

电力系统电压稳定与无功优化配置研究

毛 滢

扬州三新供电服务有限公司江都分公司 江苏 扬州 225000

摘 要：电压稳定是电力系统安全可靠运行的核心前提，无功功率供需平衡与合理分布是维持电压稳定的关键。当前区域电网覆盖广、负荷类型复杂，传统无功配置存在补偿点位集中等问题，难以满足电网常态化运行的电压稳定需求。本文以电压稳定保障为核心约束，开展电力系统无功优化配置研究。先梳理电压稳定与无功功率的耦合特性，分析核心影响因素及无功失衡危害；再明确无功优化配置的原则和约束条件，阐述常规工程实现方法；接着结合实施路径、设备选型等提出工程实施要点；最后以某地级市区域电网为验证对象，对比优化配置前后核心指标，验证方案有效性。研究成果解决了区域电网电压偏低、网损偏高等问题，为电网运维单位提供实用技术依据，具备广泛工程应用价值。

关键词：电力系统；电压稳定；无功优化；无功补偿；配置方案

电力系统运行中，电压偏移超标、暂降及失稳是供电故障、设备损坏和大面积停电主因。无功功率是维持系统电压平衡核心物理量，供需失衡、分布不合理会使节点电压偏离额定值，降低系统稳定裕度。当前区域电网覆盖广、负荷类型复杂，传统无功配置存在补偿点位集中、容量适配性差、调控滞后等问题，难适配电网常态化运行的电压稳定需求。本文聚焦电网实际运行场景，以电压稳定保障为核心约束开展无功优化配置研究。研究基于常规电网技术标准和成熟运行经验，围绕工程可实施性，梳理电压稳定与无功功率关联规律，规范无功配置流程与要点，用常规分析方法验证配置方案有效性，为电网运维单位提供实用技术依据，保障电力系统稳定运行。

一、电力系统电压稳定与无功功率的内在关联及影响因素

（一）电压稳定与无功功率的耦合特性

电力系统电压稳定本质是系统在扰动下维持各节点电压在允许范围的能力，核心取决于无功功率供需平衡与合理分布。有功功率影响系统频率稳定，无功功率不参与能量做功，用于建立电磁场，传输有显著电压损耗，不宜远距离传输，否则会加剧线路压降与网损、恶化电压水平。节点电压与无功功率强正相关，无功供给大于需求时电压升高，反之降低。系统整体电压稳定要求全网各分区无功就地平衡，避免跨区域、跨电压等级大规模流动。电压稳定裕度与无功备用容量挂钩，无功备用充足区域电压波动小、恢复快，匮乏区域微小扰动就可能引发电压失稳。

（二）电压稳定的核心影响因素

负荷是无功主要消耗单元，不同类型负荷无功需求

特性差异大，是影响电压稳定核心变量。工业异步电机负荷占比高区域，重载时无功消耗剧增，易引发局部电压偏低；居民照明、空调负荷峰谷特征显著，晚高峰无功需求集中释放，易造成全网电压偏移。负荷动态波动打破无功供需平衡，产生瞬时无功缺口，导致节点电压暂降，若系统无法快速补充无功，会影响敏感负荷运行，长期电压偏低加剧电压稳定风险。电网网架结构决定无功传输路径与损耗水平，是电压稳定基础约束。长距离输电线路、细截面导线电抗值大，无功传输电压损耗显著；环网结构无功流通路径多、电压分布均匀、稳定裕度高，但潮流分布不合理会引发无功环流。变压器变比调节、励磁无功消耗影响电压水平。空载时励磁无功消耗大，重载时漏抗电压损耗显著；多台变压器并列运行参数不匹配，会导致局部无功分布失衡。无功电源布局与容量决定电压稳定水平。同步发电机是核心无功源，偏远负荷区域缺乏发电机支撑，电压稳定风险高。当前电网无功补偿设备布局集中、容量配置不合理，投切滞后、调控不精准，会破坏电压稳定，降低系统电压抗扰动能力。

（三）无功功率失衡对电压稳定的危害

无功功率供需失衡分无功短缺与无功过剩两种工况，均会对电压稳定造成不可逆危害。无功短缺是电网常见工况，表现为节点电压偏低、线路网损增加，长期低压运行会使电机转矩下降、设备发热加剧，严重时导致负荷侧设备停运；大范围无功短缺会引发电压崩溃连锁反应，造成大面积停电。无功过剩多在负荷低谷时出现，表现为节点电压偏高，长期过压运行会击穿设备绝缘、缩短设备寿命、损坏精密用电设备；过高电压会使变压

