

高压线路雷击过电压实例分析

刘锦峰¹, 李建明², 马 林³, 周 成⁴, 李默林⁵, 周 悦⁶, 张 榆²

(1.四川能投金鼎产融控股集团有限公司, 四川 成都 610041; 2.国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 3.成都亿开伟业科技开发有限公司, 四川 成都 610000; 4.国家能源集团科学技术研究院有限公司成都分公司, 四川 成都 610073; 5.电子科技大学成都学院, 四川 成都 611731; 6.国网四川省电力公司特高压直流中心, 四川 成都 610041)

摘要: 首先论述了电力系统过电压分析的重要意义, 详细分析了电力系统过电压的主要种类, 介绍了绝缘配合的传统方法, 为后面的过电压分析提供了理论基础。对电力系统过电压获得的数据进行了时域分析和频域分析, 对现场收集到的过电压数据中一些典型的、频繁出现的过电压波形进行了分析, 判断过电压的类型和产生的原因, 这对于研究判断站内电气设备的绝缘强度、检修周期、设备改进和系统改造、过电压对高压送电线路的影响方式和程度以及过电压的防范等都具有重要的指导意义。在电力系统高压送电线路研究项目中应用取得初步成果。

关键词: 高压送电线路; 雷电放电物理过程; 避雷针; 雷电拦截新技术; 过电压数据分析

Instance analysis of lightning overvoltage in high voltage transmission line

LIU Jinfeng¹, LI Jianming², MA Lin³, ZHOU Cheng⁴, LI Molin⁵, ZHOU Yue⁶, ZHANG Yu²

(1. Sichuan Energy Investment Jinding Industry and Finance Holding Group Co., Ltd, Chengdu 610041, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute of Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610072, China; 3. Chengdu Yikai Weiye Technology Development Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 4. National Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu Branch, Chengdu 610073, China; 5. Chengdu College of University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China; 6. State Grid Ultra High Voltage Direct Current Center of Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: Firstly, the significance of power system overvoltage analysis is discussed, and the main types of overvoltage in power system are analyzed in detail; the traditional method of insulation matching is introduced, which provides a theoretical basis for the following overvoltage analysis. The data analysis of power system overvoltage includes time domain analysis and frequency domain analysis. Some typical and frequent overvoltage waveforms in the overvoltage data collected in the field are analyzed, and the types and causes of overvoltage are judged. It has important guiding significance to study and judge the insulation strength of electrical equipment, maintenance cycle, equipment and system improvement, the mode and degree of influence of overvoltage on high voltage transmission line as well as the prevention of overvoltage. The preliminary results have been achieved in the research project of high voltage transmission line.

Key words: high voltage transmission line; lightning discharge physical process; lightning rod; lightning interception new technology; overvoltage data analysis

0 引言

电力系统运行的可靠性主要由停电次数及停电时间来衡量。在电力系统中,停电的原因有很多。其中,绝缘的击穿是造成停电的主要原因之一^[1]。因此,电力系统运行的可靠性在很大程度上取决于设备的绝缘水平及工作状况。如果系统绝缘只承受正常的运行电压,就不会有什么问题,因为正常运行电压一般不会对设备造成损坏。但是,由于各种原因,系统中的绝缘要承受各种过电压的袭击,其波形、幅值和持续时间各不相同^[2]。

过电压的存在,可能导致电力系统内事故的发生。由于引起事故的原因交织在一起,在事故发生以后进行分析十分困难。在电力系统中,过电压能量的来源情况是不同的。过电压可以分为两大类,即内部过电压和雷电过电压^[3]。内部过电压的能量来自于电力系统内部的能量,例如操作过电压、谐振过电压等。雷电过电压的能量来自于电力系统之外的能量,即雷电击中了电力系统或者其附近的范围,致使电力系统过电压增大。雷电过电压也可以称作是外部过电压,可以细分为感应雷与直击雷两种^[4]。感应雷是指雷击输电线路或者电气设备附近由于电磁感应而产生的过电压。虽然感应雷的幅值通常不大,但是对于中低压等级的电气设备仍然具有危害。直击雷是指雷电直接击中输电线路产生的过电压。直击雷的幅值比感应雷大,所以对电力系统将造成更大的危害。

在电力系统中,对过电压的分析有着极其重要的意义,它可以在过电压的发展过程中对电网的影响提供可靠和准确的信息;还可为处理事故提出改进措施并提供参考依据,为此开展这方面的研究^[5]。

1 线路防雷技术改造

1.1 线路雷击分析

2019年,某线路部分区域雷击事故频发,跳闸率高,出现瓷绝缘子串损坏。为了有效解决雷

击引发的事故,对2[#]、7[#]、13[#]、14[#]、15[#]、16[#]、17[#]、18[#]、19[#]、21[#]、22[#]、26[#]和27[#]共13基杆塔进行防雷改造,安装新型直击雷保护装置,以降低该线路的雷击跳闸率和瓷绝缘子串损坏率。

