

源网荷储一体化微电网运行控制策略

刘炳辉

漯河汇力电力勘察设计有限公司 河南 漯河 462000

摘要: 随着能源转型的推进和分布式能源的快速发展,源网荷储一体化微电网作为一种新型的能源供应模式,受到广泛关注。本文从源侧、网侧、荷侧和储能侧分别详细阐述了相应的控制策略,并提出了综合协调控制方法,旨在提高微电网的运行效率、稳定性和可靠性,促进可再生能源的高效利用,为构建清洁低碳、安全高效的能源体系提供理论支持和实践指导。

关键词: 源网荷储一体化;微电网;运行控制策略

1 引言

在全球能源危机和环境问题日益严峻的背景下,可再生能源的开发与利用成为能源领域的重要发展方向。分布式能源,如太阳能、风能等,具有清洁、可再生、分布广泛等优点,但同时也存在间歇性、波动性和随机性等问题,给电网的安全稳定运行带来了挑战。微电网作为一种将分布式电源、储能装置、负荷和监控保护装置等集成在一起的小型发电系统,能够实现自我控制、保护和管理,既可以与大电网并网运行,也可以孤立运行,为分布式能源的高效利用提供了有效途径。

2 源侧运行控制策略

2.1 太阳能光伏发电控制

2.1.1 最大功率点跟踪(MPPT)控制

扰动观察法:扰动观察法通过主动调整光伏系统的工作点并观察功率反馈实现最大功率点跟踪^[1]。其核心逻辑是周期性施加微小扰动(如增减电压或电流),若扰动后功率提升,则保持调整方向;若功率下降,则反向调整。通过反复试探,工作点逐步逼近最大功率点(MPP)。

电导增量法:电导增量法基于光伏阵列输出功率的数学特性:在MPP处,功率对电压的导数为零,即电流与电压的比值等于电流对电压导数的负值。算法通过实时计算电导增量(电流变化率与电压变化率的比值),并将其与当前电导(I/V)比较,动态判断工作点与MPP的相对位置:若两者之和为正,需增加电压;若为负,需降低电压;若为零,则锁定当前点。

2.1.2 并网逆变器控制

外环常用直流母线电压或输出功率控制,直流母线电压控制时,将设定值与实际值比较,经PI调节器得有功电流参考值。内环用电流解耦控制,三相电流经Clark和Park变换后,在d-q坐标系下独立控制有功(id)和无功

电流(iq),调节id、iq控制有功、无功功率,保证电流质量,实现与电网同步。

2.2 风力发电控制

2.2.1 变速恒频控制

双馈感应发电机(DFIG)控制:转子侧变流器控制转子电流频率、幅值和相位,调节输出功率和转速。最大风能捕获时,调转子励磁电流频率使转速随风速变,控转子电流有功分量实现MPPT;并网时,控转子电流无功分量调节无功输出。

直驱永磁同步发电机(PMSG)控制:与全功率变流器相连,变流器背靠背结构,分别控发电机侧和电网侧。发电机侧控电机电磁转矩,实现最大风能捕获;电网侧用电压定向或直接功率控制,将直流电转为与电网同频同相交流电,控输出电流波形和功率因数,实现高质量并网。

2.2.2 低电压穿越(LVRT)控制

电网电压跌落时,风力发电机控变流器增无功功率输出,如按无功电流-电压跌落关系曲线确定无功电流大小。双馈风力发电机电网故障时,控转子侧变流器限制转子电流过流,可用crowbar电路等硬件保护,转子电流过大时投入电阻短接变流器,故障切除后恢复控制。

3 网侧运行控制策略

3.1 微电网与大电网的并网/离网切换控制

3.1.1 并网运行控制

功率交换控制:并网时,据分布式电源出力与负荷需求分配功率,实现与大电网功率交换。实时监测发电与用电功率,算出交换值,出力大则馈电,反之购电。同时满足大电网并网要求,如电压偏差 $\pm 5\%$ 以内、频率偏差 $\pm 0.2\text{Hz}$ 以内、谐波符合国标。

无功功率协调控制:为维持无功平衡,协调控制微电网内无功功率。分布式电源逆变器有一定无功调节能

力, 依大电网需求和微电网内无功分布, 合理分配各逆变器无功输出, 如让光伏逆变器和风电变流器按指令输出无功以稳定电压。

3.1.2 离网运行控制

主从控制: 选调节性能好、容量大的分布式电源(如储能系统或小型燃气轮机)为主电源, 采用恒压恒频(V/f)控制, 提供稳定电压和频率支撑; 从电源采用恒功率(P/Q)控制, 依主电源信号调整输出功率维持平衡^[2]。如负荷增加, 主电源增输出功率, 从电源按指令增输出。

