

低压配电系统中中性线过热与三次谐波累积关系分析

陈 涵 张春磊

湖南澧水流域水利水电开发有限责任公司江垭水电站 湖南 张家界 427221

【摘要】：三次谐波累积是引发低压配电系统中性线过热的核心诱因，两者存在显著的因果关联与耦合效应。中性线在三相不平衡工况下本就承担电流分流职责，而三次谐波的零序特性使其易在中性线中叠加累积，导致中性线电流远超设计承载阈值，进而引发过热现象。明确两者作用机制、识别影响因素并制定针对性防控措施，对保障低压配电系统安全稳定运行至关重要。通过剖析三次谐波累积的产生路径与中性线过热的形成机理，厘清两者内在关联，可为系统故障排查与优化设计提供关键支撑。

【关键词】：低压配电系统；中性线过热；三次谐波累积；零序特性；系统安全

DOI:10.12417/2811-0528.26.06.082

低压配电系统作为电力传输与分配的末端关键环节，其运行稳定性直接关乎电力供应的可靠性与安全性。中性线作为系统平衡三相电压、分流不平衡电流的核心部件，其工作状态对系统整体运行质量具有决定性影响。中性线过热故障频发，不仅会加速线路绝缘老化，缩短设备使用寿命，更可能引发火灾等严重安全事故，造成重大财产损失与电力供应中断。三次谐波累积与中性线过热之间的潜在关联，逐渐成为制约低压配电系统安全运行的关键瓶颈。深入探究两者内在联系，揭示故障发生的本质规律，可为故障防控与系统优化提供有效思路，搭建起理论认知与实际应用之间的桥梁，助力提升低压配电系统的运行安全性与稳定性。

1 低压配电系统中性线过热问题解析

中性线过热呈现多元特征，核心表现为线缆表面温度超额定阈值，绝缘层伴随软化、变色、老化乃至破损，严重时还会出现异味或局部打火。其危害具有明显递进性，初期导致中性线导电性能下降，增加线路能耗与电压损耗，破坏三相电压平衡，影响用电设备正常运行；过热加剧后，绝缘性能急剧衰减，易引发中性线与相线短路，触发保护装置动作造成停电；若故障未及时处置，高温可能引燃周边可燃物引发火灾，严重威胁配电场所安全，同时造成大量电力设备损毁，扩大经济损失^[1]。中性线过热诱因复杂，除三次谐波累积外，中性线截面选型不足会使不平衡电流通过时产生较大电阻损耗引发升温；三相负载失衡会导致大量不平衡电流集中通过中性线，超出其承载能力；中性线连接点松动或氧化形成的接触电阻增大、线缆老化导致的电阻上升以及外部散热不良等因素，也会促使温度升高，这些因素与三次谐波累积可能叠加，进一步加剧过热风险，提升故障排查与治理难度。

2 三次谐波在低压配电系统中的累积机制

2.1 三次谐波的产生源头与特性分析

三次谐波的产生主要源于低压配电系统中的非线性负载，这类负载在将交流电转换为直流电或调节电压、频率的过程中，会改变电流的正弦波形，从而产生谐波。常见的非线性负载包括开关电源、变频器、荧光灯、电弧炉等，其中开关电源广泛应用于电子设备中，是三次谐波的主要产生源头之一。三次谐波具有显著的零序特性，其相位角相同，在三相四线制系统中，无法通过三相绕组形成的回路相互抵消，而是会沿着中性线形成叠加路径。相较于其他次数的谐波，三次谐波的幅值更容易累积放大，且传播范围较广，对低压配电系统的影响更为突出，容易引发中性线相关的故障问题。

2.2 三次谐波在中性线中的累积路径探究

在三相四线制低压配电系统中，三次谐波的零序特性决定了其独特的累积路径。当三相负载产生的三次谐波电流注入系统后，由于三相谐波电流相位一致，无法在相线之间形成有效的流通回路，只能通过中性线完成回流。各相产生的三次谐波电流会在中性线中同向叠加，随着非线性负载数量的增加和运行功率的提升，中性线中的三次谐波电流会不断累积，其幅值可能逐渐超过相线电流^[2]。中性线的布线方式、长度、截面面积以及连接点的接触状态等，也会影响三次谐波的累积路径畅通性，若中性线存在阻抗突变或局部阻塞，三次谐波电流会在相应位置进一步聚集，加剧局部过热现象。

2.3 影响三次谐波累积程度的关键条件

三次谐波在中性线中的累积程度受到多种条件的影响，其中非线性负载的数量与分布是核心因素。当系统中接入的非线性负载数量较多，且集中在某一相或两相运行时，三次谐波电流的产生量会显著增加，叠加累积的效应更为明显。负载的运行工况也会影响累积程度，非线性负载在满负荷运行时产生的

