

分布式光伏与风电集群接入配网的电能质量及安全控制研究

赵振宇

上海电力绿色能源有限公司, 上海 200124

[摘要] 高渗透率分布式新能源接入使配电网电能质量问题越来越严重。本文主要研究集群并网条件下电压偏移、谐波耦合、三相不平衡的演化规律, 建立适应复杂场景的安全调控框架。通过机理分析和分层集群划分相结合的方式, 对多主体协同、一致性控制、混合储能支撑等关键技术路径进行梳理。研究表明, 建立全局协调、集群自治、终端响应的分层架构, 发挥逆变器和储能的柔性调节作用, 是实现新能源高效消纳、配电网安全运行协调统一的一种有效途径。后续要推进人工智能同态势感知技术的深度融合, 加强控制系统自适应决策能力。

[关键词] 分布式光伏; 风电集群; 配电网; 电能质量; 安全控制; 集群调控

DOI: 10.64635/ja.2026.1488

中图分类号: TM73

文献标识码: A

Research on Power Quality and Safety Control of Distribution Networks Integrated with Distributed Photovoltaic and Wind Power Clusters

Zhao Zhenyu

Shanghai Electric Power Green Energy Co., Ltd., Shanghai 200124, China

Abstract: The integration of high-penetration distributed new energy has made power quality problems in distribution networks increasingly serious. This paper mainly studies the evolution patterns of voltage deviation, harmonic coupling, and three-phase imbalance under clustered grid integration conditions, and establishes a safety regulation and control framework suited to complex scenarios. Through a combination of mechanism analysis and hierarchical cluster division, key technical paths such as multi-agent coordination, consensus control, and hybrid energy storage support are reviewed. The study shows that establishing a hierarchical architecture featuring global coordination, cluster autonomy, and terminal response, while giving full play to the flexible regulation role of inverters and energy storage, is an effective way to achieve coordinated and unified high-efficiency renewable energy accommodation and safe operation of distribution networks. In the future, the deep integration of artificial intelligence and situational awareness technologies should be promoted to strengthen the adaptive decision-making capability of control systems.

Keywords: distributed photovoltaic; wind power cluster; distribution network; power quality; safety control; cluster regulation and control

引言

双碳战略不断推进, 分布式光伏、分散式风电以越来越快的速度在配电网侧大规模部署。到 2025 年, 江苏省新能源瞬时出力峰值达到 5182.5 万千瓦, 占全省用电负荷需求的 59.1%。伴随着海量分布式电源的嵌入, 传统的配电网正由“单向无源供电网络”向“双向有源互联网络”快速转变, 其运行特性也发生了根本性的改变。这一变革在推动清洁能源占比提高的同时, 也给配电网供电品质和运行可靠性带来了前所未有的压力, 新能源固有的间歇性、波动性、随机性给配电网供电品质和运行可靠性带来了前所未有的压力。

分布式光伏和风电集群引发的电能质量问题不是相互割裂的, 而是通过潮流重分布、谐波交互影响、

电压-无功强耦合等机制相互叠加、逐级放大。由于集群接入后各节点间的电气耦合关系日趋复杂, 单一节点的扰动可能通过潮流路径波及整个馈线区域, 使得电能质量治理的难度从局部问题上升为系统性问题。传统的单点治理、事后响应的模式不能适应高渗透率场景下多点、多尺度、多目标的协调需求^[1]。因此本文从集群接入下电能质量问题的深层演化机理入手, 归纳安全控制所面对的结构性和应对思路, 在此基础上重点分析集群划分在降维调控中的核心作用, 最后梳理出关键控制技术体系, 为高比例分布式新能源配电网的规划设计和运行调度提供学理支撑。

1 电能质量问题的演化机理

分布式新能源大量接入配电网, 电能质量受电源出力特性、网络拓扑结构相互影响。其深层次机理可

以从电压分布畸变、谐波交互耦合、三相不平衡演化这三个方面来展开。

1.1 电压分布畸变与越限机理

传统配电网电压沿馈线呈单调递减态势，其调节逻辑是以单向潮流假设为基础。分布式光伏和风电注入功率之后，沿线电压分布出现明显的“抬升效应”。当集群密集接入馈线末端或者同一支路多处并网的时候，局部节点电压很容易超过上限，从而引发电压越限事故。研究表明，越靠近系统首端的并网点，它引起的电压波动幅度和谐波畸变程度就越小；在同一支线路上，距离光伏接入点越近的节点电压波动越剧烈^[2]。风电出力反调峰特性同光伏午间出力高峰叠加，又加大了电压时序波动的复杂程度。

从机理上来说，电压偏差同线路有功、无功功率分布有关。在辐射状配电网中，馈线电压降落可以近似表示为 $\Delta U \approx (PR+QX)/U$ ，其中 P、Q 为流经线路的有功和无功功率，R、X 为线路电阻和电抗。分布式电源接入改变了沿线 P、Q 的幅值和流向，当注入功率超过线路传输容量时，局部电压越限就不可避免。光伏出力的快速波动性造成电压调节时间尺度错配，慢速机械开关设备不能跟上毫秒级到秒级的电压变化，快速电力电子装置又受容量限制，二者协调配合成为电压控制的难题。

