◇ 研究报告 ◇

干式空心电抗器的试验模态特征分析*

张嵩阳1 何 强2↑ 肖伟民3 王磊磊1 王东晖1

(1 国网河南省电力公司电力科学研究院 郑州 450052)

(2 先进输电技术国家重点实验室(全球能源互联网研究院有限公司) 北京 102209)

(3 北京市劳动保护科学研究所 北京 100054)

摘要: 干式空心电抗器在变电站运行中发挥着重要作用。为了有效控制电抗器噪声的环境影响,该文利用特征系统实现方法,针对通电作用下的电抗器模态特性进行了试验分析。结果表明,干式空心电抗器的前5阶固有频率出现在其通电运行状态的作用频率中,并可能成为其在通电运行条件下发生噪声增强和设备损坏的重要原因,该研究将为改进其设备共振问题提供重要依据。

关键词: 电力高压设备; 干式空心电抗器; 试验模态分析; 降噪

中图法分类号: TB53 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2020)05-0730-06 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.05.011

Experimental modal analysis of dry-type air-core reactor on eigensystem realization algorithm method

ZHANG Songyang¹ HE Qiang² XIAO Weimin³ WANG Leilei¹ WANG Donghui¹

(1 State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

 $(2 \ \ State \ Key \ Laboratory \ of \ Advanced \ Power \ Transmission \ Technology \ (Global \ Energy \ Interconnection \ Research \ Advanced \ Power \ Transmission \ Technology \ (Global \ Energy \ Interconnection \ Research \ Advanced \ Power \ Transmission \ Technology \ (Global \ Energy \ Interconnection \ Research \ Advanced \ Power \ Transmission \ Technology \ (Global \ Energy \ Interconnection \ Research \ Advanced \ Power \ Transmission \ Technology \ (Global \ Energy \ Interconnection \ Research \ Advanced \ Power \ Transmission \ Technology \ (Global \ Energy \ Interconnection \ Research \ Advanced \ Power \ Transmission \ Technology \ (Global \ Energy \ Interconnection \ Research \ Advanced \ Research \ Advanced \ Power \ Transmission \ Technology \ (Global \ Energy \ Interconnection \ Research \ Advanced \ Power \ Transmission \ Technology \ (Global \ Energy \ Interconnection \ Research \ Advanced \ Power \ Transmission \ Technology \ (Global \ Energy \ Interconnection \ Research \ Advanced \ Power \ Transmission \ Technology \ (Global \ Energy \ Interconnection \ Research \ Advanced \ Power \ Transmission \ Technology \ (Global \ Energy \ Interconnection \ Research \ Advanced \ Research \ Advanced \ Advanced \ Power \ Technology \ (Global \ Energy \ Interconnection \ Research \ Advanced \ Advanced \ Advanced \ Advanced \ Advanced \ Advanced \ Adva$

Institute Co. Ltd.), Beijing 102209, China)

(3 Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 100054, China)

Abstract: It is an important part of the power system operation for the dry-type air-core reactor. This paper investigates the experimental modal characteristics in the work condition based on the eigensystem realization algorithm method. The result shows that the lower order resonance frequency of the dry-type air-core reactor existed in the work excitation frequency, which was one of the most important reasons of the equipment damage and noise enhancement during the work condition. The result provides the imperative data for improving the resonance of the equipment.

Keywords: High voltage equipment; Dry-type air-core reactor; Experimental modal analysis; Noise control

²⁰²⁰⁻⁰⁴⁻¹⁷ 收稿; 2020-07-15 定稿

^{*}国网河南省电力公司项目 (52170219000U)

作者简介:张嵩阳 (1976-),男,河南郑州人,硕士,研究方向: 输变电设备电磁环境监测及评价。

[†]通信作者 E-mail: heqiang0927@163.com

0 引言

近年来,随着我国城市化进程的快速发展,变 电站周边居民小区日益增加,变电站噪声扰民问题 日益突出。干式空心电抗器作为变电站内重要声源 设备,对变电站周边声环境具有较大影响。根据以 往研究结果^[1],干式空心电抗器噪声主要来源于交 流电流和谐波电流相互作用引起的线圈振动,其工 作状态下的声压级一般可达60 dB(A)以上,因而需 要对其采取有效降噪措施来降低噪声水平。

