

火力发电厂一次调频优化技术探析

郑帅

商丘裕东发电有限责任公司

DOI:10.12238/etd.v6i8.17127

[摘要]火力发电厂一次调频是保障电网频率稳定的关键环节。本文从物理机制与性能评价指标出发,分析了传统PID控制响应滞后、调频与AGC协调不足、高比例新能源接入挑战等局限性。针对上述问题,提出控制策略优化、设备系统改造、新能源互补调频三大技术路径,并进一步提出分层控制架构、大数据预测调频策略及政策市场化支持等应对策略,旨在提升调频性能与经济性,适应新型电力系统需求。

[关键词]火力发电厂;一次调频;优化技术

中图分类号:TM621.3 文献标识码:A

Analysis of Primary Frequency Regulation Optimization Technology in Thermal Power Plants

Shuai Zheng

Shangqiu Yudong Power Generation Co., Ltd.

[Abstract] Primary frequency regulation in thermal power plants is a critical component for ensuring grid frequency stability. Starting from the physical mechanisms and performance evaluation indicators, this paper analyzes the limitations of traditional PID control, such as response lag, insufficient coordination between frequency regulation and AGC, and challenges posed by high penetration of new energy sources. To address these issues, three technical pathways are proposed: optimization of control strategies, equipment and system upgrades, and complementary frequency regulation with new energy sources. Furthermore, strategies such as hierarchical control architecture, big data-based predictive frequency regulation, and policy and market support are suggested. The aim is to enhance frequency regulation performance and economic efficiency, meeting the demands of the new power system.

[Key words] Thermal Power Plant; Primary Frequency Regulation; Optimization Technology

引言

随着电网负荷波动加剧及新能源大规模接入,火力发电厂一次调频面临响应速度不足、协调性差、调节能力受限等挑战。传统调频技术难以满足高比例新能源场景下的频率稳定需求,亟需通过控制算法升级、设备改造及多能互补协同等手段提升调频性能。本文系统梳理一次调频技术原理与现存问题,探讨优化路径及实施策略,为火力发电厂调频技术升级提供理论支持与实践参考。

1 火力发电厂一次调频基本原理

1.1 一次调频的物理机制

火力发电厂一次调频是指当电网频率偏离额定值时,发电机组凭借自身调速系统的惯性自动调整输出功率,以维持电网频率稳定的过程,其核心物理机制基于机组的转速-功率特性。电网频率与发电机组转速存在严格的正比关系,额定频率对应额定转速,当电网负荷增加时,电网频率下降,发电机组转速随之降低;当电网负荷减少时,电网频率上升,发电机组转速相应升

高。调速系统中的调速器能实时监测转速变化,通过改变汽轮机进汽量或水轮机进水量,调整原动机输出功率^[1]。以汽轮发电机组为例,转速下降时,调速器使高压调节汽门开大,增加进汽量,提高汽轮机功率,进而提升发电机输出功率,弥补电网负荷缺口;转速上升时,调节汽门关小,减少进汽量,降低功率,平衡电网多余负荷。

1.2 一次调频性能评价指标

火力发电厂一次调频性能评价指标体系围绕响应速度、调节能力和稳定性三大核心构建,各指标从不同维度反映机组调频效果。调频响应速度主要通过响应时间衡量,指电网频率偏离额定值到机组输出功率开始变化的时间间隔,行业通常要求该时间不超过3秒,快速响应能及时抑制频率波动扩散。调节能力通过调频幅度和调频深度体现,调频幅度是机组实际输出功率的最大变化量,调频深度则是幅度与机组额定功率的比值,其值越大说明机组应对负荷波动的能力越强。稳定性指标包括调节时间和超调量,调节时间是功率调整至稳定值所需时间,超调量

是功率超过目标值的最大幅度,两者直接影响电网频率的波动幅度和恢复速度。

2 火力发电厂现有调频技术的局限性

2.1 传统PID控制策略的响应滞后问题

传统PID控制策略在火力发电厂一次调频中存在显著的响应滞后问题,根源在于其控制逻辑对机组复杂动态特性的适应性不足。火力发电机组是典型的多变量、大惯性、强耦合系统,从调节汽门开度变化到发电机输出功率变化,需经历蒸汽压力传递、汽轮机转速变化、发电机电磁转换等多个环节,每个环节都存在一定的时间延迟。传统PID控制参数通常基于稳态工况整定,采用固定的比例、积分、微分系数,无法根据机组负荷、蒸汽参数等运行工况的变化实时调整。当电网频率突然波动时,固定参数的PID控制器难以快速响应,导致调节汽门动作滞后,功率调整无法及时跟进频率变化。例如,低负荷工况下,锅炉燃烧稳定性下降,蒸汽压力波动较大,传统PID控制易出现调节过度或不足的情况,进一步加剧响应滞后。

