

水力发电厂 GIS 升压站雷电侵入波 阻碍电抗器研究

刘守豹¹, 侯俊宏², 方 圆¹, 李 欣¹, 杨 剑¹

(1. 大唐水电科学技术研究院有限公司, 广西 南宁 530007;

2. 嘉陵江亭子口水利水电开发有限公司, 四川 广元 628400)

摘要: 水力发电厂 GIS 升压站因场地限制, 多采用长管道方式与户外场相连, 在断路器开断时遭受雷击容易发生 GIS 内部件击穿事故。以某水力发电厂发生的雷电侵入波故障为分析对象, 首先, 采用电磁暂态分析软件 ATP-EMTP 建立升压站雷击分析模型, 对断路器开断状态下的雷电侵入波过电压进行了量化计算, 指出雷电侵入波故障原因; 然后, 对户外场加装避雷器和出线杆塔安装线路避雷器两种侵入波防治手段进行了有效性分析, 指出常规防雷手段无法解决该水电站雷电侵入波防治问题; 最后, 提出了一种雷电侵入波阻碍电抗器设计思路, 建立了该电抗器的分布参数模型, 通过仿真计算验证了该防雷措施的有效性。所提供的防雷思路对雷电多发地区水电站 GIS 升压站防雷具有重要参考价值。

关键词: 水力发电厂; 升压站; 雷电侵入波; 电磁暂态; 阻碍电抗器; 避雷器

中图分类号: TM862 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2020)02-0041-07

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.02.009

Research on Blocking Reactor of Lightning Invasion Wave in GIS Booster Station of Hydropower Plant

Liu Shoubao¹, Hou Junhong², Fang Yuan¹, Li Xin¹, Yang Jian¹

(1. Datang Hydropower Science & Technology Research Institute Co., Ltd.,

Nanning 530007, Guangxi, China; 2. Jialing River Tingzikou Water Resources and Hydropower

Development Co., Ltd., Guangyuan 628400, Sichuan, China)

Abstract: GIS booster station of power plant is usually connected with outdoor field by long pipeline due to site limitation, and breakdown accidents of GIS internal parts usually happen when the breaker is disconnected due to lightning strike. Taking the lightning surge fault in a hydropower plant as analyzing object, the lightning surge analysis model of booster station is established with the electromagnetic transient analysis software ATP-EMTP. The lightning surge overvoltage under the condition of breaker disconnection is calculated quantitatively, and the cause of lightning surge fault is pointed out. Effectiveness analysis of adding lightning arrester for the plant and installing line arrester are carried out, and it is pointed out that the conventional lightning protection methods could not solve the problem of the prevention and control of lightning invasion wave in hydropower GIS station. A design idea of blocking reactor for lightning invasion wave is presented, the distributed parameter model of the reactor is established, and the effectiveness of the proposed protection measures against lightning is verified by simulation. The proposed idea of lightning protection has an important reference value for lightning protection of GIS booster station in hydropower station in lightning prone area.

Key words: hydropower plant; booster station; lightning invasion wave; electromagnetic transient; blocking reactor; lightning arrester

0 引 言

水力发电厂多位于高山峡谷地理条件区域, 由于地形地貌复杂, 其送出线路雷击概率较高^[1-2]。

基金项目: 中国大唐集团公司科技项目资助(基于尾端电流监测的避雷器状态评估及发电厂过电压智能识别系统研究)

同时, 水力发电厂因地理位置和空间受限的原因, 多采用 GIS 进行全封闭设计, 在实际运行过程中, GIS 热备断路器断口或其他部件因雷击或多重雷击发生损坏的情况时有发生^[3-6]。

由于 GIS 管道的波阻抗极小(只有同电压等级架空输电线路的 1/12 ~ 1/15), 侵入 GIS 内的雷电

波在管道内来回反射,会形成陡度较高的过电压^[7-9]。对于分断状态的GIS断路器,雷电侵入波在断路器断口处形成的过电压幅值将因为发生反射而达到侵入过电压的2倍,严重威胁了GIS的安全运行^[10]。对于GIS升压站的雷电侵入波防治,通常的做法是使用在户外场安装出线间隔避雷器^[11-16]。如果户外场与GIS断路器之间的管道过长且中间没有GIS罐式避雷器,将使升压站防雷问题复杂化。

