

DOI: 10.19666/j.rlfed.202208205

基于多特征融合的 GIS 隔离开关 接触状态评估方法

李先锋¹, 胡晨刚¹, 高振宇¹, 陈忠华¹, 陈 锋², 倪晨晨², 晏露阳²

(1.杭州市电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310000; 2.西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

[摘 要] 现有气体绝缘开关 (GIS) 的隔离开关接触状态评估方法依据状态特征量单一, 评估结果可靠性低, 易出现误判漏判等情况。基于此, 提出一种基于多特征融合的 GIS 隔离开关接触状态评估方法。搭建 220 kV GIS 隔离开关多状态量综合检测实验平台, 实验研究了 GIS 隔离开关外壳温度信号、外壳振动信号及局部放电信号与隔离开关接触状态之间的关系。在此基础上, 将 GIS 隔离开关外壳温升、外壳振动信号振幅及局部放电特高频信号放电幅值作为隔离开关状态特征量, 建立基于支持向量机的隔离开关接触状态评估模型。对该状态评估模型进行测试, 结果表明基于多特征融合的 GIS 隔离开关接触状态评估方法准确率最高, 可达到 92.92%。

[关 键 词] GIS; 隔离开关; 状态评估; 多特征融合

[引用本文格式] 李先锋, 胡晨刚, 高振宇, 等. 基于多特征融合的 GIS 隔离开关接触状态评估方法[J]. 热力发电, 2023, 52(5): 22-28. LI Xianfeng, HU Chengang, GAO Zhenyu, et al. Evaluation method of contact state of GIS disconnector based on multi-feature fusion[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(5): 22-28.

Evaluation method of contact state of GIS disconnector based on multi-feature fusion

LI Xianfeng¹, HU Chengang¹, GAO Zhenyu¹, CHEN Zhonghua¹,
CHEN Feng², NI Chenchen², YAN Luyang²

(1. Hangzhou Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The existing GIS disconnector contact state evaluation method is based on the single state characteristic quantity, the reliability of the evaluation result is low, and it is easy to misjudge and erroneous judgment. So a method of GIS disconnector contact state evaluation based on multi-feature fusion was presented. The multi state quantity comprehensive detection experimental platform of 220 kV GIS disconnector was built. And the relationships between the GIS disconnector shell temperature signal, shell vibration signal, partial discharge signal and the contact state of the disconnector were experimentally studied. On this basis, the temperature rise of GIS disconnector shell, the amplitude of shell vibration signal and the discharge amplitude of partial discharge UHF signal were taken as the state characteristic quantities of disconnector, and the contact state evaluation model of disconnector based on support vector machine was established. The test results show that the accuracy of GIS disconnector contact state evaluation method based on multi-feature fusion is the highest, can reach 92.92%.

Key words: GIS; disconnector; state assessment; multi-feature fusion

气体绝缘开关 (gas insulated switchgear, GIS) 开断, 容易出现机械接触故障^[1-2]。如不能及时发现
中的隔离开关在电力运行及维护过程中需要频繁 并排除此类故障, 将会引起放电等事故^[3-5], 从而严

收稿日期: 2022-08-11 网络首发日期: 2023-03-01

基金项目: 浙江大有集团有限公司科技项目 (甲-2021-KJ-001)

Supported by: Science and Technology Project of Zhejiang Dayou Group Co., Ltd. (甲-2021-KJ-001)

第一作者简介: 李先锋 (1981), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电网设计、调度及运行, 13777414017@qq.com。

重影响电网的安全稳定。为此,研究高可靠性 GIS 隔离开关接触状态评估方法,及早发现并排除安全隐患,对保障电力系统稳定运行具有重要意义。

GIS 隔离开关接触故障的发展过程中常伴随异常发热、机械振动及局部放电。围绕上述典型故障特征,现有的 GIS 隔离开关的接触状态评估方法有温度检测法^[6-8]、振动检测法^[9-10]以及局部放电检测法^[11-13]。其中,温度检测法是通过检测 GIS 隔离开关外壳温度来评估其内部触头的接触状态。苏旭辉等搭建了 GIS 隔离开关温升实验平台,并分别研究了隔离开关在正常接触和接触不良状态下触头与外壳的温升特性^[14]。霍思佳则在隔离开关温升实验的基础上,研究了触头温度与外壳温度之间的函数关系^[15]。戴伟伟等提出了利用外壳温升来计算触头温升的函数解析方法,进而用于评估隔离开关的接触状态^[16]。温度检测法原理清晰、检测便捷,但是外壳温度易受自然环境等因素影响,导致其评估结果的可靠性较低。

