

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.06.005

## GIS盆式绝缘子模态特征仿真研究

杨鼎革<sup>1</sup>, 叶晓林<sup>2</sup>, 牛 博<sup>1</sup>, 黄奇峰<sup>3</sup>

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100; 2. 国网陕西省电力公司检修公司, 西安 710065;  
3. 国网陕西省电力公司西安供电公司, 西安 710032)

**摘要:** 盆式绝缘子作为GIS的重要组成部件,对其安全稳定运行起着非常重要的作用,主要表现在机械固定作用和电气绝缘作用,气密性的绝缘子还起到分隔气室的作用。为了研究不同电压等级下盆式绝缘子的固有模态特征,文中建立了110、220、330、550、750 kV 5种电压等级的盆式绝缘子有限元模型,仿真得到此5种电压等级盆式绝缘子的第7-16阶振型以及固有频率。仿真结果表明,盆式绝缘子模态普遍存在重根模态现象;不同电压等级下的盆式绝缘子固有模态特征存在一定共性,在重根模态表现出的共性更多,而非重根模态则表现出较多差异;盆式绝缘子的电压等级越高,其相同阶数的固有频率数值越低。文中的研究为振动法检测盆式绝缘子表面状态以及内部气隙缺陷等提供了指导意义。

**关键词:** 盆式绝缘子; 固有模态; 固有频率; 振型; 有限元

## Simulation Research on Modal Characteristics of GIS Basin Insulator

YANG Dingge<sup>1</sup>, YE Xiaolin<sup>2</sup>, NIU Bo<sup>1</sup>, HUANG Qifeng<sup>3</sup>

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China; 2. State Grid Shaanxi Maintenance Company, Xi'an 710065, China; 3. State Grid Xi'an Electric Power, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** Spacer is an important component of GIS and play a very important role in their safe and stable operation. They are mainly manifested in mechanical fixation and electrical insulation. Air-tight insulators also play a role in separating air chambers. In order to study the inherent modal characteristics of basin insulators under different voltage levels, this article establish a finite element model of basin type insulators with five voltage levels of 110, 220, 330, 550 kV, and 750 kV. The five voltage levels are simulated by simulation 7th-16th mode shapes and natural frequencies of basin insulators. The simulation results show that the intrinsic mode characteristics of the basin insulators under different voltage levels have certain commonalities, and they have more commonalities in the double root mode, but more differences in the non-double root mode. The research in this paper provides guidance for detecting the surface state of pot insulators by vibration method.

**Key words:** basin insulator; intrinsic mode; natural frequency; mode shape; finite element

### 0 引言

气体绝缘金属开关设备(gas insulated switchgear, GIS)与传统敞开式电气式设备相比,具有占地面积小、安全可靠、检修周期长、维护工作量少、可扩展性强等优点<sup>[1-2]</sup>,因而被广泛应用,GIS的安全可靠运行对于整个电力系统的稳定运行非常

关键。盆式绝缘子作为GIS内部极为重要的部件,主要起着机械固定作用和电气绝缘作用,气密性的绝缘子还可以起到分隔气室的作用<sup>[3-5]</sup>。机械作用为固定母线以及母线的插接式触头,绝缘作用为将母线与地或者相间(三相共体结构)进行隔离。盆式绝缘子通常是在高真空环境下由环氧树脂浇铸而成,在浇铸过程中操作不规范、工艺不完善、设备不

稳定等原因很容易导致绝缘子内部有气泡存在<sup>[6-9]</sup>。GIS在运行过程中时,盆式绝缘子要耐受GIS筒体与中心导体的挤压作用,还要承受内部高压气体SF<sub>6</sub>的压力,这些因素则会导致盆式绝缘子发生机械变形、出现裂纹和损伤等。因此,为避免盆式绝缘子发生机械变形、出现裂纹、损伤以及气泡导致的绝缘闪络等情况,盆式绝缘子的自身机械性能和绝缘性能必须达标。

