

基于 6G 通信的配电网差动保护时延补偿与可靠性验证

毛启富

成都华银达电器有限公司 四川成都

【摘要】 基于 6G 通信的配电网差动保护时延补偿与可靠性验证研究旨在解决配电网保护系统在高带宽、低时延环境下的精确动作与稳定运行问题。本文构建了结合 6G 超低时延特性的差动保护模型，提出了一种多维时延补偿算法，通过实时链路质量感知与动态权重调整实现保护信号的快速同步与精确触发。在可靠性验证方面，利用多场景仿真与硬件在环实验，评估了在不同网络负载、干扰及故障条件下的保护动作正确率与响应时间。结果表明，该方法显著提升了配电网差动保护在 6G 通信环境下的鲁棒性与动作准确性，为未来智能电网保护系统的设计与工程应用提供了理论依据与实践参考。

【关键词】 6G 通信；配电网；差动保护；时延补偿；可靠性验证

【收稿日期】 2025 年 4 月 12 日

【出刊日期】 2025 年 5 月 15 日

【DOI】 10.12208/j.jeea.20250160

Delay compensation and reliability verification of distribution network differential protection based on 6G communication

Qifu Mao

Chengdu Huayinda Electric Appliance Co., Ltd., Chengdu, Sichuan

【Abstract】 The research on delay compensation and reliability verification of distribution network differential protection based on 6G communication aims to solve the problems of accurate action and stable operation of distribution network protection systems in high-bandwidth and low-latency environments. This paper constructs a differential protection model integrating the ultra-low latency characteristics of 6G, and proposes a multi-dimensional delay compensation algorithm. Through real-time link quality perception and dynamic weight adjustment, the rapid synchronization and accurate triggering of protection signals are realized. In terms of reliability verification, multi-scenario simulations and hardware-in-the-loop experiments are used to evaluate the correct action rate and response time of protection under different network loads, interferences, and fault conditions. The results show that this method significantly improves the robustness and action accuracy of distribution network differential protection in 6G communication environments, providing a theoretical basis and practical reference for the design and engineering application of future smart grid protection systems.

【Keywords】 6G communication; Distribution network; Differential protection; Delay compensation; Reliability verification

引言

电网保护的核心目标是确保故障发生时能在最短时间内隔离故障区域，避免故障蔓延和电网崩溃。配电网差动保护因其高灵敏度和选择性而广泛应用，但在传统通信条件下，保护信号的传输延迟和数据不同步问题一直制约着保护性能的发挥。6G 通信的高可靠、超低时延特性为差动保护提供了新的技术支撑，使得保护动作的实时性和精确性有了质的提升。然而，6G 网络在不同场景下的链路波动、数据拥塞和干扰仍可

能引入时延偏差，影响保护动作的可靠性。研究在 6G 通信条件下的时延补偿策略，并通过系统化的可靠性验证，为未来智能配电网的安全稳定运行奠定技术基础，具有重要的理论意义和工程价值。

1 6G 通信环境下配电网差动保护的技术特点与挑战

6G 通信的超低时延、高可靠性与大带宽特性为配电网差动保护提供了前所未有的技术条件。传统的差动保护依赖光纤或 4G/5G 无线链路进行保护数据的传

输,其性能常受到链路延迟、抖动及带宽不足等因素的限制。在 6G 环境下,毫秒级甚至亚毫秒级的传输延迟,使得保护信号能够更接近实时地同步到各保护端,实现高速差动判据的计算与动作判定^[1]。这种技术环境下,保护装置可基于更高采样率的同步相量数据进行比对,从而提升故障检测灵敏度与抗干扰能力。然而,高速数据交互对保护算法的响应时间提出了更苛刻的要求,必须确保保护逻辑能够在极短的时间内完成差动电流计算与动作出口。

6G 网络在不同频段和场景下的传播特性差异显著,尤其是在复杂配电网环境中,电磁干扰、多径衰落及节点间动态拓扑变化都会影响通信质量。保护系统必须具备链路自适应能力,能够实时监测信道状态并调整数据传输策略,以避免由于短时链路质量下降导致的保护拒动或误动。配电网的地理分布广泛,通信节点的部署方式、供电稳定性及物理防护水平各不相同,6G 终端设备的维护与可靠运行也是影响保护系统长期稳定性的关键因素。

