

输电杆塔影响下的振荡雷电流检测

由于输电杆塔波阻抗的不连续性，导致雷电波在杆塔上传播时发生了一定的畸变。通过对雷击杆塔响应进行仿真，得到杆塔影响下的雷电波波形为标准雷电波叠加振荡分量。根据振荡雷电流的陡度、幅值和振荡时间三个基本特征，提出了雷电流特征识别和负触发，来识别检测雷电流信号。简单介绍了检测系统中的罗氏线圈传感器、信号调理电路、A-D转换、FPGA核心控制以及通信模块，来检测雷电流波形、幅值和极性等。最后，通过实验验证了仿真的正确性和检测系统的实用性。

廖敏夫 袁 幸 黄金强 王苏亚 段雄英/大连理工大学电气工程学院

0 引言

随着输电线路电压等级、杆塔高度的不断增加，电力系统遭受雷击的概率大大增加。雷击杆塔时，由于雷电流的注入，短时间内横担电压骤升，使绝缘子两端达到击穿电压并发生闪络，进而造成线路短路，同时一部分雷电流进入输电线路，其电磁、机械及热效应对电力系统中的电气设备有严重损害。因此，为减少雷击对电力系统造成的冲击事故，输电线路设计时必须采取必要的防雷保护措施^[1-2]。目前国内外通过在杆塔上安装检测装置获取雷电流参数为后续防雷保护设计提供依据。由于杆塔波阻抗的不连续，使雷电波在杆塔传播时发生畸变，因此研究杆塔对雷电流的影响，进而获得各行波通道真实的雷电参数，对改进输电线路防雷设计至关重要。



廖敏夫/教授

关键词/Keywords

杆塔影响·
畸变·
振荡雷电流·
基本特征·
检测系统·

国家自然科学基金(51277020, 51477024)，中央高校基本科研业务费专项基金(DUT13TQ102DUT14ZD201)。

武汉大学研制的雷击在线检测系统在杆塔处放置传感器实测得到的雷电流波形，与标准雷电流存在差异^[3]；清华大学通过建立杆塔的分布参数等效模型对雷击杆塔时的响应特性进行仿真，表明杆塔对雷电流测量存在影响^[4]。而现有雷电检测装置大部分是基于标准雷电流进行检测的，并且杆塔模型没有统一的标准，针对杆塔影响下雷电波的特点识别雷电流，能减少检测系统的误触发。本文通过建立考虑支架的杆塔分块模型，对杆塔影响下的雷电流进行仿真，得到雷击杆塔响应电流波形，并基于此波形提出了适用于振荡雷电流检测的三个基本特征。当输电线或杆塔遭受雷击时立即触发检测系统进行检测识别，并将雷电流数据发送至上位机。上位机可以自动保存雷击数据，为采取有针对性的防雷设计，提供有效的电流数据。

1 杆塔影响下的雷电流波形

以SZC3型输电杆塔为例，考虑支架的影响，建立如图1所示的输电杆塔四

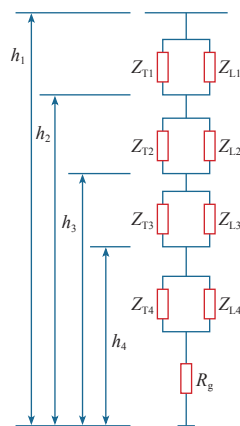


图1 输电杆塔的四段等效模型

段等效模型^[5]。其中 Z_{Ti} 、 Z_{Li} 分别表示第 i 段杆塔主体波阻抗、支架波阻抗， h_i 为第 i 段距地高度， $i=1,2,3,4$ 。

将杆塔的主体结构视为四根圆柱体组成的体系。对单独一根圆柱体，在距地面 h 处取微元 dh ，微元与圆柱中心对地投影点构成圆锥天线模型^[6]，由该模型推导可得距地 h 处圆柱体的波阻抗表达式为^[7]

$$Z' = \alpha \ln \left(\frac{r}{R-h} \right) \quad (1)$$

式中， $\alpha = 59.988$ ； h 为距地高度； r 为单根圆柱体半径； R 为微元边界与圆柱中心对地投影点之间的距离。将四根圆柱体等效为一根圆柱体，对上式进行修正，得到杆塔模型主体波阻抗表达式为

$$Z_t = kZ' = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} Z' \quad (2)$$

