

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.07.031

瓷支柱绝缘子带电状态检测系统的研制

陈重洪¹, 庄建煌², 林俊超², 彭 健², 陈培星²

(1. 福建电力职业技术学院, 福建 泉州 362008; 2. 国网福建省电力有限公司莆田供电公司, 福建 莆田 351100)

摘要: 通过研究瓷支柱绝缘子所受载荷及振动形式, 得出可用瓷支柱绝缘子固有振动频率定性评价瓷支柱绝缘子状态。基于该理论, 文中开发研制了一种瓷支柱绝缘子带电状态检测系统。通过现场检测可知, 该系统可以满足带电及实时检测操作要求, 并且对于瓷支柱绝缘子的状态监测的便捷性和可靠性有了显著提升。

关键词: 瓷支柱绝缘子; 带电检测; 机械性能; 固有振动频率; 智能系统

Development of Live Detection System for Porcelain Post Insulator

CHEN Chonghong¹, ZHUANG Jianhuang², LIN Junchao², PENG Jian², CHEN Peixing²

(1. Fujian Electric Power Technical College, Fujian Quanzhou 362008, China; 2. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Putian Power Supply Company, Fujian Putian 351100, China)

Abstract: In this paper, by studying the load and vibration form of the porcelain post insulator, it is concluded that the natural vibration frequency of the porcelain post insulator can be used to qualitatively evaluate the state of the porcelain post insulator. Based on this theory, this paper developed a porcelain post insulator live detection system. The field test results show that the live detection system of porcelain post insulator developed in this paper can meet the requirements of live and real-time detection, and can effectively improve the convenience and reliability of status monitoring of porcelain post insulator.

Key words: porcelain post insulator; live detection; mechanical character; natural vibration frequency; intelligent system

0 引言

瓷支柱绝缘子能够支持不同电压等级的母线、刀闸、避雷器等电气设备, 因此在变电站内得到大量地应用。然而, 瓷支柱绝缘子的机械性能在工作条件和外部环境的影响下会逐渐下降, 可能产生裂纹甚至出现断裂损坏, 造成严重后果^[1-3]。

220 kV 三柱式隔离开关的静触头支柱绝缘子、操作支柱绝缘子上部金属附件处发生断裂, 导致220 kV 母线对地放电见图1。通过解体分析可知, 该静触头支柱绝缘子在制造过程中存在瓷件与金属附件间胶装部位上砂不足、未涂沥青层、瓷件偏心等质量问题, 导致胶装部位应力集中。在长期运

行中, 由于隔离开关多次进行分合闸动作, 导致金属附件处内部绝缘子瓷件应力集中区域(上砂交界面)产生裂纹并逐步发展, 最终使得隔离开关在分闸操作时发生断裂事故。母线引线向上抖动并拉住隔离开关导电臂, 同时操作绝缘子继续往分闸方向转动, 就会造成操作支柱绝缘子断裂。因此, 定期对瓷支柱绝缘子的机械性能开展检测和评估, 及时找出损伤的部分, 对于变电运维及电力工程具有重要的意义^[4-5]。

在传统的3种瓷支柱绝缘子检测方法中, 红外测温法^[6]寻找初期瓷支柱绝缘子裂纹相对困难, 且测温结果受环境影响较大; 超声波检测法^[7-8]在无损伤检测方法中虽是比较成熟的, 但其需停电检测, 且缺

收稿日期: 2020-01-12; 修回日期: 2020-03-18

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2015J01190)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Fujian Province, China(2015J01190).



