

基于 TDR 的电力电缆故障定位测距 方法与应用研究

罗盼 梅家争 孙伯聪 周杨 董晨 陈露
(北京洛斯塔科技发展有限公司)

摘要: 电力电缆故障定位是电力系统运行维护中的关键问题之一,准确定位电缆故障位置可以减少电缆损坏的影响,提高维护效率。本文探讨了时域反射法(TDR)在电力电缆故障定位中的应用,介绍了TDR的工作原理和在电力电缆中的具体实现步骤。通过在PSCAD仿真平台上的电缆故障模拟,验证了TDR在开路故障的测距效果。本文总结了TDR方法的优缺点,并提出其在复杂电力系统中的实际应用前景。

关键词: 时域反射法; 电力电缆; 故障定位; 故障测距; PSCAD 仿真

0 引言

随着全球电气化进程的加速和电力系统的日益复杂化,电力电缆作为输配电系统中的关键基础设施,承载着大规模电力的传输任务。相比架空线路,电力电缆具有更高的安全性、可靠性以及较少的环境影响,广泛应用于城市输电、工业园区配电、地下隧道和海底电缆等特殊场景。然而,由于其特殊的敷设方式,一旦电缆发生故障,维护和修复的难度较大,特别是在地下或海底电缆中,电缆的直接检测与维护受限于环境和成本因素。因此,如何快速、准确地定位电缆中的故障点,成为电力系统运行维护中的重要课题。

电力电缆故障的常见类型包括短路、开路和高阻故障等^[1-2]。这些故障不仅会导致电力传输的中断,还可能引发更严重的系统故障,如设备损坏或停电事故,造成巨大的经济损失和安全风险。因此,开发高效的故障测距技术,能够减少故障的排查时间,

提高电力系统的可靠性和稳定性。传统的故障测距方法如桥式法、行波法等在一定条件下能够定位电缆故障,但在电缆长度较长或高阻故障情况下,测距精度可能下降。此外,复杂电缆系统的多分支结构、敷设环境和材料特性等因素,也会对故障定位带来干扰。为解决这些问题,时域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)^[3-6]逐渐成为电力电缆故障测距中的重要手段。

TDR方法的基本原理是通过向电缆注入脉冲信号,信号在遇到电缆故障点时发生反射。通过测量脉冲信号发射和反射的时间差,结合信号在电缆中的传播速度,可以准确计算出故障点与测试点之间的距离。该方法不仅具有操作简便、定位准确的优点,而且能够实时检测电缆故障,在电力电缆、通信电缆等领域得到广泛应用。近年来,随着计算机仿真技术的发展,TDR测距方法的研究和应用得到进一步拓展。

基金项目:北京洛斯塔科技发展有限公司科技项目(No. BNDZF23164)。



PRODUCT AND TECHNIC

|| 产品与技术 ||

利用仿真工具可以在不同条件下模拟电缆中的故障情况，对 TDR 方法进行验证和优化，从而提高其在实际电缆故障测距中的可靠性。

本文详细探讨基于 TDR 的电力电缆故障定位原理，并通过 PSCAD 仿真电缆开路故障的场景，分析 TDR 方法的有效性。通过仿真案例的研究，验证 TDR 在电缆故障测距中的精确度和响应速度，并对 TDR 方法的优缺点进行总结，进一步展望其在电力系统中的应用前景。

1 TDR 测距原理及仿真工具介绍

1.1 TDR 测距原理

TDR 是一种基于电磁波反射原理的故障定位技术，广泛应用于电力电缆、通信电缆等线性传输系统的故障测距。TDR 的工作原理是向电缆中注入脉冲信号，当信号遇到电缆中的故障点（如开路、短路或高阻故障）时，在该点发生部分或全部反射。通过测量脉冲信号发射和反射的时间差，结合电磁波在电缆中的传播速度，即可确定故障点与信号发射点之间的距离。

TDR 测距的基本公式为：

$$d = \frac{v \times \Delta T}{2} \quad (1)$$

式中， d 为故障点到测试点的距离； v 为信号在电缆中的传播速度； ΔT 为脉冲发射与反射的时间差。

电缆中的信号传播速度 v 通常由电缆绝缘材料的介电常数决定，计算公式为：

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

式中， c 为光速（约 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ）； ϵ_r 为电缆绝缘材料的相对介电常数。通过测量脉冲发射与反射之间的时间差，可以计算故障点的位置。

1.2 TDR 在电缆中的测距应用

在电力电缆中，故障类型多种多样，包括开路、短路、绝缘老化等。由于电力电缆通常敷设在地下或

其他难以接近的环境中，传统的电缆故障检测方法在这种场景下效率较低，且定位误差较大。TDR 技术为电缆故障测距提供了一种高效的解决方案，尤其适用于短距离电缆的快速定位。

当电缆发生故障时，TDR 技术通过分析反射信号的幅值、相位和时间特性，可以判断故障类型并精确计算故障距离。例如，在开路故障中，反射信号的幅值为正，表示信号无法通过故障点；而在短路故障中，反射信号的幅值为负，表明信号被短路点吸收后反射回到源端。

