

配电网中三相不平衡问题的智能治理技术及运行效果验证

杨彩霞 朱烨雄 黄倩 郭加富 赵治翔

云南铝业股份有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i11.17483

[摘要]配电网三相不平衡问题长期制约着电力系统的稳定运行与高效管理,而智能治理技术的引入为解决该问题提供了创新路径。本文聚焦配电网三相不平衡问题,阐述其危害,包括增加线路损耗、影响设备寿命、降低电压质量、干扰继电保护装置等。介绍智能治理技术,如智能换相开关技术成本低、响应快;电力电子补偿技术补偿精度高、响应迅速;分布式电源协调控制技术灵活且促进可再生能源消纳;基于人工智能算法的技术自适应与学习能力强。构建验证体系,从电能质量指标、设备运行状态指标、经济效益指标三方面验证运行效果。结果表明,智能治理技术不同程度改善电能质量,优化设备运行状态,降低线路损耗与设备维护成本,带来可观经济效益,具有较高推广应用价值。

[关键词]配电网;三相不平衡问题;智能治理技术;运行效果验证

中图分类号:TM727.2 文献标识码:A

Intelligent Control Technology for Three-Phase Imbalance in Distribution Networks and Operational Effectiveness Verification

Caixia Yang Yexiong Zhu Qian Huang Jiafu Guo Zhixiang Zhao
Yunnan Aluminium Co., Ltd.

[Abstract] The three-phase imbalance issue in distribution networks has long constrained the stable operation and efficient management of power systems. The introduction of intelligent control technology provides an innovative approach to solving this problem. This paper focuses on the three-phase imbalance issue in distribution networks, elaborating on its hazards, including increased line losses, reduced equipment lifespan, degraded voltage quality, and interference with relay protection devices. Intelligent control technologies are introduced, such as intelligent phase-switching switch technology with low cost and fast response; power electronic compensation technology with high compensation accuracy and rapid response; distributed generation coordination control technology that is flexible and promotes renewable energy integration; and technology based on artificial intelligence algorithms with strong adaptability and learning capabilities. A verification framework is constructed to assess operational effectiveness from three aspects: power quality indicators, equipment operating status indicators, and economic benefit indicators. Results show that intelligent control technologies improve power quality to varying degrees, optimize equipment operating conditions, reduce line losses and equipment maintenance costs, and yield significant economic benefits, demonstrating high value for widespread application.

[Key words] Distribution Network; Three-Phase Imbalance; Intelligent Control Technology; Operational Effectiveness Verification

引言

在现代电力系统中,配电网的三相不平衡问题已成为影响电能质量和系统稳定性的重要因素。三相不平衡不仅导致线路损耗增加、设备寿命缩短,还可能引发电压波动和继电保护失效等一系列问题,严重威胁到用户的用电体验和电力系统的安全运行。为此,智能治理技术的引入显得尤为重要。本文将系统阐

述配电网三相不平衡的危害,探讨多种智能治理技术的原理与特点,并通过实际验证分析其运行效果,以期为电力行业的稳定发展提供参考。

1 配电网三相不平衡的危害

从线路损耗看,三相不平衡使线路电流分布不均,中性线电流增大,增加线路铜损耗,且三相电压失衡会降低负载设备工作

效率,增大能量损耗。对设备寿命而言,三相不平衡让电气设备承受的电压与电流不均,设备各部分发热差异加速绝缘老化,缩短设备整体寿命,电动机等设备运行还会产生额外振动与噪声,干扰正常运行。在电压方面,三相不平衡造成配电网电压不平衡,加剧电压波动与闪变,严重影响用户用电质量,电压敏感设备可能因电压异常损坏,给用户带来经济损失。对于继电保护装置,三相不平衡可能导致其误动作或拒动作,误动作会错误切断正常运行设备,影响供电连续性,拒动作则无法及时切断故障线路,扩大故障范围,降低继电保护可靠性,威胁电力系统安全稳定运行。因此,解决配电网三相不平衡问题十分关键,智能治理技术由此产生,该技术通过实时监测与精准分析三相不平衡状况,自动调整三相负荷以实现平衡。

2 配电网三相不平衡智能治理技术

2.1 智能换相开关技术

在配电网三相不平衡智能治理技术体系里,智能换相开关技术是关键手段之一。其工作原理是实时监测三相负载电流,依据预先设定的换相策略,自动控制换相开关动作,把负载从负载较重的相切换到负载较轻的相,以此实现三相负载的均衡分配^[1]。智能换相开关主要由换相开关本体、控制器和通信模块构成,其中控制器负责采集负载电流信息并分析判断,进而发出换相指令,通信模块则保障控制器与上级系统间的信息交互,确保数据传输畅通无阻。该技术具有显著特点,成本投入相对较低,能在有效控制成本的同时达成治理目标;安装操作简便,易于部署,可快速投入使用;响应速度快,能实时调整三相负载分布,及时应对负载变化,有效解决因单相负载不均匀分布导致的三相不平衡问题。然而,它也存在一定局限,对换相开关的可靠性和使用寿命要求严格,若换相开关质量不佳或使用时间久,可能影响治理效果;换相过程中还可能出现短暂停电或电压波动,对部分敏感设备造成影响,但是凭借成本、安装和响应速度等方面的优势,智能换相开关技术在配电网三相不平衡治理中依旧发挥着重要作用,为提升配电网运行的稳定性和可靠性提供了坚实支撑。

