

配电侧电能质量监测与改善方案设计

郝孟杨¹ 孟国霞²

1.河南平高电气股份有限公司 河南 平顶山 467001

2.河南平高通用电气有限公司 河南 平顶山 467000

【摘要】：配电侧电能质量的稳定与优化是保障电力系统高效运行的核心前提，其波动问题会直接影响终端用电设备的安全与效能。针对配电侧存在的电能质量扰动现象，立足实际应用场景构建系统性监测与改善方案，通过明确监测重点、优化改善路径、强化方案落地，实现对电能质量关键指标的精准把控与持续提升，为配电网的安全稳定运行提供可靠支撑。

【关键词】：配电侧；电能质量；监测方案；改善策略；电力系统

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.088

引言

电能作为核心能源形式，在工业生产与民生生活中占据不可替代的地位，配电侧作为电能传输的关键环节，其质量水平直接关联能源利用效率与用电体验。当前配电网中，各类非线性负载的广泛应用、电网结构的复杂化等因素，导致电能质量问题愈发突出，不仅影响设备使用寿命，还可能引发电网运行风险。基于此，构建科学有效的监测体系与针对性改善路径显得尤为迫切，既要精准捕捉电能质量异常情况，也要通过合理技术手段与管理措施化解潜在问题，为电力系统的高质量运行筑牢基础。

1 配电侧电能质量核心问题剖析

1.1 电能质量扰动类型及表现形式

配电侧电能质量扰动涵盖电压偏差、频率波动、谐波污染、三相不平衡等多种类型，不同扰动类型呈现出差异化表现特征。电压偏差表现为实际电压值与额定电压值的持续偏离，可能导致用电设备输出功率异常、启动困难等问题^[1]。频率波动多由负荷突变或电源调节不当引发，会影响同步电机的转速稳定性，进而波及精密设备的运行精度；谐波污染源于非线性负载的电流畸变，多余谐波会在电网中传播，造成线路损耗增加、设备过热；三相不平衡则因三相负荷分配不均导致，易引发中性线电流过大、变压器利用率下降等情况，这些扰动形式共同构成了配电侧电能质量的主要隐患。

1.2 电能质量问题产生的核心诱因

配电侧电能质量问题的产生源于多方面因素，既有电网自身结构与运行特性的内在原因，也有外部环境与负载特性的外在影响。从内在因素来看，电网结构设计不合理、线路老化、变压器等设备参数不匹配，会导致电能传输过程中自然损耗与扰动增加；电源侧的不稳定供电，如分布式电源的间歇性出力，也会直接影响配电侧的电压与频率稳定性。外在因素方面，工业领域中电弧炉、变频器等非线性负载的大量使用，会改变电网电流的正常波形，产生谐波与无功功率；居民用电中各类电子设备的普及，以及负荷的随机增减，会导致电网负荷特性复

杂化，打破原有功率平衡，恶劣天气、外力破坏等突发情况也可能引发临时性的电能质量波动。

1.3 电能质量问题引发的连锁影响

电能质量问题的存在会对配电系统及终端用户产生多维度的连锁影响。对于电力系统而言，谐波污染与三相不平衡会增加线路损耗与变压器损耗，降低电网传输效率，长期积累可能导致设备绝缘老化加速，增加故障发生概率，甚至引发电网局部崩溃的严重后果。对于工业用户，精密生产设备对电能质量要求极高，电压偏差或频率波动可能导致产品质量下降、生产流程中断，造成经济损失；谐波干扰还可能影响自动化控制系统的正常运行，引发误操作。对于居民用户，电能质量不佳会导致家用电器使用寿命缩短，照明设备发光不稳定，空调、冰箱等设备运行噪音增大，直接影响生活舒适度与用电安全性。

2 配电侧电能质量监测体系构建

2.1 监测指标体系的科学设定

监测指标的设定需围绕配电侧电能质量的核心影响因素，覆盖电压、频率、谐波、三相平衡度等关键维度。电压指标应包含电压偏差、电压波动与闪变，明确电压允许偏离范围与波动频率阈值；频率指标需设定额定频率上下波动的允许区间，确保监测数据能准确反映频率稳定性；谐波指标应涵盖各次谐波电压含有率、谐波电流含有率及总谐波畸变率，全面捕捉谐波污染程度；三相平衡度指标包括三相电压不平衡度与三相电流不平衡度，以量化三相负荷分配的均衡状态，同时可根据配电网的实际运行特点，补充无功功率、功率因数等辅助监测指标，形成全面且有针对性的监测指标体系。

