

电缆故障测试方法综述

吴双双¹, 柏文琦¹, 杨宇祥², 何凯¹

(1.湖南省计量检测研究院,长沙 410014; 2.湖南师范大学工程与设计学院,长沙 410081)

摘要:分析了电缆故障的原因和故障类型,总结了目前常用的检测方法,包括传统的故障检测方法和基于反射法的故障检测方法。对各种方法的适用范围和优缺点进行了总结,并对电缆故障检测技术的发展趋势做了展望(引用文献33篇)。

关键词:电缆故障;测试方法;阻抗法;反射法

中图分类号:TM934

文献标志码:A

文章编号:1672-6901(2022)01-0001-05

Overview of Cable Fault Detection

WU Shuangshuang¹, BAI Wenqi¹, YANG Yuxiang², HE Kai¹

(1. Hunan Institute of Metrology and Test, Changsha 410014, China;

2. Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: The reasons of the cable fault and fault types were analyzed, and then the commonly used detection methods at present, including traditional fault detection method and the fault detection method based on the reflection method were summarized. Finally, the applicable range and advantages and disadvantages of various methods were summarized, and the development trend of cable fault detection technology was prospected (33 references cited).

Key words: cable fault; detection method; impedance spectroscopy; reflection method

0 引言

电缆作为重要的通信和电能传输基础性部件被誉为国家经济的“神经”和“血管”。为保证电缆运行安全可靠、安装更换方便,以及市容美观,电缆大多采用直埋敷设的方式。地下恶劣的环境、过负荷的使用,以及自然老化都容易导致电缆发生故障^[1]。电缆所具有的隐蔽性导致故障难以被直接观测,因此,电缆故障的精确定位对于保障国家和社会安全运行至关重要。

1 电缆故障原因及分类

电缆出现故障的原因^[2-3]包括:电缆本身的质量问题、试验过程导致的故障、安装施工质量问题、外部原因导致的电缆故障、管理不善导致的故障等。

(1)电缆本身的质量问题:电缆的生产工艺控制不严格、电缆压接力度不够或者位置存在偏移、电

缆产品质量不符合标准、存在损伤等都会导致电缆发生故障。

(2)试验过程导致的故障:采用了超出电缆适用范围的试验方法(如交流电缆进行直流耐压试验),长时间施加超出试验电压范围的高电压等。

(3)安装施工质量问题:在制作电缆的中间接头和导体连接管时密封不良、敷设电缆时因野蛮拖拽使绝缘护套受损,导致电缆长期暴露在潮湿的空气中,严重时会引起电缆的绝缘内部大面积进水,最终发生事故。

(4)外部原因导致的故障:运行过程中,牵拉或者基础沉降使电缆受到外力的冲击,导致电缆金属形变、护套损伤,引发电缆故障。

(5)管理不善导致的故障:电缆沟槽长期积水或者土层受化学物质污染,电缆环境呈现酸性或者碱性,使得电缆护套耐压和阻抗发生变化,引发绝缘故障。电缆长期运行,发热会加速电缆有机绝缘层老化,严重时可能引发短路故障,甚至引起火灾。

根据故障性质对电缆故障进行分类,可分为开路故障、低阻故障、短路故障、高阻故障^[4-5]。①开路故障:电缆对地绝缘可以满足绝缘电阻要求限制,电压不能通过电缆传输至另一端,或者电缆只能提供极小的带载能力,不能满足系统的负载要求。②低

收稿日期:2021-09-07

基金项目:湖南省市场监督管理局科技计划(2020KJJH07);
长沙市杰出创新青年培养计划(kq2009090)

作者简介:吴双双(1986—),男,高级工程师。

E-mail:dxtc234@163.com

阻故障:电缆故障点的绝缘电阻明显低于该电缆应有的特征阻抗值。③短路故障:电缆故障点的绝缘电阻趋近于零或者小于一定限值。④高阻故障:电缆绝缘电阻明显超出电缆应有的特征阻抗。闪络性故障是高阻故障的一种间歇性故障方式,不易被发现。通常电缆进行预防性试验施加一定电压时,电缆被击穿,当电压下降到一定值时,绝缘性能自行恢复。