下面从某水电厂发生的一起GIS雷电击穿故障入手,设计了一种雷电侵入波阻碍电抗器,通过与站用避雷器配合,防止雷电侵入波损坏升压站设备。为验证该思路的有效性,基于ATP-EMTP建立了电磁暂态仿真分析模型,对不同运行方式下雷电侵入波过电压幅值、各种防雷措施的有效性、阻断电容器电磁特性等进行仿真计算。研究成果对于雷击故障频发的发电厂GIS升压站的防雷工作具有重要参考价值。

1 某水力发电厂GIS雷击故障情况

水力发电厂总装机为容量1100 MW(4 × 275 MW),主接线为三角形接线,单回500 kV出线接入电网变电站。发电厂升压站为GIS室内站,户外场以后均采用GIS管道形式布置,水力发电厂GIS升压站主接线见图1。

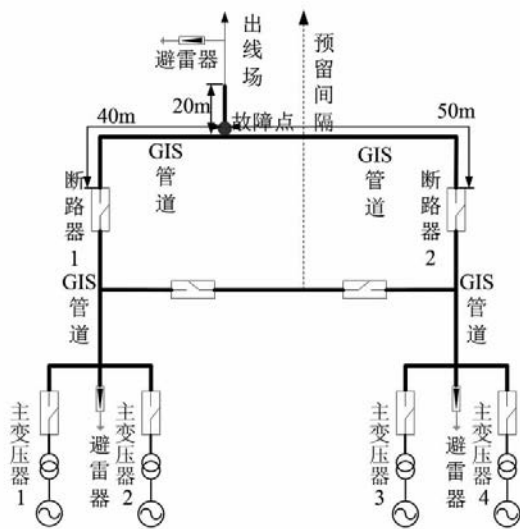


图1 GIS升压站接线

事故发生时,发电厂出现强降雨天气,送出线路走廊有大量雷电活动。首先出现的是C相高阻接

地,接地故障触发纵联差动保护,继而C相断路器1、断路器2同时跳闸,断路器断口开断,C相导线处于电位悬浮状态。接着,架空线C相导线遭受雷击,雷电侵入波通过线路进入户外场,出线间隔避雷器动作,电压互感器记录到的过电压幅值为1298 kV,而避雷器20 kA标称放电电流下冲击残压为1065 kV,这表明雷电侵入波电流幅值超过了20 kA,为大幅值雷电流引起的侵入波。最后,C相断路器1、断路器2重合闸,合闸瞬间C相金属性接地,断路器1、断路器2三相同步跳闸,故障录波情况见图2。经查,GIS出线管道气室支柱绝缘子发生击穿,如图3所示,该绝缘子位于管道预留高抗引线位置,此处导体结构比较复杂,电场畸变,是GIS绝缘的薄弱点。

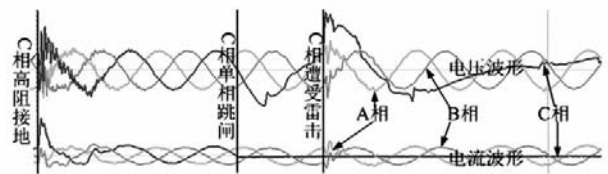


图2 水力发电厂故障录波

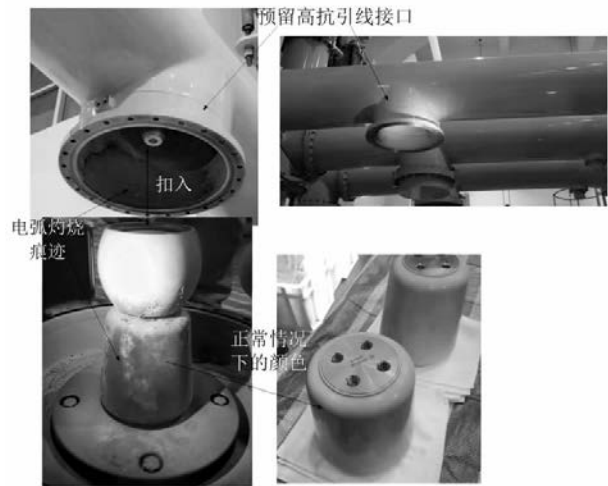


图3 故障点放电情况

从上面的分析可知,雷电侵入波是在线路跳闸断路器断口分开的情况下侵入的,虽然在电压互感器处测得的过电压幅值为1298 kV,但是在GIS管道内断路器断口处形成的入射与反射电压叠加幅值应远大于该数字。