图1 220 kV三柱式隔离开关支柱绝缘子

Fig. 1 Fracture of post insulator of 220 kV three-post isolating switch

乏实施条件,所以检测效率较低;紫外线检测法^[9-11]可以检测到瓷支柱绝缘子表层及上部金属附件处所存在的微观裂纹,但无法检测到内部存在的缺陷。

文中就已存在的瓷支柱绝缘子损伤测试问题,通过研究各项机械特性,发现了瓷支柱绝缘子的损伤状态是与响应频率之间有着关联,并以此研制出了一套能事先预防故障发生的瓷支柱绝缘子带电状态检测系统。

1 瓷支柱绝缘子的机械理论基础

1.1 瓷支柱绝缘子振动型式的研究

假设瓷支柱绝缘子为一个受作用力影响的柱状装置,其在不同形式下的振动公式如下。

1)弯曲振动。其表达式为

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}) + \rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q(x, t) \quad (1)$$

式(1)中: E 为柱状装置的弹性模量; I 为柱状装置的力矩; w 为柱状装置的下垂挠度; x 为柱状装置的长度; ρ 为柱状装置的相对密度; F 为柱状装置的横截面积; t 为时间; $q(x, t)$ 为扰动力。

2)纵向振动。其表达式为

$$\frac{\partial}{\partial x}(EF \frac{\partial u}{\partial x}) + \rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = q(x, t) \quad (2)$$

式(2)中: E 为柱状装置的弹性模量; F 为柱状装置的横截面积; u 为柱状装置的纵向变形; x 为柱状装置的长度; ρ 为柱状装置的相对密度; t 为时间; $q(x, t)$ 为扰动力。

3)扭曲振动。其表达式为

$$\frac{\partial}{\partial x}(GI_k \frac{\partial}{\partial x}(GI_k \frac{\partial \theta}{\partial x}) - \rho I_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}) = \mu(x, t) \theta \quad (3)$$

式(3)中: G 为柱状装置的剪切模数; I_k 为柱状装置的惯性力矩; θ 为柱状装置扭曲的角度; x 为柱状

置的长度; ρ 为柱状装置的相对密度; I_p 为惯性极力矩; t 为时间; $\mu(x, t)$ 为扰动力矩。

式(1)~(3)的通解可以写为

$$\omega = f(a_i, r_i, I_p, I, F, E, G, \rho) \quad (4)$$

式(4)中: a_i 、 r_i 分别为柱状装置的尺寸大小; I_p 为柱状装置惯性静力矩; I 为柱状装置断面的极力矩; F 为柱状装置的横截面积; E 为柱状装置的弹性模量; G 为柱状装置的剪切模数; ρ 为柱状装置的相对密度。

1.2 瓷支柱绝缘子机械应力型式的研究

在瓷支柱绝缘子的使用周期内,存在着两种运转的主要作用力。一方面是能让瓷支柱绝缘子发生弯曲的外界自然风力,而另一方面瓷支柱绝缘子在断路器、隔离开关操作过程中受到作用力而发生扭曲^[12-13]。

1)弯曲应力。其表达式为

$$\sigma_{u_3} = \frac{a(P_1 + P_2)}{W} = \frac{a(P_1 + P_2) \times r}{J} \quad (5)$$

式(5)中: σ_{u_3} 为弯曲应力; a 为瓷支柱绝缘子的线性尺寸; $(P_1 + P_2)$ 为瓷支柱绝缘子所受的作用力之和; J 为横截面惯性力矩; r 为截面半径。

