

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201264

基于5G授时的配网差动保护数据同步方案

向珉江¹, 袁通², 苏善诚¹, 刘宝¹, 申文伟¹, 高厚磊²

(1. 国网济南供电公司, 山东 济南 250012; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 在配网中实现基于5G通信电流差动保护的关键技术之一是区段两端电流数据的同步问题。分析现有数据同步方法应用于5G电流差动保护的适应性; 介绍5G协议中时间同步指标及实现架构; 在此基础上, 提出利用5G通信中的高精度时间信息实现数据同步的实用化路线。在该路线中, 设计一种基于5G信号参数的基站授时方案; 给出两种适用于配网电流差动保护的定时信号; 最后提出基于B码定时信号的电流差动保护数据同步方法并分析其误差。理论上所提方案可实现线路两端时间同步偏差不超过20.8 μs, 对应两侧电流相角偏差不足0.5°, 完全满足电流差动保护要求。

关键词: 5G通信; 配电网; 电流差动保护; 时间同步; B码; 基站

5G timing base data synchronization scheme for differential protection of distribution networks

XIANG Minjiang¹, YUAN Tong², SU Shancheng¹, LIU Bao¹, SHEN Wenwei¹, GAO Houlei²

(1. State Grid Jinan Power Supply Company, Jinan 250012, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: One of the key technologies for realizing the current differential protection principle based on 5G communication in distribution networks is current data synchronization at both ends of a section. This paper analyzes the adaptability of the existing data synchronization methods to 5G current differential protection and introduces time synchronization indexes and implementation architecture in the 5G protocol. This paper proposes a practical route of data synchronization using high-precision time information in 5G communication. A timing scheme for a base station based on 5G signal parameters is designed. Two types of timing signals suitable for current differential protection of a distribution network are introduced. We propose a current differential protection data synchronization method based on the B-code and analyze its error. Theoretically, the proposed scheme can realize the time synchronization deviation at both ends of the line is no more than 20.8 microseconds, and the phase angle deviation at both sides is less than 0.5 degrees, which fully meets the requirements of current differential protection.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877127) and the Science and Technology Project of Shandong Electric Power Company (No. 5206011900DG).

Key words: 5G communication; distribution networks; current differential protection; time synchronization; B code; base station

0 引言

随着越来越多以光伏为代表的分布式电源 DG 接入配电网, 配电网由原来的辐射型网络向复杂的多源、多端网络转变, 传统的三段式电流保护已无法准确识别故障。而基于双端量的电流差动保护原

理上能够解决多源网络的故障隔离问题, 但受限于通信基础设施现状, 配电网电流差动保护一直未能得到大规模推广^[1-5]。5G 通信技术的出现及快速发展, 为配电网电流差动保护提供了一种经济可靠的通信手段。5G 是第五代移动通信技术, 和 4G 相比速率更高, 容量更大, 时延更低, 理论上能够满足电流差动保护功能的需求^[6-8]。

然而电流差动保护原理上要求参与比较的线路两端的电流量必须是同步采样或者经过同步化处

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877127); 山东省电力公司科技项目资助(5206011900DG)

理的^[9], 现有的数据同步方法并不适用于 5G 通信的配电网差动保护, 因此有必要研究一种适配于配网的新方法。幸运的是, 5G 网络中具有高精度时间信息, 这为电流差动保护数据同步提供了一种潜在的选择。基于此, 本文将探讨如何利用 5G 本身的高精度时间信息实现电流差动保护的数据同步。

1 现有同步方法应用于 5G 差动保护的适用性

现有的数据同步方法主要有两类: (1) 基于数据通道的同步方法; (2) 基于 GPS/北斗的数据同步方法。这两种方法广泛应用于输电线路电流差动纵联保护, 具有满足要求的数据同步精度和成熟的运行经验, 本节将分析这两类方法在配网 5G 通信下的适用性。

1.1 基于数据通道的同步方法

基于数据通道的同步方法包括: 采样时刻调整法、采样数据修正法和时钟校正法。采样时刻调整法通过计算主从站时间误差, 调整从站采样时刻, 达到同步采样目的; 采样数据修正法通过计算两侧时钟误差, 对其中一端已采样的电流相量进行旋转, 达到同步化处理的目的; 时钟校正法则是通过计算主从侧的时间误差, 对从站时钟进行调整, 两端时钟同步后, 再进行同步采样^[10-12]。以上三种方法的关键是假定通信过程中两个方向的传输时延相同。因

