

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210099

## 5G 通信自同步配网差动保护研究与应用

高厚磊<sup>1</sup>, 徐彬<sup>1</sup>, 向珉江<sup>2</sup>, 李立生<sup>3</sup>, 徐群<sup>4</sup>, 张陶<sup>4</sup>, 李坤<sup>4</sup>, 陈恒<sup>5</sup>, 高维良<sup>1</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 国网济南供电公司, 山东 济南 250012;  
3. 国网山东电力科学研究院, 山东 济南 250003; 4. 国网青岛供电公司, 山东 青岛 266002;  
5. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 淄博 255087)

**摘要:** 随着分布式电源的高度渗透和环网结构的逐步增多, 配电网迫切需要电流差动保护应对过流保护面临的挑战。基于 5G 的商用化契机, 研究开发一种基于 5G 通信的配电网分布式差动保护。该保护采用基于移动边缘计算的切片网络作为数据通道, 具有超低延时和超高可靠的特点; 采用基于故障时刻的自同步方法解决差动保护两端的数据同步问题, 无需增加额外对时装置。在 5G 智能电网应用示范区, 对所开发装置进行了单基站和跨基站环境下的综合测试, 并投入 10 kV 线路试点运行。现场测试结果与试运行数据表明, 差动保护性能满足配电网工程应用要求。

**关键词:** 5G 通信; 网络切片; uRRLC 场景; 配电网; 差动保护; 自同步; 故障时刻

### Research and application of self-synchronized differential protection for distribution networks using 5G as the communication channel

GAO Houlei<sup>1</sup>, XU Bin<sup>1</sup>, XIANG Minjiang<sup>2</sup>, LI Lisheng<sup>3</sup>, XU Qun<sup>4</sup>, ZHANG Tao<sup>4</sup>, LI Kun<sup>4</sup>, CHEN Heng<sup>5</sup>, GAO Weiliang<sup>1</sup>  
(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. State Grid Jinan Power Supply Company, Jinan 250012, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China; 4. State Grid Qingdao Power Supply Company, Qingdao 266002, China; 5. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China)

**Abstract:** With the high penetration of distributed generation and the gradual increase of ring network structure, distribution networks urgently need current differential protection to overcome the challenges faced by over-current protection. Taking the opportunity of 5G commercialization, this paper develops a distributed differential protection for distribution networks using 5G. In this protection system, a sliced network based on mobile edge computing is deployed as a data channel. This has the feature of ultra-low latency and ultra-high reliability. The fault instant-based self-synchronization method is adopted to realize the data synchronization required by differential protection. It has no need for additional timing devices. In a demonstration of 5G application for the smart grid, the developed relays are comprehensively tested under both single and crossing base station environments. The relays have been put into use in a 10 kV feeder for test run purposes. Both field test results and test run data indicate that the performance of the proposed differential relays meet the requirements of a distribution network in engineering application.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5100-202055018A-0-0-00) and the Science and Technology Project of Shandong Electric Power Company (No. 5206011900DG).

**Key words:** 5G communication; network slice; uRRLC scene; distribution network; differential protection; self-synchronization; fault instant

## 0 引言

随着以光伏和风电为代表的分布式电源 (Distributed Generation, DG) 在配电网中的高度渗透,

配电网由原来的辐射型网络变成了有源网络, 呈现出故障电流双向流动、故障特性多变等新特点<sup>[1-3]</sup>。另一方面, 随着产业技术的发展和人们生活质量的提高, 高供电可靠性配电网, 如单环网或双环网结构<sup>[4]</sup>, 已在我国较多地区建设并投入运行。对于以上出现的有源或多源配电网, 传统的三段式电流保护以及基于过流原理进行故障定位的馈线自动化

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助 (5100-202055018A-0-0-00); 山东电力公司科技项目资助 (5206011900DG)

均难以适用，对此专家学者开展了广泛研究并陆续提出新的解决方案<sup>[5-9]</sup>。依据有源配电网的故障特性及电流分布特点，具有绝对选择性的电流差动纵联保护无疑是解决以上问题的最佳方案<sup>[10]</sup>。

电流纵差保护通过实时交换线路两端电流数据来识别区内外故障，在配电网应用时首先需要解决通道问题。根据输电网纵联差动保护的应用实践，并结合有源配电网的实际情况，对配网差动保护通道的基本要求为：带宽不小于 2 Mbps，时延不大于 15 ms，可靠性不低于 99.999%，安全等级为 I 区。虽然基于光纤以太网的对等通信能够满足配网分布式差动保护的通道要求且已开展应用研究<sup>[11-12]</sup>，但配电网点多面广，大规模铺设光纤面临难度大、投资高、工期长等诸多困难，成为制约配网差动保护推广应用的主要瓶颈。

5G 是第五代移动网络通信技术，和 4G 相比速率更高、容量更大、时延更低。随着 5G 通信技术的逐渐成熟和商用化开启，其在垂直业务领域的应用正日益深入，智能配电网的分布式保护与控制便是其中最具前景的应用领域之一<sup>[13]</sup>。5G 通信的高可靠和低延时应用场景为配网电流差动保护的通道需求提供了替代光纤的解决方案。文献<sup>[14-17]</sup>围绕 5G 通信网络切片特性、用于电网业务时的安全性以及用于分布式纵联保护的可行性等进行了深入探讨。文献<sup>[18]</sup>提出基于 5G 通信的自适应配网差动保护方案，为 5G 应用于配网保护与故障自愈进行了有益探索。