在高密度接入场景下,6G 网络的资源调度与数据优先级管理也直接关系到差动保护的实时性。配电网中可能同时存在多类保护和控制信号,如何在网络资源紧张时优先保障差动保护数据的传输,避免因带宽竞争造成的延迟,是系统设计的重要方向。6G 网络的安全机制需要与电力系统的防护要求深度融合,防止链路被恶意攻击或数据被篡改引发保护误动作。为应对这些挑战,差动保护系统不仅要依赖 6G 的物理通信性能,还需在协议层与应用层引入冗余传输、加密认证及智能路由等技术,形成从通信底层到保护逻辑的全链路可靠性保障体系。

2 基于多维感知的时延补偿算法设计与实现

时延补偿是确保差动保护在 6G 环境下稳定动作的核心环节。多维感知的设计理念是在时间、频率、空间和业务负载等多个维度同时监测通信链路状态,从而精确估算实时传输延迟。通过在保护装置和通信节点部署高精度时钟同步模块,可实现纳秒级的时间戳标记,结合 6G 网络的时隙分配特性,对端到端时延进行分解与分析。这一过程中,算法将链路传输延迟划分为固定延迟与随机延迟两部分,对固定延迟采用离线标定与周期性校准,对随机延迟则利用在线预测模型进行动态补偿,从而在保护判据计算时消除时间偏差的影响。

算法实现过程中,引入基于卡尔曼滤波与深度学习的混合预测模型,对网络状态进行实时估计。卡尔曼

滤波器适合处理高频、低幅度的延迟波动,而深度神经网络则可捕捉非线性、突发性延迟变化的规律。通过双重预测机制,系统能够在不同延迟扰动类型下维持较高的补偿精度^[2]。结合 6G 的边缘计算能力,可将部分预测与补偿计算下沉到靠近现场的通信节点,减少往返通信带来的额外延迟。为了保证多维感知的准确性,系统还会综合采集信噪比、丢包率、调度时隙占用率等参数,将其作为时延预测模型的输入特征,从而提高对链路状态变化的响应速度与预测准确率。

在工程实现层面,时延补偿模块需要与差动保护的采样同步系统深度融合。具体而言,保护端需对采样数据附加高精度时间戳,并在接收端与本地时钟对齐,再利用补偿算法修正采样时间差异。为了应对多终端、多路径的复杂通信环境,系统在数据链路层引入了多路径融合机制,即在多条可用链路中并行传输相同保护数据,并对接收的数据流进行时间对齐与一致性校验。这种机制不仅提高了抗时延波动能力,还能在单链路故障时保障保护数据的连续性与完整性。整体而言,多维感知的时延补偿设计使得 6G 环境下的配电网差动保护具备了更强的自适应与鲁棒性,为后续的可靠性验证提供了坚实的技术基础。

3 多场景条件下差动保护系统的可靠性验证方法

可靠性验证是评估 6G 通信条件下差动保护性能的关键环节,需要在多种典型工况和极端条件下进行系统化测试。验证过程中,首先构建覆盖城市配电网、城乡混合网及山区孤岛网等多种地理与拓扑特征的仿真模型,利用实时数字仿真平台(RTDS)或硬件在环(HIL)技术,将实际保护装置接入仿真网络环境。通过精确模拟不同场景下的通信链路状态,包括低负载、高负载、随机干扰、链路中断等,评估差动保护在各种网络条件下的动作正确率、拒动率与误动率。

在试验方案设计中,可靠性验证的内容不仅涵盖系统在正常运行状态下的表现,还延伸至故障发生时的多类型扰动情境,涵盖单相接地、相间短路以及高阻接地等典型电气故障类型。针对每一种故障类型,都需要在不同负载与网络条件下详细测试保护动作的响应时间与动作选择性,以确保即便通信链路存在时延波动、数据丢包或瞬时干扰的情况下,保护系统依然能够精准判定故障区域,并在最短时间内切除故障元件,防止故障扩大与电网失稳^[3-7]。验证方法还结合 6G 网络特有的切片技术,通过为差动保护信号分配独立网络切片,实现资源的物理隔离与优先级调度,并深入分析其在高并发通信环境中维持低延迟与高可靠传输的能

