

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200833

基于振动原理的 GIS 母线导电杆松动故障分析与诊断

臧旭¹, 马宏忠¹, 吴金利¹, 李呈营¹, 彭晓晗¹, 杨启帆¹, 屈斌²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384)

摘要: 气体绝缘组合电器(GIS)长期工作在大电流强电力环境下,受开关设备反复操作与长期机械振动影响, GIS 设备的电气连接处易出现松动故障,导致 GIS 异常振动,甚至引发气室漏气与绝缘性故障。针对 GIS 母线导电杆松动故障,提出了基于振动检测的故障诊断方法。对正常运行与松动故障时的振动进行理论分析,建立 126 kV 振动检测实验平台,研究母线导电杆松动时振动信号特征。研究表明:正常运行时, GIS 母线管外壳振动频率在 1 000 Hz 以内,100 Hz 是主要机械振动频率。母线导电杆松动时 1 000 Hz 以上频率成分显著增加,并且故障越严重增加越明显。故可将故障时显著增加的 1 000~3 000 Hz 的频域能量 $E_{1-3\text{ kHz}}$ 与 1 000 Hz 内的频域能量 $E_{0-1\text{ kHz}}$ 作为特征量,将其比值定义为松动故障系数 γ ,反映故障的严重程度。计算表明, $\gamma > 0.04$ 母线导电杆松动故障, γ 越大故障越严重,当 $\gamma \geq 0.1$ 则松动较为严重。

关键词: 振动信号; 母线导电杆; 松动故障; 频域能量; 松动故障系数

Analysis and diagnosis of a GIS bus conductor loosening based on mechanical vibration

ZANG Xu¹, MA Hongzhong¹, WU Jinli¹, LI Chengying¹, PENG Xiaohan¹, YANG Qifan¹, QU Bin²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China)

Abstract: Gas insulated switchgear often works under high current and strong electrical power and for long periods. In addition, repeated operation of the switchgear with long-term mechanical vibration of the equipment easily leads to the loosening of the fasteners at the electrical connections. This contributes to GIS abnormal vibration, or even air leakage and insulation failure. In this paper, a vibration detection method is adopted for the loosening failure of the GIS bus conductor. First, theoretical research on the vibration of the normal and loose fault is carried out. Then, a 126 kV vibration detection experimental platform is built to study the characteristics of the vibration signal when the bus conductor is loose. The results indicate that the vibration frequency of the GIS bus bar shell is within 1 000 Hz, and 100 Hz is the main mechanical vibration frequency if the GIS works well. When a bus conductor failure occurs, the frequency component above 1 000 Hz increases significantly in proportion to the severity of the failure. Therefore, the frequency domain energy which is significantly increased between 1 000~3 000 Hz and 0~1000 Hz can be defined as $E_{1-3\text{ kHz}}$ and $E_{0-1\text{ kHz}}$ and used as characteristic parameters. Finally, the ratio of $E_{1-3\text{ kHz}}$ and $E_{0-1\text{ kHz}}$ is defined as the loosening fault coefficient γ to reflect the severity of the loosening fault. Calculations show that when $\gamma > 0.04$, the bus conductor loosening fault occurs, and the larger the value, the more serious the fault. If $\gamma \geq 0.1$, a serious loosening failure may occur.

This work is supported by the National Nature Science Foundation of China (No. 51577050) and the Key Science and Technology Project of State Grid Tianjin Electric Power Company (No. KJ19-1-19).

Key words: vibration signal; bus conductor; loosening fault; frequency domain energy; loosening fault coefficient

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(Gas Insulated Switchgear, GIS)作为电力系统高压输电的重要设备,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577050); 国网天津市电力公司重点科技项目资助(KJ19-1-19)

目前在电力系统中运用越来越广泛。虽然 GIS 设备的运行可靠性高,但其机械与绝缘故障也时有发生。据国际大电网 CIGRE WG 统计^[1-2],对于 GIS 常见故障中机械故障占比约 44%,对于 GIS 的非常见故障中机械故障占比约 39%,据国内统计表明,由于安装缺陷、螺栓松动、触头接触不良等引起机械故障次数比例约为 39.3%与绝缘故障比例相当,所以

有必要对 GIS 的机械故障进行诊断研究^[3-4]。母线导电杆作为 GIS 主要载流设备, 长期在高电流与大电力下运行, 由于大量开关设备的操作以及母线的投切, 在冲击电流的作用下母线导电杆连接处易接触不良, 同时电流产生的热效应易使得导杆金属镀层剥落与损坏, 最终导致导电杆连接点处接触点不牢靠引发松动故障^[5-8]。早期的机械故障并不会引发放电缺陷, 如果不及时处理, 随着机械故障的扩大, 不良接触点处的接触电阻增大, 温度升高, 可能导致绝缘老化并击穿, 最终引发绝缘性故障^[9-11]。因此, 有必要对母线导电杆的运行状态进行检测, 及时发现导电杆接触点的松动故障, 避免影响母线设备的正常运行, 确保供电的安全可靠性^[12-14]。

