

Research and Application Practice of Automatic Adjustment Device for Three-phase Load Imbalance of Distribution Transformers

Fubing Peng¹ Cheng Lei¹ Guorui An¹ Yongchai Tian² Jindong Zhang²

1. Guizhou Power Grid Co., Ltd., Tongren Sinan Power Supply Bureau, Tongren, Guizhou, China, 565100

2. Guizhou Power Grid Co., Ltd., Tongren Riverside Power Supply Bureau, Tongren, Guizhou, 565100, China

Abstract

The problem of three-phase load imbalance in distribution transformers is one of the common issues in low-voltage distribution systems, which can lead to increased line losses, power quality problems, and equipment lifespan issues. To address the shortcomings of high cost, slow phase adjustment and poor monitoring accuracy in traditional manual phase adjustment, this article proposes an automatic three-phase load adjustment device based on real-time sampling current values and intelligent commutation control when analyzing the three-phase current of distribution transformers. This paper introduces how to utilize multi-point current sensing, dynamic data analysis, commutation judgment and commutation execution to achieve adaptive adjustment of load distribution and dynamic optimization of system operation. Finally, research on the load balancing system is conducted in combination with residential areas, commercial complexes, industrial parks, and new energy access scenarios. The simulation results prove that the system performance is stable, accurate and scalable, and can provide certain reference and technical paths for the refined management and intelligent regulation of distribution networks.

Keywords

Distribution transformer; Three phase load imbalance; Intelligent commutation; Power quality; Automatic adjustment device

配电变压器三相负荷不平衡自动调整装置研究与应用实践

彭富兵¹ 程蕾¹ 安国睿¹ 田永钊² 张劲东²

1. 贵州电网有限责任公司铜仁思南供电局, 中国·贵州 铜仁 565100

2. 贵州电网有限责任公司铜仁沿河供电局, 中国·贵州 铜仁 565100

摘要

配电变压器三相负荷不平衡问题是低压配电系统常见问题之一, 会造成线路损耗加大、电能质量问题和设备寿命等问题。为了解决传统人工调相存在的成本高、调相慢、监测精度差的缺陷, 文章在分析配电变压器三相电流情况下, 提出了一种基于实时采样电流值和智能换相控制的三相负荷自动调整装置, 介绍如何利用多点电流传感、动态数据分析和换相判断以及换相执行实现负荷分配的自适应调整和系统运行的动态优化。最后结合居民区、商业综合体、工业园区、新能源接入场景进行负荷平衡系统的研究。仿真结果证明, 系统性能稳定、准确和可扩展, 可以为配网的精细化管理和智能调控提供一定的参考借鉴和技术路径。

关键词

配电变压器; 三相负荷不平衡; 智能换相; 电能质量; 自动调整装置

1 引言

配电系统中三相负荷不平衡会严重影响供电质量和系统能效。随着人们生活水平不断提高, 以及商业建筑不断增多和分布式电源并网率的上升, 低压配电网单相负荷密集程度和相间负荷差异性更加突出, 三相负荷不平衡现象十分严重。因此迫切需要研制一种集三相负荷不平衡监测、智能分

析和调节控制为一体的装置来加以应对。

2 配电变压器三相负荷不平衡自动调整装置的主要功能

配电变压器三相负荷不平衡自动调整装置, 是基于智能控制和电能数据实时感知的动态调节设备, 主要用于用户侧低压配电电路的实时检测与自动换相, 以达到三相负荷平衡的目的。

2.1 实时监测功能

装置配置了高灵敏度电流、电压检测模块, 可对用户

【作者简介】彭富兵(1975-), 男, 仡佬族, 中国贵州铜仁, 本科, 工程师, 从事配网研究。

侧各相电气参数进行毫秒级采样,实现配电节点的连续运行状态感知。首先,通过数据融合算法计算三相电流、电压、有功功率、无功功率,判断电网是否平衡。其次,基于实时采样的数据处理单元通过实时采样的结果计算三相负荷不平衡度,并以曲线图的形式呈现出来,通过监测负荷变化曲线确定负荷变化趋势以及周期性波动规律^[1]。此外,装置还具有本地数据存储及远程数据传输的功能,能够将一些重要的运行数据保存下来,为运维人员留下必要的依据;并通过对比历史数据来发现某些时期的负荷的峰谷的变化规律,从而对未来做出自动调整上的预测。

2.2 自动调整功能

自动调整过程中,设备能根据所测得的用户端支路当前负荷分摊情况进行各用户的支路相位连接情况智能化、动态化判别与变换。第一,设备实时获取用户端支路的实时电流、电压和功率因数等数据,结合分支回路负荷变化趋势,应用嵌入式控制算法判断各相负荷偏离程度。如某相电流始终大于设定值,其余相几乎为空载,则该系统利用电子换相模块执行智能化的换相,把一部分单相负荷转移到目前较轻载的相位。第二,长时间运行过程中,装置可针对换相后的电流分布情况进行即时的校核,根据系统的运行情况自适应调节换相方案,并通过闭环控制保证三相电流始终在合理范围之内,将零线电流降低到极低值以下,减少附加损耗。第三,装置允许运维人员根据现场运行特性设定不平衡度阈值。一旦实时计算值高于指定阈值就开启自动调换相程序,直至完成分步换相后再次采样电流,并判断是否达到了负荷分配优化的效果。