对等控制: 各分布式电源地位平等, 通过下垂控制特性自动调节电压、频率及分配功率。模拟传统同步发电机特性, 根据有功-频率、无功-电压下垂特性调整输出。如频率下降时增有功输出, 电压下降时增无功输出, 实现无通信下的功率分配与电压频率稳定。

3.1.3 平滑切换控制

为使微电网在并网和离网模式间平滑切换, 避免冲击, 采用平滑切换控制策略。实时监测大电网和微电网状态, 提前调整分布式电源出力与储能系统充放电状态, 实现切换瞬间电压和频率无缝衔接。

3.2 微电网内部电网的优化控制

3.2.1 电压和无功功率控制

在关键节点安装无功补偿装置(如SVC、STATCOM), 据节点电压和无功需求实时调节输出, 实现电压精确控制。如节点电压低时, 增无功输出提高电压。利用分布式电源逆变器就地调节无功功率, 协调控制各电源无功输出, 优化无功分布, 减少长距离传输, 降低线路损耗。

3.2.2 潮流控制

根据负荷分布和电网拓扑优化分布式电源出力计划, 如建立潮流优化模型, 以降线路损耗为目标求最优出力值, 使潮流分布合理。必要时调整网络拓扑结构, 如改变开关状态优化潮流路径, 降线路损耗, 提高运行效率。如负荷轻区域断开部分线路减少损耗。

4 荷侧运行控制策略

4.1 需求响应控制

可中断负荷是指在电力系统紧急情况下, 可以根据调度指令中断供电的负荷。通过与用户签订可中断负荷合同, 在微电网功率不足或需要紧急平衡时, 对可中断负荷进行有序切除, 以保证微电网的安全稳定运行。同时, 给予用户一定的经济补偿, 提高用户参与需求响应的积极性。利用分时电价、实时电价等价格信号, 引导用户调整用电行为。在电价高峰时段, 鼓励用户减少用电负荷或转移用电时间; 在电价低谷时段, 激励用户增

加用电负荷, 如对电动汽车进行充电、启动储能设备充电等。通过价格杠杆实现负荷的削峰填谷, 提高微电网的运行经济性。

4.2 智能负荷控制

随着智能家居技术的发展, 越来越多的家用电器具备了智能控制功能。通过智能家居系统, 可以实现对空调、照明、冰箱等负荷的远程监控和智能控制。例如, 根据室内外温度、光照强度等环境参数, 自动调节空调的温度设定值和照明亮度, 在满足用户舒适度需求的前提下, 降低负荷能耗^[3]。在工业领域, 许多生产设备具有一定的可调节性。通过对工业负荷进行优化控制, 如调整生产班次、优化设备运行参数等, 可以在不影响生产任务的前提下, 降低工业负荷的峰谷差, 提高微电网对可再生能源的消纳能力。

5 储能侧运行控制策略

5.1 储能系统的充放电控制

根据微电网的实时功率平衡情况, 确定储能系统的充放电功率。当分布式电源出力大于负荷需求时, 储能系统吸收多余的电能进行充电; 当分布式电源出力小于负荷需求时, 储能系统释放储存的电能进行放电, 以维持微电网的功率平衡。针对分布式电源的间歇性和波动性, 利用储能系统的快速充放电能力, 平滑其输出功率波动。通过实时监测分布式电源的输出功率, 设定功率波动阈值, 当功率波动超过阈值时, 储能系统进行相应的充放电操作, 将功率波动限制在允许范围内。

5.2 储能系统的寿命管理控制

储能系统的充放电深度对其使用寿命有重要影响。过深的充放电深度会加速储能电池的老化, 降低其性能和寿命。因此, 需要合理控制储能系统的充放电深度, 设置充放电上下限, 避免电池过度充放电。为了延长储能系统的整体使用寿命, 应尽量使储能电池组中各个电池的充放电次数均衡。通过采用电池管理系统(BMS), 实时监测各个电池的状态, 根据电池的剩余电量、健康状态等信息, 合理分配充放电任务, 避免某些电池过度使用。

6 源网荷储一体化微电网综合协调控制策略

6.1 分层分布式控制架构: 从设备到系统的协同

微电网的控制需打破集中式控制的单一依赖, 构建“设备-区域-系统”三层协同架构。设备层作为底层执行单元, 需实现分布式电源(DG)、储能与负荷的自主控制与即插即用。例如, 分布式光伏通过下垂控制模拟同步发电机的外特性, 自动分配有功功率; 储能系统基于荷电状态(SOC)动态调整充放电策略, 优先保障关键