2.2 电力电子补偿技术

电力电子补偿技术通过电力电子器件构建补偿装置优化电能质量,核心设备包括静止无功补偿器(SVC)与静止同步补偿器(STATCOM)。其工作机制基于实时监测配电网三相电压电流参数,生成与不平衡电流幅值相等、相位相反的补偿电流注入系统,直接抵消不平衡分量以恢复三相平衡。SVC采用晶闸管控制技术调节导通角实现无功功率连续调节,STATCOM基于自换相变流器架构运用全数字控制技术实现不平衡电流快速动态跟踪补偿。该技术具有三大优势,补偿精度达±1%以内,可同步处理无功功率与三相不平衡问题;响应时间小于10ms,满足动态负荷补偿需求;通过闭环控制实现补偿量实时调整以适应不同工况。实际应用中可降低线路损耗、提升变压器容量利用率、抑制电压波动与闪变、改善敏感设备运行环境^[2]。技术实施也存在三方面制约,设备成本较传统方案高30%~50%,主要源于大功率电力电

子器件与精密控制系统投入;控制算法涉及多变量非线性优化,需采用先进数字信号处理技术;运行环境要求严格,需配备独立散热系统并控制温度在-10℃至40℃范围内。当前该技术已广泛应用于新能源接入、轨道交通供电、工业负荷补偿等领域,随着碳化硅器件与智能控制算法发展,设备能效比与可靠性持续提升,成本逐年下降。

2.3 分布式电源协调控制技术

分布式电源协调控制技术以构建分布式电源与配电网间的协调控制模型为工作基础,依据三相不平衡程度,实时对分布式电源输出功率做出调整,促使功率在三相间合理分配,进而达成平衡三相负载的目标。在三相四线制配电网里,通过控制分布式电源在三相上的输出电流,可降低中性线电流以实现三相平衡。该技术优势明显,一方面充分彰显分布式电源的灵活性,无需额外增添设备就能治理三相不平衡,既减少设备投入成本,又简化系统结构、降低运维难度;另一方面,有助于提高分布式电源利用率,促进可再生能源消纳,在可再生能源占比日益提升的当下,为其高效利用提供有效途径,推动能源可持续发展。不过,此技术也面临挑战,分布式电源输出功率受自然条件影响大,输出功率的不确定性增加了协调控制难度。要实现精准控制,需建立能精准模拟分布式电源运行特性及与配电网交互关系的控制模型,同时有效的通信系统不可或缺,它能保障分布式电源与控制中心间信息实时、准确传输,让控制指令及时下达。

2.4 其他智能治理技术

基于人工智能算法的智能治理技术借助神经网络、遗传算法等人工智能算法,针对三相不平衡问题构建模型并开展优化。具体工作中,先收集三相电压、电流等与三相不平衡相关的运行参数数据,将其输入预先构建好的算法模型^[3]。随后,利用大量数据进行模型训练,使模型持续学习并调整自身参数,精准把握三相不平衡的特征与规律。经充分训练,模型获得智能预测三相不平衡的能力,可提前预判可能出现的情况,同时依据模型分析结果,能制定出具有针对性的治理策略,有效治理三相不平衡问题。该技术的优势明显,具备较强的自适应能力,面对复杂多变的电网运行环境,能自动调整治理策略以满足实际需求;还拥有突出的学习能力,随着数据量增加和训练推进,模型性能不断提升,治理效果愈发良好。不过,它也存在一些短板,因需大量数据训练,数据收集与整理工作量大,且对数据质量要求高;同时,所采用的算法复杂度高,对计算资源要求高,增加了技术实现难度与成本,在实际应用推广时面临一定挑战。

3 智能治理技术运行效果验证

3.1 验证体系构建

电能质量指标作为验证体系的关键构成,三相电压不平衡度与三相电流不平衡度可直观呈现三相不平衡程度,通过对比智能治理技术应用前后这两项指标的变化,能直接判断其对改善三相不平衡状况的效果。同时,电压波动与闪变也是重要电能质量考量因素,其数值稳定性关乎电力设备正常运行及用户用电体验,监测该指标可评估智能治理技术对整体电能质量的提

升作用。设备运行状态指标亦不可或缺,设备损耗情况能反映智能治理技术对设备运行效率的影响,损耗降低表明设备运行更经济高效;设备寿命指标体现治理技术对设备长期稳定运行的保障能力,延长设备寿命可减少更换成本;设备故障率变化能直观展现智能治理技术对设备可靠性的提升,故障率降低意味着设备运行更稳定。经济效益指标是验证体系的关键考量点,线路损耗降低带来的经济效益是智能治理技术的重要成果,减少线路损耗可降低能源浪费、节约成本。

