

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.05.019

机械缺陷对 GIS 外壳振动影响

徐志钮¹, 郭一帆¹, 李先锋¹, 赵丽娟¹, 金虎², 胡伟涛³

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663;

3. 国网河北省电力有限公司超高压分公司, 河北 石家庄 050071)

摘要: 气体绝缘开关(GIS)在运行过程中会发生振动。为了分析在 GIS 外壳连接处的螺栓松动和导杆不对中两种缺陷的振动信号分别与无缺陷正常运行时的差别,文中建立了 252 kV 三相分箱型 GIS 的三维模型,并在固体力学场中对模型进行模态分析,确定其固有频率,得到较有代表性的六阶模态振型。文中通过施加不同载荷及改变模型参数等方法,在固体力学场中分别求解无缺陷、不同数量螺栓松动和不同情况的导杆不对中状态下 GIS 外壳振动加速度的时域信号,并通过频谱分析得到其频域信号,通过比较分析几种情况下外壳振动加速度信号的差别,获得 GIS 出现螺栓松动缺陷和导杆不对中缺陷在 GIS 外壳振动加速度上的特征,得到出现以上缺陷时的判据。文中所得到的相关结论对于后续的 GIS 设备运行状态监测、机械缺陷判别和振动情况研究有一定的参考价值。

关键词: 气体绝缘开关(GIS);有限元;固有频率;振动信号;螺栓松动;导杆不对中

中图分类号: TM595

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)05-0156-09

0 引言

气体绝缘开关(gas insulated switchgear, GIS)设备具有诸多优点,近些年在电力系统中得到广泛应用^[1]。然而 GIS 设备在生产、安装过程中可能会存在某些缺陷,随着运行年限的增长,各种故障也在逐年增加,主要有放电型故障、发热型故障和机械类故障^[2-4]。GIS 设备发生如螺栓松动、导杆不对中、外壳接触不平衡等机械类缺陷时,由于导体中交变电流产生的电动力和开关操作产生的机械力导致 GIS 设备发生振动,因此当存在机械类缺陷时往往会产生异常的振动信号^[5-7]。GIS 设备的异常振动可能会导致严重的危害,例如气体泄露致使内部压力下降从而导致绝缘事故等^[8-9],所以开展 GIS 设备机械缺陷振动信号研究具有工程意义。

早在上世纪 80 年代就有国外学者通过 GIS 设备外壳的振动来判断触头的接触情况^[10]。而国内方面,清华大学的钱家骊等学者在 1990 年就研究了 GIS 外壳的振动情况以及振动信号的检测,但是其主要针对放电型故障的振动信号进行研究,未对存在机械缺陷的情况进行分析^[11]。近些年,蒋玲等学者现场检测研究 GIS 长母线正常运行时在高温差情况下的振动信号,但并未涉及 GIS 设备内部发生缺

陷^[12];文献[4]对 GIS 设备外壳的振动信号进行仿真研究,但仿真模型相对简单且仅仿真计算了无故障情况下的振动信号;文献[13]进一步通过有限元仿真研究在 GIS 设备隔离开关动作时的外壳振动信号,并分析在开关动作过程中存在异物或螺栓松动时的加速度信号,但未研究开关动作结束后在运行过程中出现螺栓松动或导杆不对中等机械缺陷时的加速度情况;文献[14-15]中通过搭建实验平台的方法分别得到不同情况下的故障判据,其中文献[14]研究 GIS 设备母线触头正常与松动 2 种接触状态下的振动信号差别,得到可以初步判断是否存在母线触头松动故障的判据,文献[15]得到了一种通过不同频段能量占比来判断 GIS 是否发生放电故障或绝缘子松动的方法;卞超等学者则研究当发生 GIS 母线不对中时外壳的振动信号,但其并未与正常情况或其他机械缺陷情况下的振动信号进行对比研究,无法确定能否用来进行判别机械缺陷^[3]。总的来说,目前对于 GIS 的异常振动信号并没有较为系统性的研究报道^[5,16-17]。

为了对比不同机械缺陷与无缺陷情况下 GIS 外壳的振动信号差别,得到相应的缺陷判据,文中首先分析了 GIS 的受力情况,得到了不同状态下的 GIS 受力详情。之后利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件建立了 252 kV 三相分箱型 GIS 的三维模型,对模型进行模态分析计算,确定其固有频率,得到六阶较有代表性的模态振型。然后通过改变模型参数等方法,在固体力学场中分别计算无缺

收稿日期:2022-03-26;修回日期:2022-07-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61775057, 62273146);河北省自然科学基金资助项目(E2020502010);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021MS072)

陷情况、存在螺栓松动情况和导杆不对中情况时外壳振动的时域信号,同时对所得时域信号进行频谱分析,分析比较几种情况下的振动频域信号,指出不同缺陷时的振动信号频谱图与无缺陷情况下的差别,为后续 GIS 设备的运行状态监测、机械缺陷判别和振动情况研究提供了参考。

1 GIS 设备振动机理

1.1 无缺陷时 GIS 设备外壳振动机理

三相分箱型 GIS 设备无缺陷时,导杆各方向所受电磁力的大小相等,合力为零,导杆不会发生振动,受力情况如图 1(a)中所示。因为外壳与导杆间存在较强的电磁耦合,外壳中会产生与导杆电流同一数量级的感应电流。存在环流的外壳会在导杆产生的交变磁场作用下受到电动力的影响,受力情况如图 1(b)中所示,进而发生有规律的振动^[2-3]。