2)扭曲应力。其表达式为

$$\tau = \frac{P_2 L r}{I_p} \quad (6)$$

式(6)中: τ 为扭曲应力; P_2 为瓷支柱绝缘子承受的作用力; L 为线性尺寸; r 为截面半径; I_p 为横截面的惯性极力矩。

将(5)、(6)归纳后可以得到瓷支柱绝缘子机械应力为

$$\sigma_{\text{ообщ}} = f(\sum P_i, L_i, a_i, I_i, I_{pi}, r) \quad (7)$$

式(7)中: $\sum P_i$ 为所受作用力之和; L_i 、 a_i 分别为尺寸大小; I_i 为力矩; I_{pi} 为惯性极力矩; r 为半径。

对比式(4)、(7)可知,瓷支柱绝缘子机械应力函数与机械振动函数之间有部分自变量是一致的,由此可得,频率大小是受机械强度所改变的。

1.3 瓷支柱绝缘子极限载荷的研究

当瓷材质的应力逐渐升高至某一程度时,其结构将发生不可逆转的损坏,这种状况下的应力值定义为极限强度,施加的作用力定义为极限载荷^[14-16]。

当瓷支柱绝缘子一边固定不动,另一边施加作用力,则极限载荷为

$$P = \frac{\sigma I}{L r} \quad (8)$$

式(8)中: P 为极限载荷; σ 为极限强度; I 为横截面的惯性静力矩; L 为瓷支柱的高度; r 为横截面半径。

当固定瓷支柱绝缘子的一边,而另一边使之不受力,其特征频率为

$$\bar{\omega}_i = \frac{2K_i}{L^2} \sqrt{EI/\mu} \quad (9)$$

式(9)中: $\bar{\omega}_i$ 为特征频率; K_i 为Krylov方程的根; L 为高度; E 为弹性模量; I 为惯性静力矩; μ 为瓷支柱绝缘子的单位长度质量^[17]。

把极限载荷当作参考,损伤绝缘子的极限载荷与没损伤的比值用来衡量损伤程度,即

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{I_1}{I_0} = 2 \frac{\bar{\omega}_i}{\bar{\omega}_{i_0}} \quad (10)$$

式(10)中: P_0 为无损伤的瓷支柱绝缘子的极限载荷; P_1 为受损的瓷支柱绝缘子的极限载荷; I_1 为受损瓷支柱绝缘子横截面惯性静力矩; I_0 为无受损瓷支柱绝缘子横截面惯性静力矩; $\bar{\omega}_i$ 为受损瓷支柱绝缘子的特征频率; $\bar{\omega}_{i_0}$ 为无受损瓷支柱绝缘子的特征频率。

其中,在其他振动形式的作用下同样能够满足,所以可转换为

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{I_1}{I_0} = \frac{F_1}{F_0} = \frac{I_{p_1}}{I_{p_0}} = 2 \frac{\omega_{i_1}}{\omega_{i_0}} \quad (11)$$

式(11)中: F_1 为损伤瓷支柱绝缘子的面积; F_0 为没损伤瓷支柱绝缘子的面积; I_{p_1} 为损伤瓷支柱绝缘子的惯性极力矩; I_{p_0} 为没损伤瓷支柱绝缘子的惯性极力矩。

从式(11)可知,通过各种形式的振动,能够查出瓷支柱绝缘子的损伤情况。

1.4 瓷支柱绝缘子状态与自身频率的关系

对于瓷支柱绝缘子的机械强度而言,其特征频率随时间保持恒定是表示其良好的基本标准^[18-19]。因此,可以采用分析瓷支柱绝缘子对实验激发的响应谱方式来评判其状态。

研究采用具有足够功率的、线性的、频率范围在1~10 kHz的随机振动激励源作为振动发生器。文中实验激励信号,见图2。某次实验中接收到的经数字化处理后的瓷支柱绝缘子响应频谱见图3。

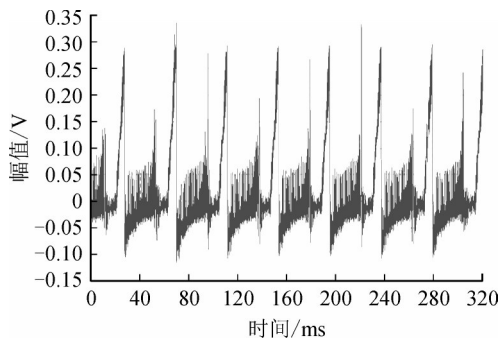


图2 实验激励的随机振动信号

Fig. 2 The test's random vibration signal

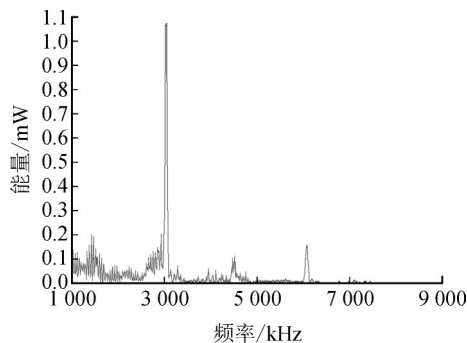


图3 数字化技术处理后的瓷支柱绝缘子响应频谱

Fig. 3 Porcelain post insulator's response spectrum after digital technology processing

