

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.06.011

基于有限元的GIS母线不对中机械振动特性研究

卞超¹, 张正东¹, 赵科², 树婷³

(1. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 南京 211100; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211100;
3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: GIS母线较长或安装错位时,会出现母线不对中现象。这种机械故障会导致GIS导杆受力不平衡,引起机械振动。文中通过有限元仿真的方法,建立单相GIS母线模型,并施加正弦载荷模拟不对中故障激励,探究其振动特性。采用有限元软件对母线模型进行计算模态分析,得到结构的固有频率和振型。通过分析母线外壳X、Y、Z方向振动加速度以及总加速度时域图和频谱图,获得各个方向上振动的频谱特征,总结自由状态下和约束条件下母线外壳的传播特性。

关键词: GIS; 机械振动; 有限元仿真; 母线不对中

Study on Mechanical Vibration Characteristics of GIS Bus Misalignment Based on FEM

BIAN Chao¹, ZHANG Zhengdong¹, ZHAO Ke², SHU Ting³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Maintenance Branch, Nanjing 211100, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Nanjing 211100, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: When the GIS bus is long or installed incorrectly, the bus will not be centered. This mechanical failure will cause the GIS guide rod to bear unbalanced force and cause mechanical vibration. In this paper, a single-phase GIS bus model is established by finite element simulation method, and a sinusoidal load is applied to simulate misalignment fault excitation and explore its vibration characteristics. FEM software is used to calculate the model analysis of the bus model, and the natural frequency and mode shape of the structure are obtained. By analyzing the vibration accelerations of the busbar shells in the X, Y, and Z directions, as well as the time-domain plots and spectrograms of the total acceleration, the spectral characteristics of the vibrations in all directions are obtained, and the propagation characteristics of the busbar shells under free conditions and constraints are summarized.

Key words: GIS; mechanical vibration; finite element simulation; misaligned bus

0 引言

金属绝缘气体封闭开关设备(gas insulator switchgear, GIS),是一种先进的高压开关电器设备,主要包括断路器、母线、隔离开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、套管等电器元件,全部电器元件均封闭在金属外壳内,并充有SF₆气体作为绝缘介质。GIS与传统的敞开式设备相比,由于其具有体积小、占用空间面积小、重量轻、安装维护方便、运

行安全以及环境适应能力强等优点,近年来得到了不断的推广应用^[1-3]。

随着GIS长期带电运行,服役时间的不断增加,GIS在运行过程中也渐渐暴露出各种问题,除发生放电性故障外,机械振动故障也是导致事故发生的主要原因之一。早期GIS故障检测的方法主要都是针对GIS的放电性故障^[4-6],目前针对GIS异常机械振动故障信号检测没有较系统的研究^[7-8]。当GIS存在如紧固螺栓松动、接触不良、母线不对中等机械

性缺陷且未发生放电性缺陷时, GIS会受机械力作用产生异常振动^[9-10]。GIS的异常振动对GIS本体具有很大危害, 严重影响设备的稳定运行。为了提高GIS设备运行的安全性、稳定性和可靠性, 且尽可能的延长其检修周期, 对其内部机械故障振动信号及检测方法的研究是十分必要的。

GIS中母线是其重要组成部件之一, 是GIS中各种组件之间的电气连接设备, 高电压等级、大规模电站中GIS设备母线长度达到几百米甚至上千米^[11], 因此, 一旦制造工艺不良或安装中出现安装工序不当等问题, 可能导致母线不对中造成内部机械缺陷, 在运行中极易发生绝缘故障^[12]。

文中基于有限元仿真软件, 模拟GIS母线不对中情况下的导杆受力, 以此为激励, 建立GIS母线的结构动力学模型, 通过振动信号分析法, 分析其时域波形及频谱分量, 得到母线外壳的振动信号与特征, 以及振动信号的传播特性。为GIS的受力振动研究、进行机械故障状态检测与故障分析提供参考依据。

1 GIS母线不对中机械振动力学机理

文中研究主要针对三相分体的GIS母线, 其母线外壳中只有一个单相高压导杆。高压导杆有电流流过, 接地的外壳无电流, 则只有高压导杆产生磁场, 因此单相GIS中的高压导杆不会承受洛伦兹力作用。但是将高压导杆看作是电容器高压极板, 外壳看作接地极板时, 其会受到电压作用下的静电力即库仑力作用。

单相GIS中当高压导杆位于母线中心即母线严格对中时, 由于导杆受到的库仑力严格对称, 合力为零, 见图1(a), 从总作用力角度来说此时导杆表现不受力的作用, 不会产生机械振动。但实际母线严格对中只是理想情况, 当母线较长或安装存在错位等情况都很容易导致母线不对中, 使得作用在导杆上的库仑力不平衡, 作用于母线引起机械振动^[13-16], 见图1(b)。

