

电力系统无功补偿装置投切策略运行实效探讨

万朝军

四川远瞻赢实业集团有限公司 四川 成都 610000

【摘要】：电力系统无功补偿装置投切策略的合理性直接关系到电压稳定水平与系统经济运行效果。围绕提升无功调节精度与运行实效这一核心目标，分析当前投切过程中存在的频繁动作、响应滞后及局部过补偿等问题，探讨基于负荷特性与电压偏差的分级控制与智能判据优化方法。构建动态协调机制，实现无功资源的精细化配置与协同控制，从而提升电压合格率、降低线损并延长设备寿命，为电网安全稳定运行提供技术支撑。

【关键词】：无功补偿；投切策略；电压稳定；优化控制；运行实效

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.094

引言

电力系统运行质量与无功功率调节水平密切相关，无功补偿装置作为保障电压稳定和降低线损的重要手段，其投切策略直接影响系统安全性与经济性。在负荷结构日益复杂和分布式电源广泛接入的背景下，传统投切方式已难以满足精细化运行需求。围绕提升运行实效开展系统研究，对于优化无功配置、提高电压合格率和促进电网高质量运行具有重要意义。

1 无功补偿装置投切运行现状与存在问题

1.1 投切控制方式及运行特点分析

无功补偿装置的投切控制方式直接决定电压调节效果与系统运行品质。当前电力系统中常见的控制模式包括定时投切、按电压偏差自动投切以及基于无功功率因数的闭环控制方式，不同方式在响应速度、调节精度与适应负荷波动能力方面存在差异。定值式控制结构简单，但对负荷随机波动的适应能力有限；电压判据控制能够反映节点电压变化，却易受短时扰动影响产生误动作；功率因数控制则更强调无功平衡，但在分布式电源接入背景下可能出现局部过补偿现象。运行实践表明，补偿装置多采用分组分级配置，通过投切电容器组或电抗器组实现阶梯式调节，其运行特点呈现出离散性与阶段性并存的特征。当系统负荷曲线变化频繁时，投切装置需要在电压允许偏差范围内保持动态跟踪能力，这对控制逻辑的灵敏度和稳定裕度提出更高要求。

在实际配电网与变电站运行环境中，负荷结构日益复杂，工业冲击性负荷、电动汽车充电设施以及分布式光伏并网均会对无功需求产生显著影响，使投切控制呈现出时变性与非线性特征。补偿容量配置若缺乏精细化分段，将导致调节步长过大，难以实现电压精确控制。部分地区仍采用传统继电器逻辑或简单延

时控制策略，未能引入数据分析与预测算法，使控制方式与现代电网运行要求存在偏差。由此可见，投切控制方式影响电压合格率，还对系统线损水平、设备运行频次以及整体运行实效产生深远影响，对其运行特点进行系统梳理，是开展后续优化研究的重要前提。

1.2 频繁投切与电压波动问题

无功补偿装置在负荷波动较大的工况下容易出现频繁投切现象，这种高频动作会削弱设备运行可靠性并加剧电压波动。电压控制阈值设置过于灵敏或死区范围过窄时，系统在轻微扰动下即触发投切指令，导致电容器组反复投入与切除，形成振荡式调节过程^[1]。此类现象增加断路器与接触器的机械磨损，还可能引起电压过冲与暂态冲击电流，对母线及下级用电设备造成不利影响。尤其在高峰负荷与低谷负荷交替阶段，若缺乏合理的延时判据与动态校核机制，投切动作往往滞后于无功需求变化，形成补偿不足与过补偿交替出现的状态，影响电压稳定裕度。

电压波动问题在长线路供电和末端负荷集中区域表现尤为明显。无功补偿容量配置与系统实际无功需求不匹配时，投切行为会放大电压幅值变化，产生闪变现象，降低电能质量水平。部分场景下，分布式电源的无功支撑能力未能与集中补偿装置形成协调控制，导致局部节点电压偏移。运行实效不足往往体现在电压合格率未显著提升、线损下降幅度有限以及设备故障率上升等方面。由此可见，频繁投切与电压波动问题不仅是控制参数设置不合理的结果，也反映出投切策略缺乏整体协同与动态优化机制，需要从控制逻辑与系统结构两方面进行深入改进。

