

线阵 UHF 传感器开关柜局部放电定位方法研究

张红兵, 索春光

(昆明理工大学理学院, 云南昆明 650500)

摘要: 对开关柜进行局部放电在线监测及定位, 可以及时发现故障及隐患, 对巡检人员做进一步检修具有指导意义。特高频法用于高压开关柜在线监测具有检测频率高、外界干扰信号小等优点, 但目前开关柜局部放电检测与定位中仍存在设备通道数量受限、不能同时监测多面开关柜的问题。为此提出一种新型的线性阵列式 UHF 传感器开关柜局部放电在线监测方法, 采用线性阵列方式实现同时对多面开关柜进行局部放电检测, 并运用包络检波对局部放电信号进行频谱搬移, 实现双通道数据采集功能。实验显示该方法对局部放电信号的定位最大误差为 13.4cm, 平均定位误差为 8.1cm, 在满足对多面开关柜局部放电检测与定位的同时具有良好的可扩展性与经济性。

关键词: UHF 传感器阵列; 开关柜; 局部放电定位; 在线检测; 包络检波; 双通道数据采集; 可扩展性

DOI: 10.11907/rjdk.211198

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2022)001-0171-05

Research on Local Discharging Positioning Method of Switchgear Based on Linear Array UHF Sensor

ZHANG Hong-bing, SUO Chun-guang

(College of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: On-line partial discharge monitoring and positioning of the switchgear can detect faults and hidden dangers in time, which is of guiding significance for inspection personnel to perform further maintenance. The UHF method used for online monitoring of high voltage switchgear has obvious advantages such as high detection frequency and small external interference signals. However, the UHF method still has the problem that the number of equipment channels is limited in the partial discharge detection and positioning of the switchgear, and the multi-sided switchgear cannot be monitored at the same time. Based on this, propose a new linear array UHF sensor switchgear partial discharge online monitoring method. The linear array method is adopted to realize the simultaneous partial discharge detection of the multi-sided switchgear, and the envelope detection is used to shift the spectrum of the partial discharge signal to realize the function of dual-channel data acquisition. Experiments show that the maximum positioning error of this method for partial discharge signals is 13.4cm, and the average positioning error is 8.1cm. This method not only satisfies the detection and positioning of partial discharge in multi-sided switchgear, but also has good scalability and economy.

Key Words: UHF sensor array; switchgear; partial discharge location; online test; envelope detection; two-channel data acquisition; scalability

0 引言

开关柜作为电力系统中的关键组件已广泛应用于输电配电网, 承担着开合、控制和保护用电设备的作用, 其运行可靠性直接影响着电力系统供电质量及安全性能。

局部放电作为一种潜在威胁, 直接影响着开关设备和电力系统的稳定和绝缘安全^[1]。因此, 对开关柜局部放电进行检测和定位是发现其内部早期绝缘缺陷的基础^[2-4], 可用于指导巡检人员对开关柜进行下一步操作、维护及检修^[5-9]。

局部放电信号包含了丰富的绝缘状态信息^[10], 特高频

收稿日期: 2021-02-08

基金项目: 中国南方电网公司科技项目(KTKM2018203)

作者简介: 张红兵(1995-), 男, 昆明理工大学理学院硕士研究生, 研究方向为能源电子; 索春光(1977-), 女, 博士, 昆明理工大学理学院副教授、硕士生导师, 研究方向为能源电子。

(Ultra High Frequency, UHF)法作为最重要的检测方法之一,广泛应用于电气设备绝缘缺陷的检测和故障诊断。UHF法是针对传统方法的不足而提出的检测方法,20世纪80年代英国人 Boggs 和 Stone 将其应用于气体绝缘开关设备的局部放电检测中。该检测方法由于抗干扰能力强、灵敏度高,近几年得到迅速发展^[11]。

文献[12-14]采用高压开关柜局部放电特高频在线监测系统对开关柜进行在线监测,结果表明UHF法可以很好地满足开关柜局部放电在线监测要求;文献[15]提出了一种基于 Android 平台的开关柜局部放电 UHF 检测系统设计方案,在实验室进行实验获得了较好效果。

