

Low-Voltage Distribution Network Topology Identification Method Based on Power Carrier Communication *

ZHANG Pan¹, GAO Qiangwei², HUANG Xu², ZHU Cong³, SUN Weiqing^{3*}

(1.State Grid Tianjin Electric Power Research Institute, Tianjin 300384, China;

2.State Grid Tianjin Electric Power Company Chengdong Power Supply Branch, Tianjin 300250, China;

3.School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the needs of low-voltage distribution network in operation and maintenance monitoring, fault elimination and other aspects, through the study of automatic identification and accurate verification of household transformer connection relationship, this paper proposes a household transformer identification and phase identification technology based on broadband carrier communication. When a phase line equipment with known phase detects that the current is passing zero, it immediately sends a message. The receiving end equipment receives the message and analyzes and compares the way of zero crossing time, judges the phase and its branch line of the receiving end equipment, completes the user's phase and station area identification, and simulates the phase identification method with PSCAD, and correctly identifies the phases of four users to be tested, which verifies the feasibility of the method. This method is easy to realize and the result is accurate.

Key words: phase recognition; cross-phase coupling; message; PSCAD

EEACC: 8110; 7210A

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.031

基于电力载波通信的低压配电网拓扑结构辨识方法 *

张 磐¹, 高强伟², 黄 旭², 朱 聪³, 孙伟卿^{3*}

(1.国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384; 2.国网天津市电力公司城东供电分公司, 天津 300250;

3.上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

摘 要: 针对低压配电网在运维监测、故障消除等方面的需求, 通过研究户变连接关系自动识别与精准校验, 本文提出了一种基于宽带载波通信的户变识别和相位识别技术。通过某一已知相位的相线设备在检测到电流正向过零时立即发送报文, 接收端设备接收报文并分析比较过零时间的方式, 判断接收端设备的相位及其分支线, 完成用户的相位和台区识别, 并对相位识别方法用 PSCAD 进行仿真, 正确识别了 4 个待测用户的相位, 验证了可行性。此方法实现方便, 判断结果准确。

关键词: 相位识别; 跨相耦合; 报文; PSCAD

中图分类号: TM744; TM73

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2021)01-0162-06

随着可再生能源的兴起, 我国的能源逐渐向低碳化、市场化和数字化发展。能源互联网摆脱了传统能源产业间供需的约束, 实现能源、信息、价值之间跨界交换, 可以有效解决现阶段能源综合使用效率低、清洁能源消纳能力差、供需互动不足等问题^[1-2]。

能源互联网以电力为核心, 建立在智能电网建设的基础上。然而, 某些老城区特别是老旧小区, 配电台区户变关系混乱、缺失, 严重影响了智能电网建设进程。未来配电网管理将从传统粗放式管理逐渐转变成精细化管理, 而实现精细化管理需要准确的台区拓扑结构^[3]。

在电力系统中, 台区是指一台变压器的供电区域, 而变压器与用户电表之间的对应关系被称为户变关系。目前低压配网户变关系的检验方法主要分为两大类。一是系统自动识别(在线方式), 例如台区停电识别、基于户变工频过零序列相关性分析、基于户变历史停电事件记录相关性判别、基于多信息相关性分析和电压皮尔逊相关系数法等^[4-5]。在线方式识别的效率, 但是成功率会受到应用场景的限制。二是人工现场识别(人工方式), 人工方式主要采用台区识别仪的方法^[6-8]。目前的台区识别仪大多采用载波通信法和脉冲电流法。脉冲电流法指

项目来源: 国家自然科学基金项目(51777126)

收稿日期: 2020-06-13 修改日期: 2020-07-26

台区识别装置通过发出高频脉冲信号来识别台区用户,但是此方法需在变压器出线端安装电流互感器,在操作上存在安全隐患,且可控制性差。载波通信法是指台区识别仪在电力线上发送载波信号,由于变压器感抗较大,高频载波在传输时不能通过变压器,因此只能在同台区里传输^[9]。但是在实际应用中当载波信号遇到共高压、共地、共电缆沟串线等情况时,存在跨变压器耦合到其他台区的情况,对台区的识别结果造成干扰。