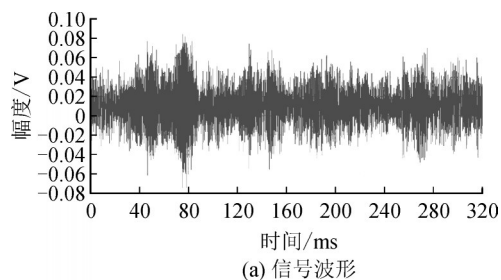
通过大量实验,覆盖没有损伤的和不同部位损伤的瓷支柱绝缘子对实验施加激励的响应情况,得出瓷支柱绝缘子的状态与响应频率的关系,结果见表1。

表1 瓷支柱绝缘子的状态与响应频率的关系

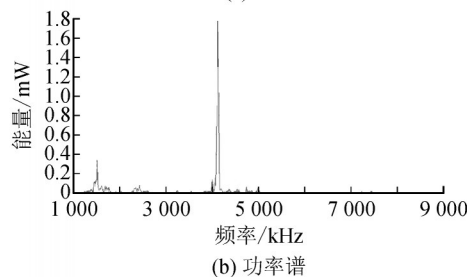
Table 1 Relationship between state and response frequency of porcelain post insulator

瓷支柱绝缘子状态	激励能量/mW	激励振幅	响应频率/kHz
正常	≥ 0.5	满足前后振幅对称均匀	3~7
瓷支柱绝缘子串上半部异常	≥ 0.5	满足前后振幅对称均匀	> 7
瓷支柱绝缘子串下半部异常	≥ 0.5	满足前后振幅对称均匀	< 3