2 GIS升压站模型的建立

采用ATP-EMTP建立水力发电厂雷电侵入波分析模型,如图4所示,其中户外场出线间隔避雷器型号为Y10W-444/1015,户外场一次设备二分裂连

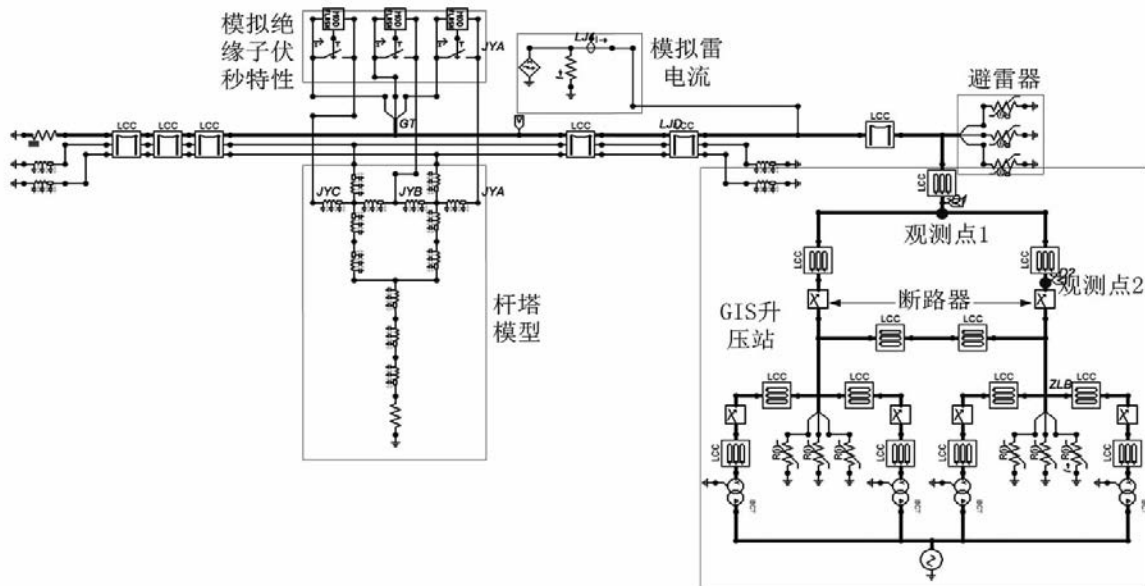
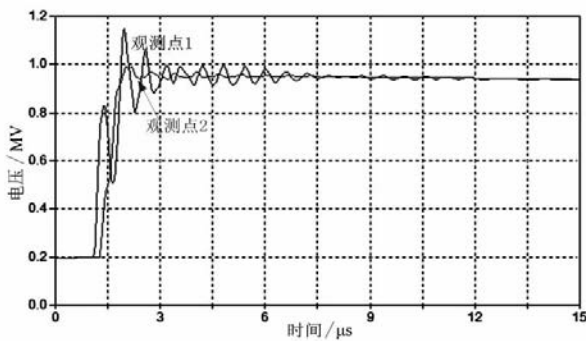
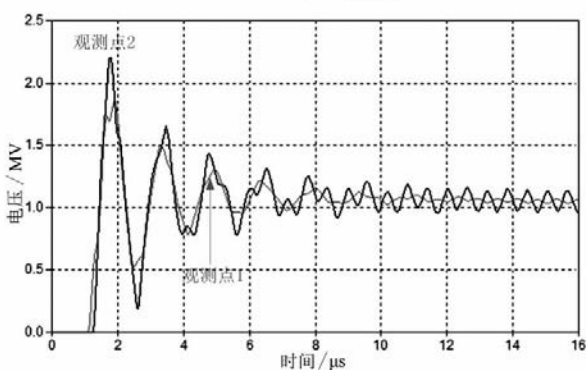


