

微电网电力自动化控制技术研究

王丽萍 刘春宇 高海军 杨 亭

内蒙古鄂尔多斯煤炭有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 016400

摘 要: 在全球能源转型与可持续发展的大背景下,微电网作为一种融合分布式发电、储能装置、负荷及监控保护系统的小型供能网络,成为现代电力领域的关键发展方向。本文聚焦于微电网电力自动化控制技术展开研究。首先概述微电网的定义、构成、运行模式及优势,为后续研究奠定基础。接着详细阐述电力自动化控制技术的策略,涵盖分布式电源控制、储能系统控制及分层控制技术。随后分析该技术面临的挑战,包括分布式电源特性、通信系统及故障保护等方面的问题。最后探讨其发展趋势,如智能化控制、多微电网协同及与智能电网深度融合等。旨在为微电网电力自动化控制技术的发展与应用提供全面的理论参考与实践指导。

关键词: 微电网; 电力自动化; 控制技术

引言: 随着能源转型与可持续发展需求的日益增长,微电网作为一种灵活、高效、可靠的分布式能源利用模式,受到广泛关注。微电网整合了分布式电源、储能装置、负荷等,可实现独立运行或与大电网互联,有效提升能源利用效率与供电可靠性。电力自动化控制技术作为微电网稳定运行的核心支撑,对保障微电网的电能质量、安全稳定及经济运行起着关键作用。深入研究微电网电力自动化控制技术,对于推动微电网的规模化应用、促进能源结构优化调整以及实现能源可持续发展具有重要的现实意义与战略价值。

1 微电网概述

1.1 微电网的定义与构成

微电网是一种由分布式电源、储能装置、能量转换装置、负荷及监控保护系统构成的小型配电系统,具备自我控制、保护和管理能力。其核心构成包括:分布式电源(如光伏、风电、微型燃气轮机等)、储能设备(锂电池、超级电容等)、电力电子变换装置(逆变器、整流器)、负荷(居民、商业、工业用电)及智能控制系统。通过静态开关与大电网连接,微电网可实现并网与孤岛模式切换,既可作为大电网的补充,也能独立为特定区域供电,尤其适用于偏远地区、海岛等无电/弱电网场景,有效解决分布式电源并网难题。

1.2 微电网的运行模式

微电网主要分为并网运行与孤岛运行两种模式。并网模式下,微电网通过公共连接点(PCC)与大电网交换功率,实现电能双向流动:当分布式电源发电过剩时,多余电能输送至大电网;当发电不足时,从大电网获取电力。此模式下,微电网需与大电网保持同步,遵循调度指令。孤岛模式则在大电网故障或计划检修时启动,

微电网断开与主网连接,依靠内部分布式电源和储能系统独立供电,优先保障重要负荷(如医院、数据中心)的持续运行。两种模式可通过智能控制实现平滑切换,确保供电连续性。

1.3 微电网的优势

微电网的核心优势在于提升供电可靠性与能源利用效率。其采用分布式电源与储能系统协同控制,可平抑可再生能源波动,减少对大电网的依赖。例如,储能系统通过“削峰填谷”降低用电成本,峰谷电价套利空间可达30%。此外,微电网就近供电特性显著降低输电损耗(较传统电网减少50%以上),并支持多能互补(冷热电联供综合效率超70%)。在环保层面,微电网以可再生能源为主导,助力碳减排,推动能源结构绿色转型。其灵活性与抗灾性也尤为突出,孤岛运行能力可在极端天气或电网故障时快速恢复局部供电,减少社会经济损失^[1]。

2 微电网电力自动化控制技术的策略

2.1 分布式电源控制技术

2.1.1 最大功率点跟踪(MPPT)控制

最大功率点跟踪(MPPT)控制是光伏、风电等分布式电源实现高效能量转换的核心技术。其核心原理是通过动态调节逆变器工作状态,使光伏板或风机始终运行在最大功率输出点。以光伏系统为例,光伏电池的输出功率受光照强度、温度等因素影响呈现非线性特性,MPPT控制器通过实时监测输出电压和电流,采用扰动观察法、增量电导法等算法,快速定位最大功率点。例如,在光照强度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 时,光伏电池在30V电压下输出功率最大,MPPT控制器通过调整逆变器占空比,使系统稳定在该电压点,实现充电效率提升20%-30%。该技术不仅适用于单一电源,还可通过多电源协同控制优

化整体出力,如某工业园区微电网通过MPPT与储能系统联动,在光照充足时优先为储能充电,夜间则由储能补充供电,显著降低用电成本。

2.1.2 有功-频率 (P-f) 和无功-电压 (Q-V) 控制

有功-频率 (P-f) 和无功-电压 (Q-V) 控制是维持微电网频率和电压稳定的关键策略。在孤岛运行模式下,微电网需自主建立电压和频率基准,此时采用P-f控制的分布式电源(如储能装置或微型燃气轮机)作为主电源,通过模拟传统同步发电机的频率下垂特性,根据有功功率变化动态调整输出频率。例如,当负荷增加导致系统频率下降时,主电源自动增加有功输出以稳定频率。同时,Q-V控制通过调节无功功率维持电压稳定,其下垂特性曲线设定为无功功率增加时电压降低,反之亦然。在并网模式下,分布式电源多采用PQ控制,由大电网提供频率和电压参考,但部分可控电源仍可通过P-f和Q-V控制参与电网调频调压。

2.2 储能系统控制技术

2.2.1 充放电控制策略

储能系统的充放电控制策略直接影响微电网的稳定性与经济性。核心策略包括基于荷电状态(SOC)的实时调控与动态功率分配。例如,采用分层控制架构,上层能量管理系统每15分钟优化调度指令,底层控制器以秒级响应执行,当光伏出力突降时,蓄电池能在300毫秒内按0.5C速率补足功率缺口。多模式切换逻辑设计通过设置SOC阈值、电价信号和负载优先级三重判据,实现离网支撑、并网调频、需求响应等模式的自动切换。例如,当SOC低于30%且处于电价高峰时段,系统自动切换至需求响应模式,通过V2G技术反向供电获取差价收益。安全防护方面,硬件配置双向DC/DC变换器,软件设置过充/过放保护、环流抑制等四重保护机制,确保极端天气下SOC维持在40%-60%区间,延长电池寿命。

2.2.2 储能容量优化配置

储能容量优化需综合考虑技术、经济与运行环境约束。基于动态规划的优化方法通过建立多阶段储能调度模型,处理时间连续性问题,但计算复杂度高;遗传算法(GA)可同时求解容量配置与接入点选择,但易陷入局部最优;粒子群优化(PSO)收敛速度快,适合大规模非线性问题。混合算法如动态规划-GA联合优化,兼顾求解速度与精度。关键影响因素包括负荷峰谷差、风光出力波动率及电价机制。例如,某研究采用双层优化模型,外层规划储能容量,内层优化运行策略,结合雨流计数法量化电池寿命损耗,使储能经济性提升12%。混合储能配置(如锂电池与铅碳电池按7:3比例组合)可降低

整体成本18%,循环效率提高至92%。未来趋势聚焦于多目标协同优化与人工智能技术深度集成,推动微电网向高可靠性、低成本、低碳化方向发展。

2.3 微电网的分层控制技术

2.3.1 一次控制

一次控制是微电网的底层本地控制,通过下垂控制、主从控制等策略实现分布式电源(DG)的功率分配与负荷均衡。下垂控制模拟同步发电机的频率-功率特性,使DG按额定容量比例分担负荷,无需通信即可实现“即插即用”,但存在电压/频率偏差。主从控制则指定主控单元(如储能装置)采用V/f控制维持系统稳定,从控单元采用PQ控制输出额定功率,控制精度高但依赖主控单元可靠性。一次控制响应速度快(毫秒级),是保障微电网实时稳定运行的基础。

2.3.2 二次控制

二次控制通过通信网络收集一次控制数据,校正电压/频率偏差并优化功率分配。其核心功能包括:1)消除一次控制因下垂特性导致的稳态误差(如电压偏差 $\leq 1\%$);2)实现多DG间的协同控制,例如通过集中式或分布式算法动态调整下垂系数;3)保障微电网与主网的同步,在并网/孤岛切换时将频率/电压偏差控制在 $\pm 0.1\text{Hz}/\pm 1\%$ 以内。二次控制响应时间为秒级,需平衡通信延迟与控制精度,是提升电能质量的关键层级。

2.3.3 三次控制

三次控制是微电网的顶层能量管理,基于经济性、环保性等目标制定优化调度策略。其功能涵盖:1)经济运行优化,通过多时间尺度调度(如日前计划与实时调整)降低用电成本;2)需求响应管理,根据电价信号或用户优先级动态调整负荷;3)可再生能源消纳最大化,结合储能充放电策略平抑间歇性出力波动。三次控制采用混合整数线性规划、模型预测控制等算法,响应时间为分钟至小时级,是实现微电网高效、低碳运行的核心决策层^[2]。