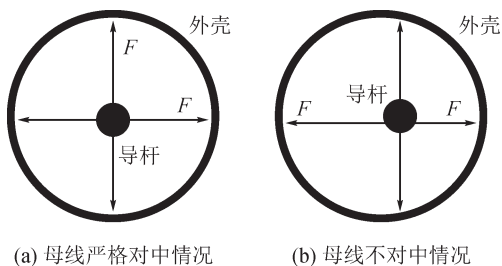


图1 母线不同状态承受的库仑力情况

Fig. 1 Coulomb force on different states of the bus

根据以上分析, 将高压导杆看作电容器的高压

极板, 母线外壳看作是电容器的接地极板, 则导杆所承受的库仑力推导如下^[17-18]。

电容器极板间总能量为

$$W = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{\epsilon_0\epsilon_r S}{2d}U^2 \quad (1)$$

将电容器两板间距离虚位移, 利用虚功原理, 则电容器总能量变化为

$$\delta W = -\frac{\epsilon_0\epsilon_r S}{2d^2}U^2\delta d \quad (2)$$

又根据力和能量变化的关系, 设两板间相互作用力为 F , 则有

$$F\delta d = -\delta W \quad (3)$$

从而求得作用力为

$$F = \frac{\epsilon_0\epsilon_r S}{2d}U^2 \quad (4)$$

式(4)中: d 为两极板间的距离; S 为受力极板的面积; U 为外加电压。

实际运行中GIS母线的外加电压周期性变化, 则式(4)可进一步推导为

$$F = \frac{\epsilon_0\epsilon_r S}{2} \cdot \frac{U^2}{d^2} = \frac{\epsilon_0\epsilon_r S}{2d^2} \cdot U_m^2 \cos^2 \omega_0 t = \frac{\epsilon_0\epsilon_r S}{2d^2} \cdot U_m^2 \cdot \frac{1}{2}(1 + \cos 2\omega_0 t) \quad (5)$$

由以上推导分析得出, 当出现母线不对中的情况导致的导杆受力不平衡, 则导杆会承受两倍于电压频率的库仑力, 在工频下工作时则承受库仑力频率为100 Hz。

根据合力效应, 将不对中的GIS母线的导杆—外壳结构, 可等效为接地圆柱导体—线电荷模型, 见图2。模型中线电荷与圆柱导体的轴线平行, 间距为 d 。根据静电感应原理, 圆柱导体上的负电荷会由于吸引作用运动到接近线电荷的一端; 圆柱导体上的正电荷会由于排斥作用运动到远离线电荷的一端, 并沿着导线入地。因此, 载流导体的电荷主要分布在其表面上^[19-20]。由此可以得出有限元仿真中荷载力的施加位置, 将力施加在导杆的外壳上。

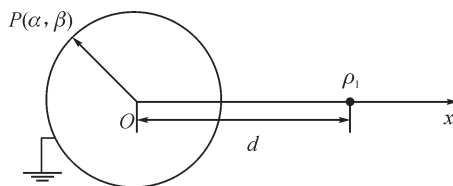


图2 接地圆柱导体—线电荷模型

Fig. 2 Grounded cylindrical conductor-line charge model

2 GIS母线的有限元分析

文中对GIS母线的有限元仿真工作应用了多个仿真软件来完成, 仿真工作包含构建几何仿真模

型、对模型进行前处理,前处理主要包括有限元网格划分、定义实常数、创建PART、定义材料属性、定义接触界面、施加约束、荷载等;进行有限元分析求解、对模型进行后处理,得到振动信号。

2.1 仿真模型建立

实际的GIS结构复杂,组成部件很多,如果按照实际结构建模由于大量复杂人为操作会提高模型失误的可能性,导致仿真求解收敛困难、分析无法进行,会影响仿真结果的准确性和精确程度。因此在对母线进行整体模型建立时,文中在原有结构的基础上对局部结构进行了合理简化^[21]。仿真建立的GIS母线模型由GIS母线外壳、导杆和绝缘子组成,具体建模尺寸为:总长0.8 m;母线外壳直径0.38 m;绝缘子直径0.5 m;导杆直径0.125 m。几何仿真模型见图3。

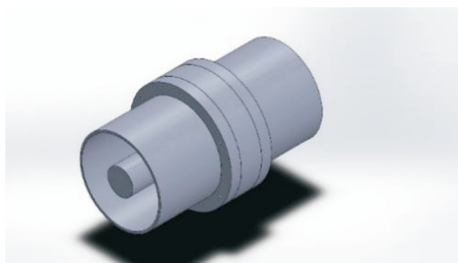


图3 GIS母线模型

Fig. 3 GIS bus model

2.2 模型网格划分

建模时各零件的约束方式是通过重合等的配合方式装配起来,在划分网格时为了使各个部件接触处网格不发生畸变,需采用布尔运算将几个部分连接成一个整体从而保持一致。

除了关键零件以外,实际结构中GIS的母线外壳和盆式绝缘子之间是通过螺栓进行连接的,在仿真建模中将连接外壳与盆式绝缘子的螺栓孔壁上网格各点与一点相连,使得螺栓各点之间保持恒定的相对位移,从而实现模拟螺栓连接特征。在网格划分时,也需要考虑螺栓的存在,螺栓相对其他部件尺寸很小,在进行整体网格划分之前,需要先将螺栓孔位的内壁进行网格的细化。

