

局域电网风光火储一体化综合发电系统 协调控制技术策略分析

贾 浩

宁夏天元热电联产有限公司 宁夏 中卫 750001

摘要: 本文研究局域电网内稳定的负荷消纳, 通过配置可再生能源发电, 讨论风光火储一体化综合发电系统协调控制技术策略分析, 构建基于状态预评估的微网-公网非瞬时切换机制, 结合改进型下垂控制与储能紧急支撑保障策略, 重点分析源网荷储协同调度、孤网非瞬时切换稳定性控制、风光火储火电调峰协同及稳定负荷动态平衡四方面。通过实时负荷预测与多能流分层控制实现风光火储互补调峰; 孤网平稳过渡; 建立可再生能源优先消纳与火电灵活调峰联动策略, 提升系统功率动态平衡能力; 采用需求侧响应与储能辅助调节技术, 实现稳定负荷与间歇性能源的实时匹配。研究成果为同类局域电网构建“火电基荷支撑+风光储灵活调节”的协同控制体系提供技术方案, 助力高比例可再生能源接入下的系统安全运行与调峰能力提升。

关键词: 源网荷储; 区域孤岛电网; 风光火储一体化; 稳定的负荷消纳

引言: 随着能源转型深入推进, 打造具有创新示范效益的新型电力系统, 局域电网风光火储一体化综合发电系统, 对于支撑新型电力系统, 降低电力生产成本, 降低碳排放具有重要作用, 同时为解决可再生能源消纳问题提供重要途径。此类系统集成风能、太阳能、常规火电与储能设备, 通过协调控制实现多能互补、提升系统稳定性。然而能源种类多样性、间歇性等特点带来诸多技术挑战^[1]。本文围绕源网荷储协同控制、孤网运行优化、风光火储协调控制等关键问题, 系统分析各环节控制策略与技术方案, 期望能够提升局域电网运行效率、经济性与可靠性, 促进可再生能源高比例接入与消纳, 助力能源系统低碳转型。

1 源网荷储协同控制策略

1.1 实时负荷预测策略

实时负荷预测是源网荷储协同控制核心环节, 直接影响电力系统经济调度与安全运行^[2]。基于历史数据挖掘与智能算法结合建立预测模型, 能够有效捕捉负荷变化规律, 预测方法主要包括时间序列分析、机器学习算法等, 其中长短期记忆网络结合注意力机制展现出优异性能, 能够同时考虑负荷历史变化趋势与外部因素影响。

精细化分类预测策略能够进一步提升准确性, 将负荷分为基础负荷、波动负荷与突发负荷, 针对性构建预测模型。通过滚动更新机制持续优化预测结果, 实时纳入最新信息, 动态调整预测参数; 与此同时结合概率预测方法, 输出负荷概率分布而非确定值提供决策依据。

1.2 能量流平衡策略

能量流平衡策略以多能互补为核心, 构建兼顾稳态供需与暂态功率实时匹配的协调机制^[3]。通过多能流耦合建模, 精准描述火电-新能源发电-储能能量转换关系, 实现全场景能量流全局优化, 既保障常规运行下的电量平衡, 更强化故障扰动、负荷突变等暂态过程的快速响应能力。

采用多时间尺度分层控制架构: 日前/日内基于风光负荷预测制定预调度计划, 预留储能调节裕度与火电备用容量; 实时层依托高速测量与快速控制技术, 毫秒级捕捉功率波动, 通过虚拟同步机技术赋予可再生能源与储能装置同步机惯量特性, 快速抑制频率变化率(ROCOF)与电压偏差。建立边际成本与暂态安全双约束分配机制, 优先消纳低成本可再生能源, 同时设定暂态功率平衡阈值, 动态协调火电与储能出力——如光伏骤降时, 储能10ms内补偿功率缺口, 火电机组同步提升负荷速率, 确保暂态频率偏差 $\leq \pm 0.2\text{Hz}$ 、电压波动 $\leq \pm 5\%$ 。

1.3 最优储能调度策略

最优储能调度策略通过合理规划储能容量配置及充放电过程, 协调系统运行提升经济效益与可靠性。多目标优化框架构成调度核心综合考虑经济性、可靠性等多维目标, 采用非劣排序遗传算法、多目标粒子群算法等求解最优调度方案。基于状态评估确定储能参与模式分为削峰填谷模式、功率平滑模式等, 根据系统状态智能切换实现储能价值最大化。

储能寿命管理策略纳入调度决策过程, 通过限制充

放电深度、避免频繁微幅充放电等措施延长使用寿命；要针对锂电池、铅酸电池以及压缩空气储能等不同技术特性，制定差异化调度策略。分层分布式调度架构解决计算复杂性问题，上层制定全局调度策略，下层执行局部优化决策；基于强化学习构建自适应调度策略，通过与环境交互不断优化决策模型，适应复杂多变工况。