然而,国内以往对其噪声控制方面的研究相对 较少,目前主要致力于结构参数(包封数、内径、线 径等)的优化设计^[2-4],以期获得更加合理的电流 分布、较低的损耗和良好的温升,但在结构设计的 同时并未充分考虑电抗器的振动噪声水平,致使无 法实现干式空心电抗器的整体性能最优。由于结构 降噪的研究不足,也使得干式空心电抗器在后期采 用一些降噪措施后,不但降噪效果十分有限,还引发 了很多技术冲突,这些问题已严重制约了干式空心 电抗器的发展^[5]。因此针对干式空心电抗器噪声控 制研究还存在很多工作需要开展。其中,对干式空 心电抗器进行模态动力学分析,是开展干式空心电 抗器降噪设计与应用降噪措施的前提基础。模态分 析是以振动理论为基础、以模态参数为目标的分析 方法,可以得到设备结构具有的特定固有频率和模 态振型,从而有效掌握设备的动力学特性,进而为设 备的降噪设计提供基础,为避免设备共振提供重要 支撑。

但目前,针对干式空心电抗器模态动力学特性的试验研究工作仍然不够充分,姜志鹏^[6]采取 block Lanczos模态提取法获得了干式空心电抗器 整体设备的前1000阶模态,宋新伟^[7]通过实验和 仿真得到了干式空心电抗器整体设备的自由模态, 并仿真分析了结构参数对干式空心电抗器自由模 态的影响,Verbruggen等^[8]对干式空心电抗器自由模 态的影响,Verbruggen等^[8]对干式空心电抗器自由模 没备的结构模态进行了计算和测量,上述模态实验 研究工作均是针对设备整体进行计算或者分析,并 未针对设备每个组件进行单独试验研究^[6-8],致使 很难准确地为干式空心电抗器的降噪设计提供有 效支撑^[5]。鉴于此,本文主要研究干式空心电抗器 的模态动力学特性,通过对绕组、支柱和整体设备 的模态试验和分析,掌握其固有频率和模态振型,从 而为干式空心电抗器结构的降噪改进工作提供有效指导。

1 模态分析与试验方法

1.1 特征系统模态分析方法

在模态分析方法中,特征系统实现方法是一种 基于多输入多输出的时域模态识别方法,具有模态 识别准确率高、计算效率高的优势。当模态频率较 密集时,该方法可将频响函数逆变换得到脉冲响应 函数,比一般频域识别方法具有更好的识别效果。 该方法最早由美国航天局提出^[9-11],并已成功应用 于多个领域的模态识别工作上。

特征系统实现方法的基本思想是利用矩阵奇 异值分解(Singular value decomposition, SVD)技 术,对实测自由脉冲响应数据矩阵进行分解,通过截 断无效奇异值,来实现状态空间最有效数目的参数 控制。其本质是一种时域参数辨识方法。下面就特 征系统算法的实现过程给出简单说明。

当系统振动时,力的平衡关系可以表示为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, t) = \boldsymbol{B}_{f}\boldsymbol{y}(t), \quad (1)$$

其中,M为系统的质量阵,C为系统的阻尼阵,K为系统的刚度阵, B_f 为输入分配矩阵,x为系统质 点位移,t为时间,y为与时间相关的函数。

将上述系统振动平衡方程(1)写成状态方程的 形式(2),即

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{u}} &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{y}, \\ \boldsymbol{v} &= \boldsymbol{C}\boldsymbol{u}, \end{aligned}$$
 (2)

其中,
$$\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}$$
,系统矩阵 $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{K} & -\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{C} \end{bmatrix}$,
控制矩阵 $\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{B}_f \end{bmatrix}$, \boldsymbol{C} 为测量矩阵。

当系统结构未发生变化时,系统矩阵和控制矩 阵均为常数矩阵,因而可以获得一组一阶常微分方 程组,可得

$$\boldsymbol{u}(t) = e^{\boldsymbol{A}(t-t_0)} + \int_{t_0}^{t} e^{\boldsymbol{A}(t-\tau)} \boldsymbol{B} \boldsymbol{y}(\tau) \mathrm{d}\tau,$$
$$t \ge t_0, \tag{3}$$