振动检测法通过分析外壳振动信号来评估 GIS 隔离开关的接触状态。吴旭涛等建立了 GIS 设备振动仿真模型,研究 GIS 隔离开关操作时外壳振动信号的特性。研究表明,外壳部位比临近实心结构处的振动幅值更高^[17]。赵廷刚等搭建了 110 kV GIS 隔离开关振动实验平台,并开展了接触正常、中度接触不良和严重接触不良 3 种状态下的振动实验。结果表明:振动信号 100 Hz 频率分量的幅值与电流平方成正比;当接触状态越恶劣,100 Hz 频率分量的幅值则越大^[18]。马波等基于 220 kV GIS 隔离开关平台,实验研究了隔离开关触头松动时外壳的振动信号特性。结果表明,触头松动会导致外壳振动信号幅值增大^[19]。振动检测法具有抗干扰能力强、灵敏度高的优点。然而,振动检测的结果与实验设备的型号、检测仪器型号参数及振动检测部位有密切关系。此外,GIS 隔离开关结构多种多样,现场连接复杂,因此振动检测法难以形成明确统一的评估标准。

局部放电检测法是通过检测隔离开关内部的放电信号来评估其机械接触状态。郭超等在对 GIS 隔离开关带电检测时,发现其内部的悬浮放电缺陷,并指出该放电原因是隔离开关内部的接触不良所致^[20]。杨明昆指出 GIS 隔离开关的接触不良将导致出现悬浮电位缺陷,并仿真分析了存在悬浮电位

时隔离开关内部的电场分布,结果表明悬浮电位将加剧电场的不均匀分布,进而导致局部放电^[21-22]。局部放电检测法应用成熟,在检测方法、放电类型识别及放电定位等方面已积累了许多成果。然而,在隔离开关接触故障早期,其通常不会出现放电现象。因此该方法难以在早期及时发现隔离开关的接触不良问题。

现有的 GIS 隔离开关接触状态评估方法,常依据单一的状态特征量,易出现故障误判、漏判等问题,隔离开关状态评估结果的准确性和可靠性均有待提高。而综合 GIS 设备多种状态特征量的影响,进而开展状态评估是提升检测可靠性的一项有效手段。为此,本文提出一种基于多特征融合的 GIS 隔离开关接触状态评估方法。其中,状态评估是后验方法,隔离开关的接触状态与温度、振动、局部放电等特征之间存在直接的因果关系,利用状态特征可反推产生特征的原因,即隔离开关的接触状态。因此,首先搭建了 220 kV GIS 隔离开关多状态综合检测实验平台,分析不同隔离开关接触状态下温度、振动及局部放电等物理量的显著特征及变化规律。将温度、振动及局部放电等状态特征量作为状态评估模型的输入,将接触正常、异常和危险 3 种等级的接触状态作为模型的输出,建立基于支持向量机算法的隔离开关接触状态评估模型。算例验证了多特征融合的隔离开关接触状态评估方法的准确性和优越性。

1 GIS 隔离开关接触故障分析

1.1 GIS 隔离开关实验台

GIS 隔离开关接触故障常伴随异常发热、异常机械振动和局部放电。为了研究隔离开关接触状态与温度、振动及局部放电等物理特征之间的响应关系,搭建 GIS 隔离开关多状态量综合检测实验平台。该实验平台以 ZF11-252 型 GIS 隔离开关为研究对象,并配置热电偶温度测量仪、15100 压电式加速度传感器和 PDS-T90 型局部放电测试仪,可以实时检测隔离开关的温度、振动及局部放电等信号。ZF11-252 型 GIS 隔离开关的结构如图 1 所示,其参数见表 1。

