

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201002

基于5G通信的继电保护技术研究

何云良¹, 裘愉涛¹, 吴路明², 边巧燕³, 金盛⁴

(1. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310000; 2. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211100;
3. 国网杭州供电公司, 浙江 杭州 310000; 4. 国网嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 为应对电力系统现有通信信道故障定位困难和长距离通信可靠性不足等难题, 基于继电保护通信性能要求, 从报文格式、带宽需求、传输延时、通信架构、安全性和数据同步技术等方面探讨了5G通信在继电保护中应用的可行性。进一步地, 明确基于5G通信的纵联保护在配电系统中应用的优越性和在中高压电力系统中应用时基于网络结构和转发协议的优化方向。最后, 针对误码、丢帧、通信中断、延时异常、授时异常等异常情况, 提出了基于5G通信的纵联保护的策略, 为5G通信技术在电力系统继电保护领域的工程应用提供参考。

关键词: 5G; 纵联保护; 通信异常; 继电保护

Research on relay protection based on 5G communication technology

HE Yunliang¹, QIU Yutao¹, WU Luming², BIAN Qiaoyan³, JIN Sheng⁴

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310000, China; 2. Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 3. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310000, China;
4. State Grid Jiaxing Power Supply Company, Jiaxing 314000, China)

Abstract: There are difficulties of fault location and reliability deficiency in existing communication channels in power systems. This paper discusses the feasibility of using 5G communications in relay protection from the aspects of message format, bandwidth demand, transmission delay, communication architecture, security and the synchronization of data based on the communication performance requirements of relay protection. It suggests that pilot protection based on 5G communication can fully make use of its advantages when it is used in distribution power systems, while the network structure and forward protocol should be optimized when it is used in medium and high voltage power systems. Finally, for the error code, frame loss, communication interruption, abnormal transmission delay, abnormal time service and other abnormalities, corresponding protection strategies are proposed. These provide an engineering application of 5G communication technology in the field of power system relay protection.

This work is supported by the Science and Technology of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5700-202019174A-0-0-00) and the Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (No. 5211JX18013W).

Key words: 5G; pilot protection; communication abnormality; relay protection

0 引言

随着风电、光伏等新能源的大量应用, 电网规模不断扩大、结构日趋复杂, 特高压交直流间耦合日益紧密, 大量电力电子设备的不断应用使得电网对故障的承受能力日渐降低, 继电保护的性能要求

也愈发严苛。当电网拓扑结构复杂或需要多级配合时, 传统相互独立的保护无法兼顾速动性和选择性要求, 现有电力通信技术已逐渐无法满足电力系统的发展需求, 因此必须研究适用于继电保护领域的新型电力信息交互通信技术。

2015年6月, 国际电信联盟将第5代移动通信技术(5G通信)正式命名为IMT-2020, 并且把移动宽带、大规模机器通信和高可靠低时延通信定义为5G主要应用场景^[1-2]。为提高电力系统信息通信的实时性和可靠性, 降低电力信息通信的成本, 研究

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5700-202019174A-0-0-00); 国网浙江省电力有限公司项目资助(5211JX18013W)

5G 通信在继电保护技术中的应用具有重要的意义。

本文首先介绍了目前已有的各种电力信息通信技术的特点及其主要应用领域,进而分析 5G 通信技术在继电保护中的主要应用场景。在此基础上,分析基于 5G 通信的继电保护信息交互技术和基于 5G 通信的电网纵联保护技术。

1 电力信息通信技术现状

目前,电力信息通信技术主要有微波通信、载波通信、光纤传输和无线通信等。

微波通信存在易受干扰、稳定性差以及传输容量偏小等无法克服的缺陷。

载波通信也存在设备易老化、故障率偏高,线路接口繁杂、桥路较多、衰耗大、抗干扰能力差等问题。

光纤通信抗干扰能力强、信息传输容量大且传输质量高,具有优良的通信特性,已逐步成为中高压电力系统主流的通信方式。目前,国家电网已实现 220 kV 及以上变电站、省直调电厂 100% 光纤覆盖的光纤通信网络^[3];南方电网公司的骨干光缆网已覆盖南方五省公司、79 地区供电局、全部 500 kV、220 kV 变电站和大部分 500 kV 电厂^[4]。然而,光纤通信也存在一系列的缺点:

1) 光纤网络建设困难,成本高。电网覆盖面积广、电力工程技术多样化、电力系统建设周期长,光纤网络作为依附于电网的次生网络,其建设也非常困难,成本高昂。并且,目前配电网的光纤网络建设处于严重滞后状态,导致配电网自动化程度不足,严重影响供电可靠性。

