

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.024

# 基于机-热-电多参量信号特征的 GIS 隔离开关状态评估方法

周秀<sup>1</sup>, 吴旭涛<sup>1</sup>, 田天<sup>1</sup>, 白金<sup>1</sup>, 张昭宇<sup>2</sup>, 李军浩<sup>2</sup>

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750001;

2. 西安交通大学(电工材料电气绝缘全国重点实验室), 陕西 西安 710049)

**摘要:** 气体绝缘开关(gas insulated switchgear, GIS)设备中的隔离开关故障往往是机械、热、电气多物理量综合作用的结果,从微小缺陷发展至严重故障的过程中,会产生异常振动、温度、局部放电多种参量信号,同时测量并分析 GIS 隔离开关的多参量信息对于准确获取其运行状态具有重要意义。文中通过在实体 220 kV GIS 实验平台上模拟隔离开关最为常见的接触不良缺陷,研究不同接触状态时振动信号、温度变化和局部放电信号的演化规律,获得其与设备状态之间的对应关系,结合健康指数理论和改进层次分析法,提出基于多参量特征的 GIS 隔离开关综合评估方法。使用该方法开展现场测试,其检查结果与多参量综合评估方法的分析结果相吻合。文中的研究为 GIS 隔离开关状态的带电检测提供了一种可行性较高的多参量融合分析新方法。

**关键词:** 气体绝缘开关(GIS); 隔离开关; 振动信号; 温度变化; 局部放电; 健康指数; 改进层次分析法

**中图分类号:** TM83

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2024)01-0220-09

## 0 引言

隔离开关是气体绝缘开关(gas insulated switchgear, GIS)设备的重要组成部分,在变电站中大量装配,一旦出现故障可能会引发严重的电力系统振荡,降低系统的可靠性和稳定性<sup>[1-2]</sup>。

近年来, GIS 隔离开关接触状态的劣化导致了多起绝缘故障。在长期运行过程中,设备老化、锈蚀或者频繁动作等原因可能使隔离开关机械状态发生变化,导致其接触状态不断劣化,表现为局部放电、高温、异常振动等现象,最终可能引发严重的设备故障<sup>[3-5]</sup>。例如 2020 年贵州某变电站的隔离开关动作异常,经解体检查发现设备的齿轮箱受潮发生锈蚀,导致传动轴卡塞严重无法正常动作,隔离开关的动、静触头不能合闸到位,结构异常导致了此次事故的发生<sup>[6]</sup>; 2019 年某 220 kV GIS 隔离开关由于锈蚀导致合闸不到位,动、静触头虚接、烧熔、滴落,最终引发放电故障<sup>[7]</sup>; 2018 年某 110 kV GIS 母线隔离开关舌簧压紧力不足导致拨叉、舌簧与传动销接触不良,发生局部烧蚀和悬浮放电<sup>[8]</sup>。

目前针对 GIS 隔离开关的现场检测已经从离线监测逐渐发展为在线监测。根据隔离开关的动作特性,上世纪八十年代日本相关领域学者提出了“机械状态监测”这一概念,主要研究项目包括分合闸线圈电流、行程-时间特性曲线等<sup>[9]</sup>。但是机械特性监测的不足主要在于其是基于设备的传动机构动作参数并由相关监测模块采集动作数据,难以直

接反应设备内部隔离开关的真实状态,因此发展至今仍然没有大范围普及。此外,隔离开关的在线状态监测是通过不同类型的传感器直接测量设备发出的物理、化学信号,分析判断设备是否存在缺陷。目前,带电检测技术在电力系统中已经得到广泛应用,如红外测温、局部放电检测、振动检测等<sup>[10-12]</sup>。

然而在现场检测中发现,使用单一检测方法可能只对隔离开关接触状态劣化的某一阶段有效,这是因为隔离开关接触状态劣化是一个动态发展的过程,是机械、热、电气等多物理量综合作用的结果<sup>[13-14]</sup>。在初始阶段,缺陷处并不会激发明显的放电信号,仅表现出轻微的异常振动;一旦隔离开关接触状态开始劣化,便会引起接触电阻增大,在回路电流的作用下局部会发热升温。此外,由于动、静触头间存在微小间隙,在电动力的作用下会导致设备机械振动增大。在这一阶段通过检测振动信号和温升的变化能尽早发现接触状态劣化的问题,防止缺陷继续劣化。如果接触劣化继续加重,烧蚀、摩擦将损坏触头,产生金属粉末,甚至导致零件松动掉落,进而在高场强的环境中引起局部放电。长时间的局部放电会使设备绝缘性能严重受损,最终导致绝缘击穿或者闪络。

因此,文中根据隔离开关接触状态劣化的各阶段特点,结合目前主流的几类在线检测方法,通过振动、温度及局部放电信号综合分析 GIS 隔离开关不同接触状态表现出的机械、热、电气参量的变化规律,获取能够表征隔离开关不同状态的多层次特征,提出了基于多参量信号特征的 GIS 隔离开关接

收稿日期:2023-08-09;修回日期:2023-10-28

触状态综合评估方法。现场应用结果表明该方法能够打破单一检测的局限,具有更好的检测效率,为 GIS 隔离开关运行状态的带电检测提供了高可靠性的新思路与具体的实现方法。

## 1 GIS 隔离开关多参量信号特性分析

### 1.1 GIS 隔离开关综合实验平台与多参量检测系统

文中实验平台如图 1 所示,为 220 kV 三相分体式 GIS,涵盖了隔离开关、出线套管、母线、操作机构等 GIS 关键组成单元,可以分别施加 200 kV 工频电压或 2 kA 工频电流,真实模拟 GIS 的高电压、大电流运行情况。单独加电压时一侧套管接高电压,另一侧套管为悬浮电位,以产生局部放电激励;单独加电流时整个 GIS 接入大电流回路,以产生振动和温升激励。实验中的加压范围是 20~160 kV,加流范围是 300~1 200 A。整个平台的检测设备包括振动传感器、红外检测仪、超声传感器和特高频传感器,均以隔离开关所在气室为检测对象。温升实验主要参考标准 GB 7251.1—2013,当每小时测点温度变化不超过 1 °C 时认为温度趋于稳定,通流静置时间约为 1 h。实验中为了保证测量信号的完整准确,在隔离开关周围一共设置了 6 个测量点,测量点 1 在绿色盆式绝缘子(简称 1 号盆子)右侧气室的正上方,测量点 6 在黄色盆式绝缘子(简称 2 号盆子)左侧气室的正上方,同时以隔离开关所在平面为采集面等距设置了 4 个测量点,顺次编号为 2—5。

