

基于振动特征的GIS触头电接触状态 诊断方法研究

何龙,马金财,朱咏明

(国网新疆电力有限公司 昌吉供电公司,新疆 昌吉 831100)

摘要: 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)的触头电接触故障会影响其电气性能。针对电接触故障难以诊断的问题,首先建立了GIS触头振动多物理场耦合模型,然后使用交直流试验装置搭建GIS强电流检测实验平台,模拟不同运行工况并采集振动信号,通过对信号的分析证明了实验方法的可行性,并提出小波包能量熵诊断方法,与时域、频域分析法对比,证明了其良好的抗干扰性。最后在变电站现场开展在线实验,分析得到设备处于正常运行与异常状态的信号频域幅值分别在100 Hz和800 Hz处,且在时域信号加速度上也有很大差异;分析小波包能量熵,得到设备正常运行时在第1、第8频带分别为0.601和0.023,而在异常状态时第1、第8频带小波能量熵分别为0.041和0.142,熵值在第1频带显著减小,第8频带显著增加。结论表明,该方法可有效诊断出GIS触头电接触状态。

关键词: 电接触;气体绝缘全封闭组合电器;多物理场耦合;振动信号;小波包;故障诊断

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd25848

Research on Diagnosis Method for Electrical Contact State of GIS Contact Based on Vibration Characteristic

HE Long, MA Jincai, ZHU Yongming

(Changji Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd.,
Changji 831100, Xinjiang, China)

Abstract: The contact electrical contact fault of gas insulated switchgear (GIS) will affect its electrical performance. A multi-physics coupling model of GIS contact vibration was first established to address the difficulty in diagnosing contact faults. An experimental platform for high-current detection of GIS was built using AC/DC test equipment, simulating different operating conditions and collecting vibration signals to demonstrate the feasibility of vibration detection and experimentation. The wavelet packet energy entropy diagnostic method was proposed and compared with time-domain and frequency-domain analysis methods, demonstrating its good anti-interference properties. Finally, online experiments were conducted at the substation site, analyzing signals indicating that under the same current, the equipment exhibited signal frequency domain amplitudes of 100 Hz and 800 Hz respectively for normal and abnormal states, with significant differences in time-domain signal acceleration as well. Analyzing wavelet packet energy entropy, it was found that during normal operation, the energy entropy in the first and eighth frequency bands was 0.601 and 0.023 respectively, while during abnormal operation, the entropy in the first and eighth frequency bands was 0.041 and 0.142 respectively, with a significant decrease in entropy in the first frequency band and a significant increase in the eighth frequency band. The conclusion indicates that this method can effectively diagnose the contact status of GIS contacts.

Key words: electrical contact; gas insulated switchgear (GIS); multi-physical field coupling; vibration signal; wavelet packet; diagnose faults

对GIS触头的电接触故障监测研究是现代电力设备运行状态检修的一个重要课题,已经有

学者开展了相关的研究^[1-3]。在以往研究中,通常使用回路电阻测量法和红外检测法对GIS触

基金项目: 国网新疆电力有限公司科技项目(5230CJ230002)

作者简介: 何龙(1988—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为高压电与绝缘,Email:3044855732@qq.com

头运行状态进行判定^[4-5],但是这两种方法会受到温度、湿度等外部环境的影响,这些都会使测量结果产生偏差。针对上述问题,国内外学者逐步开展了基于振动信号的GIS运行状态识别研究,并采用多种方法提取信号特征,对GIS的运动状态进行诊断^[6-7]。文献[8]利用大电流发生器搭建实验平台,对不同运行条件下采集到的振动频谱进行研究,通过提取信号特征对不同类型故障做出判断。文献[9]搭建GIS三维简化仿真模型,通过模拟GIS故障得到GIS壳体的振动加速度信息,依据模态分析结果得出故障发生的判据,为GIS振动检测实验提供了一种思路和研究导向。文献[10]对不同电流负载下的开关接触状态进行模拟,然后提取其振动与热信号两个特征量,利用两个特征量的相对系数对开关状态进行诊断。

综上所述,虽然在振动监测上已经取得了一些进展,但在GIS设备不同工况的真型样机模拟、电网强电流实验平台搭建、实验数据图谱的构建、振动特征的提取以及电网运行设备的故障诊断等方面仍需进一步研究。因此本文建立GIS触头振动多物理场耦合模型仿真,得到不同运行工况下的振动加速度,并研发真型实验样机,测量壳体上的振动情况,对实验平台搭建的合理性进行了较好验证。然后提出小波包能量熵诊断方法,通过与以往方法对比,验证了该方法所具有的良好抗干扰性。最后在某变电站现场实测GIS断路器壳体振动信号,测量正常运行和有异响运行状态下的振动时域与频域信号,对比分析状态改变后振动信号变化特征,提取小波能量熵频带变化情况定量诊断GIS的状态,验证文中所提方法的有效性及其可行性。

1 模型搭建及结果分析

基于电-磁-力-振动耦合关系,建立GIS触头接触孪生模型,对其振动特性进行模拟计算。模型的搭建过程中侧重模型的简化,使其方便对主动静触头的接触比、主动静触头之间的导电桥高度等仿真关键点做出合理且快速调节的同时,提高计算速度。基于文献[11]将主动静触头之间的导电桥高度设定为0.5 mm,这些参数对于GIS断路器的性能和维护具有较大的影响,因此需要在建模过程中予以考虑。为了模拟触头的接触劣化情况,设置主动静触头的接触比分别为0.6