3 工作原理

3.1 实时采集三相电流数据

在用户端与配电网中设置高精度的电流互感器可以连续获得三相电流,经过采样系统的高速模数转换器、嵌入式的数据处理单元,将原始的电流信号转换成数字量,并以毫秒级的周期进行三相负载电流波形的采样,对整个系统的负荷电流波形进行瞬时值、谐波、峰值等相关特性指标的采集,以便于后续计算分析。同时该模块还内置有去噪、滤波等算法,消除由于外界干扰和传感器自身的误差给采样数据带来的不利影响。所有的采集数据均经高速总线或者工业以太网传送给主控模块,供后续的计算和控制使用^[2]。

3.2 计算三相不平衡度

经过数据采集之后,装置可实时使用嵌入式计算模块来读取三相电流,然后应用不平衡度计算的标准化公式来判断每相电流幅值以及相位差的大小,确定三相不平衡的程度。同时结合瞬时幅值偏差法、对称分量法和时域统计特性法等多种算法,实现不平衡度的精确计算。并且充分考虑到了不同负荷下的负载性质、功率因数及谐波成分的影响,在计算过程当中,采用动态加权的方法,尽可能排除了偶发性的短时峰值给不平衡度计算带来的误差,使其更具有代表性。

3.3 阈值判定与策略触发

装置设定了多级不平衡阈值,以系统运行方案作为自动换相的触发条件,然后阈值判定模块会将计算得到的不平衡度与设定的阈值进行对比,并结合负荷种类、运行时间与历史调整数据进行多维度判定,判断出不同的开关阈值判定逻辑,应用条件优先级和模糊推理实现换相策略判断。如果检测的不平衡度大于阈值上限时,即达到高阈值范围,则采用快速换相策略;如果处于中间阈值范围,则可以实现逐渐负荷调整;如果低于阈值下限,则采用维持现状方式防止频繁换相带来的设备损耗。因此此流程保证了换相的动作具有一定的目标性以及灵活性,并且可以兼顾系统的稳定以及调控的速率。

3.4 用户端负荷换相执行

一旦启动换相策略,设备即刻通过远程控制终端或者本地执行机构完成负荷换相,换相过程中通过断路器、固态开关等装置对负载各个相位间电流分配状态进行干预,并以同步闭环的形式实现换相指令的精准传达,同时监测换相时各相电压电流的变化,避免在该过程中出现瞬态冲击或者过流。此外,可根据不同负荷类型和大小以及优劣等级可自定义设置换相路径及负荷分配模式,用于实现多种用户特性的组合调节。

3.5 持续监测与动态优化

完成换相之后,装置仍对三相电流连续采样、计算不平衡度,来验证调整效果。系统利用闭环反馈,将新采样的数据输送到优化算法当中,不断变化调节换相策略的参数,包括换相优先级、分配比例、响应时延等。另外,这个阶段通过使用实时的数据、应用自适应的控制逻辑,可不断进行迭代优化,在负荷变动、季节变换以及发生异常事件时能够自动地做出准确反应。

4 主要技术特点

4.1 响应速度快

使用高性能嵌入式处理器和高速采样电流互感器,可在毫秒内完成负荷状态检测及换相的动作。经优化的系统内部算法简化了负荷识别及换相决策的过程,在极短的时间内就可以完成负荷切换的动作,可以适应瞬时负荷的变化,能够保证三相电流的快速变化。

4.2 调节精度高

通过该装置的精密负序或零序电流计算模型能实现对每一相电流的跟踪,并且可进行动态修正,使三相负荷不平衡度小于5%。并且嵌入式控制单元实时采样调节换相方案,通过负荷分配微调,实现三相负荷的精确平衡与长时间稳定运行。

4.3 模块化设计

装置整体采用模块化结构,包括电流采集模块、换相执行模块、控制单元及通信接口模块。模块化设计便于现场安装、调试和维护,同时支持功能扩展与组件更换,降低系统维护成本并提高设备适应性。

4.4 通信接口完善

系统支持多种工业通信协议,如RS485、以太网及无线通信接口,可接入配电自动化平台,实现数据上传、远程监控和集中控制。通信接口具备冗余设计和防干扰能力,保证在复杂电网环境下的数据传输稳定性。

4.5 人机界面友好

装置配置LCD显示屏或远程监控终端,可实时显示三相电流、电压、功率及负荷不平衡度等运行参数。界面提供状态指示、故障告警及操作记录查询功能,便于运维人员掌握系统运行状况并进行针对性操作。