目前, 工程应用对 GIS 机械故障的检测方法有 X 射线成像观测法与回路电阻测量法, 文献[15]利用 X 射线对 GIS 内部的状态进行成像观测 GIS 的隔离开关动静触头的接触情况判断是否接触良好, 该方法需通过人为观察成像体的特征以判断是否发生机械松动故障, 不易得出精确的结论依据, 对于明显的松脱故障具有一定的识别准确性; 回路电阻测量法是在设备停电时, 测量连接体的接触电阻大小判断其连接可靠, 正常连接时触点间的测量电阻小于松动时触点间测量电阻, 该方法虽然可以定量分析母线导电杆的接触状态但需要离线测量所以较为不便^[16-19]。20 世纪 90 年代国外有研究者通过检测 GIS 振动信号判断其开关触点是否存在不良缺陷, 但该项研究并未得到推广, 仅用于实验条件^[20-23]。国内对于振动法检测也有一定的应用, 文献[17]利用振动法带电检测动触头操作箱的振动信号对隔离开关的接触状态进行状态评估, 在实验结果上得到故障特征量并能进行故障诊断, 但对于振动理论仍需更进一步研究。目前对于 GIS 机械故障的振动检测技术相关研究较少, 尤其对振动原理与特性研究仍需进一步深入^[24-27]。

本文主要对母线导电杆松动故障进行研究, 首先深入研究机械振动机理, 并结合有限元仿真验证振动机理, 构建了 126 kV 故障实验平台, 进行母线导电杆松动实验, 提取振动信号的故障特征并给出母线导电杆状态评估判据。

1 GIS 壳体振动原理

对于 GIS 管体封装式设备振动机理, 目前国内学者说法不一, 主要观点有壳体上感生涡流在电磁场中受力振动、载流导体在电磁场中受力振动和带电体接触面电流收缩力振动^[21-23], 对于磁致伸

缩效应引发的振动由于 GIS 外壳是铝合金制成故可以忽略。

1.1 外壳在电磁力作用下的振动

金属外壳的受力振动示意图如图 1 所示, 外壳体在金属导电杆产生的电磁场中受力振动。

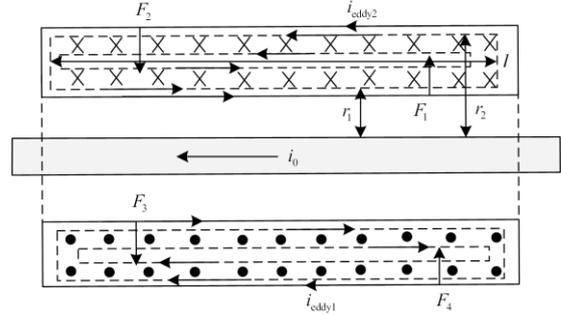


图 1 金属外壳受力示意图

Fig. 1 Diagram of metal enclosure force

对于长导体在角频率为 ω 正弦交流电的作用下 $i_0 = I_m \cos(\omega t)$, 由安培环路定理求出壳体上磁感应强度。

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \mu_r \sum i \quad (1)$$

$$B \times 2\pi r = \mu_0 \mu_r i_0 \quad (2)$$

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi r} I_m \cos(\omega t) \quad (3)$$

式中: B 是磁感应强度; μ_0 是真空中磁导率; μ_r 是相对磁导率; r 是某点与导体杆的距离。

涡流回路中磁通 Φ 计算公式为

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi r} I_m \cos(\omega t) \times l dr = \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi} I_m \cos(\omega t) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (4)$$

式中: r_1 为涡流回路下回路与导体的间距; r_2 为涡流回路上回路与导体的间距; l 为涡流回路从左至右的跨度。

计算得到涡流回路的电流 i_{eddy} 为

$$\begin{cases} i_{\text{eddy}} = \frac{-d\Phi}{R} = k_{\text{eddy}} \sin(\omega t) \\ k_{\text{eddy}} = \frac{\omega \mu_0 \mu_r l}{2\pi R} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) I_m \end{cases} \quad (5)$$

式中, R 为涡流回路的电阻。由此可得壳体上下部分的受力大小为

$$\begin{cases} F_1 = B_1 i_{\text{eddy}} l \\ F_2 = B_2 i_{\text{eddy}} l \end{cases} \quad (6)$$

将式(3)和式(5)代入式(6)得到壳体受力的最终结果为

$$\begin{cases} F_1 = \frac{\omega(\mu_0\mu_r I_m)^2 l}{8\pi^2 R r_1} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) I_m \sin(2\omega t) \\ F_2 = \frac{\omega(\mu_0\mu_r I_m)^2 l}{8\pi^2 R r_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) I_m \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (7)$$

通过上述推导可知,对于 GIS 壳体周围的电磁场分布及壳体受到电磁力的主要频率为两倍的电流频率,导体电流频率一般是 50 Hz,故电磁力与振动频率以 100 Hz 为主,并且由式(7)可知,距离导电杆越远,导体所受的电力越小。

1.2 GIS 外壳体电磁场有限元仿真

为验证 GIS 母线与三相导体中通入对称三相交流电时的电磁感应作用,结合实际的母线与导体结构,利用有限元建立如图 2 所示的 GIS 简化模型,并在外壳体靠近内部边缘、外部边缘和中部处选取三个点 dot1、dot2、dot3,仿真计算各点处的磁感应强度 B 。

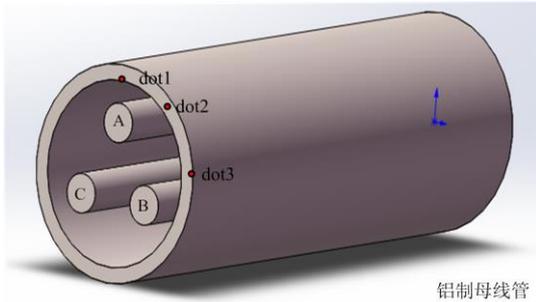


图 2 GIS 仿真模型结构图

Fig. 2 Structure of GIS simulation model

仿真模型中母线管长度为 1.5 m,外壳直径为 380 mm,内壳直径为 330 mm,导杆直径 70 mm,相互间呈 120°,采用铝制材料进行仿真分析。建立三相共体式 GIS 的二维瞬态电磁场仿真模型,考虑交流电作用下金属导体的集肤效应,施加三相对称频率为 50 Hz,幅值为 800 A 的交流电流,仿真步长为 1 ms,周期为 80 ms,得到磁感应强度云图如图 3 所示。

