀门动作频繁等弊端,这些都有较大的机械损耗,难以满足电力系统对调频速度及精度的要求。

面对日益复杂的系统频率稳定性挑战,如何构建高效灵活的调频系统,也是行业发展的突破点。单一的储能装

备虽然具有毫秒级的响应能力，但是其投资资本大，容量受到约束，在长时段的调频中难以维持 SOC 的平衡。因此，整合火电机组的宽调节范围与储能系统的高功率响应速度，实现火储联合调频，并成为提升电力系统频率稳定的必然要求，然而如何解决这两者之间的功率分配，并克服通讯延迟等问题，这不仅是当前突破的要点，也是关键瓶颈和难点。

2 火储联合机理分析

2.1 时频域互补机理：响应速度与能量密度的耦合

火电机组与储能系统的调频特性在时域上具有天然的互补性。火电机组属于典型的惯性大，但是响应慢的发电系统，在调节过程中容易受到锅炉的蒸汽压力平衡以及汽轮转动惯量等影响，还会受到辅助设备调节延时的影响。在多因素制约下仍有很多可改善的地方。例如，在处理高频小幅度的随机频率波动时会有较大的滞后性和超调量，而频繁的调节也会增加汽轮机组关键部件的金属疲劳。与其相反的是，储能系统能够凭借其电子变换器的快速控制特性，具备毫秒级的响应速度与极高的调节精度。在联合调频机制过程中，调频需求信号需要进行区域分解，并通过低通滤波器提取波动分量并由火电机组承担，随后将高频尖峰的波动量分配给储能系统。这种控制逻辑满足了“长周期稳压、短周期削峰”的需求，使储能系统承担了绝大部分的高频功率指令，不仅能够规避火箭机组物理机构的响应极限，还能够利用储能的快速动作来平抑系统频率的瞬时偏差，使频率的支撑有了高质量的跨越。

2.2 系统调节容量与功率分配的动态优化

联合调频系统的核心机理在于通过协调控制策略，重构整体的调频出力空间。火电机组的调频能力主要受限于两大部分，一部分是最大调节速率，另一部分则是调节死区，而储能系统的出力则会受限于当前的负荷状态以及最大功率。在协调构架中，联合系统是通过引入功率分配系数，将储能系统作为火电机组的调频增强单元。当系统需求波动幅值较小时，储能会通过。充放电实时补偿调频中的缺额，如果波动持续的时间较长或者幅度较大，火力电阻的平稳出力，能够补充基础的调频容量，并通过反向调节引导储能 SOC 回归安全阈值。这种协同机制打破了单一机组的调节瓶颈，通过储能的瞬时补偿反应，能够缩短联合系统的综合响应时间，并且使调频性能指标优于单一的火电机组。这一过程不仅提高了调频的响应效率，而且能够减少机组阀门的频繁动作，降低了机组的整体损耗。这也是实现资源利用效率跟控制效能的最优配比方案。

2.3 运行效能与损耗约束的内在平衡

火储联合调频的机理分析还需关注运行损耗的成本函数。由于火电机组存在调节死区，在该区域内的小幅波动往往被忽略，但在联合储能之后，这些微小的频率变动也会被储能实时进行捕捉，实现了调频覆盖率的最大化。然而这微小功率交互会对储能电池造成高频充放电循环，这就诱发电池内部的化学损伤，还会加速容量衰减。因此，联合调频的机理本质上是基于“火电机组磨损率”与“储能电池衰减率”的动态博弈^[1]。在协调控制逻辑中通过设定合理的算法分配，能够使储能仅在火电机组调节响应不理想的区间进行补充干预，这既能利用储能的快速性，还能够限制其在非必要的场景下进行损耗。这将有助于延长全系统的运营周期。这一闭环控制系统将火电机组的机械调节能力与储能的电力电子调控能力有机融合，通过在时域和频域上的精细化分配，最终能够达成响应更快，综合损耗更低的复合型调频系统，为电网频率的安全稳定运行提供了动态的、高效的保障体系。

