

摘要:

关键词:

Abstract:

Key words:

0 引言

2020年4月28日,国务院常务会议提出了“加快推进新基建,推动产业和消费升级”,按照党中央、国务院部署,加快信息网络等新型基础设施建设,以“一业带百业”,既助力产业升级、培育新动能,又带动创业就业,利当前惠长远。要根据发展需要和产业潜力,推进信息网络等新型基础设施建设。要瞄准产业升级和智能制造发展,引导各方合力建设工业互联网,适应群众数字消费新需求,

基金项目:促进网上办公、远程教育、远程医疗、车联网、智慧城市等应用^[1-3]。

2020年6月15日,国家电网公司在京举行“数字新基建”重点建设任务发布会暨云签约仪式,面向社会各界发布“数字新基建”十大重点建设任务,并与华为、阿里、腾讯、百度等合作伙伴签署合作协议^[4-5]。利用5G大速率、高可靠、低时延、广连接等技术优势,聚焦输变电智能运维、电网精准负控和能源互联网创新业务应用,推进与电信运营商、服务商深入合作,加强5G关键技术应用、行业定制化产品研制、电力5G标准体系制定,拓展智慧城市等领域5G应用,年内打造一批“5G+能源互联网”典型应用^[6-9]。

配网差动保护是解决配网保护选择性、提高配网供电可靠性的有效手段^[10-11]。差动保护要求各侧装置采样同步^[12-13],并能将本侧采样数据快速传到对侧,因此对通信通道的延时和带宽均有一定的要求。高压线路差动保护通常要求通道双向时延一致,并且单向时延不超过15 ms,要求带宽不小于64 kbps,可靠性不低于99.999%,通常采用点对点通信^[14]。

光纤通道能满足上述要求,并在高压线路保护中广泛应用^[15]。但由于配网网架结构复杂,改造频繁,多端线路光纤互通难度大,因此架空线路差动保护并不适合采用光纤通道。

在uRLLC(Ultra Reliable & Low Latency Communication,即低时延高可靠)应用场景下,5G通信克服了稳定性方面的缺陷,传输可靠性达99.999%,5G通信空口时延1 ms,端到端时延约10 ms,有能

力替代光纤成为配网电流差动保护的新通道。

目前,5G应用于配网差动保护数据传输尚处于起步阶段。文献[16]通过分析5G的主要性能指标,得出了5G可以成为配网差动保护新数据通道的结论;文献[17]验证了用IEC61850-9-2协议取代HDLC协议,并通过CPE接入到5G网络进行差动保护的方案,但没有考虑5G通信的带宽需求和流量成本,在遵循标准IEC61850-9-2格式下,每帧报文大约在300 Byte,每秒4000帧,且收发同时进行,则月流量约为6.22 TB,长期使用成本昂贵。为了消除5G通信中时延抖动对差动保护数据带来的影响,文献[18]提出了动态时间规划算法,但该方法计算量大且涉及到保护判据修改,工程应用难度较大;在差动电流数据同步方面,为克服差动保护装置需要外接对时装置带来的不便,有依赖5G基站进行高精度授时同步的研究^[19-20],也有不依赖外

部对时数据的同步技术研究^[21]；文献[22]结合工程实践提出了 5G 差动保护的省流量模式和报文乱序处理方式。

现有的研究中，从 5G 差动保护方案的提出到应用均取得了长足的进步，但缺乏针对 5G 网络与传统光纤的差异而进行的差动保护逻辑改进。传统的差动保护逻辑是以光纤为传输媒介而设计的，为此，分析了光纤网络和 5G 网络的特点，提出了适用于 5G 网络的差动保护逻辑方案，并通过实验验证改进后的效果。

