

配电网无功补偿技术应用与电能质量提升对策研究

范哲友

国电投宁夏能源铝业有限公司 宁夏 银川 750004

摘要：配电网无功补偿对提升电能质量意义重大。大量无功功率会增加损耗、降低系统利用率，影响电能质量。常见的无功补偿技术有并联电容器、静止无功补偿器、静止无功发生器等，各有优势与应用场景。基于无功补偿技术的提升对策包括精准选型，综合防治谐波，优化智能控制策略。面对分布式电源接入带来的电能质量问题，可通过合理布局设备、动态调整补偿量、改进逆变器控制、建立协同机制及完善标准规范等措施，保障配电网安全、稳定、高效运行。

关键词：配电网；无功补偿技术；电能质量提升；对策研究

引言：在当今社会，电力供应的稳定性和高质量至关重要。配电网作为电力系统与用户连接的关键环节，其运行状况直接关系到社会生产和居民生活。随着电力需求的持续增长和用电设备的多样化，配电网中的无功功率问题日益凸显，导致电能质量下降、线损增加等一系列问题。无功补偿技术作为改善配电网运行性能的有效手段，逐渐受到广泛关注。然而，目前该技术在实际应用中仍存在一些不足。因此，深入研究配电网无功补偿技术的应用，并提出针对性的电能质量提升对策，具有重要的现实意义和工程应用价值。

1 配电网无功补偿与电能质量概述

配电网作为电力系统的重要组成部分，直接面向用户，其运行状况和电能质量对社会生产和人民生活有着至关重要的影响。在配电网中，无功功率是一个不可忽视的因素。它是用于电路内电场与磁场的交换，并用来在电气设备中建立和维持磁场的电功率。虽然无功功率不对外做功，但它对维持电压稳定和保证系统正常运行起着重要作用。然而，大量无功功率的存在会导致诸多问题，如增加电网的无功损耗，使电压下降、电流增大，影响电能质量。同时，无功损耗还会降低输配电线路传输有功功率的容量，降低系统的利用率。电能质量是衡量配电网运行水平的重要指标，其主要包括电压、频率、波形等方面。良好的电能质量能够保证电气设备的正常运行，提高生产效率，减少设备故障和损耗。反之，电能质量不佳，如电压波动、谐波污染等，会对电气设备造成损害，影响设备的使用寿命和性能，甚至可能导致生产事故^[1]。无功补偿技术应运而生，其基本原理是通过在电网中设置无功补偿装置，产生与负荷所需的无功功率相等但方向相反的无功功率，以减小电网中

的无功损耗，提高电能质量。无功补偿装置可以是同步发电机、同步电动机、电容器组等。通过合理配置无功补偿装置，可以使电网的电压水平、功率因数等指标保持在合理的范围内，从而提高电能质量，降低线损，提高供电能力。因此，深入研究配电网无功补偿与电能质量的关系，对于保障配电网的安全、稳定、高效运行具有重要意义。

2 常见配电网无功补偿技术应用

2.1 并联电容器补偿应用要点

并联电容器补偿凭借结构简单、投资经济与维护便捷的优势，成为配电网无功补偿中应用最广泛的技术手段，其应用效果取决于科学规划与精细运维。（1）补偿容量科学配置：按配变容量的 10% 至 30% 确定补偿容量，坚持就地平衡原则，避免过补偿引起电压升高与无功倒送。（2）补偿方式合理选择：采用杆上固定补偿与自动投切相结合的方式，配电变压器低压侧集中补偿容量占总补偿量的 60% 以上。（3）投切开关精准控制：选用免维护真空开关或晶闸管投切装置，投切延时不少于 30 秒，杜绝投切振荡与频繁操作引发的过电压。（4）谐波抑制配套措施：针对谐波背景较重的线路，串联电抗率为 5% 至 7% 的电抗器，有效抑制谐波放大并防止电容器过载烧损。（5）运行监测与保护配置：装设过压、失压及不平衡保护，电容器运行电压不得超过额定值的 1.1 倍，定期检测电容量衰减，偏差超 10% 立即更换。

2.2 静止无功补偿器应用

静止无功补偿器凭借毫秒级快速响应与连续平滑调节的显著优势，成为解决配电网电压波动与闪变问题的核心装备，其应用必须结合现场工况精准设计。（1）应

用场景精准定位：适用于冲击性负荷集中区域，如电弧炉、轧钢机等波动负荷接入点，可有效将电压闪变值抑制在合格范围内。（2）响应速度优势发挥：利用晶闸管控制技术实现毫秒级无功调节，响应时间小于 20 毫秒，动态补偿速度远超传统机械投切装置。（3）容量配置动态计算：根据负荷波动幅值与频度确定补偿容量，动态调节范围设计为额定容量的 30% 至 100%，兼顾经济性与调节裕度。（4）谐波治理协同设计：配备滤波支路与补偿支路一体化设计，可同时滤除 5 次、7 次等主要特征谐波，谐波畸变率降至 2% 以下。（5）运行维护闭环管理：配置在线监测系统实时采集电压、电流与触发角数据，定期检查晶闸管阀组温升，冷却系统故障率控制在 0.5% 以下。