式(3)中,t为时间,t₀为初始状态时间。若使用等间 隔采样,再加之零阶保持器在一个采样间隔内采样

值不变的特性,可得

 $\mathbf{TT}(\mathbf{1})$

$$\boldsymbol{u}\left[\left(k+1\right)T\right] = e^{\boldsymbol{A}T}\boldsymbol{u}\left(kT\right) + \int_{0}^{T} \boldsymbol{e}^{\boldsymbol{A}s} \,\mathrm{d}s\boldsymbol{B}y(kT),$$
(4)

式(4)中,k为间隔数,T为时间周期。通过式(4)就 可以得到系统离散时刻的脉冲响应矩阵公式(5),如 下所示:

$$\mathbf{h}(0) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{B}, \ \mathbf{h}(T) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{A}\boldsymbol{B}, \cdots,$$
$$\mathbf{h}(kT) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{A}^{k}\boldsymbol{B}.$$
(5)

这样就有系统的Hankel矩阵如式(6)所示:

$$\mathbf{h} (k) = \begin{bmatrix} \mathbf{h} (k) & \mathbf{h} (k+1) & \cdots & \mathbf{h} (k+s) \\ \mathbf{h} (k+1) & \mathbf{h} (k+2) & \cdots & \mathbf{h} (k+s+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h} (k+r) & \mathbf{h} (k+r+1) & \cdots & \mathbf{h} (k+r+s) \end{bmatrix}.$$
(6)

将**H**(0)做奇异值分解,选取前r个最大奇异值对系统进行缩减,最终可得系统的脉冲响应函数为

$$\mathbf{h}(k) = \mathbf{I}_{p}^{\mathrm{T}} \mathbf{P}_{r} \mathbf{D}_{r}^{-1/2} \left[\mathbf{D}_{r}^{-1/2} \mathbf{P}_{r}^{\mathrm{T}} \mathbf{H}(1) \mathbf{Q}_{r} \mathbf{D}_{r}^{-1/2} \right]^{k} \cdot \mathbf{D}_{r}^{-1/2} \mathbf{Q}_{r}^{\mathrm{T}} \mathbf{I}_{m},$$
(7)

其中, P_r 、 Q_r 为正交矩阵中对应前r个最大奇异值的 SVD 分解的列, D_r 为r个最大奇异值组成的对角矩阵, I_n 为p 阶单位矩阵, p为输出向量的维数。

由此可得,系统的最小实现为

$$A = D_r^{-1/2} P_r^{\mathrm{T}} \mathbf{H}(1) Q_r D_r^{-1/2},$$

$$B = D_r^{-1/2} Q_r^{\mathrm{T}} I_m, \quad C = I_p^{\mathrm{T}} P_r D_r^{-1/2}.$$
 (8)

通过上述特征系统方法进行系统实现,就可以 系统实现所求解系统的模态参数,从而直接对系统 矩阵 *A* 进行特征分解,得到干式空心电抗器动力学 系统的固有频率。

1.2 试验分析方法

基于模态分析的基本原理,本次试验对干式空 心电抗器本体结构进行了模态试验分析,干式空心 电抗器采用了目前变电站常用的PKDGKL-300型 产品,电抗器高4670 mm,外径5140 mm,试验采 用Coinv DASP模态分析软件和INV3020C多通道 采集分析仪,利用力锤移动激励的多点激振单点拾 振方法开展模态试验,电抗器结构和试验流程图如 图1、图2所示。



图1 干式空心电抗器外形结构

Fig. 1 Dry-type air-core reactor configuration



图 2 干式空心电抗器模态试验流程图

Fig. 2 Flow chart of dry-type air-core reactor modal test

模态试验的绕组力锤锤击测点共设置40个,在 圆周方向上每隔45°设置1列测点,每列设置5个测 点,每个测点分轴向和切向两个方向激励;模态试 验的支柱力锤锤击测点共设置40个,在圆周方向上 每隔45°设置1列测点,每列设置5个测点,每个测 点分轴向和切向两个方向激励。在此基础上,利用 Coinv DASP模态分析软件,按照电抗器尺寸分别 对绕组和支柱进行结构建模,其模型如图3所示,并 按激励力方向输入锤击响应加速度。