1.2 谐波交互耦合与谐振放大

分布式电源一般通过电压源型逆变器并网，开关过程以及控制策略不可避免地会产生宽频带谐波分量。多台逆变器集群工作时，各次谐波电流在配电网中叠加传播，某频段下就会引起谐振放大。更复杂的是谐波和基波电压、电流之间存在着非线性耦合关系，谐波畸变会改变系统的等效阻抗特性，反过来影响基波电压的稳定性，形成电压畸变、谐波放大、电压波动的恶性循环链条。

集群效应使谐波分布出现新特征，不同的厂商、不同的拓扑、不同的控制策略的逆变器产生的谐波频谱不同，集群叠加后各次谐波相消或者相长，使谐波分布具有很高的不确定性。另外，风电双馈感应发电机背靠背变流器的脉宽调制过程、光伏逆变器的最大功率跟踪算法都会在某个频段产生非特征次谐波，大大提高了宽频域谐波治理的难度门槛。谐波问题和电压越限问题之间存在着双向耦合的关系，电压畸变影响逆变器锁相环的跟踪精度，进而改变其谐波发射特性，谐波电流注入又加剧了网络电压的波形畸变，二者相互激励，使电能质量恶化呈现正反馈特征。

1.3 三相不平衡演化与耦合效应

大量的单相光伏在低压配电网分散接入，叠加负荷分布固有的不对称性，造成配电网三相不平衡度明显增大。三相不平衡不但会使线路损耗增大，还会使旋转设备的运行工况变坏，而且会通过负序分量耦合通道对风电并网变流器的锁相环和控制稳定性造成干扰。极端情况下，严重的不平衡会引起风电变流器负序过流保护，造成机组脱网，从而加大系统安全风险。

需要特别指出的是，以上三种问题不是孤立存在的，而是通过“潮流-电压-谐波”三者之间的相互影响而形成复合型电能质量问题。三相不平衡造成各相电压偏差程度不一样，进而影响各相逆变器的工作点和谐波发射特性；谐波畸变又会干扰电压调节设备的测量精度和控制响应。耦合特性决定了传统的“逐一击破”治理方式不能奏效，必须要有系统层面的协同治理观。

2 安全控制面临的结构性挑战与应对思路

高渗透率分布式新能源并网给配电网安全运行带来了传统电能质量范畴之外的结构性难题，需要控制方法论做出相应的革新。

2.1 控制维度爆炸与不确定性挑战

当分布式电源数量达到几百甚至几千的时候，传统的集中式优化控制就会遇到“维数灾难”问题，通信网络负担沉重，任何一个关键节点的故障都会造成系统性的风险。与此同时，新能源出力的强随机性造成确定性安全分析范式失效，配电网运行边界变得模糊，安全裕度不能精确量化。单个分布式电源的调节容量较小，不能单独起到有效的调节作用，但是聚合后却具有很大的调节潜力，这种“碎片化”特征使传统以大型集中式电源为调节主体的控制模式陷入困境。

就配电网拓扑结构而言，它具有灵活可变的特性，分段开关、联络开关的投切操作会改变网络拓扑，进而影响潮流分布和电压支撑能力。拓扑结构与分布式电源出力之间存在耦合关系，安全分析的复杂度也随之增大，传统的基于固定拓扑的安全评估方法已经不能满足要求。

2.2 “集群划分-分层调控”应对框架

就上述的诸多难题而言，“集群划分-分层调控”理念给配电网安全控制赋予了有效的降维途径。其主要思想就是根据电气距离和调节特性相似度，把大量的分布式电源归并成若干个具有自治能力的集群，形成云、群、端三级控制架构。云端完成全局协同优化

任务,给各个集群下达调节目标和区间交换功率计划,集群层依靠本地量测信息开展自治调控,迅速响应云端指令并协调群内多元资源,设备层执行具体的控制命令,发挥逆变器、储能等终端的快速响应能力。

该框架的学术贡献在于把复杂大系统调控问题分解成“全局协调+局部自治”的层次化问题,大大降低了集中优化的计算复杂度,又保留了对局部快速扰动的敏捷响应能力。集群划分的具体实现中,可以通过构建净负荷指标与等效电气距离的双维度模块度函数,应用社区发现算法(fast-unfolding)来划分分布式光伏集群^[3]。研究表明,集群划分的质量直接影响分层调控的整体效能。即使调控资源不能实现全网全覆盖,只要基于电气距离与调节特性的相似度对关键集群进行精准布控和协同调度,就可以以较高的经济性保证系统整体运行安全。