隔离开关的主要结构包含动触头、静触头、操纵机构等。通过控制机械操纵机构可以使隔离开关处于不同的接触状态。在此设定 3 种典型的接触状态,分别为正常、异常和危险接触状态。

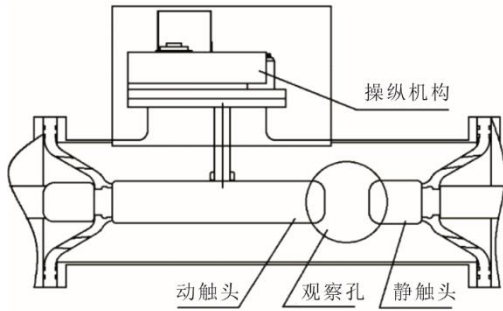


图 1 GIS 隔离开关结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the GIS disconnecter structure

表 1 GIS 隔离开关参数

Tab.1 The GIS disconnecting switch parameters

项目	数值
导杆内半径/mm	40
导杆外半径/mm	50
外壳内半径/mm	180
外壳外半径/mm	200
GIS 隔离开关气室长度/mm	1 260

GIS 隔离开关典型接触状态如图 2 所示。正常接触状态即隔离开关动静触头完全闭合，紧密接触；异常接触状态指动静触头处于半分半合的状态；危险接触状态则指动静触头处于临界接触状态。下一步，通过控制操纵机构依次设置隔离开关的 3 种典型接触状态，分析并研究其相应的温度、振动及局部放电特征信号。

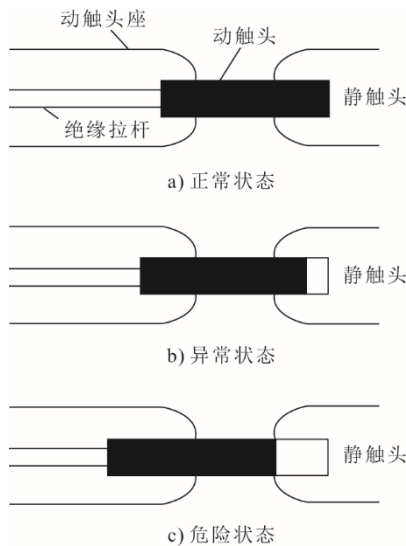


图 2 GIS 隔离开关接触状态示意

Fig.2 Schematic diagram of GIS disconnecter contact status

1.2 温度特征

利用 FCG-2000/5 数字式大电流发生器向 GIS 隔离开关中通入 1 000 A 的交流电流，取外壳外表

面的顶点作为温度观测点，利用热电偶温度测量仪每隔 20 min 记录外壳的温升。隔离开关在 3 种接触状态下的温升如图 3 所示。由图 3 可见：正常接触状态下，隔离开关外壳温度缓慢上升，100 min 内上升了 3.2 °C；异常接触状态下，任意时刻的外壳温升均高于正常状态的外壳温升，100 min 内隔离开关外壳温度上升了 3.5 °C；危险接触状态下，外壳温升上升速率明显高于正常和异常 2 种接触状态，最终温升达到了 5.9 °C。

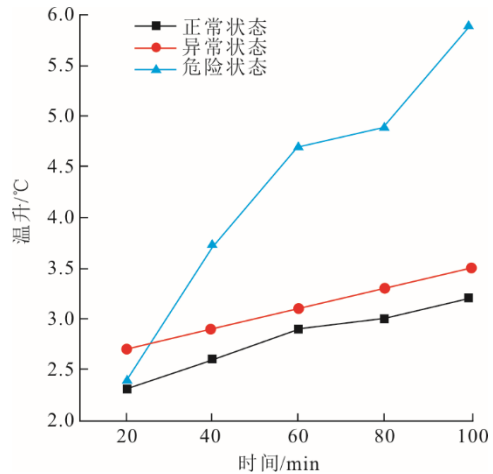


图 3 GIS 隔离开关外壳温升随接触状态变化

Fig.3 The temperature rise of the GIS disconnecter housing varies with the contact state