电缆故障类型与故障点处的电阻(R_f)关系见表1,表1中 Z_0 为电缆的特征阻抗,一般不超过 $40\ \Omega$ 。

表1 电缆故障类型

故障类型	$R_f/\ \Omega$	定义
开路	∞	在直流或高压脉冲下击穿
低阻	$<10Z_0$	R_f 不太低时,可用高压脉冲击穿
短路	0	在高压脉冲下击穿
高阻	$>10Z_0$	在直流或高压脉冲下击穿

2 传统电缆故障测试方法

2.1 阻抗法

阻抗法电缆故障测试方法按照原理可以分为电桥法、声磁同步法、音频感应法。

2.1.1 电桥法

阻抗法的经典测试方法是电桥法^[6],通过电桥平衡原理,测量到故障点的线路电阻,代入相关参数,求解定位方程对故障点进行定位。电桥法测试电路及等效电路见图1。

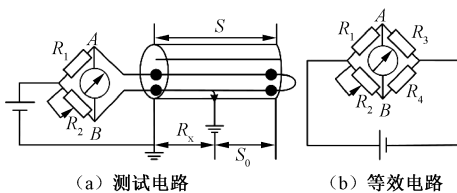


图1 电桥法测试电路及等效电路

该方法的原理是:通过调节可调电阻 R_2 使流过检流计的电流为零,这时 A 、 B 两点之间的电压为零,电桥处于平衡状态。根据电桥平衡原理可得 $R_1/R_2=R_3/R_4$ 。设电缆长度为 S ,电缆故障点与电缆末端的距离为 S_0 ,电缆故障点到测量端的距离为 S_x ,设电缆单位长度电阻为 r ,按照式(1)、式(2)、式(3)可计算出故障位置:

$$R_3 = r(S + S_0) \quad (1)$$

$$R_4 = rS_x \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得: $R_3/R_4 = r(S + S_0)/rS_x$

$$S_x = 2SR_2/(R_1 + R_2) \quad (3)$$

电桥法在电缆故障检测中的使用较为广泛,应用也较为成熟,但存在以下缺点:

(1)高阻和闪络性故障的电阻较大,电桥电流相当微弱,测量难度较大。

(2)对环境及连接要求高,不太适用于在线测试。

(3)需要电缆的固有参数,此外,使用过的电缆固有参数存在偏差,为电桥法的使用带来了很多的不确定性。

2.1.2 声磁同步法

在施加高压脉冲信号后,电缆故障点会被击穿,产生的脉冲电流感应出脉冲电磁场^[7]。磁场传播速率接近于光速,远大于放电产生的声音信号的传播速率。同步采集到达地面的电磁场信号和声音信号,计算信号到达的时间差。当信号到达的时间差最小时,可以认为该信号发出点是最接近于故障点的位置^[8]。

2.1.3 音频感应法

音频感应法主要是采用电声转换技术,用于电缆路径探测。通过将音频信号施加在两根电缆之间或者电缆与屏蔽层之间,将电缆远端短路^[9]。通过接收天线接收电缆产生的音频磁场,将接收到的信号通过电声转换为声音信号,可以通过耳机直接听取声音大小,也可以通过示波器等仪器直接观测信号的波形和幅值,准确定位电缆的路径。

2.2 行波法

2.2.1 高压脉冲法

高压脉冲法也叫冲闪法,其基本原理是,将高压直流或者脉冲高压信号施加在电缆上,当电缆故障点被击穿后,会在电缆上产生信号反射^[10]。采集入射信号和反射信号的时间差,代入波速即可计算出故障点的距离。该方法设备简单,测试速率快,影响小,在甄别和定位高阻故障和闪络性故障时被大量使用。但该方法存在高电压操作危险,容易损坏测试仪器和设备,有高压触电风险。

2.2.2 脉冲电流法

脉冲电流法是在高压脉冲法的基础上提出来的,其基本原理是,高压击穿电缆故障点时会产生放电现象,此时,安装在电缆终端的高频电流互感器会采集故障点生成的放电脉冲信号,得到信号往返电缆测试端到故障点的时长,最后根据波速来确定故障点在电缆中所处的位置^[11-12]。该方法无须接触高压电路,不会危及操作人员的生命安全,但是该方法只能在提前得知故障类型的情况下使用,使用范围很窄,其主要用于高阻故障和闪络性故障中进行