2.2 监测点的优化布局原则

监测点的布局需遵循全面覆盖、重点突出的原则，结合配电网的结构特点与负荷分布情况科学规划^[2]。在配电线路的关键节点，如变电站出线端、线路分支处、重要用户接入点，需设置固定监测点，实现对电能传输全流程的持续监测；对于负荷密度较高的区域，如工业园区、商业中心，应加密监测点

分布,精准捕捉区域内的电能质量变化;针对临时性负荷集中或易发生扰动的场所,可配置移动监测设备,进行灵活补测,确保监测数据能够全面反映配电侧不同场景下的电能质量状况,为后续分析与改善提供可靠数据支撑。

2.3 监测技术与设备的合理选用

监测技术与设备的选用需匹配监测指标要求与实际运行环境,兼顾精准性与实用性。在监测技术方面,可采用同步相量测量技术实现对电压、频率等指标的实时同步监测,利用谐波分析技术精准识别各次谐波成分,借助数据传输技术实现监测数据的实时上传与共享。监测设备应选用精度高、稳定性强、抗干扰能力突出的产品,如高精度电能质量分析仪、多功能监测终端、数据采集器等,同时需考虑设备的兼容性与扩展性,确保其能够适应配电网络的升级改造与监测需求的变化,保障监测体系的长期有效运行。如图1:



图1 配电侧电能质量监测设备现场图示

3 配电侧电能质量改善关键技术路径

3.1 谐波治理技术的优化应用

谐波治理需根据配电侧谐波污染的具体情况,选用针对性的治理技术与设备。对于固定频率的谐波源,可采用无源滤波器,通过电容、电感的合理组合,对特定次数谐波形成低阻抗通路,实现谐波分流;针对复杂多变的谐波污染,有源电力滤波器更为适用,其能够实时检测谐波电流,通过功率半导体器件产生与谐波电流大小相等、方向相反的补偿电流,抵消谐波影响;还可结合负荷特性,采用混合滤波装置,整合无源滤波与有源滤波的优势,在保障治理效果的同时控制治理成本,实现谐波污染的高效治理。如图2:



图2 配电侧电能质量治理系统现场图示

3.2 电压与频率稳定控制技术实施

电压与频率的稳定控制需从电源侧、负荷侧及传输环节多方面入手。在电源侧,可通过优化发电机组的调节机制,提升其对负荷变化的响应速度,保障输出电压与频率的稳定性;对于分布式电源接入较多的配电网络,需配置储能装置,平抑分布式电源的间歇性出力波动,缓解其对电压与频率的冲击^[3]。在负荷侧,推广应用柔性负荷调控技术,通过引导用户合理调整用电时段与用电负荷,减少负荷突变对电网的影响。在传输环节,采用有载调压变压器、静止无功补偿器等设备,实时调节线路电压,维持电压稳定在允许范围内,保障频率与电压的动态平衡。

3.3 三相不平衡调节技术的实践应用

三相不平衡调节需结合负荷分布特点,采用多种技术手段协同发力。对于永久性三相负荷不平衡,可通过优化负荷分配方式,将单相负荷均匀分配至三相线路中,从源头减少不平衡现象;在配电网络中配置三相不平衡调节器,该设备能够实时检测三相电流的不平衡度,通过调节内部器件参数,动态补偿不平衡电流,快速改善三相平衡状态;还可采用换相开关技术,根据负荷变化情况自动切换单相负荷的接入相序,实现负荷的动态平衡调节,降低三相不平衡对配电系统的不利影响,提升电网运行效率。

4 配电侧电能质量改善方案落地保障

4.1 方案实施的流程规范制定

方案实施需制定清晰有序的流程规范,确保各环节衔接顺畅、执行到位。首先需开展全面的现场勘查与数据调研,明确配电侧电能质量的实际状况与核心问题,为方案细化提供依据;随后进行方案的详细设计,包括技术路线选择、设备参数确定、施工方案规划等内容,确保方案具备可行性与针对性;在施工阶段,需严格遵循施工规范与安全标准,加强施工过程中的质量管控与安全监督,避免施工不当引发新的电能质量问题;施工完成后,进行系统调试与试运行,全面检测方案实施效果,根据试运行情况对方案进行优化调整,确保方案达到预期改善目标。

4.2 技术与管理的协同配合机制

电能质量改善需要技术手段与管理措施的协同发力,构建全方位的保障体系。在技术层面,建立设备定期检修与维护制度,及时排查监测设备、治理设备的运行故障,确保设备始终处于良好工作状态;加强技术创新与推广,引入先进的监测技术与治理设备,提升方案的技术先进性与适用性^[4]。在管理层面,制定完善的电能质量管理制度,明确各相关主体的职责与义务,规范用电行为;加强对用户的宣传引导,提高用户对电能质量重要性的认识,鼓励用户合理选用电设备、配合开展电能质量治理工作;建立健全考核与监督机制,对电能质量改