2) 长距离通信需设中继站,可靠性差。光纤通信的无中继站间距离为 200 km,目前,此距离已无法满足特高压电网和直流输电工程带来的跨大区电网联网要求,必须增设通信中继站。然而,通信中断历史事件表明,影响最大的事件均由中继站故障引起^[4]。虽然超长距离无中继的光纤通信系统已在部分地区进行试点应用,但离行业内大范围铺开应用还有较大的差距^[5]。

3) 故障定位困难。不同的电力光纤通信设备具有不同的配网标准,并且设备数量较多,通信环节复杂。若光纤通道产生故障点,其定位非常困难。

无线通信主要应用于配电网,其主流通信方案为基于 TD-LTE 技术的 230 MHz 电力无线专网^[6]和 4G 电力无线专网。与光纤网络相比,电力无线专网的建设成本较低,维护方便,但基于无线技术的本质特性,电力无线专网也存在一些不足之处:

1) 频段资源受限,带宽受限。230 MHz 频段的

电力专用授权频点为 40 个,共计 1 MHz,最大上行速率为 1.76 Mbps^[7]。无线 4G 的 1.8 G 频段将 20 MHz 规划用于交通、电力、石油等行业用通信网和公众通信网,以目前镇江试行的 10 MHz 带宽电力 4G 专网为例,小区的平均上行吞吐量为 4 Mbps,平均下行吞吐量为 6 Mbps^[8]。

2) 时延较长。依据 3GPP LET 标准要求,LET230M 的时延为 30~300 ms, LTE1800M 的时延约为 30~100 ms^[9]。

3) 安全性不足。无线通信由于其开放的信道和广播机制,使得其相较于有线通信方式更易于受到中间人攻击、虚假数据注入、伪基站攻击和电磁干扰攻击等攻击方式的影响^[10]。

4) 可靠性低。低/高温、雷雨、闪电等恶劣的环境条件、噪声、无线链路带宽的变化等因素均会对无线通信信道造成显著影响。

目前,应用于继电保护领域的电力通信技术主要为光纤通信。微波通信和载波通信一般作为偏远地区的通信方式或作为备用的通信方式。现有的无线专网性能不能满足继电保护毫秒级动作的要求,其应用主要集中于配电自动化、精准负荷控制、用电信息采集、分布式电源、充电桩业务等领域。

2 5G 通信技术在继电保护中的应用前景

从电力信息通信技术现状可以看出,电力系统有线通信信道存在敷设困难、故障定位困难以及长距离通信可靠性不足的缺点,而现有无线通信信道虽然没有有线信道的缺点,但是存在信道延时较高、带宽不足和可靠性低等缺点。

与现有 4G 无线专网相比,5G 无线通信技术使用一系列先进技术,如大规模多天线通信技术^[11]、空-时-频 3 维信道建模技术^[12]、低密度奇偶校验码和极化码技术^[13]、同时同频全双工技术^[14]、新型多址技术^[15]以及基于云的无线接入网架结构^[16]技术等,保证了高带宽、低延时、低功耗、高密度连接和高可靠性等业务目标的实现,其与现有的 4G 无线专网通信性能对比如表 1 所示^[17-19]。由表 1 可知,5G 网络各方面性能明显优于 4G 无线专网,因而在电力信息通信方面具有更广阔的应用前景。

光纤通信网络在建设时,存在建设成本高、长距离通信需设中继站等缺点,但建成后,其通信特性优良。因此在存量光纤网络范围内,无需采用 5G 网络进行替换,而在光纤骨干网络未覆盖到的范围,可考虑采用 5G 通信方式,提高通信网络建设的经济性。继电保护信息通信在电力信息通信安全中属于生产控制 I 区,其可靠性要求为 99.999%,延时要

求为实时控制(毫秒级), 授时精度要求为 $10 \mu\text{s}$ 。由表 1 可见, 5G 通信的性能指标已达到继电保护领域的通信要求, 可应用于继电保护通信技术领域, 降低通信通道的建设成本, 提升通信可靠性。

表 1 5G 与 4G 通信主要性能指标对比

Table 1 Comparison of communication main performance index between 5G and 4G

参数	数值	
	5G 取值	4G 参考值
峰值速率	20 Gbps	1 Gbps
流量密度	10 Tbps	0.1 Mbps/m ²
连接数密度	100 万/km ²	10 万/km ²
时延	空口 1 ms	>10 ms
可靠性	0.001% 丢包率(1 ms 内传输 32 bytes)	0.1% 丢包率(1 ms 内传输 32 bytes)
能效	>5 000 Gbits/kWh	<300 Gbits/kWh

继电保护技术中, 纵联保护对通信通道的特性要求较高。因此, 本文着重分析基于 5G 通信的继电保护信息交互技术, 并对基于 5G 通信的纵联保护进行工程应用研究。

3 基于 5G 通信的继电保护信息交互技术

基于 5G 通信网络架构和继电保护对通信通道的性能需求, 可以明确基于 5G 通信的电网继电保护通信指标需求、信息流架构和通信加密措施, 为实现基于 5G 通信的纵联保护建立基础。

