

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210634

基于在线监测的雷电流识别方法及其应用*

张雷^{1,2} 范菁^{1,2} 曲金帅^{1,2}

(1. 云南民族大学电气信息工程学院 昆明 650500; 2. 云南省高校信息与通信安全灾备重点实验室 昆明 650500)

摘要: 对于输电线路的雷击过电压在线监测装置,快速准确地识别雷电流信号至关重要,目前不论是硬件触发还是软件触发都存在误触发和漏触发等触发问题,而且目前的监测系统在经济性和便捷性方面存在明显弊端。本文提出一种基于嵌入式的雷击在线监测系统,可以实现对输电线路高效便捷的实时监测,极大的提高雷击监测装置的便捷性和经济性。同时提出先检测后识别的触发算法准确识别雷击电流暂态信号,首先通过幅值差的方法快速检测雷电流信号(不良数据),然后通过周期作差的方法准确识别不良数据,通过分析实验,证明该方法可以减少监测系统的误触发和漏触发次数。并且通过实验室测试,证明该监测系统的采集精度为98.49%,满足实时监测的需求,为输电线路在线监测提供一种经济便捷的监测系统。

关键词: 输电线路;在线监测;触发算法;雷电流暂态信号

中图分类号: TM93 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4

Rapid identification of lightning current method based on online monitoring and its application

Zhang Lei^{1,2} Fan Jing^{1,2} Qu Jinshuai^{1,2}

(1. School of Electrical and Information Technology, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China;

2. University Key Laboratory of Information and Communication on Security Backup and Recovery in Yunnan Province, Kunming 650500, China)

Abstract: For the lightning overvoltage on-line monitoring device of the transmission line, it is very important to accurately identify the lightning current signal. At present, whether it is hardware triggering or software triggering, there are triggering problems such as false triggering and leakage triggering, and the current monitoring system has obvious disadvantages in terms of economy and convenience. This paper proposes an embedded lightning strike online monitoring system, which can realize efficient and convenient real-time monitoring of transmission lines, and greatly improve the convenience and economy of lightning strike monitoring devices. At the same time, a triggering algorithm of first detection and identification is proposed to accurately identify the lightning current transient signal. First, the lightning current signal (bad data) is quickly detected by the method of amplitude difference, then the bad data is accurately identified by the method of period difference. Through analysis experiments, it is proved that the method can reduce the number of false triggers and missed triggers of the monitoring system. And through laboratory tests, it is proved that the acquisition accuracy of the monitoring system is 98.49%, which meets the needs of real-time monitoring and provides an economical and convenient monitoring system for online monitoring of transmission lines.

Keywords: transmission line; online monitoring; triggering algorithm; lightning current transient signal

0 介 绍

在电力网中,由于输电线路的输送距离长,线路可能经过不同的地形地貌且距离地面高,因此,高压输电线路遭遇雷击的概率相比其他的电力设备要大得多,输电线路的雷

击过电压也成为了影响电网安全运行的重要因素之一。据统计在我国由于雷击发生线路总跳闸次数占输电线路故障的60%~80%^[1]。目前,对雷电过电压的分析大多是利用电磁暂态仿真软件(power systems computer aided design, PSCAD)等软件进行仿真建模分析^[2-5],虽然仿真建模可以

收稿日期:2022-07-10

* 基金项目:国家自然科学基金(61540063)、云南省应用基础研究计划项目(2016FD058,2018FD055)资助

反映雷电过电压过程,但是实际输电线路远比仿真模型复杂,而且输电线路周围的环境比如土壤色散^[6]、地理环境和季节变化^[7]等都会对雷击过电压产生影响,所以输电线路雷电过电压在线监测对输电线路安全运行具有重要意义。

