

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210052

# 基于区域自组网的配电线路无线差动保护技术研究及应用

刘志仁<sup>1</sup>, 薛明军<sup>2,3</sup>, 杨黎明<sup>2,3</sup>, 鲍有理<sup>1</sup>, 张涛<sup>2,3</sup>, 张灏<sup>2,3</sup>, 邹磊<sup>2,3</sup>, 康升扬<sup>2,3</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司无锡供电分公司, 江苏 无锡 214026; 2. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211100; 3. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153)

**摘要:** 差动保护为配电线路下的故障快速精准隔离提供了可靠有效的手段, 但传统的光纤通道敷设困难, 运维成本高, 限制了其在配电网的应用。提出了一种无线通信下的配电线路差动保护设计方案。采用区域自组网技术构建差动保护的通信通道, 信息传输不依赖于公共网络传输设备。采用动态定向补偿技术实现各侧数据的精准同步, 不依赖于外部对时设备。采用多级安全策略加强网络安全, 提高保护业务数据传输及接入的安全性。采用无线通信抗干扰技术避免电磁波干扰, 保证数据传输可靠性。通过实验室搭建试验平台进行系统测试, 结果表明基于区域自组网的无线通道传输延时长, 延时抖动小, 数据传输可靠性高, 通道及保护功能各项性能指标完全满足配电线路差动保护要求。最后通过试运行验证了该技术具备工程应用推广价值。

**关键词:** 区域自组网; 无线通信终端; 差动保护; 保护装置; 配电网

## Research and application of wireless differential protection for a distribution network based on a regional ad-hoc network

LIU Zhiren<sup>1</sup>, XUE Mingjun<sup>2,3</sup>, YANG Liming<sup>2,3</sup>, BAO Youli<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>2,3</sup>, ZHANG Hao<sup>2,3</sup>, ZHOU Lei<sup>2,3</sup>, KANG Shengyang<sup>2,3</sup>

(1. Wuxi Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Wuxi 214026, China; 2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 3. Nanjing SAC Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

**Abstract:** Differential protection provides a reliable and effective means for fast and accurate fault isolation of distribution lines. However, traditional optical fiber laying is difficult and operation and maintenance is expensive. This limits its application in a distribution network. This paper presents a design scheme of differential protection for distribution lines under wireless communication. The communication channel for differential protection is constructed by using the technology of a regional ad-hoc network, and information transmission does not depend on public network transmission equipment. Dynamic directional compensation technology is used to realize the accurate synchronization of data on each side, and it does not depend on the external synchronization equipment. A multi-level security strategy is adopted to strengthen network security and improve the security of the service data transmission and access. The anti-interference technology of wireless communication is adopted to avoid electromagnetic interference and ensure the reliability of data transmission. Having set up a test platform in the laboratory for system testing, the results show that the wireless channel based on the regional ad-hoc network has a short transmission delay, small delay jitter, high data transmission reliability. All performance indices of the channel and protection function meet the requirements of differential protection of distribution lines. The value of engineering application and potential popularization of the technology has been verified through trial operation.

This work is supported by the Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51507050) and Young Elite Scientists Sponsorship Program by CSEE (No. CSEE-YESS-2017).

**Key words:** regional ad-hoc network; wireless communication; differential protection; protection device; distribution network

## 0 引言

近年来, 随着国民经济高速发展, 配电网规模

日益扩大, 但网络基础薄弱、运行方式多变、故障定位困难、运行可靠性低等问题严重影响了配电网安全稳定运行, 并逐渐成为制约其发展的重要因素, 迫切需要采取措施提高配电网供电可靠性<sup>[1-7]</sup>。

随着通信技术的发展, 将无线通信技术与电力业务进行深度融合, 探索无线通信技术承载电力高

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(51507050); 电机工程学会青年人才托举工程项目资助(CSEE-YESS-2017)

质量业务的应用已逐渐成为国内外研究的热点<sup>[8-12]</sup>。目前研究内容大多集中在使用4G/5G公网通道承载差动保护业务<sup>[13-16]</sup>，但5G通信技术测试结果表明，其空口侧网络报文延时、抖动等通道关键指标不稳定，公网通信环节多，运维主体多，这些都对差动保护可靠性造成不利影响；而4G无线专网通道限于自身技术原因，距离光纤通信的各项性能指标差距较大，且不具备网络授时功能，对差动保护同步功能实现影响较大，因而难以应用。综上所述，基于4G/5G技术的配电网无线差动保护暂不具备工程应用推广价值。