力,从而更全面地评估系统在复杂运行条件下的稳定性与鲁棒性。

为获得更接近工程实际的结果,还需在真实配电网试验平台上进行外场测试。这类测试选取典型的配电线路,在不影响实际供电安全的条件下,利用可控故障装置和网络扰动发生器引入测试事件。通过对比不同通信方案与补偿策略下的保护动作数据,可以量化时延补偿算法的实际提升效果。结合故障录波与网络流量分析工具,对保护系统的端到端链路性能进行综合评估,形成涵盖延迟、抖动、丢包及动作准确性的全维度可靠性指标体系。这种多场景、多维度的验证方法,确保研究成果在理论分析与工程应用之间实现无缝衔接。

4 实验与仿真结果的综合分析与优化策略

在实验与仿真环节,数据分析的核心任务是评估多维感知时延补偿算法在 6G 通信条件下对配电网差动保护性能的提升效果。通过对比无补偿、单一补偿以及多维补偿三种策略下的表现,可以直观发现多维补偿在抑制时延波动、稳定保护判据计算及提高动作精度等方面展现出明显优势。在高负载的城市配电网场景中,该策略能够保持保护系统在复杂网络环境下的快速响应与稳定动作。在链路条件恶劣、通信质量波动较大的山区孤岛网等特殊环境中,补偿算法的应用有效降低了保护系统因延迟、抖动及丢包引发的误动作和拒动作情况,表现出较高的鲁棒性与适应性,为差动保护在多种复杂运行条件下的可靠运行提供了有力的技术支撑。

在结果分析过程中,还需关注算法在不同网络负载与干扰条件下的稳定性表现。实验数据表明,当 6G 网络链路受到短时大规模接入冲击时,多维感知模型能够快速调整预测参数,维持延迟波动在可控范围内,从而保证保护判据计算的连续性。多路径融合机制在单链路中断的情况下发挥了重要作用,使保护数据的连续性得到保障^[8]。这些结果表明,在未来 6G 大规模应用于智能配电网的背景下,所提出的补偿策略能够有效提升系统的鲁棒性与自愈能力。

在优化策略方面,可进一步利用 6G 网络的边缘智能与切片管理功能,对差动保护系统进行自适应资源分配和算法参数动态调整。通过实时监测保护动作延迟与链路状态,自动调整补偿模型的预测步长与滤波参数,减少因网络条件变化引起的性能波动。引入人工智能辅助决策模块,对历史动作数据进行聚类与模式

识别,提前预测可能的链路性能下降并提前预调补偿策略。结合这些优化措施,可构建一个具备高灵敏度、低延迟、强鲁棒性和可持续优化能力的差动保护系统,为智能电网在 6G 通信环境下的安全运行提供长效保障。

5 结语

本研究围绕 6G 通信环境下配电网差动保护的时延补偿与可靠性验证展开,构建了多维感知的补偿算法,并在多场景条件下完成了系统化验证。结果表明,该方法显著提升了保护动作的实时性与准确性,具备良好的环境适应性与鲁棒性。结合 6G 的边缘计算与网络切片等优势,可进一步优化保护系统的自适应能力与资源调度效率,为未来智能电网在复杂运行条件下的安全稳定运行提供坚实的技术支撑与工程参考。

参考文献

- [1] 周英豪,牛晓琳. 基于无线通信的配电网差动保护关键技术研究[J]. 通信电源技术,2024,41(20):222-224.
- [2] 冯兴隆,孔锋峰,霍凯龙,等. 基于 5G 无线通信的配电网电流差动保护系统设计[J]. 电测与仪表,2025,62(1):116-123.
- [3] 沈雨生,荀思超,刘晓玥,等. 基于 5G 通信的配电网差动保护分析[J]. 电力系统装备,2024(12):48-50.
- [4] 陈永奎,李红梅,朱继红. 基于 5G 通信的配电网差动保护工程应用研究[J]. 浙江电力,2023,42(8):107-114.
- [5] 王一淳,李壮壮,阎妍,等. 基于 5G 通信的配电网差动保护技术探究[J]. 山东电力高等专科学校学报,2023,26(6):38-41.
- [6] 田锡禄. 基于 5G 通信技术的柔性直流配电网电流差动保护方法[J]. 模型世界,2024(28):144-146.
- [7] 于洋,汤伟,叶远波,等. 基于 5G 通信和改进 DTW 的配电网差动保护技术[J]. 哈尔滨理工大学学报,2023,28(4):110-117.
- [8] 濮宏飞,吴通华,姚刚,等. 基于 5G 通信的有源配电网线路差动保护实用化方案[J]. 电力系统自动化,2022,46(23):117-124.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS