

基于 PTR2000 模块的直流系统 接地故障多点监测的研究

戴 勇,白英杰,张 华

(南京师范大学电气与自动化工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 直流系统是发电厂、变电站中十分重要的电源系统,其组成的供电网络是一个复杂的、并联支路众多的网络,而自身的可靠性及安全性直接影响到整个电力系统的安全. 本文针对直流感地故障检测中因分布电容的存在而造成对检测结果的影响,设计了超低双频交流信号注入法,配置无线通信 PTR2000 模块和适用于本系统自定义的无线通信协议,实现无线多点数据采集和传送的功能,进行了接地电阻和电容值的测试和远程传送,测试结果证实了设计的正确性和可行性.

[关键词] 直流系统监测,超低双频交流信号,PTR2000 模块,无线数据传送

[中图分类号] TM93 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2017)02-0030-07

Research on Multiple Grounding Fault Detection of Direct Current System Based on PTR2000 Module

Dai Yong, Bai Yingjie, Zhang Hua

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Direct current system is an extremely important power system in power factory and transformer substation, and the power supply network made up of it is a network of complex and multiple parallel branches. In the meantime, accountability and safety of the DC system itself have a direct impact on the safety of the whole power system. In light of the influences of distribution capacitors on detection resulting in the DC grounding fault detection, the paper designs an ultra-low dual frequency AC signal injection method. Configured with wireless communication module PTR2000 and self-defined wireless communication protocol adapted to the alleged system, it achieves wireless multiple-point data collection and transmission. This paper conducts tests and remote transmission of grounding resistance and capacitance value, and the results verify validity and feasibility of the design.

Key words: direct current system detection, ultra low dual frequency AC signal, PTR2000 module, wireless data transmission

直流系统是发电厂、变电站中十分重要的电源系统,不光为电力系统的控制回路、信号回路、自动装置、继电保护及照明系统进行可靠的不间断的供电,还可为断路器的分、合闸操作等提供电源,并且不受发电机、厂用电、站用变以及系统运行方式改变的影响. 由于直流系统在发电厂、变电站系统中所接设备多、回路复杂,经过多年运行后,电缆绝缘普遍下降,各种端子箱、机构箱、刀闸辅助接点箱等生锈损坏、密封性下降,在雨、雪、雾天气易发生接地故障,直流系统的接地故障已成为电力系统中重大故障的事故隐患^[1-2].

文献[3]提出将直流系统正负极对地绝缘电阻和人为设置的两个电阻 R 组成电桥,系统正常时,电桥平衡. 当系统出现某一点接地时,电桥失去平衡,继电器中有较大的不平衡电流流过,当此电流大于整定值时,装置发出报警信号,产生报警信号. 电桥法存在以下缺陷:(1)正负极接地等效电阻同等下降或数值接近时,即使已经超越报警界限,装置也不工作;(2)正负极接地等效电阻数值都很大(正常范围内),差值较大时,装置会误报警.

收稿日期:2017-03-10.

通讯联系人:戴勇,工程师,研究方向:电气与自动化方向. E-mail:13851887755@163.com

文献[4]提出的直流漏电流检测法,主要是通过检测直流系统支路对地直流不平衡电流,选择接地故障所在支路来进行接地监测. 其优点有:(1) 直接利用操作电源作为检测电源,对被测量进行直接检测,可实现自动检测正负极对地接地电阻,且数值准确. (2) 检测精度不受直流系统分布电容影响. 该方法存在的问题是:若要检测正负极同时接地情况,需要频繁对正负母线切换接地电阻,形成漏电流回路,接地电阻的频繁切换很容易造成继电器等保护设备的误动作. 另外,采用此方法制成的在线式监测装置与便携式装置配合使用时有局限性.

在直流系统接地故障检测中,由于直流电源容量、环境湿度和其他因素的影响,分布电容的大小也会随之不同,在不同程度上造成对检测结果的影响. 本文在采取超低双频交流信号注入法检测直流系统接地故障同时,配置无线通信 PTR2000 模块来实现无线多点数据采集和传送的功能.

