

基于信号识别的台区拓扑监测技术

郑国权¹, 阿辽沙·叶¹, 李 然¹, 李 媛¹, 章江铭²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310000)

摘要: 低压台区处于电力系统的末端, 在未来新型电力系统建设中, 台区拓扑关系监测是提升精细化管理和供电服务水平的重要环节; 由于无法准确获知低压台区现场线路和设备的变化, 台区线路拓扑档案往往存在混乱、失管等问题, 严重影响线损治理、故障运维等工作开展; 为了准确识别和建立台区线路拓扑关系, 进行了低压台区结构和拓扑识别原理分析, 基于电压和电流信号识别方法, 对特征序列信号识别策略进行了研究, 并设计关键的硬件模块, 提出了一种基于信号识别的台区拓扑监测技术, 能够在不影响低压台区运行的情况下、准确地识别台区拓扑关系; 经现场应用实验测试, 实现了台区运行条件下的拓扑监测, 能够在较短时间内准确地识别台区拓扑关系, 表明该技术的实用性与有效性, 能够满足工程应用的需要。

关键词: 拓扑识别; 自动监测; 信号识别; 低压台区; 线路监测终端

Monitoring Technology of Station Area Topology Based on Signal Recognition

ZHENG Guoquan¹, YE Aliaosha¹, LI Ran¹, LI Yuan¹, ZHANG Jiangming²

(1. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310000, China)

Abstract: The low-voltage substation is at the end of the power system. In the construction of new power system in the future, the substation topology relationship monitoring is an important link to improve the fine management and power supply service level; Since it is impossible to accurately know the changes of on-site lines and equipment in the low-voltage substation area, there are often the problems such as confusion and loss of control in the substation area line topology files, which seriously affects the line loss management, fault operation and maintenance and other work; In order to accurately identify and establish the topology relationship of the line in the substation area, the structure of the low-voltage substation area and the principle of topology identification are analyzed. Based on the voltage and current signal identification method, the characteristic sequence signal identification strategy is studied, and the key hardware modules are designed. A substation area topology monitoring technology based on the signal identification is proposed, which can accurately identify the topology relationship of the substation area without affecting the operation of the low-voltage substation area; Through the field application test, the topology monitoring under the operating conditions of the station area is realized, and the topology relationship of the station area can be accurately identified in a short time. It shows that the technology is practical and effective, which can meet the needs of the engineering application.

Keywords: topology identification; automatic monitoring; identification signal; low voltage station area; line monitoring terminal

0 引言

新型电力系统是能源互联网双碳目标下现阶段发展的核心形态, 未来在智能化、自动化和精细化等方面面临着的要求。低压台区处于电力系统的末端, 承担着直接向用户供电的任务。近年来, 随着低压配电网的发展, 台区的智能化、信息化水平得到了极大提高^[1-2]。然而, 在低压配电网的建设过程中, 用电负荷的增加导致配电线路和电力设施经常发生调整和变动, 而电网公司因为管理、技术等原因无法对台区档案作出及时调整, 从而导致了台区的拓扑档案与实际不符^[3-5]。错误的拓扑档案会影响台区的线

损治理、防窃电排查工作的开展, 为台区的精细化管理工作带来了诸多不便^[6-7]。因此, 进行低压台区拓扑识别技术的研究具有重要意义。

台区拓扑识别是指识别台区户变关系, 通过特征信息分析、特殊事件分析、手工排查等技术手段, 对用户电表和台区变压器之间的归属关系进行识别。户变关系的准确性对台区线损管理^[8]、数据采集成功率、三相不平衡治理、停电区域预判等精细化台区管理有重要意义。实际应用中经常会遇到因台区扩容低压配电线路改造、用户私自接电、负荷投切、相邻台区载波信号串扰组网, 以及人为失误引

收稿日期: 2022-05-13; 修回日期: 2022-06-10。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5600-201919168A-0-0-00)。

作者简介: 郑国权(1988-), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电测、用电信息采集方向的研究。

引用格式: 郑国权, 阿辽沙·叶, 李 然, 等. 基于信号识别的台区拓扑监测技术[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 58-63.