与0.3。

根据实际运行工况调节强电流发生器输出电流,在工频电流的作用下会在GIS中产生电磁场,作用在接触面上的电磁力会产生振动信号,此时触头接触导体为主振动源,由此传递到GIS的其他部件上。GIS触头中电流可表示为

$$i_t = \frac{U}{Z} \cos(\omega t) = \int_s J_s dS_i \quad (1)$$

式中: i_t , U , ω 分别为电流、电压、角频率; Z , J_s 分别为GIS触头的等效阻抗和负载电流的密度; S 为触头接触导体的截面积。

电磁场包含触头导体和连接件的气隙两个场域,触头接触导体为铁磁材料,磁导率 μ 与磁场的饱和度呈非线性关系,所以GIS中电磁场满足如下的麦克斯韦方程:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_s + (-\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}) \quad (2)$$

$$\nabla \times (\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}) = 0 \quad (3)$$

根据矢量恒等式:

$$\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \mathbf{A} = \nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A} - \nabla \times \frac{1}{\mu} \times \mathbf{A} \quad (4)$$

式(2)改写为

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \mathbf{A} = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (5)$$

展开式(4)、式(5),得:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \mathbf{A} = & \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) \right] \mathbf{i} + \\ & \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial z} \right) \right] \mathbf{j} + \\ & \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial z} \right) \right] \mathbf{k} \end{aligned} \quad (6)$$

通过上述公式对矢量磁位求解,可计算出磁感应强度。建立GIS触头电磁场数学模型,是为计算GIS触头的受力。结合上面的数学模型,在结构力场中构建微分方程对GIS振动进行计算分析,微分方程计算如下:

$$\mathbf{M}_i \frac{d^2 z}{dt^2} + \mathbf{C}_i \frac{dz}{dt} + \mathbf{k}_i z = f(t) \quad (7)$$

式中: \mathbf{M}_i , \mathbf{C}_i , \mathbf{k}_i 分别为质量、阻尼和刚度系数矩阵; z , $f(t)$ 分别为形变位移和GIS触头所受激励力; $d^2 z/dt^2$, dz/dt 分别为形变加速度以及形变速度。

在得到振动的数学模型后,开始搭建物理模型并进行有限元分析。考虑到GIS的机械性能,

将触头设置成固定接触,动、静触头采用插接式,模型如图1所示。在建模过程中,对触头材料的赋值、约束、载荷等进行预处理,各部分所用材料如表1所示。在该模型中,导体部件的材质为铜,壳体部件的材质为钢,末端绝缘子的材质为绝缘树脂。网格剖分如图2所示,在构建网格时,选择合适的网格剖分精细度,对不同的域参考其重要性做不同程度细化,而且对模型进行剖分时需要考虑不同域之间的网格数量、质量和疏密度等方面,在保证计算精度的前提下,又考虑了网格的收敛性,加快了仿真的速度。具体方法表现为:根据断路器接触系统中各导体的特性,对不同的域进行划分和剖分。为了确保整个接合过程的准确性,对触头接合部位进行了极细化网格剖分处理。

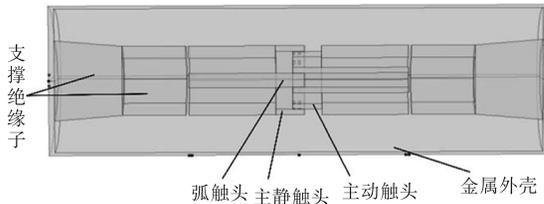


图1 GIS触头主回路有限元模型

Fig.1 Finite element model of the main circuit of GIS contacts

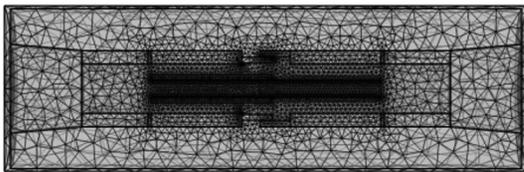


图2 网格剖分结果图

Fig.2 Meshing results plot

表1 材料属性参数表

Tab.1 Material property parameter table

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量/ Pa	泊松比	屈服强度/ MPa
铜(导体)	8 940	110e9	0.35	235
钢(外壳)	7 850	205e9	0.28	180
环氧树脂(绝缘子)	2 003	10.1e9	0.38	65

模拟 2 000 A, 2 500 A, 3 000 A 三种工况进行仿真,计算触头通入不同电流时产生的振动加速度。选择 0.04 s 作为模型仿真的节点时间,即每隔 0.04 s 进行一次仿真计算。这样的设置可以在一定程度上平衡仿真的准确性和计算效率,并且提供足够的时间分辨率来捕捉 GIS 触头的动态变化,仿真得到如图 3 所示不同工况下的 GIS 触头振动加速度。