利用上述脉冲响应矩阵公式(5)、Hankel矩阵 公式(6),代入激励力与响应值,将力与加速度响应 信号转换成速度频响函数,通过逆快速傅里叶变换 (Fast Fourier transformation, FFT)得到脉冲响应 函数,并获得系统脉冲响应函数的最小实现式(8), 从而得到系统的模态固有频率和振型。将振型数据 代入上述电抗器模态试验模型中,可得到可视化振 型结果。



图3 电抗器模态试验模型

Fig. 3 Modal test model of the dry-type air-core reactor

2 模态分析结果

2.1 绕组的模态动力学特征

通过应用上述特征系统模态分析方法获得干 式空心电抗器绕组的前5阶固有频率,如表1所示。

表1 干式空心电抗器绕组前5阶固有频率

Table 1The first 5 natural frequencies ofthe dry-type air-core reactor winding

阶次	固有频率/Hz
1 阶	35.5
2 阶	82.3
3 阶	101.7
4 阶	149.5
5 阶	202.4

同时,利用模态试验分析方法得到的较为关键 的第3阶、第4阶、第5阶模态振型,如图4所示。从 模态分析结果可见,固有频率在100 Hz、150 Hz、 200 Hz附近存在与电抗器实际运行工况噪声频谱 相近的固有频率,易于引发结构共振。其中第3阶 模态振型主要表现为沿绕组径向运动的弯扭变形 特征,第4阶模态振型主要表现为沿绕组轴向运动 的弯扭变形特征,变形使电抗器中心平面向轴向对 称压缩,第5阶模态振型主要表现为沿绕组轴向运 动的弯扭变形特征。

2.2 支柱的模态动力学特征

干式空心电抗器支柱前5阶的固有频率,如表2 所示。





图4 干式空心电抗器绕组的关键阶次模态振型 Fig. 4 Key mode modes of the dry-type air-core reactor winding

同时,利用模态试验分析方法得到的较为关键 的第1阶、第3阶模态振型,如图5所示。从模态分 析结果可见,支柱的固有频率在50 Hz、100 Hz 附近 存在与电抗器实际运行工况噪声频谱相近的固有 频率,易于引发结构共振。其中第1阶振型主要以 一阶弯曲变形为特征,第3阶振型主要以支柱底部 弯曲扭转变形为主要特征,对电抗器振动增强具有 一定的影响。

表2 干式空心电抗器支柱前5阶固有频率

Table 2The first 5 natural frequenciesof the dry-type air-core reactor supportstructure

阶次固有频率/Hz1 阶43.42 阶73.23 阶96.04 阶121.05 阶167.9		
1阶 43.4 2阶 73.2 3阶 96.0 4阶 121.0 5阶 167.9	阶次	固有频率/Hz
2阶 73.2 3阶 96.0 4阶 121.0 5阶 167.9	1阶	43.4
3阶 96.0 4阶 121.0 5阶 167.9	2 阶	73.2
4阶 121.0 5阶 167.9	3 阶	96.0
5阶 167.9	4 阶	121.0
	5 阶	167.9



图5 干式空心电抗器支柱的关键阶次模态振型 Fig. 5 Key mode modes of the dry-type air-core reactor support structure

2.3 整体设备的模态动力学特征试验

干式空心电抗器整体设备的前5阶固有频率, 如表3所示。

同时,利用模态试验分析方法得到的前4阶 模态振型,如图6所示。从模态分析结果可见,干 式空心电抗器设备整体结构的固有频率在50 Hz、 100 Hz、150 Hz 附近存在与电抗器实际运行工况噪 声频谱相近的固有频率,易于在激励力作用下容易 引发电抗器整体结构共振。其中,第1阶模态振型主 要表现为整体结构的弯曲变形为主的振动变形特 征,第2阶模态振型表现为结构的弯扭变形和扭摆 变形特征,第3阶模态振型表现为结构的拍转变形 特征,第4阶模态振型表现为结构的弯扭变形转征。 随着干式空心电抗器整体结构阶次的升高,其模态 振型特征逐渐由弯曲变形向多阶弯扭变形转变,显 示出更为复杂的变形特征。

在干式空心电抗器结构中,设备伸缩变形和弯 曲扭转变形对结构整体的共振效应起到关键作用。 其前4阶模态的固有频率较低,与设备运行时的一 些重要振动噪声频段比较靠近^[5,12]。