2019年雷雨季节开始以来,线路的防雷技术改造选定的易招雷击区域上述1 s基杆塔经过将近两个雷雨季节的运行,无一损坏和跳闸。未安装新型直击雷保护装置的31[#]杆塔两个瓷绝缘子串出现损坏现象,如图1所示。



图1 大温线路31[#]杆塔雷击现场

Fig. 1 Lightning strike site of 31[#] tower of Dawen Line

闪电可以分为云闪和地闪两大类。其中,对人类有威胁的主要是地闪。闪电的产生有很大的随机性,它与地理条件和气象条件等有关。根据相关文献,闪电的产生模型为:

1) 大气运动时产生大面积的雷雨云,其范围、厚度都达到2 000 m以上。

2) 大面积雷雨云的下方(对地面),90%左右是带负电荷。大面积雷雨云中间的强电场的变化,突破雷雨云下边的边界,以数条高密度电子束为中心的电荷群(直径约20 m)向地面移动,称为下行先导。

3) 先导接近地面对地面物体(如避雷针、接闪器等)的强感应产生符号相反的电荷,反放电称为上行先导。上下行先导接通以后,形成了雷云对大地的空气电离通道,产生下行先导的雷云中的电荷群由空气电离通道泄放雷电荷入地,此为闪电^[6]。

在“雷电原理学”上，雷电具有明显的随机性，地闪闪击数和地闪的类型与地理条件、气象条件等有关。地闪闪击数有明显的日变化和季节变化。因此雷电流的大小也有明显的差别^[7]。

根据中国雷电流幅值的概率曲线，只有约10%是100 kA以上的大电流。由于地理条件、气象条件和闪击数有明显的日变化、季节变化等因素的影响，在数十根杆塔的大温线路中，落雷的大小随机性很大。能打坏瓷绝缘子的100~300 kA雷电流概率不到10%。打坏两个瓷绝缘子，应该是很少见的情况^[8]。

110 kV的输电塔杆都架设有避雷线，大部分的雷击都可以通过避雷线保护。直击雷是通过绕击直接打在瓷绝缘子上的。目前，国内外高压输电系统损坏主要是击杆和绕击。据资料介绍与相关报道，这种情况大多数是高强度的雷击造成的^[9]。31#这种老式杆塔，距离避雷线的垂直线比较远，容易遭受绕击。近十来年，其塔杆设计比较合理，可以有效减少绕击概率。

1.2 避雷针、避雷线等接闪器与新型直击雷保护装置的异同

雷云产生的下行先导是引发闪电的原因。从雷云出现下行先导，到先导接近地面对地面物体（如避雷针、避雷线）的强感应产生符号相反的电荷，电场强度逐渐加强时出现放电^[10]。反放电称为上行先导。上下行先导接通以后，形成了雷云对大地的空气电离通道，产生下行先导的雷云中的电荷群，由空气电离通道泄放雷电荷，通过避雷针、避雷线或其他接闪器入地这一过程称为闪电。整个闪电过程持续时间仅在几百微秒到几千微秒之间。

在防雷改造项目中的新型直击雷保护装置也有下行先导接近地面，对地面新型直击雷保护装置上的金属电极产生强感应，并产生符号相反的电荷的过程。当金属电极上的电荷产生反放电，出现上行先导的过程时，高压大电流开关断开，金属电极上感应的电荷反放电以后，直击雷保护装置上的高压大电流开关断开雷电的空气电离通道。反放电极离开金属电极的电荷自动切通道，直

接和下行先导的电荷中和，阻断了雷电电离通道的形成。

对比传统防雷电（避雷针）与新型雷电拦截器（以衰减雷击点电流40%计算）在铁塔的应用，可用铁塔的垂直电位进行比较，直观地了解各自的特点。铁塔的垂直电位梯度见表1。

表1 铁塔垂直电位梯度
Tab. 1 Vertical potential gradient of iron tower
(单位: kV)

杆高/m		0	6	12	18	24	30
传统避雷针	电位	300	360	420	480	540	600
雷电拦截器		180	216	252	288	324	360
对比(减少)	ΔU	120	144	168	192	216	240

1.3 新型雷电拦截器对附近杆塔影响分析

1) 31#杆塔及其相邻的30#杆塔均没有安装新型直击雷保护装置。安装了新型直击雷保护装置的29#杆塔距离31#杆塔大约400 m。产生闪电的下行先导，无论是梯式还是箭式下行先导，整个闪电过程仅有几百微秒到几千微秒。没有文献提到下行先导可以水平移动几百米的距离。

