

火电厂与光伏发电 / 储能系统联合调频策略研究

刘旺¹ 岑凤青² 郝玲霞³

1. 北方魏家峁煤电有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010308

2. 中国移动通信集团内蒙古有限公司呼和浩特分公司 内蒙古 呼和浩特 010011

3. 蒙牛乳业总部 内蒙古 呼和浩特 011517

摘要: 文章聚焦火电厂与光伏发电/储能系统联合调频策略研究。分析了火电厂、光伏发电、储能系统的调频特性,指出各自优缺点。接着设计联合调频系统架构,涵盖总体架构、子系统功能模块及通信与监控系统。提出了基于分层控制、多目标优化、考虑光伏出力不确定性的联合调频策略。最后通过建模与仿真分析,从多维度对比联合调频与单一火电厂调频性能,验证联合调频在提升调频性能、降低成本等方面的优势。

关键词: 火电厂; 光伏发电; 储能系统; 联合调频

引言

本文针对火电厂调频响应慢、光伏出力波动大等问题,提出火电-光伏-储能联合调频架构与分层多目标优化策略,通过仿真验证其在响应速度、精度及经济性上的显著优势。

1 火电厂、光伏发电与储能系统调频特性分析

火电厂、光伏发电与储能系统在调频特性上存在显著差异。火电厂作为传统调频主力,依赖锅炉-汽轮机系统的惯性响应,一次调频响应时间约15秒,二次调频通过AGC指令调节,但存在调节速率慢、稳态误差大等问题。光伏发电因出力受光照强度波动影响,具有间歇性特征。其调频通过逆变器实现,当频率下降时减少输出功率以支撑系统,但响应速度受限于逆变器控制精度,且无法主动提供有功支撑。储能系统凭借毫秒级响应速度和双向调节能力,成为调频领域的关键技术。锂电池储能系统可在1秒内完成充放电切换,响应时间 $< 100\text{ms}$,调节精度误差 $< 1\%$ 。通过参与一次调频(下垂控制)和二次调频(AGC指令跟踪),可显著提升系统稳定性^[1]。例如,山西30MW/15MWh储能电站日均调频里程提升30%,澳大利亚Hornsedale项目降低频率波动40%。储能系统还能通过虚拟同步机技术模拟传统机组惯性,增强电网抗扰动能力,成为高比例新能源电网中不可或缺的调频资源。

2 火电厂与光伏发电/储能系统联合调频系统架构设计

2.1 联合调频系统总体架构

联合调频系统采用“分层管控+分布式执行”架构,分调度决策层、协调控制层和设备执行层,形成闭环管控。调度决策层接收电网调频指令,结合频率偏差、负荷需求等实时数据,用多源数据融合算法分析各单元调

节潜力,制定全局调频功率分配方案,确保调频性能最优。协调控制层是核心中间层,接收功率分配指令并分解为具体调节指令,实时采集各单元运行状态数据,如火电机组进汽量、光伏辐照度等,通过动态协调算法调整指令参数,解决调节延迟、速度不匹配问题。设备执行层由火电机组等设备组成,按指令完成功率调节,反馈运行状态和功率数据。

2.2 子系统功能模块设计

联合调频系统含火电厂、光伏发电、储能三个核心子系统。火电厂子系统有负荷调节、运行监测、效率优化模块,负荷调节改变发电功率,运行监测判断机组状态,效率优化降低煤耗或气耗。光伏发电子系统有最大功率跟踪、调频控制、出力预测模块,非调频时段最大化出力,调频时段预留调节裕量,采用特定算法实现快速调节,提前预测出力。储能子系统有充放电控制、SOC管理、安全保护模块,充放电控制实现快速切换,SOC管理维持最优区间,安全保护监测参数,异常时切断回路保障安全。各子系统通过功能模块拆分实现专业化管控。

2.3 通信与监控系统设计

通信与监控系统采用“有线+无线”冗余架构和集中式监控平台。通信系统分内部和外部,内部用工业以太网和CAN总线,工业以太网用于大数据量传输,延迟低;CAN总线用于控制指令传输,抗干扰强。外部通过光纤专线连接电网调度中心,配备4G/5G无线备份。监控系统用集中式SCADA平台,集成多种功能,通过分布式IO模块采集参数,频率高^[2]。平台有可视化界面,参数越限或设备故障时触发报警,记录信息并生成诊断报告,辅助运维。还支持历史数据查询和趋势分析,为调频策略优化提供依据。