人的台区档案错误等情况, 导致户变关系不准确^[9-11]。

目前, 台区拓扑识别的研究仍处于起步阶段。当前工作主要是对台区拓扑档案的校验和修正, 尤其是对台区户一变关系的识别, 手段主要分为两种^[12-15]: 一种方法是使用专用的台区识别设备, 这里主要是指台区识别仪。台区识别仪基于脉冲电流技术和载波通信技术, 其工作原理是台区识别仪发送脉冲电流信号, 如果台区内的信号接收装置能接收到该信号并正确识别, 则可以判断该用户属于该台区, 同时, 根据所接收到的脉冲电流信号所处的相线可以判断用户的相别^[16-18]。另外一种方法是基于用电信息采集系统, 使用大数据的方法, 对采集到的用户用电信息进行相关性分析, 同一台区内用户的用电信息相关性强, 不同台区用户用电信息相关性弱, 由此来判断用户的台区归属^[19]。

这两类方法目前都存在或多或少的问题。基于台区识别仪的方法需要在低压配电网中搭配额外装置使用, 而且只适用于少量用户的台区识别, 这就使得在量大面广的台区中使用台区识别仪进行拓扑信息的识别是十分困难的^[20]。基于用户用电信息相关性的台区识别, 需要采集用户大量的电压数据, 然后对这些数据进行相关处理和计算, 这就要求算法性能足够强, 才能实现台区拓扑的实时在线校验^[21]。

针对以上方法存在的问题, 文章基于脉冲电流技术, 采用模块化、智能化的思想, 设计了一种线路监测系统, 实现了包括线路分支、电表拓扑等台区拓扑信息的在线识别, 并通过在试验园区进行现场测试, 验证了该技术方案的可行性。

1 系统结构及识别原理

文章基于脉冲电流技术, 提出了一种台区拓扑识别技术, 并基于此技术设计了线路监测终端用于硬件实现。

线路监测终端兼具信号接收和发射功能, 将监测终端分别安装在台区低压分支箱、电表箱等线路上即可实现智能配变终端、低压分支箱以及电表箱之间的可靠通信, 从而完成台区拓扑信息的识别。低压台区拓扑识别系统整体框架如图 1 所示。

拓扑信号识别基于脉冲电流技术, 在工频电压过零点附近加入特征序列信号, 利用这一调制的电压或电流波形来携带信息, 通过拓扑信号的调制、发送和接收识别来实现台区拓扑识别。本文综合使用过零电路电压畸变序列识别法和电流畸变信号直接采集识别法两种方法, 并提出了一种馈线层次关系识别方法, 来实现台区拓扑的可靠识别。

1.1 过零电路电压畸变序列识别原理

由低压配电网线路结构可知, 台区内相同相位的线路构成回路, 不同相位的线路不构成回路。由于同台区的同相位线路是直连的, 电压信号除了具有一定的衰减外, 波形是几乎完全一样的, 故可以在台区内的任何位置对相线电压进行调制, 使得其产生畸变。

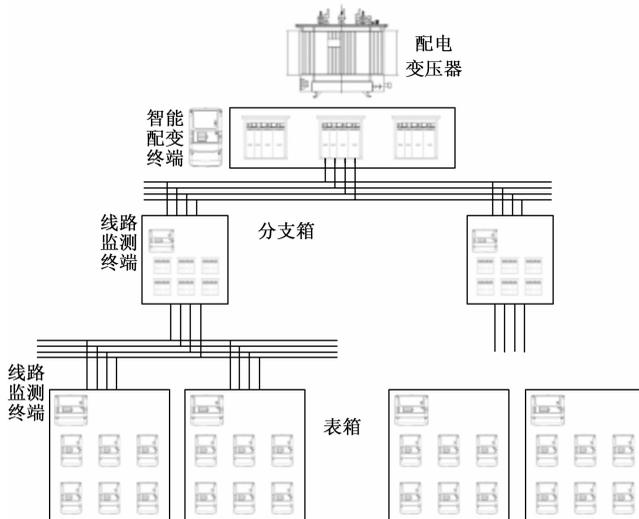


图 1 整体系统结构

当线路某处的电压发生畸变时, 同相位其他位置都能检测到该畸变, 即使畸变信号变小, 也可以可靠识别, 且当某一相电压出现畸变时, 因与其他相位无回路关系, 所以不会影响其他相位线路。