三次谐波幅值远大于轻负荷运行状态。中性线的参数设计同样关键，截面面积过小会导致中性线阻抗较大，三次谐波电流通过时产生的电压降和功率损耗增加，进一步促进热量累积；而中性线的材质选择不当，也会影响其对谐波电流的承载与传导能力，间接加剧三次谐波的累积效应。系统的供电电压质量、三相负载的平衡程度等，也会对三次谐波的累积产生一定的间接影响。

3 中性线过热与三次谐波累积的内在关联阐释

3.1 三次谐波累积对中性线电流分布的影响

三次谐波累积会彻底改变中性线的电流分布状态。在正常的三相平衡运行工况下，中性线中的电流主要为三相不平衡电流，幅值相对较小且分布均匀。当三次谐波开始累积后，由于其零序特性，各相的三次谐波电流会在中性线中同向叠加，导致中性线电流的幅值大幅增加，甚至出现中性线电流超过相线电流的情况。这种电流分布的改变不仅体现在幅值上，还会导致电流在中性线中的流通过程发生变化，原本均匀分布的电流可能会在中性线的特定区段出现集中现象，形成电流热点。三次谐波电流的频率是基波的三倍，高频电流会进一步加剧集肤效应，使电流更多地集中在中性线导体的表面，增加导体的有效电阻，进一步提升电流密度，为中性线过热埋下隐患。

3.2 谐波电流叠加引发中性线过热的作用机理

谐波电流叠加引发中性线过热的核心机理在于能量损耗的急剧增加。根据焦耳定律，电流通过导体产生的热量与电流的平方、导体电阻以及通电时间成正比。三次谐波累积导致中性线电流幅值大幅上升，叠加基波电流后，中性线承载的总电流平方值急剧增大，使得电阻损耗呈非线性增长，产生大量的焦耳热^[3]。三次谐波的高频特性加剧了集肤效应，使电流集中在导体表面，减小了电流的有效流通面积，等效增大了导体的电阻，进一步提升了单位长度导体的发热量。谐波电流的存在还会导致中性线与周边部件之间产生电磁感应损耗，这类损耗同样会转化为热量，叠加在电阻损耗产生的热量之上，导致中性线温度持续升高，最终引发过热现象。

3.3 不同谐波累积程度下中性线过热的差异表现

不同三次谐波累积程度对应着中性线过热的不同表现形态。在谐波累积程度较轻的阶段，中性线温度仅出现轻微升高，未超出额定运行温度，此时过热现象较为隐蔽，仅能通过精密仪器检测发现，对系统运行的影响较小，仅可能导致少量能耗增加。随着谐波累积程度的加深，中性线温度显著上升，接近或超出额定温度阈值，线缆绝缘层开始出现轻微软化、变色等老化迹象，同时可能伴随电压波动，影响敏感设备的正常运行。当谐波累积达到严重程度时，中性线电流会远超承载极限，温

度急剧升高，绝缘层快速老化破损，出现异味、冒烟等明显故障表征，极易引发短路、打火等严重故障，甚至诱发火灾，导致系统停电，造成重大损失。

4 基于三次谐波防控的中性线过热治理对策

4.1 三次谐波产生源头的抑制技术与措施

从三次谐波产生源头进行抑制，是治理中性线过热的基础性措施。针对非线性负载产生谐波的特性，可在非线性负载端安装无源滤波器，通过电容、电感等元件的组合，形成对三次谐波的低阻抗通路，将谐波电流限制在负载内部，减少其向系统侧的注入量。对于功率较大的非线性负载，可采用有源电力滤波器，通过实时检测负载电流中的谐波分量，生成与谐波电流幅值相等、相位相反的补偿电流，实现对三次谐波的精准抵消^[4]。优化负载选型与配置也能有效抑制谐波产生，优先选用低谐波排放的节能设备，避免大量同类非线性负载集中接入同一相，通过合理分配负载，降低单台设备或单相线路的谐波产生强度。

4.2 中性线谐波电流分流与疏导方案设计

通过合理的方案设计实现中性线谐波电流的分流与疏导，可有效降低中性线的电流承载压力，缓解过热现象。在三相四线制系统中，可采用分裂中性线的设计方案，将中性线在适当位置分裂为多条支线，分别连接不同区域或不同类型的负载，使三次谐波电流在多条支线上分散流通，避免在单一中性线上过度累积。可在中性线关键节点处设置谐波分流装置，引导部分谐波电流通过其他路径回流，减少中性线的谐波电流总量。优化系统布线方式，缩短中性线长度，减少线路阻抗，确保中性线连接点接触良好，可降低谐波电流在传输过程中的损耗与聚集，提升谐波电流的疏导效率。