本文提出一种区域自组网方式下的配电网无线差动保护系统，数据传输不依赖基站等公网传输设备，具备灵活的自组网能力。保护功能模块与无线通信模块采用分体式设计方案，安装方式灵活方便，中间环节少，适用于配电网复杂的应用场景，可大幅减少工程建设周期及基建投资，且有效避免了无线公网长时延及时延抖动对差动保护功能造成的不利影响。采用动态延时补偿的自同步技术，不依赖于外接对时装置，大大降低了外部因素导致差动保护功能意外退出的安全风险，极大地提高了差动保护功能可靠性，是一种性能较优的配电网线路保护应用方案。

本保护经过系统测试和场外测试，各项性能指标完全满足配电线路差动保护的要求，且在无锡地区成功挂网试运行。

## 1 区域自组网的配电网无线差动保护关键技术

无线自组网是当前无线通信领域一种新的、正在发展的网络技术。无线自组网系统是一个分布式、无中心、多跳的路由、对等IP网络，每个站点不仅具有发送和接收数据的功能，还具有路由中继传输的功能，不存在主从，只要具备连接条件，就可以随意部署，操作方便。该系统可以提供灵活、方便、快速的通信网络。无线自组网的特点是在不支持传统基础设施的情况下，可以提供灵活方便的通信，特别是在没有公共网络覆盖的偏远地区，无线自组网具有独立的组网能力和自组织特性。

### 1.1 总体架构

以图1所示的开闭所或环网柜为例，每个开闭所或环网柜配置一台无线通信终端(CPE)，CPE与配网保护或DTU之间通过以太网相联接，采用TCP/IP协议进行数据交互，CPE之间通过无线自组网来实现端到端之间的连接，并采用空口报文协

议完成数据交互。

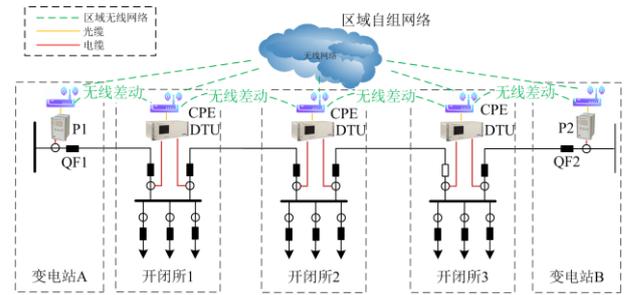


图1 基于自组网的配电网差动保护应用系统架构图

Fig. 1 Application architecture diagram of differential protection for distribution network based on ad-hoc network

配网保护或DTU集成环网主干线路的纵联差动保护功能，DTU通过CPE与相邻开闭所的DTU实时交互采样数据，并采用固定通道延时下的乒乓同步算法来实现两侧数据同步。保护装置侧与CPE协同完成数据加密功能，确保保护业务数据传输的安全性。

该方案的典型特征为CPE无需借助基站及公网设备参与的情况下，更加灵活地构建自组网络，实施通信链路的建立和拆除，实现无线数据的收发，并将数据传送至保护终端，实现差动保护功能。

### 1.2 差动保护业务数据协议设计

目前，光纤差动业务数据一般采用HDLC协议进行传输<sup>[17-19]</sup>，HDLC报文的数据帧比例较小，光纤通道的带宽利用率高；另外HDLC报文的帧结构简单，装置处理报文的时间较短，时延抖动小。

线路差动保护装置利用无线通信实现差动数据的端到端通信，无线通信通常将业务数据进行IP化处理，即通过TCP协议来传输业务数据。在数据报文转换的过程中要尽量减少数据处理时间，因此，有效的措施是尽量简化数据帧格式的转化。如图2所示，对HDLC报文的实际内容不做任何解析转换，直接将HDLC整帧报文封装到IP报文中，由无线通信模块将IP报文发送到对侧，对侧可依据报文规则解析光纵报文。



图2 通信协议设计示意图

Fig. 2 Design schematic diagram of communication protocol

配电网中的设备分布广泛，可能会出现一片区域内的保护终端为不同厂家的情况。因此，需要考虑到装置兼容性问题，在无线通信技术成熟的条

件下, 各厂家需要约定形成通用化、标准化的差动业务协议格式和数据内容, 根据各自所需的算法需求规定报文发送速率、频率、校验方法等, 从而保证在所传送信息尽可能精简、可靠的基础上实现不同厂家装置的兼容性。