1 传统差动保护逻辑原理

差动保护基本原理是采用电流基尔霍夫定律来判断被保护对象是否发生故障，即流向一个节点的电流之和等于零。

典型的光纤差动保护架构如图 1 所示。

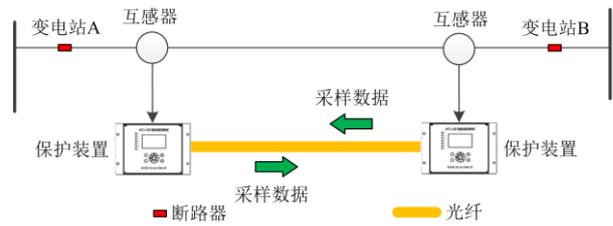


图 1 光纤差动保护示意图

Fig. 1 Diagram of optical fiber differential protection

传统的光纤差动保护逻辑判据如图 2 所示。

为防止 CT 断线导致差动误动，在线路差动保护动作逻辑中，需要对侧发送过来的差动允许信号开放差动保护元件，在收到差动允许条件且本侧差动方程均满足后差动保护动作。

向对侧发送允许信号的逻辑判据如图 3 所示。

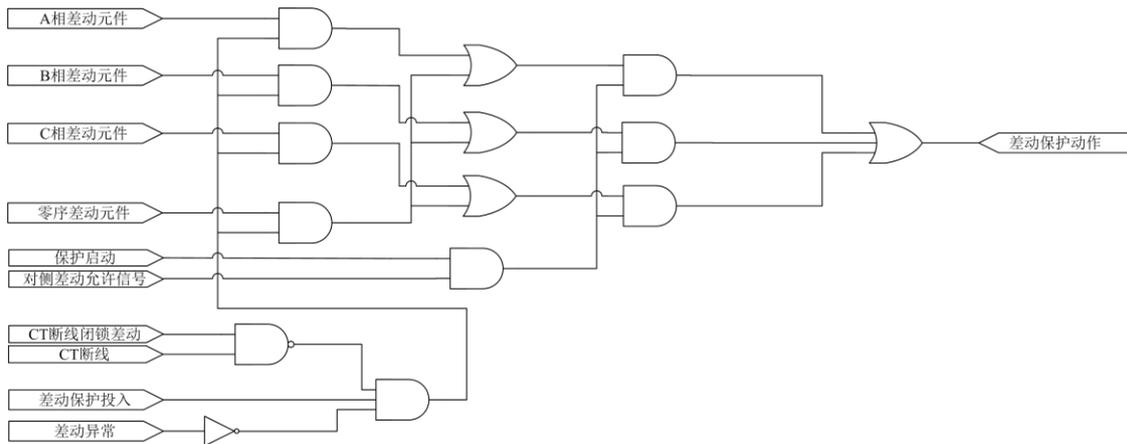


图 2 光纤差动保护逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of optical fiber differential protection

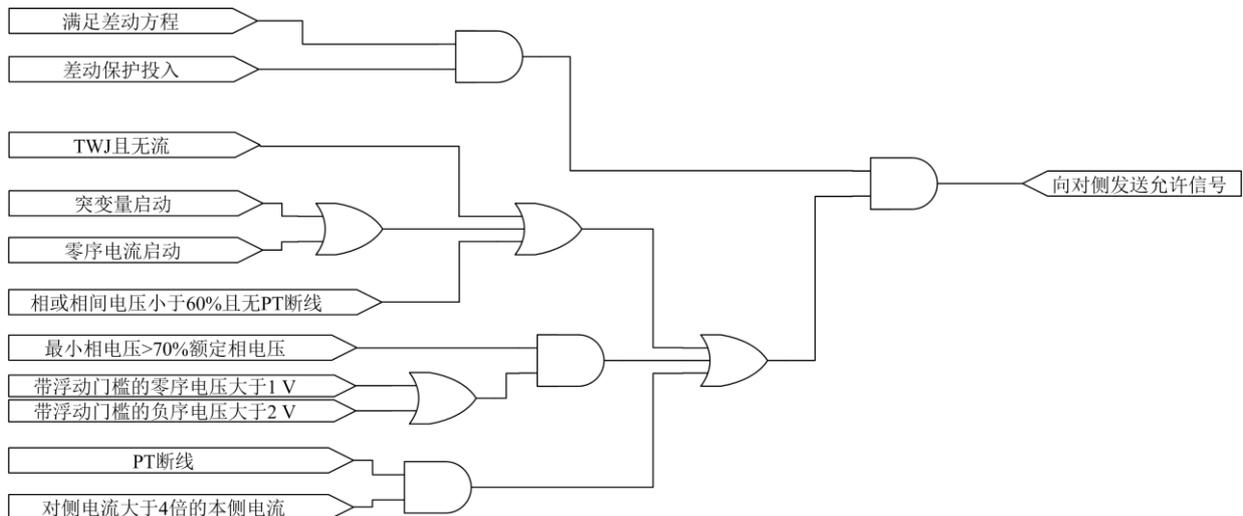


图 3 光纤差动允许信号发送逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of allowed signal sending in fiber differential protection