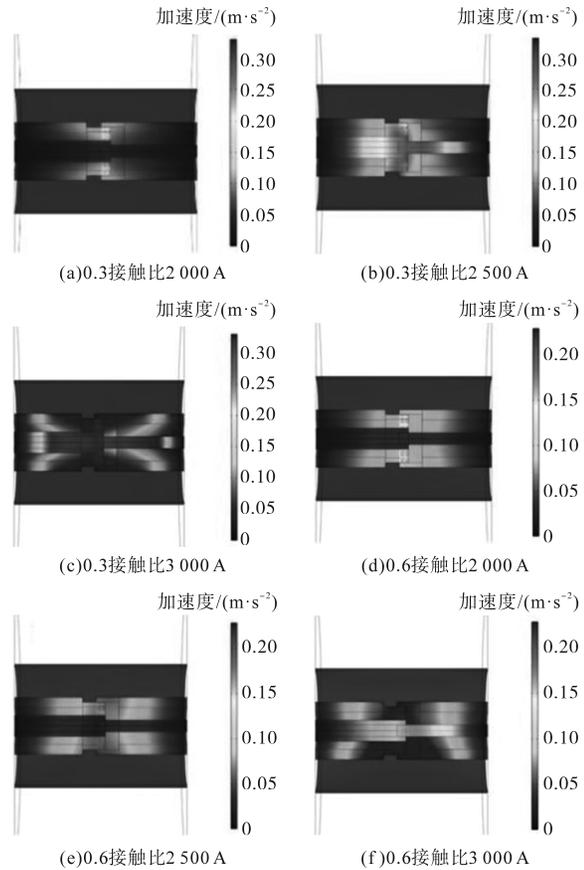


图3 GIS触头仿真

Fig.3 GIS contact simulation

把图3的数据汇总,绘制成如表2所示的表格。仿真结果表明,触头的振动加速度集中在接触点附近;在同一接触比下随着电流的增大,振动加速度也变大;触头接触面积少产生的振动加速度幅值会比接触面积多的时候要大,且在接触比为 0.3 时,加速度的增长幅度为 115%,而在接触比为 0.6 时的加速度增长幅度为 100%,接触比越小触头振动加速度随着电流增加而增大的速率越快。

表2 不同运行状态下触头振动加速度

Tab.2 Contact vibration acceleration under different operating conditions

运行电流/A	加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	
	接触比0.3	接触比0.6
2 000	0.13	0.1
2 500	0.22	0.13
3 000	0.28	0.2

2 GIS样机研制与实验平台搭建

2.1 实验平台搭建

由于在 2 000 A, 2 500 A, 3 000 A 三种运行工况下仿真计算,并得到了不同工况下 GIS 振动加

速度幅值,因此在实验室环境下,搭建GIS样机实验平台,用以验证仿真所得壳体振动数据的可靠性。采用SDDL-6000Q型号的交直流实验装置用作强电流发生器,该设备所输出的电流为0~6 000 A,满足搭建实验平台所需要的强电流大小。GIS真型样机实验所用设备如图4所示。在进行实验之前先通过加速度传感器测量壳体振动响应的效果,用来调节振动传感器的灵敏度以采集到明显的振动信号。满足实验条件之后,将三种运行工况下的电流通入到GIS样机中,实验流程如图5所示。首先,构建GIS真型实验样机,用电缆线与SDDL-6000Q型设备相连,给GIS实验样机供电,调整SDDL-6000Q型设备的输出电流,获得所需的负载电流。通过图3的振动仿真结果得知振动加速度主要集中在触头处,所以把振动传感器安装在距离触头最近的GIS样机壳体表面上,即在GIS样机中部壳体上,如图4所示,通过振动信息探测设备对信号进行采集,然后将其传送到计算机上做信号处理。

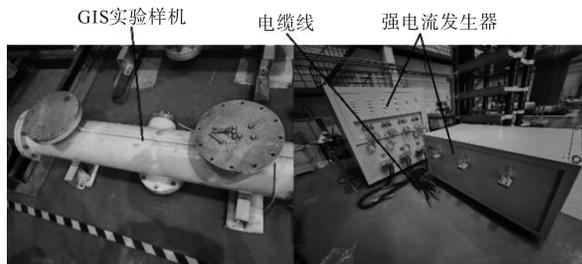


图4 GIS实验设备

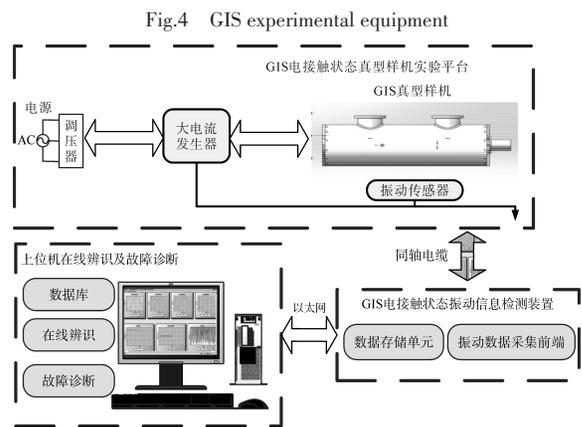


图5 GIS实验测试平台流程

Fig.5 GIS experimental test platform process

2.2 实验结果分析

参考仿真计算中所添加的电流载荷,实验时调节电流参数,模拟2 000 A,2 500 A,3 000 A三种工况,并对振动信号进行采集。

如图6所示,得到三种工况下GIS触头振动

的时域曲线。当强电流发生器发出的电流从2 000 A增加到3 000 A,在GIS壳体上检测到的加速度幅值从0.033 m/s²逐步增加到0.119 m/s²。对比发现三种工况下得到的振动加速度变化规律和理论分析结果相一致,结果表明实验样机产生的振动信号可以传递到壳体上,研发的GIS样机实验平台可以模拟出GIS电接触状态导致的振动响应,而且振动信号满足理论机理和仿真分析得到的振动特性及分布规律。在GIS腔体表面的测试分析表明,GIS触头位置产生的振动信号传递至外壳后,通过在外壳表面安装传感器可以检测到信号的振型特征,证明实验平台与样机的可靠性,以及这种检测手段应用到GIS状态诊断的可行性。