1 超低双频交流信号注入法的工作原理

若在直流系统中,某条支路出现了接地故障,设该接地电阻值为 R ,此条支路的等效电容值为 C ,则其 RC 等效电路如图 1 所示. 超低双频交流信号注入法为,设计一个由两个频率合成的超低频交流电压信号,分别注入直流正、负两根母线,从而在直流正、负母线与地之间产生一个可以用于检测的超低双频的交流电流信号,本文以超低双频交流信号注入法来说明直流系统接地监测装置的工作原理,其原理如图 2 所示.

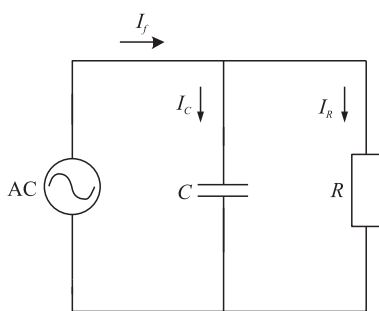


图 1 RC 等效电路

Fig. 1 RC equivalent circuit

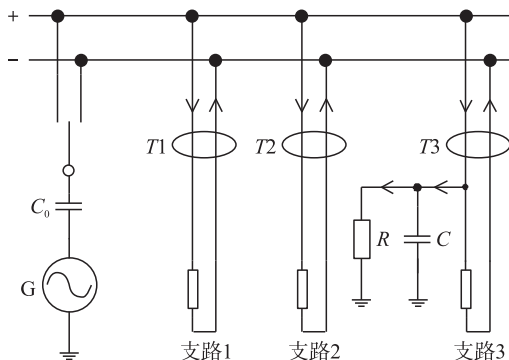


图 2 超低双频交流信号注入法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of ultra low dual frequency AC signal injection method

图 2 中, G 即为可产生超低双频交流信号的信号源, C_0 为隔直电容, R 为待测的直流系统接地电阻, C 为待测的接地电容. $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 为霍尔电流互感器, 套接在每一路负载支路引出线上.

当某一支路正常运行时, 通过霍尔电流互感器原边的正方向电流与反方向电流完全相等, 因此霍尔电流传感器的输出为零. 当某一支路(例如支路3)发生接地故障时, 由于流过霍尔电流互感器原边的正方向电流与反方向电流因为接地故障存在而不相等, 因此该支路的霍尔电流传感器就可以检测出接地电流. 当改变注入的超低双频交流信号的频率时, 由于分布电容 C 的存在, 流过接地点的电流会因此发生改变^[5]. 通过检测交流电流信号, 根据交流电压与电流的数值关系, 可以求出直流母线对地电阻的数值. 根据注入的超低双音频交流电流信号的流电路径可以判断出故障点的位置. 设定注入的信号频率为 f_1 , f_2 . 当 $f_1 < f_2$ 的超低双音频信号流过等效为分布电容的支路时, 设其电容电流为 I_{f1} , I_{f2} . 电流公式为: $I_{f1} = 2\pi f_1 C U$, $I_{f2} = 2\pi f_2 C U$. 由公式可见, 系统正常运行时, 可得超低双频信号的检测电流比值为:

$$\frac{I_{f1}}{I_{f2}} = \frac{2\pi f_1 C U}{2\pi f_2 C U} = \frac{f_1}{f_2}. \quad (1)$$

一般无电阻电流流过. 特别地, 当发生接地电阻故障时, 电路中的两条支路将会有电流流过, 设此时流过系统等效电路的电流为 I'_{f1} , I'_{f2} . 电流公式为: $I'_{f1} = \sqrt{(U/R)^2 + (2\pi f_1 C U)^2}$, $I'_{f2} = \sqrt{(U/R)^2 + (2\pi f_2 C U)^2}$. 可得当发生直流接地故障时, 超低双音频信号的检测电流比值为:

$$\frac{I'_{f1}}{I'_{f2}} = \frac{\sqrt{(U/R)^2 + (2\pi f_1 C U)^2}}{\sqrt{(U/R)^2 + (2\pi f_2 C U)^2}} = \frac{\sqrt{1 + (2\pi f_1 R C)^2}}{\sqrt{1 + (2\pi f_2 R C)^2}}. \quad (2)$$

由式(1)和(2), 可知

$$\frac{I'_{f_1}}{I'_{f_2}} > \frac{I_{f_1}}{I_{f_2}} \quad (3)$$

当检测到 $\frac{I'_{f_1}}{I'_{f_2}} > \frac{I_{f_1}}{I_{f_2}}$ 时,可判断出已发生故障.

