

基于过零偏移检测的分布式台区户变关系辨识研究

梁捷¹, 梁广明², 黄水莲²

(1. 广西电力工程建设公司, 广西 南宁 530003; 2. 南宁百会药业集团有限公司, 广西 南宁 530003)

摘要:针对传统基于高速电力线载波通信技术的集中式台区户变关系辨识方法在不同的载波厂家设备混装时易出现辨识失败的问题,提出了一种基于分布式模式和双沿过零偏移检测的台区辨识方案。文中设计了由集中器经通信模块主节点向从节点下发台区特征,在从节点处进行特征比对并判断电能表台区归属的分布式辨识模式。此外,针对不同高速电力线载波通信模块对特征信号沿过零检测算法的兼容性问题,设计了交流电信号双沿用户特征采集和辨识算法及相关通信协议支持。最后,通过对不同辨识模式的抄读性能以及抄读和辨识失败的实例进行分析,验证了所提方案的可行性。

关键词:高速电力线载波通信;分布式;双沿;台区辨识

中图分类号: TM 933 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)04-0066-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220413

Research on User-transformer Relation Identification in Distributed Station Areas Based on Zero-crossing Offset Detection

LIANG Jie¹, LIANG Guangming², HUANG Shuilian²

(1. Guangxi Electric Power Engineering Construction Company, Nanning 530003, Guangxi, China;

2. Nanning Baihui Pharmaceutical Group Co., Ltd., Nanning 530003, Guangxi, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional user-transformer relation identification method in centralized station area based on high-speed power line carrier (HPLC) is prone to having identification failure when the equipment of different carrier manufacturers are mixed, a station area identification scheme based on distributed mode and double edge zero-crossing offset detection is proposed. A distributed identification mode is designed, in which the concentrator sends the station area characteristics to station (STA) through central coordinator (CCO), compares the characteristics at STA and judges the ownership of meter station area. In addition, aiming at the compatibility of different HPLC communication modules with the feature signal zero-crossing detection algorithm, the AC signal double edge user feature acquisition and identification algorithm and the related communication protocol support are designed. Finally, the feasibility of the proposed scheme is verified by analyzing the reading performance of different identification modes and the examples of reading and identification failure.

Key words: high-speed power line carrier; distributed; double edge; station area identification

0 引言

准确建立台区户变关系是确保台区线损准确计算的关键之一^[1-2]。台区户变关系辨识技术可通过高速电力线载波^[3] (high-speed power line carrier, HPLC) 技术确定各用户计量点与低压配电变压器的归属关系,提高户变关系判断的准确性,帮助电网公司完善用户的基础数据资料,确保业扩用电报装

管理时不出现漏装、多装等问题,提高台区档案管理水平,同时也有利于台区线损的管理,避免偷换电能表计、重复装电能表等窃电行为^[4],提高电网经济运行水平。

作为面向电力抄表的高速电力线通信技术, HPLC 的通信工作频率范围主要包括 2.4~5.6 MHz、2~12 MHz、0.7~3.0 MHz、1.7~3.0 MHz 等,相比传统的窄带载波方式具有相对较宽的信道带宽,通信速率可根据需要在 2.048 kb/s~2.4 Mb/s 之间任意

选择^[5],可有力支撑高频数据采集、停电主动上报、时钟精准管理、相位拓扑识别、台区自动识别、ID统一标识管理、档案自动同步、通信性能监测和网络优化等高级应用功能的实现^[6]。此外,相对于窄带载波通信方式,电力线在高频段的噪声相对较弱,通信可靠性和稳定性显著提升。

文献[7]依据不同台区工频交流电过零相位偏移量不同的特征来辨识台区户变关系。具体是由从节点将偏移量原始数据发送至原归属主节点,由主节点进行比对判断。由于未对工频交流电过零信号的上升和下降特征进行区分,有误判的可能。此外,特征采集和识别的工作集中在主节点进行,主节点的数据处理压力较大。下面提出一种基于交流电双沿过零偏移检测的分布式台区辨识方案,介绍了双沿检测的原理,比较了分布式和集中式辨识的差异,并通过实验室和现场案例测试对所提方案的有效性进行验证。

