

建筑电气照明中的谐波问题及其抑制方法

杨 浩

(颍上交能建设工程有限公司, 安徽 阜阳 236200)

摘 要 为解决建筑电气照明系统中谐波引发的设备运行不稳定、能耗增加等问题,对LED驱动电源、三相负载、调光设备、设备耦合及配电系统等环节的谐波成因展开分析,提出针对性抑制方法,包括优化LED驱动电源拓扑与滤波设计、均衡配置三相照明负载、适配调光设备谐波过滤装置、实施设备间谐波隔离、优化配电系统结构等。这些方法形成从源头控制到系统防护的完整治理体系,为建筑电气设计及运维人员提供技术参考。

关键词 建筑电气照明;谐波抑制;LED驱动电源;三相负载均衡;智能配电系统

中图分类号: TU11

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.26.008

0 引言

建筑电气照明系统的谐波污染问题在绿色建筑与智能电网建设背景下日益凸显。LED驱动电源的非线性特性、三相负载失衡、调光设备动态谐波及配电系统结构缺陷,不仅威胁设备寿命与电网稳定性,更与“双碳”目标下的能效提升需求形成矛盾。本文聚焦谐波产生的多维度诱因,结合有源滤波器、智能控制算法等先进技术,提出从源头优化到系统防护的全链条治理方案,旨在为建筑电气系统的绿色化、智能化升级提供理论支撑与实践路径。

1 建筑电气照明主要谐波问题

1.1 LED驱动电源非线性引发的谐波

在建筑电气照明系统中,LED照明凭借高效节能的优势得到广泛应用,但其驱动电源的非线性特性成为照明系统谐波产生的核心源头。LED驱动电源内部的开关器件在高频切换过程中,会打破电流电压的正弦波形规律,由此产生大量谐波分量。这些谐波分量并非孤立存在,它们会随着电流在电路中传输,对整个照明系统的电流波形造成干扰。非隔离式驱动电路虽在成本和体积上有一定优势,但存在共模干扰问题,这种干扰会通过电路中的寄生参数耦合谐波,进一步增加谐波的复杂性和危害程度。更值得注意的是,一些低成本驱动方案为了控制成本,在滤波设计上存在缺陷,无法有效过滤已产生的谐波,导致谐波在输出过程中被放大,加剧了照明系统的谐波污染。

1.2 三相照明负载不平衡导致的谐波

三相照明负载在建筑电气照明系统中能否均衡分配直接关系到系统的谐波状况,三相负载分配不均会

显著加剧中性线谐波叠加。在实际的建筑照明设计与使用中,由于照明区域功能的差异以及灯具布置的不合理,常常出现单相照明负载集中的情况。当大量照明负载集中在某一相时,会打破三相电流原有的平衡状态,导致三相电流失衡。在这种失衡状态下,电流在三相电路中的分布不再均匀,进而引发电流波形的畸变,为谐波的产生创造了条件。中性线在三相电路中本应起到平衡三相电压的作用,但在三相负载不平衡时,中性线电流会大幅增加。更为关键的是,3次谐波具有零序性,在中性线中会出现叠加现象,使得中性线电流中的3次谐波分量被显著放大。随着3次谐波的放大,其对中性线的危害也随之加剧,可能导致中性线过热等问题。

1.3 调光设备运行产生的动态谐波

调光设备在满足建筑照明不同亮度需求的同时,其运行过程中产生的动态谐波给照明系统的稳定运行带来了挑战,调光过程的负载变化会诱发动态谐波波动。晶闸管调光作为一种传统的调光方式,其通过相位控制来调节输出电压,以达到调光目的。但这种控制方式会使电流波形出现缺口,破坏了电流的正弦特性,从而产生大量高次谐波。这些高次谐波不仅会影响调光设备自身的性能,还会通过电路传导至其他设备,造成干扰。PWM调光技术虽然在调光精度和线性度上有一定提升,但其工作原理是通过高频开关来调节占空比实现调光,高频开关动作会引入额外的谐波分量^[1]。而且,随着调光频率的变化,谐波的频率和幅值也会发生相应改变,增加了谐波的动态特性和复杂性。调光深度的变化同样会对谐波产生影响,当调光深度发生改变时,负载的工作状态也随之变化,导致电路中