上述检测、识别方法虽然能满足开关柜局部放电检测与定位要求,但仍存在一些不足之处,如UHF信号频率较高,对数据采集系统采样精度、采样带宽要求较高;采集设备通道数量受限,对多面开关柜同时监测较为困难。基于此,本文提出一种新型的基于线性阵列式UHF传感器的开关柜局部放电在线监测方法。该方法通过同轴电缆将多个特高频传感器串联组成线性阵列传感器系统,并与数据采集设备组成一套完整的开关柜局部放电在线监测系统。通过本套系统可以实现同时对多个开关柜进行局部放电的在线监测与定位,解决了采集设备数量通道受限问题,并具有灵活的可扩展性。该方法降低了采集设备的采样带宽,提高了开关柜局部放电检测与定位系统的经济性。

1 系统结构设计

开关柜对于电力系统提供高可靠、高稳定的电能起着十分重要的作用,然而开关柜数量众多、分布广泛的特点给开关柜的局部放电在线监测带来很大困难。基于此,本文提出一种新型的开关柜局部放电在线监测与定位方法,其装置示意图如图1所示。

本套开关柜局部放电在线监测与定位系统采用多个UHF传感器组成线性阵列来实现对多面开关柜进行监测,其中一个传感器阵元可监测一面开关柜,与此同时,运用包络检波电路对UHF传感器阵列采集到的局部放电信号进行降频处理。通过频谱搬移方式降低了数据采样率要求,同时降频处理更利于信号在同轴电缆中传输。

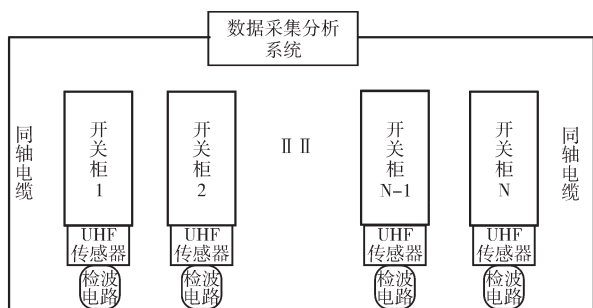


Fig. 1 Positioning system device

图1 定位系统装置

当开关柜产生局部放电时,信号由UHF传感器阵元检

测并沿两条固定的通道传回至数据采集分析系统,系统根据信号的波程差以及相关分析便可确定信号源的位置,从而实现信号源定位功能。

系统依赖UHF检测法及同轴电缆传输电磁波信号的优点,具有较强的抗干扰能力以及较高的检测灵敏度。相比于传统的并联式开关柜局部放电检测与定位方法,本方法解除了采集通道数量的限制,利用双通道实现同时对多面开关柜的局部放电检测与定位,具有灵活的可扩展性与较高的经济性。

2 系统原理分析

2.1 定位原理

当开关柜内发生局部放电时,便会由UHF传感器阵元进行感知与信号采集,最终在数据采集分析系统中得到两列具有时间延迟的信号,如图2所示。

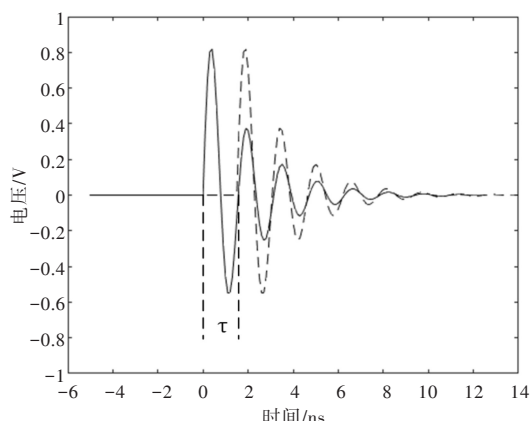


Fig. 2 Delayed signal

图2 时延信号

同轴电缆属于分布参量网络,在理想情况下可视为均匀传输线,其特性阻抗如下:

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \tag{1}$$

其中,R、L、G、C分别表示同轴电缆单位长度的电阻、电感、电导、电容。对于同轴电缆,由于 $\omega L \gg R$, $\omega C \gg G$,即R和G可忽略不计,因而:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{2}$$

本文实验采用同一型号同轴电缆,以保证特性阻抗的一致性,使采集到的两列信号具有较高的相似性,利用自相关分析便可得到其之间的时延。其局部放电位置x可表示为:

$$x = \frac{L - (t_1 - t_2)v_p}{2} \tag{3}$$

式中,L为系统所使用的同轴电缆总长度, t_1 、 t_2 分别为信号到达数据采集端口两个通道的时间, v_p 为局部放电信号在本实验所使用的同轴电缆中的传播速度。