1 台区户变关系辨识原理

台区户变关系辨识是指利用用户计量点采集的用电瞬时量数据等特征信息判断通信网络中各节点与台区的挂接从属关系。常用的特征量包括工频电压特征、信噪比、工频频率特征等。设计台区辨识方案时,需要考虑台区辨识任务启动和关闭的时机、辨识周期、台区辨识的判断规则以及结果上报方式等问题。

低压 HPLC 通信网络主要包括两种设备角色,即中央协调器(central coordinator, CCO)和通信节点(用 station 表示,通常简称为 STA)。CCO 作为主节点负责完成组网控制、采集任务管理等功能,其对应的设备实体为低压集抄系统集中器本地载波通信模块,STA 是网络底层负责用户数据采集的从节点,其对应的设备实体为电能表或采集器中的本地通信模块^[8-9]。

1.1 交流电信号的沿特征

如图 1 所示过零检测原理,在低压 HPLC 通信时,若 STA 节点能够接收到多个 CCO 节点的采集指令。定义过零偏移 $\Delta\eta$ 为通信节点接收到采样信号的时时刻 t_j 与上一个工频电压波形发生零点穿越时刻的时间差。若 STA 节点均处于同一相位或排除三相之间的已知偏移,当 STA 节点 j 接收到 CCO 节点的数据采集命令后即可计算出 $\Delta\eta$ 。同台区的 CCO 节点与 STA 节点由于台区串扰影响小,电压波形特

征重合度高;而不同台区负载的容量大小、容(感)性和三相平衡度等特性不同,导致其节点之间的波形特征一致性较弱。根据上述特点,通过统计 STA 节点与 CCO 节点间的电压波形过零偏移大小判断该 STA 节点是否为跨台区节点,即通过工频电压特征信号过零检测的方法实现台区辨识^[10]。

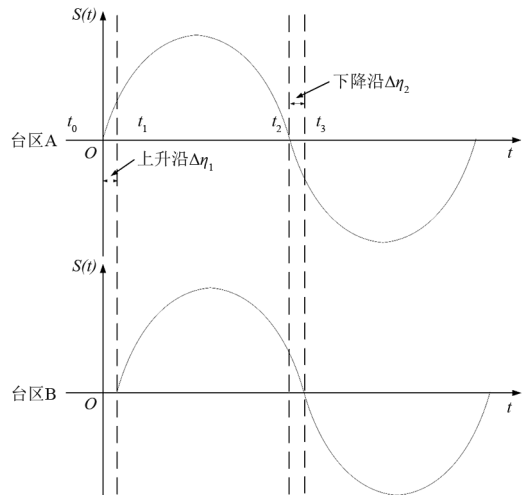


图 1 过零检测原理

对于同一个基准时刻 t_0 ,此时有两种情况:1)如图 1 中的 t_0 与 t_1 ,当前数据采样点的电压值 $S(t_1)$ 为正,处于电信号上升阶段(沿)时,采样时刻 t_j 与基准时刻 t_0 的过零偏移 $\Delta\eta$ 为两者之间的数值差减去通信延时,如式(1)中 $S(t+1) > S(t)$ 的情况。2)如图 1 中的 t_2 与 t_3 ,当前数据采样点的电压值 $S(t_3)$ 为负,处于计量点电信号下降阶段(沿)时,采样时刻 t_i 与基准时刻 t_0 的过零偏移 $\Delta\eta$ 为两者之间的数值差减去通信延时和半个工频周期,如式(1)中 $S(t+1) < S(t)$ 的情况。

$$\Delta\eta_{j,k} = \begin{cases} |t - t_i| - \alpha & S(t+1) > S(t) \\ |t - t_i| - \alpha - T_0/2 & S(t+1) < S(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta\eta_{j,k}$ 为 STA 节点 j 采集到的用户特征信号与台区 k 基准特征信号之间的过零偏移; t_i 为数据采样时间点,且 $i=0,1,\dots,I$,其中, t_0 为台区的基准过零时刻,通常由台区配电变压器低压出口侧安装的基准表进行采集; α 为相邻采集点之间的通信延时,即通信模块发送请求数据帧的时刻与接收数据应答帧的时刻之间的差值; T_0 为工频周期时长; $S(t)$ 为 t 时刻的电压值。