的电流电压波形发生改变,进而使谐波畸变率出现动态波动。

1.4 照明与其他设备的谐波耦合干扰

建筑电气系统中存在多种用电设备,照明系统与这些设备共处同一电网时,并非相互独立运行,它们之间的谐波耦合干扰会对整个电气系统的正常工作造成影响,多设备共处同一电网时谐波会相互耦合放大。照明系统自身产生的谐波会通过电网传输到其他设备,而空调、电梯等大型用电设备在运行过程中也会产生谐波,当照明系统与这些设备产生的谐波频率相近时,会出现频率叠加现象。这种叠加并非简单的数量相加,而是会使谐波的幅值增大,危害程度也随之提升。对于建筑中的弱电设备,如通信设备、监控设备等,它们对谐波更为敏感。照明系统产生的谐波通过电网传导至这些弱电设备后,会干扰其内部的电子线路和信号传输,导致弱电设备出现信号失真、工作不稳定等问题,严重时甚至会造成设备故障,影响建筑的正常运营。接地系统作为电气系统的重要组成部分,其主要作用是保障设备和人员安全。但如果接地系统不良,会成为谐波传播的又一途径。

1.5 配电系统结构缺陷放大的谐波

配电系统作为建筑电气照明系统的重要组成部分,其结构设计的合理性直接关系到谐波的传播与影响,配电设计不合理会加剧谐波的传播与影响。配电线路阻抗在谐波的传播过程中起着重要作用,当配电线路阻抗与谐波源的阻抗不匹配时,会出现谐波反射现象。反射回来的谐波与原有谐波相互作用,导致谐波在局部区域被放大。这种放大后的谐波会沿着线路继续传播,对更多的设备和线路造成干扰。变压器作为配电系统中的关键设备,其容量与照明负载的匹配程度至关重要^[2]。如果变压器容量与照明负载不匹配,在照明负载运行过程中,可能会引发谐波共振。当谐波频率与变压器及相关电路的固有频率接近时,会产生共振现象,使谐波幅值急剧增大,对变压器和整个配电系统造成严重危害,可能导致变压器过热、绝缘老化加速等问题。

2 对应谐波问题的抑制方法

2.1 LED 驱动电源谐波优化

LED 驱动电源作为谐波产生的核心源头,其谐波优化需从电路设计和技术应用两方面入手,通过改进电源结构与性能从根本上减少谐波输出。采用有源功率

因数校正(APFC)技术是降低谐波的关键手段,该技术通过实时检测输入电流与电压的相位关系,动态调整开关器件的导通状态,使输入电流波形尽可能接近正弦波,从而将功率因数提升至 0.9 以上,显著降低谐波分量。优化驱动电路拓扑结构同样重要,交错式 PFC 电路通过多相交错工作模式,可将输入电流的纹波抵消,减少开关过程中产生的谐波干扰。这种拓扑结构能分散开关器件的工作压力,降低单个器件的开关损耗,同时使电流波形更平滑,进一步抑制谐波的产生^[3]。提升驱动电源的滤波设计是不可或缺的环节,多级 LC 滤波电路通过电感和电容的协同作用,能针对性过滤不同频率的谐波。前级电感可抑制高频谐波的传导,中间电容能吸收低频谐波分量,后级滤波则进一步净化输出电流,确保流经 LED 的电流稳定且接近正弦波,避免因滤波不足导致的谐波放大问题。

2.2 三相照明负载的均衡配置

三相照明负载的均衡配置需通过科学的设计与动态调节,消除因负载失衡引发的谐波叠加,从系统层面减少谐波产生的条件。在照明系统设计阶段,应根据建筑各区域的照明需求,将照明负载按功率均匀分配至三相回路。通过计算各区域灯具的总功率,结合三相平衡原则,将负载偏差控制在合理范围内,避免某一相负载过于集中。这种均衡分配能使三相电流保持相对平衡,减少电流波形畸变的可能性。增大中性线截面是应对 3 次谐波叠加的有效措施,由于 3 次谐波在中性线中的叠加会导致电流增大,将中性线截面设计为相线截面的 1.5 倍以上,可提高中性线的载流能力,避免因 3 次谐波过大造成的中性线过热。同时,采用铜材质的中性线能降低线路阻抗,减少谐波在传输过程中的能量损耗。动态监测三相电流并通过智能开关调节平衡是保障长期稳定的关键,在三相回路中安装电流传感器,实时采集各相电流数据,当某相电流偏差超过设定阈值时,智能开关自动调整对应回路的灯具接入状态,将部分负载切换至负载较轻的相序,通过动态调节维持三相电流的平衡状态,从根源上抑制因负载失衡产生的谐波。

2.3 调光设备谐波适配设计

调光设备的谐波适配设计需针对不同调光技术的特性,通过技术替代和辅助措施,减少动态谐波的产生与传播。采用无频闪调光技术替代传统晶闸管调光可从根本上解决相位控制带来的谐波问题,0~10 V 调光通过改变控制电压信号调节灯具亮度,不影响主