目前,国内外学者对于盆式绝缘子的研究主要集中于其机械性能和绝缘性能。许建春等<sup>[10]</sup>利用Ansys软件对110 kV盆式绝缘子的电气性能和机械性能进行了仿真研究,并在此基础上制造出性能合格的盆式绝缘子;华北电力大学王永强等<sup>[11]</sup>对252 kV盆式绝缘子正常运行情况下的应力与其内部存在气泡、裂纹等缺陷时的应力进行了仿真对比研究;华北电力大学马朋飞等<sup>[12]</sup>对252 kV盆式绝缘子完好和受损情况下进行了振动试验研究,发现两种情况下的振动信号频谱差异显著;王增彬等学者<sup>[13]</sup>提出了一种盆式绝缘子多物理场的仿真计算方法,对额定工况下126 kV盆式绝缘子温度分布情况进行了建模仿真,仿真结果与实际非常接近;刘荣海等学者<sup>[14]</sup>对完好盆式绝缘子和开裂盆式绝缘子进行了振动模态试验,试验结果表明径向贯穿裂纹故障的发展会导致盆式绝缘子模态频率的下降;牛博等人<sup>[15]</sup>通过仿真研究了盆式绝缘子表面污秽类型、污秽位置和绝缘子结构对超声信号的畸变作用,为超声检测法的试验研究提供了理论参考;东北电力大学于卓琦等人<sup>[16]</sup>通过有限元仿真盆式绝缘子的模态,发现裂纹会导致盆式绝缘子重根模态现象消失,而且使模态频率下降,裂纹越深下降幅度越大,证明振动法检测盆式绝缘子机械状态是可行的;山东理工大学何柏娜等人<sup>[17]</sup>利用有限元分析软件Ansys研究了快速暂态过电压和工频电压作用下气泡大小与位置对盆式绝缘子电场分布及沿面闪络的影响;天津工业大学郭翠娟等人<sup>[18]</sup>提出基于Lamb波主动激励盆式绝缘子损伤检测的方法。

然而,尚未见有学者对不同电压等级下盆式绝缘子的模态进行研究过。文中建立了110、220、330、550、750 kV 5种电压等级下的盆式绝缘子,对其固有模态特征进行了仿真研究,总结了不同电压等级下盆式绝缘子的模态特征规律。

## 1 模态特性分析原理

模态是结构系统的固有振动特性,机械结构的

每一个模态都具有唯一的固有频率、阻尼比和振型。机械结构的模态分析通常是指对其动态特性进行研究,而振型及固有频率是展现机械结构动态特性的主要参数<sup>[19]</sup>。将盆式绝缘子简化为一个多自由度线性系统,则其振动平衡方程可表述为

$$\mathbf{M}\{\ddot{x}(t)\} + \mathbf{C}\{\dot{x}(t)\} + \mathbf{K}\{x(t)\} = \mathbf{F} \quad (1)$$

式(1)中: $\mathbf{M}$ 为盆式绝缘子的质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为盆式绝缘子的阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为盆式绝缘子的刚度矩阵; $\mathbf{F}$ 为节点力矢量; $\{\ddot{x}(t)\}$ 为加速度列阵; $\{\dot{x}(t)\}$ 为速度列阵; $\{x(t)\}$ 为节点位移。

通常情况下,阻尼对振型和固有频率的影响是非常小的,因此可以将阻尼值设为零,式(1)可简化为式(2),即无阻尼的多自由度系统自由振动方程。

$$\mathbf{M}\{\ddot{x}(t)\} + \mathbf{K}\{x(t)\} = \mathbf{F} \quad (2)$$

假设盆式绝缘子各质量块做同频率同相位的简谐振动,则有式(3)

$$\{x(t)\} = \{A\}\sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

将式(2)代入到式(3)可得

$$\{\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}\}\{A\} = \{0\} \quad (4)$$

令盆式绝缘子的特征矩阵为 $\mathbf{B} = \{\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}\}\{A\}$ ,则式(4)有非零解的条件是特征矩阵的行列式为零,即

$$|\mathbf{B}| = |\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0 \quad (5)$$

解此行列式可得到关于 $\omega^2$ 的 $n$ 次方程

$$\omega^{2n} + \alpha_1 \omega^{2(n-1)} + \dots + \alpha_{n-1} \omega^2 + \alpha_n = 0 \quad (6)$$

式(6)即为特征方程,其 $n$ 个 $\omega^2$ 根为特征值,将 $n$ 个特征值开方得到盆式绝缘子系统的 $n$ 个固有频率,分别记为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ,按照从小到大依次排序并称它们为系统的第1阶、第2阶、 $\dots$ 、第 $n$ 阶固有频率。将 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 分别代入式(4),得到对应的 $n$ 阶主振型向量 $A^1, A^2, \dots, A^n$ 。