图4 GIS升压站雷电侵入波分析模型



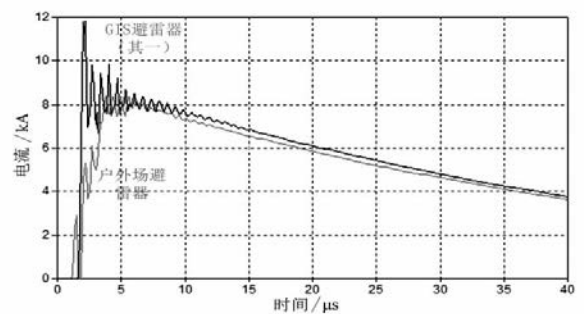
(a) 1、2号断路器合闸



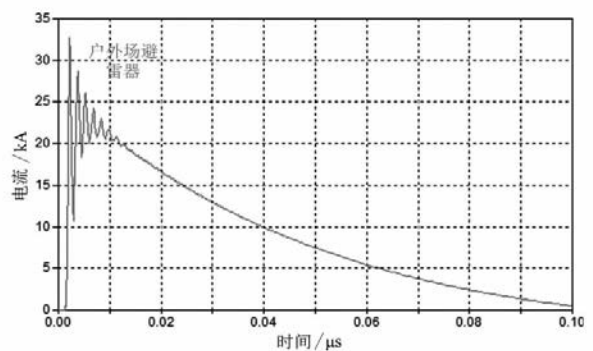
(b) 1、2号断路器分闸

图5 30 kA雷电流绕击1号杆塔A相导线时
观测点电压波形

接线型号为 $2 \times \text{LGJQT} - 1400/35$ 。架空线1号杆塔类型为5A-ZM1直线酒杯塔,1号杆塔距离升压站户外场300 m,500 kV导线型号为 $4 \times \text{LGJ} - 400/50$,地线型号为GJ-70,绝缘子串为28片XP-160型绝缘子,线路档距为500 m,杆塔接地电阻为 2Ω ,雷电流波形采用 $1.2/50 \mu\text{s}$ 单极脉冲波。500 kV GIS额定



(a) 1、2号断路器合闸



(b) 1、2号断路器分闸

图6 30 kA雷电流绕击1号杆塔A相导线时
避雷器电流波形

雷电冲击耐受电压($1.2/50 \mu\text{s}$)相对地为1675 kV,断口为2125 kV,GIS管道由单芯电缆模拟。为了便于分析,在故障点和2号断路器分别设置电压观测点1和观测点2。

采用30 kA的雷电流绕击1号杆塔A相导线,此种情况下由于雷击点离升压站出线避雷器较近,不会发生线路绝缘子串击穿。分别对1、2号断路器

合闸和分闸两种情况下的过电压进行计算,得到电压波形如图5所示,避雷器电流情况如图6所示。

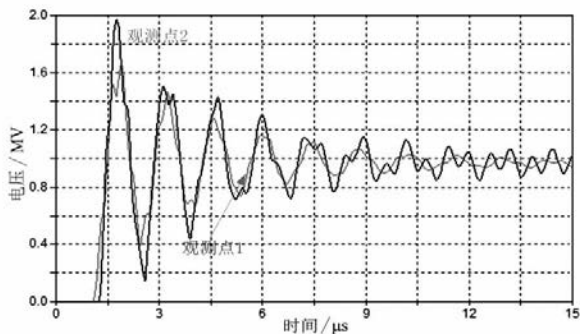
从图5和图6可知,1、2号断路器合闸时,在雷电侵入波传播路径上,户外场避雷器、两组GIS避雷器均动作,使得观测点电位得到有效限制,未出现超过GIS耐受电压幅值的过电压;在1、2号断路器分闸情况下,虽然户外场避雷器动作且释放的雷电流幅值较大,但是由于侵入波在短路断口的反射,观测点处仍然出现了高幅值的过电压。

3 常规治理措施有效性分析

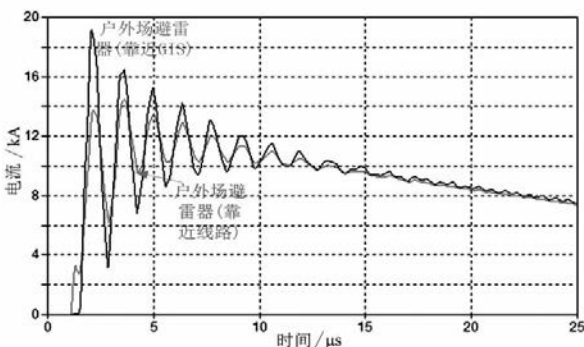
以1、2号断路器开断情况为分析对象,用30 kA雷电流绕击1号杆塔A相导线,采用加装户外场避雷器和在1号杆塔加装线路避雷器两种常规治理措施,考察治理措施的有效性。