基于上述背景和已有工作基础，本文针对新近研制开发的一种新型 5G 通信自同步配网差动保护进行全面阐述，共分四个部分。第一部分介绍 5G 通信技术特点，包括目前共存移动通信方式的技术性能对比、5G 应用场景及网络切片技术；第二部分介绍 5G 通信差动保护的关键技术，包括故障时刻自同步方法、动作判据、硬软件开发、数据帧结构以及保护动作时延分析；第三部分介绍现场测试与试点投运情况，包括济南、青岛两地的测试项目及结果，试点工程概况及运行数据；第四部分为结论。

## 1 5G 无线通信技术

### 1.1 5G 通信的特点

2015 年 6 月，在国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)第 22 次会议上，IMT-2020 推进组明确了 5G 通信关键特性的提升，包括高速率、高连接数密度、低时延、高可靠性等。综合相关文献，5G 前几代无线通信技术的性能对比如表 1 所示<sup>[13,18-20]</sup>。数据对比表明，5G 在通信速率、

端到端时延、通信可靠性以及时间同步等技术指标方面均有质的飞越，与配网差动保护对通道的技术需求非常吻合。

表 1 5G 与 4G、GPRS 通信性能的比较

Table 1 Performance comparison among 5G, 4G and GPRS

	GPRS	4G	5G
速率	20~40 kbps	50~100 Mbps	400 Mbps~10 Gbps
时延	<2 s	<100 ms	<15 ms
可靠性	70%	99.9%	99.999%
覆盖范围	3~10 km	3~5 km	0.2~1 km
时钟同步	无	1 μs	300 ns

### 1.2 5G 通信的应用场景与切片技术

IMT-2020 推进组定义了 5G 的三种应用场景，分别为超高可靠和低延时通信(ultra-Reliable and Low Latency Communications, uRLLC)、增强型移动宽带(enhanced Mobile Broadband, eMBB)和海量机器类通信(massive Machine Type Communication, mMTC)，每种应用场景对应的性能指标需求如图 1 所示。5G 通过三种应用场景为不同垂直业务领域提供差异化服务。

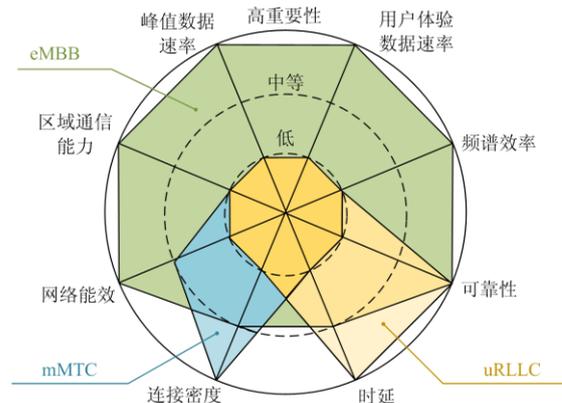


图 1 不同应用场景各关键特性的重要性示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the importance of the key features in different application scenarios

配网差动保护是 5G 三大应用场景中的 uRLLC 业务，其对端到端(End-to-end, E2E)时延以及传输可靠性有严格的要求。按照移动标准定义，一个通用的网络架构是由终端、基站、核心网、应用服务器组成，除了终端与基站属于空口传输，其他都是光纤汇聚的形式，即经过的节点越多，业务流的时延就会越大。为满足 uRLLC 业务端到端超低时延要求，需要在 5G 架构内引入网络切片技术。其实时方案是通过移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)、用户面功能(User Plane Function, UPF)下沉、控制面和用户面分离等技术，摒弃常规传输链路，

将多跳传输简化为一跳或最小跳数, 最大程度降低基站至核心网的回传时间以及核心网内的传输延时。

网络切片是基于同一个物理网络而构建不同逻辑网络的技术; MEC 是指通过在无线接入网侧部署通用服务器, 为接入网提供云计算能力的技术。采用基于 MEC 的网络切片, 即能保证配网差动保护通信延时的需求, 又能保证通信安全性要求<sup>[21]</sup>。

## 2 5G 通信自同步配网差动保护关键技术

本文研究的配网差动保护构成方式如图 2(a)所示。图中, MN 代表有源配电网中的某个馈线区段, 两端保护装置通过 5G 终端模块接入 uRRLC 切片网络, 从而实现保护装置之间基于 5G 网络的实时数据交换。

### 2.1 故障时刻自同步技术

差动保护建立在基尔霍夫电流定律之上, 在原理上需要两端电流数据的同步。与输电系统专用光纤通道不同, 5G 通信来回时延不等, 传统乒乓算法无法应用; 虽然基于卫星时钟的同步方法不要求通道来回时延相等, 但是需额外增加接收装置和同步电路, 带来了成本增加、结构复杂和可靠性问题。

为解决以上矛盾, 本文采用课题组提出的故障时刻自同步专利技术<sup>[10,22]</sup>。如图 2(b)所示, 由于配电路径较短(几百米至十几公里), 电磁波在线路上的传播时间为几微秒至几十微秒, 故障发生时线路两端几乎同时出现故障引发的电流突变; 两端保护以检测到的电流突变时刻(等同为故障发生时刻)为

