

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.01.016

基于 HPLC 通信的配电场域网时间精准同步策略

肖宇¹, 邓汉钧¹, 黄瑞¹, 刘谋海¹, 任卫军², 刘宣³

(1. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410004; 2. 长安大学信息工程学院, 陕西 西安 710064; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 配电场域网内各节点高精度的时间同步, 是实现其业务实时性与精益化的重要技术支撑。针对基于高速电力线宽带载波通信的配电场域网, 文中设计了一种时间逐级逐步精准同步策略。首先, 通信主站通过远程通信网对场域网中心节点实时校时, 使其成为场域网主时钟; 其次, 依托该场域网低时延性、广播机制和网络基准时间, 对网内各节点时钟的时间和频率进行精准监测并获得其偏差; 然后, 通过重新标定节点时钟温补系数方式调整时钟频率, 使节点时间在一个校时周期内逐步达到同步; 最后, 在实验室和应用现场对该场域网时间同步性能进行测试。测试结果显示, 该场域网时间同步准确度在 ± 0.23 s/d 以内, 比窄带电力线载波配电场域网提高了 28%, 且避免了在时间同步过程中出现时间空档或时间重复现象。

关键词: 配电系统; 配电场域网; 高速电力线宽带载波通信; 时间同步策略; 网络基准时间; 晶振温补校准
中图分类号: TM726.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3203(2023)01-0134-09

0 引言

配电场域网主要解决智能电网建设中最后一公里的配送电技术问题^[1], 其业务已从单一的用电信息采集向有序充电、分布式储能、综合能源计量等业务方向扩展, 业务处理的实时性和精益化要求高, 网内各节点高精度的时间同步是实现上述要求的重要技术支撑^[2]。

目前配电系统的信息中心和智能变电站的时间同步, 主要采用同步精度在毫秒级的网络时间协议(network time protocol, NTP)^[3]和同步精度可达纳秒级的精确时间协议(precise time protocol, PTP)^[4]。这 2 种方式均须在网络设备上要有操作系统的支持才能运行相应协议, 网内通信至少要有兆级带宽^[5]。但配电场域网内的网络设备多为嵌入式低成本设备, 并通常面对高度城市化、高密度特别是高层混凝土建筑以及地下室等复杂恶劣场景, 其性能和网内通信速率均不能满足上述条件^[6]。

配电场域网的时间同步目前主要采用以下 3 种方式, 一是基于窄带电力线载波或微功率无线等通信进行网络时间同步, 但因通信质量差、时延大, 网络时间同步准确度较低^[7-8]; 二是网内设备各自采用全球定位系统或北斗定位系统进行时间同步, 但因卫星信号受建筑物遮挡, 会频发对时失败现象^[9-10], 同时一个台区其网内设备通常都在近千台,

使用成本也会增加^[11]; 三是提高网内设备自身的时间精度, 如智能电能表等, 采用带温度补偿的实时时钟主控制器, 在出厂前都会进行多温度点测试校准^[12], 但存在实时时钟晶振老化和备用电池失效等现象^[13]。这些现象造成配电场域网内的部分设备无法满足国家电网相关技术规范 Q/GDW 10354—2020 中的时钟准确度要求(即在参比温度及工作电压范围内时钟准确度不应超过 ± 0.5 s/d), 造成时钟超差, 给营销一线人员的运维带来额外工作负担, 同时也给配电场域网的数据采集率、阶梯电价抄核率、台区同期线损等指标的核算造成较大影响^[14]。

高速电力线宽带载波(high-speed power line broadband carrier, HPLC)通信利用普及和覆盖范围非常广的电力线作为通信介质, 采用先进的多载波正交频分复用技术, 可提供每秒数兆字节的数据传输率。相对窄带电力线通信和微功率无线通信, HPLC 通信的可靠性和稳定性显著提高, 成为配电场域网中一种新的组网通信手段^[15-18]。文中依托 HPLC 通信的低时延性、广播机制和网络基准时间(network time base, NTB)^[19-21], 设计了一种配电场域网逐级逐步时间精准同步策略, 实现网内各节点时间的精准同步与管理, 为配电场域网业务向实时性和精益化方向扩展提供技术保障。

1 基于 HPLC 通信的配电场域网结构

配电场域网使用 HPLC 通信技术, 实现网内各节点之间的通信。中心节点作为网关, 负责整个网络的组网与时钟管理, 其对应实体为集中器。各节

收稿日期: 2022-07-09; 修回日期: 2022-10-27

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5700-202118203A-0-0-00); 陕西省重点研发计划资助项目(2021GY-033)

