

基于避雷器尾端电流监测的电力系统过电压反演

胡思宇¹, 黄佐流², 刘守豹¹, 郭海霞², 王世旭², 张 丰²

(1. 大唐水电科学技术研究院有限公司, 广西 南宁 530007;

2. 大唐观音岩水电开发有限公司, 云南 昆明 650011)

摘要: 避雷器是电力系统进行过电压防治的主要设备, 现有避雷器监测装置可以实现电流电压的实时监测, 但缺少进一步的数据分析功能, 且大多数在线监测设备使用电压互感器在线监测过电压, 对一次设备性能存在一定影响。文中设计了一种基于避雷器尾端电流监测来进行过电压分析的装置, 该装置利用电流互感器进行宽频尾端电流采集, 并利用所设计的内置高频采样芯片及智能程序的现地边缘计算单元对采集结果进行首端电压的智能反演, 实现对过电压过程的数据分析, 为过电压防治提供依据。

关键词: 过电压; 尾端电流; 快速傅里叶变换; 避雷器

中图分类号: TM 86 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)02-0064-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230211

Overvoltage Inversion of Power System Based on Tail-end Current Monitoring of Lightning Arrester

HU Siyu¹, HUANG Zuoliu², LIU Shoubao¹, GUO Haixia², WANG Shixu², ZHANG Feng²

(1. Datang Hydropower Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Nanning 530007, Guangxi, China;

2. Datang Guanyinyan Hydropower Development Co., Ltd., Kunming 650011, Yunnan, China)

Abstract: Lightning arrester is the main equipment for overvoltage prevention and control in power systems. The existing monitoring devices for lightning arrester can realize real-time monitoring of current and voltage, but lack further data analysis functions, and most online monitoring devices use voltage transformers to monitor overvoltage online, which has a certain impact on the performance of primary equipment. A device for overvoltage analysis based on current monitoring at tail end of lightning arrester is designed. It uses the current transformer to collect the current at the end of broadband and designs a local edge computing unit with a built-in high-frequency sampling chip and an intelligent program. And the unit realizes the intelligent inversion of the head-end voltage based on the tail-end current monitoring results and then realizes the data analysis of overvoltage process, which provides the basis for the overvoltage prevention and control.

Key words: overvoltage; tail-end current; fast Fourier transform; lightning arrester

0 引言

避雷器是保护电气设备免受高瞬态过电压妨害并限制续流时间、续流幅值的一种电器, 它的出现有效改善了变电所的安全和平稳运行^[1-5]。避雷器作为有效限制电力系统工作过电压、提高电力系统正

常运行的安全保护设备, 对其进行在线监测及数据分析格外重要。

现有避雷器监测装置可以对正常运行下的泄漏电流进行实时监测, 也可对过电压作用时刻进行记录^[6], 但尚未深入挖掘冲击电流幅值及波形各项参数中蕴含的丰富信息量。目前过电压在线监测装置获取过电压信号的方法主要有电容/阻容分压器、电压/电流互感器、末屏电压传感器和非接触式电压传感器等^[7-12]。电压互感器在过电压的高频信号作用

基金项目: 国家能源局 2021 年度能源领域首台(套)重大技术装备项目(000019705/2022-00042); 西藏玉曲河扎拉水电站重点项目(500 MW 冲击式水轮发电机组, 项目编号 02)

下呈现非线性和频变效应,二次侧提取的电压信号存在失真的情况,无法直接使用^[13-17]。其他的过电压在线监测方法均需要在系统一次侧另外安装电压互感器,对一次设备的绝缘性能存在影响。

下面设计了一种基于尾端电流监测分析过电压的装置。该装置利用大电流电流互感器(current transformer, CT)与小电流 CT 相结合的方式测量避雷器尾端电流,具有良好宽频特性;采用高频采样芯片对电流电压波形进行不失真记录。在该装置的现地边缘计算单元内置了基于尾端电流反演首端电压的过电压智能分析程序;利用有限元场分析法^[15]得到缩比试验分布参数,并利用电磁暂态分析软件 ATP-EMTP^[18-19]构建了缩比试验电磁暂态仿真模型;通过对各种幅值和频率下过电压作用时避雷器尾端电流对应波形的仿真计算,确定避雷器首端电压频率-首端电压幅值-尾端电流波形的对应关系库;并利用快速傅里叶变换方法,实现基于尾端电流对其相应首端电压的反演,进而实现过电压过程的数据分析。