1.3 运行实效不足的成因探讨

无功补偿装置投切策略运行实效不理想，往往与控制模型与系统实际运行状态脱节密切相关。部分电网仍采用基于固定阈值的电压判据或功率因数区间控

制方式，控制逻辑缺乏对负荷随机波动和潮流动态变化的实时辨识能力，导致补偿决策滞后于无功需求变化。电容器组容量配置呈现大步长分段特征，使调节过程具有明显离散性，当负荷处于临界区间时易产生补偿偏差。配电网结构复杂、节点阻抗不均衡及线路参数差异，使局部无功分布具有空间差异性，而投切策略未充分考虑节点电压灵敏度和无功功率分布系数，造成局部过补偿或补偿盲区。监测数据采集精度不足、通信延时以及控制系统抗干扰能力有限，也会削弱投切决策的准确性，进而影响电压合格率与线损控制效果。

运行管理层面的因素同样制约投切策略的实际效果。部分运行单位在设备选型与容量规划阶段缺乏系统性无功优化计算，未结合典型负荷曲线与最大最小运行方式进行潮流校核，导致补偿容量与系统需求匹配度偏低。分布式电源并网规模不断扩大，其逆变器具备无功调节能力，但集中补偿装置与分布式电源之间缺乏协调控制机制，未形成统一的无功调度平台，削弱整体调节效率。设备老化、接触器触点烧蚀以及电容器容量衰减等问题，会改变实际补偿效果，使理论计算值与现场运行结果存在偏差。

2 提升无功补偿装置投切策略运行实效的技术路径

2.1 基于负荷特性的分级投切策略设计

分级投切策略的构建应立足于典型负荷曲线与时段特征分析，通过对日负荷、周负荷及季节性负荷变化规律进行统计建模，明确不同运行区间内的无功需求范围。在此基础上，将电容器组容量按照小容量、多分段原则进行优化配置，缩小单级调节步长，使补偿容量与负荷波动幅度相匹配。对冲击性负荷和非线性负荷占比较高的区域，可引入快速投切单元与常规投切单元相结合的结构，实现基础补偿与动态补偿分层控制。引入负荷预测算法和实时潮流计算结果，对各节点电压灵敏度进行量化评估，使投切动作具备针对性和预判能力，从而减少不必要的频繁操作，提高调节精度。

在实际运行场景中，分级投切策略还应结合分布式电源出力波动情况进行动态修正。光伏、风电等电源在不同气象条件下呈现明显功率变化，其无功支撑能力与系统负荷曲线并不同步，若缺乏协同设计，易形成局部电压偏移。构建多层次控制结构，将主变低压侧集中补偿装置与馈线末端分散补偿单元进行统筹规划，可形成由主网到末端逐级响应的补偿体系。该策略能够在维持母线电压稳定时，降低线路无功输送

量，改善电压分布均匀性，体现投切策略在提升运行实效方面的系统性与协调性。

2.2 电压偏差与无功需求的协同控制机制

电压偏差是反映无功平衡状况的重要指标，但单一电压判据难以全面刻画系统无功需求变化。协同控制机制的核心在于将节点电压偏差、无功功率潮流方向及功率因数水平进行综合分析，建立多变量联动控制模型。设置合理的电压死区和时间延时参数，使投切决策具备稳定裕度，避免短时扰动引发误动作^[2]。结合实时监测系统采集的电压、电流及相位角数据，开展在线潮流计算与无功灵敏度分析，可准确判断补偿投切对系统电压分布的影响程度，从而实现精细化调节。该机制强调电压调节目标与无功功率平衡目标之间的动态匹配，提升控制策略的协调性。

在配电网多节点结构下，局部电压偏差与全网无功平衡之间存在耦合关系。协同控制应在主站层面构建统一调度平台，对集中补偿装置与分布式电源逆变器无功输出进行统一管理，避免重复补偿或调节冲突。设定分区电压控制目标值和无功优化约束条件，使各补偿单元按照优先级顺序响应，实现分层递进式调节。该模式能够抑制电压越限现象，降低线损水平，并提升系统稳定裕度，为投切策略运行实效的提升提供可靠支撑。

2.3 智能化判据与动态优化方法应用

智能化判据的引入为无功补偿装置投切策略优化提供了新的技术路径。基于历史运行数据构建样本数据库，通过机器学习算法对负荷变化趋势、电压波动特征及投切效果进行模式识别，可形成自适应控制规则。该类判据不再局限于固定阈值，而是根据实时运行状态动态调整控制参数，使投切行为更加贴合系统实际需求。结合模糊控制理论与神经网络模型，可对多因素影响下的无功需求进行综合评估，提升决策准确度。通过在线数据校核与异常识别功能，还可及时修正传感误差与数据偏差，增强控制系统的可靠性。

动态优化方法强调在连续运行过程中不断修正补偿策略，使系统始终保持在经济运行区间。利用滚动优化算法与预测控制技术，对未来短时段负荷变化进行估计，提前规划补偿投切顺序与容量组合，可降低频繁动作概率。将优化目标函数设定为电压偏差最小化与线损最小化的综合指标，在约束条件下求解最优补偿方案，有助于实现安全性与经济性的统一。智能化与动态化的结合，使投切策略从被动响应转向主动调节，显著提升电力系统无功补偿装置运行实效。