3 协调控制研究现状

3.1 传统 PID 控制及其改进机制

在火储联合调频研究的起步阶段，PID 控制凭借结构简单、鲁棒性强及易于工程实现等优势，成为最基础的协调控制手段。传统的研究主要是通过双闭环控制架构，将频率偏差信号分配给火电以及储能控制器。在克服单一 PID 处理火电机组大惯性、非线性滞后时的局限性，不少学者都提出了模糊自适应 PID 控制及抗饱和 PID 策略，旨在实时调整 PID 参数以适应不同工况。尽管这一类方法能够起到调节改良作用，但是本质上仍然属于线性定常控制范畴，难以面对电网复杂波动下的精准处理及多变量耦合约束，这就会导致调频在极端工况下仍然有波动。

3.2 模型预测控制 (MPC) 的优势与演进

随着电力系统对调频精度要求的提升，模型预测控制 (MPC) 因其在处理多约束优化问题上的卓越表现，这已经成为当前协调控制的研究要点模型预测控制，通过组建火电机组和储能系统的动态数学模型能够预测时域内反复求解优化问题，其目的是实现功率的最优分配，其核心优势则是将储能 SOC 安全约束、火电机组爬坡速率及阀门动作限制显式地纳入目标函数中，实现“预见性”调节。在近些年的研究中，分布式 MPC 和多目标的 MPC 能够解决核电机组滞后和储能容量受限的矛盾问题^[2]。目前，MPC 已成为实现火储协同平稳运行、提升系统整体调频效益的主流控制算法，特别是在处理具有延迟性闭环控制系统中，具有较强的优势和适应性。

3.3 智能控制与前沿深度学习方法

随着计算能力的飞速发展,以深度强化学习(DRL)为代表的智能控制方法正逐渐成为协调控制研究的前沿趋势,不同于依赖精准数学模型这一传统方式,智能控制通过 Agent 与环境的交互学习,能够更好地适应火电机组和储能的最佳协同策略。有研究人员表明^[3],通过神经网络拟合复杂的功率分配函数,在处理非线性干扰以及参数变化时具有独特的优势。目前,基于多智能体深度强化学习的协调控制框架,通过火电与储能自主学习最优合作逻辑,能够规避传统方法对系统精确建模的依赖。

4 评价指标与优化目标

4.1 调频效果评估指标的维度构建

火储联合调频的性能评估体系主要由“调频精度、响应速度、调频稳定性”三大核心维度构成。传统的评价指标通常围绕电网调频性能评价标准展开。在火储联合模式下,评价指标关注的不仅仅是储能系统的响应速度,除了通过频域分析衡量其对高频波动信息的捕捉能力,更侧重于对火电机组机械应力与热应力的考量,这就包括了很多内容,如机组调节阀门的动作与频率,还有锅炉气压波动幅度等。谢通过全方位的衡量,引入综合性评估指标,将频率偏差作为首要目标,辅助储能参与贡献度及机组损耗等。这些指标的量化分析,能够对比单一机组和联合系统调频的差异性,还能够评估不同协调控制策略,在抑制频率偏移方面的优势。确保在更复杂的电网环境中,调频服务能够达到国家电网调频补偿标准的要求。

4.2 经济性约束与多目标优化逻辑

在追求卓越调频性能的同时,经济性约束是限制联合调频实际应用的关键瓶颈。优化目标,通常会构建为多目标函数,在满足频率稳定性的基础上,要寻求经济成本的最小化,这些成本项目涉及的内容有很多,涵盖了火电机组因频繁参与调频而导致的耗煤量增加、阀门控制部件的超额损耗,以及储能系统的全生命周期折旧成本^[4]。此外,储能 SOC 的维持成本也是优化目标中的重要组成部分,通过合理的工具分配策略能够避免储能因长期处于高荷电或低荷电状态导致的调频能力丧失或过充过放风险。因此,在现代研究领域更加倾向于效益函数,并以调平收益减去运行成本为核心需求。利用帕累托最优前沿理论,在响应速度与运行寿命、调频贡献与设备维护成本之间寻找平衡点^[5]。通过多种目标动态的寻优,不仅能够保证系统频率的支撑能力,还能够为电力辅助服务收益最大化作出贡献,从而验证火储联合调频在商业运营层面的可行性与

