

# 小型水电站 35 kV 架空输电线路雷击事故分析

杨中瑞, 刘昌军

(四川水利职业技术学院, 四川 都江堰 611830)

**摘要:**对夏季雷暴及雷雨多发地区小型水电站来说,其高压架空输电线路的防雷保护与安全运行非常重要,因为线路两侧连接着电站与上网变电站的主设备,输电线路一旦遭受雷击,就有可能造成电站或变电站的主设备损坏,从而造成重大安全事故和经济损失。通过对某小型水电站 35 kV 架空输电线路的雷击并发生振荡事件进行定性分析,阐述了线路雷击损坏的发生机理,提出了改进对策与建议并付诸实施,取得了较好的效果。

**关键词:**小型水电站;35 kV 输电线路;雷击;振荡;防雷保护

**中图分类号:**TV7;TV734.3;TV737

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2016)05-0088-03

## 1 概述

雷电是夏季常见的自然现象,其何时何地发生、强度多少无法准确预测。对于地处多雷暴地区的水电站来说,安全渡汛和防雷工作尤为重要。水电站中最易遭受雷击的部位是位于室外的高压输电线路、升压站、开关站等。按照国家相关规范,对于升压站、开关站等布置水电站重要设备的区域均应设置避雷针,其可以有效地保护区域内的设备免受直接雷击破坏;而对于保护 35 kV 高压架空输电线路的避雷线一般只在距该线路两侧离变电站 2.5 km 范围内设置,因而其不能做到全线防雷保护。而且,即使设有避雷线,也可能因雷击过于强烈而发生直击雷绕击在输电线路造成与线路两端直接相连的设备发生雷电侵入波引起的过电压损坏的事故,严重影响到水电站的运行安全并可能造成较大的经济损失。

都江堰市处于成都平原与西部高原气流交汇处,夏季雷雨多,强度大,该区域同类型小型水电站有 50 余座,因此,防洪渡汛和防雷保护就显得尤为重要。2013 年 7 月 28 日凌晨发生的异常雷雨天气使某小型水电站 35 kV 架空输电线路遭受雷击,造成线路两侧的 A 相电流互感器损坏,停止发电 7 d,形成了巨大的汛期安全隐患并造成较大的经济损失。

## 2 事件发生经过

2013 年 7 月 28 日凌晨 2 时左右,某小型水电站所在区域发生较大雷雨,中控室值班人员根

据雷雨天气应急预案规定,短时跳开 35 kV 出线 303 开关并开启泄洪闸泄洪,1#机保厂用发电,2#机空载运行备用,短时关闭全厂通讯信号;生产管理人员、值班领导迅速到达电站中控室现场值守,全厂进入有序的应急状态。

凌晨 3 时左右,值班人员发现 35 kV 高压开关室内有明显闪光后迅速消失,现场检查后未发现明显异常。雷电减弱后、准备恢复上网发电时,值班人员发现 35 kV 线路系统侧无电,在现场验电确认后立即向电力调度人员了解情况,调度人员回复因电站 35 kV 专用输电线上出现过短路现象,线路变电站侧的上网开关 312 保护动作已跳开,要求电站检查输电线路情况。电站立即组织人员进行检查,初步发现 35 kV 线路侧 A 相避雷器损坏,绝缘电阻明显偏低,遂立即将其拆除。当时,虽然雷击现象逐渐减弱,但暴雨正逐步加强,为尽快恢复发电,确保渡汛安全,电站值班人员电告调度人员请求系统试送电。

系统送电后,在未合电站出线开关 303 情况下,值班人员发现 303 开关线路侧 A 相电流互感器有放电现象,线路侧功率出现忽“+”忽“-”振荡并逐渐加强,最高达到  $\pm 1\ 800\ \text{kW}$  左右。值班人员立即请求调度人员断开变电站侧 312 开关。由于雷击可能已经造成变电站侧也发生了故障而不能及时断开 312 上网开关,放电越来越严重,15 min 后,已出现明火燃烧,18 min 后,变电站侧上网开关 312 断开,事故现象消失。