时间起点, 计算或提取各测的电流(相量或瞬时值), 实现两端电流数据的同步测量, 然后将同步测量数据打上时标并经 5G 信道传到对侧, 完成差动保护需要的数据同步与实时交互。该方法的同步精度取决于保护装置的采样率与故障时刻检测算法。理论分析与仿真及实验结果表明<sup>[11,22-23]</sup>, 在采样率不低于 6.4 kHz, 采用相电流突变量启动与曲线拟合相结合的故障时刻检测方法, 能保证同步误差一般小于 3%; 最大不超过 6%; 满足差动保护的同步要求。

该方法依靠自身软件实现数据同步, 不依赖外部同步时钟, 不受通道来回时延影响, 不受保护装置安装环境影响, 完全适配 5G 通信配网差动保护。

### 2.2 差动保护动作判据

配网差动保护主要用来快速识别和隔离馈线区段上发生的相间短路。为适应配电网在结构、故障特性、负荷特性上的多样性, 配网差动保护采用不同的电流及差动判据形式。

#### 2.2.1 区段内无支配网场景

该场景下环网柜之间馈线上没有负荷分支, 类似于图 2(a)所示的 MN 线路。此时, 可采用全电流分相差动动作判据, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} |\dot{I}_{M\phi} + \dot{I}_{N\phi}| > K |\dot{I}_{M\phi} - \dot{I}_{N\phi}| \\ |\dot{I}_{M\phi} + \dot{I}_{N\phi}| > I_{op} \end{cases} \quad (1)$$

第一个方程为带有比率制动特性的主判据, 用在故障情况下有效区分区段内、外部短路; 第二个方程为辅助判据, 用来防止保护在稳态情况下因负荷波动、不平衡电流等因素引起的误动。

该判据能够正确检测环网或有源配网被保护区段上发生的两相或三相短路; 若是小电阻接地系统, 也能够反应单相接地短路。单侧电源供电(如开环运行)或弱馈现象(如一端为逆变类 DG)发生时, 一端电流为零或很小, 而系统侧电流很大, 由于比率制动系数  $K$  小于 1, 同时最小动作门槛  $I_{op}$  又小于负荷电流, 因此判据(1)中的两式恒满足, 保护能够可靠动作。

#### 2.2.2 区段内有支配网场景<sup>[11]</sup>

该场景下环网柜之间常接有分支负荷或分支电源, 形成 T 接馈线。若分支点处电流可测(如分支电源场景), 则可采用三端线路差动保护判据形式; 即在式(1)的基础上, 将分支线路电流添加到差动电流与制动电流中, 任一分支发生短路均可判定为内部故障。若分支点处电流不可测(如分支负荷场景), 则需要考虑分支负荷变化对差动保护产生的影响。此种情况下, 可采用基于故障分量的差动判据形式。考虑到任何故障类型都存在正序分量, 且逆变类

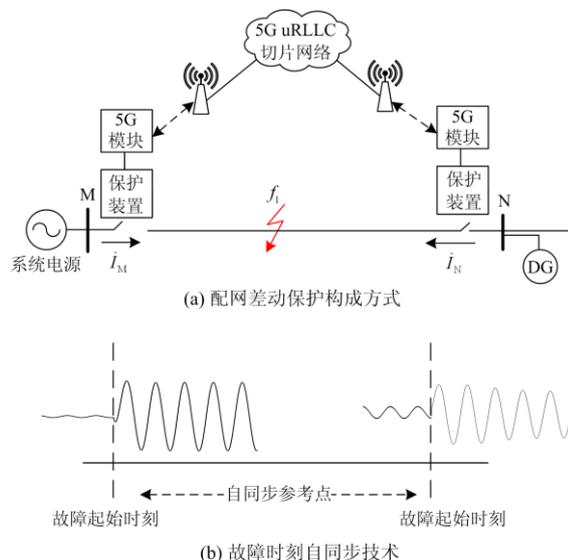


图 2 5G 通信自同步配网差动保护构成

Fig. 2 Schematic diagram of self-synchronized differential protection for distribution networks using 5G

DG 故障情况下的输出电流主要是正序电流, 因此采用基于正序故障分量电流的差动判据, 能够适应具有不可测分支电流的配网场景。

### 2.3 保护装置实现

#### 2.3.1 硬、软件开发

以山东科汇配电监测终端为基础, 通过配置 5G 客户终端模块(Customer Premise Equipment, CPE)、更新通信接口配置方案、升级软件算法等方式, 研制开发出嵌入电流差动保护功能的智能终端单元(Smart Terminal Unit, STU)。装置支持至少 8 路模拟量输入、14 路空接点输入和 2 路开出(控制分、合闸); 支持每周波 128 点采样、16 位 A/D 转换; 装置具有 2 个电以太网口、1 个 RS485 通信口和 1 个 CAN 通信口, 支持 5G 网络(无线)与光纤通道(有线)两种不同类型的通信方式。

装置软件开发分为底层软件和上层应用软件两部分。底层软件主要负责模拟量的采集、存储和计算、开关量的监测和控制、装置 IP 的获取、AI 与 DI/DO 等进程之间的功能串联等。上层应用软件主要负责装置间通信的建立、数据帧的收发和解析、差动逻辑的判断以及保护跳闸命令发出等。针对单侧电源供电或由于弱馈导致一端保护不能启动的内部故障情况, 装置设计了远方启动及跳闸逻辑, 能够保证两端保护的可靠动作。装置除具备差动保护功能外, 同时具备三遥、CT 断线检测和通信中断闭锁等功能。