光纤差动的信息传输时序如图 4 所示, T_{dly} 为光纤传输的延时, M 侧与 N 侧时序对称, 以 M 侧为例, 故障发生后经 T_{dly} , 收到 N 侧发送过来的故障发生时刻的数据, 并与自身缓存的故障起始时刻数据做差动计算, 经过 T_1 后, 计算结果满足差动条件, 发送允许信号到 N 侧。传统的光纤通道, 上下行时延一致, 且光纤通道时延稳定^[23]。故此时 N 侧也会向 M 侧发送允许信号, 再经过 T_{dly} 后, M 侧收到 N 侧发送过来的允许信号, 并经过 T_2 时间的差动保护元件判别计算后, 差动保护动作, 动作总时间为 $T_1 + T_2 + 2T_{dly}$ 。在专用光纤中, 光信息的传输速度为 20 万公里/s, 故实际延时 T_{dly} 很短。

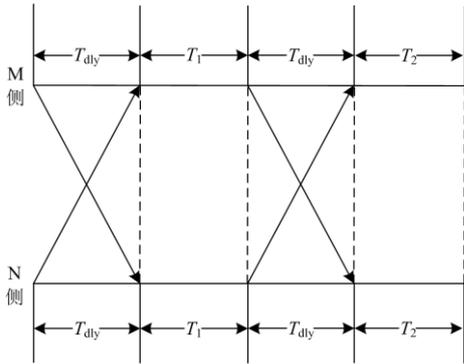


图 4 传输时序图

Fig. 4 Transmission timing diagram

现有的研究实践中, 利用 5G 实现的差动保护, 动作时序与传统光纤相同, 但 5G 的通道时延远远大于光纤的通道时延。

2 传统差动保护通信

目前国内外常见的差动保护均采用复用或专用光纤通道进行远距离通信。

20 世纪末到 21 世纪初, 由于光纤通信带宽的限制, 多采用复用 PCM(脉码调制)的 64 Kbps 通道进行数据通信, 数据内容为 ABC 三相每相各 16 位的电流瞬时采样值, 2~4 个字节开关量, 16 位 CRC 校验的 HDLC 私有报文。

为了节约通道带宽, 仅传送电流信息和少量开关量信息。为防止 CT 断线导致的差动保护误动, 传统光纤差动保护需要收到对侧传送来的允许信号后才能开放差动保护, 信号在光纤中的传输速度快、延时短, 故通过收到允许信号开放本地差动保护, 对差动保护的動作速度影响很小, 但却极大地节约

了通道带宽。

随着光纤通信技术的发展, 光纤带宽资源足够富裕, 采用 E1 接口可减少 PCM 设备投资。保护装置开始采用 E1 接口进行通信, 其带宽为 2048 bps, 除了传输电流和开关量瞬时值外, 也传输电压瞬时值, 用于电压启动等辅助判据。但传统差动保护的逻辑方案经过实践检验, 已非常成熟稳定, 无需更改。

3 5G 差动保护通信现状

3.1 通信传输实现方式

HDLC 协议作为链路层传输协议, 没有网络层, 无法通过 5G 网络传输。5G 差动终端之间的通信采用面向连接的 TCP/IP 协议, 数据帧内容可以自由定义, 可由报文头、三相电流信息、三相电压信息、开关量、时标、校验位、报文尾等组成, 差动保护装置通过 CPE 接入 5G 无线网络, 并采用自定义的报文交互采样数据, 以实现差动。正常运行时, 保护装置以固定时间间隔发送报文, 传送电流、电压的向量值; 故障状态下, 保护启动后, 传送电流、电压的瞬时值, 并提高数据的传送频率。

5G 差动的数据信息传输实现方式如图 5 所示。M 侧设备信号由 CPE 转发, 经过空口接入 5G 基站, 由承载网进行切片分组(SPN), 并由核心网处理转发回到承载网, 再由基站经空口传到 N 侧设备。