天亮后,电力部门与电站技术人员共同查找

收稿日期:2016-07-06

事故产生的原因。首先检查电站及变电站两侧开关的损坏情况,初步判断在电站 35 kV 专用输电线路发生了雷击事故,造成电站侧 303 开关、变电站侧 312 开关 A 相电流互感器绝缘损坏。经全输电线路巡查,发现雷击点正好位于 2.8 km 长的输电线路中段,架空避雷线遭受雷击发生断股,但输电线路其它地方未见明显损坏。

### 3 事故现象所涉及的主要参数

电站装机容量为  $3 \times 1250$  kW,通过 1 回 35 kV 架空输电线路上网,线路型号为 LGJ-3 $\times$ 95,线路总长度为 2.8 km,采用全线架空避雷线。避雷线型号为 LGJ-1 $\times$ 50,线路两端电站及变电站断路器均采用 GBC-35 型手车式开关柜,柜内电流互感器型号为 LZC-35,线路避雷器型号为 HY5WZ-41/134。电站上网的变电站为所在城

市的 110 kV 枢纽变电站,装设两台容量为 50 MVA 三绕组变压器。该变电站主要承担城区和部分乡镇供电,并接受区域内的小型水电站上网。

## 4 事故分析

### 4.1 问题的提出

在该事件中,对以下两个现象需要进行分析研究以确定雷击原因和可能造成的损害,从而指导电站今后的防雷保护工作:一是雷击后为什么会发生振荡现象?如何防止类似事故的发生;二是可能造成哪些危害?该电站地理接线和雷击点见图 1。

### 4.2 等效电路

图 2 中, $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$  分别为与 35 kV II 段母线有直接电气连接的全部线路、变压器高压侧、电缆等形成的对地等效电容,303 为电站侧上网开关,