文献[8]指出输电线路雷电流的直接测量是我国电力网雷电监测研究的关键技术之一。快速准确地识别雷击暂态信号对于在线监测装置至关重要,然而目前大多数雷击暂态信号的识别算法基于输电线路的故障行波数据^[9-11],虽然这些算法可以快速准确地识别和区分各种雷击过电压信号,但是对于在线监测系统触发识别雷击信号,显然这些算法很难实现,所以需要一种简单快速的识别算法触发在线监测系统。文献[12]中根据雷电流的幅值、斜率、半峰值时间,提出雷电流识别方法和循环触发,来提高触发的可靠性和波形检测的完整性。考虑到监测系统识别故障行波信号时,算法在保证稳定可靠的前提下越简单越好,采用简单的阈值触发是目前大多数监测系统采用的一种雷击暂态信号识别算法^[13-15],但是输电线路由于暴露的特性,受外界环境等因素影响,所以采用阈值触发很容易发生误触发。文献[16]提出通过计算前后两个周期电流的差值,通过归一化处理,认为该差值大于某一阈值时则是故障信号,但是这种算法对于采集率较高的监测装置,首先需要对信号进行滤波或者仅提取适量的数据做差,明显这种算法计算量较大。对于采用硬件触发^[17-19],随着硬件的老化,绝缘等都会影响触发,并且容易发生数据丢失。

对于监测系统的研究,文献[20]利用嵌入式高速采集故障信号,并通过RS485总线将采集到的数据传输到上位机,同样文献[21]设计了一种数字化系统,采样率高达1 MHz,数字化波形和相应的时间数据通过USB发送到基于计算机的存储系统,虽然可以实现高速采集和发送,但是对于山区等复杂环境下线路故障数据的采集和发送不具有便捷性。Araujo等^[22]设计了一种用于测量和记录高层接地建筑物的雷击电流的装置,同样的武汉大学利用高速采集卡设计了一款监测系统,安装在杆塔上用来实时监测输电线路过电压^[23],这些方法虽然具有较高的采样率,但是用于经过地形复杂的架空线路的在线监测具有局限性,并且维护成本高。重庆大学司马文霞等^[24]设计了用于变电站过电压的在线监测系统,文献[25]利用双通道示波器采集过电压信号,将电压记录在各自的示波器中,并通过光纤电缆传输至位于测量站的计算机,以上测量系统往往只适用于特定的场合,维护成本较高,对于输电线路的在线监测不满足经济便捷的需求。

针对上述问题,本文研究设计了一种基于嵌入式的过电压在线监测系统,同时提出基于雷击过电压的幅值差快速检测雷击信号(不良数据),然后通过不良数据识别进而触发采集,该触发算法提高识别准确性的同时大大减少计算量。通过初步实验证明该系统可以实现对输电线路高效便捷的实时监测,极大的提高监测装置的便捷性和经济性,

并且适用范围广,具有良好的发展前景。

1 系统设计

本文利用嵌入式简洁高效的特点,结合霍尔传感器、高速采集模块和远程通信模块对输电线路过电压信号进行实时监测,系统框图如图1所示。

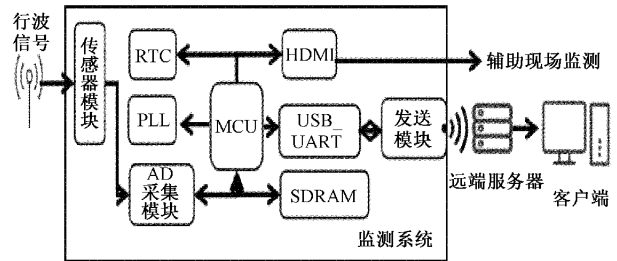


图1 系统框图

系统开始监测并且快速采集数据,通过直接存储器访问(direct memory access, DMA)将采集到的数据存储到同步动态随机存储器(synchronous dynamic random access memory, SDRAM)中,再通过DMA中断实现定量读取数据,同时执行时钟程序(real-time clock, RTC),如果需要在现场监测,则通过高清多媒体接口(high definition multimedia interface, HDMI)实现现场监测;然后利用触发算法识别采集到的数据是否为雷击故障信号,如果不满足触发条件,继续读取下一组数据,若满足触发则通过消息队列遥测传输(message queuing telemetry transport, MQTT)协议将数据打包,同时连接远端服务器,之后通过USB转串口(USB-universal asynchronous receiver transmitter, USB_UART)将数据传输到远程发送模块实现自动发送,数据发送完成后继续通过DMA中断循环读取数据。