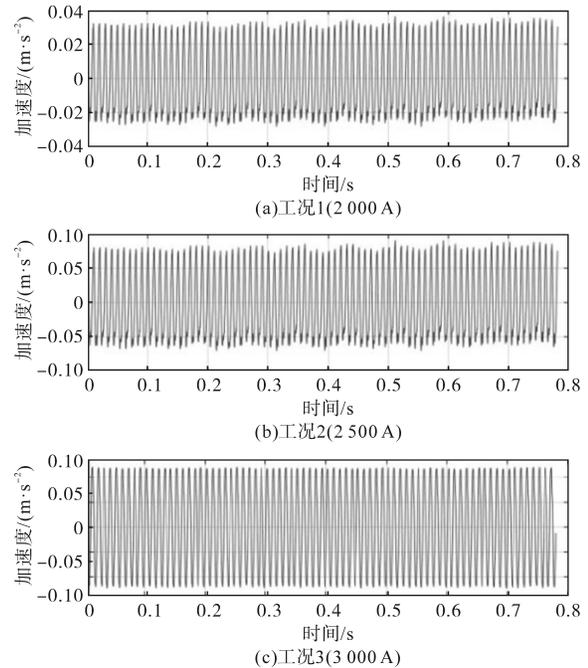


图6 三种工况下的时域图

Fig.6 Time domain diagram for the three operating conditions

3 GIS诊断方法与有效性研究

目前比较常见的GIS振动信号诊断方法为时域、频域分析法,对于GIS振动信号的特性,时域特征常使用峰值因子;频域分析方法一般使用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)。为了探究诊断方法的有效性,利用所得的实验数据,对不同的方法结果进行对比分析,提出抗干扰性和有效性最优的诊断方法。

3.1 传统时频特征诊断方法与结果分析

时域特征中峰值因子的计算为

$$C = \frac{X_{\text{peak}}}{X_{\text{RMS}}} \quad (8)$$

其中

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t)]^2 dt} \quad (9)$$

式中: C 为峰值因子; X_{peak} 为峰值,是信号在考虑的时间内的最大绝对值; X_{RMS} 为有效值,是信号功率的一种度量; $x(t)$ 为振动信号; T 为整个周期时间长度。

在GIS真型实验样机建立触头接触良好条件下的状况,调节强电流发生器输出值,采集2 000 A, 2 500 A, 3 000 A三种工况产生的振动信号,通过式(8)计算出每种工况下的峰值因子,将三种工况的峰值因子绘制成图7。

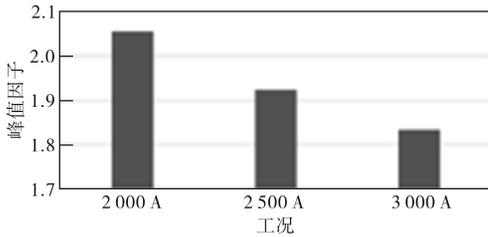


图7 峰值因子对比图

Fig.7 Comparison chart of peak factors

由图7可知,相同接触条件下,2 000 A时峰值因子为2.055 4;2 500 A时的峰值因子为1.924 6;3 000 A时的峰值因子为1.834 4。对比图7中的三组数据发现,随着电流的增加,峰值因子数值逐步下降。进行频域分析采用的FFT分析方法为

$$STFT(c, \omega) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} z(m+c)r(m)e^{-j\omega m} \quad (10)$$

其中, $r(m)$ 是分析窗,窗函数的作用是对信号进行局部截取,它是一个长度为 L 的有限长序列。当 $0 \leq m \leq L-1$, $r(m) \neq 0$,在 $[0, L-1]$ 以外, $r(m) = 0$ 。

在频率 $\omega = 2f\pi/N$ (N 通常表示FFT的点数,即进行快速傅里叶变换时所采用的离散数据的长度)位置处进行 $STFT(c, \omega)$ 分解变换,且 $N \geq L$,则式(10)可以变换为