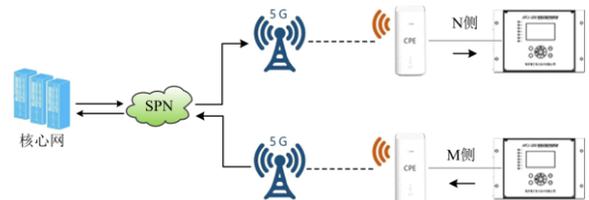


图 5 传输示意图

Fig. 5 Transmission diagram

3.2 网络通信延时

5G 端到端的时延主要由无线接入侧的空口时延、承载网传输时延以及核心网时延三部分组成。对于空口时延, 目前国内主要应用 TDD 网络下的 2.5 ms 双周期帧结构, 能达到的双向时延最大为 5.5 ms, 最小为 2 ms, 平均为 3.25 ms。承载网传输时延主要为数据从基站向核心网的传输时延, 传输通道一般为光纤, 加上路由转发时间, 可以控制在 1 ms 左右。核心网时延, 5G 核心网分为 Core (5GC, 5G 核心网)和 MEC(边界计算平台)两部分, 对于差动保护的数据, 将数据传输到就近部署的 MEC 处

理即可，不必经过上层核心网，省去了回传时间，数据在 MEC 中处理的速度很快，最大不超过 5 ms。基于以上时延分析，在 URLLC 场景下，5G 通信的端到端时延在 15 ms 以内^[24]。

为了测试网络的通信延时，两台配网线路保护装置通过 5G CPE 接入同一个 5G 基站，组网方式设置为 SA 组网，并设置程序，由 N 侧终端在 T_S 时刻发送数据，M 侧终端在接收到数据后，立刻回传给 N 侧，N 侧终端记录下收到数据的时刻 T_R 。如图 6 所示。

测试总共进行了约 100 万次，统计数据如表 1 所示，其中测试数据延时指标 T_{5Gdly} 定义为

$$T_{5Gdly} = \frac{(T_R - T_S)}{2} \quad (1)$$

由表 1 可以看出：测试延时与 5G 宣称的端到端时延约 15 ms 的指标有差距，原因是统计时间中

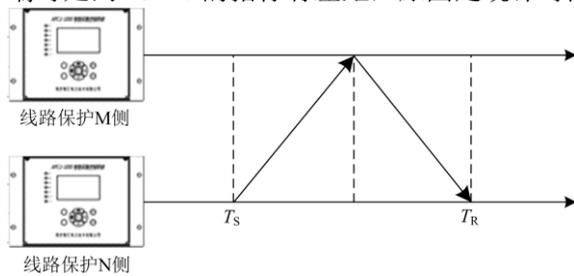


图 6 延时测试方案

Fig. 6 Delay test program

表 1 5G 延时分布统计

Table 1 5G delay distribution statistics

延时区间	5G 统计次数	占比
$T_{5Gdly} \leq 15 \text{ ms}$	964 503	96.45%
$15 \text{ ms} < T_{5Gdly} \leq 30 \text{ ms}$	34 596	3.46%
$30 \text{ ms} < T_{5Gdly} \leq 60 \text{ ms}$	914	0.09%
$T_{5Gdly} > 60 \text{ ms}$	0	0%

含有 TCP/IP 报文解析时间和发送时间、保护设备和 CPE 之间信息交互时间及操作系统的任务处理时

间。由于采用的 TCP/IP 协议有丢包重传机制，并未出现丢包，但丢包重传会导致部分数据帧延时较大。目前变电站 10 kV 线路速断保护一般整定为 0.3 s，按照时间级差 0.15 s 考虑，在除去开关的物理延时和电弧完全熄灭时间大概 50 ms 左右，保护动作时间应该在 100 ms 之内。根据第 1 节的时序分析，总动作时间为 $T_1 + T_2 + 2T_{5Gdly}$ ，差动保护动作时间 $T_1 + T_2$ 按照 40 ms 考虑，则要求 T_{5Gdly} 时间不应大于 30 ms，按照目前的时延情况，有 0.09% 以上的时间不能满足要求，这是在无干扰的 5G 试验环境下的实验结果，实际应用中，5G 由于背景环境干扰，延时会相对更大，故在 5G 差动保护通信中，信息传递一次的延时 T_{5Gdly} 占总动作时间 $T_1 + T_2 + 2T_{5Gdly}$ 的比例较大，降低了 5G 差动保护的可靠性，因此减少信息传播占用的时间有极大的必要性。