计算图 2 中 GIS 外壳体上三点 dot1、dot2、dot3 随时间变化的瞬态磁感应强度如图 4 所示。

从计算结果可知,母线壳体上各处的磁感应强度随时间呈周期变化,并且周期为电流变化周期的一半,频率为电流频率的 2 倍即为 100 Hz,并且离导电杆越近磁感应强度越大,仿真结果与前述的推导证明结论一致。

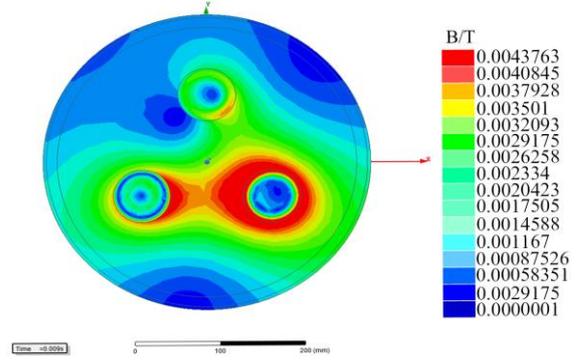


图 3 9 ms 时母线管磁感应强度云图

Fig. 3 Nephograms of magnetic induction intensity at the time of 9 ms

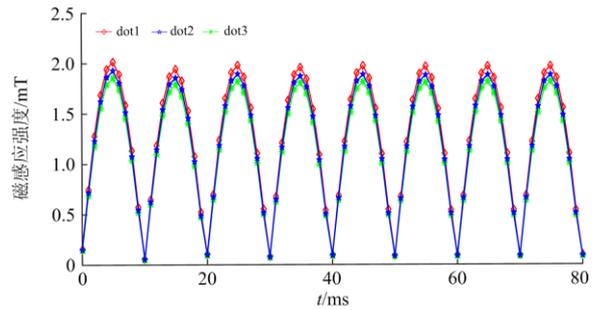


图 4 各点处瞬态磁感应强度

Fig. 4 Transient magnetic induction intensity of each dot

1.3 导电杆接触不良时机械振动原理

对于导电杆松动时,带电接触面的接触不紧密,接触部分由原来的全接触变为局部接触的斑点接触,此时电流通过导体时会使得接触部分产生电磁力收缩,流过导体电流根据同方向电流相互吸引的原理,从而产生电接触点处的电力如图 5 所示。

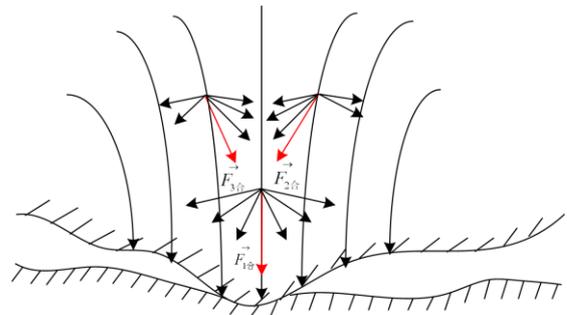


图 5 接触点所受电磁力

Fig. 5 Electrodynamics force at the point of contact

接触点处的所承受的电磁力可认为与电流的平方成正比,公式为

$$F = \lambda i^2 \quad (8)$$

式中: λ 为接触系数, 是与触点接触情况、接触点的半径及接触面的大小等有关的系数, 代入电流公式得到式(9)的电磁力公式。

$$F = F_0 + F_m \cos(2\omega t) \quad (9)$$

对于上述因电磁力引起的收缩问题, 可建立两侧间隙单自由度受力振动模型如图 6 所示。

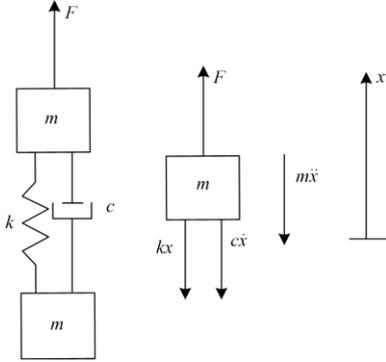


图 6 间隙受力振动模型

Fig. 6 Force vibration model of double-sided gap

如图 6 所示, 将导电杆松动故障引发的电磁力收缩振动简化为弹性系数为 k , 阻尼系数为 c 的单自由度迫振运动, 阻尼系数 c 主要由库伦阻尼引起, 与导电体的接触情况有关, 接触越紧密阻尼系数 c 越大, 当接触间隙变大时, 阻尼系数 c 减小明显, 利用弹簧部分模拟碰撞时构件间的弹性形变, 阻尼部分模拟库仑力等产生的阻尼对运动的阻碍作用, 列出导电杆松动处的运动微分方程。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 + F_m \cos(2\omega t) \quad (10)$$

