

# 山火对 10~35 kV 输电线路安全运行影响试验研究

杨佳才<sup>1</sup>,任欣悦<sup>1</sup>,王 勋<sup>1</sup>,张星海<sup>2</sup>,范松海<sup>2</sup>,陈天翔<sup>1</sup>

(1.成都理工大学核技术与自动化工程学院,四川 成都 610059;

2.国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

**摘要:**文中设计搭建了山火对 10 kV、35 kV 输电线路安全运行影响试验研究平台,燃烧松木、稻草和灌木模拟 10 kV、35 kV 输电线路下发生山火,研究了山火条件下输电线路三相电压、导线对地泄漏电流、零序电压变化特性;研究分析了火焰高度、火焰宽度对 10 kV 输电线路绝缘的影响。试验结果表明:山火能引起输电线路单相高阻接地和相间短路;造成单相高阻接地和相间短路是电压等级、对地距离、火焰高度、火焰宽度等多种因素共同作用的结果;火焰是否桥接空气间隙是影响空气绝缘的重要因素。研究了试验过程中出现的输电线路对火焰放电、受火焰影响的某相电压低于其他相电压等现象,得出了山火对 10 kV、35 kV 输电线路影响原因和规律。

**关键词:**山火;输电线路;运行影响;试验研究

**中图分类号:**TM 852 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)01-0001-05

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220101

## Experimental Research on Influence of Mountain Fire on Safe Operation of 10~35 kV Transmission Lines

YANG Jiakai<sup>1</sup>, REN Xinyue<sup>1</sup>, WANG Xun<sup>1</sup>, ZHANG Xinghai<sup>2</sup>, FAN Songhai<sup>2</sup>, CHEN Tianxiang<sup>1</sup>

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology,

Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** An experimental research platform for the impact of mountain fire on safe operation of 10 kV and 35 kV transmission lines is designed and established. Pine, straw and shrubs are burnt to simulate the mountain fire fault of 10 kV and 35 kV transmission lines, and the variation characteristics of three-phase voltage, conductor to ground leakage current and zero-sequence voltage of transmission lines under mountain fire are studied. The effects of flame height and flame width on the insulation of 10 kV transmission line are studied and analyzed too. The test results show that mountain fire can cause single-phase high resistance grounding and phase to phase short circuit of transmission line, which are the results of the joint action of voltage level, distance to ground, flame height, flame width and other factors, and whether the flame bridges the air gap is an important factor affecting air insulation. The phenomena that the transmission line discharges to the flame and the voltage of one phase affected by the flame is lower than that of other phases during the test are studied, and the causes and laws of mountain fire on 10 kV and 35 kV transmission lines are obtained.

**Key words:** wildfire; transmission line; operation effect; experimental research

## 0 引言

森林大火不仅破坏环境、威胁人民的生命财产

基金项目:国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点支持项目(U19A2080)

安全,还对输电线路的安全稳定运行造成极大影响,对整个电网的安全运行造成巨大挑战<sup>[1-3]</sup>。从国家电网和南方电网统计的事故案例中能够看到山火导致输电线路跳闸非常频繁<sup>[4]</sup>。同时,在中国配电网线路中,10 kV、35 kV 配电网线路作为主要的配电

网线路,承担着城市内与城乡之间的输电任务,在电力传输中起着重要作用。因此,研究山火对 10 kV、35 kV 输电线路安全运行的影响可以更准确地认识森林火灾导致线路跳闸这一故障并找出应对措施,具有重要意义。

为减少山火导致输电线路跳闸故障的发生,国内外学者对输电线路在山火等多种条件下的故障特性进行了一系列的模拟试验研究。国外 Uhm H S 认为火焰中离子对放电的影响类似于流注,能为放电通道注入大量的电荷<sup>[5]</sup>。美国电科院对交流导线板间隙在火焰条件下的击穿特性进行了研究,在试验初期泄漏电流主要为 100  $\mu\text{A}$  的电容电流,随着火焰高度逐渐增高,在临近击穿前,泄漏电流达到了 2.3 mA,这说明火焰中的电子和离子降低了线路间隙的绝缘强度<sup>[5]</sup>。国内尤飞、吴田等试验分析了杉树木垛火焰在不同间隙下的工频击穿特性,并分析了火焰条件下间隙的击穿机制,认为导致线路绝缘下降的主要原因有火焰高温、高电导率以及颗粒与灰烬等<sup>[6-7]</sup>。黄道春、黎鹏等在植被火条件下进行了导线-板间隙击穿特性的试验,发现击穿电压、泄漏电流都与火焰有关系<sup>[8-10]</sup>。

现有相关模拟试验研究平台尺度小且考虑的因素较为单一,未考虑实际输配电线路结构参数和环境条件等。下面设计搭建了 10 kV、35 kV 三相输电线路试验研究平台,研究山火条件下 10 kV、35 kV 输电线路三相电压、泄漏电流和零序电压的变化和规律。

## 1 试验平台与试验对象

为模拟实际输电线路与山火环境,设计搭建如图 1 所示的试验平台。

10 kV 输电线路试验平台主要由型号为 SY11-400/10、连接组别为 YNyn0 的电力变压器,变比为 10/0.1、0.2 级的 10 kV 电压互感器以及长 5 m、型号为 LGJ-120 的三相导线组成,以模拟电压等级为 10 kV 的线路段,通过并联电容器组改变线路电容电流大小。

35 kV 输电线路试验平台主要由型号为 S7-50/35、连接组别为 Yyn0 的电力变压器,变比为 35/0.1、0.2 级的 35 kV 电压互感器以及长 5.5 m、型号

为 LGJ-120 的三相导线组成,以模拟电压等级为 35 kV 的线路段,通过并联电容器组改变线路电容电流大小。

经调研,四川凉山、甘孜等森林火灾高风险区典型可燃物为松木、灌木、油桉、枯落物等,故使用松木、灌木和稻草(模拟枯落物)作为燃烧材料模拟实际森林火灾。

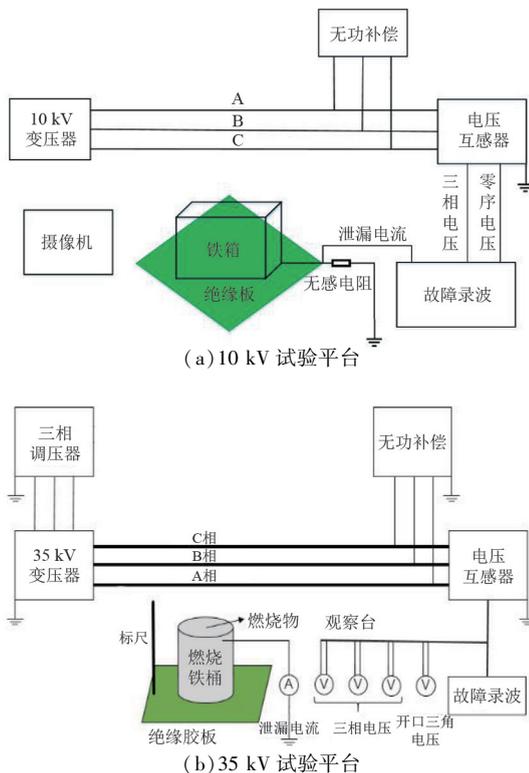


图 1 火焰对 10 kV、35 kV 输电线路影响试验平台

## 2 山火对 10 kV 输电线路安全运行影响

### 2.1 模拟火焰对单相导线的影响

将 C 相设为故障相,三相导线相间距离为 60 cm,对地距离为 52 cm。导线对地距离通过遥控燃烧铁桶下的升降平台调整,火焰高度与宽度根据堆放的木垛宽度、高度和层数调整。首先,观察并记录没有火焰时试验平台正常工作波形以作比较,将松木搭成 30 cm×30 cm×20 cm 的木垛放入铁箱中点燃,导线对铁箱距离 52 cm,火焰桥接线路时试验发现监测信号波形与正常运行波形几乎一致;缩短对地距离为 26 cm 后,波形仍无变化。引入绝缘子模拟 10 kV 线路杆塔遭遇火灾情况,绝缘子高 13 cm,火焰桥接燃烧时试验数据仍无变化,后在绝缘子上绑

一接地铁丝且使导线距铁丝 3 cm 时,火势的变化使得导线发生单相放电接地。

所设计试验条件下,火焰使得线路发生单相接地的最长对地距离为 3 cm,将此距离设为临界击穿距离并进行不同材料燃烧试验<sup>[11-12]</sup>,结果发现 3 种材料燃烧情况下均出现了放电现象和单相接地,如图 2、图 3 所示,但线路对火焰放电还未接地时的零序电压幅值不同(如图 4 所示),说明不同材料燃烧产生的火焰降低空气绝缘程度不同,灌木燃烧时零序电压最大,稻草次之,松木燃烧时零序电压最小。



图 2 导线对火焰放电

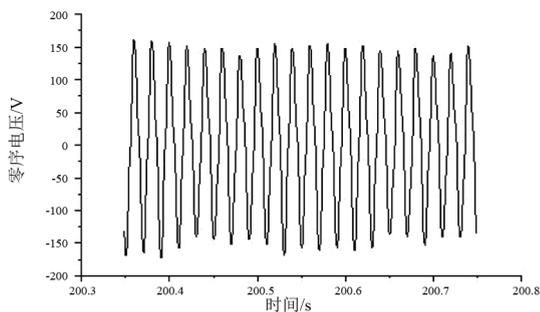


图 3 导线与铁丝 3 cm 间隙被击穿造成单相接地

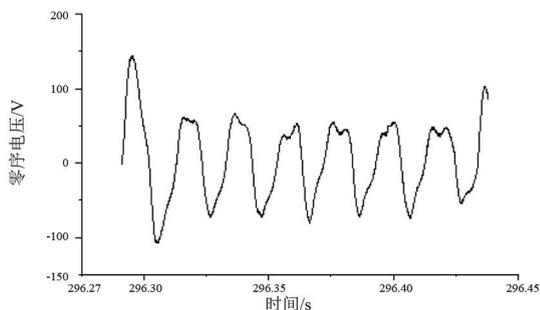
通过摄像机记录的火势变化趋势如图 5 所示。与故障录波仪记录的泄漏电流波形进行比对发现:泄漏电流随火势的变化(即火焰桥接空气间隙的情况)而变化<sup>[13]</sup>,通常在火焰全部桥接空气间隙时有明显的放电现象,故泄漏电流呈现脉冲状(如图 6 所示);3 种燃烧材料下泄漏电流峰值均在 1.0~1.2 A,受制于试验平台模拟线路本身的对地电容电流。

试验平台正常工作时二次侧三相电压峰值为 81.6 V,通常受火焰影响的故障相电压降低,其他两相电压升高<sup>[14-15]</sup>;但也能看到故障相电压有时会出现比正常运行电压高(如图 7 所示)的情况或故

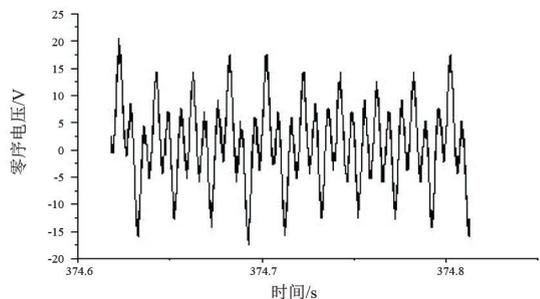
障相电压幅值并非最低的现象(如图 8 所示),说明火势的不确定性会导致线路故障相的识别比较困难。



(a) 灌木



(b) 稻草



(c) 松木

图 4 线路对火焰放电时零序电压

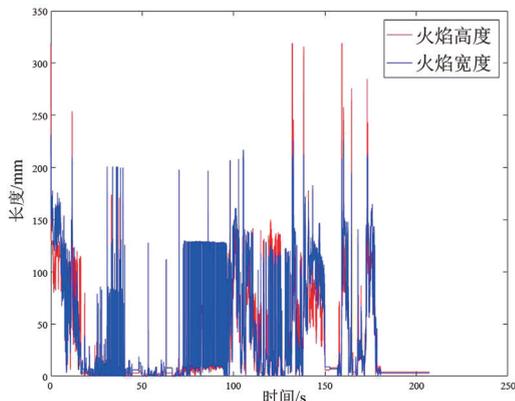


图 5 火势变化趋势

## 2.2 模拟火焰对两相导线的影响

将 B、C 两相设为故障相,为模拟实际导线风偏

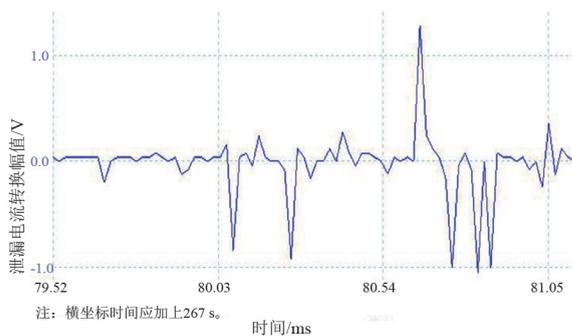


图 6 单相导线对地泄漏电流变化波形

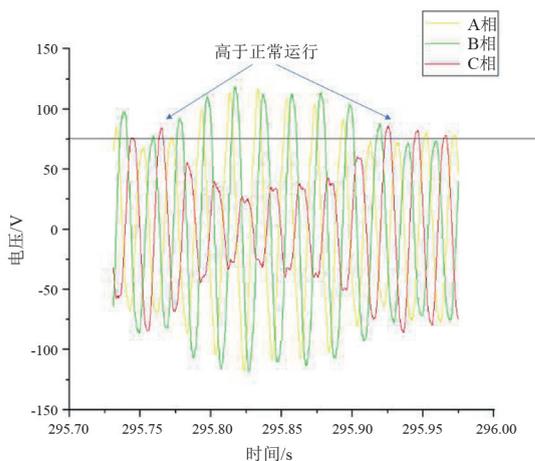


图 7 故障时 C 相电压比正常运行时 C 相电压高

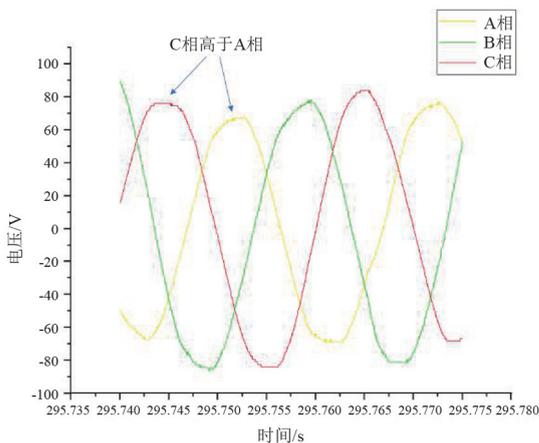


图 8 故障相 C 相电压高于正常相 A 相电压

情况,将正常运行下三相导线相间距离 60 cm 缩短为 30 cm,研究极端情况下火焰对相间的影响。导线对地距离通过升降平台调整,火焰高度与宽度根据堆放的木垛层数和宽度调整。首先,观察并记录没有火焰时本试验平台正常工作波形以作比较,再将 130 cm×50 cm×13 cm 的稻草置于 B、C 两相间,结果发现大面积稻草燃烧产生的火

焰并没有造成相间短接,对相间空气绝缘的影响不大,可能是由于 30 cm 的相间距离太大不足以造成其击穿。

### 3 山火对 35 kV 输电线路安全运行影响

#### 3.1 模拟火焰对单相导线的影响

将 A 相设为故障相,通过升降平台调整对地距离,在对地距离为 20 cm、相间距离为 38 cm 时发生明显的单相接地(如图 9 所示),泄漏电流小于三相导线对地电容电流之和,从故障录波图(如图 10 所示)中可以看到 A 相电压并没有降为 0,与金属接地有明显区别,说明火焰具有比较高的阻抗。



图 9 单相接地

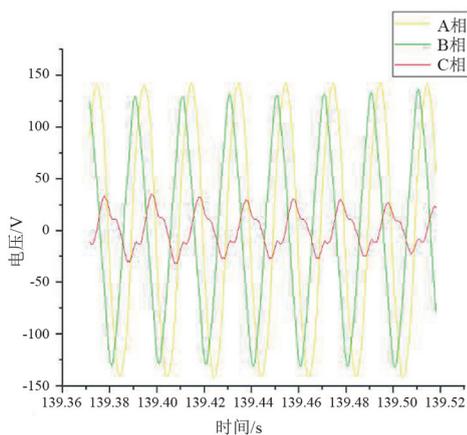


图 10 单相导线对火焰持续放电故障录波

#### 3.2 模拟火焰对两相导线的影响

将 A、B 两相设为故障相,通过升降平台调整对地距离,在对地距离为 20 cm、相间距离为 19 cm 时发生明显的相间短路(如图 11 所示),电弧随着火焰的抬升形成通路,三相电源保护开关并未跳闸。从故障录波图(如图 12 所示)也可看到 A、B 两相电压并未重合,同样说明火焰具有比较高的阻抗。

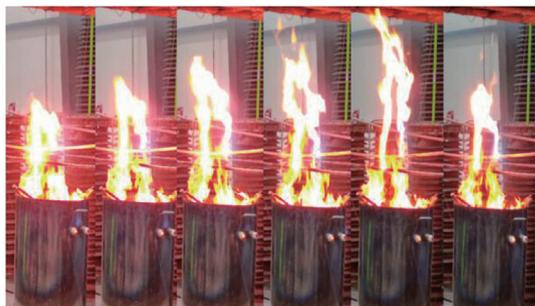


图 11 相间短路

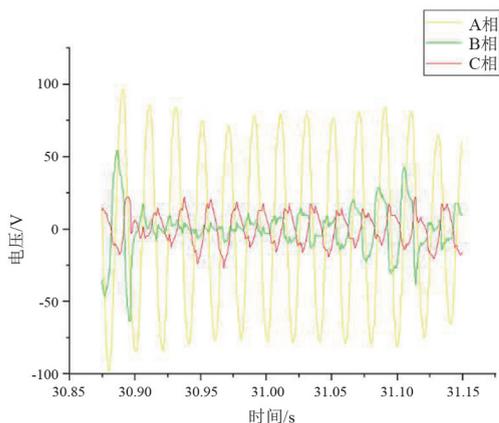


图 12 相间短路时的故障录波

## 4 结 论

1) 所设计试验平台下火焰引发单相接地和相间短路的发生,与电压等级、对地距离、火焰高度、火焰宽度等多种因素有关。

2) 火焰情况下单相接地时故障相电压并未降为 0 且泄漏电流小于三相导线对地电容电流,与金属接地比较,说明火焰具有高阻抗的特性。

3) 火焰影响单相导线时会出现故障相电压高于正常运行时故障相电压的情况或故障相电压并非最低的现象,从而导致发生山火时难以识别故障相。

4) 3 种不同材料燃烧时零序电压幅值不同,说明不同材料燃烧产生的火焰降低空气绝缘的程度不同,灌木燃烧时开口三角电压最大,稻草次之,松木燃烧时开口三角电压最小。以上现象是由于植物种类的影响还是火焰内在的温度等因素的影响还需要深入研究。

### 参考文献

[1] 牟国龙.森林火灾对林区输电线路的危害及设计对策[J].内蒙古电力技术,2013,31(4):97-99.

- [2] 徐华杰.山火灾害对输电线路稳定运行的影响[J].通信电源技术,2020,37(2):214-215.
- [3] 周志宇.山火灾害下电网输电线路跳闸风险评估研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [4] 祝贺,刘程.山火导致输电线路间隙击穿特性的研究现状[J].电瓷避雷器,2018(4):150-159.
- [5] 黄道春,卢威,姚涛,等.植被火条件下导线-板短空气间隙泄漏电流特性研究[J].电工技术学报,2019,34(16):3487-3493.
- [6] 尤飞,陈海翔,张林鹤,等.木垛火导致高压输电线路跳闸的模拟实验研究[J].中国电机工程学报,2011,31(34):192-197.
- [7] 吴田,阮江军,胡毅,等.500 kV 输电线路的山火击穿特性及机制研究[J].中国电机工程学报,2011,31(34):163-170.
- [8] 黎鹏,阮江军,黄道春,等.典型植被火焰下导线-板间隙击穿特性及放电模型研究[J].中国电机工程学报,2016,36(14):4001-4011.
- [9] 黄道春,黎鹏,阮江军,等.山火引发输电线路间隙放电机理与击穿特性综述[J].高电压技术,2015,41(2):622-632.
- [10] 黎鹏,阮江军,黄道春,等.模拟山火条件下导线-板间隙击穿特性影响因素分析[J].电工技术学报,2018,33(1):195-201.
- [11] 普子恒,阮江军,吴田,等.火焰中颗粒对间隙放电特性的影响[J].高电压技术,2014,40(1):103-110.
- [12] 张云,尤飞,陈海翔,等.山火条件下高压输电线路放电特性[J].消防科学与技术,2012,31(1):1-5.
- [13] 陈孝明,魏晗,阮玲,等.火焰高度对输电线路间隙击穿特性的影响[J].中国电力,2015,48(7):134-138.
- [14] LI Peng, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, et al. Study on the dielectric characteristics of simulation transmission line gap under fire conditions[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP), Ann Arbor, MI, 2015:233-236.
- [15] E I Koufakis, P T Tsarabaris, J S Katsanis, et al. A Wildfire Model for the Estimation of the Temperature Rise of an Overhead Line Conductor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2):1077-1082.

### 作者简介:

杨佳才(1999),男,在读硕士研究生,研究方向为高电压试验技术。

(收稿日期:2021-10-30)

# 山火烟雾对 10~35 kV 输电线路绝缘影响试验研究

杨弄潮<sup>1</sup>, 杨博闻<sup>1</sup>, 杨淳岚<sup>1</sup>, 张星海<sup>2</sup>, 范松海<sup>2</sup>, 陈天翔<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 森林山火事故造成输电线路跳闸时有发生。文中搭建了烟雾对 10~35 kV 输电线路绝缘影响试验研究平台, 设计了烟雾试验方案, 研究烟雾对 10~35 kV 输电线路空气绝缘特性影响以及烟雾浓度对输电线路单相对地和相间绝缘特性的影响。通过观察电压互感器开口三角电压和相对地泄漏电流大小和变化来判断烟雾对输电线路绝缘特性影响, 研究了不同种类烟雾在不同浓度时对泄漏电流的影响, 发现纯粹的烟雾对输电线路的绝缘特性影响较小。

**关键词:** 山火烟雾; 输电线路; 绝缘影响; 试验研究

中图分类号: TM 852 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2022)01-0006-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220102

## Experimental Research on Impact of Mountain Fire Smoke on Insulation of 10~35 kV Transmission Lines

YANG Nongchao<sup>1</sup>, YANG Bowen<sup>1</sup>, YANG Chunlan<sup>1</sup>, ZHANG Xinghai<sup>2</sup>, FAN Songhai<sup>2</sup>, CHEN Tianxiang<sup>1</sup>

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology,

Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute,

Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** The tripping of transmission lines occurred from time to time caused by forest and wildfire accidents. A test research platform on the insulation effect of smoke on 10~35 kV transmission lines is established, and a smoke test scheme is designed. The effects of smoke on the air insulation characteristics of 10~35 kV transmission lines are studied as well as the effects of smoke concentration on the phase-to-earth and interphase insulation characteristics of transmission lines. The influence of smoke on the insulation characteristics of transmission lines is judged by observing the triangular voltage of voltage transformer opening and the size and change of phase-to-earth leakage current. Experiments have investigated the effects of different types of smoke on leakage current under different concentration. And the experimental research shows that pure smoke has less effect on the insulation characteristics of transmission lines.

**Key words:** mountain fire smoke; transmission line; insulation effects; experimental research

## 0 引言

据统计,全世界每年森林大火次数高达 20 万余次<sup>[1]</sup>,对高压输电线路安全运行造成了极大的威胁。国内外在进行山火烟雾试验平台搭建的时候,采用的方法大多相同,并且在选用燃烧物方面基本

上都是甘蔗、木材、树枝或其他易燃物品。因为不同国家地区所种植的树木不同,故应采用最接近实际情况的植被进行研究。国内外研究表明,烟雾会对空气绝缘特性造成影响<sup>[1-17]</sup>。国外对烟雾对输电线路空气绝缘特性的影响进行了大量的试验研究发现:1)发现烟雾中针状颗粒物对线路之间空气绝缘特性造成的影响最大,最高可使其绝缘特性降低 90%<sup>[2]</sup>;2)当山火发生,在其中引入烟雾会使空气绝缘特性下降 20%左右<sup>[3]</sup>;3)击穿电压随着颗粒长

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点支持项目 (U19A2080)

度的增长而下降,认为颗粒能起到短接线路间隙的作用<sup>[4]</sup>;4)空中带电粒子会影响输电线路电场环境,并且地面合成电场会因为烟雾浓度的增大而增大<sup>[4]</sup>。国内对烟雾对输电线路之间空气绝缘特性的影响也进行了研究分析:1)烟雾会引起线路周围电场的畸变,当烟雾浓度不断增大的时候,更容易引起触发放电<sup>[5-7]</sup>;2)森林起火前,产生烟雾的时候会引入不同介电常数的电导率颗粒物,其绝缘性必定会受影响<sup>[8-12]</sup>;3)在产生烟雾的时候,带电粒子也会增多,当带电粒子漂浮在导线附近的时候,带电粒子放电产生颗粒链<sup>[13-16]</sup>,会造成线路间空气绝缘特性的下降<sup>[17-18]</sup>。

下面通过搭建 10~35 kV 试验平台,采用四川省森林地区常见的树叶,模拟在单相导线下方以及输电线路相间产生山火烟雾,通过测量各相电压、开口三角电压变化曲线和对地泄漏电流的变化,探究山火烟雾以及烟雾浓度、温度等对 10~35 kV 输电线路单相对地以及相间绝缘的影响。

## 1 试验方案

模拟山火烟雾产生在 A 相导线下方以及输电线路 A、B 相间,探究山火烟雾对 A 相以及 A、B 相间绝缘的影响,试验接线如图 1 所示。

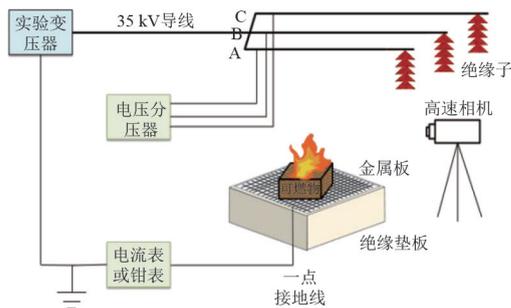


图 1 试验接线

试验平台由型号为 S7-50/35 的 Yyn0 电力变压器、变比为 35/0.1 的 0.2 级 35 kV 电压互感器以及长 5.5 m、型号为 LGJ-120 的三相导线组成<sup>[19-20]</sup>。线路两相间距为 1 m,相对地间距为 1.5 m<sup>[21]</sup>。

为便于观测烟雾浓度的情况,在导线上方 1 m 处安置了一台烟雾传感器观察烟雾浓度,通过调节实验室排风扇投切控制烟雾浓度,利用钳形电流表对泄漏电流进行测量,采用故障录波装置采集三相电压以及开口三角电压波形以观察烟雾浓度引起的

各相电压变化。

## 2 试验现象及分析

试验模拟了山火烟雾不同浓度对单相以及相间的影响。试验观察了各相电压变化以及泄漏电流的变化。各相电压随烟雾浓度变化曲线如图 2 所示。烟雾桥接单相时的开口三角电压,简称单相烟雾开口三角电压;烟雾桥接两相之间的开口三角电压,简称相间烟雾开口三角电压。试验相电压均为 20.2 kV。

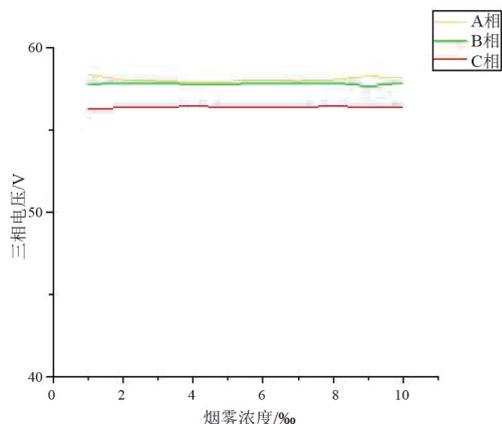


图 2 各相电位随烟雾浓度变化曲线

单相烟雾试验时开口三角电压随烟雾浓度变化曲线如图 3 所示,A 相对地泄漏电流的变化曲线如图 4 所示,单相烟雾试验时故障录波波形如图 5 所示。

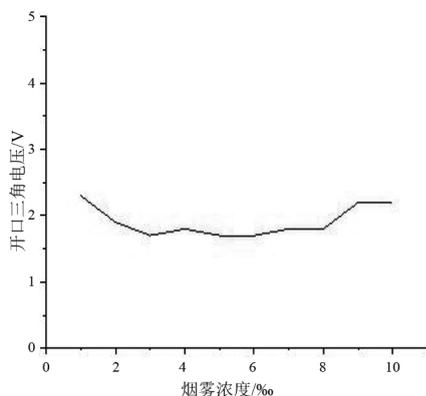


图 3 单相开口三角电压变化曲线

相间烟雾试验时,开口三角电压随烟雾浓度变化曲线如图 6 所示,单相对地泄漏电流随烟雾浓度变化曲线如图 7 所示,相间烟雾试验时故障录波波形如图 8 所示。

据图 2—图 8 可知,随着烟雾浓度的增大,线路的三相电压变化并不明显,单相和相间烟雾试验的

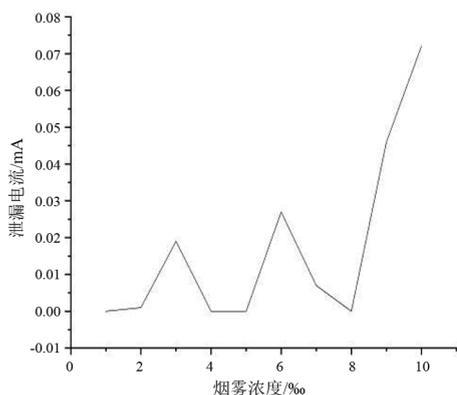


图 4 单相烟雾试验泄漏电流变化曲线

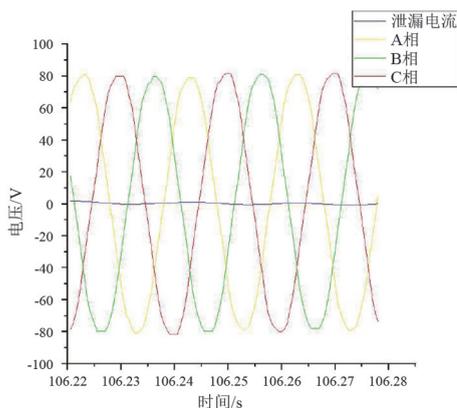


图 5 单相烟雾试验时故障录波波形

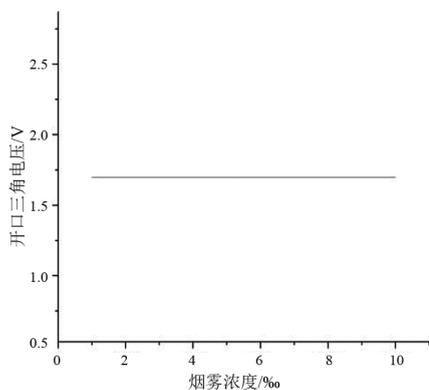


图 6 相间烟雾开口三角电压变化曲线

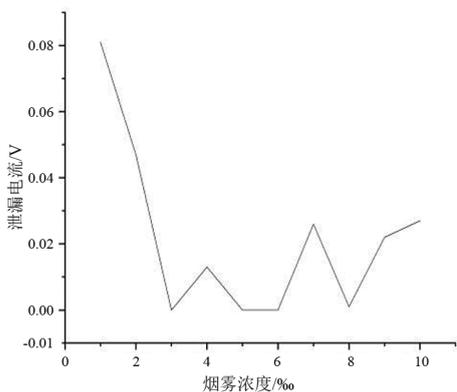


图 7 相间烟雾试验, 泄漏电流变化曲线

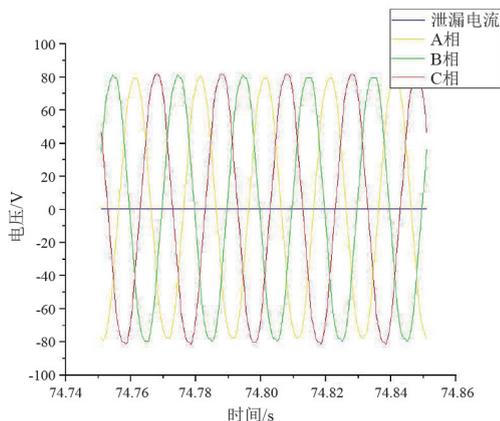


图 8 相间烟雾试验时故障录波波形

开口三角电压曲线波动很小。尽管泄漏电流会产生变化,但变化幅度很小,最高仅为 0.08 mA。故可认为烟雾的单独作用并不会使 35 kV 线路的绝缘特性下降。

### 3 山火烟雾对 10 kV 输电线路绝缘影响试验

为了进一步证明烟雾对输电线路的影响,在 10 kV 输电线路进行了极端烟雾浓度下对输电线路的影响试验。搭建的 10 kV 试验平台如图 9 所示,平台由 SY11-400/10 的 YNyn0 电力变压器、变比为 10/0.1 的电压互感器、型号为 LGJ-120 的三相输电导线、6 组 10 kV 电容器开关组等组成。通过控制不同电容器组的投切,模拟线路对地电容电流值,可调整电容电流最小级差为 1 A,可模拟最大单相接地电容电流值为 60 A。电压互感器接在模拟线路的末端,测量模拟线路的相电压和开口三角电压值。在烟雾生成装置底部接入钳形电流表测量对地泄漏电流。

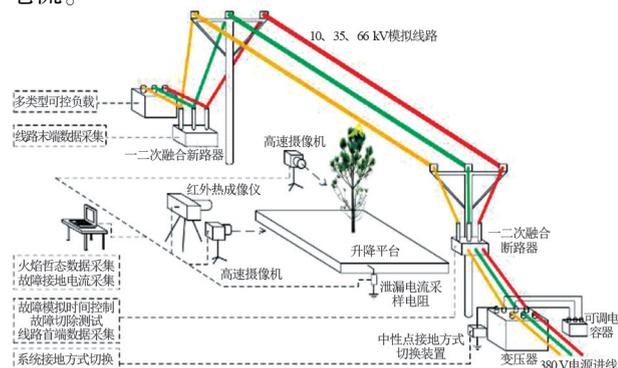


图 9 10 kV 试验平台

经查阅,凉山、甘孜发生森林大火时,周围最多的树木是松树。山火烟雾多是由周围湿润的落叶生成的,且部分区域输电线路周围有工业生产所产生的烟雾,故选用松木、树叶模拟山火烟雾,用焦炭模拟部分工业烟雾。所设计试验基于最大烟雾浓度的情况下,采用松木、树叶、焦炭 3 种不同燃烧物,分别探究不同燃烧物对输电线路的影响。图 10—图 12 分别对应树叶、松木、焦炭所产生的烟雾对三相电压、泄漏电流的故障录波波形,其中蓝色曲线代表泄漏电流。

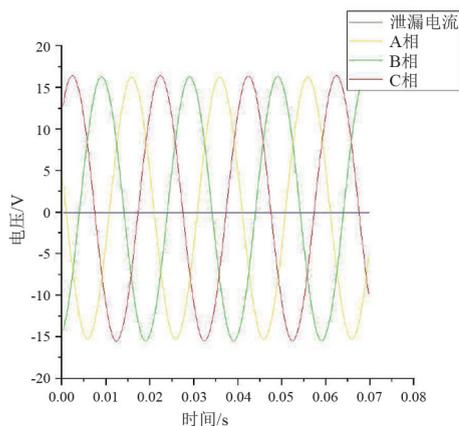


图 10 树叶烟雾对空气绝缘特性的影响

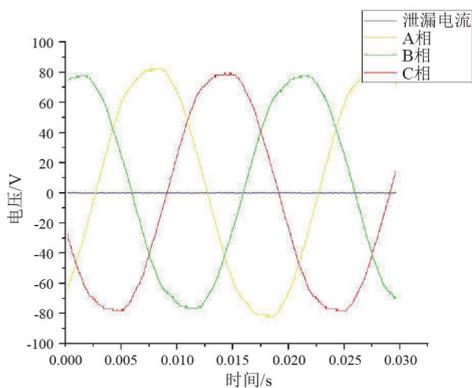


图 11 松木烟雾对空气绝缘特性的影响

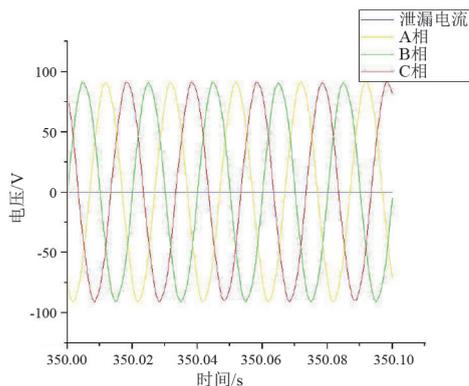


图 12 焦炭烟雾对空气绝缘特性的影响

观察相电压和对地泄漏电流的变化,在 10 kV 输电线路下,初步得出结论:3 种不同燃烧物产生的烟雾对线路的相电压和对地泄漏电流造成的影响很小,对 10 kV 线路绝缘的影响也很小。

## 4 结 论

1) 上面主要对山火前期产生的烟雾对 10~35 kV 输电线路绝缘影响进行了试验研究,通过观察烟雾情况下对地泄漏电流的变化,发现烟雾在浓度高的情况下会引起细微的泄漏电流变化。

2) 在 10 kV 输电线路中,通过对比观察 3 种不同燃烧物烟雾在浓度超出 9.999‰ 情况下三相电压和泄漏电流波形的变化,发现对 10 kV 输电线路,不同燃烧物烟雾对泄漏电流的波动影响极小,即不同物质的烟雾对空气绝缘的影响微小。

3) 国内外山火烟雾试验还做得不够多,对山火烟雾导致输电线路跳闸机理还处于初级认识阶段,对于预防山火烟雾导致输电线路跳闸的安全措施方面还存在不足,目前还没有研究给出精确的烟雾浓度、温度、火焰和电场之间的耦合关系。在后续的研究中应该考虑三者的共同作用,还需要更精细化的山火试验模拟平台。

## 参考文献

- [1] REN Xianda, LIU Jiaqiong, TANG Zhen, et al. Experimental Analysis of Fatigue Performance in Transmission Lines at Different Annealing Temperatures[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019.
- [2] 黎鹏,黄道春,阮江军,等. Gap discharge characteristic test platform influenced by multiple factors under simulated mountain fire condition [P]. 2015-02-18.
- [3] SU Haohui, SUN Meng, SHANG Jianing. Research on Stereoscopic Monitoring and Positioning Technology of Mountain Fire in EHV Transmission Lines [C]. IEEE, 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Beijing, China, 2019.
- [4] 贺政. 基于输电线路的山火监测系统 [P]. CN201620230399.7. 2016.
- [5] 王祥祥. 山火引起超高压输电线路跳闸的机理及防范分析[J]. 企业科技与发展, 2018(2): 207-209.
- [6] 祝贺, 刘程. 山火导致输电线路间隙击穿特性的研究现状[J]. 电瓷避雷器, 2018(4): 150-159.

# 山火条件下 35 kV 输电线路故障信号特征试验研究

李唯佳<sup>1</sup>, 杨宇航<sup>2</sup>, 杨佳才<sup>1</sup>, 张星海<sup>3</sup>, 范松海<sup>3</sup>, 陈天翔<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**山火灾害有很大概率会引起线路跳闸从而导致停电事故, 威胁电力系统安全稳定运行。为研究山火引发 35 kV 输电线路故障信号特征, 搭建了山火条件下 35 kV 输电线路山火故障模拟试验平台, 进行了山火故障模拟试验, 分别测量并记录了火焰单相导线试验、火焰相间导线试验、烟雾单相导线试验、烟雾相间导线试验的试验波形和试验现象。研究表明, 烟雾对输电线路绝缘的影响很小, 而火焰会对输电线路绝缘产生较大的影响。研究结果对研究防山火事故措施可提供理论支持。

**关键词:**输电线路; 山火事故; 故障模拟; 信号特征; 试验研究

**中图分类号:** TM 852 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)01-0010-06

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20220103

## Experimental Research on Fault Signal Characteristics of 35 kV Transmission Line under Mountain Fire

LI Weijia<sup>1</sup>, YANG Yuhang<sup>2</sup>, YANG Jiakai<sup>1</sup>, ZHANG Xinghai<sup>3</sup>, FAN Songhai<sup>3</sup>, CHEN Tianxiang<sup>1</sup>

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Wildfire disasters have a high probability to cause line trippings, which leads to power outages and threatening the safe and stable operation of power system. In order to study the fault signal characteristics of 35 kV transmission line caused by the wildfire, a mountain fire fault simulation test platform for 35 kV transmission line under the wildfire condition is established, and the wildfire fault simulation test is carried out. The waveforms and phenomena of flame single-phase wire test, flame phase-to-phase wire test, smoke single-phase wire test, and smoke phase-to-phase wire test are measured and recorded. The research shows that smoke has little effect on the insulation of transmission lines, while flames have a greater impact on the insulation of transmission lines. The research results can provide a theoretical support for the study of measures to prevent mountain fire accidents.

**Key words:** transmission line; wildfire accident; fault simulation; signal characteristics; experimental research

## 0 引言

随着中国经济发展, 输电线路铺设逐渐密集<sup>[1-2]</sup>, 当输电线路下方出现山火时, 输电线路的绝缘性能以及电力系统的安全性都会大幅降低, 极大

概率会造成输电线路的跳闸<sup>[3-6]</sup>, 从而影响相应地区用电的安全性。国内外对山火引发的输电线路故障开展了大量研究, 主要有山火条件下的输电线路故障试验和各种火焰引发的间隙放电试验<sup>[7-15]</sup>。但由于山火引发输电线路故障是一个复杂多变的过程, 并且在现有技术条件下是不可控的, 所以, 到目前为止, 国内外搭建的模拟试验平台考虑的影响因素都很少。目前对火焰影响输电线路放电特性的研

**基金项目:** 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点支持项目 (U19A2080)

究尚不多见,在植被燃烧的过程中,火焰的温度和形状时时刻刻都在发生变化,其对间隙绝缘能力的影响容易在研究中忽略。吴田等人通过试验发现间隙在火焰中的放电发展与火焰的电导率有关:在火焰电导率较低条件下为流注放电模式,在高电导率条件下为电弧放电模式<sup>[16]</sup>。卢威在试验中发现在火焰桥接的情况下,植被燃烧时会产生剧烈发光、发热的化学反应,产生大量的电子和离子,这些带电粒子与火焰烟气中浮动的固体颗粒相结合促进了流注到电弧发展的速度<sup>[17]</sup>。普子恒等人通过试验发现颗粒对电场的畸变作用是烟雾灰尘对输电线路绝缘的主要影响因素<sup>[18]</sup>。

下面通过对植被燃烧火灾引发 35 kV 输电线路故障的过程进行有效的模拟,分析火焰和烟雾在山火条件下对输电线路绝缘的影响及信号特征。

## 1 试验平台设计

### 1.1 试验平台搭建

在高电压实验室搭建了山火条件下 35 kV 输电线路故障模拟试验平台,如图 1 所示。该试验平台采用了型号为 S7-50/35、连接组别为 Yyn0 的电力变压器以及型号为 JDJJ<sub>2</sub>-35、变比为 35 kV/0.1 kV、0.2 级的电压互感器;采用了型号为 LGJ-120、长 5.5 m 的三相导线,通过在三相线路加装并联电容补偿的方法模拟线路长度变化和电容电流变化。导线与燃烧物铁桶距离为 22 cm,燃烧物铁桶接地,在铁桶中放入木材和枯树叶作为燃烧物。试验平台模拟了两种故障模型:

- 1) 线路单相(A相)—空气间隙(火焰或烟雾)—地;
- 2) 线路 A 相—空气间隙(火焰或烟雾)—线路 B 相。

这两个模型分别模拟实际状况下,山火引发线路对地放电和线路相间击穿两种情况。

### 1.2 试验步骤

山火条件下模拟试验分为 4 组模拟试验:1) 烟雾桥接情况下线路对地单相绝缘试验;2) 烟雾桥接情况下线路相间绝缘试验;3) 火焰桥接情况下线路相间绝缘试验;4) 火焰桥接情况下线路对地单相绝缘试验。

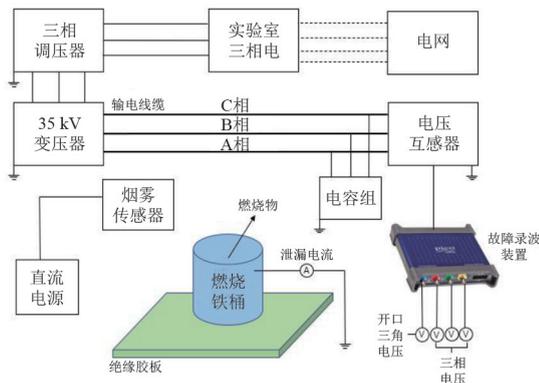


图 1 山火条件下线路故障模拟试验平台

进行烟雾桥接情况下线路对地单相绝缘状况变化的模拟试验时,将燃烧桶放置在 A 相线路正下方,线路与燃烧桶上边缘的距离为 22 cm。将桶内的木材和枯树叶点燃,调节燃烧桶遮盖铁板的位置以控制与外界空气的对流量,直至燃烧桶内升起稳定的浓烟。接通实验室三相电源,通过调压器缓慢升压,将输电线路升至额定线电压 35 kV,通过摄像机和故障录波装置实时观察并记录线路烟雾桥接处的现象、烟雾浓度、对地泄漏电流、开口三角电压和三相线路的相电压。

烟雾桥接情况下线路对地单相绝缘试验结束后,将燃烧桶移至线路 A 相、B 相之间正下方。两相间距为 38 cm,对地距离为 22 cm。在确保烟雾浓度充足后,进行模拟烟雾桥接情况下线路相间绝缘试验,如图 2 所示。



图 2 烟雾试验

模拟火焰桥接情况时将遮盖板去掉,将桶内的木材和枯树叶点燃,使桶内产生火焰,火焰位于 A 相、B 相线路之间,相间间距为 38 cm,线路对地距离为 22 cm。进行火焰桥接情况下线路相间绝缘状况的试验,如图 3 所示。

接下来将燃烧桶放至 A 相线路正下方,进行火焰桥接情况下线路对地单相放电的模拟试验。



图 3 火焰试验

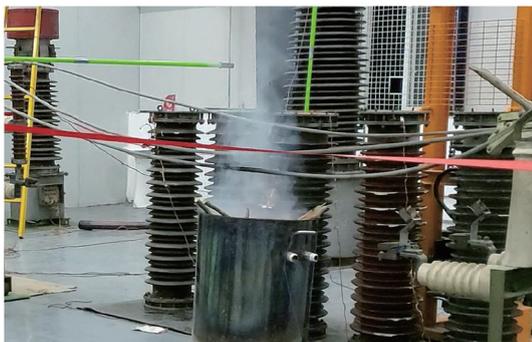


图 5 烟雾单相导线试验

## 2 试验现象及分析

山火条件下的模拟试验分为 4 组试验,在每组试验过程中都使用故障录波装置和多台录像设备进行记录。正常情况下,电压互感器二次侧每相相电压为 57.74 V,开口三角电压为 0。

### 2.1 火焰单相导线试验

通过试验发现火焰对 A 相线路进行桥接时,A 相线路与火焰桥接部分有明显的放电现象,发出电晕放电的响声。由于放电程度随火焰的变化而不断变化,火焰与线路桥接的部分不断随机性地有新的纤细的电弧生成和断裂,如图 4 所示。

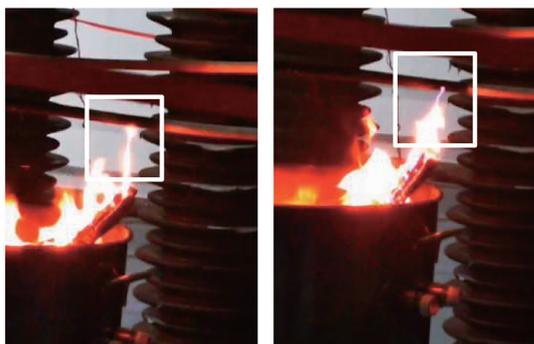


图 4 火焰单相导线试验

### 2.2 烟雾单相导线试验

烟雾对 A 相线路进行桥接,如图 5 所示。通过观察烟雾浓度和开口三角电压发现,当烟雾浓度在 9.999‰ 以上时,开口三角电压没有变化;随着浓度继续升高,通过观察录波波形,A 相互感器电压在 [57.8 V, 58.4 V] 区间内波动,与正常时相比没有变化。

### 2.3 火焰相间导线试验

火焰桥接 A、B 相之间的间隙,当相间距离为 38 cm 时,没有观察到三相电压及开口三角电压明显变化,也没有观察到放电现象。将相间距离缩短

至 19 cm 进行火焰相间导线试验时发现:有相间击穿线路立即跳闸的现象;也有相间击穿形成粗亮的电弧、桥接线路不跳闸现象,该电弧会在火焰热空气的作用下,上升形成向上拱的弧形,直至被拉断,如图 6 所示。



图 6 火焰相间导线试验

### 2.4 烟雾相间导线试验

烟雾桥接 A、B 相之间的间隙,相间距离为 38 cm。通过观察,当烟雾浓度超过测试仪最大量程(9.999‰)时,三相电压仍然处于平衡状态,没有放电现象,如图 7 所示。