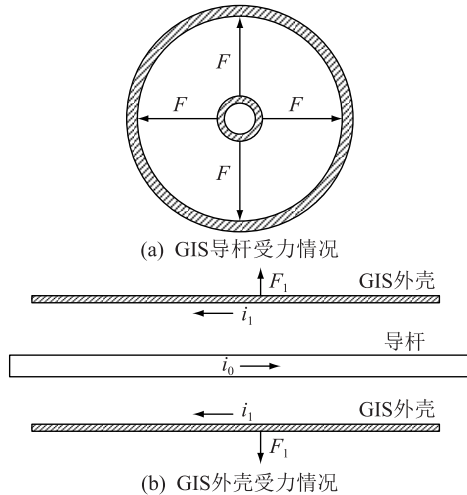


图 1 无缺陷时 GIS 受力情况
Fig.1 Force on GIS without fault

设电流大小为 I_0 ,角频率为 ω ,则导杆电流为 $i_0 = I_0 \sin(\omega t)$,令 i_1 为外壳所产生感应电流,此时其大小与 i_0 成正比,即 $i_1 = ki_0$ ($0 < k < 1$)。由于 GIS 的外壳厚度远小于外壳半径 R ,因此将外壳近似为薄壳,认为其磁场均匀,其磁场值^[1-2]如式(1)所示。

$$B = \frac{\mu_0 i_0}{2\pi R} = \frac{\mu_0 I_0 \sin(\omega t)}{2\pi R} \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; I_0 为导杆电流; R 为外壳半径。

长度为 L 的外壳所受电磁力的大小^[1-2]如式(2)所示。

$$F = Bi_1 L = \frac{\mu_0 k Li_0^2 \sin^2(\omega t)}{2\pi R} = \frac{\mu_0 k Li_0^2}{2\pi R} \cdot \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} \quad (2)$$

式中: L 为外壳长度; k 为外壳感应电流与导杆电流

比值。

由式(2)可知,当 GIS 设备正常运行时,外壳会受到 2 倍电流频率的电磁力,在工频时受到的电磁力频率为 100 Hz^[18]。

1.2 导杆不对中时 GIS 设备外壳振动机理

GIS 设备的母线导杆较长或者出现安装错位时,很容易出现导杆不对中缺陷,这会使导杆所受电场力不平衡,引起导杆的振动,出现 GIS 设备外壳振动^[3,12]。若将其中高压导杆视为高压极板,外壳视为接地极板则具体受力情况如图 2 所示。

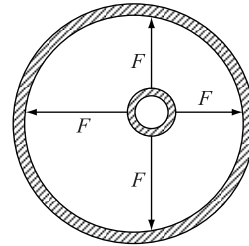


图 2 导杆不对中时所受电磁力情况
Fig.2 Electromagnetic force on guide rod when it out of center

导杆由于所受电场力的不平衡产生的作用力 F ^[3,19] 如式(3)所示。

$$F = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S U^2}{2l^2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{2l^2} U_0^2 \cos^2(\omega t) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{2l^2} U_0^2 \cdot \frac{1 + \cos(2\omega t)}{2} \quad (3)$$

式中: S 为受力单位面积; l 为两极板间的距离; ϵ_0 为绝对介电常数; ϵ_r 为相对介电常数; U 为外加电压。

由式(3)可知,当 GIS 设备出现导杆不对中缺陷时,导杆会受到 2 倍电压频率的电磁力,在工频时受到的电磁力频率为 100 Hz。

2 仿真模型建立及 GIS 固有频率计算

2.1 仿真模型参数

考虑到实际运行中的 GIS 设备结构复杂,而太过复杂的模型会导致仿真难以计算,出现结果不收敛,导致无法得到有效结果^[20],因此文中参照文献[21]建立了 GIS 设备的三维简化模型。模型的具体几何参数如下:模型总长度为 1 m;外壳外半径为 0.2 m;外壳厚度为 0.02 m;导杆外半径为 0.05 m;导杆厚度为 0.01 m;盆式绝缘子厚度为 0.02 m,倾斜角为 45°;绝缘子两侧法兰厚度为 0.03 m。几何模型具体如图 3 所示。

考虑到螺栓部位相比其他位置尺寸很小,正常剖分情况下该部位网格尺寸与螺栓尺寸的比值较大,这会导致该部位有限元法计算误差偏大,所以

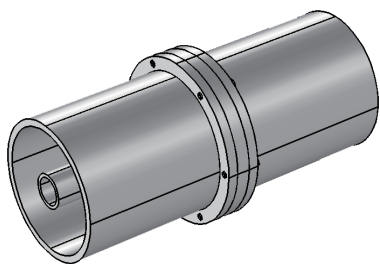


图3 GIS几何模型

Fig.3 GIS geometric model

对螺栓部位网格进行了细分;同时考虑计算的精度、准确性以及计算的速度,整体上采用自由四面体网格进行剖分,剖分的四面体单元为25 684个。

模型中外壳及导杆材料选择为铝,盆式绝缘子材料选择为环氧树脂,螺栓材料选择为钢,具体材料参数见表1^[13]。

表1 模型所用材料参数表

Table 1 Material parameters of the model

材料	质量密度/ 10^3 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa
钢	7.9	206	0.30	235
铝	2.7	70	0.33	180
环氧树脂	1.5	7	0.24	65

考虑到外壳会受到相邻法兰及绝缘子的固定约束,因此文中在外壳右侧施加了固定约束,用来模拟这种情况^[3]。

2.2 GIS固有频率计算

固有频率的计算是模态分析的一部分,机械结构的模态分析可以通过实验数据采集计算,即实验模态分析或者通过有限元软件仿真计算得到,称之为理论模态分析^[3]。文中采用了理论模态分析的方法,在2.1节所建立的仿真模型基础上,赋予模型各部分材料参数,例如质量密度、杨氏模量和泊松比等,进行理论模态分析的计算^[22]。

GIS母线这类连续体的固有频率实际上有无限多个,但可将其看作有限多个微刚体组成,具有有限多个自由度,每个自由度又对应着一阶模态,每阶模态又有特定的固有频率^[1]。考虑到高阶模态能量占比低,对振动的影响较小,文中求解了其前20阶的固有频率,结果如图4所示。为了更直观地观察GIS的振动状态^[23-25],从仿真计算所得的模态振型中选取较有代表性的六阶模态振型,见图5。