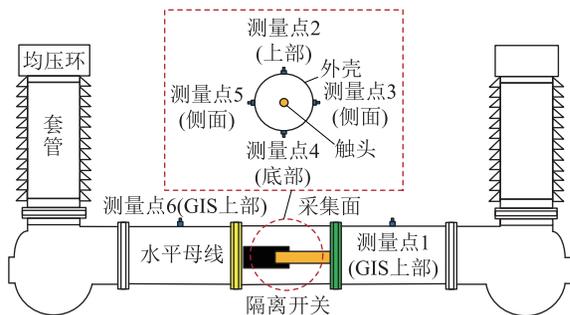


图 1 220 kV GIS 隔离开关综合实验平台

Fig.1 Comprehensive experimental platform of 220 kV GIS disconnector

通过手动调节隔离开关动触头的插入深度,在实验平台上模拟隔离开关 3 种典型的接触状态,即接触良好、接触不良以及严重接触不良。接触距离如图 2 所示,不同接触状态间通过测量回路电阻进行区分。

GIS 隔离开关综合实验平台的具体参数如表 1 所示。



图 2 GIS 隔离开关不同接触状态

Fig.2 Different contact states of GIS disconnector

表 1 设备具体参数

Table 1 Equipment specific parameters

| 参数                     | 数值        |    |
|------------------------|-----------|----|
| SF <sub>6</sub> 压强/MPa | 0.45      |    |
| 不同接触状态的回路电阻/mΩ         | 接触良好      | 25 |
|                        | 接触不良      | 56 |
|                        | 严重接触不良    | 89 |
| 电流范围/A                 | 100~1 200 |    |
| 电压范围/kV                | 20~160    |    |

为了获得 GIS 隔离开关不同接触状态下机械、热及电气信号的特征,从而建立检测参数与设备状态之间的关联关系,实验中使用自研的 GIS 振动测量系统测量外壳的振动信号,高精度专用红外热像仪测量 GIS 整体温升变化,局部放电测试仪测量特高频和超声信号。

实验中,振动、局放超声和局放特高频检测方法的频率检测范围分别为:1~4 000 Hz、30~120 kHz、300~3 000 MHz。GIS 隔离开关多参量检测流程如图 3 所示。

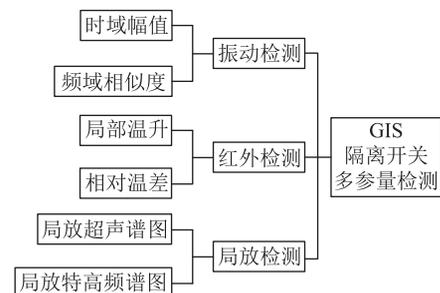


图 3 GIS 隔离开关多参量检测流程

Fig.3 Flow chart of GIS disconnector multi-parameter detection

### 1.2 多参量信号检测实验结果

分析实验数据发现,多参量信号在传播过程中会有不同程度的衰减:机械波、超声波在经过盆式绝缘子后衰减幅度最大超过 50%,热量传递至相邻气室也受到明显阻隔,但环氧树脂材料对特高频信号的影响较小<sup>[15]</sup>。因此文中确定了振动信号、温度

信号以及超声信号的最佳测量点在隔离开关正上方,特高频信号的最佳测量点在两端盆式绝缘子上。统计得到 GIS 隔离开关 3 种接触状态下的振动信号幅值、温升以及局放统计如图 4 所示,其中图 4(a)中的加速度单位为重力加速度  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ;图 4(c)中纵坐标  $D$  为 1 表示发生放电, -1 表示未发生放电。

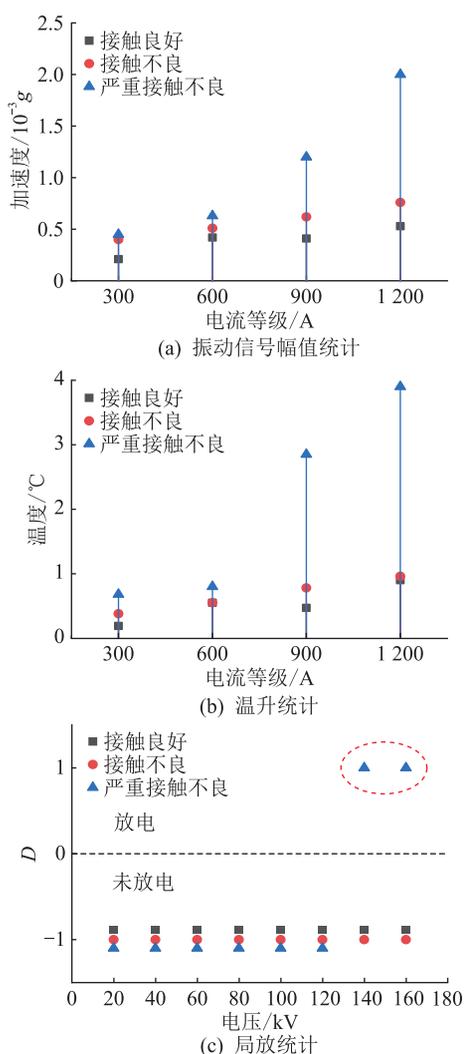


图 4 GIS 隔离开关多参量检测结果统计

Fig.4 Statistics of GIS disconnector multi-parameter detection results

由图 4 可知, GIS 隔离开关出现轻微接触状态劣化时不会影响设备的运行,振动信号幅值最大增幅与正常状态相比不超过 1 倍,温度上升在  $1^{\circ}C$  以内且没有明显热故障点,不会发生局部放电;但是一旦出现严重机械故障, GIS 外壳的振动信号幅值与正常状态相比最大增幅超过 4 倍以上,温度上升超过  $4^{\circ}C$  且在隔离开关正上方会出现明显的热故障点,施加电压超过 140 kV 时,在隔离开关触头位置发生了局部放电。