#### 2.3.2 通信协议和数据帧结构

5G 差动终端之间的通信采用面向连接的 TCP/IP 协议, 数据帧由报文头、电流量、电压量、开关量、时间标签、采样值标号、控制位、校验位、报文尾等信息组成。其中, 电流信息可以根据保护判据的需要选择三相电流相量、三相电流瞬时值、序分量等不同形式, 也可以包含全部; 电压信息则根据现场条件及判据需要选择相电压、线电压或零序电压相量。一帧数据的字节数将会因传送不同形式的电流、电压信息而发生变化, 考虑备用信息裕度后将不少于 60 字节。5G 终端工作时需要置入 SIM 卡, 通过在 CPE 中设置镜像连接, 使保护发出的数据帧可以由 CPE 经过 5G 切片网络发送至对端。正常运行情况下, 保护装置通过定间隔发送测试帧来实时监测通道状态。故障状态下, 两端保护启动并执行故障处理程序, 通过交换数据帧实现差动判定。

#### 2.3.3 5G 差动时延分析

动作时间是衡量差动保护性能的一个重要指标, 5G 通信条件下需要分析其时延构成及理论数值。如图 3 所示, 假定区段内部发生故障, 基于故

障时刻自同步原理, 两端 STU 检测出的故障发生时刻分别为  $t_{mf}$  和  $t_{nr}$  (近似为同一时刻); 然后经数据发送、数据接收、动作判定、跳闸出口等环节完成故障处理过程。以 M 侧保护为例, 故障处理过程中各阶段执行任务及理论估算时间大致如下:

- 1)  $\Delta t_{m1}$  为基波分量提取与数据打包时间, 20~25 ms;
- 2)  $\Delta t_{m2}$  为 5G 通信端到端时延, 15~20 ms;
- 3)  $\Delta t_{m3}$  为差动计算与故障判定时间, 1~2 ms;
- 4)  $\Delta t_{m4}$  为出口继电器动作时间, 5~8 ms;

因此, M 端动作时间为

$$t_{mp} = \Delta t_{m1} + \Delta t_{m2} + \Delta t_{m3} + \Delta t_{m4} = 41 \sim 55 \text{ ms}$$

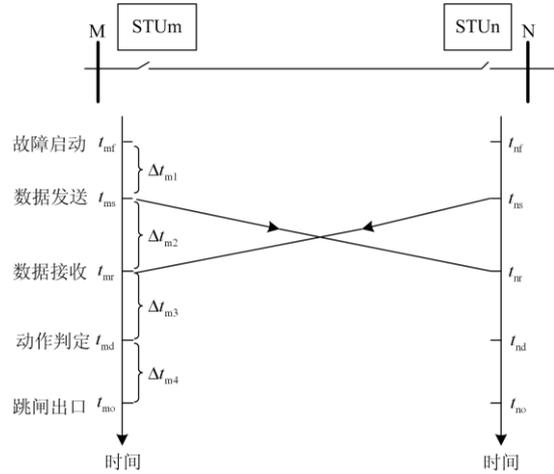


图 3 5G 差动保护动作时间构成

Fig. 3 Operating time structure of 5G-based differential relays

由于两端保护采用对等通信, N 端保护动作时间与 M 端保护大致相等。综上, 本文所开发的 5G 通信差动保护其动作时间在理论上小于 60 ms; 若采用就地跳闸, 则故障的隔离时间不会超过 100 ms。这对于缩短敏感负荷在低电压下的运行时间, 实现快速故障自愈具有重要支撑作用。

## 3 现场测试与投运

### 3.1 第一阶段测试

为检验所开发 STU 的性能和功能, 2019 年 9 月 13—16 日, 在济南供电公司汉峪金谷物联网示范配电室利用联通 5G 室内微基站环境首次成功实施差动保护测试(见图 4), 验证了利用 5G 作为配网差动保护通道的可行性。2019 年 10 月 14—15 日, 在该区域 A1-1/A1-2 地下开关站成功实施联通 5G 室内跨基站环境下差动保护测试, 检验了跨基站环境下 5G 通信延时、数据收发、保护动作时间等指标,

并与光纤差动进行了对比测试。初步试验结果表明,室内单/跨基站下 E2E 单向通信延时平均值约为 11 ms; 保护动作时间为 50~62 ms; 5G 通信较光纤通信延时约 8 ms。本阶段试验获得了 5G 通信差动保护宝贵的实践经验和数据资料, 为后续保护装置软硬件优化和 5G 通信外场试验奠定了基础。



图 4 济南汉峪金谷 5G 差动保护测试场景(2019.9.16)

Fig. 4 Test scene for 5G-based differential relays in Hanyujing, Jinan (2019.9.16)

## 3.2 第二阶段测试

2020 年 1 月 8-11 日, 在青岛供电公司 5G 智能电网古镇口应用示范区对所开发的 STU 进行了电信 5G 外场差动保护试验; 试验项目包括 5G 切片网络单、跨基站环境下通信延时、数据传输、保护逻辑、动作时间、通信可靠性等。