从模态分析的结果可知,不同的固有频率所对应的振型有摆动、扭曲、伸缩等各种不同振动状态。此外,外壳右端的振动明显小于左端的振动,这明显和外壳右端添加固定约束有关。

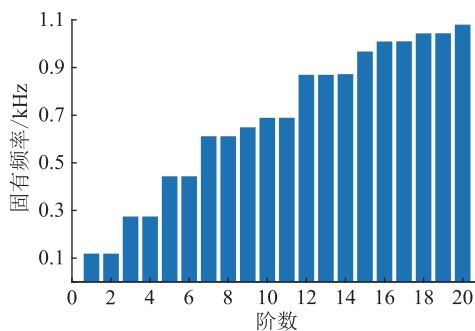


图4 GIS前20阶固有频率

Fig.4 The natural frequency of GIS from 1st to 20th order

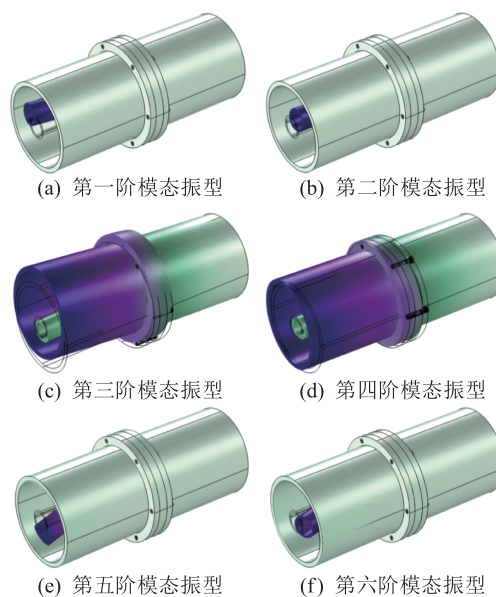


图5 GIS模态振型

Fig.5 Modal shapes of GIS

通过模态分析可得出几何模型的模态参数,得到其振动的力学特性、共振频率等,为振动特性分析、故障诊断等提供了判断依据。由第1章分析可知,在无缺陷状态及导杆不对中状态时,导杆或外壳所受到的作用力均为运行过程中由工频电流、电压所产生的100 Hz单一频率电磁力。因此,只要GIS设备的几何结构设计避开100 Hz固有频率就不会产生共振。通过第2章分析得到的GIS设备几何模型前20阶固有频率均大于100 Hz,可最大限度避免GIS设备在运行过程中发生共振的可能。

3 参考点选择及无缺陷情况

3.1 参考点选择

为了得到GIS设备存在缺陷时的振动判据,文中计算GIS设备在无缺陷正常运行时的振动信号,选择适当的参考点,通过比较不同缺陷时参考点的振动信号,得到GIS设备的缺陷判据。

考虑到文中将 GIS 母线筒右端添加了固定约束,以及对整个几何模型所有点的加速度信号进行比较的困难,选择了母线筒左端距绝缘子 0.2 m 处为参考平面 A,以及母线筒右端距绝缘子 0.2 m 处为参考平面 B,具体如图 6 所示。

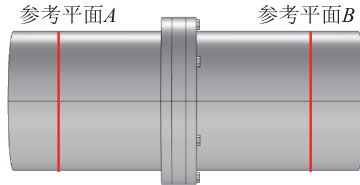


图 6 参考平面位置

Fig.6 Positions of reference planes

基于以上 2 个参考平面,文中在每个参考平面上选择了 4 个参考点,其中参考点 1、3 位于参考平面的 Y 方向上,参考点 2、4 位于参考平面的 X 方向上。具体位置如图 7 所示。

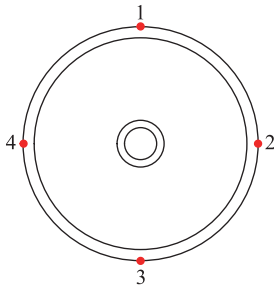


图 7 参考点位置

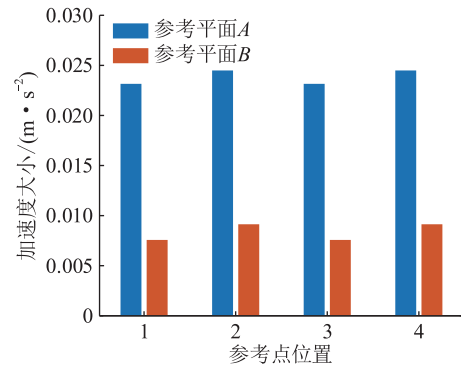
Fig.7 Positions of reference points

3.2 无缺陷情况

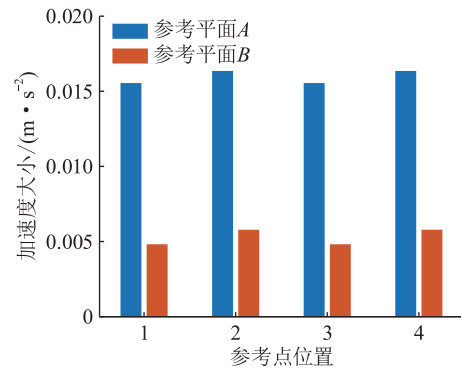
当 GIS 设备正常运行时,导杆基本不受力,外壳由于感应电流会产生磁场力。考虑到额定电流为 3 150 A,将电流等参数代入式(2)中,得到的磁场力 $F = 5.51k(1 - \cos(4\pi ft))$ 。文中在计算正常运行状态时,给予外壳所受正弦力大小为 5 N,频率为 100 Hz,作用时间为 0.5 s。

当施加正弦载荷后,2 个参考平面上的 4 个参考点的加速度信号的最大值如图 8(a)所示,各参考点的加速度最大值与平均值之差如图 8(b)所示。

由图 8 可知,参考平面 A 上参考点的加速度幅值均大于参考平面 B 上参考点的加速度幅值,无论参考平面 A 还是参考平面 B 上参考点 2、4 的加速度幅值的最大值均大于参考点 1、3 的加速度幅值的最大值。这可能是因为在建模过程中,参考平面 B 距离固定约束更近。综合考虑到建模情况及加速度幅值等因素,文中选择参考平面 A 上的参考点 4 作为基准参考点,其加速度信号的时域图如图 9 所示。