### 1.3 自组网无线差动保护同步机制的研究

传统光纤差动保护一般使用乒乓原理来实现两端数据的同步, 该方法不依赖外部时钟, 但需要通道延时稳定且收发延时一致<sup>[20-25]</sup>。自组网方式下没有公共网络环节, 通道链路中间环节少, 通道延时相对稳定, 抖动范围小, 收发路由基本一致, 但距离差动保护对通道要求的指标仍存在一定差距, 因为空口侧的延时抖动会造成通道延时变化及收发延时不一致, 为了消除该不利影响, 在接收端采用定向补偿方式, 接收端收到信息后等待一段时间再发送, 确保两侧的传输时间维持不变且相等。

自组网方式下的定向延时补偿同步方案如图 3 所示。其中,  $T_s$  为采样点间隔,  $T_n$  为参考端接收到数据时刻与下一采样点  $P_{N3}$  时刻的时间差,  $T_m$  为同步端的  $P_{M1}$  点发送时刻与接收对侧传回  $P_{M1}$  点数据时刻的时间差,  $T_{bc1}$ 、 $T_{bc2}$  分别为参考端和同步端的定向补偿延时, 经过定向延时补偿后的通道收、发延时一致, 均为  $T_d$ , 原先由实线箭头组成的“非等腰梯形”则转化为虚线箭头组成的“等腰梯形”, 根据乒乓原理的同步技术, 可以计算出补偿后通道延时  $T_d$ 。

$$T_d = \frac{T_m - T_n}{2} \quad (1)$$

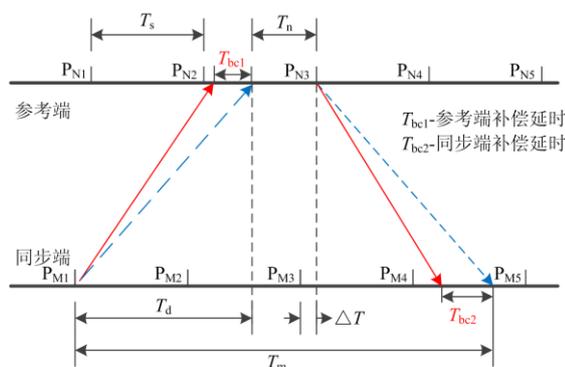


图 3 自组网方式下的定向延时补偿同步方案

Fig. 3 Directional delay compensation synchronization scheme in ad-hoc network mode

采用定向补偿技术保证了通道延时稳定且收发延时一致, 配网保护终端不做调整, 仍采用乒乓原理实现各端数据的精准同步, 来完成线路差动保护功能。

### 1.4 无线差动保护通道建链及网络安全防护机制的研究

为提高无线通信方式下差动保护业务的安全性, 将无线通道建链机制分级处理, 具体分为以下两级, 如图 4 所示。

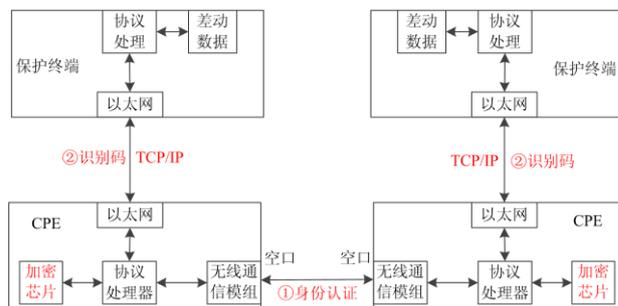


图 4 无线差动保护网络安全机制

Fig. 4 Wireless differential protection network security mechanism

第一级为两侧无线通信终端之间建立连接。无线通信在空口建立连接时, 需进行对方的身份认证, 符合身份接入条件, 才接收该数据, 保证接入的可靠性。

第二级为两侧保护之间建立连接。在保证无线通道建立连接后, 保护通过本侧与对侧的通道识别码确定连接的有效性, 只有在各侧整定的识别码匹配时, 才允许建立保护层级的通信连接。

为了提高无线网络的安全性, 除了在通信建链上采用双级可靠的建链机制以外, 按照国家能源局对通信终端安全接入功能要求, 在靠近业务侧的 CPE 采用内嵌支持国产商用密码算法的安全芯片, 采用基于 SM2 的数字认证技术实现无线通信终端与主站的双向身份认证, 两者之间的应用层报文采用 SM1 加解密措施, 确保数据的保密性和完整性。这样能够保证差动保护业务数据在通信链路上的各个环节安全可靠。

