

电力系统中分布式电源 AVC 协调控制策略研究

梁征奇 李玲君 宋明

国网威海市文登区供电公司 山东威海 264400

摘要: 随着分布式电源的大规模接入,电力系统电压控制问题日益突出,传统自动电压控制(AVC)模式已难以满足分布式电源并网后对电压稳定性和电能质量的要求。本文结合分布式电源的运行特点,探讨了AVC协调控制的策略优化路径。在分析电力系统电压波动机理及分布式电源运行特性的基础上,提出了面向分布式电源的多层次、分区域AVC协调控制思路,并研究了调度中心、区域控制单元与现场设备之间的协同关系。AVC协调控制是构建新型电力系统的重要环节,对于推动分布式电源的高效利用和电网安全运行具有重要意义。

关键词: 电力系统;分布式电源;自动电压控制;控制策略

1 电力系统中应用分布式电源的重要意义

分布式电源作为近年来电力系统发展的重要方向,其应用不仅是能源结构调整的必然选择,也是应对环境保护、能源安全与电网运行方式转型的关键举措。相比传统的大型集中式电源,分布式电源体量较小、布局灵活,能够因地制宜地接入电网,贴近负荷中心,实现能源的就地消纳。这一特性不仅有效降低了输配电过程中的能量损耗,还缓解了主干电网的输电压力,提升了电网整体运行的经济性和灵活性。尤其是在我国电力需求逐年增长、能源利用结构亟待优化的背景下,分布式电源的推广应用显得尤为重要。

从能源结构角度看,分布式电源大多以可再生能源为主,如光伏、风能、生物质能等。这些能源清洁、取之不尽,用之不竭,能够在一定程度上替代化石能源的消耗,减少温室气体和污染物的排放,符合“双碳”战略目标要求。通过推动分布式电源发展,可以逐步实现绿色低碳转型,提升电力系统的可持续发展水平。同时,分布式电源还可以与传统能源形成互补,减少对单一能源的依赖,增强能源供应的多样性与稳定性,从而在应对能源危机与外部环境不确定性时发挥积极作用。

从供电可靠性和弹性角度看,分布式电源的分散性和灵活性,有助于提升电网抵御风险的能力。传统集中式电源一旦发生故障,可能造成大范围停电,而分布式电源则通过分布式布局和分区供电,在突发事件中能够承担局部电力供应,增强电力系统的抗风险能力。特别是在自然灾害频发的地区,分布式电源与微电网的结合可以实现“孤岛运行”,

在大电网受损的情况下,依然维持关键区域的电力供应,保障社会基本运行秩序。

从技术创新和应用发展角度看,分布式电源的广泛应用推动了电网运行模式的深刻变革。随着分布式电源接入规模的不断扩大,电网逐步从“源随荷动”的传统模式,向“源网荷储协同”的新型运行模式转变。这不仅促进了电力电子技术、智能调控系统的发展,也为储能技术、需求侧管理以及虚拟电厂等新兴领域提供了发展空间。可以说,分布式电源不仅是电力生产方式的补充,更是电力系统智能化、数字化发展的重要支点。

2 分布式电源特性分析

2.1 输出的间歇性与波动性

分布式电源多以可再生能源为主,如光伏、风电等,其本质特点决定了其输出功率具有明显的间歇性与波动性。以光伏发电为例,太阳辐照度受天气、季节及昼夜变化影响显著,晴天和阴天的功率差异可能在短时间内呈现剧烈波动;而风力发电则受到风速、风向以及地理环境的限制,其输出的随机性更强。这种特性给电网的调度与实时控制带来挑战,特别是在分布式电源占比较高的区域,电力系统可能频繁出现电压波动和有功、无功功率不平衡的现象。如果缺乏有效的协调与控制手段,系统的运行稳定性将受到严重影响。此外,间歇性和波动性也使得电源预测难度增加,调度计划难以完全依赖静态模型,需要更多依托实时监测与动态控制策略。因此,对分布式电源输出规律的研究,是后续制定合理控制策略的前提。