3.1 基于 5G 通信的电网继电保护通信性能需求

基于 5G 通信的纵联保护的报文格式、网络带宽、通道时延、通道稳定性应满足现有继电保护技术的需求。

5G 通信网络传输 TCP/IP 协议网络层报文, 其核心为 TCP 和 UDP 协议^[20]。纵联保护纵联信息现有光纤传输模式和 UDP 协议类似, 属于非“面向连接”报文, 信息的发送和接收无需两端先建立连接和对话确认。考虑到现有光纤传输模式的延续性, 基于 5G 通信的电网继电保护信息交互报文类型宜优先采用 UDP 报文, 5G 通信报文帧结构如图 1 所示。

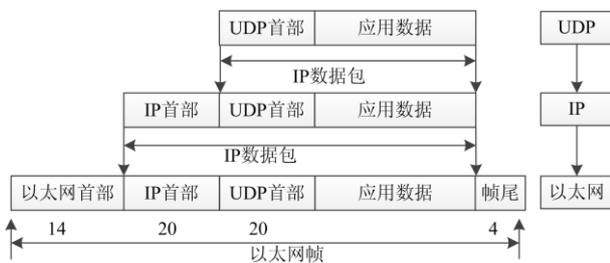


图 1 5G 通信报文帧结构

Fig. 1 Frame structure of 5G communication message

整个通信帧除应用数据外共有 58 字节, 加上 UDP 报文前导码 8 字节, 帧间距 12 字节, 共 78 字节。应用数据按照传输数据较多纵联差动保护装置考虑, 传输信息包括三相电流采样值或相量值、三相电压采样值或相量值、地址码、采样序号或时标和应用层加密的数字认证字段, 考虑一定备用扩展裕度, 纵联通道的设计报文长度小于 170 字节。工程应用中纵联通道的发送采样值的频率大部分为 1200 帧/s, 因此单个装置占用 5G 带宽小于 1.65 Mbps。

根据国内标准《DL/T 364-2019 光纤通道传输保护信息通用技术条件》, 用于继电保护的通信通道单向时延应 $\leq 12 \text{ ms}$, 且差动保护动作定值精度误差要求为 2.5%。

针对线路纵联差动保护, 通道延时偏差(即延时抖动)将反映到两侧采样时刻偏差和差流(I_{cd})计算上(如式(1)和图 2 所示)。

$$I_{cd} = \sqrt{I_m^2 + I_n^2 - 2|I_m||I_n|\cos(180 - \theta)} \quad (1)$$

式中: I_{cd} 为差流计算值; I_m 为光纤通道 M 侧的电流; I_n 为光纤通道 N 侧电流; θ 为两侧电流的夹角。

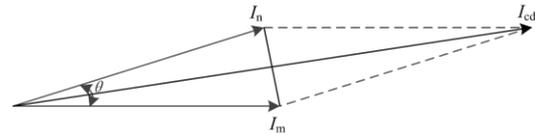


图 2 差流计算相量图

Fig. 2 Phasor diagram of differential current calculation

当通道无延时偏差时, 差流的计算值为 I_m 和 I_n 的矢量和的绝对值; 当通道存在延时偏差, 且 I_m 和 I_n 的幅值相同时, 通道延时偏差影响的定值精度误差最大。按 2.5% 的差动保护动作定值误差要求, 由此可以计算出定值误差最大时两侧电流的夹角 θ 为 2.865° ; 即对应时间偏差 $160 \mu\text{s}$ (50 Hz 电力系统)。5G 通信通道工程建设应满足此收发延时抖动要求, 并留有一定的裕度。目前的试验表明, 5G 通信来回时延抖动约为毫秒级, 尚无法满足继电保护装置的通信性能需求, 可以考虑从以下两方面进行优化:

1) 与运营商、通信设备厂家进行资源的深度整合(应用层通信接口的裁剪、消息过滤机制、内置自定义通信加密鉴权机制和增加网络监控和故障诊断机制等方式), 实现延时抖动性能的优化。例如: 优化通信协议, 包括优化空口误码、传输优先级、减少空口 4 次重传和重传时延等手段^[21]。

2) 牺牲部分保护装置性能, 保证差流计算所用的数据窗时间能够同时覆盖延时抖动发生时的数据

延时时间。例如：保证差流计算数据窗大于延时抖动的最大值与通道延时值的和值。

3.2 基于 5G 通信的电网继电保护信息流架构

结合不同电压等级电力线路的地理距离和 5G 通信网络的接入环、汇聚环、核心环的覆盖范围，应用边缘计算技术，配电网实现保护信息的交互宜在同一接入环完成，110 kV 电力网络的保护信息交互宜在汇聚环完成，220 kV 电力网络的保护信息交互宜在核心环完成，网络整体架构如图 3 所示。