本文的线路监测终端发送端处对相线电压进行调制使其产生畸变, 这一电压畸变信号除了具有一定的衰减外, 所携带的信息是不变的, 而且因为与其他相没有回路, 也不存在跨相通信的问题。配电变压器本身的大感抗特性, 对此类畸变信号具有很好的抑制作用, 决定了电压畸变信号不易通过变压器, 所以, 跨台区通信的问题也无需考虑。

因此, 在线路监测终端的发送端, 拓扑信号发送模块对过零点附近的电压进行调制, 使得电压波形发生畸变。接收端只需要利用过零检测电路即可实现可靠的识别, 设计电压硬件过零检测模块, 通过提取整组电压过零特征, 然后识别过零点附近电压畸变与相邻电压畸变之间的非调制周期个数, 完成电压畸变序列解调识别, 从而实现对拓扑信号所带信息的提取。

1.2 电流畸变信号直接采集识别原理

同过零电路电压畸变序列识别法类似, 线路监测终端发送端在过零点附近调制电流信号使其发生畸变。接收端直接采集原始的电流畸变信号, 利用 ADC 转换器对原始的电流工频信号进行离散化处理, 然后通过分析计算, 识别出电压过零点附近的电流畸变信号。

相邻电流畸变之间的非调制周期个数也能反映电流畸变信号所携带的信息, 通过识别过零点附近电流畸变与相邻电流畸变之间的非调制工期个数, 来判别发送的数据。

基于此, 线路监测终端接收端完成电流畸变序列解调识别, 从而实现对拓扑信号所带信息的提取。

1.3 馈线层次关系识别原理

台区拓扑信息识别原理如图 2 所示。图中 B1 为台区箱式变压器, 智能配变终端安装在该位置附近, 主要负责与

表计的数据交互,实现对台区的综合监控和统一管理。D11 等为台变开关柜出线开关, F11 等为分支箱, B1111 等为用户电能表。

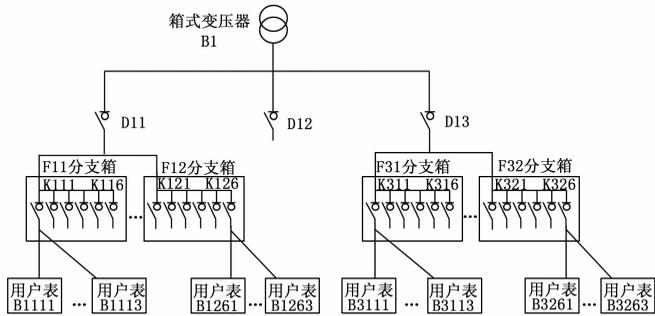


图 2 拓扑识别原理图

将线路监测终端安装在低压配电网低压分支箱、电表箱等处线路上,当智能配变终端与 D11 通信时,要求其监测终端发生脉冲电流信号。安装在 K11n、B11nn 处的监测终端都能检测到脉冲电流信号并告知智能配变终端,智能配变终端据此可判断 D11 是 K11n 和 B11nn 的上层节点。

智能配变终端依次通知各节点的监测终端发送脉冲电流信号。当安装在 K111 的线路监测终端发出脉冲电流信号后, B111n 处安装的监测终端都能检测到脉冲电流信号并告知智能配变终端,智能配变终端据此可判断 K111、B111n 的上层节点。当安装在 B1111 的监测终端发出脉冲电流信号后,没有低压智能设备能够接受到脉冲电流信号,智能配变终端据此可判断 B1111 是末端设备。

通过以上方式,智能配变终端就识别了低压线路的层次关系,形成智能配变终端-D11-K111-B111 的拓扑层次结构。经过多条线路的层次识别,便能生成整个配电网的拓扑结构。

2 硬件设计

线路监测终端是实现系统拓扑识别的主要硬件设备。为实现拓扑识别的功能,文章设计了线路监测终端硬件设备,包含拓扑发送模块,采用单相发送方式,通过插针与电源板连接,其控制信号由接口板提供。线路监测终端安装于低压配电网低压分支箱、电表箱等处线路上,是用于实现各节点装置与智能配变终端之间通信的二次设备。