3 微电网电力自动化控制技术面临的挑战

3.1 分布式电源的间歇性和波动性

分布式电源(如光伏、风电)的输出功率高度依赖自然条件,光照强度、风速等环境因素的变化导致其出力具有显著的不确定性和随机性。这种间歇性使得微电网的功率平衡难以维持,尤其在极端天气条件下,分布式电源可能突然退出运行或大幅降低出力,导致系统供需失衡。同时,其输出功率的波动性还会引发电压和频率的频繁波动,对微电网的电能质量造成直接影响。

3.2 通信系统的可靠性与实时性

微电网的分层控制架构高度依赖通信系统实现各层级间的数据交互与协同控制,但通信系统的可靠性与实时性面临严峻挑战。一方面,无线通信易受环境干扰(如电磁噪声、障碍物遮挡),导致数据传输中断或延迟,影响控制指令的及时执行;有线通信虽稳定性较高,但布线成本高且灵活性不足,难以适应微电网的动态扩展需求。另一方面,微电网控制对通信实时性要求极高,尤其是二次控制需在毫秒级时间内完成电压/频率偏差校正,若通信延迟超出阈值,将导致控制失效甚至系统失稳。

3.3 微电网的故障特性与保护难题

微电网的故障特性与传统电网存在显著差异,其保护配置面临多重难题。首先,分布式电源的接入改变了故障电流的分布与方向,双向潮流导致传统过流保护无法准确识别故障位置,易引发误动或拒动。其次,逆变器接口的分布式电源在故障时提供的短路电流有限,远低于同步发电机,导致保护装置灵敏度不足,难以快速切除故障。此外,微电网的孤岛运行模式进一步加剧了保护难度,故障电流幅值更低且方向多变,传统保护原理难以适应。

4 微电网电力自动化控制技术的发展趋势

4.1 智能化控制技术的应用

随着物联网、人工智能、大数据等技术的深度融合,微电网电力自动化控制将加速向智能化升级。通过引入机器学习算法,系统可实现分布式电源出力预测、负荷需求响应及储能充放电策略的动态优化,提升能源利用效率。例如,基于神经网络的故障诊断技术可实时监测设备状态,提前预警潜在风险,缩短故障修复时间。同时,智能电表与边缘计算设备的普及,使微电网具备自主决策能力,可根据电价信号、天气条件等外部因素自动调整运行模式,降低运营成本。此外,区块链技术将保障去中心化能源交易的数据安全与透明,推动微电网参与电力市场交易,形成“源-网-荷-储”智能互动体系。

4.2 多微电网的协同控制与集群化发展

未来微电网将突破单一系统边界,向多微电网协同

控制与集群化方向演进。通过构建分层分布式控制架构,实现区域内多个微电网的能量互济与资源共享。例如,工业园区内的多个微电网可通过集群控制器统一调度,在负荷高峰时共享储能资源,降低整体备用容量需求。同时,基于多智能体系统(MAS)的协同控制策略,可解决多微电网间的功率分配、电压平衡及故障隔离等问题,提升区域电网的韧性与可靠性。

4.3 与智能电网的深度融合

微电网与智能电网的深度融合将成为未来能源系统的核心特征。一方面,微电网将作为智能电网的“细胞单元”,通过标准化接口实现与主网的双向互动,参与需求响应、调频调压等辅助服务,提升电网灵活性。另一方面,智能电网的数字化基础设施(如5G通信、北斗时空同步)将为微电网提供毫秒级响应精度,支撑其高频次功率调节需求。此外,二者融合将推动能源互联网发展,通过构建开放、互联、智能的能源架构,实现电力、热力、燃气等多能互补与优化配置。例如,在城市综合体中,微电网可与智能电网联动,根据电价波动自动切换供电模式,同时利用余热为建筑供暖,形成“电-热-气”综合能源系统^[3]。

结束语

微电网电力自动化控制技术作为推动能源转型与智能电网发展的关键支撑,其研究不仅关乎分布式能源的高效利用,更深刻影响着未来电力系统的安全性与可持续性。当前,智能化控制、多微电网协同及与智能电网的深度融合已成为技术演进的核心方向,为应对分布式电源波动性、提升系统韧性提供了创新路径。然而,技术突破仍需跨越通信可靠性、保护协调性等现实挑战。

参考文献

- [1]王星蕊,肖晶鑫,王文忠.电力系统及其自动化技术的安全控制研究[J].冶金工业教育资源开发中心,2024:245-246
- [2]张国栋.电力系统中的自动控制技术探讨[J].仪器仪表用户,2024,31(09):182-184.
- [3]吴鸣,张楠春,梁英,等.新型电力系统背景下微电网技术研究与发展[J].新型电力系统,2024,2(03):251-271.