式中: x 为导电杆运动位移; m 为带电接触面两侧受力质点; F_0 为恒力, 对导电杆的作用相当于施加一个恒定的力, 不影响其运动, 影响导电杆运动的力是交变的电磁力, 运动方程如式(11)。

$$m\ddot{x}_1 + c\dot{x}_1 + kx_1 = F_m \cos(2\omega t) \quad (11)$$

此微分方程解形式为

$$x_1 = e^{-\xi\omega_n t} (c_1 \cos(\omega_d t) + c_2 \sin(\omega_d t)) + A \cos(2\omega t + \theta) \quad (12)$$

式中:

$$\begin{cases} \omega_d = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \\ \xi\omega_n = \frac{c}{2m} \end{cases} \quad (13)$$

式(12)中, 位移可分解为两部分, 前者是时变位移量, 后者为非时变位移量, 当发生松动时, 导电杆接触不紧密使得间隙变大, 导致阻尼系数 c 减小明显, 时变位移量衰减缓慢, 而时变位移是以角

频率为 ω_d 的正余弦振动位移叠加而成, 由于衰减缓慢会对原始的振动信号产生显著的影响, 正常运行时由于阻尼系数较大, 时变位移衰减迅速对整个导电杆受力振动影响小, 时变位移的影响主要会使得导电杆振动信号中其他频段信号的振动幅值增加, 提高了其他频段信号的能量, 所以依据此可提取导电杆松动时的故障特征量。

2 实验设置和方案

2.1 实验设备

本次实验是基于型号为 ZF7A-126 的 126 kV 三相共体式 GIS 设备的实验测试, 包含了断路器、隔离开关、母线与导电杆等主要一次设备, 通过采集设备壳体不同测点处的振动数据, 进行机械故障分析, 现场实验图如图 7。



图 7 现场实验实物图

Fig. 7 Figure of real experiment

GIS 振动检测系统由压电式振动加速度传感器、HY-109A 振动信号采集仪、计算机终端组成, 振动信号加速度传感器型号为 AC102-1A, 其灵敏度为 100 mV/g; 采样频率设置为 16 000 Hz; 频响: 5~8 000 Hz (± 3 dB); 最高振幅: ± 50 g, 振动加速度传感器分别按轴向与径向两个方向固定于母线导电杆的法兰连接处, 以获得效果较好的不同运行状态下的振动信号, 振动信号的测点位置布置如图 8 所示。

2.2 实验方案

将传感器分别沿轴向与径向布置于母线 A、B、C 三相导电杆处, 每相导电杆之间由 6 颗螺丝固定, 其中 2 颗是位移螺丝, 4 颗是固定螺丝, 本次实验的状态分为正常状态、轻度松动、中度松动和严重松动等共 4 种状态。轻度松动是将某一相导电杆的一颗位移螺丝松动后进行振动测量实验, 中度松动是松动两颗位移螺丝并再松动一颗固定螺丝后进行

振动测量实验，严重松动是将所有的位移螺丝与固定螺丝松动后进行振动测量实验，最终比较不同松动状态下的振动信号特征，提取各自的特征量，进行故障诊断与故障严重程度的比较，实验原理图如图 9 所示，振动加速度传感器沿轴向与径向布置于母线管中三相导电杆连接处，测取不同运行状态下的振动信号传输至采集仪并传至 PC 机进行振动信号数据保存。

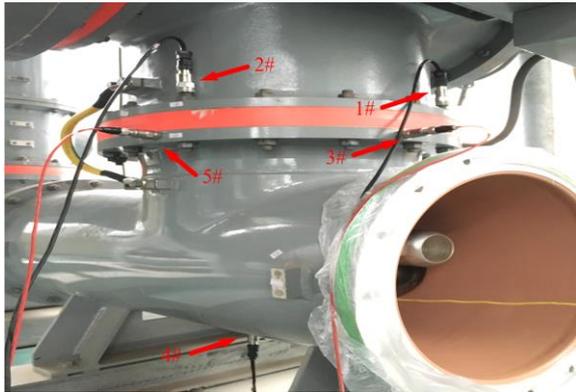


图 8 测点位置布置图

Fig. 8 Figure of measuring location

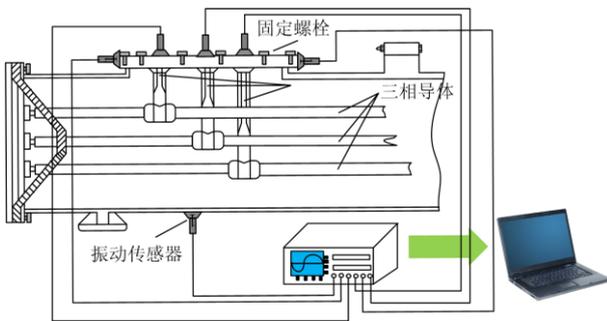


图 9 实验原理图

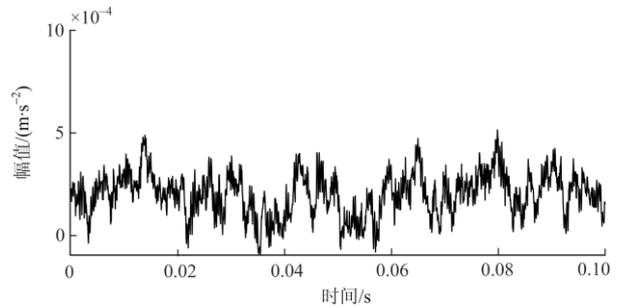
Fig. 9 Schematic diagram of the experiment