根据前文所述的台区拓扑识别原理,采用过零电路电压畸变序列识别法判断电压畸变信号,采用电流畸变信号直接采集识别法来识别电流畸变信号,获取特征电流信号编码序列,同时明确畸变电流发生在哪一相上。通过线路监测终端通过发送和识别脉冲电流信号就可以判断低压配电网包括分支、电表等之间的拓扑关系。

线路监测终端采取模块化思想,主要设计了拓扑信号发送模块、电压硬件过零检测模块、电流畸变信号处理采样模块,各模块协同工作,共同实现台区拓扑信息的识别。线路监测终端拓扑识别硬件原理如图 3 所示。

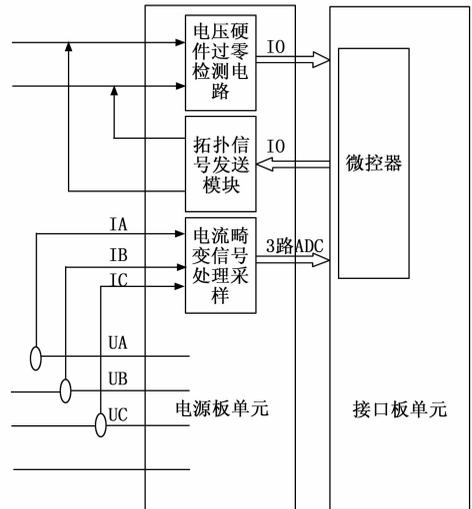


图 3 硬件原理框图

2.1 差分信号转换设计

线路监测终端备有计量采样功能和拓扑识别功能。这两种功能是通过计量采样电路和 MCU 采样电路两个功能模块来实现的。外部电压、电流的二次采样信号转为标准的正负差分信号后,一分为二:1 路给 MCU 的采样输入,实现拓扑识别功能;1 路给计量芯片的采样输入,实现计量数据监测功能。

由于现有 MCU 的 AD 输入引脚绝大部分都是单端输入,不支持差分输入,所以需要把这一路的差分信号转为单端信号再进 AD 转换器。差分信号转单端信号是通过双电源运放实现的,且必须经过两级运放实现,否则信号输入端的电压会发生变化,导致另一路的计量信号出错。通常的处理方法是:第一级运放用来实现差分信号的反向放大,第二级实现信号的抬升后放大。由于第一级和第二级的高阻抗作用,使得第一级输入信号不受影响。这种设计的局限性时电路较为繁琐,会增加电路复杂度。

本文设计一种差分信号转单端信号的方法,用单电源的单运放实现对差分信号的无缺损放大,同时不改变前端信号的幅值特性,不影响前端信号的使用。

如图 4 所示,当外部电压、电流的二次采样信号转为标准的正负差分信号、并且一分为二后,对进入 MCU 的差分信号进行处理。引入 1 个单运放的负、正端,负端做反向放大,正端加直流正偏电压,同时对信号进行抬升、反向放大。处理后输出的信号为正、且波形不变,可直接进入 MCU 的 AD 采样引脚。

同时通过串连 30 K 级的电阻,阻值远大于采样电路电阻,根据电压均分原理,在采样电阻上的偏置电压远小于采样电压,影响可忽略不计。由于差分信号在输出端做了抬升处理,进入运放的信号为正,所以运放不需要负电源支持,则电路相应减少了负电源的器件。通过降低电路复杂度,用单个运放来实现差分信号转换成单端的双采样信号,即只用一个运放和单电源就能实现计量采样和拓扑识