(a) 各参考点加速度最大值



(b) 各参考点加速度最大值与平均值之差

图 8 各参考点加速度最大值及最大值与平均值之差

Fig.8 The maximum acceleration of each reference point and the difference between the maximum acceleration and the average acceleration

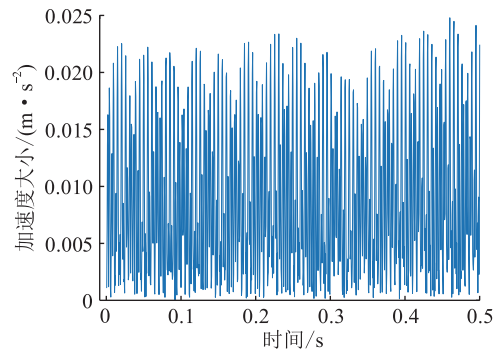


图 9 参考平面 A 参考点 4 总加速度时域

Fig.9 Time domain of total acceleration at reference point 4 of reference plane A

参考平面 A 上参考点 4 的 X, Y, Z 方向加速度信号的时域图及频谱图如图 10 所示。

对图 9 所得加速度的时域信号进行傅里叶变换,得到了参考平面 A 上参考点 4 的总加速度信号的频谱,具体如图 11 所示。

总加速度在多个频率处均出现分量的原因是总加速度幅值为 3 个方向加速度的平方和再开根号^[3],如式(4)所示。

$$a_1 = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (4)$$

式中: a_1, a_x, a_y, a_z 分别为总加速度、X 方向加速度、

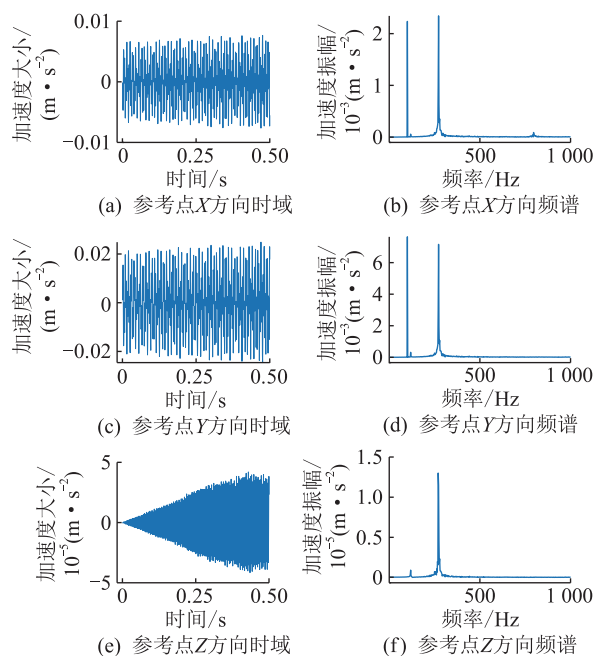


图 10 参考点各方向加速度时域与频谱

Fig.10 Acceleration time domain and spectrogram in each direction of the reference point

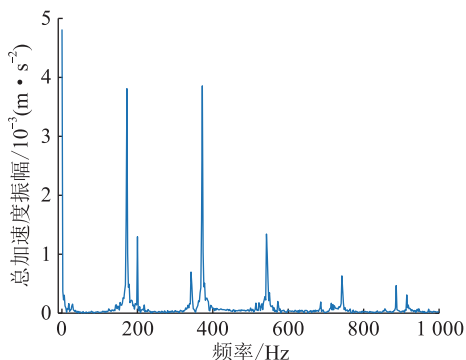


图 11 参考点总加速度频谱

Fig.11 Spectrogram of total acceleration at reference point

Y 方向加速度、Z 方向加速度幅值。

不同频率的信号叠加后求平方的结果如式(5)所示。

$$\begin{aligned}
 y &= (A_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2))^2 = \\
 &= \frac{A_1^2}{2} (\cos(4\pi f_1 t + 2\varphi_1) + 1) + \\
 &+ \frac{A_2^2}{2} (\cos(4\pi f_2 t + 2\varphi_2) + 1) + \\
 &+ A_1 A_2 \cos(2\pi(f_1 - f_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)) + \\
 &+ A_1 A_2 \cos(2\pi(f_1 + f_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)) \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中： A_1, A_2 分别为不同频率信号幅值； f_1, f_2 分别为不同频率信号的频率； φ_1, φ_2 分别为不同频率信号的相角； y 为不同频率的信号叠加的结果。

由式(5)可知，不同频率的信号叠加后求平方

所得结果的频率为原频率的倍频、差频及和频。由图 10 可知，X 和 Y 方向的加速度分量主要为 100 Hz 和 270 Hz，但 X 方向在 800 Hz 左右也有较少的加速度分量；Z 方向加速度分量主要分布在 270 Hz，在 100 Hz 左右也有较少的加速度分量；Y 方向加速度最大，X 方向次之，Z 方向加速度最小。由图 11 可知，总加速度有相当部分的直流分量，其余频率分量主要分布在 170 Hz、200 Hz、370 Hz 和 540 Hz 处。其中直流分量最多，170 Hz 及 370 Hz 处分量次之，200 Hz 及 540 Hz 处最少，在 750 Hz 左右、880 Hz 左右均有加速度分量，但这部分的加速度分量较少。该振荡频谱形成原因与式(5)中指出的不同频率信号叠加后求平方有关，体现了 GIS 设备外壳丰富的振动信号。

4 螺栓松动情况

考虑到 GIS 设备可能会出现螺栓松动缺陷，文中通过改变模型中的螺栓预紧力来模拟实际运行中可能存在的螺栓松动缺陷，分别对出现单、双和三螺栓松动缺陷进行仿真计算。当 GIS 设备出现螺栓松动缺陷时，所受电磁力情况与正常运行状态时相比基本不变，所以第 4 章仿真时外壳受力情况选择和第 3 章的受力情况保持一致。