器励磁饱和,产生谐波污染,破坏系统电压稳定平衡。

二、电力系统无功优化配置的核心原则与常规实现方法

(一) 无功优化配置的核心原则

无功优化配置以电压稳定为首要约束,兼顾经济性与可实施性,遵循电网常规运行规范。核心原则有四项,相互独立,构成配置方案核心框架。无功功率不宜远距离传输,优化配置以电网分区为基础,分为高、中、低压区,各分区独立实现无功供需平衡,禁止跨区大规模流动。高压侧调节全网无功基准,中低压侧就地补偿负荷无功,分区分管减少损耗、保障电压稳定。采用分层补偿模式,精准供给无功。高压电网用同步发电机等调节整体无功基准,中压电网用分组投切并联电容器补偿损耗,低压电网用小型分散式补偿装置就地补偿,补偿容量匹配负荷峰谷特性。在满足电压稳定约束下,以降低有功损耗、减少设备投资为目标,优化无功设备布局与容量配置,优先用现有设备调控,在无功缺口集中、电压偏差显著节点布设补偿装置。此外,配置方案贴合电网运维能力,用常规设备,设备投切用常规控制模式,调控逻辑简洁,预留无功备用容量,提升运行可靠性。

(二) 无功优化配置的基础约束条件

无功优化配置需遵循电网运行技术标准,核心约束分三类:一是电压约束,要求各节点电压在额定电压允许偏差内,不同电压等级有不同偏差范围,且无电压越限风险;二是功率约束,要求线路传输功率不超热稳定极限,变压器负载率在经济区间,无功传输距离合理,避免远距离传输加剧电压损耗;三是设备约束,要求无功补偿设备容量不超额定限值,同步发电机无功输出在调节范围内,电容器等分组投切容量匹配节点需求,设备投切次数符合运维规范,避免频繁投切损坏设备。

(三) 无功优化配置的常规工程实现方法

潮流计算是无功优化配置的基础方法,基于电网参数构建方程,计算各节点电压等数据。通过三种典型工况潮流计算,识别相关节点,明确无功供需差值,确定补偿核心点位和初步容量范围。在此基础上进行电压-无功灵敏度分析,量化无功注入对电压的影响程度,优化补偿点位布局并计算单节点最优补偿容量。基于计算和分析结果制定初始方案,结合三种工况迭代校核,以节点电压合格率等为指标,若有问题则调整点位与容量,迭代次数控制在3次以内,最终形成可落地的无功优化配置方案。

三、电压稳定约束下无功优化配置的工程实施要点

(一) 分电压等级无功优化配置实施路径

不同电压等级电网因网架结构、负荷特性和无功需求差异大,采用差异化配置路径。高压枢纽电网(220kV及以上)承担功率传输与电压支撑功能,以同步发电机为核心无功源,优化机组励磁调节参数,在枢纽变电站配大容量并联电抗器,严控无功传输范围,保障高压侧电压稳定,无大规模新增设备需求。中压输电网(110kV/35kV)承担区域功率分配功能,是无功传输与补偿核心层级,在区域变电站配分组投切式并联电容器,在线路末端配小型固定补偿装置,同步优化变压器分接头档位,适配中压电网常态化运行。低压配电网(10kV及以下)直接面向终端负荷,在工业负荷集中区域、居民小区配电房和低压线路配相应补偿装置,重点是小型化、分散化、就地化,适配低压电网运行特征。

(二) 无功补偿设备选型与布局优化

设备选型遵循成熟可靠、经济适配原则,选用常规设备。布局优化以电压改善效果为核心,兼顾运维便捷性。并联电容器适用于所有电压等级,中高压侧用干式,低压侧用自愈式;并联电抗器用于高压枢纽电网与轻载长线路,选型为油浸式固定电抗器;同步发电机仅优化励磁系统参数。设备布局遵循“重负荷、末端、电压越限节点优先”原则,中压电网每3-5个负荷节点设1组补偿装置,低压电网覆盖负荷集中区,补偿装置靠近负荷中心,所有设备布局符合空间规范,预留运维通道。

(三) 无功优化配置的运行调控与运维管理

配置方案落地后,配套常规运行调控与运维管理措施,贴合电网现有运维体系。运行调控采用分时分区控制模式,基于负荷峰谷时段制定固定投切策略,结合电压在线监测数据微调,禁止无功设备频繁投切。运维管理纳入电网常规巡检体系,每月检查外观,每季度开展容量测试与绝缘检测,建立无功运行台账,定期分析运行效果,动态微调补偿容量,同时开展运维人员常规培训。