隔离开关的动、静触头从接触良好逐渐劣化为

仅靠动触头尖端与静触头的弹簧触指接触,触头间接触斑点逐渐减少导致有效导通面积减小,回路电阻增大<sup>[16-18]</sup>。高压条件下,动触头尖端因为机械振动导致的电接触松动而演变为电位悬浮,当超过耐受电压值时触头尖端极有可能发生放电甚至产生电弧,并且产生以 100 Hz 为主的特征频率。图 5 为实验测得的典型悬浮放电谱图,其中 PRPD 为局部放电相位分布谱图,PRPS 为局部放电脉冲信号谱图。特高频信号在前、后半周相位均出现放电脉冲,幅值达到 60 mV,相邻放电时间基本一致,呈左右分布;而超声信号具有明显的工频相关性,在工频相角上集中于两簇,周期最大值为 23 mV,并且频率 100 Hz 的相关性大于频率 50 Hz 的相关性。特高频检测结果与超声检测结果一致,均为典型的悬浮放电特征<sup>[19-20]</sup>。

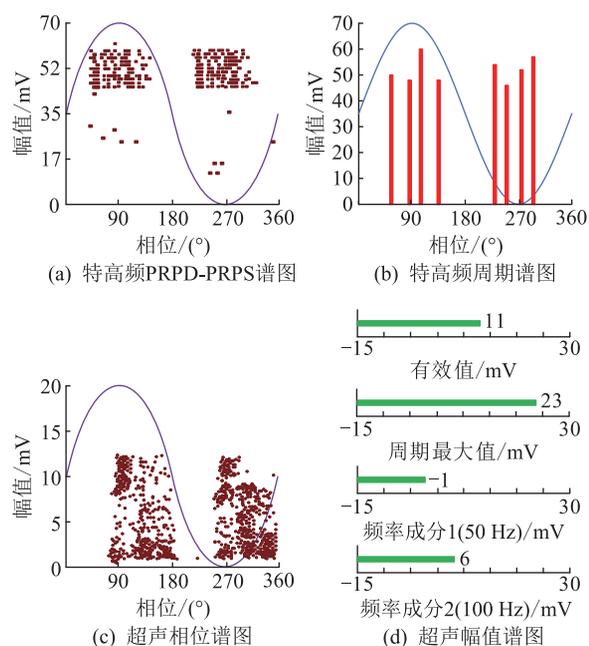


图 5 隔离开关局部放电典型谱图

Fig.5 Typical spectrum of disconnector partial discharge

振动信号和温度变化主要受电流大小以及隔离开关接触状态 2 个因素的影响。同一接触状态下电流等级越高, GIS 外壳振幅越大,温度上升越快;同一电流等级下,隔离开关接触缺陷越严重, GIS 外壳振幅越大,温度上升也越快。同时, GIS 隔离开关只有在接触状态严重劣化时,持续施加高电压才有可能在触头位置发生局部放电。

## 2 基于多参量信号特征的 GIS 隔离开关综合评估方法

文中的基本思路为:首先根据实验结果建立检测信号与隔离开关接触状态的对应关系;然后通过经验公式或计算结果将指数范围转化为 0~10,根据

实验指数得到其对应的设备状态等级,指数越小,说明该项实验结果越好,反映的设备状态就越好;最后根据所有的实验指数及对应的设备状态等级,配以不同的权重系数,得到基于多参量的 GIS 综合健康指数<sup>[21]</sup>。

### 2.1 多参量健康指数

结合健康指数理论,将实验得到的检测结果作为评估指数,每项指数的范围统一归算为 0~10,建立函数关系式对 GIS 隔离开关机械状态进行表征<sup>[22]</sup>,如表 2 所示。

表 2 综合健康指数与设备状态对应关系  
Table 2 Correspondence between comprehensive health index and equipment status

| 健康指数    | 状态 | 状态评估  |
|---------|----|---|
| 0~3.5   | 良好 | 设备性能稳定,健康水平指数和故障发生概率在一段时间内不会有太大的变化                |
| 3.5~6.5 | 一般 | 设备基本处于良好运行状态,整体性能有所下降,故障发生概率进入上升阶段,重点监测有无异常增长量    |
| 6.5~8.5 | 较差 | 设备状态劣化进程加快,故障发生概率明显上升,需要给予积极维护检修,缩短检测周期,密切监测异常增长量 |
| 8.5~10  | 极差 | 设备严重劣化,已经发生故障,立即停电处理,对设备进行全面检修                    |

#### 2.1.1 振动信号的健康指数 $H_1$

隔离开关接触状态的劣化不仅导致时域信号振幅增大,也会使对应频谱中频率分布、幅值发生变化,集中在 100~1 000 Hz 之间,以 100 Hz 倍频为主<sup>[23-24]</sup>。统计出各频率的幅值平方占 100~1 000 Hz 幅值平方之和的百分比,将其作为特征量,占比公式为:

$$P_{fx} = A_x^2 / \sum_{y=100}^{1000} A_y^2 \quad (1)$$

式中: $A_x$ 为  $x$  频率的振动幅值; $A_y$ 为  $y$  频率的振动幅值; $P_{fx}$ 为  $x$  频率的幅值平方占 100~1 000 Hz 幅值平方之和的百分比。

为计算故障状态与正常状态振动信号频率间的关系,引入皮尔逊相关系数  $r$ :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{10} (B_i - \bar{B})(C_i - \bar{C})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{10} (B_i - \bar{B})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (C_i - \bar{C})^2}} \quad (2)$$