此, 基于光纤的同步方法在误差允许范围内满足要求。而 5G 通信本身架构决定了数据来回传输时延并不相同, 下面进行分析。

如图 1 所示, 线路 M 端通过 5G 网络与 N 端进行数据交换。为了更清楚说明原理, 保护装置和 5G 终端在图中用 P 表示, 在忽略 MEC(Mobile Edge Computing)处理数据的时间情况下, 数据包从 M 端到 N 端需要经过 P 到基站的空口时延 t_1 , 基站到数据处理中心的网络时延 t_2 , 以及数据包从数据处理中心到 N 端 P 的网络时延 t_3 和空口时延 t_4 。即从 M 端到 N 端总时延 $t_{M \rightarrow N}$ 为

$$t_{M \rightarrow N} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (1)$$

考虑到基站与 5G CPE 的空口上下行时延并不相同, N 端向 M 端通信时, 数据包传输路径与 A 端向 B 端通信并不对称。类似地, N 端向 M 端总时延 $t_{N \rightarrow M}$ 为

$$t_{N \rightarrow M} = t_2 + t_3 + t_5 + t_6 \quad (2)$$

由于 $t_{M \rightarrow N} \neq t_{N \rightarrow M}$, 基于数据通道的同步算法利用 5G 通信无法实现。另外, 由于该过程存在数据包的多跳转发, 因此会出现随机缓冲或排队问题, 导致时延抖动比较大, 这也是基于数据通道的同步算法在 5G 通信中无法实现一个原因。经试验, 5G 网络单向时延抖动达到 2 ms。这对于同步精度要求是微秒级别的差动保护来说是无法接受的。

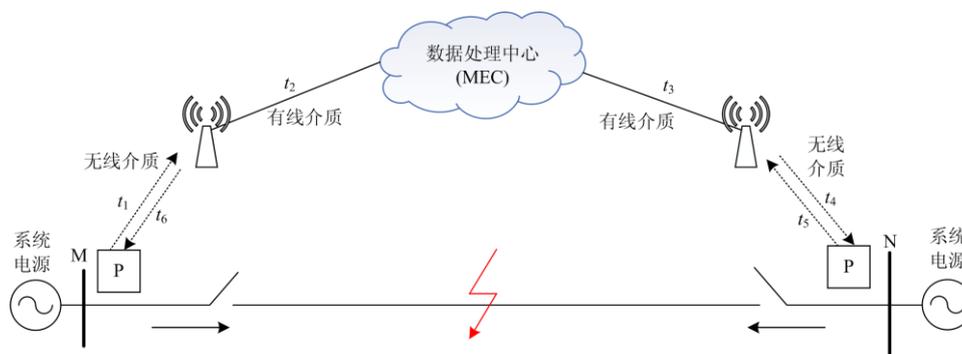


图 1 5G 通信的数据包流向及时延示意图

Fig. 1 Packet flow and timely delay of 5G communication

1.2 基于 GPS/北斗的同步方法

基于 GPS/北斗的数据同步原理是: 安装在线路两侧的 GPS/北斗接收机接收卫星发送的时间信息, 通过对接收信息进行解码和处理, 可输出两种时间信号: 一是 1PPS 秒脉冲信号; 二是经串口输出的与 1PPS 对应的 UTC 时间(年、月、日、时、分、秒)。利用秒脉冲对两端采样脉冲进行同步, 可使两端采样脉冲误差不超过 $2 \mu\text{s}$, 同步后的采样数据通过 5G 网络完成传输, 实现保护功能。技术上, 基于 GPS/

北斗的同步方法是一种不依赖通道联系的、理想的同步方法, 在 5G 差动保护中能够保证高精度数据同步。

但配电网不同于输电网, 其线路长度在几千米, 且线路众多, 采用该方法给每一个保护装置配置 GPS/北斗接收模块将大大增加建设成本, 目前西安同步电子科技有限公司的 SYN2306C 型 GPS 北斗授时导航接收机同步精度在 30 ns 以内, 市场价格为 2 500 元。显然在经济上是不能接受的。同时,

配电网周围高大建筑及电磁干扰可能影响卫星信号的接收,从而导致授时的中断,在可靠性上与输电线路相比也会有所下降。

通过以上分析,基于通道的数据同步方法在原理上无法适应 5G 差动保护的要求;而基于卫星的数据同步方法在原理上可行,但考虑到经济性和可靠性等因素,无法在配电网中大规模推广。因此,需要寻找一种适配于配电网 5G 差动保护的数据同步方法。

2 3GPP 规范中对 5G 时间同步的描述

5G 发展,标准先行。3GPP(The 3rd Generation Partnership Project)作为目前移动通信标准的制定者,对 5G 授时的应用场景、同步精度以及可能的实现方式进行了讨论,本节将从 3GPP 标准的视角,对 5G 时间同步相关的内容进行总结。