3 实验结果与分析

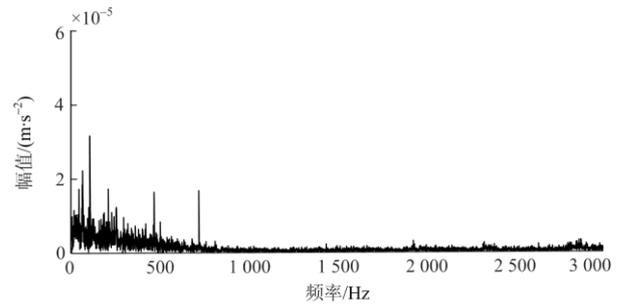
3.1 不同运行状态的信号对比

经过实验发现，外壳振动信号沿径向方向的振动较轴向方向的振动更为明显，选取径向方向的测点 3 的振动信号为研究对象，进行多次实验，研究不同状态下振动信号的时域和频域的特征。

正常运行时，导电杆连接正常，振动信号的时频特征如图 10 所示，可知正常运行时振动信号变化幅度较小，并且主要以基频 100 Hz 及其整数倍的频率为主，但主要的频段能量集中于 1 000 Hz 以内，大于 1 000 Hz 的信号幅值较小，相比于 1 000 Hz 以内的信号幅值几乎可以忽略。



(a) 振动信号时域图



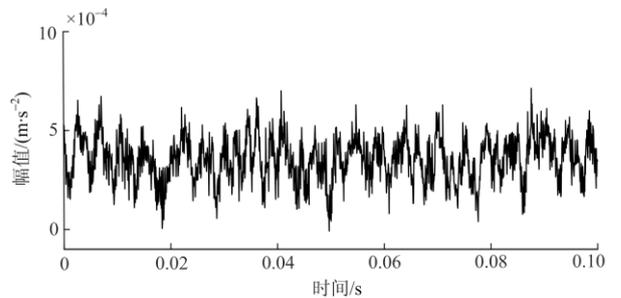
(b) 振动信号频域图

图 10 正常运行时测点 3 振动信号

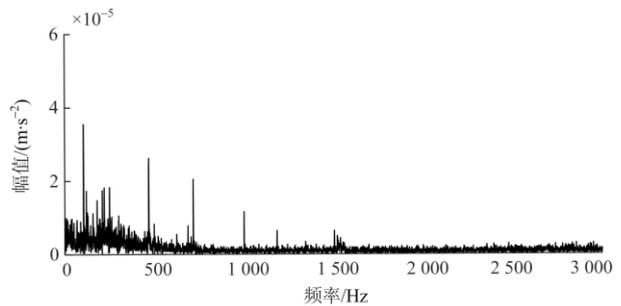
Fig. 10 Vibration signal of measuring point 3

on normal condition

发生母线导电杆松动故障时，振动信号时频图如图 11 所示，图 11 中分图(a)、(b)对应轻度松动故障的时频图，(c)、(d)对应中度松动故障，(e)、(f)对应严重松动故障。



(a) 轻度松动振动时域图



(b) 轻度松动振动频域图

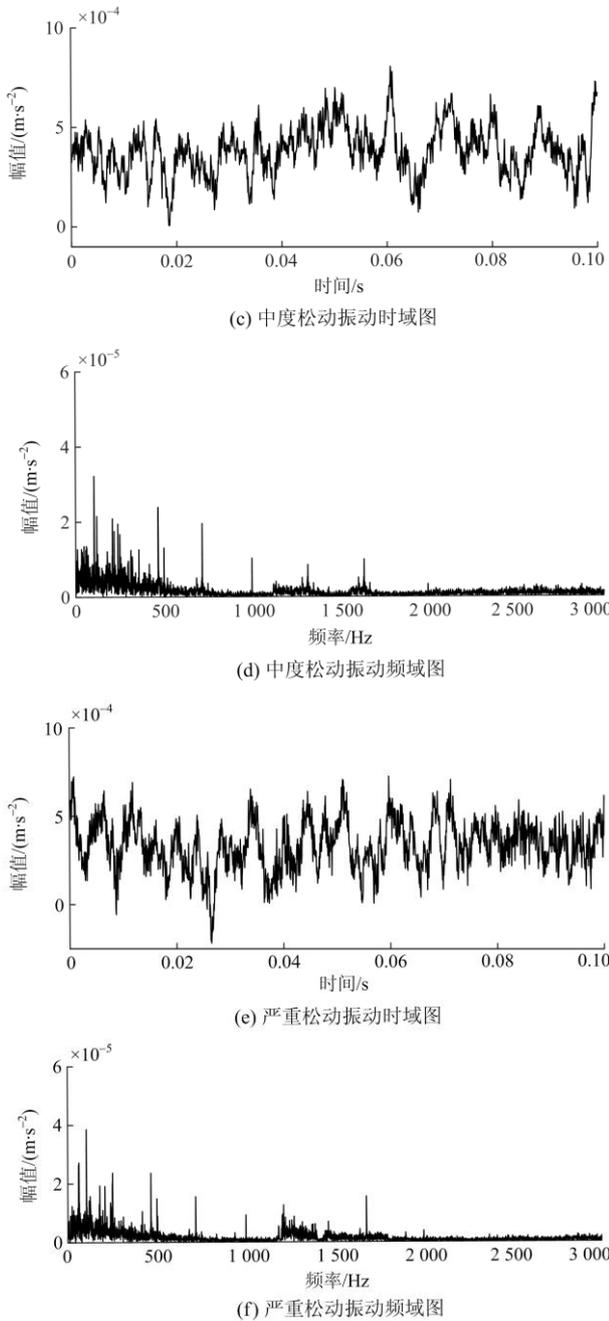


图 11 松动故障下测点 3 振动信号

Fig. 11 Vibration signals of measuring point 3 under loose fault

如图 11 所示, 导电杆发生松动故障时, 时域信号的振动幅值相比正常时显著增大, 并且其频域信号在 1 000~3 000 Hz 信号能量变化显著, 随着故障严重程度变大, 该频段的信号能量增加显著, 相比正常运行时信号的能量不仅仅是集中于 1 000 Hz 以内, 因此频段信号的能量可作为故障判断的特征依据。