3 投切策略优化后的运行效果分析

3.1 电压合格率与系统稳定性提升情况

投切策略优化后,节点电压控制精度明显提高,母线电压偏差控制在允许范围内的时间比例显著增加。对比优化前后的运行数据可以发现,电压越限次数明显减少,电压波动幅值趋于平缓,尤其在负荷高峰与低谷交替阶段,系统电压曲线更加连续稳定。分级投切与协同控制机制的应用,使无功补偿容量与实际无功需求匹配度增强,减少了过补偿与欠补偿交替出现的现象。潮流计算结果显示,无功功率在网络中的分布更加均衡,电压支撑能力得到强化,系统静态电压稳定裕度有所提升,为复杂运行方式下的安全稳定运行提供保障。

在多电源并网和负荷结构多样化背景下,稳定性的提升还体现在电压恢复速度和抗扰动能力方面。当局部负荷突增或分布式电源出力波动时,优化后的投切策略能够快速响应,抑制电压偏移幅度,避免连锁反应扩大。无功支撑点布局更加合理,使关键节点具备更强的电压调节能力。运行实效的提升表现在统计指标改善,还反映在系统运行状态更加平稳,调度操作压力降低,电能质量水平整体提升,体现出投切策略优化在保障电网安全方面的重要作用。

3.2 线损降低与经济效益改善表现

无功补偿装置投切策略优化后,线路中无功电流传输距离缩短,电流有效值下降,线路铜损随之减少。对典型馈线进行对比分析,优化策略实施后线损率呈现稳定下降趋势,尤其在负荷较大时段,损耗削减效果更加明显^[3]。无功功率就地平衡程度提高,使主变压器及线路负荷分布更加合理,降低了无功倒送现象。潮流分布的改善还减少了设备过载风险,提高输电通道利用效率。经济运行分析表明,综合线损电量减少带来的电费节约具有持续性,为供电企业创造稳定收益。

经济效益的改善体现在电能损耗降低,还体现在

设备利用率与运行管理效率提升方面。投切动作次数减少,降低了开关设备频繁操作带来的能耗与故障风险。合理配置补偿容量后,功率因数水平提升,减少因功率因数偏低产生的罚款支出,改善用电侧经济指标。无功管理水平的提高使电网运行更加接近优化状态,体现出技术措施与经济效益之间的协同关系,进一步凸显投切策略在电力系统运行管理中的价值。

3.3 设备运行寿命与维护成本变化分析

投切策略优化后,补偿装置的动作频率趋于合理,断路器与接触器的机械磨损程度明显降低。电容器组在稳定运行区间内工作,避免因过电压或频繁冲击电流造成介质老化加速。设备温升水平控制更加稳定,减少了绝缘材料劣化和触点烧蚀现象。运行数据统计显示,故障停运次数下降,设备可用率提高,检修周期得到延长。投切逻辑的改进有效降低了暂态冲击对系统的影响,提升整体运行可靠性,为电网长期稳定运行奠定基础。

维护成本方面的变化同样具有显著表现。设备故障率降低后,计划外抢修次数减少,人工与备品备件支出随之下降。通过在线监测与数据分析实现状态评估,可根据实际运行状况安排检修计划,避免过度维护或滞后维护。设备寿命延长意味着固定资产折旧周期得到合理利用,投资回报率提升。运行实效的改善体现在技术指标优化,更体现在全生命周期成本的综合下降,充分体现无功补偿装置投切策略优化的长远价值。

4 结语

本文围绕电力系统无功补偿装置投切策略运行实效展开系统分析,从运行现状与问题入手,提出分级投切、协同控制及智能化优化等技术路径,并对优化后的电压质量、线损水平及设备寿命变化进行了综合论证。研究表明,科学合理的投切策略能够提升电压合格率,增强系统稳定性,降低运行成本。相关思路为电网精细化无功管理与安全经济运行提供了实践参考。

参考文献:

- [1] 李文杰,张磊,张万杰,等.基于辨识算法的中压配电网固定电容无功补偿方法[J].微型电脑应用,2026,42(01):175-179.
- [2] 马飞越,牛雨芊,孙尚鹏,等.电容器组相控投切快速真空断路器关合策略研究[J].高压电器,2025,61(12):33-41.
- [3] 刘洪波,李倩倩,石鹏,等.新能源多场站短路比的临界指标及影响因素[J].电网与清洁能源,2025,41(07):94-101+106.