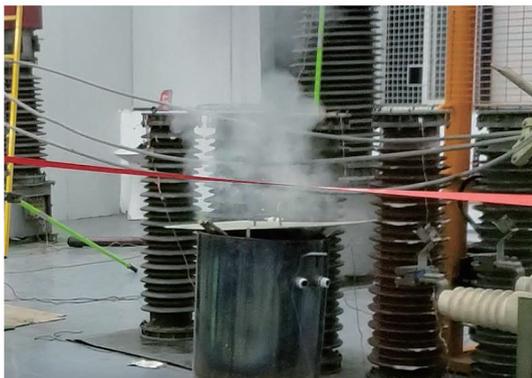


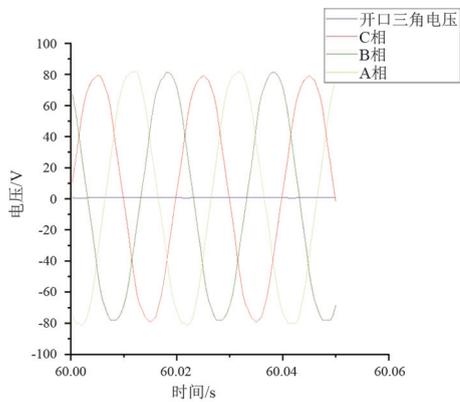
图 7 烟雾相间导线试验

### 3 山火条件下模拟试验分析

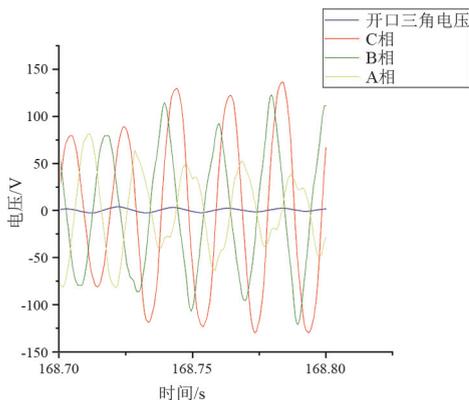
#### 3.1 单相对地故障信号特征分析

当烟雾桥接线路时,三相电压仍然处于平衡状态,输电线路没有发生故障;当火焰桥接 A 相线路时,相当于输电线路单相高阻接地故障,A 相电压会随间隙的温度、气压、火焰桥接程度、火焰烟气中颗粒浓度等众多随机因素的变化而变化。截取三相电压及开口三角电压的电压波形,如图 8 所示。从图 8(b)可观察到,故障相 A 相的电压幅值比 B、C 两相的电压幅值低,而从图 8(c)可观察到故障相 A 相的电压幅值比非故障相 B 相的电压幅值高,故障相 A 相电压并非最低电压。

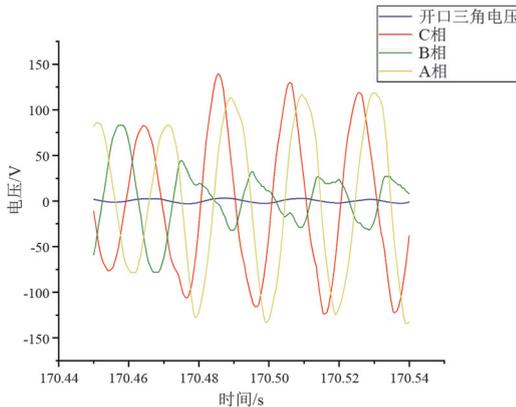
在正常状态时,A 相电压峰值经互感器测量为 81.6 V。电压峰值从正常电压过渡到较低的放电电压,再从放电电压过渡到正常电压所需的时间称之为电弧刷新时间。通过故障波形发现,烟雾条件下,A 相电压峰值为 81.67 V,没有电弧产生;火焰条件下,A 相电压峰值在 [ 10 V, 130 V ] 的区间内变化,电弧刷新时间在 0.2~0.3 s 范围内。



(a) 烟雾单相对地故障试验电压波形



(b) 火焰单相对地故障试验电压波形 1



(c) 火焰单相对地故障试验电压波形 2

图 8 单相试验电压波形

通过图 8 比较分析,火焰条件下相电压的变化范围比烟雾条件下变化范围大,这是由于火焰温度比烟雾高,导致火焰中的带电粒子的不规则热运动比烟雾中颗粒的热运动更剧烈,使火焰中放电粒子形成的放电通道具有较大的随机性,造成火焰条件下电压变化范围大。并且正是因为火焰中粒子热运动剧烈,火焰中放电通道组建和断裂的频率快,所以火焰条件下电弧的刷新时间很短。

#### 3.2 相间烟雾火焰故障信号特征分析

烟雾桥接 A、B 相线路时,即使烟雾浓度已经超过测量仪最大量程(9.999‰),三相电压波形仍然呈现出高度平衡的状态,如图 9 所示。经过分析,对于所产生的烟雾浓度而言,烟雾中的颗粒虽然会使导线周围的电场发生畸变<sup>[19]</sup>,但 35 kV 电压等级下的相间距离过大,不足以使相间击穿放电。

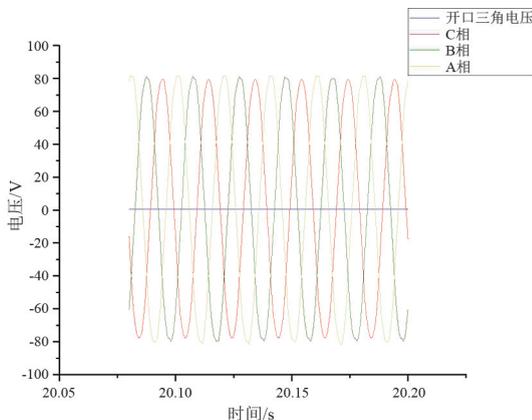


图 9 烟雾桥接相间时各电压波形

用火焰桥接 A、B 相线路时,为得到明显的现象,将相间距离缩短为 19 cm。经过多次试验,现象分为两种:1) 线路立即跳闸,电弧还未拉长就已经

熄灭;2) A、B 相击穿形成粗亮的电弧桥接间隙、并随着火焰的热气流上升形成向上拱的弧形,直至被拉断,又接着会在下方形成新的电弧,一直循环此过程,如图 10 所示。

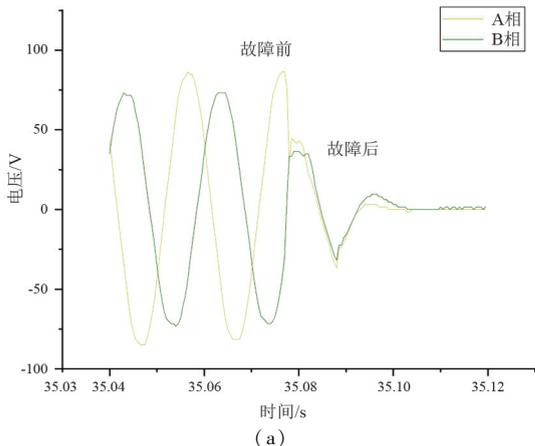


图 10 相间击穿电弧发展过程

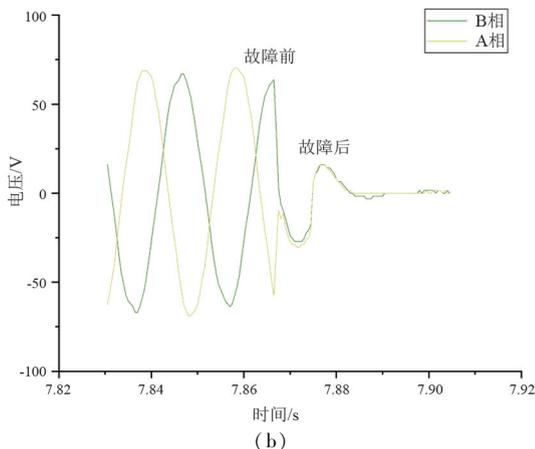
对线路出现立即跳闸现象的故障波形(如图 11 所示)进行分析,发现跳闸瞬间 A、B 相电压波形重合,造成相间短路故障,并且观察到 A、B 两相之间出现极短暂的弧光,导致系统中产生较大的电流,使保护动作。图 11(a)和图 11(b)分别为截取的两个时间段波形。

对未跳闸并且产生明显电弧现象的两组故障相波形(如图 12 所示)进行分析。图 12(a)和图 12(b)分别为截取的两个时间段波形。

在相间放电击穿后, A、B 相间贯穿粗亮的电弧造成相间短路,整个系统构成相间高阻短路故障。两相间隙中产生了温度极高的粗亮电弧,由于电弧是一束游离的气体,质量极轻,容易变形,在下方火焰热空气的作用下,电弧迅速向上移动,从而形成向上拱的形状。与线路跳闸 A、B 两相电压重合的情



(a)

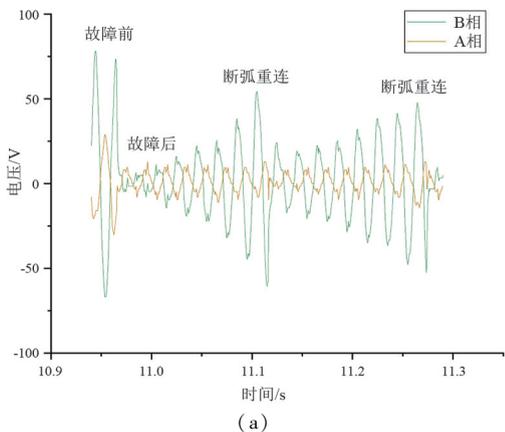


(b)

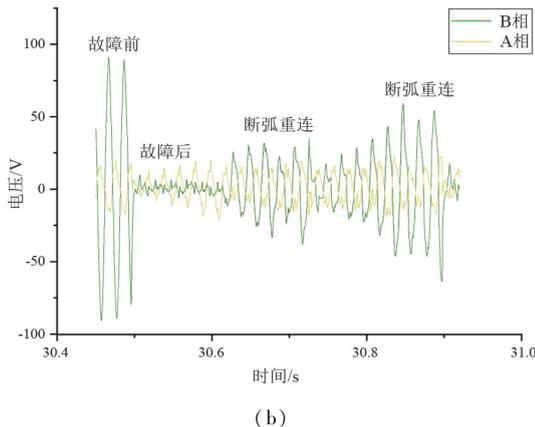
图 11 相间短路跳闸时故障相电压波形

况不同,此过程中 A、B 两相存在电压差和相位差,放电通道被拉长,通道阻抗增大,系统不会有很大的电流,所以不会导致实验室三相电源保护跳闸。

A、B 相之间的电弧属于交流电弧,当放电通道被拉长至一定阻抗时,介质的恢复强度大于电压的恢复强度,交流电弧在此放电通道上熄灭,而原放电通道下方区域满足间隙击穿条件,从而形成新的电弧,循环往复,将此过程命名为断弧重连,如图 12 所示。通过图像可以看出,故障后当 B 相电压幅值有



(a)



(b)

图 12 相间短路未跳闸时故障相电压波形

增大趋势时,经过6~9个周期,为0.12~0.18 s,产生断弧重连现象。

## 4 结 论

上面搭建了山火条件下线路击穿模拟试验平台,模拟了烟雾、火焰单相导线试验以及烟雾、火焰相间导线试验,得到了以下结论:

1)模拟烟雾条件下单相和相间导线故障试验时,当烟雾浓度为9.999‰时,开口三角电压和故障相互感器电压都没有明显变化。因此,烟雾对输电线路绝缘性能的影响很小。

2)模拟火焰单相导线试验时,由于放电程度随火焰的变化而不断变化,火焰与线路桥接的部分不断随机性地有新的纤细的电弧生成和断裂,电弧刷新时间很短。火焰与输电线路之间产生电弧会降低导线附近空气绝缘程度,导致出现单相高阻抗接地故障。

3)模拟火焰相间导线试验时,出现了相间阻抗短路故障,生成的相间交流电弧会在火焰热空气的作用下向上抬升直至拉断,又在下方生成新的放电通道,再被不断抬升拉断,以此循环。经测量,此状态下交流电弧产生和拉断时间间隔为0.12~0.18 s。因此火焰在相间距离较短的情况下,会使两相导线出现相间短路故障的现象,导致导线相间绝缘性能下降。

4)当输电线路出现单相接地故障时,故障相电压幅值并非一直最低,健全相电压幅值会出现最低电压的现象。

### 参考文献

- [1] 赵敏.浅析35 kV 架空线路设计的要点[J].建材与装饰,2017(47):221-222.
- [2] 朱洪志.35 kV 架空输电线路防鸟类筑巢的研究[J].上海节能,2018(11):897-900.
- [3] 陆佳政,刘毓,吴传平,等.输电线路山火卫星监测与告警算法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(21):5511-5519.
- [4] J R Fonseca, A L Tan, R P Silva, et al. Effects of agricultural fires on the performance of overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 687-694.
- [5] A Sukhmandan, D A Hoch. Fire induced flashovers of transmission lines: theoretical models[J]. IEEE AFRI-

CON 6th Africon Conference in Africa, George, South Africa, 2002.

- [6] A Robledo-Martinez, E Guzman, J L Hernandez. Dielectric characteristics of a model transmission line in the presence of fire[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(4): 776-782.
- [7] 徐华杰.山火灾害对输电线路稳定运行的影响[J].通信电源技术,2020,37(2):214-215.
- [8] 周恩泽,胡思雨,张录军,等.电网山火灾害特征及风险预警技术[J].电力工程技术,2020,39(3):58-64.
- [9] Aroon Sukhmandan. A Theoretical and Experimental Investigation into Fire Induced Flashover of High Voltage Transmission Lines[D]. South Africa: University of KwaZulu Natal, 2004.
- [10] 普子恒,阮江军,黄道春,等.火焰条件下间隙的直流电压击穿特性研究[J].中国电机工程学报,2014,34(3):453-459.
- [11] 张云,尤飞,陈海翔,等.山火引发输电线路跳闸事故的统计与分析[J].消防科学与技术,2011,30(12):1177-1180.
- [12] 吴田,胡毅,阮江军,等.交流输电线路模型在山火条件下的击穿机理[J].高电压技术,2011,37(5):1115-1122.
- [13] 尤飞,陈海翔,张林鹤,等.木垛火导致高压输电线路跳闸的模拟实验研究[J].中国电机工程学报,2011,31(34):192-197.
- [14] 张雷.华北电网输电线路受山火影响特征分析[J].山东电力技术,2019,46(9):18-22.
- [15] 申元,孟见刚,徐肖伟,等.输电线路山火跳闸预估技术研究[J].云南电力技术,2017,45(4):54-57.
- [16] 吴田,刘凯,胡毅,等.植被火焰的电导率特性及其对导线-板间隙的绝缘的影响[C]//湖北省电工技术学会、武汉电工技术学会2013年度学术年会、第五届“智能电网”暨“电机能效提升”发展论坛论文集.武汉:湖北省电工技术学会,武汉电工技术学会,2013:251-259.
- [17] 卢威.模拟高风险植被火焰条件下间隙击穿特性试验研究[D].武汉:武汉大学,2019.
- [18] 普子恒,阮江军,吴田,等.火焰中颗粒对间隙放电特性的影响[J].高电压技术,2014,40(1):103-110.
- [19] 黄道春,黎鹏,阮江军,等.山火引发输电线路间隙放电机理与击穿特性综述[J].高电压技术,2015,41(2):622-632.

### 作者简介:

李唯佳(1998),女,硕士研究生,研究方向为高电压试验技术。(收稿日期:2021-10-30)

# 山火对空气间隙绝缘击穿特性影响试验研究

刘磊<sup>1</sup>, 杨宇航<sup>2</sup>, 徐会凯<sup>1</sup>, 张星海<sup>3</sup>, 吴驰<sup>3</sup>, 陈天翔<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 3. 国网四川省电力公司力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**近年来,山火频发给电网安全稳定运行带来了巨大威胁。山火会导致架空输电线路间隙绝缘强度显著下降,从而引发线路跳闸,造成线路出现停运等严重事故。文中设计了“棒-棒”电极空气间隙放电模型,开展了“棒-棒”模型的空气间隙绝缘击穿试验,研究了火焰、温度、烟雾对间隙绝缘的影响。试验研究表明,火焰高度和温度对间隙击穿特性影响较大,温度是影响间隙击穿特性的决定性因素。所研究数据可为输电线路预防山火跳闸事故提供参考。

**关键词:**山火; 输电线路; 空气间隙; 击穿特性; 试验研究

**中图分类号:** TM 832 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)01-0016-05

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20220104

## Experimental Research on Influence of Mountain Fire on Insulation Breakdown Characteristics of Air Gap

LIU Lei<sup>1</sup>, YANG Yuhang<sup>2</sup>, XU Huikai<sup>1</sup>, ZHANG Xinghai<sup>3</sup>, WU Chi<sup>3</sup>, CHEN Tianxiang<sup>1</sup>

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** In recent years, the frequently happening of mountain fire has brought a great threat to the safe and stable operation of power grid. Mountain fire will cause the insulation strength of overhead transmission line gap to decrease significantly, resulting in line tripping, line shutdown and other serious accidents. So a "rod-rod" electrode air gap discharge model is designed, the air gap insulation breakdown test of the "rod-rod" model is carried out, and the influence of flame, temperature and smoke on gap insulation is studied. The results show that the flame height and temperature have a great influence on the gap breakdown characteristics, and the temperature is the decisive factor affecting the gap breakdown characteristics. The research results can provide a reference for the prevention of mountain fire tripping accidents in transmission lines.

**Key words:** mountain fire; transmission line; air gap; breakdown characteristics; experimental research

## 0 引言

线路走廊紧张是中国输电网发展过程中的突出问题<sup>[1-4]</sup>,长距离输电线路不可避免经过植被茂密的山林火灾易发生区<sup>[5]</sup>。山火发生时,植被猛烈燃烧,剧烈的氧化还原反应导致周围众多环境因素发

生翻天覆地的变化。火焰的高温燃烧会产生众多的带电粒子和烟尘颗粒等,这些因素容易导致输电线路绝缘强度迅速下降,从而引发线路跳闸事故<sup>[6-8]</sup>。

已有不少文献针对火焰条件下间隙的击穿特性开展了相关试验研究<sup>[9-12]</sup>,但由于山火引发输电线路故障过程复杂多变,所搭建的模拟试验平台考虑的影响因素较少,也缺少对流注起始到先导击穿这一整个放电过程的监测,同时忽略了变化的火焰状态对间隙绝缘能力的影响<sup>[9-10]</sup>。为了更精确地分析

森林火灾引发输电线路故障机理,下面通过建立模拟试验平台,探究比较了烟雾、温度、火焰对间隙绝缘强度的影响,为山火引发输电线路跳闸事故的研究提供参考。

## 1 试验平台搭建

### 1.1 试验布置

山火发生时,浓烟、高温、火焰、火焰高度等都是导致线路对地或相间绝缘能力降低的主要原因<sup>[7,10-12]</sup>,为了进一步探究和比较这些因素对绝缘性能的影响程度,设计了“棒-棒”电极间隙放电模型,研究了火焰、温度和烟雾对间隙绝缘特性影响程度,试验平台如图 1 所示。

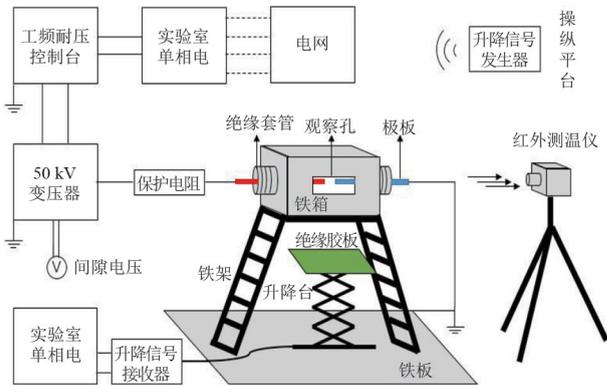


图 1 “棒-棒”电极间隙放电模拟试验平台

试验设备主要由 50 kV/15 kVA 工频试验变压器、保护电阻、无线控制升降台、红外测温仪以及“棒-棒”电极组成。其中“棒-棒”电极放电模型构成部分包括一个多面打孔铁箱、一对高压穿墙套管、一对电极板,如图 2 所示。穿墙套管为椭圆柱形,镶嵌固定于铁箱两侧。两极板穿过两穿墙套管,在套管内进行固定,构成间隙距离为 3 cm 的“棒-棒”间隙模型。3 cm 距离为 35 kV 输电线路树线放电的临界距离。3 cm“棒-棒”间隙可以在一定程度上模拟输电线路树线不均匀电场。

为了研究温度和空气对流扩散对间隙击穿电压的影响,铁箱底面设置成开合结构,可控制铁箱为半密闭或密闭状态。铁箱前侧设有小型观察孔,主要用于观测间隙击穿现象和安装烟雾传感器。

### 1.2 试验方法与步骤

间隙条件下模拟试验分为:间隙条件下模拟预实验、果炭升温试验、间隙烟雾试验、酒精火焰桥接试验。



图 2 “棒-棒”电极间隙放电模型箱

1) 搭建试验平台,进行试验设备的调试和连接,并准备好相应燃烧物品。将铁箱内“棒-棒”电极间隙距离固定在 3 cm,测量实验室内温度、湿度、气压后,进行预实验。

2) 引燃已经堆叠好的无烟果炭,放置在铁箱下部,将铁箱内部空气温度升至最高温度 200 ℃。试验期间没有烟雾、火焰的干扰,通过控制升降台改变果炭与箱体底部之间距离来改变箱体内气隙温度,从而得到空气间隙温度这一单一因素变化时不同温度对应的间隙击穿电压。

3) 待铁箱冷却至室温后,进行间隙烟雾试验。试验烟雾由枯木树叶不完全燃烧产生,试验过程中,应确保枯木树叶处于不完全燃烧状态,禁止火焰桥接间隙。试验进行时,通过观察孔上安装的烟雾传感器测量烟雾浓度,同时测量特定烟雾浓度范围内不同气隙温度对应的击穿电压。

4) 进行酒精火焰击穿电压试验,测量间隙与酒精火焰在未桥接、临界桥接和完全桥接等火焰高度宽度不一样的情况下,不同温度所对应的击穿电压。每组试验都通过红外测温仪测量并记录“棒-棒”电极间隙的平均温度。

试验结束后,整理所记录的数据,按照步骤 1 至步骤 4 重复 3 次试验,并记录数据。

## 2 试验及结果分析

### 2.1 温度对间隙击穿电压影响

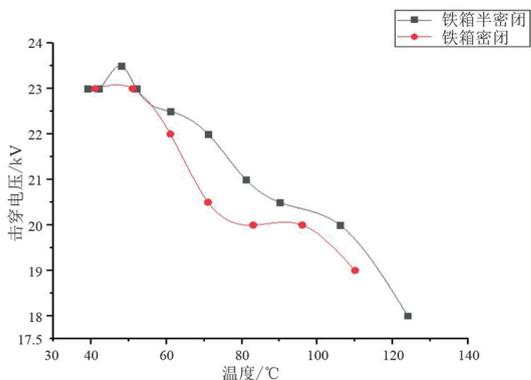
为减小空气对流扩散对试验的影响,控制参数单一变化,需将铁箱设置成密闭或半密闭状态。在密闭状态下,铁箱底部关闭,火焰喷枪从观察孔对箱体加热,使箱体成密闭状态。在半密闭状态下,铁箱底部打开,火焰喷枪从箱体底部加热。由于观察孔

开口较小,试验过程中对铁箱内气隙温度变化影响较小,铁箱可视为密闭或半密闭状态,如图 3 所示。测量记录不同温度对应的击穿电压。

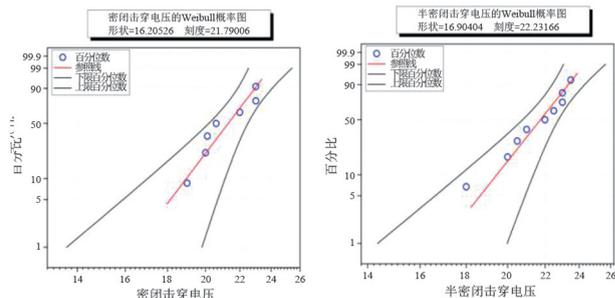


图 3 密闭和半密闭状态下加热试验

将密闭状态和半密闭状态下击穿电压随温度变化的试验数据绘制成曲线,如图 4 所示。在密闭状态下的间隙击穿电压比同温度半密闭状态下的间隙击穿电压低。这是由于密闭环境中,上一次间隙击穿所产生的带电电荷不容易扩散,导致下一次击穿更容易发生,使击穿电压下降。由于密闭空间内空气间隙更易击穿,为了排除这一因素对试验的影响,在之后的试验中应选择半密闭状态进行试验。



(a) 击穿电压对比



(b) 威布尔概率

图 4 密闭和半密闭条件下击穿电压随温度变化

## 2.2 烟雾对间隙击穿电压影响

间隙烟雾试验如图 5 所示。在箱体下部放上枯

木树叶和少量果碳,试验过程中枯木树叶处于不完全燃烧状态,箱体内部气隙温度可通过控制升降台改变枯木和果碳与箱体底部之间的距离来改变。



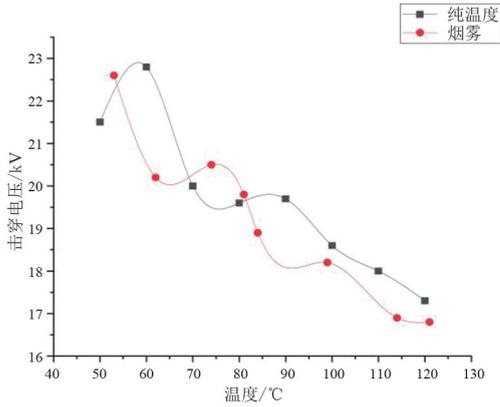
图 5 间隙烟雾试验

将烟雾浓度设置在 9.999% 以上,将不同温度对应的击穿电压绘制成曲线,并与通过果碳升温试验获得的单纯温度因素影响下的击穿电压数据进行比较,如图 6 所示。从图中可以看出,在 50~120 ℃ 范围内,最小击穿电压与最大击穿电压相比:单纯温度因素影响下,击穿电压下降 24.1%;烟雾因素影响下,击穿电压下降 25.7%。与单纯温度因素影响相比,枯木树叶产生的烟雾没有使击穿电压有明显降低,说明此种烟雾条件下对降低间隙绝缘能力有一定的影响但远不及温度明显。

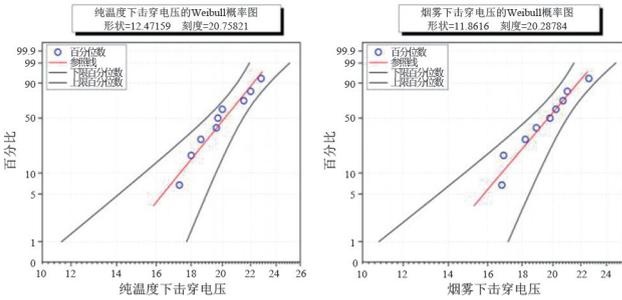
## 2.3 火焰对间隙击穿电压影响

将 12 个酒精块堆叠在锡纸盘内引燃使火焰桥接间隙。整个燃烧过程中,酒精块燃烧稳定性较好,且不产生烟雾,适合用于研究火焰对击穿电压的影响。调节锡纸盘内酒精火焰高度变化,间隙与酒精火焰在未桥接、临界桥接和完全桥接的状态如图 7 所示。在铁箱半密闭状态下,只采用酒精火焰对铁箱升温速度较慢,因此先采用火焰喷枪将铁箱内气隙温度加热到试验所需温度,再加入酒精火焰。

将酒精火焰桥接间隙条件下测量的击穿电压与对应温度的数据绘制成曲线,并与单纯温度因素影响下击穿电压曲线进行比较分析,如图 8 所示。当酒精火焰未桥接间隙时,相同温度下,酒精火焰与单纯温度因素影响下击穿电压随温度变化基本一致,说明在该阶段温度是主要影响因素;当酒精火焰和间隙临界桥接时,相同温度下,酒精火焰曲线的击穿电压会陡然下降,说明酒精火焰桥接间隙时,酒精火焰对击穿电压有着重要影响;当酒精火焰完全桥接间隙时,随着温度的升高,酒精火焰条件下击穿电压



(a) 击穿电压对比

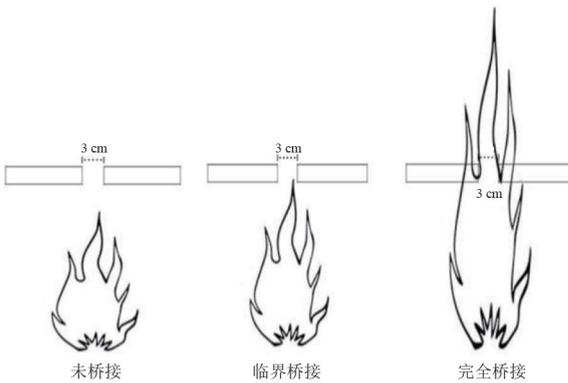


(b) 威布尔概率

图 6 烟雾与温度条件下击穿电压随温度变化



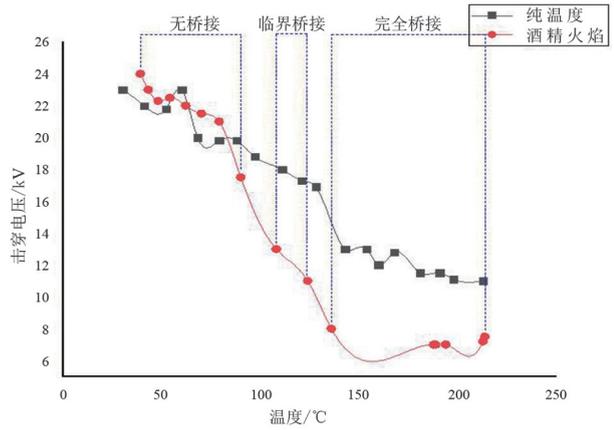
(a) 酒精火焰高度



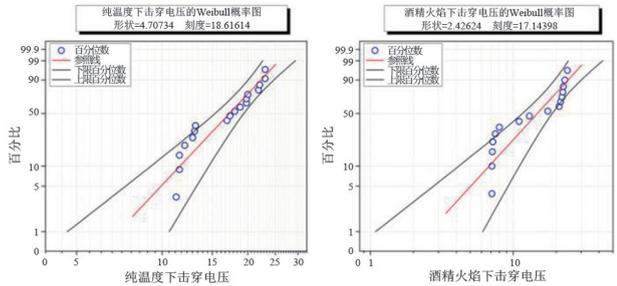
(b) 酒精火焰未桥接、临界桥接和完全桥接

图 7 酒精火焰与间隙桥接状态

下降梯度和单纯温度因素影响下击穿电压下降梯度基本一致,约为  $1.9 \times 10^{-2}$  kV/°C。在完全桥接阶段,当气隙温度稳定时,击穿电压随酒精火焰高度的变化幅度较小,这说明在酒精火焰完全桥接间隙时,温度仍为影响间隙击穿特性的决定性因素,而酒精火焰对击穿电压的影响较小。从图 8 中也可以看出,当酒精火焰完全桥接间隙且气隙温度稳定时,击穿电压的变化幅度较小,此时的击穿电压可视为最低击穿电压。



(a) 击穿电压对比



(b) 威布尔概率

图 8 酒精火焰与纯温度条件下击穿电压随温度变化

在同一条件下重复 3 次试验,获得的试验结果基本一致,证明了所模拟试验结果的一致性。

### 3 结 论

上面设计了“棒-棒”电极间隙放电模型,开展了“棒-棒”模型的空气间隙绝缘击穿试验,研究了火焰、温度、烟雾对间隙绝缘的影响程度,得到了以下结论:

1) 在单纯温度因素影响下,击穿电压的大小随温度的升高显著下降,温度对间隙绝缘能力的影响明显。

2) 在一定温度条件下,枯木树叶产生的烟雾

浓度对击穿电压的影响较小。当烟雾浓度达到 9.999% 以上水平时,与单纯温度因素影响相比,枯木树叶产生的烟雾使击穿电压有所降低但不明显,说明枯木树叶产生的烟雾对击穿电压影响较小,远低于温度的影响。

3) 当酒精火焰高度升高但未桥接间隙时,击穿电压降低,与同阶段单纯温度因素影响下的变化幅度基本一致;当酒精火焰和间隙临界桥接时,击穿电压持续下降且下降明显;当酒精火焰完全桥接间隙时,击穿电压变化幅度与同阶段单纯温度因素影响下的变化幅度基本一致。当气隙温度稳定时,击穿电压随酒精火焰高度的变化幅度较小,说明在酒精火焰完全桥接间隙时,温度为影响间隙击穿特性的决定性因素。同时,当酒精火焰完全桥接间隙且气隙温度稳定时,击穿电压的变化幅度较小,所获得的击穿电压可视为最低击穿电压。

#### 参考文献

- [1] 张文亮,陆家榆,鞠勇,等.±800 kV 直流输电线路的导线选型研究[J].中国电机工程学报,2007,27(27):1-6.
- [2] 张文亮,于永清,李光范,等.特高压直流技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.
- [3] 舒印彪.中国直流输电的现状与展望[J].高电压技术,2004,30(11):1-2.
- [7] 蒋文权.山火对输电线路流注放电的影响机理[D].长沙:湖南大学,2019.
- [8] 张雷.华北电网输电线路受山火影响特征分析[J].山东电力技术,2019,46(9):18-22.
- [9] 何诚,舒立福,刘柯珍,等.广西地区山火引起高压线路跳闸环境特征研究[J].消防科学与技术,2020,39(12):1626-1629.
- [10] 邵尤国,李辉,赵洁,等.山火条件下的特高压输电线路击穿概率模型研究与分析[J].电测与仪表,2018,55(21):31-35.
- [11] 王强.超特高压输电线路防山火管理分析与研究[J].中国战略新兴产业,2020(10):15.
- [12] 刘士嘉,段泽龙.高压输电线路山火跳闸原因分析及对策[J].消防界(电子版),2019,5(8):51.
- [13] 周志宇.山火灾害下电网输电线路跳闸风险评估研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [14] 刘丛洋.超高压架空输电线路的山火灾害防控探究[J].科技与创新,2016(4):103-104.
- [15] 王振华.模拟山火条件下典型高压输电线路闪络和受

- [4] 舒印彪,张文亮.特高压输电若干关键技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(31):1-6.
- [5] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
- [6] 黄道春,黎鹏,阮江军,等.山火引发输电线路间隙放电机理与击穿特性综述[J].高电压技术,2015,41(2):622-632.
- [7] 陈孝明,魏晗,阮羚,等.火焰高度对输电线路间隙击穿特性的影响[J].中国电力,2015,48(7):134-138.
- [8] 叶立平,陈锡阳,何子兰,等.山火预警技术在输电线路的应用现状[J].电力系统保护与控制,2014,42(6):145-153.
- [9] 祝贺,刘程.山火导致输电线路间隙击穿特性的研究现状[J].电瓷避雷器,2018(4):150-159.
- [10] 吴田,胡毅,阮江军,等.交流输电线路模型在山火条件下的击穿机理[J].高电压技术,2011,37(5):1115-1122.
- [11] 普子恒,阮江军,吴田,等.火焰中颗粒对间隙放电特性的影响[J].高电压技术,2014,40(1):103-110.
- [12] 尤飞,陈海翔,张林鹤,等.木垛火导致高压输电线路跳闸的模拟实验研究[J].中国电机工程学报,2011,31(34):192-197.

#### 作者简介:

刘 磊(1996),男,硕士研究生,主要研究方向为高电压试验技术。

(收稿日期:2021-10-28)

(上接第 9 页)

- 损特性及机理分析[D].南京:南京工业大学,2016.
- [16] 李斌,杜卫,朱海波,等.山区地带发生的山火对超高压输电线路的影响[J].工程技术(全文版),2016:210.
- [17] 万能,庄严,马超.高压输电线路山火跳闸机理分析及防范措施探讨[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2016,21(1):70-72.
- [18] 刘程,孔祥美.山火条件下±800 kV 输电线路合成电场仿真研究[J].黑龙江电力,2020,42(5):416-420.
- [19] 于晓翔.一起全密封 35 kV 变压器故障分析[J].电气技术,2020,21(6):91-94.
- [20] 电力设备预防性试验规程:DL/T 596—1996[S].北京:中国电力出版社,1997.
- [21] 电力安全工作规程 高压试验室部分:GB 26861—2011[S].北京:中国电力出版社,2012.

#### 作者简介:

杨弄潮(1999),男,在读硕士研究生,研究方向为高压电试验技术。

(收稿日期:2021-10-29)

# 基于配电网一二次融合成套设备的 接地故障处理方案研究

曾先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华

(南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102)

**摘要:**针对单相接地故障检测和快速隔离的难题,提出了基于配电网一二次融合技术的接地故障处理方案。方案通过一二次融合成套设备及小波包暂态零序选线技术,利用来电合闸、无压分闸、合于故障加速跳闸、故障路径优先等策略,有效解决了多分支、多供电方式下单终端选线选段的难题。同时结合现场应用案例,证明了所提方案可以快速实现接地故障区段的定位和隔离,具有普遍的适用性。

**关键词:**小电流接地系统;单相接地;一二次融合;小波包;故障路径优先

**中图分类号:**TM 452 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)01-0021-05

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220105

## Research on Earthing Fault Treatment Based on Primary and Secondary Integration Technology of Distribution Network

ZENG Xianfeng, REN Baiqun, SONG Bing, SHI Yong, ZHU Zhonghua

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu, China)

**Abstract:**In order to solve the problems about the detection and quick isolation of single-phase earthing faults in a small current grounding system, an earthing fault treatment scheme is proposed based on primary and secondary integration technology of distribution network. Through a complete set of primary and secondary fusion equipment and wavelet packet transient zero-sequence line selection technology, and combined with the use of incoming call closing, voltage-free opening, closing on fault accelerated tripping, fault path priority and other strategies, the problems of single terminal line selection under multi-branch and multi-power supply modes are effectively solved. At the same time, combined with on-site application cases, it is proved that the proposed scheme can quickly realize the location and isolation of ground fault zone and has universal applicability.

**Key words:**small current grounding system; single-phase earthing fault; primary and secondary integration; wavelet packet; fault path priority

## 0 引言

中国的配电网大多是小电流接地系统,长期以来单相接地故障的检测一直是困扰配电网运行的技术难题<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着一二次融合成套设备的推广应用及小电流接地故障保护技术的逐步成熟<sup>[3-4]</sup>,国家电网有限公司和中国南方电网有限责任公司均根据新的运行规程,要求提升配电网单相接地故障快速处理能力,以消除事故扩大风险,进一

步提高供电安全性与可靠性<sup>[5-6]</sup>。

基于一二次融合的配电网成套设备的推广使用,为解决单相接地故障问题提供了良好的基础。首先,规范了现场电压及电流互感器配置模式,具备零序 PT 和零序 CT 采集功能;其次,采用标准化航插接口设计和标准化定义,有效避免 PT、CT 极性错接等问题<sup>[7]</sup>;最后,完善了配电终端接地故障处理功能的部署,为单相接地故障的检测和快速隔离提供了有利条件。

下面针对配电网小电流接地系统单相接地故障检测和快速隔离的难题,首先,对配电网一二次融合

成套设备的传感器进行了研究;其次,根据一二次融合成套设备具备高精度零序传感器特点,研究了基于小波包的接地算法,并阐述了基于一二次融合和暂态零序功率方向、故障路径优先方法的接地故障处理方案;最后,结合现场应用案例,说明了所提方案可有效解决多分支、多供电方式下单终端选线选段和故障快速隔离的难题,具有普遍的适用性。

## 1 配电网一二次融合成套设备零序电压传感技术

配电网一二次融合成套设备在小电流接地上运用,主要实现了零序电压的采集,同时对三相电流和零序电流的采集精度提出了更高的要求,为小电流接地选线提供了物理和技术条件。

1) 柱上开关(指断路器或负荷开关,下同)零序电压小信号传感技术的应用。由于柱上开关体积和结构的限制,内部很难加装常规电磁式原理的零压互感器,因此常规柱上开关一般没有零序电压采集。为了实现零序电压的采集,一二次融合成套柱上开关一般使用电容分压形式的小信号传感器,采用类似 CVT 互感器结构的复合膜电容,图 1 为电容型零序电压传感器示意图。

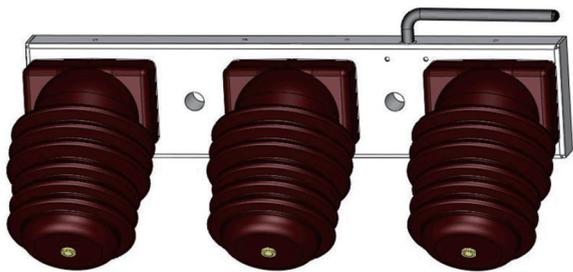


图 1 电容型零序电压传感器

2) 电容型零序电压传感器原理。如图 2 所示,电容分压器由安装在 A、B、C 三相的高压耐受电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和低压信号电容  $C_4$  构成。其中高压耐受电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  电容值相同,典型参数为 600 pF,电容  $C_4$  的典型参数为 1.6  $\mu\text{F}$ 。当三相电压对称平衡时,此时电容  $C_4$  两侧的电压为 0,当发生单相金属接地时,电容  $C_4$  两侧的电压约为 6.5 V。

3) 一二次融合成套设备内采用高精度零序 CT,变比一般为 20 A/1 A,一次侧零序电流不到 1 A 时也有很高的采集精度,保证高阻接地时接地特征的有效提取。

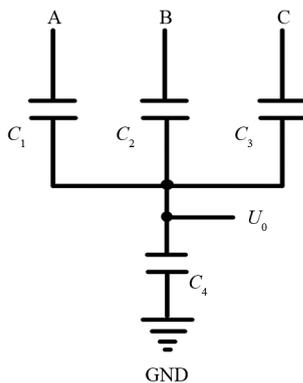


图 2 电容型零序电压传感器原理

应用以上关键技术的配电网一二次融合成套设备的推广使用,为解决配电网单相接地故障问题提供了良好的物理和技术条件。

## 2 接地故障小波包选线技术

接地故障处理的关键是把故障时的特征量选出来进行分析。针对小电流接地系统单相接地故障时稳态故障特征不明显的问题,采用小波包变换方法,可以提取暂态零序功率方向作为选线判据,识别是否发生单相接地故障<sup>[8-10]</sup>。

### 2.1 小波包变换理论分析

多分辨率分析 (multi-resolution analysis, MRA) 理论作为小波分析中的基本框架<sup>[7]</sup>,满足二尺度方程:

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(n) \varphi(2t - n) \quad (1)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g(n) \psi(2t - n) \quad (2)$$

式中: $\varphi(t)$ 为尺度函数; $\psi(t)$ 为小波函数; $h(n)$ 和 $g(n)$ 为小波分解滤波器组系数。在分解滤波器组系数已知的情况下,原始信号的小波分解可以通过 Mallat 快速算法实现。对于正规性条件较好的 db10 正交小波, $h(n)$ 和 $g(n)$ 构成一个共轭正交滤波器组(conjugate quadrature filter, CQF),具有划分较高频率倍频程的能力,能提高频域分辨率,同时降低计算的复杂度。

对于基本小波  $\psi(t)$  经伸缩与位移引出的函数族,如果满足框架条件则原始信号  $x(t)$  可以根据小波变换结果进行稳定的重构。重构公式为

$$c_n^{j-1} = \sum_k h'_{n-2k} c_k^{(j)} + \sum_k g'_{n-2k} d_k^{(j)} \quad (3)$$

式中,  $h'(n)$  和  $g'(n)$  分别为与  $h(n)$  和  $g(n)$  相对应的小波重构滤波器组系数。

通过上述小波重构方法,可以得到原始信号在不同频段下的信息,这就为接地故障时的暂态特征信号的提取和分析提供了基础。

### 2.2 故障特征提取

小电流接地系统发生单相接地故障时,故障支路的暂态零序电流与暂态零序电压相位相反,非故障支路暂态零序电流与暂态零序电压相位相同,暂态零序功率方向与故障支路相反。利用小波包对零序电压和零序电流的暂态特征进行 db10 正交小波分解,得到原始信号在不同频段下的信息,滤除工频区域频带,剩余频带中高频能量包含暂态零序电压和零序电流的接地特征,根据暂态零序功率方向判断本支路是否发生单相接地故障。

图 3 所示为某小电流接地系统发生单相接地故障后的原始录波波形经小波包变换后提取的暂态零序电流和暂态零序电压故障特征,显而易见故障支路和非故障支路的暂态零序功率方向相反。

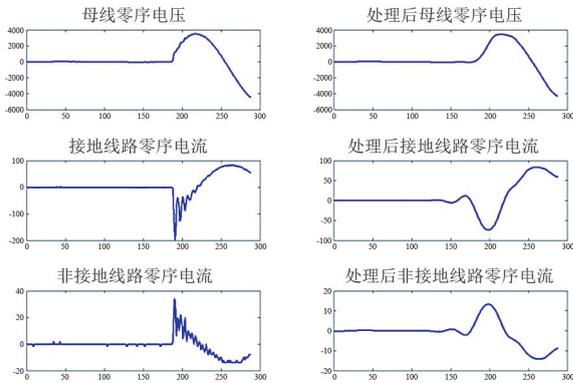


图 3 小波包变换后暂态零序功率方向对比

应用以上基于小波包变换的暂态零序功率方法后,可以有效提高高频域分辨率,更好提取故障特征,根据接地时暂态零序电流与零序电压的相位关系,计算暂态零序功率方向,进而可以识别本线路是否为单相接地故障线路。

## 3 一二次融合成套设备接地故障处理

通过自适应型馈线自动化“无压分闸、来电延时合闸”方式,配合变电站出线断路器重合闸<sup>[11]</sup>,实现多分支多联络配电网架的故障定位与隔离,自动完成接地故障的选线、定位及隔离,非常适用于主站与终

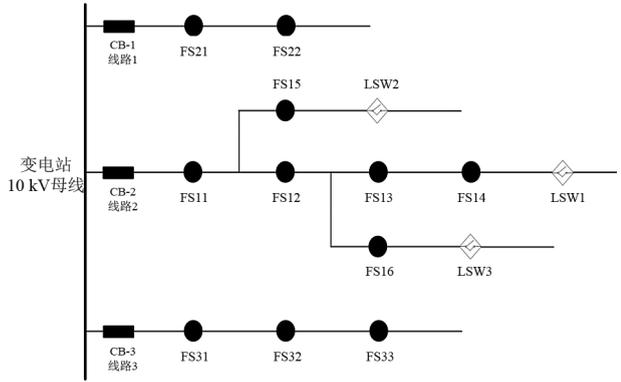


图 4 主接线

端间通信条件不可靠或不具备通信条件的区域。

以图 4 所示典型主接线为例说明单相接地故障处理逻辑,每条出线配置一定数量的柱上开关—二次成套设备。

主接线图元含义如表 1 所示。

表 1 主接线图元含义

图元	含义	图元	含义
	变电站出线断路器在合闸位置		变电站出线断路器在分闸位置
	成套分段开关在合闸位置		成套分段开关在分闸位置
	联络开关在合闸位置		联络开关在分闸位置

主接线中成套分段开关采用负荷开关—二次融合成套设备或断路器—二次融合成套设备,即 FS11—FS16, FS21—FS22, FS31—FS33 均为一二次融合成套分段开关。

配电网线路首开关 FS11、FS21、FS31 处的馈线终端(feeder terminal unit, FTU)设置为首开关,自动适应首开关接地选线模式。其余非首开关的分段开关处 FTU 设置为非首 FTU,自动选段,联络开关处的 FTU 则为联络模式,在单侧长时间失压后可自动或人工合闸转换供电方式。

以 FS12、FS13、FS16 间发生单相接地故障为例,说明单相接地故障的处理过程。

1) 感受到接地故障的 FS11—FS16、FS21—FS22、FS31—FS33,根据暂态零序功率方向开始判断该线路下游是否发生接地故障,若接地故障在其后端则自动记忆,并动态调节本开关来电合闸延时。

图 5 中 FS11 和 FS12 判断出在其后端发生接地故障,FS13—FS16、FS21—FS22、FS31—FS33 判断出其后端未发生接地故障。

2) 首开关 FS11 经整定延时后选线跳闸, FS11 跳闸后, FS12—FS16 因为感受到失压而分闸, 主线失电跳闸(如图 6 所示)。

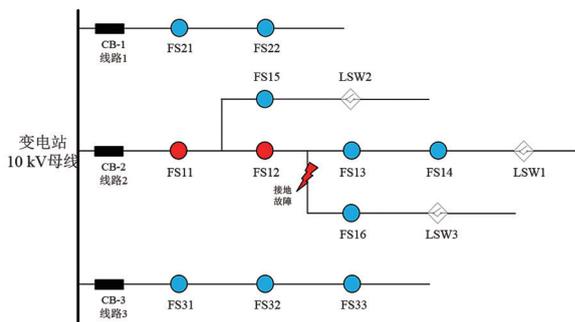


图 5 单相接地故障逻辑判断

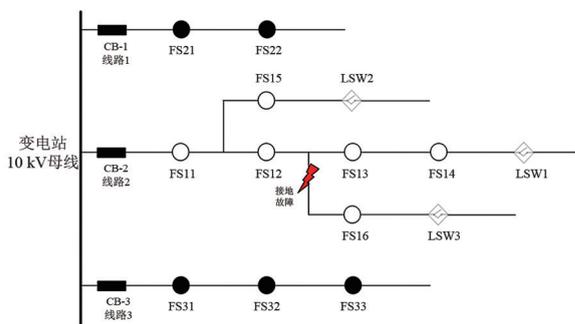


图 6 FS11 选线跳闸, FS12—FS16 失压跳闸

3) 首开关 FS11 选线跳闸后, 经整定延时重合闸。FS11 重合闸后, 若在一段时间内没有检测到故障, 说明故障不在紧临 FS11 的下游, FS11 将自动在一定时间内闭锁接地跳闸, 避免频繁跳闸和重合闸, 同时减少线路供电恢复时间。由于首开关有重合闸, 极端情况下, 即使选线失误, 也可保证恢复正常供电(如图 7 所示)。

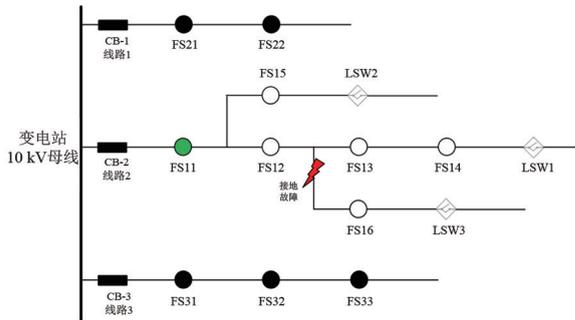


图 7 FS11 重合闸

4) 其他开关检测到来电后根据故障记忆状态执行动态时间来电合闸逻辑, FS12 因为有故障记忆, 经短延时合闸, FS15 无故障记忆, 经长延时合闸。在逐级合闸过程中, FS12 合闸后合于故障, 由此可定位故障点位于 FS12 下端。

5) FS12 合闸后会立即检测到接地故障。由于合于故障, FS12 加速保护动作跳闸(单相接地时故

障电流很小, 负荷开关可直接跳闸), 并正向闭锁来电合闸, 防止再次合于故障; FS13 和 FS16 因为检测到来电后迅速失电, 执行反向闭锁逻辑, 防止反向来电时合于故障(如图 8 所示)。

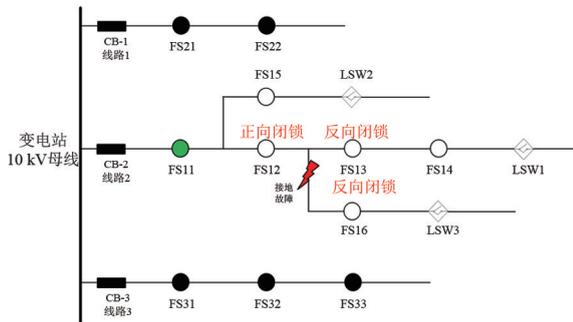


图 8 FS12 跳闸并正向闭锁, FS13、FS16 反向闭锁

6) 其他非故障区段开关 FS15 自适应长延时合闸, 逐级恢复非故障区域供电(如图 9 所示)。

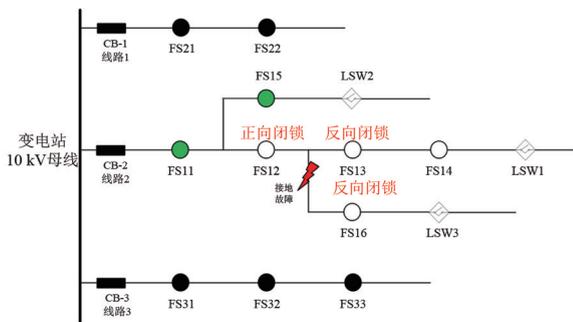


图 9 其他非故障区段开关逐级合闸, 恢复供电

7) 联络开关 LSW1 和 LSW3 在单侧失压后经整定延时后自动合闸(若担心联络开关自投会导致线路过载发生, 亦可退出联络开关自投模式转为人工模式), FS14 执行来电合闸逻辑, FS13 和 FS16 因为有反向闭锁不合闸, 最后完成故障区段的隔离和非故障区段的供电恢复。

上述接地故障处理过程表明, 通过一二次融合成套设备可靠实现了接地故障的准确选线选段和快速隔离。

## 4 现场应用

根据上述暂态零序功率方向作为选线选段判据的一二次融合配电网成套设备已在多个省份投入运行, 在华中某市的现场真型接地测试中, 在中性点经消弧线圈接地方式下, 模拟 2500 Ω、1500 Ω、500 Ω、金属性、破损绝缘子以及树枝等接地故障情形, 一二次融合成套设备均能准确可靠选线选段。

该市红莲湖站主接线如图 10 所示, 在莲 2301 和莲 2304 区间内发生单相接地故障后, 由该支路莲

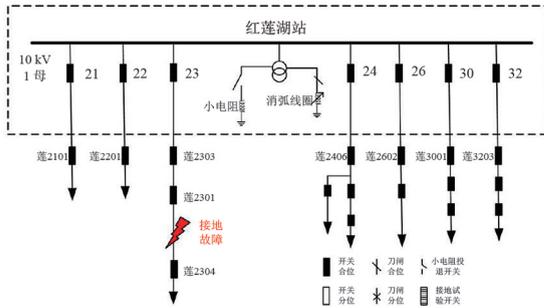


图 10 红莲湖站主接线

2303 处的一二次融合成套设备准确选线选段并隔离了故障。

此次故障发生时,莲 2303 处的一二次融合成套设备核心单元(馈线终端)的动作情况及录波波形如图 11 和图 12 所示。

16:16:46:420ms	自适应型合闸信号 1->0
16:16:44:480ms	开关合位置 0->1
16:16:44:476ms	开关分位置 1->0
16:16:44:469ms	弹簧未储能 0->1
16:16:44:419ms	自适应型合闸信号 0->1
16:16:44:371ms	自适应型跳闸信号 1->0
16:16:44:071ms	接地选线动作遥信 1->0
16:16:42:422ms	开关分位置 0->1
16:16:42:418ms	开关合位置 1->0
16:16:42:371ms	自适应型跳闸信号 0->1
16:16:42:071ms	接地选线动作遥信 0->1

图 11 莲 2303 馈线终端动作情况

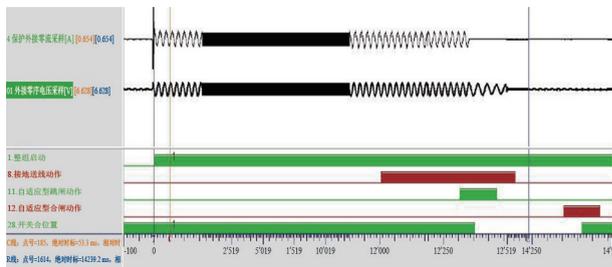


图 12 莲 2303 馈线终端录波波形

由此可见,基于配电网一二次融合成套设备,采用小波包暂态零序功率方向法、故障路径优先的接地故障选线选段关键技术能有效解决小电流接地系统单相接地故障选线选段的难题,方案具有普遍的适用性。

## 5 结论

针对配电网小电流接地系统单相接地故障检测和快速隔离的难题,提出了基于配电网一二次融合技术的接地故障处理方案,具有以下优势:

1)可以避免或减少人为参与,不依赖主站、不依赖通信,由配电终端自动完成接地故障的选线、定位及隔离,可实现单相接地故障的秒级定位、数十秒

隔离和供电恢复,极大减少故障处理时人力物力消耗,大大提高供电可靠性。

2)不需要监控系统主机或单独的选线装置,不用增设信号注入源设备。

3)相比于电压时间型或电压电流时间型馈线自动化,自适应型可实现非故障区段延时的自调整,能适应多电源联络、多分支一次网架等更多运行场合。

4)首开关选线重合闸保证极端情况下即使选线不准,该线路其他开关也能在短时间内来电合闸恢复正常供电;通过非故障区段延时自调整,馈线自动化逻辑自适应多电源联络、多分支一次网架。

## 参考文献

- [1] 徐丙垠,薛永端,冯光,等.配电网接地故障保护若干问题的探讨[J].电力系统自动化,2019,43(20):1-7.
- [2] 叶强,胥威汀,汪伟,等.“碳中和”愿景下的四川电力减碳路径构想[J].四川电力技术,2021,44(2):28-32.
- [3] 薛永端,徐丙垠,冯祖仁,等.小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J].中国电机工程学报,2003,23(7):51-56.
- [4] 薛永端,李娟,徐丙垠,等.中性点不接地系统小电流接地故障暂态等值电路的建立[J].中国电机工程学报,2013,33(34):223-232.
- [5] 国家电网有限公司设备部.国网设备部关于加强大城市配电网单相接地故障快速处置工作的通知[Z].北京:国家电网有限公司,2019.
- [6] 中国南方电网有限责任公司.小电流接地选线装置技术规范:Q/CSG 110040—2012[S].北京:中国电力出版社,2012.
- [7] 雷杨.基于一二次融合成套设备的单相接地故障处理应用及思考[C]//2019年全国配电网接地故障快速处置技术论坛.厦门:中国电机工程学会智慧用能与节能专业委员会,2019.
- [8] 戴剑锋,张艳霞,侯喆.小波重构算法在配电网接地选线中的应用[J].电网技术,2004,28(3):43-47.
- [9] 梁睿,叶开,彭楠,等.暂态零序电流波形差异的单相接地故障选线[J].电力工程技术,2019,38(4):74-79.
- [10] 鲁改凤,化雨,金小兵,等.小电流接地系统单相接地故障选线方法探究[J].电力系统保护与控制,2010,38(12):44-49.
- [11] 李兆拓,金松茂,张华.基于区域序号的自适应就地型馈线自动化故障处理方法[J].电力系统自动化,2019,43(19):179-184.