为了在特征信息采集时区分用户电信号中的沿

特征,定义台区特征信息交互报文格式如表 1 所示。

表 1 台区特征信息采集交互报文格式

序号	定义字段	字节长度/byte
1	TEI	12
2	采集方式	2
3	保留	2
4	采集序列号	8
5	告知总数量	8
6	起始采集 NTB1	32
7	台区特征信息序列 1	$(N-7) \times 8$
8	起始采集 NTB2(可选)	32
9	台区特征信息序列 2(可选)	$(M-N-4) \times 8$

表 1 中:序号 2 的采集方式字段的数值为 1 时表示下降沿采集,数值为 2 表示上升沿采集,数值为 3 表示双沿采集,数值为 0 表示保留;序号 6 和序号 8 的起始采集 NTB 表示本次采集过零点的起始时刻,即发送第一个特征数据采集帧的时刻;序号 7 和序号 9 的台区特征信息序列的内容为采集的用户特征数据,根据数据类型确定; M 为台区从节点序号; N 为从节点数量。当采集方式为上升沿或者下降沿时,起始采集 NTB2 和台区特征信息序列 2 字段留空。当采集方式为双沿时,起始采集 NTB1 和台区特征信息序列 1 为下降沿数据,起始采集 NTB2 和台区特征信息序列 2 为上升沿数据。

1.2 过零检测判断规则

在集中式辨识模式下,CCO 收集到多个 STA 上报的特征信息后,通常以同一时刻上升沿或下降沿的过零偏移不超过某一个阈值,作为该 STA 节点是否属于该 CCO 对应台区的判断规则,如式(2)所示。

$$\frac{\sum_{p \in P'} \Delta \eta^p}{\|P'\|} < \delta \quad (2)$$

式中: $\Delta \eta^p$ 为时刻 p 的过零偏移; p 为采样数据对应

时间序列编号且 $p \in P'$; δ 为集中式辨识模式下台区辨识的判断阈值; P' 为过零偏移的特征采样数据时间序列,由原始数据经预处理和剔除无效数据后获得,其模为 $\|P'\|$,表示序列长度。

在分布式辨识中,STA 收到多个可能同台区的 CCO 节点的辨识任务时,通常根据各 CCO 提供的台区基准特征信号优选出其中过零偏移量最小的节点作为该 STA 节点的归属节点,即若 $\exists j \in J, k \in K$,满足式(3),则认为台区 k 为 STA 节点 i 的优选归属台区。

$$\Delta \eta_{j,k} = \min(\Delta \eta_{j,1}, \Delta \eta_{j,2}, \dots, \Delta \eta_{j,k}, \dots, \Delta \eta_{j,K}) \quad (3)$$

式中, J 和 K 分别为 STA 节点集合和台区集合,且 $j \in J = \{1, 2, \dots, J\}, k \in K = \{1, 2, \dots, K\}$ 。

低压台区集中器和电能表的 HPLC 通信模块通过内置过零检测电路,对各相电压过零点进行检测判断,记录电压过零点的时刻。通过上述过零检测算法实现偏差计算,从而得到各待定电能表是否归属于某台区的辨识结果。但现场安装的各厂家的 HPLC 通信模块对上升沿、下降沿采集和式(1)判别功能的支持能力存在差异,实际使用时可能会出现判别失败的问题。

2 台区户变关系辨识模式

2.1 集中式台区辨识

以全载集抄方式为例,台区通信网络拓扑见图 2,台区辨识功能可根据应用需求部署在营销主站或计量主站(以下简称主站),它通过 GPRS/CDMA 无线网络与所辖多个集中器进行远程通信^[11]。为了获取台区基准特征,每个集中器和基准表与所在台区的变压器低压侧出线端相连。