$$STFT(c, 2\pi f/N) = \sum_{m=0}^{L-1} z(m+c)r(m)e^{-jm2\pi f/N} \quad (11)$$

如果对时间 c 采样,式(11)可变换为

$$STFT(rR, 2\pi f/N) = \sum_{m=0}^{L-1} z(m+rR)r(m)e^{-j2\pi f/N} \quad (12)$$

其中

$$-\infty < r < +\infty$$

$$0 \leq f \leq N-1$$

式中: R 为帧移,也称为帧间位移,即两个相邻分析帧之间的时间间隔(以采样点为单位)。

对三种工况产生的振动信号进行FFT分解得到如图8所示的频域波形图。

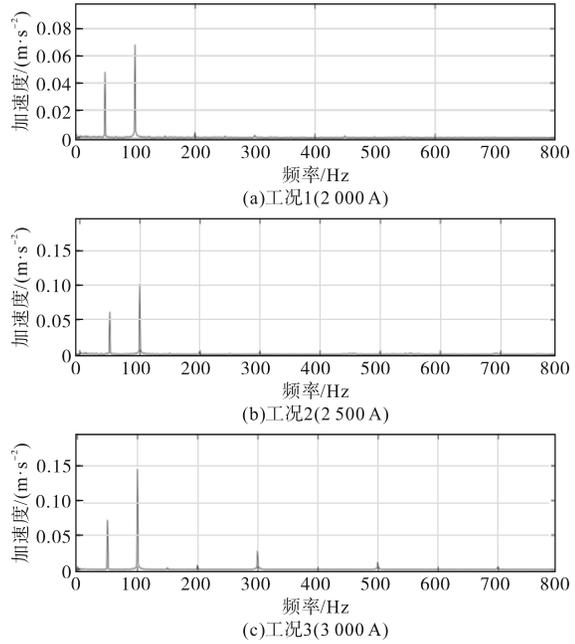


图8 不同工况下的频域图

Fig.8 Frequency-domain diagrams for different operating conditions

以图6三种工况下的时域图中所展现出的振动加速度幅值作为特征绘制成时域幅值对比图如图9所示。以图8三种工况下的频域图中所展现出的基频振动加速度幅值作为特征绘制成幅值对比图如图10所示,分析基频100 Hz的加速度变化趋势。

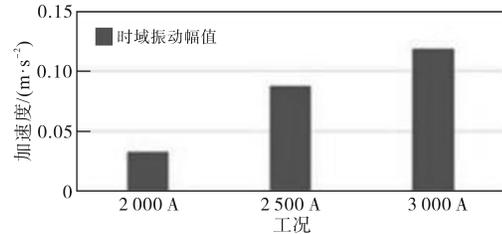


图9 时域幅值对比图

Fig.9 Time-domain amplitude comparison diagram

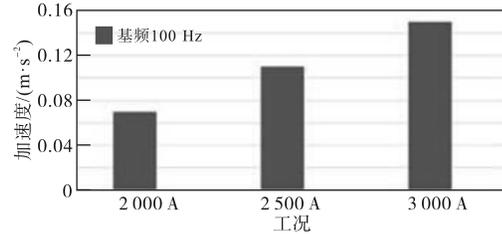


图10 基频100 Hz幅值对比图

Fig.10 Amplitude comparison diagram of fundamental frequency 100 Hz

在相同电接触状态下,随着强电流平台输出电流从2 000 A增加到3 000 A,时域振动加速度从0.033 m/s²增加到0.119 m/s²,变化率超过260%;振动频域在基频100 Hz时,三种工况加速度从0.07 m/s²增加到0.15 m/s²,变化率超过114%。

综上所述,通过峰值因子和时域幅值以及基频100 Hz幅值变化表明,时域、频域分析诊断结果受电流变化影响较大,无法直接进行GIS电接触故障诊断。

3.2 小波包能量熵诊断方法与结果分析

由3.1节可知,传统的时域、频域分析法容易受到电流工况的影响,因此,本文结合小波包能量熵理论,提出基于振动特征的GIS触头电接触状态诊断方法。小波包能量熵是一种基于小波变换的信号分析方法,可以细致地分析信号在不同频带中的特征。小波包能量熵通过迭代应用高通和低通滤波器以及下采样来实现,母小波 $\psi(t)$ 和相应的尺度函数 $\phi(t)$ 用于生成滤波器系数。

使用母小波和尺度函数生成相应的高通 $g[n]$ 和低通 $h[n]$ 滤波器系数。这些系数通过母小波的尺度方程和波动方程获得:

$$g[n] = (-1)^n h[-n+1] \quad (13)$$

对于 n 为偶数时的 $h[n]$:

$$h[n] = \int \phi(t)\phi(t-2n)dt \quad (14)$$

在每一级分解中,信号通过低通滤波器 $h[n]$ 和高通滤波器 $g[n]$ 过滤,然后抽取第二个样本:

$$\begin{cases} a_{j+1}[k] = \sum_n h[n-2k]a_j[n] \\ d_{j+1}[k] = \sum_n g[n-2k]a_j[n] \end{cases} \quad (15)$$

式中: $a_j[n]$ 为第 j 层的逼近(低频部分); $d_{j+1}[k]$ 为第 $j+1$ 层的细节(高频部分)。

计算每个子带的能量,对于每个分解得到的子带信号 $d_{j,k}(t)$,其中 j 是分解级数, k 是该级中的子带索引(从0到 2^j-1),计算每个子带的能量 $E_{j,k}$,在离散情形下,可以通过求和来近似:

$$E_{j,k} = \sum_n |d_{j,k}[s]|^2 \quad (16)$$

式中: s 为子带 $d_{j,k}$ 中的所有样本点。

所有子带能量的总和即为信号的总能量 E_{total} :

$$E_{\text{total}} = \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} E_{j,k} \quad (17)$$

