

GIS 正常运行与松动故障下的振动机理^{*}

臧旭¹, 孙诚斌¹, 张甜谨¹, 杨嵩¹, 段大卫²

(1. 国网江苏省电力有限公司镇江供电分公司, 江苏 镇江 212000;

2. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 气体绝缘开关设备(GIS)运行时常发生开关部件及电气连接点的松动故障, 引发机械的异常振动。分别从导电杆所受电磁力与涡流两方面推导三相共体式 GIS 与三相分体式 GIS 受力振动机理, 进行仿真建模, 证明了振动机理的正确性。建立松动故障时接触面受力振动模型, 仿真计算松动时接触面的振动位移, 并对比正常运行时振动特性与松动故障时振动特性的差异, 发现松动故障时振动信号在某些频段的能量会增加, 常见的是在 1 000~2 000 Hz 段的能量增加明显。进行现场实际的松动故障模拟, 采集 GIS 振动信号, 对振动信号进行时频变换提取频谱特征, 验证了仿真计算的正确性。

关键词: 故障诊断; 气体绝缘开关设备(GIS); 松动故障; 涡流; 振动特性差异

中图分类号: TM595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)06-0076-07

doi: 10.12177/emca.2022.036

Vibration Mechanism of GIS Under Normal Operation and Looseness Fault^{*}

ZANG Xu¹, SUN Chengbin¹, ZHANG Tianjin¹, YANG Song¹, DUAN Dawei²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Zhenjiang Power Supply Branch, Zhenjiang 212000, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The looseness fault of switch parts and electrical connection points often occurs in the operation of gas insulated switchgear (GIS), which leads to abnormal mechanical vibration. The vibration mechanism of three-phase community GIS and three-phase split GIS is derived from the electromagnetic force and eddy current on the conductive rod respectively, and the correctness of the vibration mechanism is proved by simulation modeling. The mechanical vibration model of the contact surface in the case of looseness fault is established, and the vibration displacement of the contact surface in the case of looseness is calculated by simulation. By comparing the vibration characteristics of normal operation with those of looseness fault, it is found that the energy of vibration signal will increase in some frequency bands when loosening fault occurs, and the energy increase is obvious in the 1 000~2 000 Hz range. By simulating the actual looseness fault on site, collecting the GIS vibration signal, and extracting the spectrum characteristics of the vibration signal by time-frequency transformation, the correctness of the simulation calculation is verified.

Key words: fault diagnosis; gas insulated switchgear (GIS); looseness fault; eddy current; vibration characteristic difference

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)作为电力系统高压输电的重要设备,目前在电力系统中的

运用越来越广泛。虽然 GIS 设备的运行可靠性高,但机械故障与绝缘故障也时有发生。据国际大电网会议(CIGRE)统计,GIS 常见故障中机械故障占比约 44%,GIS 的非常见故障中机械故障

收稿日期: 2022-03-07; 收到修改稿日期: 2022-05-20

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51577050); 国网江苏省电力公司重点科技项目(J20200040)

作者简介: 臧旭(1994—),男,硕士,工程师,研究方向为 GIS 故障诊断。

占比约 39%^[1-2]。国内统计表明,由安装缺陷、螺丝紧固件松动、触头松脱接触不良等电气连接点松动引发的故障比例约占 39.3%,与绝缘故障比例相当,所以有必要对 GIS 的松动故障进行诊断研究^[3-4]。振动法主要应用于开关设备断路器故障或隔离开关动静触头脱落等方面,目前对于 GIS 机械故障的研究,大多利用振动法测得故障与正常时的振动数据,再通过试验数据挖掘故障特征量(主要是频域特征量)作为故障诊断依据,但都缺少理论的证明与支撑。

文献[5]利用振动法带电检测动触头操作箱对隔离开关的接触状态并进行状态评估,利用频谱分布特征区别是否发生触头的松动故障,但对于振动理论解释较少,且未能给出故障诊断的理论依据,故障诊断特征量提取主要依赖于试验数据,缺少理论层面的分析。文献[6]详细推导了三相共体式与三相分体式 GIS 的受力振动原理,公式与理论都较为全面,分析了各种引发 GIS 振动的原因。但对于涡流引发振动以及松动故障引发振动这两类重要的振动原理推导较为简单,未能结合试验或仿真结果证明其理论的正确性,故有必要进一步完善这两种理论下的 GIS 振动机理。