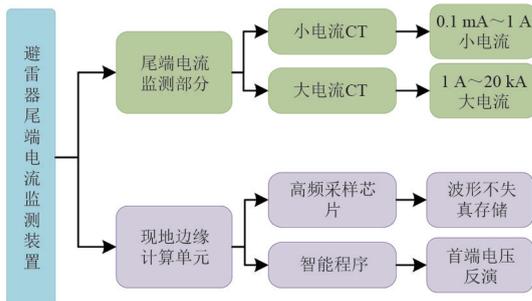
1 避雷器尾端电流监测装置工作原理

1.1 装置组成

过电压参数监测的难点主要体现在不同原因造成的过电压,其频率范围差异较大、过电压幅值差异大造成的尾端电流差异极大以及不同类型电压叠加的问题^[20-23]。

一般 CT 正常运行时的尾端电流的幅值为毫安级别;雷电过电压时,尾端电流的幅值接近千安级别。这就要求避雷器尾端电流监测装置要有较大量程,能够对较小电流和大电流都具灵敏性^[24-25]。

所设计装置由尾端电流监测、现地边缘计算单元两部分组成,如图 1 所示。



电流监测部分采用小电流 CT 与大电流高频电流互感器(high frequency current transformer, HFCT)

组合工作的方式来对避雷器的尾端电流进行采集,详细信息见表 1。

表 1 两种互感器详细信息

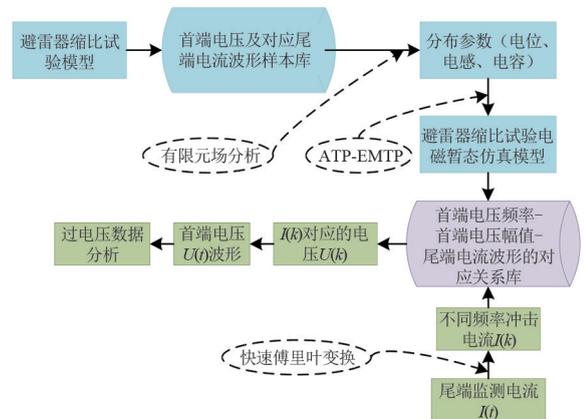
指标	小电流 CT	大电流 HFCT
测量范围	0.1 mA~1 A (最大 10 A)	1 A~20 kA
频带范围	40 Hz~2 kHz	1~30 MHz
开孔尺寸	80 mm×26 mm	外径 144 mm; 内孔径 54 mm; 厚度 37 mm
信号输出	2 芯屏蔽电缆,电缆规格 2×1.0 mm,长度 30 m	同轴屏蔽电缆, 长度 30 m
安装位置	系统接地线(排)	系统接地线(排)
安装方式	接地线从传感器 内孔穿心式,传感 器带开闭卡扣	接地线从传感器 内孔穿心式,传感 器带开闭卡扣
防护等级	IP65	IP65

将两种型号 CT 采集到的电流进行合成后,便可得到避雷器尾端泄露电流。

在现地边缘计算单元中内置了高频采样芯片,其采样速率为 100 MS/s,此部分用于对电流波形的高频采集,并对冲击电流的数据及波形进行存储。正常工作情况下,现地边缘计算单元只记录尾端泄露电流的有效值;当过电压作用时,边缘计算单元将对波形进行不失真存储,并通过内置的智能识别程序,基于监测到的尾端电流反演避雷器首端电压。

1.2 基于尾端电流的过电压过程分析

在现地边缘计算单元中内置了智能识别程序,通过此程序,可实现基于尾端电流的首端电压反演,进而对过电压进行分析。整个智能识别程序流程如图 2 所示。



整个流程详述如下:

1) 建立与实际试验具有几何相似、物理相似和动态行为相似性的缩比试验模型^[26],并利用现场测试的方式,获取尾端电流及对应首端电压样本库。

2) 根据缩比试验模型,利用有限元场分析方

法,建立避雷器电场及磁场的有限元场分析模型。基于已知避雷器的材料相对介电常数、电阻率等条件,仿真得到避雷器电位分布、相关金属部件电容分布及避雷器电感等分布参数。

3) 将有限元场分析结果作为参数,在电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 中建立缩比试验电磁暂态仿真模型。对各种幅值和频率下过电压作用时避雷器尾端电流对应波形进行仿真计算,确定避雷器“首端电压频率-首端电压幅值-尾端电流波形”的对应关系库。