## 作者简介:

曾先锋(1987),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为配电自动化、配电保护与控制;

任百群(1972),男,主要从事电力系统继电保护及自动运动专业工作。(收稿日期:2021-10-22)

# 基于柔性光学电流互感器的接地选线装置

石 勇,任百群,王 耀,李宇琦,刘倪宣,姜 磊  
(南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102)

**摘要:**针对现场无法安装常规零序互感器的的问题,提出了基于柔性全光学电流互感器的接地选线装置方案。针对当前小电流接地系统单相接地故障特征,形成了基于光学电流互感器的暂态选线方案。该方案已在现场得到应用,运行情况良好。

**关键词:**接地选线;光学电流互感器;暂态法

**中图分类号:**TM 452 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2022)01-0026-04

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220106

## Grounding Line Selection Device Based on Flexible Optical Current Transformer

SHI Yong, REN Baiqun, WANG Yao, LI Yuqi, LIU Nixuan, JIANG Lei  
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu, China)

**Abstract:** Aiming at the conventional zero-sequence current transformer that can't be installed in the field, the scheme for grounding line selection device is proposed based on flexible optical current transformer. In view of the current characteristics of single-phase grounding fault in small current grounding system, the transient line selection scheme based on optical current transformer is formed. According to the actual application in the field, the operation condition of the proposed scheme is good.

**Key words:** grounding line selection; optical current transformer; transient method

## 0 引 言

小电流接地系统接地选线一般使用有功分量法、谐波法、注入信号法、残流增量法、中电阻法、暂态无功功率法等选线方法<sup>[1-4]</sup>。以上方法均需使用到线路的零序电流,但是在架空线、GIS 开关柜等场合传统的穿心式零序互感器无法安装,只能使用三相电流互感器自产零序电流进行选线。小电流接地系统单相接地故障残流一般在 10 A 以内,相电流互感器一次额定值在 600 A 以上,变比太大导致二次侧变到选线装置的零序电流只有毫安级,小于装置的灵敏测量范围。自产零序电流由于三相变比不一致导致不平衡电流过大也会影响选线精度及灵敏度。此外现有常规零序互感器在现场二次电缆较长的情况下,由于带负载不足导致幅值误差及角度误差大于允许范围,影响选线灵敏度导致高阻接地时拒动。

## 1 柔性全光纤电流互感器

全光纤电流互感器(fiber optical current transducer, FOCT)<sup>[5]</sup>是采用光纤作为电流传感材料的光学 CT。柔性全光纤电流互感器<sup>[6]</sup>是 FOCT 发展的方向,它可以在现场根据导体形状不同绕制成所需形状的光纤传感环,比传统互感器更灵活,安装和维护更加方便,重量更轻,无绝缘要求。

对于 GIS 开关柜体形状不规则、架空线三相距离较远等场合,将三相电流从常规零序电流互感器穿过需要孔径很大,且形状特殊。由于铁芯材料及重量限制无法制造出适合现场安装孔径的常规互感器,柔性光互感器可以根据现场需要绕制成各种形状且重量很轻。将三相导线从零序光互感器的光纤环中穿过,全光纤式电流互感器采集单元利用传感光纤的法拉弟磁光效应感应被测三相导线中电流产生

的磁场信号即零序电流磁场,计算出被测零序电流并输出,具有精度高、动态范围大、谐波特性好等特点。

## 2 选线系统方案

基于光学电流互感器的选线系统由接地选线装置、多个零序光学互感器及采集单元组成。每个间隔配置一台零序光学电流互感器,每套光学互感器含一个光纤环及一台采集单元,每个采集单元配置一个光路模块,三相电流都从光纤环的保偏光缆中穿过,这样在光纤环采集的就是零序电流。采集单元置于柜中,采集保偏光纤中的模拟量转换成数字量后,通过点对点通讯光纤将采集的电流数据输出至接地选线装置,无需经交换机中转。选线装置的电压由常规电压互感器接入。对于现场部分支路使用传统电磁式电流互感器、部分支路使用光学电流互感器的场合,选线装置支持常规电流互感器与光学电流互感器混合采样。整个系统如图 1 所示。

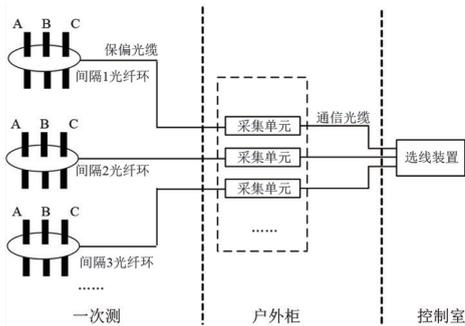


图 1 基于光学电流互感器选线系统方案

## 3 接地故障检测选线对光学电流互感器的要求

目前保护用光学电流互感器采样率按数字化站标准为 4000 Hz。单相接地故障的暂态电流主要为暂态电容电流,对于架空线自由振荡频率一般为 300~1500 Hz,电缆线路的电感远小于架空线路,对地电容却比架空线大很多倍,因此暂态过程振荡频率很高,一般为 1500~3000 Hz<sup>[4]</sup>,根据奈奎斯特定理采样率  $f_{s,max}$  需要大于 2 倍信号的最高频率  $f_{max}$ ,即  $f_{s,max} \geq 2f_{max} = 6000$  Hz 采样率。因此光 CT 采集单元的采样率不能低于 6000 Hz,所提系统中光学电流互感器采集单元的采样率与接地选线装置采样率一致,设置为 10 kHz,保证接地故障时刻暂态特征数

据能可靠采集。

为保证采样数据的实时性及可靠性,采集单元数字信号光纤与接地选线装置通过点对点连接,不经过交换机,保证各支路零序电流采样延时都是固定的。接地选线装置根据额定延时调整光 CT 信号与电磁型零序电流互感器及电压互感器信号时差,保证各信号时间的一致性。

保护用光学电流互感器的测量范围考虑到三相短路等情况,一般为额定电流的 30~40 倍,达到上千安培,远大于负荷电流。但小电流接地系统单相接地故障时零序电流很小,特别是架空线路在经高阻单相接地时,一次侧只有几安培电流。如果使用常规保护用光学电流互感器在小电流情况下无法实现准确测量。根据规程规定,选线装置用零序互感器一次额定电流宜按照系统电容电流值的 2 倍选取<sup>[7]</sup>。因此测量小电流能力要求比常规保护用光学互感器要求高很多,需要光学互感器最小能监测的一次电流为 0.2 A,最高测量电流为 250 A,满足如下精度要求:1) 0.2~0.5 A,比值误差  $\leq 10\%$ ; 2) 0.5~250 A,比值误差  $\leq 1\%$ 。

## 4 零序光学互感器现场安装

光学电流互感器可采用如图 2 所示的 AIS 支柱式(包括与断路器集成方式)、套管式、GIS 集成式、柔性等方式安装。



图 2 光学电流互感器安装方式

以上方式前两种适用于相电流互感器的安装,后两种适合于零序电流互感器的安装。柔性

安装方式可在不改动原有系统情况下进行,避免三相电缆的拆解,减小施工难度和周期。为便于现场安装和维护,光 CT 采用柔性结构,传感光纤制成光缆型式,支持现场缠绕,因此安装及维护时无需拆解三相电缆,在传感光纤外围以两瓣式壳体进行保护和固定,如图 3 所示壳体可为圆形或跑道型等任意适合安装的形状。现场安装如图 4 所示,可在开关柜内安装,也可以在电缆室安装。因光 CT 重量很轻,在电缆室安装时不会因为互感器很重而压坏电缆。

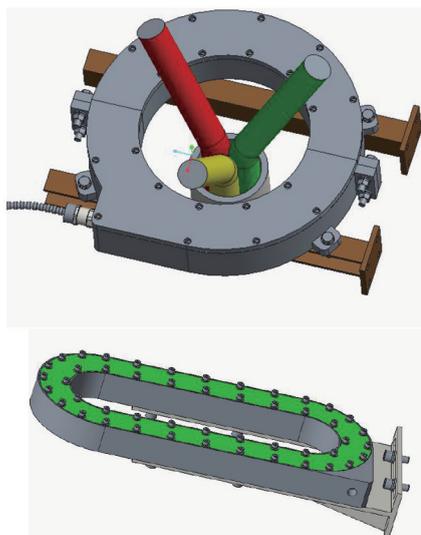


图 3 零序光学电流互感器壳体



图 4 零序光学电流互感器现场安装

行性,对基于柔性光学 CT 的接地选线装置分别进行静态试验与真型动模接地试验验证。

圆形壳体在现场已有大量应用,静态模拟测试仅验证跑道型壳体。搭建静态试验平台,将图 3 下面的“跑道型”柔性光学 CT 传感环绕制在三相电缆外,三相电缆排布方式为分散与集中两种。分散时三相电缆间距为 20 cm,集中时三相电缆间距均为 5 cm。采用博电测试仪加入由 10 A 的正常负荷电流及不同数值的零序电流合成的电流,其中正常运行负荷电流相位相差  $120^\circ$ ,调整电流中零序分量,记录数据如表 1 所示。

表 1 静态试验记录

实际值/A	电缆排布方式	测量值/A	幅值误差/%	角差/( $^\circ$ )
0.2	分散	0.201	0.50	1.1
	集中	0.198	1.00	1.1
5.0	分散	4.985	0.30	0.9
	集中	4.982	0.36	0.9
10.0	分散	9.971	0.29	0.9
	集中	9.975	0.25	0.9

从测试数据可见,不管导体分布方式如何,对光学 CT 测量精度影响不大,一次电流在 0.5 A 以下幅值误差小于等于 1%,0.5 A 以上幅值误差小于 1%,可以满足接地选线装置精度要求。

真型动模试验:配电网户外真型试验场包括 10 kV 开关站 1 座和 10 kV 试验线路 7 条,测试时用到 5 条。试验 1 线、2 线采用集中参数柜模拟真实线路的分布式参数,试验 3 线、4 线和 5 线为实际电缆线路。试验场配置预调式消弧线圈,型号为 XH-DCZ-400/10.5,额定容量为 400 kVA,电流调节范围为 20~66 A,共分为 14 挡,通过有载分接开关等差调节。母线电容电流为 25.2 A,各线路参数详见表 2。

表 2 各线路电容电流

试验线路	电容电流/A
试验 1 线	2.66
试验 2 线	11.83
试验 3 线	1.06
试验 4 线	1.60
试验 5 线	8.05

在户外试验场安装录波装置,在表 1 所示 5 条馈线的 A、B、C 相电缆出线处安装 10/1 零序电流互感器。母线处安装电压互感器接入录波装置。

## 5 试验及运行

为验证柔光学电流互感器在接地选线应用的可

在消弧线圈自动补偿、欠补偿、过补偿方式下,分别进行在试验1线A相经不同过渡电阻接地的持续性电弧接地试验和间歇性电弧接地试验。自动补偿时系统电容电流为25.2 A,消弧线圈补偿电流为27.1 A;欠补偿时调节系统电容电流为31.0 A,消弧线圈补偿电流为20.0 A;过补偿时调节系统电容电流为25.2 A,消弧线圈补偿电流为34.2 A。过渡电阻值分别为250  $\Omega$ 、500  $\Omega$ 、1000  $\Omega$ 、2000  $\Omega$ 、3000  $\Omega$ 和4000  $\Omega$ 。将录波装置录取的接地波形经测试仪回放,将其中电流数据放大10倍还原为一次值后接入即将在现场投运的光学电流互感器,电压信号直接接入接地选线装置的电压采集插件。选线启动零序电压设置为10 V,以上各种接地测试均能正确选出故障线路。

图5是消弧线圈过补偿系统经4000  $\Omega$ 过渡电阻高阻接地时基于光CT接地选线装置的波形。从波形中可以看出,单相高阻接地时零序电流及电压信号都很微弱。经消弧线圈补偿后各支路稳态电流方向一致,幅值基本差不多,仅靠接地瞬间故障线路与非故障线路相位及幅值特征可以判断出线路1为故障线路。

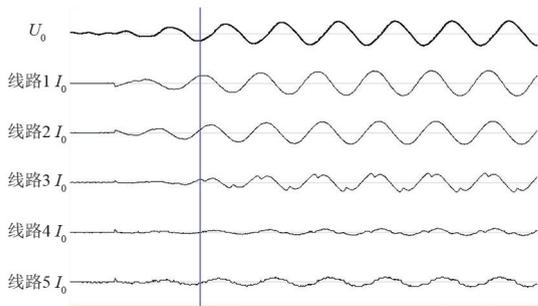


图5 过补偿经4000  $\Omega$ 过渡电阻接地波形

基于光CT的接地选线装置已在天生桥水电站、鲁布革水电站投运,现场最长运行时间超过一年,未发生拒动及误动。

## 6 结 论

柔性光CT可以方便地在架空线及GIS等难以安装常规零序互感器的场合进行安装,因输出的为数字信号,不会因二次电缆过长而导致幅值误差及角差过大。

基于光CT的接地选线装置提高了现场单相接

地故障处理效率,降低事故处理时间,避免接地故障引发的电缆火灾导致的重大设备损失和经济损失,避免了人身伤害,提高了供电可靠性。

## 参考文献

- [1] 贺家李,李永丽,董新洲,等.电力系统继电保护原理(4版)[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [2] 戴剑锋,张艳霞.基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J].中国电机工程学报,2003,23(5):44-47.
- [3] 戴剑锋,张艳霞,侯喆.小波重构算法在配电网接地选线中的应用[J].电网技术,2004,28(3):43-47.
- [4] 石勇,张艳霞,沈勇环.基于数字信号处理器和小波包重构算法的配电网接地选线装置的研究[J].电网技术,2005,29(4):50-54.
- [5] 石勇,张艳霞,刘卓辉. CPLD在小电流接地选线装置中的应用[J].中国农村水利水电,2004,265(11):111-113.
- [6] 小电流接地系统单相接地故障选线装置运行规程: T/CSEE 0056—2017[S].北京:中国电力出版社,2018.
- [7] 阎嫦娥,王耀,罗苏南,等.用于发电机保护的柔性全光纤电流互感器[J].电力自动化设备,2017,37(4):191-196.
- [8] GUO Weina, HUANG Wenjie. Optical Current Transformer Accuracy Problems and Solutions[C]. 2010 Asia-Pacific Conference on Power Electronics and Design, Wuhan, 2010:47-50.
- [9] 王凯,王耀,王光,等.光学电流互感器应用于发电机保护的研究及实践[J].水电与抽水蓄能,2016,2(4):28-33.
- [10] 尤向阳,葛笑寒,吴萍.基于零序电流波形相似度的接地故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(14):125-130.
- [11] 邱进,田野,李冠华,等.基于现场实录波形的小电流接地故障暂态选线研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(6):180-187.
- [12] 王鹏,冯光,韦延方,等.10 kV配电网的接地故障测试述评及真型实验场设计[J].电力系统保护与控制,2020,48(11):178-187.

## 作者简介:

石 勇(1978),男,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护及接地技术研究;

任百群(1972),男,主要从事电力系统继电保护及自动运动专业工作。

(收稿日期:2021-10-23)

# 基于小波包能量的漏电保护方案研究

赵恒<sup>1</sup>,左金威<sup>1</sup>,瞿科<sup>2</sup>

(1.国网四川省电力公司,四川成都 610041;2.四川大学电气工程学院,四川成都 610065)

**摘要:**现有剩余电流保护器多以总剩余电流或故障电流有效值作为动作判据,阈值固定,难以识别触电类型。为了减轻因人身触电事故造成的严重后果,针对低压配电网,文中研究了一种基于小波包能量的漏电保护方案。利用滑动时间窗计算剩余电流的小波包能量相对熵,根据相对熵的变化大小判断是否为生命体触电,并在此基础上提出了漏电保护方案。文中模拟了电阻、猪肉和兔子等不同触电类型的实验,实验结果证明所提方法的正确性和有效性,对于开发新一代剩余电流保护器具有参考价值。

**关键词:**低压配电网;漏电保护;触电电流;事故检测;相对熵

**中图分类号:**TM 564.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)01-0030-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220107

## Research on Leakage Protection Scheme Based on Wavelet Packet Energy

ZHAO Heng<sup>1</sup>, ZUO Jinwei<sup>1</sup>, QU Ke<sup>2</sup>

(1.State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:** Most of the current protective methods act based on the total residual current with a fixed threshold, which is difficult to identify the types of electric shock. In order to reduce the serious consequence caused by electrical shock, and aiming at low-voltage distribution network, a leakage protection scheme based on wavelet packet energy is studied. Relative entropy of wavelet packet energy is calculated according to residual current through sliding time window. The change value of relative entropy serves as a criterion for electrical shock of life entity. On this basis, the leakage protection scheme is proposed. The resistance, pork and rabbit are used to simulate different electric shocks. The results show the correctness and effectiveness of the proposed method, which is of a certain significance in developing new residual current devices.

**Key words:** low-voltage distribution network; leakage protection; shock current; fault detection; relative entropy

## 0 引言

低压配电网作为电力传输终端,直接面向电力用户,而因触电事故造成的人身伤害和经济损失成为工业界和学术界关注的重要问题。目前低压配电网主要采用剩余电流保护装置,在发生触电的情况下切除电源从而保障人身安全<sup>[1]</sup>。漏电保护器根据动作类型分类,可分为电磁式和电子式<sup>[2]</sup>;漏电保护器根据对含有直流分量漏电流的不同动作特

性,可以分为AC型、A型和B型<sup>[3]</sup>。但是这些漏电保护器主要根据触电以后剩余电流大小或变化量动作,不能有效区别生命体和非生命体触电,降低了对人身安全保护的動作正确率。由于运行、测量噪声等多因素的影响,生命体触电特征监测分析亟待解决。研究生命体触电事故检测方法和开发有效漏电保护方案对于保护人身安全,降低事故损害具有重要的理论价值和工程意义。

近年来,国内外学者对触电事故特征检测分析开展了相关研究,主要包括时频域分析<sup>[4-7]</sup>和数字

滤波分析<sup>[8-9]</sup>。文献[4]对不同的生物触电模型提取了多个时域和频域特征,通过降维处理和支持向量机进行触电识别。文献[5]提出识别生物触电电流改进型近似熵的计算方法,减少了计算量,缩短了判断时间。文献[6]利用傅里叶变换和弗莱贝尔格等值模型计算生物阻抗特征,展现了触电的暂态过程;文献[7]利用快速傅里叶变换对生物触电电流进行了频谱分析,得到了生物触电电流和总剩余电流相关的结论。文献[8]将基于有限冲击响应的数字滤波技术与径向基函数神经网络技术结合,实现了快速识别触电事件。文献[9]结合滤波算法和S变换,从时频特征和能量变换不同角度,对比分析触电和非触电信号,提出了识别生命体触电的特征量。生命体与非生命体之间存在明显的阻抗特征差异,生命体阻抗特性复杂,频散特性是区分生命体触电和非生命体触电的有效特征<sup>[10-11]</sup>。但是该算法难度大,且需系统存在谐波分量,实际应用困难。

相对熵可以衡量两个随机变量之间的距离。小波包相对熵分析方法,集中了小波包和相对熵的优点,小波包放大局部信号,能够根据信号的特点自适应地选择频带,而相对熵能反应信号之间的细微差别,相对熵越大,信号变化越大<sup>[12-14]</sup>。用电阻、猪肉和活兔进行单相触电实验,以保护装置检测所得单通道故障剩余电流为检测电流,从时域、频域进行生命体触电特征的提取,并在此基础上设计基于小波包能量相对熵的漏电保护方案,通过实验验证相对熵作为生命体触电特征的有效性。

## 1 生命体阻抗模型与触电特征分析

### 1.1 生命体 Cole-Cole 模型

生物组织电特性广泛被运用于人体成分和病理学研究<sup>[15]</sup>。由于构成人体组织的细胞和细胞间质具有不同的电特性,人体组织具有电容特性,低频时高阻抗,高频时低阻抗。如图1所示,1940年科尔提出了贴合生物组织阻抗特性的模型<sup>[16]</sup>,其中 $R_s$ 和 $R_b$ 为生命体组织等效电阻, $C_s$ 为依赖频率的等效电容。

### 1.2 时域特征和频域特征

时域特征根据实际触电电流,利用统计量进行分析,包括均值、方差、偏度和峭度<sup>[17]</sup>。选取均值和方差来度量触电特征。

设有限长的随机信号为 $x(n) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,

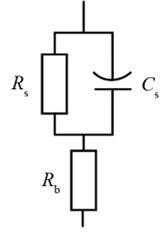


图1 生命体等效模型

统计量均值 $\mu_x$ 的计算公式为

$$\mu_x = E[x(n)] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad (1)$$

式中: $E$ 为期望值; $\mu_x$ 为均值; $N$ 为信号总长度。

方差用于表示随机信号偏离其平均值的程度,计算公式为

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n) - \mu_x]^2 \quad (2)$$

频域特征主要利用傅里叶变换将信号从时域转换为频域,得到各频域的幅值和能量分布情况,便于对信号本质进行更深的挖掘。

## 2 基于小波包能量相对熵触电识别

### 2.1 小波包能量相对熵原理

近年来,信息理论在电力系统分析诊断中得到越来越广泛的应用,其中相对熵可以衡量两个随机变量之间的变化情况。当两个随机变量分布相同时,它们的相对熵为0;当两个随机变量的差异越大时,它们的相对熵也会变大。对于信号而言,信号变化程度越大,相对熵越大。

小波包分解通过高低通滤波器,将两个分量重复计算达到分辨率要求,其公式为

$$\begin{cases} w_{2j}^{(i)}(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k w_j^{(i-1)}(2t - k) \\ w_{2j+1}^{(i)}(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k w_j^{(i-1)}(2t - k) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $w_{2j}^{(i)}(t)$ 、 $w_{2j+1}^{(i)}(t)$ 分别为小波分解系数; $h_k$ 、 $g_k$ 分别为小波分解的低通、高通滤波器组。

通过对信号 $w(t)$ 进行 $i$ 层分解,得到第 $j$ 频段的能量为

$$E_j^{(i)} = \sum [w_j^{(i)}(n)]^2 \quad (4)$$

式中, $w_j^{(i)}$ 为第 $i$ 层第 $j$ 频段的系数。

该频段能量在总能量中比例为

$$p_j^{(i)} = E_j^{(i)} / E^{(i)} \quad (5)$$

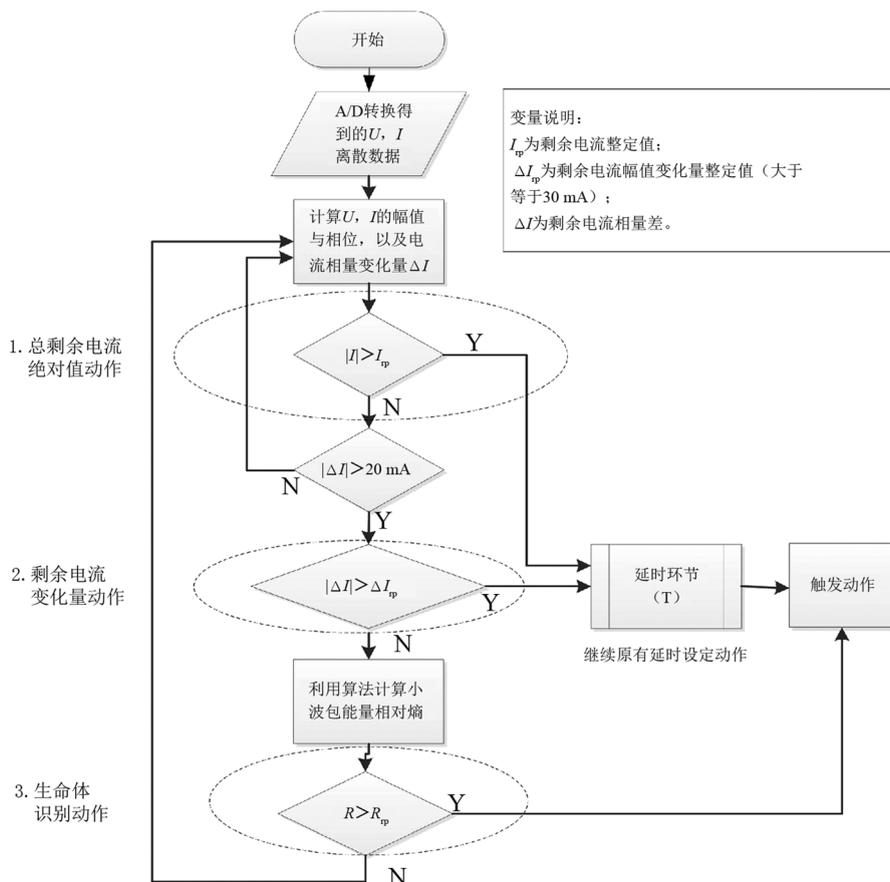


图 2 小波包能量相对熵识别流程

式中,  $E^{(i)} = \sum_{j=1}^{2^i} E_j^{(i)}$  为信号总能量。其能量分布概率为  $P^{(i)} = \{p_1, p_2, \dots, p_{2^i}\}$ 。同理, 可得另一信号  $w'(t)$  的频谱能量分布概率  $P'^{(i)} = \{p'_1, p'_2, \dots, p'_{2^i}\}$ 。定义信号  $w(t)$  与  $w'(t)$  的小波包能量相对熵为

$$R(w, w') = \sum_{k=1}^{2^i} \left| p_k \ln \frac{p_k}{p'_k} \right| + \sum_{k=1}^{2^i} \left| p'_k \ln \frac{p'_k}{p_k} \right| \quad (6)$$

式中,  $k$  为小波包分解层数。

## 2.2 小波包能量相对熵识别流程

现有漏电保护器一般通过总剩余电流或者故障剩余电流幅值进行动作。因正常剩余电流与故障电流之间相角的不确定性, 总剩余电流可能增大也可能减小, 基于总剩余电流动作的漏电保护器可能拒动或误动; 同时由于现有漏电保护器不能有效识别生命体触电, 基于故障剩余电流动作的漏电保护器阈值低 (30 mA), 导致动作频繁, 在广大的农村地区投运率低, 触电伤亡事件时有发生。

新型漏电保护器设计以识别生命体触电为核心, 在现有漏电保护器的基础上改进为 3 个识别环节。包括总剩余电流动作、故障剩余电流动作和人

体触电识别动作 3 个环节, 如图 2 所示。

一个周期的波形数据采集  $n$  个采样点数据, 将第  $i$  个电流采样点数据记作  $I_i$ , 命名为  $I_1, I_2, \dots, I_n$  进行下面的分析整定。

步骤 1: 为避免较大泄漏电流长期存在, 首先进行总剩余电流幅值判断, 记为  $|I|$ 。

$$|I| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{I_i^2}{n}} \quad (7)$$

式中:  $I_i$  为第  $i$  个采样点电流;  $n$  为一个周期采样点数。

如果  $|I| \geq I_{wp}$ , 则判定线路有故障发生, 长延时后, 继电器切断回路; 如果  $|I| < I_{wp}$ , 则判定线路无故障发生, 返回步骤 1。其中,  $I_{wp}$  为剩余电流整定值。 $I_{wp}$  可根据线路绝缘状况在 50~800 mA 进行设定, 此处设定为 100 mA。

步骤 2: 判断故障剩余电流。根据式 (7) 计算出总剩余电流前后 2 个周波的矢量变化量有效值, 记为  $|\Delta I|$ 。

$$|\Delta I| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(I_{i+n} - I_i)^2}{n}} \quad (8)$$

若  $|\Delta I| \geq 20 \text{ mA}$ , 则进入下一环节判断, 若不成立, 则返回步骤 1; 如果有  $|\Delta I| \geq \Delta I_{\text{tp}}$ , 则判定有故障发生, 短延时后, 切断主回路; 如果有  $|\Delta I| < \Delta I_{\text{tp}}$ , 则判定无故障发生, 动作机构不动作, 返回到步骤 1。其中,  $\Delta I_{\text{tp}}$  为剩余电流变化量整定值。因有第三环节的人体触电识别保护,  $\Delta I_{\text{tp}}$  可根据运行状况在 20~100 mA 设定, 为避免频繁跳闸此处设定为 50 mA。

步骤 3: 对于生命体触电识别动作, 进行小波包能量相对熵  $R$  计算, 若小于阈值, 则不动作, 返回步骤 1; 若大于阈值, 识别为生命体触电, 则无延时动作, 继电器切断主回路。

通过对 100 余组猪、兔触电故障电流小波包能量相对熵进行计算, 选取 db5 小波, 进行 3 层小波包分解, 阈值  $R$  为 0.01。

### 3 实验数据验证分析

#### 3.1 生命体触电电流获取

为获取真实的生物触电信号, 搭建了生物触电实验平台。FLUKE 6100 A 标准扰动源提供电源信号; 功率放大器将电源信号放大至可带功率的电压信号; 采用 YOKOGAWA DL750 示波录波仪对相关电流、电压信号录波; 3 盏白炽灯 (220 V, 50 Hz, 100 W) 模拟线路负载, 触电实验接线图如图 3 所示。

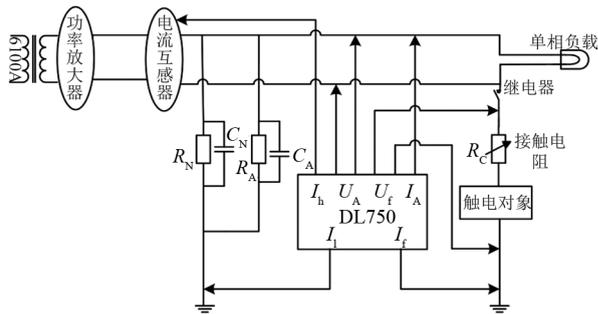


图 3 触电实验接线

$I_b$ 、 $I_f$ 、 $I_i$  分别为总剩余电流、漏电故障电流、正常剩余电流, 系统电压为  $U_A$ , 负载电流为  $I_A$ , 触电物体的两段电压为  $U_f$ , 故障支路  $R_A$ 、 $R_N$  和  $C_A$ 、 $C_N$  分别表示单相线路对地绝缘电阻和对地分布电容,  $R_C$  为故障支路接触电阻。

FLUKE 6100 A 输出电压源为: 50 Hz 基频, 0~20 次谐波, 基波为 10 V; 功率放大器输出: 220 V; DL750 采样频率: 10 kHz; 接触电阻  $R_C$  为 8000  $\Omega$ 。分别以一个 4000  $\Omega$  电阻、新鲜猪肉、活兔为实验对

象, 获取实验数据。兔子作为实验对象的时候, 以兔子的左前肢和右后肢为触电接触部位, 并接入接触电阻  $R_C$ 。为了确保能够有效模拟人体皮肤, 实验做了以下处理: 1) 电极贴片包裹兔子的触电接触部位并用多股铜线芯缠绕, 避免增大接触阻抗; 2) 保持兔子触电接触部位的皮肤完整不破损, 确保皮肤阻抗正常; 3) 将兔子触电接触部位的毛发清理干净, 避免毛发的绝缘作用。为了保证不对兔子造成致命的伤害, 实验时将兔子麻醉并加入接触阻抗。

根据图 3 搭建了试验电路, 利用电阻、新鲜猪肉和活兔进行触电实验, 分别得到触电波形如图 4 所示。

从上述波形可以看出, 因为有对地电容的存在, 在故障发生前, 总回路中存在一定的剩余电流。在故障发生后, 3 组实验剩余电流均增大, 对比 3 组图形可以看出: 1) 猪肉和兔子故障后, 剩余电流存在一个明显的暂态过程, 之后趋于稳定。2) 电阻触电故障后, 剩余电电流增大幅度是固定的, 表现出线性特征; 而兔子和猪肉触电故障后, 剩余电流持续增大, 呈现明显的非线性特征。分别从时域和频域进行特征分析。

#### 3.2 触电电流时域特征

从剩余电流均值统计 (见表 1) 可以看出, 触电后, 猪肉、兔子的剩余电流在不断增大, 但增幅并不明显, 20 个周波中平均增幅分别为 0.199 4%, 0.013 8%, 而电阻增幅趋于 0。说明由于生命体细胞中存在电阻和电容, 在触电过程中, 电流的热效应和化学效应对生命体带来损伤, 生物阻抗随时间增加而变化, 生物的触电电流随时间增加而增大。同时由于接触面积等触电实际情况不同, 猪肉和活兔的电流增幅不同。从剩余电流方差统计 (见表 2) 可以看出, 电阻变化率趋近 0, 猪肉和活兔分别偏离平均值 0.389 6% 和 0.028%, 方差在触电后 20 个周期内呈现增长的趋势, 但增长幅度仍然很小。

从上述可以看出, 生物在触电过程中存在触电电流幅值递增的非线性的触电特征, 但增幅绝对值较小, 猪肉和活兔的周期平均变化阈值为  $10^{-3} \text{ mA}$ , 且变化尺度不一。利用时域特征进行漏电保护器开发还存在两个方面的问题: 1) 短时间尺度下特征无法提取。中国规定漏电保护器最大分断时间为 200 ms, 人体安全电流小于 30 mA。在短时间内, 设定小电流低变化率的特征阈值, 对测量设备的精度提出较

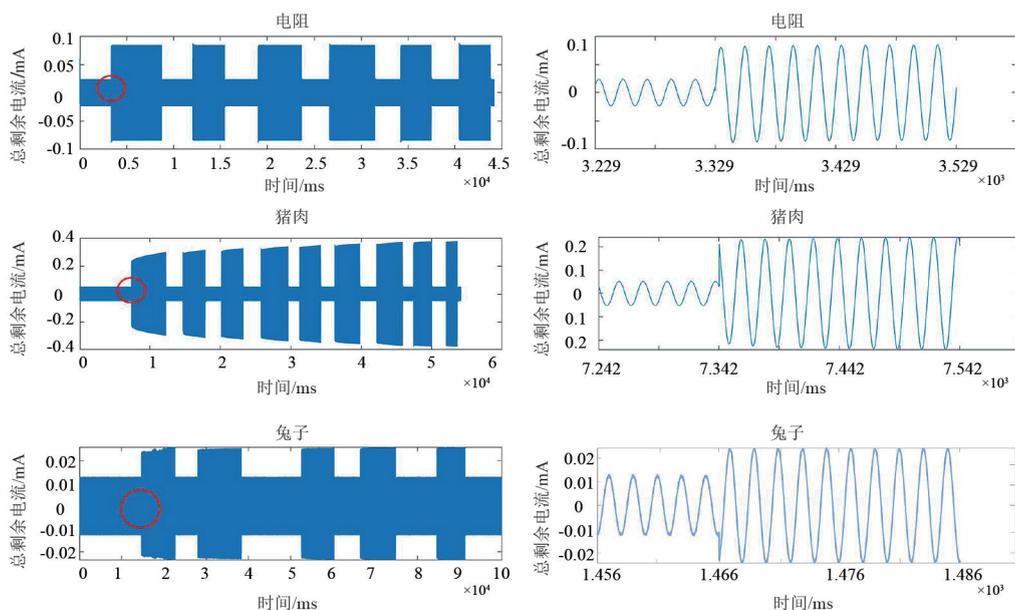


图 4 电阻、猪肉、活兔触电总剩余电流

表 1 剩余电流均值统计

对象	T1	T2	T3	...	T18	T19	T20	变化平均值/%
电阻	0.055 1	0.055 1	0.055 1	...	0.055 1	0.055 1	0.055 1	0
猪肉	0.155 9	0.156 2	0.156 7	...	0.161 4	0.161 6	0.161 9	0.199 4
活兔	0.014 7	0.014 7	0.014 8	...	0.014 8	0.014 8	0.014 8	0.013 8

表 2 剩余电流方差统计

对象	T1	T2	T3	...	T18	T19	T20	变化平均值/%
电阻	0.000 7	0.000 7	0.000 7	...	0.000 7	0.000 7	0.000 7	-0.001 8
猪肉	0.005 9	0.005 9	0.006 0	...	0.006 3	0.006 3	0.006 3	0.389 6
活兔	0	0	0	...	0	0	0	0.028 0

表 3 小波包能量相对熵统计

对象	T1, T2	T2, T3	T3, T4	T4, T5	T5, T6	T6, T7	T7, T8
电阻	0	0	0.000 1	0.001 1	0.002 5	0.000 1	0
猪肉	0	0	0.000 1	0.185 3	0.259 9	0	0
兔子	0.000 1	0.000 1	0.000 2	0.028 5	0.034 2	0.000 1	0

高要求,而长时间尺度下,动作时间不能满足人体安全保护的要求。2) 配电系统本身运行工况复杂,扰动较多,绝缘老化、天气潮湿等故障具有相似特征,利用幅值递增进行判断很难区别生命体和非生命体触电信号,容易出现误动。

### 3.3 触电电流频域特征

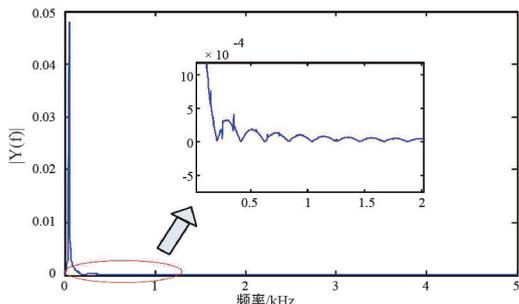
频域特征主要利用傅里叶变换将信号从时域转换为频域,得到各频域的幅值和能量分布情况。图 5 为猪肉触电试验总剩余电流故障前后频谱波形图,图 6 为猪肉触电试验各次谐波与基波比值曲线。故障前的谐波总畸变率为 3.7%,故障后的谐波总畸变率为 4.9%。对比各次谐波的成分,故障后的低次谐波含量较故障前的低次谐波含量更高。可以看出故障前后,电流差异大,由于受生命体阻抗特征的影响,呈现出非线性的变化,在不同频率下的能量分布不同。

### 3.4 小波包能量相对熵

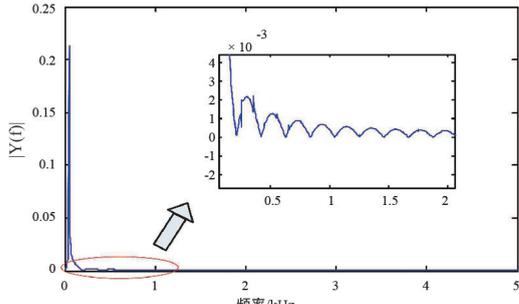
利用小波包能量相对熵进行触电特征识别,因采样频率为 10 kHz,在触电前后各取 4 个周期数据 (T1—T8),选取 db5 小波,进行 3 层小波包分解,相邻周期对应计算小波包能量相对熵,其结果如表 3 和图 7 所示。从计算结果可以看出:

1) 触电前 4 个周期 (T1—T4) 的小波包能量相对熵无明显变化,信号几乎相同;但触电后,从周期 T5 开始,猪肉和兔子的熵值呈现明显增长,而电阻的熵值变化不明显,说明生命体触电后,由于受生命体阻抗特点的影响,触电电流频谱发生明显变化,复杂程度增大。

2) 在触电后的 2 个周期 T5, T6 内,猪肉和兔子熵值变化存在明显暂态过程,相对熵均大于 0.01,可以识别为生命体触电,并在 2 个周期后趋于稳定。



(a) 故障前剩余电流频谱波形



(b) 故障后剩余电流频谱波形

图 5 猪肉触电试验总剩余电流故障前后频谱波形

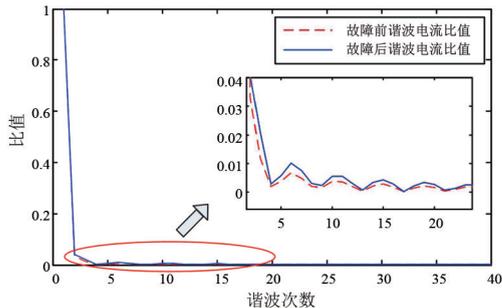


图 6 猪肉触电试验各次谐波与基波比值曲线

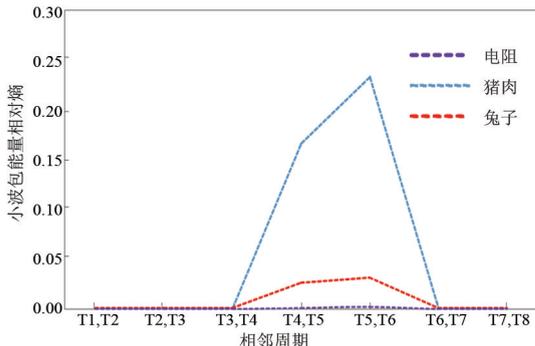


图 7 小波包能量相对熵曲线

从以上实验可以看出,通过小波包能量相对熵的计算,滤除了电流中谐波的影响,突出了生命体触电的主要特征,能够反映触电前后频谱的细微变化。

该算法只需采集 2 个周期电流,通过比较  $R \geq 0.01$  即可判断生命体触电。从时间上看,利用文中数据导入 Matlab 进行计算,第一环节剩余电流计算时间为 8 ms,第二环节剩余电流变化量计算时间

为 12 ms,第三环节小波包能量相对熵计算时间为 43 ms,计算判断时间为 63 ms。同时数据采样时间 2 个周期为 40 ms,机构动作时间一般为 20 ms 以内<sup>[19-20]</sup>,总计时间为 123 ms,能够满足 200 ms 的时间要求。

由此分析可知,小波包能量相对熵与剩余电流均值、方差和频谱特征相比,能够有效区别生命体和非生命体触电事故,可以用作漏电保护方案中触电识别的关键特征,进行软件功能设计。

## 4 结 论

前面提出了可通过检测并计算触电电流的小波包能量相对熵用于区别生命体和非生命体触电事故。同时搭建了物理实验平台,对生命体和非生命体触电进行模拟并获取实测数据,证明了所提的小波包能量相对熵识别生命体触电事故的有效性。在此基础上,提出了开发漏电保护器的方案。该方案简便可靠,符合漏电保护工程应用领域的要求。主要结论为:

1) 在时域中,以猪肉和活兔为代表的生命体触电电流,触电后电流幅值持续增大,在 2~4 个周期后趋于稳定,表现出明显的非线性;

2) 在频域中,以猪肉和活兔为代表的生命体触电电流,触电前后频谱发生畸变,触电电流能量主要分布在低频,高频能量较小且特征不明显;

3) 小波包能量相对熵算法综合了小波包滤波以及相对熵识别细微特征的优点,与剩余电流均值、方差和频谱特征相比,能够有效区别生命体和非生命体触电事故,可以用作漏电保护方案中触电识别的关键特征,进行新型漏电保护器设计。

## 参考文献

[1] 滕松林, 杨校生. 触电漏电保护器及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1994.  
 [2] 刘金焱, 季慧玉. 剩余电流保护器的 IEC 标准最新动态研究[J]. 低压电器, 2008(23): 59-61.  
 [3] 低压开关设备和控制设备 第 2 部分: 断路器: GB/T 14048.2—2020[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.  
 [4] 韩晓慧, 杜松怀, 苏娟, 等. 触电信号暂态特征提取及故障类型识别方法[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3591-3596.

# 弧光保护通道自检技术的应用研究

王杰,侯炜,陈俊,牛洪海

(南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102)

**摘要:**阐述了中低压开关柜弧光保护通道自检技术的必要性。介绍了通过叠加光脉冲实现弧光通道自检的原理和方法。理论分析递归中值滤波对光脉冲的影响消除,以及光脉冲对背景光计算的误差估计。试验表明,在保证电弧光保护装置不误动的情况下,该方法能有效地对弧光通道进行实时自检,从而提高弧光保护装置运行的可靠性。

**关键词:**通道自检;递归中值滤波;光脉冲;误差估计;无源传感器

中图分类号:TM 72 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)01-0036-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220108

## Application Research of Channel Self-Checking Technology in Arc Flash Relay

WANG Jie, HOU Wei, CHEN Jun, NIU Honghai

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu, China)

**Abstract:** The necessity of self-checking technology for arc transmission channel in arc flash relay of medium-voltage and low-voltage switchgears is described. The principle and methods realizing self-checking for arc transmission channel by superimposing pulse light are introduced. It is theoretically analyzed that the recursive median filter algorithm can eliminate the influence of pulse light, and the deviation of pulse light to background light is also estimated. The test shows that in the premise of no misoperation of the device, the method can realize real-time self-checking for arc transmission channel, which can improve the reliability of arc flash relay.

