

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221929

特高压直流穿墙套管故障的振动监测研究

张晋寅¹, 陈晓东², 谢志成¹, 臧春艳³, 王婷婷², 于 杰², 张 淞³, 刘 智²

(1. 南方电网公司超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663; 2. 西安西电高压套管有限公司, 陕西 西安 710077; 3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 特高压直流穿墙套管是我国电网的卡脖子技术之一。目前不仅其核心设计与制造技术存在较多难点有待攻克, 其设备运行的状态监测技术也是一个难点问题。为此, 在分析特高压直流穿墙套管的结构和常见故障的基础上, 探索了振动法在特高压直流穿墙套管故障在线监测领域的应用, 并开展了理论仿真研究, 发现当特高压直流穿墙套管的外绝缘或内绝缘发生损伤时, 套管的基础特征频率有明显改变。随后对 800 kV 级特高压直流穿墙套管的电容芯子开裂和硅橡胶伞裙破裂开展了故障模拟和振动测试, 结果表明不同故障状态下套管的基础特征频率有较大差异。因此采用振动监测技术可有效实现对特高压直流穿墙套管故障的甄别, 可为特高压工程建设和运维人员提供技术参考。

关键词: 特高压直流穿墙套管; 外绝缘; 内绝缘; 振动法; 特征频率

中图分类号: TM216.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0190-04

1 引言

特高压直流穿墙套管用于阀厅内部和外部高电压大容量输变电设备的电气连接, 产品单体承受系统电压和电流, 是直流输电系统的“咽喉”^[1]。截止到 2020 年 1 月, 我国国家电网公司投资建设和运营管理的特高压直流穿墙套管的应用中纯 SF₆ 气体绝缘有 128 支, 胶浸纸绝缘有 236 支^[2]。我国的特高压直流穿墙套管经过多年的发展, 在穿墙套管的故障分析、运营维护、设计工艺等方面也取得了较大的进展。张启浩等^[3]总结了 2011~2016 年在±800 kV 电网直流输电中套管发生的故障, 提出了增加等电位线等改进措施, 并提出应重视 SF₆ 分解物检测等运营维护的建议; 周晔等^[4]对套管外绝缘硅橡胶套进行了绝缘结构优化设计; 张晋寅等^[5]研究了特高压直流穿墙套管的温度分布特性, 并将仿真计算结果与实际测量温度进行了对比等。目前穿墙套管的主要检测方法仍为离线检测, 但该方法操作复杂、费时费力, 且对操作人员要求高。实际上一些非电信号

能够反映套管工作状态, 且具有可在线监测、安全可靠等优点, 因而基于非电信号的特高压直流穿墙套管在线监测研究很有必要。为提升套管质量及运行可靠性, 本文对特高压直流穿墙套管故障开展振动监测研究, 获得了一些有益的结论, 可供借鉴。

2 特高压直流穿墙套管

特高压直流穿墙套管耦合了环境、力、热、电等要素于一体, 具备承载电流、支撑、绝缘等功能。通常, 特高压直流穿墙套管会稍微向上倾斜安装在距离地面 15~30 m 墙壁上, 其作用是让高电位的直流电流穿过墙壁, 连接墙内和墙外设备。穿墙套管在运行时承受高压大电流, 且墙内、墙外套管应当具有各种环境条件下的外绝缘耐受能力。

我国特高压直流输电工程中特高压直流穿墙套管的类型为胶浸纸式及 SF₆ 气体式两种。胶浸纸绝缘又分为内部加 SF₆ 气体绝缘和加固体绝缘。纯 SF₆ 气体绝缘特高压直流穿墙套管与其他套管相比结构最为简单, 主要由导杆组件、套

收稿日期: 2022-09-16, **修回日期:** 2022-12-12

作者简介: 张晋寅(1986-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为换流站/变电站设备高电压试验技术和变压器、互感器及套管类设备技术监督等, E-mail: 405761299@qq.com

通讯作者: 臧春艳(1978-), 女, 博士后、副教授, 研究方向为电气设备绝缘监测与故障诊断、电弧电接触、电工电能新技术等, E-mail: zcy_peace@hust.edu.cn