### 3.2.1 示范区 5G 切片网络情况

该示范区为青岛公司联合华为、中国电信构建的 5G 智能电网四大应用基地之一, 采用基于 SA 架构的电力专用 5G uRLLC 切片网络, 其网络架构如图 5 所示。青岛电信 5G 网络的核心网位于济南, 通过建立网络切片, 将通信链路下沉到青岛本地, 部署方式为: 在青岛供电公司总部设置 MEC 服务器, 在崂山区设置数据汇集中心(Data Center, DC)。在切片网络内, 数据经过 CPE 所连基站传输到 DC, 再从 DC 传输至 MEC 服务器, 所有数据经过 MEC 集中处理后, 沿原路径被转发给其需要通信的 CPE,

不再经过济南核心网, 从而有效降低了传输时延。

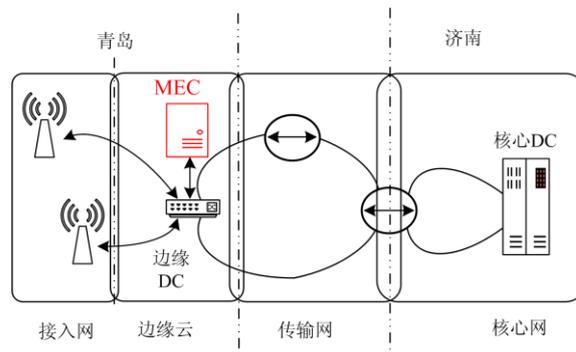


图 5 测试地区 5G 切片网络架构

Fig. 5 MEC-based 5G slice network architecture in test area

### 3.2.2 测试地点的布局

测试地点位于黄岛区古镇口, 测试区域的 5G 基站的布局与测试地点的相对地理位置如图 6 所示。

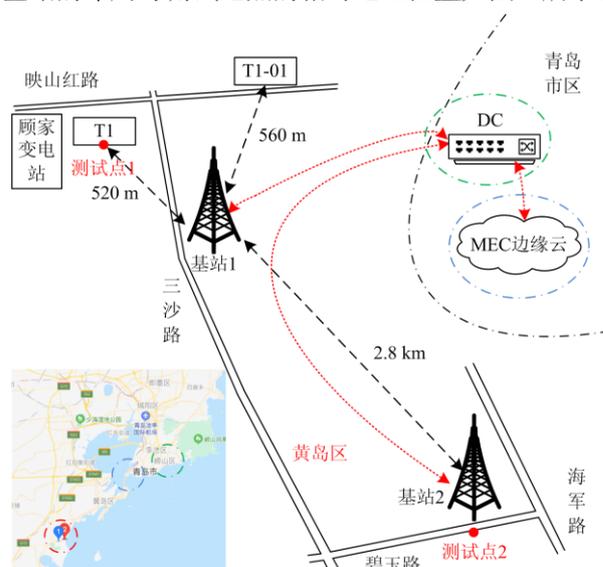


图 6 测试地区地理信息图

Fig. 6 Geographic information of test area

图中, 测试点 1 位于 T1 处, 紧邻 110 kV 顾家变电站, 距离基站 1 约 520 m; 测试点 2 紧邻基站 2, 距离基站 1 约 2.8 km。根据 5G 基站的覆盖范围指标(表 1), 测试点 1 只在基站 1 覆盖区域内, 而基站 2 只能覆盖测试点 2。通过在测试点 1 布置两台 STU 和两台 CPE, 实现单基站下 5G 通信性能测试和保护装置功能测试。通过在测试点 1 和测试点 2 各布置一台 STU 和 CPE, 实现跨基站环境下的通信性能和保护功能测试。图 7 为跨基站测试场景, 其中测试点 2 因位于基站旁边田地, 由便携式发电机为保护装置提供工作电源。



(a) 测试点 1 (b) 测试点 2

图 7 黄岛古镇口跨基站测试场景(2020.1.10)

Fig. 7 Test scene under two base stations in Guzhenkou, Huangdao (2020.1.10)

### 3.2.3 5G 通信延时测试

因 STU 之间的通信基于 TCP/IP 协议，故使用 TCP/IP 下的 PING 命令来测试装置之间来回时延。通过本端 STU 向对端 STU 发送因特网报文控制协议(Internet Control Message Protocol, ICMP)请求报文，测试报文能否正常返回及其返回时间，从而得到通信的可靠性和 E2E 来回时延。

测试按单基站下非切片网络、单基站下 MEC 切片网络、跨基站下 MEC 切片网络三个通信场景进行 E2E 来回时延测定。E2E 来回时延测试结果如图 8 所示。

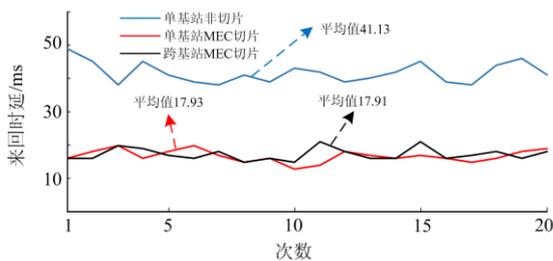


图 8 不同场景下 E2E 时延测试结果

Fig. 8 E2E delay test results in different scenarios

结果显示：单基站 5G 非切片场景下，E2E 来回时延平均值为 41.13 ms；单基站 5G 切片场景下，E2E 来回时延平均值为 17.93 ms，单程时延为 8.97 ms；跨基站切片场景下，E2E 时延和单基站的基本相同。测试结果证明，5G 网络切片能够显著降低端到端传输延时，其单程平均时延不超过 10 ms，与 5G 公布的技术指标相吻合，满足差动保护对通道延时要求；同时，跨基站通信不会对 E2E 时延带