距离定位。

2.2.3 二次脉冲法

为了克服高压脉冲法和脉冲电流法的局限,提出了二次脉冲法(SIM)^[13]。首先向待测电缆发射一个低压脉冲,信号遇到故障点会发生反射,记录下反射信号的波形信息。然后逐渐提高脉冲信号电压,使被注入脉冲的电缆故障点被击穿,此时故障点会出现并维持约几百微妙的低阻状态。在此状态下,向电缆注入低压脉冲信号,信号遇到故障点会发生发射,记录下反射信号的波形信息。通过比较两次反射信号的波形信息即可确定故障点。该方法测距准确性较高且易操作,但所需的测量仪器较多、检测流程繁琐且难以把握闪络故障维持的时间,增大了测量的不确定性。

3 基于反射法的电缆故障测试方法

反射法因无须建立模型,且测量方法简便快捷、准确而成为首选技术。依据探测信号的不同,反射法可分为:时域反射法(TDR)^[14-15]、时频域反射法(TFDR)^[16-17]、扩展频域反射法(SSTDR)^[18-19],以及混沌时域反射法(CTDR)^[20-23]。

3.1 时域反射法

时域反射法的工作原理见图2。其原理为:向故障电缆注入低压脉冲信号,信号遇到阻抗不匹配的点会发生反射。

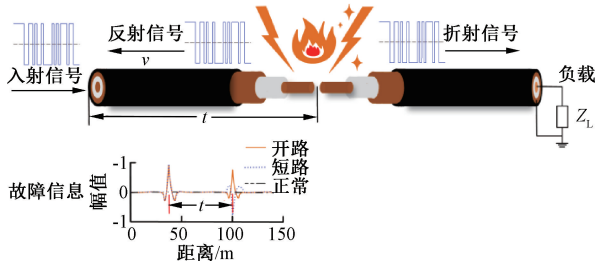


图2 时域反射法的工作原理

由行波的传输理论可知,故障点处的反射系数 Γ 按照式(4)计算:

$$\Gamma = \frac{Z_0 - Z_L}{Z_0 + Z_L} \quad (4)$$

式中: Z_0 为电缆故障点的阻抗, Ω ; Z_L 为电缆的特征阻抗, Ω 。反射情况分以下类型:

- (1) 电缆正常:无故障: $Z_0 = Z_L, \Gamma = 0$;
- (2) 电缆开路: $Z_0 = \infty, \Gamma = 1$,信号发生全反射,且入射信号与反射信号的极性相同;
- (3) 电缆短路: $Z_0 = 0, \Gamma = -1$,信号发生全反射,且入射信号与反射信号的极性相反。

测得入射信号与反射信号的时间差 t ,若已知信

号在电缆中的传播速率为 v ,则测试点到故障点的距离 $l = vt/2$,信号在电缆中的传播速率可表示为:

$$v = \frac{l}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (5)$$

式中: T 为信号在电缆中的传输时间, s ; L 为高频时传输线分布电感, H ; C 为传输线分布电容, F ; c_0 为光速, $m \cdot s^{-1}$; ϵ 为电缆芯包络介质的相对介电系数; μ 为电缆芯包络介质的相对导磁系数,不同规格的电缆受材料和尺寸影响系数不同。

TDR实现简单,且对电缆无损害,但是在测量过程中容易产生噪声信号的叠加,给反射信号提取带来困难,且测试信号随着传播距离的增大,衰减也会逐渐增大,很难识别反射信号,导致测量结果误差很大^[24],在实际工作中无法检测高阻故障。

3.2 时频域反射法

TDR的单域分析方法常受到分辨率的限制,而TFDR综合考虑信号在时域和频域范围内的特性,向电缆中注入高斯包络调频信号,利用Wigner算法对入射信号和反射信号进行时频分析,得到故障信息,从而确定故障位置和故障类型^[25-26]。

TFDR采用的高斯包络调频信号 $s(t)$ 由式(6)表示:

$$s(t) = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} e^{-\frac{\alpha(t-t_0)^2}{2} + \frac{\beta(t-t_0)^2}{2} + j\omega_0(t-t_0)} \quad (6)$$