温升实验结果表明，随着隔离开关接触状态的恶化，隔离开关触头部位的接触电阻增大，进而导致外壳温升增高。隔离开关的接触状态恶劣程度越高，外壳的温升就越高。

1.3 振动特征

同样将 GIS 隔离开关设置为 3 种不同的接触状态，选择隔离开关外壳外表面的顶点作为振动测量点，并利用 15100 压电式加速度传感器对隔离开关外壳振动信号进行测量。振动信号测量系统如图 4 所示，传感器采集到的外壳振动信号经过信号预处理单元传送到上位机进行数据处理。

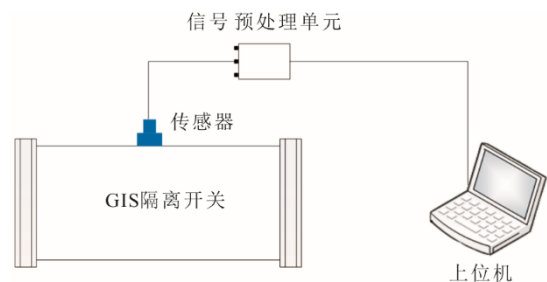


图 4 振动测量系统示意

Fig.4 Schematic diagram of the vibration measurement system

隔离开关在 3 种接触状态下的外壳振动测量信号如图 5 所示。正常、异常和危险接触状态下外壳振动加速度幅值分别为 0.016、0.022、0.041 m/s²。

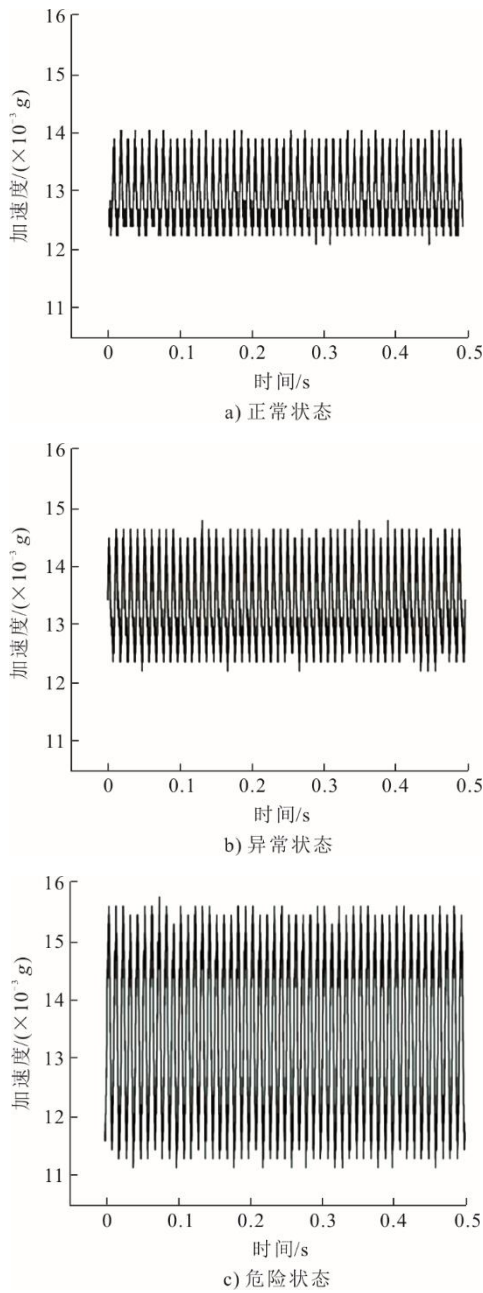


图 5 外壳振动随接触状态变化

Fig.5 The housing vibration varies with the contact state

振动实验结果表明，随着 GIS 隔离开关接触状态的恶化，隔离开关外壳振动信号幅值增大。通过检测 GIS 隔离开关外壳振动信号，可以间接评估其接触状态。

1.4 局部放电特征

利用 YDTW-100/200 型工频实验变压器向 GIS 隔离开关施加 160 kV 电压，并利用 PDS-T90 型局

部放电测试仪来检测局部放电引起的特高频信号。即将特高频信号传感器放置于 GIS 隔离开关的绝缘盆上，测量到的信号经特高频信号采集器通过无线通信的方式传送至 PDS-T90 主机中，并生成局部放电图谱。隔离开关在不同接触状态下的局部放电检测图谱如图 6 所示。