电路的电流电压波形,能有效避免因相位切割产生的高次谐波。这种调光方式不仅谐波含量低,还能保证调光过程的平滑性,提升照明质量。在调光回路中增设专用谐波滤波器是抑制现有调光设备谐波的重要手段,滤波器需根据调光设备的工作频率和谐波特性进行定制,对于晶闸管调光器,配置RC吸收回路可吸收开关过程中产生的高频谐波;对于PWM调光器,安装LC低通滤波器能过滤高频开关引入的谐波分量^[4]。滤波器的接入位置应靠近调光设备输出端,以最大限度减少谐波向后续电路的传导。开发调光与滤波协同控制的智能模块能适应动态谐波的变化,该模块通过检测调光深度和输出电流波形,实时调整滤波器的参数,当调光深度增加导致谐波畸变率上升时,自动增强滤波强度;当调光频率变化时,同步切换滤波器的工作频段,确保在不同调光状态下都能有效抑制谐波,实现调光功能与谐波控制的协同运行。

2.4 设备间谐波隔离与防护

设备间的谐波隔离与防护需通过物理隔离和路径阻断,切断谐波在不同设备间的耦合传播路径。将照明系统与其他设备采用独立配电回路是减少相互干扰的基础措施,照明回路与空调、电梯等动力回路分开敷设,各自配备独立的断路器和配电线路。独立回路能避免照明系统产生的谐波直接传入动力设备,同时防止动力设备的谐波侵入照明回路,从电路结构上实现谐波隔离。关键设备加装谐波隔离变压器可进一步阻断谐波传播,隔离变压器通过电磁感应传递能量,其初级和次级绕组之间的屏蔽层能有效抑制共模谐波的耦合。在照明系统与弱电设备之间安装隔离变压器,能过滤照明系统产生的谐波,避免对通信、监控等弱电设备造成干扰;在动力设备与照明回路之间加装隔离变压器,则可防止动力谐波影响照明设备的稳定运行^[6]。优化接地系统是消除地线传播谐波的重要环节,采用单独接地方式,将照明系统、动力设备和弱电设备的接地装置分开设置,接地体之间保持足够距离,避免谐波通过接地极相互传导。同时,接地线路采用多股铜缆并缩短接地长度,降低接地阻抗,减少谐波在接地回路中的传播损耗,通过完善的接地设计切断谐波的地线传播路径。

2.5 配电系统谐波抑制优化

配电系统的谐波抑制优化需从线路设计、设备匹配和回路划分三个维度入手,减少谐波的放大与传播。优化配电线路阻抗匹配可有效避免谐波反射,在设计

阶段计算线路阻抗与谐波源阻抗的匹配参数,通过选择合适截面的电缆和缩短线路长度,使线路阻抗与谐波源阻抗保持匹配。对于长距离配电线路,采用阻抗补偿装置,在线路中串联可调电感,动态调整线路阻抗特性,避免因阻抗不匹配导致的谐波反射放大。合理匹配变压器容量与照明负载能防止谐波共振,根据照明系统的总功率和谐波含量,选择容量为照明负载1.2~1.5倍的变压器,同时确保变压器的短路阻抗在合理范围内。这种匹配方式能使变压器的固有频率远离主要谐波频率,避免共振现象的发生。此外,定期检测变压器的运行参数,当照明负载发生较大变化时,及时调整变压器的运行状态,防止因负载波动引发的共振风险。实施配电回路分区设计可阻止谐波交叉污染,将照明回路、动力回路和弱电回路严格分开,不同回路采用独立的桥架敷设,且保持一定安全距离。在回路交汇处设置隔离挡板,减少谐波通过空间辐射产生的干扰。同时,在各回路的进线端安装谐波滤波器,针对性过滤本回路产生的谐波,通过分区设计和局部滤波相结合的方式,有效抑制谐波在配电系统中的扩散。

3 结束语

建筑电气照明谐波治理需立足系统视角,兼顾问题成因与抑制逻辑。LED驱动电源优化从源头减少谐波输出,三相负载均衡与调光设备适配切断谐波放大路径,设备隔离与配电系统优化则构建谐波传播屏障。这套治理方案既针对具体谐波诱因,又形成协同防控机制,可有效降低谐波对设备寿命、能耗及系统稳定性的影响。在后续实践中,需结合建筑照明实际场景动态调整策略,持续提升谐波治理的精准性与经济性,为建筑电气系统安全高效运行提供保障。

参考文献:

- [1] 刘景德.建筑电气照明系统的节能优化与智能控制技术研究[J].中国照明电器,2025(05):148-149,165.
- [2] 尹壮壮.建筑电气照明安装工程施工技术[J].光源与照明,2025(04):38-40.
- [3] 孙烨鑫,张勇.建筑电气照明安装工程施工关键技术与注意事项[J].光源与照明,2025(04):41-43.
- [4] 吴祖军.照明节能技术在建筑电气设计中的应用[J].住宅与房地产,2025(04):123-125.
- [5] 毛凯旋.室内设计中建筑电气照明系统的设计应用分析[J].居舍,2024(28):95-97.