式中: t_0 为调频信号, s ; ω_0 为频率中心, Hz ; α 为持续时间, s ; β 为带度,%。调频信号由 $t_0, \omega_0, \alpha, \beta$ 决定。

其傅里叶变换 $S(\omega)$ 可表示为:

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int s(t) e^{-j\omega t} dt \quad (7)$$

在文献[27]和文献[28]中,通过式(8)、式(9)来表示调频信号的参数:

$$T_s^2 = \int (t - t_0)^2 |s(t)|^2 dt \quad (8)$$

$$B_s^2 = \int (\omega - \omega_0)^2 |S(\omega)|^2 d\omega = \frac{\alpha^2 + \beta^2}{2\alpha} \quad (9)$$

式中: T_s 为信号时长的标准偏差; B_s 为信号的带宽。对于入射信号的参数可以根据待测电缆的长度和信号发生器的输出范围自行选择。

入射信号 $s(t)$ 的Wigner-Viller时频由式(10)表示:

$$W_p(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) x^* \left(t - \frac{1}{2} \tau\right) x \left(t + \frac{1}{2} \tau\right) e^{-j\tau\omega} d\tau \quad (10)$$

对入射信号和反射信号利用时频互相关函数进

行优化计算 C_{sr} , 由式(11)计算:

$$C_{sr}(t) = \frac{\int_{t'=t-t_s}^{t'+t_s} W_r(t', \omega) W_s(t' - t, \omega) d\omega dt'}{\sqrt{\int_{t=-t_s}^{t'+t_s} W_s^2(t, \omega) d\omega dt} \sqrt{\int_{t'=t-t_s}^{t'+t_s} W_r^2(t', \omega) d\omega dt'}} \quad (11)$$

对 C_{sr} 进行归一化处理, 首端反射和故障点反射两个局部峰之间的时间差 Δt 即为故障测距时间, 则电缆故障距离 l 为:

$$l = \frac{v \cdot \Delta t}{2} \quad (12)$$

式中: v 为电缆中信号的传播速率, $m \cdot s^{-1}$ 。虽然 TFDR 能实现高精度的故障定位, 但是高斯包络调频信号对电缆中的信号形成干扰, 因此, 不能实现在线检测^[27]。

3.3 扩展频域反射法

SSTDR 作为一种单端检测方法, 它的测试信号是采用二进制相移键控 (BPSK) 调制的 PN 序列。经过调制后的信号可以提高信号相关的信噪比, 提高抗干扰和滤除噪声的能力, 且不会干扰电缆中的正常信号。SSTDR 将调制后的 PN 序列 $x(t)$ 注入电缆, 信号通过阻抗不匹配的节点时会发生明显反射, 考虑加性噪声 $n(t)$, 接收到的反射信号为:

$$y(t) = \sum_k a_k x(t - \tau) + n(t) \quad (13)$$

式中: a_k 为发射信号的衰减系数; τ 为信号在测试电缆中的传输延迟时间, s 。

将反射信号 $y(t)$ 与参考信号 $x(t-t_i)$ (t_i 为系统延时估计值) 做相关:

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^T y(t) x(t - t_i) dt = \int_0^T \left\{ \sum_k a_k x(t - \tau) + n(t) \right\} x(t - t_i) dt = \int_0^T x(t - t_i) \sum_k a_k x(t - \tau) dt + \int_0^T x(t - t_i) n(t) dt \quad (14)$$

式中: T 为 PN 序列的周期, s ; $n(t)$ 与参考信号不相关, 该项的积分可认为是零; 根据伪随机序列的原理, 当反射信号与入射信号的相位一致时, 只有一个信号峰值, 此时 $\tau = t_i$ 。该时间即为反射信号的延时时间。

SSTDR 使用的伪随机信号具有高斯白噪声均值为零的特点, 抗干扰能力强且不会对电缆中的工作信号产生干扰, 适合用于在线检测^[28], 但是检测范围受码周期的限制, 需要价格昂贵的伪随机码发