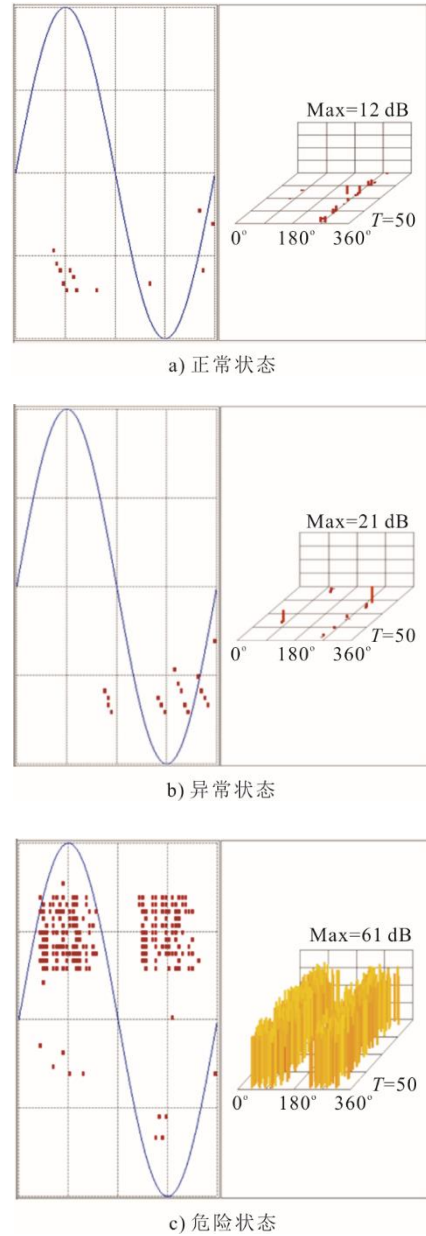


图 6 局部放电随接触状态变化

Fig.6 Local discharge varies with the contact state

局部放电实验结果表明：GIS 隔离开关在正常接触状态下，检测图谱中有零星脉冲信号，且信号幅值较低，即 GIS 隔离开关内部基本不发生局部放电；GIS 隔离开关在异常接触状态下，检测图谱中出现零星的放电脉冲信号，但信号的幅值也较低，

局部放电的特征并不明显；GIS 隔离开关在危险接触状态下，在电压信号的正负半周的峰值附近出现大量放电脉冲信号，脉冲信号幅值较大，最大值约为 60 dB 左右，并且放电信号脉冲具有正负半周对称出现的特征。即隔离开关的接触状态恶劣程度越高，隔离开关内部越容易出现局部放电，则利用特高频检测到的放电幅值就越高。

2 基于多特征融合隔离开关状态评估

将 GIS 隔离开关外壳的温升、外壳振动信号振幅及局部放电特高频信号放电幅值作为隔离开关的状态特征量，基于支持向量机算法，建立隔离开关多特征融合的接触状态评估模型，并通过测试验证评估模型的有效性。

2.1 支持向量机模型

在评估 GIS 隔离开关接触状态前，规定隔离开关的接触状态等级。在此，根据图 2 所示的 3 种典型接触状态，设定 GIS 隔离开关接触状态共有 3 个类别，即 y_i ($i=1, 2, 3$)。 y_1 、 y_2 、 y_3 分别表示接触状态正常、异常和危险。GIS 隔离开关的状态特征向量设为 x ，即 (x_1, x_2, x_3) 。 x_1 、 x_2 、 x_3 分别为温度特征量、振动特征量和局部放电特征量。