3 火电厂与光伏发电/储能系统联合调频策略研究

3.1 基于分层控制的联合调频策略

基于分层控制的联合调频策略按照“全局优化-局部协调-个体执行”的逻辑分层实现调节,通过层级间的协同配合提升系统调频性能。上层为全局优化层,以电网频率偏差最小化和调节成本最低化为目标,建立含约束条件的优化模型,约束条件包括火电机组调节速率上限、光伏出力预测区间、储能SOC范围等,采用粒子群优化算法求解最优功率分配方案,将总调频功率分解为火电厂基础调节功率、储能瞬时补偿功率和光伏辅助调节功率。中层为局部协调层,针对各子系统调节特性差异进行动态协调,当电网出现瞬时频率波动(波动幅度 $>0.2\text{Hz}$)时,优先调用储能系统释放瞬时功率,响应时间控制在0.5秒内,快速平抑波动;当频率波动趋于稳定但仍存在偏差时,启动火电厂进行功率调节,逐步承接基础调节任务,同时根据光伏实时出力调整其辅助调节幅度。下层为个体执行层,各子系统根据协调指令采用专用控制算法执行调节,火电厂采用PID+前馈控制算法消除调节延迟,光伏系统采用改进下垂控制算法提升调节精度,储能系统采用模型预测控制算法优化充放电曲线。该策略通过分层分工实现优势互补,既利用储能快速响应特性应对瞬时波动,又依托火电厂稳定出力特性保障持续调节,同时融入光伏出力提升经济性。

3.2 基于多目标优化的联合调频策略

基于多目标优化的联合调频策略以调频效果、经济性和环保性为三大核心目标,通过权重分配和优化算法实现多目标平衡。建立多目标优化函数,调频效果目标采用频率偏差积分值(IAE)衡量,目标值控制在 $0.5\text{Hz}\cdot\text{s}$ 以内;经济性目标以单位调频成本最低为准则,涵盖火电厂燃料成本、储能充放电损耗成本和光伏运维成本;环保性目标以碳排放量最低为指标,重点降低火电厂燃煤或燃气排放。采用层次分析法确定各目标权重,电网负荷高峰期调频需求迫切,调频效果权重设为0.5,经济性和环保性各设为0.25;负荷低谷期调频需求降低,经济性权重提升至0.4,调频效果和环保性各设为0.3。通过非支配排序遗传算法(NSGA-III)求解优化模型,得到Pareto最优解集中的最优功率分配方案。在执行过程中,实时监测各目标实现情况,当频率偏差超过阈值时,动态提升调频效果权重;当燃料价格上涨时,增加经济性权重调整功率分配。

3.3 考虑光伏出力不确定性的联合调频策略

考虑光伏出力不确定性的联合调频策略采用“预测-补偿-鲁棒控制”的三级机制,应对光伏出力波动对调频

效果的影响。首先通过组合预测模型提升光伏出力预测精度,融合基于历史数据的时间序列模型、基于气象数据的物理模型和基于实时数据的卡尔曼滤波修正模型,实现短期(15分钟-1小时)出力预测误差控制在8%以内,超短期(1-15分钟)预测误差控制在5%以内,为调度决策提供可靠依据。基于预测结果预留调节裕量,当预测光伏出力处于高波动区间(波动幅度 $>10\%/10\text{分钟}$)时,将储能SOC维持在50%-80%的较高区间,预留更多放电裕量,同时让火电厂保持10%-15%的额定功率调节裕量,避免因光伏出力突降导致调频能力不足^[3]。采用鲁棒控制算法实现实时补偿,通过滑模控制跟踪实际调频功率与指令功率的偏差,当光伏出力实际值与预测值出现偏差时,立即调整储能和火电厂的调节幅度,例如光伏出力突降10%时,储能在0.5秒内释放对应功率,火电厂在30秒内逐步承接部分调节功率,确保总调频功率满足指令要求。另外,建立不确定性评估指标体系,实时量化光伏出力波动风险,动态调整裕量预留比例,提升系统应对不确定性的能力。