2.2 同轴电缆行波特性分析

同轴波导是一种由内、外导体构成的双导体导波系

统,也称为同轴线。局部放电信号在同轴电缆中传输时的损耗与同轴电缆的尺寸、介电常数、工作频率有关,根据文献[16],电缆的衰减分为 3 个部分,分别为导体(铜)损耗、介质损耗和附加损耗,其公式如下:

总衰减:

$$\alpha = \alpha_{\text{导}} + \alpha_{\text{介}} + \alpha_{\text{附}} \quad (4)$$

导体损耗:

$$\alpha_{\text{导}} = 0.361 * \left(\frac{K_1}{d} + \frac{K_2}{D} \right) * \frac{1}{z_c} * \sqrt{f} \quad (5)$$

介质损耗:

$$\alpha_{\text{介}} = 0.091 * \sqrt{\varepsilon_r} * \tan\delta_e * f \quad (6)$$

附加损耗:

$$\alpha_{\text{附}} = 10 * \log \left[\frac{(s+1)^2}{4s} \right] + 0.0022 * \sqrt{f} \quad (7)$$

式中:d为内导体有效外径(mm);D为外导体有效内径(mm);K₁为内导体结构系数;K₂为外导体结构系数;Z_c为特性阻抗(Ω);ε_r为等效介电常数;tand_e为等效介质损耗角正切;s为驻波;f为频率(MHz)。

开关柜局部放电在线定位系统采用RG316同轴电缆,其阻抗为50Ω,最大工作频率为3000MHz,最大工作电压为1.2KVrms,传输速率为70%。结合式(5)和式(6)可计算出在100MHz时衰减为0.262dB/m。

除了同轴电缆的衰减特性外,影响本系统定位精度的因素还有射频信号在同轴电缆中的传播速度,这也是系统定位误差的来源之一。

信号向前传播的速度取决于电场和磁场建立的速度,对于空气中的无损耗线,行波沿线传播的相速(即电磁波沿线传播的速度)为:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)} \quad (8)$$

即等于空气(或真空)中的光速。式(8)中μ₀、ε₀分别为真空中的磁导率、介电常数。若无损耗绝缘介质的相对介电常数为ε_r,则行波沿线传播的相速为:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\varepsilon_r}} \text{ (m/s)} \quad (9)$$

对本系统使用的同轴电缆扫频速度进行测试,测试10~160MHz的电磁波信号在同轴电缆中的传输速度,结果如图3所示。

由图3可以看出速度随频率的增加基本保持不变。由于同轴电缆的折反射以及趋肤效应存在,电磁波在同轴电缆中的速度会有一定波动,在后续实验及计算中,速度取其平均值2.2×10⁸ m/s。

2.3 包络检波电路设计

开关柜内发生的局部放电是一个伴随着正负电荷的中和过程。在发生绝缘击穿过程中会产生一个陡度很大的脉冲电流,其脉冲电流上升时间通常小于1ns,因此会向周围辐射出0.3~3GHz的电磁波,UHF局放监测法就是检测

该电磁波信号。但根据奈奎斯特采样定理,要求采集设备具有很高的采样频率,另外高频信号也不利于在同轴电缆中传输。因此,本系统在UHF采集天线后端增加包络检波电路,对采集到的高频信号进行频谱搬移,以降低设备采样率和克服局部放电传感器互易性带来的辐射问题。

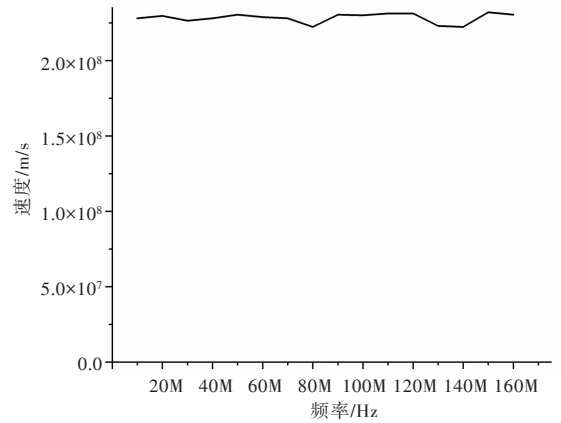


Fig. 3 Coaxial cable propagation speed at different frequencies

图3 不同频率下的同轴电缆传播速度

在工程实际中有一类信号叫做调幅波信号。调幅波信号是一种用低频信号控制高频信号幅度的特殊信号。检波电路是一类专门把低频信号提取出来的电路,使用二极管可以组成最简单的检波电路。包络检波电路原理如图4所示。