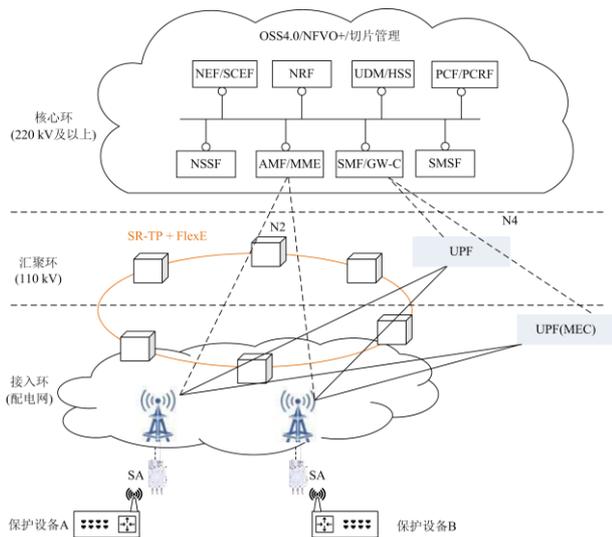


图 3 网络整体架构

Fig. 3 Overall communication network architecture

纵联保护技术中，线路两侧点对点通过网络传输电力信息。保护装置通过安装所在地基站无线连接至 5G 接入环；采用网络切片技术实现虚拟专用网络、专用带宽，保证传输稳定性；采用边缘计算技术，实现传输路由最优，缩短传输延时，提升稳定性。

针对核心网，为满足继电保护传输时延要求，专网切片中应当提供专用的具备边缘计算功能(MEC)的用户端口功能(UPF)用于接入和转发数据流量。根据时延需求估算，当网络侧时延要求 10 ms 及以下时，建议部署 UPF 在普通汇聚或基站点机房；网络侧时延要求为 10~20 ms 时，建议部署 UPF 在传输距离不超过 200 km 的骨干汇聚机房或城域核心机房；网络侧时延要求为 20~30 ms 时，建议部署 UPF 在传输距离不超过 500 km 的城域核心或省中心机房。

针对传输网，为满足继电保护业务具备确定性服务质量的承载要求，切片分组网络(SPN)引入灵活以太网(FlexE)技术和分段路由技术(SR-TP)，在转发层面提供基于时分链路的端到端传输管道，具有低

时延、透明传输、硬隔离等特征。可实现客户数据的接入/恢复、增加/删除操作维护管理(OAM)信息、数据流的交叉连接，以及监控和保护等功能。

针对无线网，其无线空口延时应满足继电保护要求。无线空口时延是从用户终端(UE)到集中单元(CU)的这一段时延，包括 UE 处理时延、基站处理时延、调度时延、重传时延、空口传输时延。在目前 5G 网络测试中，当关闭预调度时，2.6 GHz 新空口(NR)5 ms 单周期无线侧平均时延为 11.3 ms，4.9 GHz NR 2.5 ms 单周期无线侧平均时延为 7.7 ms。开启预调度，2.6 GHz NR 和 4.9 GHz NR 平均时延分别为 6 ms 和 4.7 ms，较关闭预调度分别有 5.3 ms 和 3 ms 提升。目前 5G 无线网建设采用 2.6 GHz 设备，可按照时域和频率资源块的方式，进行动态分配，实现无线侧网络切片。2020 年入网的 2.6 GHz 和 4.9 GHz 无线网设备，可根据设备支持能力实现网络资源静态分配，保障网络切片的服务质量。

3.3 基于 5G 通信的电网继电保护信息加密技术

电网业务作为 5G 通信网络中的一部分业务，一般是通过网络切片方式实现业务之间的无线频谱资源的隔离，进而满足继电保护通信安全性^[22]的要求。无线频谱资源的隔离可以分为物理隔离和逻辑隔离。物理隔离方式的覆盖范围、覆盖效果、传输速度、资源分配灵活性通常不如共享频谱，并且频谱租赁代价极为高昂；且逻辑隔离方式也分为软隔离和硬隔离技术，其中，软隔离通过虚拟局域网(VLAN)标签与网络切片标识的映射实现隔离，无法做到硬件、时隙层面的隔离；硬隔离方案基于灵活以太网(FlexE)技术实现独占时隙的特性^[23]。因此，5G 通信网络的硬件隔离一般采用基于硬隔离的逻辑隔离技术。在此基础上，电网业务的信息传输还应增加信息加密技术。

无线通信的信息加密技术一般分为基于射频指纹、无线信道指纹、物理层挑战-响应机制、物理层水印及跨层认证等物理层技术^[24]和基于信息加密和解密等算法的应用层技术。从现有研究来看，物理层安全技术尚不成熟，其可靠性、成本和引入的延时导致其性能不足以满足继电保护的高可靠和高实时性能要求，故应选择更为成熟可靠的应用层加密技术。