善工作成效进行定期评估,确保各项措施落到实处。

4.3 资金与人才的支撑体系建设

资金与人才是方案顺利落地的重要保障,需构建完善的支撑体系。在资金保障方面,积极争取政府相关政策支持与资金扶持,合理规划项目预算;鼓励社会资本参与电能质量治理项目,拓宽资金筹集渠道;加强资金使用管理,提高资金使用效率,确保资金投入与项目成效相匹配。在人才支撑方面,加强与高校、科研机构的合作,培养一批兼具理论知识与实践经验的专业技术人才,重点提升其在电能质量监测、治理技术应用、方案设计等方面的能力;建立常态化培训机制,定期组织相关从业人员参加技术培训与交流,及时更新知识储备、掌握行业最新技术动态;完善人才激励机制,吸引并留住优秀专业人才,为电能质量改善工作提供持续的人才保障。

5 电能质量改善成效验证与优化路径

5.1 成效验证的核心评价维度

成效验证需围绕多个核心评价维度展开,全面评估改善方案的实施效果。电能质量指标维度,重点监测电压偏差、频率波动、谐波畸变率、三相不平衡度等关键指标的改善情况,验证其是否达到相关标准要求;系统运行效率维度,分析线路损耗、变压器利用率、供电可靠性等指标的变化,评估方案对配电系统运行效率的提升作用;经济与社会效益维度,核算因电能质量改善带来的设备维护成本降低、生产效率提升、能源消耗减少等经济效益,以及对环境保护、用电安全保障等方面产生的社会效益;方案可行性与可持续性维度,评估方案实施过程中的操作便捷性、成本控制情况,以及在不同运行工况下的适应能力,为方案的长期应用提供参考。

5.2 基于验证结果的优化方向

根据成效验证结果,精准识别方案存在的不足与改进空间,明确优化方向。若部分电能质量指标改善未达预期,需重

新分析问题根源,调整治理技术方案,如优化滤波设备参数、增加监测点密度等;若系统运行效率提升不明显,可从设备选型、运行方式优化等方面入手,进一步降低能耗、提高设备利用率;若方案实施成本过高,需在保障治理效果的前提下,优化方案设计、选用性价比更高的设备、合理控制施工成本^[5]。针对方案在特殊工况下适应性不足的问题,需强化方案的灵活性与兼容性,提升其应对复杂运行环境的能力,确保方案能够持续满足配电侧电能质量改善的需求。

5.3 长期优化的动态调整机制构建

构建长期优化的动态调整机制,确保电能质量能够持续保持在较高水平。建立电能质量长期监测数据库,对监测数据进行常态化分析,跟踪电能质量变化趋势,及时发现新的问题与潜在风险;结合配电网络的升级改造、负荷特性的变化、新技术的发展等情况,定期对改善方案进行评估与调整,使其始终与实际需求相匹配;加强行业内技术交流与经验共享,借鉴先进地区的成功案例与实践经验,不断引入新的技术理念与治理方法,持续优化改善路径;建立反馈响应机制,及时收集用户反馈意见,针对用户提出的用电需求与问题,快速调整优化方案,形成“监测-改善-验证-优化”的闭环管理模式,实现电能质量的持续提升。

6 结语

本文围绕配电侧电能质量监测与改善展开全面探讨,通过剖析核心问题、构建监测体系、明确技术路径、完善落地保障、优化成效验证,形成了一套系统性的解决方案。该方案立足配电侧实际运行特点,实现了问题导向与目标导向的统一,为解决电能质量扰动问题、提升配电系统运行效能提供了切实可行的路径。配电侧电能质量治理是一项长期且持续的工作,未来需结合技术发展与实际需求,不断优化方案、创新方法,持续巩固改善成效,为电力系统的安全、高效、可持续运行提供坚实保障。

参考文献:

- [1] 董奇.光伏发电对电网电能质量的影响分析[J].灯与照明,2025,49(06):134-136+148.
- [2] 肖白,黄丽婷,焦明曦,等.基于最小二乘法-遗传算法和改进可变模糊集的电能质量综合评估[J/OL].现代电力,1-10[2025-12-15].
- [3] 李猛,冯宇波.配电电能质量导致电气火灾的要素分析[J].智能建筑电气技术,2024,18(02):101-103.
- [4] 陈东亚,邱煜捷,魏春娟,等.配电侧智能电表 Modbus 通信规约一致性研究[J].仪表技术,2024,(01):36-38+69.
- [5] 马腾,刘洋,许立雄,等.基于区块链的配电侧多微电网电能去中心化交易模型[J].电网技术,2021,45(06):2237-2247.