3.2 故障特征提取

从上述实验结果可知, 对于母线导电杆发生松

动故障时, 主要的特征是不同的频率段振动信号的能量发生较为明显的变化, 对于正常运行时振动信号的能量主要集中于 1 000 Hz 以内, 松动故障会导致 1 000~3 000 Hz 频段能量增大, 选取测点 3 与测点 5 两个径向测点所测数据作为研究对象, 选取 0~1 000 Hz 与 1 000~3 000 Hz 的频段能量作为特征值, 分别定义为 $E_{0-1\text{kHz}}$ 与 $E_{1-3\text{kHz}}$, 其计算公式为

$$E_{0-1\text{kHz}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \text{mag}(i)^2} \quad (14)$$

$$E_{1-3\text{kHz}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{mag}(j)^2} \quad (15)$$

式中: m 为 1 000 Hz 以内的数据点数; $\text{mag}(i)$ 为 1 000 Hz 以内频域信号的幅值; n 为 1 000~3 000 Hz 内的数据点数; $\text{mag}(j)$ 为 1 000~3 000 Hz 频域信号的幅值即是能量大小, 将 $E_{1-3\text{kHz}}$ 与 $E_{0-1\text{kHz}}$ 的比值定义为 γ 称为松动故障系数, 计算得出不同运行状态下多组特征量的值, 正常运行状态定义为状态 1, 计算结果如表 1 所示。

表 1 正常运行的频段能量与比值

Table 1 Frequency domain energy and ratio on normal condition

状态	$E_{0-1\text{kHz}}$	$E_{1-3\text{kHz}}$	γ
1	0.180 4	0.003 5	0.019 4
1	0.172 2	0.003 2	0.018 6
1	0.165 1	0.003 1	0.018 8
1	0.092 6	0.002 5	0.027 0
1	0.091 3	0.002 8	0.030 7
1	0.084 8	0.002 9	0.034 2
1	0.102 4	0.002 7	0.031 8
1	0.092 1	0.002 9	0.031 5
1	0.085 6	0.002 6	0.030 4
1	0.096 9	0.003 2	0.033 0

定义轻度松动、中度松动与严重松动分别为状态 2、状态 3 和状态 4, 计算结果如表 2 所示。

比较表 1 和表 2 中频段能量可知, 对于正常运行与故障运行时基本频段 0~1 000 Hz 的能量差异不大, 与频谱图的特点相吻合, 对于 1 000~3 000 Hz 频段能量变化明显, 绘制出正常与松动故障时的 $E_{1-3\text{kHz}}$ 频段能量特征比较图如图 12 所示。

对于松动故障时 $E_{1-3\text{kHz}}$ 频段能量增加, 并且越严重的松动故障导致能量增加越显著, 故可以作为判断 GIS 是否发生松动故障的依据, 由图 12 可知, 对于正常运行时 $E_{1-3\text{kHz}}$ 趋于平稳变化不明显, 一旦发生故障能量显著增加, 越严重的故障能量增加越大。为进一步得到松动故障时的特征, 绘制出正常与松动故障时松动故障系数 γ 的变化曲线图(图 13)。

表 2 松动故障的频段能量与比值

Table 2 Frequency domain energy and ratio under loosening fault

状态	E_{0-1} kHz	E_{1-3} kHz	γ
2	0.176 1	0.007 6	0.043 2
2	0.175 2	0.007 5	0.042 8
2	0.174 5	0.007 2	0.041 2
2	0.177 6	0.007 8	0.043 9
2	0.170 7	0.006 9	0.039 3
2	0.105 5	0.006 7	0.063 5
2	0.102 5	0.006 5	0.063 4
2	0.096 6	0.006 4	0.066 2
2	0.092 8	0.006 2	0.066 8
2	0.091 3	0.006 1	0.065 5
3	0.183 2	0.012 2	0.066 6
3	0.180 8	0.012 1	0.067 0
3	0.183 1	0.012 2	0.066 6
3	0.175 9	0.009 2	0.052 3
3	0.174 9	0.008 9	0.050 9
3	0.170 2	0.008 7	0.051 1
3	0.096 2	0.008 4	0.087 3
3	0.092 1	0.008 2	0.089 0
3	0.098 6	0.008 7	0.088 2
3	0.095 4	0.008 4	0.088 0
4	0.185 6	0.015 8	0.085 1
4	0.181 2	0.014 7	0.081 1
4	0.179 6	0.012 3	0.068 5
4	0.175 4	0.011 8	0.067 3
4	0.170 5	0.011 2	0.065 7
4	0.098 2	0.012 2	0.124 2
4	0.096 3	0.012 1	0.125 6
4	0.094 5	0.011 8	0.124 9
4	0.092 7	0.011 5	0.124 1
4	0.091 2	0.010 8	0.118 4