式中: $B_i$ 、 $C_i$ 分别为接触良好状态、待测状态的振动信号第  $i$  个特征量; $\bar{B}$ 、 $\bar{C}$ 分别为接触良好状态、待测状态的振动信号平均值。

建立典型特征向量  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{A} = [p_{100} \quad p_{200} \quad \cdots \quad p_{1000}] \quad (3)$$

式中: $p_{100}$ 为振动信号在 100 Hz 频率处的幅值占比,其他变量以此类推。计算得到的相关系数  $r$  的取值范围为  $[-1, 1]$ ,从工程应用角度,对  $r$  进行绝对值计算:

$$r_1 = |r| \quad (4)$$

接触不良状态和严重接触不良状态的振动信号相对于接触良好状态的相关系数如表 3 所示。

表 3 接触故障的相关系数  
Table 3 Correlation coefficient of contact failure

| 电流等级/A | 接触不良     | 严重接触不良   |
|--------|----------|----------|
| 200    | 0.092 14 | 0.123 37 |
| 400    | 0.561 87 | 0.253 38 |
| 600    | 0.785 49 | 0.344 43 |
| 800    | 0.835 03 | 0.795 14 |
| 1 000  | 0.912 55 | 0.820 39 |
| 1 200  | 0.884 52 | 0.844 52 |

$r_1$  越接近 1 则表示 2 组信号越相似,即检测数据所代表的接触状态与接触良好状态越接近。根据计算结果,通过式(5)降半岭函数将相关系数  $r_1$  转为 0~10 范围进行分级,实验结果的参数越大代表设备状态越好。

$$H_1 = \begin{cases} 0 & r_1 \leq a \\ 5 - 5\sin\left(\frac{\pi}{b-a}\left(x - \frac{a+b}{2}\right)\right) & a < r_1 < b \\ 10 & r_1 \geq b \end{cases} \quad (5)$$

实际计算的相关系数值越接近 1 则表征隔离开关的运行状态越好,故式(5)中对应的  $a$  为 0,  $b$  为 1。根据相关系数分布特征对隔离开关状态进行等级划分,从高到低记为 A、B、C,代表的健康指数分别为 10、8、6、4、2,对应 5 类健康状态。基于振动信号相似度的健康指数  $H_1$ ,对应关系如表 4 所示。

表 4 振动信号与健康指数  $H_1$  对应关系  
Table 4 Correspondence between vibration signal and health index  $H_1$

| 状态等级 | 相似度     | 健康指数 $H_1$ |
|------|---------|------------|
| A    | 0~0.2   | 10         |
|      | 0.2~0.4 | 8          |
| B    | 0.5~0.6 | 6          |
|      | 0.6~0.8 | 4          |
| C    | >0.8    | 2          |

#### 2.1.2 温度信号的健康指数 $H_2$

GIS 是电流致热型设备,通过监测隔离开关设备的热故障点,计算出接触不良状态与正常状态的相对温差来表征故障的严重程度<sup>[25-26]</sup>。相对温差  $\delta_t$

为 2 个对应测量点之间的温升之差与其中较高温度点的温升之比的百分数,其计算公式为:

$$\delta_t = \frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $\tau_1$ 为发热点温升; $\tau_2$ 为正常相对应点的温升。

计算得到不同电流下在测量点 2 处的相对温差计算值如表 5 所示。

表 5 接触故障的相对温差

Table 5 Relative temperature difference of contact failure

| 电流等级/A | 接触不良/% | 严重接触不良/% |
|--------|--------|----------|
| 200    | 0      | 50       |
| 400    | 33     | 83       |
| 600    | 50     | 77       |
| 800    | 38     | 85       |
| 1 000  | 10     | 74       |
| 1 200  | 10     | 76       |

如果出现热故障,相对温差值越大则表征 GIS 隔离开关机械状态劣化越严重。根据计算结果,通过式(7)升半岭函数将相对温差  $\delta_t$  转换为 0~10 范围进行分级,实验结果的参数越小代表设备状态越好。

$$H_2 = \begin{cases} 0 & \delta_t \leq a \\ 5 + 5\sin\left(\frac{\pi}{b-a}\left(x - \frac{a+b}{2}\right)\right) & a < \delta_t < b \\ 10 & \delta_t \geq b \end{cases} \quad (7)$$

实际计算相对温差值越接近 0 时表征隔离开关的状态越好,故式中对应的  $a$  为 0,  $b$  为 1。根据相对温差分布特征对隔离开关状态进行等级划分,从高到低记为 A、B、C,代表的健康指数分别为 10、8、6、4、2,对应 5 类健康状态。基于温度信号相对温差的指数  $H_2$ 。对应关系如表 6 所示。

表 6 温度信号与健康指数  $H_2$  对应关系

Table 6 Correspondence between temperature signal and health index  $H_2$

| 状态等级 | 相似度     | 健康指数 $H_2$ |
|------|---------|------------|
| A    | 0~0.2   | 10         |
|      | 0.2~0.4 | 8          |
| B    | 0.5~0.6 | 6          |
|      | 0.6~0.8 | 4          |
| C    | >0.8    | 2          |

### 2.1.3 局放超声信号健康指数 $H_3$

结合前文隔离开关严重接触不良缺陷的局放超声检测结果,可以按照不同接触状态下超声信号

的特征值确定故障等级。正常状态下,超声信号幅值  $V_{peak}$  小于 5 mV 且 50 Hz 频率分量与 100 Hz 频率分量间没有表现出相关性;劣化初始阶段,超声信号幅值  $V_{peak}$  在 5~10 mV 之间,相位图表现为正弦带状聚集,50 Hz 频率分量幅值  $V_{50 Hz}$  与 100 Hz 频率分量幅值  $V_{100 Hz}$  上升;当隔离开关接触状态严重劣化时,相位图出现明显聚集效应,放电脉冲具有工频相关性,脉冲在工频相角上集中于两簇,出现“双峰”,且超声信号幅值  $V_{peak} > 10$  mV,50 Hz、100 Hz 频率特征明显且  $V_{100 Hz}/V_{50 Hz} \approx 2$ <sup>[27]</sup>。基于局放超声信号谱图特征的健康指数  $H_3$  的对应关系如表 7 所示。

