

# 低压供电网络暗埋式线路走向识别仪设计

胡越月,熊丙权,邓薇,田粟

(国网重庆市电力公司南岸供电分公司,重庆 400060)

**摘要:**在低压配电网中,暗埋线路因其安全性高、稳定性强和隐蔽性好等特点广泛应用于居民小区等集中供电区域,然而在竣工验收、户表核对等情况下需要确定暗埋线路的走向,目前尚没有在一种不停电、不入户的前提下高效准确识别暗埋线路走向的装置或手段。介绍了一种基于传输线理论的暗埋式线路走向识别仪,利用基于FPGA的DDS信号发生器产生所需特征高频信号,通过信号耦合电路将特征信号注入待测输电线路,特征信号经由作为天线的输电线路进行传播,利用全向接收天线检测沿线有无特征信号来识别出线路的走向。通过分析低压电力线的电磁场特性建立了高频信号在低压电力线中的衰减特性模型,并根据居民楼输电实际距离模型来排除多径效应对于检测结果的干扰。最后,通过居民楼的实地测试验证了该系统的可靠性。

**关键词:**低压供电网络;暗埋线路走向;信号识别

**中图分类号:**TM733 **文献标识码:**B **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21873

## Buried Transmission Line Recognition System in Low Voltage Supply Network

HU Yueyue, XIONG Bingquan, DENG Wei, TIAN Li

(Nanan Power Supply Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** In low-voltage distribution network, the buried lines are widely used in residential areas because of its high safety, strong stability and good concealment, during the process of final acceptance of the building or household-meter checking, the direction of the buried line need to determined. However, there is no such kind of device or method that can identify the direction of the buried line accurately without power cut and entering households. A buried line direction recognition instrument based on transmission line theory was introduced. The characteristic high frequency signal was generated by DDS signal generator and coupled into the transmission line through signal coupling circuit, then the characteristic signal was transmitted through the transmission line as the antenna, and the omnidirectional receiving antenna was used to detect a characteristic signal along the line to identify the direction of the line. The attenuation model of the low-voltage power line was established by analyzing the electromagnetic field characteristics of high frequency characteristic signal in the low-voltage power line. Distance model of household power lines on different floors was established to eliminate the interference between adjacent lines. Finally, the reliability of the system was verified by the field test in the residential building.

**Key words:** low voltage supply network; direction of buried transmission line; signal identification

随着城市化进程日渐加快,居民小区等集中用电区域越来越多。暗埋线路凭借安全性高、美观性好等优势,成为新建小区的低压(220 V/380 V)供电网络的主要走线方式。然而,暗埋式线路的一个缺点是:在进行“表计接线错误”、老旧小区表后线排查、投诉处理、新上小区户表关系核对验收等需要进行户表关系核实时,无法直观地看到

暗埋线路的走向。最传统的方法是通过依次开断电能表空开或者增加负荷的方法,排查户表对应关系,该方法的前提是多位住户同时在家,并且用户家里需要短时停电或增加额外电费,这不仅增加了排查工作的难度,也给用户造成不小的困扰。目前市场上的串户排查设备多需要在用户家中安装检测设备来确定户表对应关系,并不

是完全的“不入户”前提下进行的户表核对<sup>[1-3]</sup>。在建设智能电网的大趋势下,改进现有方法或研制新型装置以提高暗埋线路走向识别的处理效率和提升用户体验成为一个亟待解决的问题。目前对于暗埋线路走向的判断,尚没有一种完全不入户、不停电、高效准确识别暗埋线路走向的装置或手段。