2 孤网运行优化策略

2.1 微网切换策略

微网切换策略聚焦并网与孤网模式转换的可行性评估与过渡控制，构建基于状态判别的保障机制。通过电网状态监测系统实时评估电源容量、负荷特性及储能储备，建立切换条件综合判据，避免盲目切换导致系统失稳。

控制技术侧重孤网独立运行稳定性：通过改进型下垂控制算法实现微电源功率动态分配，结合虚拟阻抗技术抑制环流问题；建立稳定裕度评估模型，实时监测频率电压偏移，当出现异常时自动触发储能紧急功率支撑，确保孤网运行初期频率电压稳定。该策略聚焦可行性评估与独立运行控制，为微网安全过渡提供实用化解决方案。

2.2 短期功率平衡策略

短期功率平衡策略关注孤网状态下电力系统频率稳定与功率平衡维持机制，确保秒级至分钟级时间尺度系统稳定运行。基于分层控制架构构建功率平衡体系，一次调频依靠微电源下垂特性自主响应频率变化，二次调频通过中央控制器发出功率调整指令，恢复系统频率。下垂控制是基础调频方法，通过设定频率-功率特性曲线实现负荷按比例分配，但存在稳态频率偏差问题；而改进型下垂控制引入积分项消除频率静差，同时通过通信网络交换信息实现无偏分布式控制。

惯性控制与虚拟同步机技术为系统提供合成惯性与阻尼特性，抑制频率变化率，增强系统鲁棒性。旋转储能装置如飞轮能够提供天然惯性响应，静态储能装置如电池通过功率变换器控制策略模拟惯性特性；而基于状态估计预测控制方法考虑系统未来状态的演化，能够提前干预潜在失衡风险。

2.3 应急储能调度策略

应急储能调度策略着眼于电网紧急情况下储能资源快速响应与合理分配，构建多层次应急保障体系。分级响应机制根据事故严重程度划分为预警、一般、严重、特别严重四个等级，针对性启动相应应急预案；突发事件识别与分类方法结合阈值判断与模式识别技术，实现故障快速诊断与响应。关键负荷分级保障策略将负荷分为重要负荷、次要负荷与可中断负荷，明确保障优先

级，确保有限储能资源优先保障重要负荷供电。

快速功率注入技术利用储能响应速度优势，在毫秒级时间内提供紧急功率支撑，补偿功率缺口防止系统崩溃。容量预留策略确保储能装置始终保持一定比例容量用于应急响应，不参与常规经济调度；而基于风险评估优化储能容量分配，能够将系统可靠性提升收益与储能成本进行平衡。多类型储能协同策略结合超级电容器快速响应特性与电池持续供电能力，形成互补应急体系；自愈控制算法则在故障发生后自动隔离故障区域，重构网络拓扑快速恢复非故障区域供电。

3 孤网模式下的协调控制策略

3.1 可再生发电优先策略

可再生发电优先策略以最大化风能、太阳能等清洁能源利用率为核心目标，构建多维度优先消纳机制。优先调度框架赋予可再生能源最高调度优先级，通过定制化调度机制与政策激励推动清洁能源消纳。全景感知技术实现可再生能源出力精准预测，结合气象数据、历史发电模式等多源信息构建多时间尺度预测模型，为调度决策提供依据。

友好型并网控制技术增强可再生能源并网适应性，通过低电压穿越、频率支撑等辅助服务能力，使风电光伏具备传统发电机组特性。消纳能力评估方法基于安全稳定约束计算系统可再生能源消纳上限，为优化调度提供边界条件。多能互补协同机制实现风光互补、风光互济策略，利用不同能源互补特性，平滑总体出力波动；弃风弃光管理策略在必要限电情况下，基于电站特性、响应速度等因素制定公平合理限电方案，最小化弃电量。

3.2 火电灵活调峰协同控制策略

火电灵活调峰协同控制策略旨在构建火电与风光等新能源深度耦合的动态调节体系，通过技术革新与控制优化实现火电机组对新能源出力波动的快速响应与协同互补。在火电机组侧，通过汽轮机调节特性优化改造，突破传统运行边界限制，使机组能够实现更宽范围的负荷调节，提升快速启停与深度调峰能力，为新能源消纳提供灵活的功率调节空间。

基于模型预测控制理论构建动态调度框架，结合新能源出力预测数据与电网实时运行状态，建立火电-新能源功率耦合数学模型，精准预测系统未来功率变化趋势。在此基础上优化火电调峰控制序列，实现火电与新能源在不同时间尺度下的功率协同，确保电网运行的稳定性与经济性。