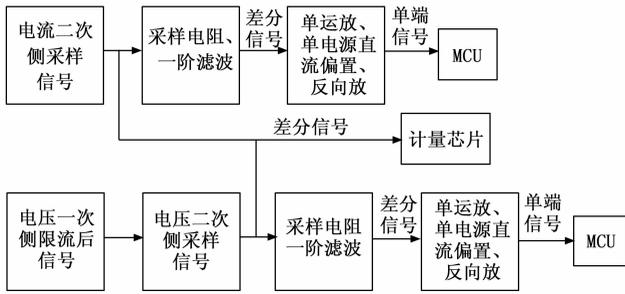


图 4 差分转单端信号原理框图

别双采样的功能。

2.2 电压硬件过零检测模块

电压硬件过零检测模块的设计目的有两方面：一是交采电压信号过零检测，用于辅助拓扑信号发送模块发送拓扑信号；二是交采电压畸变信号识别，用于识别电压畸变序列编码。

电压硬件过零检测模块的基本功能是完成交采电压信号的过零检测，辅助其他两模块实现拓扑信号的发送和识别。电压硬件过零检测电路如图 5 所示。

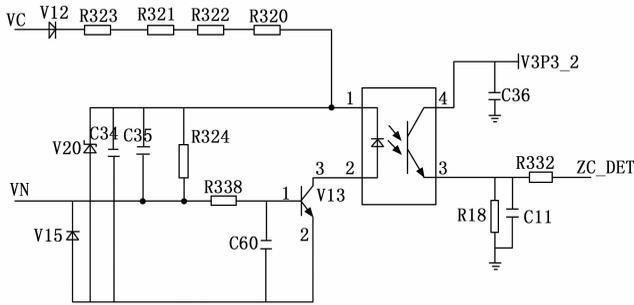


图 5 电压过零检测电路

另外，电压硬件过零检测模块能够识别交采电压畸变信号，通过电压信号过零特征的识别，实现电压畸变序列编码的识别。前端电压信号采样电路如图 6 所示。

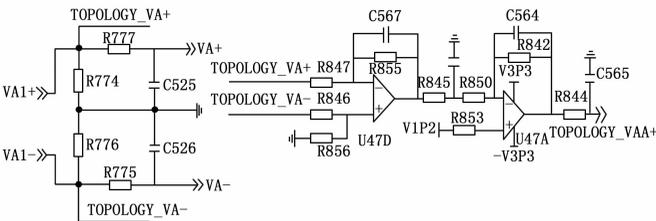


图 6 电压信号采样电路

2.3 拓扑信号发送模块

拓扑信号发送模块用于发送拓扑识别信号，通过控制可控硅在电压过零点附近导通，开启畸变电流回路，从而产生畸变电流。畸变信号发生回路主要由可控硅、限流电感、保险丝组成。

拓扑信号发送模块采用模块化设计，模块与电源板通过插针连接，由电源板提供两组接口：

- 1) 提供两个 IO 口对拓扑发送模块光耦进行互斥控制
- 2) 提供火线和零线接口，用于将调制信号加入到电力线上。

2.4 电流畸变信号处理采样模块

电流畸变信号处理采样模块主要用于识别电流畸变信号，直接采集电流畸变信号，ADC 转换器对原始的电压电流工频信号进行离散化处理，通过识别过零点附近电压电流畸变与相邻电压电流畸变之间的非调制工期个数，来判断发送的数据。从中处理后的接受信号中提取信息，从而实现电流编码序列的识别。前端电流信号采样电路如图 7 所示。

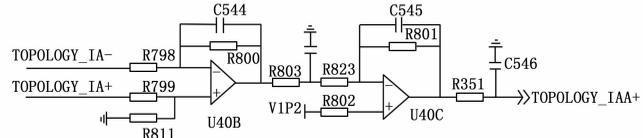


图 7 电流信号采样电路

3 拓扑识别策略

使用线路监测终端进行台区拓扑信息的识别，需要建立通信链路后应用拓扑识别原理开展信号识别。

智能配变终端与各线路监测终端建立通信链路，记录通信地址等基础档案。

3.1 特征信号生成

智能配变终端发起拓扑识别命令，通知安装于台区变压器开关柜出线开关处的线路监测终端依次发送拓扑识别信号，将接收到第 k 个出线开关拓扑识别信号的 P 个节点集合记为 $S^{(k)} = \{s_1^{(k)}, s_2^{(k)}, \dots, s_p^{(k)}\}$ ，并告知智能配变终端。

3.2 信号识别策略

对于集合 $S^{(k)}$ 内的第 p 个节点 $s_p^{(k)}$ ，智能配变终端通知其线路监测终端发送拓扑识别信号，设集合 $S^{(k)}$ 内其他检测到该信号的节点的数量为 m 。