4.1 单螺栓松动

出现单螺栓松动时，参考点总加速度的时域如图 12 所示。

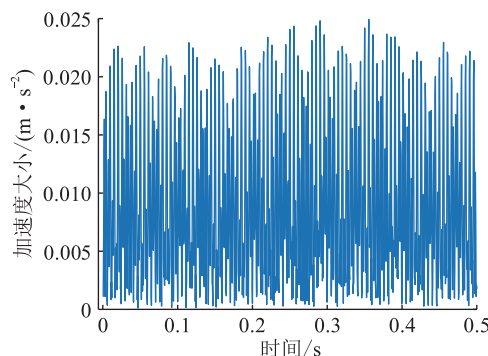


图 12 单螺栓松动时参考点加速度时域

Fig.12 Time domain diagram of reference point acceleration when a bolt is loose

对比图 9 与图 12 发现与无缺陷时相比，当 GIS 设备出现单螺栓松动情况时，加速度出现较小的增加。

4.2 双螺栓松动

出现双螺栓松动的情况时，参考点总加速度的时域图如图 13 所示。

对比图 9、图 12 和图 13 发现双螺栓松动时与

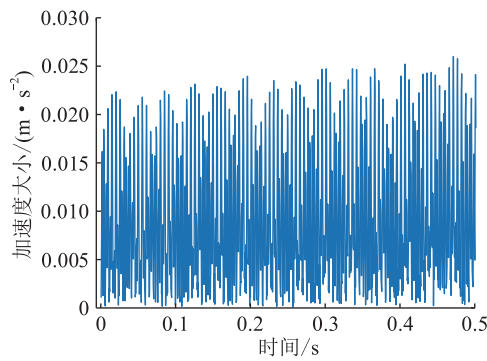


图 13 双螺栓松动时参考点加速度时域

Fig.13 Time domain diagram of reference point acceleration when two bolts are loose

无缺陷时和单螺栓松动时相比,加速度幅值有一定程度的增大。

4.3 三螺栓松动

出现三螺栓松动时,参考点总加速度的时域如图 14 所示。

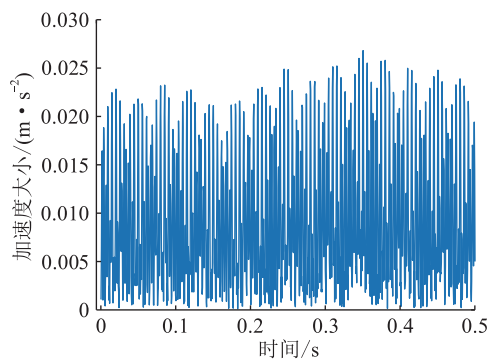


图 14 三螺栓松动时参考点加速度时域

Fig.14 Time domain diagram of reference point acceleration when three bolts are loose

由图 9 及图 14 可知,当出现三螺栓松动时,加速度的幅值有所增大,幅值增大程度与单螺栓松动时相比增加较多,但与双螺栓松动时的加速度幅值相比仅有细微增大。

4.4 不同松动对比

螺栓松动时与无缺陷的频谱对比见图 15。对比存在螺栓松动时与无缺陷时的频谱,可得在 170 Hz、200 Hz、370 Hz、540 Hz 左右及 750 Hz 左右的加速度分量幅值均有所改变。随着螺栓松动个数的改变,加速度不同频率分量的占比也在发生变化,具体到螺栓松动时各主要频率分量与直流分量比值变化,如表 2 所示。

由表 2 可知,当 GIS 设备在外壳连接处存在螺栓松动的缺陷时,在文中建模条件下所选参考点位置的 170 Hz 和 370 Hz 频率分量与直流分量的比值大于 1, 200 Hz 和 540 Hz 频率分量与直流分量的比

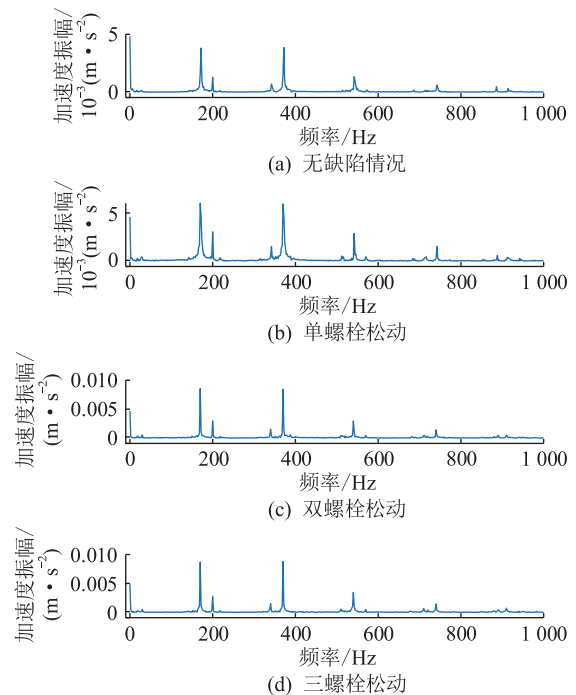


图 15 螺栓松动时频谱对比

Fig.15 Spectrogram comparison when bolts are loose

表 2 螺栓松动时各主要频率分量与直流分量比值

Table 2 Ratio of main frequency component to DC component when bolts are loose

缺陷类型	170 Hz	200 Hz	370 Hz	540 Hz
无缺陷	0.79	0.27	0.80	0.21
单螺栓松动	1.31	0.66	1.29	0.63
双螺栓松动	1.82	0.64	1.80	0.63
三螺栓松动	1.78	0.56	1.80	0.71

值大于 0.5。这些特有的频谱特征可用于及时判断 GIS 设备在外壳连接处是否出现螺栓松动的缺陷。

5 导杆不对中情况

当 GIS 出现导杆不对中的情况时,导杆发生偏移,导致外壳振动信号也发生改变^[3,12]。文中通过调整导杆所在位置仿真计算 2 种不同偏移情况下外壳振动信号的变化。