2.2 接入点分散与潮流反转

与集中式电站不同,分布式电源往往以小规模、分散化方式接入配电网,其位置遍布城乡负荷中心附近。由于接入点多而分散,潮流分布出现较大差异,传统配电网自上而下的单向潮流模式被打破。特别是在分布式电源出力大于本地负荷需求时,电力会向上传输,造成潮流反转现象。这不仅影响配电网的潮流分布规律,还可能导致保护装置动作误差、电压越限等问题。潮流反转还对电力设备的选型、线路损耗和电压调节提出新要求,若未加以合理规划,容易引发局部过载与设备损耗加剧。接入点的分散化还增加了电网调度与监控的复杂性,电力系统需要更加灵活的分区管理和实时数据采集手段。如何在分布式电源接入不断增加的背景下,保持潮流的可控性与电能质量的稳定,成为电力系统中亟需解决的重要问题。

2.3 对电压与频率稳定性的影响

电力系统稳定运行依赖电压和频率的平衡,但分布式电源的接入打破了传统稳定机制。首先,分布式电源多为逆变器型电源,缺乏大型机组惯性支撑,在系统发生扰动时,频率调节能力不足,可能加剧系统频率波动。其次,在电压控制方面,分布式电源的无功调节能力有限,特别是大量光伏接入时,当日照条件突变时电压可能出现剧烈波动,对用户用电安全产生影响。如果电网缺少有效的电压支撑措施,例如无功补偿与快速调节手段,可能出现电压越限或频繁波动的情况。此外,分布式电源输出特性的不确定性,使得电压与频率控制呈现复杂耦合关系,常规的集中式调节方式难以适应这一变化。因此,在大规模分布式电源接入条件下,如何构建分布式电源与电网之间的互动调节机制,保障电压和频率的稳定性,是实现分布式能源消纳和电力系统安全运行的关键。

3 AVC 协调控制策略框架

3.1 分层分区控制思路

在分布式电源广泛接入电力系统的背景下,电网运行模式日益复杂,传统的集中式自动电压控制(AVC)已难以满足快速、精准的调节需求。为此,分层分区控制思路应运而生,并逐渐成为研究和实践中的核心方法。这一思路的本质在于将大电网复杂的电压调节问题进行分解,通过层级化和区域化的方式实现精细化、分布式的协调控制,从而既保证全局电网的电压稳定,又能兼顾分布式电源接入后的局部

调节需求。

从宏观层面看,分层分区控制主要包括“全局—区域—终端”三个层次。全局层通常由调度中心或主控系统负责,其核心任务是制定总体的电压控制目标和策略,保证电网运行的安全性与稳定性。区域层则对应电网的不同分区,如配电网或局部微电网,其主要作用是根据上层目标进行细化和分解,并结合本区域内分布式电源的特性,制定可操作性的控制方案。终端层则是直接作用于设备,如分布式电源逆变器、并网点无功补偿装置和储能系统,负责快速响应区域层下达的控制指令,完成实时的电压调节。

在具体实施过程中,分区的划分通常依据电网的拓扑结构、潮流分布以及分布式电源的接入特征。例如,对于高分布密度的光伏电站区域,可以单独作为一个调控单元,以便在光照条件变化时及时调整电压水平;而在负荷集中的城市配电网,则可能将一个变电站供电范围划为一个分区,由区域控制器统一协调调节。通过这种“因网制宜”的分区方式,不仅能够提升调节的灵活性,还能避免单一控制中心因信息量过大而导致的延时和失效。

分层分区控制思路的优势体现在三个方面。第一,它将复杂问题分解成多个相对独立的子问题,使得控制任务更具可操作性,提升了系统的响应速度。第二,分层机制为控制提供了冗余保障:即便某一层级出现故障或延迟,其他层级仍能在一定范围内保持电网的稳定运行。第三,这一思路为未来大规模应用储能、虚拟电厂和需求侧响应奠定了基础,因为这些新型资源同样可以灵活嵌入不同的层级和分区之中,实现更广义上的源网荷储协同。

3.2 多主体协同机制

在分布式电源快速发展的背景下,电力系统中的参与主体逐渐呈现多样化特征,除了传统的发电厂和电网调度中心,还包括数量庞大的光伏、风电场站,中小型分布式电源用户,储能系统以及用电负荷侧的响应资源。各类主体之间既存在目标上的一致性——保障电网安全稳定运行,又存在利益与行为上的差异性,这为电压控制与无功调节提出了更高要求。多主体协同机制的设计,正是AVC协调控制策略的核心环节,其目的在于打破传统单向控制模式,实现多层次、多维度的资源联动与优化配置。