式中， k 为修正系数； k_1 为电感修正系数； k_2 为电容修正系数。

$$k_1 = \frac{1}{4} + \frac{M}{4L} + \frac{M_s}{8L} \quad (3)$$

式中， L 为四根垂直圆柱体体系中单根圆柱体的自感； M 为体系中相邻圆柱体之间的互感； M_s 为对角线之间圆柱体的互感。设根据黎曼公式可得^[8]

$$L = 2 \left(r - a + l \ln \frac{l+a}{r} \right) \quad (4)$$

$$M = 2(d_1 - b) - l \ln(b-l) \quad (5)$$

$$M_s = 2(d_2 - c) - l \ln(c-l) \quad (6)$$

式中， l 为圆柱体长度； d_1 为相邻圆柱体距离； d_2 为对角线上两圆柱体距离； a 为单根圆柱体高 l 处横截面半径与中心对地投影点组成的倒置三角形斜边长度； b 为任一圆柱体高 l 处横截面圆心与相邻圆柱体中心对地投影点之间的距离； c 为任一圆柱体高 l 处横截面圆心与对角线处圆柱体中心对地投影点之间的距离。

电容修正系数可以由电场关系确定，其值与两根相邻圆柱体之间的距离有关^[8]，可以设为 $k_2 = 1.76$ 。得到主体波阻抗后，支架波阻抗为 $Z_L = 9Z_T$ ^[9]。

根据上述主体波阻抗的计算公式，得到杆塔等效模型。对杆塔影响下的雷电流进行仿真。取

雷电通道波阻抗 300Ω ，接地电阻 15Ω ，雷电波为双指数模型，其表达式为

$$i = i_m (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (7)$$

式中， i_m 为 40 kA ； α 为 0.015 ； β 为 1.86 。对雷击杆塔响应进行仿真，其峰前波形仿真图如图2所示。

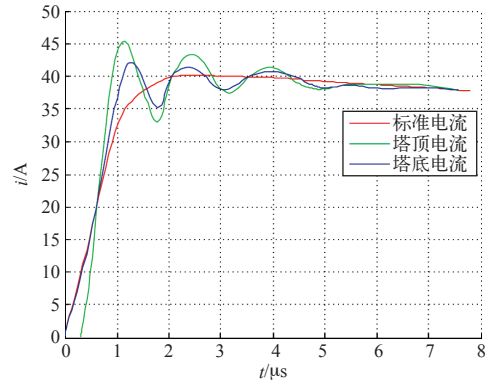


图2 雷电流流经杆塔仿真电流 (40 kA)

由仿真波形图可以看出：与标准雷电流相比，杆塔影响下的雷电流波形波峰部分发生不规则振荡，使平滑的雷电波叠加上振荡波，且随着电流值的下降，振荡越来越弱。

2 振荡雷电流的基本特征

考虑存储在RAM中的数据，没有雷电流通过时，采样电流平均值在噪声电压幅度内，即

$$\bar{I}_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n+N-1} i(t+nT_s) \leq \Delta \quad (8)$$

式中， N 为采样点数，取 $N=20$ ； T_s 为采样时间。当连续两次电流平均值不满足式(9)时，则记 t_2 为起始时刻，即

$$\bar{I}_1(t_1) = \bar{I}_2(t_2) \quad (9)$$

t_2 时刻之后保存的数据与未发生雷击时保存的数据不同，为避免系统发生其他故障引起的误触发，考虑以下几个特征来识别振荡雷电流。

1) 发生雷击时，单位时间内电流变化率要大于雷电流最小陡度和故障电流变化率两者之中较大的值，即满足

$$|I(n+1) - I(n)| f_s \geq K_{\min} \quad (10)$$

式中， $I(n)$ 、 $I(n+1)$ 为前后两次电流采样值； f_s 为采样频率； $K_{\min}$ 为雷电流波前陡度经验值 $2 \text{ kA}/\mu\text{s}$ ，其值远大于短路电流变化率。