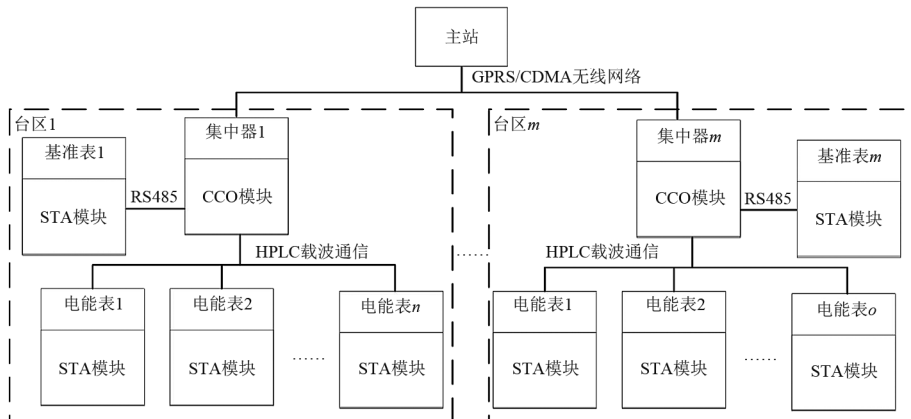


图 2 全载集抄方式台区拓扑图

集中式辨识为传统台区辨识模式,其主要特征是 STA 向 CCO 上报台区特征,在 CCO 处进行比较判断。其辨识流程如图 3 所示。首先,主站下发台区辨识使能命令;接着,集中器控制 CCO 模块启动台区辨识任务,CCO 采用轮询或点对点下发方式向载波电能表发送台区特征查询帧,即查询台区特征的报文。若通信成功,STA 模块接收到查询帧后向 CCO 模块回复告知帧,CCO 模块接收该帧后提取其中的电能表用户特征信息与台区基准特征信息进行比较,从而对该电能表所挂接从属的台区进行辨识。完成所有电能表的辨识后存储获取到的台区辨识名单。在 CCO 台区辨识功能使能过程中,若 CCO 上报了无法辨识的电能表计或节点跨台区事件,集中器需将该信息上报主站,便于主站安排运行维护人员至现场勘查,针对相关档案进行完善或修正。

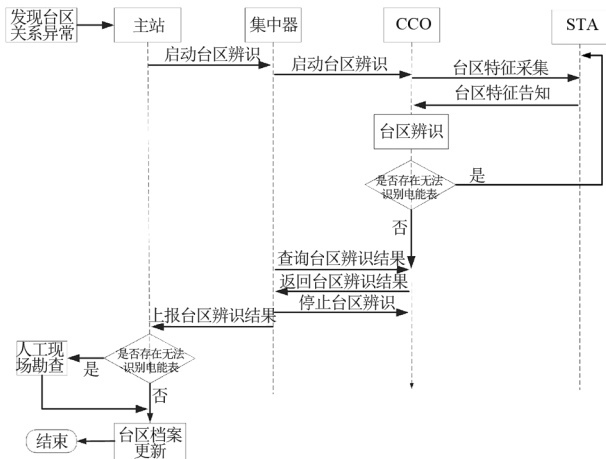


图 3 集中式台区辨识流程

表 2 为两种辨识模式比较,在集中式辨识过程中,STA 模块与台区辨识相关的工作内容主要包括执行台区用户特征采集任务,采集 CCO 本地台区用户特征信息,响应 CCO 下发的台区用户特征查询命令等。CCO 模块与台区辨识相关工作内容主要包括响应集中器下发的台区辨识使能控制命令,向 STA 下发台区辨识任务启动报文和台区特征采集方案,以及收集各 STA 的采集结果并进行比对分析等。值得注意的是,为了保证台区辨识期间正常的日冻结抄读、费用控制下发、高频采集、事件上报等数据业务通信,STA 即使判断台区辨识结果归属错误也不允许主动离网。此外,为了保持辨识对象固定,减少辨识难度,在台区辨识期间设置 CCO 的白名单过滤功能处于开启状态,即仅对当前搜索到的电能表进行台区辨识,对于新增电能表则在台区辨识完成之后再处理。当 CCO 发现非本台区的电能

