

建筑照明电气工程中电力系统保护与控制措施研究

阮诗词

中国葛洲坝集团第二工程有限公司 四川 成都 610091

摘要：现代建筑照明电气化、智能化升级过程中，照明负荷结构发生显著变化，非线性LED负荷大量应用，引发谐波超标、电压波动、线路过载等诸多电力运行问题，极大影响照明系统安全稳定运行。本文结合建筑照明电力系统架构与负荷运行特性，系统梳理各类电气故障类型、成因与运行风险，从继电保护、电能治理、智能控制及运维防护多维度提出优化管控措施，有效提升建筑照明供电可靠性、用电安全性与节能运行水平。

关键词：建筑照明；电气工程；电力系统保护；控制措施

引言：照明系统是建筑电气工程的核心组成部分，直接关系建筑使用体验与用电安全。当前各类商用、民用建筑照明负荷日趋复杂，传统保护控制方案难以适配新型LED照明的非线性用电特征，易出现保护误动、电能质量劣化、故障扩散等问题。为有效规避电气安全隐患、改善供电品质、降低照明能耗，本文深入探究建筑照明电力系统运行短板与故障机理，制定科学完善的保护与控制策略，为工程应用提供可靠技术支撑。

1 建筑照明电气工程中电力系统基础理论与运行特性

1.1 建筑照明电力系统整体架构

（1）供配电主干系统与照明分支回路构成。建筑照明电力系统以10/0.4kV变压器为电源节点，经低压配电柜、主干电缆、楼层配电箱形成放射式或树干式供电主干网络，照明分支回路从末端配电箱引出，经微型断路器保护后供给各照明终端设备。主干系统承担电能输送与分配职能，分支回路实现分区域、分功能的精细化控制。（2）照明负荷分类与供电层级划分。按供电可靠性要求，照明负荷划分为一级、二级及三级负荷。一类高层建筑中的疏散照明、备用照明为一级负荷，由双电源供电；公共区域普通照明为二级负荷；车库、设备房等辅助照明为三级负荷。各级负荷通过不同供电方式和切换逻辑实现分层分级管理^[1]。（3）智能化照明配电系统组成模块。智能化系统由配电监测模块、调光控制模块、通信网关、中央管理平台及传感器网络构成。各模块通过总线或无线通信协议互联，实现电压、电流、功率因数等电气参数的实时采集与远程调控，支持按需照明与能耗优化策略。

1.2 建筑照明电力负荷运行特性

（1）常规照明负荷稳定运行特性。传统荧光灯、金卤灯等气体放电光源，其功率因数约0.85~0.9，启动时存在数倍额定电流的冲击涌流，稳态运行后电流波形接近

正弦，谐波含量较低（总畸变率 $<10\%$ ），负荷曲线相对平稳，受电网电压波动影响较小。（2）LED新型照明负荷非线性用电特性。LED驱动电源为开关型电力电子装置，其输入电流呈脉冲状，含有丰富的高次谐波（以3次、5次、7次为主），总谐波畸变率可达15%~30%，功率因数受驱动拓扑影响显著，劣质驱动在宽电压范围内波动较大。同时，LED负荷具有恒功率特性，电流随电压升高而下降，呈现负阻抗特征。（3）不同场景照明负荷波动规律。办公类建筑照明负荷呈周期性日波动，工作日8:00~18:00为高峰区间，负荷变化平缓；商场类照明负荷随营业时段及节假日呈明显峰谷交替；酒店类照明负荷夜间高于日间，季节性差异较大。各类场景负荷波动规律直接影响配电容量计算与节能策略制定。

1.3 照明电力系统保护与控制基本准则

（1）安全性与稳定性设计准则。系统应设置短路保护、过载保护、接地故障保护三级防护体系，采用选择性配合确保故障时仅切除故障回路，维持非故障区域持续供电。剩余电流动作保护值不宜大于30mA，末端回路切断电源时间不应超过5s，保障人身安全与设备稳定运行。（2）经济性与节能性管控准则。基于需用系数法与负荷密度法合理选配变压器及线缆截面，减少初投资与线路损耗。采用智能调光、时段控制、自然光补偿等节能策略，将照明功率密度控制在规范限值以内，实现全生命周期成本最优化。（3）可靠性与智能化适配准则。关键照明回路应采用双路供电或配置EPS应急电源，自动转换开关的动作时间应满足灯具再启动时间要求。智能化系统应具备冗余通信链路与故障自诊断功能，配电模块支持带电热插拔维护，确保系统在部分故障状态下仍能维持基本照明功能。