2.2 调频与AGC(自动发电控制)的协调性不足

火力发电厂调频与AGC的协调性不足是现有技术的突出局限性,两者控制目标的差异和控制逻辑的独立运行是主要原因。调频以快速平抑电网频率波动为目标,要求机组功率快速变化;AGC则以跟踪电网调度计划、维持区域间功率平衡为目标,强调功率调整的平稳性和经济性,两者在控制优先级和调节速度上存在天然矛盾。现有系统中,调频和AGC多采用独立的控制模块,缺乏统一的协调机制,当两者同时发出调节指令时,易出现指令冲突^[2]。例如,调频要求机组快速增加功率以抑制频率下降,而AGC可能因调度计划要求机组降低功率,导致调节指令相互干扰,使机组功率频繁波动,既影响调频效果,又增加机组设备损耗。此外,AGC指令的调整周期通常为几十秒至几分钟,而调频响应需在几秒内完成,这种时间尺度的差异导致AGC无法及时适应调频后的功率状态,易出现调频结束后功率回退过快的情况。

2.3 高比例新能源接入对调频能力的挑战

高比例新能源接入给火力发电厂调频能力带来严峻挑战,核心问题在于新能源发电的间歇性和波动性导致电网负荷波动加剧,而传统火电机组调频储备和响应能力难以匹配。风电、光伏等新能源发电依赖自然条件,输出功率易受风速、光照等因素影响,短时间内可能出现大幅波动,这种波动通过电网传递后,会使电网频率波动频率和幅度显著增加,对一次调频的响应速度和调节精度提出更高要求。同时,新能源发电机组多采用电力电子变流器并网,其惯量远低于传统火电机组,无法像火电机组那样通过自身惯量提供天然的调频支撑,导致电网整体惯量下降,频率调节能力弱化,进一步增加火电机组的调频压力。传统火电机组的调频储备通常按常规负荷波动设计,高比例新能源接入后,负荷波动幅度超出原有储备范围,易出现调频能力不足的情况。

3 火力发电厂一次调频优化技术路径分析

3.1 控制策略优化

控制策略优化是提升火力发电厂一次调频性能的核心路径,通过引入先进控制算法替代传统PID控制,实现对机组动态特性的精准适配。模型预测控制是主流优化方向之一,该算法通过建立机组多变量动态模型,实时预测未来一段时间内的频率变化和功率响应,结合约束条件提前制定最优调节方案,有效弥补传统PID控制的滞后缺陷。模糊控制技术通过模拟专家控制经验,将频率偏差、偏差变化率等参数模糊化处理,根据不同运行工况动态调整控制参数,增强对机组非线性、耦合特性的适应性,尤其在变负荷工况下能显著提升调节稳定性。另外,将PID控制与先进算法结合形成复合控制策略,如PID-模糊复合控制、PID-模型预测复合控制,既能保留PID控制的简洁性,又能发挥先进算法的优势。同时,通过构建多目标优化函数,综合考虑调频速度、稳定性、经济性等因素,使控制策略在满足调频需求的同时,降低机组煤耗和设备损耗,实现调频性能与运行经济性的协同提升。

3.2 设备与系统改造

设备与系统改造是提升一次调频能力的硬件保障,通过优化关键设备性能和完善系统架构,降低调节滞后并增强调节精度。在调速系统改造方面,将传统机械调速器或模拟电液调速器升级为数字电液调速系统,提升转速信号采集精度和调节指令执行速度,使调节汽门动作响应时间缩短至0.5秒以内^[3]。锅炉系统改造聚焦于增强燃烧稳定性和蒸汽参数调节能力,采用低氮燃烧器优化燃烧组织,配套升级给煤、给粉系统,实现给煤量的快速精确调整;优化汽包水位控制和过热汽温控制逻辑,减少功率调节过程中蒸汽参数的波动幅度。在机组协调控制系统改造中,增加调频优先级判断模块,当调频指令与AGC指令冲突时,自动按电网频率偏差程度调整指令权重,实现两者协调运行。通过加装高精度传感器和升级数据传输网络,提升频率、转速、功率等关键参数的采集和传输实时性,为控制策略的精准执行提供数据支撑,从硬件层面夯实调频性能提升的基础。

3.3 新能源互补调频技术

新能源互补调频技术通过构建火电机组与新能源发电系统的协同调频体系,破解高比例新能源接入下的调频难题,实现双方优势互补。该技术核心是建立火储新能源协同控制平台,将风电、光伏等新能源发电系统与火电机组、储能装置整合,形成多源协同调频单元。新能源发电系统的快速功率调节能力可弥补火电机组的响应滞后缺陷,例如光伏逆变器和风电变流器的功率调节响应时间可达到毫秒级,能快速平抑高频次的小幅频率波动;而火电机组则凭借稳定的调节持续性,承担低频次的大幅频率波动调节任务,保障调频的稳定性和持久性。储能装置在协同体系中发挥关键作用,当新能源功率过剩时,储能装置充电储存电能;当新能源功率不足或电网频率下降时,储能装置快速放电补充功率,有效平抑新能源功率波动对调频的影响。同时,通过先进的能量管理系统,实时分配各单元的调频任务,根据新能源出力、电网频率变化和火电机组状态,动态调整各单元的功率调节幅度和速度,实现整体调频性能的最优化。