本文主要对 GIS 正常与异常运行时的受力振动理论进行更深入的研究,分别从导电杆所受电磁力与涡流两方面推导三相共体式 GIS 与三相分体式 GIS 受力振动机理,通过仿真建模证明振动机理的正确性;建立松动故障时接触面受力振动模型,进行受力与运动分析计算;最后结合现场正常与异常运行时的数据频谱特征证明理论的正确性,对 GIS 受力振动理论进行完善。

1 GIS 正常运行时振动原理与仿真

对于 GIS 管体封装式设备振动机理,目前国内外学者说法不一,本文主要从 GIS 外壳体上感生涡流在电磁场作用下受力振动和壳体内部载流导体间相互作用力引发振动两方面进行分析,对于文献[7]提到的磁致伸缩效应引发的振动不作考虑,主要因为 GIS 外壳现在多由铝合金制成,不存在磁致伸缩效应。

1.1 涡流引发壳体振动原理

GIS 腔体中的导电杆带电后会在外壳体上感

生出感应电动势,通过金属壳体涡流自回路感应产生涡流,在磁场作用下产生电磁力进而引发壳体的振动^[8-11]。涡流受力分析示意图如图 1 所示。

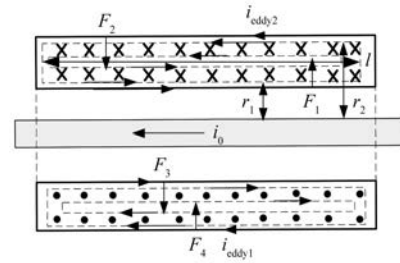


图 1 外壳体涡流受力分析图

假设导电杆在外壳内部产生的磁场均匀分布,长导体通以正弦交流电 $i_0 = I_m \cos(\omega t)$,由安培环路定理求出壳体上磁感应强度:

$$\oint B dl = \mu_0 \mu_r \sum i \quad (1)$$

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

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

式中: i 为环路中电流; i_0 为导体中流过的瞬时电流; I_m 为电流幅值; t 为时间; 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; l 为涡流回路从左至右的跨度。

涡流回路中磁通 Φ 计算如下:

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

式中: r_2 和 r_1 分别为涡流上、下回路与导电杆中心的距离。

计算得到涡流回路的电流 i_{eddy} 为

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

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)得到壳体受力最终结果:

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

对于 GIS 壳体,周围磁场的交变频率为电流频率,而壳体受到电磁力的主要频率为 2 倍的电流频率,电流频率一般是 50 Hz,故电磁力与振动频率以 100 Hz 为主。由式(7)可知,距离导电杆越远导体所受的电磁力越小。

1.2 涡流引发振动的有限元仿真

为验证上述理论的计算结果,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、外部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。

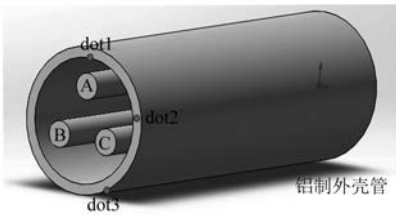


图 2 GIS 仿真模型结构图

仿真模型中外壳管长度为 1.5 m,外壳直径为 380 mm,内壳直径为 330 mm,导杆直径 70 mm,以管体中心为参考点对称分布,相互成 120°。GIS 的二维瞬态电磁场仿真模型中,采用铝制材料进行仿真计算,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,仿真参数如表 1 所示,得到磁感应强度云图如图 3 所示。

表 1 壳体与金属导体材料及参数		
参数名称	外壳参数值	导体参数值
相对磁导率/(H·m ⁻¹)	1	0.9
电导率/(S·m ⁻¹)	1 100 000	3 870 000
密度/(kg·m ⁻³)	8 055	8 933
泊松比	0.3	0.38
壳体厚度/mm	25	—
导电杆直径/mm	—	70