### 1.5 无线通信的抗干扰技术

无线通信的环境不是一成不变的, 有时候会遇到突发电磁波干扰, 为保证无线通信终端正常工作, 自组网无线通信终端采用了无线跳频技术, 随时避开受干扰的频点。跳频通过跳频触发、跳频过程和跳频停止三步完成。运行过程中会实时对当前的频段进行监视, 当检测出在  $f_0$  频段信道受到干扰时, 会按照预先设置的频点顺序, 如图 5 所示, 进行固定周期的频点切换顺序  $f_1$ — $f_4$ , 对数据进行重发; 即使某些信道有干扰, 也不会长时间驻留, 减少影响。通过自主测量及跳频策略, 规避无线信道有干扰的频点, 保持工作信道在干扰小的信道上。

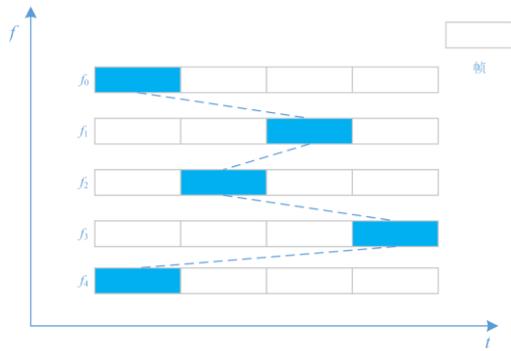


图 5 无线通信下的跳频示意图

Fig. 5 Frequency hopping diagram under wireless communication

跳频触发：通过判断跳频触发条件并上报跳频频点列表与生效时间。

跳频过程：测量跳频过程中该频点的信噪比、噪声干扰水平和 CQI(信道质量指示)值，并对该频点是否满足要求进行实时评估。

跳频停止：确定最终停跳频点，然后两侧通信终端在约定生效时间共同切换到该频点，保证差动保护业务不中断。

## 2 区域自组网的无线差动保护测试

### 2.1 系统测试环境

为验证该保护系统的实用性<sup>[26-28]</sup>，在实验室中搭建了基于区域自组网的配电网线路保护系统测试平台，并重点测试了自组网通信方式下的通道和差动保护功能各项性能指标，试验平台如图 6 所示。其中红色实线为试验电缆线，黄色实线为光纤。

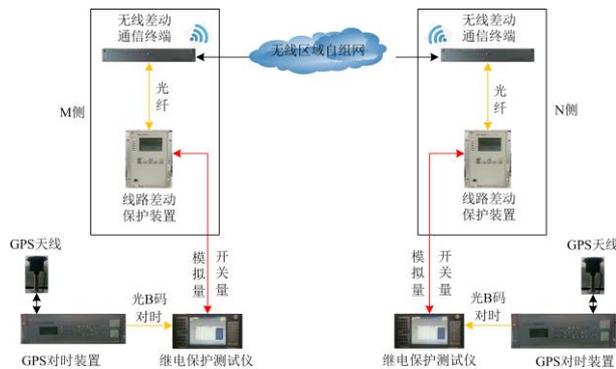


图 6 测试系统架构图

Fig. 6 Test system architecture diagram

该实验平台包括两套配电网线路差动保护装置、两套无线差动保护通信终端、两台继电保护测试仪、两台 GPS 对时装置及 GPS 天线，具体试验设备型号清单如表 1 所示。

表 1 测试设备及功能表

Table 1 Test equipment and function sheet

序号	测试设备	数量
1	低压线路保护装置	2 台
2	无线差动通信终端	2 台
3	继电保护测试仪	2 台
4	GPS 对时装置及 GPS 天线	2 套

表 1 中各型号设备均为 2 台(套)，平均分配至两个不同的实验室中，二者直线距离为 307 m，地理位置如图 7 所示。



图 7 实验室地理位置示意图

Fig. 7 Map of the geographical location of the laboratory

### 2.2 系统测试结果

基于上述实验平台，测试无线通道性能和差动保护性能。

无线通道性能主要包括通道稳定性、通道延时时间、通道误码率、通道延时变化等，无线差动保护装置可实时统计上述通道性能指标信息，并输出至保护液晶显示屏。本次试验过程中，当保护系统两侧无线通道正常建立稳定连接后，读取保护装置实时统计的通道信息，具体结果如表 2 所示。