1) 若 $m = 0$ ，即集合 $S^{(k)}$ 内其他线路监测终端都没有检测到拓扑识别信号，则认为该节点属于末端设备，保存识别结果。

2) 若 $m \neq 0$ ，即集合 $S^{(k)}$ 内有其他线路监测终端检测到拓扑识别信号，则将这些线路监测终端集合记为 $S_p^{(k)} = \{k_{p1}^{(k)}, k_{p2}^{(k)}, \dots, k_{pQ}^{(k)}\}$ ，表示集合 $S_p^{(k)}$ 为 $S^{(k)}$ 内第 p 个线路监测终端的下层节点，保存识别结果，并告知智能配变终端。

集合 $S^{(k)}$ 内所有线路监测终端依次进行上述操作，直至所有节点完成识别。

对于集合 $S_p^{(k)}$ 内的第 q 个节点，智能配变终端通知其线路监测终端发送拓扑识别信号，设集合 $S_p^{(k)}$ 内其他检测到该信号的线路监测终端的数量为 n 。

1) 若 $n = 0$ ，即集合 $S_p^{(k)}$ 内其他线路监测终端都没有检测到拓扑识别信号，则认为该节点属于末端设备，保存识别结果。

2) 若 $n \neq 0$ ，即集合 $S_p^{(k)}$ 内有其他线路监测终端检测到拓

扑识别信号,则记这些线路监测终端集合 $S_{pq}^{(k)} = \{k_{pq1}^{(k)}, k_{pq2}^{(k)}, \dots, k_{pqq}^{(k)}\}$,表示集合 $S_{pq}^{(k)}$ 为 $S_p^{(k)}$ 内第 q 个线路监测终端的下层节点,保存识别结果,并告知智能配变终端。

集合 $S_p^{(k)}$ 内所有线路监测终端依次进行上述操作,直至所有节点完成识别。

智能配变终端综合以上识别结果,分析得出配变出线开关—分支箱—表箱—用户表的层级线路关系,更新拓扑档案,完成台区拓扑识别。

4 测试结果与分析

4.1 测试条件

为了满足现场应用的需要,对本文技术方法的测试验证应符合低压台区线路和设备安装的实际情况。

根据前述章节分析的系统结构和馈线层次关系,为验证台区拓扑识别技术的可行性,选择合适的低压台区,开展实际情况下的现场测试。现场测试环境如图 8 所示。

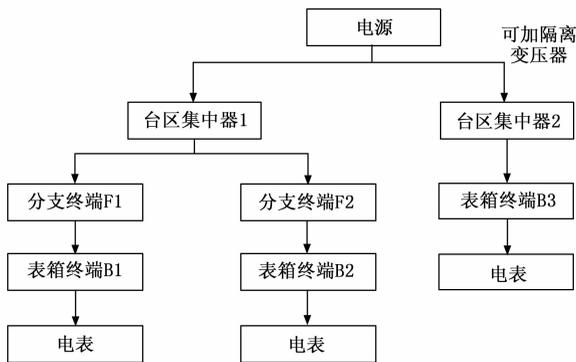


图 8 测试环境

其中,分支终端也使用多表位终端样机,只是未接电表,当做一个分支终端使用。

集中器到表箱终端的具体接线方式如图 9 所示。

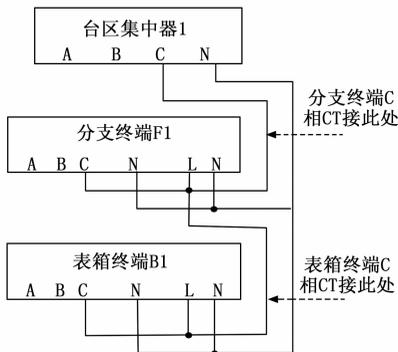


图 9 接线方式

4.2 测试方法

4.2.1 测试流程指令

在表箱终端 B1 侧发送拓扑识别指令,用于开启整个拓扑识别流程,具体指令如下:

指令 1: toprxd 2—开启拓扑识别指令,识别 2 个字节

的编码,支持 2~6 个字节;