表节点后,需立即上报给集中器。

表 2 两种辨识模式比较

模块类型	辨识模式	
	集中式	分布式
通用	响应集中器台区辨识使能控制命令和搜集台区基准特征	
CCO	收集各 STA 的台区用户特征采集结果	下发台区特征
特有	分析获取的数据,进行对比判断	查询台区辨识结果
通用	台区用户特征数据采集和存储	
STA	响应台区特征发布信息	
特有	响应台区特征查询命令	分析获取的数据,进行对比判断
		响应台区辨识结果查询命令

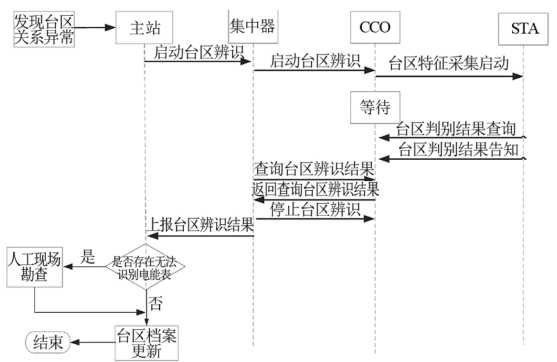


图 4 分布式台区辨识流程

2.2 分布式台区辨识

由第 2.1 节可知,集中式台区辨识模式依赖于 CCO 集中式的数据分析和控制中心,辨识过程中 CCO 需进行台区全局节点任务控制、特征量的获取以及进行集中分析和计算,与 STA 之间需进行大量的信息交换,对信道质量依赖度高,辨识模式不够灵活,在信道质量不佳或易受干扰时应用具有一定的局限性。对此,提出一种分布式台区辨识模式,如图 4 所示,它采用分布式的控制方案,主要思路是集中器经 CCO 向 STA 下发台区特征,在 STA 处进行特征比对并判断台区归属,最后将辨识结果提供给 CCO。

如表 2 所示,分布式辨识模式中 STA 区别于集中式的特有工作内容主要由 STA 进行台区用户特征信息比对、台区归属初步分析,以及响应 CCO 下发台区判断结果查询命令。分布式辨识模式中,CCO 模块的特有工作内容主要为向各个 STA 通过全网广播方式下发台区特征信息、轮询读取 STA 的台区判别结果。

比较上述两种辨识模式可知,分布式台区辨识

模式将台区特征比对和判断归属的工作分配给 STA 节点完成,对 CCO 的数据处理压力较小,同时对不同厂家 STA 混装的识别算法兼容能力较强。

3 案例测试

3.1 实验室测试

为验证所提台区辨识方案的可行性,在实验室采用模拟配电变压器和单相、三相智能电能表模拟现场环境搭建两个小规模模拟台区进行测试。两个模拟台区的单相电能表分别安装在模拟配电变压器低压出线端的 A 相和 B 相。三相电能表与集中器通过 RS-485 方式连接,用于获取台区基准特征,不参与性能测试指标评价。

为对辨识结果进行定量评价,评价指标采用准确率 β 和召回率 γ 。

$$\beta = n/J \times 100\% \quad (4)$$

$$\gamma = r/J \times 100\% \quad (5)$$

式中: n 为当前台区中能准确辨识的 STA 节点数; r 为当前台区中能正常采集和召回辨识结果的 STA 节点数。

测试时首先对台区集中器及电能表进行对时,并通过三相基准表采集各台区的特征电参量数据;然后,清空集中器单相电能表档案,启动无档案自动搜表任务,使电能表通过数据主动上报的方式,将自身地址发送给集中器;接着,集中器更新台区的档案信息;最后,分别通过集中式和分布式辨识模式进行台区辨识。实验室测试结果见表 3 的台区 1 和台区 2。

3.2 现场测试

在广西某城市低压居民台区进行现场测试,该现场包括 4 个台区,下属共计 388 只用户电能表。最长允许测试时间设为 2 min。在现场已安装的采集设备的基础上,通过集中器软件升级和 HPLC 通信模块更换方式使设备支持上述两种辨识模式。所更

换的 STA 模块来自不同的厂家。表 3 中序号 3~5 和 6A 的 4 个台区中通信模块的台区辨识算法仍沿用现场原 HPLC 通信模块厂家的方法。为便于对比辨识效果,将两种辨识模式的辨识结果绘制成图 5。图 5(a)、(b)分别展示识别用时和识别准确率的测试结果,其中的台区编号按用户数由少到多排序。