与表1中所对应的3种典型的频谱关系,分别见图4~6。



(a) 信号波形



(b) 功率谱

图4 检测频率值在3~7 kHz区间内正常频谱示意图

Fig. 4 The normal spectrum of the detection frequency value between 3~7 kHz

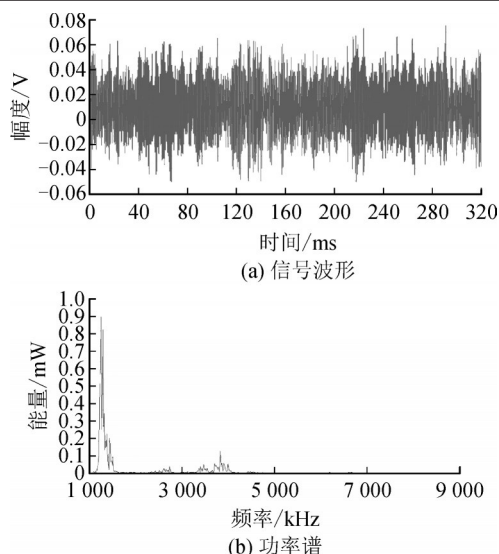


图5 检测频率值在小于3 kHz区间内异常频谱示意图

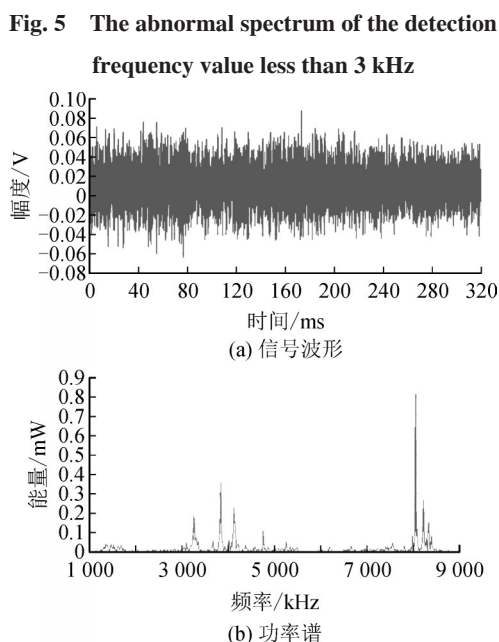


图6 检测频率值在大于7 kHz区间内异常频谱示意图

Fig. 6 The abnormal spectrum of the detection frequency value higher than 3 kHz

2 瓷支柱绝缘子带电状态检测系统的研制

2.1 瓷支柱绝缘子带电检测系统实物

文中研制的瓷支柱绝缘子状态检测系统的实物图见图7。测试仪、绝缘杆以及平板电脑等几个部分是其主要组成部分。

测试仪包含振动发生器、信号接收器以及语音播报3个部分。其中,振动发生器能够对瓷支柱绝缘子施加线性的大功率随机振动,输出的振动频率范围为1~10 kHz。磁致伸缩、电动和压电这3种类型的振动发生器能够产生上述频率范围的振动,但

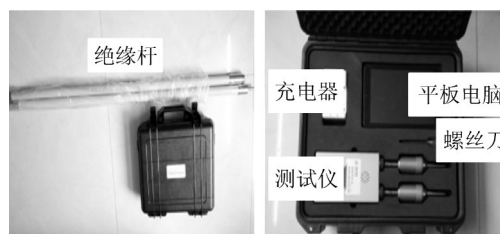


图7 瓷支柱绝缘子状态检测系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of porcelain pillar insulator live detection system

磁致伸缩发生器需要庞大的主振装置,电动型发生器的谐振频率低。因此,文中采用了压电型振动发生器。信号接收器采用压电式传感器采集瓷支柱绝缘子在振动发生器作用下的响应信号,然后对数据进行初步处理,如放大信号、数字化处理等。同时测试仪能够在检测开始与结束时候进行语音播报。

将绝缘杆的一端连接上测试仪,即可实现在带电情况下的操作。测试仪测量到的数据通过蓝牙传输到平板电脑中,采用软件保存并处理采集到的信号。

2.2 检测系统的性能参数

研制的瓷支柱绝缘子带电状态检测系统的性能参数如下:①检测范围:10~500 kV;②采样速度:50 kHz/s;③检测方式:带电检测;④采样数据长度:327.68 ms;⑤在线监测模式:通过蓝牙将测试数据传至平板的应用软件中;⑥振动发生器输出模式:脉冲、噪波及正反向扫频3种模式可以自行选择;⑦振动发生器输出加速度: $>30 \text{ m/s}^2$;⑧接收器测量频率准确度:0.001;⑨信号接收器接收频率范围:0.2~15 kHz;⑩信号接收器灵敏度: 1.6 pC/mS^{-2} 。

2.3 检测系统的优点

- 1)采用蓝牙传输模式的离线测量,无需传输线。
- 2)能抵抗强电磁干扰,运行稳定。
- 3)操作过程实时语音播报,方便操作和数据记录。
- 4)装置内置稳定型电池模块,无需现场电源。
- 5)缩短了单个瓷支柱绝缘子检测时间,达到单支完成检测时间在10~15 s,并且能够实时同步分析得出检测结果。

- 6)建立了数据库实现对检测结果智能诊断。

2.4 检测系统适用的范围

文中研制的瓷支柱绝缘子带电状态检测系统适用于10~500 kV电压等级的瓷支柱绝缘子性能测量。

3 瓷支柱绝缘子带电状态检测系统的应用

瓷支柱绝缘子带电状态检测系统的现场应用测试图见图8。首先将检测仪探针准确抵触在被测

目标体的底部接触面上,抵触位置正确后会听到仪器语音播报“检测开始”,此时开始执行测量,直到语音播报“检测结束”,则所测前端动作完成。然后利用后端电脑里的分析软件得出的数据结果。