指令 2: toptxd 01 02—拓扑触发指令,2 个字节,编码为 0102,支持 6 个字节,每个字节之间空格隔开。

需要注意的是,表箱终端 B1 发出的 toprxd 0102 拓扑触发命令,其自身可以收到,分支终端也能收到;分支终端发出的 toprxd 0102 拓扑触发命令,表箱终端是不能收到的,只有上级终端能收到。在测试中成功收到编码后会生成以下日志:

```
[2020-01-05 14: 16: 57. 0555 TopDevice]: Phase: 3, RightNum: 7, 07, 01, 08, 00, 00, 00, 00, max: 23. 0, min: 20. 7 [2020-01-05 14: 16: 57. 0838 Sys- Manage]: 1578233817 从 3 相接收到拓扑识别编码: 0107
```

一般情况下开角越大,触发电流就会越大,但是触发电流达到能识别的电流后,再增大并不会帮助提高成功率,如开角到 700 μ s 时成功率和 600 μ s 是差不多的。为安全考虑,开角一般不允许超过 800 μ s。开角相关指令如下:

指令 1: 查看开角命令 show angle;

指令 2: 设置开角命令 set angle 650。

另外,系统也支持报文的设置和抄读,具体如下:

```
读取拓扑开角参数: 68 AA AA AA AA AA AA 68 00 02 63 33 64 16;
```

```
设置拓扑开角参数: 68 AA AA AA AA AA AA 68 00 06 33 63 D0 D1 D2 D3 CS 16。
```

4.2.2 识别成功率测试

为验证该拓扑识别方案的正确性,进行拓扑成功率测试。测试过程中使用 testtop 命令进行拓扑识别测试,该命令能够通过设置起始地址、执行次数、间隔时间等实现拓扑触发的重复执行,避免了手动输入不方便的问题。其中起始地址和执行次数需要人为设置,间隔时间在不设置的情况下默认为 9 s,即每一个拓扑识别命令间隔 9 s 发送。需要注意的是,若间隔时间小于 5 s,拓扑触发会被拦截,所以为保证拓扑识别测试实验的严谨性,硬件要求拓扑触发间隔至少 5 s。

具体测试命令举例如下:

```
testtop 0101 100 10
```

表示测试编码从 0101 开始,测试 100 次,间隔为 10 s。

4.3 测试结果分析

使用不同变比的电流互感器进行对比测试,在开角为 600 μ s,触发电流 24~29 A 的条件下经过 100 次重复验证,测试成功率结果如表 1 所示。

表 1 实验结果

电流互感器变比	识别准确率/%
400:5	97.0
800:5	97.5

测试结果基本与现场实际拓扑关系基本相符,识别准确率较高,表明本文基于信号识别的拓扑监测技术能够进行准确、有效地拓扑识别。即使在不同的电流互感器变比

情况下,也能够满足现场实际工程应用的需要。

5 结束语

本文针对低压台区拓扑档案混乱、无法准确监管的问题,研究了特征信序列号识别方法和策略,提出了一种基于信号识别的台区拓扑监测系统和技术,能够有效解决台区拓扑档案带来的管理失能。通过现场测试验证,证明了该方法的有效性和实用性,能够准确、快速地识别台区实际线路拓扑关系,实现运行中的拓扑监测,为台区精细化管理提供必要的技术支持。

参考文献:

- [1] 闫卫国,王高猛,林济铿,等.基于AMI量测信息的低压配电网拓扑校验方法[J].中国电力,2019,52(2):125-133.
- [2] 欧新,韩鹏,卢玉凤,等.基于N线的拓扑感知技术研究[J].计算机测量与控制,2022,30(1):154-160.
- [3] 蔡秋芸.脉冲载波技术在台区用户识别中的应用[J].科技创新导报,2010,168(24):26.
- [4] 黄吕超,冯笑,陈明辉,等.基于拓扑层级关系结构的便携式低压智能检测仪设计[J].计算机测量与控制,2021,29(10):228-232.
- [5] 唐泽洋,周鲲鹏,曹侃,等.基于配电网运行数据的线变关系校验方法[J].高电压技术,2018,44(4):1059-1068.
- [6] 李国昌.基于LoRa技术和GPU加速的台区拓扑辨识方法[J].电测与仪表,2019,56(21):88-95.
- [7] 于仕哲.基于DSP的电气在线监控系统的设计及实现[D].北京:华北电力大学,2013.
- [8] 夏水斌,余鹤,董重重,等.基于集抄系统深化应用的低压台区电网拓扑重构方案[J].电测与仪表,2017,54(20):110-115.
- [9] 李嫣然.220kV终端变电站低压母线自愈关键技术研究[D].

