

分布式能源接入下的微电网电力管理与控制技术研究

王永全

佛山电力设计院有限公司 广东 佛山 528000

摘要：本文聚焦分布式能源接入下的微电网电力管理与控制技术。首先概述分布式能源与微电网，分析分布式能源接入对微电网电压稳定性、功率流、安全性与可靠性的影响。接着阐述微电网协调控制策略、分布式能源优化调度、智能预测技术应用等电力管理技术，以及频率、电压控制和有源电力控制等稳定性控制技术，为微电网稳定运行提供理论支持。

关键词：分布式能源；微电网；电力管理；控制技术

引言：随着能源转型推进，分布式能源凭借靠近用户、减少损耗等优势，在能源领域应用日益广泛。微电网作为集成分布式能源的小型供能系统，可并网或孤岛运行。然而，分布式能源的间歇性和不确定性给微电网的电力管理与控制带来挑战。研究其相关技术，对保障微电网稳定运行、促进可再生能源消纳、推动能源可持续发展具有重要意义。

1 分布式能源与微电网概述

1.1 分布式能源定义

分布式能源是相对传统集中式能源的新型利用方式，多分布在用户端附近，以小型模块化、分散式布置，可独立或与大电网并网运行。它涵盖多种能源形式，如分布式发电，包括太阳能光伏、风力、生物质能、小型水力发电等；分布式储能，像电池、飞轮、超级电容储能等；还有分布式冷热电联产系统，通过能源梯级利用同时提供多种能源，提高综合利用效率。其优势显著，靠近用户侧，减少传输损耗，提高利用效率，如屋顶光伏发电可直接供用户使用；增强能源供应可靠性与安全性，大电网故障时能为重要负荷供电；促进可再生能源消纳，减少对传统化石能源依赖，利于环保与可持续发展。不过，其广泛应用也面临挑战，出力有间歇性和不确定性，如太阳能受光照、风力受风速影响，给电力系统运行和调度带来困难；接入需配套电力电子设备和控制技术，增加系统复杂性与成本。

1.2 微电网系统架构

微电网是集成分布式能源、储能装置、负荷及相关控制保护装置的小型供能系统，可并网或孤岛独立运行。其架构含分布式电源、储能系统、负荷、电力电子接口、监控与保护系统、能量管理系统等关键部分。分布式电源是能量来源，分可再生能源（如太阳能、风能）和不可再生能源（如小型柴油发电机、燃气轮机）

发电，需合理配置与协调控制^[1]。储能系统作用重大，能平衡电源出力波动与负荷需求变化，提高稳定性和可靠性。常见储能方式有电池、超级电容、飞轮储能等，各有特点，适用于不同场景。负荷是能量消耗端，有工业、商业和居民负荷等，用电特性和需求响应能力不同，运行管理需充分考虑。电力电子接口是连接关键设备，实现电能形式转换与控制，性能影响运行效率和电能质量。监控与保护系统实时监测运行状态，采集参数，及时处理异常，确保安全稳定。能量管理系统是“大脑”，采集分析信息，制定运行策略和调度计划，实现经济高效可靠运行。

2 分布式能源接入对微电网的影响

2.1 电压稳定性影响

分布式能源接入微电网后，会对系统的电压稳定性产生显著影响。由于分布式能源的出力具有间歇性和不确定性，当大量分布式能源接入时，可能会导致微电网中的电压波动和闪变。另外，分布式能源的接入位置和容量也会影响电压稳定性。如果分布式能源集中在微电网的某一区域接入，可能会导致该区域的电压升高，而其他区域的电压降低，造成电压分布不均衡。当分布式能源的接入容量过大时，可能会超过微电网的电压调节能力，引发电压越限问题，影响用电设备的正常运行。为了应对分布式能源接入对电压稳定性的影响，需要采取一系列的电压控制措施。例如，在分布式能源接口处安装无功补偿装置，如静止无功补偿器（SVC）或静止同步补偿器（STATCOM），通过调节无功功率来稳定电压。同时，合理规划分布式能源的接入位置和容量，避免局部过载和电压失衡。利用能量管理系统对分布式能源的出力进行实时监测和调控，根据电压变化情况调整发电计划，确保电压在允许范围内波动。