表 7 超声信号与健康指数  $H_3$  对应关系

Table 7 Correspondence between ultrasonic signal and health index  $H_3$

| 状态等级 | 谱图特征   | 健康指数 $H_3$ |
|------|--|------------|
| A    | $V_{peak} > 20$ mV, $V_{100 Hz}/V_{50 Hz} \approx 2$ , 相位图谱出现“双峰”,幅值大增                       | 10         |
|      | $V_{peak} > 10$ mV, $V_{100 Hz} > V_{50 Hz}$ , 相位图谱出现“双峰”                                    | 8          |
| B    | $5 \text{ mV} \leq V_{peak} \leq 10 \text{ mV}$ , $V_{100 Hz}$ 、 $V_{50 Hz}$ 出现幅值,相位图谱正弦带状聚集 | 6          |
|      | $5 \text{ mV} \leq V_{peak} \leq 10 \text{ mV}$ , $V_{100 Hz}$ 、 $V_{50 Hz}$ 幅值不明显,相位图谱水平聚集  | 4          |
| C    | $V_{peak} < 5$ mV, 无明显特征   | 2          |

### 2.1.4 局放特高频信号健康指数 $H_4$

隔离开关接触不良缺陷的局放特高频检测结果表明,在接触状态劣化早期阶段,GIS 内部很难发生局部放电产生特高频信号;当接触状态严重劣化时,在盆式绝缘子附近测得局放特高频信号,局放谱图特征表现为典型的悬浮放电。基于局放特高频信号谱图特征的健康指数  $H_4$  的对应关系见表 8。

表 8 特高频信号与健康指数  $H_4$  对应关系

Table 8 Correspondence between ultra-high frequency signal and health index  $H_4$

| 状态等级 | 谱图特征   | 健康指数 $H_4$ |
|------|--|------------|
| A    | 脉冲幅值大于 50 dB, PRPD 相位谱图对称分布,相邻放电时间基本一致且放电次数少 | 8~10       |
| B    | 脉冲幅值较低,出现杂散放电脉冲                              | 4~6        |
| C    | 无明显脉冲信号                                      | 0~2        |

### 2.2 多参量指数权重计算

由前文分析可知,振动信号的相似度、温度信号的相对温差以及局放信号特征指标在一定范围内都能反映 GIS 隔离开关的运行状态,能够发现隔离开关是否存在缺陷。然而,在 GIS 隔离开关接触状态劣化的早期阶段,局放检测效果不佳,振动信

号和温度变化与接触状态间具有较明显的对应关系;一旦出现局放信号,隔离开关内部很可能已经发生了严重的故障。同时,根据各现场的具体情况,不同检测手段的普及程度也有差别。因此,各项实验项目的权重系数应有所侧重,根据实际情况确定不同指数的权重比例,区分重要程度。

基于改进层次分析(improved analytic hierarchy process, IAHP)法计算出振动信号、温度信号、局放超声信号以及局放特高频信号的权重系数,可分为以下步骤<sup>[27]</sup>。

(1) 假设待评估项目有  $n$  个指标,为了使评估更合理,引入  $m$  个相关领域专家给出的判断决策,得到对应判断矩阵  $\mathbf{H}_{(k)}$ ,其中  $h_{ij(k)}$  为矩阵元素,  $i, j=1, 2, \dots, n$ 。

$$\mathbf{H}_{(k)} = (h_{ij(k)})_{n \times n} \quad (8)$$

按照 1—5 分标度法进行打分评价,对参量统一评价规则,如表 9 所示。判断矩阵  $\mathbf{H}_{(k)}$  如表 10 所示,  $\mathbf{H}_{(k)}$  为互反矩阵,其中  $k=1, 2, \dots, m$ 。

表 9 1—5 分标度法  
Table 9 1—5 points scale method

| 标度  | 含义  |
|-----|---|
| 1   | 2 个因素相比,具有相同重要性   |
| 3   | 2 个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要  |
| 5   | 2 个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要  |
| 2,4 | 上述两相邻判断的中值  |
| 倒数  | 若因素 $i$ 与因素 $j$ 的重要性之比为 $h_{ij(k)}$ , 则因素 $j$ 与因素 $i$ 的重要性之比为 $h_{ji(k)} = 1/h_{ij(k)}$ |

表 10 判断矩阵格式(以 4 阶为例)

Table 10 Judgment matrix format (4 order for example)

| $\mathbf{H}_{(k)}$ | $\mathbf{H}_1$ | $\mathbf{H}_2$ | $\mathbf{H}_3$ | $\mathbf{H}_4$ |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $\mathbf{H}_1$     | $h_{11}$       | $h_{12}$       | $h_{13}$       | $h_{14}$       |
| $\mathbf{H}_2$     | $h_{21}$       | $h_{22}$       | $h_{23}$       | $h_{24}$       |
| $\mathbf{H}_3$     | $h_{31}$       | $h_{32}$       | $h_{33}$       | $h_{34}$       |
| $\mathbf{H}_4$     | $h_{41}$       | $h_{42}$       | $h_{43}$       | $h_{44}$       |

(2) 计算矩阵  $\mathbf{H}_{(k)}$  的反对称矩阵  $\mathbf{B}_{(k)}$ 。

$$\mathbf{B}_{(k)} = (b_{ij(k)})_{n \times n} = \lg \mathbf{H}_{(k)} \quad (9)$$

式中:  $b_{ij(k)}$  为矩阵  $\mathbf{B}_{(k)}$  元素。

(3) 验证判断矩阵的总体标准差  $\sigma_{ij}$ 。

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m \left( b_{ij(k)} - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m b_{ij(k)} \right)^2} \quad (10)$$

若任意  $\sigma_{ij} < 1$ ,则表示不同判断矩阵之间较统一,即专家的意见基本一致,数据处于合理区间;若存在  $\sigma_{ij} \geq 1$ ,则表示判断矩阵之间分歧较大,专家的意见中存在互相矛盾,须返回步骤(1)重新构造判断矩阵。