2.1 时间同步技术指标

目前工业制造业、电网、无人驾驶等领域对时间同步精度有非常高的需求。现在的解决方案大多依赖于有线网络对时或卫星授时,5G 技术作为实现工业 4.0 的关键,有必要在通信可靠性、通信延迟和时间同步方面进行加强。其中,3GPP 组织在多个标准中提到时间同步的精度及应用场景,总结如表 1 所示。

由表 1 可以看出,3GPP 对时钟同步精度提出了微秒级的指标,同时描述了相应的应用场景及服务范围^[13-14]。可以预见的是,随着 5G 标准的出台,各大运营商及设备生产厂家将会不断推出符合 5G 标准的终端产品,本文将根据 5G 标准的描述,提出基于 5G 授时的配电网差动保护数据同步实用化路线。

表 1 5G 授时精度指标
Table 1 Time precision index of 5G

同一通信组中用于时钟同步的设备数	同步性指标要求	服务范围	场景
1	300	900 ns	<100 m×100 m 运动控制
2	300	<900 ns	<1 000 m×100 m 工业控制器的控制通信
3	10	<10 μs	<2 500 m ² 高数据率视频流
3a	100	<1 μs	<10 km ² 视频制作同步和包定时
4	100	<1 μs	<20 km ² 智能电网: PMU 之间的同步

注:全局时间域一般要求同步主控器和时钟域的任何设备之间的精度为 1 μs。

2.2 时间敏感网络

为了满足垂直行业对于网络超低延时、高可靠性、确定性及时间同步等方面的要求,3GPP 组织考虑将时间敏感网络(Time Sensitive Network, TSN)与 5G 网络相融合^[15],依托时间敏感网络技术的网络确定性传输,实现 5G 网络性能指标的提升。其中,对于时间同步的分析,标准^[16]指出,基站(gNB)与单个终端(Use Equipment, UE)可通过 U_u 接口实现时间同步,其精度取决于:参考时间信号的粒度、传播时延补偿等。

在刚刚冻结的 5G R16 版本中,确定了 5G 与时间敏感网络的融合方案,并提出相应的时间同步精度要求:UE、gNB、UPF(User Plane Function)等时钟保持小于 1 μs 的时间同步。5G 系统作为 TSN 网络的一个透明传输的网桥,整个 5G 系统被视为一个时间感知系统,只有在 5G 系统边缘的 TSN 转换器需要支持/执行 IEEE 802.1AS 协议功能,通过测量消息在 5G 系统的停留时间,调整应用点本地时钟^[17-18],实现 TSN 网络的时间同步。如图 2 所示。

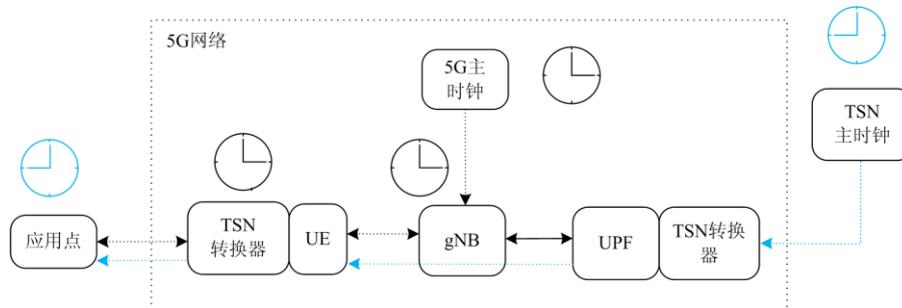


图 2 透明时钟传输

Fig. 2 Transparent clock transmission

图中蓝色为 TSN 时钟, 黑色为 5G 系统内部时钟。5G 系统作为透明时钟, 该方案不要求其与时钟同步, 但由于需要对停留时间进行测量, 因此要求 5G 系统内部各部分时钟保持高精度时间同步。

由 3GPP 标准来看, 5G 网络将逐渐部署在工业自动化领域。与传统的有线通信链路相比, 可靠的低延时无线连接更能提高制造业的灵活性。目前, 3GPP 组织正逐步制定满足工业通信需求的技术指标和实现架构, 旨在建立一个安全可靠确定的数据传输网络, 时间同步作为其重要指标, 是许多应用场景的关键要素。在未来工业场景中, 通过 5G 网络实现终端设备高精度时间同步是必需的。