表 2 无线通道相关指标

Table 2 Wireless channel related indicators

序号	通道信息	显示结果
1	通信稳定	是
2	采样同步	是
3	报文通信时间	11 628 μs
4	总失稳次数	0
5	总丢帧次数	0
6	总帧延迟次数	0
7	总帧错误次数	0
8	总通信时间变化次数	0
9	总采样失步次数	0

由保护装置的通道信息显示结果可知, 无线通道通信稳定, 通道延时 11 628 μs, 各侧数据同步且无丢帧、误帧情况, 通道整体运行状态良好。

为进一步测试无线通道传输性能, 采用对比两侧差动保护装置电流同步相位差的方法进行验证。保护装置对电流模拟量的采样频率为 1 200 Hz, 工频交流量频率为 50 Hz, 同步时间误差与两侧保护装置采集到的同步电流相位误差关系如式(2)所示。

$$f \Delta t = \frac{\Delta \varphi}{360^\circ} \quad (2)$$

式中:  $\Delta t$  为同步误差;  $f = 50 \text{ Hz}$ ;  $\Delta \varphi$  为两侧保护装置的同步电流相位误差。试验测得两侧同步电流相位误差后, 再通过式(3)即可计算出通道延时抖动同步时间误差。

$$\Delta t = \frac{\Delta \varphi}{360^\circ f} = \frac{\Delta \varphi}{18000} \quad (3)$$

同步时间误差  $\Delta t$  主要由两部分组成, 一是通道延时抖动引起的同步时间误差  $\Delta t_{\text{TD}}$ , 二是保护装置的固有同步误差  $\Delta t_{\text{GY}}$ 。其中保护装置的固有同步误差主要包括采样误差、RC 滤波回路引起的时间误差、同步算法误差等, 该固有同步误差可通过光纤互连测得。由于  $\Delta t$ 、 $\Delta t_{\text{TD}}$  和  $\Delta t_{\text{GY}}$  在实验中均为由统计得到的最大值, 且二者并无直接的耦合关系, 因此可通过式(4)近似计算。

$$\Delta t = \Delta t_{\text{TD}} + \Delta t_{\text{GY}} \quad (4)$$

具体试验方法如下: 两侧装置上电后采用 1.3 节所述的同步算法进行数据同步, 待通道完全恢复正常后开始进行试验; 首先通过 GPS 对时装置对两侧的继电保护测试仪进行对时, 完成对时后两侧继电保护测试仪分别为各侧线路保护装置同步输出同相位的电流模拟量, 本侧线路保护装置通过无线通道接收对侧保护装置同步电流模拟量, 与本侧同步电流实时进行相位差计算, 经过长时间数据统计, 可以得到最大相位差, 通过式(3)计算最大同步时间误差  $\Delta t$ 。

每次统计时间为 48 h, 先后进行三次统计, 结果如表 3 所示。

表 3 无线通道同步时间误差测试结果

Table 3 Test results of wireless channel synchronization time error

序号	最大同步相位差	最大同步时间误差/μs
1	-1.923 ~+1.609 °	-106.8~+89.4
2	-1.592 ~+1.971 °	-88.4~+109.5
3	-1.867 ~+1.793 °	-103.7~+99.6

由表 3 的统计结果可知, 通道最大同步时间误差  $\Delta t$  约为 109.5 μs。

通过对比实验测试固有同步误差  $\Delta t_{\text{GY}}$ , 具体方法如下: 在同一实验室中, 将两台线路保护装置通过光纤直连, GPS 对时装置为两侧的继电保护测试仪对时, 完成对时后继电保护测试仪为两侧线路保护装置同步输出同相位的电流模拟量, 统计同步后的两侧电流相位差, 统计结果如表 4 所示。

表 4 线路差动保护固有同步误差测试结果

Table 4 Test results of inherent synchronization error of line differential protection

序号	最大同步相位差	最大同步时间误差/μs
1	-0.637 ~+0.593 °	-35.4~+32.9
2	-0.528 ~+0.671 °	-29.3~+37.3
3	-0.582 ~+0.643 °	-32.3~+35.7

由统计结果可知固有同步误差  $\Delta t_{\text{GY}}$  约为  $\pm 37.3 \mu\text{s}$ 。通过计算可得无线通道延时抖动引起的最大时间误差为

$$\Delta t_{\text{TD}} = \Delta t - \Delta t_{\text{GY}} = 72.2 \mu\text{s}$$

差动保护性能主要体现为差动保护动作时间。差动保护动作时间应为差动保护固有动作时间与报文通信时间(通道延时)之和。

模拟如下区内故障: 差动保护动作定值设置为 1 A, 两侧线路保护装置施加同相位故障电流 1 A(差动电流为 2 A), 差动保护动作时间如表 5 所示。自组网方式下的无线差动保护动作时间与预期相符。