传感器模块提供与所施加的磁通密度成比例的输出信号,利用霍尔传感器产生与导体中流动的电流成比例的输出电压,进而获取线路的电流信号。

高速采集模块使用2路65 MSPS,12位的模拟信号转数字信号模块,根据奈奎斯特采样定理要求和IEC 60060-1中规定的 $1.2/50 \mu\text{s}$ 标准雷电波^[26],监测系统采样周期达15.38 ns,可以满足高速稳定采集的要求。

远程通信模块控制器与主控系统的USB_UART连接,通过配置程通信模块可以实现数据自动传输到指定远端服务器。

整个监测系统体积小,控制简单,便于调试,实现输电线路故障数据的远程发送,极大的提高监测工作便捷性。

2 典型内外过电压

电力系统在运行时,过电压主要包括操作过电压和雷击过电压,而雷击过电压是引起输电线路跳闸的主要原因,根据某变电站记录的过电压数据,如图2所示。

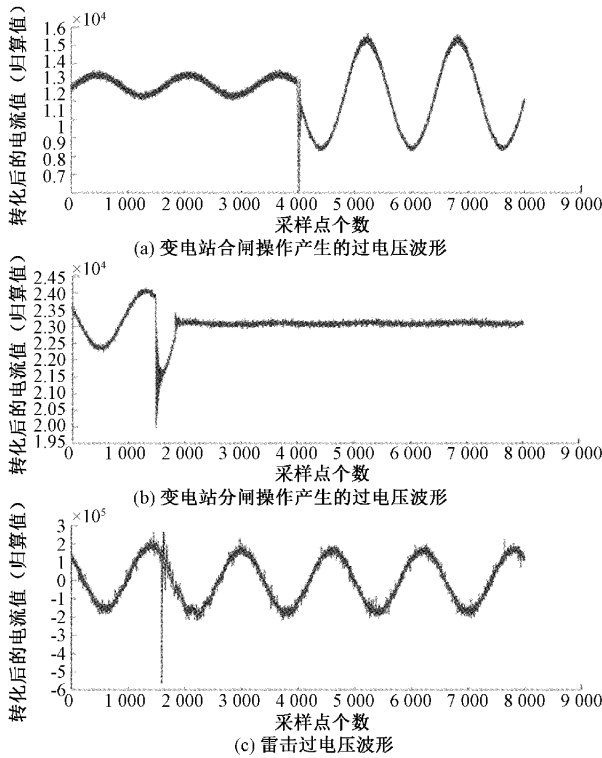


图 2 某变电站记录的过电压波形

其中图 2(a)是变电站合闸操作产生的过电压波形,图 2(b)是变电站分闸操作,图 2(c)是雷击过电压波形数据。可以发现,系统在发生过电压时,线路电压的幅值,频率,陡度等都会发生明显突变,基于这些特征输电线路监测系统可以准确快速识别过电压信号,为在线监测系统的快速触发提供依据。

3 系统触发算法分析

目前对于判别一组数据是否为雷电流故障信号,一般采用的方法包括利用幅值,或者利用暂态波形的斜率、半峰值时间进行识别,还有整体分析算法比如标准差算法和残差平方和算法等。

其中利用幅值触发时,选定一个阈值 ψ ,将采集到的波形数据和该阈值比较大小,假如波形数据中有一个或者多个数值大于阈值则触发采集,相反不触发。实际应用中,选定阈值的大小直接关系能不能准确识别雷电流暂态信号,但是由于大量噪声信号,使用很难准确识别雷电流暂态信号, ψ 值选取较小,系统容易发生误触发, ψ 值选取较大,容易发生漏触发。

标准差算法则是对波形数据进行整体分析,具体利用式(1)计算得到一段波形数据的标准差:

$$\begin{cases} \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (i_{(n)} - i_{(av)})^2} \\ i_{(av)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_{(n)} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i_{(n)}$ 为系统采集的波形数据, N 为采集数据量,首先计算实际雷击故障波形的标准差 σ_0 ,然后计算系统采集到的波形数据的标准差 σ_1 ,当任意波形的 σ_1 与 σ_0 相等或者在 $[\sigma_0 \pm \delta]$ 区间内,则认为满足触发条件,否则不满足。明显的利用标准差算法判别雷击故障波形计算量较大,相应的系统功耗就会增加,而且该算法 σ_0 的选取具有随机性。