点主要与中心节点进行数据交换和时间同步,其对应实体为智能电能表。

1.1 智能电能表硬件组成

目前智能电能表多采用多芯模组化设计理念^[22],基于 HPLC 通信方式的智能电能表硬件设计如图 1 所示。

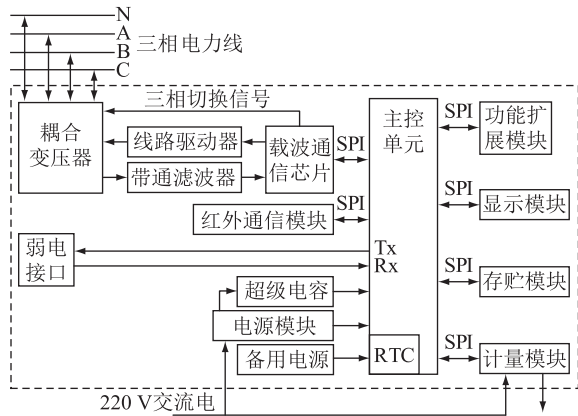


图 1 智能电能表硬件设计

Fig.1 Smart meter hardware design

主控单元是智能电能表的核心,主要负责电能表各模组的管理与协调等功能,带有实时时钟控制器(real-time clock controller, RTC),用来控制时间计算和时钟校准。备用电源,主要是锂电池,在停电或电源模块故障时向时钟模块供电。宽带载波通信模块主要由载波通信芯片、线路驱动器、带通滤波器和耦合变压器四部分组成。其中载波通信芯片选取支持多载波正交频分复用技术的芯片,线路驱动器用于放大发送模拟信号,带通滤波器对接收到的模拟信号进行滤波,耦合变压器用于双向模拟信号与电力线之间的耦合。红外通信模块主要实现电能表与手持数据采集终端的通信。每个模块与主控单元通过串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)协议进行数据通信。

1.2 配电场域网拓扑

基于 HPLC 通信的配电场域网拓扑如图 2 所示。该场域网通过中继节点形成树状网络^[23-24]。集中器所安装的通信模块具有中心节点的地位,是整个网络的网关,负责整个网络的组网与时钟管理,通过光纤、移动通信网、以太网等远程通信网与配电系统信息中心的通信主站进行数据交换,并通过 HPLC 通信方式与网络中各节点进行数据交换。节点 T_1 与 T_2 为 HPLC 通信的中继节点,拥有三相线通信能力和数据中继转发功能;节点 A_1 — A_6 具有 A 相线 HPLC 通信能力;节点 B_1 — B_5 具有 B 相线 HPLC 通信能力;节点 C_1 — C_5 具有 C 相线 HPLC 通

信能力。各节点所对应的实体为安装有 HPLC 通信模块的电能表或采集器。

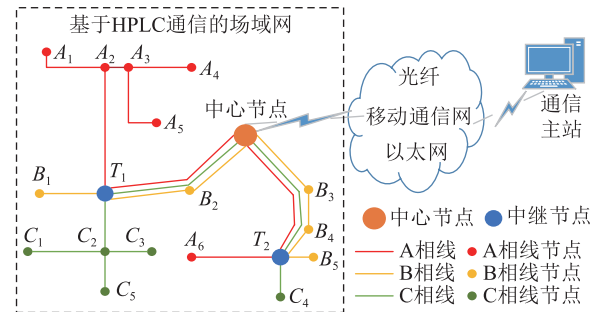


图 2 基于 HPLC 通信的配电场域网拓扑

Fig.2 Topology of distribution field network based on HPLC communication

在该场域网中,时间同步管理采用逐级同步策略。通信主站安装 NTP,主时钟采用营销服务中心标准时钟源,校时精度可达皮秒级;通信主站通过光纤、移动通信网、以太网等远程通信网实时对场域网中心节点进行时间同步,中心节点再通过 HPLC 通信向场域网内各节点进行时间同步。

2 场域网中心节点时间同步策略

通信主站对场域网中心节点(集中器)时间同步策略如图 3 所示。通信主站通过远程通信网实时对场域网中心节点进行时间同步,具体通信方式依据中心节点选配的通信模块确定,目前以第 4 代移动通信网方式为主。首先对集中器时钟进行监测,依据监测结果生成校时清单,再根据校时清单对中心节点进行时间同步。

2.1 集中器时钟监测

首先,主站获取集中器的时钟信息。一方面,集中器主动定时向主站上报心跳帧,主站通过解析心跳帧,获取集中器时钟信息;另一方面,主站编制集中器时钟巡测计划,对计划中的集中器和复电的集中器进行召测,获取集中器时钟信息。对于召测不成功的集中器,则加入到集中器时钟冻结明细表中。

其次,判断集中器与主站的时钟偏差是否超过所设定的阈值(针对市场化交易用户和非市场化交易用户,可设定不同阈值),若是,则加入到校时清单。

2.2 集中器时间同步

主站对集中器进行时间同步时,首先,查询校时清单,获取集中器相关信息。若是面向对象协议集中器,则按国家电网企业标准 DL/T 698.45 下发精准校时参数命令;若是 13 版集中器,则按国家电

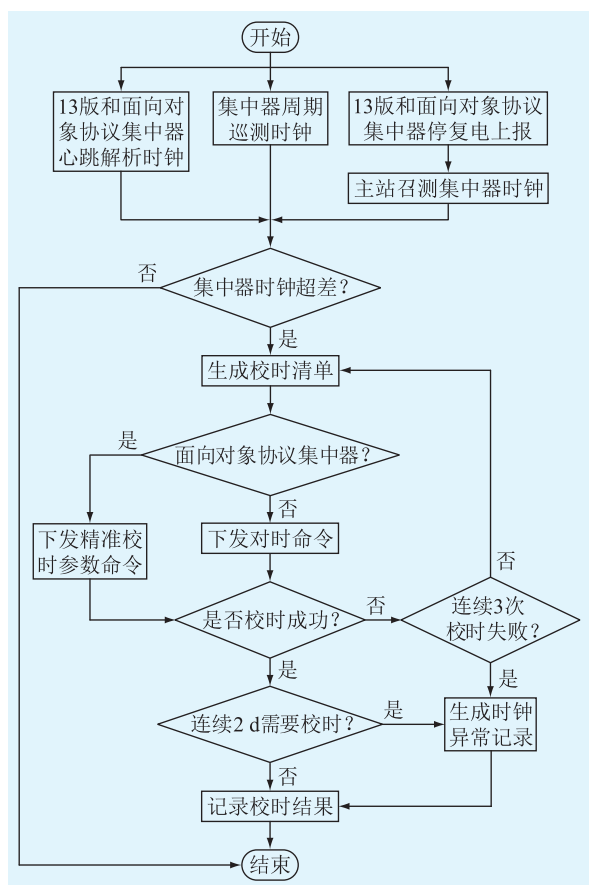


图3 集中器时间同步策略

Fig.3 Concentrator time synchronization strategy

网企业标准 Q/GDW 1376—2013 下发对时命令。

其次,依据集中器回复的信息,判断是否校时成功。若成功,再判断是否连续 2 d 需要校时,若是,则生成集中器时钟异常记录;若校时失败,再判断是否已连续 3 次校时失败,若是,则生成集中器时钟异常记录。