2 建筑照明电气工程中电力系统故障类型与运行风险分析

2.1 照明电力系统常见电气故障类型

(1) 短路故障: 相间短路、单相接地短路故障特征。相间短路发生时, 故障电流可达到额定电流的10~20倍, 产生巨大电动力与高温, 导致导体熔断、绝缘烧毁; 单相接地短路时, 故障电流相对较小(约为相间短路的1/3~1/2), 但会使非故障相对地电压升高至线电压水平, 持续运行将严重威胁线路绝缘寿命, 两者均需在0.4s内由保护装置切除。(2) 过载故障: 长期过载、短时冲击过载故障成因。长期过载多由照明灯具功率超出设计容量或回路随意增容引起, 导致导体温升持续超过允许工作温度, 加速绝缘老化脆化; 短时冲击过载主要源于大面积灯具集中启动时的励磁涌流(可达额定电流5~7倍), 虽持续时间仅为毫秒级, 但频繁冲击将导致断路器触头磨损、热元件疲劳^[2]。(3) 漏电与电压异常故障运行表现。漏电故障表现为剩余电流持续增大, 当超过30mA时对人体构成电击威胁, 同时伴随绝缘电阻下降、局部发热等现象; 电压异常包括电压暂降(低于额定值85%)、电压暂升(高于额定值110%)及闪变, 会导致LED驱动失控、光源频闪甚至批量损坏。

2.2 故障产生诱因分析

(1) 线路老化、设备质量缺陷等硬件诱因。绝缘层长期受热氧化后脆裂、导体接头处氧化接触电阻增大、微型断路器机械寿命耗尽导致拒动或误动, 均为硬件层面常见诱因。劣质LED驱动电源内部电解电容提前失效, 引发输出纹波增大, 加速光源光衰。(2) 负荷不合理配置、违规用电等人为诱因。施工阶段未按三相平衡原则分配单相照明负荷, 导致中性线电流过大; 使用过程中私拉乱接、超容量增装灯具使回路长期处于临界过载状态; 维护时选用规格不匹配的保护器件, 削弱了系统保护选择性。(3) 谐波干扰、电压波动等环境与系统诱因。LED驱动等非线性设备产生的大量3次谐波在中性线叠加, 导致中性线过载发热; 上级电网中大功率电动机启停、无功补偿投切等造成电压骤变, 干扰照明设备正常运行, 甚至触发驱动保护闭锁。

2.3 故障危害与系统运行风险评估

(1) 电气故障引发的设备损坏与照明失效风险。短路故障产生的热效应可直接烧毁配电线路及照明终端, 过载运行使绝缘寿命按Arrhenius指数规律衰减, 每超温8~10℃寿命减半; 一旦保护拒动, 故障持续将导致大面积照明失效, 影响建筑正常使用功能。(2) 漏电、短路引发的消防安全与人身安全风险。接地电弧短路产生的局部高温可达3000℃以上, 足以引燃周边可燃物, 是建筑电气火灾的主要成因; 漏电电流通过人体时, 心室颤

动阈值为30~50mA/0.2s, 若剩余电流保护装置失效, 将直接危及人员生命安全。(3) 故障扩散对整体建筑电力系统的连锁影响。照明分支回路故障若未及时隔离, 将越级跳闸导致整段母线失压, 波及动力、空调等非照明负荷; 谐波污染沿配电系统向上传播, 引起变压器附加铜损增加、无功补偿电容器过热鼓胀, 降低整个建筑供电系统的供电品质与运行可靠性。

3 建筑照明电气工程中电力系统保护与核心控制措施

3.1 电力系统基础保护技术应用

(1) 短路保护: 断路器、熔断器选型与整定。照明配电回路选用微型断路器时, 其额定分断能力不应小于安装处预期短路电流, 一般回路取6~10kA, 重要回路取15kA以上。C型脱扣器(7~10倍额定电流)适用于荧光灯及LED驱动类负载; D型(10~14倍)适用于金卤灯等冲击电流较大的光源。熔断器按熔体额定电流 ≥ 1.2 倍计算电流、 ≤ 2.5 倍电缆载流量选型, 其弧前特性须与上级保护选择性配合, 防止越级跳闸。(2) 过载保护: 热继电器匹配与负荷管控。热继电器整定电流按回路计算电流的1.05~1.15倍设定, 反时限特性应确保1.2倍额定电流下2h内动作, 7.2倍下不超过10s。日常运行中, 照明分支回路实际电流应长期控制在断路器额定电流的80%以下, 预留裕度; 回路增容时须重新校核导线截面与保护整定值, 严禁仅更换断路器而忽视线缆载流能力^[3]。(3) 漏电保护: 剩余电流保护装置安装与调试。照明末端回路应装设 $I_{\Delta n} \leq 30\text{mA}$ 的RCD, 动作时间 $\leq 0.1\text{s}$; 潮湿场所选用 $I_{\Delta n} \leq 15\text{mA}$ 加强型。安装后逐路测试, 分别模拟0.5 $I_{\Delta n}$ 、1.0 $I_{\Delta n}$ 、2.0 $I_{\Delta n}$ 三档, 验证不动作、及时动作与快速动作性能。每月手动试验按钮巡检一次, 确保机构灵活无卡阻。