本文提出利用高速信号采集处理的数字化线路走向识别仪,来实现暗埋线路识别过程不入户、不停电的目标。当输电线上有交变电流流动时,就可以在线路周围发生电磁波的辐射,此时的输电线路就具有了作为天线的特性,能够进行信号传播<sup>[4-8]</sup>。本文利用该原理,在待检测线路的一端注入特征信号,使信号沿输电线路进行传播,通过沿线路收集并判断有无特征信号,来识别出线路的走向。由于低压电力线的设计不同于光纤、双绞线等通信传输线,并未考虑高频信号传输的需要,因此载波信号在低压电力网络中传输时信号衰减十分严重,且易受到多径效应的影响。为了在检测终端能够可靠地检出信号,必须保证信号在传输路径上的强度和信号完整性。

本文通过分析低压电力线的电磁场特性,对其进行基于传输线理论的建模,在该模型基础上分析高频信号在电力线中的衰减特性,得出了高频信号在低压电力线中的衰减特性曲线,并通过建立居民楼内实际传输线距离模型排除相邻传输线耦合效应对于检测结果的干扰。形成一套不停电、不入户、高效准确识别暗埋线路走向的装置,居民楼中的实地测试表明该系统检测结果的可靠性。

### 1 理论基础

高频特征信号注入低压电力线之后,会在线路周围产生辐射,由于特征信号的频率较高,传输信号模型为分布参数模型。为了精确地描述高频特征信号在低压电力线中的衰减情况,我们对电力线周围的电磁场分布情况进行分析,建立了基于电磁场理论的电力线传输线模型。由于电力线在电能表到用户间会有一段并行排线的情况,相邻之间的导线之间会相互干扰,因此需要考虑多导体存在下的电力线模型。

假设传输线平行分布,电场分量和磁场分量平行于XOY平面。因此,将导体轴向方向设为z轴,图1所示为n+1个导体构成的传输线,其中n

个导体为谐振单元导体,另一个为参考导体。

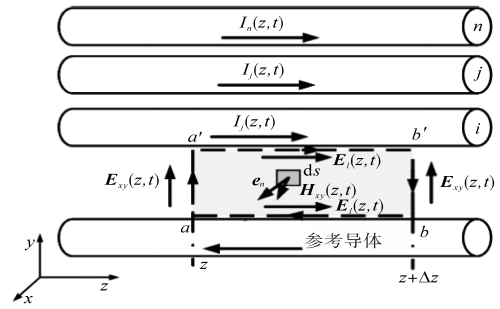


图1 多导体传输线模型

Fig.1 Multi-conductor transmission line model

根据图1,在参考导体与第i个导体之间选取一段长度为Δz的微元,在这段微元内两导体围成的表面S<sub>i</sub>,外围路径C<sub>i</sub>,根据法拉第电磁感应定律,可得外围路径内产生的感应电动势:

$$\int_a^{a'} \mathbf{E}_{xy} \cdot d\mathbf{l} + \int_{a'}^b \mathbf{E}_z \cdot d\mathbf{l} + \int_b^{b'} \mathbf{E}_{xy} \cdot d\mathbf{l} + \int_b^a \mathbf{E}_z \cdot d\mathbf{l} = \mu \frac{d}{dt} \int_{S_i} \mathbf{H}_{xy} \cdot \mathbf{e}_n ds \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}_{xy}$ 表示位于平行于XOY平面的横向电场; $\mathbf{E}_z$ 表示沿着导体表面的电场,或z方向电场; $\mathbf{H}_{xy}$ 为磁场强度; $\mathbf{e}_n$ 为该点的外法线单位向量; $\mu$ 为导体的磁导率。

每个导体的电压电流均可写成上述形式,于是可以将其整合成矩阵形式:

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{U}(z,t) = -\mathbf{R}\mathbf{I}(z,t) - \mathbf{L} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{I}(z,t) \quad (2)$$

设第i个导体与第j个导体之间的电导为G<sub>ij</sub>,它表示横向平面上两个导体间流过的传导电流与导体间的电压之比,那么传输线单位长度的电荷可以根据每对导体间的单位长度电容c<sub>ij</sub>定义,将每个导体的电流方程列出,可以得到矩阵形式的方程:

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{I}(z,t) = -\mathbf{G}\mathbf{U}(z,t) - \mathbf{C} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{U}(z,t) \quad (3)$$

如果将第i个导体上单位长度的总电荷表示为q<sub>i</sub>,则电容矩阵C满足:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{C}\mathbf{U} \quad (4)$$

式中:Q为每个导体单位长度电荷组成的列向量。类似地,可以得到电导矩阵满足的表达式:

$$\mathbf{I}_t = \mathbf{G}\mathbf{U} \quad (5)$$

式中:I<sub>t</sub>为全部导体单位长度上流过的横向传导电流。

式(2)~式(5)中单位长度的电阻矩阵R、电感矩阵L、电容矩阵C和电导矩阵G是反映多导

体传输线结构特性的参数,对于导体中的电压、电流分布至关重要,而对于特定的传输线结构,可以通过计算得到各个参数矩阵。针对传输线方程特点,将整个传输线方程组解耦:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial z^2} U(z,t) = [RG]U(z,t) + [RC + LG] \frac{\partial}{\partial z} U(z,t) + LC \frac{\partial^2}{\partial t^2} U(z,t) \\ \frac{\partial^2}{\partial z^2} I(z,t) = [GR]I(z,t) + [CR + GL] \frac{\partial}{\partial z} I(z,t) + CL \frac{\partial^2}{\partial t^2} U(z,t) \end{cases} \quad (6)$$

由于低压电力线特征参数的复杂性,单位长度的电阻矩阵  $R$ 、电感矩阵  $L$ 、电容矩阵  $C$  和电导矩阵  $G$  需通过实际测量得到,代入式(6)便可以得到低压电力线中各个位置的电流和电压分布,进而得到空间磁场分布情况。

基于该传输线方程,结合居民楼走线特点和距离模型,可以得到对应住户家特征信号的强度范围,从而判定户表关系的对应性。如图2所示,  $d_p$  为电能表出线端多传输线并列部分的长度,  $d_l$  为跨楼层走线长度,  $d_h$  为住户所在楼层的走线长度。

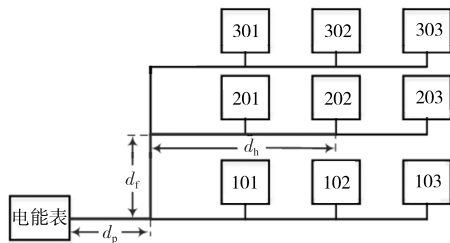


图2 不同楼层住户电力线距离模型

Fig.2 Distance model of household power lines on different floors

以图2所示的距离模型为例,利用式(6)进行计算,假设在户表关系核对时,在202户所对应的电能表出口端耦合高频特征信号,由于电能表出线端存在一段并行排线的情况,特征信号会通过电磁耦合串扰到其他住户的电力线中,因此无论是否202户的户表关系是否对应,202的入户端的电力线中都有可能存在特征信号,如何判断接收到的是真实特征信号还是串扰特征信号,是正确判断户表关系的重要基础。由上面推导出来的多导体传输线模型可知,邻近电力线串扰信号的幅值明显小于原特征信号的幅值,因此为了排除串扰对判断结果的影响,我们对于检测端的信号幅值设置一个阈值,当检测到的信号大于该阈

值时,才能判定为接受到特征信号,从而确定户表关系对应正确。

## 2 设计方案

本线路识别系统按照作用位置的不同可以分为信号加载模块、信号扰变模块和信号识别模块三部分,如图3。信号加载模块作用在低压配电网电能表用户侧的输电线上;信号扰变模块的作用是消除反向信号对于原信号的串扰,因此作用在信号加载模块靠近电能表的一侧;信号识别模块是手持式可移动的模块,作用在待检测暗埋线路附近。