3 场域网普通节点时间同步策略

在一个校时周期内(默认 24 h),基于 HPLC 通信的场域网普通节点时间同步过程如图 4 所示,该过程包括时钟时间监测、时钟频率监测、时钟校准策略和时钟频率调整 4 个阶段。



图4 普通节点时间同步过程

Fig.4 Time synchronization process of general nodes

首先,以场域网中心节点为主时钟,利用 HPLC 通信的广播信道,对网内节点时钟时间进行精准监测,获得节点时钟的时间偏差;其次,以 HPLC 的 NTB 为基线,对网内节点时钟频率进行监测,获得节点时钟的频率偏差;再次,按照时钟频率与时间

逐步同步的策略,计算节点在一个同步周期内各步所需同步的时间偏差,据此计算出各步所需调整的时钟频率值;最后,重新设定节点时钟温补系数调整其时钟频率,使节点时钟的频率与时间逐步修正到准确值。

3.1 场域网节点时钟时间监测

基于 HPLC 通信的场域网中,中心节点对各节点时钟时间的监测分为广播校时监测和精准校时监测 2 个过程,如图 5 所示。

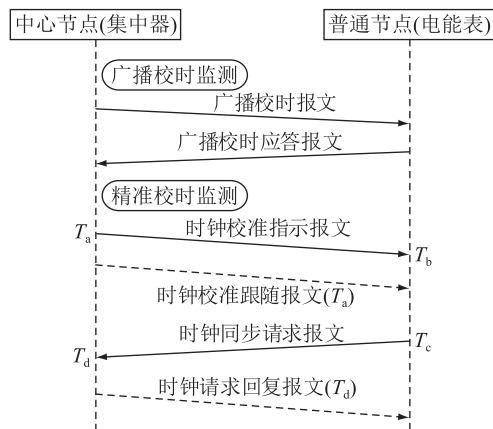


图5 节点时钟时间监测过程

Fig.5 Node clock time monitoring process

3.1.1 广播校时监测

一个校时周期的开始时间通常选在零点过后的时间段,中心节点通过其 HPLC 通信广播信道,按照国家电网企业标准 Q/GDW 1376.2—2013 使用 AFN=05H, FN=F3 报文,向全网所有节点进行广播校时,广播校时报文携带报文精确发送时间。各节点在收到该报文后,将报文中携带的发送时间与自己的时钟时间进行比较,按照国家电网企业标准 Q/GDW 1376.1—2013,使用请求 3 类数据 AFN=0EH 上行报文,将计算的时间偏差绝对值携带在广播校时应答报文中发回中心节点。

配电场域网会遇到邻域干扰、本地网络层级深或噪声干扰等使通信质量恶劣的情况^[25]。因此,中心节点首先比较广播校时报文的发送时间与接收到的各节点的广播校时应答报文时间,来判断各节点的通信延迟。当该延迟大于所设阈值,如 150 ms (该阈值设置与网络校时精度相关,精度要求越高,该阈值设置越小)时,说明中心节点到该节点的通信质量差,必须考虑网络校时的通信延迟,将该节点添加到校时节点列表。其次,对于通信延迟小的节点,若广播校时应答报文中所携带的时间偏差绝对值小于所设阈值(如 0.15 s)时,说明该节点时间同步准确;否则说明该节点需要时钟校准,将该节

点添加到校时节点列表。

3.1.2 精准校时监测

中心节点对校时节点列表中的节点依次进行精准校时监测,如图 5 所示,以获得其时钟时间的精确偏差。其过程如下:

(1) 中心节点从校时节点列表中依次选取每个节点,查询路由表,获取中心节点到该节点的最优路由。

(2) 中心节点按预设监测周期向该节点发送时钟校准指示报文,并记录发送该报文的精确时间 T_a 。

(3) 中心节点继续发送时钟校准跟随报文,该报文携带时钟校准指示报文的精确发送时间 T_a 。

(4) 当该节点收到时钟校准指示报文时,记录接收时间 T_b ,随后再从接收到的时钟校准跟随报文中,解析出时钟校准指示报文的发送时间 T_a 。设中心节点到该节点的延时为 T_{D-MS} ,该节点时钟时间偏差为 T_{OFF} ,则可得到式(1)。

$$T_b - T_a = T_{D-MS} + T_{OFF} \quad (1)$$

(5) 该节点再按原路径向中心节点发送时钟同步请求报文,并记录发送时刻 T_c 。

(6) 当中心节点收到该节点发送的时钟同步请求报文时,记录接收时刻 T_d ,并将 T_d 放入时钟请求回复报文中,发回给该节点。

(7) 该节点收到时钟请求回复报文后,从该报文中解析出 T_d 。设该节点到中心节点的延时为 T_{D-SM} ,则可得到式(2)。

$$T_d - T_c = T_{D-SM} - T_{OFF} \quad (2)$$

假设中心节点与该节点之间的同一路径往返时间是相等的,即 $T_{D-SM} = T_{D-MS} = T_D$ 。根据式(1)和式(2),则可计算出该节点与中心节点时钟的时间偏差 T_{OFF} 和链路延时 T_D 。

$$T_{OFF} = (T_b - T_a + T_c - T_d)/2 \quad (3)$$

$$T_D = (T_b - T_a + T_d - T_c)/2 \quad (4)$$

(8) 按照预设的监测周期,重复上述过程 7 次,将得到的 7 个 T_{OFF} 值。去除最大值和最小值,取剩余 5 个值的平均值,就能得到该节点时钟与中心节点时钟的时间偏差。如果时间偏差大于所设阈值(如 10 min),则向中心节点上报节点时钟异常事件。