计算图 2 中三个点的磁感应强度,绘制关于时间的变化曲线如图 4 所示。

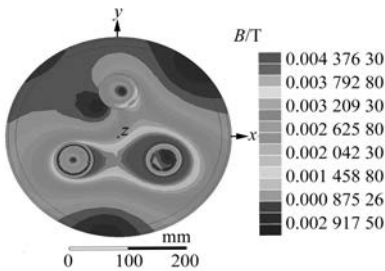


图 3 9 ms 时母线管断面磁感应强度云图

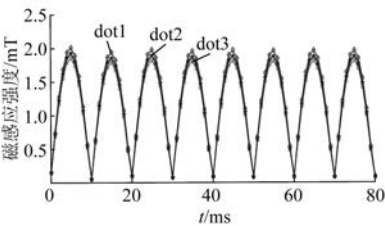


图 4 各点处瞬态磁感应强度

由计算结果可知,壳体上各点处的磁感应强度随时间呈周期性变化。磁感应强度计算取绝对值,因此均在正半轴,实际其变化周期与通入电流的交变周期一致。计算各点所受电磁力的大小,计算结果如图 5 所示。

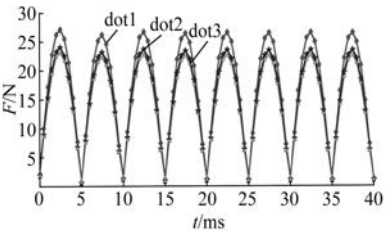


图 5 各点上的电磁力大小

由计算结果可知,各点所受电磁力的变化频率为 2 倍的电流交变频率即为 100 Hz,因此仿真所得电磁力变化规律与式(7)的推导结果一致,证明了涡流产生电磁力公式的正确性。

1.3 导电杆受力振动原理分析

GIS 腔体中的三相导体在有电流流过时,会在周围产生各自的磁场,从而对邻近的导体产生相互作用力,特别是当导体距离相对较近时,产生的作用力也较明显。对于三相分体式的 GIS,铝制外壳的阻隔起到一定的磁场屏蔽作用。但对于三相共体式 GIS,由于三相导体布置在同一个金属封闭壳体内,导体间电磁力作用非常明显,这也

是引发振动的主要原因^[12-15]。以 a 相导体作为受力研究对象,假设各相导体流过的电流三相对称为 $i_a = I_m \sin(\omega t)$, 则 $i_b = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$, $i_c = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$ 。如图 6 所示,给出 a 相导体某一瞬间磁场分布图,其中 b、c 两相对 a 相的磁感应强度用 B_{ba} 与 B_{ca} 表示,三相导体间距离分别为 l_{ab} 、 l_{ca} 、 l_{bc} ,实际中认为 $l_{ab} = l_{ca} = l_{bc} = l$ 。

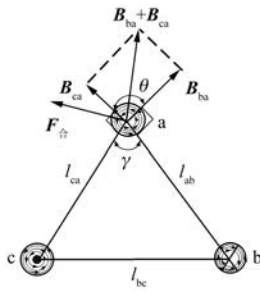


图 6 三相导体杆受力示意图

根据无限长导体的电磁感应强度计算公式, b、c 相导体对 a 相导体产生的电磁感应强度分别为

$$B_{ba} = \frac{\mu_0 \mu_r I_m}{2\pi l_{ba}} \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (8)$$

$$B_{ca} = \frac{\mu_0 \mu_r I_m}{2\pi l_{ca}} \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (9)$$

由余弦定理计算得到 a 相导体的合成磁场为

$$B_{a\text{合}} = \sqrt{B_{ba}^2 + B_{ca}^2 - 2B_{ba}B_{ca}\cos(180^\circ - \theta)} = \sqrt{B_{ba}^2 + B_{ca}^2 - 2B_{ba}B_{ca}\cos\gamma} \quad (10)$$

$$\cos\gamma = \frac{l_{ab}^2 + l_{ca}^2 - l_{bc}^2}{2l_{ab}l_{ca}} \quad (11)$$

考虑到 $l_{ab} = l_{ca} = l_{bc} = l$, 将式(8)、式(9)、式(11)代入式(10), 得到:

$$B_{a\text{合}} = \frac{\sqrt{3}\mu_0\mu_r I_m}{4\pi l} \quad (12)$$

假设导体杆 a 的长度为 l_a , 根据电磁力计算公式, 可算得导体所受电磁力大小为

$$F_a = B_{a\text{合}} i_a l_a = \frac{\sqrt{3}\mu_0\mu_r I_m^2 l_a}{4\pi l} |\sin(\omega t)| \quad (13)$$

