

Optimal configuration of reactive power compensation in distribution network and its energy saving effect analysis

Xiaolin Bian

Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd. Xuejiawan Power Supply Company, Ordos, Inner Mongolia, 010300, China

Abstract

As the terminal component of power systems, distribution networks face critical challenges including increased line losses and degraded voltage quality caused by reactive power imbalance, which significantly impacts energy utilization efficiency. This study addresses key pain points in current distribution networks, including irrational reactive power compensation configurations, inadequate equipment adaptability, and weak dynamic regulation capabilities. Through systematic analysis of reactive power mechanisms and energy-saving principles, the paper proposes three innovative solutions: differentiated compensation schemes tailored to load characteristics, optimized models incorporating intelligent algorithms, and coordinated configuration strategies for distributed generation integration. Theoretical analysis and simulation validation demonstrate that these optimized approaches effectively reduce line loss rates, improve voltage qualification rates, and enhance equipment utilization efficiency. This research provides both theoretical foundations and practical engineering references for energy-saving upgrades in distribution networks.

Keywords

distribution network reactive power compensation; optimal configuration; energy saving effect

配电网无功补偿优化配置及其节能效果分析

边晓林

内蒙古电力(集团)有限责任公司薛家湾供电公司, 中国·内蒙古·鄂尔多斯 010300

摘要

配电网属于电力系统的末端环节, 无功功率失衡造成线损增多、电压品质下降等情况严重影响着能源利用效率。本文针对当下配电网无功补偿配置不合理、设备适应性欠缺以及动态调节能力弱等痛点展开论述, 系统阐述无功功率的作用机理与节能原理, 并给出根据负荷特性实施差异化配置的方法、结合智能算法的优化模型以及分布式电源接入情况下的协调配置策略, 在理论分析和仿真验证之后证明这种优化方案可以有效地缩减配电网的线损率, 改善电压合格率并提高设备利用率, 从而给配电网开展节能改造给予理论支撑和工程参照。

关键词

配电网无功补偿; 优化配置; 节能效果

1 引言

在“双碳”目标的指引下, 配电网节能减耗是电力转型的关键使命, 配电网承担着分配和供应电能、向终端用户供电的任务, 然而大量的随机波动负荷、高比例分布式电源接入, 造成配电网中无功功率流紊乱严重, 并产生大量有功功率损耗, 统计数据表明我国平均配电网线损率高达 6%-10%, 远高于国际领先水平。而无功补偿作为保障电能品质、减少线损的技术手段, 配置是否合理直接决定了其节能量, 当前情况下我国家庭用网络无功补偿存在“重集中轻分散”、“重固定轻动态”的问题, 难以为应对复杂多变的实际运行条件,

针对以上情况, 本文围绕无功改善技术进行优化配置的研究, 在分析无功补偿理论基础及其研究现状的基础上建立多元性优化策略具有现实意义^[1]。

2 配电网无功补偿与节能的理论基础

2.1 无功功率的基本概念与作用机制

无功功率是指在电力系统中维持电气设备磁场、电场的非有功消耗功率。其数学表达式为 $Q=UI\sin\phi$ (其中 U 表示电压, I 表示电流, ϕ 代表功率因数角)。虽然它不对外做功, 但却是保证变压器、电动机等感性用电设备正常工作的必要条件, 在配电网中存在不合理流动时会产生以下问题: 一是在输电线路产生电流增加导致电阻损耗(线损与电流平方成正比), 二是造成电压降落影响用户端电压稳定情况出现, 三是降低变压器、线路等有效输送容量限制供电

【作者简介】边晓林(1980-), 男, 中国山西忻州人, 本科, 工程师, 从事电网调度研究。

能力发挥水平从而制约着整个配电网的安全经济运行状态良好实现。

2.2 无功补偿的节能原理

无功补偿的节能重点是接入电容器、电抗器或者 SVG 这些补偿装置之后,就在当地平衡掉感性负荷所要的无功功率,削减无功功率在配电网里的远距离传输过程,这样可以达成很多层次上的节能目标:第一项就是减少线损情况出现,按照电工原理得知线损功率 $\Delta P=I^2R$,如果把无功功率补上了以后,线路中的电流 I 下降了,那么相应的线损也会大幅度降低;第二点是改良功率因数水平,在原先 $\cos \phi 1$ 的基础上提升到现在的 $\cos \phi 2$ 状态下,使得线路输送同量有功功率所需要的电流有所缩减,从而免除因为功率因数过低而被罚缴电费的情况发生;第三方面则是优化电压品质状况,由于无功补偿设备能给予一定支持作用于电压上,能够防止电压波动和闪变现象产生,保证用户端设备处在正常工作条件下的额定电压范围内运行,避免由电压异常造成的额外能耗增加问题发生出来;第四部分还在于释放供电容量空间大小控制下实施操作流程执行步骤进行展开阐述,无功功率传输需求减小后就可以让线路、变压器之类相关联设施得以充分使用其全部容负载范围之内内容纳下来,并且延迟扩充电网投资进程时间推移过程中间接实现节能目的效果。