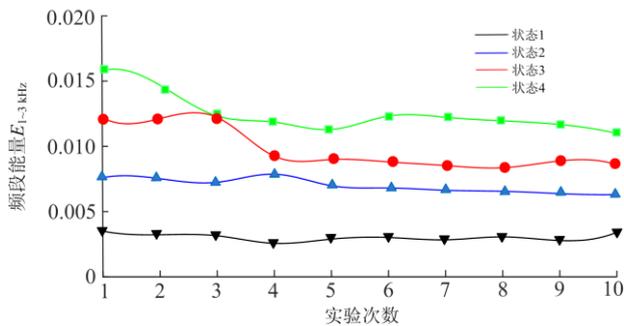


图 12 频段能量特征比较图

Fig. 12 Comparison diagram of frequency domain energy characteristic

由不同状态下松动故障系数变化曲线图与表 2 中计算结果可知：对于正常运行时的 GIS 故障系数

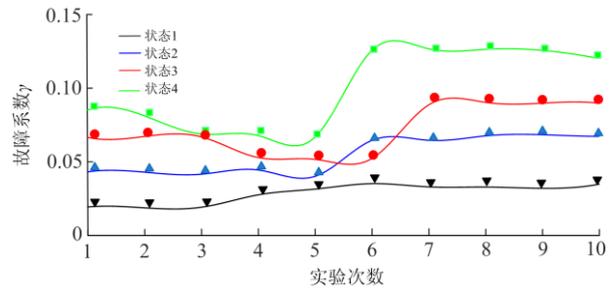


图 13 松动故障系数变化曲线图

Fig. 13 Loosening fault coefficient variation curve

γ 最小($\gamma \leq 0.04$)；当发生了松动故障时，松动故障系数增大($\gamma > 0.04$)，并且故障越严重， γ 数值增大越明显，由于实验中选取测点位置不同，部分测点和位置处的基本频段 0~1 000 Hz 的能量较大，此时会使得 γ 的值偏小，如图 13 中状态 3 曲线存在向下拐点，当以 γ 的平均值作为参考数值时，可减小此类原因导致的参考值计算缺陷，并不影响对于故障的判断，由计算结果可知：当 $\gamma \geq 0.1$ 时，松动故障系数是正常运行时的 2~3 倍，说明此时故障已经较为严重，必须采取相应的检修措施以确保设备安全稳定的运行。

4 结论

1) GIS 正常运行时，母线管外壳受力振动径向方向振动较轴向方向更为明显，振动频率中以 2 倍的工频频率即 100 Hz 最为显著且是电磁力振动的主要频率，母线导电杆接触面间的电磁力收缩作用也会引发壳体振动，影响振动频率。

2) 母线导电杆发生松动故障时，母线管振动信号中 1 000~3 000 Hz 的频段能量增大，相比于正常运行时增加显著，并且随着松动的严重程度的增加而增大。

3) 可以通过松动故障系数 γ 判断故障的严重程度，当 γ 的值显著大于正常运行时的数值则可能发生松动故障，结合上述实验， $\gamma \leq 0.04$ 设备连接较可靠其发生松动故障的可能性很小，当 γ 值较大时 $\gamma \geq 0.1$ 说明发生故障，并且 γ 数值越大说明故障越严重。

参考文献

[1] MA Hongzhong, LIU Baowen, XU Honghua, et al. GIS mechanical state identification and defect diagnosis technology based on self-excited vibration of assembled circuit breaker[J]. IET Science Measurement & Technology, 2020, 14(1): 56-63.