来影响，这为在大地理范围跨度上应用差动保护提供了支撑。测试结果还显示，同种类切片测试场景下，最高时延与最低时延差值达到 4 ms；这表明，5G 切片网络内 E2E 通信时延具有一定的波动范围。

### 3.2.4 STU 保护功能测试

#### 1) 单基站通信环境

在测试点 1，STU1+CPE1 与 STU2+CPE2 构成一套差动保护，CPE1 与 CPE2 之间经基站 1 进行数据通信。利用继电保护测试仪同时给两台 STU 施加电压、电流信号，按两侧电源供电场景和单侧电源供电场景分别模拟不同类型的区内故障和区外故障各 10 次，检验数据传送的可靠性、差动判别的正确性及保护动作时间。在所进行的约 300 次故障模拟中，数据传送无误，差动保护动作全部正确。表 2 为两侧电源供电区内故障场景下保护动作时间的统计结果。

表 2 两侧电源供电区内故障场景下动作时间统计

Table 2 Tripping time statistic for simulated internal

动作时间/ms	三相						
	短路	AB 相间	BC 相间	AC 接地	A 相 接地	B 相 接地	C 相 接地
STU1 最小	40	40	41	41	41	41	40
STU1 最大	47	51	51	51	50	48	50
STU1 平均	44	46	46	45	45	45	44
STU2 最小	40	39	43	38	39	40	41
STU2 最大	50	58	46	47	44	48	48
STU2 平均	44	44	44	44	41	43	45

从表 2 中可以看出，各种故障类型下，两端保护动作时间的平均值约为 45 ms，最大值不超过 60 ms，与理论分析基本一致。

#### 2) 跨基站通信环境

跨基站测试时，STU1+CPE1 位于测试点 1，STU2+CPE2 位于测试点 2，两台装置之间通过基站 1 和基站 2 进行数据交换。由于两台 STU 相距超过 3 km，无法利用继保仪同时施加故障信号，因此测试时模拟单端电源供电区段内部故障的场景，检验保护的相应情况。具体做法是：利用继保仪给 STU1 施加反映故障类型的故障信号，模拟电源侧保护装置；而处在测试点 2 的 STU2 不施加故障信号，模拟故障点下游保护装置。该模拟场景下，STU1 因流过故障电流能够可靠启动，而 STU2 因无电流流过不会启动；此时差动保护需要执行单端启动远方跳闸逻辑。在所进行的 35 次模拟测试中(每一故障类型做 5 次)，两端保护均判定为内部故障，其动作时间统计结果如表 3 所示。

表 3 单侧电源供电区内故障场景下动作时间统计

Table 3 Tripping time statistic for simulated internal faults under single-end power supply

动作时间	最小	最大	平均
STU1	32 ms	42 ms	37.5 ms
STU2	45 ms	59 ms	53.7 ms

测试结果表明, 本文设计的单端启动远方跳闸逻辑既能保证两端保护可靠动作, 又能有效缩短电源侧保护的動作时间。这为 5G 差动保护应用于单电源辐射型网络或开环运行拉手环网提供了保障。

### 3.3 试点投运

在经过两个阶段现场测试和性能优化后, 2020 年 6 月 2 日, 四台 5G 差动保护装置分别投运于古镇口示范区 10 kV 康大线 T1 和 T1-01 环网柜。两个试点环网柜与 5G 基站的相对位置如图 6 所示, 试点线路结构以及闭环配置情况如图 9 所示。T1 与 T1-01 为一、二次融合环网柜, 配有完整的三相电流、三相电压、零序电流和零序电压互感器, 其进出线开关均为断路器, 可实现就地跳闸。差动保护按进线间隔进行配置, 其中 STU2 与 STU3 构成两环网柜之间馈线的差动保护, STU1 与 STU4 用于后续差动保护区段的扩展。所有 STU 均在基站 1 覆盖范围内。