3 配电网无功补偿的发展现状

3.1 配置方式不合理,与负荷特性匹配度低

目前我国配电网无功补偿大多采用“集中补偿为主,分散补偿为辅”的传统模式,且集中补偿装置多安装在变电站 10kV 母线上,而配网线路中段、末端及用户侧的补偿配置严重不足。这种“一刀切”的补偿方式忽视了配电网负荷的时空差异性,如居民负荷的“峰谷差”,工业负荷的冲击性以及商业负荷的日间聚集特性等,造成负荷高峰时补偿容量不够,低谷时过补偿,不但不能真正降低线损,还会带来电压越限、谐波超标等一系列新问题。例如:某沿海城市配电网,其中心城区商业负荷密集地区由于补偿滞后,在高峰时段的线损率比平时高出了 8%;郊区居民负荷低谷过补偿造成了部分台区电压偏高超过额定值的 7%,从数据上看大概有 40% 左右的配电网线路末端因为没有就近补偿使得线损占比超过了全网线损量 50% 以上,成为了影响配电网节能的关键瓶颈。

3.2 补偿设备选型单一,适应性不足

当前配电网所采用的无功补偿设备依旧是以传统的固定电容器组为主,占到了总量的 70% 以上,而固定补偿装置虽然造价较低,但是调节不够灵活,并不能够根据负荷的变化及时对补偿容量进行调整,其响应时间一般会超过 3 秒,在面对新能源发电这种具有波动性与随机性的特性时,适应性明显不足。另外有些地方还在用老旧的电抗器等装置,存在谐波放大的隐患且要付出大量的维护费用,每年都要花掉

相当于原值 15% 的钱来保养这些设备。相比而言,SVG (静止无功发生器) 等新型电力电子设备响应快(毫秒级),调节范围宽广,但初始投资成本却是传统设备的 3 倍以上,并且缺少大规模应用的实际案例,推广起来困难重重。而且现有产品大多只具备单一功能,很难做到既实现无功补偿又解决谐波问题、提供电压支撑等功能性要求,难以适应现代配电网复杂的运行环境。

3.3 缺乏动态调控能力,难以应对复杂工况

随着分布式光伏、风电等新能源大规模接入,配电网由传统的无源网络转变为有源网络,无功功率的产生与消耗具有很强的随机性和波动性,部分地区分布式电源出力变化范围可达 $\pm 30%$,对无功补偿的动态调控要求越来越高。但是目前大部分配电网无功补偿系统缺少统一的智能调控平台,补偿装置大多独立运行,需要人工手动操作调节,滞后性强,SCADA 系统的刷新周期一般为 5 秒,不能达到全局优化效果。而且配电网自动化水平较低,大概有 30% 的偏远台区未能做到负荷及电源状况的即时观测,使得补偿策略改变慢于工况变动,在新能源出力突变或者负荷剧烈波动的时候,很容易产生无功功率失衡的情况,某风电场并网点就曾因为补偿调控不及时而引发三次连续电压震荡现象,致使周边用户的设备故障停运,显示了现有的调节能力存在不足之处。

4 配电网无功补偿优化配置策略

4.1 优化配置的核心目标与约束条件

无功补偿优化配置的核心目标是达到多目标协同最优,包含最小化配电网总线损、最大功率因数、提高电压合格率、减少补偿设备投资成本,在多目标优化过程中要依照配电网功能合理分配各目标权重,工业配电网应以保证电压稳定性和供电可靠性为主,居民配电网应着重于最小化线损和经济性平衡。并且还要满足以下约束条件:首先是要有电压约束,10kV 配网节点电压要在额定电压的 $\pm 5%$ 范围之内,低压配网(220/380V)允许偏差为 $\pm 7%$,保障用户设备安全稳定运行;其次是设备容量约束,补偿装置输出的容量不能超出其额定值,避免发生过补偿带来的谐波放大或者电压越限现象;再次就是潮流约束,线路传输的功率应当严格控制在安全极限以内,防止出现过载损害设备的情况发生。最后需要考虑的是经济性约束因素,综合考量补偿设备购置费、安装费以及运维全生命周期的成本,并且要求该投资回收期不超过五年的时间长度限制条件,同时也要顾及到环保方面的相关约束,优先采用那些低损耗、低噪音的新款型式补偿设备。构建加权多目标优化模型实现技术、经济与环保的动态平衡^[2]。