4) 成功建立关系库后,依据快速傅里叶变换法 (fast Fourier transform, FFT) [27] 实现尾端电流 $I(t)$ 波形从时域到频域的转换,分解得到其不同频率的冲击电流分量 $I(k)$,过程如下[28-32]:

首先,将非周期性的连续尾端电流波形信号 $I(t)$ 进行傅里叶变换,即

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

式中, $I(\omega)$ 为 $I(t)$ 的连续频谱,在实际过程中,其结果应为 $I(t)$ 的离散信号 $I(nT)$ 。因此,使用 $I(nT)$ 来计算 $I(t)$ 的频谱。有限长离散信号 $I(n)$ ($n=0, 1, \dots, N-1$) 的 N 点离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) $I(k)$ 如式(2)、式(3)所示。

$$I(k) = \sum_{n=0}^{N-1} I(n) W_N^{kn} \quad (2)$$

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \quad (3)$$

式中: $k=0, 1, \dots, N-1$; W_N 为旋转因子; N 为 DFT 的变换区间长度。通过 FFT,将 $I(n)$ 分解为两个序列之和,即

$$I(n) = I_1(n) + I_2(n) \quad (4)$$

式中: $I_1(n)$ 为偶数序列; $I_2(n)$ 为奇数序列。 $I_1(n)$ 与 $I_2(n)$ 的长度都为 $N/2$,则

$$I(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} I_1(n) W_N^{2kn} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} I_2(n) W_N^{(2n+1)k} \quad (5)$$

所以

$$I(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} I_1(n) W_N^{2kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} I_2(n) W_N^{2kn} \quad (6)$$

由于

$$W_N^{2kn} = e^{-j\frac{2\pi}{N}2kn} = e^{-j\frac{2\pi}{N/2}kn} = W_{N/2}^{kn} \quad (7)$$

则有

$$I(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} I_1(n) W_{N/2}^{kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} I_2(n) W_{N/2}^{kn} = I_1(k) + W_N^k I_2(k) \quad (8)$$

式中: $I_1(k)$ 和 $I_2(k)$ 分别为 $I_1(n)$ 和 $I_2(n)$ 的 $N/2$ 点 DFT; $W_{N/2}$ 为旋转因子。由于 $I_1(k)$ 和 $I_2(k)$ 都以 $N/2$ 为周期,因此 $I(k)$ 又可表示为:

$$I(k) = I_1(k) + W_N^k I_2(k) \quad (9)$$

$$I(k + \frac{N}{2}) = I_1(k) - W_N^k I_2(k) \quad (10)$$

式中, $k=0, 1, \dots, N/2-1$ 。

5) 在成功通过快速傅里叶变换得到尾端电流 $I(t)$ 的不同频率冲击电流 $I(k)$ 后,利用智能识别方法,在避雷器“首端电压频率-首端电压幅值-尾端电流波形”的对应关系库中查找不同频率冲击电流 $I(k)$ 对应的首端电压 $U(k)$,通过合成查找到的所有 $U(k)$,成功反演真实首端电压波形 $U(t)$ 。

6) 通过分析反演得到的首端电压,获取波头时间、波尾时间、幅值等关键参数,从而对整个过电压过程进行分析。

2 避雷器尾端电流监测装置的应用

2.1 现场安装及仿真模型建立

在某水电厂开展了避雷器尾端电流监测系统的现场试点应用。在 500 kV GIS 升压站主变压器高压侧罐式避雷器(A、B、C 三相)上进行试点安装,避雷器尾端电流监测装置现场安装情况图 3 所示。

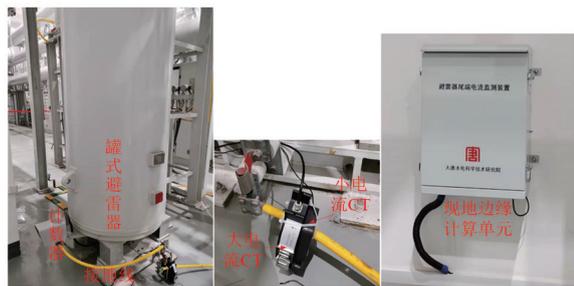


图 3 避雷器尾端电流监测装置现场安装

该水电厂采用的避雷器为 500 kV GIS SF₆ 罐式无间隙金属氧化物避雷器,型号为 Y10WF1-420/960,结构如图 4 所示。

依据图 4 所示的罐式避雷器结构,在电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 中构建该避雷器的分布参数电磁暂态模型,如图 5 所示。由于 500 kV GIS 管线及避雷器采用单相封闭结构,因此相间没有电容、电感的耦合作用。