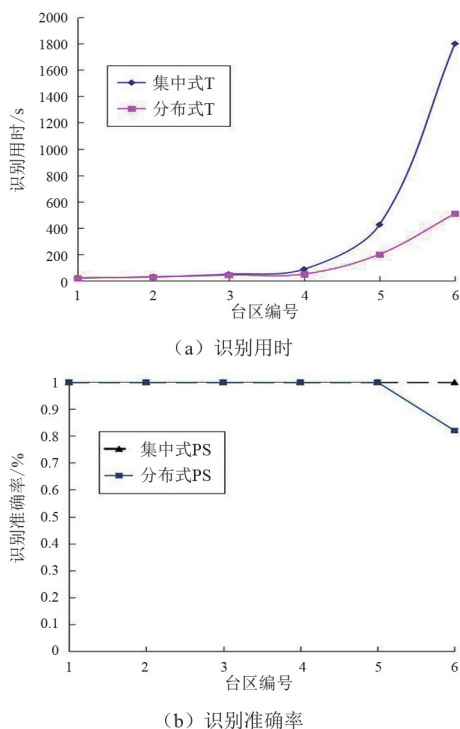


图 5 测试结果

1) 识别用时

图 5(a) 中的台区 1 和台区 2 为实验室模拟台区,由于用户数较少,比较可知在两种模式辨识所需的时间差距不大,且均能准确辨识所有用户。台区 3~6 为现场测试台区。由图 5(a) 可见,随着用户数的增多,两种辨识模式的用时均随之增长,但集中式模式的测试用时增长较快。这是由于集中式辨识模式需收集台区内 STA 高频采集的台区用户特征信息,数据传输容量大,对通信信道质量和 CCO 的大

表 3 测试结果

台区序号	用户数	测试用时/s		准确率/%		召回率/%	
		集中式	分布式	集中式	分布式	集中式	分布式
1	23	16.9	16.9	100	100	100	100
2	46	18.2	18.1	100	100	100	100
3	63	21.9	21.2	100	100	100	100
4	84	30.8	29.9	100	100	100	100
5	102	52.9	43.6	100	100	100	100
6A	139	120.0	61.7	96.4	100	99.3	100
6B	139	120.0	61.8	99.3	100	99.3	100

数据处理能力要求较高,故测试时间较长。而分布式模式用户特征信息的获取和分析判断工作由 STA 完成,节约了信息在信道传输的时间和 CCO 的数据分析时间,故辨识效率较高。

2) 识别准确率

将现场测试台区的电能表编号按台区归属绘制成图 6。图 6 中的真实情况是指通过现场勘察确定的电能表真实户变归属关系。

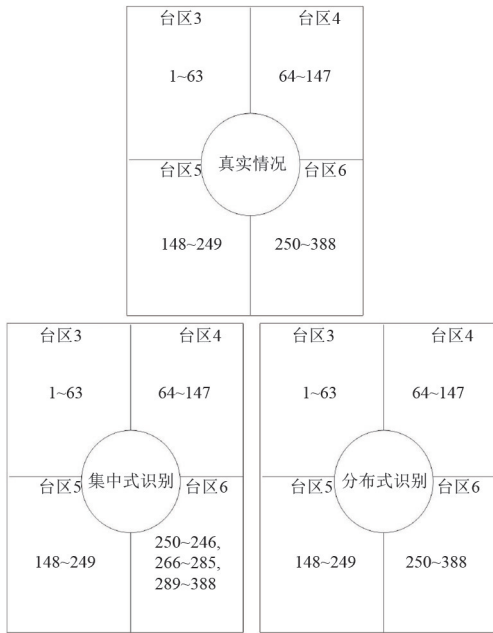


图 6 现场台区辨识结果

由图 6 和表 3 可见,分布式辨识结果与真实情况一致。集中式辨识中台区 6A 的召回率为 99.3%,但辨识准确率仅为 96.4%。即本次测试过程中有 1 只电能表抄表失败,除此之外,还有 3 只电能表通信正常但辨识失败。结合图 6 可知,编号为 265 和编号为 286~288 的 4 只电能表在测试过程中辨识失败。