由式(2)可知,当系统发生接地故障时,接地电阻阻值一定,此时若系统本身存在的分布电容非常大,趋近于正无穷时,则可得

$$\frac{I'_{f_1}}{I'_{f_2}} = \frac{\sqrt{1+(2\pi f_1 RC)^2}}{\sqrt{1+(2\pi f_2 RC)^2}} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{I_{f_1}}{I_{f_2}} \quad (4)$$

由式(4)可知,若系统中的分布电容非常大时,系统将会出现误报,即无法判别出 $\frac{I'_{f_1}}{I'_{f_2}}$ 与 $\frac{I_{f_1}}{I_{f_2}}$ 的大小,此时也就无法判断直流系统是否存在接地故障. 现设计一个判别值 $\beta \left(\frac{f_1}{f_2} = \frac{I_{f_1}}{I_{f_2}} < \beta < 1 \right)$, 当需要判断直流系统是否发生

接地故障时,只需判断是否存在满足 $\frac{I'_{f_1}}{I'_{f_2}} > \beta > \frac{I_{f_1}}{I_{f_2}}$ 的 β 即可,即使得 $\frac{\sqrt{1+(2\pi f_1 RC)^2}}{\sqrt{1+(2\pi f_2 RC)^2}} > \beta$. 得到接地电阻范围,

$$R < \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{1-\alpha^2}{f_2 \alpha^2 - f_1^2}} \quad (5)$$

设 $f_2 = pf_1$, 将式(5)改为

$$R < \frac{1}{2\pi f_1 C} \sqrt{\frac{1-\alpha^2}{p\alpha^2 - 1}} \quad (6)$$

由式(6)可知,通过超低双音频信号注入法可以检测到的接地电阻,其电阻阻值与直流支路对地分布电容的关系可用式(6)表示^[6-7].

2 基于 PTR2000 无线收发模块的多点无线监测系统

传统直流系统的各个数据采集模块大多采用有线通信的方式进行数据交换,若能在每个采集数据的终端使用无线的方式进行数据传送,可去除通信设备之间的物理线路连接,不仅简化了施工难度和系统复杂度,还可以大大地降低成本. 一种基于 PTR2000 无线收发模块的多点无线通用数据采集系统,可有效地解决这一问题^[8].

2.1 系统结构

无线收发模块的多点无线监测系统结构图如图 3 所示. 系统使用一台主机(PC 机)和多台从机以无线收发方式实现“多对一”的数据传输,将各个终端节点采集到的数据汇总到上位机中. PC 机作为主控

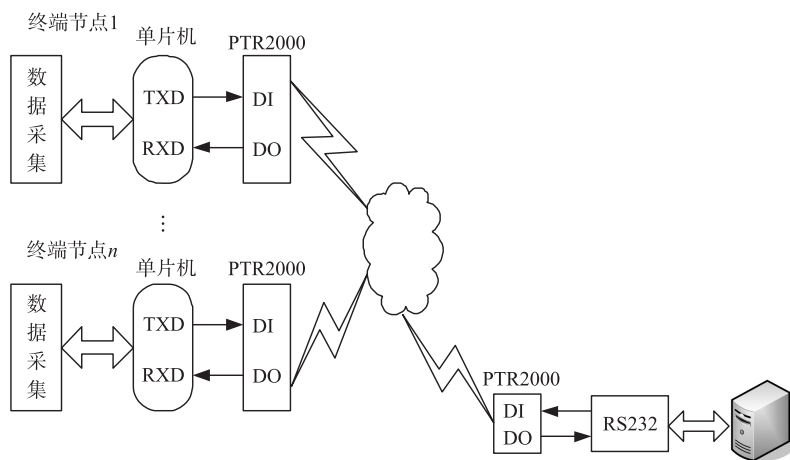


图 3 无线收发模块的多点无线监测系统结构图

Fig. 3 Structure of wireless transceiver module multi-point wireless monitoring system

机,利用 RS232 总线与无线收发模块 PTR2000 相连,负责控制和管理网络中的通信,并对收集到的各个节点的数据进行存储和处理、历史数据查询、数据统计等。数据采集、单片机与无线收发模块 PTR2000 组成一个无线数据收发器,作为终端节点^[8]。