残差平方和算法则是利用(2)计算采集到的数据与标准数据之间的残差平方和:

$$\gamma = \sum_{n=1}^N (I_{(j)} - i_{(j)})^2 \quad (2)$$

其中, $I_{(j)}$ 指标准雷电流故障波形的值, $i_{(j)}$ 是采集的波形数据值,为了减少系统计算量,实际计算时选取若干个数据值即可,然后通过实验设定一个阈值 γ_0 。实际监测时,通过计算 $I_{(j)}$ 和 $i_{(j)}$ 二者的残差平方和 γ ,当任意一段波形的 γ 在 $[\gamma_0 \pm \delta]$ 区间内时系统开始触发,否则不满足触发条件。但是实际的雷电流波形由于外界环境的影响,波形数据中伴随大量噪声信号,并且不同环境下的雷击故障信号存在差异,所以选取的标准值 $I_{(j)}$ 具有随机性。

利用雷击暂态波形的斜率、半峰值时间进行识别,如图 3 所示。

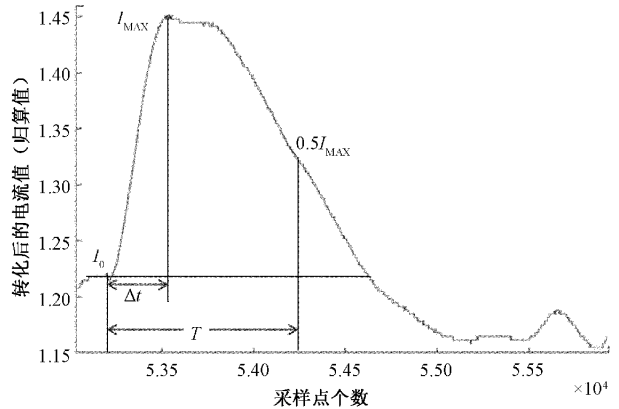


图 3 雷电流波形

实际测量时,当暂态信号的斜率和半峰值时间满足式(3),则认为满足触发条件,否则不满足。

$$\begin{cases} \frac{(I_{MAX} - I_0)}{\Delta t} > K \\ T > T_0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 I_{MAX} 指雷电流暂态信号的峰值, I_0 雷击暂态信号波前值, Δt 为峰值时间, T 为半峰值时间, K 和 T_0 都是经验值,选取具有随机性,而且实际应用中,雷击暂态信号的峰值和半峰值很难准确识别。

本文利用电力系统状态估计的思想,对雷击暂态信号(不良数据)进行检测和识别,基本步骤是首先通过简单快速的方法检测不良数据,然后进一步识别不良数据,去除伪不良数据,大大减少误触发和漏触发的同时,减少计算量,

为雷电流暂态信号提供一种高效准确的识别方法,检测和识别流程如图4所示。

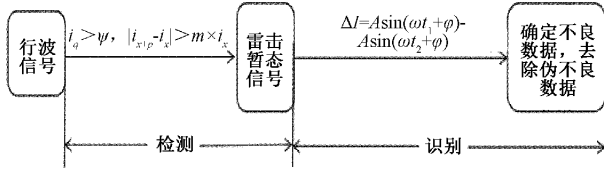


图4 雷击电流识别过程

首先基于雷击电流的幅值特性提出利用幅值差和幅值快速检测不良数据,根据变电站记录,图5为实际输电线路的雷击故障波形,通过对实际雷击故障波形的分析,发现输电线路在发生雷击时,电流波形会发生明显波动。