2.2 功率流与供需平衡

分布式能源接入改变了微电网功率流分布与供需平

衡。传统微电网功率多从上级电网流向负荷，接入后功率流方向复杂。出力大于本地负荷，多余功率反向流入上级电网；出力不足则从上级电网补充。这给微电网规划与运行管理带来新挑战。一是要加强微电网与上级电网的协调通信，保障功率合理交换调度；二是要提升微电网对功率波动的调节能力以实现供需平衡。可采用分布式能源优化调度与储能系统充放电控制结合的方法，通过能量管理系统预测和优化调度分布式能源出力，合理安排发电计划，使其与负荷需求匹配。同时利用储能系统在出力过剩时储能、不足时释能，平抑波动，提高供电可靠性与经济性。

2.3 安全性与可靠性挑战

分布式能源接入后，微电网安全性和可靠性面临诸多难题。一方面，其接入增加了故障概率与类型。因分布式能源多经电力电子接口连接，电力电子设备故障可能使分布式能源无法正常发电或与微电网解列，影响稳定运行。另一方面，分布式能源的间歇性和不确定性让孤岛运行模式下的安全性面临更大挑战，出力波动可能致孤岛内功率不平衡，引发频率和电压波动，甚至系统崩溃。为此，要加强保护和控制技术研究^[2]。研发适配的保护装置，快速准确检测隔离故障；完善孤岛检测和切换技术，保障孤岛运行模式下与大电网平稳分离和连接；建立安全评估和风险预警机制，定期评估监测运行状态，及时发现并解决潜在安全隐患。

3 微电网电力管理与控制技术

3.1 微电网协调控制策略

微电网协调控制策略是实现微电网安全、稳定、经济运行的关键。常见的微电网协调控制策略包括主从控制策略、对等控制策略和分层控制策略。主从控制策略将微电网中的分布式电源分为主电源和从电源。主电源通常采用恒压恒频（V/f）控制方式，为微电网提供稳定的电压和频率参考；从电源则采用恒功率（PQ）控制方式，根据主电源的指令调整自身的输出功率。主从控制策略的优点是控制简单、易于实现，但主电源的故障可能会导致整个微电网的崩溃，可靠性较低。对等控制策略中，所有分布式电源具有平等的地位，采用相同的控制方式，如下垂控制。下垂控制通过模拟传统发电机的下垂特性，根据分布式电源的输出功率自动调整其输出电压和频率，实现分布式电源之间的功率自动分配和电压频率的自动调节。对等控制策略具有较好的冗余性和可靠性，但下垂控制存在一定的功率分配误差，可能会影响微电网的运行效率。分层控制策略将微电网的控制分为上层、中层和下层。上层为能量管理系统，负责制

定微电网的全局运行策略和调度计划；中层为区域控制器，负责对微电网进行分区管理和协调控制；下层为本地控制器，负责对单个分布式电源、储能系统和负荷进行实时控制。分层控制策略结合了主从控制和对等控制的优点，能够实现微电网的高效、可靠运行，但系统结构复杂，对通信和控制技术要求较高。

3.2 分布式能源优化调度

分布式能源优化调度是微电网电力管理的重要内容，其目的是在满足负荷需求和系统运行约束的前提下，合理安排分布式能源的发电计划和储能系统的充放电策略，实现微电网的经济、高效运行。分布式能源优化调度通常需要考虑多个目标，如最小化运行成本、最大化可再生能源利用率、减少污染物排放等。为了实现这些目标，需要建立相应的数学模型，并采用合适的优化算法进行求解。常见的优化算法包括遗传算法、粒子群优化算法、模拟退火算法等。在分布式能源优化调度过程中，需要充分考虑分布式能源的出力特性、负荷需求的变化、电价信息以及储能系统的状态等因素。同时，优先调度可再生能源发电，提高可再生能源的利用率，减少对传统化石能源的依赖。

3.3 智能预测技术在负荷与发电预测中的应用

智能预测技术在微电网的负荷与发电预测中发挥着重要作用。准确的负荷预测和发电预测是实现分布式能源优化调度和微电网稳定运行的基础。负荷预测可以分为短期负荷预测、中期负荷预测和长期负荷预测。短期负荷预测通常用于制定微电网的日内调度计划，预测时间范围为几分钟到几小时；中期负荷预测用于安排微电网的周调度计划，预测时间范围为几天到几周；长期负荷预测则用于微电网的规划和建设，预测时间范围为几年到几十年。常见的负荷预测方法包括时间序列分析法、人工神经网络法、支持向量机法等。发电预测主要针对分布式能源的出力进行预测，尤其是对可再生能源发电的预测。由于可再生能源的出力受自然因素影响较大，预测难度较高。目前，常用的发电预测方法有物理模型法、统计模型法和混合模型法^[3]。物理模型法基于气象数据和分布式能源的物理特性建立预测模型；统计模型法通过对历史数据进行分析和建模来预测未来的出力；混合模型法结合了物理模型法和统计模型法的优点，提高了预测的准确性。智能预测技术通过引入大数据、人工智能等先进技术，不断优化预测模型和算法，提高负荷预测和发电预测的精度。