2) 发生雷击时, 电流幅值应大于标准雷电流幅值, 取 $I_{\max}$ 为雷电流幅度经验最小值10 kA, 即满足

$$|I(n)_{\max}| \geq I_{\max} \quad (11)$$

3) 发生雷击时, 由于杆塔影响, 雷电波波形为衰减振荡波, 其振荡频率、振荡幅值和调节时间随着杆塔结构、高度的不同而不同。但是振荡波形所占整个波形的比例不应超过整个冲击波的覆盖范围, 即振荡时间应满足

$$t_{\min} \leq |t_i - t_j| \leq t_{\max} \quad (12)$$

式中, t_i 为振荡雷电流第一个极大值对应的时刻, 取 t_i 为满足式(13)的最小值

$$\begin{cases} I(n) - I(n-1) \geq 0 \\ I(n) - I(n+1) \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

t_j 为振荡雷电流最后一个极小值对应的时刻, 取 t_j 为满足式(14)的最大值

$$\begin{cases} I(n) - I(n-1) \leq 0 \\ I(n) - I(n+1) \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

$t_{\min}$ 为一次雷电冲击最小持续时间经验值, 取为1.5 μ s; $t_{\max}$ 为一次雷电冲击最大持续时间经验值, 取为40 μ s。如果存储的数据同时满足上述三个特征才被认为杆塔遭受雷击。

3 检测系统的设计与实现

检测系统的整个结构如图3所示。雷电流采集采用罗氏线圈, 将电流信号转变双极性电压信号。双极性电压信号经调理电路变为符合A-D工作范围的单极性电压信号。然后由A-D对其进行均匀量化后发送至核心控制芯片FPGA, 对其进行

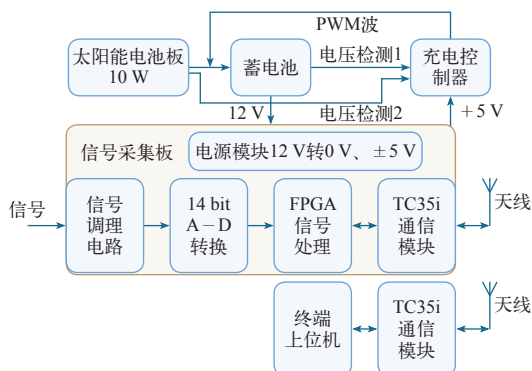


图3 检测系统整体结构图

数据处理。整个检测板由太阳能电池板对其进行供电。如果满足振荡雷电流特征, 由TC35i将雷电流数据发送至上位机, 上位机将这些数据进行保存, 并且重绘波形。

3.1 信号采集

罗氏线圈以自积分工作模式采集信号, 把电流信号缩小转变为 ± 4 V以内的双极性电压信号, 其工作原理: 设 $i_1(t)$ 为被测雷电流; $i_2(t)$ 为流过罗氏线圈的电流; M 为互感系数; L 、 R 和 C 分别为自感系数、内阻和分布电容; r 为信号采样电阻。

根据基尔霍夫定律有^[9-14]

$$e(t) = -M \frac{di_1}{dt} = L \frac{di_2}{dt} + (R+r)i_2 \quad (15)$$

由于雷电流为高频电流, 故 $\omega L \gg R+r$, 所以式(15)可以表示为

$$i_2 = -\frac{M}{L} i_1 = \frac{1}{N} i_1 \quad (16)$$

式中, N 为线圈匝数。信号采样电阻两端电压 U_r 可以表示为 $U_r = i_2 r$, 所以被测电流可以表示为

$$i_1 = \frac{N}{r} U_r \quad (17)$$

因此, 当信号采样电阻满足自积分条件时, 其压降 U_r 与被测电流呈线性关系。经验证, 信号采样电阻0.4 Ω 、线圈匝数50 000匝即可把50 kA以内的雷电流信号缩小改变 ± 4 V以内的电压信号。

信号调理时首先将罗氏线圈得到的 ± 4 V以内的双极性电压信号经电压跟随器进行稳压, 稳压后经过差分放大器将电压缩小为双极性 ± 1 V以内, 缩小后的双极性 ± 1 V电压叠加一个2 V的基准电压转变为幅值线性变化的1~3 V以内的单极性电压信号, 即

$$U_{\text{out}} = \pm \frac{1}{4} U + 2 \quad (18)$$

3.2 数据处理与触发

A-D将1~3 V以内的单极性电压信号进行均匀量化后, 发送至FPGA。FPGA例化位宽12 bit, 其RAM深度为2 048。数据按地址分配在RAM中, 地址分配完后, 覆盖原来的数据, 再次重新