由于盆式绝缘子系统可认为是线性自由振动系统,因此低阶固有频率对应的振型对整个系统的动态特性占据着主导地位,主要提取第7-16阶固有频率以及振型进行分析。

## 2 仿真模型的建立

以110、220、330、550、750 kV盆式绝缘子为研究对象,利用SolidWorks软件分别建立5种电压等级下盆式绝缘子三维模型。盆式绝缘子几何尺寸均为实测,各个电压等级下的几何尺寸见表1,几何尺寸标注示意图见图1,按照实际尺寸建立的三维模型见图2,曲面均采用圆角处理使其光滑。

表1 盆式绝缘子几何尺寸

Table 1 Basin insulator geometry

| 电压等级/kV | 外径/mm | 厚度/mm | 中心导体直径/mm | 盆体凸出高度/mm |
|---------|-------|-------|-----------|-----------|
| 110     | 400   | 34    | 46        | 140       |
| 220     | 480   | 38    | 60        | 188       |
| 330     | 520   | 40    | 90        | 220       |
| 550     | 680   | 60    | 130       | 260       |
| 750     | 1080  | 80    | 200       | 300       |

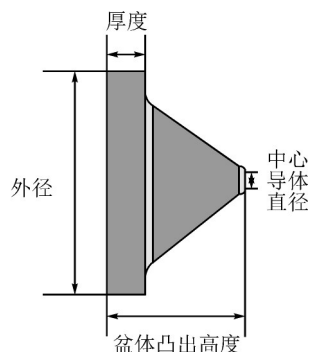


图1 几何尺寸标注示意图

Fig. 1 Geometric dimensioning diagram

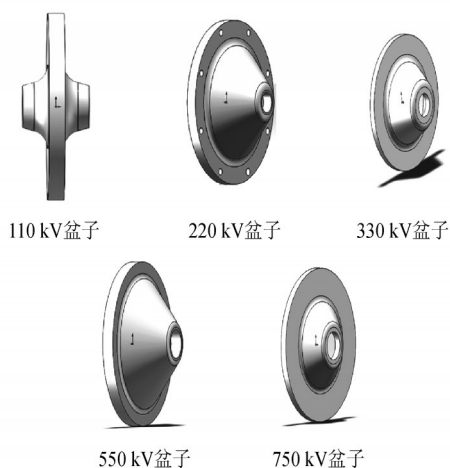


图2 盆式绝缘子三维模型

Fig. 2 3D model of basin insulator

将所建盆式绝缘子三维模型导入仿真软件,物理场选择结构力学中的固体力学,选择一般研究中的特征频率,然后全部构建形成联合体。盆式绝缘子材料填充选择环氧树脂,环氧树脂的杨氏模量设置为 $10^9$  Pa,泊松比设置为0.38。网格划分选择软件默认划分,单元大小为常规。220 kV 盆式绝缘子网格划分结果见图3。固有模态是指系统自由振动时的模态,因此对盆式绝缘子不必添加任何约束。

### 3 固有模态仿真结果

对110、220、330、550、750 kV 5种电压等级的盆式绝缘子进行无约束的自由模态分析,由于前6阶模

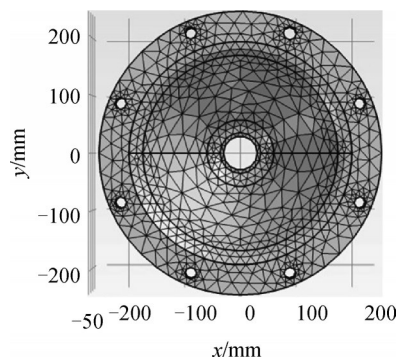


图3 220 kV 盆式绝缘子网格划分结果

Fig. 3 220 kV basin insulator meshing results

态为刚体模态,盆式绝缘子只是产生了宏观位移并未发生形变,所以固有频率都非常小,在6阶之后的固有频率才是盆式绝缘子结构发生弹性形变而产生的振动。在实际中,由于结构的高阶模态不易被激发,而低阶的模态更易被激发,因此,想要表达结构的振动状态可以通过低阶的模态叠加实现。文中选取6阶之后的第7~16阶固有模态仿真结果进行研究。

#### 3.1 盆式绝缘子振型仿真结果

盆式绝缘子振型可以反映其结构的刚度分布特性,描述了结构在该振型对应的固有频率下各个节点位置的相对振幅大小。振型越大,结构区域的刚度越低,应变能越大;振型越小,结构区域的刚度越高,应变能越低<sup>[20]</sup>。仿真得到的110 kV 盆式绝缘子第7~16阶模态振型见图4。