基于 5G 通信的纵联保护的继电保护信息交互采用 UDP 协议，与智能变电站的 GOOSE、SV 等实时报文具有共同点，均是“无连接”的，在正式通信前不必与对方先建立连接，不管对方状态就直接发送，传输数据量大，实时性要求高。参考

IEC62351-6 针对此类报文提出的安全防护措施要求尽可能小的计算量, 从而满足继电保护和采样值的快速时间响应, 大多数影响传输速度的加密技术和其他安全方法都不适用, 因此, 数字签名认证是更好的安全措施。

针对继电保护信息, 其报文头部分进行循环冗余校验(CRC)计算, 以及对报文体进行哈希摘要计算, 最终在扩展部分对摘要进行签名, 保证报文的完整性。

针对 5G 网络的数据传输方面, 利用 5G 网络的 5G-AKA 和 EAP-AKA'(五元组鉴权)认证机制, 实现网络与用户之间双向认证, 保障信息交互双方身份的合法性。通过终端和 gNB 之间、终端和 AMF 之间提供对信令进行强制完整性保护以及加密保护, 实现数据的加密保护和完整性保护。

4 基于 5G 通信的电网纵联保护技术

5G 通信网络大带宽和长距离通信优势, 可以有效增加继电保护纵联通道传输数据内容, 包含差动保护所需的采样值, 但 5G 通信将对现有纵联差动保护原理和纵联命令式(纵联距离、过流闭锁等)保护同步原理基础产生一定影响。因此, 有必要分析现有数据同步技术在基于 5G 通信的继电保护中的适用性, 并研究基于 5G 通信的电网纵联保护策略。

4.1 不同电压等级电力系统的 5G 纵联保护适应性

目前, 110 kV 以上电压等级的输电线路已具备完善的光纤差动纵联及方向纵联保护, 且电力光纤专网的通信带宽、可靠性以及通信时延等方面的性能均不低于 5G 通信, 例如: 传统复用保护通道在 40~60 km 通道长度的时延处于 2.5~3 ms 之间, 双向时延差在 0.03~0.05 ms 之间^[25-26]。所以, 对于中高压电力系统, 5G 纵联保护的需求迫切性并不强烈。而配电网多采用简单的过流、过压逻辑, 不依赖通信, 但不能实现分段隔离, 停电影响范围扩大, 故障后供电恢复时间长(几天或小时级别), 且配网终端通信点多面广, 布局分散, 光纤敷设难度大、成本高。5G 通信技术可以在长距离通信、分布式新能源或配电网等领域发挥其快速部署、成本低、易升级和扩容等优势。因此, 5G 纵联保护更适宜在配电网领域进行推广和应用。

当 5G 纵联保护使用于中高电压等级电力系统时, 还需要考虑长距离通信带来的延时递增效应, 例如, 超高压输电线路距离较长(几十公里至几百公里), 采用 5G 网络进行端到端通信, 中间要跨若干基站。因此, 需要对现行的 5G 通信方案进行优化, 例如:

1) 调整 5G 网络结构, 使得 MEC 和 3 层 VPN 下沉, 降低光纤传输时延。实验表明, 东西向传输时延可从 1 ms 降低到 100 μ s, 南北向传输时延从 1 ms 降低到 50 μ s^[27]。

2) 调整 5G 网络设备转发协议, 基于 FlexE 转发和信道隔离技术实现低延时转发。实验表明, 传输设备转发时延从 50 μ s 降低至 1 μ s^[27]。

4.2 现有数据同步技术对 5G 纵联保护的适应性

数字化变电站的站内现有同步技术主要包括插值同步、基于时钟的同步采样、基于延时可测交换机的插值同步技术; 站间现有数据同步技术比较常用的是采样时刻调整法和基于对时的双端同步采样。

站内插值同步的应用场景是在过程层采用点对点传输模式时, 合并单元输出的数字量采样值直接发送至保护装置, 整个采样及传输环节不存在延时不稳定因素。在基于 5G 通信的电网纵联保护中, 需要对对侧的采样和本地的采样进行同步, 通过 5G 网络的传输延时受传输环节、传输距离的影响无法忽略, 所以无法将变电站中的插值同步技术直接应用于纵联保护, 并且插值同步需要更高的采样率, 对装置性能网络带宽的要求都比较高。

站内基于时钟的同步采样技术的应用场景是合并单元到保护装置的传输方式采用组网传输模式, 采样值信号经以太网交换机共享至过程层总线, 传输延时不稳定, 所以采用由过程层合并单元实现全站采样数据时间同步, 间隔层保护装置仅需要对齐采样序号即可完成采样的同步。基于时钟的同步采样技术不受通道传输的影响, 可以应用于基于 5G 通信的电网纵联保护。