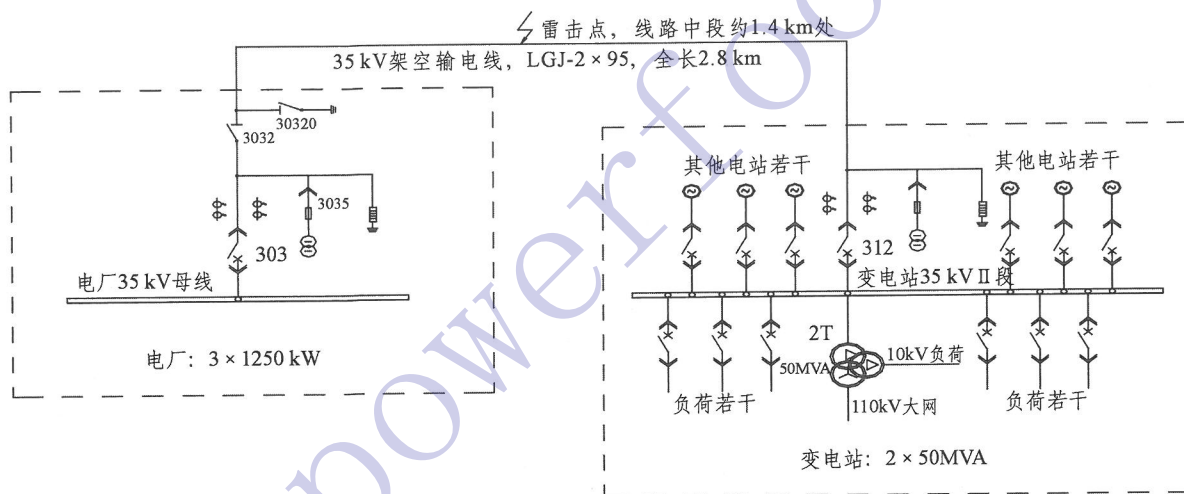


图 1 地理接线及雷击点示意图

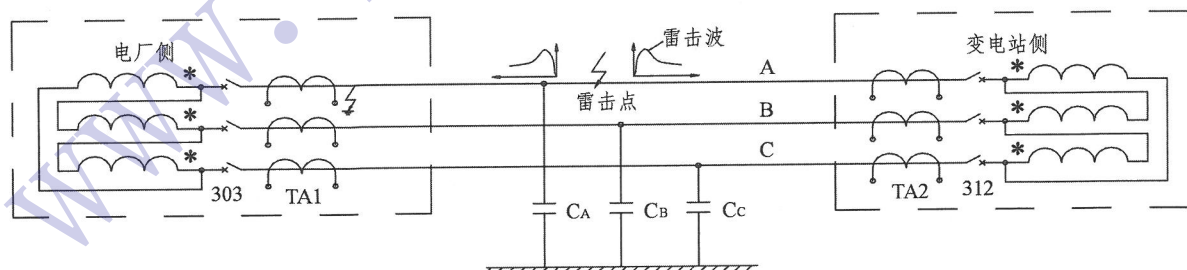


图 2 等效电路及雷击点示意图

TA1 为其柜内配置的电流互感器;312 为变电站侧上网开关,TA2 为其柜内配置的电流互感器。雷击点发生在 2.8 km 长的输电线路中段,雷击发生时 303、312 开关已经断开,线路两侧均无电源。

### 4.3 雷击破坏原因

图 2 中,雷击发生时电站、变电站两侧开关 303、312 已经断开,当线路中段 A 相遭受雷击、所形成的强大雷电侵入波向两侧推进至断路器断口时,无法正常释放强大的雷电电荷,形成浪涌过电压,而此时避雷器却没有迅速放电实施保护;与此

同时,电站和变电站两侧的 A 相电流互感器高压侧也遭受到同样大小的雷击过电压作用,必然会造成互感器高压侧首匝线圈绝缘损坏。

#### 4.4 电弧产生的原因

线路遭受雷击事故后,线路两侧的电流互感器绝缘已经损坏,但由于故障排查工作不彻底,未能排除已经存在的故障点,一旦系统 312 开关送

电,35 kV 工频交流电作用在线路及两侧电压互感器上,在绝缘已经损坏的 A 相电流互感器上产生电弧而接地形成电弧过电压,所产生的电弧过电压将导致绝缘的进一步损坏且逐步加强。

#### 4.5 电弧过电压振荡产生的原因

调度人员合上 312 开关试送电时电站侧上网开关 303 呈断开状态,此时的等效电路见图 3。

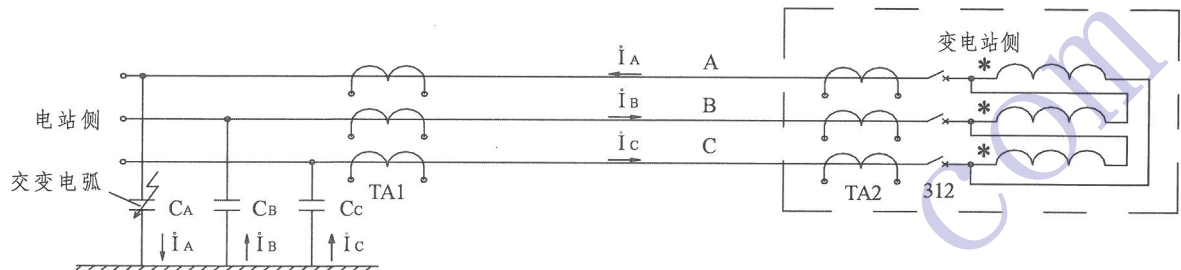


图 3 接地电弧振荡等效电路图

设某一时刻三相交流电的相电压分别为  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ ,对地电容分别为  $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$ ,线路各相的电感分别为  $X_A$ 、 $X_B$ 、 $X_C$ ,对地电容电流分别  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 。正常状态下,三相对地电容电流相量和为 0。