3.1 加装户外场避雷器

在原有户外场避雷器附近加装一组同型号站用避雷器,与原有避雷器一起削弱雷电侵入波能量,两组避雷器分相并联排列,忽略两组避雷器之间的电气距离。计算得到电压电流波形如图7所示。



(a) 观测点电压波形



(b) 户外场避雷器电流波形

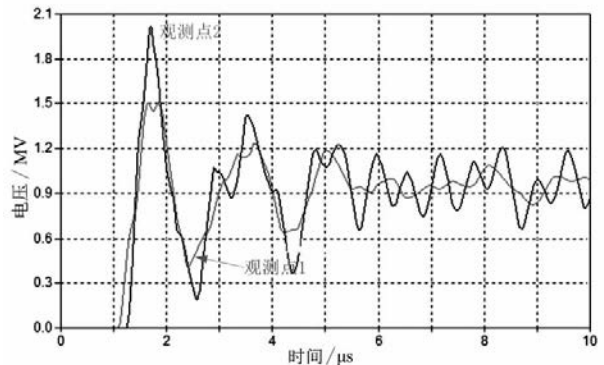
图7 加装户外场避雷器后的电压电流波形

从图7可知,采用两组户外场避雷器的方式在一定程度上能够有效削弱GIS管道内和断路器断口

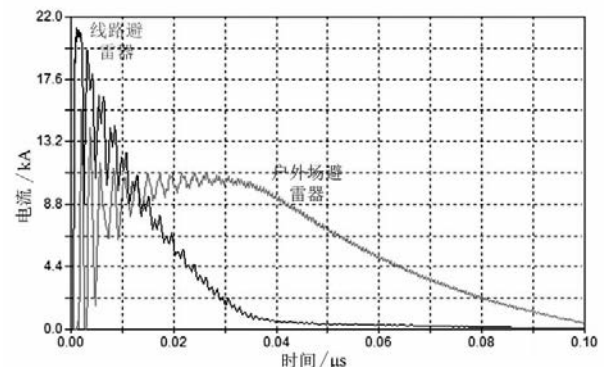
的电压幅值,但是降低的效果并不明显,过电压幅值在GIS耐受电压附近。从两组避雷器A相电流波形可知,靠近GIS的避雷器吸收的能量大于靠近线路侧的避雷器吸收的能量,表明大量的雷电流能量进入GIS是管道内过电压幅值高的根本原因。

3.2 在1号杆塔加装线路避雷器

在1号杆塔A相安装型号为YH20CX1-396/1050的线路避雷器,在30 kA雷电流绕击1号杆塔A相导线时,观测点电压及避雷器电流情况如图8所示。



(a) 观测点电压波形



(b) 避雷器电流波形

图8 加装线路避雷器后的电压电流波形

从图8可知,线路避雷器在雷击后释放了大量雷电流能量,但仍有较高幅值的雷电流侵入升压站,导致观测点电压幅值接近其额定耐受值。通过加装户外场避雷器和在1号杆塔加装线路避雷器都可以在一定程度上降低GIS管道和断路器断口的侵入波过电压幅值,但是效果并不显著。

4 雷电侵入波阻碍电抗器及其防雷效果

为了彻底解决水力发电厂GIS升压站雷电侵入波导致的设备损坏问题,需要采用更加严格的防雷措施。根据电抗对高频电流的阻碍作用,提出了一种雷电侵入波阻碍电抗器与避雷器配合使用的防雷思路。

4.1 设计思路及分布参数模型

雷电侵入波阻碍电抗器不是阻波器,阻波器是为电力载波通信提供信号通道的电抗器,其结构高度较低且首尾两端并联了保护避雷器以便在雷电冲击下及时释放雷电侵入波能量^[17]。因此,常规电力通信领域使用的阻波器不能直接用于阻碍雷电侵入波。

为了能够有效防止雷电侵入波,需要在阻波器的基础上做两点改造:一是增加电抗器的结构高度;二是减小线圈匝数以降低电抗器重量。所设计的电抗器结构图如图 9 所示,电抗器分内外两层,其中每匝导线由两个铜排并联,每层线圈有 28 匝导线。铜排尺寸为 40 mm × 10 mm,每匝线圈中两个铜排的间隙距离为 10 mm,上下两匝线圈之间的间隙距离为 40 mm,内层线圈的内径为 360 mm,内外层线圈之间的间距为 30 mm,电抗器结构高度为 2200 mm。