3 面向电能质量提升的关键控制技术

在前面的架构指导下,如下几类控制技术对改善集群并网条件下配电网电能质量及安全水平起着关键作用。

3.1 多设备协同优化调控

打破单一设备独立调节的局限,把分布式光伏逆变器、电池储能系统、有载调压变压器、静止无功发生器等纳入统一的优化调控体系。以电压偏差最小化、网络损耗最低化为联合目标,建立多设备协同优化模型,对光伏实施双层集群控制策略来调配无功电压支撑,储能系统和有载调压变压器分别采取分时段差异化调控策略^[4]。仿真结果表明,该方案可以有效地平抑电压波动,降低系统网损。储能系统可以承担大约60%的快速无功补偿任务,调相机和静止无功发生器分别承担25%和15%的无功补偿任务,体现出分层优先级分配的合理性。

协同调控的关键就是多时间尺度的匹配衔接,电压越限属于慢时间尺度的调节,谐波畸变和暂态波动属于毫秒级快速响应。因此优化模型中要加入差异化的时间尺度约束,把机械开关设备和电力电子装置分层解耦协调。建立以网损最小和电压偏移最小为目标的优化模型,采用改进的多组织粒子群优化(MPSO)算法结合小生境技术,求解最优调节顺序与设备动作量。

3.2 分布式一致性协同控制

由于集中控制方案在可扩展性方面存在的固有瓶颈,分布式一致性协议使得各个光伏逆变器只需要和相邻的设备进行局部信息交互,就可以实现电压和谐

波的协同治理。在领导-跟随模式下,跟随逆变器以领导者节点的电压指令为参考,用一致性迭代算法实现全局渐近收敛。该方法可以克服小容量逆变器个体补偿能力不足的缺点,又削弱了通信依赖,大大提高了系统抗通信扰动的能力。

从控制理论的角度来审视,一致性控制把全局优化问题转化为依靠局部信息交互的分布式迭代问题,收敛速率同通信拓扑的代数连通度相关联。该方法对于通信基础设施薄弱的农村配电网来说,也具有较好的适用性。一致性控制的有效性要依靠合理的集群划分,良好的集群划分可以保证群内节点之间的电气耦合紧密,局部信息交互可以反映全局态势,从而保证一致性迭代的收敛性以及收敛速度。

3.3 储能支撑与柔性互联技术

储能系统在不抑功率震荡、提供快速无功支撑方面有独特技术优势。电池和超级电容器组成的混合储能系统,可以满足能量型和功率型调节的双重需求,在电压暂降初期由超级电容器提供瞬时功率支持,电池承担较长时间尺度的能量平衡任务^[5]。另外,能量路由器、柔性多状态开关等电力电子柔性互联装置的工程化应用,给配电网主动潮流调控赋予了能力,从网络拓扑结构层面为电能质量综合治理开辟了新途径。

从功能定位上来说,储能系统在分层调控中起着承上启下的作用,设备层储能提供快速功率响应,集群层储能作为群内柔性调节资源支撑自治调控,全局层储能的能量时移功能可以为云端优化提供时间维度的调节裕度。多重角色的统一,使储能能在云、群、端三层架构中成为连接各个层次的纽带。三种技术手段的互补关系可以归纳为多设备协同从优化决策层面提供全局最优方案,一致性控制从信息交互层面保证分布式实现的可行性,储能和柔性互联从物理装备层面提供快速响应的硬件基础,三者各有侧重又互为补充,在分层调控架构中形成完整的闭环控制链条,三者互相支撑、缺一不可。

4 结语

分布式光伏和风电集群规模化接入配电网,既是能源转型的必然趋势,也是配电网运行控制的重大的难题。本文分析了电压越限、谐波耦合、三相不平衡的产生原因以及相互影响的关系;论述了集群分层调控克服“维度灾难”和“资源碎片化”的方法论优势;整理了多设备协同、一致性控制、混合储能等关键技术的适用条件。研究表明,单纯的设

备级调控难以应对高渗透率场景下的系统性电能质量挑战,必须依托合理的集群划分实现分层分区治理。创建起“全局协调-集群自治-终端响应”的分层架构,是达成新能源消纳和电网安全的合理途径。未来要发展信息-能量流耦合的态势感知方法、考虑不确定性的鲁棒优化策略、深度强化学习决策技术,为配电网安全稳定运行提供支持。此外,如何在实际工程中实现集群边界的动态自适应调整,也是后续研究需要重点关注的方向。

[参考文献]

- [1] 付利达,贾清泉,孙玲玲,等. 构网/跟网型光伏逆变器混联的配电网有功无功双层调压策略[J]. 电力系统自动化,2025,49(12):171-183.
- [2] 王美威,张洪阳,李君,等. 大规模分布式光伏接入石化企业对配电网安全影响研究[J]. 安全、健康和环境,2025,25(1):16-23.
- [3] 张凌浩,郭子冉,肖小龙,等. 基于分布式光伏集群划分的配电网电压调控策略[J]. 分布式能源,2026,11(3):99-109.
- [4] 贾会东,徐海瑞,鲍薇,等. 一种高渗透率光伏下配电网多设备协同调控方法[J]. 自动化应用,2025,66(19):77-82.
- [5] 胡蓉,殷雪莉,徐梦,等. 基于分布式一致性的新型配电系统电能质量综合治理研究[J]. 电测与仪表,2025,62(8):49-61.