形成电弧过电压的基础是产生间歇性电弧。当中性点非直接接地系统发生单相间歇性电弧接地故障时,由于电弧多次不断的熄灭和重燃而导致系统对地电容上的电荷多次不断的积累和重新再分配,就会在非故障相的电感电容回路上高频振荡,随着电弧的产生而形成高温,造成互感器绝缘进行性损坏。

在高频振荡过程中,由于等效回路阻抗性质呈  $R-L-C$  交替变化,则回路中的电流特性亦呈  $I_R-I_L-I_C$  交替变化,回路功率产生忽“+”忽“-”的交替变化。谐振时,其达到最大值,同时,绝缘由于电弧热量的烧损伴随电弧进行性增强,电弧过电压就会越来越高,回路电流幅值也就越来越大,电弧振荡越来越强,功率越来越大,以致回路故障可能从单相接地故障逐步发展为相间短路故障。当 312 开关断开后,加载在线路上的 35 kV 工频激励电压消失,电弧也就随之消失了。

## 5 结 语

(1) 雷击作为自然现象不可避免,其发生的时间、地点、强弱等无法预测。作为水电站,必须加强对其的防范,尽量减少雷击损失。

(2) 架空避雷线是高压架空输电线路预防直击雷的有效措施,务必使其功能完好,接地电

阻满足要求。笔者在文中介绍的水电站避雷线就遭受了直击雷作用而产生电弧,绕击了输电线路中的 A 相而产生雷电侵入波破坏事故;正是由于避雷线的作用,大大削弱了雷击对输电线路的直接危害。

(3) 高压架空输电线路两侧应安装线路保护避雷器,可有效削弱雷电侵入波;避雷器的配置必须符合相关规范要求,作好定期校验,保证避雷器功能完好并确保避雷器可靠投入运行。

(4) 文中介绍的水电站在雷雨时执行了雷雨天气运行应急预案,断开了电站上网开关且幸好变电站开关由于保护动作已经断开,强大的雷电波侵入时没有直接作用在电站和变电站两侧的 35 kV 母线上,否则将会造成母线连接的所有设备直接遭受雷电侵入波过电压,极易使主变压器高压侧首匝绝缘破坏而发生严重事故,甚至引起变压器爆炸,造成重大安全事故和经济损失。

(5) 小型水电站往往由于资金原因,不可能花较多经费去增加防雷、保护设备设施,因此,雷雨天气运行的预防工作就显得尤为重要;一定要制定适合于电站实际情况的雷雨天气应急预案并严格执行;当发生雷暴、雷雨等强对流异常天气时,应启动应急预案,科学避雷,确保人员和主设备安全。笔者建议:此时应停止向外输电,断开输电线路侧开关,并确认线路避雷器可靠工作。

(6) 尽量不要采用发电机电压直馈线。因为

(下转第 99 页)

震加速度为 0.04 g,地震荷载非常小,笔者不作详细描述,仅对风荷载和爆炸荷载根据欧洲规范的计算方法进行分析。

#### 4.1 荷载及内力计算

##### (1) 风荷载。

该电站基本风速为 25 m/s,属于 II 类场地。取  $z_0 = 0.05$  m,  $z_{\min} = 2$  m。计算高度取主变防爆墙高度  $z = 7.3$  m,基本风速取  $v_b = 25$  m/s,风压力计算见表 2。

表 2 苏布雷水电站主变防爆墙风荷载计算结果

$z_0 = 0.05$	$z_{\min} = 2$
$k_r = 0.19 \left( \frac{z_0}{z_0, II} \right) = 0.19$	$z_0 = z_0, II$
$c_r(z) = k_r \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) = 0.95$	$z > z_{\min}$
$c_0(z) = 1$	
$c_e(z) = 1 + \frac{7k_f}{c_0(z) \ln(z/z_0)} = 1.55$	$k_f = 1$
$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 = 0.39$	$\rho = 1.25$
$q_p(z) = q_b [c_r(z)]^2 [c_0(z)]^2 c_e(z) = 0.55$	