**Key words:** channel self-checking; recursive median filter algorithm; pulse light; deviation estimation; passive arc sensor

## 0 引言

随着配电网的发展,中低压开关柜数量越来越多。6~35 kV 中低压开关柜作为中低压母线的载体,由于其空间狭小,发生故障时,往往伴随柜体燃弧、起火。若不能及时切除故障,弧光迅速蔓延会带来严重的经济和财产损失。传统的中低压开关柜一般无专门的保护,柜内发生故障时大多依靠带延时的变压器低压侧后备保护来切除故障,延时较长,设备损伤较大,恢复供电周期较长。弧光保护以发生故障时的弧光检测为主要依据,同时结合故障电流判据,可快速切除开关柜内短路故障。由于响应快,动作可靠,弧光保护在许多中低压开关柜得到使用<sup>[1-2]</sup>。

弧光保护装置能否及时、快速地检测并切除故

障,很大程度上取决于弧光传感器性能的好坏<sup>[3-5]</sup>。由于无源传感器在传感器损坏或者弧光传感器光纤断裂时,保护装置无法感知故障信号并及时发出告警信息,对装置的可靠运行带来隐患。所以有必要对传感器自检技术进行完善。

## 1 弧光传感器自检技术方案

### 1.1 弧光采集回路自检方案设计

弧光传感器一般安装在开关柜母线室和断路器室。无源式弧光传感器通过光敏物质采集弧光信号,并通过传输光纤将信号传输给保护装置,弧光信号采集如图1所示。由于传感器处于较封闭的环境,假如传感器损坏或传输光纤断裂,保护装置采集到的信号并未有大的变化,发生故障时,保护装置将不能采集到正确的弧光信号而导致装置拒动。

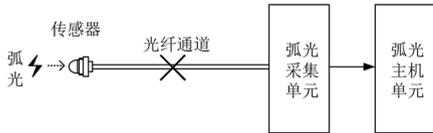


图1 弧光信号采集

为实现弧光传输通道实时自检,设计了基于分光原理的弧光采集回路自检方法,如图2所示。通过弧光采集单元实时发送幅值、脉宽均可调制的脉冲光,然后叠加在弧光传输通道中。脉冲光信号经传感器透镜反射后经弧光采集单元发送给主机单元。主机单元实时检索叠加在传感器采样信号中的脉冲光,并与预设的脉冲光特性参数比较从而判断弧光传输通道是否完好。

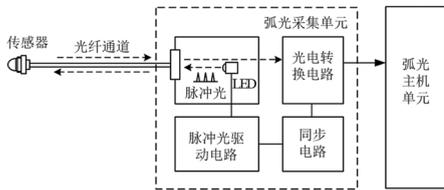


图2 弧光通道自检方案

LED 脉冲光发射光源在驱动电路驱动下,发出周期、脉宽均可调制的脉冲光。脉冲光经聚光透镜耦合在弧光传输光纤中。在弧光传感器玻璃球面内反射膜的作用下,脉冲光信号重新通过传输光纤返回至采集单元。主机单元接收到光信号后进行数据处理,如若能收到脉冲光源发出的光脉冲信号,则可说明光纤通道无损;反之,则说明传感器或光纤通道运行不正常,装置需及时发出报警信号提醒运行人员进行故障排查及检修。

弧光保护装置以是否接收到 LED 脉冲光源发出的光脉冲作为弧光通道是否正常工作的依据,所以光脉冲的检索是弧光通道自检技术的关键。弧光通道叠加脉冲光示意图如图3所示。

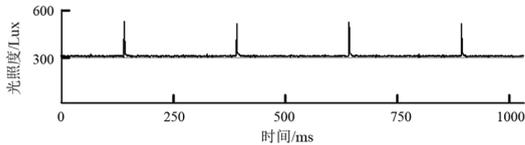


图3 弧光通道叠加脉冲光

为使计算值接近真实环境,将  $T$  时间内所有采样原始值求平均值计算得到背景光的计算公式为

$$L_{\text{base}}(n) = \frac{1}{k+1} \sum_{n-k}^n \{s_p(n)\} \quad (1)$$

式中: $s_p(n)$  为弧光采集数据原值; $L_{\text{base}}(n)$  为环境背景光强值。

由于光具有叠加性,装置在接收到 LED 光脉冲时,采样值根据脉冲信号强弱在背景光基础上有光

增量,根据光增量  $\Delta L$  的大小可以判断是否接收到脉冲信号,即

$$\Delta L = s_c(n) - L_{\text{base}}(n) > \Delta L_{\text{set}} \quad (2)$$

式中: $s_c(n)$  为滤波后的弧光采样值; $\Delta L_{\text{set}}$  为设定的光增量值。

当实时采样值的光增量大于预先设定的增量值,即可认为接受到 LED 光源发出的光脉冲。假定第 1 次接收到脉冲信号时间记为  $T_1$ ,再次接收到脉冲信号时间记为  $T_2$ ,根据两次接收到脉冲信号的时间间隔  $\Delta T$  与脉冲光源周期作比较,即可判断弧光通道是否完好。

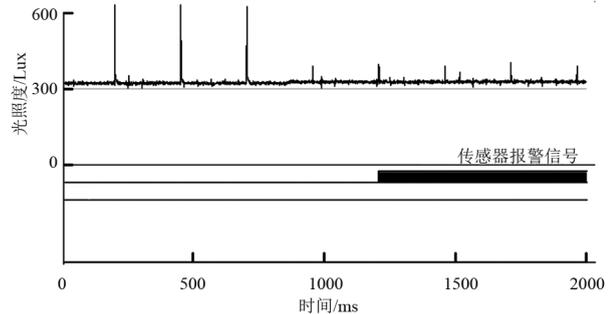


图4 弧光通道自检

图4为弧光通道自检示意。图中在 710 ms 时,人为剪短弧光传输光纤以模拟现场传输光纤损坏,弧光采集单元不能接受到返回的光脉冲信号,在 1210 ms 时,弧光传感器通道发出传感器异常报警信号,提示运检人员进行异常检修。

## 1.2 基于递归中值滤波算法的弧光信号处理

由于通道自检方案在弧光信号采集回路中人为叠加了幅值、脉宽均可调制的脉冲光,为防止脉冲光对保护装置的正常运行造成影响,需要在弧光采样信号参与逻辑运算之前将叠加的脉冲光滤除,从而保证弧光保护装置正常运行。下面使用递归中值滤波算法对弧光采样信号进行滤波<sup>[6]</sup>。

采样序列为  $\{x(n)\} (n=1,2,3,\dots)$ , 设中值窗长为  $l$  ( $l$  为奇数), 从中连续抽取  $l$  个数据:  $\{x(i-k), x(i-k+1), \dots, x(i-1), x(i), x(i+1), \dots, x(i+k-1), x(i+k)\}$ , 其中,  $k=(l-1)/2$ ,  $x(i)$  为位于窗口中心的数据。

中值滤波可表示为

$$y(i) = M_{\text{edian}} \{x(i-k), x(i-k+1), \dots, x(i-1), x(i), x(i+1), \dots, x(i+k-1), x(i+k)\} \quad (3)$$

式中: $M_{\text{edian}}$  为中值滤波函数; $y(i)$  为中值滤波结果。

将中值滤波的结果形成新的数列,并将该数列再次进行新的中值滤波,结果即为递归中值滤波,用公式表示为

$$y(i) = M_{\text{edian}} \{y(i-k), y(i-k+1), \dots, y(i-1), y(i), y(i+1), \dots, y(i+k-1), y(i+k)\} \quad (4)$$

递归中值滤波可以滤除脉冲宽度小于  $l/2$  的脉冲干扰,且对强度较大的脉冲噪声有一定的去噪能力。

为使脉冲光源不造成弧光装置误动,需满足式(5)。

$$T_h \leq kT_s \quad (5)$$

式中:  $T_h$  为 LED 光源发出的光脉冲脉宽;  $T_s$  为弧光信号采样周期。

引入可靠系数  $\lambda (\lambda \leq 1)$ , 即

$$T_h = \lambda k T_s \quad (6)$$

式(6)表明,只要光脉冲信号脉宽设定合理,弧光采样值在参与逻辑运算之前会通过中值滤波把光脉冲信号滤除,而不会对装置正常运行造成影响。

所设计的中值滤波窗长  $l=9$ , 则  $k=4$ 。可靠系数  $\lambda=0.8$ , 得到滤波前与滤波后的波形对比图如图 5 所示。

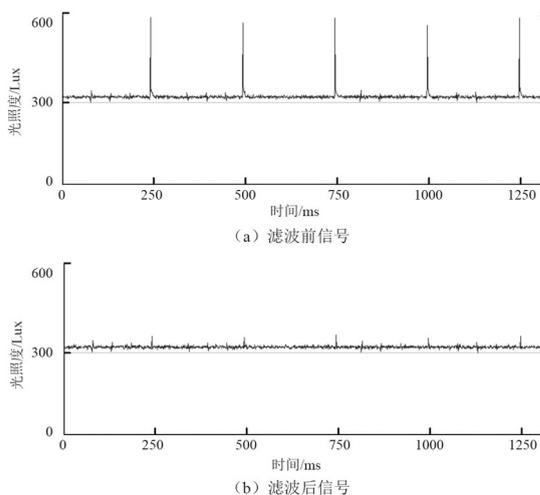


图 5 中值滤波前后波形对比

图 5 中,采样信号滤波前的尖峰为 LED 光源发出的光脉冲,经中值滤波后,脉冲信号被滤除,不会对弧光保护逻辑造成干扰。

### 1.3 脉冲光对环境背景光影响的误差估计

由于 LED 灯周期性地发射光脉冲,会对弧光保护装置采集到的背景光有所影响。设定光脉冲光强基于背景光的增量为  $\Delta L$ , 脉冲光周期为  $T_w$ , 脉宽为  $T_h$ , 弧光保护装置采样周期为  $T_s$ , 假定每隔  $T_w$  计算一次背景光, 据式(5)可得光脉冲对背景光的影响偏差为  $\Delta L_{\text{base}} = \frac{n_1 \Delta L}{n}$ ,  $n_1$  和  $n$  分别为  $T_w$  时刻内光脉冲信号采样个数和总采样个数。定义光脉冲的影响百分比  $\delta = \frac{\Delta L_{\text{base}}}{L_{\text{base}}} = \frac{n_1 \Delta L}{n L_{\text{base}}}$ , 由于  $n_1 = \frac{T_h}{T_s}$  和

$$n = \frac{T_w}{T_s}, \text{ 可得}$$

$$\delta = \frac{T_h \Delta L}{T_w L_{\text{base}}} \quad (7)$$

假定弧光传感器所处环境的背景光和光脉冲基于环境光的增量大致相等时,脉冲光对背景光的影响百分比为脉冲光脉宽和周期的比值。文中计算得到  $\delta$  值为 0.024%, 可见,光脉冲信号对背景光的影响可忽略不计。

## 2 系统设计与实验

### 2.1 系统构成

弧光保护系统如图 6 所示,由弧光主机单元、弧光采集单元、弧光传感器以及光纤等组成<sup>[7-8]</sup>。

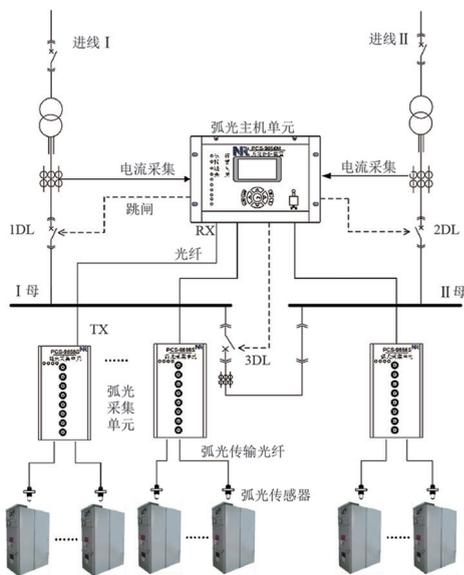


图 6 系统组成

弧光主机单元采集被保护母线的进线或分段电流。弧光传感器将采集到的弧光信号通过弧光传输光纤连接至弧光采集单元。弧光采集单元对光强信号进行采样,并将数据通过光纤传给主机单元。主机单元通过光强信号、电流信号进线逻辑判据选择跳开相应的开关。

### 2.2 工作原理

保护装置采用基于工频变化量原理的电气检测判据,当发生故障时,电流突变量大于设定门槛,电流判据满足,即

$$\Delta I_{\varphi\varphi} > K \Delta I_{\varphi\varphi\text{th}} + \Delta I_{\varphi\varphi\text{th}} \quad (8)$$

式中:  $\Delta I_{\varphi\varphi}$  为相电流变化量;  $\Delta I_{\varphi\varphi\text{th}}$  为浮动门槛,随着变化量输出增大而逐步自动提高;  $K$  为比例系数,保证浮动门槛始终大于不平衡输出;  $I_{\varphi\varphi\text{th}}$  为固定门槛,

需躲过正常负荷电流波动值最大值。弧光保护逻辑如图7所示。

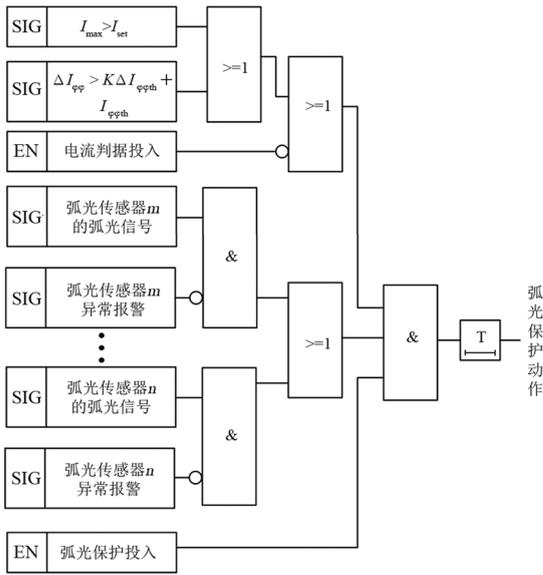


图7 弧光保护逻辑

### 2.3 实验结果

基于以上理论基础开发的弧光保护装置<sup>[9-11]</sup>,在模拟弧光故障时记录的波形如图8所示。

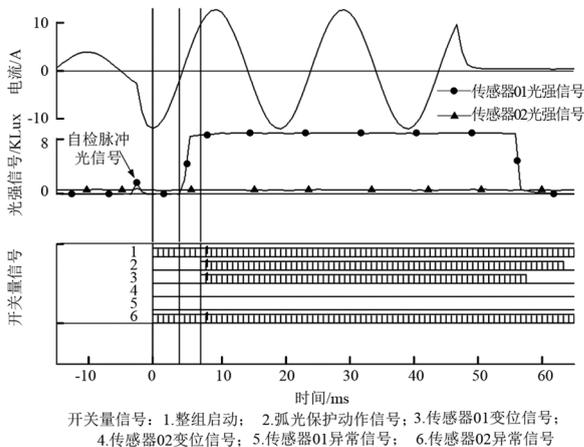


图8 故障录波

在图8中,0 ms时由于电流突变到达设定门槛,整组启动。4 ms时发生弧光故障,7 ms时弧光信号标志位变位,同时弧光保护动作。假定机构动作时间30~40 ms,可保证在50 ms内切除故障,有效防止弧光故障对人员和设备造成损伤。

模拟两路弧光信号:弧光传感器01可以接收到自检脉冲光,且故障时可以接收到弧光信号,该传感器异常信号为0;传感器02接收不到自检脉冲光,故障时也无法接收到弧光信号,故该传感器异常信号为1;发生故障的传感器异常时,不影响其他传感器正常工作。经实验,传感器02异常,传感器01正常,在采集到弧光信号时,依然可以正确动作。

## 3 结论

前面介绍了电弧光保护弧光传感器通道自检的原理和方法。该方法可消除因弧光传感器损坏而导致装置拒动的隐患,提高整个系统可靠运行的能力。基于所提通道自检技术的电弧光保护装置已在多个厂站投入使用,运行结果表明,该保护能为中低压开关柜提供有效、可靠的保护方案。

### 参考文献

- [1] 张喜玲,杨慧霞,蒋冠前. 弧光保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(14):130-135.
- [2] 李立生,李建修,邵志敏,等. 基于光纤传感的电弧光保护技术在智能电网中的应用[J]. 低压电器,2012(20):11-14.
- [3] Marcia L Eblen, Tom A Short, Tom A Short. Medium-Voltage Arc Flash in Switchgear and Live-Front Transformers [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6):5280-5288.
- [4] S A Saleh, A S Aljankawey, R Errouissi. Phase-based Digital Protection for Arc Flash Faults [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3):2110-2121.
- [5] Jay Prigmore, John S Schaffer. Triggered Current Limiters—Their Arc Flash Mitigation and Damage Limitation Capabilities [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2):1114-1122.
- [6] 王寅,潘佩芳,孔凡坊,等. 基于递归中值滤波的暂态能量方向元件仿真分析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(7):29-31,41.
- [7] 李从飞,陈凡,鲁雅斌,等. DPR360ARC弧光保护系统设计[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(12):125-128.
- [8] 万山景,王坚,张梓望. 电弧光保护系统配置方案探讨[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(16):99-103.
- [9] 张杰,马宏伟. 矿用高压开关柜的弧光监测与保护系统[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(11):141-145.
- [10] 骆明峰,陈为,刘明明,等. 配电开关柜短路燃弧故障检测与保护装置[J]. 电器与能效管理技术,2015(7):21-24.
- [11] 薛瑞,高雄翔,卞连兵,等. 电弧光保护装置在煤矿高压开关柜中的应用[J]. 煤矿机电,2016(5):86-88.

### 作者简介:

王杰(1984),男,硕士,工程师,主要从事低压设备继电保护开发工作。

(收稿日期:2021-05-18)

# 电流互感器位置与死区故障保护动作行为分析

王利平<sup>1</sup>,程浪<sup>2</sup>,胡杨<sup>2</sup>

(1.国网四川省电力公司,四川成都 610041;

2.国网四川省电力公司检修公司,四川成都 610041)

**摘要:**文中对电流互感器(CT)在不同安装位置发生位于断路器与CT之间的故障进行了保护的动作为行为分析。同时分析了死区故障时,断路器失灵保护和死区保护的逻辑,梳理了四川电网220 kV以上断路器CT安装位置的现状,并提出为了保障系统稳定应严格按照反事故措施要求将CT在断路器两侧布置的建议。

**关键词:**电流互感器;安装位置;死区保护;断路器失灵保护

中图分类号:TM 774 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2022)01-0040-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220109

## Action Behavior Analysis of Current Transformer Position and Dead-zone Fault Protection

WANG Liping<sup>1</sup>, CHENG Lang<sup>2</sup>, HU Yang<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:**The action behavior of the protection is analyzed when current transformer (CT) is installed in different positions in case that the fault point is between the circuit breaker and the CT. If the action behavior could not remove the fault reliably, the range of outage would be extended. At the same time, in the case of a dead-zone fault, the action logics of the failure protection of circuit breaker and the dead-zone protection are analyzed. The current situation of the installation locations of CT of 220 kV circuit breaker and above in Sichuan power grid is summarized, and based on the existing researches, the suggestions are proposed that the CT should be arranged on both sides of circuit breaker strictly in accordance with the requirements of anti-accident measures.

**Key words:** current transformer; installation position; dead-zone protection; failure protection of circuit breaker

## 0 引言

电力系统继电保护是电网安全稳定运行的第一道防线,要求能够有选择性地快速切除故障。继电保护装置的电气量保护主要是通过电流互感器(current transformer, CT)感知故障,由保护逻辑运算动作出口并驱动断路器隔离故障的。继电保护装置的保护范围与电流电压互感器的安装位置密切相关。若电流互感器安装位置不当时,可能导致断路器与电流互感器之间产生死区,造成相关元件主保护无法动作,应充分考虑合理的电流互感器配置和二次绕组分配,消除主保护死区,如存在保护死区,则应根据电网的需要配置死区保护或断路器失灵保

护切除故障<sup>[1-2]</sup>。由于一次接线原因,CT死区发生故障必然会扩大事故停电范围。根据四川电网的实际情况,对220 kV及以上电压等级常见的双母线和3/2接线方式的电流互感器位置和死区故障的保护动作为进行了统计分析,得出了关于保护死区与CT安装位置之间的相联性的结论。这里所描述的CT均为保护用CT。

## 1 CT安装位置对保护行为的影响

在变电站中,CT通常相邻断路器安装,有的安装在断路器两侧(常见于GIS设备),有的安装在断路器某一侧(常见于户外敞开式设备),断路器与CT之间通过导体连接,距离有长有短,有一定的概

率发生故障。

### 1.1 CT 双侧安装

当 CT 双侧安装时,为防止部分一次设备失去主保护,绕组应交叉接入保护装置,使得断路器所在元件的保护范围交叉重叠。双母线接线形式的支路和母联断路器 CT 双侧安装分别如图 1、图 2 所示,3/2 接线形式的 CT 双侧安装如图 3 所示。

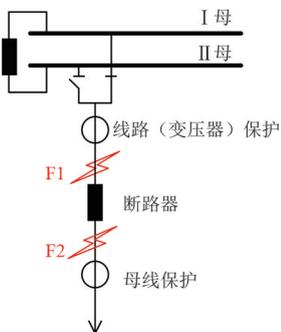


图 1 双母线接线的支路 CT 双侧安装

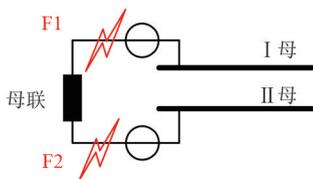


图 2 双母线接线的母联断路器 CT 双侧安装

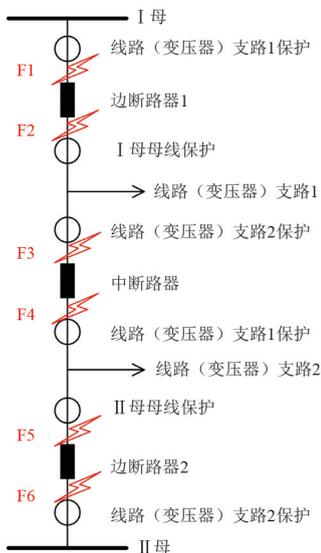


图 3 3/2 接线的 CT 双侧安装

图 1 中的两组 CT 之间的区域实际上是同时处于母线保护和线路(变压器)保护的主保护范围之内。若 F1 或 F2 发生故障时,母线保护和线路(变压器)主保护将同时动作,跳开相应的断路器。按照保护的选择性要求,当 F2 故障时应只跳开线路(变压器),而不应切除母线。母线保护和线路(变压器)保护同时动作实际上是扩大了事故停电范

围。图 2 中的母联断路器两组 CT 之间的区域实际上是同时处于两段母线的差动保护范围之内。若 F1 或 F2 发生故障时,两段母线将被同时切除,同样扩大了事故停电范围。同理,图 3 所示的 3/2 接线串上断路器和 CT 之间发生故障时仍会扩大事故停电范围。

### 1.2 CT 单侧安装

对于双母线接线的线路(变压器)支路,CT 可以单侧安装在断路器的母线侧,也可以安装在非母线侧,如图 4 所示。当 CT 安装在母线侧时,如 F1 发生故障,故障点位于线路(变压器)保护范围内、母线保护范围外,则线路(变压器)主保护动作跳开断路器但故障仍然存在时,需依靠母线保护中的支路失灵保护延时动作,切除该支路所在母线。当 CT 安装在非母线侧时,如 F2 发生故障,故障点位于母线保护范围内、线路(变压器)保护范围外时,则母线主保护动作跳开断路器,同时通过“其他保护动作”开入远跳对侧断路器将故障点切除。但同时扩大了事故停电范围(母线停电)。

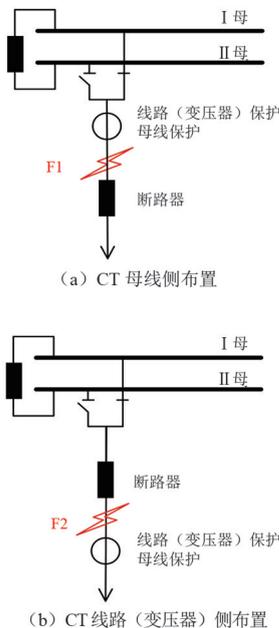


图 4 双母线接线的支路 CT 单侧安装

对于双母线接线的母联 CT,可单侧安装在母联断路器的靠 I 母侧或靠 II 母侧,如图 5 所示。当 CT 安装在靠 I 母侧时,如 F1 发生故障,该故障点位于 II 母线的差动保护范围内,母线保护的 II 母小差动作跳开母联(分段)断路器和 II 母上的运行支路,但故障点仍然存在于 I 母上,需依靠母线保护中的母联失灵保护延时动作跳开 I 母上的运行支路,才能

切除故障。同理,可分析当 CT 安装在靠 II 母侧时,在 F2 发生故障的情形。

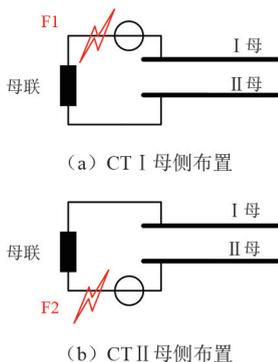


图 5 双母线接线的母联断路器 CT 单侧安装

对于 3/2 接线的边断路器,CT 可以单侧安装在断路器的母线侧,也可以安装在非母线侧(靠中断路器侧),如图 6 所示。存在的问题和双母线接线的线路(变压器)支路是相同的。

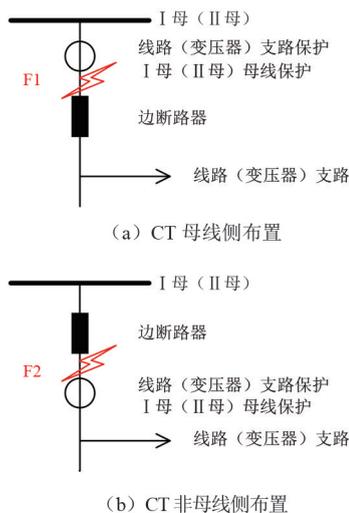


图 6 3/2 接线的边断路器 CT 单侧安装

对于 3/2 接线的中断路器,CT 单侧安装时(如图 7 所示),当 F3 发生故障,故障点在支路 2 的保护范围内,线路(变压器)支路 2 主保护动作,跳开中断路器和边断路器 2,但故障点仍然存在,需依靠断路器死区保护延时动作跳开边断路器 1 和线路(变压器)支路 1 对侧断路器以隔离故障,同时扩大了停电范围(线路(变压器)支路 1、支路 2 均停电)。同理,可分析当 F4 发生故障时的情形。

### 1.3 小结

由于断路器和 CT 之间总存在电气距离,存在发生故障的概率,当 CT 布置在断路器两侧时,断路器两侧元件主保护的保护区在 CT 和断路器之间

交叉重叠,在该区域发生故障时,两侧元件的主保护同时快速动作,直接将故障点隔离;当 CT 布置在断路器一侧时,保护区覆盖该故障点的主保护动作后并不能切除故障,需要依靠断路器失灵保护、死区保护动作或其他保护动作远跳对侧的方式,切除相邻元件后才能隔离故障点。

可见,无论 CT 安装在哪个位置,为了可靠切除故障,保护会将非故障元件切除,扩大停电范围。

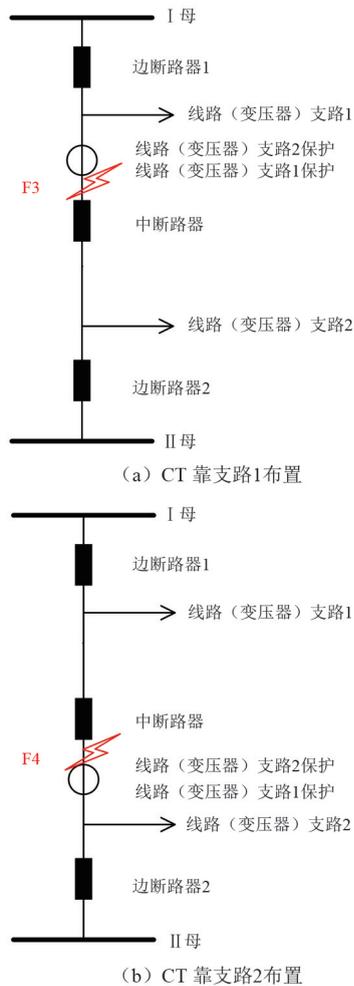


图 7 3/2 接线的中断路器 CT 单侧安装

## 2 相关保护的动作为分析

在 220 kV 及以上电压等级的变电站内,受 CT 安装位置影响的保护主要有差动保护、断路器失灵保护、断路器死区保护等,其中差动保护主要包括母线差动保护、主变压器差动保护及线路差动保护。

### 2.1 常见差动保护逻辑

常见的母线差动保护动作原理为若母线保护各间隔电流满足启动条件:

$$\begin{cases} \Delta I_{r_m} > \Delta I_{dset_m} \\ I_{d_m} > I_{dset_m} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta I_{r_m}$ 为制动电流的突变量; $\Delta I_{dset_m}$ 为制动电流突变量门槛值; $I_{d_m}$ 为母线差动电流; $I_{dset_m}$ 为差动电流启动整定值。即当任一相的合电流突变量大于突变量门坎或当任一相的差电流大于差电流门坎定值时,保护启动。同时满足动作条件后,母线保护动作,其动作方程为

$$\begin{cases} I_{d_m} > I_{dset_m} \\ I_{d_m} > K_{r_m} \times (I_{r_m} - I_{d_m}) \end{cases}$$

其中,

$$\begin{cases} I_{r_m} = \sum_{j=1}^n |I_j| \\ I_{d_m} = \left| \sum_{j=1}^n I_j \right| \end{cases} \quad (2)$$

式中: $n$ 为支路数量; $I_j$ 为母线第 $j$ 支路电流, $j=1, 2, \dots, n$ ;  $K_{r_m}$ 为比率制动系数。

此外,220 kV 母线差动保护动作需经复合电压元件动作才能出口跳闸,其方程为

$$\begin{cases} U_a \leq U_{set} \text{ 或 } U_b \leq U_{set} \text{ 或 } U_c \leq U_{set} \\ 3U_0 \geq U_{0set} \\ U_2 \geq U_{2set} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 分别为母线三相电压; $U_0$ 、 $U_2$ 分别为母线零序电压和负序电压; $U_{set}$ 、 $U_{0set}$ 、 $U_{2set}$ 分别为母线相电压、零序电压、负序电压、复合电压闭锁整定值。3个判据中的任何一个被满足,该段母线的复合电压元件动作。

常见的线路差动保护动作判据为

$$\begin{cases} I_{CD\varphi} > 0.6 \times I_{R\varphi} \\ I_{CD\varphi} > I_H \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\varphi$ 为相别,即A、B、C三相; $I_{CD\varphi}$ 为 $\varphi$ 相线路差动电流,即为线路两侧电流矢量和的幅值; $I_{R\varphi}$ 为 $\varphi$ 相线路制动电流,即为两侧电流矢量差的幅值; $I_H$ 为动作门槛值。当电容电流补偿投入时, $I_H$ 为1.5倍差动电流定值和1.5倍实测电容电流两者间的最大值;当电容电流补偿不投入时, $I_H$ 为1.5倍差动电流定值和4倍实测电容电流两者间的最大值。

常见主变压器差动保护则主要采用比率差动动作方程,其方程为

$$\begin{cases} I_d > I_{cdqd}, I_r \leq I_e \\ I_d > 0.5 \times (I_r - I_e) + I_{cdqd}, I_e < I_r \leq 6I_e \\ I_d > 0.75 \times (I_r - 6I_e) + 0.5 \times \\ ((6I_e - I_e) + I_{cdqd}, I_r > 6I_e \end{cases} \quad (5)$$

式中: $I_{cdqd}$ 为差动保护启动定值; $I_d$ 为变压器差动电流, $I_d = \left| \sum_{i=1}^k \dot{i}_i \right|$ ;  $I_r$ 为制动电流, $I_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k | \dot{i}_i |$ ,  $k$ 为变压器各侧CT支路数, $\dot{i}_i$ 为第 $i$ 侧电流, $i=1, 2, \dots, k$ ;  $I_e$ 为额定电流。

差动保护的逻辑动作原理,使得其差动保护范围被严格限制在其所接各CT绕组安装位置之内,即会导致差动保护范围交叉重叠和保护死区的情况发生。

## 2.2 断路器失灵保护的动作为分析

部分CT单侧安装产生的保护死区发生故障时,主保护动作跳开了相应的断路器,但CT仍然能感受到故障电流,这和断路器失灵时的现象是相似的,因此可以依靠断路器失灵保护来最终切除故障。断路器失灵保护是断路器拒动时断开与故障元件相连的所有其它连接电源的断路器的近后备保护,是母线保护装置和断路器保护装置的重要功能。断路器失灵保护一般是指故障电气设备的继电保护动作发出跳闸命令而断路器拒动时,利用故障设备的保护动作信息与拒动断路器的电流信息构成对断路器失灵的判别,能够以较短的时限切除其他有关的断路器,使停电范围限制在最小。

双母线接线的断路器失灵保护功能是在母线保护装置中实现的。当保护装置收到故障线路(主变压器)支路的启动失灵开入后,同时经失灵电流定值判断、母线电压闭锁开放等条件,延时动作跳开故障支路所在母线的全部支路断路器、母联(分段)断路器等,实现故障点的隔离。此外,双母线接线的母线保护装置还能实现联跳主变压器三侧的功能,即当母线保护动作跳主变压器支路而主变压器支路断路器拒动时,延时通过“主变压器失灵联跳”开入跳开主变压器三侧。线路支路采用相电流、零序电流(或负序电流)“与门”逻辑;变压器支路采用相电流、零序电流、负序电流“或门”逻辑<sup>[3]</sup>。

3/2接线的断路器失灵保护则是在断路器保护装置中实现的。3/2接线的断路器失灵保护无电压闭锁,对于线路保护分相跳闸开入和变压器、发变组、线路高压电抗器三相跳闸开入,应采取措施防止由于开入量异常而导致的失灵保护无法启动。任一相跳闸开入后,需经电流突变量或零序电流启动并展宽后启动失灵;三相跳闸开入后,不经电流突变量或零序电流启动失灵<sup>[4]</sup>。此外该接线方式下,其三

跳启动失灵还可经低功率因素辅助判据开放,低功率因素元件动作条件为

$$|\cos \theta| < \cos \theta_{zd} \quad (6)$$

式中: $\theta$ 为一相电压与电流的相角差测量值; $\theta_{zd}$ 为装置低功率因素角整定值。当装置整定为 $\theta_{zd}$ 时,低功率元件的动作范围为

$$\begin{cases} \theta_{zd} < \theta < 180^\circ - \theta_{zd} \\ 180^\circ + \theta_{zd} < \theta < 360^\circ - \theta_{zd} \end{cases} \quad (7)$$

当任一相电压低于 0.3 倍额定相电压时,低功率因素元件退出。

### 2.3 死区保护的動作行为分析

在断路器和 CT 的死区发生故障,若仅依靠断路器失灵保护来最终隔离故障点,动作时间较长,可能会造成系统失稳,因此应采取其他措施尽可能快速切除故障。目前主要通过断路器死区保护来实现改目的。

母联断路器的死区保护是母线保护装置中的功能之一。当双母线接线母联断路器和 CT 之间发生故障时,母联死区保护可以比母联失灵保护更快地切除故障。在双母线并列运行发生母联死区故障时,母线保护发出跳闸命令后,母联断路器跳开而母联 CT 仍有电流,且大差比率差动元件不返回,则判断母联 CT 发生死区故障,经 150 ms 延时后母联 CT 电流不计入小差计算<sup>[5]</sup>,通过合位死区故障动作,相继跳开两条母线。在双母线分列运行时(母联跳位继电位“TWJ”开入为“1”且母联分列运行压板投入),若母联 CT 无流,则经过 400 ms 短延时后,母联电流将不计入小差计算<sup>[5]</sup>。该方式下死区故障可实现快速有选择性的跳闸。若当双母线接线的母联断路器通过合闸操作对未带电母线进行充电时,检测到母联跳闸位置信号为“1”,且母联手合接点信号由“0”变“1”,则启动充电至死区保护闭锁母差保护。在大差差动电流起动开始的 300 ms 内,闭锁母差保护直接出口跳母联断路器<sup>[6]</sup>。

3/2 接线的断路器保护装置中也具有死区保护功能。保护装置的死区保护功能仅在断路器三相跳闸后,三相位置信号均为“1”时才启动。当断路器保护收到三相跳闸失灵启动信号和三相跳闸位置,并且最大相电流大于失灵保护相电流定值,则判断为死区故障。死区保护出口回路与失灵保护一致,但动作延时较失灵保护更短,即经较短延时切除其他有关断路器以隔离故障<sup>[7]</sup>。对于分相操作断路器,若死

区内发生单相接地故障且线路保护单相跳闸时,可以通过断路器失灵保护动作来隔离故障;也可以因保护跳闸后故障电流持续,导致单相跳闸失败引起线路保护三相跳闸。通过死区保护动作来隔离故障,具体哪一个保护动作隔离故障与“死区保护时间”和“失灵保护时间”定值有关。

## 3 四川电网保护 CT 安装位置现状

截至 2020 年 4 月,国网四川电力共运行有 220 kV 变电站 241 座,500 kV 变电站 52 座,共计 3575 个断路器。CT 安装位置统计情况详见表 1。由表 1 可以看出:1)按断路器结构来分,AIS 结构的断路器有 1860 个,保护用 CT 全部单侧安装;GIS 结构的断路器中有 846 个断路器的保护用 CT 双侧安装,869 个的保护用 CT 单侧安装。2)按电压等级来分,500 kV 电压等级的 3/2 接线有 349 个断路器保护用 CT 双侧安装,286 个断路器保护用 CT 单侧安装;220 kV 电压等级双母线(双母双分、双母单分)和桥接线等主接线有 497 个断路器保护用 CT 双侧安装,2443 个断路器保护用 CT 单侧安装。

表 1 不同开关结构的 CT 安装位置情况

变电站类型	CT 安装位置	断路器数量/台				
		AIS 结构	GIS 结构	500 kV	220 kV	合计
常规	双侧	0	612	273	339	612
	单侧	1836	415	267	1984	2251
智能	双侧	0	234	76	158	234
	单侧	24	454	19	459	478
常规+智能	双侧	0	846	349	497	846
	单侧	1860	869	286	2443	2729

从统计数据来看,国网四川电力 CT 单侧安装的情况仍占绝大多数。对于 500 kV 变电站,该情况下将导致故障不能快速切除,尤其是在四川个别 500 kV 站点,如果出现死区故障,将可能导致系统失稳。但随着近年来智能变电站和 GIS 站的不断投运,加之已对该类情况逐渐重视,CT 双侧布置情况日渐增多,500 kV 系统 CT 单侧布置的隐患得到改善。

## 4 结 论

上面对电流互感器在不同安装位置时的保护动作行为进行了分析,得出以下结论:

1)CT 在断路器双侧安装布置时,主保护能快速切除故障。  
(下转第 86 页)

# 分布式光伏储能系统的优化配置方法

彭伟<sup>1,2</sup>, 郑连清<sup>1</sup>, 郑天文<sup>2</sup>

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;

2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610213)

**摘要:** 光伏发电的随机性和间歇性导致资源利用率低, 储能具备控制灵活、响应快速的特性, 是当前解决光伏并网和提高消纳的有效手段之一。目前, 高昂投资成本是制约储能推广应用的关键, 文中从成本角度出发研究了分布式光伏系统中储能的优化配置方法。首先, 以分布式储能系统的投资和运行成本为目标, 同时考虑储能接入位置、配置容量、荷电状态和电网运行状态等为约束条件建立双层优化模型; 然后, 介绍优化模型求解方法, 外层采用遗传算法优化储能配置位置、功率和容量, 内层采用粒子群算法结合 MATPOWER 潮流计算工具优化储能日内运行策略; 最后, 在 Matlab 软件中采用 IEEE9 节点系统验证了优化配置方法的可行性和有效性。

**关键词:** 分布式光伏; 分布式储能; 优化配置; 遗传算法; 粒子群算法

**中图分类号:** TM 914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)01-0045-05

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20220110

## Optimal Configuration Method of Distributed Photovoltaic Energy Storage System

PENG Wei<sup>1,2</sup>, ZHENG Lianqing<sup>1</sup>, ZHENG Tianwen<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Sichuan Energy Internet Research Institute of Tsinghua University, Chengdu 610213, Sichuan, China)

**Abstract:** The randomness and intermittent nature of photovoltaic power generation lead to low resource utilization, and energy storage has the characteristics of flexible control and rapid response. It is currently one of the effective means to solve photovoltaic grid connection and improve consumption. At present, the high investment cost of energy storage is the key to restrict its promotion and application. Therefore, the optimal configuration method of energy storage in distributed photovoltaic systems is studied from the perspective of cost. Firstly, take the investment and operating cost of distributed energy storage system as the goal, a two-layer optimization model is established while considering the storage access location, configuration capacity, state of charge, and grid operation status as constraints. And then the optimization model solution method is introduced, that is, the outer layer uses genetic algorithm to optimize energy storage configuration location, power and capacity, and the inner layer uses particle swarm algorithm combined with MATPOWER power flow calculation tool to optimize the daily operation strategy of energy storage. Finally, the IEEE 9-node system is used in Matlab software to verify the feasibility and effectiveness of the proposed optimal configuration method.

**Key words:** distributed photovoltaic; distributed energy storage; optimal configuration; genetic algorithm; particle swarm algorithm

## 0 引言

随着化石能源危机与环境污染问题日益严重, 建设清洁低碳、安全高效的能源体系已是未来发展的必然趋势, 太阳能资源作为一种清洁可再生能源目前已广泛应用于分布式光伏发电系统<sup>[1]</sup>。

光伏发电的随机性和间歇性导致输出功率波动较大, 为电网的安全稳定运行带来严重挑战。同时随着需求侧负荷峰谷差增加, 负荷尖峰时刻供电问题更加凸显, 单纯的增加发电机备用容量不仅投资费用昂贵而且设备资源利用率低。储能具有功率快速控制、能量灵活吞吐的特性, 是当前解决光伏并网和消纳的有效手段之一<sup>[2]</sup>。目前储能投资费用是

制约其推广应用的关键,因此研究储能的优化配置对于提高光伏消纳、电网稳定和系统经济效益都具有重要意义。

目前,国内外许多学者对此课题进行了广泛研究,储能优化配置方法主要有差额补充法、波动平抑分析法和经济性评估法。1) 差额补充法:文献[3]介绍了在光伏-储能系统中利用光伏发电系统的最小日发电量与其在雨雪等极端天气下的发电量差额作为储能的配置容量;文献[4]根据风速概率密度计算风电场输出功率期望值作为风电场平均功率水平,用实际输出功率和该平均功率的差额确定储能的补偿容量,可实现风电场的定功率输出,但储能容量相对要大一些。2) 波动平抑分析法:文献[5]介绍了一种基于平滑控制的超级电容与电池混合储能系统的能量管理方法;文献[6]提出了一种用于控制微电网联络线功率输出的储能系统容量优化方法;文献[7]通过 BESS 所需补偿特定频段来确定其功率容量,但补偿频段的选取仅限于 0.01~1 Hz 之间,适应性不强,且没有给出储能系统容量确定方法。3) 经济评估法:文献[8]介绍了储能配置在光伏发电侧从减小脱网考核、限电考核和功率控制子站投运率考核等几方面衡量储能的经济效益;文献[9]以并网分布式光伏储能系统作为研究对象,配置储能后系统运行最小电力花费为目标;文献[10-11]针对储能系统利用分时电价峰谷价差套利、参与辅助服务、替代备用电源等,建立了系统收益目标函数,使配置储能后系统收益最大。

已有的储能优化配置研究中经济评估法使用较少,且研究对象多为单一分布式电源中配置储能。因此,考虑在分布式光伏储能系统中针对多个分布式源配置储能建立双层优化模型,外层采用遗传算法优化储能配置位置、功率和容量,内层采用粒子群算法结合 MATPOWER<sup>[12]</sup>潮流计算工具优化储能日内运行策略使系统总成本最小;最后,在 Matlab 软件中采用改进 IEEE9 节点系统验证了优化配置方法的可行性和有效性。

## 1 分布式储能系统优化配置模型

考虑在分布式光伏储能系统中针对多个分布式电源配置储能,采用经济评估法对不同储能配置方案进行评价,最终取经济性最佳方案作为储能最优配置方案。

### 1.1 目标函数

取储能系统年总成本作为目标函数,主要包括电网网损费用、分布式电源提供的无功功率费用、储能充放电费用以及储能成本费用,具体公式如式(1)所示。

$$F = C_{\text{LOSS}} + C_{\text{DG}} + C_{\text{PB}} + C_{\text{DESS}} \quad (1)$$

式中: $F$ 为储能系统年总成本; $C_{\text{LOSS}}$ 为网损费用; $C_{\text{DG}}$ 为分布式电源提供的无功功率费用; $C_{\text{PB}}$ 为储能充放电费用; $C_{\text{DESS}}$ 为储能成本费用。

$$C_{\text{LOSS}} = \sum_1^T \sum_1^{24} P_{\text{LOSS}}(i) \cdot \Delta t \cdot R(i) \quad (2)$$

式中: $P_{\text{LOSS}}(i)$ 为采样时刻电网损耗功率; $\Delta t$ 为系统采样时间间隔; $R(i)$ 为分时电价; $T$ 为一年内储能系统运行天数。

$$C_{\text{DG}} = 0.03 \sum_1^T \sum_1^{24} P_{\text{dg}}(i) \cdot \Delta t \cdot R(i) \quad (3)$$

式中, $P_{\text{dg}}(i)$ 为采样时刻分布式电源提供的无功功率。

$$C_{\text{PB}} = \sum_1^T \sum_1^{24} \{P_{\text{ch}}(i) - P_{\text{dis}}(i)\} \cdot \Delta t \cdot R(i) \quad (4)$$

式中: $P_{\text{ch}}(i)$ 为采样时刻储能电池的充电功率; $P_{\text{dis}}(i)$ 为放电功率。

$$C_{\text{DESS}} = C_{\text{BESS}} + C_{\text{M}} \quad (5)$$

式中: $C_{\text{BESS}}$ 为储能系统投资建设费用; $C_{\text{M}}$ 为储能运行维护费用。

$$C_{\text{BESS}} = \sum_1^m (C_{\text{p}} \cdot P_{\text{bess}} + C_{\text{E}} \cdot E_{\text{bess}}) \cdot \frac{r}{(1+r)^n - 1} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{bess}}$ 为储能配置功率; $E_{\text{bess}}$ 为配置容量; $C_{\text{p}}$ 为储能单位功率成本; $C_{\text{E}}$ 为储能单位容量成本; $r$ 为贴现率; $n$ 为储能系统寿命年限; $m$ 为储能安装个数。

$$C_{\text{M}} = C_{\text{m}} Q \quad (7)$$

式中: $C_{\text{m}}$ 为单位发电量储能运行维护成本; $Q$ 为储能装置年发电量。

### 1.2 约束条件

约束条件考虑了电网安全性和储能系统运行稳定性,具体包括:电网节点功率平衡约束、分布式电源出力约束、节点电压幅值约束、支路有功功率约束、储能系统充放电功率约束以及荷电状态约束等。

#### 1) 节点功率平衡

$$P_{\text{u}} = U_{\text{u}} \sum_{j=1}^N U_{\text{j}} [G_{\text{ij}} \cos(\delta_{\text{u}} - \delta_{\text{j}}) + B_{\text{ij}} \sin(\delta_{\text{u}} - \delta_{\text{j}})] \quad (8)$$

$$Q_{\text{u}} = U_{\text{u}} \sum_{j=1}^N U_{\text{j}} [G_{\text{ij}} \sin(\delta_{\text{u}} - \delta_{\text{j}}) - B_{\text{ij}} \cos(\delta_{\text{u}} - \delta_{\text{j}})] \quad (9)$$

式中: $P_{it}$ 、 $Q_{it}$ 分别为 $t$ 时刻电网节点 $i$ 的注入有功功率和无功功率; $U_{it}$ 、 $U_{jt}$ 分别为 $t$ 时刻节点 $i$ 、 $j$ 的电压; $\delta_{it}$ 、 $\delta_{jt}$ 分别为 $t$ 时刻节点 $i$ 、 $j$ 的相角; $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 分别为节点导纳矩阵第 $i$ 行 $j$ 列的实部和虚部; $N$ 为节点总数。

### 2) 发电机出力约束

$$P_{r,\min} \leq P_{G,r,t} \leq P_{r,\max} \quad (10)$$

式中, $P_{r,\min}$ 、 $P_{r,\max}$ 和 $P_{G,r,t}$ 分别为第 $r$ 个分布式电源的最小、最大出力和 $t$ 时刻第 $r$ 个电源的实际出力。

### 3) 节点电压约束

$$U_{i,\min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,\max} \quad (11)$$

式中, $U_{r,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 和 $U_{i,t}$ 分别为节点 $i$ 所允许的最低、最高电压和 $t$ 时刻节点 $i$ 实际电压。

### 4) 支路有功约束

$$-P_{l,\max} \leq P_{l,t} \leq P_{l,\max} \quad (12)$$

式中: $P_{l,\max}$ 为支路 $l$ 的最大有功功率; $P_{l,t}$ 为支路 $l$ 在 $t$ 时刻的实际有功功率。

### 5) 储能荷电状态连续性约束

$$S_{oc,x,t} = S_{oc,x,0} + \frac{\sum_{h=1}^t \left( P_{ch,x} \eta_{e,x} - \frac{P_{dis,x}}{\eta_{d,x}} \right) \Delta T}{E_{bess,x}} \quad (13)$$

式中: $S_{oc,x,0}$ 和 $S_{oc,x,t}$ 分别为储能系统 $x$ 的初始时刻和 $t$ 时刻的荷电状态; $P_{ch,x}$ 和 $P_{dis,x}$ 分别为储能系统 $x$ 的充放电功率; $\eta_{e,x}$ 和 $\eta_{d,x}$ 分别为储能系统 $x$ 的充放电效率; $E_{bess,x}$ 为储能系统 $x$ 的额定容量。

### 6) 储能荷电状态约束

$$S_{oc,\min} \leq S_{oc}(i) \leq S_{oc,\max} \quad (14)$$

式中, $S_{oc,\min}$ 和 $S_{oc,\max}$ 分别为储能系统 $x$ 的最小和最大荷电状态。

### 7) 储能系统功率约束

$$P_{DESS,i,t} = x_i (P_{dis,i,t} - P_{ch,i,t}) \quad (15)$$

式中: $P_{DESS,i,t}$ 为节点 $i$ 处储能能在 $t$ 时刻的实际充放电功率; $x_i$ 为0—1状态变量,1表示电网第 $i$ 个节点位置接入储能,反之未接入; $P_{dis,i,t}$ 为节点 $i$ 储能 $t$ 时刻放电功率; $P_{ch,i,t}$ 为节点 $i$ 储能 $t$ 时刻充电功率。