4 适用于 5G 网络的差动保护逻辑方案

由图 3 可以看出，允许信号判别逻辑中所需的对侧 TWJ 且无流，对侧突变量启动、对侧零序电流启动、对侧相或相间电压小于 60% 且无 PT 断线等信息，均可以通过开关量的形式以 5G 信号传递到对侧，对侧直接进行允许信号的就地判别，同时每帧数据增加的传送信息小于 2 个字节(16 个 bit 位)，对 5G 流量消耗影响不大。允许信号就地判别后，差动保护动作满足，无需等待对侧允许信号即可动作，从来使得差动保护数据信息只需要一次传播，减少了差动判别时延。

允许信号的就地判别逻辑如图 7 所示。

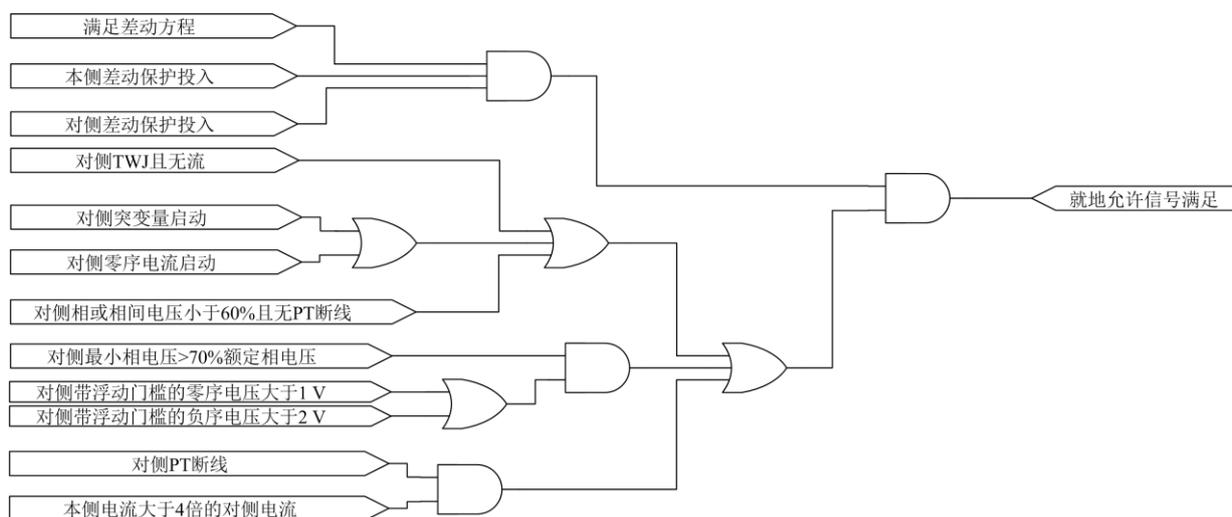


图 7 5G 差动允许信号就地判别逻辑图

Fig. 7 Logic diagram of 5G differential allowed signal local discrimination

改进后差动保护的数据在 5G 中的传输时序流程如图 8 所示。

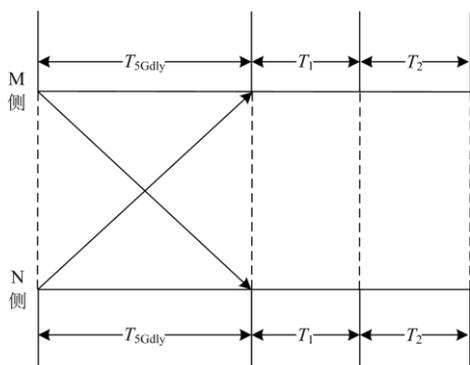


图 8 改进 5G 差动逻辑时序图

Fig. 8 Improved 5G differential logic timing diagram

由图 8 可以看出：改进后总时间为 $T_1 + T_2 + T_{5Gdly}$ ，按照总时间 100 ms 的裕度计算，常规动作时间 $T_1 + T_2$ 按照 40 ms 考虑， T_{5Gdly} 不应大于 60 ms 即可，大大降低了差动保护对 5G 网络的时延要求。