注:表中  $k_f$  为湍流系数。

风荷载作用面积  $A > 10$  m<sup>2</sup>,故取外压力系数

表 3 主变防爆墙结构计算结果表

计算部位	最大弯矩 /kN@m	最大剪力 /kN	计算配筋 $A_s$ /mm <sup>2</sup>	实际配筋 $A_s$ /mm <sup>2</sup>	裂缝宽度 /mm
主变防爆墙	122.7	33.6	1 166	HA20e = 200(1 570)	0.213

荷载难以定性定量分析。而采用欧洲规范对风荷载和爆炸荷载的计算方法,选取欧洲规范中比较类似的天然气爆炸模拟分析主变爆炸情况形成的主变防爆墙计算书及设计产品已经通过监理工程师批准,说明采用欧洲规范对风荷载和爆炸荷载的计算方法设计主变防爆墙是合适的。

#### 参考文献:

- [1] EN 1991-1-4:2005, Eurocode 1: Actions on structures — Part 1-4: General actions — Wind actions.
- [2] EN 1991-1-7:2006, Eurocode 1: Actions on structures —

$c_{pe} = c_{pe,10} = 0.8$ ,内压力系数  $c_{pi} = 0.3$ ,则防爆墙承受风压力特征值为  $w = 0.55 \times 0.8 + 0.55 \times 0.3 = 0.61$  (kN/m<sup>2</sup>)。

##### (2) 爆炸荷载。

对于主变压器可能发生的爆炸荷载对防爆墙产生的压力,选取欧洲规范中比较类似的天然气爆炸计算方法。

根据主变防爆墙布置,矩形围合体的体积  $V = 14.53 \times 9.6 \times 7.3 = 1 018.26$  (m<sup>3</sup>)。由于围合体顶部和下游侧没有墙体遮挡,故  $p_{stat} = 0$ ,通风部分的面积为  $A_V = 14.53 \times 7.3 + 14.53 \times 9.6 = 245.56$  (m<sup>2</sup>),则爆炸压力  $p_d = 3 + 0 + 0.04 \div (245.56 \div 1 018.26)^2 = 3.69$  (kN/m<sup>2</sup>)。

#### 4.2 计算结果

在最不利工况下(风压力+爆炸压力),主变防爆墙结构计算结果见表 3。

#### 5 结 语

户外主变防爆墙受力情况复杂,特别是爆炸

Part 1-7: General actions — Accidental actions.

- [3] EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [4] 薛颖亮,李云贵. 中欧风荷载规范的对比研究[J]. 土木工程信息技术,2010, 2(1):78-81.

#### 作者简介:

王树平(1977-),男,四川成都人,高级工程师,学士,从事水利水电工程设计工作;  
董官炯(1988-),男,四川巴中人,工程师,硕士,从事水利水电工程设计工作。 (责任编辑:李燕辉)

(上接第 90 页)

目前运行的小型水轮发电机出口电压不管是 6.3 kV,还是 10.5 kV 均是中性点不接地系统;既使其不是幅度很大但波头陡度很陡的雷电侵入波也很容易造成发电机绕组引出线首匝绝缘损坏;一旦局部绝缘轻微损坏而引起的接地电容电流在接地绕组和接地点铁芯中流过,哪怕该电容电流不大,但燃起的电弧在定子铁芯中流动极易损坏定子铁芯叠片的片间绝缘(仅是很薄的一层绝缘

漆),从而使电机的修复非常困难,将引起较长时间的停机,经济损失巨大。

#### 作者简介:

杨中瑞(1972-),男,四川乐至人,双合教学科研电厂厂长,讲师,学士,从事水电站技术管理、教学、设计与咨询等工作;  
刘昌军(1977-),男,四川宜宾人,助理工程师,学士,从事水电站运行技术与管理工作。 (责任编辑:李燕辉)