[2] DAI D, WANG X, LONG J, et al. Feature extraction of

- GIS partial discharge signal based on S-transform and singular value decomposition[J]. IET Science Measurement & Technology, 2017, 11(2): 186-193.
- [3] 张佩, 赵书涛, 申路, 等. 基于改进EEMD的高压断路器振声联合故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 77-81.
ZHANG Pei, ZHAO Shutao, SHENG Lu, et al. Research on vibration and acoustic joint mechanical fault diagnosis method of high voltage circuit breaker based on improved EEMD[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 77-81.
- [4] REN Ming, DONG Ming, XU Zhigang, et al. Partial discharge pulses at artificial protrusions in SF6 under negative IEC60060-3 standard impulses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 1070-9878.
- [5] 王涛云, 马宏忠, 崔杨柳, 等. 基于可拓分析和熵值法的GIS状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 115-120.
WANG Taoyun, MA Hongzhong, CUI Yangliu, et al. Condition evaluation of gas insulated switchgear based on extension analysis and entropy method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 115-120.
- [6] 律方成, 金虎, 王子建, 等. 基于组合核多特征融合的GIS局部放电检测与识别[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 334-340.
LÜ Fangcheng, JIN Hu, WANG Zijian, et al. GIS partial discharge detection and recognition based on the kernel combination and multiple feature fusion method[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 29(10): 334-340.
- [7] 王磊, 刘衍, 冯宇, 等. 特高压GIS变电站VFTO波形衰减仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 45-51.
WANG Lei, LIU Yan, FENG Yu, et al. Simulation research on VFTO waveform attenuation in UHV GIS substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 45-51.
- [8] 杨玥坪, 何聪, 李军浩. 工频恒定电压下SF₆气体中沿面放电发展过程研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 145-150.
YANG Yueping, HE Cong, LI Junhao. Development process of surface discharge in SF₆ gas under constant voltage of power frequency[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 145-150.
- [9] 徐明月, 李喆, 孙汉文, 等. 基于改进梅尔倒谱系数的GIS机械故障诊断方法[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 122-128.
XU Mingyue, LI Zhe, SUN Hanwen, et al. Mechanical fault diagnosis of GIS based on improved MFCC[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 122-128.
- [10] 赵谦, 殷建荣, 程成, 等. 基于就地控制器的变电站GIS智能化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 149-155.
ZHAO Qian, YIN Jianrong, CHENG Cheng, et al. Study on intelligent GIS based on on-site control unit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 149-155.
- [11] HUANG Q, JING S, LI J, et al. Smart substation: state of the art and future development[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 32(2): 1098-1105.
- [12] 高佳程, 田蕴卿, 朱永利, 等. 基于完全集合经验模态分解和排列熵的局部放电信号的小波包去噪方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(3): 1-7.
GAO Jiacheng, TIAN Yunqing, ZHU Yongli, et al. Wavelet package denoising method for partial discharge signals based on CEEMD and PE[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(3): 1-7.
- [13] 王彦博, 朱明晓, 邵先军, 等. 气体绝缘组合电器中局部放电特高频信号S参数特性仿真与实验研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 234-240.
WANG Yanbo, ZHU Mingxiao, SHAO Xianjun, et al. Simulation and experimental research on S parameter characteristic of partial discharge UHF signals in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 234-240.
- [14] WU Maochao, YU Aibing, CHEN Qiuji, et al. Design of adjustable chip breaker for PCD turning tools[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 172.
- [15] 许焕清, 马君鹏, 王成亮, 等. GIS设备典型缺陷的X射线数字成像检测技术[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1697-1702.
XU Huanqing, MA Junpeng, WANG Chengliang, et al. X-ray detection technology for typical defects of GIS equipment[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1697-1702.
- [16] 孙曙光, 于晗, 杜太行, 等. 基于振动信号样本熵和相关向量机的万能式断路器分合闸故障诊断[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 20-30.
SUN Shuguang, YU Han, DU Taihang, et al. Diagnosis on the switching fault of conventional circuit breaker based on vibration signal sample entropy and RVM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 20-30.
- [17] 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.
- [18] YOSHIDA M, KOJIMA H, HAYAKAWA N, et al. Evaluation of UHF method for partial discharge measurement by simultaneous observation of UHF signal and current pulse waveforms[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(2): 425-431.
- [19] 管敏渊, 楼平, 金国亮, 等. 基于希尔伯特-黄变换的GIS超声波检测异常信号诊断[J]. 高压电器, 2019, 55(6): 23-30.
GUAN Minyuan, LOU Ping, JIN Guoliang, et al. Fault diagnosis of GIS based on Hilbert-Huang transform of on-line ultrasonic detection signals[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 23-30.
- [20] 史文, 杨正理, 陈海霞, 等. GIS中自由金属微粒缺陷局部放电信号特征分析[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 139-144.
SHI Wen, YANG Zhengli, CHEN Haixai, et al. Characteristics analysis of partial discharge signals of free metal particle defects in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 139-144.
- [21] 刘凯, 彭在兴, 王颂, 等. GIS内部过热工程仿真技术研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 13-18, 25.
LIU Kai, PENG Zaixing, WANG Song, et al. Research on GIS overheating engineering simulation technology[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 13-18, 25.
- [22] 李伟, 李山, 公多虎, 等. 550 kV离相气体绝缘组合电器电磁环流建模计算与发热消缺措施[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3289-3294.
LI Wei, LI Shan, GONG Duohu, et al. Electromagnetic circulation current and heating defect elimination method for 550 kV monophonic GIS[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3289-3294.
- [23] APPASANI B, MOHANTA D K. A review on synchrophasor communication system: communication technologies, standards and applications[J]. Protection and Control of Modern Power System, 2018, 3(4): 383-399. DOI: 10.1186/s41601-018-0110-4.
- [24] 路艳巧, 孙翠英, 曹红卫, 等. 基于边缘计算与深度学习
- 的输电设备异物检测方法[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 27-33.
- LU Yanqiao, SUN Cuiying, CAO Hongwei, et al. Foreign body detection method for transmission equipment based on edge computing and deep learning[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 27-33.
- [25] 周自强, 纪扬, 苏焯, 等. 基于迁移学习卷积神经网络的电缆隧道锈蚀识别算法[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 104-110.
ZHOU Ziqiang, JI Yang, SU Ye, et al. A hybrid transfer learning/CNN algorithm for cable tunnel rust recognition[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 104-110.
- [26] 郭晓芸, 李海明, 许赟杰, 等. 基于改进果蝇算法优化PNN的变压器故障诊断研究[J]. 上海电力大学学报, 2020, 36(4): 395-400.
GUO Xiaoyun, LI Haiming, XU Yunjie, et al. Transformer fault diagnosis based on improved FOA optimized PNN[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2020, 36(4): 395-400.
- [27] 张安勤, 吴蕊, 张挺. 基于信息熵的异常检测算法[J]. 上海电力大学学报, 2020, 36(4): 386-390.
ZHANG Anqin, WU Rui, ZHANG Ting. Anomaly detection algorithm based on information entropy[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2020, 36(4): 386-390.

收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2020-11-06

作者简介:

臧旭(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为组合电器带电检测与故障诊断; E-mail: 18351988021@163.com

马宏忠(1962—), 男, 博士, 博士生导师, 研究方向为电气设备在线监测及故障诊断, 电机运行与控制等; E-mail: hhumhz@163.com.

吴金利(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为变压器与高压并联电抗器在线监测与故障诊断。

(编辑 姜新丽)