3 5G 网络的高精度时间同步

由 5G 网络自身架构所决定, 时间同步的实现分为两步: (1) 5G 基站之间实现高精度时间同步; (2) 5G 接收终端由各自覆盖区域的基站独立授时。通过以上两步, 5G 网络将时间信息传递至所连接的设备, 5G 网络中的时间信息流向, 如图 3 所示。

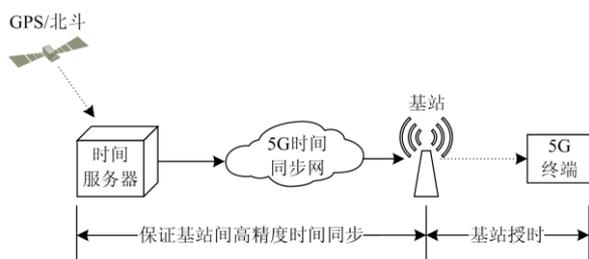


图 3 5G 网络的时间同步流向示意图

Fig. 3 Time synchronization flow diagram of 5G network

3.1 基站层面的时间同步

5G 网络通信本身对时间同步有较高需求。5G 网络采用时分复用(TDD)制式, 基于 TDD 制式特点, 需对基站空口时间偏差进行严格限定, 否则会造成终端跨基站切换时上下行时隙干扰。除此之外, 5G 站间协同技术要求多信号间的时延差需满足一定要求, 否则无法合并。这对协同点之间的时间偏差提出了更苛刻的要求。

目前我国各运营商可实现基站间空口时间偏差在 $1.5 \mu\text{s}$ 以内。根据 IMT-2020 发布的《5G 同步组网架构及关键技术》介绍^[19], 随着 5G 系统对同步精度需求更高, 同步安全性要求更严格, 有必要建设自主可控、安全可靠的高精度时间同步网, 与基站卫星授时方案互为补充^[20-21]。该白皮书指出, 未来基站空口时间同步精度将达到数百纳秒级别。

3.2 基站与 5G 终端的时间同步

目前基站与 5G 终端时间同步是亟需解决的技

术难题, 该过程不同于有线链路, 由于传播路径的不确定性以及 5G 终端的移动性大大增加了授时难度。本小节根据 5G 无线通信过程中两种信号参数: SIB9 和 TA, 设计一种基站授时方案。5G 终端获取 SIB9 和 TA 值的流程如图 4 所示。

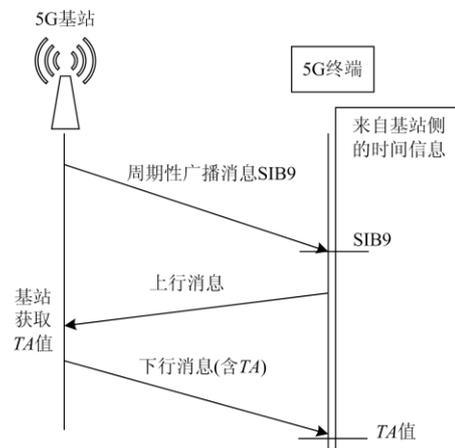


图 4 5G 终端获取 SIB9 和 TA 值示意图

Fig. 4 Schematic diagram of SIB9 and TA values obtained by 5G terminal

其中, SIB9 和 TA 值的含义解释如下:

SIB9: 在 5G 下行同步过程中, 5G 终端通过小区周期性广播或请求的方式获取 SI 消息。其中, 系统消息块(System Information Block9, SIB9)中包含与 GPS 时间和协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC)相关的信息^[22]。包括夏令时(day light saving time)、GPS 时与 UTC 时偏移量(leap seconds)、国际协调时间与当地时间的偏移量(local time offset)、世界协调时(time Info UTC)等, 因此可以考虑利用 SIB9 中的时间信息作为参考时间信号, 实现 5G 终端时钟的时间同步。

TA 值: 5G 通信时, 为保证位于同一个子帧但在不同频域资源的信号能够同时到达基站, 需对基站到 5G 终端的传播延迟进行估计, 调整终端发送信号时刻, 确保所有终端的上行传输是同步的。通过检测上行信号距离基站位置的远近, 基站侧获取 TA 值, 并将 TA 值通过下行消息反馈给终端, 终端根据 TA 调整本侧的信号发送时间^[23]。换句话说, TA 值表示两倍的传播时延。

授时方案: 5G 终端利用系统消息块 SIB9 和 TA 值, 实现本地时钟与基站侧的时间同步, 该过程分为以下四个步骤:

第一步, 5G 终端解析系统消息块 SIB9 内的时间信息, 其中含有传输 SIB9 的 SI 窗口结束边界处对应的世界协调时, 将此时间记为 t_0 。

第二步, 由时间提前量 TA 推导出真正的基站到 5G 终端的传播时延 τ 。此步骤包含两种情况:

1) 5G 终端初始化时, 基站通过测量接收的 Preamble 来确定 TA 值, 并通过 TA Command 字段(共 12 bit, 对应 TA 索引值为 0~3846)发送至 5G 终端。当子载波间隔为 $2^\mu \times 15 \text{ kHz}$ ($\mu = 0, 1, 2, \dots$) 时的时间提前量 TA 粒度为 $T_\mu = 16 \times 64 \times T_C / 2^\mu$, 对于随机接入而言, $TA \times T_\mu$ 可得到实际调整值。 T_C 为 5G NR 的最小时间单位为 0.508 6 ns。由 TA 值的定义可知, 其实质为两倍的传播时延, 因此可得基站到 5G 终端的传播时延 τ_1 为

$$\tau_1 = (TA \times T_\mu) / 2 \quad (3)$$

2) 在连接状态, 考虑到 5G 终端的移动性、晶振偏移等因素, 仍需对 TA 进行更新, 基站通过测量上行传输信号确定此刻 TA 的偏移量, 偏移量 TA 通过 TA Command 字段(共 6 bit, 对应 TA 索引值为 0~63)发给 5G 终端, 5G 终端保存前一次 TA 实际调整值 $N_{TA,old}$, 收到新的偏移量 TA 值之后, 计算出新的实际调整值: $N_{TA,new} = N_{TA,old} + (TA - 31) \cdot T_\mu$ 。由此可得该情况下的传播时延 τ_2 为

$$\tau_2 = [N_{TA,old} + (TA - 31) \times T_\mu] / 2 \quad (4)$$

第三步, 根据参考时间信号 t_0 和传播时延 τ , 计算 5G 终端侧的真正时刻 t_z 为

$$t_z = t_0 + \tau \quad (5)$$

第四步, 终端侧时钟根据 t_z , 修正本地时钟。

以上步骤可实现基站授时功能, 图 5 为基站授时原理, 该方法直接利用 5G 通信信号, 无需基站侧额外的信令开销, 实现简单。

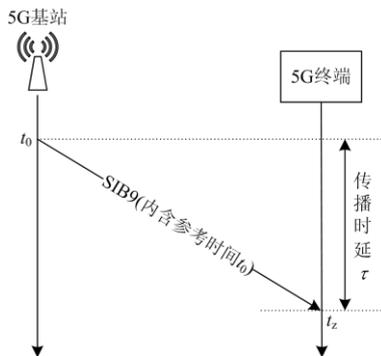


图 5 授时原理图

Fig. 5 Timing schematic diagram

4 5G 终端与差动保护装置的时间同步

目前国内外电力系统中采用的时间同步方式以卫星授时、有线方式和网络时间同步为主, 主要

包括 GPS 授时、秒脉冲授时、IRIG-B 码以及 NTP(SNTP)、IEEE 1588 时间网络对时等。其中, 有线方式授时有两种: 1PPS+ToD、IRIG-B(DC)码^[24]。其主要用于近距离授时, 具有成本低、精度较高、实现简单、连接快速等优点, 5G 终端与差动保护装置之间可采用该方式。下面分别对其进行说明。

1) 1PPS+ToD

1PPS+ToD 依靠秒脉冲与实时时间信息实现时间同步, 示意图如图 6 所示。

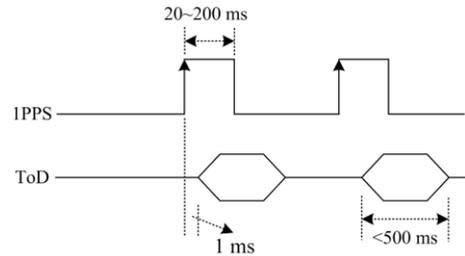


图 6 1PPS+ToD 信号结构图

Fig. 6 Signal structure of 1PPS+ToD

对于 1PPS 信号: 1PPS 信号采用上升沿作为准时沿, 上升时间应小于 50 ns, 脉宽应为 20~200 ms;

对于 ToD 信号: 在 1PPS 信号上升沿 1 ms 后开始传送, 并在 500 ms 内传完, 此 ToD 消息标记当前 1PPS 上升沿时间, 帧速率为 1 次/s, 通过串口进行传输。

2) IRIG-B(DC)码^[25]