生器, 成本较高^[29]。

3.4 混沌时域反射法

CTDR 利用混沌信号作为电缆故障的检测信号, 不仅消除了 TDR 不能在线检测的弊端, 而且价格低廉, 无须昂贵的设备。CTDR 的工作原理与 STDR 大致相同, 只是测试信号有差异。文献[22]和文献[30]利用半导体激光器产生的混沌信号作为故障电缆的测试信号, 实现了断点定位、阻抗失配测量, 以及在线测量。但是受到色散的影响, 混沌信号的宽频空间分辨率会随着探测距离的增加而恶化。文献[23]利用简单的布尔电路代替复杂的光电器件产生混沌信号, 并采用文献[31]的曲线拟和方法改善了随着测量距离增加色散使反射相关峰变宽导致空间分辨率变差的问题, 实现了对最大故障距离 1 992 m、空间分辨率 0.1 m 的开路和短路故障定位^[32]。然而, 非线性电路产生 CTDR 所需的混沌信号, 其输出信号的功率谱振荡明显, 自相关曲线的主峰附近存在较高旁瓣。当对较劲的故障电缆进行检测时, 旁瓣作为“鬼峰”会给测量结果引入误判^[27]。文献[22]研究了 100 m 的故障电缆在 Colpitts 振荡器不同状态下的自相关特性, 探索了适合 CTDR 的混沌状态。文献[23]将经典的 Colpitts 振荡器与作者改进的电路作对比, 结果显示: 在混沌模式下表现出更高的基频和更低的峰值旁瓣, 可用于高速混沌通信。

4 总结与展望

传统的电缆故障检测方法已经经历了很长时间的的研究和发展, 形成了较为成熟的体系, 应用于检测要求较低和低成本场合^[33]。电桥法和低压脉冲反射法对低阻故障和短路故障的应用效果较好, 但是不能进行在线检测, 而离线检测就意味着断电, 这必将浪费大量的财力、物力。而高阻故障和闪络故障在实际应用中多采用二次脉冲法或者高压脉冲法, 这两种方法在检测的过程中需要大量的测量仪器且操作步骤繁琐, 尤其冲闪法容易引起高压介入, 危害人生安全。在测试技术发展智能化趋势下, 电缆故障测试将会呈现出以下发展趋势:

(1) 现有测试原理与智能辨识技术的相结合, 可提取更多的信号特征进行综合诊断。例如将 TFDR 与人工神经网络相结合, 通过定量跟踪聚类结果的变化来监控电缆的整体状态, 分析电缆的退化趋势, 从而用于电缆的健康监控。

(2) 新能源技术大规模应用, 直流应用场景下电缆的缺陷机理与交流应用场景下电缆的缺陷机理

有差别,检测方法差异需要进一步去研究和探索。

(3)全方位电缆故障在线监测和全自动故障测距相结合是未来的发展趋势。这包括对电缆的运行状态、退化程度,以及运行出现故障时能够自动定位故障位置,实现全方位实时、动态监测。

(4)针对电缆的不同故障,研究各种具有代表性的电缆本体和附件结构下典型绝缘缺陷的时域、频域特性,提取故障特征阻抗指纹,构建电缆缺陷校准指纹库,为反射法阻抗分析的电缆故障测试仪器的校准提供依据。

参考文献:

[1] 戴静旭,刘杰,王彦伟.高压电缆故障原因分析及对策措施[J].高电压技术,2004(增刊1):54-55.

[2] 胡迪.电力电缆的故障原因与应对措施分析[J].集成电路应用,2021,38(4):122-123.

[3] 罗祥,欧进永,刘奇.电力电缆的运行维护与故障分析[J].电工技术,2021(9):90-93.

[4] GHULE A K, SATURE O D, LAVATE P S. Under ground fault detector [J]. International Journal of Scientific Research and Engineering Trends, 2021, 5(12): 90-93.

[5] 朱朝旭.基于 STDR/SSTDR 的铁路信号电缆故障在线检测系统的研究[D].兰州:兰州交通大学,2012.

[6] GAJBHIYE S, KARMORE S P. Cable fault monitoring and indication: A review [J]. International Journal of Computer Science and Network, 2013, 2(4): 20-24.

[7] 高巧妹,戚宇林.基于声磁同步原理电力电缆故障定位的研究[J].电测与仪表,2014,51(10):28-32.

[8] GAO Q M, QI Y L. Power cable fault locator based on synchronization principle of sound and magnetic[J]. Advanced Materials Research, 2013(765-767):2337-2340.