站内基于延时可测交换机的插值同步, 主要原理为交换机从接收到 SV 数据帧的第一个比特开始到按设定规则将该 SV 数据帧转发出交换机需要经过一定的处理时间, 该处理时间即为 SV 数据帧的交换延时, 交换机将该值在 SV 数据帧的特定位置进行累加, 可为该 SV 的订阅设备提供 SV 数据帧在整个网络中传输时延, 从而可回溯到该 SV 数据帧发布的准确时刻, 在保护装置采用插值算法实现同步, 整个采样环节不再依赖于外部时钟信号。在基于 5G 通信的电网纵联保护中, 采样数据传输环节包括无线发送、基站、5G 网络等各环节多设备, 中间设备数目多、种类多, 很难实现各环节的延时可测, 所以无法将变电站中的插值同步技术直接应用于纵联保护, 但可以研究将整个传输环节的延时作为测量对象的技术方案。

站间采样时刻调整法利用乒乓算法计算两端发送数据的时刻偏差, 乒乓算法示意图如图 4 所示。

站间采样时刻调整法要求通道数据收发传输时延相等, 基于 5G 端到端的网络时延涉及到无线、传输、核心网、承载网多个环节, 目前难以满足要求。

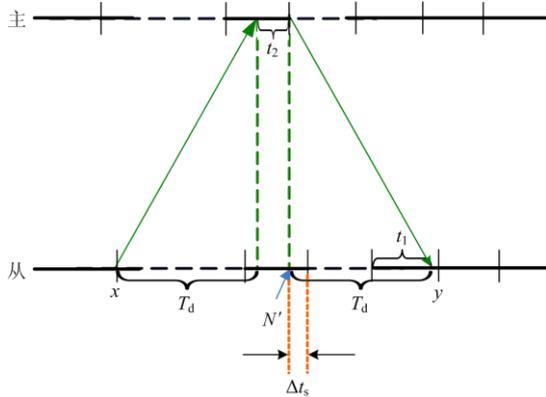


图 4 乒乓算法示意图

Fig. 4 Schematic of ping-pong algorithm

$$T_d = \frac{y - x - t_2}{2} \quad (2)$$

$$\Delta t_s = (T_d - t_1) \% T_s \quad (3)$$

式中: x 为从侧发送数据时刻; t_2 为主侧收到从侧命令到向从侧发送命令的时间间隔; y 为从侧接收到主侧反馈命令的时刻; t_1 为最新一次发送到接收到主侧反馈命令的时间间隔; T_d 为通道延时; Δt_s 为两侧发送数据的时刻偏差。

站间基于统一时钟源的同步方法: 在线路两端都配置时钟同步装置, 接收机输出的时间码可直接送给微处理器, 用来给采样数据置以时间标签。两侧采样时钟给出的采样脉冲之间具有不超过 $2 \mu s$ 的相对误差。此同步方法精度高, 不需通道联系, 不受电网频率变化影响, 然而受到外部对时信号可靠性的影响。基于时钟的同步采样技术不受通道传输的影响, 可以应用于基于 5G 通信的电网纵联保护, 其网络授时的架构如图 5 所示。

4.3 基于 5G 通信的电网纵联保护策略

5G 传输网络保护装置与基站间采用无线传输, 数据传输的正确率、可靠性、实时性受障碍物及天气等干扰因素的影响较大, 因此需要考虑误码、丢帧、通信中断、延时过大等通信异常情况对 5G 纵联保护装置的影响和相应的保护策略。下面分别针对基于非同步原理的纵联命令式(纵联距离、方向过流)^[28-29]保护和基于同步的纵联差动保护进行分析。

当无线信道通信中断时, 由于差动计算元件缺少对侧电流信息, 差流计算不准确, 可能导致保护的误动或拒动。因此, 两种纵联保护装置均应瞬时闭锁相应的保护功能。

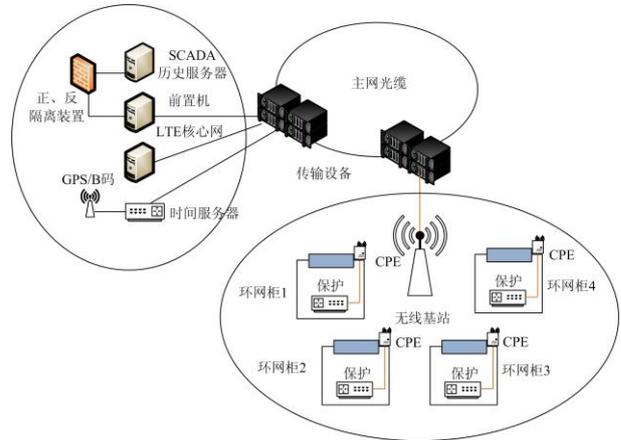


图 5 网络授时架构

Fig. 5 Network timing architecture

当无线信道延时过大(大于 12 ms)时, 由于延时补偿过大, 两侧电流在同步过程中可能出现混叠现象(两侧电流角差可能增大或减小), 进而会导致保护的误动或拒动。对于基于非同步原理的纵联命令式保护, 由于其不使用对侧实时采样值, 所以装置保护功能不闭锁, 延时收到对侧信号后保护动作。对于同步原理的纵联差动保护, 延时过大导致差流计算出现误差, 会导致保护的误动或拒动, 可以考虑以下两种策略:

- 1) 异常期间, 装置瞬时闭锁;
- 2) 若延时过大, 但小于上限值 T_{max} (装置缓存大于 T_{max} 时间传输数据所占空间), 由于 5G 纵联保护装置基于时标进行同步, 可以考虑不闭锁装置。

当无线信道发生误码或丢帧异常时, 对于基于非同步原理的纵联命令式保护, 由于其不使用对侧实时采样值, 所以装置保护功能不闭锁, 延时收到对侧信号后保护动作。对于同步原理的纵联差动保护, 差流瞬时值计算将出现误差, 会导致保护的误动或拒动, 可以考虑以下三种策略:

- 1) 异常期间, 装置瞬时闭锁, 延时一个周波返回。
- 2) 将采样点数据和相应采样点的相量数据同时发送, 采用采样点差动和相量数据差动相互补充。异常期间, 装置瞬时闭锁; 异常返回时, 使用相量值进行差流计算。
- 3) 异常期间, 若误码或丢帧数量为 1, 考虑基于异常帧前后的数据使用插值方式进行差流计算。

基于非同步的纵联保护, 受通道影响小, 但由于其基于方向判别故障是否在区内, 因此受系统运行方式影响大, 并且存在高阻故障灵敏度低等缺点。基于同步的纵联保护, 判据简单, 不受系统运行方

式的影响, 灵敏度高, 但由于 5G 通信下通道延时抖动大, 需要依靠装置时钟同步进行采样同步, 而依靠外部的同步系统可靠性较差, 故基于同步的纵联保护可靠性较差。因此, 5G 纵联保护整体策略采用基于同步的纵联差动保护复合基于非同步的纵联距离(方向)保护的方案。在授时回路正常时, 采用纵联差动保护、纵联命令式(纵联距离、方向过流)保护同时判别, 纵联差动保护动作于出口, 纵联命令式(纵联距离、方向过流)保护进行故障判别, 但不出口; 授时回路异常时, 纵联差动保护退出, 纵联命令式(纵联距离、方向过流)保护动作在判别差动退出时动作于出口切除故障, 从而保证 5G 通信下, 纵联保护的可靠性、灵敏性、速动性。此外, 针对纵联距离保护需考虑振荡开放, 存在振荡开放判据延时长, 纵联保护动作慢的问题。针对此问题, 可采用不经同步的电流相量幅值差异等辅助判据, 快速开放振荡故障, 优化纵联保护的性。考虑非同步纵联保护在配网应用时, 通过 5G 网络接收线路对侧的方向及电流启动信号, 结合本侧的故障电流特征, 确定故障点发生在线路区内或区外。

5 结论

本文通过对电力系统现有通信技术特点和继电保护应用场景的分析, 探讨了基于 5G 通信的继电保护各项性能指标的需求、信息流架构和信息安全技术, 明确了 5G 通信技术在继电保护领域应用的可行性, 并针对 5G 通信的技术特点提出了针对误码、丢帧、通信中断、延时过大等通信异常情况的保护策略, 为 5G 通信技术在电力系统继电保护领域的工程应用提供参考。