### 8) 储能系统充放电功率约束

$$-P_{bess} \leq P_{dis,i,t} \leq P_{bess} \quad (16)$$

$$-P_{bess} \leq P_{ch,i,t} \leq P_{bess} \quad (17)$$

式中, $P_{bess}$ 为第 $i$ 个节点接入储能的额定功率。

## 2 储能优化配置求解方法

### 2.1 求解流程

分布式储能优化配置是一个多目标非线性整数规划问题,包括确定储能接入位置、功率、容量以及

运行策略等。将单层多目标优化问题转换为双层优化来求解,可以很大程度降低求解复杂程度。因此,建立双层优化模型:外层优化目标为储能系统接入位置、功率和容量,以上技术参数为离散整数形式,适合采用遗传算法基因编码优化求解;内层优化目标为储能系统成本,在外层给出确定的储能参数后,内层采用粒子群算法结合MATPOWER潮流计算工具,优化储能系统的运行策略,使储能系统在该种配置下总成本最小;然后,将内层优化结果反馈回外层进行遗传算法的选择、交叉和变异运算,通过反复迭代比较确定可行域内储能最优配置和运行策略。具体求解过程如储能优化配置流程图1所示。

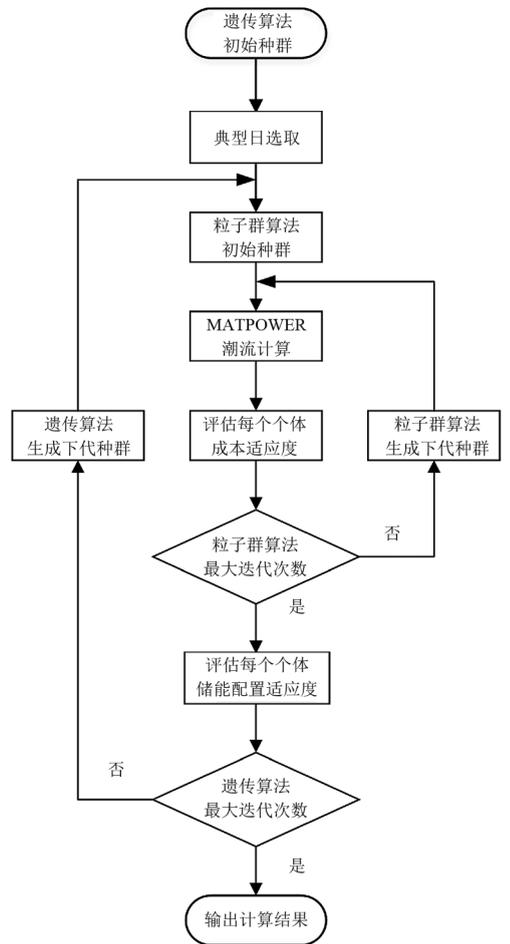


图1 储能优化配置流程

### 2.2 遗传算法

遗传算法(genetic algorithm, GA)是模拟自然界生物进化机制的一种算法。首先,需要通过编码建立一个初始种群;然后,运用遗传操作对种群中每个个体对环境的适应程度进行操作,实现优胜劣汰的进化过程。

种群中的个体编码信息包含影响目标函数的决策变量,类似于决定生物特性的基因,同时遗传算法

中个体信息采用二进制编码,适合于表示离散整数变量。文中的种群个体信息包含储能接入位置、功率和容量等信息。

遗传算法的目标函数为  $F$ , 在确定种群后每个个体将信息传递给内层优化, 通过粒子群算法得到的优化结果即为该遗传个体的适应度。根据每个个体的适应度筛选出优质个体保留到下一代, 直至求得最优解。其中遗传操作主要包括选择算子, 交叉算子和变异算子。

### 2.3 粒子群算法

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 也是一种进化算法, 适用于解决连续非线性问题。它是从随机解出发, 通过迭代寻求最优解。优化问题的每个潜在解都可以看作一个粒子, 每个粒子都有一个适应度 (fitness), 由自身参数和与目标函数映射关系决定; 粒子包含速度和位置两个参数, 前者决定粒子飞行的速度和方向, 后者表示目标的一种潜在解。采用线性递减权重控制策略 (linearly decreasing weight, LDW), 能够有效提高算法寻优速度, 具体公式如下:

$$v_{ij,k+1} = \omega v_{ij,k} + c_1 r_1 (p_{bij,k} - x_{ij,k}) + c_2 r_2 (g_{bj,k} - x_{ij,k}) \quad (18)$$

$$\omega = \frac{(\omega_{ini} - \omega_{end}) \cdot (k_{max} - k)}{k_{max}} + \omega_{end} \quad (19)$$

$$x_{ij,k+1} = x_{ij,k} + v_{ij,k+1} \quad (20)$$

式中:  $i$  为第  $i$  个粒子;  $j$  为粒子的维度;  $k$  为迭代次数;  $\omega$  为权重系数;  $p_{bi}$  为个体极值;  $g_b$  为全局极值;  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子;  $r_1$ 、 $r_2$  为  $0 \sim 1$  之间的随机数;  $\omega_{ini}$  为初始权重;  $\omega_{end}$  为迭代至最大进化代数时的权重;  $x_{ij}$  为粒子的位置。

在外层优化给定储能接入位置、功率和容量后, 内层首先随机产生各采样时刻储能的充放电功率; 然后, 根据储能荷电状态连续性约束进行功率修正并得到单个个体日内运行策略; 最后, 利用粒子群优化算法结合 MATPOWER 潮流计算工具通过多次迭代寻优求得当前给定配置下储能系统的最优日内运行策略。

## 3 算例分析

### 3.1 参数配置

选取改进 IEEE 9 节点系统作为仿真测试算例, 图 2 为系统电气接线图, 其中 2 号、3 号节点分别接入最大出力为 16.5 MW 和 8.3 MW 的光伏发电

系统, 1 号节点为系统平衡节点且接有装机容量为 30 MW 的常规发电机组, 5 号、7 号和 9 号节点处接入负荷。

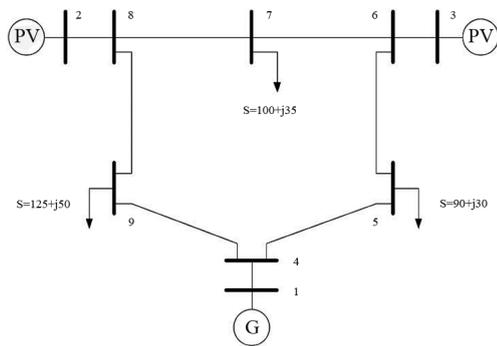


图 2 IEEE 9 节点电气接线

现考虑在 1—9 号节点中最多选取 2 个位置配置储能, 储能额定功率可选 4.0、6.0、8.0、10.0 MW, 额定容量可选 4~50 MWh。

图 3 为 2 号光伏发电系统某典型日出力曲线图, 其中采样时间间隔为 1 h。为简化计算, 3 号光伏发电系统各时刻出力取为 2 号光伏发电系统同时刻出力的 0.5 倍。

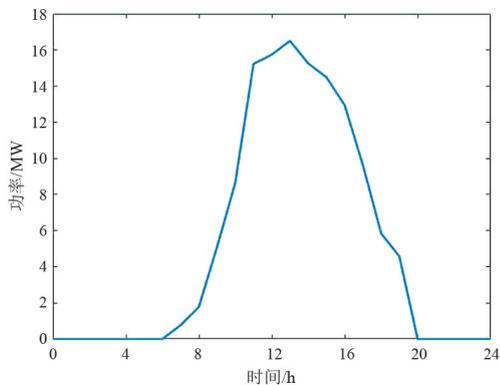


图 3 光伏出力曲线

选取中国某地区分时电能表, 其峰谷电价执行时段和具体价格如表 1 所示。储能电池选择综合性能较好的锂离子电池, 它支持深度充放电, 在 80% 的放电深度情况下循环寿命可达 3000 次以上, 仿真相关参数选取如表 2 所示<sup>[13-16]</sup>。

表 1 分时电价

分段时间	价格/(元/kWh)
00:00—08:00	0.25
08:00—11:00	0.75
11:00—18:00	0.50
18:00—22:00	0.75
22:00—24:00	0.25

表 2 工程参数

参数名称	数值	参数名称	数值
$C_p/(元/kW)$	0.30	$C_E/(元/kWh)$	0.40
$r/\%$	3	$C_m/(元/kWh)$	0.05
$S_{oc,min}$	0.2	$S_{oc,max}$	0.8
$\eta_{ch}$	0.95	$\eta_{dis}$	0.90
$C_1$	1.5	$C_2$	1.5
$w_{ini}$	0.40	$w_{end}$	0.90

3.2 结果分析

按照双层优化模型求解流程,在外层遗传算法最大迭代次数 100 次、交叉率 0.7、变异率 0.05,在内层粒子群算法最大迭代次数 100 次、种群数 60 的情况下通过运行程序解得储能最佳配置方案为:4 号和 9 号节点分别接入 4 MW/4 MWh 电池储能。

图 4 为分布式储能系统总成本随迭代次数的变化曲线,可以看出当迭代次数达 65 次时目标收敛,此时系统最小成本为 4225 万元/年。图 5 和图 6 分别为系统取最小成本时,4 号和 9 号节点处储能的荷电状态曲线。

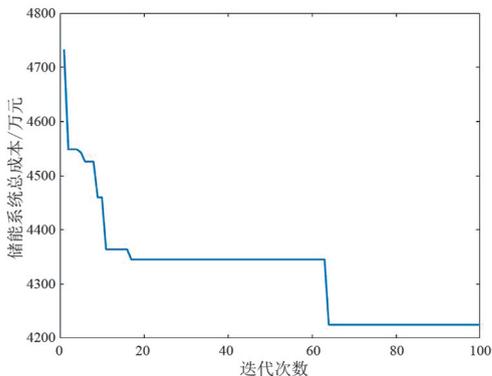


图 4 储能系统成本适应值曲线

从图 5 和图 6 可看出储能主要在 00:00—08:00 和 11:00—18:00 电价低平时段充电,08:00—11:00 和 18:00—22:00 电价峰值时段放电,储能运行策略能够利用峰谷电价差套利减小充放电费用。

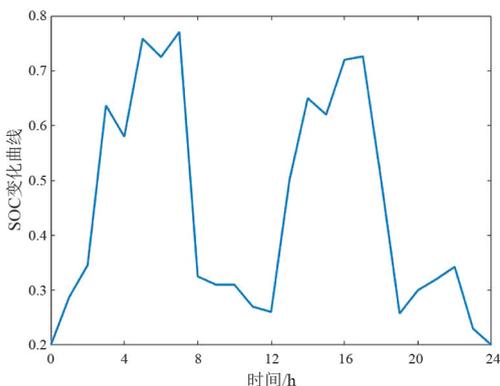


图 5 4 号节点储能 SOC 曲线

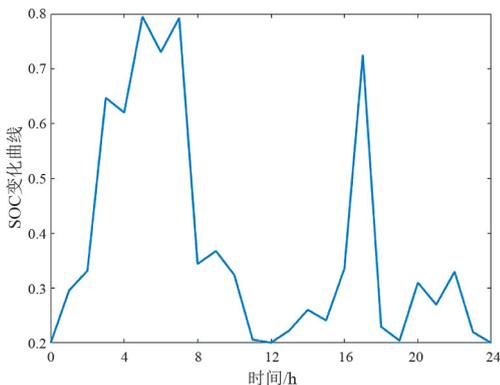


图 6 9 号节点储能 SOC 曲线

4 结 论

针对分布式光伏储能系统优化配置问题,提出遗传算法结合粒子群算法的双层优化模型。详细介绍了算法求解流程,然后通过改进 IEEE9 节点系统进行仿真验证,最后得到了以下基本结论:

1) 所提出的双层优化模型能够有效解决分布式光伏系统中储能选点布局和容量配置问题,同时算法运行稳定且收敛性良好。

2) 在给定的 IEEE9 节点系统中,当 4 号节点和 9 号节点分别接入 4 MW/4 MWh 的储能时,系统最小成本为 4225 万元/年。

3) 储能运行策略主要表现为:电价低平时段充电,峰值时段放电,通过峰谷电价差套利减小充放电费用;同时储能不同时刻的充放电能够改变电网潮流,一定程度上降低系统网损和无功费用。

参考文献

[1] 袁见. 中国太阳能光伏产业政策效应研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2013.

[2] 林少伯. 含光伏电源的微电网储能控制技术[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

[3] 吴思圆,周富云. 直流配电网中储能容量配置原则及容量配比[J]. 通信电源技术, 2018, 35(9): 225-227.

[4] 韩涛,卢继平,乔梁,等. 大型并网风电场储能容量优化方案[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 169-173.

[5] 张野,郭力,贾宏杰,等. 基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 36-41.

# 适用于采动影响区的新型可调式 钢管桁架设计研究

周建军,蒋锐,向越,车达,杨昌金

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都 610021)

**摘要:**随着大量输电线路工程的建设,线路途径采动影响区的比例日益增高。在开采活动的影响下,输电铁塔塔基处地表可能产生移动和变形,造成基础倾斜、杆塔变形等危害。中空防护大板基础已成功应用于特高压直流线路采动影响区,取得了良好的效果和工程应用经验,但其适应地形能力差、开方量巨大、水土流失严重。结合钢构件和长短腿的设计经验,提出将刚性隔面上移、隔面以下设置新型可调式钢管桁架的连接方式,代替中空防护大板基础,从而有效提高铁塔抵抗地表变形的能力和铁塔对地形的适应能力。

**关键词:**采动影响区;输电铁塔;基础方案;可调式钢管桁架

**中图分类号:**TU 347 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)01-0050-07

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220111

## Research on Design of New Adjustable Steel Pipe Truss Suitable for Mining-affected Areas

ZHOU Jianjun, JIANG Rui, XIANG Yue, CHE Da, YANG Changjin

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

**Abstract:** With the construction of a large number of transmission line projects, the proportion of mining-affected areas along the line is increasing day by day. Under the influence of mining activities, the ground surface at the foundation of transmission tower may move and deform, resulting in foundation tilt, tower deformation and other hazards. The hollow protective slab foundation has been successfully applied in mining-affected areas of UHVDC transmission lines, and has achieved good results and engineering application experiences. However, it has a poor adaptability to terrain, huge excavation volume and serious soil and water loss. Combined with the design experiences of steel members and long and short legs, a connection mode is proposed to move the rigid partition upward and set a new type of adjustable steel pipe truss below the partition surface so as to replace the hollow protective plate foundation, which can effectively improve the towers' ability to withstand surface deformation and to adapt to the terrain.

**Key words:** mining-affected areas; transmission tower; foundation design scheme; adjustable steel pipe truss

## 0 引言

随着输电线路工程的大力建设,线路走廊日益紧张,线路途径采动影响区的比例日益增高<sup>[1]</sup>。在地下开采的影响下,采动影响区地表的移动和变形破坏了输电杆塔与地基之间的初始平衡状态。伴着力系平衡的重新建立,使输电杆塔中产生附加应力,轻则可造成基础倾斜、开裂、杆塔变形,重则造成

基础沉陷、杆塔倾倒,严重威胁输电线路的安全运行<sup>[2-4]</sup>。采动影响区的输电线路已有多处铁塔发生基础沉降、杆塔倾斜<sup>[5-9]</sup>,如内蒙古乌海伊公线50号铁塔。

通过研究采动影响区内的不同基础特性,文献[10]给出了提高采空区输电线路稳定性的技术措施。文献[11]采用概率积分法对采空区段残余变形进行预测,也提出了相应的工程防治措施及建议。

目前,针对采动影响区内输电铁塔面临的问题,

基础设计时主要采用中空防护大板基础<sup>[12]</sup>。该基础可有效抵抗下部土体的不均匀沉降,铁塔支座位移和上部结构应力均大幅降低,有效缓解上部铁塔的杆件变形。但中空防护大板基础在山区应用时,地形适应能力差,基面开方量巨大,经常形成5 m以上的永久性边坡,存在一定的安全隐患;若地表变形导致铁塔变形、倾斜,调节铁塔十分困难。

结合钢构架和长短腿的设计经验,提出将刚性隔面上移,隔面以下设置新型可调式钢管桁架的连接方式来代替中空防护大板基础,从而有效提高杆塔抵抗地表变形的能力,同时也增加铁塔对地形的适应能力。

## 1 新型可调式钢架设计

### 1.1 设计思路

设计思路是将刚性隔面上移,隔面以下设置新型可调式钢架的连接方式来代替中空防护大板基础,如图1所示。该设计方案通过增加刚性横隔面来缓冲地表变形对上部结构的影响,提高杆塔抵抗地表变形的能力。同时,可调式钢管桁架为长短腿结构,极大地增加了铁塔对地形的适应能力。

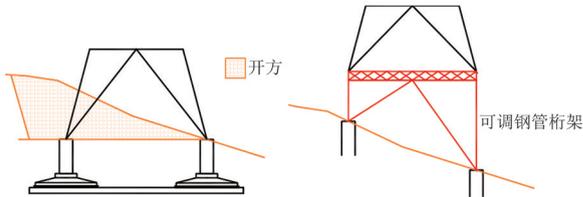


图1 中空防护大板基础和可调式钢管桁架

可调式钢管桁架腿部主材的连接节点设计为可调式球铰,腿部斜材的连接节点设计为单铰。同时,腿部主材和腿部斜材增加可调节结构。地表变形前后可调式钢管桁架变化如图2所示。

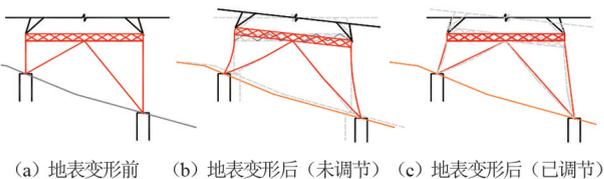


图2 可调式钢管桁架

正常运行时,球铰为刚性节点。当地表变形后,杆塔根开发生变化,此时杆塔受力平衡发生改变,部分构件承受较大的弯矩,若不进行调节,随着变形增大,构件将发生变形破坏。调节时,把球铰设置为杆

件可自由转动的铰接,通过调节腿部主斜材的长短和角度,使杆恢复平衡,释放杆塔的附加弯矩,避免杆塔构件发生变形破坏。调节完成后,球铰恢复为刚性节点。

### 1.2 设计原理

#### 1.2.1 整体设计

当可调式钢管桁架调节为铰接时,需采用临时拉线等辅助措施,属于静力学问题。需计算两种情况,如图3所示。

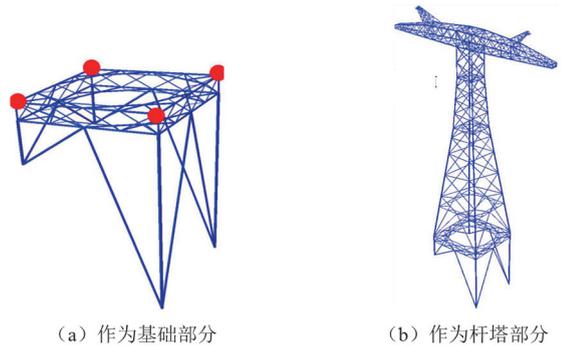


图3 可调式钢管桁架受力模型

情况1:可调式钢管桁架承受塔腿传递的基础作用力,此时可调式钢管桁架的受力为上部结构计算的基础作用力。

情况2:可调式钢管桁架作为杆塔部分,杆塔建模时应加入可调式钢管桁架。

因杆塔通过可调式钢管桁架调节后受力再次达到平衡。设计时,除了计算正常情况,还应计算达到最大调节后再次平衡时模型,如图4所示。

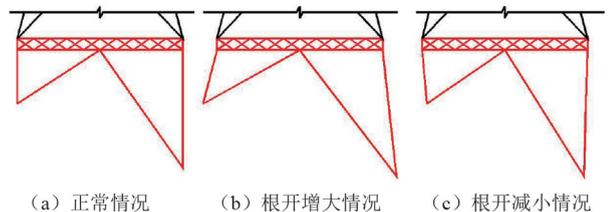


图4 根开变化后的可调式钢管桁架模型

腿部横隔面构件为杆塔变形敏感处,故钢管桁架结构在此处采用刚性横隔面,增大该部分刚度,提高抵抗地表变形的能力,如图5所示。

#### 1.2.2 局部设计

相较于常规塔腿设计,为满足钢管桁架的可调节功能需重点考虑:1)腿部主材可调铰接节点;2)腿部斜材可调铰接节点;3)可伸缩结构。

##### 1) 腿部主材可调铰接节点

腿部主材可调铰接节点采用球铰。由于球铰在

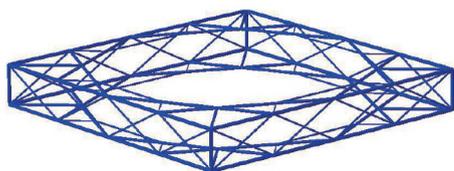


图 5 刚性横隔面

调节时为可转动结构,在运行时为刚性结构,并且需承受较大上拔力,在传统桥梁球铰的基础上进行改良设计。

根据文献[13]对山西省川底乡段收集的测量资料分析表明,水平变形是导致根开变化的主要原因,其值通常在 0~300 mm。球铰按最小转角为 0.01 rad,以 0.01 rad 级差递增,转角 0.02~0.06 rad 进行设计,可调节的根开范围如表 1 所示。

表 1 球铰各级正侧面根开调节范围

转角 $\theta/\text{rad}$	调节范围/mm	
	短腿 4 m、长腿 12 m	短腿 5 m、长腿 15 m
0.02	320	400
0.03	480	600
0.04	640	800
0.05	801	1001
0.06	961	1201

注:调节范围=短腿 4(5) $\times\tan\theta$ +长腿 12(15) $\times\tan\theta$ 。

从表 1 可知,球铰转动范围满足 0.02 rad 时可满足绝大多数塔位的调节要求。根据上述要求,改良后的球铰设计如图 6 所示。

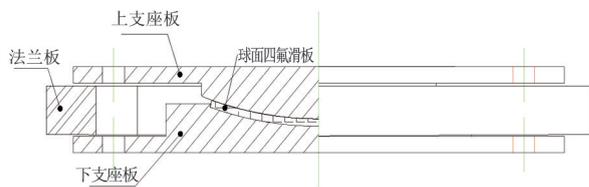


图 6 球铰支座设计

球铰可转动范围为 0.01~0.03 rad。抗拉设计如同法兰,通过螺栓传递。竖向下压设计承载力为 1000~8000 kN,共分为 6 级。为保证在运行时不随意转动,在上下座板之间添加刚性法兰板,即可以保证结构的传递下压力稳定,也对球铰起防尘垫圈的作用,如图 7 所示。

当球铰需要调节时,可用对应坡度的法兰板替换,标准化的法兰板坡度为 0~0.03 rad,其中 0.01 rad 为一级。

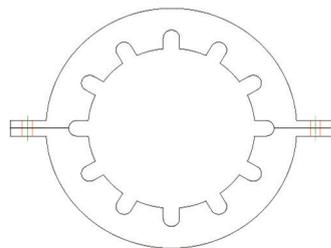


图 7 法兰板结构

腿部主材采用可调球铰与刚性隔面、基础进行连接,达到灵活转动与适应变形后地形的能力。球铰安装位置如图 8 所示,分别为钢管桁架腿部主材的上部和钢管桁架与基础相连接处。

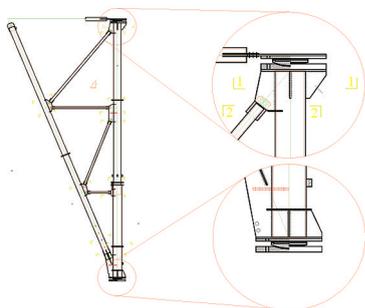


图 8 球铰安装位置

## 2) 腿部斜材可调铰接节点

考虑腿部斜材受力小,钢管规格小,无需采用球铰,采用单铰即可,位置如图 9(a)所示。即应用一颗螺栓连接,便满足腿部斜材大部分的转角需要,如图 9(b)所示。当地表变形导致铁塔根开变化非常大的时候,可在单铰节点板之间增加垫片或更换新的节点板完成调节。

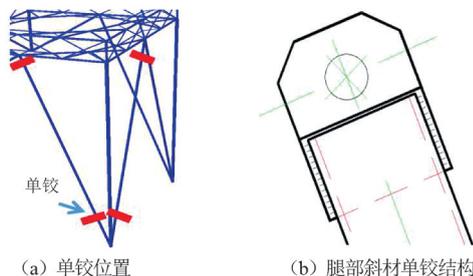


图 9 腿部斜材可调铰接节点

## 3) 主斜材可伸缩结构

可调式刚性隔面铁塔方案通过可伸缩结构调节腿部主材的长短,从而适应因采动活动导致的铁塔基础间不均匀沉降。

目前,在多条特高压线路的采动影响区中实施加长型地脚螺栓,是可行的腿部主材可伸缩结构方案。具体内容包括:杆塔与基础采用地脚螺栓连接,

基础主柱上的地脚螺栓外露丝扣长度适当加长。加强对塔位进行监测,一旦因地表变形引起基础不均匀沉降,可以先将地脚螺栓放松,利用千斤顶抬升塔腿,调平后在塔脚板下垫钢板,实现杆塔调平。钢垫板厚度可系列化,以适应不同的沉降量,多层使用时可垂直调向进行插垫,如图 10(a)。腿部斜材也存在可伸缩结构,主要通过同管材相连来实现,如图 10(b)所示。

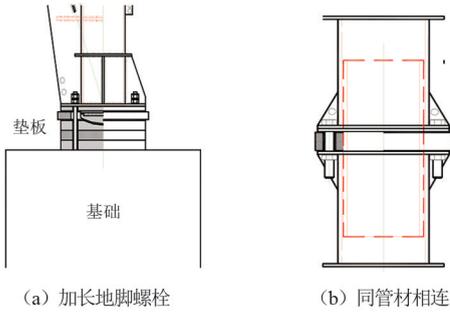


图 10 主斜材可伸缩结构

## 2 可调式刚性隔面铁塔设计受力研究

以滇西北工程 ZC27102 为例,建模分析可调式刚性隔面铁塔方案的受力。

上部铁塔为 ZC27102,呼高为 60 m,平腿,下部采用可调式刚性隔面钢管桁架结构,如图 11—图 12 所示。

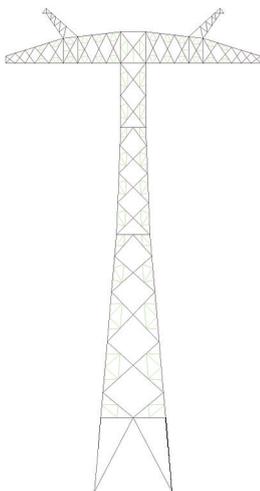


图 11 ZC27102-60 单线

本章主要研究可调式刚性隔面钢管桁架结构主要构件:主材 Z1—Z3 和斜材 X1—X2 的受力情况。其中:Z1 为两横隔面之间的主材,设计长度为 2 m;Z2 为腿部短腿主材,设计长度为 5 m;Z3 为腿部长腿主材,设计长度为 15 m;X1 为短腿腿部斜材;X2

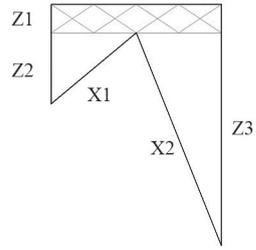


图 12 刚性隔面钢管桁架

为长腿腿部斜材。

### 2.1 双腿调节

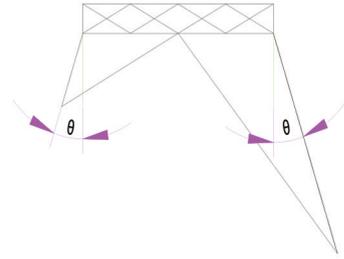


图 13 转角  $\theta$

图 13 是腿部主材转角变化示意图。腿部主材 Z1—Z3 受力情况如图 14 所示。由图可见  $\theta$  角在  $-0.06 \sim 0.06$  rad 变化时 Z1—Z3 受力的情况。

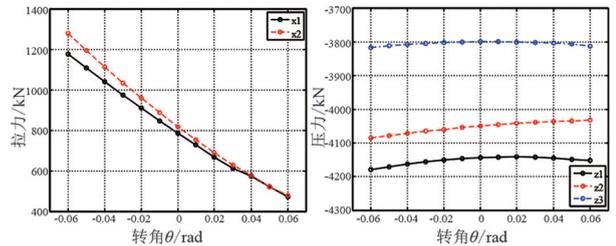


图 14 Z1—Z3 主材受力情况(双腿调节)

主材 Z1—Z3 拉力与压力之比在 0.72~0.73 之间。Z2 受力最大,Z3 最小。Z1—Z3 主材各个角度下压力最大值和最小值之间差异在 1.5% 以内。 $\theta$  角每变化 0.01 rad,受力变化处于 0.3% 以内。所以在设计过程中,若  $\theta$  位于  $\pm 0.01 \sim \pm 0.06$  rad 之间,可简化计算  $0^\circ$  角时主材受力,乘以 1.5% 的内力增大系数进行选材。

腿部斜材 X1—X2 受力情况如图 15 所示。

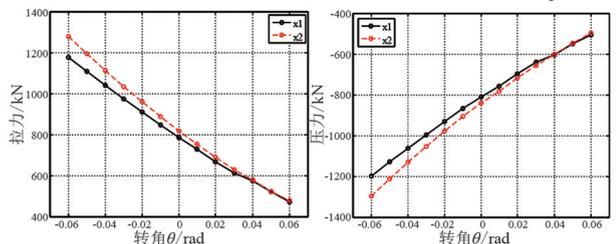


图 15 X1—X2 斜材受力情况(双腿调节)

腿部斜材 X1—X2 拉力与压力之比在的 0.94 ~ 0.98 之间。 $\theta$  角越小时,腿部斜材 X1—X2 受力越大,但考虑到  $\theta$  角越大时,长度增加,因此在计算时,应根据实际情况计算  $\theta$  角最大和最小时构件的承载能力。

## 2.2 仅调节短腿

实际操作时,若所需调节根开较小时,可能仅利用球铰调节短腿。

腿部主材 Z1—Z3 受力情况如图 16 所示。由图可见  $\theta$  角在  $-0.05 \sim 0.05$  rad 变化时 Z1—Z3 受力的情况。

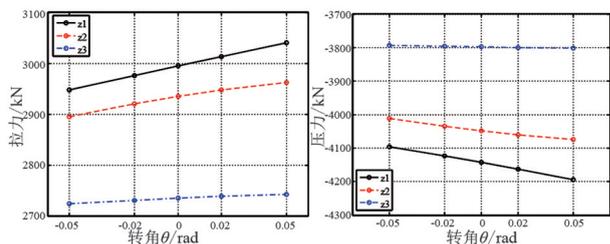


图 16 Z1—Z3 主材受力情况(仅调节短腿)

在这种情况下,腿部主材 Z1—Z3 拉力与压力之比在 0.72 ~ 0.73 之间。Z2 受力最大,Z3 最小。Z1—Z2 主材各个角度下压力最大值和最小值之间差异在 2.5% 以内, $\theta$  角每变化 0.01 rad,受力变化处于 0.3% 以内。 $\theta$  角越大,腿部主材 Z1—Z2 受力越大,Z3 主材内力基本无变化。

腿部斜材 X1—X2 受力情况如图 17 所示。

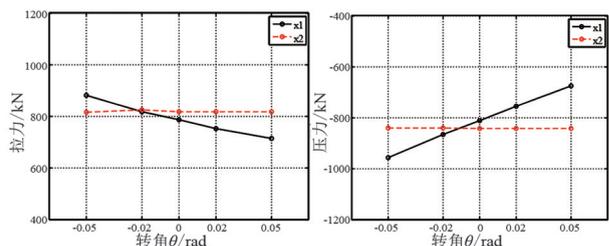


图 17 X1—X2 斜材受力情况(仅调节短腿)

在这种情况下,腿部斜材 X1—X2 拉力与压力之比在 0.92 ~ 1.06 之间。 $\theta$  角越小时,腿部斜材 X1 受力越大,X2 斜材内力基本无变化。

## 2.3 仅调节长腿

实际操作时,若所需调节根开较小时,也可能仅利用球铰调节长腿。

腿部主材 Z1—Z3 受力情况如图 18 所示。由图可见  $\theta$  角在  $-0.05 \sim 0.05$  rad 变化时 Z1—Z3 受力的情况。

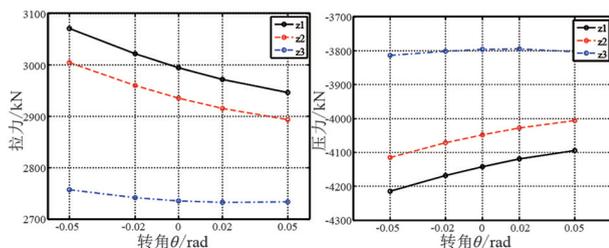


图 18 Z1—Z3 主材受力情况(仅调节长腿)

在这种情况下,腿部主材 Z1—Z3 拉力与压力之比在 0.72 ~ 0.73 之间。Z2 受力最大,Z3 最小。 $\theta$  角每变化 0.01 rad,受力变化处于 0.3% 以内。 $\theta$  角越小,腿部主材 Z1—Z2 受力越大,Z3 主材内力基本无变化。Z2 主材最大受力与双主材同时调节时基本相当。

腿部斜材 X1—X2 受力情况如图 19 所示。

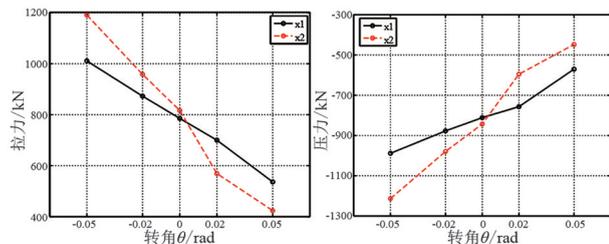


图 19 X1—X2 斜材受力情况(仅调节长腿)

在这种情况下,腿部斜材 X1—X2 拉力与压力之比在 0.94 ~ 1.02 之间。 $\theta$  角越小时,腿部斜材 X1—X2 受力越大。

## 2.4 不同极差

对 10 m 极差和 8 m 极差下 Z1—Z3 与 X1—X2 构件受力进行对比。其中 10 m 极差中长腿为 15 m,短腿为 5 m;8 m 极差中长腿为 12 m,短腿为 4 m。Z1—Z3 与 X1—X2 在两种极差下的受力情况如图 20—图 24 所示。Z1—Z3 与 X1—X2 不同极差下受力与调节角度的变化规律相同,极差越大,同调节角度下受力越大。

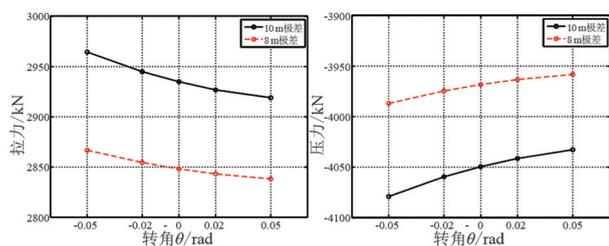


图 20 Z1 不同极差下受力情况

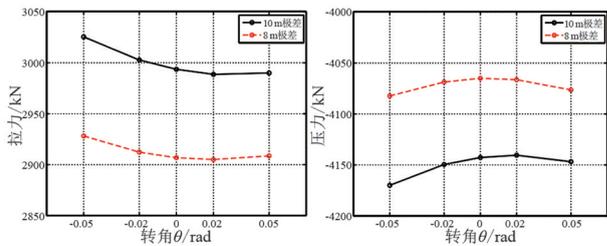


图 21 Z2 不同极差下受力情况

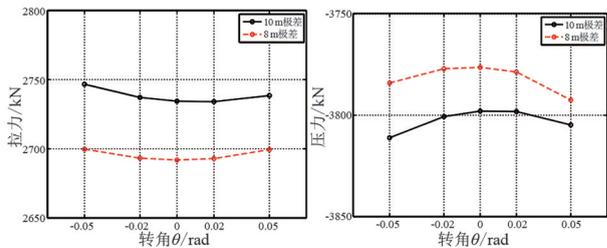


图 22 Z3 不同极差下受力情况

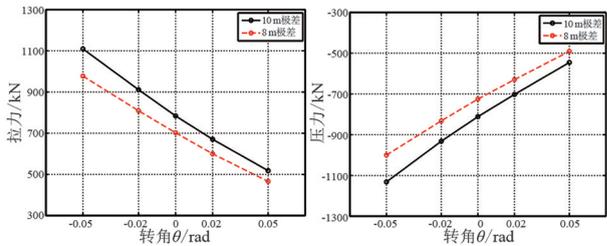


图 23 X1 不同极差下受力情况

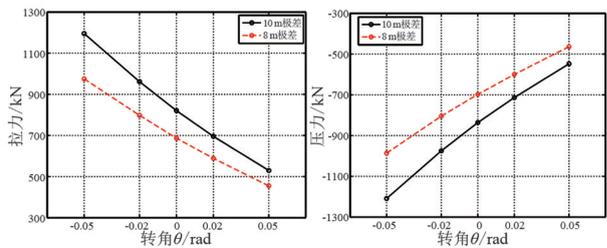


图 24 X2 不同极差下受力情况

上面可对调式刚性隔面主要构件在各种情况下的受力进行了分析,总结了相应的规律。进行可调式刚性隔面主要构件设计时,计算受力应综合考虑在球铰可调角度  $\theta$  为最大值、最小值和  $0^\circ$  时的受力,选取拉力和压力的最大值。计算长度选取构件在球铰可调角度  $\theta$  为最大值、最小值和  $0^\circ$  时的最大值。

### 3 可调式钢管桁架和中空防护大板基础对比

以滇西北工程 ZC27102 为例,对比分析可调式钢管桁架设计和中空防护大板,如图 25 所示。可调

式钢管桁架设计采用 ZC27102-60 m 铁塔+钢管桁架。常见地表坡度  $25^\circ$  下,若采用传统施工的中空防护大板基础,铁塔需采用 ZC27102-74 m,形成高达 12 m 的永久性边坡;若采用半填半挖方式,铁塔仅需采用 ZC27102-67 m,护坡高度为 6 m,虽然依然形成较高的永久边坡,但优于传统施工。本章将比较可调式钢管桁架设计与半填半挖方式下中空防护大板基础在经济和安全等方面的差异。

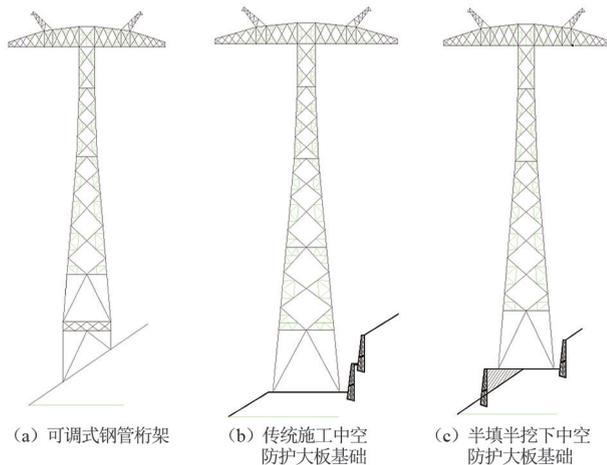


图 25 坡度  $25^\circ$  下 3 种方式对比

#### 3.1 经济性对比

半填半挖方式下中空防护大板基础与可调式钢管桁架设计综合造价如表 2 所示。根据经济性对比,在山区采用腿长可调式钢管桁架设计,相较于中空防护大板基础,可节省投资约 33%。随着地形坡度增加,投资节约比例将持续增加。

表 2 中空防护大板基础与可调式钢管桁架设计经济性对比

方案	ZC27102-67 m 中空防护大板基础	ZC27102-60 m 可调式钢管桁架设计
所耗钢材/t	88.28	110.16(塔重 79.06+ 钢管桁架 31.10)
可调球铰/万元	—	3.2(0.4 万元/个×8 个)
基础混凝土/ $m^3$	245.23	137.70
基础钢筋/t	15.94	11.16
基坑土石方/ $m^3$	1 961.68	151.47
基面土石方/ $m^3$	590.90	12.00
浆砌块石/ $m^3$	363.69	—
占地面积/ $m^2$	324.20	288.39
综合造价/万元	196	131
投资减少/%		33

#### 3.2 安全性对比

根据采动影响区对输电线路的影响,杆塔主要

受地表变形的影响<sup>[14]</sup>。当采动影响区水平变形参数为  $\alpha$  (mm/m)、地表曲率为  $K$  (mm/m<sup>2</sup>) 时,杆塔塔位处为  $L\alpha$  和  $L^2K$ ,其中  $L$  为铁塔根开,如表 3 所示。

表 3 中空防护大板基础与可调式钢管桁架设计对比

方案	根开/m	水平变形/mm	曲率变形/mm
ZC27102-67 m 中空防护大板基础	16.9	$16.9\alpha$	$16.9^2K$
ZC27102-60 m 可调式钢管桁架设计	15.2	$15.2\alpha$	$15.2^2K$

由表 3 可知,由于可调式钢管桁架设计铁塔根开小,故采动影响区对其影响小。同时,相较于可调式钢管桁架设计,中空防护大板方案还存在高边坡稳定性问题。高边坡在开采活动下极易失稳,形成滑坡或崩塌,如表 4 所示。

表 4 ZC27102-67 m 中空防护大板基础永久边坡的采动影响

方案	水平变形/mm	曲率变形/mm
护坡	$18\alpha$	$18\alpha$
堡坎	$36^2K$	$36^2K$

若考虑护坡和堡坎的采动影响,可调式钢管桁架设计水平变形和曲率变形值为中空防护大板基础的 29% 和 8%。因此,相较于中空防护大板基础,在山区采用腿长可调式钢管桁架设计不仅可以减小铁塔根开,降低采动影响区对铁塔的影响,而且能有效避免采动影响区高边坡问题,提高了输电线路的安全性。

## 4 结 论

上面提出将刚性隔面上移,隔面以下设置新型环保型可调式钢管桁架的连接方式来代替中空防护大板基础,该方式适应地形能力强,同时具有变形后腿长可调节的特性。通过对整体及局部的设计研究,主要得出以下结论:

1) 根据钢构架设计经验,对可调式钢管桁架的整体、局部和关键节点分别进行设计,研究球铰、可伸缩结构、刚性隔面等主要部件。

2) 进行可调式刚性隔面主要构件设计时,计算受力应综合考虑在球铰可调角度  $\theta$  为最大值、最小值和  $0^\circ$  时的受力,选取拉力和压力的最大值。计算长度选取构件在球铰可调角度  $\theta$  为最大值、最小值

和  $0^\circ$  时的最大值。

3) 将中空防护大板基础和可调式钢管桁架设计进行对比,结果表明可调式钢管桁架设计具有更加优越的经济性和安全性。

## 参考文献

- [1] 季善浩,李勃.煤矿采空区 220 kV 输电线路转角塔基础沉降及处理[J].山东电力技术,2011(2):30-33.
- [2] 史振华.采空区输电线路直线自立塔基础沉降及处理方案[J].山西电力技术,1997,17(3):18-20.
- [3] 刘鸣,李永浩,张厚启,等.地质灾害区输电塔架安全分析[J].中国电力,2012,45(5):34-39.
- [4] 张建强,杨昆,王予东,等.煤矿采空区地段高压输电线路铁塔地基处理的研究[J].电网技术,2006,30(2):30-34.
- [5] 郝梦明.220 kV 四端线 012 号铁塔基础纠偏技术分析[J].广东电力,2002,15(1):67-69.
- [6] 付明翔,韩为民,默增禄.煤矿采空区 500 kV 输电线路设计的探讨[J].电力建设,2004,25(6):30-32.
- [7] 国网北京电力建设研究院.煤矿采空区架空输电线路基础研究报告[R].北京:国家电网公司,2006.
- [8] 杜庆荣.铁塔倾斜原因及纠偏技术的探讨[J].武汉船舶职业技术学院学报,2006,5(3):46-48.
- [9] 张建强,赵凤山,张全录,等.乌海伊临 220 kV 输电线路 50 号塔基地下采空区的稳定性分析[J].工程地质学报,2004,12(增刊):302-306.
- [10] 代泽兵,鲁先龙,程永锋.煤矿采空区架空输电线路基础研究[J].武汉大学学报(工学版),2009(增刊):312-316.
- [11] 康晨阳,刘益平,汤志刚,等.某采空区架空输电线路残余变形预测与防治[J].电力勘测设计,2020,139(5):49-52.
- [12] 秦庆芝,曹玉杰,毛彤宇,等.特高压输电线路煤矿采动影响区铁塔基础设计研究[J].电力建设,2009,30(2):18-21.
- [13] 高文龙.采空区特高压输电杆塔的稳定研究[D].北京:中国矿业大学,2010.
- [14]  $\pm 800$  kV 及以下直流架空输电线路工程施工及验收规程:DL/T 5235—2010[S].北京:中国电力出版社,2010.

## 作者简介:

周建军(1979),男,硕士,高级工程师,从事线路设计与研究工作。

(收稿日期:2021-04-01)

# 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践

李成鑫<sup>1</sup>, 王志高<sup>2</sup>, 安政<sup>3</sup>, 耿植<sup>2</sup>, 王方强<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 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 610041; 3. 国网四川省电力公司巴中供电公司, 四川 巴中 636000)

**摘要:**针对中国西南地区典型湿热气候电网设备锈蚀严重的实际情况,以四川某110 kV变电站为例,开展了湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践,力求达到“电网设备10年不生锈”的目标要求。该工程设计合理,施工严格,监督到位,质量可靠,效果显著,并成为四川电网在湿热气候环境下变电站防腐施工的标准化流程和典型案例,在四川电网全面推广应用。

**关键词:**湿热气候; 变电站; 防腐工程

**中图分类号:** TG 174 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2022)01-0057-05

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20220112

## Design and Practice of Anti-corrosion Engineering for Substation in Southwest Area with Damp-heat Climate

LI Chengxin<sup>1</sup>, WANG Zhigao<sup>2</sup>, AN Zheng<sup>3</sup>, GENG Zhi<sup>2</sup>, WANG Fangqiang<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Bazhong Electric Power Supply Company, Bazhong 636000, Sichuan, China)

**Abstract:** According to the actual situation of severe corrosion of power grid equipments in typical damp-heat climate in southwestern China, taking a 110 kV substation in Sichuan province for example, anti-corrosion engineering of this substation is designed and carried out to achieve the goal of "10-year guarantee against rusting". This project is reasonable in design, strict in operation, efficient in supervision, reliable in quality and remarkable in effect. The standard process and typical experiences of anti-corrosion engineering in damp-heat climate are summarized from this project, which have been applied in whole Sichuan power grids.