IRIG-B(DC)码信号是每秒一帧的时间串码, 其基本的码元是“0”码元“1”码元和“P”码元, 每个码元占用 10 ms 时间, 一帧串码含 100 个码元。码元“0”和“1”对应的脉冲宽度为 2 ms 和 5 ms, “P”码元是位置码元, 对应的脉冲宽度为 8 ms, 结构如图 7 所示。

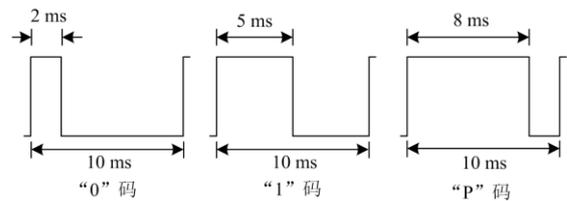


图 7 B 码码元结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of B-code element

连续两个“P”码元表明整秒的开始, 第二个“P”码元的脉冲前沿是“准时”参考点, 相当于整秒的起点, 定义其为“Pr”。每 10 个码元有一个位置码元, 共有 10 个, 定义其为 P1,P2, ..., P9,P0。用于隔离天、时、分、秒的码元。

从 IRIG-B 码的特征可以看出, 其中含有精确的秒脉冲和完整的绝对时间信息。1PPS+ToD 的授时方式与 IRIG-B 码类似, 区别在于线缆数量。IRIG-B 码仅需要一根线缆完成信息传输, 1PPS+ToD 需要两根线缆, 一根用于传输秒脉冲, 另一个用于传输当前秒的绝对时间信息。

5 保护装置之间的数据同步

1PPS+ToD 和 B 码均可作为对时信号为保护装

置提供授时, 本节以 B 码为例, 设计基于 5G 授时的数据同步方法, 实现保护装置之间的数据同步。

来自 5G 终端的 B 码并不能直接被保护装置利用, 需通过 B 码解码器完成解码。B 码解码器从编码信息中判断出整秒的上升沿, 并发出 1PPS 对时脉冲信号。同时, 通过判断 5 ms 和 2 ms 脉冲的位置, 提取出时间信号, 以 BCD 码的形式通过接口输出至装置 CPU, 完成对时。其在差动保护中的应用原理如图 8 所示。

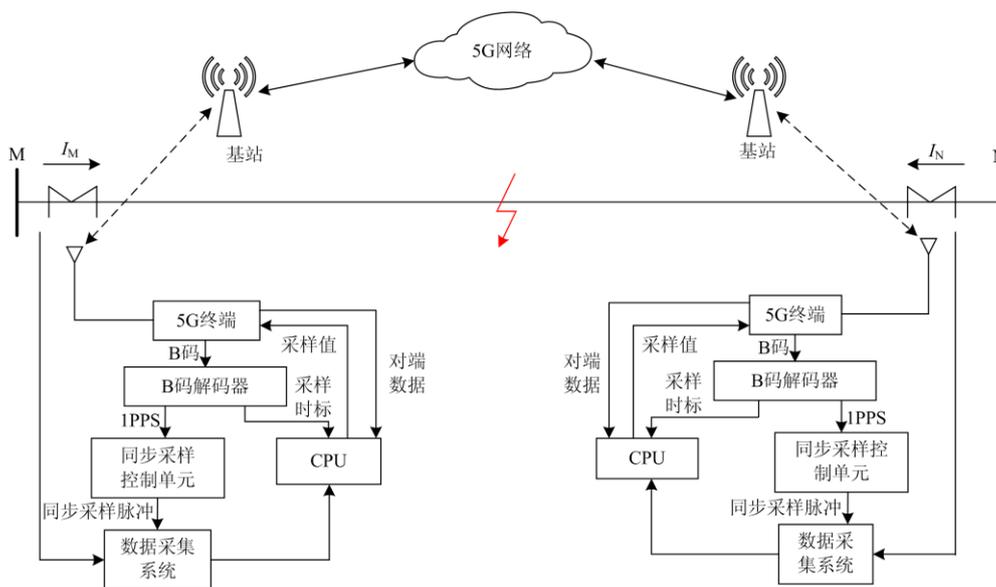


图 8 5G 授时在差动保护中的应用

Fig. 8 Application of 5G timing in differential protection

数据采集系统包括电压形成、滤波、采样保持及数模转换等功能, 使模拟输入量准确地转换为相应数字量; 同步采样控制单元包括高稳晶振、整形电路、计数分频等功能, 输出满足采样要求的时钟信号(采样频率可调), 该时钟每隔 1 s 被 1PPS 信号的上升沿同步一次, 因此当线路两端都配置同样的同步电路后, 两端得到的采样脉冲将具有与两端 1PPS 之间同样高的同步精度; CPU 对数据采集系统输入的原始数据以及对端数据进行分析 and 处理, 完成各种继电保护测量、逻辑和控制功能^[26]。