2.3 动力学分析过程

对模型进行动力学分析,求解步骤可以简单表述为3步:前处理,加载、求解,后处理,模型见图4。

根据110 kV GIS设备各零件所用的材料,对有限元仿真的材料属性进行定义。为减轻设备重量,110 kV GIS设备中母线筒壳体等主要部件均采用铝合金代替低碳钢,因此设置模型中母线筒壳体和导杆材料均为铝合金;盆式绝缘子的首选材料是具有良好绝缘性能的环氧树脂。主要零部件材料性能

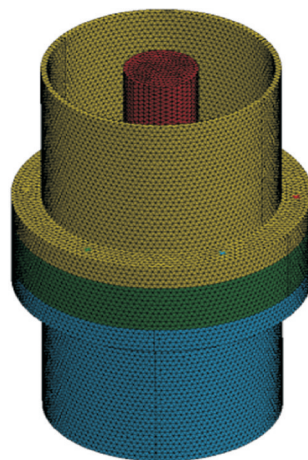


图4 LS-PREPOST中仿真模型图

Fig. 4 Diagram of simulation model in LS-PREPOST

参数见表1。需要注意的是,在定义模型材料参数时,不一定要输入每一种材料所有的参数,但是需要确保材料数据的正确性,同时确保使用一致的单位制,否则不准确的材料和不正确的单位制可能会导致由材料参数异常引起求解错误。

表1 仿真模型材料参数表

Table 1 Material parameters of simulation model

零件	材料	质量密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模 量/GPa	泊松 比	屈服强 度/MPa
母线筒壳体 和导杆	铝	2.7×10^3	69	0.33	240
盆式绝 缘子	环氧 树脂	1.2×10^3	2.4	0.24	50

根据第1章中的母线不对中时的受力分析,导杆会承受两倍电压变化频率的库仑力,取工频下其受力频率为100 Hz;又由于载流导体的电荷主要分布在其表面上,因此对母线导杆的外表面上的点施加频率为100 Hz、幅值为100 N、方向为X正方向的正弦力,作用时间为0.5 s。施加荷载情况见图5、6。

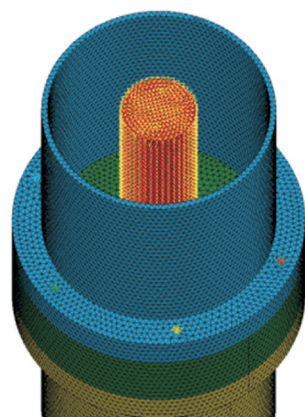


图5 母线导杆外表面上的受力点

Fig. 5 Force points on the outer surface of the bus bar

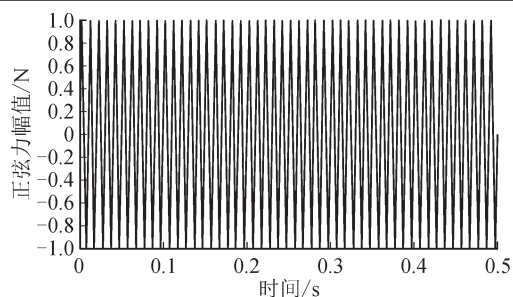


图6 施加荷载的正弦力波形图

Fig. 6 Sinusoidal waveform of applied load

GIS 仿真模型部件之间存在接触,除施加荷载外,还需要定义接触界面;对上节母线外壳的上端施加了固定约束,以模拟母线受相邻的法兰、绝缘子固定束缚的作用。

在求解之前,还需要设置求解过程的控制参数,如设置求解时间和控制时间步长、设定求解器等,选择输出文件和输出时间间隔,输出结果文件。

后处理主要是采用后处理器观察整体振动变形和应力应变状态、进行绘制应力应变、位移、加速度时间历程曲线等。对于实际仿真应用而言,可以不需要过多考虑仿真软件自身的运行机理,而是考虑建立模型输入、处理和进行输出计算。

3 基于理论模态分析方法的GIS振动特性研究

模态分析是分析振动系统中的“结构特性”,即要获得机械结构的固有属性,也就是结构的动态特征参数。这些模态参数可以由仿真计算或试验分析取得,即对应模态分析分为理论模态分析和试验模态分析。文中是通过有限元计算的方法进行模态分析,即理论模态分析。首先建立起实体几何模型,并赋予材料的属性,如质量密度、泊松比和杨氏模量等,求得模态分析结果。每一个模态具有特定的固有频率、阻尼和模态振型。

母线振动结构是一个连续体,实际上有无穷多个自由度,但是当看作有限个微刚体组成时,可以认为其具有有限个自由度,一个自由度对应一阶模态。理论上固有频率有很多阶,但因为低阶模态更容易被激励,且高阶模态能量占比太低,对振动影响不大,所以文中设置求解前15阶模态,仅关注前15阶固有频率。每一阶的固有频率见图7。