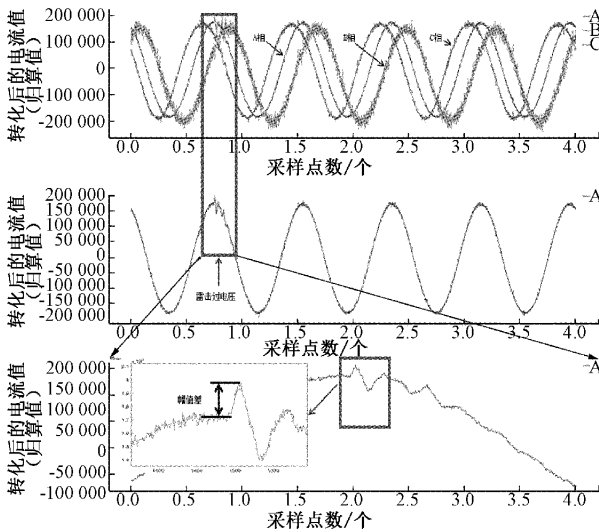


图5 某变电站记录的雷击信号波形

其中幅值差触发利用雷击会使三相电流幅值发生明显抖动的特性,利用幅值差识别雷电流暂态信号,具体流程如下:对于一段雷击暂态电流,将采集到的所有电流设为一个集合 I_n 表示为:

$$I_n = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_x, \dots, i_{x+p}, \dots, i_n\} \quad (4)$$

集合中 i_x 和 i_{x+p} 表示故障信号中的两个电流值,一般 i_{x+p} 取雷击暂态某值,波前某值为 i_x ,其中 p 的设置与系统采样率相关,利用式(5)计算 i_x 和 i_{x+p} 之间的差:

$$|i_{x+p} - i_x| > m \times i_x \quad (5)$$

因为考虑到雷击暂态信号的极性,所以二者差的绝对值如果满足式(5),则认为该段暂态信号为雷击暂态,否则不是,式中 m 通过分析实际雷击暂态波形得出,本文中 m 设置为 0.15。

本文采用幅值和幅值差触发共同检测不良数据,如图6所示。

设 i_q, i_x 和 i_{x+p} 表示暂态信号中的某一数据值,其中 i_{x+p} 不一定是暂态信号的峰值,检测算法为式(6):

$$F_x = \begin{cases} 0, & \text{其他} \\ 1, & i_q > \psi, |i_{x+p} - i_x| > m \times i_x \end{cases} \quad (6)$$

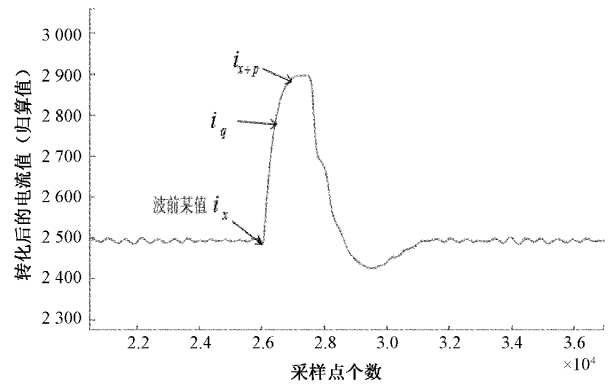


图6 检测不良数据算法示意图

式(6)中当 $F_x = 1$ 时,认为该数据为不良数据,接下来将该组数据进一步识别去除伪不良数据,为 0 时为正常数据。

然后识别检测的不良数据,采用周期作差的方法,根据某变电站实际测量的数据如图7所示,首先假设将该组不良数据表示为式(7):

$$I = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

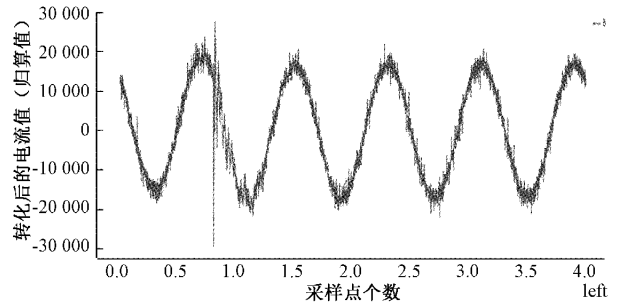


图7 某变电站记录的雷击信号波形(B相)

式(7)中 A 表示雷电流幅值,其中将波形的最后一个周期数据选作基准数据,和其他周期数据作差如式(8):

$$\Delta I = A \sin(\omega t_1 + \varphi) - A \sin(\omega t_2 + \varphi) \quad (8)$$