2) 110 kV的输电塔杆都架设有避雷线，大部分的雷电下行先导都可以通过铁塔部分避雷线进行引雷入地保护（这里是指80 kA以下的强度比较低的雷击）。29#杆塔安装有新型直击雷保护装置，其安装高度高于避雷线3 m以上。它中和了上空的下行先导，没有下行先导的电荷群，不会影响旁边的任何位置的铁塔。

3) 31#杆塔同时损坏两个瓷绝缘子串是十余年来未遇到过的大电流雷击造成的，由中国雷电流幅值的概率曲线来看，雷电流应该在200 kA左右。它出现的概率大概为2%。加上落雷点的随机性，这条线路17年来，有这么一次大电流雷击，而且是经典的引雷入地的高压输电防雷的避雷线，出现无法保护的绕击雷损坏，说明了不采用新的直击雷保护技术，要解决这些问题是不大可能的。

1.4 整改建议

经现场勘查，大温线110 kV输电线路的31#~35#杆塔，其中31#、33#杆塔处于山脊的最

高点, 极易遭受直击雷损害, 在31[#]、33[#]杆塔上, 宜安装新型直击雷保护装置, 来避免雷击情况的发生。

2 过电压信号监测

电力系统过电压所导致的事故发生后, 由于引起事故的原因通常交织在一起, 往往难以进行判断。为了分析电力系统中各类过电压事故的发生原因, 及时获取过电压发生时刻的准确波形数据显得尤为重要。

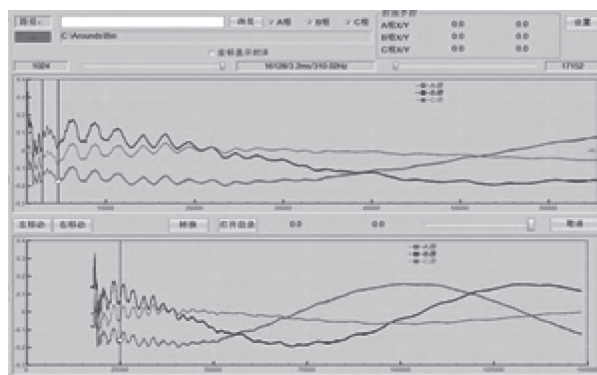
目前, 因缺乏实测的过电压数据, 研究人员大多通过仿真计算来获得过电压的特性参数。但是, 因仿真时元件参数不精确, 往往造成计算结果与实际情况出入较大。随着传感器技术、计算机与通信技术的发展, 国内各高校、科研单位开展了对电力系统过电压的实时监测研究。它能够分析电力系统中产生过电压事故的原因提供有效参考和依据。

在本文研究中, 避雷器处采集到的过电压信号通过同轴电缆传送到主控室, 并通过网络传送到专家工作室的暂态过电压在线监测采集系统, 方便随时调取数据。过电压在线监测系统采集到的双重雷击过电压波形如图2所示。

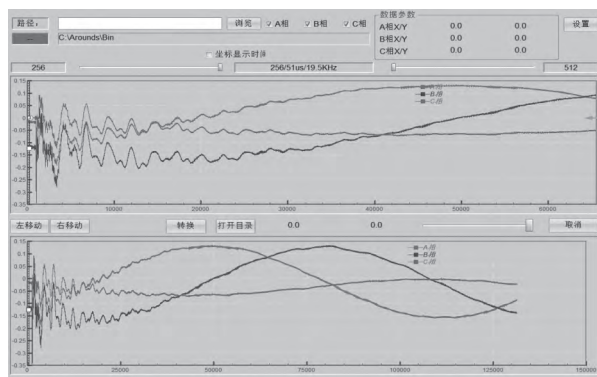
根据《交流电力系统雷电侵入波过电压监测导则》, 双重雷击是指由两个雷击组成的雷闪, 两个雷击的时间间隔通常约为50 ms以内。通过对上述采集到的典型过电压波形进行分析, 前后两次过电压波形的波前时间分别为12 μ s、25 μ s, 幅值分别为-198.74 kV、-120 kV, 持续时间分别为6 ms、5 ms。双脉冲的间隔时间为16.37 ms。

此外, 根据过电压在线监测系统记录到的雷电过电压数据的时间信息, 调取雷电定位系统, 查看此时此刻该变电站所有出线线路走廊内的落雷情况, 也得以证实过电压实测数据的准确性。

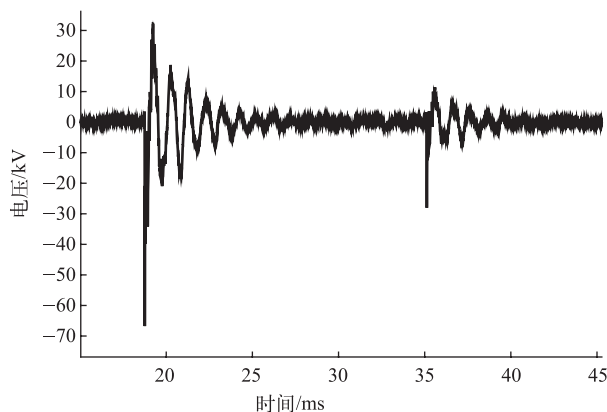
在感应雷过电压发生时, 其波形主要特征是短时间内三相电压幅值急剧抬升, 三相波形呈单极性脉冲且相序保持不变, 三相波形高度相似, 并逐渐回落到正常电压。