(4) 计算反对称矩阵  $\mathbf{B}_{(k)}$  的平均阵  $\mathbf{B}$ 。

$$\mathbf{B} = (b_{ij})_{n \times n} = \left( \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m b_{ij(k)} \right)_{n \times n} \quad (11)$$

(5) 计算  $\mathbf{B}$  的最优传递矩阵  $\mathbf{C}$ 。

$$\mathbf{C} = (c_{ij})_{n \times n} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n (b_{il} - b_{jl}) \quad (12)$$

(6) 得到各评估指标的权重值  $w_j$ 。

$$w_j = 1 / \sum_{i=1}^n 10^{c_{ij}} \quad (13)$$

如果计算中出现某项指标缺失,需要进行相应权重调整,权重的重新分配由其他指标与缺失指标的关联程度以及最初权重共同决定。评估指标权重计算流程如图 6 所示。

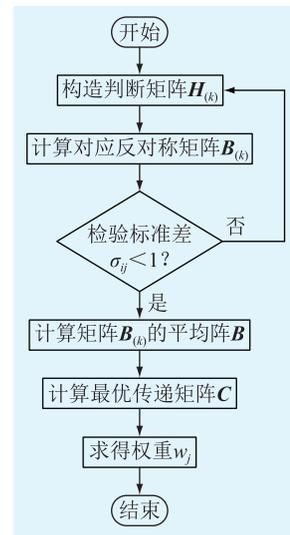


图 6 评估指标权重计算流程

Fig.6 Flow chart of evaluation index weight calculation

结合各项评估指标的权重分配  $w_j$ ,即可计算出待测隔离开关的综合健康指数  $H$ ,计算公式为:

$$H = \frac{\sum_{d=1}^4 w_d H_d}{\sum_{d=1}^4 w_d} \quad (14)$$

综合健康指数范围为 0~10,其中 10 为状态最差,0 为状态最好。在评估过程中,所有的实验项目都可以囊括其中;如果实验项目数量不足表 10 中所列的 4 种项目,则可根据实际情况进行  $d$  的调整。不论实验项目如何,最终得到的结果都是反映根据实验得到的综合健康指数值,其范围都在 0~10 之内。

### 3 GIS 隔离开关状态检测现场应用

在某 220 kV 变电站开展了现场测试,对该 GIS 站某 220 kV 三相母线 6M 线的隔离开关进行巡检

时发现,6M-b相指示牌显示合闸不到位,位置信号显示合闸距离小于相邻两相。检测时间为正午,从日负荷曲线查知该时间段处于当日用电峰值,且该时间段内负荷无较大变化。

经检测分析,6M-b相GIS隔离开关的外壳振动幅值为 $0.742 \times 10^{-3} g$ ,而相邻a、c相的振动幅值基本相同,其中6M-a相振动幅值为 $0.463 \times 10^{-3} g$ ,6M-b相幅值升高近60%,时域信号检测结果异常。两相隔离开关振动信号时域波形如图7所示。

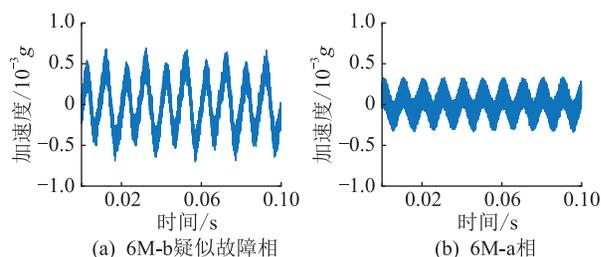


图7 振动信号幅值对比

Fig.7 Comparison of vibration signal amplitude

现场同时使用了红外热像仪测量疑似故障区域的温度分布,未发现热故障;局放超声检测结果显示该气室的超声信号有效值和周期最大值也出现小幅度升高,但没有表现出50 Hz、100 Hz频率相关性,判断该气室内部并未出现局部放电;局放特高频检测谱图中存在现场干扰产生的杂散脉冲信号,无放电征兆,如图8所示,进入健康评估流程。

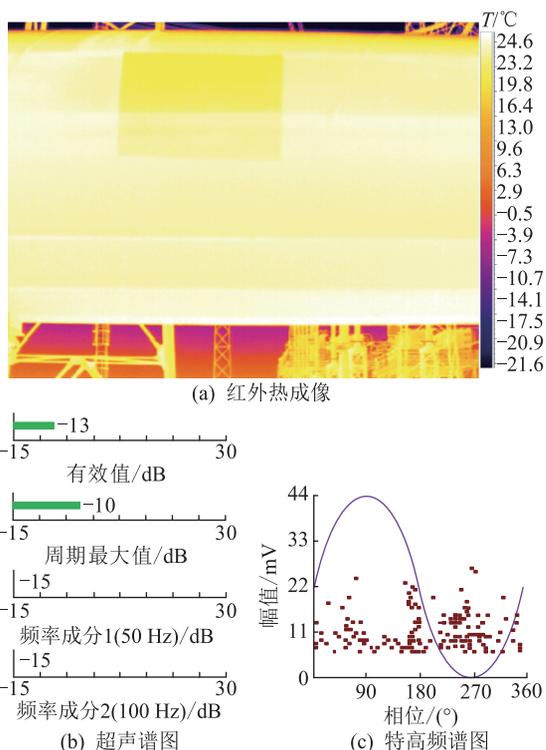


图8 现场检测结果

Fig.8 Field test results

根据检测结果,计算疑似故障相与对照相振动信号在频域100~1 000 Hz中的相似度为0.38,由表4可知对应健康指数 $H_1 = 8$ ;当天室外温度高于30℃时,GIS外壳温度整体偏高,红外热像图特征不明显,记温度健康指数 $H_2 = 4$ ;超声信号出现小幅增量,记健康指数 $H_3 = 4$ ;特高频信号无异常,对应健康指数 $H_4 = 2$ 。根据前文计算方法计算出各项检测结果对应的权重系数,得到综合健康指数 $H = 3.9$ ,由表2可知隔离开关内部可能存在机械故障,但无绝缘缺陷,建议对内部进行进一步检查。