式(8)中 t_1 和 t_2 分别表示两个周期数据对应的时间,当 ΔI 大于设定的阈值,则认为该数据为真不良数据,否则是伪不良数据。如图8所示,线路发生雷击时,雷击暂态周期的数据和最后一个周期数据的差明显不同于其他周期。

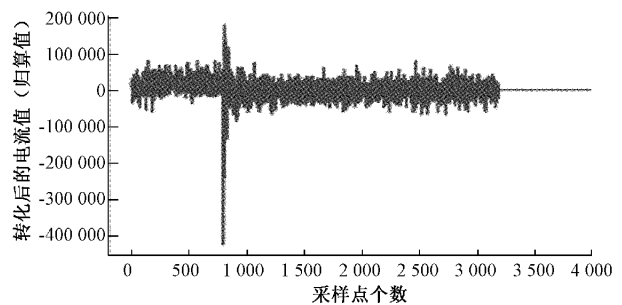


图8 周期作差后 ΔI 的数据分布(B相)

通过对实际雷击暂态波形的分析,认为该触发算法可以准确识别线路雷电流暂态信号。

实际测量时,为保证暂态电流信号的完整性,满足触发条件后,向前读取一个周期数据,想后读取 5 个周期数据,具体采样原理如图 9。

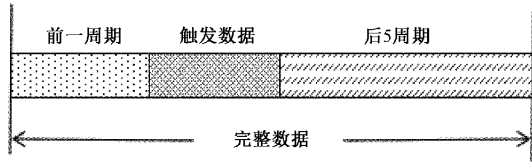


图 9 系统采样原理

4 实 验

实验时通过雷击浪涌发生器进行监测实验,实验测量如图 10 所示。

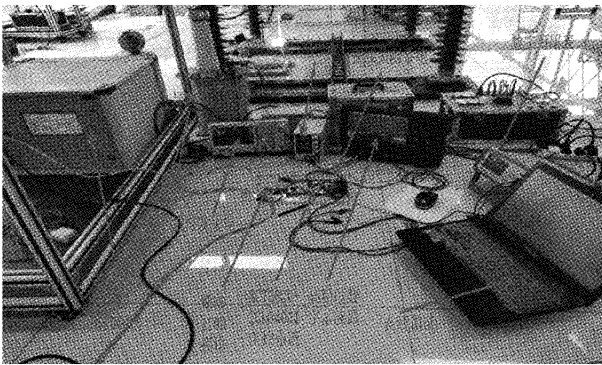


图 10 系统采集实验

实验过程中,首先通过波形发生器和 HDMI 输出接口验证监测系统的采样率,方法是利用波形发生器稳定输出频率为 1 MHz 的正弦波,利用显示器连接 HDMI 输出接口将采集到的信号实时显示,通过对比验证证明模数转换(analog-to-digital, AD)模块的采样率高达 65 MSPS,满足高速采集的需求。然后利用雷击浪涌发生器进行触发算法验证实验,利用高精度数字示波器和监测系统同时采集数据,发现通过监测系统可以快速准确识别雷击暂态信号,并且触发后的故障数据实时发送到远端服务器,获取得到波形如图 11 所示。

其中图 11(a)是利用数字示波器采集得到的波形,图 11(b)是本文监测采集得到的波形数据,通过将两组数据拟合如图 11(c),选取其中 82 组对应的数据做线性拟合分析,如图 12 所示。

通过实验证明该监测系统可以快速准确识别雷电流暂态信号,将示波器采集到的波形数据作为基准波形,通过和监测系统采集的数据拟合,证明本监测系统的采样精度为 98.49%。误差主要来源于测量系统的固有误差和数据拟合过程中产生的随机误差,首先是传感器模块和 AD 采集模块存在固有误差,传感器模块在正常工作条件下的线性