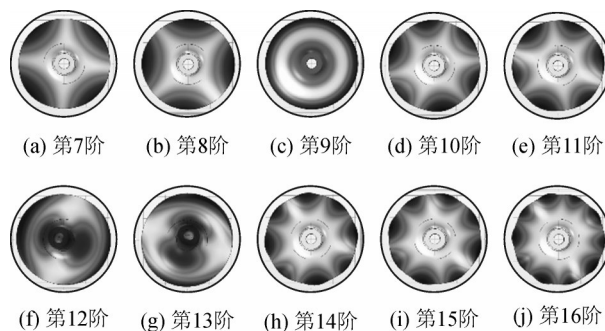


图4 110 kV 盆式绝缘子振型

Fig. 4 110 kV basin type insulator

220 kV 盆式绝缘子振型见图5。

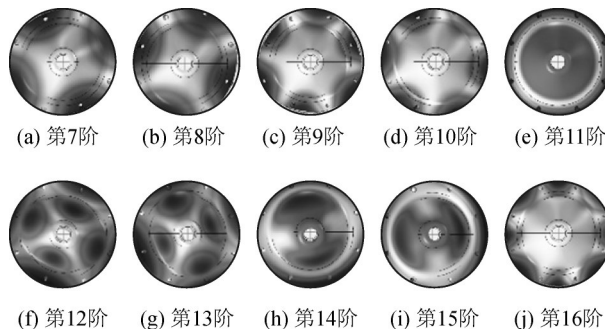


图5 220 kV 盆式绝缘子振型

Fig. 5 220 kV basin type insulator

330 kV 盆式绝缘子振型见图 6。

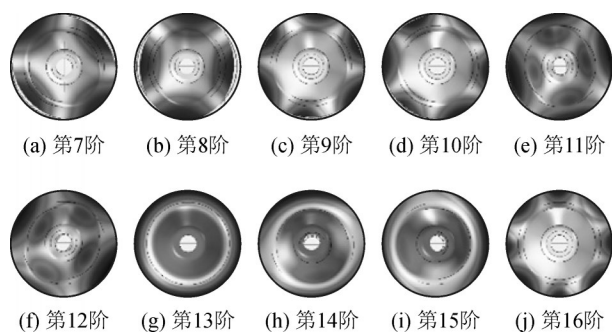


图 6 330 kV 盆式绝缘子振型

Fig. 6 330 kV basin type insulator

550 kV 盆式绝缘子振型见图 7。

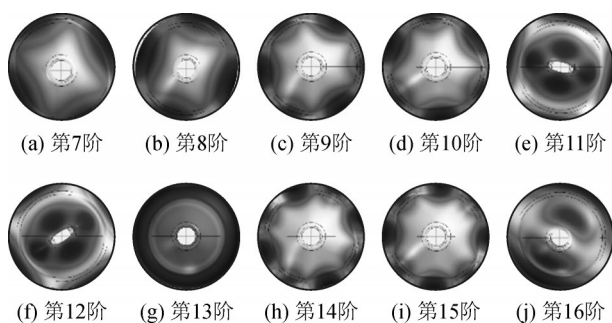


图 7 550 kV 盆式绝缘子振型

Fig. 7 550 kV basin type insulator

750 kV 盆式绝缘子振型见图 8。

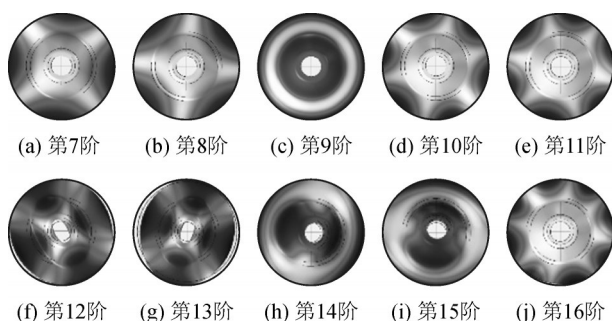


图 8 750 kV 盆式绝缘子振型

Fig. 8 750 kV basin type insulator

可以看到每一个电压等级下的盆式绝缘子都会出现一部分相邻阶的振型十分相似,如 110 kV 盆式绝缘子第 7/8 阶振型、第 10/11 阶振型、第 12/13 阶振型以及第 14/15 阶振型;220 kV 盆式绝缘子第 7/8 阶振型、第 9/10 阶振型、第 12/13 阶振型、第 14/15 阶振型;330 kV 盆式绝缘子第 7/8 阶振型、第 9/10 阶振型、第 11/12 阶振型、第 14/15 阶振型;550 kV 盆式绝缘子第 7/8 阶振型、第 9/10 阶振型、第 11/12 阶振型、第 14/15 阶振型;750 kV 盆式绝缘子第 7/8 阶振型、第 10/11 阶振型、第 12/13 阶振型以及第 14/15 阶振型。这些振型形状十分相似,但是模态振型的相位不同,振型相互正交,在空间上旋转某一个角度振型可完全重合。这表明每一个电压等级下的盆式

绝缘子都出现了重根模态现象,而且在第 7-16 阶振型中每一个电压等级下的盆式绝缘子都会出现 4 对重根模态。