(四) 特殊工况下的无功配置应急保障

针对负荷骤增、线路故障、检修停运等特殊工况,制定简易应急保障措施强化电压稳定防护,措施无复杂联动控制,适配现场快速处置需求。负荷骤增时,优先投入备用无功补偿设备,同步调节发电机无功输出,补充无功缺口、抑制电压跌落;线路故障停运时,及时调整潮流分布,切除故障区域冗余补偿设备,投入受电区域备用设备,避免局部电压失衡;电网检修时,提前优化无功配置,转移无功负荷,保障检修区域周边节点电压稳定无越限风险。所有应急措施均为手动常规操作,无需自动化联动系统,处置流程简洁、可快速落地,最大限度降低特殊工况下电压稳定风险,保障供电连续性。

四、无功优化配置效果验证与工程数据分析

(一) 验证对象与基础参数

选取某地级市区域电网为验证对象,该电网含220kV变电站3座、110kV变电站8座、35kV变电站12座、10kV配网线路46条,负荷以工业、居民负荷为主,有末端电压偏低等常规问题,贴合多数区域电网运行特征。验证基础参数采用电网实际运行数据,优化配置前开展基准工况测试,记录三项核心指标作对比基准,测试数据均为现场实测。

(二) 优化配置方案落地内容

基于配置原则与实施路径,对该区域电网开展无功优化配置,不进行大规模设备改造,仅优化现有设备运行参数、新增少量常规补偿设备,方案投资低、可快速落地。高压侧优化220kV变电站电抗器运行状态,调整同步发电机励磁参数,预留15%无功备用容量;中压侧在110kV/35kV变电站新增分组并联电容器18组,优化变压器分接头档位26台;低压侧在工业负荷区、居民小区新增低压补偿装置32台,分散布局在负荷末端节点。设备均为常规型号,投切策略匹配负荷峰谷时段,调控流程贴合现有运维模式。

(三) 核心指标对比分析

优化配置后,选取三种典型工况现场实测,对比配置前后核心指标,数据贴合工程实际,改善效果明显。电压合格率上,配置前全网节点合格率92.3%,10kV低压末端节点合格率86.7%,有12个电压越限节点;配置后全网升至99.1%,低压末端节点升至97.8%,无电压越限问题,高峰负荷时段电压跌落幅度降60%。综合网损率方面,配置前为3.82%,配置后降至2.95%,年减少有功损耗约820万kW·h,无功远距离传输占比降70%。电压稳定裕度上,配置前系统无功备用容量不足8%,扰动下电压恢复时间超5s;配置后提升至22%,电压扰动后恢复时

间缩至1.5s以内,无电压失稳风险。

(四) 运行效果综合评价

该区域电网无功优化配置方案落地后,解决了电压偏低等常规运行问题,核心指标满足电网运行规范要求。方案采用常规设备与成熟方法,投资成本低、运维难度小、适配性强,可复制应用于同类型区域电网。运行中无功设备投切顺畅,调控精准,运维人员可快速掌握操作流程。方案兼顾电压稳定与经济运行,实现安全效益与经济效益统一,验证了无功优化配置对电压稳定的提升作用,具备广泛工程应用价值。

结语

综上所述,本文围绕电力系统电压稳定与无功优化配置开展研究,明确了电压稳定与无功功率的关联及影响因素,提出兼顾实用性与经济性的无功优化配置原则、方法及实施要点,通过区域电网实例验证了方案有效性。研究显示,该方案能改善电网电压水平、降低网损、提升电压稳定裕度,采用常规设备与成熟技术,落地难度低、可复制性强。未来可结合电网智能化与新能源并网需求完善配置策略,为新型电力系统电压稳定保障提供技术支撑。

参考文献:

[1]卢艳艳,赵雪洁.电力系统中的无功优化与电压稳定控制研究[J].工程管理,2024,5(4):13-15.
[2]李斌,罗晓伊.分布式电源对电力系统电压无功优化影响的研究[J].电气技术,2024,25(10):55-61,78.
[3]黄颖峰,田巧红.基于广域协同优化的电力系统多机暂态稳定无功控制方法[J].电测与仪表,2025,62(8):170-177.
[4]杨晓磊,曲仕响.电容器组安装优化策略及其对电力系统稳定性影响[J].电力设备管理,2025(11):278-280.
[5]王凯平,姜明磊,孙圣轩,等.支撑新能源电力系统电压稳定的分布式调相机优化配置研究[J].东北电力大学学报,2024,44(5):112-120.