计算每个子带能量占总能量的比例 $p_{j,k}$:

$$p_{j,k} = \frac{E_{j,k}}{E_{\text{total}}} \quad (18)$$

最后,计算每层小波包能量熵 H_i ,它是各子带能量比例的熵:

$$H_i = -p_{j,k} \log_2(p_{j,k}) \quad (19)$$

在小波函数选择中一般选取支撑长度为5~9之间、有支撑性、紧支性以及信号波形相似的小波。经过筛选与对比,文中选取了常见的db N 小波函数,其支撑长度为 $2N-1$,选取 $N=4$,即小波基db4,满足支撑长度。对于小波包分解层数的选取目前没有通用的选择方法,本文根据文献[12]给出的方法,首先对振动信号的频域进行分析后,通过理论仿真与实测数据分析,振动基频主要集中在100 Hz,高频信号为基频的整数倍,因此进行小波包分解时频带分辨率应在100 Hz左右:

$$f = F_s / 2^{(y+1)} \quad (20)$$

式中: f 为频带分辨率; F_s 为采样频率; y 为估算分解层数。

由于采样频率为2 560 Hz,因此根据式(20)估算小波包分解层数为3或4层,选择同一工况良好接触状态下的振动信号进行小波包能量熵分解,得到如图11所示的两个分解层数的能量熵图。由于振动频率变化规律为100 Hz及其倍频的变化,能量占比应该关注100 Hz及其倍频的能量变化,所以与4层相比,采用3层分解后,其能量分布的表征会更加明显,更有效地映射出状态变化。

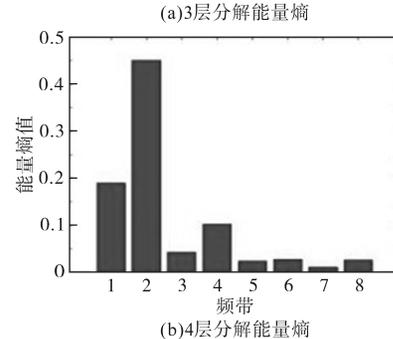
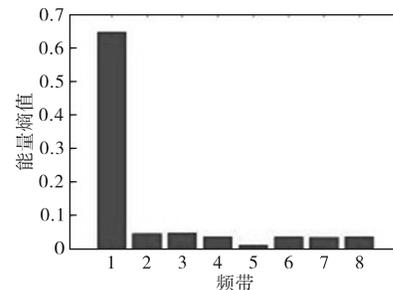


图11 不同分解层小波包能量熵柱状图

Fig.11 Histogram of different decomposition layer wavelet packet energy entropy

在GIS真型实验样机建立GIS触头接触良好条件下的状况,调节强电流发生器输出值,设置2 000 A,2 500 A,3 000 A三种工况,得到不同工况下产生的振动信号,并进行小波包能量熵分析,图12展示了获得的小波包能量熵的柱形图。

由图12可知,三种工况下的小波包能量熵在第1频带的数值为0.6左右,第6频带数值为0.02左右,第8频带数值为0.02左右,多数频带的上下浮动差值都在0.01左右。每一频带的小波包能量熵变化小,证明小波包能量熵分解方法具有良好的抗干扰性,能够有效诊断GIS触头的电接触状态。因此在现场数据分析中,选用本文提出的小波包能量熵诊断方法。

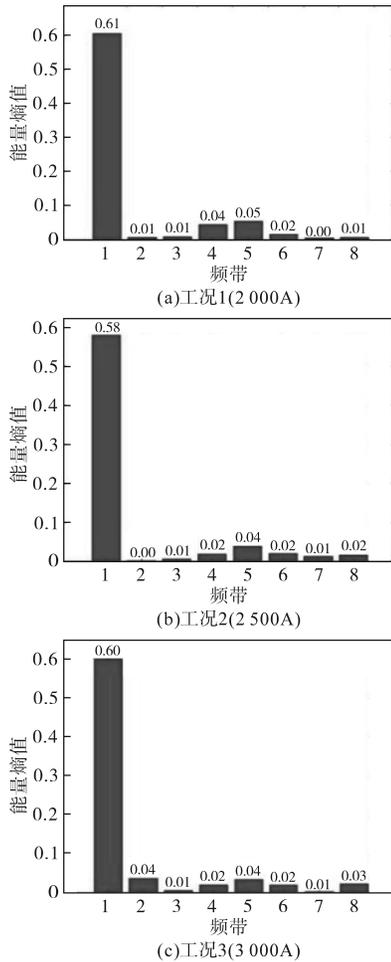


图12 小波包能量熵柱状图

Fig.12 Histogram of wavelet packet energy entropy

4 GIS变电站现场数据分析

4.1 不同运行状态下GIS振动在线监测实验

为验证研究的成果是否可用于实际工程装备的在线监测,对某站GIS开关的振动特性和故障诊断进行验证。实验选取某站某线的220 kV

正常运行的A相开关与处于异常状态的C相开关做对比,如图13所示,此时A,C两相电流相同,均处在367 A负载电流下。

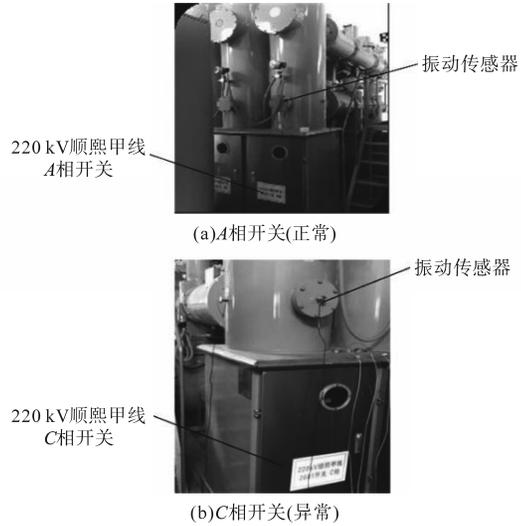


图13 某站A相开关和C相开关

Fig.13 A phase switch and C phase switch at a station

检测时振动传感器粘贴在开关壳体上,采集到如图14所示正常运行的A相开关和处于异常状态的C相开关振动时域波形图。A相开关振动信号时域振动加速度幅值在0.02 m/s²处,而C相开关的幅值在0.2 m/s²处,对比发现正常A相与异常C相有着明显的差异,异常相的幅值是正常相的10倍,可以判断C相开关有发生故障的可能,