3.2 场域网节点时钟频率监测

在基于 HPLC 通信的场域网中,为使全网所有节点能统一理解和使用时隙分配,以及正确地发送和解析报文信号,所有节点必须同步到一个共用时钟,即 NTB。该时钟由中心节点通过一个 32 位的计时器来维护。

在场域网运维阶段,中心节点会定期在广播信道发送中央信标,在信标的信标时间戳字段嵌入一个 32 位的“信标时间戳”,即 NTB 值,其误差小于 $25 \mu s$ ^[26]。在每个信标周期的起始时刻(即零点),中心节点会指定起始的 NTB 值。网内各节点在本地也维护一个 32 位计时器(NTB_STA),各节点通过接收中心节点的中央信标或代理节点的代理信标来保持与中心节点的 NTB 同步。

在一个校时周期内,对场域网内的节点进行时钟频率监测的过程如图 6 所示。

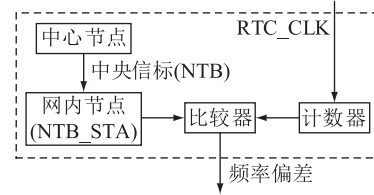


图 6 节点时钟频率监测过程

Fig.6 Node clock frequency monitoring process

(1) 在一个校时周期开始时,节点设置一个计数器,该计数器的计数频率基准采用实时时钟的频率(RTC_CLK)。

(2) 在每个信标周期开始时,节点通过接收中心节点发送的中央信标获取 NTB 初始值。

(3) 启动计数器,初值设置为第(2)步获取的 NTB 初始值。

(4) 在该信标周期内,节点通过中央信标或代理信标对本地 NTB_STA 进行同步。

(5) 当该信标周期结束时,比较计数器与本地 NTB_STA 的偏差,获得在一个信标周期内实时时钟频率的偏差。

(6) 转至第(2)步,再次计算在一个信标周期内实时时钟频率的偏差,连续计算 10 次。

(7) 对获取的 10 次频率偏差值进行均值化处理,获得实时时钟频率的偏差率。

3.3 场域网节点时间同步策略

场域网内节点的时钟精准同步包括时间同步和频率校准两方面。如果采用直接时间同步方式,当用户查询用电信息时,会出现时间空档或时间重复现象,导致用户投诉。因此,时钟精准同步采用在一个校时周期内,通过调整时钟频率使时钟时间逐步达到同步的策略。不同时间段采用不同调整步进值,如在校时周期开始零点过后这段时间,大多数用户的用电量相对较少,同步的步进值可加大。假设节点时钟时间偏差为 T_{OFF} ;调整步数 $S = 8$;每步调整时长为 T_s ;每步调整步进权重为 $V_i(i = 1, 2, \dots, 8)$,权重递减,以此说明时钟逐步校准策

略,如图7所示。

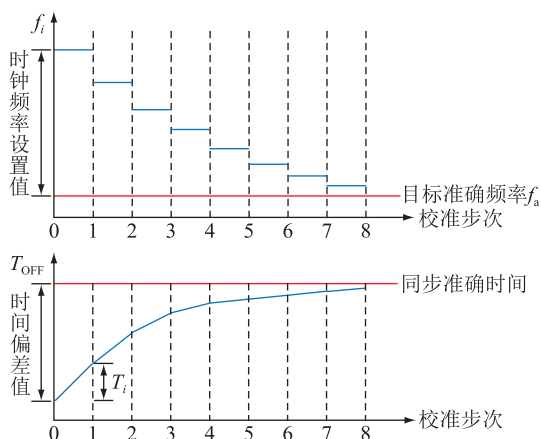


图7 逐步时间同步策略示意

Fig.7 Schematic diagram of step-by-step time synchronization strategy

(1) 依据时钟频率监测模块获取的节点时钟频率偏差率以及当前实时时钟频率 RTC_CLK,可计算出实时时钟的目标准确频率 f_a 。

(2) 设置一个定时器,定时器时设长为 T_s ,初始化定时器重启次数 $N = 1$;

(3) 计算第 i 步需要调整的时钟时间偏差 T_i ,计算如式(5)所示。

$$T_i = T_{OFF} V_i / \sum_{j=1}^S V_j \quad (5)$$

(4) 依据时钟目标准确频率 f_a 、本步调整的时钟时间偏差 T_i 、每步调整时长 T_s ,可计算出本步需要设置的目标时钟频率 f_i ,计算如式(6)所示。

$$f_i = T_i f_a / T_s + f_a \quad (6)$$

(5) 设置节点目标时钟频率为 f_i ,并等待定时器溢出中断后,置 $N = N + 1$,若 $N \leq S$,重启定时器,并转第(3)步,否则校时过程结束。