2.2 部分硬件电路设计

基于 PTR2000 模块的直流系统接地故障多点监测部分硬件电路框图如图 4 所示。

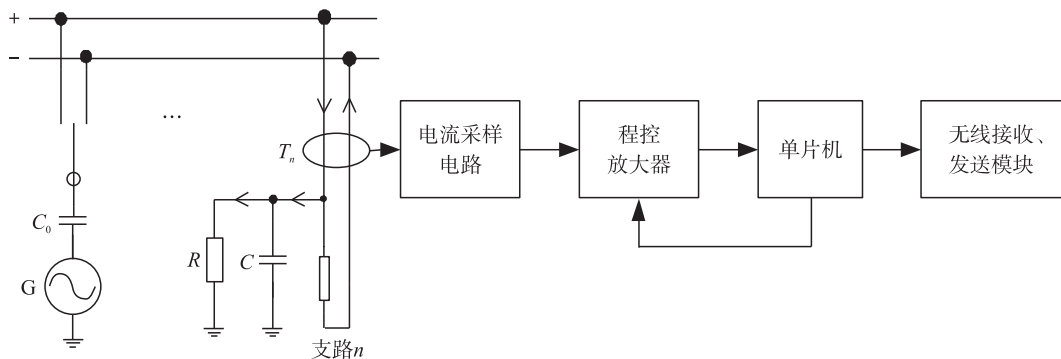


图 4 部分硬件电路框图

Fig. 4 Diagram of part of the hardware circuit

电流采样电路选用了型号为 SMI10mDCE 的霍尔电流传感器,将流过霍尔传感器线圈内的电路的电流转换为电压输出。在本系统中,电流传感器的输出检测信号值很小,且量程跨度较大。为了能准确传输给符合单片机的 A/D 模块检测要求的信号,选用数字控制可编程增益仪用放大器 PGA202,其可实现 1 倍,10 倍,100 倍,1 000 倍四级编程可控的增益放大,恰好满足本系统检测信号范围跨度大这一特点,与单片机的 IO 口相连,通过检测对比控制其增益放大倍数,即可自动与输入 A/D 检测端口所需信号相匹配,完成自动信号调理过程,单片机通过采集,从而获得检测结果。

单片机选用 TI 公司的 MSP430F5529,它通过自己的串口以及 IO 控制口与 PTR2000 模块直接相连,一是完成数据的采集和处理,二是向 PTR2000 发送数据并且接收 PC 机通过 PTR2000 传送过来的数据。和单片机相连的 PTR2000 主要是将单片机的待传数据调制成交频信号,发送到 PC 机端的 PTR2000 模块;同时接收 PC 机端的 PTR2000 模块传送过来的射频信号,并调制成单片机能够识别的 TTL 信号送给单片机。

2.3 无线数据传输系统的软件设计

无线通信中,由于外部环境的干扰,通常误码率比较高,因此通信协议的设计对保证通信可靠性十分重要。本文重点介绍适用于本系统自定义的无线通信协议,通信中数据帧和命令帧的格式分别见表 1 和表 2。

表 1 通信中数据帧的格式

Table 1 Format of data frames in communication				
帧首	地址	数据	CRC	帧尾
0X24	1 字节	1 字节	1 字节	0X2A

表 2 通信中命令帧的格式

Table 2 Format of command frames in communication				
帧首	地址	数据	CRC	帧尾
0X24	1 字节	2 字节	1 字节	0X2A

数据发送采用查询方式,接收采用中断方式。数据帧包含帧首、帧尾、地址、数据以及校验部分,帧首用定义为“\$”字符,其数值为 0X24。帧尾定义“*”字符,其数值为 0X2A。数据部分为 2 个字节,地址部分和数据部分使用 16 进制 ASC II 传送,确保协议的透明性。帧的校验部分使用 CRC 校验,确保数据的可靠性。接收方检测到 0X2A 字节后,表示收到有效数据帧,如果该帧通过校验,接受方根据命令请求后发送相应的数据。若该帧结构非法,则丢弃该帧。