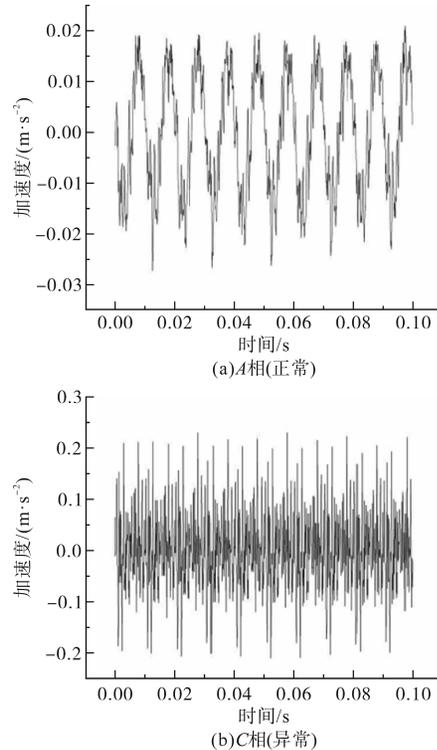


图14 某站开关振动时域图

Fig.14 Time-domain diagram of switch vibration at a station

在GIS真型样机实验时得到触头不同工况下振动信号的时域图像也有着差异,但其在小波包能量熵分解时并没有明显差异,因此无法准确判断GIS是否存在电接触故障,所以用小波包能量熵法对GIS电接触状态进行诊断。

4.2 不同状态下GIS振动状态诊断

为了得到该诊断方法在工程实践中的效果,测试现场数据采集的时域信号,再用FFT将其转换为频域上的频谱图,从而帮助我们了解信号的频率特性。某站开关频域图如图15所示。

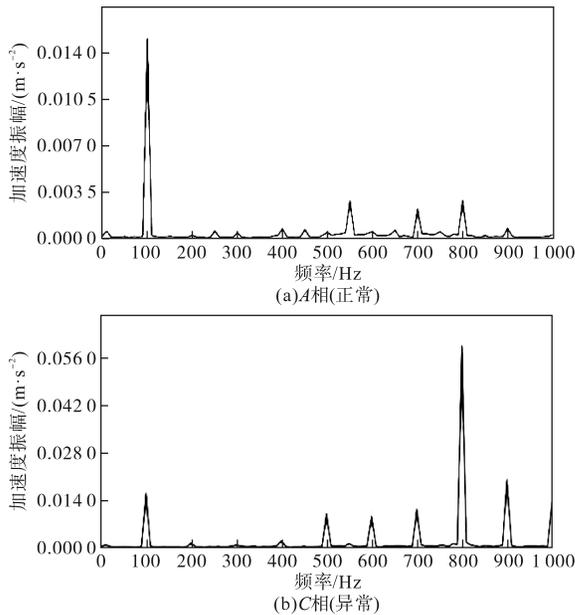


图15 某站开关频域图

Fig.15 Frequency-domain diagram of a switch of a certain station

由图15看出,当设备正常运行时,检测到振动信号的频域振幅最大值在100 Hz处,幅值为0.016 m/s²,其余高频分量如700 Hz,800 Hz的幅值为0.002 m/s²左右;设备异常时,频域振幅最大值在800 Hz,幅值为0.056 m/s²,其高频分量900 Hz的幅值为0.021 m/s²,500 Hz,600 Hz,700 Hz的幅值为0.01 m/s²左右,而在基频100 Hz的幅值仅为0.014 m/s²。对比发现,异常状态的C相开关产生幅值很大的高频分量,而基频幅值大幅降低,与正常A相开关有明显区别。具体的开关振动频域数据如表3所示。

然后采用小波包能量熵方法,对各频率段进

表3 某变电站开关振动频域数据

Tab.3 Frequency-domain data of switch in a substation

220 kV 某站开关	振动幅值/(m·s ⁻²)					
	100 Hz	500 Hz	600 Hz	700 Hz	800 Hz	900 Hz
A相(正常)	0.01	0.001	0.003	0.002	0.002	0.001
C相(异常)	0.014	0.010	0.010	0.010	0.056	0.021

行分层,使各频率段的能量更加集中,可以更明显地观察到各频率段的能量分布,用以对开关状态进行诊断。振动信号经小波包分析所得到的能量熵柱状图如图16所示。

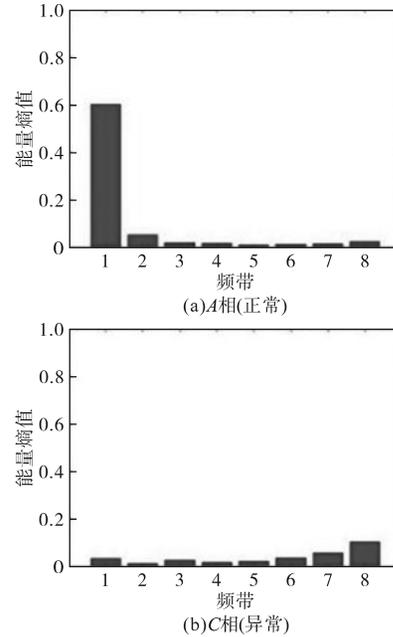


图16 某站开关振动小波能量熵柱状图

Fig.16 Histogram of wavelet energy entropy of vibration at a station

对比图16得到,当GIS设备处在不同运行状态下,其能量熵特征值有着明显的差异。图16a为处于正常运行的A相开关,第1段频带的数值最高为0.601,第8段频带数值为0.023;图16b为处于异常状态的C相开关,第1段频带的数值最小为0.041,第8段频带数值为0.142。分析表明,设备正常运行时,第1频带数值较大,第8频带数值较小;设备异常时,第1频带数值较小,第8频带数值较大。因此可以用第1、第8段频带的数值变化规律,判定GIS触头电接触状态。