前15阶每一模态下的振型中选取了有代表性的几阶模态振型,见图8。

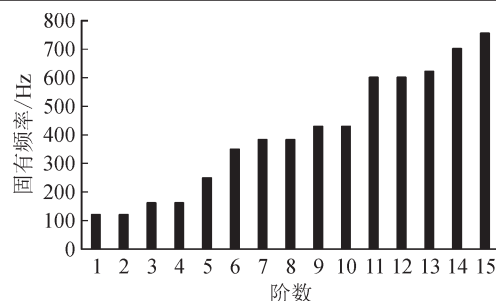


图7 GIS母线模型模态分析的固有频率

Fig. 7 Natural frequency of modal analysis of GIS bus model

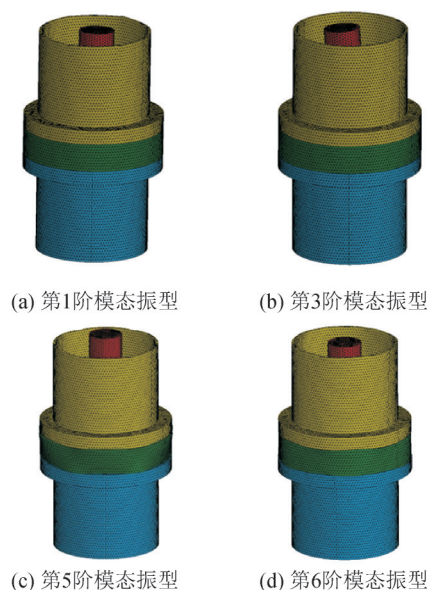


图8 母线模型的模态振型图

Fig. 8 Modal mode shapes of GIS bus model

通过模态计算可知,从低阶到高阶模态,固有频率是逐渐增大的。其固有频率对应的振型有摆动、扭曲、伸缩等多种振动状态,既有内部导体的振动,也随着振动传播伴随着母线壳体的振动。母线外壳上端的振动幅度明显小于母线下端。

模态分析的意义在于可以识别出系统的模态参数,掌握振动系统结构的力学特征,得到其共振频率点和系统的结构特征,为振动系统结构的振动特性分析、振动故障的诊断提供了依据。而对于文中所研究的情况,其激励源为电压产生的力学频率为100 Hz的库仑力,是单一频率,当其作用到GIS上时,所产生的响对于线性系统就是100 Hz的振动响应,只要GIS结构设计避开了100 Hz的固有频率,则不会产生共振,通过以上的分析可以知道,GIS的模态分析所计算得到的前15阶固有频率会避开100 Hz,防止运行中产生共振。

4 母线不对中机械缺陷的仿真结果分析

仿真结果分析主要是使用后处理器 LS-

PREPOST 观察整体振动、变形以及基于 LS-PREPOST 进行应力、应变、位移、速度、加速度时间历程曲线等后处理。

4.1 仿真振动信号测量位置的选择

为了统一振动信号测量位置,得到合适的采集点,对仿真模型水平母线结构见图9(a)外壳的上节和下节母线的1/2处分别取为采集面A、B,选取每个采集面的上下和左右4点,采集点分布见图9(b),采集点1和3在母线的X方向上,而采集点2和4在Y方向上。

