

燃机电厂电气系统中的电力负荷波动控制技术

朱智峰

华电福新广州能源有限公司 广东 广州 511340

摘要: 在电力系统向高比例可再生能源转型时, 燃机电厂是调峰保供核心电源, 其电气系统电力负荷波动控制能力关乎电网频率稳定与供电质量, 负荷波动会引发诸多问题, 严重时损坏设备或致电网解列。本文聚焦该控制技术, 先剖析负荷波动来源、数学特征及系统影响, 接着构建涵盖燃机本体调节等多维核心技术体系, 重点探讨智能算法设计应用, 提出优化方向与趋势, 为燃机电厂提升负荷波动适应性提供理论支撑, 保障其安全高效运行及电力系统灵活性。

关键词: 燃机电厂; 电力负荷波动; 动态响应控制

引言: 在“双碳”目标与新型电力系统建设背景下, 高比例可再生能源并网改变了电力系统运行特性, 燃机电厂凭借灵活调节优势成为电网调峰保供核心电源。其电气系统负荷波动控制能力至关重要, 但当前面临用户侧冲击、新能源出力波动及厂内扰动的多重挑战, 威胁设备与电网安全。本文从波动特性、技术体系、智能算法等维度展开研究, 为提升机组负荷适应性提供理论支撑。

1 燃机电厂电气系统负荷波动特性分析

1.1 负荷波动来源

燃机电厂电气系统负荷波动来源具有多元性, 可分为外部电网扰动与内部运行扰动两大类。外部扰动中, 最主要的是用户侧用电需求的实时变化, 如工业企业大型电机启停、商业综合体空调系统切换等, 这类负荷变化具有突发性与短时冲击性, 峰值电流可达额定值的1.5-2倍。其次, 电网侧接入的风电、光伏等可再生能源出力波动通过并网线路传递至燃机电厂, 此类波动具有间歇性与随机性, 波动幅度随天气条件动态变化。内部扰动则源于电厂自身运行过程, 包括燃机燃料压力波动导致的出力波动、发电机励磁系统参数漂移、辅助设备(如给水泵、风机)的启停操作等。此外, 电网故障后的恢复过程、继电保护装置的动作也可能引发负荷的瞬时波动。这些来源的波动相互叠加, 使燃机电厂电气系统负荷呈现复杂的多尺度波动特征。

1.2 波动数学模型构建

负荷波动数学模型的构建需基于实测数据与波动特性, 采用多时间尺度分解与概率统计相结合的方法。首先通过小波变换或经验模态分解(EMD)将负荷时间序列分解为长周期趋势分量、中周期波动分量与短周期冲击分量, 分别对应不同来源的波动。对于长周期趋势分量, 采用线性回归或ARIMA模型描述, 反映用户用电的

周期性变化; 中周期波动分量采用GARCH模型刻画其波动性聚集特征, 契合可再生能源出力波动规律; 短周期冲击分量则通过泊松过程与脉冲响应函数建模, 表征突发扰动的影响。同时, 引入状态空间方程构建负荷波动与燃机运行参数(转速、燃料量)、电网参数(电压、频率)的关联模型, 以状态向量包含负荷值、波动速率、设备运行状态等变量, 实现对波动过程的动态描述。模型参数通过最小二乘法或卡尔曼滤波算法进行辨识优化, 确保模型精度^[1]。

1.3 波动对系统的影响评估

负荷波动对燃机电厂电气系统的影响体现在设备运行、电网交互及供电质量三个层面。在设备层面, 频繁的负荷波动导致燃机转子承受交变应力, 加速金属疲劳, 缩短机组使用寿命; 发电机定子绕组电流的波动会引发铁芯磁滞损耗与涡流损耗增加, 导致设备温升超标, 绝缘老化速度加快。对于电网交互而言, 负荷波动通过并网接口传递至电网, 引发并网点电压与频率的偏离, 当波动幅度超过电网调度允许范围时, 可能触发并网保护装置动作, 导致电厂解列, 影响电网稳定运行。在供电质量方面, 负荷波动产生的谐波电流注入电网, 会干扰周边敏感用电设备(如精密仪器、PLC控制系统)的正常工作, 导致产品质量下降或设备误动作。此外, 波动还会增加电厂燃料消耗与运维成本, 降低机组运行经济性, 需通过定量评估(如电压偏差率、频率波动系数)明确影响程度, 为控制策略制定提供依据。

2 燃机电厂电力负荷波动控制核心技术体系

2.1 基于燃机本体的负荷调节技术

基于燃机本体的负荷调节技术是控制负荷波动的基础手段, 核心通过精准调控燃料供给与空气配比实现出力与负荷的动态匹配。该技术以燃机控制系统(TCS)为

核心,采用分级调节策略:当负荷出现小幅波动时,通过电液伺服阀调节燃料喷嘴的开度,改变进入燃烧室的燃料流量,调节精度可达0.1%额定燃料量,响应时间控制在100-300ms;当面临大幅负荷冲击时,系统同步调节压气机进口导叶(IGV)开度,优化空气流量与燃料的混合比,确保燃烧效率的同时提升出力调节范围,可实现额定负荷 $\pm 15\%$ 的快速调节。为避免调节过程中出现超调或振荡,采用PID与前馈控制相结合的算法,前馈信号取自负荷波动预测值,提前修正调节指令。同时,通过监测燃机排气温度、转子振动等参数构建约束条件,防止调节动作对设备造成损伤,保障机组安全。