由式(13)可知, GIS 导体杆受到的电磁力是周期性变化的, 振动频率与电磁力频率一致, 为工频 50 Hz。因此, 对于三相共体式的 GIS, 导体所受电磁力以 50 Hz 作为振动的主频率。建立三相导体的电磁场仿真模型如图 7 所示, 仿真参数见表 2。

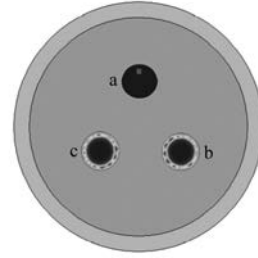


图 7 三相导体杆电磁场仿真模型

表 2 三相导体杆参数设定

参数名称	参数值
三相导体距离/mm	100
导体杆长度/mm	500
相对磁导率/(H·m ⁻¹)	0.2
通入杆中电流/A	10

三相导体通入三相对称交流电后, 求解 a 相导体上某点处电磁力大小, 如图 8 所示。由图 8 可知, 0.2 s 后仿真计算结果稳定, 导体杆所受电磁力交变并且变化周期为 0.01 s。由于计算的是电磁力的大小即其绝对值, 故实际周期为 0.02 s, 仿真结果与理论推导一致, 证明了式(13)的正确性。

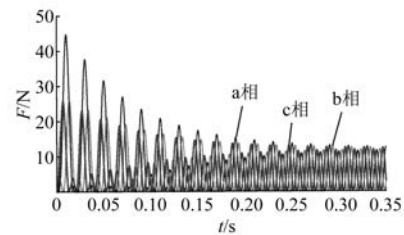


图 8 三相导体杆所受电磁力大小

2 GIS 异常运行时振动原理与仿真

2.1 GIS 松动故障下的振动机理

GIS 内部的电气设备较多, 机械故障中触头、导杆及电气连接点松动属于常见故障, 对于母线、隔离开关、断路器等部件连接点在电流通过时都会发生振动, 振动原因是流过接触面上的电流之间的相互作用^[16-18], 其受力示意图如图 9 所示。接触面间属于多斑点式接触, 接触点所受电磁力为

$$F = F_0 + F_m \cos(2\omega t) \quad (14)$$

式中: F_0 为恒力; F_m 为交变电磁力幅值; ω 为电磁力变化角频率; t 为时间。

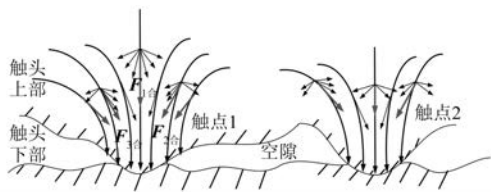


图9 触头接触面受力分析图

接触面的振动可认为是电磁力引起的接触面收缩运动。建立接触面单自由度受力振动模型如图10所示,并进行振动分析。将触点间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,利用弹簧部分模拟碰撞时的弹性形变,阻尼部分模拟库仑力等产生的阻尼对运动的阻碍作用^[19-21]。

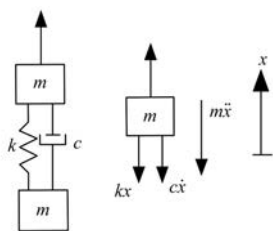


图10 接触面受力振动模型

弹性系数 k 与阻尼系数 c 和接触点的半径及接触面光滑程度有关,阻尼系数 c 主要由库仑阻尼引起,与接触点接触紧密程度有关,接触越紧密 c 越大,当松动间隙变大时阻尼系数减小明显,触点收缩运动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 + F_m \cos(2\omega t) \quad (15)$$

式中: x 为触点间运动位移; m 为两侧受力质点。

求解上式的微分方程解:

$$x_1 = e^{-\xi\omega_n t} [c_1 \cos(\omega_d t) + c_2 \sin(\omega_d t)] + A \cos(2\omega t + \theta) + B \quad (16)$$

$$\begin{cases} \omega_d = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \\ \xi\omega_n = \frac{c}{2m} \end{cases} \quad (17)$$

式(16)中位移由三部分组成,后面两部分为时不变位移量,作用是使得位移发生周期性变化;前面的位移量是时变位移量,由角频率为 ω_d 的振动位移叠加而成^[22-24]。当接触点接触不紧密时,阻尼系数 c 显著减小,则时变位移衰减缓慢,最终影响触点的运动,从频域分析来说即是振动信号

