

基于可再生能源的配电网集成设计的研究

钱汉钊

东莞电力设计院有限公司, 广东省东莞市, 523000;

摘要: 随着全球能源结构转型和低碳经济发展的深入推进, 可再生能源在电力系统中的集成应用已成为能源领域的重要研究方向。本文系统研究了可再生能源与配电网集成的关键技术问题, 从规划设计、运行控制、储能配置、智能调度等多个维度展开深入探讨。研究表明, 高比例可再生能源接入给传统配电网带来了随机双向潮流、电压波动、故障定位困难等挑战, 而主动配电网模式通过源-网-荷-储协同控制技术能够有效提升电网对可再生能源的消纳能力。本文详细分析了分布式电源接入优化规划方法、多能互补运行策略、柔性互联技术等核心问题, 提出了集成可再生能源的配电网设计框架和实施路径, 为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系提供了理论支撑和技术参考。

关键词: 可再生能源; 配电网; 集成设计; 分布式电源; 智能调度; 储能系统

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 09. 024

引言

在全球气候变化和能源安全双重挑战下, 大力发展可再生能源已成为世界各国的战略选择。近年来, 我国风电、光伏等可再生能源发电装机规模持续快速增长, 据国家能源局网站发布, 截至 2024 年 6 月底, 风电装机总量突破 4.67 亿千瓦, 连续 15 年保持全球首位; 太阳能电站年均新增装机相当于再造五个三峡工程。这种爆发式增长使得大量分布式电源接入配电网, 彻底改变了传统配电网单向辐射状的运行特性, 给电网规划、运行和控制带来了全新挑战。

可再生能源具有显著的间歇性和波动性特征, 其大规模接入导致配电网出现随机双向潮流、故障难以快速定位隔离、电压波动大等技术难题。传统配电网的规划方法和运行控制策略已难以适应新形势下的发展需求。在此背景下, 研究基于可再生能源的配电网集成设计具有重要的理论价值和现实意义。通过构建主动配电网模式, 实现源-网-荷-储协同优化, 能够在确保电网安全稳定运行的前提下, 大幅提升可再生能源消纳比例, 推动能源系统绿色低碳转型。

1 可再生能源配电网集成的基本概念与特征

1.1 概念

可再生能源配电网集成是指将分布式可再生能源发电系统与现有配电网有机融合, 形成协调运行的整体能源供应体系。区别于传统配电网的单向供电模式, 集成可再生能源的配电网呈现出双向潮流、多源协同和主动控制三大典型特征。在结构上, 这种新型配电网打破了“发电-输电-配电-用电”的严格界限, 实现了电能生产与消费在配网层面的局部闭环。

1.2 特征

可再生能源配电网集成系统表现出明显的技术特性。首先是电源出力的波动性和不确定性, 风电和光伏发电受天气条件影响显著, 日内功率波动幅度可达额定容量的 70% 以上。其次是电网结构的复杂化, 分布式电源的接入使配电网从单电源辐射状网络变为多电源环网结构, 潮流分布更加复杂。第三是运行控制的智能化需求, 为应对可再生能源的波动, 需要引入先进的监测、通信和控制技术, 实现配电网的实时感知和快速调节。

从系统功能角度看, 可再生能源配电网集成设计需要实现三大核心目标: 高效消纳 可再生能源发电、确保供电可靠性和电能质量、优化配置 电网资源提高运行经济性。这三个目标之间既相互促进又存在一定矛盾, 需要进行多目标协调优化。例如, 为提高可再生能源消纳率而增加电网灵活性投资, 可能会影响经济性指标; 而过度强调成本控制又可能制约可再生能源的发展空间。因此, 科学的集成设计必须在多重约束条件下寻找最优平衡点。

2 可再生能源配电网集成的关键技术挑战

2.1 功率波动与电网稳定性问题

可再生能源发电输出功率受自然条件影响显著, 呈现出明显的时空波动特性。太阳能发电受日照强度和云层变化影响, 日内波动幅度可达额定容量的 70% 以上; 风力发电则受风速变化制约, 分钟级波动现象十分常见。

这种不可控的功率波动会导致配电网潮流分布频繁变化,引发电压偏差、频率偏移等电能质量问题,严重时可能引发电网振荡甚至崩溃事故。

针对功率波动问题,现代配电网集成设计需要重点考虑多时间尺度的平衡策略。在秒级和分钟级时间尺度上,可通过快速响应的储能系统和柔性负荷进行功率平衡;在小时级时间尺度上,则需要依靠传统机组调节和需求侧响应来实现能量平衡。