综上所述,本文采用基于电力载波的户变识别方法,发射端设备在检测到电流正向过零时立即发送报文,接收端设备接收报文并分析比较过零时间的方式,判断发射端设备的相位及其分支线,完成用户的相位识别和台区识别。

1 技术原理

电力线载波(Power Line Carrier, PLC)通信是利用低压配电网作为信息传输媒介进行语音或数据传输的一种特殊通信方式^[10]。

我国使用的工频交流电三相之间的相位差是 120° ,三相交流电信号单向过零点的时间差为 $T/3$ 。利用这一点,假设已知 A 相的相位,处于 B 相或 C 相的待测设备能够记录 A 相单向(例如正向)过零的时刻与自身所处相线下一次单向(与 A 相对应,正向)过零时刻的时间差,就可以识别所在相线的相位。本文使用基于载波通信的报文发送接收的方法对户变关系和相位进行判别。

1.1 通信协议

通信报文是用来确定户变关系以及判定相位的关键。通信报文具有较为统一的格式,这减少了对计时器的结果的干扰,并且方便了本文户变识别与电力相位识别的实现。

通信报文分成 6 个部分:同步头、报文长度、发送端地址、发送端相位、报文校验和结束符,各个部分的大小如图 1 所示。同步头表示有效报文开始,识别到同步头后处理器模块便让计时器开始计时;报文长度指发送端地址至结束符中间所有字节数之和;发送端地址以及发送端相位用来判断待测端所属的分支线以及相位;报文校验的内容是对发送端地址与发送端相位加起来的 5 个字节通过异或运算后获得的结果。接收端的处理器模块识别到结束符后将之前接收到的字节重新进行报文检验,得到的

同步头	报文长度	发送端地址	发送端相位	报文校验	结束符
4 byte	1 byte	4 byte	1 byte	1 byte	1 byte

图 1 报文组成

结果若与之前接收到的报文校验相同则可以判定接收到正确的报文内容,随后进入到相位识别的步骤。这种形式构成,明确了各部分的职能,有效减少了其他信号的干扰,提高了接收报文的准确性。

1.2 发送/接收端硬件组成

发送端与接收端内部结构相似,均含有处理器模块、载波通信模块、单向过零检测电路模块、计时模块等部分,如图 2 所示。

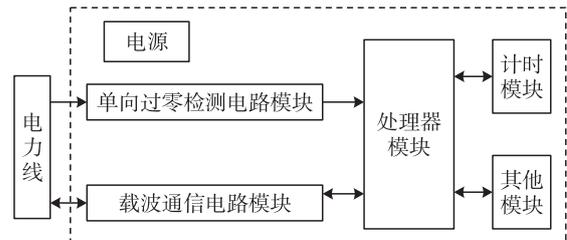


图 2 发送接收端模块构成

各个模块功能如下:

(1)系统电源。电源电压为 220 V,额定频率为 50 Hz。

(2)计时模块。当已知相位的电流正向过零,发送端开始发送报文,接收端识别到同步头后计时器便立刻开始计时;当接收端确认收到完整正确的报文后,计时器收到处理器模块的命令停止计时,同时把开始与结束的时刻上传到处理器模块上,以此得到时间差。计时精度为 0.1 ms。

(3)处理器模块。处理器处理的内容具有多样性。一方面,处理器需要对接收到的数据进行初步的分析,过滤掉无效数据,然后对数据进行精准的计算。同时处理器还需要处理过零检测模块的过零信息和控制载波的发送等内容^[11]。这里选用 AVR 单片机,内嵌长寿命 EEPROM 能长期保存关键数据,避免断电丢失。片内大容量 RAM 满足一般场合使用的同时,能更有效地支持高级语言开发系统程序。

(4)单方向过零检测模块。单方向过零检测指一个周期中,只选取电流信号的一个过零点来获知相位信息。当正弦信号在过零点时,其导数可以取到极大值,能够有效保证相位测量的准确度^[12]。要求延迟时间小于 0.5 μs 。