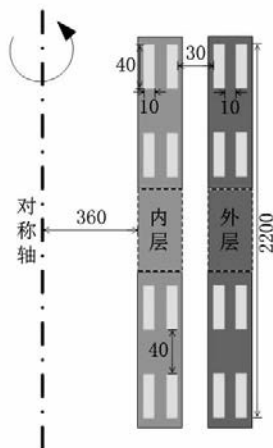


图 9 电抗器尺寸参数(单位: mm)

将电抗器等分为 7 个单元,在 ATP-EMTP 中建立电抗器分布参数模型,如图 10 所示,其中各单元的对地电容和自感、相邻单元互容以及跨越一个单元的两单元间的互容通过有限元计算方式提取,跨越多个单元的两单元间的互容由于数量急剧下降而忽略。

在有限元软件中建立仿真模型对分布参数进行提取,如图 11 所示;计算得到相关参数如表 1 所示。

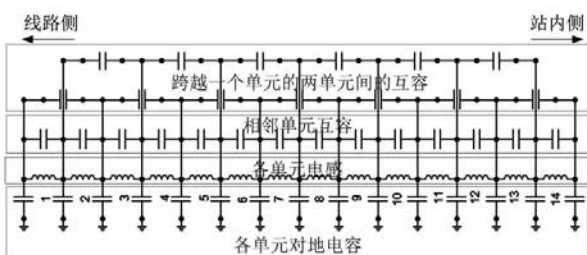
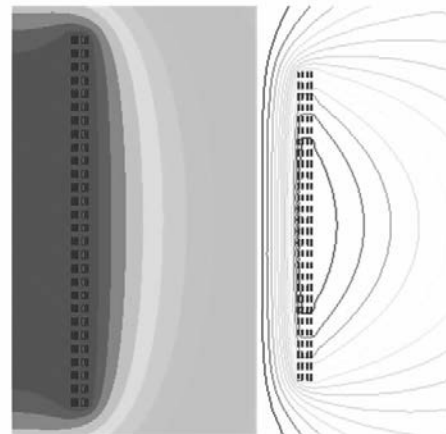


图 10 电抗器的分布参数模型



(a) 电场计算结果 (b) 磁场计算结果

图 11 电抗器参数提取有限元计算模型

表 1 各单元的电容、电感参数(仅列出单元 1-单元 7)

单元序号	电感/nH	电容/ μ F	
		对地	互容
1	905	15.4	83.6
2	854	6.0	79.9
3	840	5.1	79.8
4	836	4.7	79.7
5	834	4.5	79.7
6	833	4.4	79.7
7	833	4.3	79.7