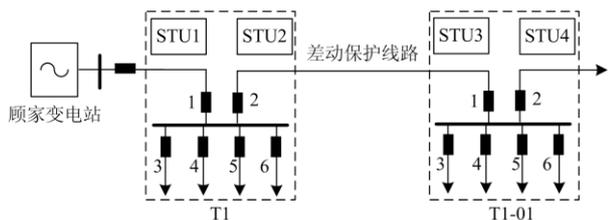


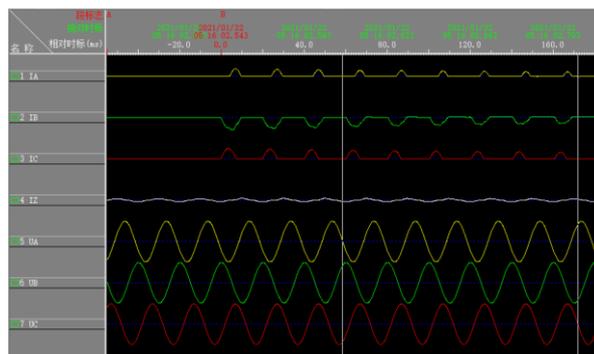
图 9 试点线路保护配置图

Fig. 9 Protection configuration diagram of demonstration line

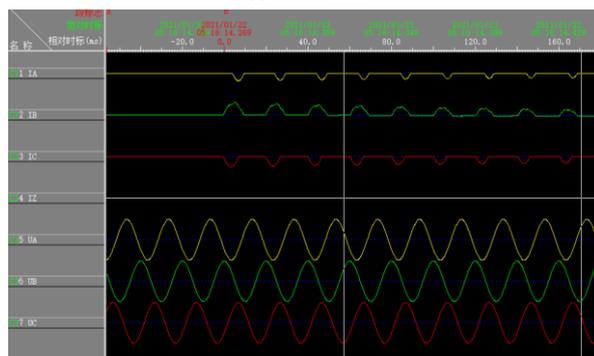
试点线路是 10 kV 康大线的一段 400 m 的电缆线路, 试运行以来没有发生过故障。为在线检验 5G 差动保护相关性能, 2021 年 1 月 22 日 05:00 在 T1-01 环网柜下游进行了空投负荷操作, 对投运的差动保护来讲相当于发生了外部扰动或故障。图 10 和图 11 分别给出了该场景下 STU2 与 STU3 的故障录波与事故报文截图。

图 10 的录波表明, 负荷投入前试点线路为空载, 投入后线路流过了穿越性励磁涌流; 这是因为该时间段用户负荷很小, 相当于空载投入配电变压器, 故出现励磁涌流, 故障录波数据正确。图 11 表明, 空投负荷时两端保护启动并进入故障处理程序, 数据收发准确无误, 差动计算正确, 判定结果

为外部故障。特别值得重视的是, STU2 报文显示: 本端 A、B、C 三相电流分别为  $0.045304 \angle 343^\circ \text{A}$ 、 $0.106526 \angle 200^\circ \text{A}$  和  $0.074691 \angle 41^\circ \text{A}$ , 收到的对端 A、B、C 三相电流分别为  $0.045304 \angle 163^\circ \text{A}$ 、 $0.106526 \angle 19^\circ \text{A}$  和  $0.075915 \angle 220^\circ \text{A}$ , 两端同名相电流近乎理想的大小相等相位相反; STU3 报文显示出与 STU2 同样精度的结果。这表明, 本文提出的故障时刻自同步方法能够实现准确的同步测量, 即便是在励磁涌流这种不规则信号情形下, 两端电流幅值误差最大相仅为 1.6%, 相位误差不大于  $1^\circ$ 。



(a) STU2 录波



(b) STU3 录波

图 10 差动保护装置录波截图

Fig. 10 Waveform record screenshots of differential relays

```
Send: 23ms,Recv: 46ms,Trip: Xms
Local_I: Ia=0.045304A,343ag1;Ib=0.106526A,200ag1;Ic=0.074691A,41ag1
Remote_I: Ia=0.045304A,163ag1;Ib=0.106526A,200ag1;Ic=0.075915A,220ag1
Id: Ida=0.000612A,Idb=0.002449A,Idc=0.001837A
Ir: Ira=0.054488A,Irb=0.127954A,Irc=0.090608A
3U0: 0.311688 V,U2: 0.128584 V 3I0: 0.032900 A 10ag1
Local_V: Ua=60.493507 V 219ag1,Ub=60.064934 V 100ag1,Uc=60.142857 V 33
```

(a) STU2 报文

```
Send: 28ms,Recv: 47ms,Trip: Xms
Local_I: Ia=0.045304A,163ag1;Ib=0.106526A,19ag1;Ic=0.075915A,220ag1
Remote_I: Ia=0.045304A,343ag1;Ib=0.106526A,200ag1;Ic=0.074691A,41ag1
Id: Ida=0.000612A,Idb=0.002449A,Idc=0.001837A
Ir: Ira=0.054488A,Irb=0.127954A,Irc=0.090608A
3U0: 0.298701 V,U2: 0.128584 V 3I0: 0.000000 A 0ag1
Local_V: Ua=60.506493 V 217ag1,Ub=60.038960 V 98ag1,Uc=60.142857 V 33
```

(b) STU3 报文

图 11 差动保护装置报文截图

Fig. 11 Fault report screenshots of differential relays

## 4 结论

本文研究开发了一种基于 5G 切片网络和故障时刻自同步的配网差动保护,开展了 5G 环境下的现场测试与试点投运,结论如下:

1) 5G 切片网络的端到端通信延时为 8~14 ms,平均值小于 11 ms,比光纤通信长约 8 ms,满足配网差动保护对通道的延时要求;

2) 采用相量形式进行数据交换,在所进行的上千次测试中没有发现数据传送错误,验证了切片网络通信的可靠性;

3) 故障时刻自同步方法构思新颖,实现简单,不需要外部时钟对时,不受通道来回时延影响,为 5G 通信配网差动保护提供了实用化同步手段;

4) 能够正确识别不同接地方式系统发生的相间短路和小电阻接地系统发生的单相接地故障,适用于单侧电源供电、双侧电源供电、DG 接入等不同配电网场景;