5 动作性能测试

利用无线应用场景实验室的 5G 网络环境进行差动保护的相关测试，测试网络为 SA 组网，基站提供 uRLLC 切片服务。网络测试环境如图 9 所示。

模拟线路发生金属性接地故障，观察并对比采用传统差动保护逻辑的 5G 差动保护动作时间和改进后的 5G 差动保护逻辑动作时间，如图 10 所示，蓝色为改进前的差动整组动作时间，橙色为改进后的差动整组动作时间。

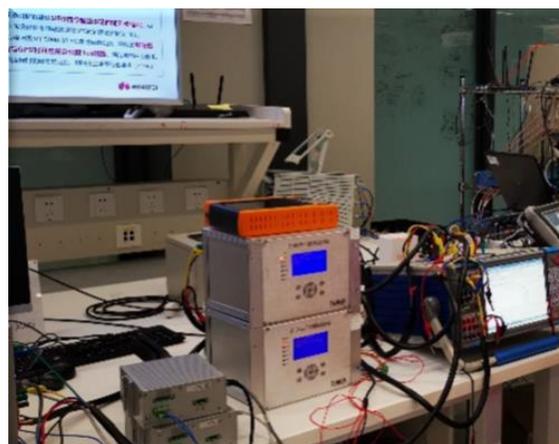


图 9 网络测试环境

Fig. 9 Network test environment

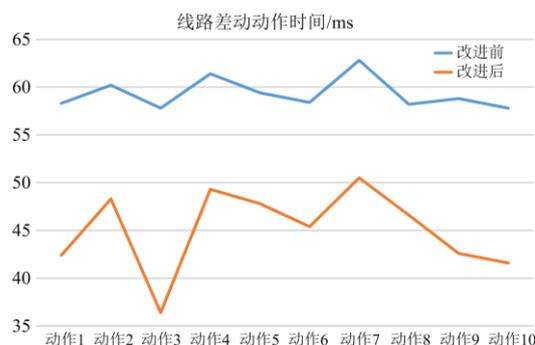


图 10 动作时间对比

Fig. 10 Action time comparison

结合实验结果，改进后的整组动作时间加快了 10~15 ms，约为信息在 5G 环境中的传输时延，与理论分析的结果一致。

6 结论

本文首先详细介绍了传统差动保护的逻辑原理和动作时序,并分析了在 5G 环境中使用传统差动保护逻辑存在通信延时长导致保护可靠性低的问题,进而提出通过优化差动保护逻辑的方法,以降低通信延时长对动作速度的影响,并在 5G 网络的实验室中进行了对比验证。结果表明,改进后的 5G 差动保护整组动作速度更快,提高了在 5G 环境下应用差动保护的可靠性。

参考文献

- [1] 张瑶,王傲寒,张宏. 中国智能电网发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 180-187.
ZHANG Yao, WANG Aohan, ZHANG Hong. Overview of smart grid development in China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 180-187.
- [2] 陈皓勇,李志豪,陈永波,等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-8.
CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 1-8.
- [3] 张呈宇,李红五,屈阳,等. 面向工业互联网的 5G 边缘计算发展与应用[J]. 电信科学, 2021, 37(1): 129-136.
ZHANG Chengyu, LI Hongwu, QU Yang, et al. 5G edge computing development and application for industrial internet[J]. Telecommunication Science, 2021, 37(1): 129-136.
- [4] 关鹏程,古庆利. 5G 通信与新基建的发展机会展望[J]. 集成电路应用, 2021, 38(6): 86-87.
GUAN Pengcheng, GU Qingli. Prospect of 5G communication and new infrastructure development opportunities[J]. Applications of IC, 2021, 38(6): 86-87.
- [5] 雍培,张宁,慈松,等. 5G 通信基站参与需求响应: 关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5540-5551.
YONG Pei, ZHANG Ning, CI Song, et al. 5G Communication base stations participating in demand response: key technologies and prospects[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5540-5551.
- [6] 陈文伟,朱玉坤,张宁池,等. 面向能源互联网的 5G 关键技术及应用场景研究[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(8): 83-90.
CHEN Wenwei, ZHU Yukun, ZHANG Ningchi, et al. Research on 5G key technologies and application scenarios for energy internet[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(8): 83-90.
- [7] 黄震,刘军,李洋. 5G 商用元年发展现状及应用挑战[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(1): 18-25.
HUANG Zhen, LIU Jun, LI Yang. Development status and application challenges in the first year of 5G commercial era[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(1): 18-25.
- [8] 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): 4015-4024.
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): 4015-4024.
- [9] 王智慧,汪洋,孟萨出拉,等. 5G 技术架构及电力应用关键技术概述[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(8): 8-19.
WANG Zhihui, WANG Yang, MENG Sachula, et al. 5G technology architecture and key technologies of power application[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(8): 8-19.
- [10] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [11] 王彦国,赵希才. 智能分布式配电保护及自愈控制系统[J]. 供用电, 2019, 36(9): 1-8.
WANG Yanguo, ZHAO Xicai. Intelligent distributed protection and self-healing control system for distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(9): 1-8.
- [12] 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.
- [13] 许建德,陆以群. 新型数字电流差动保护装置中的数据采样同步和通信方式[J]. 电力系统自动化, 1993, 17(4): 23-26.
XU Jiande, LU Yiqun. A new scheme of sampling synchronization & communication for digital current differential relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(4): 23-26.
- [14] 金华锋,叶红兵,凌昉,等. 复用通道误码和延时对线路纵差保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 63-66, 84.
JIN Huafeng, YE Hongbing, LING Fang, et al. Principle and realization of presetting and following-setting compensation mode in resonant grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 63-66, 84.