2.2 分布式电源并网与系统保护难题

高比例分布式电源接入改变了配电网的单向供电模式,形成了复杂的多电源网络结构。这种结构变化使得传统基于放射状电网设计的保护系统面临严峻挑战,主要表现为保护灵敏度下降、选择性丧失、非同期合闸风险增加等问题。特别是当分布式电源渗透率超过 30% 时,传统三段式电流保护的正确动作率可能降至 80% 以下。

解决保护适配性问题需要从设备层和系统层双管齐下。在设备层面,开发具有方向判别能力的智能保护装置,集成电压、电流、频率等多参量判据;在系统层面,构建基于广域测量的协同保护体系,实现故障信息的快速共享和联合研判^[1]。

3 可再生能源配电网集成设计方法

3.1 主动配电网规划理论

主动配电网是对传统配电网理念的重大革新,其核心是通过主动控制和管理手段,实现分布式能源的高效利用和电网资源的优化配置。在规划阶段,需要综合考虑可再生能源资源禀赋、负荷需求特性、网络拓扑结构等多重因素,建立多目标优化模型。常见的优化目标包括投资成本最小、网损最低、电压质量最优、可再生能源渗透率最大等。

现代配电网规划已从传统的确定性方法发展为考虑不确定性的随机规划方法。通过建立风速、光照强度和负荷需求的概率模型,采用场景分析法或鲁棒优化技术,能够有效处理可再生能源出力的不确定性。

3.2 多能互补与协同运行策略

可再生能源的高效利用离不开多能互补技术的支持。通过协调优化不同特性的能源品种,可以实现能源供给的时空互补,提高系统整体效率。常见的互补模式包括风-光互补、水-光互补、光-储互补等。在配电网层面,还需要考虑电、热、冷等多种能源形式的协同优

化,构建综合能源系统。

多能互补系统的优化运行需要解决两个关键问题:一是建立精确的元件模型,包括可再生能源发电单元、储能设备、柔性负荷等的运行特性;二是设计高效的调度算法,能够在复杂约束条件下快速求解最优运行策略。

4 智能技术在可再生能源配电网中的应用

4.1 数字孪生与虚拟电厂技术

数字孪生技术为可再生能源配电网提供了全新的管理工具。通过构建与物理电网同步更新的虚拟镜像,可以实现配电网全生命周期的精准管控。数字孪生模型整合了地理信息、设备参数、运行状态等多源数据,支持规划仿真、状态评估、故障预警等高级应用。预计到 2025 年,数字孪生技术将在配电网规划领域得到广泛应用,使规划方案的准确性提高 30% 以上。

虚拟电厂技术是聚合分布式资源的有效手段。通过先进的信息通信技术,将分散的可再生能源发电单元、储能系统和可控负荷聚合成一个可控的整体,参与电力市场交易和系统调度。虚拟电厂不仅能够平抑可再生能源的波动性,还可以提供调频、备用等辅助服务,创造额外的经济效益^[2]。

4.2 区块链与分布式控制技术

区块链技术为去中心化的电力交易提供了可信平台。在含高比例可再生能源的配电网中,传统的集中式交易模式难以适应大量分布式主体的参与需求。基于区块链构建的点对点电力交易市场,可以实现发电者与消费者之间的直接交易,降低交易成本,激发市场活力。同时,智能合约的自动执行特性,能够确保复杂交易条件的可靠实现,减少人为干预和纠纷。

分布式控制技术是解决大规模系统协调问题的有效途径。与集中式控制相比,分布式控制具有可靠性高、扩展性好、通信负担轻等优势。通过设计合理的分布式算法,各局部控制器仅需与相邻节点交换有限信息,即可实现全局优化目标。在可再生能源配电网中,分布式控制特别适用于电压无功调节、经济调度等问题。研究表明,采用一致性算法的分布式电压控制策略,可将计算时间缩短至集中式方法的 1/5,同时保持相当的优化效果^[3]。