对比不同电压等级下的盆式绝缘子振型,可以发现大部分振型的形状十分相似。5 种电压等级的盆式绝缘子第 7/8 阶振型都会呈现出“十”字型的形状;110 kV 盆式绝缘子第 10/11 阶振型、220 kV 盆式绝缘子第 9/10 阶振型、330 kV 盆式绝缘子第 9/10 阶振型、550 kV 盆式绝缘子第 9/10 阶振型、750 kV 盆式绝缘子第 10/11 阶振型都会呈现出“\*”字型形状;110 kV 盆式绝缘子第 14/15 阶振型、220 kV 盆式绝缘子第 16 阶振型、330 kV 盆式绝缘子第 16 阶振型、550 kV 盆式绝缘子第 14/15 阶振型、750 kV 盆式绝缘子第 16 阶振型都会呈现出“米”字型形状。“十”字型振型、“\*”字型振型、“米”字型振型所对应的阶数依次递增,表明阶数越高,盆式绝缘子的扭曲和变形程度在向更加严重的方向发展。对于不同电压等级的盆式绝缘子,低阶的振型形状相对于高阶振型的形状也更加接近。

除了“十”字型振型、“\*”字型振型、“米”字型振型这 3 种重根模态振型之外,还有其他非重根模态的振型也十分相似。例如 110 kV 盆式绝缘子第 9 阶振型、220 kV 盆式绝缘子第 11 阶振型、330 kV 盆式绝缘子第 13 阶振型、550 kV 盆式绝缘子第 13 阶振型、750 kV 盆式绝缘子第 9 阶振型会呈现出“帽子”型振型。

除去 110 kV 盆式绝缘子,其他各个电压等级的盆式绝缘子还会出现一种“细十”字型的重根模态振型,分别为 220 kV 盆式绝缘子第 12/13 阶振型、330 kV 盆式绝缘子第 11/12 阶振型、550 kV 盆式绝缘子第 11/12 阶振型、750 kV 盆式绝缘子第 12/13 阶振型。

同时,不同电压等级下的相似重根模态所对应的阶数会更加接近,大多情况下只差一阶,而非重根模态所对应的阶数差别较大,阶数相差可以达到四阶。这表明对于不同电压等级的盆式绝缘子,它们之间的共同点会更多地体现在重根模态,不同点会体现在非重根模态。

### 3.2 盆式绝缘子固有频率仿真结果

盆式绝缘子的固有频率是指其做自由振动时,位移随着时间按照正弦或余弦规律变化的频率,固有频率数值仅仅与盆式绝缘子的固有特性有关,如质量、外形、材料属性等。当盆式绝缘子发生形变时,弹力使其恢复原状,弹力的大小主要和盆式绝缘子的尺寸大小与硬度大小相关,盆式绝缘子的质