由第 1 章分析可知,当出现导杆不对中缺陷时,导杆所受电磁力合力不为零,同时考虑到交流电存在集肤效应,因此第 5 章仿真时在导杆表面施加频率为 100 Hz 的正弦力,作用时间为 0.5 s。考虑到电压、电流的变化会影响导杆受力情况,因此第 5 章仿真时分别计算导杆表面受力为 100~500 N 的 100 Hz 正弦力的情况。计算后发现结果只存在加速度幅值大小上的变化,对整体的频谱变化规律并无影响。综上第 5 章的仿真计算均是在导杆表面受力为 100 Hz 的 100 N 正弦力情况下进行。

5.1 不对中案例一

导杆不对中案例一是考虑到导杆仅存在单一方向上的错位,具体如图 16 所示,将导杆在 Y 方向上平移 3 cm。

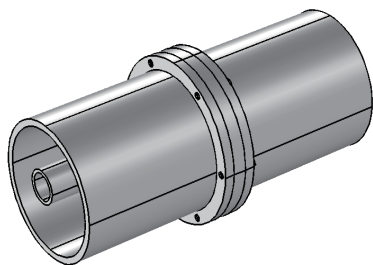


图 16 第一种导杆不对中情况

Fig.16 The first type of conductive rod out of center

在进行了仿真计算后,参考点总加速度的时域如图 17 所示。

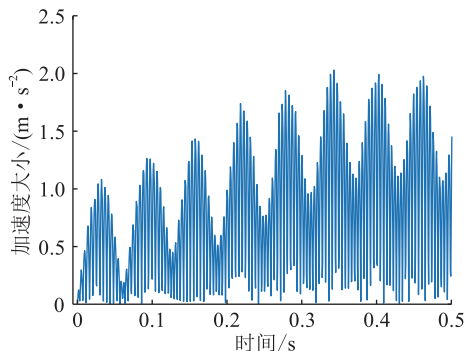


图 17 第一种导杆不对中时参考点加速度时域

Fig.17 Time domain diagram of reference point acceleration when the first conducting rod out of center

由图 9 和图 17 可知,与无缺陷的情况相比,当存在第一种导杆不对中情况时,参考点的加速度幅值有极显著的增大。

5.2 不对中案例二

导杆不对中案例二是考虑到导杆存在 2 个方向上的错位,具体如图 18 所示,将导杆在 X 方向上平移了 1 cm,在 Y 方向上平移了 1 cm。

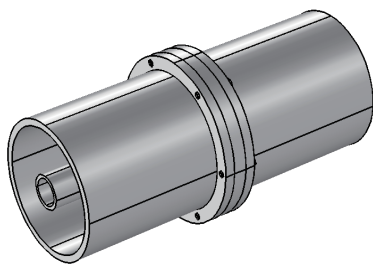


图 18 第二种导杆不对中情况

Fig.18 The second type of conductive rod out of center

进行仿真计算后,参考点总加速度的时域如图 19 所示。

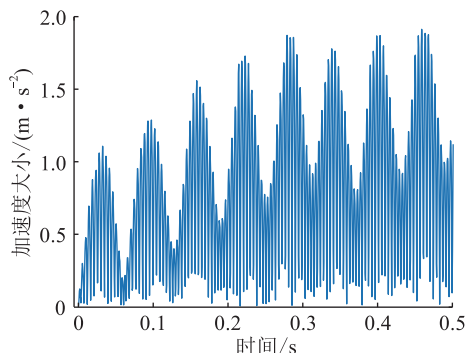


图 19 第二种导杆不对中时参考点加速度时域

Fig.19 Time domain diagram of reference point acceleration when the second conducting rod out of center

由图 9 和图 19 可知,相比于无缺陷的情况,只要存在导杆不对中的情况,外壳的加速度幅值就会显著增加。

5.3 不对中情况对比

无缺陷的情况下与 2 种不对中缺陷时的频谱对比如图 20 所示。第一种导杆不对中与第二种导杆不对中的频谱差值如图 21 所示。

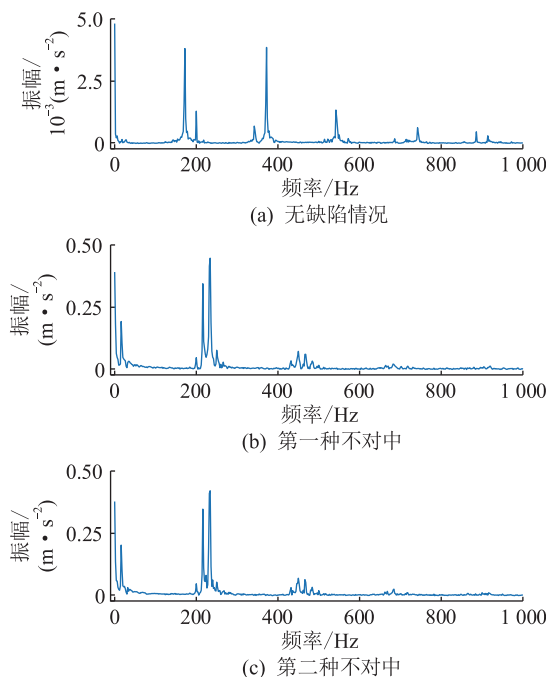


图 20 导杆不对中时频谱对比

Fig.20 Spectrogram comparison when conducting rods with misalignment fault

由图 20 可知,加速度的频谱与无缺陷情况或螺栓松动时相比有极大的不同,导杆不对中时在 370 Hz 处的频率分量较小,在直流分量及 215 Hz 和 235 Hz 处分量有较大提升。由图 20 和图 21 可知,出现第二种导杆不对中缺陷时的频谱与第一种导杆不对中时的频谱较为相似。但出现第一种导杆不对中缺陷时,在 235 Hz 的加速度频率分量相较于第二