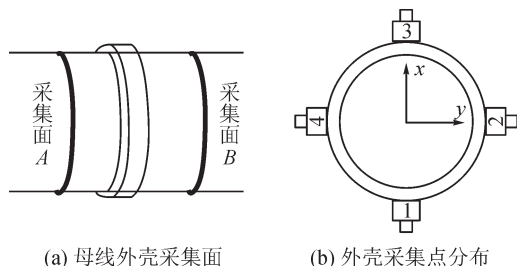


图9 GIS外壳采集面的测量位置分布

Fig. 9 Location distribution of vibration-collecting surface on GIS shell

施加荷载正弦力下的采集面A和B的4个测试点的总加速度时域波形见图10、11。

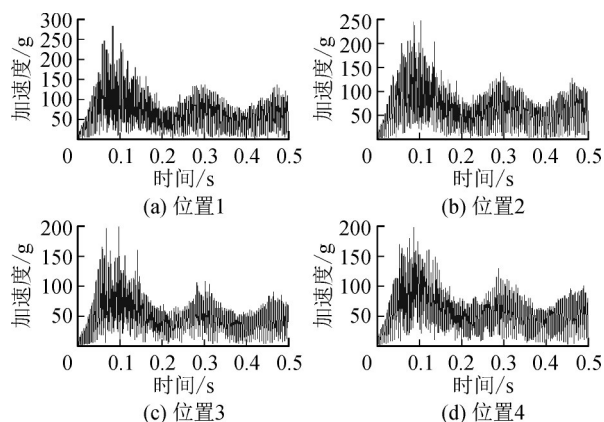


图10 采集面A振动信号时域波形

Fig. 10 Vibration waveform of collecting surface A

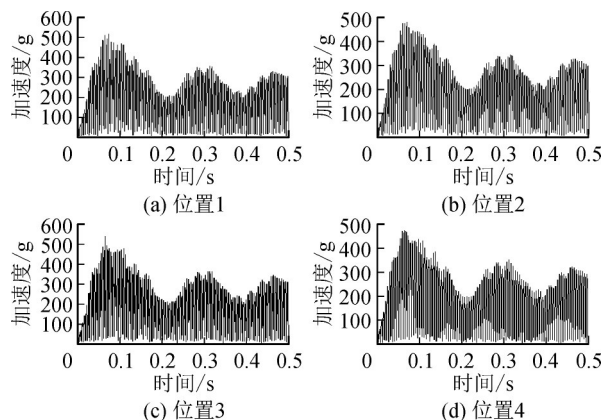


图11 采集面B振动信号时域波形

Fig. 11 Vibration waveform of collecting surface B

根据采集面A、B的4个测试点的时域波形图,

可以得出,在图10中的图(a)、(b)中振动加速度均比图(c)、(d)大,在图11中的图(a)、(c)中振动加速度均比图(b)、(d)大;而图11中振动加速度均比图10大,且周期性更明显,特性更鲜明,这是由于母线模型建立中,仅对外壳的上部进行了固定约束。所以综合考虑仿真情况,测量振动加速度信号时,取GIS的下节外壳的采集面B位置1的采集点,即外壳X方向上的点。该点在外壳俯视图上的分布见图12。

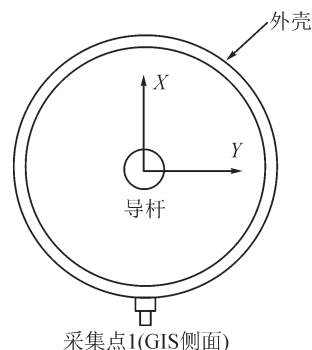


图12 采集面上采集点分布

Fig. 12 The distribution vibration-collecting points on GIS

4.2 GIS母线不对中情况下的振动信号特征

对采集面B位置1处的总加速度信号进行傅里叶分析,可以得到的频谱图见图13。由图13中可以看到,总振动加速度频率主要是200 Hz,此外还有直流分量,在400、600、800 Hz左右也出现有加速度分量。

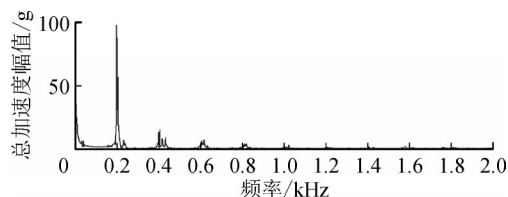


图13 总振动加速度频谱图

Fig. 13 Resultant vibration acceleration spectrum

对采集面B位置1处,观察X、Y、Z方向振动加速度时域信号,并进行傅里叶分析,得到频谱图,见图14。

由于总加速度是X、Y、Z方向的加速度的平方和再开根号,见式(6)。根据式(7)两个不同频率叠加的平方公式,最终总加速度的频率为原来的频率的倍频、和频和差频分量。

$$a_{\text{总}} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} y &= [A_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2)]^2 = \\ &= \left\{ \frac{A_1^2}{2} [1 + \cos(2 \cdot 2\pi f_1 t + 2\varphi_1)] + \frac{A_2^2}{2} \right. \\ &\quad [1 + \cos(2 \cdot 2\pi f_2 t + 2\varphi_2)] + \\ &\quad A_1 A_2 \cos[2\pi(f_2 - f_1)t + (\varphi_2 - \varphi_1)] + \\ &\quad \left. A_1 A_2 \cos[2\pi(f_2 + f_1)t + (\varphi_2 + \varphi_1)] \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