- [15] 南瑞继保公司. RCS-931 系列超高压线路成套保护装置技术和使用说明[Z]. 南京: 南京南瑞继保电气有限公司, 2003.
Nari-Relays Co. RCS-931 series ultra-high voltage line complete protection device technology and operating instructions[Z]. Nanjing: Nari Electric Co., 2003.
- [16] 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): 1-9.
GAO Weiliang, GAO Houlei, XU Bin, et al. Feasibility analysis of adopting 5G in differential protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 1-9.
- [17] 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.
- [18] 黄福全, 王廷凰, 张海台, 等. 基于 5G 通信和动态时间规划算法的配电网线路差动保护[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(4): 77-85.
HUANG Fuquan, WANG Tinghuang, ZHANG Haitai, et al. Differential protection of the distribution line based on 5G communication and dynamic time wrapping algorithm[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(4): 77-85.
- [19] 袁通, 高厚磊, 徐彬, 等. 5G 高精度时间同步及在电网中的应用模式研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(8): 47-53.
YUAN Tong, GAO Houlei, XU Bin, et al. Research on 5G high-precision time synchronization and its application mode in power grid[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(8): 47-53.
- [20] 向珉江, 袁通, 苏善诚, 等. 基于 5G 授时的配网差动保护数据同步方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 8-15.
XIANG Minjiang, YUAN Tong, SU Shancheng, et al. 5G timing base data synchronization scheme for differential protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 8-15.
- [21] 陈从靖, 霍银龙, 岳峰, 等. 5G 通信下配电网差动保护数据同步方法研究与应用[J]. 浙江电力, 2021, 40(2): 68-72.
CHEN Congjing, HUO Yinlong, YUE Feng, et al. Research and application of data synchronization method for differential protection of distribution network based on 5G communication[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(2): 68-72.
- [22] 宋志伟, 徐舒, 王润路, 等. 5G 通信条件下的线路差动保护优化策略研究[J]. 供用电, 2021, 38(5): 68-72.
SONG Zhiwei, XU Shu, WANG Runlu, et al. Research on optimization strategy of line differential protection under 5G communication conditions[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(5): 68-72.
- [23] 高厚磊, 江世芳, 贺家李. 数字电流差动保护中几种采样同步方法[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(9): 46-49, 53.
GAO Houlei, JIANG Shifang, HE Jiali. Sampling synchronization methods in digital current differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(9): 46-49, 53.
- [24] 刘鹏. 5G 超低时延技术分析[J]. 通信电源技术, 2018, 35(10): 199-200, 203.
LIU Peng. Analysis of 5G low latency technology[J]. Telecom Power Technologies, 2018, 35(10): 199-200, 203.

收稿日期: 2021-11-04; 修回日期: 2022-03-09

作者简介:

邹晓峰(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: unisamuel@hotmail.com

沈冰(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: ee_shen_bing@hotmail.com

蒋献伟(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: jiang_xianwei@sh.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)