从结构上看,多主体协同机制包括调度主体、区域主体和终端主体三个层次。调度主体位于最高层,负责全网运

行的总体规划与控制目标设定,如电压水平区间、无功备用容量等。区域主体则是介于全网与终端之间的中间环节,其主要作用是根据区域内的分布式电源和负荷情况,制定符合本地特征的控制策略。终端主体则具体到设备层,包括光伏逆变器、储能电池、STATCOM 装置等,负责快速执行调节指令,完成电压与无功的实时调控。这种多层主体的分工与协作,使得控制体系既有全局把控,又具备灵活响应。

值得注意的是,多主体协同机制不仅涉及技术逻辑,还与利益分配和管理机制紧密相关。不同主体的运营目标可能存在差异,例如分布式电源业主更关注经济收益,而电网侧则更重视安全稳定。因此,协同机制的构建应引入激励约束机制,通过市场化调节或政策引导,促使各方在共同目标下实现合理让渡与合作。例如,在无功调节服务中,可以通过补偿机制鼓励分布式电源主动参与电压调控,从而提升协同调节的积极性。

3.3 技术支撑与信息化平台

随着分布式电源大量接入,电力系统运行面临的动态复杂性大幅增加,传统的人工调度和经验控制模式难以满足快速、精细化的电压与无功调节需求。因此,构建完善的技术支撑体系和信息化平台成为 AVC 协调控制策略得以有效实施的关键。信息化平台不仅承担数据采集、传输与处理功能,还为控制策略的实时执行提供决策支持。

在技术层面,物联网(IoT)和智能传感技术可实现对电网关键节点的全域监测,包括电压、潮流、负荷以及分布式电源出力等参数。通过部署高精度传感器和通信终端,系统能够实现毫秒级数据采集和远程传输,为 AVC 协调控制提供可靠的实时信息基础。同时,大数据和人工智能算法的应用,使得历史数据分析、功率预测及负荷趋势分析成为可能,从而提前识别电压偏差风险,支持预测性调节,而非单纯依赖事后响应。

信息化平台还可以实现多主体之间的高效协同。通过云端数据处理和区域控制器的分层通信,调度中心、区域控制单元及终端设备能够实现信息共享和指令下达的闭环操作。平台能够根据实时数据自动生成优化控制指令,例如调整逆

变器无功出力、启动储能支撑或调节分接头,实现快速响应。进一步结合可视化技术,电网运行状态、预测趋势及异常预警可直观呈现,便于调度人员和管理者及时决策。

4 结论

本文围绕分布式电源接入条件下的电力系统电压控制问题,提出了 AVC 协调控制的研究思路。通过对分布式电源特性与电力系统电压控制难点的分析,可以得出以下几点结论:其一,分布式电源的接入显著改变了电压波动特征,传统 AVC 模式已无法完全适应,需要引入分区、分层的协同控制模式;其二,AVC 协调控制不仅需要考虑调度层面的整体优化,还应关注区域控制与现场设备的实时响应,通过建立信息共享与动态调节机制,实现全链条的有机衔接;其三,数字化和信息化技术的发展为 AVC 协调控制提供了支撑,基于大数据和智能算法的实时分析,有助于提升电压控制的预测性和主动性。所以,分布式电源的广泛接入为电力系统的绿色转型提供了动力,但也对电网的稳定运行提出了更高要求。AVC 协调控制作为连接分布式电源与电网的关键纽带,既是技术优化的核心点,也是未来智能电网建设的重要方向。未来研究应进一步加强 AVC 与分布式能源管理系统(DERMS)的融合,探索基于人工智能和边缘计算的控制手段,为构建安全、清洁、灵活、高效的新型电力系统提供更有力的支撑。

参考文献:

- [1] 丘永茂.快速限流器在分布式电源接入电力系统中的应用研究[J].光源与照明,2024(7):159-161
- [2] 石童昕,陈龙胜,李统帅,金飞宇.基于智能体的电力系统分布式自适应抗干扰控制[J].北京航空航天大学学报,2024,50(5):1685-1692
- [3] 李斌,罗晓伊.分布式电源对电力系统电压无功优化影响的研究[J].电气技术,2024,25(10):55-6178
- [4] 唐伟强,武丽梅.分布式电源接入电力系统研究[J].光源与照明,2024(4):153-155
- [5] 张瑞.分布式电源接入对电力系统安全稳定运行产生的影响分析[J].电工材料,2024(6):30-33