5 储能系统在可再生能源配电网中的配置优化

5.1 储能类型选择与容量配置

储能系统是平抑可再生能源波动的关键设备,其合

理配置直接影响配电网的运行性能和经济性。常见的储能技术包括电化学储能（锂离子电池、铅酸电池等）、机械储能（飞轮、压缩空气等）、电磁储能（超级电容、超导储能等）和热储能等。不同类型储能在功率密度、能量密度、响应速度、循环寿命等方面各具特点，需要根据应用场景进行针对性选择。

储能容量配置需要综合考虑技术经济因素。在技术层面，需分析可再生能源出力与负荷需求的时序特性，确定所需的能量缓冲规模和功率调节能力；在经济层面，则需评估储能投资成本、运行维护费用、循环寿命等参数，计算全生命周期成本效益。

5.2 储能系统运行策略与价值挖掘

储能系统的运行策略直接影响其功能发挥和经济效益。常见的运行模式包括峰谷套利、可再生能源平滑、调频辅助服务等。在配电网环境下，往往需要兼顾多种应用目标，设计复合运行策略。基于模型预测控制的滚动优化方法，能够根据最新的可再生能源预测和负荷预测，动态调整储能系统的充放电计划，实现运行效益最大化。

随着电力市场改革的深入，储能系统的价值实现途径日益多元化。除传统的电网侧应用外，储能系统还可以参与需求响应、容量市场、备用市场等多个价值流。通过合理的市场机制设计和价格信号引导，能够充分挖掘储能系统的灵活调节潜力^[3]。

6 可再生能源配电网集成设计的实施路径

6.1 技术标准与政策体系构建

推进可再生能源配电网集成需要完善的技术标准体系支撑。当前亟需制定的标准包括：分布式电源并网技术规范、主动配电网规划设计导则、多能互补系统测试方法等。这些标准应充分考虑不同地区的资源禀赋和电网特点，保持适度的灵活性，为技术创新留出空间。同时，要加强与国际标准的对接，促进技术交流和设备互通。

政策体系是引导行业发展的重要保障。政府部门应出台激励政策，如投资补贴、税收优惠、绿色信贷等，降低可再生能源配电网项目的投资风险；完善价格机制，建立反映灵活资源价值的市场体系；加强监管协调，解决多头管理、标准不一等问题。

6.2 示范工程建设与经验推广

示范工程是验证新技术、新模式的有效途径。选择具有代表性的地区建设可再生能源配电网示范项目，可以积累实践经验，降低全面推广的风险。示范工程建设应注重系统性和创新性，既要验证技术可行性，也要探索商业模式和管理机制。示范内容可包括：高比例可再生能源接入、源网荷储协同控制、综合能源服务等。

经验总结和推广是示范工程价值实现的关键环节。通过建立完善的监测评估体系，量化分析示范项目的技术经济性能；形成可复制、可推广的典型设计方案和运营模式；组织行业交流活动，扩大示范效应^[4]。

7 结论与展望

本研究系统探讨了基于可再生能源的配电网集成设计问题，得出以下主要结论：主动配电网模式通过源-网-荷-储协同控制技术，能够有效解决高比例可再生能源接入带来的技术挑战；多能互补优化运行和储能系统合理配置可显著提高可再生能源消纳比例；数字孪生、区块链等智能技术的应用为配电网管理提供了创新手段；完善的标准体系和政策支持是推进集成的制度保障。

未来可再生能源配电网将呈现以下发展趋势：一是柔性互联技术广泛应用，实现多电压等级灵活衔接；二是“源网荷储”一体化调控平台成为标配，供需动态平衡能力显著提升；三是数字孪生技术深度应用，实现规划、运行与维护的全流程数字化；四是分布式电力市场成熟发展，激发用户侧灵活资源参与系统调节。随着技术进步和机制完善，可再生能源将在配电网中承担越来越重要的角色，为构建清洁低碳、安全高效的能源体系作出更大贡献。

参考文献

- [1] 李丽丽, 泮泉泉. 电力系统智能配电网的设计[J]. 光源与照明, 2023(3): 215-217.
- [2] 杨皓然. 基于电力系统分析的智能配电网建设研究[J]. 仪器仪表用户, 2024, 31(10): 76-78.
- [3] 刘世杰, 陈景尚, 陈赵荣, 等. 智能化低压配电网线缆抢修系统设计[J]. 光源与照明. 2023, (8).
- [4] 陈池瑶, 苗世洪, 姚福星, 等. 基于多智能体算法的多微电网-配电网分层协同调度策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 57-65.