图8 瓷支柱绝缘子带电状态检测系统测试

Fig. 8 Live test system for porcelain post insulator

然而,现场应用中瓷支柱绝缘子状态检测系统的测量结果会因测试位置的不同而有所差异。因此,需要对同一瓷支柱绝缘子的多个位置进行测量,以便能进行综合判断。

采用文中研制的瓷支柱绝缘子带电状态检测系统,在国网莆田供电公司所辖的若干个变电站内进行了瓷支柱绝缘子性能测量,测试数据达到3千多组,并从中发现有19只的性能处在异常状态,而本文所研制的装置在及时维护及故障防范方面提供了重要的参考,保障了电力系统的可靠运行。

4 结语

研制的瓷支柱绝缘子带电状态检测系统,与传统的测试方式相比较,具备可带电作业、检测速度快、可持续检测时间较长、传输速度快、重量轻等特点。不仅加快检测速度,降低人工作业的时间,且装置可单人操作,大幅度提高工作效率和安全性,节省了大量的人力、物力和财力。

参考文献:

- [1] 王少华,李 特,周象贤,等. 变电站瓷支柱绝缘子断裂故障分析及预防措施[J]. 电瓷避雷器,2016(5):35-38.
WANG Shaohua, LI Te, ZHOU Xiangxian, et al. Fracture fault analysis and preventive measures of porcelain post insulator in substation[J]. Electric Porcelain Arrester, 2016, (5):35-38.
- [2] 律方成,马建桥,汪佛池,等. 基于红外成像的瓷支柱绝缘子发热规律研究[J]. 电工技术学报,2013,28(12):130-135.
LYU Fangcheng, MA Jianqiao, WANG Fochi, et al. Study on the heating law of porcelain pillar insulator based on infrared imaging[J]. Journal of Electrical Engineering, 2013, 28(12):130-135.
- [3] 郑云海,王门鸿,吴奇宝,等. 紫外探伤仪在输变电设备电晕放电检测中的应用[J]. 电世界,2019,60(2):6-9.
ZHENG Yunhai, WANG Menhong, WU Qibao, et al. Application of ultraviolet flaw detector in corona discharge detection of power transmission and transformation equipment [J]. Electrical World, 2019, 60(2):6-9.
- [4] 黎卫国,张长虹,杨 旭,等. 500 kV GIL三支柱绝缘子炸裂故障分析与防范措施[J]. 电瓷避雷器,2019(3):221-227.
LI Weiguo, ZHANG Changhong, YANG Xu, et al. Analysis and preventive measures on burst failure of 500 kV GIL three-pillar insulator[J]. Insulators and Arresters, 2019(3):221-227.
- [5] 姜 斌,谢 强,何 畅,等. 不同连接方式下直流场回路支柱绝缘子抗震性能研究[J]. 高压电器,2019,55(6):124-130.
JIANG Bin, XIE Qiang, HE Chang, et al. Seismic performance of post insulators in dc field circuits with different connection modes[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6):124-130.
- [6] 王胜辉,律方成,李燕青,等. 紫外成像法在变电站电晕放电检测中的应用研究[J]. 高压电器,2010,46(2):15-19.
WANG Shenghui, LAW Fangcheng, LI Yanqing, et al. Application of ultraviolet imaging in corona discharge detection of substation[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(2):15-19.
- [7] 黄 艳,高从闯. 超声波探伤在瓷支柱绝缘子缺陷检查中的应用[J]. 电工技术,2013(2):70-71.
HUANG Yan, GAO Congchuang. Application of ultrasonic flaw detection in defect inspection of porcelain pillar insulator[J]. Electrical Technology, 2013(2):70-71.
- [8] 张 旭,张 颖. 超声波检测技术在电力设备绝缘诊断中的应用[J]. 自动化与仪器仪表,2017(12):197-198.
ZHANG Xu, ZHANG Ying. Application of ultrasonic testing technology in insulation diagnosis of power equipment [J]. Automation and Instrumentation, 2017(12):197-198.
- [9] 国伟辉,闫 帅,荆林远,等. 电场法在支柱绝缘子检测中的应用探讨[J]. 科技视界,2018(28):33-35.
GUO Weihui, YAN Shuai, JING Linyuan, et al. Discussion on the application of electric field method in pillar insulator detection[J]. Science and Technology Vision, 2018 (28):33-35.
- [10] 张广兴. 瓷绝缘子振动声学检测方法研究及应用[D]. 北京:北京:华北电力大学,2017.
ZHANG Guangxing. Research and application of vibration acoustic detection method for porcelain insulator[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2017.
- [11] 谢沛锋. 隔离开关瓷柱绝缘子应力分析及检测装置的研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.
XIE Peifeng. Study on stress analysis and detection device