2.3 静止无功发生器应用优势

静止无功发生器（SVG）在配电网无功补偿中优势显著。响应速度极快是它的突出亮点，能在瞬间检测到无功功率的变化并快速调整，可在几毫秒内完成对无功的补偿，远快于传统补偿设备，能有效应对快速变化的负载。补偿精度极高，SVG 可连续平滑地调节无功输出，能精确地补偿无功功率，使功率因数接近 1，大大提升电能质量。而且调节范围广，既能发出无功功率，也能吸收无功功率，可适应不同工况下的无功需求，无论是轻载还是重载，都能实现良好的补偿效果^[2]。SVG 还具备很强的稳定性和可靠性，它采用先进的电力电子技术，结构紧凑，受外界环境因素影响小。同时，它不会与电网发生谐振，避免了传统补偿装置可能出现的并联谐振问题，降低了系统故障风险，能为配电网的稳定运行提供有力保障。

2.4 智能无功补偿装置应用模式

智能无功补偿装置在配电网中具有多种应用模式，独立分散式应用是将装置安装在各个用电设备附近，能针对单个设备或小范围区域的无功需求进行精准补偿，减少了无功在电网中的传输，降低线路损耗，提高设备的功率因数，适用于负载分布分散的场景。集中式应用则把智能无功补偿装置安装在变电站或配电站的母线处，对整个供电区域进行统一的无功补偿。这种模式可实现对配电网无功功率的宏观调控，提高整个区域的功率因数，优化电网的电压质量，适用于负载集中且规模较大的区域。混合式应用结合了独立分散式和集中式的优点，在局部负载处采用独立分散补偿，同时在变电站母线处进行集中补偿。既能满足局部负载的快速无功需求，又能对整个配电网进行统筹调节，实现无功补偿的精细化和高效化。智能无功补偿装置还可与分布式电

源协同应用，根据电源的输出特性和负载的无功需求动态调整补偿策略，保障配电网的稳定运行。

2.5 串联电容器补偿应用场景

串联电容器补偿在配电网中有多种典型应用场景，在长距离输电线路中，它能发挥重要作用。由于线路电抗较大，会导致电压降落和功率损耗增加，串联电容器可补偿线路电抗，缩短电气距离，提高输电能力，减少无功损耗，提升电压质量，保障长距离线路末端的电压稳定。对于重负荷线路，当线路负荷较大时，电压会出现明显下降，串联电容器补偿可增加线路输送容量，改善沿线电压分布，使电压维持在合理范围，保证设备正常运行。在含有大量电动机等感性负载的工业配电网中，串联电容器能补偿感性无功，提高功率因数，降低企业的电费支出，还能减少设备发热和损耗，延长设备使用寿命^[3]。在多回并联输电线路中，它可改善各回线路的负荷分配，避免线路间出现环流，提高电网运行的经济性和可靠性。此外，在新能源接入配电网时，串联电容器补偿可增强系统的稳定性，减少新能源发电间歇性和波动性带来的影响。

3 基于无功补偿技术的配电网电能质量提升对策

3.1 无功补偿装置精准选型策略

无功补偿装置的精准选型是保障配电网电能质量治理效果的前提条件，必须立足电网实际运行数据，从需求分析到设备验证实施全流程科学决策。（1）补偿需求全面测算：开展电能质量普查，采集功率因数、电压偏差与谐波数据，确定最大无功缺额，测算精度控制在 5% 以内。（2）补偿方式优化确定：根据无功需求分布特征，合理选择集中补偿、分组自动补偿或就地补偿方式，实现无功分层分区就地平衡。（3）设备类型针对匹配：电压波动频繁区域选用静止无功补偿器，谐波背景较重区域选用有源滤波补偿一体化装置，提升治理针对性。（4）容量分组精细设计：采用不等容分组投切方案，各组容量按二进制或算术编码配置，投切级差缩小，补偿精度提升至正负 1% 以内。（5）选型验证与经济比选：对备选方案进行技术经济综合评估，投资回收期控制在 3 至 5 年，同时开展样机试运行验证，确保选型方案切实可行。