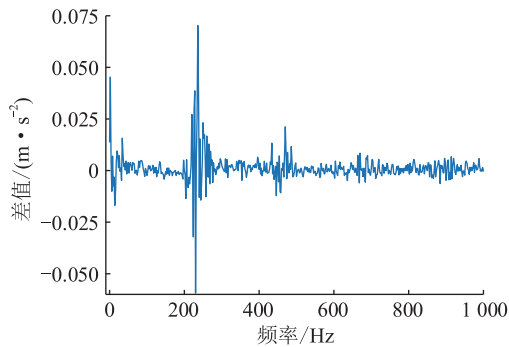


图 21 2 种导杆不对中缺陷时的频谱差值

Fig.21 The difference between the spectrogram of two kinds of conducting rods with misalignment fault

种导杆不对中缺陷时有所增加,在 215 Hz 的加速度频率分量要小于存在第二种导杆不对中缺陷时的频率分量。具体到导杆不对中时各主要频率分量与直流分量比值的变化如表 3 所示。

表 3 导杆不对中时各主要频率分量与直流分量比值

Table 3 Ratio of main frequency component to DC component when conducting rods with misalignment fault

缺陷类型	215 Hz	235 Hz
无缺陷	0.01	7.27×10^{-4}
导杆不对中案例一	0.88	1.15
导杆不对中案例二	0.92	1.11

由表 3 可知,当 GIS 设备存在导杆不对中的缺陷时,在文中建模条件下所选参考点位置的 215 Hz 和 235 Hz 处频率分量与直流分量的比值都远大于无缺陷情况下的比值。这些外壳加速度频谱特征的改变可作为一种有效的判据来判断 GIS 设备是否存在导杆不对中的缺陷。

6 结论

文中针对 GIS 设备可能存在的螺栓松动和导杆不对中 2 种机械缺陷,建立简化的三维仿真模型,通过固体力学的仿真计算发现与导杆受力大小无关的判据来确定 GIS 设备是否出现了机械缺陷。具体结果如下:(1) 当出现螺栓松动的机械缺陷时,文中所选参考点的振动加速度在主要频率分量 170 Hz 和 370 Hz 处与直流分量的比值均大于 1,双或三螺栓松动时该比值要大于单螺栓松动时;在占比相对较少的 200 Hz 和 540 Hz 处频率分量与直流分量的比值均大于 0.5;这些频谱特征可以用来判断 GIS 设备在外壳连接处是否出现了螺栓松动的缺陷。(2) 当出现导杆不对中的机械缺陷时,外壳加速度会有显著的增大;此时加速度的频率分量主要分布在 215 Hz 和 235 Hz,与无缺陷情况时和出现螺栓松动

时的加速度频谱图有着显著的区别,可以作为一种有效的判据来判断 GIS 设备中是否存在导杆不对中的缺陷。

文中得到的结论对于 GIS 设备的运行状态监测、机械缺陷判别和振动情况的后续研究具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 张书琴,张克选,岳宝强,等. GIS 的异响振动及其时变力分析[J]. 高压电器,2020,56(10):155-160,167.
ZHANG Shuqin,ZHANG Kexuan,YUE Baoqiang, et al. Analysis on abnormal vibration and its time-varying force of GIS[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(10):155-160,167.
- [2] 丁登伟,何良,龙伟,等. GIS 设备运行状态下振动机理及检测诊断技术研究[J]. 高压电器,2019,55(11):93-99.
DING Dengwei,HE Liang, LONG Wei, et al. Analysis on vibration mechanisms and detection diagnosis technology of GIS in operating condition [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55 (11):93-99.
- [3] 卞超,张正东,赵科,等. 基于有限元的 GIS 母线不对中机械振动特性研究[J]. 高压电器,2020,56(6):72-79.
BIAN Chao,ZHANG Zhengdong,ZHAO Ke, et al. Study on mechanical vibration characteristics of GIS bus misalignment based on FEM[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(6):72-79.
- [4] 齐卫东,牛博,胡德贵,等. 基于有限元的 GIS 水平母线外壳振动仿真研究[J]. 高压电器,2018,54(6):46-52,59.
QI Weidong,NIU Bo,HU Degui, et al. Vibration simulation of GIS horizontal bus shell based on FEM[J]. High Voltage Apparatus,2018,54(6):46-52,59.
- [5] 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. Review of GIS mechanical fault vibration detection research[J]. Shandong Industrial Technology,2015(17):261-263.
- [6] 邢敬. GIS 机械故障振动检测技术研究[D]. 沈阳:沈阳工程学院,2016.
XING Jing. Research on mechanical fault vibration detecting technology of GIS [D]. Shenyang:Shenyang Institute of Engineering,2016.
- [7] 侯焰. 基于异常振动分析的 GIS 机械故障诊断技术研究[D]. 济南:山东大学,2017.
HOU Yan. Research on fault diagnosis of machine based on vibration signal of GIS[D]. Jinan:Shandong University,2017.
- [8] 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.
- [9] 郝金鹏. 外壳振动信号在 GIS 故障诊断中的应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.
HAO Jinpeng. The applied research of shell vibration signal in GIS fault diagnosis[D]. Beijing:North China Electric Power University,2016.