支持向量机是针对二分类问题提出的，而本文的隔离开关接触状态评估是个三分类问题。在此将三分类转化为多个二分类问题，即在每 2 个类别之间建立二分类支持向量机模型进行分类^[22-26]。

在二分类模型中，设要分的 2 个类别分别为 y_1 （分类标签用 1 来表示）和 y_2 （分类标签用 -1 来表示）。构造最优超平面 S ，将这 2 类样本分开，如图 7 所示。

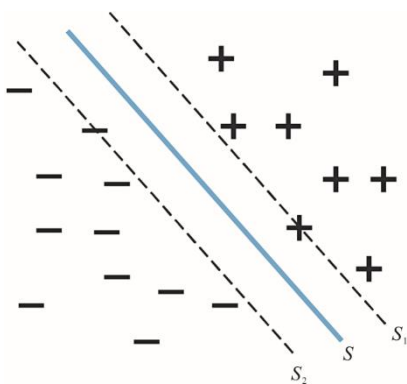


图 7 最优超平面示意

Fig.7 Schematic diagram of the optimal hyperplane

设最优分类的超平面 S 方程为：

$$\omega^T x + b = 0 \quad (1)$$

式中： ω 为法向量，决定了超平面的方向； b 为位移项，决定了超平面与源点的距离。 ω 和 b 均为待求解的参数。

在图 7 中，过距最优超平面最近的样本点作平行于最优超平面的平面 S_1 和 S_2 。设 S_1 和 S_2 的方程分别为：

$$\begin{cases} \omega^T x_i + b = 1 \\ \omega^T x_i + b = -1 \end{cases} \quad (2)$$

则对于 GIS 隔离开关的状态特征 x_i ，对应的接触状态 y_i 为：

$$y_i = \begin{cases} 1 & \omega^T x_i + b \geq 1 \\ -1 & \omega^T x_i + b < -1 \end{cases} \quad (3)$$

平面 S_1 和 S_2 的距离 d 为：

$$d = \frac{2}{\|\omega\|} \quad (4)$$

式中： $\|\omega\|$ 为法向量 ω 的 L_2 范数。

支持向量机模型的目标是找到具有“最大间隔距离”的超平面，故面向 GIS 隔离开关接触状态评估的支持向量机模型可表示为：

$$\begin{aligned} \max_{\omega, b} & \quad \frac{2}{\|\omega\|} \\ \text{s.t.} & \quad y_i (\omega^T x_i + b) \geq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

考虑到支持向量机在低维输入空间存在线性不可分的情况，在此选用高斯核函数将输入样本映射到高维空间。

2.2 模型测试

基于实验结果建立特征空间中的样本集。1 个 GIS 隔离开关样本实例中的特征信息包含温度、振动和局部放电特征值，共包含 480 组实验数据。随机取 240 组数据作为支持向量机模型的训练样本，其中设置隔离开关接触状态为正常、异常和危险下的样本各 80 组^[27-29]；其余 240 组数据为测试样本。

在此分别利用基于单特征的支持向量机模型和基于多状态量融合的支持向量机模型对 GIS 隔离开关的接触状态进行评估。评估的准确率见表 2。由表 2 可见：多状态量融合的支持向量机模型准确率最高，达到了 92.92%。对基于单特征的支持向量机模型来说，分类的准确率明显低于基于多状态量融合的支持向量机模型。这证明了综合考虑温度、振动和局部放电多个状态量，能提高隔离开关接触状态评估的准确性。

表2 不同模型的准确率
Tab.2 Accuracy of the different models

GIS 隔离开关状态评估模型	准确率/%
基于温度特征的支持向量机模型	74.17
基于振动特征的支持向量机模型	69.58
基于局部放电特征的支持向量机模型	68.75
基于温度、振动特征的支持向量机模型	77.08
基于振动、局放特征的支持向量机模型	88.75
基于温度、局放特征的支持向量机模型	88.33
基于多状态量融合的支持向量机模型	92.92

3 结 论

综合温度、振动和局部放电3个状态特征量,提出了基于多状态量融合的GIS隔离开关接触状态评估方法,并通过测试证明了该评估方法的有效性。本文主要工作和结论为:

1) 搭建了GIS隔离开关多状态量综合检测实验平台,研究了温度、振动及局部放电状态特征量与隔离开关接触状态之间的关系。

2) 围绕温度、振动及局部放电,基于支持向量机,建立了GIS隔离开关多状态量融合的接触状态评估模型。

3) 测试结果表明,基于多特征融合的GIS隔离开关接触状态评估方法的准确率达到92.92%,即证明了本文所提方法的可靠性与优越性。

4) 未来工作可尝试将智能算法和支持向量机算法相结合,进一步提高分类的精度。

致谢:衷心感谢西安交通大学李军浩教授在实验平台及实验数据方面提供的帮助。

[参 考 文 献]

[1] 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.

[2] 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 disconnecter based on mechanical vibration[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1591-1599.

[3] 杨景刚, 刘媛, 高山, 等. 高压断路器机械故障诊断技术[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2): 1-6.
YANG Jinggang, LIU Yuan, GAO Shan, et al. Review on mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breakers[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2): 1-6.

[4] HOSL F L. Contact parameter computation and analysis of air circuit breaker with permanent magnet actuator[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2013, 8(3): 595-602.

[5] 常广, 张振乾, 王毅. 高压断路器机械故障振动诊断综述[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 85-90.
CHANG Guang, ZHANG Zhenqian, WANG Yi. Review on mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breakers based on vibration diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 85-90.

[6] 李征宇, 高晋文, 高宝明, 等. 基于温度检测的气体绝缘开关接触状态场路结合分析法[J]. 热力发电, 2022, 51(2): 142-149.
LI Zhengyu, GAO Jinwen, GAO Baoming, et al. Field-circuit combination analysis method of contact state of GIS based on temperature measurement[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 142-149.

[7] 任思源, 贾兆鹏, 李亨涛, 等. 超声波多通道同步温度分布测量方法[J]. 热力发电, 2018, 47(1): 119-124.
REN Siyuan, JIA Zhaopeng, LI Hengtao, et al. Multichannel synchronous ultrasonic temperature distribution measurement method[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(1): 119-124.

[8] 李爽, 毕海涛, 鲁旭臣, 等. GIS局部过热故障红外成像技术诊断静态试验研究[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 76-82.
LI Shuang, BI Haitao, LU Xuchen, et al. Static test research on GIS partial overheating fault by infrared imaging technology[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 76-82.

[9] 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.
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.

[10] 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): 7248-7259.
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): 7248-7259.

[11] 谢江平. GIS设备局部放电故障分析研究[J]. 陕西水利, 2020(2): 194-196.
XIE Jiangping. Research on partial discharge fault analysis of GIS equipment[J]. Shaanxi Water Resource, 2020(2): 194-196.

[12] 陈靖国. GIS设备局部放电故障多维度诊断方法的实际应用[J]. 科技资讯, 2020, 18(4): 29-30.
CHEN Jingguo. Practical application of multi-dimensional diagnosis methods for partial discharge faults in GIS equipment[J]. Science & Technology Information, 2020, 18(4): 29-30.

[13] 丁然. GIS局部放电检测机理与精确定位研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017: 1.
DING Ran. The research of detection mechanism and precise location method for partial discharge in GIS[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2017: 1.