表3 干式空心电抗器前5阶固有频率

Table 3 The first 5 natural frequencies ofthe dry-type air-core reactor

阶次	固有频率/Hz
1阶	12.85
2 阶	33.78
3 阶	48.87
4 阶	98.62
5 阶	146.63



图 6 干式空心电抗器整体设备的前 4 阶模态振型 Fig. 6 Key mode modes of the dry-type air-core reactor

在实际通电运行过程中,干式空心电抗器在电 流作用下容易发生结构共振,最终可能导致电抗器 结构振动加大,在结构内部形成振动增强和放大作 用,大幅提升结构噪声水平。另外,结构各位置在变 形条件下容易出现应力集中,在弯曲和扭转变形下 也易于引发设备变形和损坏。有鉴于此,建议在今 后的研究中,针对干式空心电抗器易于发生变形的 位置,利用降噪阻尼材料或进行结构改进,改变设备 的模态特征,使其远离通电状态下的主要作用频段, 避免通电运行状态下设备共振的发生,同时降低共 高设备的环保水平。

振对设备的损坏能力,进而保证设备的安全运行,提

3 结论

本文利用特征系统模态分析方法,对干式空 心电抗器绕组、支柱和整体设备的模态特征进行 试验和分析,电抗器绕组的前5阶模态固有频率 主要集中在35.5 Hz、82.3 Hz、101.7 Hz、149.5 Hz、 202.4 Hz,支柱的前5阶模态固有频率主要集中在 43.4 Hz、73.2 Hz、96.0 Hz、121.0 Hz、167.9 Hz, 电抗器整体的前5阶模态固有频率主要集中在 12.85 Hz、33.78 Hz、48.87 Hz、98.62 Hz、146.63 Hz, 其中电抗器绕组、支柱和整体设备模态固有频率与 通电时电抗器的振动峰值频率100 Hz和200 Hz较 为接近,易于引发设备共振,进而增加设备噪声水平 并影响设备正常运行。因此,可考虑针对设备关键 位置应用降噪阻尼材料或结构设计来改变设备的 低阶固有频率,进而避免通电激励下设备发生共振。

参考文献

- 陆居志,李健, 汲胜昌,等. 干式空心电抗器噪声等效电流测 试方法研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1): 77-85.
 Lu Juzhi, Li Jian, Ji Shengchang, et al. Study on equivalent current test method of noise of dry-type air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 77-85.
- [2] 陈锋, 巴灿, 徐玉东, 等. 矩形截面导线绕制的干式空心电抗器 优化设计方法 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(24): 5115-5125.
 Chen Feng, Ba Can, Xu Yudong, et al. Optimum design

of dry-type air-core reactor wound with wire of rectangular cross-section[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5115–5125.

- [3] 刘晓霆. 交直流混合下的干式空心电抗器设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- [4] Ma C, Zhao Y, Ma X. Efficient optimization design of dry-type air-core reactors with the improved genetic algorithm[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017, 55(2): 235–242.
- [5] 葛计彬, 平德勇, 和立伟, 等. 干式空心电抗器异常噪声的分析与对策 [J]. 电工电气, 2018(8): 75-76.
- [6] 姜志鹏. 干式空心电抗器多物理场分析及应用研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [7] 宋新伟. 干式空心电抗器振动特性研究 [D]. 合肥: 合肥工业 大学, 2018.
- [8] Verbruggen L, Kotiniitty J, Lehtonen M. 3-D finite element modeling of breathing mode for dry-type air-core reactors[C]. The COMSOL Users Conference, France, 2007.
- [9] 张枢文, 嵇春艳, 吴立人. ERA 法识别大型结构损伤与定位 [J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2007, 21(3): 17–21. Zhang Shuwen, Ji Chunyan, Wu Liren. Identification and orientation of structural damage with ERA method[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2007, 21(3): 17–21.
- [10] Juang J N, Pappa R S. An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 1985, 8(5): 620–627.
- [11] 肖伟民, 邱宁, 李贤徽, 等. 基于 ERA 方法的电力阻波器试验 模态特性研究 [C]. 2019 年全国声学大会, 深圳, 2019.
- [12] 张月华,张猛,胡宾,等. 低噪声注胶换位电磁线空心电抗器研究 [J]. 高压电器, 2018, 54(12): 188–191.
 Zhang Yuehua, Zhang Meng, Hu Bin, et al. Research of low noise glue-injected transposition magnet wire aircore reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 188–191.