量则对其加速度影响显著。对于相同外形的结构,材料的硬度越高其固有频率越高,结构的质量越小其固有频率越高。

仿真得到的110、220、330、550、750 kV 5种电压等级的盆式绝缘子的第7~16阶固有频率数值见表2。

表2 盆式绝缘子固有频率

Table 2 Basin insulator natural frequency

| 阶数   | 固有频率/Hz |        |        |        |        |
|------|---------|--------|--------|--------|--------|
|      | 110 kV  | 220 kV | 330 kV | 550 kV | 750 kV |
| 第7阶  | 218.65  | 137.87 | 117.17 | 83.846 | 67.78  |
| 第8阶  | 218.72  | 137.95 | 117.18 | 83.857 | 67.766 |
| 第9阶  | 330.46  | 309.74 | 239.91 | 202.37 | 127.49 |
| 第10阶 | 382.76  | 309.86 | 239.93 | 202.39 | 134.32 |
| 第11阶 | 382.87  | 370.25 | 352.04 | 302.75 | 134.36 |
| 第12阶 | 566.4   | 377.51 | 352.07 | 302.81 | 159.09 |
| 第13阶 | 566.73  | 377.83 | 356.02 | 302.92 | 159.12 |
| 第14阶 | 622.95  | 464.42 | 384.87 | 349.24 | 177.96 |
| 第15阶 | 623.09  | 464.43 | 384.95 | 349.26 | 177.97 |
| 第16阶 | 913.70  | 497.37 | 412.53 | 366.55 | 212.42 |

各个电压等级的盆式绝缘子的第7~16阶固有频率变化趋势见图9。

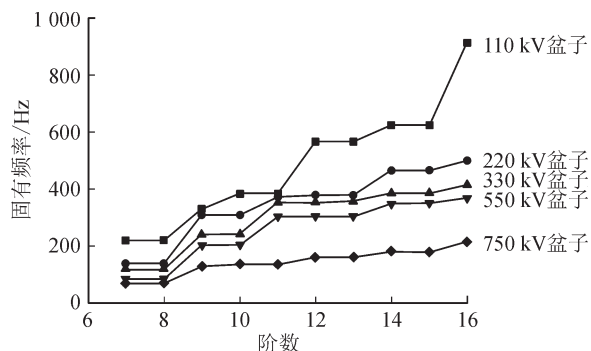


图9 盆式绝缘子固有频率

Fig. 9 Basin insulator natural frequency

从图9可以看出盆式绝缘子的电压等级越高,其相同阶数的固有频率的数值越低。对于每一个电压等级的盆式绝缘子,重根模态对应的固有频率会十分接近。

各个电压等级的盆式绝缘子第7~16阶固有频率的变化范围见图10。

从图10可以看出,盆式绝缘子的电压等级越高,第7~16阶固有频率的变化范围越大,而且110 kV盆式绝缘子固有频率变化范围达到695 Hz,远高于其他电压等级的盆式绝缘子的。

## 4 分析与讨论

### 4.1 盆式绝缘子振型仿真结果分析与讨论

各个电压等级的盆式绝缘子都会出现重根模

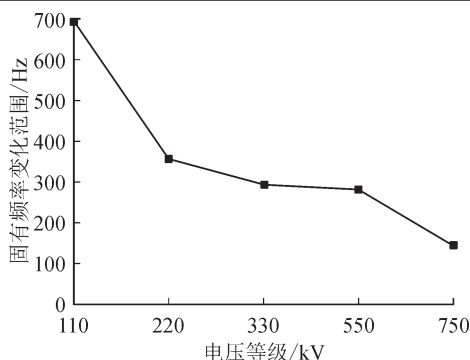


图10 固有频率变化范围

Fig. 10 Natural frequency variation range

态现象,其主要原因为盆式绝缘子都具有循环对称性,重根只是对循环对称结构的特殊振动特性即振型随激振点移动特性的一种数学描述。一对重根模态振型所对应的固有频率非常接近,因为它们的振动差异只是体现在振动空间方向上,振型形状是一致的。

对于第7~16阶振型,各个电压等级的盆式绝缘子都存在“十”字型振型、“\*”字型振型和“米”字型振型3种典型的重根模态振型,这是因为他们的外形有很多相似性,浇铸材料都是环氧树脂,随着电压等级的升高,盆式绝缘子相当于在空间尺寸上放大,结构特点没变,所以有大部分振型会体现出很大程度的相似性。同时,由于各个电压等级的盆式绝缘子并不是完全由空间尺寸放大得到,所以许多相似振型的阶数会出现较大的差异。

从结构特点看,110 kV盆式绝缘子外形与其他电压等级的盆式绝缘子差异最为显著,因为110 kV盆式绝缘子外形是两面凸起,而其他电压等级盆式绝缘子外形是单面凸起,所以其他电压等级的盆式绝缘子会出现一种“细十”字型的重根模态振型,110 kV盆式绝缘子并存在该振型。