分配。在按地址分配数据的同时,进行对数据识别,判断其是否满足雷电识别条件,满足则停止采集数据,由通信模块进行发送,数据发送完成后,产生一个复位信号,采集装置重新开始采集数据。这一过程实现了数据先保存,再识别处理,后复位的负触发方式。

对于一个 $2.5/40\ \mu\text{s}$ 长冲击雷电流,如果采样频率过大,要保存整个波形需要大量数据点,同时需要通信模块发送大量数据;如果采样频率过小,则可能会丢失数据,增大误差。因此,采用 $20\ \text{MHz}$ 的采样频率,既可以较好地采集雷电流波形,又不需要通信模块发送大量的波形数据。在该采样频率下采集800个点即可覆盖约一个完整的雷电波。考虑通信模块位宽的限制,将每个12 bit宽的数据截成两个6 bit宽的数据,数据总量变为1 600个点。

3.3 终端上位机

当输电线或杆塔遭受雷击时,终端上位机具有自动报警功能,此时,用户在上位机界面利用通信模块向下位机索要检测系统采集到的数据,软件自动将数据保存为原始文档,同时利用原始数据计算雷电流陡度、幅值和极性,存于另一文档。查看雷电流历史数据时,软件自动读取已保存的文档,利用原始数据进行波形绘制,并且,在软件下方状态栏显示雷电流参数,如雷电流陡度、波峰值、波峰值时刻、波谷值及波谷值时刻等。其界面如图4所示。

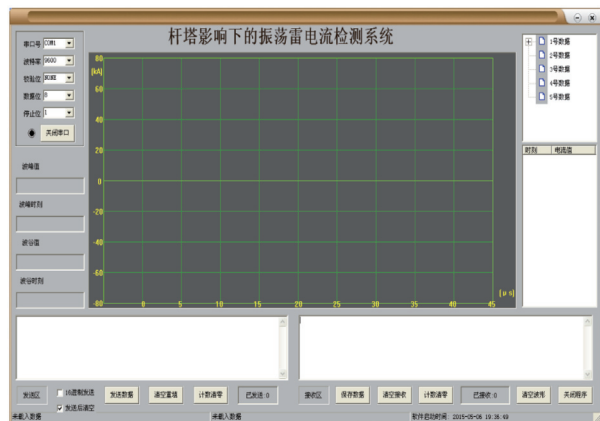


图4 终端上位机控制界面

4 振荡雷电流采集实验

整机实验的目的:验证本文提出的振荡雷电流基本特征能够识别非标准雷电流并且在上位机重绘波形。方法:使用脉冲群发生器模拟产生雷电波,用 RLC 电路模拟杆塔,雷电电流经杆塔模型后,进入采集板。图5为示波器采集到的整个雷电流波形,并将波峰处进行放大,得到的波形。图6为上位机根据采集板采集到的雷电流数据绘制而成的波形与上位机波峰放大波形,与示波器获得的波形一致。