通过此策略,可使节点时钟的频率和时间在一个校时周期内逐步逼近其准确值,避免在校时过程中出现时间空档或时间重复的现象。

3.4 节点时钟频率调整方法

智能电能表多采用带有实时时钟的控制器,用来控制时间计算和时钟校准。为提高时钟秒脉冲误差校准的准确度和灵活性,生产过程中将时钟晶振频率的温飘曲线分为若干段,并测试每段温补系数,将其作为原始值存贮到设备中,后续使用再依据晶振频率实时偏差对该系数进行修正。带温度补偿调整功能的实时时钟校准原理如图8所示。

首先,依据目标时钟频率 f_i 与当前时钟频率的偏差,重新标定当前温度段的温补系数;其次,时钟校准自动温补模块采用新的温补系数,依据当前实

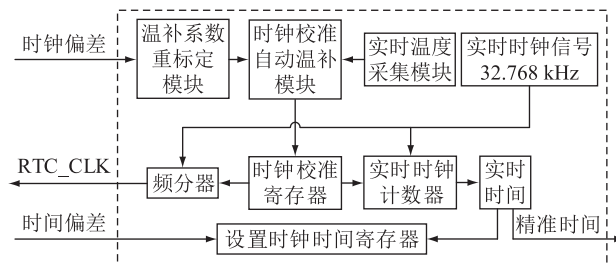


图8 实时时钟校准原理

Fig.8 Principle of real-time clock calibration

时温度,计算实时温补时钟校准值和频分系数;最后,将计算的校准值和频分系数写入时钟校准寄存器,实现对实时时钟计数器和频分器的修正,从而实现时钟时间和输出时钟脉冲频率的调整。也可通过设置时钟时间寄存器实现对时钟时间的直接调整。

3.4.1 温补系数的重新标定

如果温度补偿后的时钟频率仍存在偏差,说明时钟晶振特性发生了变化,则须对原标定的温补系数重新标定。假定在某温度下,测定的当前时钟频率偏差为 f_n ,该温度下原标定的温补系数为 K_0 ,原有频率偏差为 f_0 ,则可计算该温度下新的温补系数 K_n 为:

$$K_n = K_0 - \lambda \frac{f_n - f_0}{f_0} \quad (7)$$

式中: λ 为依据该时钟晶振特性所标定的常数。

3.4.2 自动温补的时钟频率校准

采用温度补偿方式对时钟频率偏移的校准通过以下7步自动完成。

(1) 加载参数。加载参数包括各区段的温补系数、区段温度界值和 P_0-P_6 值。参数加载后,若温补区间参数被重新修订,则应重新加载,否则用已加载参数。

(2) 设置温度采样参数。设置参数包括采集频率、级联梳状滤波器降采样率、是否分压、模数转换时间和滤波器忽略采样点数等。

(3) 计算实时温度。为避免温度测量过程中出现跳差,取数次测量值的均值作为温度采样值 X ,同时为使测量出的温度更加精确,对测量出的温度进行校正。实时温度 T 的计算如式(8)所示。

$$T = P_0 X^2 + P_1 X + P_2 \quad (8)$$

式中: P_0, P_1, P_2 为依据该温度采集数模转换特性测量出的校正参数。

(4) 确定温补系数。将计算所得实时温度值与区段温度界值进行比较,确定温补区间 t 以及与该区间相对应的温补系数 K_t 。

(5) 计算秒脉冲误差。晶振频率温飘曲线可用一个二阶方程近似表示,依据温补系数 K_t 和实时温度 T ,计算当前秒脉冲频率偏差率 f_{Δ} ,如式(9)所示。

$$f_{\Delta} = K_t (T - T_{ct})^2 + P_4 \quad (9)$$

式中: T_{ct} 为第 t 段温飘曲线的中心温度; P_4 为在常温下时钟频率的偏差值。

(6) 计算时钟校准值和频分系数。时钟频率校正值 f_c 与频分系数 f_d 的计算分别为:

$$f_c = f_{\Delta} P_5 \quad (10)$$

$$f_d = P_c / 2 - f_{\Delta} P_6 \quad (11)$$

式中: P_5 为已标定完成的频率偏差为 1×10^{-6} 时 f_c 的值; P_c 为 32.768 kHz; $P_6 = P_c \times 2.048 \times 10^{-4}$ 。

(7) 向时钟校准寄存器设置 f_c 与 f_d 的值,然后转第(3)步,重新进行时钟频率自动温补。

4 场域网时间同步性能测试

4.1 节点时钟频率温补系数初标定

在全温度下对参与试验的场域网节点(智能电表)实时时钟所使用 32.768 kHz 晶振的频率温飘曲线进行测试。将温飘曲线分为 5 个温度区段,依据测试值计算每段温补系数,测试值与计算的温补系数如表 1 所示。

表 1 晶振频率温飘曲线测试数据

Table 1 Test data of crystal frequency temperature drift curve

曲线分段/°C	段中心频率/kHz	温补系数
-50~-20	317.8	20 827
-19~0	328.0	21 495
1~39	336.0	22 020
40~59	374.1	24 517
60~99	385.4	25 257

4.2 实验室环境下测试

在实验室搭建了如图 9 所示 64 节点 14 层级的菱形拓扑的测试平台。

将平台各节点(智能电表)放入屏蔽箱中,由程控衰减器调节节点之间通信,实现阻断、开放节点 HPLC 链路通信功能,以模拟不同网络通信环境和网络层级。屏蔽箱内及屏蔽箱之间测试设备的连接如图 10 所示。