5 结论

文章针对GIS触头电接触状态的故障诊断,对触头有限元模型、实验样机的搭建与分析和小波包能量熵方法的选择以及GIS现场数据分析开展了系统性研究,研究结果为:

1)建立GIS触头振动多物理场耦合模型,搭建GIS检测实验平台,验证了振动检测与实验的可行性。

2)提出小波包能量熵方法,并提取不同工况下的能量熵值,与传统方法进行诊断结果对比,证明本文提出方法具有更好的抗干扰性。

3)采集现场数据,基于小波包能量熵对信号

各频率段进行分层,得到了8个频带的能量熵值,分析发现尤其是第1频带与第8频带的能量熵值变化较大,可以用频带的能量熵变化规律有效表征GIS电接触状态,因此可以利用小波包能量熵法对GIS电接触状态进行诊断。

参考文献

- [1] 刘瀚琛,王冲,鞠平.双碳背景下综合能源电力系统弹性分析与提升研究综述[J].电气工程学报,2023,18(2):108-124.
LIU Hanchen, WANG Chong, JU Ping. Review on resilience analysis and enhancement of integrated energy power systems considering dual carbon goal[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(2): 108-124.
- [2] 高扬,沈毅,夏峰,等.基于特高频传感器的GIS局放信号监测装置及定位方法[J].电气工程学报,2022,17(1):244-250.
GAO Yang, SHEN Yi, XIA Feng, et al. GIS partial discharge signal monitoring device and localization method based on UHF sensor[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(1): 244-250.
- [3] 国家电网公司运维检修部.高压开关设备典型故障案例汇编[M].北京:中国电力出版社,2012.
Operation and Maintenance Department of State Grid Corporation. Compilation of typical fault cases of high-voltage switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [4] 连和,林向宇,赵欢,等.封闭式高压开关柜内接头的电阻检测与发热诊断[J].电世界,2021,62(1):24-26.
LIAN He, LIN Xiangyu, ZHAO Huan, et al. Resistance detection and heating diagnosis of connector in closed high voltage switch cabinet[J]. Electric World, 2021, 62(1): 24-26.
- [5] 李玉杰,李洪涛,宋思齐,等.基于红外的GIS内部导体温度检测技术研究[J].电力工程技术,2019,38(2):142-146.
LI Yujie, LI Hongtao, SONG Siqi, et al. Temperature detection of internal conductor in GIS based on infrared thermal imaging [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 142-146.
- [6] 苏戈,张垒,赵艳涛,等.考虑SF6透射率校正的GIS设备红外测温技术[J].光学与光电技术,2023,21(4):98-106.
SU Ge, ZHANG Lei, ZHAO Yantao, et al. Infrared temperature measurement technology of GIS equipment considering SF6 transmittance correction[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2023, 21(4): 98-106.
- [7] XIONG Q, ZHAO J F, GUO Z Q, et al. Mechanical defects diagnosis for gas insulated switchgear using acoustic imaging approach[J]. Applied Acoustics, 2021, 174(3): 107784.
- [8] 屈斌,张佳成,张昭宇,等. GIS设备非电接触松动缺陷的振动试验研究与特性分析[J].高压电器,2023,59(8):136-145.
QU Bin, ZHANG Jiacheng, ZHANG Zhaoyu, et al. Research on vibration test and characteristic analysis of non-electric contact looseness defect of GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(8): 136-145.
- [9] 徐志钮,郭一帆,李先锋,等.机械缺陷对GIS外壳振动影响[J].电力工程技术,2022,41(5):156-164, 185.
XU Zhiniu, GUO Yifan, LI Xianfeng, et al. Influence of mechanical faults on the vibration of GIS shell[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 156-164, 185.
- [10] 吴玖汕,赵壮民,杨玥坪,等. GIS隔离开关接触状态振动-温度联合检测方法[J].高电压技术,2023,49(1):207-214.
WU Jiushan, ZHAO Zhuangmin, YANG Yueping, et al. Vibration-temperature joint detection method for GIS disconnecter connection state[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 207-214.
- [11] 王昕宇.基于振动信号的GIS电接触故障特性的研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2021.
WANG Xinyu. Study of electrical contact fault characteristics of GIS based on vibration signals[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [12] 杨斌,樊志刚,王建国,等.小波包和1D CNN结合的刀具磨损状态识别[J].机械设计与制造,2024(9):228-232.
YANG Bin, FAN Zhigang, WANG Jianguo, et al. Tool wear state recognition based on wavelet packet and 1D CNN[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(9): 228-232.

收稿日期:2024-04-17

修改稿日期:2024-06-20