[14] 苏旭辉, 龙伟, 任成君, 等. GIS隔离开关不同接触

- 状态下的温升特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 121-128.
- SU Xuhui, LONG Wei, REN Chengjun, et al. Study on temperature rise characteristics of GIS disconnecter under different contact conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 121-128.
- [15] 霍思佳. GIS 设备隔离开关接触过热缺陷特征分析及检测技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 1.
- HUO Sijia. Research on characteristics and detection technology of contact overheating defects of GIS equipment isolation switch[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 1.
- [16] 戴伟伟, 高凯, 马利, 等. 基于多物理场耦合的 GIS 温升异常状态评估研究[J]. 机电工程, 2018, 35(6): 623-626.
- DAI Weiwei, GAO Kai, MA Li, et al. Condition assessment of abnormal temperature rise of GIS based on multi-physics coupling[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2018, 35(6): 623-626.
- [17] 吴旭涛, 马云龙, 李秀广, 等. GIS 开关操作外壳振动分布特性仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 80-87.
- WU Xutao, MA Yunlong, LI Xiuguang, et al. Simulation study on vibration distribution characteristics of GIS switch operation shell[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 80-87.
- [18] 赵廷刚, 刘浩, 苏旭辉, 等. 基于振动信号的 GIS 隔离开关触头接触缺陷试验研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(4): 158-161.
- ZHAO Tinggang, LIU Hao, SU Xuhui, et al. Experimental study on contact defect of GIS disconnect switch contacts based on vibration signal[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(4): 158-161.
- [19] 马波, 吴旭涛, 李秀广, 等. 基于振动信号的 GIS 隔离开关接触状态带电检测技术研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 73-77.
- MA Bo, WU Xutao, LI Xiuguang, et al. Contact status live detection of GIS disconnecter based on vibration signal[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 73-77.
- [20] 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 disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 168-174.
- [21] 杨明昆. 基于 ANSYS 模型分析 GIS 隔离开关内部电场变化[J]. 云南电力技术, 2016, 44(3): 114-116.
- YANG Mingkun. Analysis of internal electric field variation of GIS isolation switch based on ANSYS model[J]. Yunnan Electric Power Technology, 2016, 44(3): 114-116.
- [22] 臧旭, 马宏忠, 吴金利, 等. 基于振动原理的 GIS 母线导电杆松动故障分析与诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 12-20.
- ZANG Xu, MA Hongzhong, WU Jinli, et al. Analysis and diagnosis of a GIS bus conductor loosening based on mechanical vibration[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 12-20.
- [23] 杨珮鑫, 张沛超. 基于多分类支持向量机的分布式发电系统并网保护[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 110-116.
- YANG Peixin, ZHANG Peichao. Grid-connected protection of distributed power generation system based on multi-class support vector machine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 110-116.
- [24] 袁培, 王舶仲, 毛文奇, 等. 基于多重生成功对抗网络的智能开关设备状态感知与诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 67-75.
- YUAN Pei, WANG Bozhong, MAO Wenqi, et al. Research on state perception and diagnosis of intelligent switches based on triple generative adversarial networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 67-75.
- [25] 刘超, 乔圣扬. 基于主成分分析与多分类支持向量机的单沟泥石流危险性预测[J]. 河北地质大学学报, 2021, 44(4): 83-89.
- LIU Chao, QIAO Shengyang. Hazard prediction of single gully debris flow based on principal component analysis and multi-classification support vector machine[J]. Journal of Hebei GEO University, 2021, 44(4): 83-89.
- [26] 朱艳伟, 石新春, 李鹏. 多分辨率奇异谱熵和支持向量机在孤岛与扰动识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 64-70.
- ZHU Yanwei, SHI Xinchun, LI Peng. Classification of islanding and grid disturbance based on multiresolution singular spectrum entropy[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 64-70.
- [27] 李文君, 段登伟, 朱雨, 等. 基于 5G 通信模式下的配电网自愈保护应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 152-159.
- LI Wenjun, DUAN Dengwei, ZHU Yu, et al. Application of distribution network protection based on a 5G end-to-end communication mode[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 152-159.
- [28] 庞明月, 王文标, 汪思源. 基于粒子群优化支持向量机的建筑室内温度预测模型[J]. 科技与创新, 2017(18): 14-15.
- PANG Mingyue, WANG Wenbiao, WANG Siyuan. Prediction model of building indoor temperature based on particle swarm optimization support vector machine [J]. Science and Technology & Innovation, 2017(18): 14-15.
- [29] 吴行健, 石晶, 陈红坤, 等. 基于短路电流小半波特征的短路故障快速检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 86-94.
- WU Xingjian, SHI Jing, CHEN Hongkun, et al. Fast short-circuit fault detection method based on a small half-wave feature[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 86-94.

(责任编辑 杜亚勤)