参考文献

- [1] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15-29.
ZHANG Ping, TAO Yunzheng, ZHANG Zhi. Survey of several key technologies for 5G[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 15-29.
- [2] ITU-R M 2083-0. IMT vision, framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond[S]. ITU-R, Document 5/199-E, 2015.
- [3] 于昊. 电力系统省级骨干传输网建设方案[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
YU Hao. Construction solutions of provincial backbone transmission network in power system[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [4] 孙昊. 南方电网骨干光纤通信网系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
SUN Hao. Research of the backbone communication network system in China Southern Power Grid[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [5] 王峰, 马静, 张亮, 等. 超长距光传输技术在宁夏电网中的应用[J]. 宁夏电力, 2018(1): 43-47.
WANG Feng, MA Jing, ZHANG Liang, et al. Application of ultra-long span optical communication technology in Ningxia power grid[J]. Ningxia Electric Power, 2018(1): 43-47.
- [6] 唐元春, 林文钦, 陈力, 等. 面向电力无线专网的分层异构网络接入协同选择方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 171-178.
TANG Yuanchun, LIN Wenqin, CHEN Li, et al. An access synergetic selection approach in hierarchical heterogeneous network oriented to power wireless communication[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 171-178.
- [7] 张叶峰. TD-LTE 技术在电力无线通信系统中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
ZHANG Yefeng. Application of TD-LTE technology in electric power wireless communication system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [8] 邱威. 4G LTE 无线通信技术及其在电力专网中的应用[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
QIU Wei. 4G LTE wireless communication technology and its applications in power private networks[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [9] 高峰, 高泽华, 丰雷, 等. TD-LTE 技术标准与实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [10] 张泰民. 面向智能电网无线终端的安全通信和抗干扰关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
ZHANG Taimin. Research on secure communication and anti-jamming technologies for wireless devices in smart grid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [11] MARZETTA T L. Non-cooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [12] TOMMI J, PEKKA K. Device-to-device extension to geometry-based stochastic channel models[C] // 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), April 13-17, 2015, Lisbon, Portugal: 1-4.
- [13] ESLAMI, ALI, HOSSEIN P N. A practical approach to polar codes[C] // 2011 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT), July 31-August 5, 2011, St. Petersburg, Russia.

- [14] SABHARWAL A, SCHNITER P, GUO D, et al. In-band full-duplex wireless: challenges and opportunities[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(9): 1637-1652.
- [15] TAO Y, LIU L, LIU S, et al. A survey: several technologies of non-orthogonal transmission for 5G[J]. China Communications, 2015, 121(10): 1-15.
- [16] DEMESTICHAS P, GEORGAKOPOULOS A, KARVOUNAS D, et al. 5G on the horizon: key challenges for the radio access network[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 8(3): 47-53.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 李珏, 刘灏, 田建南, 等. 适用于主动配电网 PMU 的数据传输协议与通信性能分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 3-10.
- LI Jue, LIU Hao, TIAN Jiannan, et al. Communication protocol and performance analysis for the PMU of distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 3-10.
- [21] 王常玲, 赵元. 基于 5G 承载网的电力差动保护业务时延抖动分析[J]. 通信世界, 2019(32): 33-36.
- [22] 李劲松, 陆鑫, 张金虎, 等. 基于 IEC 61850 的智能变电站数据隐私保护方法研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 69-75.
- LI Jinsong, LU Xin, ZHANG Jinhui, et al. Smart substation data privacy protection method based on IEC61850[J]. Smart Power, 2019, 47(7): 69-75.
- [23] 毛玉欣, 陈林, 游世林, 等. 5G 网络切片安全隔离机制与应用[J]. 移动通信, 2019, 43(10): 31-37.
- MAO Yuxin, CHEN Lin, YOU Shilin, et al. 5G network slicing security isolation mechanism application[J]. Mobile Communication, 2019, 43(10): 31-37.
- [24] 宋华伟. 移动通信物理层安全认证技术研究[D]. 洛阳: 战略支援部队信息工程大学, 2018.
- SONG Huawei. Research on physical layer security authentication technology in mobile communication[D]. Luoyang: Information Engineering University, 2018.
- [25] 金华锋, 余荣云, 吴奕, 等. 继电保护数字复用通道的时延[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 42-45.
- JIN Huafeng, YU Rongyun, WU Yi, et al. Transmission delay of multiplex channel used for protection relays[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 42-45.
- [26] 许俊现, 高会生, 汪洋. 用于线路纵差保护的 PTN 时分复用业务时延分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 56-62.
- XU Junxian, GAO Huisheng, WANG Yang. A delay time analysis of time division multiplexing services over PTN applied to line longitudinal differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 56-62.
- [27] 苏林奋. 5G 专线业务低时延特性的研究与实现[J]. 电信工程技术与标准化, 2020, 33(7): 16-19.
- SU Linfen. Research and implementation of 5G line service with low delay[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2020, 33(7): 16-19.
- [28] 湛江波, 陈碧云, 王楚通. 含超导元件的配电网继电保护方案研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(8): 84-90.
- CHEN Jiangbo, CHEN Biyun, WANG Chutong. Distribution grid relay protection scheme with superconducting device[J]. Smart Power, 2020, 48(8): 84-90.
- [29] 李艳, 张安龙, 郑曦. 配电网广域保护信息流建模与通信性能分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 53-60.
- LI Yan, ZHANG Anlong, ZHENG Xi. Modeling and communication performance analysis of wide-area protection information flow in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 33(7): 53-60.

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2021-02-18

作者简介:

何云良(1964—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; Email: hyl64@sina.com

裘愉涛(1967—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为继电保护技术应用与管理; E-mail: zdqyt@vip.sina.com

吴路明(1988—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为新型继电保护原理与技术。E-mail: shuideleiheng@sina.com

(编辑 周金梅)