管内绝缘、均压装置、硅橡胶复合外套等组成。但这种直流穿墙套管的直径很大,且对电场调节能力弱。

胶浸纸式套管的制作方法是用电环氧树脂浸渍电容芯子。套管外绝缘采用复合绝缘外套,并将压力值为 0.3~0.5 MPa 的 SF₆ 气体填充到复合绝缘外套与电容芯体之间。这种结构的套管电气性能优良,特别是套管内外场强分布合理,耐局部放电性能好,有很好的憎水性,耐污秽性能优良,抗机械应力强,同时还具备质轻体小、不易发生破碎的特性,这使其运输与包装更可靠安全,可维护性好。但由于电容芯子较长,电容芯子的绕制及真空环氧浸渍、固化工艺难度大,对生产条件、生产设备及制造工艺等要求较高。

环氧树脂浸渍干式特高压直流穿墙套管在正常工作时,其屏蔽筒和中心导体处于一条水平线上,在受到力、热、电、环境因素等多种条件的影响下,导电杆和屏蔽筒的同心度会发生改变,然后摩擦产生金属粉尘。这些粉尘在电场力的作用下可能会吸附到电极及绝缘子的表面,使得电场的畸变程度增加,易发生绝缘闪络,闪络让直流穿墙套管内部的 SF₆ 气体温度升高,从而更易发生故障。此外,该类型穿墙套管中的金属导电管与金属固定环可能会出现间隙和接触不良的情况,可能会直接造成金属固定环和导电管间的放电,从而引发更大的故障^[6,7]。

3 振动监测的原理

利用固有振动频率开展设备故障监测方便快捷,不影响设备正常工作,且传感器可收集人们不宜接近位置的振动信号。

描述结构振动的特征值问题的计算公式为:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\phi = 0 \quad (1)$$

式中, \mathbf{K} 为整体刚度矩阵; ω 、 ϕ 分别为固有振动频率和正则化振型; \mathbf{M} 为质量矩阵。

若直流穿墙损伤让 \mathbf{K} 或 \mathbf{M} 产生了一个微小扰动,则固有振动频率和正则化振型发生了一个微小改变。则结构振动的扰动方程可改写为:

$$(\phi + \Delta\phi)[(\mathbf{K} + \Delta\mathbf{K}) - (\omega^2 + \Delta\omega^2)(\mathbf{M} + \Delta\mathbf{M})] = 0 \quad (2)$$

式中, $\Delta\phi$ 为正则化振型的微小改变量; $\Delta\mathbf{K}$ 为整体刚度矩阵的微小改变量; $\Delta\mathbf{M}$ 为质量矩阵的微小改变量。

特高压直流穿墙套管为体积大、重量沉的复杂结构体,在发生一些故障时对质量矩阵基本无

影响,但对刚度会有显著的影响^[8,9]。因此在式(2)中质量矩阵的微小改变量可视为 0,即忽略掉 $\Delta\mathbf{M}$,修正得到下式:

$$\Delta\omega^2 = \phi^T \Delta\mathbf{K} \phi / (\phi^T \mathbf{M} \phi) \quad (3)$$

对一个单纯振动模态的研究($i=1,2,3,\dots$)方程可写为:

$$\Delta\omega_i^2 = \phi_i^T \Delta\mathbf{K} \phi_i / (\phi_i^T \mathbf{M} \phi_i) \quad (4)$$