(5)载波通信模块。载波调制的基本原理是:在发送时,先把数字信号设置成高频信号,通过功率放大后耦合到电力线上,随后通过电力线路传输到接收端,接收端中的耦合电路将高频信号接收,最后由解调电路将其还原为数字信号^[13]。如图 3 所示,载波通信模块可以分为以下几个部分^[14]:

①信号耦合电路。将需要发送的信号耦合到电

力线路上,或从电力线上接收信号,将强电与弱电部分分隔开;

②带通滤波电路。消除有效信号频带之外的干扰;

③信号发送电路。把待发送的信号放大到合适的功率;

④载波处理芯片。用于调制和解调信号,并对数据帧做进一步处理,如通信帧识别转发;

⑤路由处理芯片。用于管理和维护路由信息。

此处选用 UT-6204-PLC 电力载波通信模块,波特率默认 115 200 bit/s。

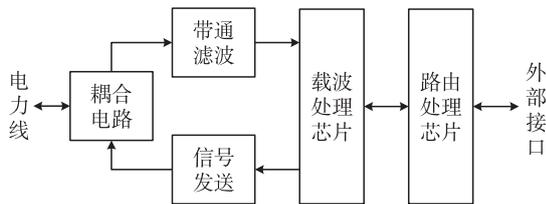


图3 载波模块原理框图

1.3 现场台区拓扑结构

现有的用电信息采集终端对于上文所述的发送接收端适用。现场检测与采集系统框架如图4所示:在配变台区配变侧、分支箱、表箱分别安装配变终端、分支监测单元、末端终端,自动识别变压器-分支箱-用户之间关系,由配变终端将“台区-分支箱-用户”三级关系上传到用电信息系统,经系统自行匹配后将“台区-分支箱-用户”异常关系推送到供电服务指挥系统。发送接收端可以便捷地安装在这些终端上,接着可以用本文提到的方法对异常和未知的台区进行检测。

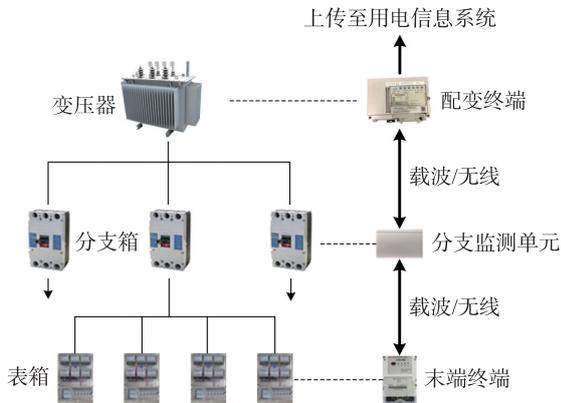


图4 现场检测与采集系统框图

2 实现方法

2.1 发送端工作流程

发送端部署在相线和分支线都已知的终端上,通过载波模块把存有自身相位与地址信息的报文耦

合到电力线上。当发送端电流单向过零时报文开始发送,持续时间为 T_m 。

因为电力相位识别是动态的过程,所以以 T_s 为周期,当和上一次发送开始的时间间隔大于 T_s 后,发送端准备重新发送报文。此时处理器模块控制单向过零检测模块检测下一次单向过零时间。记 t_0 为下一次正向过零的时刻,此时单向过零检测模块停止检测,处理器模块控制载波通信模块重新发送报文,同时计时模块记录报文开始与结束发送的时间间隔 T_m 。

载波通信速率不高,发送端发送报文的持续时间 T_m 远远大于工频周期 T , $T_m = L/V$, L 是报文的总发送位数, V 是载波通信的速率,其中 $T_s > T_m > T$ 。

2.2 接收端工作流程

接收端部署在分支线与相位未知仍需判别的终端上。接收端是利用自身的载波通信模块来接收电力线上的载波信息,然后处理器将接收到的这些载波信息还原成报文。因为发送端与接收端中间会发生跨相耦合,所以即使两者不处在同一相位,接收端依旧能够接收到发送端发出的报文。但与此同时,跨相耦合也会对接收端实际接收报文的时间造成干扰。一般通信距离越短,干扰越大,所造成误差的也越大,在实际操作时需要距离进行严格的控制。