HPLC 信号通过连接程控衰减器后进入模拟网络,并经载波耦合器耦合到电力线上,与电能表载波模块进行通信。电能表载波信号通过电源滤波器将载波和电源信道分离,可使市电供电和载波通信信道完全隔离,电力负荷不会对通信信道造成干扰。

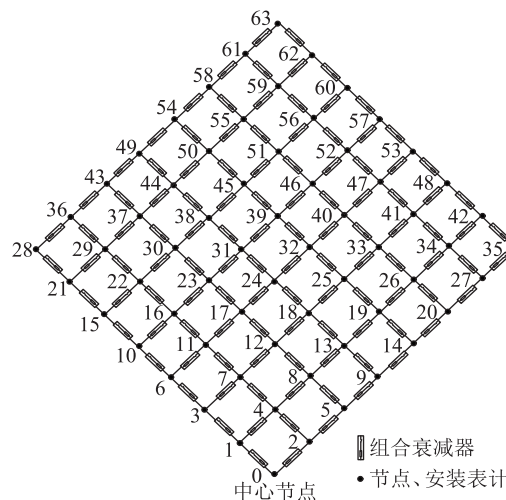


图 9 实验室测试平台拓扑

Fig.9 Laboratory test platform topology

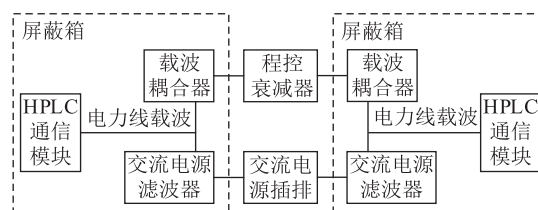


图 10 屏蔽箱测试设备连接示意

Fig.10 Test equipment connection diagram of shield box

4.2.1 场域网中心节点时间同步性能测试

用一台主机模拟通信主站,分别采用光纤、4G 移动通信网、以太网通信,对 10 个包括 13 版和 20 版等不同类型集中器的时间同步性能进行测试。测试中随机调整主机时钟和中心节点时钟,测试 10 个校时周期,每个校时周期对不同通信方式分别模拟 20 种状态,测试数据统计结果如表 2 所示。

表 2 中心节点时间同步性能

Table 2 Central node time synchronization performance

测试指标	测试数据
停电校时召测成功率/%	99.86
时钟超差上报准确率/%	100
时钟异常上报准确率/%	100
光纤通信方式时间同步准确度/(ms·d ⁻¹)	±63
4G 移动通信方式时间同步准确度/(ms·d ⁻¹)	±120
以太网通信方式时间同步准确度/(ms·d ⁻¹)	±87

测试结果显示,文中提出的校时方法能对所测各类集中器进行时间同步,测试结果均高于国家电网相关标准要求。时间同步准确度主要取决于集中器与通信主站之间的组网通信方式和通信质量。

4.2.2 场域网普通节点时间同步性能测试

采用同一批次电能表,分别测试采用文中策略的 HPLC 场域网、采用直接校时策略的 HPLC 场域

网和窄带电力线载波(NPLC)场域网中普通节点的时间同步性能。各场域网均测20个校时周期,在每个校时周期随机更改中心节点时间、各节点时间和各衰减器的衰减率。在每个校时周期结束后,记录各节点时钟数据。测试完成后的统计数据如表3所示。

表3 普通节点时间同步性能
Table 3 General node time synchronization performance

测试指标	文中策略- HPLC	直接校时- HPLC	NPLC
时钟偏差上报准确率/%	99.96	98.76	96.21
时钟异常上报准确率/%	100	99.46	98.12
节点时间同步准确度/(s·d ⁻¹)	±0.23	±0.27	±0.32

测试结果显示,采用文中策略的HPLC场域网,在模拟的各个复杂HPLC通信环境下,各节点均能在一个校时周期内,通过调整时钟频率的方式,使节点时间逐步达到同步,同步准确度在±0.23 s/d以内,比采用直接校时策略的HPLC场域网和窄带电力线载波场域网分别提升15%和28%,另外2项指标也有所提升。

4.3 实际环境下测试

选取湖南省长沙市某城乡结合部某台区进行测试,该台区具有低、中、高层建筑群以及散居住房,具有典型城乡配电场域网的使用环境。台区共有376户,部署采用文中策略的HPLC通信配电场域网,与通信主站采用4G移动通信进行连接,按国家电网对配电场域网的测试规范对场域网各项指标进行测试,特别是各节点的时间同步性能,测试历时60 d。测试结果显示,该场域网的时间同步准确度在±0.23 s/d以内,所测信息抄收与时间同步等各项指标均满足国家电网相关标准。

5 结论

配电场域网内各节点高精度的时间同步,是实现其业务实时性和精益化的重要技术支撑。依托HPLC通信的低时延性、广播机制和NTB,文中设计了一种逐级逐步时间精准同步策略,在实验室和应用现场对采用该策略的场域网时间同步性能进行了测试,测试结果表明文中所提策略具有以下优点:

(1) 采用逐级逐步时间精准同步策略的HPLC场域网,其时间同步准确度在±0.23 s/d以内,高于国家电网相关标准要求,没有增加网络设备成本。

(2) 通过调整网内节点时钟频率的方式,使节点时间同步的稳定性更好。

(3) 采用所提策略可避免在时间同步过程中出现时间空档或时间重复的现象。

参考文献:

[1] 张晶,代攀,吴天京,等. 新一代智能电网技术标准体系架构设计及需求分析[J]. 电力系统自动化,2020,44(9):12-20.
ZHANG Jing, DAI Pan, WU Tianjing, et al. Architecture design and demand analysis of new generation technical standard system for smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 12-20.