3.2 谐波综合防治技术措施

谐波会严重影响配电网电能质量，需采取综合防治技术措施。安装无源滤波器是基础手段，它由电容、电感和电阻组成，能对特定频率的谐波进行有效吸收。根据谐波频率特性设计不同类型的无源滤波器，如单调谐滤波器、高通滤波器等，可针对性地降低谐波含量。

有源电力滤波器也是关键设备,它能实时监测谐波电流,并快速产生与之大小相等、方向相反的补偿电流,实现动态补偿,对变化的谐波具有良好的跟踪和抑制能力^[4]。优化变压器接线方式也能减少谐波,采用 Dyn11 接线方式的变压器,可有效抑制三次及三的倍数次谐波,避免其注入电网。加强对非线性负荷设备的管理同样重要,对使用大量非线性设备的用户,要求其采取谐波治理措施,如安装谐波抑制装置,从源头上减少谐波的产生。建立谐波监测系统,实时掌握配电网中的谐波情况,为制定和调整谐波防治策略提供数据支持,确保配电网的电能质量符合标准要求。

3.3 智能无功补偿控制策略优化

智能无功补偿控制策略的优化是充分发挥补偿装置效能、实现配电网优质经济运行的关键环节,必须依托先进算法与信息通信技术构建协同控制体系。(1)控制目标多元协同:将电压合格率、功率因数与线损率纳入统一优化目标,功率因数控制在 0.95 至 0.98 区间,避免单一目标优化引发顾此失彼。(2)九区图控制策略升级:突破传统九区图边界僵化缺陷,引入十三区图与模糊控制相结合,动态调整投切边界,减少装置频繁动作次数 30% 以上。(3)人工智能算法应用:采用遗传算法与神经网络优化无功配置,基于历史运行数据训练预测模型,实现负荷变化前 10 分钟的预判性补偿。(4)群调群控协同优化:依托配电自动化主站实现多台补偿装置协调联动,统一分配各节点补偿任务,消除站间无功倒送与调节冲突。(5)闭环控制动态校核:建立补偿效果实时反馈机制,每 5 分钟校核一次电压与功率因数实际值,偏差超限自动修正控制参数,确保控制策略持续最优。

3.4 分布式电源接入下的补偿对策

分布式电源接入配电网虽能促进能源多元化,但因其出力的间歇性和波动性,易引发电压波动、谐波污染等电能质量问题,需采取有效补偿对策。根据分布式电源的接入位置、容量和类型,合理布局无功补偿设备,确保在不同工况下都能实现无功的就地平衡,减少线路损耗和电压偏差。例如,在分布式电源集中接入点附近

安装动态无功补偿装置,可快速响应无功变化。利用先进的传感器和通信技术,实时监测分布式电源和配电网的运行状态,通过智能算法动态调整无功补偿量。当分布式电源出力增加时,自动减少无功补偿装置的输出;出力减少时,及时增加补偿,维持电压稳定^[5]。通过改进分布式电源的逆变器控制策略,使其具备一定的无功调节功能,在发电的同时参与无功补偿,提高系统的电压支撑能力。建立协同控制机制不容忽视,实现分布式电源、无功补偿装置和电网调度之间的信息共享与协同运行,根据电网的整体需求统一调配无功资源,提高配电网的运行效率和稳定性。完善相关标准和规范,明确分布式电源接入的无功要求和考核机制,为提升配电网电能质量提供制度保障。

结语

未来,配电网无功补偿技术将朝着智能化、高效化、集成化方向发展。随着电力电子技术和智能控制算法的不断进步,无功补偿装置的响应速度、补偿精度和可靠性将大幅提升。同时,分布式电源大规模接入配电网的趋势不可逆转,这要求无功补偿技术与之深度融合,实现源网荷储的协调控制,以应对分布式电源出力的不确定性。此外,随着能源互联网和大数据技术的发展,可实现对配电网无功功率和电能质量的实时监测与精准分析,为无功补偿策略的动态优化提供有力支持,进一步提升配电网的运行效率和电能质量。

参考文献

- [1] 韩文盈,黄晓彤,张宸,等.无功补偿装置在配电网电压稳定性提升中的应用[J].行车指南,2026,(4):0169-0171.
- [2] 李美.分布式光伏接入对配电网电能质量的优化研究[J].微型计算机,2026,(2):250-252.
- [3] 张守恩.光伏并网下 10kV 配电网台区无功补偿技术[J].电工技术,2026,(9):97-99.
- [4] 马雪,何地.考虑通信质量的配电网无功补偿技术研究[J].通信电源技术,2025,42(22):52-54.
- [5] 沈曰伟.油田配电网谐波及无功补偿分析及治理对策研究[J].内蒙古石油化工,2025,51(3):13-15+25.