5 应用效益

5.1 降低损耗

当配电系统工作时,如果三相负荷分配不合理,则会使得三相的相电流相差较大,继而导致线路以及变压器内部由于电流不对称而增加附加损耗。此时可以应用自动调整装置以及负荷换相方式,使得电流在三相之间趋于均匀,从根源处解决了因电流畸变引起能量损失的问题。针对系统的动态调节功能而言,在负荷变化过程中会快速反应并减少中性线上的电流,减小相应的电能回流和发热损耗。

5.2 提高供电质量

配电网络电压不平衡会对用户端设备运行特性产生影响,自动调整装置通过电压对称化、负荷再分配等算法实现三相电压偏差的实时修正,保证三相电能输出一致性。同时,在系统内部集成稳态电压分析模型,在换相控制时针对支路电压偏移量开展有针对性的补偿来消除因单相偏重引起的电压跌落,进而通过稳压控制实现电能传输质量的提升。

5.3 延长设备寿命

由于长期处于非满负荷状态运行,绕组和导线部分存在过大的应力,引起过热、材料疲劳等问题。利用自适应调整装置,使变压器绕组电流、温升分布比较均匀,尽量降低局部过载的概率。再配合自动换相的控制方式采用限流和同步的技术实现电流快速动态均衡变化,防止由于瞬时电流大所造成绝缘损毁。对配电线而言,均衡运行显著降低热应力,减缓导体和接点老化速度。

5.4 智能化管理

自动调整装置具备多维度数据采集功能、设备状态诊断功能和决策优化功能,可以实现配电网络的智能化运行和业务管理。系统由云端数据平台和本地控制单元两部分组成,实现负荷的状态集中采集与分布式控制,通过对大数据进行分析判断和机器学习获取负荷的变化规律,再生成动态的负荷预测模型,在负荷发生偏移的时候进行提前负荷平衡的调节。

6 典型应用场景

6.1 居民区配电变压器

居民区单相负荷比重较大并且集中在某一段时间段内使用,在某个瞬间三相电流不均会造成电流峰值超出标准情

况。自动调整装置能够根据各用户分支路的实际电流值判断出高负载相,并且通过前期负荷分布规律来自动执行相间切换,使整个配电支路处于动态平衡状态中。在居民区用电高峰晚高峰时期,系统能够自动修正相别分配,避免某相支路过载而其他支路相电流过低情况的发生。

6.2 商业综合体供电系统

商业建筑群里面各种电器设备的功率大小悬殊、各支路负载波动较大、三相负荷存在不平衡问题。自动调整装置能利用智能换相模块将不同用电支路分成不同的组别,对每个用电支路的负载情况进行监视,并且根据此时的运行情况来分配相应的相位,保证系统的平衡性。系统内置的负荷趋势分析功能可根据历史用电数据预测负荷变化方向,提前优化换相指令,防止突发负荷集中引发的电压偏移。

6.3 工业园区配电网络与农村电网改造项目

工业园区的设备一般是生产线的生产设备,设备启动时电流大、功率因数小,常常造成三相负荷分配严重不平衡。自动调整装置可以预先置换相位来进行负荷均衡控制,运用负荷均衡方式把电机类负荷分散到不同的相线上,从而可以降低变压器运行时的压力;该系统还支持多节点并联控制,在一个大的厂区中可以并联调整多台变压器,提高了整个园区供电的稳定性。在农村电网改造中由于其单相用户的数量较多、供电半径较大等原因存在大量的线损问题,为了减小中性线电流及末端电压的损失利用该装置的自动负荷平衡功能可有效地提高低压网的运行状况,提升电能输送效率^[1]。

6.4 可再生能源接入点

分布式光伏、风能等接入低压配网后,随着潮流方向、负荷特性的变化,导致系统容易发生电流不对称现象,而自动调节装置就是基于对分布式电源的输出监测及负荷侧功率流的分析,实现发电量和用电量之间的平衡。在逆变器输出端增加数据采集模块对各相功率输入差别情况进行实时监测,通过相别切换或并联无功补偿相结合的方法予以纠正,从而达到保持接入点电压水平,减小逆变器反复起停的影响的目的,保证分布式电源与配电网络的协调运行,为新能源接入条件下电能质量与系统安全提供有力的保障。

7 结语

配电变压器三相负荷不平衡自动调整装置运用了数据采集、智能判断和动态执行的闭合回路式控制方式,实现了配电变压器负荷的实时平衡及配电变压器运行状态的最优。装置的应用不仅在技术层面提升了配电系统的运行效率与供电质量,也在管理层面推动了配电环节的数字化与智能化转型。

参考文献

- [1] 陈云飞,姬亚丽.配电变压器台区三相负荷不平衡控制方法研究[J].电气时代,2024(11):106-109.
- [2] 吴泽恩.配电变压器三相负荷不平衡的危害及优化对策研究[J].数字化用户,2023(39).
- [3] 王涛,徐劲松.基于自动换相的农村配电网负荷三相不平衡调节装置的研制[J].宁夏电力,2025(3).