2.2 电气系统侧负荷波动抑制技术

电气系统侧负荷波动抑制技术通过配置专用补偿装置,在负荷波动传递路径上实现主动抑制,与燃机本体调节形成互补。目前主流技术包括静止同步补偿器(STATCOM)与飞轮储能系统协同运行模式:STATCOM通过电力电子变流器快速输出无功功率,在20-50ms内平抑负荷波动引发的电压波动,维持并网点电压稳定在 $\pm 2\%$ 额定电压范围内;飞轮储能系统则针对有功功率波动,当负荷突增时快速释放动能转化为电能补充出力,负荷突减时吸收多余电能储存,响应时间小于10ms,储能容量可根据波动幅度配置为机组额定功率的5%-10%。此外,部分电厂采用超导磁储能(SMES)技术,利用其高功率密度与快速响应特性,抑制高频次、小幅度的负荷波动^[2]。这些装置通过协调控制单元与电厂主控制系统通信,实现与燃机调节的无缝衔接,提升整体波动抑制效果。

2.3 基于预测的超前控制技术

基于预测的超前控制技术通过提前获取负荷波动信息,将控制时机从“被动响应”转变为“主动预判”,大幅提升控制精度。该技术的核心是构建多源预测模型,整合三类输入信息:一是通过电网调度系统获取未来15分钟-2小时的负荷预测曲线,明确中长周期波动趋势;二是利用电厂内部传感器实时采集负荷、电压、频率等参数,通过时序分析预测未来1-10秒的短期波动;三是结合气象数据(风速、光照)预测可再生能源并网带来的波动。预测模型采用深度学习算法(如LSTM),通过历史数据训练优化,短期预测误差可控制在3%以内,中长周期预测误差小于5%。预测结果输入燃机与电气侧控制系统后,提前生成调节指令,如预判负荷将突增时,提前小幅增加燃料供给与储能系统预充电,使系统在波动发生前处于预备状态,有效减小波动引发的参数偏差,降低调节过程中的能量损耗。

2.4 智能化协同控制技术

智能化协同控制技术打破燃机本体调节与电气侧抑制的独立运行模式,通过构建统一的控制平台实现多设备、多目标的协同优化。该技术以工业互联网平台为载体,接入燃机控制系统、储能装置、STATCOM、电网调度系统等多源数据,采用分层控制架构:底层为设备控制层,负责执行具体调节指令;中层为协调控制层,基于负荷波动状态与设备运行约束,分配各装置的调节任务,如小幅波动优先由储能系统抑制,大幅波动则启动燃机调节与储能协同;顶层为优化决策层,以“频率稳定、能耗最低、设备损耗最小”为多目标,通过粒子群优化(PSO)算法生成最优控制策略。系统具备自学习能力,通过不断积累运行数据优化协调规则,适应不同波动场景。同时,引入数字孪生技术构建设备虚拟模型,模拟不同控制策略的效果,为实际控制提供参考,提升协同控制的可靠性。

3 智能控制算法设计与优化

3.1 模型预测控制(MPC)应用

模型预测控制(MPC)凭借其处理多约束、多变量系统的优势,成为燃机电厂负荷波动控制的核心算法之一。其应用过程分为三个关键步骤:首先建立燃机电厂电气系统的预测模型,包含燃机燃料-出力特性、储能装置充放电特性、电网接口特性等,以状态空间方程形式描述系统动态行为;其次确定优化目标函数,综合考虑负荷跟踪误差、燃料消耗、设备调节量等指标,如目标函数为“最小化负荷偏差平方和+加权燃料成本+调节量惩罚项”;最后在每个控制周期内,通过滚动优化求解未来一段时间的最优控制序列,仅执行当前时刻指令,下一周期重新基于新的测量数据优化。针对燃机系统的非线性特征,采用非线性MPC(NMPC)算法,通过序列二次规划(SQP)求解优化问题,控制周期设为50ms,可有效处理负荷波动中的非线性耦合问题,使负荷跟踪精度提升20%以上^[3]。

3.2 强化学习(RL)优化

强化学习(RL)通过智能体与环境的交互试错实现控制策略优化,特别适用于负荷波动这类动态复杂场景。在燃机电厂负荷控制中,RL的应用框架为:将负荷波动状态(波动幅度、速率)、设备运行状态(燃机转速、储能SOC)作为环境状态输入;将燃机燃料调节量、储能充放电功率等作为智能体的动作输出;以“负荷跟踪精度高、设备损耗小、能耗低”为奖励信号,设计奖励函数,如负荷偏差越小、调节动作越平缓,奖励值越高。采用深度强化学习算法(如DQN、PPO)训练智能体,利用历史运行数据与仿真数据构建训练环境,通过数百万次