4 联合调频系统建模与仿真分析

4.1 联合调频系统数学模型建立

联合调频系统数学模型通过子系统建模和耦合关系建模,构建反映系统动态调节特性的整体模型。火电厂模型采用三阶非线性模型,包含锅炉、汽轮机和发电机三个子模块,锅炉模块以燃料量为输入,蒸汽压力为输出,模型方程考虑燃料燃烧延迟和蒸汽传输延迟,蒸汽压力变化率与燃料量和蒸汽消耗量的差值成正比;汽轮机模块以蒸汽压力为输入,机械功率为输出,通过阀门流量特性方程描述进汽量与机械功率的关系,引入摩擦和阻尼系数反映机械损耗;发电机模块将机械功率转换为电功率,考虑转子惯性和阻尼特性,通过swing方程描述转速与电功率的关系。光伏发电模型采用含光照扰动的出力模型,以辐照度、温度为输入,通过光伏阵列数学模型计算最大输出功率,结合调频控制算法模型,输出实际调频功率,引入高斯噪声模拟辐照度随机波动。储能系统模型采用等效电路模型,锂电池模型考虑欧姆内阻、极化电阻和电容,通过状态方程描述SOC变化与充放电电流的关系,结合充放电控制模型输出调节功率;变流器模型采用PWM控制模型,描述指令功率到实际输出功率的转换过程。耦合模型考虑各子系统功率交互关系,总输出功率为火电厂、光伏和储能输出功率的代数和,同时引入频率反馈模型,将电网频率偏差反馈至各子系统控制端,形成闭环调节。

4.2 仿真平台搭建与参数设置

仿真平台基于MATLAB/Simulink搭建,集成各子系统模型和耦合模块,形成完整的联合调频仿真环境。平台包含数据输入模块、模型运算模块、结果输出模块和可视化分析模块,数据输入模块可导入电网负荷曲线、辐照度时序数据、调频指令信号等输入数据,支持CSV和MAT格式数据导入;模型运算模块采用固定步长求解器,步长设置为1ms,确保捕捉快速动态响应过程;结果输出模块可导出频率偏差、各子系统功率输出、SOC变化等关键数据;可视化分析模块实时显示频率曲线、功率分配曲线等动态曲线。参数设置基于实际设备参数和行业标准,火电厂选用300MW燃煤机组参数,汽轮机调节延迟30秒,调峰速率3%/分钟,锅炉蒸汽压力时间常数60秒;光伏发电系统容量100MW,光伏阵列开路电压800V,短路电流500A,辐照度基准值1000W/m²,温度基准值25℃,预测误差设置为5%-8%;储能系统选用100MWh锂电池储能,额定充放电功率50MW,SOC初始值50%,充放电效率90%,内阻0.01Ω;电网参数设置为额定频率50Hz,频率偏差阈值±0.2Hz,转动惯量10kg·m²,阻尼系数0.5N·m·s/rad。此外,设置不同仿真场景参数,包括额定负荷、负荷突变(±10%额定负荷)、辐照度突变(±20%基准值)等场景,用于测试系统在不同工况下的性能。

4.3 仿真结果与分析

仿真结果从调频响应速度、调频精度、经济性和稳定性四个维度进行分析,对比联合调频与单一火电厂调频的性能差异。在负荷突变+10%额定负荷场景下,联合调频系统频率最低值为49.85Hz,频率恢复至49.9Hz的时间为20秒,而单一火电厂调频系统频率最低值为49.7Hz,恢复时间为45秒,表明储能系统的快速响应有效提升了调频响应速度,缩短了频率恢复时间。调频精度方面,联合

调频系统频率偏差积分值(IAE)为0.3Hz·s,调节误差最大为0.15Hz,单一火电厂调频IAE为0.8Hz·s,误差最大为0.3Hz,得益于光伏和储能的协同补偿,联合调频精度显著提升。经济性分析显示,联合调频系统单位调频成本为0.8元/(kW·h),较单一火电厂调频(1.2元/(kW·h))降低33.3%,因为光伏出力替代了部分火电厂出力,减少了燃料消耗,同时储能的快速调节降低了火电厂深度调频的效率损失。稳定性方面,在辐照度突变±20%场景下,联合调频系统频率波动幅度控制在±0.1Hz以内,SOC维持在30%-70%区间,而单一光伏调频系统频率波动幅度达±0.3Hz,无法稳定运行,证明联合系统通过火电厂和储能的补偿作用,有效抑制了光伏出力不确定性带来的影响,提升了系统运行稳定性。

结束语

火电厂与光伏发电/储能系统联合调频是应对高比例新能源电网调频需求的有效途径。本文通过深入分析调频特性、设计系统架构、提出多种联合调频策略并进行建模仿真,验证了联合调频在提升调频响应速度、精度、经济性和稳定性方面的显著效果。未来,随着新能源占比的进一步提高,需持续优化联合调频策略,加强系统协同控制,以更好地保障电网安全稳定运行,推动能源清洁低碳转型。

参考文献

- [1]王伟胜,刘纯,董存.高比例新能源电力系统频率特性分析与调频机制研究[J].中国电机工程学报,2022,42(1):1-12.
- [2]陈永华,李军徽,刘念.储能系统参与电力系统调频的控制策略研究综述[J].电力系统自动化,2021,45(10):186-195.
- [3]王兴兴,孙建桥,陈明.储能火电联合调频系统设计与研究[J].华电技术,2020,42(4):72-76.