如图 12 所示,在实际使用过程中,电抗器安装在门型架上(与载波通信电抗器类似),在阻波器线路侧、站内侧各安装一组避雷器。

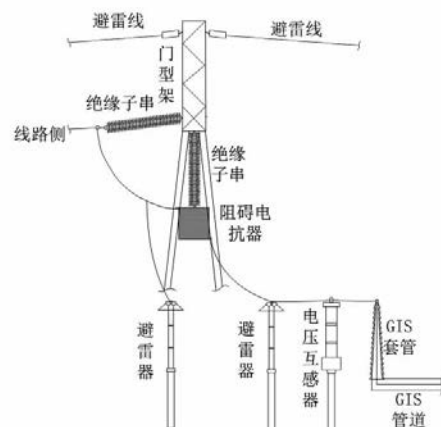


图 12 雷电侵入波阻碍电抗器安装示意

4.2 雷电侵入波阻碍电抗器效果分析

采用 30 kA 雷电流绕击 1 号杆塔 A 相导线,杆塔未安装线路避雷器,此种情况下 A 相绝缘子串未击穿,电压电流波形如图 13 所示。

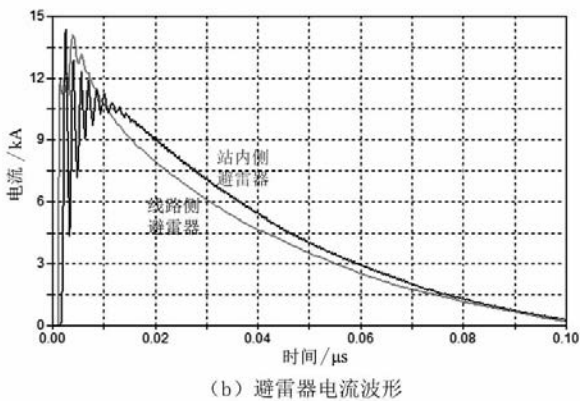
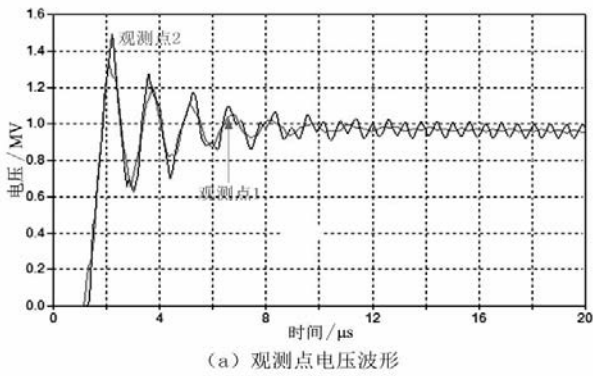


图13 采用侵入波阻碍电抗器后的电压电流波形

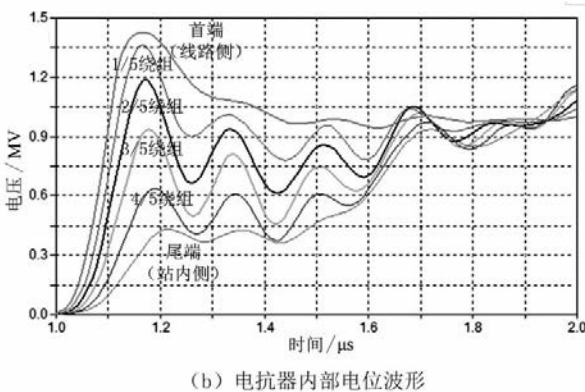
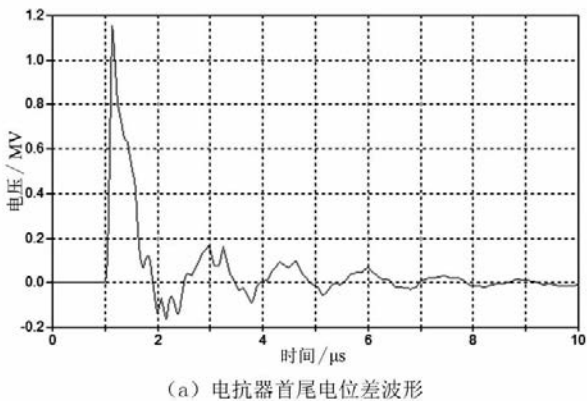


图14 侵入波阻碍电抗器工作时电位分布

从图13可知,在加装阻碍电抗器后,GIS管道内和断路器断口处的雷电侵入波过电压幅值大幅降

低,实现了过电压安全防护;从避雷器电流波形可知,阻碍电抗器的使用让靠近线路侧的避雷器能够更多地释放来自线路侧的雷电能量,使侵入升压站的能量大幅降低,减轻了靠近站内的户外场避雷器的能量释放负担。

阻碍电抗器自身的电位分布情况见图14,在所述雷电流作用下,其两个引线端电位差最大值为1150 kV,在雷电流冲击下不会发生电抗器首尾或内部放电的问题。

5 结 语

1) 水力发电厂 GIS 升压站因户外场到开关站的管道过长,在断路器处于开断状态下遭受雷击,容易发生雷电侵入波在断路器断口处发生反射,使户外场避雷器无法及时吸收雷电能量的情况,在侵入波雷电流过大时,易发生设备击穿故障。

2) 简单采用加装户外场避雷器或在1号杆塔安装线路避雷器的方式,难以大幅削减进入GIS的雷电流能量,对侵入波过电压的防治效果有限,无法满足GIS断路器开断情况下的防雷要求。

3) 通过采用雷电侵入波阻碍电抗器和站用避雷器配合,利用雷电流侵入升压站时在电抗器首端形成的高电位,强制实现线路侧避雷器对雷电流能量的大量释放,使得进入升压站的雷电能量大幅减小,达到了防止GIS管道和断路器断口击穿的目的。

