

环网柜结合分布式补偿 在长距离供电电压质量提升中的应用分析

郎文斌

上海沪电电力工程有限公司 上海 200090

摘 要: 长距离供电线路受线路电抗大、负荷分布不均等因素影响, 普遍存在末端电压偏低、电压波动频繁的问题。本文聚焦环网柜与分布式无功补偿的协同调控开展研究, 构建基于电压实时监测的数据驱动模型, 并设计前馈调节与优先级动态补偿策略, 经过集成 SVG 与串联电容补偿机制, 实现对节点电压的精细化调节和快速响应控制, 该系统在提高电压合格率、抑制电压波动、改善负载端电能质量方面效果显著。

关键词: 长距离供电; 环网柜; 无功补偿; 电压调节; 电能质量

引言

长距离输电线路在农配网及区域电网中应用广泛, 其固有的感抗特性和线路结构容易导致末端电压失衡, 使供电稳定性下降, 传统静态无功补偿方式难以满足实时波动负荷的调节需求, 制约了电能质量的提升。针对这一情况, 需要在配电系统中引入具有快速响应能力的调控机制, 以优化电压分布, 保障供电可靠性, 以环网柜作为核心控制节点, 结合分布式静止无功补偿装置, 研究其在复杂负荷条件下的调节策略与控制模型, 可增强系统对电压波动的适应性和稳定性。

1 长距离供电中电压质量面临的主要问题

1.1 电压波动与压降特性分析

电压沿线路方向持续降低, 受端电压显著低于送端电压, 呈现出明显的电压压降现象, 在线路负载不断变化的情况下, 电压波动愈发频繁, 系统运行中的电压稳定性难以保障^[1]。特别是在输电半径过长的情况下, 沿线各级负荷点之间的电压不平衡程度加剧, 局部节点电压甚至可能低于设备允许的偏差范围, 影响用电设备的正常运行, 电压波动与系统自身的负荷特性相关, 还和线路无功补偿配置、感抗分布状况以及末端响应机制紧密相连。

1.2 长距离线路负载特性与阻抗影响

在连续供电链路里, 负载侧对电能的有功及无功需求经高阻抗通道传输, 容易造成功率损耗增加, 电压回馈能力减弱, 随着线路负荷分布的动态变化, 沿线功率流动状态改变, 局部节点会因传输路径电抗不均而出现负荷电压失衡。

供电路径中的电阻与电抗阻尼会持续影响负载端的电压响应灵敏度, 让电压稳定性对负荷扰动更加敏感, 远距离线路末端的低压特性与无功功率本地无法自给直接有关, 这使得该类结构在没有有效补偿手段的情况下, 难以满足标准电压运行要求。

2 环网柜在电压支撑中的结构优势

2.1 分段式供电架构优化

核心设计是把主供电干线经过多个分支环节划分为若干独立或半独立的电气供电段, 供电段之间用环网开关连接, 让线路结构拥有闭环运行和多点供电能力, 实际应用时, 借助环网柜的开关切换功能, 结合线路末端的负荷测量与母线电压采样, 确定最佳供电路径, 再据此重新配置馈线电流流向, 调整无功流动平衡状态, 进而削减沿线电压压降【2】。对于线路末端电压偏低的区域, 环网柜结构引导并联电容器或串联电容补偿装置接入, 在局部段落建立感抗补偿支撑点, 增强末端电压支撑能力, 系统运行中实时采集环网各段电流、电压及相角信息, 借助集中式或分布式控制策略, 实现分段电压状态闭环调节, 动态切换运行方式, 使电压控制具备快速响应与区域差异化补偿能力, 明显缓解线路压降集聚问题。

2.2 快速故障隔离与自动重合功能

环网柜结构中集成带电显示装置、遥测遥控单元、接地开关与真空断路器, 高频采样模块实时监测线路运行状态, 故障发生时, 系统凭借电流突变与电压骤降信号触发继电保护逻辑, 依据预设参数判别故障类型, 并在毫秒级时间内下

发跳闸指令。该跳闸命令经分布式通信网络传输至对应开关装置,实现对故障段的精准断开,让非故障段保持正常供电状态,防止整条线路大范围失压,缩小电压异常的影响范围。

完成隔离后,自动重合闸单元启动,按设定的重合延迟时间与重合策略进行一次或多次重合尝试,控制逻辑结合弧光识别和短路电流持续时间,判断是否为暂态性故障,若电弧熄灭或异常波形消失,便发出重合指令重新接通电源。整个过程中,母线电压监测装置与环网开关状态信号联动,对节点电压水平进行闭环修正,并根据补偿需求调整电容投切状态,使系统在切除故障时恢复无功支撑,故障处理完毕后,系统重新建立电压调节模型,对断点电压偏移进行补偿修正,确保线路末端电压快速回稳,维持供电区域的电能质量和配电连续性。