为了保证能够收到电力线上连续有效的载波数据,需要让接收端的载波通信模块一直处于接收模式,以此实现电力相位以及台区分支线的动态识别。载波通信模块将接收到的所有有效数据送到处理器模块中。当发送端的载波开始发送后,接收端的处理器模块将从电力线上连续检测到的 32 位数据与同步头比较,若完全相同,则判定是发送端发送出的报文,随后通知载波模块继续接收后面的数据。假如与同步头不一样,则将其判定为其他干扰信号。这种方法对防止误判,减少干扰,减少对户变识别的影响具有显著的效果。然后处理器把所有有效数据合并为字节,还原出完整的报文。

接收端的处理器模块在识别到报文的结束符后,命令计时模块开始计时,并且让单方向过零检测模块检测所处相线下一个单向过零时刻。当单向过零检测模块检测到下个单向过零时刻后计时模块停止计时,并将单向过零时刻 t_1 发送至处理器模块,处理器模块计算出接收端收到结束符时刻与下一个单向过零时刻之间的时间差 T_z 。

2.3 相位判别方法

当不考虑各个模块之间的交互时间以及信号传输时间时,可以近似认为发送端的发送时刻为 $t_0 = t_1 - T_z - T_m$,记时间段 $T_k = T_z + T_m$,因为三相交流电信号单

向过零点的时间差为 $T/3$, 因此计算接收端单向过零点的时间差 $\Delta T = (T_z + T_m) \% T$, 通过计算后的结果可以判断接收端所处相位, 公式中的 $\%$ 表示取余。假设发送端位于 A 相: 假如 T_k 是工频电流周期 T 的整数倍 ($\Delta T = T_k \% T \approx 0$), 则判定接收端位于 A 相; 如果 ΔT 近似为 $T/3$, 则判定接收端位于 B 相; 如果 ΔT 近似为 $2T/3$, 则判定接收端位于 C 相。

但是实际操作时, 如果不考虑各个模块之间的交互和信号传输时间, 会对计时结果产生干扰, 对最后判定结果产生影响, 所以现在把判别点拓展成一个区间: 当 $0 \leq \Delta T \leq T/6$ 或 $5T/6 \leq \Delta T \leq T$, 接收端与发送端同相位; $T/6 \leq \Delta T \leq T/2$, 接收端延迟发送端 1 个相位; $T/2 \leq \Delta T \leq 5T/6$, 接收端延迟发送端 2 个相位。具体流程如下:

(1) 根据自然停电上电发生 (例如计划停电, 故障停电等) 事件获取上电时间, 按时间归类获得准确的户变关系;

(2) 采集任务调度系统依据终端上报的停电上电事件, 定期对台区的停电事件分析, 生成搜表任务, 筛选出需要分析的混淆台区;

(3) 对于混淆台区发送端在电流单向过零时开始发送报文, 报文存储着发送端的相位与地址信息, 报文发送持续时间为 T_m ;

(4) 接收端记录接收到报文结束符的时刻与自身所处相位下一个单向过零时刻之间的间隔 T_z ;

(5) 接收端的处理器计算 $\Delta T = (T_z + T_m) \% T$, 通

过 ΔT 和发送端的相位进行相位识别, 通过地址信息进行户变关系识别。

2.4 时序分析

假设发送端位于 A 相, 如图 5 所示, 记 t_0 时刻 A 相一次正向过零, 此时发送端的载波模块开始发送报文, 经过 T_m 时间, 报文发送结束。接收端在待测区域的 A 相识别到结束符后过了 T_{zA} 时间到达下一次过零时刻 t_{1A} ; 待测区域的 B 相识别到结束符后过了 T_{zB} 时间到达下一次过零时刻 t_{1B} ; 待测区域的 C 相识别到结束符后过了 T_{zC} 时间到达下一次过零时刻 t_{1C} 。