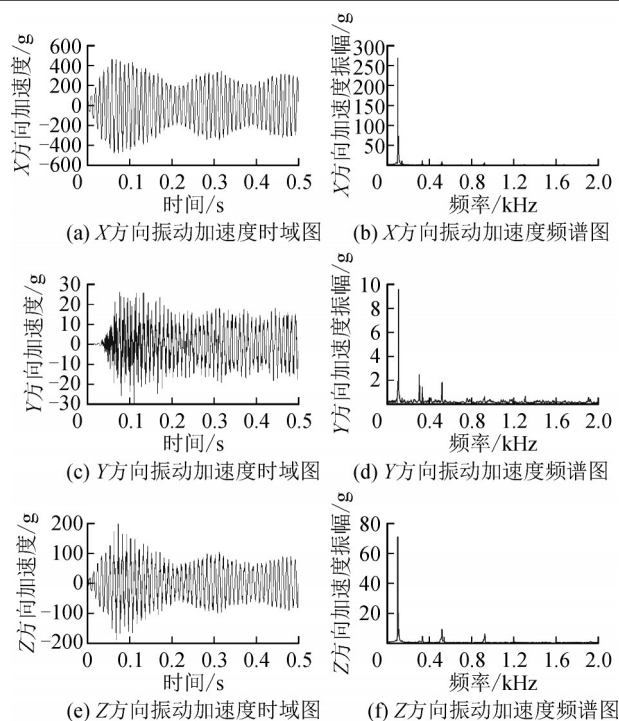


图14 位置1处X、Y、Z方向振动加速度时域图和频谱图

Fig. 14 X、Y、Z vibration acceleration waveform and spectrum at position 1

可以发现, X、Y、Z方向振动加速度频率分量基本一致, 主要为100 Hz, 此外在333.8、517.7、921.5 Hz也出现有加速度分量, 这几个频谱分量的幅值都在1 g以上, 频谱中出现的其他分量的幅值均较小, 且X方向加速度幅值大于Z方向大于Y方向。GIS母线不对中情况下, 由于各个方向上振动加速度的频谱非常丰富且具有独特的特征, 可以通过检测各方向上振动加速度信号特征来综合进行机械缺陷的判断。

4.3 振动信号在GIS外壳中的传播特性

考虑到现场GIS分布的紧凑性, 振动信号会由导杆产生沿着外壳传播, 且现场振动信号是在外壳上测量的, 所以需要研究振动信号在GIS外壳中的传播特性。文中以母线不对中缺陷为例, 研究异常分量幅值沿GIS外壳传播的振动特性。

4.3.1 自由状态下母线外壳的传播特性

在仿真前处理中, 母线模型下节外壳未施加约束, 处于自由状态, 为研究沿GIS外壳传播的振动特性, 取其在X方向上的采集点1~7, 分布见图15。

由4.2中的研究可知, 母线不对中缺陷会有异常频率分量, 对于总的振动加速度来说, 200 Hz异常分量明显; 对于3个方向的加速度来说, X方向的振动加速度幅值最大且100 Hz最为明显, 所以文中研究在以上7个采集点处X方向加速度100 Hz幅值、总加速度200 Hz幅值以及总加速度时域幅值随

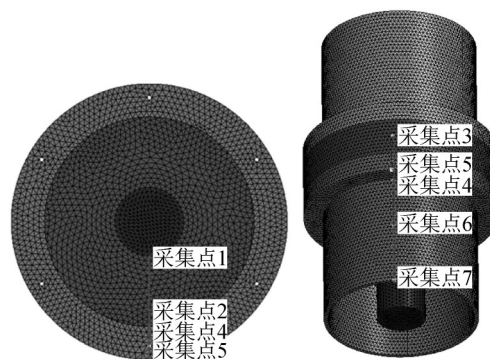


图15 母线模型的采集点分布

Fig. 15 The distribution vibration-collecting points on GIS

采集点位置的变化关系, 见图16、17。

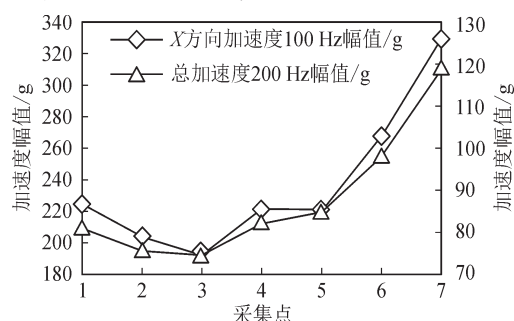


图16 X方向加速度100 Hz幅值和总加速度200 Hz幅值随采集点位置变化的关系图

Fig. 16 The amplitude of the 100 Hz component of X-direction acceleration and the 200 Hz component of the resultant acceleration change

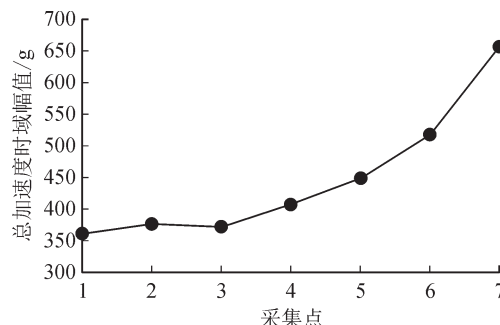


图17 总加速度时域幅值随采集点位置变化的关系图

Fig. 17 The amplitude of the resultant acceleration change

根据仿真结果, 可以发现, 无论是X方向加速度100 Hz幅值、总加速度200 Hz幅值随采集点位置的变化, 还是总加速度时域幅值随采集点位置的变化, 其振动信号的传播趋势基本一致。采集点1~3表征的传播过程是, 振动信号从导杆上发出, 传播到绝缘子上, 再到绝缘子外部, 加速度幅值呈逐渐降低的趋势; 而采集点4~7表征的传播过程是从绝缘子外部再到母线外壳下节, 在这个传播过程中由于母线外壳下节没有施加约束作用, 采集点7的幅值是采集点3处的1.6~1.7倍, 振动幅度明显比绝缘