稳健性。

5 技术挑战与展望

5.1 核心瓶颈:多目标协同、SOC 管理与通信时延的博弈

在火储联合调频的深入实践中,技术挑战主要集中在三个维度。第一个维度是多目标优化困境,指的是火电机组的运行安全和储能系统的寿命损耗,这是一对本质上的矛盾。如何在调频响应精准、煤耗增长、设备疲劳与电池退化之间建立稳健的加权函数,是当前协调控制的核心难点^[6]。第二个维度则是储能 SOC 的平抑问题,由于储能能量的密度受限,在长期参加调频的过程中容易使 SOC 偏离安全区间。这就要求我们逐步实现在实时调平任务时与 SOC 的自愈恢复进行切换,但是这一举措往往会引入额外的控制复杂性,导致系统调节性能在特定时段发生剧烈波动。第三个维度是通信时延带来的系统不稳定性,储能联合控制高度会依赖于远程数据的传输,然而在广域网络通信过程中,信号的传递延时以及丢包、抖动,都会破坏控制闭环的相位裕度,这就会进一步造成系统响应延迟,甚至会出现频率震荡^[7]。然而在现有的控制架构中,这种非确定性的延时补偿能力不高,会导致高频调频需求下,控制指令与实际物理响应之间存在不可忽视的相位滞后,严重影响了协同效率。

5.2 未来发展:从模型驱动向人工智能协同与集群调控演进

展望未来,火储联合调频将朝着“数据驱动与机理分析深度融合”的方向演进。首先,针对复杂约束下的决策控制是基于先进算法模型展开的,即通过物理信息神经网络与深度强化学习,以及在线实时训练克服模型参数不准确与非线性干扰难题,实现控制策略的“动态自愈”^[8]。其次,协同对象将从单一机组与储能对,向“火电+储能+可再生能源”的多源协同集群调控发展,通过源网荷储的协同优化,在更大区域内平抑频率波动。此外,边缘计算技术将改善通信时延瓶颈,在现场侧部署边缘控制器进行本地化快速决策,能够极大地降低对中心控制站的绝对依赖,从而提升系统对电网扰动的响应速度^[9]。

在未来的研究重点中,还应当进一步攻克储能电池的在线寿命。其动态衰减特性作为控制约束,将嵌入实时调度系统,在保障电网频率稳定的同时,还应当实现活储全周期运行成本的极小化,这也为电力系统向高比例可再生能源转型提供了技术支持^[10]。

[参考文献]

[1]黄欣,江河滕,罗澍忻,等.考虑火电与储能的广域分层协

- 调精细化规划方法[J].电网与清洁能源,2026,42(1):22-33.
- [2]丁文斌,汪昱煜,李昱彤,等.移动储能在火电深度调峰应用中的经济性探讨[J].科技与创新,2026,11(1):53-56.
- [3]秦建军,赵佳,李颖.新能源背景下储能参与火电调峰及配置方式研究[J].科技创新与应用,2026,16(1):151-154.
- [4]王天宇,张江丰,尹昊蕊,等.基于自适应马尔科夫功率预测的混合储能辅助火电机组 AGC 随机模型预测控制[J].热力发电,2026,55(2):147-157.
- [5]张小科,张少锋,尤顺,等.混合储能辅助火电机组 AGC 调频优化配置双层模型[J].储能科学与技术,2026,16(1):1-4.
- [6]胡涛,闫志彬,齐屹,等.电能量-调频-惯量联合市场下电化学储能构网型改造策略[J].电力建设,2026,47(3): 170-184.
- [7]李帆,盛锴,王志杰.基于自适应模糊控制的火-储联合调频协调控制方法[J].湖南电力,2026,46(1):90-97.
- [8]祁艳超,洪文鹏.集成熔盐储能的亚临界火电机组热力学性能及经济性研究[J].工程热物理学报,2026,47(2): 412-425.
- [9]范乐,范旭刚,兀鹏越,等.混合储能辅助火电机组调频技术应用研究[J].河南科学,2026,44(1):79-87.
- [10]洪烽,梁璐,逢亚蕾,等.基于自适应协同下垂的飞轮储能联合火电机组一次调频控制策略[J].热力发电,2023,52(1):36-44.
- 作者简介:郝连庆(1991.2—),毕业院校:青岛大学,所学专业:电气工程及其自动化专业,当前就职单位:大唐鲁北发电有限责任公司,职务:生产高级主管,职称级别:工程师。