其中, $\Delta\omega_i$ 为 $\Delta\mathbf{K}$ 的函数,即:

$$\Delta\omega = f(\Delta\mathbf{K}) \quad (5)$$

根据式(5)可知,若结构刚度因裂缝等原因发生了改变,则固有振动频率也会发生改变。所以特高压直流穿墙套管的损伤情况可由直流穿墙套管固有振动频率的变化反映出来。

特高压直流穿墙套管的外绝缘有相应的应力极限,若套管承受的应力超过此极限,则会导致直流穿墙套管结构的破坏,而与之对应的极限强度的应力即称之为极限载荷。推导特高压直流穿墙套管的极限载荷和其固有振动频率的关系可得出:

$$P = \sigma I / (rL) \quad (6)$$

式中, P 为极限载荷; σ 为应力; I 为特高压直流穿墙套管的危险断面惯性力矩; r 为特高压直流穿墙套管的危险断面半径; L 为特高压直流穿墙套管的长度。

将完好的特高压直流穿墙套管与发生损伤的特高压直流穿墙套管作比较,并将参考点选为极限载荷即为其承受能力。则损伤的特高压直流穿墙套管的极限载荷与正常工作的特高压直流穿墙套管的极限载荷之比即可表征直流穿墙套管的损坏程度。因此可得下式:

$$P_1 / P_0 = \omega_{i1}^2 / \omega_{i0}^2 \quad (7)$$

式中, P_1 、 P_0 分别为已经损伤、完好的特高压直流穿墙套管的极限载荷; ω_{i1} 、 ω_{i0} 分别为已经损伤、正常的特高压直流穿墙套管的固有振动频率; i 为模态阶数。

由式(7)可知,及时检测特高压直流穿墙套管的固有振动频率,即可解决在线检测特高压直流穿墙套管运行状态的判别问题。当在特高压直流穿墙套管带电运行时,其振动频率中即包含整套管的状态信息。因此,基于振动法可实现特高压直流穿墙套管运行状态的在线监测。

4 理论仿真与试验验证

4.1 仿真分析

对某国内制造商的胶浸纸与 SF₆ 复合绝缘的 ±800 kV 的特高压直流穿墙套管进行振动模

态仿真分析。该穿墙套管总长度为 21.75 m,分为室内、室外两部分,室内、室外部分长度分别为 10.50、8.95 m,中间部分由法兰连接,法兰穿过墙壁并固定在墙壁上。安装角度为水平 0~10°。

在 Comsol 中建立模型见图 1。套管的主要组成部分有均压环、绝缘筒、法兰、导电杆、电容芯子、强制电位等部分组成,其中均压环和法兰的材料为铝,电容芯子的材料为胶浸纸,导电杆的材料为铜镀银,绝缘筒的材料采用硅橡胶。正常工作时,套管法兰盘固定在墙壁上,故而需在法兰处添加一个固定约束,用于模拟套管在正常工作时的状态。对研究模型进行有限元划分三角网格,并对特高压直流穿墙套管进行振动模态分析。得出正常工作条件下无故障套管的基础特征频率为 0.83 136 Hz。

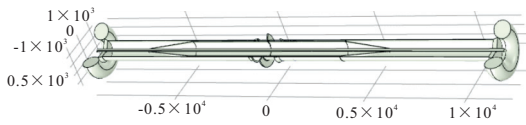


图 1 特高压直流穿墙套管的结构图(单位:mm)

Fig. 1 The structure scheme of UHV DC wall bushing

为模拟特高压直流穿墙套管的外绝缘损坏情况,在套管模型的硅橡胶套上建立一个细小的环绕型裂缝,深度为 5 mm,用来模拟硅橡胶伞裙破裂情况,见图 2。对室内部分外绝缘硅橡胶存在裂缝的套管基于有限元仿真进行固有频率分析,得出损伤套管的基础特征频率为 0.869 21 Hz。

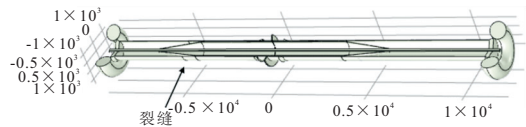


图 2 外绝缘损伤的特高压直流穿墙套管(单位:mm)

Fig. 2 UHV DC wall bushing with outdoor insulation fault

同理,对内绝缘损伤的特高压直流穿墙套管的振动模态进行分析,通过建模在套管室内部分的内绝缘电容芯子上建立一个细小的环绕型损伤,深度为 5 mm,用来模拟电容芯子开裂的情况,见图 3。通过振动模态分析得出损伤套管的基础特征频率为 0.852 09 Hz。