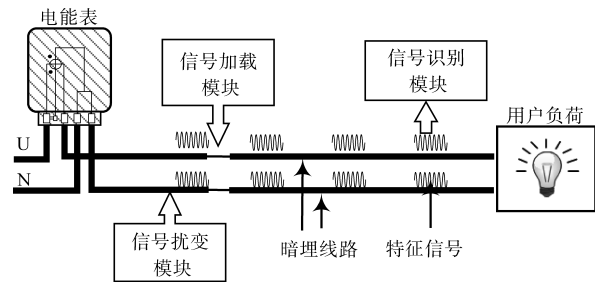


图3 系统结构示意图

Fig.3 System structure diagram

### 2.1 信号加载模块

信号加载单元负责产生具有特征值的调制信号,并将其注入到电能表空开或室内配电箱空开的负载侧。该模块又可以分为信号产生模块、信号注入模块两个子模块,如图4所示。

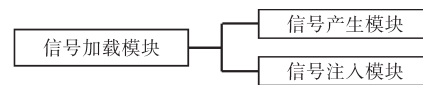


图4 信号加载模块分解示意图

Fig.4 Decomposition diagram of signal loading module

#### 2.1.1 信号产生模块

信号发生装置产生的信号必须满足所需信号的频率、强度的要求。为了减少环境信号对于有效信号的干扰,需选择实际测量环境中干扰信号最小的频段作为发生信号的频段。使用信号强度检测仪进行了多个新旧小区测量现场的干扰频段及强度测试,测试结果表明:500 MHz ~ 1 GHz 频段内干扰信号最弱。另外,还进行了线缆、隔离材料对信号衰减程度测试,测试结果表明:注入特征信号的强度应至少达到 15 dBm。

综上,我们对于信号发生装置的要求是:能够产生频率在 500 MHz ~ 1 GHz 内、强度在 0 ~ 15 dBm 内的信号,执行准确率达到 99.7% 以上。根据以上指标,最终采用了基于 FPGA 芯片的 DDS

信号发生器。

### 2.1.2 信号注入模块

信号注入模块负责将信号产生模块中发出的信号高质量注入到低压网络中。在注入过程中,该模块需要确保供电网络的高压交流侧与信号产生模块的低压直流侧在物理意义上保持隔离状态。

信号注入模块的核心部分是信号耦合电路,本文采用电容耦合的方式,相比于电感耦合,电路结构更加简单,传输特性更优秀<sup>[9]</sup>。电容耦合的主要元件是耦合电容器,电路图如图5所示,该耦合电路将高频特征信号直接注入到低压电网中。

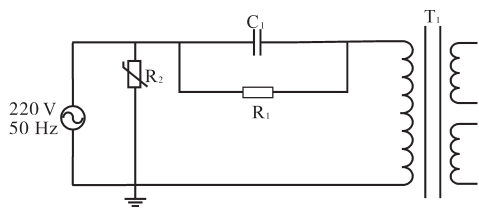


图5 电容耦合电路  
Fig.5 Capacitive coupling circuit

图5中,  $C_1$  一端接入低压电网,因此需要采用高压电容,耐压值大于300V;高频电容  $C_1$  不仅起到耦合高频载波信号的作用,而且还能隔离高压工频信号;  $T_1$  的初级线圈与  $C_1$  组成高通滤波电路,阻止来自电网的工频信号,削弱低频噪声和干扰信号,同时保证高频特征信号的通过,并尽量减少对其的衰减作用;  $R_2$  是一个阻值非线性的压敏电阻,正常情况下漏电流很小,对电路的作用可以忽略,当其两端的电压超过了自身的额定值时,  $R_2$  阻抗明显减小,电流主要从该通路流过,对电路中其他元件起到保护作用;  $R_1$  为  $C_1$  的卸荷电阻,用于消耗积累在  $C_1$  两端的电荷。