基于 500 kV GIS 断路器罐式避雷器电磁暂态仿真模型,利用 FFT 得到不同频率冲击电流 $I(k)$ 对应的电压 $U(k)$,建立了“避雷器首端电压频率-首

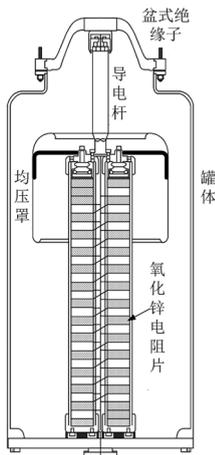


图 4 500 kV GIS 断路器罐式避雷器结构

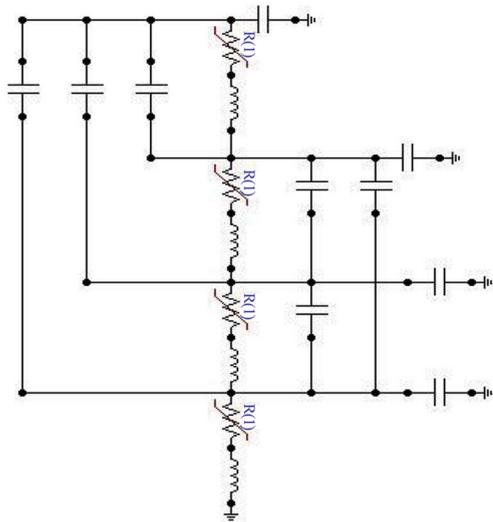


图 5 500 kV GIS 罐式避雷器分布参数模型

端电压幅值-尾端电流波形”的对应关系库。下面将通过某次试验-仿真结果的对应关系说明建立此对应关系库的可行性。

对避雷器 A、B、C 三相在分别施加 1.2/50 μs 的典型雷电波形后,测得的典型首端电压、尾端电流波形如图 6 所示。将图 6 试验所使用的首端电压作为激励施加在仿真模型中,得到的首端电压与尾端电流波形如图 7 所示。由图 6 和图 7 可知,仿真计算结果与实验测试结果具有较好的一致性。这表明,通过电磁暂态仿真模型建立各种典型电压作用下避雷器“首端电压频率-首端电压幅值-尾端电流波形”的对应关系库是可行的。