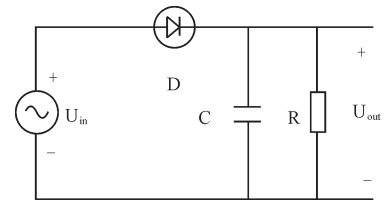


Fig. 4 Schematic diagram of envelope detection

图4 包络检波原理

根据文献[17]可知衰减震荡函数能够很好地表征其局部放电特性。结合ADS(Advanced Design System, ADS)仿真软件对包络检波电路进行仿真,采用射频二极管HSMS-2822,其信号源数学模型如下:

$$f(t) = A * g(t) \sin(2\pi f_0 t) \sin(2\pi f_c t) \quad (10)$$

式中,A为信号幅值1V,f₀为包络信号频率100MHz,f_c为载波信号频率1GHz。仿真时包络检波电路电容为100pF,负载电阻为50Ω。仿真输出结果如图5和图6所示。其中,图6为包络检波电路的输出波形,其最大幅值约为0.2V,且该包络检波电路可以较好地提取出载波信号中的包络,实现UHF信号的频谱搬移。

图7为包络检波电路实物,其长约40mm,宽约12mm,利用SMA接头使其方便与同轴电缆进行连接,便携性好。前端加入高通滤波器,滤除300MHz以下的低频信号,使其抗干扰能力加强。输出阻抗为50Ω,与同轴电缆的阻抗匹配可最大程度减小信号传输时的折反射。

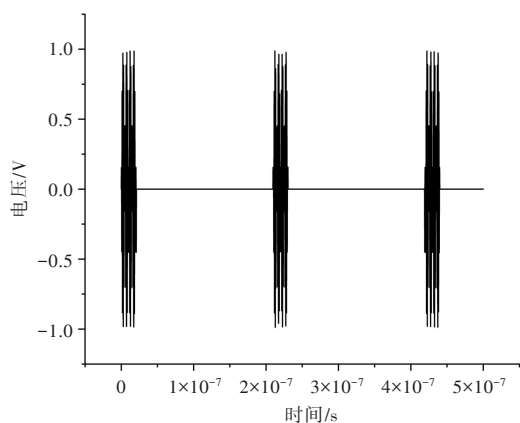


Fig. 5 Local discharge signal source simulation

图5 局部放电信号源仿真

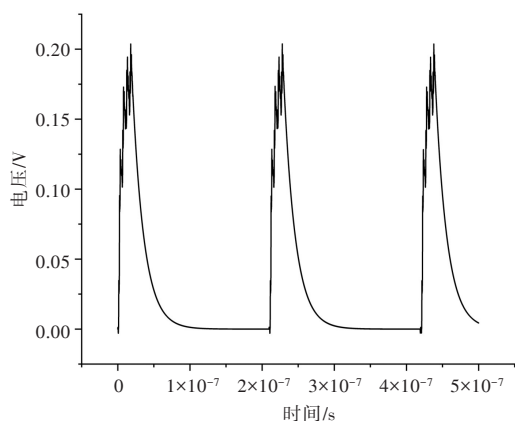


Fig. 6 Envelope detection simulation results

图6 包络检波仿真结果

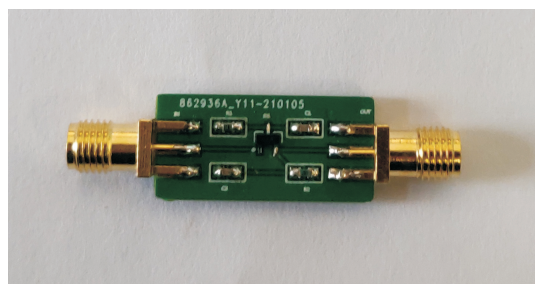


Fig. 7 Envelope detection circuit

图7 包络检波电路实物

3 系统定位试验

为了验证该方案的可行性,在实验室环境下搭建实验平台对该系统进行测试,如图8所示。

实验使用ns陡脉冲信号发生器输出脉冲信号模拟开关柜局部放电信号。实验时脉冲信号的幅值为20V。UHF传感器采用北京领翼中翔科技有限公司的UHF特高频耦合器,频率带宽为100~2 000MHz,其在示波器通道内采集到的波形如图9所示。