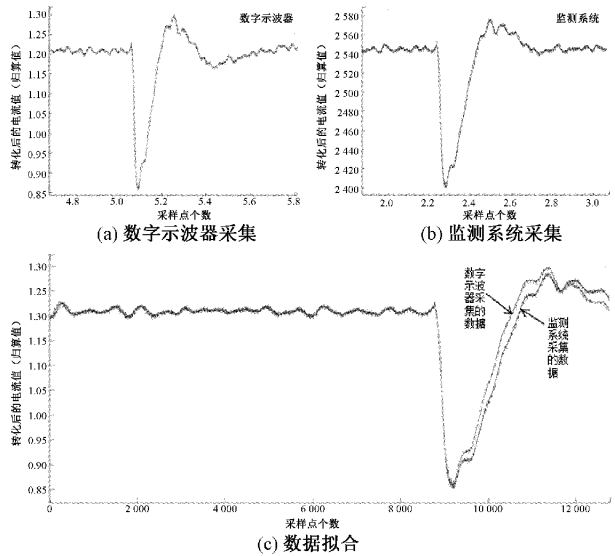


图 11 示波器和监测系统同时采集的数据

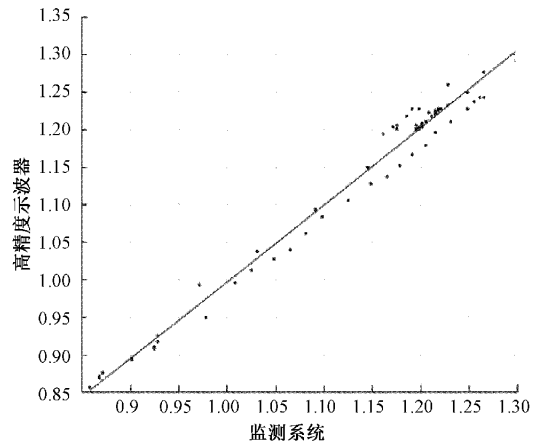


图 12 线性拟合

误差为 0.4%,AD 采集模块的增益误差为 0.5%,因此,测量系统在正常工作条件下的理论误差为 0.9%;其次数据拟合过程中会产生随机误差,因为高精度示波器和本文设计的测量系统采样率不同,分别为 100 MSPS 和 65 MSPS。

同时通过触发算法误触发和漏触发的次数对比几种触发算法,实验时每一种算法采集 10 次,对比发现,本文提出的触发算法相较于幅值触发算法等,可以有效减少误触发和漏触发次数,同时相比于整体分析算法比如标准差算法和残差平方和算法等,可以减少计算量。具体如表 1 所示。

表 1 触发算法对比

| 触发算法 | 误触发次数 | 漏触发次数 |
|-----------|-------|-------|
| 幅值触发 | 2 | 3 |
| 斜率触发 | 2 | 2 |
| 幅值差触发 | 2 | 4 |
| 本文采用的触发算法 | 0 | 1 |

5 结 论

综上所述,本文设计的监测系统可以满足高速采集和稳定传输的要求,对于输电线路在一些复杂环境下的在线监测提供了一种高效、便捷、经济的测量系统。

本文通过对比分析各种触发算法,提出利用电力系统状态估计的思想,首先利用幅值和幅值差对雷电流暂态信号(不良数据)进行快速检测,然后利用周期数据作差的方法进一步识别不良数据,去除伪不良数据,为输电线路雷击信号在线监测提供一种高效准确的识别方法。

通过实验证明,该触发算法减少误触发和漏触发的同时极大减少计算量;同时通过采样精度分析,证明本文设计的测量系统可以准确采集输电线路的雷电流信号,采样精度为 98.49%,满足快速准确的采集需求,为雷击监测提供一种低成本的在线监测装置。