5G 终端通过 3.2 节的授时方案完成自身的时间同步, 并输出 B 码对时信号, 通过 B 码解码器为同步采样控制单元提供 1PPS, 用于同步采样时钟信号; 同时, 输出的与 1PPS 相对应的时间信息每隔 1 秒向 CPU 传送一次, 以保证 CPU 为采样数据置以时间标签。

本文提出的基于 5G 授时的数据同步方案误差包括 3 部分, 如图 9 所示。

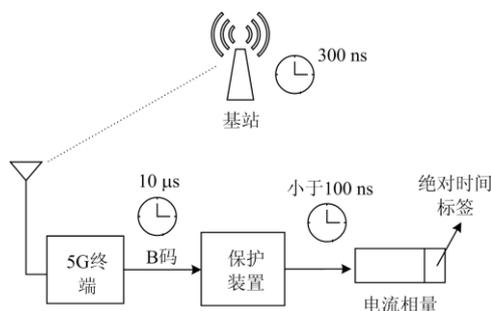


图 9 数据同步误差示意图

Fig. 9 Data synchronization error diagram

1) 基站间的同步误差。线路两侧的 5G 终端可能由同一基站覆盖, 此时无需考虑基站间误差; 也可能由不同基站覆盖(跨基站), 此时 5G 终端的同步误差会叠加基站间的误差^[27]。4G 网络可实现基站间时间同步误差在 1.5 μs 以内, 目前 5G 网络需实现基站间空口时间偏差 300 ns 以内。

2) 基站与 5G 终端的同步误差。该部分误差取

决于上文提到的授时方案,包括 SIB9 中参考时间粒度(250 ns)、TA 粒度(130 ns)、TA 调整误差(130 ns)以及接口延迟(小于 200 ns)等,理论分析,该部分误差小于 1 μ s,但考虑实际无线传输环境噪声及多径干扰,目前有部分 5G 终端生产厂家提出 10 μ s 的授时目标。

3) 数据同步误差。该部分误差包括采样晶振频率及其温漂引起的误差、秒脉冲和晶振产生采样频率过程的误差。采样脉冲的产生由计数晶振次数得到,秒脉冲的到来触发计数,触发时刻为晶振的上升沿,此时会引入误差,最大为一个晶振周期,如图 10 所示。此误差与采样晶振频率有关且每秒不累计。以 25 MHz 晶振为例,每秒该误差最大为 $1/(25 \times 10^6) = 40$ ns。而温漂引起的误差则会不断积累,对于温漂为 2PPM(百万分之一)的晶振,其 1 s 内产生的最大误差为 2 μ s,但该环节经过多年改良已比较成熟,可通过控温和算法优化将此误差限制在可忽略的范围。产生采样频率引起的误差与其生成方法有关,由硬件生成时误差来自硬件电路输入到输出的时延;由软件生成时误差来自编程时延。此误差为 50 ns 以内。

综合各类误差,考虑最不理想的情况,线路两侧输出的电流相量时间偏差为 20.8 μ s,对应两侧电流相角偏差不到 0.5%;完全满足电流差动保护要求。

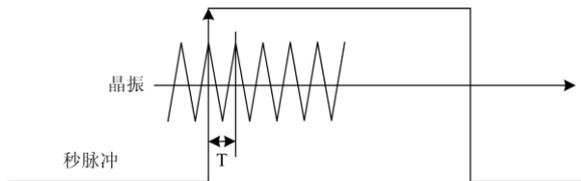


图 10 晶振频率引起的误差

Fig. 10 Error caused by crystal frequency

6 结束语

5G 网络为配网电流差动保护提供了一种经济可靠的数据传输通道,但需研究适配于 5G 网络的电流差动保护数据同步方法。幸运的是 5G 网络中自然携带高精度时间信息,这为解决电流差动保护的数据同步提供了一条新的思路。本文总结了 5G 协议里的时间同步指标及架构,在此基础上,分析了利用 5G 网络中的高精度时间信息实现数据同步的可行性、技术关键和解决思路,并提出了具体的实施方案,为后续差动保护数据同步实用化提供参考。

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 谢民,王同文,徐靖东,等.分布式电源对配网继电保护影响及综合改进保护方案[J].电力系统保护与控制,2019,47(19):78-84.

XIE Min, WANG Tongwen, XU Jingdong, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distribution network and comprehensive improvement of protection scheme[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 78-84.