3.2 电能质量指标改善验证

为验证智能治理技术对电能质量指标的改善效果,于实际配电网中安装智能治理设备并开展监测。具体是对治理前后三相电压不平衡度、三相电流不平衡度、电压波动与闪变等关键电能质量指标实时监测,经对比分析获取数据评估治理成效。从监测结果可知,不同智能治理技术改善效果有别^[4]。采用智能换相开关技术后,三相电压不平衡度与三相电流不平衡度明显降低,原本偏差较大的三相电压和电流逐渐趋于平衡,电压波动与闪变问题也得到改善,电力供应稳定性增强。电力电子补偿技术成效更为显著,能将三相不平衡度控制在极小范围,大幅缩小三相间电压和电流差异,使电能质量得到质的提升,为电力设备稳定运行提供有力保障。分布式电源协调控制技术在分布式电源接入较多区域改善效果明显,通过合理调整分布式电源输出功率,平衡三相负载,减少因分布式电源接入引发的三相不平衡问题,提升整体电能质量。综合而言,这些智能治理技术均在不同程度上改善了电能质量指标。

3.3 设备运行状态优化验证

为验证智能治理技术对设备运行状态的优化效果,对治理前后设备的损耗、寿命、故障率等关键运行状态指标展开统计分析,通过收集设备在不同阶段的运行数据,对比治理前后各项指标变化来评估其实际作用。从设备损耗看,未实施智能治理时,线路因三相不平衡等问题电流分布不均,电阻损耗增加;应用该技术后,合理调整优化三相电流,使线路电流更均衡,有效减少电阻损耗,降低设备发热情况,设备内部元件承受的热应力降低,减缓了元件老化速度。在设备寿命方面,智能治理技术降低设备损耗和发热,减少设备长期高负荷运行产生的损耗积累,让设备在更良好环境下工作,各部件磨损程度降低,使用寿命得以有效延长。在设备故障率方面,不平衡电压和电流会使设备内部元件承受不均匀应力,增加元件损坏风险,而智能治理技术减少设备承受的不平衡电压与电流,使设备运行在更稳定的电压和电流环境,提高设备运行可靠性,减少因电压电流不平衡引发的故障,降低设备故障率。

3.4 经济效益提升验证

未应用智能治理技术时,线路因三相不平衡、谐波等因素产生一定程度的电能损耗,造成电能浪费并增加供电成本。而投入使用智能治理技术后,通过平衡调整三相电流、有效抑制谐波等措施,显著降低了线路损耗。线路损耗减少,意味着输送相同电量时实际消耗电能降低,直接减少了供电企业在输电过程中的电能浪费,进而降低供电成本,为供电企业带来可观经济收益。同时,设备维护成本降低带来的经济效益也不容小觑。传统运行模式下,设备长期承受不平衡电压和电流、频繁故障冲击,导致设备损耗加快、故障率上升,企业需投入大量资金用于设备维护和更换。智能治理技术的应用改变了这一局面,它优化设备运行环境,减少设备承受的不利因素,降低设备故障发生概率,延长设备使用寿命,设备故障减少使企业在设备维修、更换零部件等方面的支出大幅降低,减少了运营成本^[5]。通过对实际运行数据的计算分析可知,智能治理技术在降低线路损耗和设备维护成本方面成效显著,综合计算得出的投资回报率较高,这表明其在技术层面具有优势的同时,在经济层面也能为企业带来切实利益,具有较高的推广应用价值。

4 结语

综上所述,配电网三相不平衡问题对电力系统稳定运行和用户用电质量有着诸多不利影响。而智能换相开关技术、电力电子补偿技术、分布式电源协调控制技术以及其他基于人工智能算法的智能治理技术等,为解决该问题提供了有效手段。通过运行效果验证,这些技术在改善电能质量、优化设备运行状态和提升经济效益等方面成效显著。因此,应积极推广应用这些智能治理技术,以提升配电网运行的稳定性和可靠性,推动电力行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 赵东元,高月春.配电网低压负荷不平衡机理及治理措施研究[J].电力电容器与无功补偿,2016,37(6):59-63.
- [2] 张鹏,徐全.低压配电网三相不平衡运行的影响及治理对策[J].机械与电子控制工程,2025,7(21).
- [3] 王韬.考虑三相电压不平衡的输电线路改造影响研究[J].电气技术与经济,2025(10):52-54.
- [4] 李彬贤,李佳勇,海征,等.基于多智能体深度强化学习的配电网三相平衡在线治理方法[J].中国电机工程学报,2025,45(5):1729-1740+I0009.
- [5] 袁长亚,林永胜,陈勇,等.智能换相技术在配电网三相不平衡治理中的应用分析[J].电子世界,2021(6):75-76.