3.3 储能充放电优化策略

储能充放电优化策略围绕储能资源高效利用展开，

构建多维度优化决策体系。时空协同优化方法将储能规划与运行相结合,实现长短期协调与空间布局优化;基于新能源出力特性的充放电策略,通过实时跟踪风电、光伏功率波动曲线,在可再生能源过剩时段充电存储盈余能量,在出力低谷期放电补充功率缺口,实现孤网内清洁能源最大化消纳与储能资源优化配置。功率波动平抑控制通过储能快速响应特性,抑制可再生能源功率波动,平滑出力曲线减轻电网调节压力。

协同控制架构实现多类型储能装置互补运行,利用超级电容器高功率密度特性应对瞬时功率波动,电池储能系统提供持续能量支持,压缩空气储能满足长周期调节需求。基于深度强化学习优化决策模型通过与环境持续交互,不断完善充放电策略适应复杂多变环境。储能参与辅助服务策略明确储能可在调频、调压等辅助服务中角色定位,挖掘储能多元价值;电网阻塞管理方法利用储能灵活调节特性缓解输电走廊拥堵,延缓网络扩建需求。

4 稳定负荷消纳策略

4.1 需求侧响应策略

需求侧响应策略聚焦于激励机制设计与用户行为引导,构建电力消费者主动参与电网调节体系。价格型需求响应机制通过实时供需信号、能源裕度指示等动态反馈形式,替代传统峰谷电价结构,基于孤网内风光出力波动与储能状态引导用户调整用电行为,实现供需动态平衡;激励型需求响应计划设计可中断负荷、直接负荷控制等合同模式,用户根据系统实时功率缺额信号减少用电获取相应补偿。用户分类分级管理策略根据用户用电特性、响应能力以及重要性等因素,建立差异化响应方案提高参与度与响应效果。

4.2 灵活负荷控制策略

灵活负荷控制策略关注负荷端可调节性提升与精细化管理,形成负荷侧调节资源库。负荷特性识别与分类方法基于用电设备物理特性,将负荷分为时间可转移型、功率可调节型与完全刚性型三类,明确调控潜力。基于优先级动态负荷调控算法根据系统实时状态与负荷重要性,动态调整负荷运行状态,保障重要负荷供电。

分布式协同控制架构实现集中决策与分散执行相结合,上层控制中心发出调控指令,下层控制器自主执行具体操作,提高系统响应速度与可靠性。快速负荷控制策略应对紧急情况下系统功率平衡需求,通过快速减负荷措施维持系统稳定;基于负荷聚集模型用电行为预测

通过数据挖掘与机器学习方法,预测用户用电模式,为负荷控制决策提供依据。

4.3 储能辅助负荷调节

储能辅助负荷调节策略探讨储能系统与负荷协同运行机制,构建双向互动调节模式。电力电子接口技术通过先进功率变换器实现储能与负荷快速无缝连接,提供毫秒级响应能力;负荷特性匹配储能配置方法根据负荷波动特点、响应要求等因素,选择合适储能类型与容量提高系统经济性。虚拟同步机控制策略使储能系统模拟同步发电机特性,为负荷提供稳定电压频率支撑增强系统稳定性。

分布式储能就近支撑策略通过布置小型分散储能单元就近支撑负荷调节,减少网络损耗提高响应速度;基于模型预测负荷调节算法综合考虑负荷预测值、系统约束与储能状态,优化储能功率输出实现负荷平滑调节。

结论:本研究系统分析局域电网风光火储一体化综合发电系统协调控制关键技术,构建了完整的技术体系。在源网荷储协同控制方面,通过负荷预测、能量平衡与储能调度实现资源高效利用;孤网运行优化依靠微网功率平衡与应急调度保障系统可靠性。实现风光火储协调控制结合可再生优先、热电联产与储能优化增强系统灵活性;稳定负荷消纳融合需求响应、灵活负荷与储能辅助提高系统稳定性。在产业发展层面,该技术体系可有效提升局域电网的运行效率与稳定性,降低能源供应成本,增强区域内企业的能源保障能力,进而提高产品在市场中的竞争力,推动产业绿色转型升级。

未来研究应重点关注人工智能应用、多能互补优化以及区块链赋能,持续推动局域电网智能化低碳化发展,为能源系统转型和产业可持续发展提供更有力的技术支撑。

参考文献

- [1]谢桦,李凯,鄢靖彪,等.基于生成对抗网络修正的源网荷储协同优化调度[J].中国电机工程学报,2025,45(5):1668-1679.
- [2]赵冬梅,宋晨铭,冯向阳,等.100%新能源场景下考虑频率稳定约束的源网荷储一体化系统储能优化配置[J].电工技术学报,2025,40(7):2146-2161.
- [3]高波,刘川,韩建,等.基于PSO-ELM的可植入UPQC的“源-网-荷-储”系统最优控制策略[J].电力系统保护与控制,2025,53(2):62-72.