4 应对策略

4.1 开发分层控制架构实现多目标优化

开发分层控制架构是实现一次调频多目标优化的有效应对策略,通过构建层级清晰、功能明确的控制体系,协调调频、AGC、经济性等多目标需求。该架构通常分为三层:底层为设备控制层,负责调速器、锅炉、发电机等关键设备的实时控制,采用快速响应算法确保设备动作的及时性和精确性,核心目标是快速响应频率波动;中层为协调控制层,作为核心层级,整合底层设备状态数据、电网频率数据和AGC指令,通过多目标优化算法权衡调频速度、AGC跟踪精度和机组运行经济性,制定最优功率调节指令并下发至底层,解决调频与AGC的指令冲突问题;顶层为决策管理层,基于电网调度需求、机组长期运行数据和市场信号,制定调频储备容量配置、控制参数优化方向等长期策略,为中层协调控制提供决策支持。各层级通过高速数据通信网络实现信息交互,底层实时上传设备状态,顶层定期下发优化目标,中层动态调整控制策略,形成闭环控制,确保在满足电网调频需求的同时,兼顾机组运行稳定性和经济性。

4.2 基于大数据的机组状态预测与调频策略动态调整

基于大数据的机组状态预测与调频策略动态调整策略,通过挖掘海量运行数据价值,提升调频决策的前瞻性和精准性。首先构建覆盖机组全流程的大数据采集体系,实时采集转速、功率、蒸汽压力、煤耗、新能源出力、电网频率等多维度数据,经清洗、整合后形成标准化数据集。利用机器学习算法建立机组状态预测模型,基于历史数据和实时工况,预测未来5-10分钟内机组功率调节能力、蒸汽参数变化趋势及可能出现的异常状态,提前识别调频风险。建立调频策略动态调整模型,将预测的机组状态、电网频率变化趋势与历史调频效果数据相结合,实时优化控制参数。例如,预测到电网频率将出现大幅下降且机组蒸汽压力充足时,提前增大调节汽门开度预存功率;预测到新能源出力将骤增时,提前降低火电机组功率,预留调频空间。另外,通过大数据分析不同工况下的调频效果,持续迭代优化预测模型和控制策略,使调频决策不断适应机组老化、工况变化等因素,提升长期调频性能。

4.3 政策支持与市场化机制完善(如调频辅助服务补偿)

政策支持与市场化机制完善是推动火力发电厂一次调频技术升级的重要保障,通过构建良性激励机制,激发企业技术改造和优化运营的积极性。在政策支持方面,政府部门应出台针对性的技术标准和补贴政策,明确高比例新能源接入下火电机组调频性能的最低要求,对开展数字电液调速系统改造、新能源协同调频等技术升级的企业给予财政补贴或税收减免,降低改造成本^[4]。在市场化机制建设方面,核心是完善调频辅助服务补偿机制,建立基于调频性能指标的补偿标准,将响应时间、调节精度、稳定性等指标与补偿金额直接挂钩,对调频性能优异的机组给予更高补偿,充分体现“优质优价”。同时,扩大调频辅助服务市场参与范围,允许火储新能源协同单元、独立储能等主体参与市场竞争,通过市场竞争倒逼火电机组提升调频性能。建立调频服务交易平台,规范交易流程,保障市场主体的合法权益,形成“政策引导+市场激励”的双重驱动机制,推动火力发电厂主动投入一次调频技术升级,提升电网整体调频能力。

5 结束语

火力发电厂一次调频优化需兼顾技术升级与机制创新。通过控制策略迭代、设备系统改造及新能源协同,可显著提升调频响应速度与稳定性;而分层控制架构与大数据预测技术的应用,则进一步实现了多目标优化。未来,需依托政策引导与市场化补偿机制,激发企业技术改造动力,推动调频技术向智能化、协同化方向发展,为构建安全高效的新型电力系统奠定基础。

参考文献

- [1]董俞宏.火力发电厂一次调频优化技术探析[J].电力设备管理,2025(4):77-79.
- [2]任晓辰.火电机组一次调频和AGC原因与优化分析[J].集成电路应用,2021,38(03):116-117.
- [3]吴琼,潘宁.火电机组一次调频精细化控制策略[J].设备管理与维修,2020(21):116-119.
- [4]王玉国,李达.火力发电厂一次调频闭环控制策略研究与应用[J].机电信息,2023(5):4-6.