迭代优化使智能体掌握不同波动场景下的最优控制策略。与传统PID控制相比,RL优化后的策略在应对随机负荷波动时,调节超调量降低30%,响应速度提升15%,且能自适应不同运行工况的变化,具备较强的鲁棒性。

3.3 混合算法实现

混合算法凭借融合不同算法独特优势的方式,有效弥补了单一算法存在的不足,进而达成更为理想的负荷波动控制成效。当前,在众多混合算法中,“MPC+RL”混合算法与“PID+LSTM+模糊控制”混合算法应用极为广泛。在“MPC+RL”混合算法体系里,模型预测控制(MPC)主要承担处理中长周期确定性负荷波动的任务。它依据预先构建的精准预测模型,生成基础性的调节指令,为系统的稳定运行奠定基础。而强化学习(RL)则聚焦于短期随机波动以及系统非线性扰动,通过与系统实时交互,不断调整控制指令,使得系统在面对确定性与随机性波动场景时,都能展现出良好的性能表现,确保电力系统的平稳运行。“PID+LSTM+模糊控制”混合算法中,长短期记忆网络(LSTM)模型发挥其强大的预测能力,精准预测负荷波动趋势,为比例-积分-微分(PID)控制器提供前馈修正信号。模糊控制则依据负荷波动幅度以及设备运行状态,动态灵活地调整PID参数,有效解决了传统PID因参数固定而导致的调节性能不足问题。混合算法通过实时数据分配单元精准判断波动类型,自动切换主导控制算法。在实际电厂的应用中,相较于单一MPC算法,其负荷波动控制误差显著降低25%,设备调节次数也减少18%,极大地提升电力系统的稳定性和运行效率。

4 负荷波动控制技术的优化策略与未来展望

4.1 现有控制技术的优化方向

现有负荷波动控制技术的优化需围绕“精度提升、成本降低、可靠性增强”三个核心目标展开。在硬件优化方面,针对储能装置,研发高能量密度、长寿命的新型储能材料(如固态电池、高温超导材料),降低储能系统的占地面积与运维成本;优化电力电子变流器拓扑结构,提升STATCOM与储能装置的功率转换效率,减少能量损耗。在控制算法优化方面,引入迁移学习技术,将成熟电厂的RL控制模型快速迁移至新电厂,缩短算法训练周期;融合数字孪生与实时仿真技术,构建更精准的系统模型,提升MPC与混合算法的预测精度。在系统集成优

化方面,加强与电网调度系统的信息交互,接入更广范围的负荷与新能源出力数据,实现厂网协同控制;建立设备健康管理模块,将控制策略与设备寿命预测相结合,避免过度调节导致的设备损耗^[4]。

4.2 未来发展趋势

未来燃机电厂负荷波动控制技术将呈现“智能化、协同化、绿色化”的发展趋势。智能化方面,人工智能技术的深度应用将实现控制策略的自进化,如基于大语言模型整合运维经验与控制知识,提升算法的决策能力;边缘计算技术的部署使控制指令在设备端本地执行,降低数据传输延迟,提升高频波动的控制效果。协同化方面,将从厂内设备协同向“多电厂-电网-用户”的全域协同发展,通过虚拟电厂(VPP)技术整合多个燃机电厂与分布式能源,实现区域级负荷波动的集中调控;与用户侧需求响应系统联动,引导用户错峰用电,从源头减少负荷波动。绿色化方面,控制策略将融入碳减排目标,在调节过程中优先考虑燃料燃烧效率,减少碳排放;研发低碳储能技术(如氢能储能),实现负荷控制与低碳发展的协同推进,助力“双碳”目标达成。

结束语:

电力负荷波动控制是燃机电厂适应新型电力系统的核心技术,关乎机组安全、电网稳定及能源效率。本文梳理了燃机电厂电气系统负荷波动特性,构建了涵盖本体调节等多方面的核心技术体系,探讨智能算法设计应用,指明技术优化方向与趋势。负荷波动控制技术发展呈现智能化、系统化变革。面对高比例可再生能源并网挑战,未来要加强多学科融合、协同创新及厂网协同,通过技术与管理优化提升负荷适应力,保障新型电力系统建设。

参考文献:

- [1]施凯.燃机电厂电气系统中的电力负荷波动控制技术[J].电气时代,2025(7):39-42.
- [2]刘景勇.关于电厂电气设备的安全运行管理与维护探讨[J].中小企业管理与科技,2020,000(010):19-20.
- [3]谢毅.燃机电厂电气设备安全运行与维护技术探析[J].电力设备管理,2025,(04):246-248.
- [4]马先松.基于燃机电厂热工系统的节能减排技术研究与应用[J].电气技术与经济,2024,(05):144-146.