### 2.2 信号扰变模块

考虑到信号注入后传播没有方向性,为防止反向信号反射后与原信号发生串扰,还需在反向加入扰变模块对反向信号进行抑制。夹式电源线滤波磁环因为可单触式安装,不必切割电缆,且具有极佳的高频噪声吸收性能,在高频信号抑制中应用最广。根据信号衰减程度的要求,我们选择了ZCAT 2035-0930型号的磁环滤波器,对于该磁环进行扫频测试,得到了其对应的伯德图,如图6所示。幅频特性图表明该滤波器对500MHz~1GHz的信号衰减程度 $\geq 52$ dB。

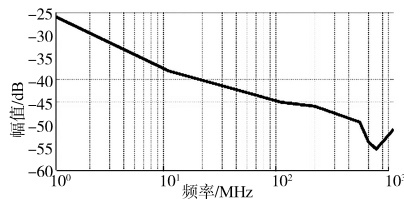


图6 滤波磁环幅频特性图

Fig.6 Amplitude-frequency characteristic curve of filter

### 2.3 信号识别模块

信号识别单元负责对伴随线路走向的信号进行接收,再对信号进行采集、解调、判断,最后将结果显示出来。信号识别单元又可以分为信号接收模块和采集处理模块。

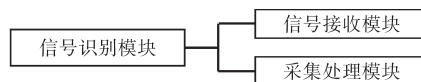


图7 信号识别模块组成框图

Fig.7 Composition block diagram of signal identification module

#### 2.3.1 信号接收模块

信号接收模块用于接收待测线路中具有特征值的无线信号,使用天线装置来实现。选用摩托罗拉PMAE4002/3 GP系列全向天线。

#### 2.3.2 采集处理模块

使用DSP数字信号电路来实现对于高频信号的实时处理<sup>[10]</sup>,硬件系统板选用FMC6416P/PA,为了检验其响应速度,我们对该类元件进行1000次中断响应速度试验。测试时,采集处理板供电电压5V,数据口连接电脑,测试表明,该采集处理板的中断响应用时均小于1 $\mu$ s,满足我们高速信号采集的需求。运用Java语言编写了软件程序,程序流程图如图8所示。

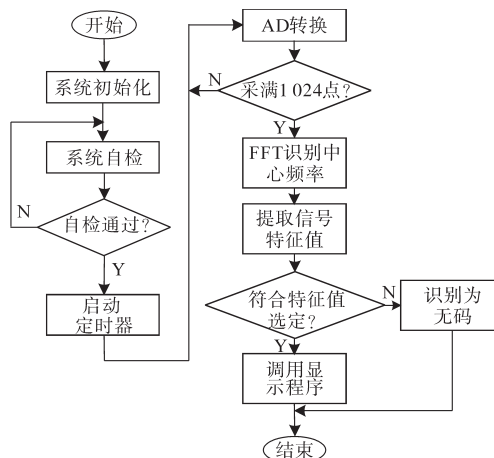


图8 程序流程图

Fig.8 Procedure flow chart

对编写的程序进行调试、仿真,检验其信号采集和处理仿真准确率。测试时,将不同频率下

有特征值的信号和无特征值的信号都输入程序中,检验程序是否能成功输出结果。测试结果表明:程序的信号采集和处理仿真准确率达到100%,满足工程实践要求。

### 3 现场试验及结果分析

低压供电网络暗埋式线路走向识别仪研发完成后,为了验证整体效果,我们选取了共10处居民小区(5处老小区和5处新小区),使用本仪器对其暗埋式线路分别进行了表后线排查工作和表后线竣工验收工作。

为实现不入户不断电识别暗埋线路走向,最大探测深度、最大探测距离是该识别仪必要的两个性能指标。

#### 3.1 最大探测深度模拟测试

最大探测深度表明了该识别仪能检测到的输电线的最大埋线深度。测试时,测试信号频率为1 GHz,强度为15 dBm,线缆长度150 m,隔离材料密度为2 500 kg/m<sup>3</sup>,测试结果如图9所示。