盆式绝缘子非重根模态对应的振型本身其实是一个空间对称的振型,所以循环对称部分在各个空间方向上振动是一致的,所以不会存在与之相似的另一重根模态振型。

### 4.2 盆式绝缘子固有频率仿真结果分析与讨论

盆式绝缘子的电压等级越高,其相同阶数的固有频率的数值越低。这是因为盆式绝缘子电压等级越高,其空间尺寸越大,而盆式绝缘子的浇铸材料均为环氧树脂,所以空间尺寸越大其质量越大,而各个电压等级的盆式绝缘子结构十分相似,所以相同阶数的固有频率越低。110 kV盆式绝缘子的第7~16阶固有频率变化范围为218~914 Hz,750 kV盆式绝缘子的第7~16阶固有频率变化范围为68~212 Hz,可见由于空间尺寸的扩大,固有频率变化范

围会出现显著的降低。

## 5 结语

文中建立了110、220、330、550、750 kV 5种电压等级的盆式绝缘子有限元模型,对此5种电压等级盆式绝缘子的第7-16阶振型以及固有频率进行了仿真研究。研究表明,各个电压等级的盆式绝缘子由于结构上的相似性,振型会存在非常多的共性。盆式绝缘子均为循环对称结构,所以振型会体现出重根模态现象,而且不同电压等级下的相似重根模态振型对应的阶数十分接近。但是各个电压等级的盆式绝缘子结构并不完全是空间尺寸上的简单放大,所以许多非重根模态的阶数相差较大。另外,随着电压等级的升高,盆式绝缘子空间尺寸变大,质量变大,其相同阶数的固有频率数值会显著下降。

## 参考文献:

- [1] 邱毓昌. GIS装置及其绝缘技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,2007:2-10.  
QIU Yuchang. The equipment and insulation technology in GIS[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,2007:2-10.
- [2] 路士杰,张连根,周宏扬,等. 温度对工频下环氧支柱沿面闪络电压的影响[J]. 高电压技术,2019,45(9):2774-2781.  
LU Shijie, ZHANG Liangen, ZHOU Hongyang, et al. Effect of temperature on flashover voltage of epoxy column at power frequency[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2774-2781.
- [3] KOCH M. gas insulated substations[M]. West Sussex: John Wiley and Sons Ltd., 2014: 4-5.
- [4] 刘振亚,特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005.  
LIU Zhenya. Extra high voltage power grid[M]. Beijing: China Economic Publishing Press, 2005.
- [5] 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.
- [6] 陈敏. 介质高频特性对GIS绝缘子绝缘性能影响研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017.  
CHEN Min. Study on the influence of dielectric high-frequency characteristics on the insulation performance of GIS insulators[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [7] 王永强,胡芳芳,谢军,等. GIS盆式绝缘子气隙缺陷下电场变化规律仿真研究[J]. 绝缘材料,2016,49(1):40-45.

- WANG Yongqiang, HU Fangfang, XIE Jun, et al. Simulation study of electric field variation under GIS basin insulator air gap defect[J]. Insulating Materials, 2016, 49(1): 40-45.
- [8] 王浩然,郭子豪,张丝钰,等. 缺陷对特高压交流盆式绝缘子电场分布的影响[J]. 高电压技术,2018,44(3):1-11.  
WANG Haoran, GUO Zihao, ZHANG Siyu, et al. Effect of defects on electric field distribution of UHV AC basin insulators[J]. High Voltage Technology, 2018, 44(3): 1-11.
- [9] SZEWCZYK M, PIASECKI W, STOSUR M, et al. Damping of VFTO in gas-insulated switchgear by a new coating material[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 36(6):2553-2558.
- [10] 许建春,卢鹏. 1100 kV GIS盆式绝缘子的性能[J]. 电力建设,2010(8):91-93.  
XU Jianchun, LU Peng. Performance of 1100 kV GIS Basin Insulators[J]. Electric Power Construction, 2010(8): 91-93.
- [11] 王永强,胡芳芳,李长元,等. 典型内部缺陷下GIS盆式绝缘子有限元应力分析[J]. 绝缘材料,2017,50(1):78-83.  
WANG Yongqiang, HU Fangfang, LI Changyuan, et al. Finite element stress analysis of GIS basin insulator under typical internal defects[J]. Insulating Materials, 2017, 50(1): 78-83.
- [12] 马鹏飞,史腾飞,刘荣海,等. GIS盆式绝缘子振动检测研究[J]. 云南电力技术,2017,45(4):38-42.  
MA Pengfei, SHI Tengfei, LIU Ronghai, et al. Research on GIS basin insulator vibration detection[J]. Yunnan Electric Power Technology, 2017, 45(4): 38-42.
- [13] 王增彬,刘姝嫔,周宏扬,等. GIS盆式绝缘子温度多物理场仿真方法[J]. 高电压技术,2019,45(12):3820-3826.  
WANG Zengbin, LIU Shupin, ZHOU Hongyang, et al. Multiphysics simulation method of GIS basin insulator temperature[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(12): 3820-3826.
- [14] 刘荣海,臧春艳,杨迎春,等. 盆式绝缘子开裂故障的无损检测技术研究[J]. 高压电器,2019,55(3):151-155.  
LIU Ronghai, ZANG Chunyan, YANG Yingchun, et al. Nondestructive testing of cracking faults of basin insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 151-155.
- [15] 牛博,杨鼎革,于义亮,等. 基于超声波的GIS盆式绝缘子表面污秽检测技术仿真研究[J]. 高压电器,2018,54(11):105-110.  
NIU Bo, YANG Dingge, YU Yiliang, et al. Simulation research on surface contamination detection technology of GIS basin insulator based on ultrasound[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 105-110.
- [16] 于卓琦,高晋文,王克胜,等. 基于模态分析的GIS盆式绝缘子裂纹缺陷检测方法研究[J]. 电测与仪表,2019,56(9):100-104.  
YU Zhuoqi, GAO Jinwen, WANG Kesheng, et al. Research