[2] 闫群民,穆佳豪,马永翔,等. 分布式储能应用模式及优化配置综述[J]. 电力工程技术,2022,41(2):67-74.
YAN Qunmin, MU Jiahao, MA Yongxiang, et al. Review of distributed energy storage application mode and optimal configuration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 67-74.

[3] 曾庆琦. 高精度网络时间同步的研究与实现[D]. 武汉:中国科学院大学(中国科学院武汉物理与数学研究所),2020.
ZENG Qingqi. Research and implementation of high-precision network time synchronization[D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences), 2020.

[4] 赵忠明,韩亮,胡炯,等. 电力系统SDH网络非对称路径PTP对时策略[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(9):150-157.
ZHAO Zhongming, HAN Liang, HU Jiong, et al. PTP strategy for asymmetric path in the SDH network of a power system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 150-157.

[5] GUTIÉRREZ-RIVAS J L, TORRES-GONZÁLEZ F, ROS E, et al. Enhancing white rabbit synchronization stability and scalability using P2P transparent and hybrid clocks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(11): 7316-7324.

[6] AT A, NMP A. Automated demand response in smart distribution grid: a review on metering infrastructure, communication technology and optimization models[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 206: 107835.

[7] 钱斌,蔡梓文,肖勇,等. 电力系统时间同步攻击研究综述[J]. 电网技术,2020,44(10):4035-4045.
QIAN Bin, CAI Ziwen, XIAO Yong, et al. Review on time synchronization attack in power system[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 4035-4045.

[8] 史建超,谢志远. 面向电力物联网信息感知的低压电力线与微功率无线通信融合方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(10):147-157.
SHI Jianchao, XIE Zhiyuan. Fusion method of low voltage power line and micro power wireless communication for information perception of power Internet of Things[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 147-157.

[9] 麦锋. 变电站GPS对时系统的安装关键点探析[J]. 电工技术,2018(19):89-91.
MAI Feng. Discussion on the key points of installation of GPS time synchronization system in substation[J]. Electric Engineering, 2018(19): 89-91.

[10] 张赢,魏文震,李江,等. 基于北斗授时的μPMU测量误差

- 综合分析[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(8):83-91.
ZHANG Ying, WEI Wenzhen, LI Jiang, et al. Comprehensive measurement error analysis of μ PMU based on Beidou time service[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8):83-91.
- [11] 陈皓勇,蔡伟钧,陈健润. 能量与信息融合的电力物联网技术[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(22):8-17.
CHEN Haoyong, CAI Weijun, CHEN Jianrun. Power Internet of Things technology with energy and information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22):8-17.
- [12] HAAPALA T, LISCIDINI A, HALONEN K A I. Temperature compensation of crystal references in NB-IoT modems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I:Regular Papers, 2020, 67(7):2467-2480.
- [13] 薛冲. 基于晶体振荡器的老化建模及其智能补偿[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
XUE Chong. Aging modeling intelligent compensation based on crystal oscillator[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [14] 刘晨,白泰,王家驹,等. 用户用电信息采集系统的深化应用研究综述[J]. 电测与仪表,2022,59(2):1-8.
LIU Chen, BAI Tai, WANG Jiaju, et al. Review on the deepening application of electricity consumption information acquisition system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2):1-8.
- [15] 王鸿玺,唐如意,吴一敌,等. 基于 HPLC 的智能抄表技术在客户侧泛在电力物联网中的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(3):92-98.
WANG Hongxi, TANG Ruyi, WU Yidi, et al. Research and application of smart meter reading technology based on HPLC in customer side universal power Internet of Things [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3):92-98.
- [16] PINTO-BENEL F A, BLANCO-VELASCO M, CRUZ-ROLDÁN F. Throughput analysis of wavelet OFDM in broadband power line communications [J]. IEEE Access, 6:16727-16736.
- [17] 王清,荆臻,李琮琮,等. 宽带电力线载波通信物理层资源分配新算法[J]. 电测与仪表,2021,58(7):124-129.
WANG Qing, JING Zhen, LI Congcong, et al. A novel algorithm of physical layer resource allocation for broadband power line carrier communication [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7):124-129.
- [18] 付志达,闫冠峰,丁浩,等. 高速电力线载波和微功率无线双模通信在配电台区的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(6):50-56.
FU Zhida, YAN Guanfeng, DING Hao, et al. Application of HPLC and RF dual-mode communication in distribution transformer area [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(6):50-56.
- [19] MLÝNEK P, RUSZ M, BENEŠ L, et al. Possibilities of broadband power line communications for smart home and smart building applications [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2021, 21(1):240.
- [20] 金鑫,肖勇,曾勇刚,等. 低压电力线宽带载波通信信道建模及误差补偿[J]. 中国电机工程学报,2020,40(9):2800-2809.
JIN Xin, XIAO Yong, ZENG Yonggang, et al. Modeling and error compensation for low-voltage broadband power line communications [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9):2800-2809.
- [21] SHLEZINGER N, SHAKED R, DABORA R. On the capacity of MIMO broadband power line communications channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(10):4795-4810.
- [22] 刘彬德,蔡高琰,梁炳基,等. 多芯模组化智能物联电能表的设计[J]. 物联网技术,2021,11(7):81-85.
LIU Binde, CAI Gaoyan, LIANG Bingji, et al. Design of multi-core modular intelligent IoT watt-hour meter [J]. Internet of Things Technologies, 2021, 11(7):81-85.
- [23] 黄瑞,刘超,刘谋海,等. 基于 HPLC 与 RF 自适应通信的配电场域网[J]. 电力系统及其自动化学报,2022,34(1):76-83.
HUANG Rui, LIU Chao, LIU Mouhai, et al. Heterogeneous field network for power distribution grid based on HPLC and RF adaptive communication [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(1):76-83.
- [24] 王贤辉,郝伟琦,李铮,等. 基于高速电力线载波的客户侧智慧能源高效数据采集方法[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(9):84-92.
WANG Xianhui, HAO Weiqi, LI Zheng, et al. Method of high efficient data acquisition in customer-side smart energy system based on HPLC [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(9):84-92.
- [25] 景皓,张智远,庞先海,等. 一种低压电力线载波通信主动抗干扰技术[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(5):701-708.
JING Hao, ZHANG Zhiyuan, PANG Xianhai, et al. Active anti-jamming technique for low voltage power line carrier communication [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(5):701-708.
- [26] IEEE standard for medium frequency (less than 12 MHz) power line communications for smart grid applications [J]. IEEE Std 1901 1-2018, 2018:1-192.