表 5 差动保护动作时间测试结果

Table 5 Differential protection action time test results

序号	差动保护动作时间/ms
1	39.8
2	38.6
3	39.3

根据以上测试结果, 得到自组网方式下的无线差动保护性能指标如表 6 所示。

表 6 自组网方式下无线差动保护性能指标

Table 6 Performance index of wireless differential protection in ad-hoc network mode

序号	项目	指标
1	通道带宽	20 M
2	报文通信时间(通道延时)	<14 ms
3	同步相位误差	<2 °
4	通道延时抖动	<0.1 ms
5	差动保护动作时间	<50 ms

为了验证自组网无线信号传输的距离范围, 分别在 1 km、2 km、5 km 和 10 km 的情况下开展了传输距离测试, 在 5 km 及以下距离的情况下, 无

线差动保护的性能指标均满足表 6 中的参数。但是在 10 km 的距离下，出现了信号长期中断的情况。自组网的无线信号传输受遮蔽物、地势差等诸多因素的影响，具体的传输距离需要视现场的场景而定。

### 3 现场工程实施

#### 3.1 试运行现场情况介绍

为了验证基于区域自组网的无线差动保护的工程应用效果，选取了无锡供电公司某 10 kV 配电线路开展挂网试运行工作，试运行线路全长约 500 m，线路两端的配电房之间间隔若干座高楼，可以有效考验无线信号长距离传输及穿越障碍物的能力。

#### 3.2 无线信号检测

无线通道信号质量是影响无线差动保护性能的重要因素之一。为了全面掌握试运行现场的无线信号质量，对工程现场进行了长时间、多维度的无线信号检测，统计了晴天、阴雨天等不同天气，以及室内、室外不同空间条件下无线通道信号质量的检测数据，具体如表 7 所示，高于差动保护对通道接受裕度不低于 10 dB 的需求。

表 7 不同场景下的无线信号接收裕度

天气	室内 <sup>注1</sup>	室外 <sup>注1</sup>
晴天	14 dB	16 dB
阴雨天	13 dB	14 dB

注 1: 表中室内、室外取自墙壁内外相邻的两个点，且面向对侧配电房

由表 7 可知，相同天气条件下，室外无线信号质量明显优于室内；相同的空间条件下，天气对无线信号也略有影响，但是所有场景下的无线信号质量均满足差动保护使用要求，为后续施工方案的制定提供了强有力的数据支撑。

#### 3.3 现场安装调试

线路差动保护装置和无线通信终端采用传统的屏柜安装方式，布置在配电房室内，安装示意如图 8 所示。线路保护装置通过二次电缆与开关柜连接，实现装置的采样和跳闸。无线传输天线采用专用电缆与无线通信终端连接，安装于配电房墙壁外侧，以获得更好的无线信号质量。

经现场实测，区域自组网无线通信技术的差动保护通信延时小于 12 ms，误码率优于 10<sup>-8</sup>，综合性能指标达到现有移动通信最高水平，全面满足差动保护技术要求，故障下线路两端保护跳闸整组时间小于 50 ms，最大程度地减少了故障停电范围和时间，大大提高了配电网运行的可靠性。

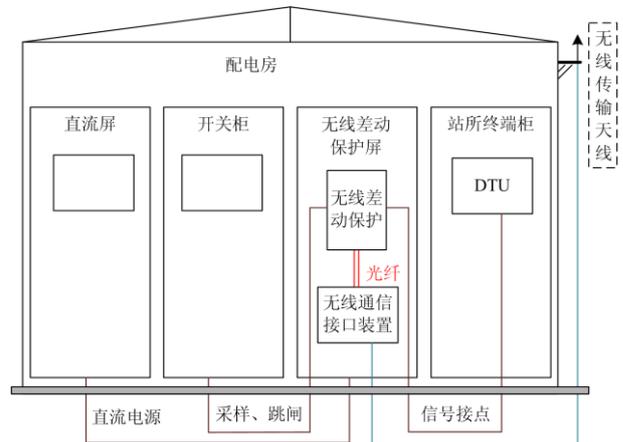


图 8 无线差动保护试运行安装示意图

Fig. 8 Installation diagram of wireless differential protection trial operation

#### 3.4 试运行总结

装置自 2020 年 1 月 8 日试运行以来，经历了 10 余次区外故障，差动保护均不动作。运维人员多次去现场对该设备进行了全方位的巡视，并读取了运行近一年来的装置内部运行日志，通过对该运行数据进行分析 and 总结，得出如下结论：无线通道延时持续在 12 ms 以下，且没有发生过任何丢帧和误码情况，无线通道稳定可靠，成功经受住非视距、长距离传输噪声、干扰以及电波衰减的影响，长时间的现场成功运行，也标志着该技术具备了实际工程应用的条件。