- [10] OHSHITA Y, HASHIMOTO A, KUROSAWA Y. A diagnostic technique to detect abnormal conditions of contacts measuring vibrations in metal enclosures of gas insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(4): 2090-2094.
- [11] 钱家骊, 沈力, 刘卫东, 等. GIS 的壳体振动现象及其检测[J]. 高压电器, 1990, 26(6): 3-9.
QIAN Jiali, SHEN Li, LIU Weidong, et al. Vibration phenomena on GIS enclosure due to inner partial discharge and its detection[J]. High Voltage Apparatus, 1990, 26(6): 3-9.
- [12] 蒋玲, 曲全磊, 王志惠, 等. 高温差工况下长母线 GIS 设备振动特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 144-151.
JIANG Ling, QU Quanlei, WANG Zhihui, et al. Study on vibration characteristics of long-busbar GIS equipment in large temperature difference conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 144-151.
- [13] 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.
- [14] 黄清, 魏旭, 许建刚, 等. 基于振动原理的 GIS 母线触头松动缺陷诊断技术研究[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 99-104, 108.
HUANG Qing, WEI Xu, XU Jiangang, et al. Research of GIS bus loose contact fault diagnosis techniques based on mechanical vibration[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 99-104, 108.
- [15] 屈斌, 张利, 王永宁, 等. 基于振动信号的 GIS 机械松动与局部放电诊断方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 98-106.
QU Bin, ZHANG Li, WANG Yongning, et al. Study of mechanical looseness and partial discharge diagnoses of GIS based on vibration signals[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 98-106.
- [16] 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.
- [17] 贾劲颂. 基于 GIS 设备振动特性的故障检测技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
JIA Jinsong. Research on GIS fault detection based on vibration characteristics[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [18] 臧旭, 马宏忠, 吴金利, 等. 基于振动原理的 GIS 母线导体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.
- [19] 杨晓卫, 胡延涛. 电力系统中封闭母线的振动[J]. 电气制造, 2010, 5(12): 68-69.
YANG Xiaowei, HU Yantao. Vibration of a closed busbar in a power system[J]. Electrical Manufacturing, 2010, 5(12): 68-69.
- [20] 周甜, 李自品, 沈泉宇, 等. GIS 隔离开关触头温升多场耦合数值计算与分析[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 13-20.
ZHOU Tian, LI Zipin, SHEN Quanyu, et al. The numerical analysis on temperature rise multiphysics coupling of GIS disconnecter contacts[J]. Electric Power, 2018, 51(2): 13-20.
- [21] 马波, 吴旭涛, 李秀广, 等. GIS 温度场分布特性及影响因素的有限元仿真研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(3): 69-73, 79.
MA Bo, WU Xutao, LI Xiuguang, et al. Finite element simulation of temperature field distribution characteristics and influencing factors in GIS[J]. Insulating Materials, 2019, 52(3): 69-73, 79.
- [22] 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.
- [23] 马星光, 王晓一, 黄锐, 等. 基于复合特征的 GIS 振动信号特征提取方法[J]. 高压电器, 2021, 57(12): 83-89.
MA Xingguang, WANG Xiaoyi, HUANG Rui, et al. Extraction method of GIS vibration signal characteristic based on composite feature[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 83-89.
- [24] 赵洪山, 高玉峰. 基于振动特征估计的 GIS 设备故障检测与分析[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 114-120.
ZHAO Hongshan, GAO Yufeng. Fault detection and analysis of GIS based on vibration characteristic estimation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 114-120.
- [25] 王旭鹏. GIS 设备振动状态检测及隔离开关接触不良缺陷识别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
WANG Xupeng. Research on vibration state detection of GIS equipment and poor contact defect identification method for isolating switch[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.

作者简介:



徐志铓

徐志铓(1979),男,博士,副教授,研究方向为光纤分布式传感及在电气设备状态监测与故障诊断中的应用(E-mail:wzenjxx@sohu.com);

郭一帆(1996),男,硕士在读,研究方向为光纤分布式传感及在电气设备状态监测与故障诊断中的应用;

李先锋(1996),男,硕士在读,研究方向为光纤分布式传感及在电气设备状态监测与故障诊断中的应用。

Integrated operation and maintenance design of secondary equipment in substation based on GSP

PENG Zhiqiang¹, ZHANG Qibing², ZHENG Mingzhong¹, LUO Fei¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: The current information exchange interface and human-computer interaction interface of secondary equipment operation and maintenance in substation are not unified, which seriously restricts the efficient operation and maintenance of substation. In view of this situation, the research on the efficient operation and maintenance technology of secondary equipment in substation based on power system general service protocol (GSP) is carried out. Firstly, the architecture of integrated operation and maintenance of secondary equipment in substation is designed, and the information modeling method of integrated operation and maintenance of secondary equipment in substation based on substation operation and maintenance configuration language (SOMCL) is proposed. Then, the service interface and information interaction mechanism of integrated operation and maintenance of secondary equipment in substation are designed based on object-oriented technology (OOT), which achieves the goal of plug and play information interaction between operation and maintenance tools and the object to be transported. Finally, the integrated operation and maintenance tool of secondary equipment in substation is developed to realize the standardization and visualization of operation and maintenance of intelligent secondary equipment in substation, and achieves the goal of integrated and efficient operation and maintenance of secondary equipment in substation. The proposed method has been piloted in several new smart substations, which verifies the feasibility of the integrated operation and maintenance technology of secondary equipment in substation.

Keywords: smart substation; secondary equipment; integrated operation and maintenance; information model; general service protocol (GSP); object-oriented technology (OOT)

(编辑 吴楠)

(上接第 164 页)

Influence of mechanical faults on the vibration of GIS shell

XU Zhiniu¹, GUO Yifan¹, LI Xianfeng¹, ZHAO Lijuan¹, JIN Hu², HU Weitao³

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding

071003, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. State Grid

Hebei Electric Power Co., Ltd. Extra High Voltage Branch, Shijiazhuang 050071, China)

Abstract: The gas insulated switch (GIS) vibrates during operation. In order to analyze the difference between the vibration signals for loosed bolts or misaligned conducting rods at the connection of GIS shell and the normal operation without defects, a 3D model of 252 kV three-phase box-type GIS is established in this paper. Computational modal analysis is firstly performed on the model in the field of solid mechanics. Secondly, the natural frequency is determined, and the representative sixth mode shapes are obtained. By applying different loads and changing the parameters of the model, the time-domain signals of the vibration acceleration of GIS shell under the state of no fault, different number of bolts loose and different cases of conducting rod misalignment are solved in the solid mechanics field. Then the frequency-domain signals are obtained through spectrum analysis. By comparing and analyzing the difference of vibration acceleration signals of GIS shell in several cases, the characteristics of vibration acceleration of GIS shell in case of bolt loosening fault and conducting rod misalignment fault are obtained. Finally, the criteria for the above faults are obtained. Some certain reference value about the follow-up GIS equipment running condition monitoring, mechanical fault identification and vibration research have been provided in the conclusion of this paper.

Keywords: gas insulated switch (GIS); finite element; natural frequency; vibration signal; bolt looseness; conducting rod misalignment

(编辑 李栋)