**Key words:** damp-heat climate; substation; anti-corrosion engineering

## 0 引言

四川省位于中国西南地区,属于典型的亚热带湿润气候,由于青藏高原、秦岭、大巴山、横断山脉的阻隔,四周山区东南部相对较低有利水汽进入,西北部山区相对较高不利于水汽的散失,导致空气湿度大,多阴雨天气,多雾,日照不足,这种湿热气候环境为金属腐蚀提供了有利条件<sup>[1]</sup>。在这种恶劣的大腐蚀环境下,四川电网由于设备金属材料腐蚀失效而影响电网安全稳定运行的事故频繁发生<sup>[2-3]</sup>,福

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(521997200030)

建、湖南等其他省份也有类似电网设备腐蚀案例报导<sup>[4-7]</sup>。现有的电网防腐工程存在涂料选择不当、除锈不彻底、施工工艺不规范、质量验收手段缺乏等诸多问题,导致防腐效果不理想,防腐寿命过短。

为防止设备锈蚀危及电网的运行安全,选取锈蚀较为严重的某110 kV变电站作为示范工程进行防腐设计与实践,力求达到“电网设备10年不生锈”的目标要求。根据该示范工程总结的国网四川省电力公司变电站防腐施工技术规范 and 标准作业指导卡等典型经验,已在四川省变电站防腐大修技改工程全面推广。在防腐质量检验、防腐施工、防腐维护方面的经验也已写入国家电网有限公司《电网输

变配电设备防腐技术指导意见》<sup>[8]</sup>,对于四川、重庆、贵州等中国西南湿热环境变电站防腐维护具有重要的指导意义。

## 1 防腐工程简介及施工方案设计

某 110 kV 变电站位于四川省巴中市,于 2009 年 7 月投入运行。该变电站因气候潮湿多雨,加上周边环境严重,自投运以来户外一次设备出现大面积锈蚀情况,为设备以及电网的安全稳定运行埋下了严重隐患。据四川省统计局数据,四川省巴中市年平均温度 17.6 ℃,年平均湿度 75%,年降雨量 1 260.1 mm<sup>[9]</sup>。高温、高湿、高降雨量的特殊环境导致这一地区的电网设备腐蚀较为严重。该变电站防腐示范工程前的腐蚀情况如图 1 所示。

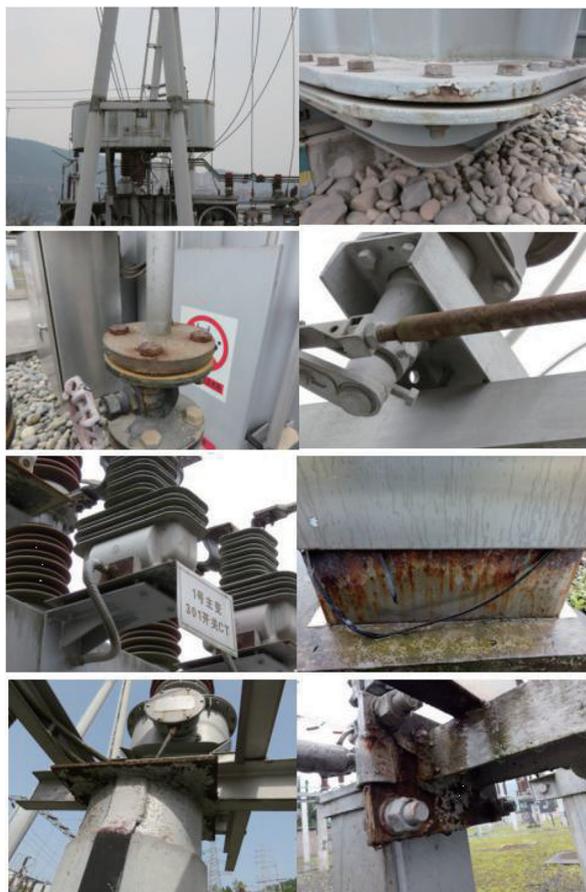


图 1 变电站防腐示范工程前腐蚀情况

在充分开展现场查勘后确定了施工方案设计,明确了巴中市大气腐蚀环境等级、除锈工艺、涂层体系设计以及涂料成分配比等相关技术要求。同时为保证施工质量,工艺流程严格按照电动除锈、底漆、中间漆、面漆 4 道工序进行,并确保每层涂料涂

刷间隔时长满足实干要求。现场每一道施工工序都必须经过技术人员验收合格后方可进入下一道施工。每一桶涂料开盖前都须经确认成分、配比无误后方可进入现场使用。

四川省巴中市经实测,Q235 碳钢材料暴晒第 1 年期大气腐蚀速率为 15.88  $\mu\text{m}/\text{a}$ ,根据 GB/T 19292.1—2018《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第 1 部分:分类测定和评估》<sup>[10]</sup>判定其大气腐蚀环境等级为 C2 级。按设计使用年限 10 年,设计涂层干膜厚度须达到 160  $\mu\text{m}$  以上。同时,每层涂料涂刷间隔时长留够,确保每层涂料有足够时长实干。因此每道涂层实干后,除外观检查外,还须经涂层的厚度、附着力质量检验。涂层厚度要求见表 1,涂层附着力大于等于 5 MPa,检测合格后方可进入下一道工序。

## 2 防腐施工技术要求

### 2.1 涂层体系设计及涂料现场检查

对于变电站的防腐工程,选择适合的涂料至关重要。针对中国西南地区湿热气候特点,选用了防腐性能较好的重防腐涂料,要求不仅要具备普通涂料的基础性能,最重要的是要具有良好的抗渗性和耐湿热、耐紫外老化性能<sup>[11]</sup>。本次变电站防腐示范工程涂层体系设计为 3 层:分别为环氧富锌底漆大于等于 60  $\mu\text{m}$ ,环氧云铁中间漆大于等于 50  $\mu\text{m}$ ,丙烯酸聚氨酯面漆大于等于 50  $\mu\text{m}$ ,总干膜厚度大于等于 160  $\mu\text{m}$ 。涂层体系设计如表 1 所示。

表 1 变电站防腐示范工程涂层体系设计

涂层	涂料品种	涂层道数	最低干膜厚度/ $\mu\text{m}$
底漆	环氧富锌底漆	1	60
中间漆	环氧云铁中间漆	1	50
面漆	丙烯酸聚氨酯面漆	1	50
总干膜厚度			160

现场检查防腐涂料、稀释剂和固化剂等产品的质量合格证明文件、检验报告等,其品种、规格和性能等应满足技术合同要求和有关国家、行业标准的规定。涂刷前,检查防腐涂料的型号、名称、颜色及有效期等是否与质量证明文件相符。防腐涂料开启后,不应存在结皮、结块、凝胶等现象,检查数量为每批按总桶数随机抽查 $\sqrt{n/2}$ ,且不少于 3 桶。涂料充分搅拌均匀后方可施工,采用电动搅拌装置进行机

械搅拌。先将各组分分别搅拌均匀,再严格按涂料产品使用指导说明书规定的比例,添加固化剂和稀释剂进行配制并搅拌均匀无沉淀现象,然后按规定放置 10~15 min 进行熟化,不均匀混合禁止施工。现场施工环境温度宜在 5~38 ℃ 之间,空气湿度不大于 85%。被施工物体表面不得有凝露。在有雨、雾、雪、大风和较大灰尘的条件下应停止户外施工。

## 2.2 涂装工艺

防腐施工涂装工艺流程如下:表面除锈→除锈验收合格后→涂刷第一道底漆→干燥验收合格后→涂刷第二道中间漆→干燥验收合格后→涂刷第三道面漆→干燥验收合格后→工程质量、安全验收。涂装施工方案流程如图 2 所示。

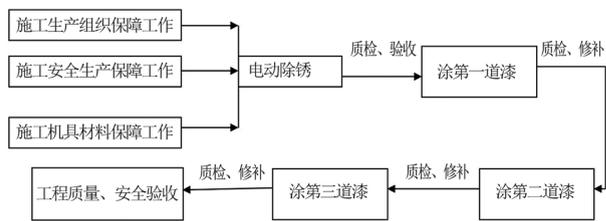


图 2 涂装施工方案流程

## 2.3 表面处理

涂装前首先要对设备原有的表面锈层进行除锈处理,以保证涂层与金属基体具有良好的结合力,基体的清洁程度直接影响设备的最终防腐效果。该变电站防腐示范工程表面除锈处理采用电动与手动工具相结合的形式进行。在除锈处理前,金属表面的厚锈层、焊渣、毛刺和飞溅物等附着物全部铲除,对于表面涂层已劣化部位(起泡、锈蚀、开裂、剥落)处的原涂层也全部铲除。表面处理使用电动砂轮机或电动钢丝刷除锈,电动工具无法到达的部位采用钢丝刷、铲刀、砂纸等手动工具除锈,除锈完成后用干净棉纱清除金属表面的浮灰和碎屑。

除锈后金属表面清洁度要求达到 GB/T 8923.1—2011 规定的 St3 级,即表面应无可见的油、脂和污物,并且没有附着不牢的氧化皮、铁锈、涂层和外来杂质,表面应具有金属底材的光泽<sup>[11]</sup>。对于不易清理部位,处理后表面应达到 GB/T 8923.1—2011 规定的 St2 标准,即在不放大的情况下观察时,表面应无可见的油、脂和污物,并且没有附着不牢的氧化皮、铁锈、涂层和外来杂质<sup>[12]</sup>。紧固件用砂纸包裹反复打磨,除锈等级达到 GB/T 8923.1—2011 规定的 St2 级以上。

## 2.4 底漆涂刷

除了表面处理,涂装的施工工艺也同样重要。在表面除锈处理完毕后,确保 4 h 内完成环氧富锌底漆涂装。环氧富锌底漆是以环氧树脂、锌粉、聚酰胺固化剂等为主要成分的特种涂料,含有大量金属锌粉,具有阴极保护作用,该漆自然干燥快、附着力强、耐水性好,在各种环境下的防腐蚀性能优良,是重防腐领域选用最多的产品之一。基于底漆工艺质量的重要性,在环氧富锌底漆涂装后,现场技术人员应及时进行回检,对漏涂和缺陷立即进行处理,确保涂装后涂层均匀平整、色泽正常,无明显的疏松、皱皮、流坠、针孔和气泡等缺陷以及无漏涂、误涂和涂层脱皮现象,对于非导电部件紧固件均用涂料予以全包覆。待底漆施工完成实干后,对底漆进行附着力和涂层厚度检测,确保满足厚度不低于 60 μm 以及附着力大于等于 5 MPa 的试验要求。

## 2.5 中间漆涂刷

待环氧富锌底漆实干且满足相关试验检测后,进行环氧云铁中间漆涂装。环氧云铁中间漆含有鳞片状防锈保护等成分,能更好地封闭屏蔽及延缓各种环境条件下腐蚀介质的侵蚀。环氧云铁中间漆涂装后,及时对涂装质量进行检查,漆膜应无针孔、气泡、裂纹、起皮脱落、流挂、漏涂等缺陷。实干后,随机取点对中间漆进行涂层厚度检测,确保中间漆+底漆满足厚度不低于 110 μm 要求。

## 2.6 面漆喷涂

最后一道工序进行丙烯酸聚氨酯面漆涂装。丙烯酸聚氨酯面漆是由羟基丙烯酸树脂、脂肪族聚氨酯、耐候性颜料、助剂等组成的混合物,防腐性能好,耐候性能优异。此外,漆膜还具有较好的耐酸、耐碱、耐水、耐油、耐热、耐化学腐蚀性,其漆膜光亮、饱满,具有良好的表面装饰性。变压器、箱体等大面积部件采用喷涂方式;紧固件、边角缝隙等其他小面积部件采用手工刷涂。丙烯酸聚氨酯面漆喷涂后,及时对涂装质量进行检查,面漆应均匀平整、色泽正常,无针孔、气泡、裂纹、起皮脱落、流挂、漏涂等缺陷。涂装完毕后,测量漆膜总厚度,确保面漆+中间漆+底漆满足总厚度不低于 160 μm 以及附着力大于等于 5 MPa 的要求。

## 3 防腐工程质量验收及防腐效果跟踪

为检验防腐施工质量及效果,对变电站防腐示

范工程质量进行了验收,开展了工程前、中、后期外观和涂层厚度、附着力指标前后检测对比工作以及长期防腐效果跟踪。该变电站典型部位防腐处理前后对比照片如图 3—图 5 所示。



图 3 1 号主变压器本体防腐处理前后对比



图 4 2 号主变压器 102 断路器支架防腐前后对比



图 5 35 kV 301 断路器间隔防腐处理前后对比

### 3.1 外观检查

从图 3—图 5 可以看出,该变电站典型部位防腐处理前后对比效果明显。原有的锈蚀、涂层起皮脱落处已被处理干净,经过底漆、中间漆刷涂后表面

整体喷涂一层海灰面漆。涂层外观均匀平整、色泽正常,无明显的疏松、皱皮、流坠、针孔和气泡等缺陷,无漏涂、误涂和涂层脱皮现象。紧固件、边缘棱角、缝隙等薄弱部位均采用涂料全包覆处理。

### 3.2 涂层厚度检测

采用德国 Qnix4500 磁性法涂层测厚仪对该变电站典型部位开展了防腐工程前、中、后期涂层厚度检测工作。检测结果见表 2、表 3。从结果可以看出,抽检的 2 号主变压器 102 断路器间隔支架和 35 kV 301 断路器间隔,防腐处理前原涂层厚度平均值分别为  $63.4 \mu\text{m}$  和  $87.7 \mu\text{m}$ ,远低于 DL/T 1425—2015《变电站金属材料腐蚀防护技术导则》规定的户外最低  $120 \mu\text{m}$  的标准<sup>[12]</sup>。经过三层涂层涂覆,抽检的 2 号主变压器 102 断路器间隔支架和 35 kV 301 断路器间隔的防腐涂层总厚度平均值分别达到  $330 \mu\text{m}$  和  $212 \mu\text{m}$ ,均高于设计值  $160 \mu\text{m}$ 。

表 2 2 号主变压器 102 断路器间隔支架涂层厚度

单位:  $\mu\text{m}$

检测阶段	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	平均值
防腐前	52.2	48.4	67.1	73.0	68.1	71.6	63.4
底漆后	156	175	166	183	172	160	169
中间漆后	253	262	249	269	272	275	263
面漆后	316	322	305	339	342	353	330

表 3 35 kV 301 断路器间隔涂层厚度

单位:  $\mu\text{m}$

检测阶段	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	平均值
防腐前	89.0	79.0	82.0	89.1	91.8	95.5	87.7
防腐后	222	219	223	190	201	218	212

### 3.3 涂层附着力检测

采用美国 Defelsko PosiTest AT-A 拉拔法附着力测试仪对防腐工程前、后涂层附着力进行了抽检,现场测试照片见图 6。以 1 号主变压器本体为例,防腐处理前,对于原涂层附着力抽检结果为  $3.68 \sim 4.39 \text{ MPa}$ ,均低于 DL/T 1425—2015《变电站金属材料腐蚀防护技术导则》规定的  $5 \text{ MPa}$  标准<sup>[13]</sup>。防腐处理后,对于涂层附着力抽检结果为  $9.89 \sim 14.51 \text{ MPa}$ ,均高于标准值  $5 \text{ MPa}$ 。由于附着力试验属于破坏性试验,因此抽检的位置和数量应严格控制。检测完后,应对破坏试验造成的涂层损伤部位采用同种涂层体系进行修复。

### 3.4 防腐效果跟踪

本次变电站防腐示范工程完工后,经过 4 年的实际运行,未见涂层发生明显失色、粉化,未观察到



图 6 涂层附着力检测

涂层有起泡、起皱、开裂、脱落、锈蚀等现象,全站设备运行情况良好。

## 4 结 论

针对四川湿热气候电网设备腐蚀严重的实际情况,以某 110 kV 变电站作为试点,开展了变电站防腐工程设计及防腐工程实践,探索出湿热气候变电站防腐涂层体系设计、施工技术要求、操作规范及质量验收方法,为其他类似环境条件下变电站的防腐工程提供了参考,工程中的创新做法如下:

### 1) 电动除锈工艺应用

充分发挥电动工具除锈效率更高、除锈力度更强等优点,彻底将锈蚀设备表面锈渣清除干净并打磨至可见金属光泽,杜绝因除锈不彻底,从防腐涂层底层最先起壳的现象,有效地保证了防腐涂层底漆附着力效果。

### 2) 三层涂层体系设计

较以往变电站防腐施工采用的“一底两面”涂料搭配相比,防腐示范工程采用“一底漆—中间漆—面漆”的三层涂层配套体系。充分发挥环氧富锌底漆附着力强、阴极保护,环氧云铁中间漆封闭屏蔽效果好,丙烯酸聚氨酯面漆耐候性能优良等特点,确保充分发挥涂层整体效果。

### 3) 涂层附着力质量验收

很多情况下,涂层厚度虽然达标,但由于除锈不彻底、涂料调配不当、涂刷工艺不过关等施工工艺原因,导致底漆与基体之间、涂层整体附着力不足,运行后涂层容易起皮、开裂,而这些内部缺陷通过目视和涂层测厚无法发现。防腐示范工程采用拉拔法附着力测试仪,在现场对防腐工程前、后涂层附着力进行检测,检出附着力不合格的涂层均铲除重做,从根本上确保涂层施工工艺质量过关。

## 参考文献

- [1] 潘玉霞,王玫,王志高,等.大气腐蚀环境对四川电网输变电设备腐蚀的影响研究[J].材料保护,2018,51(4):110-129.
- [2] 朱军,赵兴虹,吴驰,等.四川地区变电站高压电气设备锈蚀情况及防腐技术研究[J].四川电力技术,2016,39(5):49-89.
- [3] 王志高,田倩倩,耿植,等.四川电网输变电设备的腐蚀情况调查及防护措施[J].腐蚀与防护,2021,42(3):34-37.
- [4] 陈军君,李明,王军,等.变电站金属构件的常见腐蚀形式及解决措施[J].内蒙古电力技术,2013,31(1):7-11.
- [5] 顾君梦,杨凡,邓亚文.变电所接地装置钢质腐蚀及电化学保护的探讨[J].云南电力技术,2004(2):17-18.
- [6] 方乙君,柳松,王雄文,等.沿海地区变电站腐蚀现状及防腐措施研究[J].电气技术,2018(12):97-102.
- [7] 夏晓健,金焱,乔汉文,等.输变电设备腐蚀状况调查与分析[J].腐蚀科学与防护技术,2019,31(2):121-127.
- [8] 国家电网有限公司.电网输变电设备防腐技术指导意见[Z].北京:国家电网有限公司,2019.
- [9] 四川省统计局,国家统计局四川调查总队.四川统计年鉴—2018[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [10] 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第 1 部分:分类测定和评估:GB/T 19292.1—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [11] 王剑英,邓杰,董男,等.热带沿海输变电设备防腐技术研究及应用[J].涂料工业,2016,46(12):63-67.
- [12] 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第 1 部分:未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级:GB/T 8923.1—2011[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [13] 变电站金属材料腐蚀防护技术导则:DL/T 1425—2015[S].北京:中国电力出版社,2015.

## 作者简介:

李成鑫(1977),男,工学硕士,高级工程师,从事电网技术监督工作;

王志高(1985),男,工学博士,高级工程师,从事电网设备腐蚀与防护工作;

安政(1987),男,工学硕士,工程师,从事电网技术监督与变电检修工作;

耿植(1990),男,工学硕士,工程师,从事电网设备腐蚀与防护工作;

王方强(1970),男,工学硕士,高级工程师,从事电网环境监测工作。

(收稿日期:2021-06-17)

# 图像识别技术在机组运行状态判断及 监控对点中的应用

满亚勤<sup>1</sup>,张翹飞<sup>1</sup>,曾 燃<sup>1</sup>,卿 明<sup>2</sup>,童 静<sup>2</sup>,尹永亮<sup>2</sup>,谢晓鸣<sup>2</sup>,王秋霖<sup>2</sup>

(1. 四川华能宝兴河水电有限责任公司,四川 雅安 625000;

2. 四川超影科技有限公司,四川 成都 610094)

**摘要:**水电站主要是通过人工查看数字量输入(DI)板信号指示灯、监控画面、事件表和报警表查看机组运行状态正常与否,花费时间较多且存在遗漏的可能。文中提出了一种将图像识别技术应用到DI板信号指示灯识别的方法,通过图像识别自动生成信号点表,并将图像处理算法(模板匹配、动态规划、几何定位与区域选择算法)集成到手机应用软件(APP)。使用该APP的拍照和识别功能,实现对机组DI板信号指示灯的实时、快速识别并输出结果,识别正确率可达到98%以上。现场人员根据识别结果可快速查看机组运行时信号点状态是否正常,有针对性地检查和对点,提高了工作效率,特别是对于新建水电站机组投运和已投产水电站机组检修作业的优化效果更为明显,同时所提出的图像处理算法可推广到更多工业场景下的指示灯及仪表智能识别应用中。

**关键词:**水电站机组;图像识别;DI板;模板匹配;动态规划;APP

**中图分类号:**TM 736 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2022)01-0062-04

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220113

## Application of Image Recognition Technology to Judgement for Operation Condition and Monitoring Signals of Hydropower Unit

MAN Yaqin<sup>1</sup>, ZHANG Chifei<sup>1</sup>, ZENG Ran<sup>1</sup>, QING Ming<sup>2</sup>, TONG Jing<sup>2</sup>,

YIN Yongliang<sup>2</sup>, XIE Xiaoming<sup>2</sup>, WANG Qiulin<sup>2</sup>

(1. Sichuan Huaneng Baoxing River Hydropower Co., Ltd., Ya'an 625000, Sichuan, China;

2. Sichuan Chaoying Technology Co., Ltd., Chengdu 610094, Sichuan, China)

**Abstract:** A hydropower station is always characterized by manual work involved in reading the indicators of digital input (DI) board, monitoring images, event lists and alarm apparatus to ensure the validity of the unit, which costs a lot of time and may ignore something by the staff. So the application of image recognition technology is proposed in reading the indicators of DI board. The signal location list is created automatically in image recognition, while the algorithms of image processing, such as template matching, dynamic programming, geometrical positioning and area selection, are integrated into a mobile APP. By taking photographs and recognizing the images, this APP can enable the user to read the indicators of DI board and output the result immediately at any time with an accuracy above 98%. According to the results, the staff can quickly know the validity of signal locations, and then inspect the locations purposefully. It is a great improvement in working efficiency, especially for the initiation of a new hydropower station or the maintenance of a running one. At the same time, the proposed image processing algorithm can be extended to more intelligent recognition applications of indicator lights and instruments in industrial scenes.

**Key words:** hydropower unit; image recognition; DI board; template matching; dynamic programming; APP

## 0 引言

水电站机组通常由现地控制单元(local control

unit,LCU)进行控制。水电站机组主机和辅机设备的运行状态均接入机组LCU,同时机组LCU也会发出各种指令,对机组主机和辅机对象进行控制。机组LCU一般布置在水电站生产设备附近,是水电站

计算机监控系统的底层控制单元<sup>[1]</sup>,机组 LCU 的数字量输入(digital input, DI)板采集水电站机组主机和辅机设备的运行状态。DI 板上的每一个指示灯亮或灭,指示了机组 LCU 所采集到的一个运行状态,如进水球阀的开或关、制动闸的顶起或落下、断路器的分闸或合闸等。

水电站机组主要有停机、空转、空载和并网 4 种标准状态。每一种标准状态对应所有指示灯中哪些亮和哪些灭,也就是每一种标准状态对应于所有指示灯亮或灭组成的标准信号点表。当某个指示灯不满足当前机组状态对应的标准信号点表时,说明有设备处于异常状态。水电站机组 DI 板上有数百个指示灯(以宝兴水电站为例,每台机组 LCU 分别有 4 块 DI 板,每块 DI 板有 64 个信号指示灯,共 256 个),目前采用的方法是通过人工查看和识别是否有指示灯处于异常状态<sup>[2]</sup>,或者是通过人工查看计算机监控系统操作员站的监控画面、事件表和报警表判断设备运行状态是否正常。由于 DI 板信号指示灯数量较多,如采用人工方式查看,其工作量较大,花费的时间较多且人眼查看存在出错的风险<sup>[3]</sup>,因此,目前判断机组运行状态及监控对点的方法存在工作效率较低以及可能出现漏检和误检的问题。

随着计算机图像处理技术的不断发展,图像识别技术已广泛应用于车牌识别、人脸识别、医学图像识别以及工业环境下信号指示灯识别等领域<sup>[4-6]</sup>。图像识别技术能使获取所需信息的速度越来越快,给各个行业带来了极大的方便<sup>[7]</sup>。下面提出一种对水电站机组 DI 板信号指示灯进行图像识别的方法,可大大提高判断机组运行状态及监控对点的工作效率和正确率。

## 1 方法设计

通过对水电站机组 4 种标准状态下 LCU 的 DI 板信号指示灯进行图像识别,识别出目前所拍图像对应的信号指示灯的亮、灭分布情况,自动生成相应的信号点表,并分别与已保存的该台机组 4 种标准状态对应的标准信号点表进行对比,分析有哪些信号指示灯不一致,并自动实时、快速、准确地输出比较结果;同时可识别任一张拍摄的图像中哪些信号指示灯不亮和哪些信号指示灯亮,并自动实时、快速、准确地输出识别结果,供现场人员查看和分析,给机组运行状

态判断以及监控对点、故障查找等提供依据和指导。

为实现上述功能,首先,需利用模板图像匹配算法<sup>[8]</sup>、动态规划算法<sup>[9]</sup>和几何定位与区域选择算法<sup>[10]</sup>等来定位 DI 板每个信号指示灯的位置并识别出每个信号指示灯的亮、灭状态;其次,需关联机组 DI 板信号指示灯图像与机组 DI 信号点表,信号点表内容包括 DI 点的信号名称及编号,格式采用 xls 格式;最后,为了提高可操作性和便捷性,开发一套基于 Android 系统的具有图像识别和输出功能的手机 APP,将上述图像识别算法集成到手机应用软件(application, APP)内,并内置机组标准状态 DI 信号点表,人员可在现场使用手机 APP 的拍照和识别功能,自动生成并输出相应的 xls 格式信号点表,实现对机组 DI 信号指示灯状态的实时、快速识别和对比。

每个水电站机组 DI 板型号和数量不同,采用的图像识别技术和算法需根据特定的识别对象进行选择和优化。下面以宝兴水电站为例,对该电站机组 DI 板信号指示灯识别采用的图像识别算法和开发的 APP 进行阐述,并给出了测试结果。

## 2 识别算法

### 2.1 模板匹配

模板匹配是一种在一幅图像中寻找与另一幅模板图像最佳匹配(相似)部分的技术。

模板从源图像左上角开始,每次以模板的左上角像素点为单位从左至右、从上至下滑动,每到达一个像素点后,以该像素点的左上角为顶点,从源图像中截取与模板一样大小的图像与模板进行像素比较运算<sup>[11]</sup>,计算所截取的图与模板图之间的相似度作为该像素点的相似度,进而计算出源图像中每个像素点的相似度。

其中,相似度计算采用的方法是 CV\_TM\_CCOEFF\_NORMED<sup>[12]</sup>。计算公式为:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} T'(x', y') \cdot I'(x + x', y + y')}{\sqrt{\sum_{x', y'} T'(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} I'(x + x', y + y')}} \quad (1)$$

$$T'(x', y') = T(x', y') - \frac{1}{(w \cdot h)} \cdot \sum_{x'', y''} T(x'', y'') \quad (2)$$

$$I'(x + x', y + y') = I(x + x', y + y') - \frac{1}{(w \cdot h)} \cdot \sum_{x'', y''} T(x'', y'') \quad (3)$$

式中:  $(x, y)$  为要匹配的点的坐标;  $T(x, y)$  为用来匹配的模板图像;  $I(x, y)$  为采集的需要进行识别的源图像;  $R(x, y)$  为模板匹配得到的系数, 取值范围为  $[-1, 1]$ ,  $R(x, y)$  为“1”时表示完全匹配,  $R(x, y)$  为“-1”时表示完全不匹配;  $w$  为图像的宽度(横向像素);  $h$  为图像的高度(竖向像素)。

对于整幅图像的每一个坐标, 通过遍历  $(x, y)$  的周围像素  $(x', y')$  与模板对应位置的  $(x', y')$  值计算出一个相应的匹配系数  $R(x, y)$ 。同时在计算该匹配系数时, 需使用模板大小区域的平均值, 该平均值的计算需遍历模板大小区域的  $(x'', y'')$ 。

指示灯识别算法中的匹配模板图采用“D”, 通过模板匹配算法识别出指示灯右侧的字母“D”, 该字母“D”位于机组 DI 板信号指示灯的右侧, 编号依次是 D00—D63。经模板匹配识别后相似度大于 0.5 的“D”位置点如图 1 中的圆圈所示。由于在源图像上存在其他与“D”相似的元素, 因此会获得一些误识别的“D”, 如图 1 左侧所示。



图 1 经模板匹配识别后“D”的位置

### 3.2 动态规划

拍照获取的面板图像中全部指示灯一般会超过 256 个, 同时由于噪声干扰, 匹配出来的“D”的个数通常大于 256 个, 需采用动态规划的方法, 寻找和定位出其中 256 个 DI 信号指示灯的准确位置。

动态规划算法的步骤: 分析优化解的结构, 递归地定义最优解的代价, 自底向上地计算优化解的代价保存之并获取构造最优解的信息, 以及根据构造最优解的信息构造优化解。

动态规划的实施过程: 对于任意一个“D”的位置, 将其作为起始点, 寻找一个有效的 64 个“D”的

垂直排列, 判断在其垂直下方给定的距离内是否有另一个“D”, 如果有, 则继续寻找第二个“D”下方是否有第三个“D”, 以此类推, 直到一共寻找到 64 个“D”的垂直排列, 则判断结束, 将这 64 个“D”作为一组有效的列。而对于一些误识别的“D”, 在此寻找过程中无法得到一个 64 个“D”的列, 这样的“D”就被排除在外, 从识别结果中删除。经动态规划后得到的“D”如图 2 中的圆圈所示。



图 2 经动态规划后有效“D”的位置

### 3.3 几何定位与区域选择

通过模板匹配和动态规划得到 256 个有效“D”的位置后, 就可以计算出相邻的两个“D”的距离  $x$ 。每个指示灯的圆心位置处在每个“D”的左下方, 水平距离为  $x/1.3$ , 垂直距离为  $x/2$ 。在以每一个指示灯圆心位置为圆心、 $x/2.5$  为半径的圆内, 计算出亮度超过一个阈值的像素所占比例, 如果比例超过 20% 则识别该指示灯为“亮”, 如低于 20% 则识别该指示灯为“灭”。指示灯识别结果如图 3 所示, 其中大圆圈表示“亮”, 小圆圈表示“灭”。

## 3 APP 功能及测试结果

### 3.1 DI 标准点表维护功能

由于机组相关设备存在技术改造的可能性, 每台机组的监控信号点表会新增或删除某些信号点, 且某些信号点的定义也会发生变化。该 APP 关联 DI 板信号指示灯图像与信号点表, 内置每台机组 4 种标准状态的 DI 信号点表, 并能对每台机组的信号点表进行修改、保存和导入。APP 在第一次使用时, 使用该功能导入每台机组 4 种标准状态的 DI 信号点表。



图 3 经几何定位与区域选择得到的指示灯亮、灭结果

### 3.2 DI 标准图像维护功能

APP 具有通过拍照来维护标准信号点表的功能,APP 利用其选框的 4 个定位点对机组 4 种标准状态下的图像进行拍照和识别,如果识别成功,则自动生成 4 种标准状态下的 DI 信号点表,之后自动导入并替换机组 4 种标准状态下原有的标准信号点表。

### 3.3 DI 板状态识别功能

选择“状态识别”,APP 自动调用相机拍摄,拍摄完成后,点击“识别”按键,弹出“状态对比”和“点亮识别”选择窗口。

选择“状态对比”后弹出“机组和状态”选择窗口,选择“机组和状态”,APP 自动对所拍图像进行识别后生成信号点表,并与内置的该台机组该标准状态的信号点表进行对比,输出与标准信号点表不一致的对比结果,对比标准信号点表后某个信号指示灯是“亮”或者“不亮”。状态对比完成后会自动以 Excel 文件保存每次状态对比的结果。

选择“点亮识别”,再选择“点亮”或“未点亮”选项,选择后输出相应的识别结果。

### 3.4 测试结果

经测试,该 APP 能在 1 s 内识别出 256 个 DI 板信号指示灯的亮、灭状态,并输出相应的对比或识别结果,同时经人员现场核对,该 APP 的图像识别正确率和图像识别后输出结果(信号点表)的正确率均大于 98%,且该 APP 的各项功能正确。目前该图像识别 APP 已实际应用于宝兴水电站,应用效果良好。

## 4 结 论

前面将图像识别技术应用到水电站机组 DI 板

信号指示灯识别,并开发了一套基于 Android 系统的具有图像识别和输出功能的手机 APP。测试结果表明,使用该 APP 的拍照和识别功能,可以快速、准确地识别 DI 板信号指示灯,并输出识别结果供现场人员查看,提高了判断机组运行状态、监控对点和查找故障等的工作效率,避免了人工识别效率低和易遗漏等问题。该 APP 应用人工智能图像处理技术为现场工作赋能,具有较大的推广价值和使用价值,同时所提出的图像处理算法可应用到更多工业场景下的指示灯及仪表智能识别,也可集成到监控或巡检的工业机器人中,优化和提高工业现场巡检等工作的效率,实现工业环境的智能化作业。

### 参考文献

- [1] 刘佳,黄剑锋,尚进.去学水电厂计算机监控系统设计及应用[J].水电厂自动化,2020,41(1):10-12.
- [2] 戴宏伟,王宇航,魏鹏,等.水电监控远动通信信息点表自动比对及同步技术研究[J].水电能源科学,2019,37,229(9):165-168.
- [3] 王均华.高效自动化信号对点调试方法的探讨[C]//浙江省科学技术协会第十九届输配电研讨会论文集.舟山:浙江省科学技术学术委员会,2011:1-5.
- [4] 郑远攀,李广阳,李晔.深度学习在图像识别中的应用研究综述[J].计算机工程与应用,2019,55(12):20-36.
- [5] 蒋树强,闵巍庆,王树徽.面向智能交互的图像识别技术综述与展望[J].计算机研究与发展,2016,53(1):113-122.
- [6] 林庆达,禚亮,覃威威.电力系统图像识别研究综述[J].云南电力技术,2017,45(4):30-33.
- [7] 罗曦.浅谈深度学习在图像识别领域的应用现状与优势[J].科技资讯,2020,18(3):21-22.
- [8] 贾迪,朱宁丹,杨宁华,等.图像匹配方法研究综述[J].中国图象图形学报,2019,24(5):677-699.
- [9] 张莹.动态规划算法综述[J].科技视界,2014(28):126.
- [10] 姬亭.基于对偶四元数的高分辨率卫星遥感影像几何定位研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
- [11] 翟雨微.基于改进的 SIFT 图像匹配算法研究[D].长春:吉林大学,2017.
- [12] Kai Briechele, Uwe D Hanebeck. Template Matching Using Fast Normalized Cross Correlation [C] // Proceedings of SPIE Vol. 4387, Aero Sense Symposium, Orlando, Florida, 2001.

作者简介:

满亚勤(1975),男,高级工程师,主要从事电力系统及其自动化专业的工作。(收稿日期:2021-08-08)

# 一种调压开关触头装置的优化设计

李海国

(山东普益电气有限公司, 山东 滨州 256600)

**摘要:**为解决农村等偏远地区电压偏低问题,配合国家农村电网改造工程,先后开发了多种电力智能调压器。开发过程中遇到某型号调压开关使用的传统触头部件存在接触不良、拉弧等问题,严重影响了调压器的使用性能。在产品优化分析的基础上,设计了一种闭合自紧式触头装置,通过动触头和静触头充分可靠的接触,保证了调压开关运行的稳定性,增加了通流能力。装机试验证明,该装置性能可靠、运行稳定,并且结构紧凑,制造成本低。

**关键词:**调压开关;动触头;静触头;装置

**中图分类号:**TM 564.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)01-0066-05

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220114

## Optimal Design for Contact Device of A Voltage Regulating Switch

LI Haiguo

(Shandong Puyi Electric Co., Ltd., Binzhou 256600, Shandong, China)

**Abstract:**In order to solve the problem of lower voltage in rural areas and other remote areas, a variety of intelligent voltage regulators have been developed in cooperation with the national rural power grid reconstruction project. In the process of development, the traditional contact parts used in a certain type of voltage regulating switch have some problems, such as poor contact and arcing, which seriously affects the performance of voltage regulator. On the basis of product optimization analysis, a closed self-tightening contact device is designed. Through the full and reliable contact between moving contact and static contact, the stability of voltage regulating switch is ensured and the flow capacity is increased. The installation test shows that the device has a reliable performance and stable operation with compact structure and low manufacturing cost.

**Key words:**voltage regulating switch; moving contact; static contact; device

## 0 引言

由于传统变压器输出电压固定不变,存在近变压器一端实际电压偏高、远变压器一端实际电压严重偏低等问题,反映在广大偏远山区、农村、广阔林区等地区尤为普遍。为此国家“关于‘十三五’期间实施新一轮农村电网改造升级工程的意见”中明确提出:在东部沿海地区基本实现城乡供电服务均等化的基础上,广大中西部地区特别是城乡供电服务差距实现大幅缩小,综合电压合格率要达到97.9%。

为响应国家号召,配合农村电网改造升级工程,从2016年开始,先后开发了多种型号的电力智能调

压器。其中采用新型自耦变压器、有载分接开关、线路自动监测与控制等技术的电力智能调压器方案,具有多挡位调节、精细调节、用户无断电等特点。由于该技术优势比较突出,因此电力智能调压器项目入选2018年度山东省技术创新项目。

## 1 多挡电力智能调压器原理简介

图1为某型号调压器电气原理图。由图可知,该装置主要由一个自耦变压器、多个电气开关、两个电抗器和一个电子开关组成。A为输入端,A1为输出端。当输出端A1电压正常时,KMA3旁路开关接通,调压器在此状态下不工作;当A1电压低于

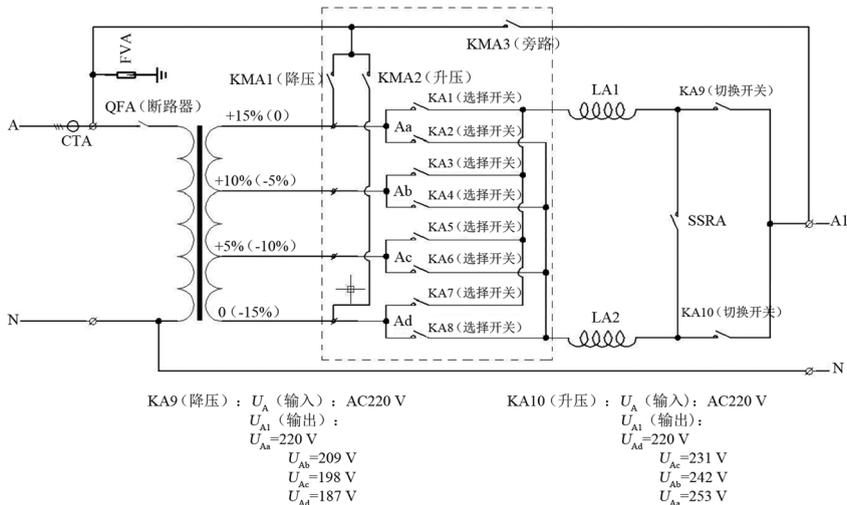


图1 某型号调压器电气原理

设定标准时,升压开关 KMA2 接通,根据所需升压值,通过选择开关中的某两个接通实现升压;当 A1 电压系统设定高于标准时,降压开关 KMA1 接通,根据所需降压值,通过选择开关中的某两个接通实现降压<sup>[1-3]</sup>。

由于无论是升压还是降压,都需要事先合上升压或者降压开关,这是升压或者降压的关键第一步,必须稳定可靠、导流能力强且能适应自动升降压的要求。在最初研制调压器的时候,采用常规触头结构,平面接触,用拉伸弹簧提供触头压力。经过一段时间的试验验证,出现了一些问题,严重影响了产品性能。

## 2 常规触头装置的应用

目前应用于电器产品中的触头装置,一般由动触头、静触头、弹簧、拨杆等零部件组成。这种触头装置的接触类型一般为面接触或线接触,对接触表面要求较高,而且也需要较大的额定触头压力,接触面加工难度大,装配过程中也难以调整,单靠弹簧的作用力使触头接触导电,遇到振动、发热也容易拉弧,对触头造成烧蚀损坏。在一些触头导电大且有振动的特定场所中,它要求触头接触面积大,有较大的接触压力,不能因振动和接触压力等问题而造成拉弧烧蚀<sup>[4-5]</sup>。

在研制图1所示型号的调压开关时,应用到升降压开合触头结构,需要在升压和降压时转换升降压开关,开始使用常规的动静触头面接触,采用弹簧拉杆结构实现触头开合。通过一段时间的使用,时

常出现触头接触不良、错位等缺陷,通过调整弹簧拉力、更换触头等措施,始终未能彻底解决问题。

图2所示的是某型号调压开关局部结构简图,它主要包括底盘、驱动块、动触头、静触头、出线端、动触头座、进线端、挂销、轴承、拉伸弹簧、弹簧固定轴和驱动轴等零部件。

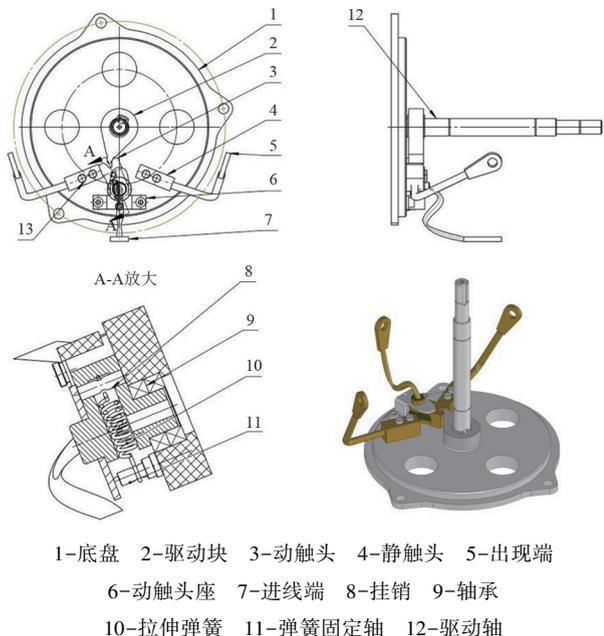


图2 某型号调压开关局部结构

为更进一步了解升降压触头装置结构,图3提供了升降压触头装置局部图。可同时参考图2和图3来分析触头的开合运动和工作情况。

动触头通过动触头座安装在底盘上,动触头上、下各有一个同心的凸出销轴,一端通过两个滚动轴承与底盘活动连接,另一端与动触头座上孔滑动配合,并作为进线端的连接接口;动触头的中间部位加

工出一个槽状结构,并在靠近内侧部位设置一销孔安装挂销,为拉伸弹簧提供空间和挂弹簧之用;动触头外侧加工出特殊的齿形槽,它与驱动块相互作用,驱动块的动力来源是通过其安装的驱动轴来提供;拉伸弹簧的一端套在固定在底盘上的弹簧固定轴上,另一端套在安装到动触头的活动挂销上;两个静触头分别为升降压触头,一端连接出线端,另一端通过两个销轴固定在底盘上。

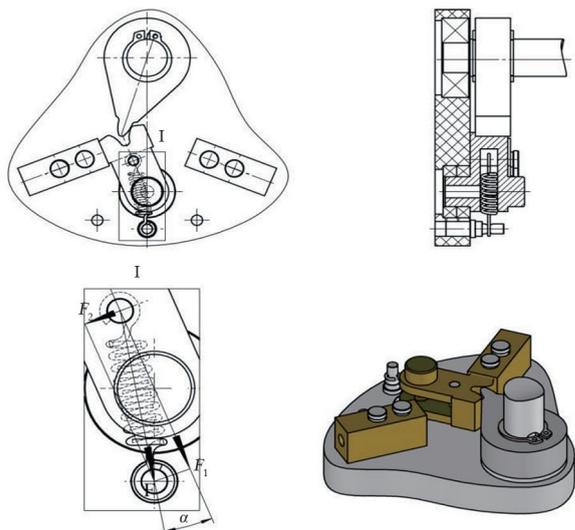


图 3 升降压触头装置局部

如图 3 所示,图示状态是动触头与其中一个静触头闭合的工况,可设定此时系统处于升压状态。驱动轴带动驱动块顺时针旋转,实现升压(关于升压方法,则不在所讨论范围之内);当系统需要降压时,驱动轴带动驱动块逆时针旋转,当驱动块旋转到动触头齿槽时,会将动触头拨动到另一侧与另一个静触头闭合,此时系统则处于降压状态。无论是升压还是降压,其额定触头压力均由拉伸弹簧提供。

产品使用过程初期并未发现问题,经过一段时间的应用,发现个别触头出现接触不良、错位,有时出现短暂拉弧。由于此开关转换频率非常低,只是在需要升降压转换时才切换,问题当时未体现出来,时间一长问题比较严重,特别是问题出现在升降压换挡的时候,严重影响了产品使用性能。为此采取将静触头两个销轴的配合改为间隙配合,加大拉簧拉力,改为浮动压紧等措施,有所好转,但始终未从根本上解决问题。

经过仔细对比分析,认为主要问题是触头的额定压力不够,压力不够的危害,特别体现在升降压换挡时有振动容易出现拉弧。如图 3 所示,弹簧的拉

力为  $F$ , 弹簧拉力方向与作用在动触头转轴的力  $F_1$  方向的夹角为  $\alpha$ , 则额定触头压力  $F_2$  (动触头作用在静触头上的压力) 为

$$F_2 = F \sin \alpha$$

由于系统升降压时需转换触头,动触头的齿槽在驱动齿的作用下必须来回均能拨动而不能干涩,故夹角  $\alpha$  不能增大,  $\sin \alpha$  值很小,  $F_2$  的值就很小。由于  $\sin \alpha$  值很小,仅增加弹簧的拉力  $F_1$  作用有限,必须改变原有结构形式才有可能解决问题。

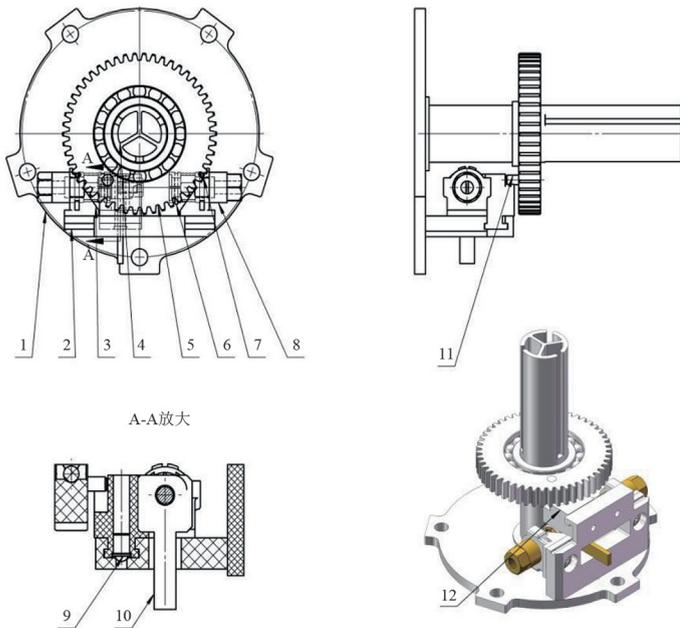
### 3 闭合自紧式触头装置

针对调压器升降压开关结构性缺陷所存在的不足,解决触头压力小、有振动所带来的问题,优化设计了一种用于特定场所的闭合自紧式触头装置,用于调压开关的升降压转换,以期解决接触不良、拉弧等问题,经过试验证明,达到了预期目的。该装置具有结构紧凑、通流能力强、运行稳定、制造成本低等优点。

如图 4 所示,优化设计后的升降压触头结构主要包括底盘、升降压座、静触头座、绝缘主轴、驱动盘、钢丝卡簧、轴用弹性挡圈、静触头、弹簧球头柱塞、进线铜排、驱动拨销和升降滑块等零部件。

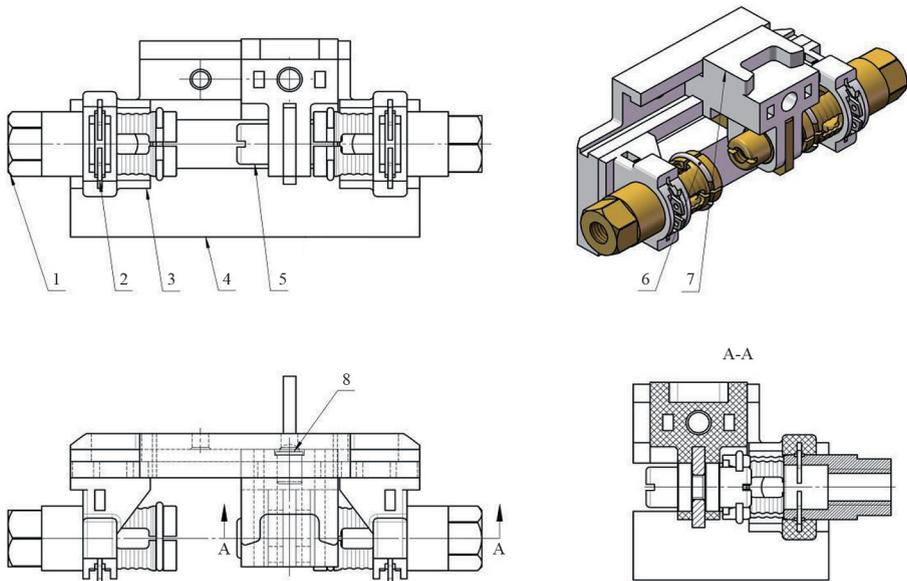
为更进一步了解闭合自紧式触头装置结构,可同时参考图 5 提供的闭合自紧式触头装置结构局部图来分析触头的开合运动和工作情况,图中标号 14 的零件是动触头,为圆柱体结构。调压器输入总电流分为 75 A、100 A、150 A 三档,为使兼容性强,动触头直接按导通 150 A 电流确定直径尺寸为 10 mm。

升降压座安装固定在底盘上,作为升降压系统模块的一个基体;升降滑块放置在升降压座的 T 型槽中,可左右滑动,升降滑块中间槽放置进线铜排,动触头为左右两个铜柱,它们把进线铜排夹紧并固定在升降滑块上,可随升降滑块左右移动。为确保动触头两个位置的准确性,保证不因振动、发热等因素而改变位置,在升降滑块中心位置设置了定位用的弹簧球头柱塞,在升降压座的相应位置设置一定位孔,这样动静触头在左右两个位置配合时就稳定可靠,有利于提高通流的稳定性和提升整体产品性能。绝缘主轴下端固定在底盘上,中间设置一个台阶用于安装驱动盘。驱动盘是一个轴承结构的齿轮型零件,其内圈固定在绝缘芯轴上,外齿圈可自由转



1-底盘 2-升降压座 3-静触头座 4-绝缘主轴 5-驱动盘 6-钢丝卡簧 7-轴用弹性挡圈  
8-静触头 9-弹簧球头柱塞 10-进线铜排 11-驱动拨销 12-升降滑块

图 4 优化设计后的升降压触头结构



1-静触头 2-轴用弹性挡圈 3-静触头座 4-升降压座 5-动触头 6-钢丝卡簧 7-升降滑块 8-弹簧球头柱塞

图 5 闭合自紧式触头装置局部结构

动。驱动盘下端安装一个驱动拨销,其作用是当驱动盘转动时能使得升降滑块左右移动,实现升降压开关的合分。

如图 5 所示,静触头安装在静触头座上,用外圆定位,轴向定位用一轴用弹性挡圈放置到静触头上的卡槽中来完成,静触头外端设置螺纹孔外接铜线软连接作为出线,具体安装步骤为:先将轴用弹性挡圈放置到静触头座的卡槽里,用卡簧钳撑开轴用

弹性挡圈,再从静触头座侧面放入静触头,直至轴用弹性挡圈落入静触头的卡槽中即可完成。静触头座安装在升降压座上,通过座宽和底部圆凸台定位,用一自攻螺钉拧紧固定。

静触头的接触导电部位为一弹性结构,它依靠头部内孔与动触头接触导电,为使接触牢靠耐用,静触头中部靠近接触导电端设定为薄壁结构,并开 4 个方孔,接触部分开 4 个开口槽,增加弹性。静触头接

触孔比动触头铜柱直径小 0.3~0.5 mm,在加工中用与铜柱等径的研磨棒研磨内孔,经研磨后的内孔要保证弹性伸缩量在 0.20~0.25 mm 之间,以保证在触头使用过程中充分接触,减小接触电阻。静触头内孔外端倒一斜角,以便在动静触头接触时运行顺利。

静触头的结构是本次优化设计的关键零件,其性能优劣直接影响系统可靠性。如图 6 所示,除了设置轴向定位卡槽、开 4 个方孔和接触部分开 4 个开口槽之外,在空间结构允许的情况下,尽量增大  $l$  尺寸的数值, $l$  长度一般应大于 10 mm,并在  $l$  尺寸范围内加工成波纹状,以进一步增强其弹性,使得触头结合既方便进入又接触牢靠。

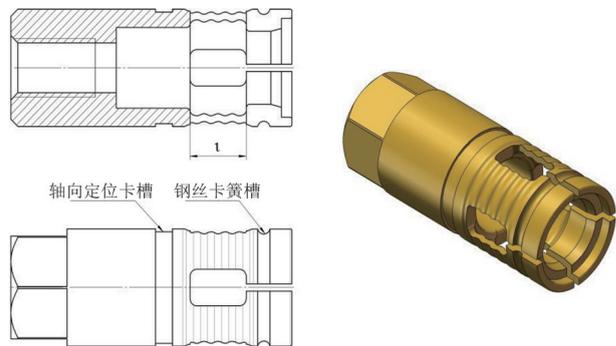


图 6 静触头结构

为进一步提高触头接触导电的可靠性,适当增加触头的额定压力,可在静触头触点部位外圆设有一钢丝卡簧槽,放置一钢丝卡簧,在卡簧的作用下,静触头触点部位弹性大大增强。使用钢丝卡簧时需注意卡簧槽的大小适合,防止因弹簧张力过大影响触头的分合。

动触头为圆柱体结构,左右各一个与进线铜排连接定位,在升降滑块的作用下左右移动分别与左右两个静触头分开或结合,从而实现触头的断开和闭合。

在使用过程中,触点部位可适当涂抹部分导电硅脂减小触点的接触电阻并起到润滑作用。

为增强装置的坚固耐用和绝缘性能,除去导电零部件、轴用弹性挡圈和钢丝卡簧,其余零部件均采用高强度绝缘材料增强尼龙添加 40% 玻璃纤维 (PA66+GF40) 压模制成。

#### 4 闭合自紧式触头装置的应用对比情况

图 4、图 5 中所示状态是动触头与其中一个静触头闭合,可设定此时系统处于升压状态。驱动盘

的外齿圈在外力作用下顺时针旋转,实现升压;当线路需要降压时,驱动盘的外齿圈逆时针旋转,安装在外齿圈下的驱动拨销旋转到升降滑块的倒 U 型槽左侧面时,升降滑块会在升降压座的滑槽中向左滑动,顺势将下端的动触头铜柱分开,外齿盘继续转动,就会将动触头拨动到另一侧与另一个静触头闭合,此时系统则处于降压状态。无论是升压还是降压,其位置定位由其弹簧球头柱塞提供,安全稳固。

优化设计的闭合自紧式触头装置应用于改造升级后的调压开关中,经过批量装机后使用观察,发现动静触头关闭和开合平稳顺利、无过热拉弧问题出现。其中有两台出现过触头闭合时有卡顿现象,经拆机检修发现是动静触头机加工尺寸问题,修正后问题解决。传统触头结构用在这里时的故障量达到 60% 以上,这充分说明优化后的触头结构在自身弹性和钢丝卡簧的弹性力作用下,运行稳定,性能可靠,通流能力强。

#### 5 结 论

电力智能调压器升降压开关在研制初期使用传统触头结构形式,在使用过程中多次出现触头接触不良、压力不够、错位等缺陷,影响设备性能;在换装了闭合自紧式触头装置后,运行稳定性,导流能力大大增强。为使触头充分可靠的接触,闭合自紧式触头装置还在接触导电部位增加钢丝卡簧,保证了触头的可靠接触,提高了寿命。

#### 参考文献

- [1] 郑文武,李海国.一种触头组件及机械开关:CN206628369[P].2017-11-10.
- [2] 李海国,李长虹,刘国良,等.多挡电力智能调压器有载分接开关的研发[J].电工电气,2018(10):54-59.
- [3] 李海国.旋转式机械开关在电力智能调压器中的应用[J].河北电力技术,2019,38(5):38-41.
- [4] 黄正乾,冯科让,罗淳,等.一种抽出式开关电器用桥型触头:CN102637537[P].2015-06-03.
- [5] 孙仁礼,许广林,曹卫东.一种隔离开关可分触头:CN102468081[P].2012-05-23.