[9] 黄维雄.用音频电流感应法查找电缆故障点[J].电工技术,2001(4):51-51.

[10] 薛西武.高压冲闪法在电缆故障测试中的应用[J].科技经济导刊,2017(28):32-32.

[11] 梁栋,徐丙垠,刘洋,等.基于差分方向行波的脉冲电流电缆故障测距方法[J].电测与仪表,2021,58(7):150-156.

[12] GERNOT D, CHRISTIAN R, PETER S, et al. Earth fault localization with the help of the fast-pulse-detection method using the new high-power-current-injection (HPCI) [C]// Electric Power Quality & Supply Reliability Conference. Tartu, Estonia; IEEE, 2012:1-5.

[13] 于聪.二次脉冲法电缆故障测距技术在本钢的应用[J].中国新技术新产品,2015(10):37-37.

[14] 白晓斌,王亮,杨军,等.电力电缆故障精确定点检测系统设计[J].电线电缆,2021(3):32-34.

[15] ZHANG J M, ZHANG Y B, GUAN Y G. Analysis of time-domain reflectometry combined with wavelet transform for fault detection in aircraft shielded cables [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(11):4579-4586.

[16] 黄小卫,蔡驰,李骏晓,等.长距离海底电缆故障定位技术与探讨[J].电线电缆,2021(3):35-40.

[17] SHI Q, TRLTZSCH U, KANOUN O. Analysis of the parameters of a lossy coaxial cable for cable fault location [C]// International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD). Sousse, Tunisia; IEEE, 2011:311-325.

[18] 王昱皓,周凯,汪先进,等.基于改进时频域反射法的电力电缆局部缺陷定位[J].中国电机工程学报,2021,41(7):1-10.

[19] LEE C K, SHIN Y J. Multi-core cable fault diagnosis using cluster time-frequency domain reflectometry [C]// 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Minneapolis, USA; IEEE, 2018:1-6.

[20] 吴志江.飞机电缆间歇性故障检测方法研究[J].电子测量技术,2020,43(17):35-39.

[21] SHI X D, LI X H, YANG Z G, et al. Fault detection of aircraft cable via spread spectrum time domain reflectometry [J]. Sensors & Transducers, 2014, 167(3): 135-141.

[22] 徐航,王安帮,韩晓红,等.混沌信号相关法测量电介质传输线的断点及阻抗失配[J].物理学报,2011,60(9):142-147.

[23] ZHANG J G, XU H, WANG B J, et al. Wiring fault detection with Boolean-chaos time-domain reflectometry [J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 80(1-2): 553-559.

[24] HANG X, LI J X, LI L, et al. Chaos time-domain reflectometry for fault location on live wires [J]. Journal of Applied Analysis & Computation, 2015, 5(2): 243-250.

[25] LI J X, WANG Y C, MA C. Experimental demonstration of 1.5 GHz chaos generation using an improved Colpitts oscillator [J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 72(3): 575-580.

[26] SHI Q H, KANOUN O. Detection and location of single cable fault by impedance spectroscopy [C]// Instrumentation & Measurement Technology Conference. Montevideo, Uruguay: IEEE, 2014:595-599.

[27] 王瑶瑶,姚周飞,谢伟,等.基于时频域反射法的高温超导电缆故障定位研究[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1540-1547.

[28] SONG E S, SHIN Y J, STONE P E, et al. Detection and location of multiple wiring faults via time-frequency-domain reflectometry [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(1): 131-138.

[29] 徐航,马培国,王冰洁,等.噪声时域反射法实现多根电缆故障的同时检测[J].激光与光电子学进展,2017,54(5):237-244.

[30] WANG A B, ZHANG M J, XU H, et al. Location of wire faults using chaotic signal [J]. Electron Device Letters, IEEE, 2011, 32(3):372-374.

[31] SMITH P, FURSE C, GUNTHER J. Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location [J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(6): 1469-1478.

[32] 吴春华,胡雅,李智华,等.基于 SSTDR 的光伏系统直流母线电弧故障在线检测与定位[J].中国电机工程学报,2020,40(8):2725-2735.

[33] 袁燕岭,李世松,董杰,等.电力电缆诊断检测技术综述[J].电测与仪表,2016,53(11):1-7.