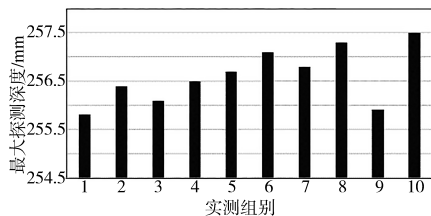


图9 最大探测深度测试结果

Fig.9 Test results of maximum detection depth

由图9可知,10次测试得到的最大探测深度平均值为256.61 mm,最小值为255.8 mm,大于一般情况下的暗埋线路深度。

#### 3.2 最远探测距离模拟测试

最远探测距离是指手持的信号接收模块能接收到信号处与信号注入点处的最大距离。测试信号频率为1 GHz,强度为15 dBm,暗埋线缆与探测仪之间间隔240 mm,隔离材料为2 500 kg/m<sup>3</sup>的混凝土,进行了10次测试,结果如图10所示。

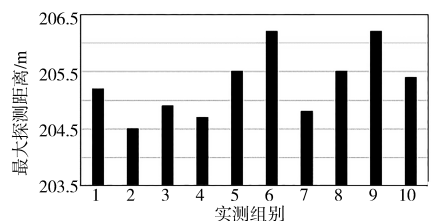


图10 最远探测距离测试结果

Fig.10 Test results of farthest detection distance

由图10可知,10次测试的平均最大探测距离为

205.29 m,最小值为204.7 m,满足现场测试要求。

综上所述,识别仪能够实现不入户、不断电识别低压供电网络线路走向的功能。现场测试通过后,使用本仪器共完成1 470户新老小区的表后线核对工作,现场工作时不入户率、不停电率均达到100%,大大降低了户表关系核对的人力和时间成本。

### 4 结论

文中提出了一种基于高速信号采集处理的低压供电网络暗埋式线路走向识别仪设计思路,利用电容耦合电路将特征信号注入传输线中,并利用传输线的天线特性检测其辐射出的特征信号,从而判断暗埋式线路的走向。

现场实测结果表明,该识别仪可探测暗埋深度小于等于255.8 mm的线路,可以在信号加载点204.7 m之内探测到特征信号。将本文中提出的低压供电网络暗埋式线路走向识别仪用于实际居民楼户表关系核对案例中,实现了不停电、不入户的情况下检测到暗埋线路的走向从而核对户表关系的目标,极大地节约了人力,有效提高户表关系核对的效率。

#### 参考文献

- [1] 周纯,刘纲,费涛,等.基于支持向量机的串户排查方法[J].中国新通信,2020,22(4):45-46.
- [2] 熊德智,杨帅,陈向群,等.低压用户串户检测装置的设计[J].电测与仪表,2015,53(19):119-124.
- [3] 寇英刚,范洁,楚成博,等.无线电能表串户排查的传输损耗研究[J].哈尔滨理工大学学报,2018,23(3):28-33.
- [4] Wang W, Zhang L. Algorithm for end user data collection in a transformer area[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2017, 12(2):292-293.
- [5] 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.
- [6] 张慧.低压宽带电力线信道和噪声建模研究[D].北京:华北电力大学(北京),2019.
- [7] 葛纹伉,张腾,高若愚,等.低压电力线通信技术特点及其网络模型研究[J].电力设备管理,2020(3):77-79.
- [8] 李松浓,胡晓锐,郑可,等.低压电力线载波通信信道衰减特性测量与分析[J].电力系统保护与控制,2018,46(4):99-106.
- [9] 蔡红娟,贺良华.基于低压电力线通信的信号耦合电路设计[J].电力科学与工程,2007,23(1):49-51.
- [10] 黄振.基于DSP和FPGA的多通道数据采集系统设计与实现[D].武汉:华中科技大学,2018.

收稿日期:2020-05-07

修改稿日期:2020-06-27