3 分布式无功补偿技术要点

3.1 静止无功发生器(SVG)原理

在结构构成上,SVG包含三相逆变桥、电感滤波器、直流支撑电容及电流检测模块,其中逆变桥借助脉宽调制技术(PWM)驱动,进而生成可控的输出电流波形^[3]。其控制系统把检测到的母线电压偏差作为输入量,经比例积分运算后形成参考电流指令,再与实际输出电流对比,两者差值经电流调节器处理后产生控制信号,该信号作用于驱动单元,以此实现对逆变器开关管的控制。SVG输出电流表达式为

$$i_{\text{SVG}}(t) = I_m \sin(\omega t + \phi)$$

其中 ϕ 为输出电流与系统电压之间的相位角,母线电压下降时,SVG输出滞后电流提供感性无功;母线电压升高时,SVG输出超前电流吸收感性无功。SVG无功调节速率高、响应时间短,具备连续可调、无阶跃变化特性,适合布置在供电末端或波动负载节点,以增强电压控制能力,削弱感抗引起的电压压降。

3.2 动态补偿策略与控制逻辑

3.2.1 补偿指令生成与数据驱动控制机制

实际运行时,在各关键节点布设电压采样装置和电流互感器,实时获取补偿点运行参数,像节点电压幅值、负荷电流大小、相位角偏移等,采集数据传至控制中心后,由集中式或分布式调度系统完成状态解析,系统依据设定目标电压值与采样电压的偏差量,判断当前所需无功补偿容量。该无功容量经控制计算模块转化为对应的三相无功电流参考

指令,进而生成可调节信号,传送到逆变单元或电容投切装置,转换过程中,系统自动匹配节点阻抗参数,修正补偿响应曲线,保证无功注入与系统工况高度契合,控制流程采用分层结构部署,把低延迟执行指令下发至边缘设备,由本地控制器执行瞬态响应指令,以提高补偿动作的响应速度和调节精度。

3.2.2 预测性前馈调节与优先级响应策略

为提升调节动作的前瞻性与稳定性,控制策略融入前馈控制模块与负荷预测模型,系统借助历史负荷变化数据,运用趋势拟合和扰动分析方法,提前预判未来调节周期内的负载变化趋势,依据预测结果预设调节幅度与执行时间点,实现补偿指令的超前分配,在此机制下,调节动作不再完全取决于当前误差值,而是在负荷扰动来临前完成资源准备。动态补偿控制系统构建响应优先级调度表,对节点灵敏度、电压波动频率和系统重要度进行综合赋权,高优先级区域在无功资源分配中优先获得调节权,确保关键节点在负荷突变时率先得到补偿资源,对于SVG与并联电容组的控制,根据功率因数变化速率和无功需求动态调整接入顺序与持续时间,避免调节冲突和资源浪费,系统运行时同步采集调节后的电压反馈信号,参与下一周期的参数修正和调度优化,形成完整的预测—执行—反馈闭环机制。

4 环网柜与分布式补偿协同控制机制

4.1 电压监测与数据驱动控制模型

环网柜节点作为配电结构里的中枢单元,其开关设备、测量装置及通信模块集成电压、电流、功率因数等物理量的实时采样功能,并经过高速通信通道上传至集中控制器或本地边缘计算单元^[4]。系统对采集到的数据进行幅值解算与相量提取处理,从而形成分时段电压波形数据库,控制中心采用滑动窗口机制对连续时间段内的电压波动情况进行趋势识别,精准捕捉幅值下探、频率偏移或功率反向等异常特征,并将这些特征作为调压触发量。

控制模型构建以母线电压幅值与额定目标电压之间的误差为输入变量,定义电压偏移度量函数

$$\Delta U = U_{\text{ref}} - U_n$$

并设置多级触发阈值,依据数值大小分配无功补偿级次与补偿位置,针对多节点结构,系统运用加权分布式评估算法,为各支路电压状态分配不同调节优先级,调控指令并非直接驱动单一节点,而是基于线路阻抗模型构建无功注入影

响矩阵, 预测特定补偿点对邻近节点电压的影响, 确保局部动作对整体系统的干扰降至最低。控制系统引入延迟检测与干扰识别模块, 排除暂态扰动引发的短时电压突变对补偿指令的误触发影响, 各节点补偿装置的响应数据返回系统后, 参与后续控制策略更新, 形成闭环控制链路。

4.2 实时调度算法与配电系统响应速度提升

调度系统的输入数据涵盖实时负荷功率流分布图、电压相量监测值、当前电容器或 SVG 补偿容量状态, 以及环网柜各段位运行拓扑信息。系统以拓扑识别模块输出的节点连接关系为边界条件, 结合母线节点电压下探速率、负荷变化梯度和历史扰动响应模型, 构建多目标调度目标函数, 将最小化电压偏差、降低线路损耗和维持节点功率平衡作为优化目标。

