

# 路灯配电网电压无功优化节能装置应用分析

徐庆丰

国网湖北省电力有限公司黄冈供电公司路灯管理中心, 湖北 黄冈 438000

**摘要** : 本文通过分析装置工作原理, 结合路灯配电特性, 说明其调节电压、补偿无功功率的具体作用, 总结装置在提升供电质量、降低线路损耗方面的效果, 为路灯节能改造提供参考方向。

**关键词** : 路灯配电网; 电压无功优化; 节能装置; 应用分析; 电能质量

## Application Analysis of Reactive Power Optimization Energy Saving Device for Street Light Distribution Network Voltage

Xu Qingfeng

Huanggang Power Supply Company Road Lamp Management Center, State Grid Hubei Electric Power Co., LTD.  
Huanggang, Hubei 438000

**Abstract** : This paper analyzes the working principle of the device, combined with the characteristics of street lamp distribution, explains the specific role of regulating voltage and compensating reactive power, summarizes the effect of the device in improving power supply quality and reducing line loss, and provides reference direction for street lamp energy saving transformation.

**Keywords** : street light distribution network; voltage reactive power optimization; energy saving device; application analysis; power quality

### 引言

当前多数城市路灯采用传统配电模式, 线路末端易出现电压偏差。夜间用电低谷时段电压升高, 导致灯具寿命缩短; 用电高峰时电压不足, 影响照明效果。另外, 配电线路存在感性无功电流, 增加变压器与线缆负担。长期运行导致电能浪费, 配电设备发热量增大, 维护成本上升。鉴于此, 本文主要研究路灯配电网电压无功优化节能装置应用相关问题。

### 一、装置技术原理

#### (一) 电压调节机制

电压调节机制通过安装在线路关键节点的电压传感器, 持续采集三相电压数值, 并将数据传送至控制单元进行分析。当检测到电压超出额定值  $\pm 7%$  的允许范围时, 装置启动调节程序: 对于电压偏高情况, 优先调整配电变压器的有载分接开关, 降低输出电压; 若电压持续偏高且变压器调节余量不足, 则自动切除部分并联电容器组, 减少容性无功输出。针对电压偏低问题, 装置首先投入备用电容器组, 通过补偿线路无功功率提升电压水平; 若仍无法满足要求, 则控制变压器分接头升压操作。调节过程中采用延时判断与梯度调整策略, 避免频繁动作导致设备磨损<sup>[1]</sup>。

#### (二) 无功补偿方式

电网无功补偿系统采用智能分级调控策略, 基于实时采集的电压、电流相位角数据动态调整补偿方案。并联电容器组按总补偿容量划分为四组均等单元, 每组配置独立投切开关与状态监测

模块。控制器持续计算系统无功功率缺额, 当检测到感性无功超出预设阈值时, 依据负荷波动趋势选择最优投入顺序。投切逻辑采用循环轮换机制, 优先启用运行时长较少的电容器单元, 均衡各组使用寿命。装置内置温度传感器与谐波分析模块, 实时监测电容器绝缘介质损耗与谐波畸变率, 异常工况下自动闭锁操作并触发报警信号<sup>[2]</sup>。

电容器组采用三角形接线方式接入三相系统, 相比星形接线可形成环流路径, 提升电容器利用效率。每相电容器串联电抗器组成调谐支路, 参数设计兼顾抑制五次以上谐波与限制合闸涌流的双重需求。投切装置选用双向晶闸管模块, 通过电压过零检测电路精确捕捉交流波形过零点, 在电流自然过零时刻执行分合闸操作, 最大程度降低暂态冲击电流。对于夜间轻载或新能源高渗透场景下可能出现的容性无功倒送问题, 补偿系统设置双向调节功能, 当功率因数超前达到临界值时, 逐步切除部分电容器组并启动电抗器投入功能, 实现无功潮流的双向平衡。

智能判据模块集成多参数协同分析算法, 综合考量电压偏差

率、负荷变化率与设备运行状态等多维度信息。在光伏电站出力骤降或大型电机启动等暂态过程中，动态调整补偿响应速度与动作阈值。历史数据学习功能可识别不同时段的无功变化规律，自动优化预设参数配置。装置外壳采用全封闭防尘设计，散热风道配置温度自适应调速风机，确保高温高湿环境下稳定运行。运维界面提供可视化趋势曲线与故障录波功能，支持远程修改定值参数与投退操作，提升系统运维便捷性。

## 二、装置核心组成

### （一）监测控制单元

监测控制单元作为装置的中枢神经系统，由信号采集、数据处理与指令输出三大部分构成。信号采集部分采用高精度电压传感器与0.2S级电流互感器组合，电压传感器选用电阻分压原理型器件，量程覆盖150-300V交流电压，采样频率达到每秒1000次；电流互感器采用穿芯式结构，支持0-200A宽范围测量。数据处理核心搭载32位ARM处理器，运行自适应模糊PID控制算法，通过建立电压偏差率、无功变化速率等多维度数学模型，实现动态调节策略优化。通信模块集成4G与RS485双通道，支持远程接收配电自动化主站指令，同时兼容本地触摸屏参数修改。为提升可靠性，系统采用双CPU冗余架构，主控芯片异常时备用芯片可在50ms内无缝接管控制权。数据存储单元配备8GB工业级FLASH芯片，可连续保存90天运行数据，包括电压合格率统计、无功补偿动作记录等关键参数<sup>[5]</sup>。