对该相隔离开关气室使用X光数字成像进行检测,发现隔离开关气室左侧静触头与盆式绝缘子连接处有一枚紧固螺栓掉落,如图9所示。由于紧固螺栓掉落导致隔离开关接触异常,继而引发异常振动,该设备被解体后返厂检修。

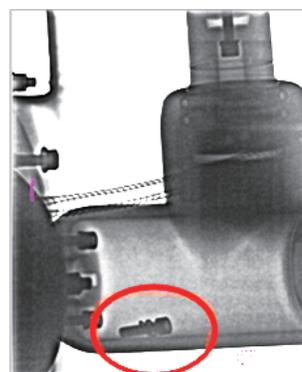


图9 疑似故障相隔离开关X光成像

Fig.9 Suspected faulty phase disconnecter X-ray image

#### 4 结论

文中在220 kV GIS隔离开关实验平台上开展了针对机械、热、电气多参量的检测实验,得出以下结论:

(1) 在GIS隔离开关接触状态劣化的初始阶段,缺陷处并不会激发明显的放电信号;随着接触状态的逐渐劣化,动、静触头的接触电阻增大,导致设备发热升温,机械振动增大;当接触状态劣化严重时,缺陷处会引发局部放电,使设备绝缘性能受损。

(2) 分析比较了不同接触状态的信号特性,根据频域特性计算振动信号相似度,根据外壳温度分布特征计算温度信号相对温差,局放产生的超声、特高频典型谱图特征,构建得到多参量信号的特征量,结合健康指数理论、IAHP,提出基于机-热-电多参量的GIS隔离开关综合评估方法。

最后,现场测试GIS隔离开关状态多参量综合评估方法,解体检查结果与状态检测的分析结果相吻合,证明该方法具有实际意义。

## 致 谢

本文得到国网宁夏电力有限公司科技项目(52-29DK200051)资助,谨此致谢!

## 参考文献:

- [1] 杨哲,张倩然,高阳,等. GIS 机械故障振动检测研究综述[J]. 山东工业技术,2015(17):261-263.  
YANG Zhe,ZHANG Qianran,GAO Yang,et al. Summary of key research on GIS mechanical fault detection[J]. Journal of Shandong Industrial Technology,2015(17):261-263.
- [2] WANG Y X,YAN J,YANG Z,et al. A novel federated transfer learning framework for intelligent diagnosis of insulation defects in gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2022,71:1-11.
- [3] 钟尧,郝建,丁屹林,等. GIS 设备典型机械缺陷的非线性振动行为表征参量分析和诊断模型研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(19):7248-7260.  
ZHONG Yao,HAO Jian,DING Yilin,et al. Nonlinear vibration behavior characterization parameter analysis and diagnosis model of typical mechanical defects of GIS equipment[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(19):7248-7260.
- [4] 梁基重,晋涛,牛曙,等. 基于 EMD-FFT 特征提取的 GIS 机械缺陷诊断方法研究[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(3):216-223.  
LIANG Jichong,JIN Tao,NIU Shu,et al. Research on GIS mechanical defect diagnosis method based on EMD-FFT feature extraction[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(3):216-223.
- [5] 冉梦东,孟天东. 一起 220 kV GIS 隔离开关合闸不到位故障案例分析[J]. 农村电气化,2021(6):33-35.  
RAN Mengdong,MENG Tiandong. Case analysis of a 220 kV GIS disconnecting switch incorrect closing[J]. Rural Electrification,2021(6):33-35.
- [6] 张丕沛,李杰,汪鹏. 隔离开关合闸不到位引起 GIS 放电故障的原因分析[J]. 山东电力技术,2021,48(11):54-58.  
ZHANG Pipei,LI Jie,WANG Peng. Cause analysis of GIS discharge fault caused by disconnecting switch closing not in place[J]. Shandong Electric Power,2021,48(11):54-58.
- [7] 郭超,周波,谭学敏,等. GIS 隔离开关内悬浮放电缺陷带电检测与解体分析[J]. 高压电器,2021,57(5):168-174.  
GUO Chao,ZHOU Bo,TAN Xuemin,et al. Online detection and disassembly analysis on floating discharge defect in GIS disconnecting switch[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(5):168-174.
- [8] 余江,李庆飞,李瑞峥,等. 电气设备在线监测技术的研究与展望[J]. 造纸装备及材料,2022,51(8):129-131.  
YU Jiang,LI Qingfei,LI Ruizheng,et al. Research and prospect of on-line monitoring technology for electrical equipment[J]. Papermaking Equipment & Materials,2022,51(8):129-131.
- [9] 吴悠,杨支吉,丁颀. 高压电气设备中红外技术诊断的应用[J]. 低碳世界,2017(21):33-34.  
WU You,YANG Zhiji,DING Di. Application of infrared technology diagnosis in high voltage electrical equipment[J]. Low Carbon World,2017(21):33-34.
- [10] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术,2015,41(8):2583-2601.  
LI Junhao,HAN Xutao,LIU Zehui,et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering,2015,41(8):2583-2601.
- [11] 李秀广,吴旭涛,朱洪波,等. 基于振动信号的 GIS 触头接触异常研究分析[J]. 高压电器,2016,52(10):165-169,175.  
LI Xiuguang,WU Xutao,ZHU Hongbo,et al. Research on contacting fault of GIS contact based on vibration signal[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(10):165-169,175.
- [12] 金虎. 基于多参量的 GIS 局部放电发展过程研究及严重程度评估[D]. 北京:华北电力大学,2015.  
JIN Hu. GIS partial discharge development process research and its severity evaluation based on the multiple parameters[D]. Beijing:North China Electric Power University,2015.
- [13] 周大洲,王兴照,吕俊涛,等. 基于多参量的气体绝缘组合电器带电检测诊断技术[J]. 山东电力技术,2016,43(4):15-17.  
ZHOU Dazhou,WANG Xingzhao,LYU Juntao,et al. Live detection and diagnosis technology for the gas insulated switchgear based on multi-parameters[J]. Shandong Electric Power,2016,43(4):15-17.
- [14] 周云锋,张子阳,杨景刚,等. 基于超声波法的 GIS 盆式绝缘子内部气隙放电特性研究[J]. 江苏电机工程,2012,31(4):3-5,8.  
ZHOU Yunfeng,ZHANG Ziyang,YANG Jinggang,et al. Research on discharge characteristics of GIS basin insulator internal air gap based on the ultrasonic method[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2012,31(4):3-5,8.
- [15] 刘媛,杨景刚,贾勇勇,等. 基于振动原理的 GIS 隔离开关触头接触状态检测技术[J]. 高电压技术,2019,45(5):1591-1599.  
LIU Yuan,YANG Jinggang,JIA Yongyong,et al. Connection state diagnosis method of GIS disconnecting switch based on mechanical vibration[J]. High Voltage Engineering,2019,45(5):1591-1599.
- [16] 李凯,许洪华,陈冰冰,等. GIS 振动机理及固有频率研究[J]. 电测与仪表,2017,54(3):14-18.  
LI Kai,XU Honghua,CHEN Bingbing,et al. Research on vibration mechanism and natural frequency in GIS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2017,54(3):14-18.
- [17] 丁登伟,唐诚,高文胜,等. GIS 中典型局部放电的频谱特征及传播特性[J]. 高电压技术,2014,40(10):3243-3251.  
DING Dengwei,TANG Cheng,GAO Wensheng,et al. Frequency attributes and propagation properties of typical partial discharge in GIS[J]. High Voltage Engineering,2014,40(10):3243-3251.
- [18] 袁文海,刘彪,徐浩,等. 基于复合神经网络的 GIS 局放故障类型识别[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(4):157-164.