3) 异常问题分析

对上述抄表失败问题,现场调查发现电能表 265 与该台区的集中器地理距离相对较远,HPLC 抄表传输距离较长,信号衰减较严重。由于集中式辨识模式下需传输大量的台区用户特征信息,数据传输量大,故抄表速度慢且成功率低。虽然采集任务有补抄机制,但由表 3 可见,该模式下测试时长为 120 s,即达到了预设的最大允许测试时间,此时集中器会下发台区辨识任务停止命令,强制终止辨识任务。此时该电能表的数据未完成补抄,后续的辨识流程无法完成,故认为是辨识失败。而分布式辨识模式下,用户特征信息的获取和分析判断工作由 STA 完成,信道上只需传输下发台区基准特征信息

和辨识结果查询交互报文,数据传输量较小,故辨识成功率较高。

此外,现场调查发现:编号为 286~288 的 3 只电能表在测试过程中能正常抄表,但辨识失败;本次测试的辨识算法采用工频交流电压过零检测法,辨识失败的 STA 生产厂家为同一厂家,与同台区其他电能表的生产厂家不同。该厂家由于早期标准未统一的历史原因,仅支持下降沿信息的采集和特征辨识,但依然支持双沿工频信号特性信息采集。台区 6 的 CCO 厂家考虑到芯片的处理能力有限,其产品仅提供上升沿特征辨识功能,CCO 厂家与该 STA 厂家在辨识算法的沿数据处理方式上存在不兼容的情况。

据此推断,集中式辨识模式下,CCO 可采集到该问题 STA 回复的双沿台区用户特征信息,但却无法进行辨识,造成现场不同 HPLC 厂家的产品混装时台区辨识功能无法互联互通的情况。而在分布式辨识模式下,CCO 在辨识时仅负责下发台区基准特征信息和向各 STA 查询台区判别结果,台区归属判别在各用户的 STA 模块上实现,该厂家的 STA 收到 CCO 下发的双沿台区基准特征信息与自身采集到的用户特征信息进行比较,可正常辨识,故在该模式下,未发生上述 CCO 辨识功能兼容性缺陷造成的辨识失败问题。

为验证上述推断结果,通过更换模块和集中器软件升级的方式使台区 6 的 CCO 支持双沿检测功能,并重新进行测试,结果如表 3 中的台区 6B 所示。可见,CCO 支持双沿检测后,召回率与辨识准确率相等,即除了 1 只电能表抄表失败外,其余电能表均能准确辨识,说明支持双沿检测的 CCO 能准确辨识上升沿和下降沿的用户特征信息,辨识失败问题不再发生,故上述推断结果是可信的。

4 结 论

上面分析了传统集中式台区户变关系辨识技术中存在的不足,提出了一种基于 HPLC 通信模块的分布式双沿台区辨识方案。该方案在 HPLC 相关通信设备的基础上,建立由集中器经 CCO 向 STA 下发台区特征,在 STA 处进行特征比对并判断台区归属的分布式辨识模式,设计了交流信号双沿检测算法并提供通信规约支持,避免了不同厂家的 HPLC 通信模块设计的沿过零检测算法的兼容性问题。案

例测试情况表明,在现场台区用户较多时,分布式辨识模式的处理性能更佳,且出现抄读失败和辨识失败的情况较少,验证了所提方案的可行性。所提方案辨识户变关系仅利用了低压台区用户电信号的工频电压特征,如何综合利用工频周期特征、工频频率特征提高辨识的准确率值得进一步研究。

参考文献

- [1] 蔡永智,唐捷,阙华坤,等.基于电压集群特性分析的台区户变关系校验方法[J].广东电力,2021,34(8):50-60.
- [2] 梁捷,梁广明,黄水莲.基于 LSSVM 的用户异常用电行为辨识研究[J].青海电力,2021,40(2):27-31.
- [3] 李彩霞.基于 HPLC 通信模块的智能电表深化应用[J].电子技术与软件工程,2021(9):205-206.
- [4] 潘明明,田世明,吴博,等.基于智能电表数据的台区识别与窃电检测方法研究[J].智慧电力,2017,45(12):80-84.