最后,合成所有 $U(k)$ 便可计算出尾端电流对应的首端电压 $U(t)$ 。

通过图 2 所示流程便可依托尾端电流监测单元、现地边缘计算单元,对波形进行不失真存储,并通过智能识别程序实现避雷器首端电压的反演还原。

该装置监测到的正常情况下的避雷器尾端泄漏电流显示界面如图 8 所示。

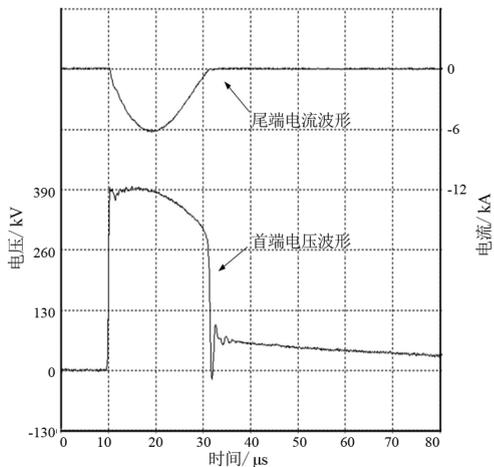


图 6 试验所得避雷器首端电压、尾端电流波形

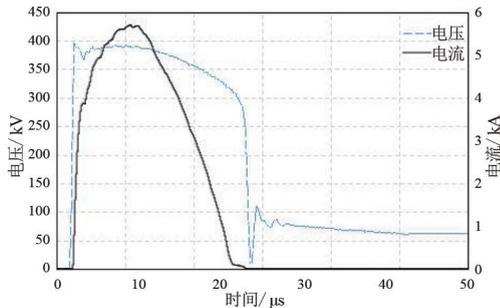


图 7 仿真模型所得的电压、电流波形

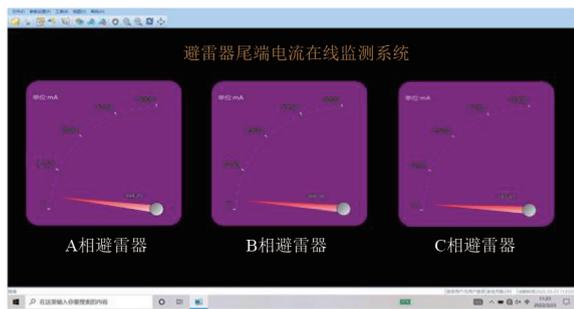


图 8 正常情况下避雷器尾端泄漏电流显示界面

2.2 现场监测实例

下面将详细介绍避雷器尾端电流监测装置在现场应用中的两种实际分析情况。

1) GIS 母线合闸过电压

在一次水电厂 GIS 对 II 母线进行充电的过程中,变压器 B 相避雷器尾端电流监测到冲击电流,波形如图 9(a)和图 9(b)所示,其中电流幅值为-60 A。反推得到冲击电压幅值为-691 kV,波头时间为 80 ns,如图 9(c)所示。该装置通过分析数据及波形,识别出此次过电压具有典型的快速暂态过电压

(very fast transient overvoltage, VFTO) 特性^[33], VFTO 不仅会影响到 GIS 设备本身运行的可靠性,而且会对设备的绝缘性能造成很大的威胁。虽然该电压幅值未超过 500 kV 高压设备 1550 kV 的雷电过电压耐受值,但仍对设备有一定影响。该装置的成功分析及预警,可为一线生产人员提供检修指导,防患于未然。

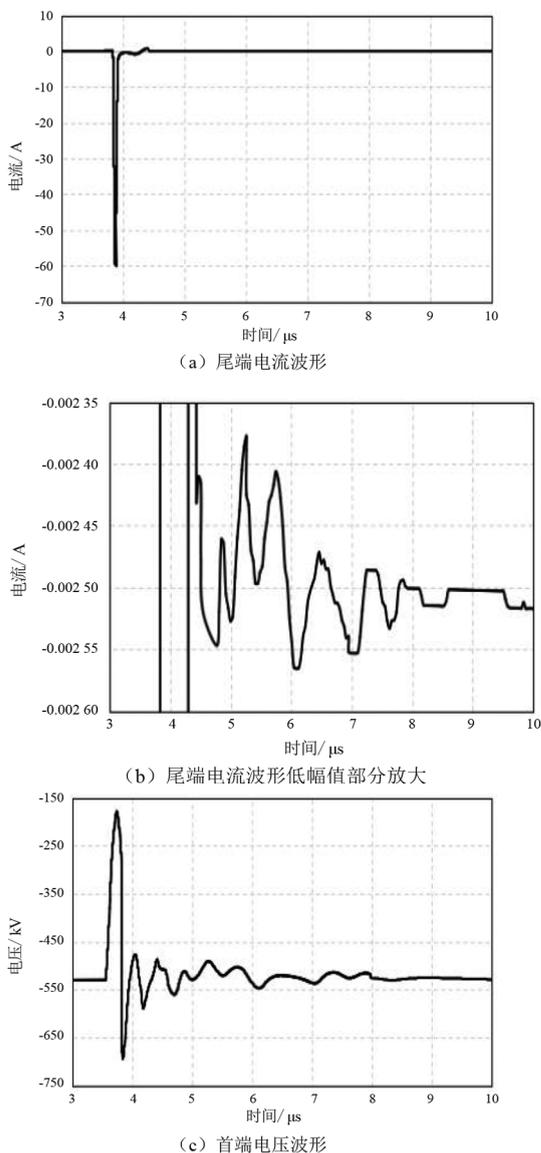


图 9 空充母线过电压波形

2) 雷电过电压

在雷雨天气情况下,在 A 相避雷器尾端监测到冲击电流幅值为 268 A,如图 10(a)、图 10(b)所示,通过装置反演推算得到冲击电压幅值为 695 kV,波头时间为 19 μs,如图 10(c)所示。避雷器尾端电流监测装置分析得知,该波形具有典型的雷电侵入波过电压特点,其电压幅值未超过 500 kV 高压设备 1550 kV 的雷电过电压耐受值。此次成功监测到了雷电过电压,并对其过电压水平进行了反演推算,可