- YUAN Wenhai, LIU Biao, XU Hao, et al. Partial discharge fault type identification of GIS based on composite neural network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4):157-164.
- [19] GAO W S, ZHAO D B, DING D W, et al. Investigation of frequency characteristics of typical PD and the propagation properties in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(3):1654-1662.
- [20] HJARTARSON T, JESUS B, HUGHES D T, et al. Development of health indices for asset condition assessment [C]//2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat.No.03CH37495). Dallas, TX, USA. IEEE, 2004:541-544.
- [21] 孟繁津. 基于健康状态的电力变压器可靠性和经济性寿命评估研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.  
MENG Fanjin. Study on reliability life and economic life of power transformer based on health index [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [22] 冯俊宗, 孙利雄, 陈维维, 等. 不同运行状态下 GIS 隔离开关的振动特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(12):4314-4322.  
FENG Junzong, SUN Lixiong, CHEN Weiwei, et al. Vibration characteristics of GIS isolating switch under different operating conditions[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12):4314-4322.
- [23] 夏中原, 李威, 兰光宇, 等. 某 220 kV GIS 母线跳闸故障分析与处理[J]. 高压电器, 2023, 59(6):223-228.  
XIA Zhongyuan, LI Wei, LAN Guangyu, et al. Analysis and treatment on busbar trip of 220 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6):223-228.
- [24] 陈宝怡. 红外诊断技术在高压断路器内部发热故障中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(5):92-95, 99.  
CHEN Baoyi. Application of infrared diagnostic technology in high voltage circuit breaker internal heat fault[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(5):92-95, 99.
- [25] 侯国斌, 傅明利, 邓晓峰, 等. GIS 温升的多物理场仿真与实验及热通量分布特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(7):2322-2328.  
HOU Guobin, FU Mingli, DENG Xiaofeng, et al. Multi-physics coupling simulation and experiment of temperature rise in GIS and heat flux distribution characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7):2322-2328.
- [26] ZHANG L, HAN X T, LI J H. Partial discharge detection and analysis of needle-plane defect in SF<sub>6</sub> under negative oscillating lightning impulse voltage based on UHF method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1):296-303.
- [27] GRALL A, DIEULLE L, BERENQUER C, et al. Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2002, 51(2):141-150.

作者简介:



周秀

周秀(1984),男,硕士,高级工程师,从事电力设备状态检测及诊断工作(E-mail:zhou-xiu007@163.com);

吴旭涛(1972),男,学士,高级工程师,从事电力设备状态检测及诊断和电力系统稳定分析与控制相关工作;

田天(1991),男,硕士,工程师,从事电力设备状态检测及诊断相关工作。

## Condition assessment method of GIS disconnecter based on vibration-thermal-electrical multi-parameter signal characteristics

ZHOU Xiu<sup>1</sup>, WU Xutao<sup>1</sup>, TIAN Tian<sup>1</sup>, BAI Jin<sup>1</sup>, ZHANG Zhaoyu<sup>2</sup>, LI Junhao<sup>2</sup>

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Yinchuan 750001, China;

2. Xi'an Jiaotong University (State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment), Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The disconnecter fault in gas insulated switchgear (GIS) is commonly caused by the combined effects of mechanical, thermal, and electrical factors. Throughout the progression from defect development to a severe fault, various signals, including abnormal vibration, temperature changes, and partial discharge, are generated. The simultaneous measurement and analysis of multi-parameter information pertaining to the GIS disconnecter are crucial for accurately determining its operating condition. This study focuses on simulating typical defects in a 220 kV GIS disconnecter to investigate the evolution patterns of vibration signals, temperature variations, and partial discharge signals under different contact states. The aim is to establish the correlation between these signals and the condition of the GIS disconnecter. Additionally, the study proposes a comprehensive evaluation method for GIS disconnecter by incorporating the health index theory and an improved analytic hierarchy process. The proposed method is subsequently applied to practical GIS, demonstrating consistency between the identified fault and the analysis results obtained through the multi-parameter comprehensive evaluation approach. Overall, this research introduces a highly feasible new method for the detection of GIS disconnecter conditions.

**Keywords:** gas insulated switchgear (GIS); disconnecter; vibration signal; temperature variation; partial discharge; health index; improved analytic hierarchy process

(编辑 钱悦)