- [5] 邱志辉,伍栋文,刘水,等.基于 HPLC 通信模块的智能电表深化应用研究[J].江西电力,2018,42(10):25-29.
- [6] 余鹤,夏水斌,鄢烈奇,等.低压用电“台区识别技术”研究[J].通信与信息技术,2019,49(2):35-39.
- [7] 柯海波.基于 HPLC 在智能电网数据采集中的应用探讨[J].四川电力技术,2021,44(1):58-61.
- [8] 梁捷,梁广明.宽带电力线载波通信资源优化调度方案分析[J].内蒙古电力技术,2020,38(5):9-13.
- [9] 梁捷.计量自动化系统上行和载波通信联合测试研究[J].云南电力技术,2019,47(2):84-87.
- [10] 朱阳光,刘瑞敏,沈鑫,等.基于过零点检测的台区电压畸变研究[J].数据通信,2019,38(4):27-31.
- [11] 范杏元,周纯.兼容电力线载波通信的低压集抄研究[J].信息技术,2019,43(5):65-70.

作者简介:

梁捷(1987),男,硕士,工程师,主要从事电能计量管理方面的工作。

(收稿日期:2021-11-10)

(上接第 54 页)

3)利用“三查”技术,可发现人不能至或其他原因未列入台账的电网地质灾害隐患点,同时对列入台账的地质灾害隐患点能够进行及时跟踪监测,提高汛期前电网地质隐患点排查的精度和效率,锁定重点关注对象。仍需在电网防灾减灾事业中进一步推广,逐步建立全省至全国范围内电网地质灾害标志库。

4)“三查”技术也可运用到电网规划选址、施工阶段。遥感技术是电网防灾减灾重要技术手段,探求新的遥感数据处理技术,将人工智能引入遥感地质数据分析中,为构建坚强智能电网中电网规划技术领域提供技术支持。

参考文献

- [1] Chuang DENG, Yongxing CAO, Zhihang XUE, et al. A case study of landslide monitoring system for a transmission tower in Maoxian, Sichuan China[C]//2017 IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks, IEEE; 2017.
- [2] Marie COSTANTINI, Alessandro FERRETTI, Federico MINATI, et al. Analysis of surface deformations over the whole Italian territory by interferometric processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed radar data[J]. Remote Sensing of Environment, 2017,202:250-275.
- [3] D Di MARTIRE, M PACI, P CONFUORTO, et al. A nation-wide system for landslide mapping and risk management in Italy: The Second Not-ordinary Plan of Environmental Remote Sensing[J].International Journal of Applied Earth

Observation and Geoinformation, 2017,63:143-157.

- [4] Jie DONG, Lu ZHANG, Menghua Li, et al. Measuring precursory movements of the recent Xinmo landslide in Mao County, China with Sentinel-1 and ALOS-2 PALSAR-2 datasets[J]. Landslides, 2018,15(8):135-144.
- [5] Emanuele INTRIERI, Federico RASPINI, Alfio FUMAGALLI, et al. The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data[J]. Landslides, 2018,15:123-133.
- [6] 石菊松,吴树仁,石玲.遥感在滑坡灾害研究中的应用进展[J].地质评论,2008,54(4):505-514.
- [7] 戴岚欣,许强,范宣梅,等.2017年8月8日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究[J].工程地质学报,25(4):1151-1164.
- [8] 曹永兴,邓鹤鸣,蔡炜,等.电力设施应对地震及其次生灾害的研究进展[J].高电压技术,2019,45(6):1962-1974.
- [9] 曹永兴,常鸣,唐川,等.丹巴康定输电走廊滑坡泥石流遥感调查及预警对策[J].地质灾害与环境保护,2013(2):8-15.
- [10] Yong Xing CAO, Zhi Hang XUE, Chang Hua ZHANG, et al. Design and Application of Online Landslide Monitoring System for Transmission Lines Corridor Based on the Optical Fiber Sensing Technology[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 556-562:3160-3163.

作者简介:

卜祥航(1987),男,博士,高级工程师,从事输变电工程防灾减灾技术研究工作。(收稿日期:2021-11-05)