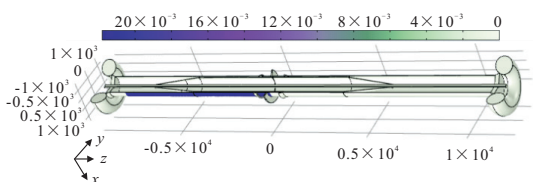


图 3 内绝缘损伤套管的固有频率分析(单位:mm)

Fig. 3 Natural frequency analysis on the bushing with inner insulation fault

由仿真结果可知,无论是外绝缘硅橡胶筒或

内绝缘电容芯子发生损伤,特高压直流穿墙套管的基础特征频率均发生了明显的改变。因此在特高压直流穿墙套管运行监测中可收集其振动信号,然后基于数据实时分析对应的基础特征频率,从而判定套管是否发生故障。

4.2 试验验证

选取同一型号的若干完好和有损伤的特高压直流穿墙套管,统计套管的基本结构参数和损坏情况,并逐一进行编号。损伤的套管可按照其裂纹位置分为外绝缘破损和内绝缘破损两大类。待振动传感器安装完毕后,套管正常加压运行,每隔一段时间测试一次套管的振动数据。本文试验选择在多只 CRFGZ-±800/6328 型特高压直流穿墙套管上安装振动传感器,部分样品人为设置了外绝缘硅橡胶筒裂缝或内绝缘电容芯子裂缝,裂缝深度均为 5 mm。每个套管安装 4 个振动传感器,安装位置见图 4。

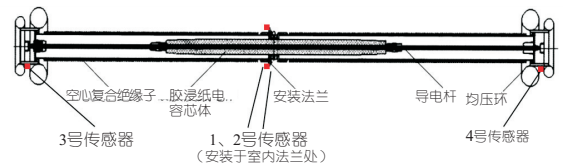


图 4 振动传感器的安装位置

Fig. 4 Installation sites of the vibration sensors

传感器采用通用型三轴 ICP 加速度计,其型号为 356A25,量程为 ±200 g PK,灵敏度为 (±10%)25 mV/g,频响(±5%)为 1~5 kHz,分辨率(1~10 kHz)为 0.000 2 g RMS,重量为 10.5 g。

通过对实测数据的分析,计算出套管无故障(状态 1)、硅橡胶伞裙破裂(状态 2)、套管芯子开裂(状态 3)三种情况下,套管基础特征频率见表 1。

表 1 几种状态下特高压直流穿墙套管的基础特征频率

套管状态	传感器位置			
	# 1 传感器	# 2 传感器	# 3 传感器	# 4 传感器
状态 1	0.842 5	0.843 0	0.846 9	0.843 8
状态 2	0.852 1	0.852 2	0.859 2	0.856 0
状态 3	0.873 3	0.874 5	0.881 4	0.882 6

由表 1 可知,从振动信号中可发现套管不同状态下,其基础特征频率有较大差异。因此,采用振动监测的方法可较早发现特高压直流穿墙套管的故障或早期征兆。

5 结论

a. 本文探索了振动法在特高压直流穿墙套管故障在线监测领域的应用。理论仿真和试验结

果表明,无论是外绝缘硅橡胶筒或内绝缘电容芯子发生损伤,特高压直流穿墙套管的基础特征频率均发生了明显的改变。

b. 在特高压直流穿墙套管运行监测中可收集其振动信号,然后基于数据实时分析对应的基础特征频率,从而判定套管是否发生故障。

参考文献:

- [1] 刘杉,宋胜利,卢理成,等. ±800 kV 特高压直流穿墙套管故障分析及设计改进[J]. 高电压技术, 2019,45(9):2928-2935.
- [2] 兰贞波,宋友,邓建钢,等. 我国特高压交直流套管研究现状[J]. 电瓷避雷器,2021(2):1-6,14.
- [3] 张启浩,吴德贯,马正霖. ±800 kV 特高压直流输电工程直流穿墙套管设计缺陷及其改进方法[J]. 高压电器,2019,55(4):239-244.
- [4] 周晔,魏俊梅. 1100 kV 硅橡胶套管绝缘结构优化设

计[J]. 电气制造,2010(10):72-74.