### （二）执行机构模块

执行机构模块包含有载调压单元与智能电容投切单元两大功能组件。有载调压单元采用真空灭弧室型分接开关，配置永磁电机驱动机构，可在带电状态下完成17档位调节，单次档位切换时间 $\leq 200\text{ms}$ ，机械寿命达50万次。调压控制器内置位置编码器，实时反馈开关触点状态，防止滑档现象发生。电容投切单元由晶闸管电子开关与磁保持继电器组成复合式结构：晶闸管负责毫秒级快速投切，承担主要操作任务；继电器作为物理隔离保障，在设备维护时提供明显断开点。电容器组采用模块化设计，每套装置配置4-8组容量为10kvar的自愈式低压电容器，各组间配置差流保护继电器，实时监测电容内部元件的击穿故障。散热系统包含铝制散热片与轴流风机双重散热结构，当电容柜内温度超过55℃时自动启动强制风冷<sup>[4]</sup>。机械联锁装置确保调压与电容投切操作互斥执行，避免多设备同时动作引发电网扰动。

### （三）保护系统设计

保护系统构建三级纵深防御体系：第一级为快速电子保护，采用FPGA可编程逻辑器件实时监测电压电流瞬时值，当检测到过压（ $> 260\text{V}$ ）、欠压（ $< 180\text{V}$ ）或短路电流（ $> 10\text{In}$ ）时，在5ms内触发晶闸管闭锁；第二级为机械保护，配置高分断能力断路器与快速熔断器组合，在电子保护失效时，于20ms内实现物理分断；第三级为后备绝缘保护，采用分布式温度传感器与漏电流检测模块，实时监测设备绝缘状态。过压保护设置240V预警、250V延时切除、260V瞬时跳闸三级响应机制，短路保护区分对

称性故障与非对称性故障，分别采取不同动作时限。智能诊断系统每30分钟自动执行设备自检，包括电容器容值衰减检测、开关机构润滑度分析等20项健康指标评估<sup>[6]</sup>。紧急情况下，UPS备用电源可维持保护系统持续工作15分钟，确保故障完全隔离。事件记录器完整保存最近100次保护动作波形与参数，为故障溯源提供数据支撑。

## 三、实际应用效果

### （一）电能质量改善

电压调节装置通过实时动态补偿机制，将线路电压波动幅度控制在 $\pm 3\%$ 额定值以内。采用分级电压校正策略，在负荷突变时优先启动快速电容投切，1秒内完成初步稳压，再通过变压器分接头精细调节至目标值。三相不平衡补偿功能可自动检测各相电流差异，向滞后相追加补偿量，使不平衡度从15%降至5%以下。灯具端电压稳定性提升后，LED驱动电源的电流纹波系数降低40%，有效延缓灯珠光衰。谐波抑制模块可滤除3次、5次特征谐波，总谐波畸变率由8%降至3%以内，减少灯具频闪现象<sup>[6]</sup>。电压骤降保护功能在电网瞬时故障时，维持80%额定电压输出持续500ms，避免路灯群体熄灭。

### （二）节能效益体现

无功补偿系统根据负荷率自动切换控制模式：高峰时段全容量投入，夜间轻载时切换至小容量分组轮换运行。动态补偿使变压器负载损耗下降18%-22%，等效年运行时间延长约2000小时。线路电流有效值减少后，铝芯电缆的集肤效应损耗降低13%-18%，年节约线损电量达8000-12000kWh。电容器分组投切策略延长元件使用寿命，相比传统固定补偿方式，电容更换周期从3年延长至5年。变压器油温监测显示绕组热点温度下降9-11℃，绝缘老化速度减缓30%，预期寿命增加5-8年。配电柜通风需求减少，辅助冷却设备能耗同步下降15%-20%<sup>[7]</sup>。

### （三）管理效率提升

远程监测平台集成GIS地理信息模块，可在地图上直观显示各节点电压、功率因数等关键参数。自动生成日报表统计电压合格率、无功补偿动作次数等数据，异常事件触发微信工单推送。移动端APP支持调节参数远程修改，现场调试时间由2小时缩短至20分钟。智能诊断系统通过机器学习分析历史数据，提前14天预警电容器容值衰减、开关机构卡涩等潜在故障。标准化通信协议实现与SCADA系统无缝对接，数据刷新周期从分钟级提升至秒级。电子化台账自动记录设备运行日志，检修计划生成效率提高70%，备品备件库存周转率优化40%<sup>[8]</sup>。