确定其过电压水平,对落实防雷措施具有指导意义。

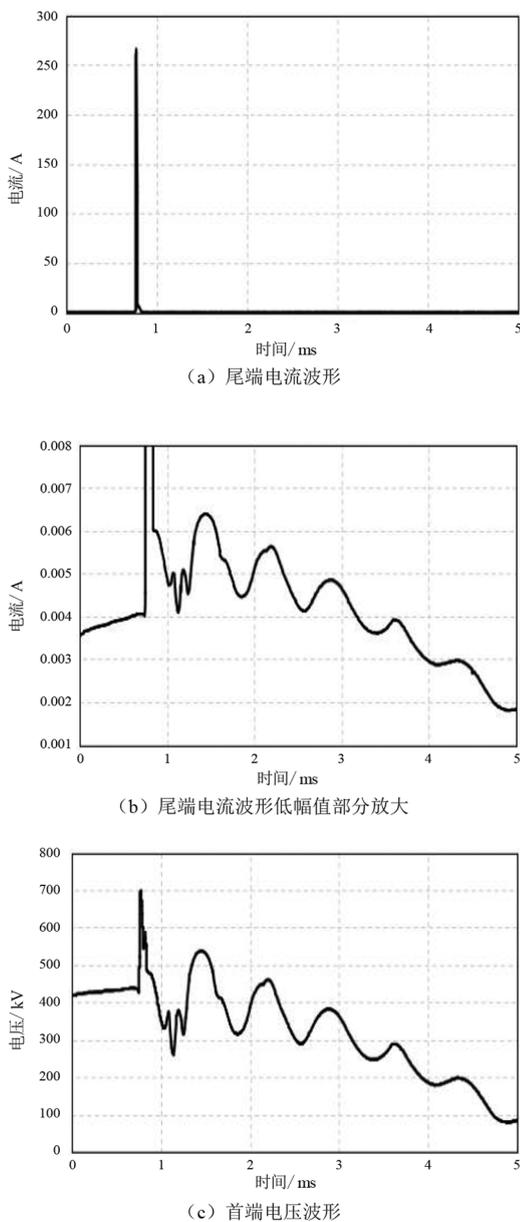


图 10 雷电过电压波形

由上面两个实例可看出,所设计的避雷器尾端电流监测装置可以准确对 VFTO、雷电过电压等有效地进行尾端电流的监测、首端电压的反演以及过电压的数据分析等,验证了利用设计装置实施过电压在线监测及数据分析的可行性,对提高过电压防治具有重要的理论和实际价值。

3 结 论

上面设计了一种基于尾端电流对过电压进行反演及数据分析的装置,该装置通过在避雷器尾端安装全量程电流高频采集传感器,可以方便、安全、可靠地实现对避雷器动作情况和动作电流的采集;并

在现地边缘计算单元中内置了基于快速傅里叶变换方法的智能波形反演程序,实现了对首端电压的反演,进而对整个过电压过程进行精确分析。

从实际应用情况来看,所提供的避雷器尾端电流监测装置,能够有效反映避雷器动作过电压情况,并对电力系统电磁暂态过程进行精确分析,对过电压防治具有重要的理论和实际价值。