图 5(a)为主机主程序,初始化后设置终端节点(从机)的首地址,调用发送子程序后,进入到下一个从机的巡检。图 5(b)为主机发送子程序流程图,通过程序控制先把模块状态转成发送状态,并向外出命令帧,当命令帧发完后随即再把收发模块的状态转换为接收模式。在此模式下主机准备接收从机传来的信息,只要从机发出信息,主机就会运行接收中断服务子程序。如图 5(c)所示,主机先是判断帧结构是否合法,帧检验是否通过,若数据为假,则回到主程序,若数据为真则接收数据。

图 6 为从机程序流程图。图 6(a)为从机主程序,仅负责 AD 数据采集,当从机接收到主机发出的数据传送命令后,从机开始运行中断服务程序,如图 6(b)所示。从机通过查询地址是否有效,获得与主机通

信. 若无效随即开中断,重新运行从机主程序. 若命令有效则开始运行发送子程序. 从机数据发送子程序如图 6(c)所示.

运行程序先读取 AD 转换数据,然后把无线通信模块转换成发送状态,数据发完后再把无线通信模块转换为接收状态^[9].

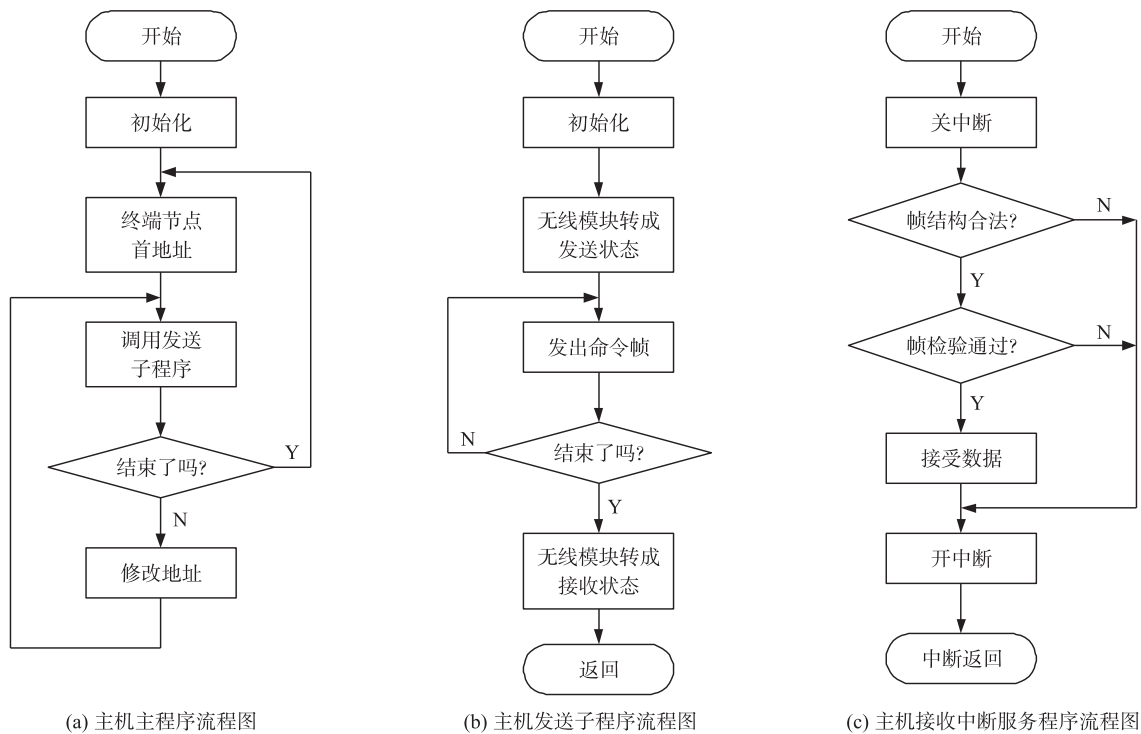


图 5 主机程序流程图

Fig. 5 Flow chart of host program

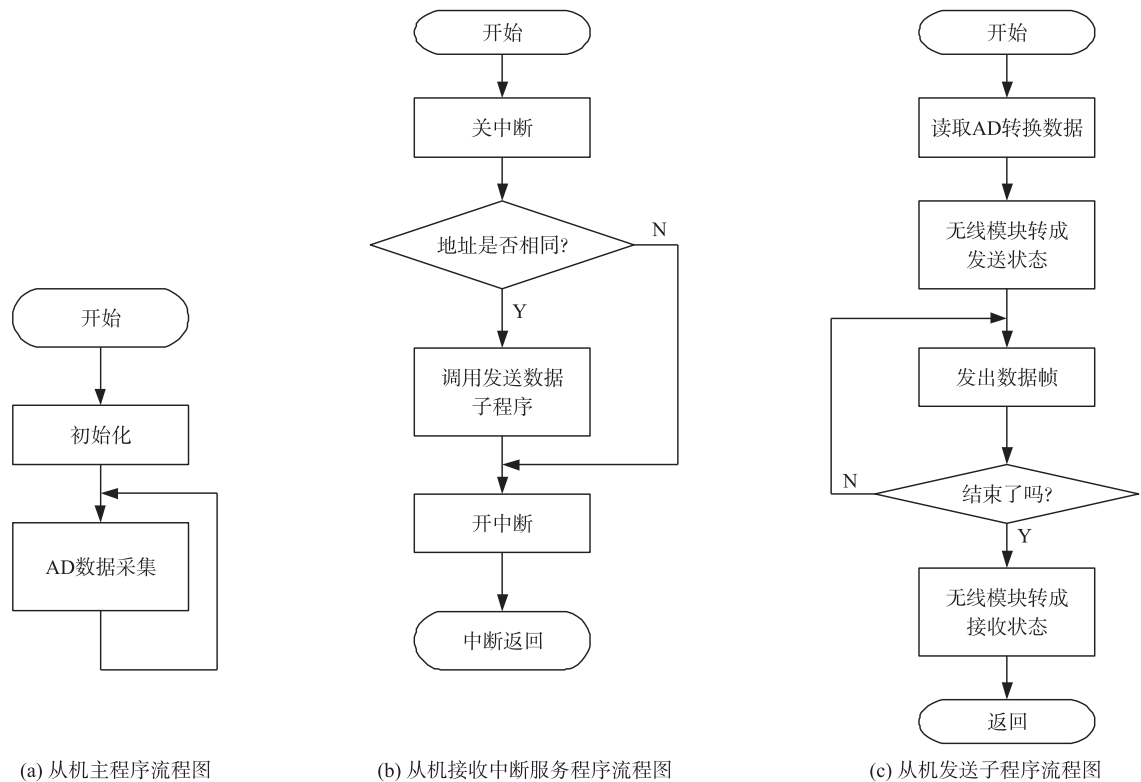


图 6 终端节点(从机)程序流程图

Fig. 6 Flow chart of terminal node(slave) program

3 接地阻容值实测结果

根据上述设计思想开发研制的样机,超低双频信号(分别为 0.66 Hz 和 0.33 Hz)经正(负)母线接至某接地电阻或电容构成回路,产生的电流流过霍尔传感器线圈内的电路,将电流转换为电压输出,超低双频信号波形图如图 7 所示。