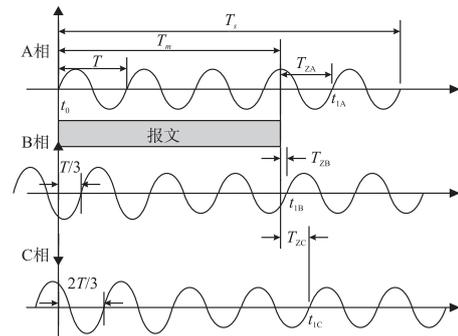


图 5 时序图

3 仿真与分析

3.1 模型搭建

为了验证相位识别方法的可实现性, 现基于 PSCAD 进行模拟仿真。其仿真模型如图 6 所示, 模拟低压台区用户, 电压经过三相双圈变压器后降低为 0.4 kV, 从配电变压器低压侧开始, 往下依次为

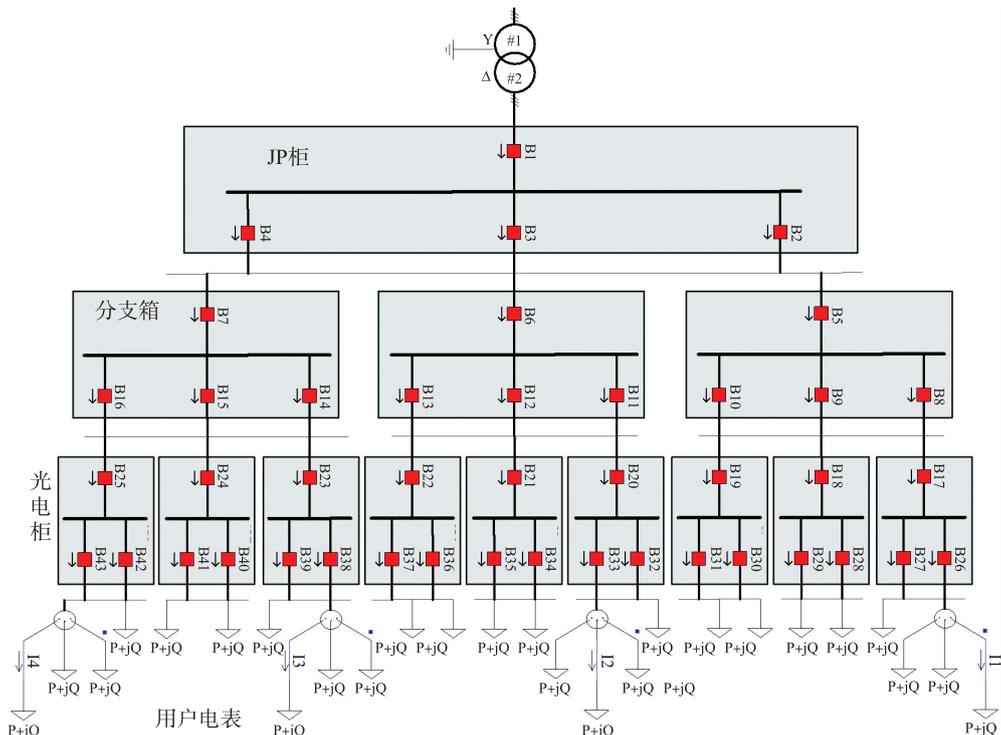


图 6 低压台区仿真模型

JP 柜、分支箱、光力柜和用户电表。以配电变压器低压侧 A 相为发送端,以电流 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 所在相位为接收端,模拟待测台区用户 1、2、3、4。

3.2 仿真分析

PSCAD 仿真时,一般设置仿真时间为 0.3 s~0.5 s,绘图步长一般设为 10 μ s,故设置仿真时间为 0.5 s,绘图步长为 10 μ s。经过实际仿真测试,控制电路中的过零检测模块在计算步长设为 10 μ s 时的过零记录最为完整,故将计算步长设为 10 μ s,其控制模块如图 7 所示。