在多个不同频段内的能量均有所增加。

2.2 GIS 松动故障下振动仿真计算

上述理论需要进行计算验证。现假设松动时有多个接触点,仿真中取接触点个数为100,认为触点位移均沿同一方向,振动叠加不考虑角度问题,得到如下振动位移计算式:

$$\begin{cases} x_1 = e^{-\xi_1\omega_{n1}t} [c_{11} \cos(\omega_{d1}t) + c_{12} \sin(\omega_{d1}t)] + A_1 \cos(2\omega t + \theta_1) \\ x_2 = e^{-\xi_2\omega_{n2}t} [c_{21} \cos(\omega_{d2}t) + c_{22} \sin(\omega_{d2}t)] + A_2 \cos(2\omega t + \theta_2) \\ \vdots \\ x = \sum_{i=1}^{100} e^{-\xi_i\omega_{ni}t} [c_{i1} \cos(\omega_{di}t) + c_{i2} \sin(\omega_{di}t)] + A_i \cos(2\omega t + \theta_i) \end{cases} \quad (18)$$

选取多组不同的阻尼系数 c 、弹性系数 k ,得到不同的角频率 ω_{di} 与阻尼系数 $\xi_i\omega_{ni}$,部分参数如表3所示。

表3 部分仿真参数

阻尼系数 $\xi_i\omega_{ni}$	ω_{d1}	ω_{d2}	二倍频振幅
0.012	60π	80π	0.01
0.015	100π	120π	0.01
0.010	140π	160π	0.01
0.021	180π	200π	0.01
0.030	220π	240π	0.01
0.035	260π	280π	0.01
—	—	—	—

仿真得到时域的振动波形图如图11所示,并进行频域变换得到频谱如图12所示。由仿真结果可知,松动类故障会导致某些频率的振动信号幅值增加,并且幅值增加的信号频率是不能确定的,与接触点曲率半径、阻尼系数和弹性系数等多种因素有关。接触点越多,时变位移量衰减越缓慢,各个频段信号能量变化越显著。由计算结果可知,能量增加的主要频段是1 000~2 000 Hz。此外,松动也会导致构件结构改变,使得固有频率变化。

3 试验对比验证

3.1 试验设置

本次试验是基于型号为ZF7A-126的126 kV三相共体式GIS设备的试验测试,包含了断路器、

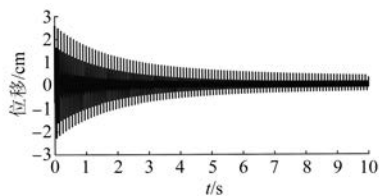


图 11 振动位移时域图

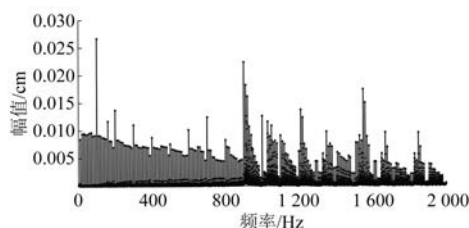


图 12 振动位移频谱分析

隔离开关、母线与导电杆等主要一次设备,模拟松动故障,采集松动故障与正常运行时的振动数据。

GIS 振动检测系统由压电式振动加速度传感器、1DH5922D 动态测试分析仪(最大采样频率为 125 460 Hz)及计算机终端组成。振动信号加速度传感器型号为 1A212E,其灵敏度为 $50 \text{ mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$,采样频率设置为 20 kHz,分别按轴向与径向布置于盆式绝缘子外壁上,布置图如图 13 所示。

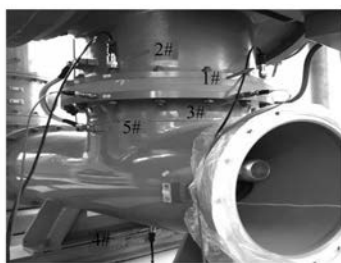


图 13 测点位置布置图

本次故障模拟的是母线导电杆松动故障。GIS 母线主要起汇流作用,流过的电流较大,振动也较为显著,长期运行下母线导电杆的连接螺丝可能发生松脱。因此,可对母线的固定螺丝进行松脱故障试验,测取正常与异常时 GIS 外壳的振动信号并进行频谱分析,对比故障前后信号的频谱特征验证上述理论,并进行松动故障的判别与诊断。