参考文献

- [1] 熊小伏,方伟阳,程韧俐,等.基于实时雷击信息的输电线路强送决策方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(19):7-11.
- [2] LONG Y, YAO C, MI Y, et al. Identification of direct lightning strike faults based on mahalanobis distance and S-transform[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 2019-2030.
- [3] 何常根.新疆输电线路在线监测设备供电可靠性研究[J].电子测量技术,2019,42(10):12-15, DOI: 10.19651/j.cnki.emt.1802429.
- [4] 谢施君,曾嵘,李建明,等.变电站雷电侵入过电压波形特征及其影响因素的仿真[J].高电压技术,2016,42(5):1556-1564.
- [5] BRIGNONE M, DELFINO F, PROCOPIO R, et al. Evaluation of power system lightning performance, Part I: Model and numerical solution using the PSCAD-EMTDC platform[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016:137-145.
- [6] SHESHYKANI K, AKBARI M. Evaluation of lightning-induced voltages on multiconductor overhead lines located above a lossy dispersive ground[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 683-690.
- [7] RAKON V A, BORGHETTI A, BOUQUEGNEAU C, et al. CIGRE technical brochure on lightning parameters for engineering applications [C]. 2013 International Symposium on Lightning Protection(XII SIPDA), IEEE, 2013: 373-377.
- [8] 陈家宏,赵淳,谷山强,等.我国电网雷电监测与防护技术现状及发展趋势[J].高电压技术,2016,42(11): 3361-3375.
- [9] 姚陈果,王琪,吴昊,等.基于故障选相及时域、频域分析的输电线路直击雷识别方法及其应用[J].高电压技术,2014,40(5):1298-1305.
- [10] 邹贵彬,高厚磊,王明军,等.一种雷电波侵入变电站的扰动识别方法[J].电网技术,2012,36(4):179-183.
- [11] 齐国强,王增平,裘愉涛,等.基于信号复杂度衰减的特高压直流输电线路雷电暂态识别方法[J].电力系统保护与控制,2018,46(17):1-8.
- [12] 钟林,廖敏夫,袁幸,等.雷电流识别与在线检测系统设计[J].电测与仪表,2016,53(6):69-73.
- [13] 司马文霞,张煌竟,杨鸣,等.某变电站 10 kV 系统实测雷电侵入波过电压幅值与波形特征统计分析[J].高电压技术,2021,47(1):214-222.
- [14] 朱时阳,周文俊,邓雨荣,等.可记录多重雷击的雷电流波形在线监测装置研制[J].高电压技术,2013,39(11):2699-2705.
- [15] 田闯哲,张龙,罗辉勇,等.特高压直流输电线路雷击暂态响应监测技术研究[J].电瓷避雷器,2021(3):93-98.
- [16] 谢景海,袁敬中,郭嘉,等.一种输电线路多参数可视化物联网监测系统[J].科学技术与工程,2021,21(12): 4975-4981.
- [17] 封建宝.基于罗氏线圈对高压输电线路雷电绕击、反击的识别[J].电气开关,2010,48(1):34-36.
- [18] 肖剑锋,王剑飞,何志满,等.基于罗氏线圈和微分环的雷电流在线监测综述[J].电测与仪表,2018,55(17): 1-8.
- [19] 万翔,孙伟,王影影,等.单极性长持续时间脉冲电流的测量研究[J].电测与仪表,2020,57(17):116-122, DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2020.17.018.
- [20] YANG Z, JIANG S. Design of lightning detection system based on ARM [C]. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), IEEE, 2014: 346-350.
- [21] LEAL A F R, RAKOV V A, PISSOLATO FILHO J, et al. A low-cost system for measuring lightning electric field waveforms, its calibration and application to remote measurements of currents [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 60(2): 414-422.
- [22] ARAUJO L, VISACRO S. Digital signal processor based device for measurement of return stroke currents of lightning strikes to tall structures: First experimental results [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(6): 2476-2482.
- [23] 王建国,王守鹏,蔡力,等.10 kV 运行配电线路雷电感应过电压波形在线监测[J].电机与控制学报,2021, 25(1):1-7.

- [24] 杜林,李欣,司马文霞,等. 110 kV 变电站过电压在线监测系统及其波形分析[J]. 高电压技术,2012,38(3): 535-543.
- [25] SANTOS M N N, PIANTINI A. Characteristics of lightning-induced voltages based on experimental data[J]. High Voltage, 2021, 6(3): 555-561.
- [26] HINOW M, HAUSCHILD W, GOCKENBACH E. Lightning impulse voltage and overshoot evaluation proposed in drafts of IEC 60060-1 and future UHV testing [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(5): 1628-1634.

作者简介

张雷, 硕士研究生, 主要研究方向为输电线路雷击在线监测。

E-mail: 15694142728@163.com

范菁, 教授, 主要研究方向为无线传感器网络、复杂网络、数据挖掘和智能计算研究。

E-mail: fanjing9476@163.com