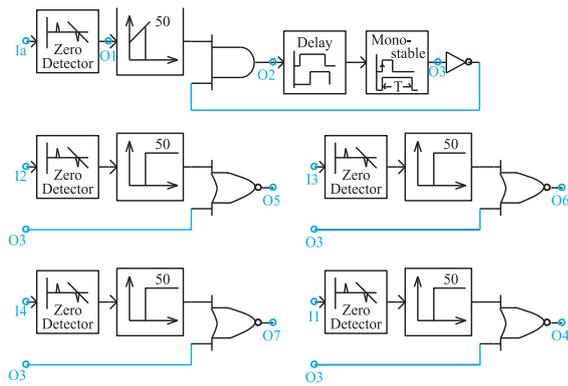


图 7 控制模块

用 Mono-stable 模块来模拟报文的发送,报文发送持续时间 $T_m=L/V$,故将脉冲持续时间设置为 0.2 s,表示报文的发送持续时间 T_m 为 0.2 s,其波形如图 8 所示,用信号 O_3 表示报文的发送,1 表示处于发送状态,0 表示停止发送。在 $t_0=0.055$ 2 s A 相正向过零的时刻开始发送报文。记变压器二次侧 A 相电流为 I_a ,其周期 T 为 0.021 4 s。

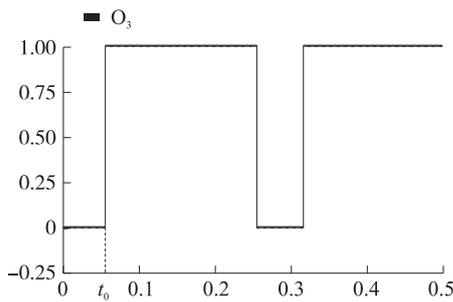


图 8 模拟报文发送波形

信号 O_4 、 O_5 、 O_6 、 O_7 分别表示接收端的用户 1、2、3、4 在收到发送端发出的结束符的时刻与下一次单向往过零时刻之间的时间差 T_z ,1 表示正处于收到结束符与下一个正向过零之间的时刻。如图 9 所示,由图可知收到最后一个字符与下次第一次正向过零的时间间隔 $T_{z1}=0.012$ 9 s, $T_{z2}=0.018$ 4 s, $T_{z3}=0.004$ 6 s, $T_{z4}=0.005$ 5 s。

将结果代入 $\Delta T=(T_z+T_m)\%T$ 中即可得到 ΔT ,

得到的结果与最后判别的结果如表 1 所示。最后判别的结果为接收端用户 1 属于 A 相,接收端用户 2 属于 B 相,接收端用户 3 属于 C 相,接收端用户 4 属于 C 相,而得到的结果也与事实相符。结果证明此方法用来判别相位是准确且有效的。