3.2 试验结果分析

经过对 GIS 正常运行与母线导电杆的固定螺

丝松动两种状态进行试验,得到这两种状态下的振动时域信号与频域分析结果如图 14 所示。

固定螺丝松动时,时域信号的振动幅值相比正常时显著增大。对比图 14(b)和图 14(d)即正常与松动故障时 1 000~2 000 Hz 的频域信号幅值,可知故障时该频段信号幅值是增大的。该频段的信号幅值增加与故障位置和故障类型有关,这与上述的松动故障下振动位移仿真结果一致,因此也可将该频段信号的幅值变化作为故障判断的特征依据。

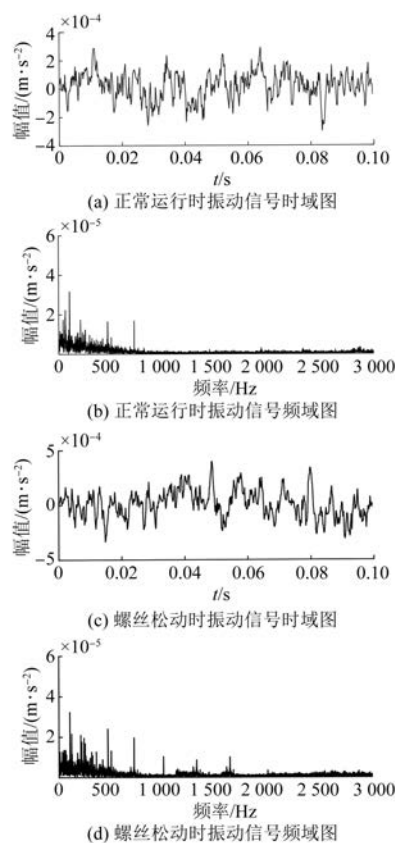


图 14 正常与异常运行时测点振动信号

4 结 语

(1) 本文分析了 GIS 外壳涡流引发振动的原理及壳内导体间电磁力作用的振动原理,分别进行仿真分析以验证 GIS 的受力情况与振动变化规律,结果表明正常运行时的 GIS 设备振动频率为 100 Hz 或者 50 Hz 都有可能,这是 GIS 设备的受力原理不同所导致的。

(2) 母线导电杆发生松动故障时,GIS 外壳振动信号中 1 000~2 000 Hz 的频段信号幅值有

所增加。这一结果与 GIS 松动故障下的仿真计算具有相似性,可以为后续 GIS 松动故障的研究提供理论依据,也可作为提取故障特征的参考为松动类机械故障诊断提供有效的判别方法。

【参考文献】

- [1] MA H Z, LIU B W, XU H H, 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.
- [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.
- [3] REN M, DONG M, XIAO Z G, 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.
- [4] 陈予伦,常丁戈,杨鼎革,等. GIS 中金属颗粒诱发沿面局部放电发展过程的研究 [J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 153.
- [5] 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.
- [6] 杨景刚,刘媛,宋思齐,等. GIS 设备机械缺陷的振动检测技术研究 [J]. 高压电器, 2018, 54(11): 86.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 张连根,路士杰,李成榕,等. 气体绝缘组合电器中微米量级金属粉尘运动和放电特征 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 444.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] WU M C, YU A B, CHEN Q J, et al. Design of adjustable chip breaker for PCD turning tools [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 172: 105411.
- [17] 刘宝稳,汤容川,马钰洲,等. 基于 S 变换 D-SVM AlexNet 模型的 GIS 机械故障诊断与试验分析 [J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2526.
- [18] 张亮,何聪,李军浩,等. 振荡雷电冲击电压下气体绝缘组合电器中极不均匀场击穿特性研究 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(12): 2672.
- [19] 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.
- [20] 王振浩,顾欣然,孙福军. 基于 EMD 近似熵的高压断路器故障诊断 [J]. 高压电器, 2018, 54(10): 151.
- [21] 韩世杰,吕泽钦,隋浩冉,等. 基于 EFPI 传感器的 GIS 局部放电模式识别研究 [J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 149.
- [22] 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.
- [23] 陈继明,许辰航,李鹏,等. 基于时频分析与分形理论的 GIS 局部放电模式识别特征提取方法 [J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 287.
- [24] 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(1): 2.