子处大,通过观察模态分析中的振型也可以发现母线外壳下节的振动幅度更加明显。

4.3.2 约束条件下母线外壳的传播特性

在仿真前处理中,母线模型上节外壳施加了约束,可以表征实际中短母线的一端与法兰等相连的情况。为研究这种状态下沿GIS外壳传播的振动特性,再取母线外壳上节的7个采集点,这7个点分布与母线下节的采集点完全对称,也称为1-7,总加速度时域幅值随采集点位置的变化关系见图18。可以看到,由于外壳上端受到约束作用其表现出来的振动传播特性与下节不同,上节整体的总加速度时域幅值低于下节的幅值,且由绝缘子向外壳上端部振动信号传播时,加速度幅值呈逐渐降低的趋势;外壳上端部的约束作用比较明显。

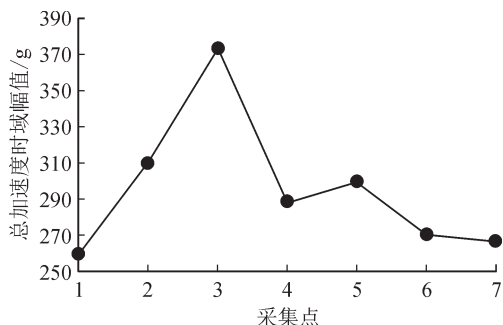


图18 总加速度时域幅值随采集点位置变化的关系图

Fig. 18 The amplitude of the resultant acceleration change

绝缘子上部的采集点4和采集点7接收到的振动信号时域波形的最高幅值分别为289 g和267 g,离绝缘子较远的采集点7处的振动信号最高幅值衰减为采集点4的92.39%。又由建模时这两点之间的距离为300 cm,即可认为振动信号在传播过程中的衰减率为0.31 %/cm,即每经过1 cm信号衰减0.31 %。

如果在振动信号传播的过程中遇到绝缘盆子,那么盆子也会对振动的传播有明显的影响。对于绝缘盆子上下部的两个采集点4,之间有法兰和绝缘盆子,距离为200 cm,绝缘盆子上部和下部的两个采集点4的振动加速度时域波形的最高幅值分别为289 g和407 g,说明振动信号在传播过程中遇到盆子经过螺栓连接的法兰时,振动幅值会大幅衰减。

5 结语

当母线较长或安装存在错位导致母线不对中时,单相GIS中导杆受力不平衡,会承受两倍电压变化频率的库仑力,引起机械振动。为研究在此种母线不对中机械故障情况下母线的振动特性,文中首先通过多种有限元仿真软件建立单相GIS母线模

型,通过施加正弦载荷来模拟故障激励,并通过后处理器软件得到导杆与外壳振动的时变特性与频谱特性。此外,采用有限元软件对母线模型进行计算模态分析,得到结构的固有频率和振型。

结果表明,根据母线外壳上X、Y、Z方向振动加速度时域图和频谱图,X、Y、Z方向振动加速度频率分量基本一致,主要为100 Hz,此外在333.8、517.7、921.5 Hz也出现有频率分量,获得其频谱特征。外壳下节自由状态下的振动传播特性和上端约束条件下母线外壳的传播特性,呈现不同的特征。

文中的母线模型与仿真分析结果对于GIS的不对中故障受力振动分析、进行状态监测与故障诊断具有重要意义。

参考文献:

- [1] 于国强,王宇.某110 kV GIS母线短路故障分析[J].农村电气化,2011(11):28-29.
YU Guoqiang, WANG Yu. Short-circuit fault analysis of a 110 kV GIS bus [J]. Rural Electrification, 2012, 13(5):41-44.
- [2] LI C, HE J L, HU J, et al. Switching transient of 1 000 kV UHV system considering detailed substation structure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 112-122.
- [3] SRIVASTAVA K, MORCOS M. A review of some critical aspects of insulation design of GIS/GIL systems[C]// Proceedings of the 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Atlanta, Georgia, USA: IEEE, 2001: 787-792.
- [4] 韩旭涛,刘泽辉,李军浩,等.基于光电复合传感器的GIS局放检测方法研究[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6760-6769.
HAN Xutao, LIU Zehui, LI Junhao, et al. Study on PD detection method in GIS based on the optical and UHF integrated sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22):6760-6769.
- [5] 金立军,刘卫东,钱家骊. GIS绝缘配合中的故障分析及诊断和检测技术[J].中国电力,2002(3):56-59.
JIN Lijun, LIU Weidong, QIAN Jiali. The failure analysis and diagnostic and detection technology of insulation co-ordination in GIS[J]. Electric Power, 2002(3):56-59
- [6] 李凯,许洪华,马宏忠,等. GIS针尖类局部放电引起的振动特性研究[J].陕西电力,2016,44(9):80-84.
LI Kai, XU Honghua, MA Hongzhong, et al. Vibration characteristics of needle partial discharge in GIS[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(9):80-84.
- [7] 黄金剑,杨宝琨.基于振动信号的GIS机械状态检测系统及其应用[J].广西电力,2015,38(5):55-59.
HUANG Jinjian, YANG Baokun. GIS mechanical condition detection system based on vibration signal and its applica-