3.2 照明电力系统稳定控制措施

(1) 电压与无功功率优化控制策略。照明配电母线电压应维持在额定值的90%~106%范围内, 通过有载调压变压器或线路末端稳压装置实现动态调节。无功补偿采用集中与就地相结合方式, 在照明配电箱侧装设智能无功补偿模块, 使系统功率因数保持在0.92以上, 对长距离供电回路宜在灯具端并联电容器进行单灯补偿, 减少线路无功电流传输损耗。(2) 电网谐波抑制与电能质量治理措施。针对LED驱动产生的3次、5次、7次谐波, 在配电箱进线侧装设零序滤波器以阻断中性线谐波通路, 同时配置有源滤波器实时补偿动态谐波电流, 使总谐波畸变率控制在8%以下, 各次奇次谐波含有率不超过3%。

(3) 负荷均衡分配与动态调控方法。照明单相负荷按L1、L2、L3三相顺序分配, 确保任意两相间电流不平衡

度不超过15%。动态调控采用需求响应策略,高峰时段自动降低非关键区域照度至基础维持水平,低谷时段恢复全照度运行,实现削峰填谷与系统节能协同^[4]。

3.3 智能化保护与控制技术优化

(1) 智能监测模块对故障的实时识别与预警。各级配电箱内集成多回路智能监测模块,以每周波128点的采样速率实时采集电压、电流、剩余电流、接点温度等参数,内置故障特征数据库进行波形比对识别。当参数趋势逼近设定阈值时提前发出预警信号,实现从被动跳闸到主动预防的转变。(2) 自动重合闸、双电源切换智能保护技术。因外部瞬时故障导致跳闸的回路,采用智能重合闸装置判定为瞬时性故障后经0.5~1s自动重合一次,失败则闭锁报警。一级照明负荷配置双电源自动转换开关,切换动作时间不应大于灯具允许中断时间(LED灯具 $\leq 0.5s$,金卤灯 $\leq 0.1s$),优先切换至备用电源供电。(3) 基于物联网的照明电力系统远程管控技术。构建云边协同的物联网管控平台,智能终端通过无线通信或有线总线将电气参数上传至云平台,运维人员远程查阅运行状态、接收故障告警、下发调光或分合闸指令。平台内置机器学习算法,根据历史数据自动优化保护整定建议,实现策略持续迭代升级。

3.4 系统运维保障与防护优化措施

(1) 定期设备检测与线路隐患排查机制。建立季度预防性检修制度,内容包括红外热成像检测端子接头温度(温升限值 $\leq 65K$)、绝缘电阻测试(线间及对地绝缘电阻 $\geq 2M\Omega$)、保护装置动作特性校验。每年进行电缆耐压试验与断路器脱扣特性核查,对动作次数超过允许寿命80%的开关器件提前更换。(2) 防雷、接地系统优化防护措施。照明配电进线处安装Ⅰ级试验浪涌保护器(冲击电流 $I_{imp} \geq 12.5kA$),分配电箱处安装Ⅱ级试验SPD(标称放电电流 $I_n \geq 20kA$),两端连接导线长

度之和不大于0.5m。照明设备金属外壳、配电箱体及金属管均接入建筑共用接地系统,接地电阻不大于 1Ω ,并采取等电位连接消除电位差^[5]。(3) 极端工况下电力系统应急管控方案。市电中断时应急照明自动切换至蓄电池供电模式,持续时间不低于90min;同时启动柴油发电机组,优先保障疏散照明与重要场所供电。制定三级应急响应预案,明确不同故障等级下的操作流程与恢复时序,每半年进行一次全流程模拟演练,确保极端工况下照明电力系统的基本功能保障与有序恢复。

结束语

本文系统性研究建筑照明电气工程电力系统的运行特性与故障风险,针对性构建了集故障防护、电能质量治理、智能调控、运维保障于一体的综合管控体系。通过规范保护器件选型、平衡负荷分配、抑制电网谐波、落地智能化管控手段,可有效解决建筑照明用电的各类常见问题。后续可结合不同建筑场景负荷特征优化控制逻辑,持续提升照明电力系统的智能化、安全化与节能化运行效能。

参考文献

- [1]周宇.建筑电气照明系统故障特征及安全保护控制技术[J].智能建筑与智慧城市,2023,24(09):89-91.
- [2]林剑峰.民用建筑照明电气工程安全防护与系统控制优化[J].现代建筑电气,2024,15(07):45-48.
- [3]朱新华.电力系统保护与控制中电气工程及其自动化技术的应用研究[J].电子元器件与信息技术,2024,8(10):93-95.
- [4]刘志强,黄伟.建筑工地配电系统谐波抑制技术研究进展[J].电力系统保护与控制,2022,50(02):167-175.
- [5]李树南,张颂.建筑照明电气工程中电力系统的保护与控制策略研究[J].工程技术研究,2024,9(18):102-104.