#### 作者简介:

李海国(1969),男,教授级高级工程师,主要从事机械电气设计相关工作。(收稿日期:2021-09-12)

# 基于多种检测手段的高压电缆头 绝缘放电诊断分析

赵文君<sup>1</sup>, 栾崇彪<sup>2</sup>, 冯 藩<sup>3</sup>, 施 逸<sup>1</sup>, 蒋益强<sup>1</sup>, 兰 浩<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司宜宾供电公司, 四川 宜宾 644000; 2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621000; 3. 国网四川省电力公司绵阳供电公司, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 高压电缆头制作由于结构封闭、部件复杂以及电场均匀度要求高, 一直是一个难题。在利用红外精确测温、超声波和高频电流局放检测法的基础上, 创新性地引入了X射线吸收衬度成像技术对电力电缆头进行无损检测。通过多种检测手段综合诊断及解体论证, 对一起35 kV单芯高压电力电缆头绝缘放电案例进行了详细分析。分析结果表明: X射线吸收衬度成像技术能够有效辅助查找高压电缆头在制作或使用中老化产生的孔洞、裂缝等缺陷; 多种检测方式相互验证, 可以提高缺陷定性分析的准确率。文中率先将X射线吸收衬度成像技术应用于工程现场, 实现通过图形查找高压电缆头故障缺陷, 提高电力电缆故障诊断直观性和可靠性。

**关键词:** 电力电缆; X射线吸收衬度成像技术; 高频电流局放检测

中图分类号: TM 854 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2022)01-0071-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220115

## Analysis on Insulation Discharge Diagnosis in High-voltage Cable Head Based on Multiple Detection Methods

ZHAO Wenjun<sup>1</sup>, LUAN Chongbiao<sup>2</sup>, FENG Fan<sup>3</sup>, SHI Yi<sup>1</sup>, JIANG Yiqiang<sup>1</sup>, LAN Hao<sup>1</sup>

(1. State Grid Yibin Electric Power Supply Company, Yibin 644000, Sichuan, China;

2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang

621000, Sichuan, China; 3. State Grid Mianyang Electric Power Supply

Company, Mianyang 621000, Sichuan, China)

**Abstract:** The manufacturing process of high-voltage cable head has always been a difficult problem due to the enclosed structure, complex components and high requirements of electric field uniformity. On the basis of infrared temperature measurement, ultrasonic and high-frequency current testing, X-ray absorption-contrast imaging technology is introduced to carry out the nondestructive testing for power cable head. Through the comprehensive diagnosis of various methods and disassembly, an insulation discharge case of a 35 kV single-core high-voltage cable head is analyzed in detail. The analysis results show that X-ray absorption-contrast imaging technology can effectively help to determine defects such as holes and cracks which are formed in manufacturing process or ageing process, and mutual verification of various methods can improve the accuracy of qualitative analysis for the defects. The proposed X-ray absorption-contrast imaging technology is firstly applied to engineering, which realizes searching defects by images, and improves the direct visualization and reliability of defects diagnosis for power cables.

**Key words:** power cable; X-ray absorption-contrast imaging technology; partial discharge detection of high-frequency current

## 0 引言

随着中国经济的快速发展以及城市化进程的飞

速推进, 城市电网规模不断扩大, 电力电缆作为城市清洁能源的主要传输通道, 敷设数量增长迅猛, 其平均年增长量高达35%<sup>[1]</sup>。与架空裸导线相比, 电力电缆具有占用土地资源少、受自然条件限制小、不

影响城市美观、运行效率高以及安全性强等优点。但当电力电缆在生产或运输过程中存在局部缺陷时,容易导致其在运行中局部电场不均匀,长期下去引起电缆局部放电,造成安全隐患。尤其是电缆头作为电气连接关键节点,其制作工艺不良或制作操作不规范,也往往给电缆线路的安全运行带来危害。因此,相应的保障电力电缆安全运行的局部放电检测、诊断成像技术应运而生<sup>[2-5]</sup>。

目前电力电缆现场检测技术中,较为简便也较为成熟的主要包括红外精确测温、超声波以及高频电流局部放电检测。但由于现场检测环境的干扰以及电力电缆头内部元件的不可视性,无法实现在运行或不解体情况下准确找出缺陷原因。下面通过对一起 35 kV 单芯高压电力电缆头绝缘放电案例进行详细分析,利用红外精确测温、超声波以及高频电流局放检测的有效性,创新性地引入 X 射线吸收衬度成像技术,辅助诊断、定性电缆头缺陷。通过对比红外精确测温、超声波和高频电流局放、X 射线吸收衬度成像的检测结果,综合诊断缺陷类型,分析缺陷原因。最后通过解体电缆头,验收上述诊断及分析的准确性。

## 1 X 射线吸收衬度成像技术的实现

X 射线吸收衬度成像技术<sup>[6-7]</sup>如图 1 所示。其中,X 射线源为吸收色毫米级焦斑;源光栅为微米级宽线光源,其作用为增强横向相干性;样品为生物组织或低密度材料等;相位光栅作用为相位周期调制且自成像是条纹;分析光栅作用是将偏折角转为透射强度或相位扫描;二维探测器像素为数十微米。

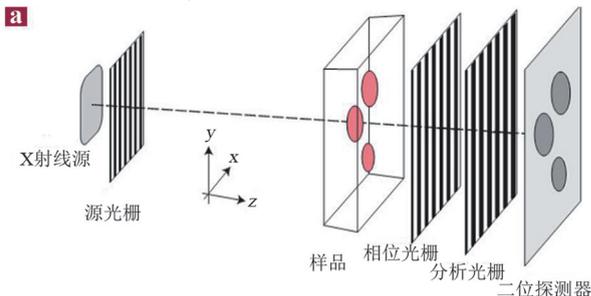


图 1 X 射线吸收衬度成像技术原理

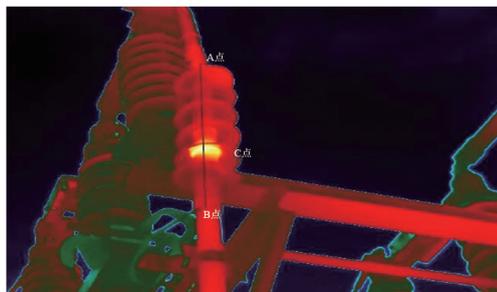
吸收衬度成像原理是通过检测非相干叠加的光栅自成像是条纹的位置移动和强度衰减等获得样品的吸收、相位和暗场衬度图像。采用 X 射线吸收衬度暗场衬度成像技术,可将电缆内部结构以图像形式显示,能够清晰准确地发现缺陷部位,为分析缺陷原因提供支撑。

## 2 案例检测过程

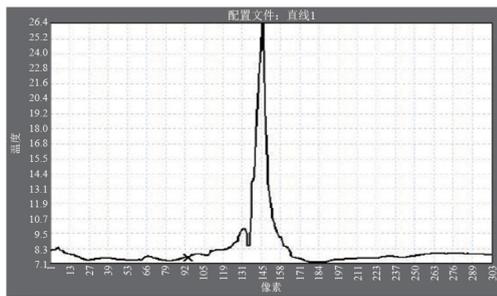
在某 110 kV 变电站专业巡视过程中,发现某 35 kV 出线电缆 C 相出线电缆头红外图谱特征异常,后经超声波及高频电流局放检测论证,确诊其电缆头内部存在局部放电。为进一步查找放电点,分析放电原因,对该电缆头开展了 X 射线吸收衬度暗场衬度成像分析。

### 2.1 红外精确测温

红外精确测温采用常见的 FLIR 红外测温仪,其中该 35 kV 间隔出线电缆头 A、B 两相相同位置未发现红外图谱异常,C 相电缆头红外热成像<sup>[8]</sup>异常图谱如图 2 所示。



(a)



(b)

图 2 红外热成像检测

其中图 2(a) 为设备运行状态下红外热成像图

谱,从图中可以清晰看出该电缆头发热现象明显,发热点位于第一片伞裙与第二片伞裙之间(从下至上)。为更清晰了解其温升情况,采集图 2(a)中 A 点到 C 点直线温度变化曲线,如图 2(b)所示。图 2(b)中 A 点像素点为 1, B 点像素点为 303, C 点像素点为 150(温度最高点)。图 2(b)中 C 点温度为  $26.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,环境温度小于  $8.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,则其同设备同材质温升大于  $18.1\text{ K}$ ,依据 DL/T 664—2016《带电设备红外诊断应用规范》,判断该电缆存在“严重”以上的电压致热型缺陷。

## 2.2 超声波检测

利用型号为 PDS-T90 的局部放电测试仪进行超声波测试<sup>[9]</sup>,测试方法为:将传感器正对图 2(a)中 C 点位置,并沿该电缆头进行  $360^{\circ}$ 局部放电测试,测试过程中应与带电部位保持足够安全距离,与该电缆保持  $0.7\text{ m}$  的测试结果如图 3 所示。

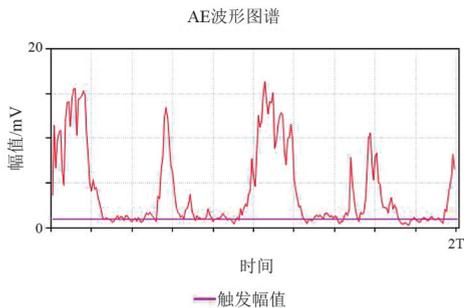


图 3 超声波检测

图 3 采集两个运行电压周期下放电特性。从图中可以看出,每个周期内存在两簇放电信号,放电幅值及相位较为稳定,其中放电触发幅值位于工频交流正弦波上升沿上,其放电幅值在  $40\text{ dB}$  增益下高达  $17\text{ mV}$ 。由此可以推断该电缆头存在较强的局部放电,放电类型为绝缘性放电。

## 2.3 高频局部放电流检测

用 PDS-T90 局部放电测试仪在该电缆屏蔽层接地软铜线处进行高频电流局部放电检测<sup>[10-11]</sup>。检测结果表明,该电缆存在绝缘性放电,其放电几乎覆盖整个周期相位。局部放电相位分布(phase resolved partial discharge, PRPD)和脉冲序列相位分布(phase resolved pulse sequence, PRPS)图谱如图 4 所示。根据图谱特征判断为绝缘性放电,与超声波检测结果一致。

## 2.4 X 射线吸收衬度成像检测

为进一步验证该电缆放电特征,研究局部放电作用下电缆绝缘层老化、放电通道形成机理,以及不良工艺情况下导致裂纹等缺陷的图形成像特征,对该故障电缆头进行 X 射线吸收衬度(暗场衬度)成像检测,其检测结果如图 5 所示。

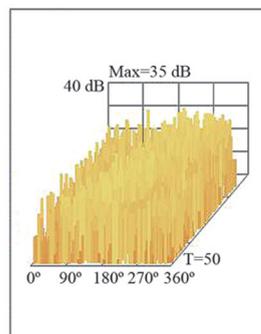
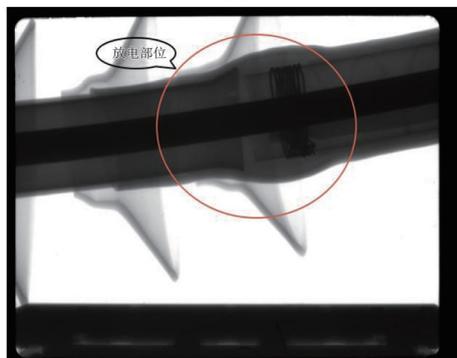


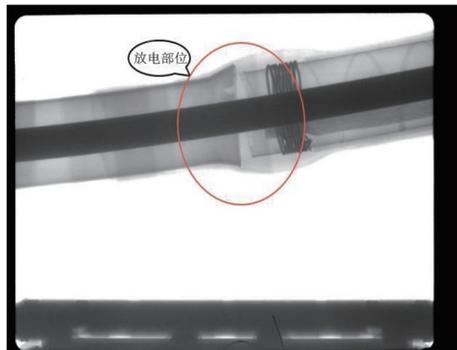
图 4 高频局部放电流检测



(a)



(b)



(c)

图 5 X 射线吸收衬度成像检测

图 5(a)为存在绝缘放电缺陷的  $35\text{ kV}$  电缆头。根据红外热成像、超声波以及高频局放电流检测结果,图中黑色方框区域存在局部放电缺陷,并对该区域进行 X 射线暗场衬度检测。根据不同照射剂量,

其成像结果不同,图 5(b)的照射剂量为 15 mR,图 5(c)的照射剂量为 30 mR。通过对比分析,发现图 5(c)距离屏蔽层接地软连接缠绕处朝左处存在明显淡色区域,该区域形成主要是该处材料对 X 光吸收与周围材料吸收程度不同而影像显示差异。

根据该 35 kV 单芯电缆结构可知,该淡色区域处应为半导体应力管覆盖在电缆本体半导体层上,两者材料相同,用于均匀电场,改善电场分布,避免局部放电发生。由于电缆头在制作过程中未严格按照标准工艺进行安装,导致设备在运行过程中产生局部放电。

### 3 解体及分析

为确定放电位置,分析放电原因,对该故障电缆头进行解体,发现其半导体应力管表面与护套绝缘之间存在放电,其表面有大量放电电痕,导致现场红外精确测温图谱异常,见图 6(a)所示。对半导体应力管解体时,发现其半导体应力管与电缆头本体半导体层之间未直接相连,存在 1~2 mm 缝隙被填充胶填充,半导体应力管未起到均匀电场作用产生绝缘放电,见图 6(b)所示。

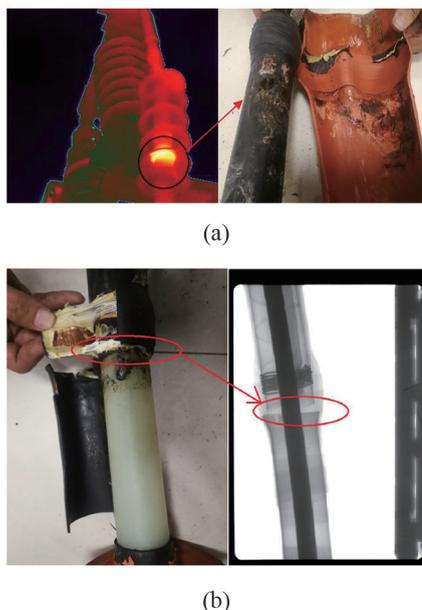


图 6 放电(发热)位置解体

### 4 结论

综上所述,此次绝缘放电原因为电缆头半导体

应力管未覆盖在电缆本体半导体层上,导致其电场分布不均,引起电缆头绝缘放电。

红外精确测温、超声波检测以及高频电流局部放电检测是检测高压电缆头缺陷的常用方法,能够准确发现运行过程中较为严重的绝缘性放电缺陷。X 射线吸收衬度成像技术能够有效辅助诊断,定性电缆头缺陷,同时对电缆绝缘层孔洞、裂纹等微工艺缺陷进行直观检测。所提方法成功实现了 X 射线吸收衬度成像技术对电缆头内部工艺性缺陷可视性诊断,为推进 X 射线对运行设备内部可视性分析奠定基础。

#### 参考文献

- [1] 朱玮. 浅谈我国电线电缆发展历史与未来展望[J]. 甘肃电力, 2006, 22(9): 156-157.
- [2] 彭江, 程序, 刘明, 等. 电网设备带电检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [3] 王风雷. 电力设备状态检测新技术应用案例精选[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [4] 吕军, 彭江, 冀肖彤, 等. 红外热性检测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [5] 白皓, 栾茜, 赵祥龙, 等. 电缆终端局部放电诊断方法的研究与应用[J]. 山东电力技术, 2020, 47(6): 41-46.
- [6] 王圣浩. X 射线光栅相位衬度成像技术和方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [7] 杜杨, 刘鑫, 雷耀虎, 等. X 射线光栅微分相衬成像视场分析[J]. 物理学报, 2016, 65(5): 058701.
- [8] 张国灿, 苏东青, 叶玉云. 红外成像技术在电力设备状态检测中的应用[J]. 电工技术, 2012(12): 48-49.
- [9] 姚勇, 岳彦峰, 黄兴泉. GIS 超高频/超声波局放检测方法的现场应用[J]. 高电压技术, 2008, 33(2): 422-424.
- [10] 陈智勇, 许飞, 戴洪宾. 基于高频电流电磁耦合法的 XLPE 电缆局部放电测量分析[J]. 广西电力, 2012, 35(8): 15-18.
- [11] 陈腾彪, 邬涛, 魏前虎, 等. 高频脉冲电流法在高压电缆带电局放检测以及定位中的应用[J]. 广东电力, 2017, 27(1): 114-119.

#### 作者简介:

赵文君(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 电气试验高级技师, 从事气体放电及绝缘放电检测工作;

梁崇彪(1987), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为脉冲功率及其应用技术。

(收稿日期: 2021-08-12)

# 一起雷击跳闸事故中电动机返送电对电网的影响分析

蓝彬桓,黄宇涵,陈鹏

(国网四川省电力公司遂宁供电公司,四川 遂宁 629000)

**摘要:**针对一起某110 kV线路雷击跳闸后,由于电动机返送电导致线路重合失败的复杂电网事故,从现场录波记录、事故现象、保护行为、断路器动作时序等方面进行详细分析,深入探讨了电动机返送电对110 kV终端系统的影响,并提出了合理的应对措施和改进方法。

**关键词:**110 kV终端系统;返送电;故障分析

**中图分类号:**TM 773 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2022)01-0075-03

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220116

## Analysis of Impact on Power Grid Caused by Power Return from Motor in A Lightning Trip-out Accident

LAN Binhuan, HUANG Yuhan, CHEN Peng

(State Grid Suining Electric Power Supply Company, Suining 629000, Sichuan, China)

**Abstract:** Aiming at a complex power grid accident that the reclosing fails due to the power return from motor after a lightning trip-out of 110 kV transmission lines, the impact of power return from motor on 110 kV terminal system is analyzed in detail in the aspect of wave recording, accident appearance, relay protection behaviour and time sequence of breaker action. The reasonable countermeasures and improvement methods are also proposed.

**Key words:** 110 kV terminal system; power return; fault analysis

## 0 引言

继电保护是电力系统第一道防线,承载着切除故障、恢复供电的重要作用,其动作可靠性直接决定电网能否安全运行。然而,电力系统由集中式向分布式的演变过程对电网继电保护控制提出严峻挑战<sup>[1]</sup>,尤其是在终端110 kV系统中,在唯一电源侧发生故障后,电动机返送电可能让站内多个设备感受到暂态故障电流<sup>[2]</sup>,进而导致继电保护装置的不正确动作,威胁电网安全运行。下面针对一起雷击跳闸引起的电动机返送电事故进行详细分析。

## 1 事故简述

### 1.1 系统运行方式

220 kV A站:110 kV两段母线并列运行,110 kV L1线167断路器运行于I母;110 kV L2线168断路器运行于II母,对侧110 kV D站155断路器热备用;110 kV L4线164断路器运行于I母;变压器

110 kV侧中性点直接接地。

110 kV B站:110 kV两段母线并列运行,110 kV L1线152断路器运行于I母,L1线为110 kV B站唯一进线电源点;110 kV L4线151断路器运行于I母;变压器110 kV侧中性点经间隙接地。

110 kV C站:110 kV L3线为用户C站的主供电源,162断路器运行于II母;110 kV L4线为用户C站的备用电源,但站内并未启用备自投,161断路器处于分位。

L1、L2线路部分输电区间为同塔架设,具体电网结构如图1所示。

### 1.2 事故状况及保护动作报告

2020年7月24日06:29:18左右,A站侧L1线167断路器、L2线168断路器保护跳闸,B站侧L1线152断路器保护跳闸,同时1号主变压器间隙被击穿。L2线D侧155断路器本身处于分位,保护未动作。各站动作报文详见表1。

经巡视后发现在L1线9号塔上相、L2线10号塔上相(同塔)绝缘钢帽均存在明显雷击痕迹,判断

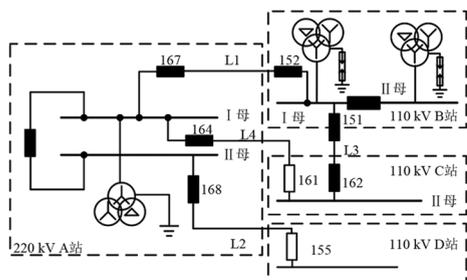


图 1 系统运行方式

表 1 各站动作报文

位置	时刻	报文
A 站 167 断路器	06:29:17.989	保护启动
	06:29:18.031	距离保护 I 段保护动作,选 B 相
	06:29:19.603	重合闸动作成功
B 站 152 断路器	06:29:17.996	保护启动
	06:29:18.016	距离保护 I 段保护动作,选 A、B 相
A 站 168 断路器	06:29:17.988	保护启动
	06:29:18.001	纵联差动保护动作
	06:29:18.021	接地距离 I 段保护动作

为雷击引起的跳闸事故,由表 1 可知,L1 线 167 断路器动作后重合成功,但由于终端 B 站 152 断路器动作后未重合,导致 B 站全站停电。

## 2 事件原因分析

### 2.1 保护动作分析

1) 调取 L2 线 A 站侧线路保护故障波形如图 2 所示,由图可知,A 站侧母线 A、B 相电压下降,电流增加,并产生零序电压、零序电流,A、B 相测量阻抗明显低于 C 相,推断为 A、B 两相接地故障。D 站侧断路器处于分位,因此差动电流等于制动电流,达到式(1)动作条件,差动保护动作正确<sup>[3]</sup>。

$$\begin{cases} I_{d\Phi} > 0.6 \times I_{r\Phi} \\ I_{d\Phi} > I_{dset} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I_{d\Phi}$  为相差动电流; $I_{r\Phi}$  为相制动电流; $I_{dset}$  为差动电流整定定值。

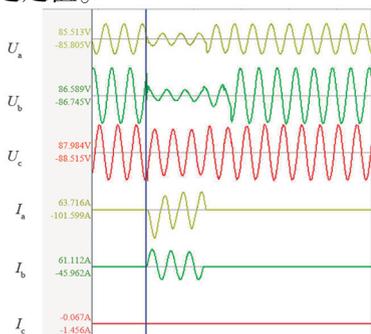


图 2 220 kV A 站 L2 线故障录波

2) 调取 L1 线两侧线路保护故障波形对比如图 3 所示,图中标识 1 代表 A 站侧电气量,标识 2 代表 B 站侧电气量。由图可知,故障时两侧 B 相电压同时下降,两侧 B 相电流增加且同相位,A、C 相位相反,由此推断 L1 线发生区内 B 相故障。随后,B 站侧 152 断路器先一步切除故障,电压恢复,故障电流消失,约一个周波后 A 站侧 167 断路器动作,母线电压随即恢复。

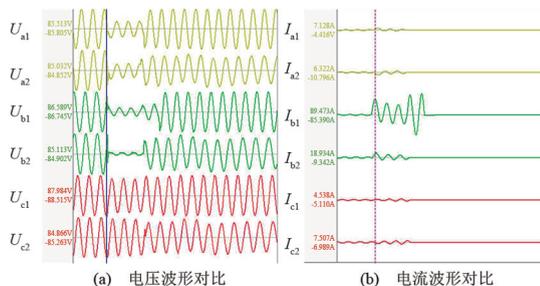


图 3 L1 线两侧故障波形对比

A 站侧 B 相测量阻抗最低达到  $0.2 \Omega$ , 小于保护定值,L1 线距离 I 段动作。由于雷击为瞬时性故障,且 152 断路器先跳开,A 站侧 167 断路器满足检母线有压线路无压条件重合成功,综合判断 A 站侧保护装置正确动作。

3) L1 线作为 110 kV B 站的唯一进线电源,在电源侧发生故障后,B 站应无法向 L1 线提供故障电流。但根据动作报文和录波分析,B 站侧 L1 线 B 相存在明显故障电流,B 站侧故障测距阻抗为  $0.13 \Omega$  落于定值动作区间,从而导致距离 I 段保护动作,L1 线 152 断路器未投重合闸,从而导致 L1 线在瞬时故障后重合失败,将具体分析故障电流来源。

将 L1 线、L3 线故障电流波形进行对比,如图 4 所示,其中标识 1 代表 L3 线电气量,标识 2 代表 L1 线电气量。由图可知,两条线路电流幅值、相位接近一致,具体存在差异是因为接地点的零序电源向 L1 线提供零序电流。

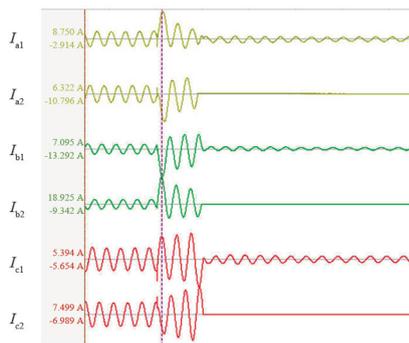


图 4 L1、L3 线故障电流波形

由图 5 可知,故障发生前频率为  $49.972 \text{ Hz}$ ,电压二次值约为  $60 \text{ V}$ ,故障切除后,母线电压、母线频率持

续下降。考虑为故障切除后,C 站的大电动机负荷可以视为暂态小电源向母线反送电,但受到负荷制动作用,其转速越来越低,输出电压下降,符合大电动机反送电的特征<sup>[4]</sup>。由此,可以推断出 C 站电动机反送电是导致 B 站 152 断路器动作的根本原因。

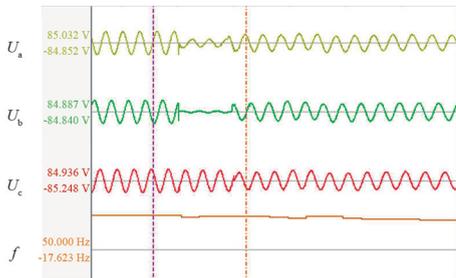


图 5 B 站母线电压及频率波形

4) 本次故障由雷电直击杆塔引起,事故过程中线路避雷器未能防止雷电波侵入变电站 B,之后 B 站 1 号主变压器间隙率先被击穿。B 站内两台主变压器电流波形如图 6 所示。由图可知,在故障时 1 号主变压器间隙流过稳定电流,代表此时间隙已被击穿,雷电过电压波通过 1 号主变压器间隙被导入地,因此 2 号主变压器间隙未被击穿。此时局部电网系统出现 A 站主变压器中压侧接地、B 站 1 号主变压器接地两个接地点,故障点零序电源以这两个接地点构成回路,三相中流过同相电流。因此在 B 站 1 号主变压器中三相电流基本同相,呈现典型零序特征。综上所述,1 号主变压器间隙被击穿后形成接地点,防止了雷电波对变压器的损坏,主变压器间隙动作行为正确<sup>[5]</sup>。

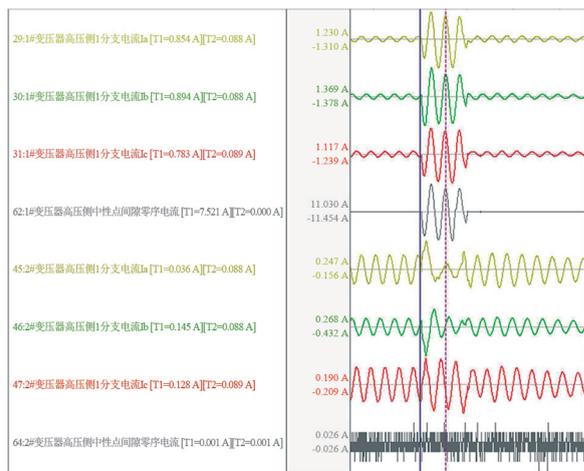


图 6 两台主变压器电流波形

### 3 结论

该事故因雷电直击杆塔导致 L2 线发生 A、B 相接地短路故障,该线路两侧差流满足差动保护条件,保护正确动作跳开 168 断路器;同时,同塔 L1 线发

生 B 相接地短路故障,A 站侧距离保护 I 段动作,1.5 s 后重合闸正确动作,而由于大电动机返送电让 B 站 L1 线距离保护感受到故障电流,跳开 152 断路器,因此 L1 线重合失败。此外,雷电波沿 L1 线侵入 B 站导致 1 号主变压器间隙被击穿,主变压器电流呈典型零序特征。针对本事故中发现的问题和隐患,特提出以下几点建议:

1) 终端 110 kV 变电站在来电侧故障时,大电动机返送电可能会为故障点提供故障电流,影响瞬时性故障线路成功重合。建议电网单位加强对用户站负荷的分析管控,并针对性进行合理保护配置,避免因用户负荷特性影响电网安全运行。

2) 若线路避雷器不能发挥作用,雷电波侵入变电站后若未击穿间隙且电压较高,则存在主变压器间隙保护动作跳三侧的可能,延误后续恢复送电进度。建议定期检查线路避雷器可靠性,降低电网运行风险。

3) L1 线发生区内故障时,若 A 站侧断路器先跳闸,则会导致 B 站失去接地点运行,单相接地故障时零序电压理论值可能达 300 V<sup>[2]</sup>,导致零序过压保护动作,跳主变压器各侧断路器,延误后续恢复送电进度。建议在终端 110 kV 系统中将光纤差动保护设为主保护,区内故障时同时跳开两侧断路器,防止 110 kV 系统中性点失地后经线路侧接地点运行。

下一步,将详细量化分析电动机返送电的暂态特性,求解大电动机负荷的动态响应特性。

### 参考文献

- [1] 胡鹏飞,朱乃璇,江道灼,等.柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J].电力系统自动化,2021,45(8):2-12.
- [2] 严文洁,罗皓文,严文帅,等.一起线路单相接地导致变压器间隙零序动作事故的分析[J].技术与市场,2019,26(10):7-9.
- [3] 宋志伟,徐舒,王润路,等.5G 通信条件下的线路差动保护优化策略研究[J].供用电,2021,38(5):17-22.
- [4] 赵云,刘世琦,李晓明,等.考虑电磁暂态过程的大功率异步电机全压起动方法[J].高电压技术,2013,39(2):464-473.
- [5] 薛峰,谢夏寅,孙徐龙,等.220 kV 线路故障引起 110 kV 系统保护异常动作的研究分析[J].江苏电机工程,2010,29(4):51-53.

### 作者简介:

蓝彬恒(1991),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为电力系统继电保护等;

黄宇涵(1995),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护等。(收稿日期:2021-08-21)

# 某主变压器保护多次动作跳闸事故分析

王伟,王婷婷,张里

(国网四川省电力公司技能培训中心,四川成都 611133)

**摘要:**针对重瓦斯保护动作引起主变压器跳闸事故频发,对某35 kV变电站主变压器压器几年来多次跳闸事故的经过进行分析,发现主变压器区外故障产生的穿越性电流可能是造成跳闸的重要原因。通过搭建试验平台对变压器主保护装置进行了大量的电气量保护试验及非电量保护试验,找到了主变压器重瓦斯保护动作跳闸却没有动作报文的原因,并提出将重瓦斯保护的整定值设定为标准范围内的最高上限值来防止主变压器压器区外故障产生的穿越性电流引起重瓦斯保护误动作。

**关键词:**瓦斯继电器;动作报文;电流速断保护

**中图分类号:**TM 774 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2022)01-0078-03

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220117

## Analysis on Tripping Accidents of Repeated Protection Actions of A Main Transformer

WANG Wei, WANG Tingting, ZHANG Li

(Skills Training Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 611133, Sichuan, China)

**Abstract:** Aiming at the repeated tripping accidents caused by buchholz relay protection actions, the history of repeatedly tripping accidents of the main transformer in a 35 kV substation over the past few years is analyzed, and it is found out that the through current generated by the fault outside the main transformer area may be the important cause of main transformer tripping. A large number of electrical power protection tests and non-electrical power protection tests are carried out on the main protection device of transformer by setting up a test platform. The reasons why the heavy gas protection action of main transformer tripped but there is no action message are found out, and it is proposed that the setting value of heavy gas protection is set as the highest upper limit within the standard range to prevent the through current generated by the fault outside the main transformer area from causing the malfunction of heavy gas protection.

**Key words:** buchholz relay; action message; current quick-breaking protection

## 0 引言

变压器的主保护包括差动电流保护和重瓦斯保护,当变压器内部发生严重故障时,变压器的主保护能快速跳闸,保护变压器本体不受损坏,灵敏度较高。而近年来,由电力变压器重瓦斯保护动作引起的主变压器跳闸事故频发<sup>[1-4]</sup>。某35 kV变电站在2017年至2020年期间,多次发生主变压器跳闸事故,导致全站失电。下面收集了每次主变压器压器跳闸事故的相关资料,分析了事故发生的主要原因。

## 1 主变压器压器跳闸事故情况经过

某35 kV变电站(该站主接线为单母线接线只

有1台主变压器、5条10 kV出线)主接线如图1所示,在2017年至2020年间总共发生了5次主变压器跳闸事件。

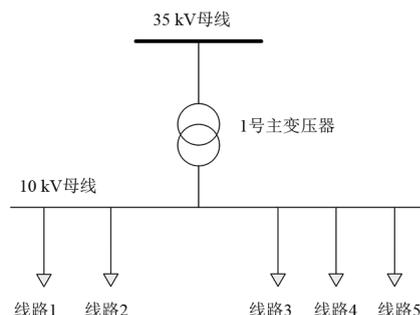


图1 35 kV变电站主接线

### 1.1 第1次跳闸

2017年某日,10 kV线路1保护动作,1号主变

压器两侧断路器跳闸,引起全站失电,导致另4条10 kV线路停电,10 kV出线间隔为两CT配置。现场检查发现35 kV变电站10 kV线路1保护装置显示“电流速断动作”,1号主变压器保护后备保护装置显示“本侧复合电压动作”。

对1号主变压器本体及连接线外观进行检查无异常,未发现近区短路情况。结合1号主变压器动作情况,对主变压器油样进行化验,结果显示油样无异常。对1号主变压器保护装置的二次电压、电流及控制回路进行了绝缘测试,绝缘测量值都在10 MΩ以上,绝缘合格,排除了回路绝缘降低,触发保护动作的可能。对主变压器主保护装置二次回路进行梳理,并检查了接线情况,未发现寄生回路。“复压动作信号仅表示复压元件开放,非出口跳闸命令”,说明线路故障时主变压器保护未动作,10 kV线路1保护动作与主变压器动作无任何关联。对主变压器保护装置进行保护全检,断路器传动测试,试验结果显示保护装置动作正常,报文显示正确。

### 1.2 第2次跳闸

2019年某日,1号主变压器两侧断路器跳闸导致35 kV全站失电,5条10 kV线路停电。现场检查发现1号主变压器保护装置无任何保护动作报文。

现场对1号主变压器本体及连接线外观进行检查无异常,未发现近区短路情况。主变压器油样化验结果显示无异常。对现场主变压器及10 kV出线间隔的操作回路进行绝缘测试及回路梳理,未发现寄生回路和异常。但对保护装置的插件进行拆卸检查时,发现1号主变压器低后备保护测控装置开关操作插件上的部分元件有烧灼痕迹。

### 1.3 第3次跳闸

2020年某日,该变电站10 kV线路2保护装置电流速断保护动作断路器跳闸,同时1号主变压器两侧断路器跳闸,全站10 kV系统失电,而主变压器主保护和后备保护没有任何动作报文。

现场检查发现,10 kV线路2断路器因AB相间故障电流速断保护动作,A相电流二次值大于保护电流速断整定值,动作行为正确。

对1号主变压器本体及连接线外观进行检查未发现异常及近区短路情况。对主变压器油样进行化验,结果显示油样无异常。检查主变压器保护装置中无任何启动或动作信息,也未发现其他明显异常。对1号主变压器主保护和后备保护装置进行校验并检查二次回路,主变压器保护装置能够正确动作。对主变压器差动保护调试时发现保护能够正常动

作。在主变压器上也进行了重瓦斯传动试验,能够正确动作。进一步检查主变压器保护装置的插件,发现主变压器差动保护装置电源、开入插件以及高、低压侧断路器操作插件的部分元件有烧蚀痕迹。

### 1.4 第4次跳闸

2020年的第2次跳闸,该35 kV变电站10 kV线路3保护装置电流速断保护动作断路器跳闸,1号主变压器有载重瓦斯保护动作,两侧开关跳闸,全站失电。

现场检查发现该35 kV变电站10 kV线路3保护装置电流速断保护动作跳闸,动作电流二次值大于电流速断保护定值,10 kV线路3保护装置动作为正确;1号主变压器有载重瓦斯动作跳开两侧断路器。

对1号主变压器本体外观检查无异常,未发现喷油现象,压力释放阀未动作,有载调压分接开关瓦斯继电器内无积水、受潮现象。有载调压开关油枕油位正常。但发现有载调压开关油枕油位计有油位上涌痕迹、主变压器呼吸器硅胶无变色、呼吸器的油杯换气衔接处较紧固,存在阻碍正常呼吸的现象。

非电量二次回路绝缘测试合格,绝缘测量值在100 MΩ以上,排除了潮湿导致回路导通触发保护动作的可能。检查主变压器主保护装置二次回路接线情况,未发现寄生回路,也未发现回路异常导通等情况。

手动触发有载调压瓦斯继电器探针,有载调压重瓦斯动作,断路器跳闸且保护装置出现报文,与1号主变压器动作的报文一致,能够复现1号主变压器保护动作现象。

进一步核算故障时电流大小:10 kV线路3断路器故障二次电流为67.46 A,CT变比为100/5,一次侧电流为 $1\ 349.2\text{ A}$ ,折算到主变压器高压侧电流为 $1\ 349.2 \times 10 / 35 = 385.5\text{ A}$ 。高压侧额定电流为66 A,说明流过主变压器高压侧的故障电流为1号主变压器高压侧额定电流的6倍。

最后对主保护(差动)进行调试及保护传动,保护出口正常,能正确跳开两侧断路器。

### 1.5 第5次跳闸

2020年的第3次跳闸,该35 kV变电站10 kV线路4保护装置电流速断保护动作断路器跳闸,同时1号主变压器两侧断路器跳闸,全站10 kV系统失电,主变压器保护无任何动作报文。

现场检查发现该站10 kV线路4保护装置因AB相间故障导致电流速断保护动作跳闸,A相电流超过电流速断整定值,动作行为正确。

对 1 号主变压器本体及连接线外观进行检查无异常,未发现近区短路情况。油样检测无异常。主变压器保护装置及二次回路也未发现异常,但后备保护测控装置电源插件个别元器件已老化变色。

## 2 事故原因分析及处置

### 2.1 电气量保护动作分析

通过分析发现第 1、3、4、5 次主变压器跳闸都有主变压器区外 10 kV 线路保护动作跳线路断路器。除了第 2 次主变压器跳闸事件有主变压器保护动作报文,其余几次均无动作报文,考虑是主变压器区外故障导致差动保护动作,而报文显示延时造成的。但通过模拟试验发现主变压器保护在区外大电流故障情况下并不动作,在区内故障情况下正确动作且显示动作报文,无动作报文延时现象,故排除此种可能。

### 2.2 非电量保护动作分析

考虑到第 4 次主变压器跳闸事件是有载重瓦斯动作且有报文,并且通过手动短接有载调压重瓦斯继电器使有载重瓦斯信号开入,变压器保护既有报文也能实现正常的跳闸,于是对非电量保护的有载重瓦斯保护进行试验。

非电量保护的工作原理如图 2 所示,其中 YZZWSS 为中间继电器,TJ 为跳闸出口继电器。当有载调压重瓦斯继电器动作,信号开入接点闭合。回路从控制正电源到 YZZWS 中间继电器再到控制负电源接通,YZZWS 中间继电器线圈带电;对应的常开接点 YZZWS 接点闭合,从而控制正电源到跳闸出口继电器 TJ 再到出口压板最后到控制负电源回路导通;当出口跳闸继电器 TJ 线圈带电,对应的跳闸回路接通实现断路器的跳闸。

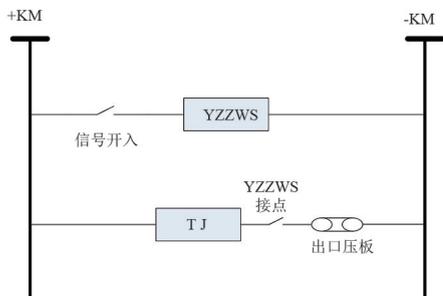


图 2 非电量保护工作原理

非电量保护试验平台是采用昂立微机保护测试仪和昂立的模拟断路器来搭建的,如图 3 所示。通过继电保护测试仪的开关量输出功能对主变压器非电量保护进行试验发现:在有载重瓦斯开入信号持续 7~28 ms 时,有载重瓦斯动作跳模拟断路器,但

无报文显示;当有载重瓦斯开入信号持续 29 ms 或更长时间,有载重瓦斯动作跳模拟断路器后立即显示有载重瓦斯动作的报文。

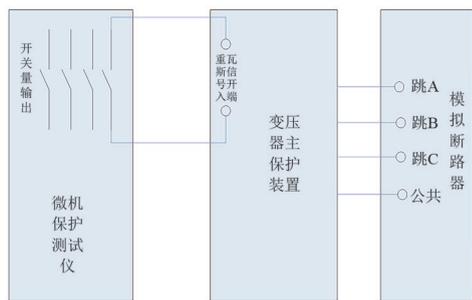


图 3 非电量保护试验平台

### 2.3 处理措施

对主变压器进行的试验包括耐压试验、绝缘电阻测量、油样检验分析等,最终确定主变压器内部无故障。在主变压器压区内部无故障的情况下,应将重瓦斯保护的整定值设定在标准值范围内的最上限,防止主变压器区外故障产生的穿越性电流导致重瓦斯继电器误动作。

## 3 结论

通过模拟试验及综合分析,该 35 kV 变电站主变压器跳闸事故主要由于区外线路故障导致主变压器有较大的穿越性电流流过,引起主变压器油温升高造成油流动短时冲击瓦斯继电器,从而导致主变压器跳闸、全站停电。由于油流冲击瓦斯继电器的时间较短,导致有载重瓦斯动作却无报文显示,因此难以发现主变压器非电量保护动作。建议一方面适当提高重瓦斯保护的整定值来防止重瓦斯保护误动作,另一方面运行时应记录主变压器压区外故障穿越性电流的冲击数量和电流的数值,为主变压器压器的运行检修提供依据。

### 参考文献

- [1] 谢家安,周圆,李涛. 区外短路故障导致主变重瓦斯误动作解决方案研究[J]. 中国电机(技术版),2015(11):45-48.
- [2] 董学芹,刘佳,田莉莉. 110 kV 变电站主变重瓦斯保护动作故障浅析[J]. 通讯世界,2016(3):119-120.
- [3] 张兆君,吴昱明. 穿越性大电流冲击下主变重瓦斯误动作的原因分析[J]. 大众用电,2021(1):35-36.
- [4] 乔江峰. 一起区外故障引发主变重瓦斯误动作事件的分析及整改[J]. 自动化应用,2018(11):139-141.

### 作者简介:

王伟(1981),男,硕士,讲师,研究方向为电力系统继电保护。  
(收稿日期:2020-09-13)

# 变电站保护装置状态监测的优化和异常处置

余骏阳,李继尧,李辉,宋麟飞,李飞鹏,蒋枝  
(国网四川省电力公司检修公司,四川成都 610042)

**摘要:**随着变电站二次系统的不断发展,对于二次设备状态,特别是继电保护装置状态的监测越发重要。基于采集保护装置自身各类信号形成的站端和主站状态监测系统已经全面推广,但由于监测规模和信号数量的不断膨胀,对保护装置的状态监测呈现复杂化、无序化的趋势,运维人员也难以高效排查处置保护装置异常。文中首先多角度分析了现有站端保护装置监测系统的优缺点,进而从现场实际出发提出优化保护装置状态监测的方案。在优化状态监测信号以及显示的同时,结合实际运行维护经验,提出并讨论了发现、处置、报送保护装置异常的标准流程。

**关键词:**变电站;保护装置;状态监测

**中图分类号:**TM 77 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2022)01-0081-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220118

## Optimization and Abnormal Disposal of Condition Monitoring for Substation Protection Device

YU Junyang, LI Jiyao, LI Hui, SONG Linfei, LI Feipeng, JIANG Zhi  
(State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610042, Sichuan, China)

**Abstract:** With the continuous development of substation secondary system, monitoring the status of secondary equipment, especially relay protection devices becomes much more important. The condition monitoring system in the station and remote terminal based on the collection of various signals of protection devices has been widely promoted. However, due to the expansion of the scale and the quantities, the condition monitoring of protection devices presents a trend of complexity and disorder. And it is hard for the operation and maintenance personnel to efficiently troubleshoot and deal with the abnormal problems. Firstly, the advantages and disadvantages of the existing monitoring system for in-station protection device analyzed from multiple perspectives, and then a scheme to optimize the monitoring system is put forward from on-site experience. While optimizing the signal and display of condition monitoring, a standard process of finding, disposing and reporting the abnormal problems of protection devices based on the practical operation and maintenance experiences is also proposed.