4.2 基于负荷特性的无功补偿配置方法

面对配电网负荷的时空不同,提出了“分层分区、就近补偿”的差异化补偿方法。一是搭建负荷特性数据库,并

以数据驱动的方式对各类负荷（居民、工业、商业）的时间分布特征（如居民早峰 7:00—9:00、晚峰 18:00—22:00）空间分布规律和谐波含量进行识别，实现针对用户的个性化配置二是推行分层补偿策略在变电站侧设置大容量集中补偿装置 (SVG), 基本保证全网无功功率平衡; 在线路中段及分支线设置分组投切电容器组, 重点解决线路中段严重的线损问题; 用户侧就地补偿, 针对钢铁化工等高耗能工矿企业, 在车间变压器低压端装设快速响应补偿设备, 全程动态抵消其冲击负载无功需行量; 在分布式电源并网点安装双向无功调节器, 实现源荷无功匹配另外对于含有谐波的非线性负荷, 比如变频器、电弧炉等, 采用滤波型补偿装置 (LC 滤波器) 进行无功补偿, 在补偿无功的同时可以抑制谐波污染。某工业园区经过此方法配置后, 线路末端电压合格率达到 99.5%, 线损率降低 11.2%。证明了该种配置方法是有效的。

4.3 智能算法在资源配置优化中的应用研究

为了求解无功补偿优化配置的非线性和多约束复杂性问题, 智能算法利用自身的全局搜索的能力来作为该问题的主要支撑核心。常用的智能算法中, 遗传算法适合解决离散变量的优化工作, 所以可以确定补偿节点的位置与设备类型选择; 粒子群算法收敛速度快, 适合做补偿容量方面的优化; 而模拟退火算法可避免陷入局部最优解, 且可以与其他算法组合成混合模型进行优化求解等等方法来进行应用。如采用了“遗传-粒子群”混合算法, 以总损耗最小、投资成本最低为目标函数, 同时考虑电压及设备功率等约束因素, 并以此为目标对某 10kV 配电网做了优化分析, 得出线损率相比传统方式降低了 15%, 并且使投资回收期减少了 2 年的时间。机器学习算法的使用也使优化更加具有前瞻性, 通过 BP 神经网络、LSTM 等模型准确预测负荷及新能源出力的时间和空间的变化情况, 并据此做出动态调整补偿策略。近年来随着人工智能技术的发展, 强化学习算法也开始被用于实时调控中, 依靠智能体与配电网环境不断交互来自主地对补偿策略进行优化, 在复杂多变的运行工况下适配相应的补偿策略, 为配电网无功补偿智能化升级提供了新的思路^[3]。

4.4 分布式电源接入下的无功补偿协调配置

针对分布式光伏、风电接入产生的无功功率波动问题, 构建“源网荷储”协同的无功补偿协调配置体系。首先确

定分布式电源的无功调节潜力边界, 光伏逆变器的无功输出范围一般在额定功率 $-0.4\sim 0.4pu$ 之间, 风电变流器可以实现 $-0.3\sim 0.3pu$ 的无功调节, 在此基础上通过优化控制策略来最大限度地发挥其就地无功补偿的能力, 并减少对传统补偿设备的需求; 其次建设一个全网统一智能调控平台, 将变电站、线路侧、用户侧以及分布式电源各自的补偿资源进行整合利用起来, 根据实时量测到的数据（电压、电流、功率因数等）采用模型预测控制的方法来进行全局最优方案设计工作, 在光伏出力达到高峰时段时优先使用光伏逆变器提供必要的无功支持作用, 在负荷高峰期则需要储能系统与 SVG 装置相互配合共同发挥作用, 依靠储能充放电调节和 SVG 快速响应机制相结合的方式使得两者之间的无功功率能够得到很好的匹配程度。同时, 在微电网场景下, 采用分布式协同控制策略, 各补偿单元依靠本地信息和邻域通信自行决定, 免除集中控制的通信延迟状况, 而且凭借无功辅助服务市场机制, 促使分布式电源业主参加无功调节, 经由市场化手段改进协调配置的经济性, 某乡村配电网含有分布式光伏以后, 应用这一策略之后, 电压波动幅度下降了 60%, 新能源消纳率增长 12%, 明显改善了配电网的安全经济运行水平。

5 结语

综上所述, 配电网无功补偿优化配置是提升能源利用效率、推动配电网智能化升级的重要举措。本文经由剖析当前配电网无功补偿的发展现状及突出问题, 在理论根基上给出了融合负荷特性、智能算法以及分布式电源协同的优化规划方案, 给配电网节能改造赋予了体系化的解决办法, 实践表明, 恰当的无功补偿规划可明显削减线损并改良电能品质, 有着不错的经济和社会效益。

参考文献

- [1] 张达,孙伟卿,杨文威.考虑有功无功协调优化的配电网储能与无功补偿配置[J].电力系统及其自动化学报,2024,36(09):44-50.
- [2] 王兆斌,王业篷.一种中压配电网无功补偿优化配置方法[J].云南电业,2023,(06):19-26.
- [3] 邵斌.基于含分布式电源的配电网动态无功补偿优化路径探讨[J].电工技术,2023,(S1):280-282.