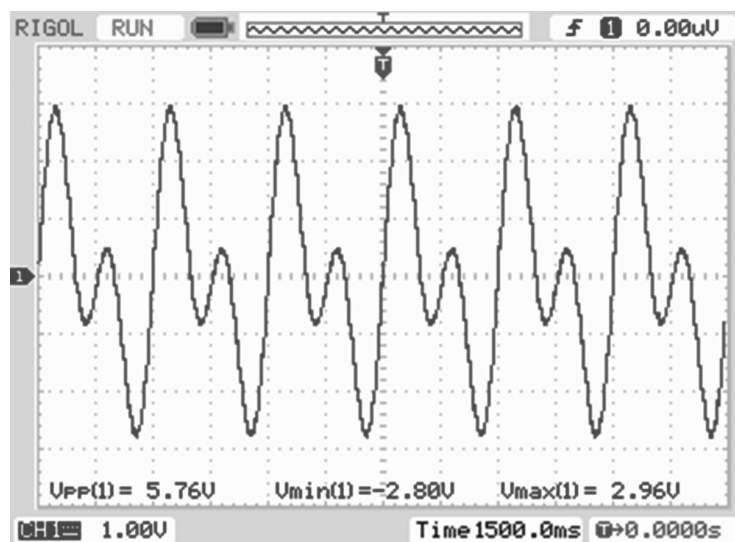


图 7 超低双频信号波形图

Fig. 7 Waveform of ultra low dual frequency signal

通过“一点对多点”的无线巡检测试,从一个终端节点获得的一组接地电阻和接地电容实测数据分别如表 3~4 所示。

表 3 接地电阻实测表

Table 3 Measurement table of grounding resistance

接地电阻 (k Ω)	1	5	10	20	30	50	70	80
测得电流 (mA)	48	9.6	4.8	2.4	1.6	0.96	0.68	0.6

表 4 接地电容实测表

Table 4 Measurement table of grounding capacitance

接地电容 (μ F)	100	75	50	30	20	10	5	1
测得电流 (mA)	45.28	34.04	22.64	13.59	9.05	4.52	2.62	0.45

经功率放大器输出幅度为 48 伏的超低频信号,经正(负)母线接至某接点电阻或电容产生电流,将流过霍尔传感器线圈内电路的电流转换为电压输出,通过其输出值采集,从而获得检测结果。随着接地电阻的变小,检测到与电流成正比的电压也随之变大。随着接地电容的变大,容抗变小,检测到与电流成正比的电压也随之变大。经过分析,测试数据的非线性误差小于 1%。

4 结语

本文通过超低双频交流信号注入法减小因分布电容的存在而造成对检测结果的影响,并能根据交流电压与电流的数值关系,求出直流母线对地电阻的数值。根据注入的超低双频交流电流信号的流电路径可判断出发生接地故障时的支路及故障点的位置。通过配置无线通信 PTR2000 模块和适用于本系统自定义的无线通信协议,实现了无线多点数据采集和传送的功能,不仅去掉通信设备之间的物理线路连接,简化了施工难度和系统复杂度,还可以大大地降低成本。以实测接地电阻和电容值证实了设计的正确性和可行性。

[参考文献] (References)

- [1] 张次衡. 直流系统接地故障检测装置电容影响问题的探讨[J]. 电力自动化设备, 1996, 16(1): 48-50.

- ZHANG C H. Discussion of capacity influence on DC system ground fault detector[J]. Electric power automation equipment, 1996, 16(1): 48-50. (in Chinese)
- [2] NOVAK T, MORLEY L A, TRUTT F C. Sensitive ground-fault relaying[J]. IEEE transactions on industry applications, 2002, 24(5): 853-861.
- [3] 岳德坤. 基于单片机的电源系统绝缘监测方法[J]. 电讯技术, 2004, 44(5): 179-182. (in Chinese)
- YUE D K. A singlechip-based insulation monitoring method for direct current operating power supply system[J]. Telecommunication engineering, 2004, 44(5): 179-182. (in Chinese)
- [4] 季涛. 基于 Lonworks 现场总线技术的分布式直流电源绝缘监测系统[D]. 淄博: 山东理工大学, 2003
- JI T. A distributed insulation monitoring system for substation DC source based Lonworks fieldbus technology[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [5] 崔实, 张连斌, 霍刚. 变频在线型直流系统监测装置的研究[J]. 华北电力技术, 1997(9): 25-28.
- CUI S, ZHANG L B, HUO G. Research on monitoring device of frequency conversion on-line DC system[J]. North China electric power, 1997(9): 25-28. (in Chinese)
- [6] 李悦. 直流绝缘监测系统研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2012.
- LEE Y. Research on safety DC insulation monitoring system[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012. (in Chinese)
- [7] 齐超. 基于信号注入的小电流接地系统离线故障定位研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- QI C. Research on off-line fault location of small current grounding system based on signal injection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009. (in Chinese)
- [8] 求是科技. 单片机典型模块设计实例导航[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 4.
- Qiu Shi Science & Technologies. Single chip microcomputer typical module design example navigation[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2008: 4. (in Chinese)
- [9] 张胜波, 马小军, 詹俊. 基于 nRF401 的无线多点数据采集系统[J]. 微计算机信息, 2007, 23(17): 96-97.
- ZHANG S B, MA X J, ZHAN J. System of wireless mulit-node data acquisition based on nRF401[J]. Microcomputer information, 2007, 23(17): 96-97. (in Chinese)

[责任编辑: 陈 庆]