**Key words:** substation; relay protection device; condition monitoring

## 0 引言

变电站各类保护装置作为二次系统重要组成部分,在继电保护功能框架内处于核心位置。保护装置对变压器、线路、电容电抗等设备出现故障时采取的措施,能有力确保人身安全威胁快速消除、电网影响范围得到控制、相关联设备损失尽可能最小化。以保护装置为核心构成的继电保护体系是电网稳定运行的基石。在高电压等级的变电网络中,脱离保护运行是被严格禁止的。这也意味着保护装置运行状态直接与一次设备能否正常投运存在密切关联,

如何有效监测和处置异常保护装置极为重要。

随着保护装置自身监测能力提升,通过采集保护装置信号判别保护装置运行状态已广泛应用,对采集信号进行挖掘分析能够有效预警和确认装置异常程度<sup>[1-4]</sup>。对监控系统的优化研究逐步发展,其中:通过改进监测系统后端界面的友好性可以提升监控人员的工作效率<sup>[5]</sup>,也有研究尝试将具备采集保护装置信号的站端系统有机结合,进行广域监测,从而更加有效利用现有站端信息<sup>[6]</sup>;更有一些研究针对智能站网络报文多提出了利用神经网络或大数据方式进行处置的方案<sup>[7-8]</sup>。但这些研究多忽略了实际中的问题,即现在用来监测设备状态的信息量

已经从不足向过多跨越,由原有的信号缺乏使运维人员不能发现保护装置异常的难点,已经转向为信号太多使运维人员无法高效排查实际异常的痛点。

下面讨论了当前变电站对保护装置监测的实际现状,从监测设备主体出发,对监测方式、监测内容等方面展开了分类论述,并结合运维实际讨论了当前设备状态监测存在的不足。针对现有保护状态监测不足的现状,试图从减少重叠、降低负担、有效分类等关键点出发,提出并讨论了几个保护装置状态监测的优化方向。对装置状态监测系统本身异常的及时处置是正确可靠监测保护设备状态的基础,为此讨论了一套经现场验证有效的排查流程,从有效定位异常、临时处置和高效报送 3 个层次提升现场运行维护应对二次保护装置异常的能力。

## 1 变电站保护装置监测的现状

现有变电站自动化系统已日趋完善,特别对于站端数据采集与监视控制(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统,各后台厂家在实践中不断改进,逐渐形成了一套既符合现有标准,同时也基本满足变电站实际需求的自动化厂站监控平台,能够做到站端信息应收尽收、应显尽显。与此同时,以站端通信管理机(或应用服务器)加上主站平台的前置服务器构成的集中监控平台也同步发展成熟。上述 2 套系统的重要功能之一就是对于厂站端包括保护装置在内的各类设备进行监控。除此之外,保护信息子站、录波装置、网络报文分析仪等新辅助设备也直接或间接对保护装置工作状态进行了有效监测。下面将分类对变电站保护装置监测的应用特点进行阐述,并结合运行维护实际,指出其应用中存在的缺点。

### 1.1 站端自动化监控系统

变电站自动化监控系统,实际上是 SCADA 系统应用在变电站环境下一个具体化实例,其基本特点与 SCADA 系统一致。在对保护装置进行监测方面,站端自动化监控系统主要依靠测控装置和保护装置自身对保护装置工作状态进行监控。具体地说,硬接点信号一般通过测控装置采集,软信号通过保护装置经协议上送。

各类信号中,硬接点信号较少,但部分信号具有唯一性,例如通过电源常闭接点传递的电源故障信号,该信号无法通过保护自身发出。随着变电站保护装置的不断增多,硬信号存在 2 个主要短板:1)

经电路传递至测控再转换为报文上送的流程,相较于保护装置直接上送信号报文更为繁琐,在实际中由于导线松动、测控装置异常等原因会造成漏报、误报;2)其唯一性存在争议,部分信号,例如装置电源故障亦可以通过间接手段发现(通信中断,或无正常心跳报文上送等)。

由于硬信号通常反应严重问题和总体异常,因而两者在实际中会给运行维护人员造成误解,其原因在于监控系统未能对软硬节点进行明显区分。从事序列(sequence of event, SOE)和光字牌中运行维护人员无从分辨其来源,只能通过经验判别。

### 1.2 主站监控系统

主站监控系统主要通过站端前置机、调度数据网络、站端远动通信装置构成,站端远动通信装置类同于监控系统;通过采集测控装置和保护装置的遥测信号实现对保护装置状态的监测;通过 60870-5-104 协议经调度数据网络与主站前置进行通信。主站前置系统采集多个站点信息,显示异常状态并及时发出报警,告知集中监控人员。

由于在实际中远动通信管理机多采用与后台监控服务器相同的采集数据库导出得到,且对于新站,更多后台厂家更将远动通信应用化,运行于服务器之上,此时远动应用大多与后台采用完全相同的遥测数据库,仅增加通信点表用于上传至主站。如此,远动通信管理机或服务器与站端监控系统的信息来源完全一致。

主站监控相对于站端监控增加了在主站发现异常、分析异常、通知站端的这个步骤,而站端收到通知后仍需按照固有步骤处置异常,如图 1 所示。由

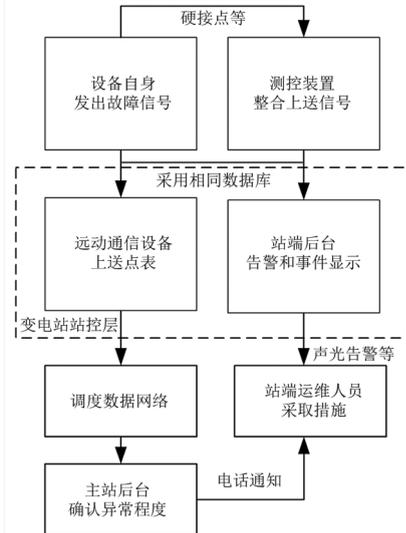


图 1 主站和站端监控异常信息流的传递

于其采集来源、方式一致,主站监控和站端监控的重叠性极大,主站监控系统存在和站端监控同样的短板,同时还受到主站—站端联络这一流程不确定性的附加影响。

### 1.3 保护信息子站

保护信息子站,顾名思义就是对保护信息设备信息进行归纳汇总,采集其动作、运行信息<sup>[9]</sup>,同时保护信息子站还在实际应用中接入故障录波装置等设备,丰富其信息采集的广度和深度。

但由于保护信息子站在认知中,仅作为辅助装置存在,其信息在站端和主站均不受重视,更多作为一种补充性质和历史故障回顾性质的设备存在。同时,考虑保护信息子站在二次网络中处于非实时 II 区,其实时性也无法得到保证。在变电站的实际运维中,运行维护人员甚少关注保护信息子站的动作信息,仅仅对保信子站设备本身的状态和其与主站链路状态的异常进行跟踪和维护,忽略了保护信息装置采集信息本身的价值。

### 1.4 其他辅助设备

在前述三大类设备之外,站端还有部分设备同样具有对保护设备状态进行监测的功能。例如故障录波装置、智能站中普遍配备的网络报文记录分析装置等,均可以间接方式反应站内保护设备异常情况,即设备在特定异常时,此类辅助设备无法正常完成其业务交互,从而产生相应告警。在这些设备本体出现异常的同时,部分设备还会将此类异常作为一个总的异常信息上送至监控和远动系统,告知运行维护和监控人员。

### 1.5 小结

从总体考察现有保护装置监测的体系,考虑到大部分装置异常信号来源完全一致(保护装置自身)的前提下,多个监测设备的存在,在提供更多信号冗余性的同时,也增添了重复性和复杂性,瑜不掩瑕。

随着变电站少人或无人运行维护体系的不断推广,站端保护装置状态监测的实际执行单一、强度弱。当前,因为人员配置的减少、运行维护工作繁杂、站端监控信号过多、异常状态信号不明确等原因,保护装置状态监测在内的站端运行感知已经越发依赖于主站监控;在无人站,装置的异常告知完全依赖于主站通知;有人值守站也由于人员和工作强度因素而更加倾向于由主站监控人员通知,而不是通过站端信号分辨是否存在需要处置或进一步验证的保护装置异常。顺应智能化和少人化的要求而导

致的异常确认模糊和处置缓慢值得关注。

## 2 保护装置状态监测的优化

由上可知,在实际变电站对继电保护等保护设备的状态监测网络中,无论是监测设备主体、监测实施方式以及监测功能上均存在较多冗余。过多的状态监测冗余不但不能提升装置状态监测的可靠性,反而降低了状态监测的准确性,减缓了运行维护人员的反应速度,甚至直接影响设备的稳定运行。

结合现场实际运行经验,提出可以通过减少硬接点信号、简化信号展示、合理筛选处理信号、增加信号来源等方式进行改进,以期达到增强保护装置监测水平、减少无谓时间浪费、提升站端二次系统稳定性的目的。

### 2.1 减少对硬接点信号的依赖

逐步减少并最终消除对硬接点信号的采集和依赖从长远看是必要的。以电源掉电和 CPU 板件故障为例,在实际运维中处置此类异常的操作,与其他引发非硬接点信号的异常是完全一样的。从这个意义上来说,对于此类故障,尽管在处置初期无法分辨故障的根本来源,但不会对处置行为(停用设备、隔离动作回路等)的正确性产生影响。运行维护人员在出现异常后,均需到达保护装置现场进行检查,鉴于设备自身的面板或信号显示已经统一完备,运行维护人员能够轻易在现场确定实际故障点。

与硬信号带来的信号冗杂、传递繁琐相比较,在监控信号上牺牲部分明确性是对整个监控体系有益的。进一步,更少甚至消除硬接点信号意味着公用测控装置的减少、电缆使用的减少,可在走向智能站间隔层网络少电缆化的道路上实现跨越。

### 2.2 简化非必要信号的展示

站端、主站后台,保护信息子站和录波装置等设备一般均接入了大部分甚至所有保护装置所能提供的信号节点。在新的保护装置信号更加细化以及保护装置的软信号上送能力不断提升的当前,信号缺失已不再是问题,新的问题是信号过多带来的困扰。变电站端监控在后台画面绘制时,常常将异常信号状态的光字不加以挑选地按间隔分页铺满整个屏幕,运维人员难以准确分辨关键的异常信号,对异常的程度判定造成困难。实际中,一个间隔光字屏幕

包含了该间隔的近百个信号,当保护装置 CPU 板故障时,曾出现过几十个信号同时闪烁,运维人员难以辨别的事件。

因而,简化后台信号的展示是有必要的。通过不显示非必要信号或者过增加子页面的形式,仅在间隔页面显示关键信号、总信号,来帮助运行维护人员快速判定故障的范围和程度。应注意,简化非必要信号的展示并不等于不采集、不使用这些信号,监测系统应在后台通过 SOE 的方式记录这些信号,用于后期分析、报告撰写等用途。

### 2.3 分类、分级、合并处理信号

在简化关键信号显示的同时,对信号进行智能分类、分级、合并处理也应一并开展。除开光字信号,运维人员常通过 SOE 观察基于时间的异常发生记录。对于状态监测系统,各信号均会以发出和复归两种状态显示在 SOE 中进行展示,同时,较新的监测系统会按照系统数据库后台预设的类型以颜色等方式标记信号是否为警告、提示等。但以上特性并不能减小对装置异常的分析负担,运行维护及检修人员仍需要在数十甚至数百条信息中,提取关键的时间节点,确定异常的发生和发展过程。

在监测系统的后台软件上着手,对信号进行智能分类、分级并采用适当合并处理的方式使得 SOE 信息清晰化。具体说来,首先,应明确标识信号的发出和复归作为一对信号进行展示或处理;其次,应基于时间和装置个体,对信号进行分类后再进行合并处理,并在必要时可以展开显示时间段内的所有信号;再次,应根据信号的重要性,例如是否为总信号,是否为关联到光字的信号等,对信号进行分级,对高级别信号进行突出显示;最后,软件应增加“有选择性地标识”和“导出信号”的功能,便于进一步分析。

### 2.4 增加信号接入并标识来源

当前站端和主站的后台监控仅基于测控装置作为状态监测消息源,浪费了其他设备提供的信息。应加强对支持 61850 协议设备的推广,并加快后台系统对于其他辅助监测设备的信号接入能力,实现多信号源交叉接入,并结合对信号的展示优化、分类分级优化,在一个间隔异常的时间段内综合多个消息源,增强其可信度,夯实具体信息。在此之外,通过对每条信号的来源进行标识,能够帮助运行维护、检修人员从多角度准确分析异常。

在信号增多、设备性能增强的情况下,针对保护

装置监测信号的优化,能够更好帮助运行维护人员发现异常、排查异常、分析异常,更好实现站端或主站端一个平台、多个接入、提示关键、信息详实、异常可发现、故障可处置、事件可回溯,提升变电站运维水平进一步提升。

### 2.5 小结

根据装置监测系统,特别是基于测控、远动系统的监控系统的实际,为更好地展示信号、利于运行维护人员进行故障排查、增加可信度,从精简、突出、多源等方向提出了优化方案。

对当前设备监测的优化应在信号采集和显示进行优化的基础上,进一步加强对软件界面、逻辑、功能的开发,减少人工干预,智能化处置信号,利用强大的计算机算力减少人员负担。

## 3 状态监测异常的故障处置

变电站保护装置状态监测的存在,大大提升了变电站二次系统的运维水平,有利于电网设备安全稳定运行。但当前,不论保护装置状态监测的重叠性和复杂性,单纯观察现有运行维护人员在应对异常出现时的反应,仍然存在许多漏洞和不足。针对跳闸等突发事件,运行维护水平高的变电站通过对各类预案的培训,能够较好地处置。但对于各类保护装置的异常处置,仍依赖于个人经验,撒网式对异常信号的搜寻以及无条件依赖于对二次专业人员的求助,缺乏条理、过程混乱、处置低效。

事实上,对于保护装置监测设备的故障处置,按照时间先后顺序,可以分为 3 个关键步骤进行处置:定位监测设备故障、监视失效时的临时处置、异常状况的报送。

### 3.1 定位设备故障

首先,快速、正确定位故障源应是理清装置异常的前提。正确定位故障又应根据监控后台信息找到异常影响的范围:若是异常范围局限在一台设备,可以认为异常源出自于该设备;但若异常信息指向的设备广,则应考虑状态监测设备自身或电源故障等。在站控层广泛应用 IEC 61850 协议的当下,装置模型中信号多,若设备出现严重异常,信号数量会较大,此时应忽略异常设备具体的异常信号,先明确异常设备的数量和范围,排除引发大面积异常设备的情形,再进一步分析可能的异常来源。

在进一步确认保护设备异常的过程中,应能够

找准关键异常信息,避免错误判断异常实质。具体说,要避免自身设备以及关联设备的冗余信号干扰:一方面,要排除设备自身由于异常发出的干扰信息,按照逻辑先后的顺序锁定引发连锁异常的头部异常源;另一方面,要排除由于本设备异常导致的关联设备异常,例如线路保护装置故障可能引起存在虚端子连接的母线保护、断路器保护异常等。

另外,定位故障除了发现异常设备、关键的异常消息之外,还隐含着确认故障程度的要求。在监控信号中,信号不仅会指出设备自身侦测到的问题,同时还会不同程度地给出设备自身逻辑给出的“处置”,例如闭锁、失效等。应以相关信号作为参考,确定异常的严重性:是否影响了全部功能,是否使得关联设备功能无效,是否存在扩大的可能等等。定位故障的整个流程如图 2 所示,对异常范围和程度有初步判断,能够更好指导对异常的临时处置以及在与上级沟通时提供更多信息。

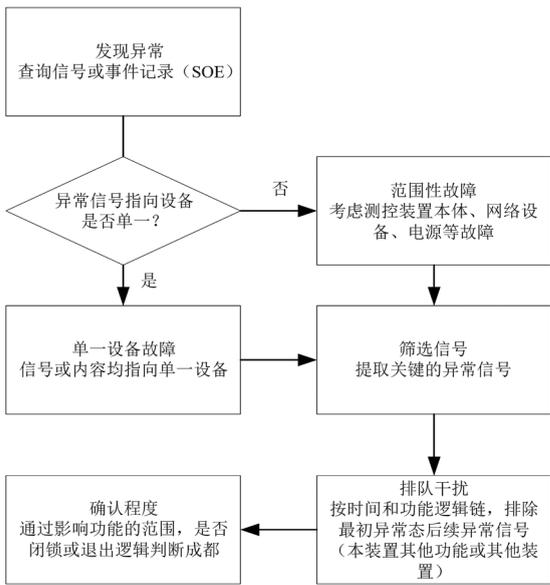


图 2 定位设备故障流程

### 3.2 临时处置异常

保护设备异常发出后,应采取对应的临时处置措施。确定采取何种临时处置措施的前提是了解以下两点:异常的当前影响和异常的可能发展。其中异常的当前影响包含了范围和程度,即有多少设备出现了异常,和这些异常对设备的运行是否产生了实质性的影响。而异常的可能发展实际上是异常状态是否长期保持,是否出现了新的异常等。

根据不同的影响和故障的发展,在向上级进行异常情况报送之前,运行维护人员可以采取不同的措施控制异常进一步恶化,如表 1 所示。

表 1 临时处置措施

程度	间断发生	稳定保持	进展恶化
不影响功能	加大巡视密度	加大巡视密度	现场采取进一步措施
部分闭锁	现场监视,准备采取进一步措施	现场监视,视情况停用保护设备	现场监视,停用保护设备
全部闭锁	现场监视,视情况停用保护设备	现场监视,停用保护设备	停用保护设备,监视其他设备

需要注意的是,上述讨论均基于异常不会导致一次设备丢失保护的情况,即双重性保护体系仍可以确保线路等间隔不丢失保护。若异常已经影响了间隔的所有保护,则应首先考虑联系上级采取措施停运被保护间隔,因为无论是否处置装置异常,均存在在一次间隔完全丢失保护的风险,而这是绝对不允许发生的。

### 3.3 异常状态的报送

对于运行维护人员,受限于备件和专业能力,在对保护装置异常的临时处置之后,不应要求其能够最终排除持续性和复杂性的异常,但应向上级或二次检修部门可靠汇报异常情况。汇报内容应专业、准确、简明、不遗漏关键信息,便于准确采取进一步措施对异常进行处置。

对于保护装置异常状态的报送,应突出以下几个方面的内容:

1) 时间节点。报送中应包含异常在时间轴上的有关信息,包括但不限于异常发生的事件、异常是否持续、异常是否多次重复发生、异常随时间是否有发展。同时,还应同时在报送中指出在异常出现、发展的时间点附近是否有相关操作,是否有其他工作进行,是否出现气象变化,以便排查引起异常的原因是否与外界操作有关。

2) 影响范围。报送中应体现出现异常的范围,即归纳总结本次异常情形造成了哪些间隔、哪些保护和辅助设备出现了异常情形。当保护装置监测状态系统出现异常时,报送中除说明监测设备本身受异常影响的范围外,还应体现哪些范围内的设备因此失去了站端和主站后台的监控。

3) 对运行的实际影响。在向上级的报送中,除体现影响范围外,更应按间隔作为单位说明异常对保护造成的实际影响程度,例如:保护完全失去功能,主保护失去功能,导致后备保护失去功能,不影响保护功能。在报送时,应按照前述中的表述,准确定义最关键、影响最大的异常,忽略影响不大的异常。

4) 当前已经采取的措施。在报送的最后,应报

告针对异常已经采取或准备采取的措施。同时,应给出从运维角度对异常的分析意见,提供可能需要准备的备件、工器具清单。若可能,在检修人员远程指导下,可根据变电站备件和工具情况对异常进一步处置或直接消除异常。若异常严重需要考虑一次停电处理,还应沟通后向调度和检修部门分别反馈准备的检修操作和可能的停电时间,做好协调,以便最高效地处置异常。

## 4 结 论

上面从优化装置监测信号和加强针对异常的处置流程出发,讨论了加强变电站保护装置监测系统的有效手段和方法。随着对异常处置流程的不断完善、运维培训不断加强、各个监测系统的有机统一加深、监测信息显示的进一步优化,以及监测设备、保护设备自身鲁棒性、异常侦测能力以及性能加强,越来越智能化的保护状态监测系统将会在保障变电站正常运行上发挥更强作用。

### 参考文献

[1] 王彦洁. 智能变电站继电保护在线监测系统关键技术及应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2020.  
 [2] 张晓华, 刘跃新, 刘永欣, 等. 智能变电站二次设备的

(上接第 44 页)

2) 双母线接线支路 CT 单侧安装在断路器母线侧时,存在保护死区,需要靠断路器失灵保护延时动作隔离故障;CT 单侧安装在断路器非母线侧时,通过其他保护动作远跳对侧的方式能快速切除故障。

3) 双母线接线母联 CT 安装在母联断路器单侧时,存在保护死区,在分列运行时,母联分位死区保护能快速切除故障,其他情况需要靠母联死区保护延时动作隔离故障。

4) CT 和断路器之间的死区发生故障时,除母联分位死区外,保护装置为隔离故障均会扩大停电范围,与 CT 安装位置无关。

因此,为保障系统稳定,应按照国家电网有限公司十八项电网重大反事故措施(修订版)的要求在断路器两侧布置 CT。

### 参考文献

[1] 继电保护和安全自动装置技术规程:GB/T 14285—2006[S].上海:上海人民出版社,2006.

状态监测技术研究[J].电气技术,2011(4):41-44.

[3] 朱华,刘柱揆,许守东,等.基于 EPON 网络的智能变电站继电保护测试技术的研究[J].云南电力技术,2021,49(3):7-10.  
 [4] 刘永欣,师峰,姜帅,等.智能变电站继电保护状态监测的一种模糊评估算法[J].电力系统保护与控制,2014,42(3):37-41.  
 [5] 段翔兮,邹璇,高剑,等.基于 Unity3d 的监控告警信息展示系统的设计与实现[J].四川电力技术,2020,43(3):78-84.  
 [6] 叶远波,刘宏君,张兆云,等.基于广域信息的继电保护实时评价研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(13):150-157.  
 [7] 张宇泽,张心洁,刘宪棚,等.基于竞争神经网络的变电站集中监控全面监视周期分类方法[J].四川电力技术,2020,43(6):11-15.  
 [8] 张艺,李大中,郑永康.基于大数据的智能变电站二次状态监测系统研究[J].四川电力技术,2019,42(4):43-48.  
 [9] 王跃强,廖华兴,袁晓青,等.基于保信系统的继电保护状态评价系统的开发与应用[J].电力系统保护与控制,2014,42(8):134-139.

### 作者简介:

余骏阳(1990),女,硕士,工程师,从事继电保护和厂站自动化工作。(收稿日期:2021-09-14)

[2] 国家电网有限公司.国家电网有限公司十八项电网重大反事故措施(修订版)[Z].北京:国家电网有限公司,2018.  
 [3] 变压器、高压并联电抗器和母线保护及辅助装置标准化设计规范:Q/GDW 1175—2013[S].北京:中国电力出版社,2013.  
 [4] 线路保护及辅助装置标准化设计规范:Q/GDW 1161—2014[S].北京:中国电力出版社,2014.  
 [5] 长园深瑞继保自动化有限公司:BP-2CA-F/DA-G 母线保护装置技术使用说明书[Z].深圳:长园深瑞继保自动化有限公司,2013.  
 [6] 南京南瑞继保电气有限公司:PCS-921-G 系列断路器保护及自动重合闸装置说明书[Z].南京:南京南瑞继保电气有限公司,2015.

### 作者简介:

王利平(1972),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统继电保护;

程浪(1987),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护;

胡杨(1995),男,硕士,助理工程师,从事继电保护现场检修工作。(收稿日期:2021-09-06)

# 110 kV GIS 隔离开关缺相故障分析

黄克全,郑荣锋,屈飞飞,刘圆方,陆晓彬,黄鑫  
(国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041)

**摘要:**文中针对一起110 kV GIS设备隔离开关缺相故障导致主变压器跳闸的事故展开讨论,通过对故障录波进行分析,结合故障定位以及GIS设备开罐解体检修,最终找到了设备工艺缺陷及事故诱因,并提出合理的整改建议。

**关键词:**缺相故障;GIS隔离开关;事故分析

**中图分类号:**TM 564 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2022)01-0087-04

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220119

## Analysis on Open-phase Fault of 110 kV GIS Disconnecter

HUANG Kequan, ZHENG Rongfeng, QU Feifei, LIU Yuanfang, LU Xiaobin, HUANG Xin  
(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** A main transformer tripping accident caused by open-phase fault of 110 kV GIS disconnecter is analyzed. Through the analysis of fault recording, and combined with fault location and disassembly maintenance of GIS equipment, the equipment process defects and the cause of the accident are finally found out, and the reasonable rectification suggestions are put forward.

**Key words:** open-phase fault; GIS disconnecter; accident analysis

## 0 引言

随着电力技术发展以及城市土地资源紧张加剧,气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)越来越多地应用在新投变电站以及老旧变电站改造中,相对于常规敞开式变电设备,GIS具有占地面积小、技术性能优良、日常维护简单、可靠性高等优点。但由于GIS的导电部分全封闭于GIS管道中,对运行维护带来一些负面影响,如开罐检修工艺复杂、安装环境无尘化要求高、GIS气体污染等<sup>[1]</sup>。当GIS设备发生局部故障而需要停电检修时,往往要将相邻的GIS气室也进行停电,扩大了停电范围<sup>[2]</sup>;GIS气体回收以及真空注气往往耗时长,增加了停电时间。特别是GIS的密封特性使得内部的隔离开关位置只能通过位置传动机构进行判断,无法进行直观的观察<sup>[3]</sup>,操作过程一旦出现分合不到位难以立即发现,容易造成缺相运行。

下面分析处理了某110 kV变电站一起GIS隔离开关分合不到位,造成主变压器缺相运行后跳闸事故,通过故障分析及检修处理恢复供电,为GIS设

备的运行维护提供了典型运行经验。

## 1 故障经过

### 1.1 故障前运行方式

故障前该站接线方式如图1所示,运行方式为:182断路器供110 kV II母及2号主变压器电源,经110 kV内桥130断路器供110 kV I母及1号主变压器电源,181断路器热备用,110 kV备自投投入,10 kV分段930断路器热备用,10 kV备自投投入,10 kV I段所有出线因10 kV I段开关柜改造,负荷均改接(除电容一路971断路器、站用变压器961断路器外),仅站用变压器961断路器投入运行。

### 1.2 故障发生经过

故障当日,根据运行需要,需退出182断路器运行,将该站主供电源切换至181断路器。01:57,182断路器由运行转热备用;01:59,181断路器由热备用转运行;02:03拉开1、2号主变压器110 kV侧中性点1019、1029隔离开关。181断路器合闸后,监控机、测控装置均无潮流显示,但110 kV和10 kV电压正常。初步判断为监控系统异常。

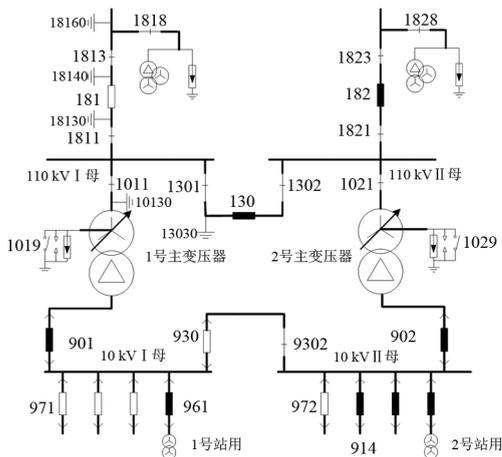


图 1 事故变电站故障前运行方式

此后,该站还进行了主变压器调挡和电容器投切操作。07:39,调度远方操作将 1 号主变压器由 4 挡调为 5 挡,此时 2 号主变压器在 7 挡;07:50,10 kV 电容二路 972 断路器合闸;07:51,10 kV 电容一路 971 断路器合闸。

07:51:17:996,2 号主变压器高后备保护启动,2965 ms 间隙过流 II 段保护动作,动作电流 5.83 A (间隙零序 II 段整定值为 2 A,3 s),2 号主变压器高后备保护出口跳开 130、902 断路器。

## 2 故障初步分析

### 2.1 故障特征分析

故障录波显示,01:59,181 断路器由跳位转合位时,181、130 断路器 CT 均检测出 B 相有负荷电流,A、C 相无电流,零相出现与 B 相同样的电流,如图 2 所示。02:03,拉开 1、2 号主变压器 110 kV 侧中性点 1019、1029 隔离开关后,181 断路器 B 相电流消失。分析认为,A、C 相存在一次回路中断路器或隔离开关合闸不到位的可能。由于操作过程中,主变压器中性点均处于直接接地状态,故 B 相电流等同于流过中性点的零序电流。拉开中性点隔离开关后,主变压器高压侧无负荷接入,故高压侧无负荷电流,B 相电流消失。



图 2 181 断路器电流故障录波

故障录波显示,到 07:51 主变压器高后备保护启动跳闸前,全站 10 kV I、II 段母线电压均正常,特别是 01:57,182 断路器由运行转热备用后,此时本应全站停电。因此,应该是 10 kV 系统存在倒送电。经逐一排查,检查出 10 kV II 段 914 线路对侧断路器违规合环,通过另一电源点倒送至该站 10 kV II 母,对全站供电。

根据 SOE 记录和故障录波,07:39,1 号主变压器由 4 挡变为 5 挡;07:51,10 kV 电容二路 972 断路器合闸;07:51:14,10 kV 电容一路 971 断路器合闸;07:51:20,2 号主变压器间隙过流 II 段动作 (5.88 A),跳 182、130、902 断路器(此时 182 断路器处于热备用状态),2 号主变压器 902 断路器 A、B 相电流消失,181 断路器 B 相、零相电流减小为 0,181、902 断路器录波如图 3 所示。

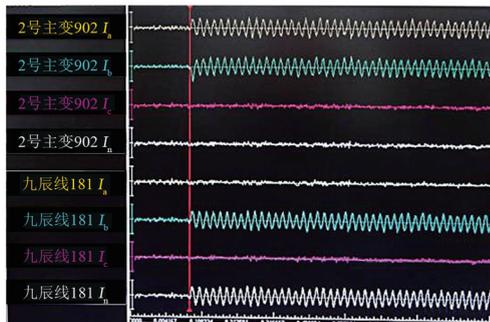


图 3 181 断路器、902 断路器电流故障录波

分析认为,凌晨由于 10 kV II 段出线负荷较低,914 线路倒送电可满足供电要求,而随着早上用电负荷的增长,914 线路供电容量已不能满足要求,10 kV II 段母线电压逐步下降,通过主变压器调挡和投入补偿电容提升 10 kV 母线。

当投入 10 kV 电容一路时,电容电流很大,使得 2 号主变压器 902 断路器 A、B 相出现相序相反的电流,投切电容的传递过电压加上主变压器缺相运行本身的相对地的零序过电压叠加,导致 2 号主变压器中性点击穿放电并持续较长时间,造成主变压器零序 II 段动作跳闸。

2 号主变压器 902 断路器关跳闸后,930 断路器合闸,110 kV 九辰线 181 断路器 B 相、零相,901 断路器 A、B 相,930 断路器 A、B 相均再次出现较大电流,SOE 记录显示此后 1 号主变压器高后备保护先后多次启动,最终 1 号主变压器中性点放电间隙棒烧融。08:50,经调度命令,运行人员操作拉开 181 断路器,1 号主变压器断电。由于中性点间隙长期

承受 B 相的相电压,致中性点间隙性击穿放电,零序保护启动,但由于放电时间未达到整定值,保护返回未出口。

### 2.2 试验验证

为了验证上述 181 断路器或隔离开关 A、C 相缺相的推测,对该 GIS I 段设备所有接地开关之间进行了分段回路电阻测试,结果如表 1 所示(其中 1301 和 1811 回路之间含部分母线,阻值相对较高)。

表 1 回路电阻测试值 单位:  $\mu\Omega$

设备编号	A 相	B 相	C 相
1813	$+\infty$	73	$+\infty$
181	35	39	36
1811 和 1011	241	250	253
1301 和 1811	424	455	428

由表 1 可知,1813 隔离开关 A、C 相回路不通,验证了 1813 隔离开关 A、C 相合闸不到位的推断。

## 3 检修处理

对 1813 隔离开关进行了开罐检查,其内部如图 4 所示。开罐发现,该隔离开关 A、C 两相动触头未关合到位,B 相触头合闸正常。由于 A、C 两相共用一个绝缘连杆进行操作,B 相单独使用一个绝缘连杆操作,所以 A、C 两相的故障同时发生。



图 4 1813 隔离开关内部

为进一步查明操作机构的转动不能带动内部的 A、C 相导体伸缩的内在原因,现场进一步拆除了隔离开关的动触头侧导体并进行了解体检查,检查发现用于 A、C 相导体传动的 A 相叉条拐臂卡口变形扩张,卡口内部磨圆,导致 A、C 相绝缘传动杆与拐臂连接处出现打滑现象。图 5 为叉头拐臂带动绝缘拉杆分合闸的示意图,故障卡口与新卡口对比如图 6 所示。

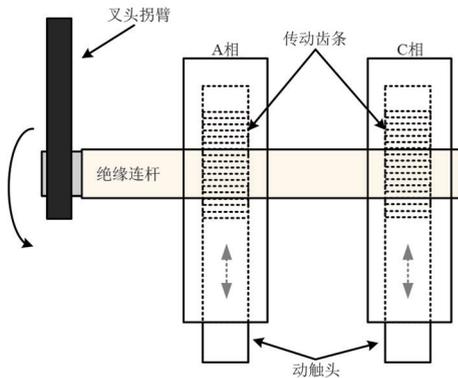


图 5 叉头拐臂带动绝缘拉杆分合闸



图 6 新旧叉条拐臂对比

紧固到位,完成气室清洁、更换吸附剂和密封圈、抽真空、充 SF<sub>6</sub> 气体并经操作试验、回路电阻测试合格。之后,对该站所有隔离开关的导体叉条拐臂进行全面开罐检查,还发现了 1011、1301 隔离开关叉条处螺栓松动及磨损的痕迹,如图 7 所示。

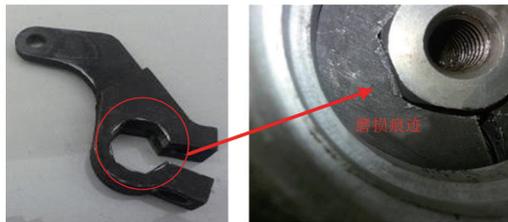


图 7 1011 叉条拐臂

## 4 原因分析

经与生产厂家共同分析,认为这是由于该部件在制造过程中的生产工艺欠佳和在装配过程中控制不严,导致叉条拐臂与传动轴存在尺寸上的正公差,再加上气动机构分、合闸对罐内导体冲击较大,经过十多年来多次操作,造成螺栓松动使部件发生变形,导致这次故障的发生。据厂家人员介绍,该部件在全国普遍使用,但变形缺陷系首次发生,应为极个别的问题。

## 5 结论

1) 该站变电一次部分采用典型的内桥结构,

现场更换 1813 隔离开关 A 相拐臂,紧固螺钉

但其 110 kV 母线未设计单独的母线 PT, 靠两组 110 kV 线路侧 PT 监视 110 kV 母线电压, 虽节约了投资, 但暴露出在断路器、隔离开关合不到位时, 无法有效监视母线电压的弊端。建议对于受端 GIS 变电站, 必须设计两组独立的母线 PT, 以监测线路断路器、隔离开关是否合闸到位, 确保线路电压送到 110 kV 母线上。

2) GIS 设备免维护是相对的, 由于断路器、隔离开关分、合闸操作会对从操作机构到罐内导体的一系列连接的传动部分产生较大冲击力, 经过多次操作, 累积效应可能会使螺栓松动, 部件发生变形<sup>[4-5]</sup>。日常维护可对操作机构进行检查, 但对罐内传动部分无法检查。建议对 GIS 设备严格大修管理, 对运行 15 年及以上的 GIS 设备进行开罐大修, 更换老化磨损的部件, 消除设备隐患, 确保安全运行。

3) 加强 110 kV 用电管理, 防止断路器意外投切形成合环倒送电导致人身、设备事故。同时, 运行人员一旦发现监控信号异常, 都应及时汇报并尽快查明原因, 以防止事故扩大。

(上接第 35 页)

- [5] 熊晓祎, 肖先勇, 左金威, 等. 触电事故特征改进近似熵检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 27-33.
- [6] 刘永梅, 盛万兴, 杜松怀. 一种面向剩余电流保护装置的触电阻抗建模方法[J]. 河北工业大学学报, 2017, 46(4): 15-23.
- [7] 李磊, 关海鸥, 杜松怀, 等. 农村低压电网触电生物电流频谱特性分析[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2016, 28(3): 129-133.
- [8] 关海鸥, 杜松怀, 李春兰, 等. 基于有限脉冲反应和径向基神经网络的触电信号识别[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 187-194.
- [9] 任龙霞. 活体触电识别研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [10] 李浩. 触/漏电故障分量提取与触电特征识别研究[D]. 成都: 四川大学, 2014.
- [11] Herman S. Electrical properties of tissue and cell suspensions[J]. Advances in Biological and Medical Physics, 1957, 5: 147-209.
- [12] 杨杰, 吴浩, 董星星, 等. 基于电流故障分量特征和随机森林的输电线路故障类型识别[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 53-63.
- [13] 杜刚, 赵冬梅, 刘鑫, 等. 基于重尾分布的风电功率波动特性概率分布[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7):

## 参考文献

- [1] 周敏琛, 苏秀苹. 断路器操作机构中连杆的可靠性分析[J]. 江苏电器, 2003(6): 21-23.
- [2] 齐波, 李成榕, 耿弼博. GIS 设备绝缘子高压电极故障局部放电严重程度的诊断与评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1719-1727.
- [3] 兰建军, 洪智勇, 林青瑜. 高压断路器机械参数监测与寿命预估方法研究[J]. 华北电力大学学报, 2011, 30(1): 57-60.
- [4] 刘君华, 姚明, 黄成军, 等. 采用声电联合法的局部放电定位试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2458-2463.
- [5] P Bolin, H Koch. Introduction and applications of gas insulated substation(GIS)[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, 2005: 920-926.

## 作者简介:

黄克全(1982), 男, 高级技师, 工程师, 主要从事变电一次设备检修、安装工作;

郑荣锋(1993), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事变电一次设备检修、安装工作。 (收稿日期: 2021-08-07)

52-57.

- [14] 莫慧芳, 谷爱昱, 饶明辉, 等. 基于小波包能量相对熵的电机振声信号故障检测[J]. 煤矿机械, 2014, 35(3): 231-233.
- [15] Yasulisa Omura, Kazuma Kojima. Spectroscopic study and analysis of the impact of alcohol intake on bio-impedance of the human body[C]. 2011 IEEE Sensors Proceedings: 1648-1651.
- [16] Cole K S. Permeability and impermeability of cell membranes for ions[J]. Cold Spring Harbour Symposia Quant. Biol., 1940, 8: 110-122.
- [17] 关海鸥, 郭元建, 杜松怀, 等. 农村低压电网触电电流数字特征描述与分析[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(3): 202-207.
- [18] 丁晨. A 型漏电保护器专用芯片的设计与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [19] 李奎, 陆俭国, 瞿建喜. 智能化漏电保护器的研究[J]. 机床电器, 2002, 29(4): 7-9.

## 作者简介:

赵恒(1983), 男, 高级工程师, 研究方向为漏电保护与电气安全;

左金威(1991), 男, 工程师, 研究方向为剩余电流保护技术。 (收稿日期: 2021-08-09)

# 老型号变压器排油注氮灭火装置接口改造

谭文强<sup>1</sup>, 宋宇<sup>1</sup>, 邓浩<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司  
德阳供电公司, 四川 德阳 618000)

**摘要:**根据 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》规定, 单台容量在 125 MVA 及以上独立变电站油浸变压器应设置自动灭火系统。现在运行的部分 125 MVA 及以上容量老型号变压器出厂时未配置排油注氮灭火装置, 未预留排油和注氮管道孔洞。为解决老旧油浸变压器无接口连接安装排油注氮灭火装置, 文中创新性地提出利用变压器人孔、放油阀和取样阀作为连接接口的解决方案。较之目前普遍采用在变压器上新开孔的方法, 该方法具有简洁、方便、安全的特点, 能极大缩短改造时间, 大幅节省施工费用的优点。

**关键词:** 变压器; 排油注氮装置; 接口

中图分类号: TM 72 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2022)01-0091-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220120

## Modification for the Interface of Oil Evacuation and Nitrogen Injection Extinguishing Device in Old Type Transformer

TAN Wenqiang<sup>1</sup>, SONG Yu<sup>1</sup>, DENG Hao<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China)

**Abstract:** According to the regulations of "Code for fire protection design of buildings" (GB 50016-2014), an automatic fire extinguishing system should be installed for a separate oil-immersed transformer with a capacity of 125 MV · A and above. Some of the old type transformers with 125 MVA and above are not equipped the hole with oil evacuation and nitrogen injection extinguishing device, and there are no holes prepared for oil evacuation and nitrogen injection pipes in advance. In order to solve the problems of the old oil-immersed transformer without interface connected to install the oil evacuation and nitrogen injection extinguishing device, an innovative solution of using transformer manhole, oil discharge valve and sampling valve as connection interface is proposed. Compared with the method of opening new holes in transformers, the proposed method has the advantages of simplicity, convenience and safety, which can greatly shorten the reconstruction time and save the construction cost.

**Key words:** transformer; oil evacuation and nitrogen injection; interface

## 0 引言

随着电力系统的不断发展, 变压器容量越来越大, 电压等级不断提高, 变压器消防装置的作用显得更加重要<sup>[1]</sup>。现有老型号变压器排油和注氮接口的改造, 普遍采用在变压器器身上新开口的方案, 存在现场或返厂开孔难于实现的问题。本体上开孔改变变压器原有设计和结构, 如发生变压器故障, 可能会引起故障责任划分不清, 引起不必要的争议。

下面提出老型号变压器排油注氮装置利用人孔、放油阀和取样阀作为接口的改造方案, 解决变压器开孔难、施工时间长、费用高且容易引发争议的问题。

## 1 现状分析

### 1.1 普遍采用的方法

变压器发生故障引发火灾有两种情况。第一种情况是器身未形成开口的内部火灾, 由于故障瞬间变压器内部温度陡升, 变压器油汽化产生大量气体,

压力增大触发重瓦斯继电器动作,引起变压器三侧断路器跳闸断开变压器与电力网络的电气连接,短路电流消失,内部油失去能量支持不再分解汽化。变压器内部产生大量气体后压力增大器身存在破裂的可能性。为保障变压器的安全,排油注氮系统开启排油阀排出部分变压器油进行泄压使变压器内部压力减小。第二种情况是变压器故障造成器身破裂与大气联通的开口,变压器油在破裂处或外溢燃烧,内部压力与大气压一致,不会随温度升高。近年来电网大型变压器火灾事故表明,如不进行排油和冷却降温防止变压器油不断汽化,变压器火灾将一直持续到所有可燃物烧尽,如着火变压器邻近其他重要设备和建筑将产生更大损失。这两种情况排油注氮系统都会关闭断流阀防止油枕继续向变压器油箱内补充变压器油,此时通过变压器器身上接口连接排油管道排油,能有效减少可燃物和燃烧时间。

现有油浸变压器排油注氮灭火装置接口普遍采用的方法是在变压器本体上方开孔作为排油孔,在变压器下方开孔作为注氮孔。排油管路连接于油箱上部,通过导油管与事故油坑相连,系统的排油泄压由串接在排油管路中的排油阀控制<sup>[2]</sup>,如图 1 所示。灭火装置满足启动条件后打开排油阀,变压器油通过排油管道排出到事故油池,同时断流阀关闭油枕对变压器的供油,油箱上部变压器油位下降到排油管道位置。注氮管路连接消防柜中的氮气瓶和设置在油箱底部的注氮孔,为保障氮气注入经排油一段时间后,控制系统开启氮气释放阀,将氮气从变压器底部注入油箱中,氮气与变压器油混合,上升到达油箱上部,起到降低油温和隔绝空气的灭火作用。

## 1.2 问题分析

变压器采用返厂开孔,拆装、往返运输、工厂生产等因素造成返厂耗时长,拆装施工费、往返运输费、厂家服务等费用高,难于实现。采用现场开孔,变压器需停电进行排油、吊罩、开孔、清洗、回吊、注油、调试等多道工序,现场作业时间大幅增加,场地无法保证;变压器钟罩内部油渍无法彻底清洗干净,开孔及阀门焊接工作属于一级动火作业,存在极大的火灾隐患;焊接会破坏变压器的完整性,过程中产生的烃类气体残留和金属残渣不易清理干净。特别值得注意的是现场开孔作业无法保证恒温恒湿环境,变压器铁芯长时间暴露在空气中且变压器油长时间与空气接触,空气中含有水分,势必将少量水分

带入变压器内部,变压器油溶解空气超过饱和或水分造成局部放电都会使后期运行导致轻瓦斯频繁动作或油化验数据达不到要求,甚至造成内部放电短路,因此改造工程应尽量减少铁芯和变压器油暴露在空气中的时间。



图 1 采用新开孔方式

## 2 利用人孔和取样阀

### 2.1 排油孔

大型变压器侧面器身均设有人孔,在变压器正常运行时,人孔处于封闭状态,可以利用人孔盖板改造加装管路作为排油管道。改造后人孔盖板须要连接排油管道开孔,所以在改造前应精确测量加工好新盖板尺寸、螺栓孔洞大小和位置。

### 2.2 注氮孔

利用取样阀连接排油和注氮管道,无需另外开孔,对变压器本体内部影响小;且变压器正常运行时,注氮阀门闭锁,与变压器的互不干扰,如图 2 所示。



图 2 采用人孔和取样阀方式

根据气体灭火系统灭火浸渍时间不小于 1 min 的要求,排油注氮在扑灭变压器内部故障引起火灾时的氮气灭火剂量较小,一般不到变压器油箱容积的 1%。但为防止变压器爆炸,起隔离空气窒息灭火和对变压器油冷却作用的排油注氮灭火浸渍时间应大于 10 min。这个充氮时间是远大于灭火充氮时间的,要求油浸变压器容量不大于 50 MVA 时,在 15 MPa 压力下氮气储存容器总容积为 40 L;油浸变压器容量在 50~360 MVA 时,在 15 MPa 压力下氮气储存容器总容积为 80 L;油浸变压器容量大于 360 MVA 时,在 15 MPa 压力下氮气储存容器总容积为 126 L。

利用取样阀进行改造:根据变压器取样阀实际个数改造成 2 个注氮孔设计,按照电力行业完善化改造要求和《油浸变压器排油注氮装置技术规程》中相关条文说明,对于 50~360 MVA 变压器,灭火装置采用 2 个  $W$  为 40 L 的氮气瓶,氮气初始压力  $P_1$  为 15 MPa,减压后氮气压力  $P_2$  为 1.20 MPa,减压后氮气体积为

$$V = 2W \times P_1 / P_2 = 1000 \text{ L} \quad (1)$$

注氮时间不小于 30 min,选取 31 min,注氮调节阀的出口流量为

$$Q = W/t = 32.258 \text{ L/min} \quad (2)$$

注氮管道采用抗拉强度  $\sigma$  为 235 MPa、厚度  $\delta$  为 3.5 mm、外径  $D$  为 25 mm 的碳素钢管,安全系数  $S$  取 4,其承压强度为

$$P = 2\sigma/\delta SD = 1.34 \text{ MPa} \quad (3)$$

$P > P_2$ , 满足要求。

### 2.3 工程实施

现场停电施工总耗时约 100 h,变压器油位需降至人孔以下,按照 DL/T 573—2010《电力变压器检修导则》要求,应保证在空气相对湿度不大于 65% 时铁芯暴露时间应小于 16 h;在空气相对湿度不大于 75% 时铁芯暴露时间应小于 12 h。改造前应做好现场查勘和附件设计制造、过渡方案以及机具、器械、车辆、人员等前期准备工作。在加装断流阀及更换双浮球瓦斯继电器完成前,铁芯必须完全浸在绝缘油内不能暴露。所有加装的孔洞盖板、阀门和管道必须提前准备好,做到精确的专属配件加工,确保尺寸完全对应。改造过程中,因涉及主变压器油管道相关工作,应及时关闭相关阀门,避免主变压器本体油箱进入空气。如存在进入空气的可能,应通过

排油管上的放气螺栓将气体排除干净后,再开启相关阀门,防止气体进入变压器<sup>[3]</sup>。油枕蝶阀更换完成后应将油枕内油全部注满,本体油排至人孔以下,应在 2 h 内完成所有阀门的更换或加装,完成后需尽快注油淹没变压器铁芯,防止铁芯受潮,保证铁芯暴露时间满足规定要求。

## 3 利用放油阀和取样阀

### 3.1 排油孔

排油孔利用下部已有的放油阀进行改造,采用 U 型排油管道,改造成三通结构,既满足放油需要,又能与消防柜排油管道连接。

排油管道采用虹吸原理,即利用油柱压力差,使绝缘油上升再流到低处,直到两边的油面相等,油就会停止流动。排油管道设置为 DN125,顶部高度与变压器铁芯持平(以厂家变压器设计图为准),当变压器发生外部火灾造成开孔,导致顶部与大气连通时,注入的过量氮气会从开孔处溢出,其排油效果与常规无异。消防柜与变压器之间应满足不同电压等级下的安全距离,一般大于集油坑边缘到变压器的距离,但排油管道较重,对放油阀的纵向拉力较大,易导致变压器漏油,排油管不宜过长,长度应尽量保证在 8 m 以内。变压器内部故障时,变压器油热分解产生大量气体,油箱压力骤增,触发重瓦斯继电器动作,发出断路器跳闸信号。此时压力释放阀动作,排油注氮装置启动,注入的氮气会增加内部压力,导致油面继续下降,铁芯暴露。

### 3.2 注氮孔

根据变压器取样阀改造成 2 个注氮孔。为满足氮气注入量的要求,注氮管道采用 DN25/3.5 碳素钢管,计算符合要求的压力输出值和流量输出值。接口改造如图 3 所示。

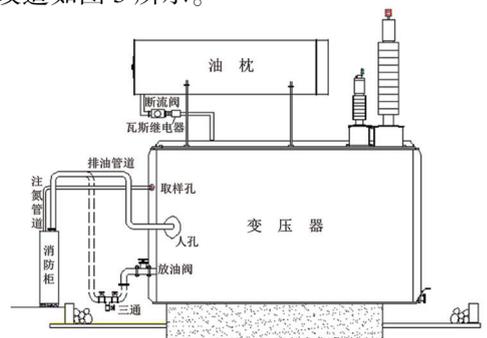


图3 接口改造

### 3.3 工程实施

现场施工不需要放油,铁芯不会暴露,消防柜、管道支架基础、三通管件等器件与变压器距离能满足安全要求,安装可在不停电情况下进行。为防止触电危险,在做好现场查勘和附件设计制造、过渡方案以及机具、器械、车辆、人员等前期准备工作后,排油和注氮管道安装过程需要停电进行,停电时间总耗时约 24 h。

## 4 结 论

前面创新性提出的利用变压器人孔、取样阀和放油阀作为接口的改造方案,现场实施简单,无需变压器运输、吊罩、开孔、清洗、回吊、调试等工序,费用支出低,对主设备影响小;在现场安全措施到位的情况下,停电时间大幅减少;且不使用明火,杜绝了火灾隐患;并由排油注氮厂家出具改造方案、计算报告及产品承诺函,与变压器生产厂家责任明确。

利用放油阀和取样阀,因变压器运行时放油阀

处于关闭,大部分改造工作可在不停电条件下完成,与利用人孔和取样阀方案比较,变压器无需排油、注油工序,停电时间短,几乎不存在变压器铁芯受潮或变压器油中混入气体的风险。在满足取样阀和放油阀改造条件时,应优先选用此方案。

### 参考文献

- [1] 梁猛,邵华,林榕.主变压器 BMH 型排油注氮灭火装置改造方案及工程应用[J].电力建设,2010,31(9):64-67.
- [2] 徐晓辉.排油注氮灭火装置控制系统设计研究[J].电气自动化,2017,39(5):99-101.
- [3] 王艳,李士林.大型变压器排油注氮消防系统改造[J].河北电力技术,2009,28(5):45-47.

### 作者简介:

谭文强(1974),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向为电力消防安全管理;

宋宇(1989),男,硕士研究生,工程师,研究方向为电力和建筑消防安全管理;

邓浩(1986),男,硕士研究生,高级工程师,从事变电设备检修工作。

(收稿日期:2021-08-26)

(上接第 49 页)

- [6] 王成山,于波,肖峻,等.平滑微电网联络线功率波动的储能系统容量优化方法[J].电力系统自动化,2013,37(3):12-17.
- [7] JIA Hongxin, FU Yang, ZHANG Yu, et al. Design of hybridenergy storage control system for wind farms based onflow battery and electric double-layer capacitor[C]// Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, China, 2010:1-6.
- [8] 蒋科,张信真,苏麟,等.新能源侧储能系统综合经济效益评估方法与实例[J].电力勘测设计,2020(S1):18-24.
- [9] 分布式储能系统优化与经济性分析[D].长沙:湖南大学,2019.
- [10] Benedikt Lunz, Hannes Walz, Dirk Uwe Sauer. Optimizing Vehicle-to-Grid Charging Strategies Using Genetic Algorithms under the Consideration of Battery Aging[C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011:1-7.
- [11] Ohtaka T, Iwamoto S. Possibility of using NAS battery systems for dynamic control of line overloads [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002:44-49.

- [12] Zimmerman, R D, Murillo-Sánchez. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2011,26(1):12-19.
- [13] 谢桦,滕晓斐,张艳杰,等.风/光/储微网规划经济性影响因素分析[J].电力系统自动化,2019,43(6):70-76.
- [14] 修晓青.储能系统容量优化配置及全寿命周期经济性评估方法研究[D].北京:中国农业大学,2018.
- [15] 严玉廷.考虑寿命约束的分散式储能控制方法[J].云南电力技术,2019,47(2):11-15.
- [16] 刘文霞,牛淑娅,石道桂,等.考虑运行策略及投资主体利益的主动配电系统储能优化配置[J].电网技术,2015,39(10):2697-2704.

### 作者简介:

彭伟(1990),男,硕士研究生,研究方向为新能源发电中储能的优化配置;

郑连清(1964),男,博士,教授,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用等;

郑天文(1987),男,博士,主要从事储能、新能源系统控制与优化运行方面的研究工作。

(收稿日期:2021-09-31)