由图8可以看出,示波器两个通道内采集到的波形之

间具有明显的延时,对采集到的数据进行函数自相关分析,结合MATLAB软件计算出两列信号之间的延时,再结合式(3)计算出信号源的位置。利用信号发生器在不同位置进行信号耦合,并通过分析计算出信号源位置,再与实际的位置进行比较,以此确定本套系统的定位精度以及定位误差。多次实验结果如表1所示。

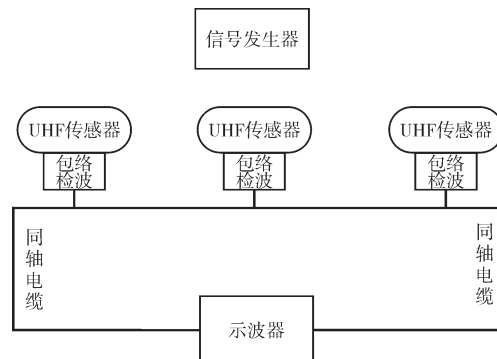


Fig. 8 Experimental principle

图8 实验原理

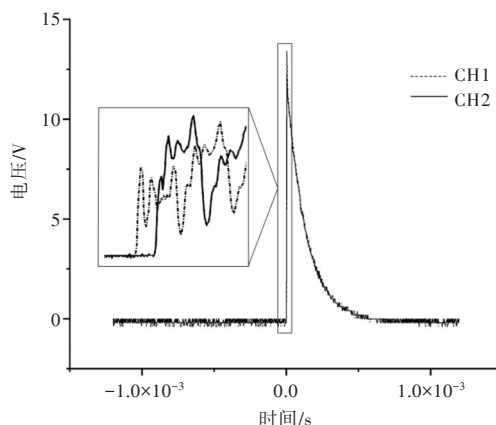


Fig. 9 Pulse waveform graph

图9 脉冲波形

Table 1 Local discharge positioning experiment data

表1 局部放电定位实验数据

(m)

物理长度	系统测量长度	测量误差
1	0.942 0	0.058 0
2	1.866 0	0.134 0
3	3.002 0	0.002 0
5	5.062 0	0.062 0
10	10.134 0	0.134 0
13	13.134 0	0.134 0
15	14.954 0	0.046 0
平均值		0.081 0

表1是在实验室条件下对本套开关柜局部放电在线监测系统多次定位实验的数据。结果表明,本套系统在多次实验中均能成功检测到信号,定位成功率为100%。最大定位误差为13.4cm,平均误差为8.1cm,证明本套系统对多面开关柜进行局部放电监测与定位效果很好。

4 结语

本文对开关柜局部放电信号特性进行了研究,针对UHF检测法提出一种全新的串联式局部放电监测与定位系统。该系统能同时对多面开关柜进行在线监测,并对发生局部放电的开关柜进行精确定位。在实验室条件下对该套系统进行了局部放电模拟定位实验,验证了该方案的可行性。

针对阵列传感器的互易性问题,本文对包络检波特性进行了研究。运用包络检波电路克服了阵列传感器的互易性问题,降低了局放信号传输频率及对设备采样率的要求,使本套系统具有更好的经济性。

参考文献:

- [1] LIU J C, ZHANG G G, DONG J L, et al. Study on miniaturized UHF antennas for partial discharge detection in high-voltage electrical equipment[J]. *Sensors*, 2015, 15(11): 1209-1221.
- [2] HAN J, SUN Q Z, DANG W J. Research on a new on-line monitoring system for switchgear bureaus [J]. *Electromechanical Information*, 2018, 36(9): 39-42.
韩捷, 孙奇珍, 党卫军. 一种新型的开关柜局放在线监测系统研究[J]. *机电信息*, 2018, 36(9): 39-42.
- [3] LE J H. The design of abnormal strong light monitoring and early warning system in high voltage switchgear based on image analysis [J]. *Software Guide*, 2017, 16(7): 103-105.
乐坚浩. 基于图像分析的高压开关柜内异常强光监测及预警系统设计[J]. *软件导刊*, 2017, 16(7): 103-105.
- [4] DONG Z. Overview of UHF band satellite communication development [J]. *Software Guide*, 2016, 15(6): 126-128.
董桢. UHF频段卫星通信发展综述[J]. *软件导刊*, 2016, 15(6): 126-128.
- [5] XU P X, ZHOU L, LIU C, et al. Research on partial discharge monitoring system of high voltage switchgear[J]. *Electric Safety Technology*, 2020, 22(10): 38-45.
许璞轩, 周辽, 刘冲, 等. 高压开关柜局放监测系统研究[J]. *电力安全技术*, 2020, 22(10): 38-45.
- [6] ZHU P N, LI T F. Application of ultra-high frequency location technology in fault diagnosis of high voltage switchgear[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(9): 43-49, 62.
朱溥楠, 李腾飞. 特高频定位技术在高压开关柜故障诊断中的应用[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(9): 43-49, 62.
- [7] LU Z X, ZHAO W, ZHANG Y, et al. Analysis of internal insulation defects in switchgear based on UHF PD detection technology[J]. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2020, 38(13): 200-201.
路智欣, 赵威, 张诣, 等. 基于UHF局放检测技术的开关柜内部绝缘缺陷分析[J]. *电子技术与软件工程*, 2020, 38(13): 200-201.
- [8] ZHANG M, FANG J, HAO F Z, et al. Experiment on the effectiveness of partial discharge detection in switchgear based on UHF sensing[J]. *Southern Power System Technology*, 2020, 14(3): 23-28.
张敏, 方健, 郝方舟, 等. 基于穿心特高频传感的开关柜局部放电检测有效性试验[J]. *南方电网技术*, 2020, 14(3): 23-28.
- [9] CHEN Q, GAO Y Y, YI S. Data confusion algorithm for privacy state estimation in smart grid [J]. *Electronic Science and Technology*, 2018, 31(10): 22-28.
陈倩, 高钰莹, 易松. 智能电网中隐私保护状态估计的数据混淆算法[J]. *电子科技*, 2018, 31(10): 22-28.
- [10] LI X W, TANG H M, MU S Y, et al. Partial discharge monitoring system for PD characteristics of typical defects in GIS using UHF method [C]//2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2012: 625-628.
- [11] HUANG C J. Study on partial discharge on-line monitoring of high voltage switchgears based on ultra-high-frequency method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
黄琮鉴. 基于超高频法的高压开关柜局部放电在线监测的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [12] LI Z, LUO L G, CHEN J D, et al. A new PD location method based on UHF wireless sensor array[J]. *High Voltage Technology*, 2019, 45(2): 418-425.
李臻, 罗林根, 陈敬德, 等. 基于特高频无线传感阵列的新型局部放电定位方法[J]. *高电压技术*, 2019, 45(2): 418-425.
- [13] HE J, TIAN T, SONG X B, et al. Research on partial discharge identification method of switchgear based on UHF method[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(11): 90-95, 101.
何金, 田涛, 宋晓博, 等. 基于特高频法的开关柜局部放电识别方法研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(11): 90-95, 101.
- [14] YAO C G, HUANG C J, WU B, et al. Using the finite difference time domain method to analyze the ultra high frequency signal propagation characteristics in switchgear [J]. *High Voltage Technology*, 2013, 39(2): 272-279.
姚陈果, 黄琮鉴, 吴彬, 等. 采用时域有限差分法分析开关柜中超高频信号传播特性[J]. *高电压技术*, 2013, 39(2): 272-279.
- [15] ZHANG D W. Research on distribute detection system of switchgear partial discharge[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
张大伟. 分布式开关柜局部放电检测系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [16] LI Q H. RF coaxial cable attenuation characteristics analysis [C]//China Communications Society 2010 Optical Annual Conference Papers, 2010: 390-395.
李庆和. RF同轴电缆衰减特性分析[C]. 中国通信学会2010年光缆电缆学术年会论文集, 2010: 390-395.
- [17] YANG Y. Feature extraction of partial discharge signals based on envelope detection [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020.
杨雨. 基于包络检波的局部放电信号特征提取研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.

(责任编辑: 杜能钢)