负荷供电；柔性负荷通过需求响应协议响应电价信号，实现用电行为的主动调节。区域层作为中间协调层，需通过能量管理单元（EMS）实现内部源-荷-储的动态平衡。EMS采用模型预测控制（MPC），结合气象预测、负荷历史数据及实时电价，滚动优化日内调度计划，协调可再生能源与储能的出力顺序，优先消纳清洁能源，同时通过负荷分级管理（关键/可中断/可调节）动态调整供电优先级。系统层作为全局优化层，需实现微电网与主网或相邻微电网的互联互动。通过聚合商参与电力市场交易，根据实时电价或辅助服务需求调整运行策略；在孤岛/并网模式切换时，采用主从控制或对等控制确保功率平衡与电压频率稳定；跨微电网间通过区块链或分布式优化算法实现能量互济，提升整体资源利用效率。

6.2 多时间尺度控制策略：从秒级到日级的动态响应

微电网运行需兼顾快速响应与长期经济性，因此需构建多时间尺度控制体系。秒级控制聚焦紧急场景，通过储能系统（如超容、飞轮）的快速充放电抑制功率突变，同时切除可中断负荷防止频率/电压崩溃，确保系统瞬时稳定性。分钟级控制侧重经济调度，基于滚动优化的MPC算法，结合需求响应引导可调节负荷跟踪可再生能源出力，动态调整储能充放电计划以减少弃风弃光。例如，在光伏出力高峰期，通过价格信号激励用户增加用电，同时储能系统存储多余电能；在出力低谷期，储能放电满足负荷需求，降低对主网的依赖。小时级/日级控制则面向长期规划，考虑设备寿命衰减的储能充放电策略，延长电池使用寿命；结合分时电价制定“谷充峰放”策略，通过低谷时段充电、高峰时段放电降低购电成本，同时优化分布式电源的维护计划，减少停机损失。

6.3 可靠性与自适应控制：应对不确定性的核心能力

微电网运行面临可再生能源出力波动、负荷预测误差及设备故障等不确定性，需通过可靠优化与自适应控制提升系统韧性。不确定性处理方面，采用随机优化或可靠优化方法，将气象预测误差、负荷波动等纳入约束条件，生成保守但可行的调度计划；引入数字孪生技术，通过虚拟系统实时模拟物理状态，提前预测潜在风险并调整控制参数^[4]。例如，在光伏出力预测偏低时，数字孪生模型可模拟储能系统提前充电的场景，避免实际运行中供电不足。故障自愈能力方面，基于分布式状态估计技术，通过多节点数据融合快速定位故障点并隔离故障区域；利用多代理系统（MAS）实现故障后自组织

重构，例如在孤岛模式下，通过代理节点协商重新分配功率，优先恢复关键负荷供电，同时启动备用电源（如柴油发电机）支撑系统稳定运行。

6.4 智能化与数字化技术融合：从数据到决策的闭环

微电网控制需充分利用数据驱动与数字化技术，实现从被动响应到主动优化的转变。数据驱动控制方面，通过大数据分析挖掘用户用电模式，识别可调节负荷的潜在容量，优化需求响应策略；利用深度强化学习（DRL）训练控制模型，使其在动态环境中自主学习最优决策策略。例如，DRL模型可根据历史数据学习储能充放电与电价的关系，在实时运行中自动选择成本最低的操作路径。边缘计算与通信优化方面，在设备层部署边缘计算节点，就近处理数据并执行控制指令，减少云端通信延迟；采用5G+时间敏感网络（TSN）构建低时延、高可靠的通信架构，确保控制指令的实时性与准确性。例如，在分布式光伏集群中，边缘节点可快速计算局部功率平衡需求，并通过TSN网络同步协调相邻节点的出力，避免功率振荡。

结语

源网荷储一体化微电网作为一种新型的能源供应模式，对于推动能源转型、提高可再生能源利用率、增强电力系统灵活性和可靠性具有重要意义。本文针对源网荷储一体化微电网的运行特点和面临的挑战，从源侧、网侧、荷侧和储能侧分别详细阐述了相应的运行控制策略，并提出了综合协调控制方法。未来的研究应进一步深入探讨这些问题，不断完善微电网运行控制理论和方法，推动源网荷储一体化微电网技术的广泛应用和可持续发展，为构建清洁低碳、安全高效的能源体系做出更大贡献。

参考文献

- [1]冯银苹.区域源网荷储一体化调控管理的模式分析[J].科技视界,2025,15(06):23-26.
- [2]俞蕴妮.源网荷储一体化调控建设探究[J].仪器仪表用户,2025,32(01):1-2+5.
- [3]罗宏波,施铭涛,汪涛,等.基于互联网发展的电力“源网荷储一体化”项目建设分析[J].电工技术,2024,(S2):634-636.
- [4]高瞻展,周茜.推动源网荷储一体化关键在配电网高质量发展[N].河南商报,2024-12-12(A02).