(上接第57页)

- [6] 陈策,武伟,盛珂,等.基于ATML标准架构的通用半实物仿真测试平台[J].计量与测试技术,2020,47(9):35-40.
- [7] WANG N, ZHAO W, SUN S M, et al. Hardware-in-loop test platform design for AVC sub-station of the new energy station based on RT-LAB[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 510: 022016.
- [8] 夏佳佳,邹毅军,周江伟,等.嵌入式软件自动化测试系统研究[J].计算机测量与控制,2016,24(4):22-25.
- [9] 张家旭,郭崇,王晨,等.基于半实物仿真平台的自动泊车系统性能评价[J].吉林大学学报(工学版),2022,52(7):1552-1560.
- [10] 李忠安,沈全荣,王言国,等.电力系统智能装置自动化测试系统的设计[J].电力系统自动化,2009,33(8):77-80.
- [11] 何谢振,周志飞,蒋剑.LKJ-15C主机软件半实物自动化测试系统设计[J].控制与信息技术,2021(4):89-94.
- [12] DL/T645-2007,多功能电能表通信协议[S].中国:中华人

昆明:昆明理工大学,2015.

- [10] 范开俊,徐丙垠,董俊,等.基于智能终端逐级查询的馈线拓扑识别方法[J].电力系统自动化,2015,39(11):180-186.
- [11] 卢德龙,王巨灏,张颖,等.计及用户侧数据不确定性的台区线损粗糙算法[J].电力需求侧管理,2020,22(6):33-38,44.
- [12] 王海云,张岩,闫富荣,等.基于深度神经网络的低压台区线损异常识别方法[J].电力需求侧管理,2018,20(6):31-35.
- [13] 李平,吴伟将,严永辉,等.基于数据驱动的台区户一变关系核查方法研究[J].电力需求侧管理,2020,22(1):64-68.
- [14] 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.
- [15] 李亚,樊汝森,蒋伟,等.基于BP神经网络的智能台区识别方法研究[J].电测与仪表,2017,54(654):31-36.
- [16] 袁超.低压配电网台区识别技术的研究与开发[D].大连:大连理工大学,2014.
- [17] 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):31-34.
- [18] 姜慧竹,宋玮琼,王学良,等.小波变换+BP神经网络识别高速载波台区的方法[J].信息技术,2020,44(4):147-151,156.
- [19] 李东升,杜青.利用现有技术提高用电信息采集成功率[J].电力需求侧管理,2012,14(4):38-40.
- [20] 赵磊,单渊达,李蔚.电力线载波抄表的新进展[J].电力需求侧管理,2004(4):30-32.
- [21] 李国昌,宋玮琼,姜慧竹,等.基于过零时刻与SNR算法的电能表台区识别方法研究与应用[J].电测与仪表,2019,56(7):148-152.

- [13] Q/GDW 11612.1—2016,低压电力线宽带载波通信互联互通技术规范[S].中国:国家电网公司,2016.
- [14] Q/GDW 1376-2—2013,电力用户用电信息采集系统通信协议[S].中国:国家电网公司,2013.
- [15] 余万祥,李维波,徐聪,等.基于STM32+W5500的双环网磁场数据采集技术[J].中国舰船研究,2019,14(6):58-66.
- [16] 彭道刚,张浩,李辉,等.基于Modbus协议的ARM嵌入式监测平台设计与实现[J].电力自动化设备,2009,29(1):115-119,123.
- [17] 周阳明.基于Python语言的自动测试系统通用软件平台实现[J].电子设计工程,2019,27(5):81-85.
- [18] 李芍,冯亮,张领辉,等.基于异步通信的综合模块化车辆电子系统软件重构[J].兵工学报,2020,41(10):1939-1949.
- [19] 宋宏川,詹浩,魏中成,等.基于XML的飞行仿真气动力模型存储格式[J].航空学报,2020,41(9):85-95.