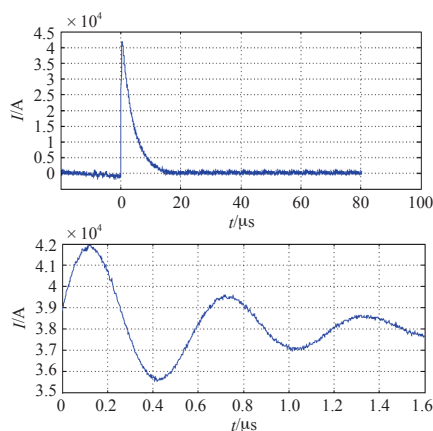


图5 脉冲群发生器模拟雷电流

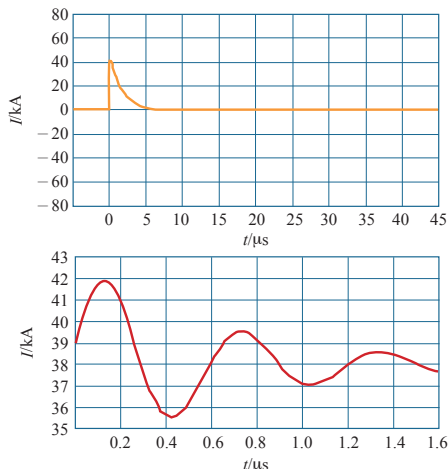


图6 上位机重绘雷电流波形

实验结果表明:对于脉冲群发出的雷击浪涌信号,检测系统能够根据振荡雷电流陡度、峰值及振荡时间这三个特征对其进行识别,并在上位机重绘。与仿真结果对比:由于仿真时选取的雷电激励是双指数模型,因此,与脉冲群发生器发

出的雷电激励信号相比,其峰后电流变换率较为缓慢。但是仿真和实验获得的波形均在波峰处发生明显振荡,因此可以认为,在实验室条件下其结果与仿真结果一致。

5 结束语

通过建立杆塔分块模型,对雷击杆塔响应进行仿真,得到杆塔影响下的雷电波在波峰处发生明显振荡。

基于此波形,本文提出振荡雷电流陡度、峰值及振荡时间这三个特征,用于雷电检测系统中雷电流的检测识别,并且通过实验验证了检测系统的实用性。

参考文献

- [1] 陈林. 雷电全时空监测系统在超高压电网应用中的关键技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [2] 杜林, 戴斌, 司马文霞, 等. 架空输电线路雷电流过压识别 [J]. 高电压技术, 2010, 36 (12): 590-598.
- [3] 汪涛, 周文俊, 易辉, 等. 架空输电线路雷电流波形实时监测系统 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (5): 961-965.
- [4] 王辉, 刘俊, 何金良, 等. 输电线路杆塔对雷电流监测结果的影响 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (9): 1910-1914.
- [5] 杨勇. 架空输电线路雷电监测及雷击杆塔暂态特

性分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.

- [6] Gutierrez J A, Moreno P, Naredo J L. Nonuniform transmission tower model for lightning transient studies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (2): 490-496.
- [7] Jordan E C. Electromagnetic waves and radiating systems [J]. American Journal of Physics, 1951, 19 (8): 477-478.
- [8] 叶齐政, 孙敏. 电磁场 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007.
- [9] Hara T, Yamamoto O. Modeling of a transmission tower for lightning surge analysis [J]. IEE Proc Gener Trans Distrib, 1996, 143 (3): 283-289.
- [10] 金丹, 徐春营, 岳鑫桂, 等. 输电线路雷电流测量用Rogowski线圈低频失真校正技术 [J]. 电力系统自动化, 2013 (22): 96-100.
- [11] 邱关源, 罗先觉. 电路 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] Stanley B Lippman, Josée Lajoie, Barbara E Moo. C++ Primer中文版 [M]. 李师贤, 蒋爱军, 梅晓勇, 等译. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [13] Jeff Prosise. MFC Window程序设计 [M]. 北京博彦科技发展有限公司, 译. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [14] 杨宝初, 刘晓波, 戴玉松. 高电压技术 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2001.

(收稿日期: 2015-09-07) **EA**

(上接第57页)

- [2] 蒋雪峰, 黄文新. 基于模糊控制的新型异步电动机直接转矩控制系统 [J]. 电气应用, 2012, 31 (20): 82-86.
- [3] 石成柱, 郑金吾. 基于DSP的电压无功模糊控制器研制 [J]. 电气应用, 2011, 30 (15): 52-55.
- [4] 李红伟. 变论域模糊控制的无刷直流电机控制系统 [J]. 控制工程, 2010, 17 (5): 599-602.
- [5] 李洪兴. 模糊控制的插值机理 [J]. 中国科学: E辑, 1998, 28 (3): 259-267.
- [6] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器 [J]. 中国科

学: E辑, 1999, 29 (1): 32-42.

- [7] 李洪兴. 非线性系统的变论域稳定自适应模糊控制 [J]. 中国科学: E辑, 2002, 32 (2): 211-223.
- [8] 古超. 基于变论域模糊控制的温控器的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [9] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [10] 李萍. 模糊自整定PID控制器的设计和仿真 [J]. 仪器与仪表学报, 2004, 25 (4): 264-267.

(收稿日期: 2015-10-10) **EA**