5) 保护装置结构紧凑、易于安装,适用于在环网柜或开闭所内按单间隔进行配置,构成面向馈线区段的分布式差动保护,实现馈线故障的准确定位和快速隔离,动作时间在 60 ms 以内。

## 参考文献

- [1] 吴争荣, 王钢, 李海峰, 等. 含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 130-136.  
WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Analysis on the distribution network with distributed generators under phase-to-phase short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 130-136.
- [2] 周卫, 张尧, 夏成军, 等. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 1-5, 10.  
ZHOU Wei, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 1-5, 10.
- [3] 郑晨玲, 朱革兰, 兰金晨, 等. 逆变型分布式电源接入对电压时间型馈线自动化的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 112-116.  
ZHENG Chenling, ZHU Gelan, LAN Jinchun, et al. Research on the effect of inverter interfaced distributed generation on voltage-time feeder automation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 112-116.
- [4] 甘国晓, 王主丁, 周昱甬, 等. 基于可靠性及经济性的中压配电网闭环运行方式[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 144-150.  
GAN Guoxiao, WANG Zhuding, ZHOU Yuyong, et al. Reliability and economy based closed-loop operation models for medium voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 144-150.
- [5] 许偲轩, 陆于平. 含 DG 配网电流幅值差异化保护方案[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 164-169.  
XU Sixuan, LU Yuping. Current amplitude differential protection for distribution system with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 164-169.
- [6] 杨晶晶, 林凡勤, 周成瀚, 等. 含分布式电源的馈线电流序分量比较式保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 116-123.  
YANG Jingjing, LIN Fanqin, ZHOU Chenghan, et al. Comparison protection method of current sequence components for feeder with distributed generation [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 116-123.
- [7] 高岩, 李永丽, 陈晓龙, 等. 基于电流幅值比的有源配电网自适应差动保护原理[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-7[2021-02-26].<https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000540>.  
GAO Yan, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Adaptive differential protection principle based on current amplitude ratio[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA:1-7[2021-02-26]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000540>.
- [8] 徐萌, 邹贵彬, 陈宁, 等. 基于故障超前相的有源配电网能量方向纵联保护方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 58-64.  
XU Meng, ZOU Guibin, CHEN Ning, et al. Energy-directional pilot protection based on leading-phase for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 58-64.
- [9] 马帅, 武志刚, 高厚磊, 等. 适配高渗透率 DG 接入配电网的幅值比较式保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 43-50.  
MA Shuai, WU Zhigang, GAO Houlei, et al. Amplitude comparison protection for distribution network with high permeability distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 43-50.
- [10] 高厚磊, 李娟, 朱国防, 等. 有源配电网电流差动保护应用技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 40-44.  
GAO Houlei, LI Juan, ZHU Guofang, et al. Study on application technology of current differential protection in active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 40-44.

- [11] 李娟. 有源配电网电流差动保护原理与实现技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.  
LI Juan. Studies on current differential protection and implementation technologies in active distribution networks[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [12] 吴悦华, 高厚磊, 田健, 等. 有源配电网分布式故障自愈方案与实现[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 181-196.  
WU Yuehua, GAO Houlei, TIAN Jian, et al. Distributed fault self-healing scheme and implementation of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 181-196.
- [13] 中国南方电网电力调度中心. 5G 智能电网白皮书[Z]. 2018.  
China Southern Power Grid Power Dispatching Center. White paper of 5G in smart grid[Z]. 2018.
- [14] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4025.  
ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G Communication for the ubiquitous internet of things in electricity: technical principles and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4025.
- [15] MORGADO A, HUQ K M S, MUMTAZ S, et al. A survey of 5G technologies: regulatory, standardization and industrial perspectives[J]. Digital Communications and Networks, 2018, 4(2): 87-97.
- [16] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [17] BAG G, THRYBOM L, HOVILA P. Challenges and opportunities of 5G in power grids[C] // CIRED - Open Access Proceedings Journal, 2017: 2145-2148
- [18] 王廷凰, 余江, 许健, 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.
- [19] IUT. ITU-RM 083 IMT vision-framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond[Z]. Geneva: ITU-R, 2015.
- [20] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [21] 夏旭, 朱雪田, 梅承力, 等. 5G 切片在电力物联网中的研究和实践[J]. 移动通信, 2019, 43(1): 63-69.  
XIA Xu, ZHU Xuotian, MEI Chengli, et al. Research and practice on 5G slicing in power internet of things[J]. Mobile Communications, 2019, 43(1): 63-69.
- [22] 高厚磊, 李娟, 朱国防, 等. 有源配电网的自同步正序故障分量电流差动保护方法: 中国, ZL201310462249. X[P]. 2016-07-06.
- [23] 董金金, 高厚磊, 李娟, 等. 基于电流突变量曲线拟合的故障时刻检测算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 75-81.  
DONG Jinjin, GAO Houlei, LI Juan, et al. Fault instant detection algorithm based on curve fitting of phase current increments[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 75-81.

收稿日期: 2021-02-01

作者简介:

高厚磊(1963—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: houlei@sdu.edu.cn

徐彬(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为5G在电力系统中的应用以及海上风电场的保护与控制; E-mail: xubinsdu@163.com

向珉江(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电网保护、运检技术及管理。E-mail: xiangminjiang@163.com

(编辑 姜新丽)