(下转第41页)

- [32] LUTZ B, JUHRE K, IMAMOVIC D. Long - term performance of gas insulated systems under HVDC stress[C]// 19th International Symposium High Voltage Engineering. Pilsen:[S.l.], 2015: 530.
- [33] JUHRE K, HERING M. Testing and long-term performance of gas - insulated systems for DC application[C]// GIGRE - IEC Conference on EHV and UHV (AC&DC). Hakodate: GIGRE-IEC, 2019: 10-14.
- [34] HERING M, CLAUS M, TUCZED M. Gasisolierte gleichspannungsschaltanlagen zum einsatz auf offshore- konverterplattformen. fachtagung hochspannungsschaltanlagen[C]// Anwendungen, Betrieb und Erfahrungen. Darmstadt: [S.l.], 2018: 9.
- [35] CIGRE WG B3.26. Guidelines for the design and construction of AC offshore substations for wind power plants[M]. UK: CIGRE, 2011.
- [36] Germany government decided to privilege underground installations for the north-south DC transmission lines. [EB/OL] 2018-07-12. <https://www.siemens.com/press/PR2017070370EMEN>.
- 李德军(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事高压开关产品的设计、生产和技术管理工作。
- 刘志民(1966—), 男, 工学博士, 研究方向为电气绝缘与高电压技术, 长期从事高压开关产品的设计、生产和技术管理工作。
- KOSSE M(née Hering)(1988—), female, Ph.D. Germany, been engaged in responsible for DC gas-insulated switchgear.
- KUSCHEL M(1969—), male, Ph.D., Germany, been engaged in chief technology officer high voltage gas - insulated switchgear.
- JUHRE M(1972—), male, Germany, been engaged in management and key research in high-voltage gas-insulated switchgear for AC and DC systems.

(上接第 31 页)

- on GIS basin insulator crack defect detection method based on modal analysis[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2019, 53(9): 100-104
- [17] 何柏娜, 孔 杰, 宁家兴, 等. 存在气泡缺陷的盆式绝缘子电场仿真分析[J]. 绝缘材料, 2019, 52(5): 92-98.
- HE Baina, KONG Jie, NING Jiaying, et al. Electric field simulation analysis of basin insulator with bubble defects [J]. Insulating Materials, 2019, 52(5): 92-98.
- [18] 郭翠娟, 杨明珠. 基于振动响应分析的盆式绝缘子损伤检测系统[J]. 传感技术学报, 2016, 29(10): 1606-1612.
- GUO Cuijuan, YANG Mingzhu. Basin-type insulator damage detection system based on vibration response analysis [J]. Journal of Transduction Technology, 2016, 29(10): 1606-1612.
- [19] STEIGER R, FELTRIN G, WEBER F, et al. Experimental modal analysis of a multi-storey light-frame timber building [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15(8): 3265-3291.
- [20] 臧献国. 基于模态振型和响应面法的结构声学性能优化设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- ZANG Xianguo. Optimal design of structural acoustic performance based on modal mode and response surface method[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- 杨鼎革(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事开关类设备运维检修、状态评估和故障诊断。