[4] 江友华,帅禄玮,曹以龙.基于 DDPG 算法的光伏充电站策略优化[J].上海电力大学学报,2020,36(2):201-205.

JIANG Youhua, SHUAI Luwei, CAO Yilong. Photovoltaic charging station strategy based on DDPG[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2020, 36(2): 201-205.

[5] 钱峰,陈艺,刘俊磊,等.大规模风电接入的电力系统协调控制策略[J].广东电力,2019,32(11):12-18.

QIAN Feng, CHEN Yi, LIU Junlei, et al. Coordinated control strategy for power systems with large-scale wind power integration[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11): 12-18.

[6] 王毅,陈启鑫,张宁,等.5G 通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J].电网技术,2019,43(5):1575-1585.

WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric internet of things: application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.

[7] 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.

[8] 王宏延,顾舒娴,完颜绍澎,等.5G 技术在电力系统中的应用与研究[J].广东电力,2019,32(11):78-85.

WANG Hongyan, GU Shuxian, WANYAN Shaopeng, et al. Research and application of 5G technology in power

- systems[J]. *Guangdong Electric Power*, 2019, 32(11): 78-85.
- [9] 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.
- [10] 黄琦东, 戴人杰, 丁聪, 等. 智能化变电站差动保护数据的同步方法[J]. *上海电力学院学报*, 2013, 29(4): 338-342.
- HUANG Qidong, DAI Renjie, DING Cong, et al. Data synchronization methods of differential protection for smart substation[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2013, 29(4): 338-342.
- [11] 汪志彬, 郝俊山. 一种差动保护的数据采样同步新方法[J]. *继电器*, 2007, 35(增刊 1): 94-97.
- WANG Zhibin, HAO Junshan. A new method of data sampling synchronization for differential protection[J]. *Relay*, 2007, 35(S1): 94-97.
- [12] 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. Several sampling synchronization methods in digital current differential protection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1996, 20(9): 46-49, 53.
- [13] 3GPP. Study on communication for automation in vertical domains (Release 16)[Z]. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2020.
- [14] 3GPP. Feasibility study on LAN support in 5G (Release 16)[Z]. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2018.
- [15] 3GPP. Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains (Release 16)[Z]. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2019.
- [16] KHOSHNEVISAN M, JOSEPH V, GUPTA P, et al. 5G industrial networks with CoMP for URLLC and time sensitive network architecture[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(4).
- [17] 3GPP. Study on NR industrial internet of things (IoT) (Release 16)[Z]. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2019.
- [18] 3GPP. Study on 5GS enhanced support of vertical and LAN services (Release 16)[Z]. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2019.
- [19] IMT-2020(5G) 推进组. 5G 同步组网架构及关键技术白皮书[EB/OL]. [2019]. <https://max.book118.com/html/2019/0718/5102333313002104.shtm>.
- [20] 刘颂, 吕京飞. 面向 5G 承载的同步网架构演进[J]. *电信技术*, 2017(9): 22-26.
- LIU Song, LÜ Jingfei. Evolution of synchronous network architecture for 5G bearing[J]. *Telecommunications Network Technology*, 2017(9): 22-26.
- [21] 王悦, 林泳泽. 面向 5G 的高精度时间同步网演进策略[J]. *电信技术*, 2017(8): 55-57.
- WANG Yue, LIN Yongze. High-precision time synchronization network evolution strategy for 5G[J]. *Telecommunications Technology*, 2017(8): 55-57.
- [22] 3GPP. Radio resource control (RRC) protocol specification (Release 16)[Z]. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2020.
- [23] 3GPP. Physical channels and modulation (Release 16)[Z]. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2020.
- [24] 吴玉锋. 面向电力系统的时间同步系统关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- WU Yufeng. Key technological research on power system time synchronization system oriented to power system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [25] 陈家辉. 智能变电站 IRIG-B 码授时问题的分析与解决方案[J]. *无线互联科技*, 2017(17): 102-106.
- CHEN Jiahui. Analysis and solution of IRIG-B code timing problem in the intelligent substation[J]. *Wireless Internet Technology*, 2017(17): 102-106.
- [26] 杨奇逊, 黄少锋. 微型机继电保护基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [27] 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 ICT*, 2020, 18(8): 47-53.

收稿日期: 2020-10-20; 修回日期: 2021-01-25

作者简介:

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

袁通(1996—), 男, 博士研究生, 通信作者, 研究方向为电力系统继电保护、5G 应用; E-mail: yuantongsdu@126.com

苏善诚(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网保护、自动化技术及管理。E-mail: 361952584@qq.com

(编辑 葛艳娜)