(a) 过电压信号1



(b) 过电压信号2



(c) 过电压波形数据

图2 双重雷击过电压波形

Fig. 2 Double lightning overvoltage waveform

图3为雷击10 kV系统输电线路附近时, 变电站内过电压监测系统所记录的感应雷过电压实测波形。

由图3可知, 雷电过电压波形的幅值约为27 kV, 波头较陡, 波前上升时间约为30 μ s, 波尾波形有一定的振荡, 波长约持续1 000 μ s。图3中的过电压波形参数远大于1.2 μ s/50 μ s的标准雷电过电压波形, 是由于雷电侵入波在传输的过

程中,受到线路冲击电晕、电阻损耗和折反射等的影响,导致实测雷电过电压的波前和波长时间延长,波头陡度降低,波形参数存在较大的分散性。

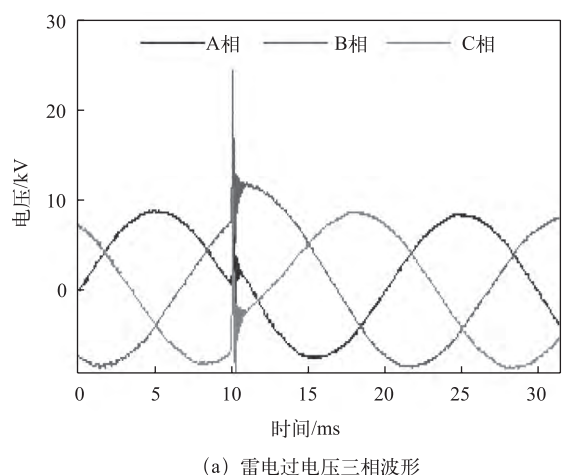
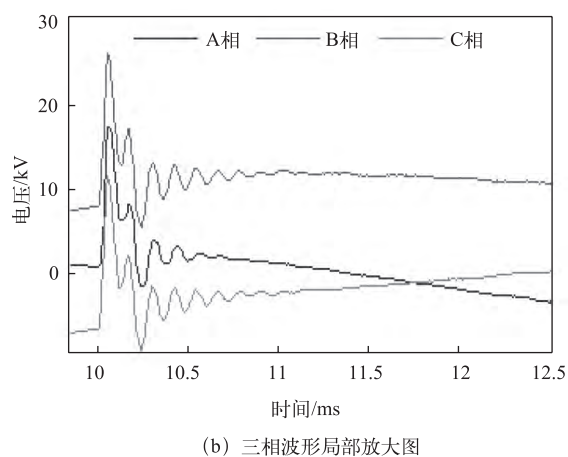


图3 输电线路的雷过电压波形

Fig. 3 Lightning overvoltage waveform of transmission line

3 结束语

本文首先对线路防雷技术改造进行了分析与研究,提出了高压送电线路应用雷电拦截新技术的基本思路。传统的避雷针、避雷线和避雷带等接闪装置都是产生闪电的条件下行先导与避雷针等接闪器出现的反放电,即上行先导,形成空气电离通道,引雷云中电荷入地。而新型直击雷保护装置的反放电中行了产生闪电的条件——下行先导,从而不产生闪电。它们从感应相反的电荷到反放电的过程是相似的。

此外,通过对在避雷器处实测的雷击过电压波形数据实例进行分析,可以清楚地显示出过电压的波形,能够得知过电压的幅值大小、持续时间等参数,从而可以大致地判断出经常受到哪些过电压的袭击,为电力系统安全运行提供了科学的监测依据。对过电压进行统计分析可以得到过电压的出现概率情况,这样就对电气设计和电气制造提供了可靠的现实依据。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 李建明. 电力系统过电压测量与分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [3] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [4] 张纬钺, 何金良, 高玉明. 过电压与绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [5] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [6] 钟一俊. 特高压输电技术研究和应用综述[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2008.
- [7] 兰海涛. 高压电网过电压在线监测系统设计与实现研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [8] 刘强, 张元芳, 黄海鲲, 等. MV-I型过电压在线监测装置的研制[J]. 高电压技术, 2002, 28(8): 46-48.
- [9] 郭良峰, 杜林, 魏钢, 等. 在线监测获取的电力系统过电压波形分析[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 64-73.
- [10] 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.

作者简介

刘锦峰(1970—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统监测技术。

(收稿日期: 2022-09-10)