作者简介:



肖宇

肖宇(1972),男,硕士,高级工程师,从事智能电网信息通信工作(E-mail:1829875087@qq.com);

邓汉钧(1976),男,学士,高级工程师,从事电能计量工作;

黄瑞(1989),男,硕士,高级工程师,从事用电采集系统通信工作。

Precise time synchronization strategy of power distribution field network based on HPLC communication

XIAO Yu¹, DENG Hanjun¹, HUANG Rui¹, LIU Mouhai¹, REN Weijun², LIU Xuan³

(1. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China;

2. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: The high-precision time synchronization of each node in the power distribution field network is an important technical support for realizing real-time and refined business. For the power distribution field network based on high-speed power line broadband carrier communication, a step-by-step precision time synchronization strategy is designed. Firstly, the clock of the central node is calibrated in real-time by the communication master station through the long-distance communication network and used as the master clock of the field network. Secondly, relying on the low latency, the broadcast mechanism, and the network time base of the field network, the time and frequency of the clocks of each node in the network are accurately monitored and their deviations are obtained. Thirdly, the clock frequency is adjusted by re-calibrating the temperature compensation coefficient of the node clock, so that the node time is gradually synchronized within a timing cycle. Finally, the time synchronization performances of the field network are tested in the laboratory and job site. The test results show that the time synchronization accuracy of the field network is within ± 0.23 s during a day, which is 28% higher than that of the power distribution field network based on narrowband power line carrier, and these phenomena of time gap or time repetition are avoided in the time synchronization process.

Keywords: power distribution system; power distribution field network; high-speed power line broadband carrier communication; time synchronization strategy; network time base; crystal oscillator temperature compensation calibration

(编辑 陆海霞)

(上接第 133 页)

附录 A

$$\begin{cases} U_1 = \frac{-k_1 R U_{\text{ref}3} + k_3 R U_{\text{ref}1} + k_3 R_1 U_{\text{ref}1} + k_3 R_p U_{\text{ref}1} + RR_1 U_{\text{ref}1} + RR_3 U_{\text{ref}1} + R_1 R_3 U_{\text{ref}1} + RR_n U_{\text{ref}1} + R_1 R_n U_{\text{ref}1} + RR_p U_{\text{ref}1} + R_3 R_p U_{\text{ref}1} + R_n R_p U_{\text{ref}1}}{RR_1 + RR_3 + R_1 R_3 + RR_n + R_1 R_n + RR_p + R_3 R_p + R_n R_p + k_1 k_3 + k_1 R + k_3 R + k_1 R_3 + k_3 R_1 + k_1 R_n + k_3 R_p} \\ U_3 = \frac{k_1 R U_{\text{ref}3} - k_3 R U_{\text{ref}1} + k_1 R_3 U_{\text{ref}3} + k_1 R_n U_{\text{ref}3} + RR_1 U_{\text{ref}3} + RR_3 U_{\text{ref}3} + R_1 R_3 U_{\text{ref}3} + RR_n U_{\text{ref}3} + R_1 R_n U_{\text{ref}3} + RR_p U_{\text{ref}3} + R_3 R_p U_{\text{ref}3} + R_n R_p U_{\text{ref}3}}{RR_1 + RR_3 + R_1 R_3 + RR_n + R_1 R_n + RR_p + R_3 R_p + R_n R_p + k_1 k_3 + k_1 R + k_3 R + k_1 R_3 + k_3 R_1 + k_1 R_n + k_3 R_p} \end{cases} \quad (\text{A1})$$

Secondary voltage and current control strategy based on the DCT in true bipolar DC distribution network

GUAN Shangshu, TAO Shun, MA Xihuan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China

Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In the true bipolar DC distribution network, due to the difference in cable impedance, the traditional bottom droop control has inherent contradictions between reducing voltage deviation and improving shunt accuracy, which affect the stability of the system and the economy of operation. Based on the underlying control, a voltage-current secondary control strategy based on DC/DC transformer (DCT) suitable for true bipolar topology is proposed. The control strategy is based on communication to collect the current of parallel DCT and the voltage of series DCT with different polarity. The consistency algorithm is adopted to achieve convergence of current control and voltage control, thereby achieving the optimal load distribution and effectively suppressing voltage imbalance. A true bipolar DC distribution network model is built by PSCAD/EMTDC. The simulation and evaluation results verify the effectiveness in diverse working conditions, adaptability to different topologies and reliability when a fault occurs in a distribution network of the proposed control strategy.

Keywords: true bipolar; DC distribution network; droop control; DC/DC transformer (DCT); consensus algorithm; secondary control

(编辑 刘晓燕)