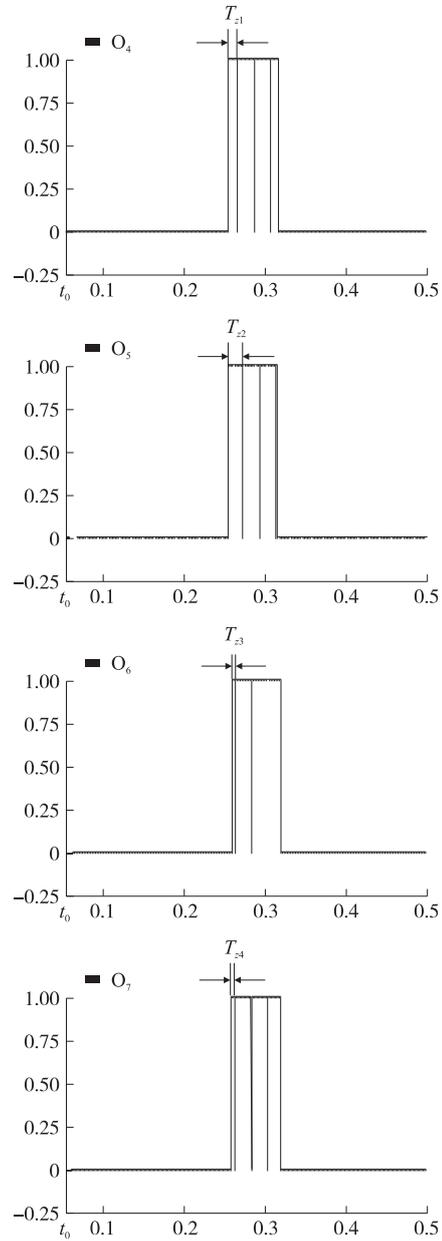


图 9 接收端 T_z 波形

表 1 判别结果

接收端	T_z/s	ΔT	隶属区间	相位判别
1	0.012 9	0.020 3	$(5T/6, T)$	A 相
2	0.018 4	0.004 4	$(T/6, T/2)$	B 相
3	0.004 6	0.012 0	$(T/2, 5T/6)$	C 相
4	0.005 5	0.012 9	$(T/2, 5T/6)$	C 相

4 结论

本文提出了一种基于电力载波通信的户变关系识

别与相位识别技术,此方法可以应用于现有的用电信息采集设备上。现有采集终端的硬件组成部分包括了发送接收端所需的模块,所以此方法的成本相对较低,操作也较为简便,只需完成软件上的嵌入和部署工作。发送端的功能可以通过软件部署到载波集中器等设备中实现,接收端的功能可以通过软件部署到载波采集器或者载波智能电表等设备中来实现。最后通过PSCAD 仿真软件模拟台区进行仿真分析,实现了台区的相位识别。本次仿真仅考虑了同一台区的用户,对于不同台区的用户的相位识别还有待研究。

参考文献:

- [1] 杨锦春,刘慧. 能源互联网的资源配置效应研究[J]. 技术经济与管理研究,2020(1):109-113.
- [2] 郑玉平,王丹,万灿,等. 面向新型城镇的能源互联网关键技术及应用[J]. 电力系统自动化,2019,43(14):2-16.
- [4] 徐大青,栾文鹏,王鹏,等. 智能电表数据分析方法及应用[J]. 供用电,2015,32(8):25-30.
- [5] 肖勇,赵云,涂志东,等. 基于改进的皮尔逊相关系数的低压配电网拓扑结构校验方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(11):37-43.
- [6] 范荻,李绍山,李海涛,等. 台区用户识别仪关键技术应用研究[J]. 华北电力技术,2010(7):27-30.
- [7] 李建,赵汉昌. 多功能低压台区识别设备的研制[J]. 电测与仪表,2014,51(13):107-111.
- [8] 徐湛. 台区用户识别仪应用分析[J]. 计量与测试技术,2009,36(11):26-28.
- [9] 黄家伟,夏中金,陈述. 宽带电力线载波通信信道特性研究与建模[J]. 黑龙江电力,2018,40(5):467-470.
- [10] 吴限,陈明,冯国富. 低压电力线载波通信路由器设计仿真[J]. 计算机仿真,2017,34(10):194-198.
- [11] 徐蕊妍. 基于电力线载波通信的线路识别检测仪设计研究[J]. 电器工业,2018,(12):76-78.
- [12] 刘静章,王进旗,王凤波. 过零检测技术在相位测量中应用[J]. 电子测量技术,2004,(5):67-68.
- [13] 徐伟,王斌,蒋元建. 低压电力线载波通信技术在用电信息采集系统中的应用[J]. 电测与仪表,2010,47(7A):44-47.
- [14] 杜鹏,米增强,贾雨龙,等. 基于网损灵敏度方差的配电网分布式储能位置与容量优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(6):103-109.



张 磐(1983—),男,硕士研究生,研究方向为智能配电网和智能变电站技术,pan.zhang@tj.sgcc.com.cn;



高强伟(1985—),男,硕士研究生,研究方向为智能配电网,qiangwei.gao@tj.sgcc.com.cn;



黄 旭(1984—),男,硕士研究生,研究方向为智能配电网,xu.huang@tj.sgcc.com.cn;



孙伟卿(1985—),男,副教授,博士,研究方向为电力系统规划与优化、新能源消纳,sidswq@163.com。