### 4 结论

区域自组网无线差动保护的成功研制及顺利投运，标志着无线通信承载差动保护具备了推广应用的可行性，自组网方式下的无线差动保护应用场景广泛、部署成本较低，对于实现配电网故障快速精准隔离具有重要的指导意义，且满足配电网坚强、可靠、有源、互联、开放、互动的发展方向。

#### 参考文献

[1] 张凯翔, 张肖青. 分布式电源对配电网继电保护的影响分析[J]. 供用电, 2017, 34(8): 47-51.  
ZHANG Kaixiang, ZHANG Xiaoqing. Influence analysis of distributed generation on relay protection of distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(8): 47-51.

[2] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.  
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al.

- Continuous commutation failure suppression and coordinated restoration of multi infeed DC systems based on improved VDCOL[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48 (13): 63-72.
- [3] BADAL F R, DAS P, SARKER S K, et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(1): 87-113. DOI: 10.1186/s41601-019-0122-8.
- [4] 莫峻, 吉斌. 考虑 DG 入网策略配电网过流保护方案[J]. *华北电力大学学报: 自然科学版*, 2018, 45(5): 62-69.  
MO Jun, JI Bin. Overcurrent protection scheme of distribution network considering grid-connection strategy of distributed generator[J]. *Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition*, 2018, 45(5): 62-69.
- [5] 高维良, 高厚磊, 徐彬, 等. 5G 用作配电网差动保护通道的可行性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(8): 1-7.  
GAO Weiliang, GAO Houlei, XU Bin, et al. Feasibility analysis of 5G as differential protection channel of distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(8): 1-7.
- [6] 赵旭阳, 王聪, 牛胜锁, 等. 综合考虑中性点接地方式和网架结构的配电网供电可靠性的评估[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(18): 49-56.  
ZHAO Xuyang, WANG Cong, NIU Shengsuo, et al. Evaluation of power supply reliability of distribution network considering neutral grounding mode and grid structure[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(18): 49-56.
- [7] 向敏, 何川, 田力, 等. 基于模糊神经网络的配电网无线通信系统性能评估方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2016, 31(2): 64-71.  
XIANG Min, HE Chuan, TIAN Li, et al. Evaluation method for wireless communication performance of distribution network based on fuzzy neural network[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2016, 31(2): 64-71.
- [8] 曹津平, 刘建明, 李祥珍. 面向智能配用电网络的电力无线专网技术方案[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(11): 76-80.  
CAO Jinping, LIU Jianming, LI Xiangzhen. A power wireless broadband technology scheme for smart power distribution and utilization networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(11): 76-80.
- [9] 徐光福, 张春合, 严伟, 等. 基于 EPON 通信的智能配电网馈线差动保护[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(2): 76-80.  
XU Guangfu, ZHANG Chunhe, YAN Wei, et al. Feeder differential protection based on EPON communication for smart distribution networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(2): 76-80.
- [10] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(2): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [11] 胡永红, 张超, 文一帆, 等. 智能电网终端融合通信接入网切换策略[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(23): 90-96.  
HU Yonghong, ZHANG Chao, WEN Yifan, et al. Switching strategy of smart grid terminal fusion communication access network[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(23): 90-96.
- [12] 李永亮, 冯杰波, 郑晓庆, 等. 基于 1.8 GHz TD-LTE 无线专网的负荷控制终端接入技术[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(24): 128-132.  
LI Yongliang, FENG Jiebo, ZHENG Xiaoqing, et al. Load control terminal access technology based on 1.8 GHz TD-LTE wireless private network[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(24): 128-132.
- [13] 文安, 黄维芳, 邱荣福, 等. 基于 PTN 和 4G 无线专网的配电网自适应控制保护系统[J]. *电器与能效管理技术*, 2018(5): 57-63.  
WEN An, HUANG Weifang, QIU Rongfu, et al. Distributed adaptive control protection system based on PTN & 4G LTE[J]. *Electrical and Energy Management Technology*, 2018(5): 57-63.
- [14] CHEN S, GAO L, LUO F, et al. A 5G communication based adaptive current differential protection for distribution networks[C] // 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), November 23-25, 2020, Chengdu, China.
- [15] 王廷凰, 余江, 许建, 等. 基于 5G 无线通信的配电网自适应差动保护技术探讨[J]. *供用电*, 2019, 36(9): 18-21, 27.  
WANG Tinghuang, YU Jiang, XU Jian, et al. Discussion on adaptive differential protection technology of distribution network based on 5G wireless communication[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(9): 18-21, 27.
- [16] 瞿水华, 郭钊杰, 许乐飞. 5G 技术在智能电网中的实践和验证[J]. *供用电*, 2021, 38(5): 2-9, 34.  
QU Shuihua, GUO Zhaojie, XU Lefei. Practice and verification of 5g technology in smart grid[J]. *Distribution & Utilization*, 2021, 38(5): 2-9, 34.
- [17] JIN Neng, LIN Xiangning, XING Jiawei, et al. Research on multiterminal current differential protection criterion