- [5] 张晋寅,杨旭,邓军,潘志城. ±800 kV 柔性直流穿墙套管温升特性研究[J]. 变压器,2021,58(12):38-41,45,77.
- [6] 黎斌,王日新,于欣,等. 超/特高压直流套管的研发新思路——±800 kV 电容式复合绝缘穿墙套管结构设计探讨[J]. 高压电器,2021,57(7):1-11,17.
- [7] 狄谦,刘之方,李国富. 550 kV SF6 气体绝缘组合电器套管研制[J]. 中国电力,2010,43(10):16-19.
- [8] WU J R, LI Q S. Finite element model updating for a high-rise structure based on ambient vibration measurements[J]. Engineering structures, 2004, 26(7): 979-990.
- [9] QIN Q, LI H B, QIAN L Z, et al. Modal identification of Tsing Ma bridge by using improved exponentsystem realization algorithm [J]. Journal of sound and vibration, 2001, 247(2): 325-341.

Research on Vibration Monitoring on Ultra-voltage DC Wall Bushing

ZHANG Jin-yin¹, CHEN Xiao-dong², XIE Zhi-cheng¹, ZANG Chun-yan³,
WANG Ting-ting², YU Jie², ZHANG Song³, LIU Zhi²

(1. Overhaul Test Center of China Southern Power Grid Corporation EHV Transmission Company, Guangzhou 510663, China; 2. Xi'an XD High Voltage Bushing Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 3. School of Electrical and Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: UHV DC wall bushing is the neck-jamming technology of China's power grid. At present, not only its core design and manufacturing technology still have many difficulties to be overcome, but also the state monitoring technology of its equipment operation is also a hot issue. This paper explores the application of an on-line monitoring technology based on vibration signals in UHV DC wall bushings. On the basis of analyzing the structure and common faults of UHV DC wall bushings, theoretical simulation research is carried out. It is found that when the outdoor insulation or inner insulation of the UHV DC wall bushing is damaged, the fundamental characteristic frequency of the bushing changes significantly. Afterwards, this paper carried out fault simulation and vibration tests on the cracking of capacitor core and the rupture of silicone rubber shed of the 800 kV UHV DC wall bushing. The results show that the fundamental characteristic frequencies of the bushing under different fault conditions are quite different. Therefore, the use of vibration monitoring technology can effectively identify the faults of UHV DC wall bushings, which can provide technical reference for UHV engineering construction and operation and maintenance personnel.

Key words: UHV DC wall bushing; outdoor insulation; inner insulation; vibration method; characteristic frequency

(上接第 62 页)

Study on Adverse Impact of River Blocking Project on Water Environment and Optimal Operation of the Project

PANG Min^{1a}, ZHANG Peng², YOU Jia-yi^{1b}, ZHANG Qian^{1b}, CHEN Zhi-qi³

(1a. College of Hydrology and Water Resources; 1b. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. Jiangsu Academy of Environmental Industry and Technology Corp, Nanjing 210036, China)

Abstract: In order to improve the water environment carrying capacity of Nanchang during the dry period, this paper constructed a water environment model at the lower end of the Ganjiang River and proposed an optimal scheduling scheme. The results show that the optimal scheduling water levels for the Ganjiang main river and its four downstream branches—the main, the north, the middle, and the south—were between the minimum ecological water level and the alert control water level, and that the scheduling time was within 1.11 days when the flow rate was less than 1 020 m³/s. Conversely, when the flow rate was greater than 1 020 m³/s, the alert control water level was the flood control limit water level. The optimal scheduling water levels of the main river and the four branches were between the minimum ecological water level and the flood control limit water level, and the scheduling time was within 4-7 d. It was suggested that each branch barrage hub should be operated close to the alert control water level to ensure that the water quality of the river control section meet the standard, and to maintained the maximum amount of water resources available in Nanchang.

Key words: lower reaches of Ganjiang River; water environmental model; river junction; optimal scheduling