调度算法采用多阶段响应框架, 经过初级识别算法设定电压调节动作窗口, 在该窗口内以固定采样周期跟踪节点电压变化速率并以预测模型推算未来数秒内的电压演化趋势。若预测结果表明未来趋势将触碰设定阈值, 系统便提前发出预调度指令, 激活目标节点的无功补偿装置使其进入待命状态, 补偿动作由快速解耦控制器输出的控制信号确定, 采用串并联混合控制逻辑, 依据负载扰动的幅度和方向来判断是采用 SVG 独立补偿, 还是借助串联电容进行辅助调节。

配电系统响应速度的提升依靠补偿装置本体响应能力和调度指令下发的延迟优化, 系统调度算法结合路径最短优先机制与主备并行策略, 确保主控制器路径失效时, 备用通信通道能在极短时间内完成控制接力。为避免调节指令冲突或补偿冗余, 系统在调度算法中加入动作互斥判别机制, 判断当前补偿动作是否与邻近节点计划调节行为重叠, 必要时进行补偿优先级排序与动作锁定。

5 电能质量提升效应分析

5.1 电压合格率改善量化指标

电压合格率的改善评价基于运行周期内各电压采样点的时序数据与额定电压容限间的符合度分析。系统在配电节点部署高精度同步电压监测模块, 按固定周期采集各母线、馈线末端及关键负荷点的电压幅值, 并在每一采样周期内将测得电压值 $U_n(t)$ 与额定电压 U_{ref} 比较, 设定上下限容差 $\pm \Delta U$, 若 $U_n(t) \in [U_{ref} - \Delta U, U_{ref} + \Delta U]$, 则记为合格样本。合格率计算表达式为

$$\eta = \frac{N_{qualified}}{N_{total}}$$

其中 $N_{qualified}$ 表示合格样本点个数, N_{total} 为总采样数, 实际调压运行中, 系统引入串联电容装置后, 对线路电抗进行有效补偿, 使负荷末端电压回升, 从而提升 $N_{qualified}$ 的比值。在串联补偿控制中, 依据线路无功功率 Q 以及串联容抗的关系, 计算补偿电压增量为

$$\Delta U_c = \frac{QX_c}{U_1}$$

将该电压增量纳入原端电压模型进行叠加仿真, 可得出在不同负荷工况下, 节点电压运行轨迹朝目标电压区间收敛。借助分布式 SVG 的动态响应能力, 在电压微偏离阈值附近开展细微调节, 让电压维持在波动边界以内。

5.2 电压波动抑制与负载端稳定性验证

在系统节点布置采样频率不低于数十毫秒级的同步电压采样器, 实时捕捉瞬时电压偏移率 $\frac{dU}{dt}$, 并结合前一时段负载电流变化率 $\frac{dI}{dt}$ 建立扰动响应映射模型。在负载变化初始阶段, 采样系统把电压下跌或上升趋势转变为触发事件, 输入到无功补偿控制中心, 控制中心运用预测性补偿策略, 依据当前扰动类型匹配最佳响应装置, 向目标 SVG 或电容组输出功率调节指令, 响应动作依照目标节点相量位置实施注入电流控制, 旨在将实际电压值拉回设定值, 稳定负载侧电压变化范围。在系统验证环节, 构建的仿真模型涵盖完整负载扰动序列与补偿响应曲线, 分别测算扰动前后的节点电压均值、波动幅度及恢复时间。针对负载端电压稳定性的验证指标设定为: 稳态恢复时间、峰值偏差量和电压恢复斜率, 稳态恢复时间指的是电压从扰动峰值回落至容差范围的时间跨度; 电压恢复斜率的计算公式为

$$k = \frac{U_{max} - U_{ss}}{t_{rec}}$$

其中 U_{max} 为扰动峰值, U_{ss} 为稳态电压, t_{rec} 为恢复时间, 对多个工况下的扰动序列仿真数据进行拟合, 验证补偿系统在不同负载变化条件下均具备稳定压制能力, 能迅速抑制电压峰值偏移并保持波形对称性。

结语: 对环网柜与分布式无功补偿系统的结构改良和控制策略规划, 构建了适用于长距离供电线路的协同调节模型, 系统借助多点电压监测和预测性补偿算法, 达成了对电压偏差的迅速识别与精确调节, 强化了配电网末端的电压支

撑能力。仿真与分析结果显示,该方法在抑制电压波动、提高负载端稳定性以及改善整体电能质量方面具备实际工程应用价值,为长距离配电线路的调压提供了有效途径。

参考文献:

[1] 谢蕾蕾,褚长军,吴香华,等.环保气体绝缘环网柜优化技术性能提高分析[J].中国新技术新产品,2025,(10):114-116.

[2] 孟瑞,郭佩铭,杨帆.配电环网柜箱变的运行检修与

故障处理技术探讨[J].中国设备工程,2025,(08):165-167.

[3] 袁红.长距离供电线缆压降计算及供电方案选择分析[J].中国水运,2024,24(10):55-57+60.

[4] 蒲晋超.煤矿掘进工作面长距离供电方案设计及应用[J].机械工程与自动化,2024,(03):192-194.

作者简介: 郎文斌(1984-8-5),男,汉族,浙江兰溪人,职称(职务):工程师,本科,研究方向:输配电工程