- with high sensitivity and synchronization error tolerance capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 3085-3094.
- [18] 李彦, 王芊. 基于 C37.94 协议的纵差保护复用通道故诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 120-122.  
LI Yan, WANG Qian. A fault detection method for multiplex channel of longitudinal differential protection based on protocol C37.94[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 120-122.
- [19] 罗义晖, 王荣超, 谈浩, 等. 一种继电保护复用通道瞬时性故障诊断方案[J]. 电气技术, 2020, 21(11): 87-91, 95.  
LUO Yihui, WANG Rongchao, TAN Hao, et al. A transient fault diagnosis scheme for multiplex channel of relay protection[J]. Electrical Technology, 2020, 21(11): 87-91, 95.
- [20] 李永丽, 李仲青, 李斌, 等. 超、特高压长线路光纤纵差保护数据同步[J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 168-172.  
LI Yongli, LI Zhongqing, LI Bin, et al. Data synchronization for current differential protection based on optical fiber channel for EHV & UHV long transmission line[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(2): 168-172.
- [21] 郝全柱. 光纤差动保护同步采样方案简析[J]. 机电信息, 2017(33): 24-25.  
HAO Quanzhu. Analysis of synchronous sampling scheme for optical fiber differential protection[J]. Electromechanical Information, 2017(33): 24-25.
- [22] 余江, 黄河, 陈宏山, 等. 5G 无线通信承载差动保护业务的应用探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 10-16.  
YU Jiang, HUANG He, CHEN Hongshan, et al. Discussion on application of 5G wireless communication carrying differential protection service[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 10-16.
- [23] 戚宣威, 李宝伟, 董新涛, 等. 基于等传变思路的超高速输电线路保护研究与开发[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 178-187.  
QI Xuanwei, LI Baowei, DONG Xintao, et al. Research and development on the ultra-high-speed transmission line protection based on the concept of the equal transfer[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 178-187.
- [24] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [25] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [26] 朱鹏辉, 王磊. 光纤差动保护在齐鲁 6 kV 配电网中的应用[J]. 齐鲁石油化工, 2018, 46(1): 46-49.  
ZHU Penghui, WANG Lei. Application of optical fiber differential protection on the Qilu 6 kV distribution network[J]. Qilu Petrochemical Technology, 2018, 46(1): 46-49.
- [27] 段运鑫, 刘宝江, 魏勇, 等. 基于光纤网络的 10 kV 智能配电网差动保护方案设计[J]. 电器与能效管理技术, 2015(13): 28-31, 49.  
DUAN Yunxin, LIU Baojiang, WEI Yong, et al. Differential relay protection scheme design for 10 kV smart distribution network based on optical fiber network[J]. Electrical and Energy Efficiency Management Technology, 2015(13): 28-31, 49.
- [28] 刘秋菊, 胡宝, 倪传坤, 等. 数字化光纤差动保护的测试[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 75-78, 99.  
LIU Qiuju, HU Bao, NI Chuankun, et al. Testing of digital optical fiber differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 75-78, 99.

收稿日期: 2021-01-15; 修回日期: 2021-06-16

#### 作者简介:

刘志仁(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统二次技术; E-mail: liuzhiren30@qq.com

薛明军(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: mingjun-xue@sac-china.com

杨黎明(1988—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: liming-yang@sac-china.com

(编辑 魏小丽)