参考文献

- [1] 刘发成,赵洪波,齐亮.一起避雷器泄漏电流数据增大案例分析[J].电工电气,2020(7):75-76.
- [2] 余喆,蓝道林,董树礼,等.一起避雷器泄漏电流异常增大特殊案例分析[J].浙江电力,2018,37(5):38-43.
- [3] 朱露露.避雷器智能在线监测系统的研究与设计[D].合肥:安徽建筑大学,2021.
- [4] 苏同斐,李红刚.避雷器泄漏电流超标原因分析[J].山东工业技术,2018(22):166.
- [5] 杨敏.配网架空线路防雷措施[J].科技创新与应用,2018(32):122-123.
- [6] 魏欣欣,安新慧.避雷器在线监测装置在变电站的应用与研究[J].机电信息,2019(29):44-45.
- [7] 张重远,黄涛,任寅寅,等.应用电站设备宽频特性的过电压在线监测装置[J].高电压技术,2011,37(2):310-317.
- [8] 李伟,汤海燕,黄倩,等.配电网过电压在线监测系统的研究[J].电测与仪表,2012,49(2):80-83.
- [9] 黄海波,赵文炎,寇小适,等.一种过电压在线监测分压器的设计[J].变压器,2010,47(8):28-30.
- [10] 张榆,谢敏,谢施君,等.不同负载条件下 CVT 过电压监测装置频率响应特性分析[J].四川电力技术,2019,42(4):21-23.
- [11] 郑文哲.利用非接触无线测量技术开展过电压测量[J].电力安全技术,2020,22(10):9-15.
- [12] 袁佳歆,雷洋,熊信恒,等.一种基于多导体静电耦合原理的非接触式过电压测量方法[J].电工技术学报,2014,29(S1):524-530.
- [13] 黄雁,钟红红,叶杰,等.电压互感器3次谐波电压测量失真机理分析与对策[J].变压器,2019,56(9):53-59.
- [14] 李文博.基于 CVT 宽频线性模型的过电压在线监测方法研究[D].保定:华北电力大学,2013.
- [15] 蔡岳丰,范啸平,邵能灵.船舶水中电场分析方法研究综述[J].上海交通大学学报,2018,52(10):1410-1416.
- [16] 黄华,代静,刘勇,等.GIS 电压互感器的传递过电压试验研究[J].电测与仪表,2014,51(12):1-6.
- [17] 穆舟,江波,赵伟,等.电力系统暂态过电压测量技术综述[J].电测与仪表,2022,59(5):1-13.
- [18] 钱鑫,李璇,施围.电力系统仿真计算软件介绍[J].继电器,2002,30(1):43-46.
- [19] 徐政.免费使用的电磁暂态分析程序——ATP-EMTP 程序介绍[J].电网技术,1999,23(7):64-65.
- [20] 胡浩,陶曾杰.配电网的操作过电压与故障过电压[J].电工电气,2011(7):58-59.
- [21] 吴义纯.基于 EMTP 的操作过电压仿真[C]//第三届安徽自然科学学术年会安徽省电机工程学会 2005 年学术年会论文集.合肥:安徽省电机工程学会,2005:133-137.
- [22] 孙伟,王韵,武增尧,等.500 kV GIS 中快速暂态过电压的测量[J].高压电器,1998,34(4):11-14.
- [23] 何文林,杨智.变电设备过电压在线监测应用研究[J].浙江电力,2018,37(11):36-40.
- [24] 廖思哲,王婉婷,郑刚.基于 EMTP 仿真和实测的接地电缆雷电过电压特性分析[J].电瓷避雷,2021(6):120-124.
- [25] 陈功,段涛,许彝,等.基于 EMTP-RV 的 GIS 变电站雷电过电压研究——以厄瓜多尔辛克雷水电站送出工程为例[J].人民长江,2021,52(2):182-186.
- [26] 陈喆.基于相似理论和模型试验的结构动响应分析[D].南京:南京航空航天大学,2012.
- [27] 李苑青,蒋宇飞,肖涵,等.信号与系统实验中傅里叶变换的研究与实践[J].科技风,2021(32):68-71.
- [28] 陈玮任,张文斌,王立哲,等.基于快速傅里叶变换的 VFTO 实测波形分析[J].电子科技,2021,34(3):65-70.
- [29] 张宝琦.快速傅里叶变换算法在电机波形测试中的应用[J].电工技术杂志,1984(7):25-34.
- [30] 孙冬,高清维,竺德,等.离散傅里叶变换的自适应循环电力谐波分析算法[J].安徽大学学报(自然科学版),2013,37(6):57-64.
- [31] 王天健,吴振升,王晖,等.基于快速傅里叶变换的电力系统频率实时计算方法[J].郑州大学学报(工学版),2011,32(3):81-84.
- [32] 李剑飞.基于傅里叶变换的电力谐波改进测量方法研究[D].杭州:浙江大学,2019.
- [33] 丁登伟,庞理声,莫乔卫,等.水电站 GIS 特快速暂态过电压在线监测系统构建及监测数据分析[J].高压电器,2020,56(6):57-65.

作者简介:

胡思宇(1996),女,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为水电大数据智能应用;

黄佐流(1968),男,工程师,主要研究方向为水电建设工程机电设备管理、发电厂设备管理和检修维护;

刘守豹(1983),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统暂态分析与工程电磁场数值计算。

(收稿日期:2022-07-01)