- of porcelain insulator for isolating switch[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [12] 谢 强, 张 玥, 何 畅, 等. 管母连接 ± 800 kV 复合支柱绝缘子的抗震性能分析及试验研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 1-8.
- XIE Qiang, ZHANG Yue, HE Chang. Seismic performance analysis and experimental study of composite pillar insulators with pipe parent connection at ± 800 kV[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 1-8.
- [13] 刘 鹏, 李乃一, 田汇冬, 等. ± 1 100 kV 直流 SF₆ 气体绝缘穿墙套管支柱绝缘子电场分布特性分析[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 194-200.
- LIU Peng, LI Naiyi, TIAN Huidong, et al. Analysis of electric field distribution characteristics of SF₆ gas insulation pillar insulator with ± 1 100 kV dc insulation[J]. Global Energy Internet, 2019, 2(2): 194-200.
- [14] BEHNIA K, KAPITULNIK A. A lower bound to the thermal diffusivity of insulators[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2019, 31(40): 241-247.
- [15] 赵 骞, 陈国宏, 李远山, 等. 瓷支柱绝缘子偏心程度对力学性能影响研究[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2019, 24(1): 21-25.
- ZHAO Qian, CHEN Guohong, LI Yuanshan, et al. Influence of eccentricity of porcelain pillar insulator on mechanical properties[J]. Journal of Anhui Vocational College of Electrical Engineering. 2019, 24(1): 21-25.
- [16] 付天孟, 刘广兴, 蒲英俊, 等. 浅谈声振动检测技术在瓷支柱绝缘子中的应用[J]. 山东工业技术, 2019(6): 186-188.
- FU Tianmeng, LIU Guangxing, PU Yingjun, et al. Application of acoustic vibration detection technology in porcelain pillar insulator[J]. Shandong Industrial Technology, 2019(6): 186-188.
- [17] 吐尔洪江·吐逊, 阿满姑丽·库热西. 500 kV 升压站支柱绝缘子污闪的基本防治对策[J]. 科技创新导报, 2017, 14(17): 24-26.
- TUERHONGJIANG Tuxun, AMMANGUOLI Kurexi. Basic prevention and control measures for pollution flashover of pillar insulators in 500 kV booster stations[J]. Science and Technology Innovation Guide, 2017, 14(17): 24-26.
- [18] ROCHA P H, COSTA E G, SERRES A R, et al. Inspection in overhead insulators through the analysis of the irradiated RF spectrum[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019(113): 355-361.
- [19] 刘海龙, 程永锋, 卢智成, 等. ± 1 100 kV 复合支柱绝缘子地震模拟振动台试验[J]. 电瓷避雷器, 2018(6): 138-144.
- LIU Hailong, CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, et al. Seismic simulation shaking table test for composite pillar insulator at ± 1 100 kV[J]. Insulators and Arresters, 2018(6): 138-144.
- 陈重洪(1980—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气控制。
- 庄建煌(1974—), 男, 大学本科, 高级工程师, 高级技师, 主要从事输变电检修及相关技术工作的研究与开发。
- 林俊超(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事配电运维检修方面的研究工作。
- 彭 健(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事变电运行与检修方面的研究工作。
- 陈培星(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事变电二次检修方面的研究工作。