参考文献

- [1] 胡苗. 含小水电的山区配电网规划和优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [2] 范威. 偏远山区风光水资源分布特性及优化配置研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [3] 邱慧敏. 500 kV 避雷器保护距离试验及对热备用断路器距离保护效果分析[J]. 电瓷避雷器, 2015(3): 57-61.
- [4] 钱海, 邱慧敏, 别睿, 等. 500 kV 断路器多重雷击事故分析[J]. 南方电网技术, 2014, 8(5): 20-23.
- [5] 荀羽, 韦瑞峰, 代正元, 等. 母线分段带断口运行母联断路器雷击事故[J]. 云南电力技术, 2016, 44(S2): 118-120.
- [6] 王乃会, 邢大鹏, 汪德荣, 等. 热备用状态下的断路器雷击事故分析[J]. 电工电气, 2012(2): 39-41.
- [7] 何哲, 朱斌, 梁晖, 等. GIS 变电站进线电缆雷电过电压影响因素分析[J]. 电瓷避雷器, 2018(5): 84-88.
- [8] 倪秀尧, 倪莉. GIS 的防雷设计原则[J]. 电工技术, 2001(11): 5-6.

[9] 李雍,周悦,李建明,等. 特高压 GIS 变电站雷电过电压防护研究[J]. 高压电器,2016,52(7):37-44.

[10] 李乐,潘文斌. 电厂升压站侵入波过电压抑制策略研究[J]. 电工技术,2019(23):6-8.

[11] 樊友平,陈艺,白津阳,等. 高压低通滤波器限制雷电过电压的应用方案[J]. 高电压技术,2019,45(4):1256-1265.

[12] 谢海,黄金,孙春日,等. 220 kV 输电线路终端避雷器对断路器断口保护效果的研究[J]. 南方电网技术,2017,11(12):62-67.

[13] 叶育林,刘行,刘晏平,等. 500 kV 多雷区核电厂变电站雷电过电压仿真计算分析[J]. 电瓷避雷器,2019(5):167-172.

[14] 谭逢焘,罗日成,李懿儒,等. 1000 kV GIS 变电站雷电

过电压影响因素分析[J]. 电力学报,2019,34(3):249-255.

[15] 孙秋芹,张永涛,汪泓,等. 江苏 500 kV 电网限流电抗器雷电侵入波过电压特性[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(12):87-92.

[16] 黄修乾,张文锋,赵淳,等. 500 kV 紧凑型线路雷电反击机理研究[J]. 云南电力技术,2016,44(1):110-114.

[17] 李张秀,江峰,张建波. 一起阻波器闪络故障产生的原因分析及防范[J]. 四川水力发电,2017,36(1):110-112.

作者简介:

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

(收稿日期:2020-03-02)

(上接第35页)

表2 各种故障情况下保护动作情况

故障类型	故障距离/km	过渡电阻/ Ω	高频分量电流差值 D	故障位置判别	是否动作
区内故障	1000	100	22.97	区内	是
		500	8.02	区内	是
	1500	100	20.16	区内	是
		500	7.35	区内	是
	2000	100	16.69	区内	是
		500	6.13	区内	是
远端区外故障	2500	100	13.54	区内	是
		500	5.10	区内	是
	0.1	0.89	区外	否	
远端区外故障	100	0.51	区外	否	
	500	0.45	区外	否	

4 结 语

基于高压直流输电系统拓扑结构,分析了输电线路区内故障时故障电流高频部分的信号特征,利用故障信号小波系数构造了保护方法,具有以下特点:

1) 选取能够反应接地故障特征的高频电气量作为保护特征量,所选的频段受故障电阻和故障位置的影响小,提高了区内外故障的识别能力,能够可靠地保护线路全长。

2) 使用 3 ms 的滑动数据窗进行保护判别,减少了瞬时干扰信号对保护判据的影响。同时,仅使用

线路单端电气量,无需在线路两侧进行数据交换,在故障发生后 5 ms 内即可识别区内故障,保护动作速度快。

参考文献

[1] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.

[2] 汤广福,庞辉,贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1760-1771.

[3] 宋国兵,高淑萍,蔡新雷,等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):123-129.

[4] 陈国平,李明节,许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):2-10.

[5] 张保会,孔飞,张嵩,等. 高压直流输电线路单端暂态量保护装置的技术开发[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):179-185.

[6] 束洪春,刘可真,朱盛强,等. ± 800 kV 特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31):108-117.

作者简介:

李小鹏(1987),博士,高级工程师,研究方向为高压直流输电控制与保护;

戴文睿(1996),硕士研究生,研究方向为高压直流输电线路保护;

林 圣(1983),教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统保护与故障定位;

李世龙(1989),博士,工程师,研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期:2020-02-24)