## 四、安装使用注意事项

### （一）设备选型要点

设备选型需综合考量路段照明负荷特性与电网结构特征。首先通过历史用电数据统计单灯功率、总灯数量及同时系数，计算实际运行负荷，建议选取装置额定容量为计算值的1.1-1.15

倍。例如单灯150W的路灯200盏，考虑0.8同时系数时总负荷24kW，应选择30kVA容量的装置。调节余量需覆盖季节性负荷波动，冬季亮灯时间延长带来的额外损耗需纳入余量计算。优先选用抽屉式模块化结构产品，单个功能单元支持热插拔更换，便于故障快速处理与后期扩容。外壳防护等级不低于IP54，确保户外安装时的防尘防水性能<sup>[9]</sup>。内部元件需满足-25℃至60℃宽温域工作条件，避免极端天气导致功能异常。通信接口应兼容标准Modbus RTU协议，便于接入现有配电监控系统。对于多回路配电场景，推荐选用分相补偿型设备，可独立调节各相无功输出，有效解决三相负荷不平衡问题<sup>[10]</sup>。

### （二）安装位置选择

安装位置直接影响电压采样精度与调节效果。优先选择靠近负荷中心的配电箱输出端，该位置能准确反映末端灯具的电压质量。对于辐射状配电线路，建议在主干线长度40%-60%区间设置装置，例如1公里线路安装在400-600米处。安装点需避开强电磁干扰源，与变频器、大功率电机等设备保持5米以上距离。柜体安装采用壁挂式或落地式，确保底部距地面≥30厘米，防止地面积水侵入。柜体背部预留20厘米散热空间，顶部加装防雨檐避免雨水渗漏。进线电缆选用YJV22-4×25mm<sup>2</sup>规格，弯曲半径≥15倍电缆直径。电压采样线采用屏蔽双绞线，长度不超过50米，与动力电缆分开敷设。接地系统要求独立设置，接地电阻≤4Ω，接地铜排截面≥50mm<sup>2</sup>。对于多装置并联场景，需设置主从控制模式，避免调节指令冲突。

### （三）日常维护要求

建立三级维护体系保障设备长效运行。日常巡检每周一次，重点观察液晶显示屏参数是否正常，记录电压波动范围与功率因数数值。月度维护需打开柜门检查，使用红外测温仪测量电容器表面温度，正常值应低于65℃；用扭矩扳手复核母线连接螺栓，紧固力矩控制在25-30N·m范围。每季度深度维护时，使用压缩空气清理柜内积尘，风压保持0.3-0.5MPa，吹扫方向与散热孔道同向。每年停电检修期间，使用LCR表测量电容器容值，衰减超过标称值10%即需更换；用微欧计检测接触器触点电阻，阻值>50μΩ时进行打磨处理。软件系统每半年升级一次，通过USB接口导入更新包前需做好参数备份。历史数据每月导出存档，重点分析电压合格率曲线与无功补偿动作频次<sup>[11]</sup>。备用配件库需常备控制板、熔断器、散热风扇等易损件，储存环境湿度≤70%。突发故障时，先查看故障代码对照表，复位操作无效再联系专业技术人员处理。

## 五、结语

电压无功优化装置为路灯配电系统提供了经济实用的改造方案。通过自动调节与补偿功能，在保障照明质量的同时实现节能降耗。建议结合具体路段负荷特性，制定差异化配置方案，逐步推进城市路灯智能化升级。

## 参考文献

- [1] 胡艳平. 城市路灯节能与绿色照明措施探究 [J]. 灯与照明, 2023, (2): 17-19, 42.
- [2] 谢建林, 杨挺昂. 城市路灯节能方法研究 [J]. 光源与照明, 2023(4): 21-23.
- [3] 柯银梅. 基于绿色路灯照明理念的城市路灯节能管理研究 [J]. 光源与照明, 2023(10): 33-35.
- [4] 苗鹏, 崔少军, 刘计良. 太阳能路灯自适应节能装置的设计 [J]. 北京工业职业技术学院学报, 2020, 19(3): 32-35.
- [5] 王鹏举, 经本钦, 嵇建波, 等. 智慧路灯自动控制与测试装置的设计与实现 [J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(1): 129-133, 183.
- [6] 康强. 基于视频图像处理技术的智能路灯节能控制系统 [J]. 科技创新与应用, 2021, (21): 152-154.
- [7] 樊赢, 苏蓓蓓, 王志可. 一种基于光照度检测的路灯节能控制系统设计 [J]. 数字技术与应用, 2020, (4): 170-171.
- [8] 何晓玲, 陈泽娜, 赖文娜, 等. 一种优化降净路灯设计 [J]. 河南科技, 2022, (2): 55-58.
- [9] 阳小萍. LED路灯结合智能调光控制装置在城市道路照明中的应用 [J]. 电脑采购, 2022(51): 47-49.
- [10] 丁一婷, 刘俊清. 基于太阳能自动追光的智能路灯控制系统 [J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2023, (3): 58-62, 68.
- [11] 刘兴盛. 节能技术在电力变压器设计中的应用 [J]. 科技风, 2021(33): 193-195.