4.3 适配谐波工况的中性线选型与改造策略

结合谐波工况特点优化中性线的选型与改造，可提升中性线对谐波电流的承载能力。在中性线截面选型方面，应充分考虑三次谐波累积的影响，适当增大中性线的截面面积，通常可选用与相线等截面的中性线，对于谐波含量较高的系统，可进一步加大截面，降低导体电阻，减少电流通过时的热量产生。在材质选择上，优先选用导电性能优良、电阻率低的铜导体，提升中性线的导电效率与散热性能。对于已投入运行的老旧系统，可开展中性线改造工作，修复松动、氧化的连接点，加装绝缘防护套管，提升中性线在谐波工况下的运行稳定性与安全性。

5 低压配电系统中性线安全运行保障体系构建

5.1 谐波与中性线状态的实时监测体系搭建

搭建谐波与中性线状态的实时监测体系,是保障中性线安全运行的前提。在低压配电系统的关键节点,包括中性线主干线、分支线以及非线性负载集中接入点,安装谐波监测装置,实时采集三次谐波的幅值、相位等参数,掌握谐波的产生与累积情况。在中性线的关键区段安装温度监测传感器,实时监测线缆表面温度与接头温度,及时发现温度异常升高的现象。通过数据采集终端将监测到的谐波数据与温度数据传输至后台监控中心,构建全面的监测网络,实现对系统运行状态的实时掌控,为故障预警与处置提供数据支撑。

5.2 基于运行数据的故障预警与处置机制

建立基于运行数据的故障预警与处置机制,是实现中性线过热故障早发现、早处置的核心支撑,能够大幅提升故障响应效率与处置精准度。在后台监控中心搭建专业化数据处理平台,整合并深度分析实时采集的谐波幅值、相位及中性线线缆温度、接头温度等关键数据,结合系统运行工况科学设定多维度谐波幅值阈值与温度阈值区间。当监测数据突破预设阈值时,系统立即触发分级预警信号,通过声光提示、监控报警等多渠道同步告知运维人员,精准指引故障排查方向。针对不同等级的预警信号制定差异化处置流程:轻微预警时,可远程调控负载运行分配状态、启用备用滤波装置等手段快速干预,避免故障升级;严重预警时,需立即启动应急处置预案,自动或手动切断相关区域电源,迅速组织专业运维团队赶赴现场开展全面排查,及时更换损坏的中性线部件及附属装置,待彻底消

除安全隐患、经严格检测合格后,方可恢复供电,保障系统安全稳定运行。

5.3 全生命周期的中性线维护与管理规范

制定全生命周期的中性线维护与管理规范,可从制度层面保障中性线的安全运行。在设计阶段,明确中性线的选型标准、截面计算方法以及谐波防控措施,确保设计方案适配系统的谐波工况。在施工阶段,严格按照设计要求开展中性线的敷设与连接工作,加强施工质量管控,避免出现连接松动、线缆损伤等问题^[5]。在运行阶段,定期对中性线进行巡检维护,检查线缆绝缘状态、连接点接触情况以及监测装置的运行状态,及时清理线缆周边的障碍物,保障散热通畅。在退运阶段,对中性线进行全面检测评估,妥善处置老化、损坏的线缆,避免废旧线缆随意丢弃引发安全隐患。

6 结语

本文深入剖析了低压配电系统中中性线过热与三次谐波累积的内在关联,明确了三次谐波累积通过改变中性线电流分布、增加能量损耗引发过热的作用机理。通过梳理三次谐波的产生与累积机制,结合中性线过热的故障表现,提出了从源头抑制谐波、分流疏导谐波电流、优化中性线选型改造以及构建安全运行保障体系的治理路径。研究成果为低压配电系统中性线过热故障的防控提供了系统的技术思路,对提升电力供应的安全性与稳定性具有重要实践意义。未来需持续关注非线性负载的发展趋势,进一步优化谐波防控与中性线保护技术,完善安全运行保障体系。

参考文献:

- [1] 张琴.建筑电力系统低压配电系统安装及调试技术[J].居业,2025,(11):100-102.
- [2] 杨浩旋.综合能源站低压配电系统接地型式及断路器极数选择研究[J].中国设备工程,2025,(21):148-150.
- [3] 孙立业.电力推进船舶中低压配电系统稳定性增强技术研究[J].电气技术与经济,2025,(10):55-58.
- [4] 向明.低压配电系统中的 TN、TT 和 IT 接地适用性分析[J].集成电路应用,2025,42(10):144-145.
- [5] 纪春晓,李世友,邹伟业.低压配电系统的施工与维护研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(09):68-70.