4 微电网稳定性控制技术

4.1 频率控制技术

频率是微电网运行的重要指标之一，频率的稳定对于保障用电设备的正常运行至关重要。当微电网中的有功功率不平衡时，会导致频率的波动。分布式能源接入微电网后，由于其出力的间歇性和不确定性，增加了频率控制的难度。微电网频率控制技术主要包括一次调频、二次调频和三次调频。一次调频是通过分布式电源的调速器实现的，当频率发生变化时，调速器自动调整分布式电源的输出功率，以抑制频率的快速波动。一次调频是瞬时的、自动的，但调节能力有限，无法消除频率的稳态偏差。二次调频是通过能量管理系统或区域控制器实现的，根据频率偏差和联络线功率偏差，调整分布式电源的设定功率，消除频率的稳态偏差。二次调频通常采用积分控制算法，能够实现对频率的精确控制。三次调频主要是从经济运行的角度出发，根据微电网的负荷预测和分布式能源的出力预测，合理安排分布式电源的发电计划，实现有功功率的最优分配，进一步提高微电网的经济性和稳定性。

4.2 电压控制技术

电压稳定性是微电网安全运行的关键。如前文所述，分布式能源接入会引起微电网电压的波动和闪变，因此需要采取有效的电压控制技术来稳定电压。微电网电压控制技术可以分为本地电压控制和全局电压控制。本地电压控制是在分布式电源接口处或负荷侧安装无功补偿装置，如电容器组、静止无功补偿器（SVC）或静止同步补偿器（STATCOM），通过调节无功功率来稳定局部电压。本地电压控制具有响应速度快、控制灵活等优点，但只能解决局部电压问题。全局电压控制是通过能量管理系统对整个微电网的电压进行集中监测和调控。能量管理系统根据各节点的电压测量值，计算出需要调节的无功功率，并通过通信网络向分布式电源和无功补偿装置发送控制指令，实现对全局电压的优化控制。全局电压控制能够综合考虑微电网的整体运行情

况，协调各节点的电压调节，提高电压控制的效果。

4.3 有源电力控制技术

有源电力控制技术是一种通过电力电子装置对微电网中的电能质量进行实时监测和调节的技术。常见的有源电力控制装置包括有源电力滤波器（APF）、动态电压恢复器（DVR）和统一电能质量调节器（UPQC）等。有源电力滤波器通过实时监测电网中的谐波电流，产生与之大小相等、相位相反的补偿电流，从而消除谐波污染。动态电压恢复器能够在电压暂降或暂升时快速向电网注入或吸收有功和无功功率，维持负荷端电压的稳定^[4]。统一电能质量调节器结合了有源电力滤波器和动态电压恢复器的功能，能够同时解决多种电能质量问题。有源电力控制技术的应用需要综合考虑微电网的实际情况和成本因素。合理选择有源电力控制装置的类型和容量，并将其与其他电力管理和控制技术相结合，能够有效提高微电网的稳定性和电能质量，促进微电网的广泛应用和发展。

结束语

分布式能源接入微电网是能源发展的重要趋势，其电力管理与控制技术是保障微电网稳定运行的核心。本文探讨了该领域多方面技术，虽取得一定成果，但仍面临诸多挑战。未来需进一步优化控制策略、提升预测精度、降低成本，推动微电网技术不断完善，为实现能源的绿色、高效利用和可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 范成.考虑分布式新能源波动性的智能电网稳定性控制研究[J].自动化应用,2025,66(05):129-131+134.
- [2] 孙静,于斌.智能电网建设中分布式能源并网技术的应用[J].电力设备管理,2025,(04):126-128.
- [3] 吕远帆.电力工程中智能电网技术研究与实践[J].电力设备管理,2024,(15):214-216.
- [4] 张文龙,付饶,袁丁.智能微电网在建筑工程中的应用策略研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(10):1-3.