- tion[J]. Guangxi Electric Power, 2015, 38(5):55-59.
- [8] 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.
- [9] 王一博, 王福杰, 马繁宗. GIS变电站设备常见故障原因及处理方法分析[J]. 中国新技术新产品, 2016, 24(5):30-31.
WANG Yibo, WANG Fujie, MA Fanzong. Analysis of common failure causes and treatment methods of GIS substation equipment[J]. Chinese New Technology and Products, 2016, 24(5):30-31.
- [10] 南方, 王全海, 闫练. GIS母线工程设计及应用[J]. 电气时代, 2015(6):66-69.
NAN Fang, WANG Quanhai, YAN Lian. GIS bus engineering design and application[J]. Electric age, 2015(6): 66-69.
- [11] 李大权, 姜飞, 万荣兴. 关于800 kV GIS长距离母线筒位移研究[J]. 电气技术, 2012, 13(5):41-44.
LI Daquan, JIANG Fei, WAN Rongxing. Research on the displacement of 800 kV GIS long distance busbar[J]. Electrical Engineering, 2012, 13(5):41-44.
- [12] 武荣强. 6 kV变电所母线振动原因分析及改造[J]. 设备管理与维修, 2016, 37(2):55-57.
WU Rongqiang. Cause analysis and reform of vibration of busbars in 6 kV substation[J]. Plant Maintenance Engineering, 2016, 37(2):55-57.
- [13] RUNDE M, SKYBERG B, OHLEN M. Vibration analysis for periodic diagnostic testing of circuit-breakers[C]//Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. London, UK: IET 1999:98-101.
- [14] 杨瑞棠. 母线的振动规律[J]. 中南水力发电, 2007, 23(3):52-70.
YANG Ruitang. Busbar vibration law[J]. Central South Hydropower, 2007, 23(3):52-70.
- [15] YANG Jinggang, LIU Yuan, LI Junhao, et al. Study on the vibration characteristics of GIS's vertical bus under fastening bolts on flange[C]//2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). [S.l.]: IEEE, 2016:721-724.
- [16] 杨景刚, 刘媛, 宋思齐. GIS设备机械缺陷的振动检测技术研究[J]. 高压电器, 2018, 54(1):86-90.
YANG Jinggang, LIU Yuan, SONG Siqi. Research on vibration detection technology of GIS equipment mechanical defects[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1):86-90.
- [17] 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.
- [18] 聂合贤. 对平行板电容器极板受力问题的讨论[J]. 山西大学师范学院学报(综合版), 1995(4):77-78.
Nie Hexian. Discussion on the force of parallel plate capacitors[J]. Journal of Teachers College of Shanxi University (Comprehensive Edition), 1995(4): 77-78.
- [19] 张志国. 二平行载流圆柱上的电荷分布[J]. 大学物理, 1994, 13(9):6-9.
ZHANG Zhiguo. Charge distribution on two parallel current-carrying cylinders[J]. College Physics, 1994, 13(9):6-9.
- [20] 喻莉, 杨植宗, 何艳. 线电荷与圆柱导体间的相互作用[J]. 物理通报, 2011(2):15-16.
YU Li, YANG Zhizong, HE Yan. Interaction between line charge and cylindrical conductor[J]. Physics Bulletin, 2011 (2):15-16.
- [21] 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):46-59.
QI Weidong, NIU Bo, HU Degui, et al. Reasons for poor contact of electrical equipment and analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6):46-59.

卞超(1978—),男,教高,本科,长期从事高压开关检修管理与技术研究工作。

(上接第71页)

- SHI Wei. Overvoltage calculation of power system[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988.
- [11] DOMMEL H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 北京:水利电力出版社, 1991:27-32.
DOMMEL H W. Electromagnetic transient calculation theory of power system[M]. Beijing:Hydraulic and Electric Power Press, 1991:27-32.
- [12] 马文成, 马存良, 孙润花. 隔离开关操作顺序探讨[J]. 科学经验交流, 2015(23):103-105.
MA Wencheng, MA Cunliang, SUN Runhua. Discussion on the operation sequence of isolating switch[J]. Exchange of Scientific Experience, 2015(23):103-105.
- [13] 陆健, 王启武, 高靓, 等. 变电站主变断路器两侧隔离开关操作顺序的改进[J]. 电力安全技术, 2012, 14(8):190-193.
LU Jian, WANG Qiwu, GAO Liang. Improvement of operation sequence of isolation switch on both sides of substation main transformer circuit breaker[J]. Power Security Technology, 2012, 14(8):190-193.
- [14] 黎斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2015.
LI Bin. SF₆ high voltage electrical design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2015.
- 刘凯(1991—),男,工程师,主要从事高压开关设备故障诊断及状态评估研究。