1.3 仿真工具介绍

电磁暂态仿真软件（Power Systems Computer Aided Design, PSCAD）是用于电力系统瞬态分析的高级仿真工具，广泛应用于电力工程领域，尤其适用于电磁瞬态现象的研究和电力系统中各种设备、网络的仿真分析^[7-9]。它提供了丰富的电力系统元件库和建模功能，可以模拟输电线路、电力电缆、变压器、发电机等设备在实际工作中的电磁瞬态响应。

PSCAD 的优势在于：

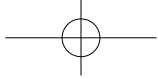
1) 电磁瞬态分析：PSCAD 能够准确模拟电力系统中瞬态过程的动态响应，包括过电压、短路故障、涌流等。

2) 图形化界面：PSCAD 采用直观的图形化建模界面，用户可以通过拖放元件来构建复杂的电力系统模型，便于观察和分析仿真结果。

3) 精确的波形分析：PSCAD 能够精确捕捉电压、电流等信号的时域波形变化，特别适合用于时域反射法的波形分析与故障定位。

4) 多场景应用：PSCAD 不仅能够处理电力电缆故障，还可以用于研究电力电子设备、HVDC 系统、电机控制等领域，具备广泛的应用前景。

在本研究 TDR 故障定位仿真中，PSCAD 的瞬态分析功能被用于模拟脉冲信号在电缆中的传播及其



在故障点的反射过程。通过该仿真工具，可以精确地记录信号的发射和反射时间，测量脉冲波形的特征变化，最终实现对故障点的定位。

1.4 TDR 仿真原理

在 PSCAD 中进行 TDR 仿真时，主要步骤如下：

1) 电缆建模：在 PSCAD 中，使用传输线模型或电缆模型对实际的电力电缆进行建模。用户可以设置电缆的长度、阻抗、电感、电容等参数，以模拟电缆的实际运行情况。

2) 脉冲信号注入：在仿真开始时，在电缆的一端注入脉冲信号，通常使用方波或尖脉冲作为测试信号。该信号通过电缆传播，遇到故障点时发生反射。

3) 故障点设置：在电缆模型的中间某一位置人为设置一个故障点（如开路或短路），以模拟实际故障场景。

4) 波形记录与分析：PSCAD 能够实时记录电缆两端的电压、电流波形。通过分析反射波与发射波的时间差及波形特征，可以计算故障点的位置。

通过上述过程，PSCAD 能够准确模拟 TDR 在电力电缆中的测距过程，并生成详细的波形数据供进一步分析。

2 仿真验证

2.1 电缆模型构建

在本仿真案例中，设置电力电缆的总长度为 10km，设置在 6km 处发生开路故障。电缆的物理参数如表 1 所示。

表 1 仿真案例参数设置明细表

序号	参数名称	参数值	单位
1	电阻	0.1	Ω/km
2	电感	0.3	mH/km
3	电容	0.25	$\mu\text{F}/\text{km}$
4	导纳	0.05	mS/km

仿真在 PSCAD 平台上进行，采用单芯电缆模型。信号源在电缆起点处注入脉冲电压，信号幅值为 10V，脉冲宽度为 $1\mu\text{s}$ 。

2.2 仿真步骤

(1) 步骤 1：电缆建模

在 PSCAD 中使用输电线路模型，配置为单芯电缆，并输入上述参数进行建模。电缆长度设置为 10km。

(2) 步骤 2：故障设置

在电缆的 6km 处设置一个开路故障。使用开关模型来表示开路故障，通过设定开关在某个时刻断开来模拟电缆的开路情况。

(3) 步骤 3：信号源配置

在电缆的输入端施加一个脉冲信号作为测试信号。信号类型：脉冲信号；脉冲幅值：10V；脉冲宽度： $1\mu\text{s}$ ；持续时间： $0.5\mu\text{s}$ ；上升/下降时间： $0.1\mu\text{s}$ ；信号注入位置：电缆的起始端。

(4) 步骤 4：监测点设置

在电缆起点设置一个监测点，用来监测反射回来的波形，分析其与初始发射信号的时间差。

2.3 仿真分析

(1) 步骤 5：仿真运行

运行 PSCAD 仿真。仿真时长设置为 1s，以确保能够捕捉到故障反射信号。

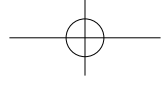
(2) 步骤 6：数据分析

通过监测点观察电缆起点处的电压波形，可以看到发射的脉冲信号及其在故障点处产生的反射波。通过分析脉冲信号到达故障点的时间以及反射波返回的时间，可以计算出故障点的位置。

发射时间和反射时间的时间差为 ΔT ，即脉冲信号从电缆起点到故障点并反射回来的时间：

$$\Delta T = T_{\text{return}} - T_{\text{send}} \quad (3)$$

式中， T_{return} 为接收到反射波的时刻； T_{send} 为信号源注入脉冲的时刻。



PRODUCT AND TECHNIC

|| 产品与技术 ||

信号在电缆中的传播速度 v 可以通过电缆的介电常数 ε_r 计算得出：

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (4)$$

式中， c 为光速（约 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ），设置电缆的介电常数为 $2.2^{[10]}$ ，则信号传播速度为：

$$v = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{2.2}} \approx 2.02 \times 10^8 \text{m/s} \quad (5)$$

通过式（1），可以计算故障点到电缆起点的距离 d 。

2.4 仿真结果

计算仿真结果，脉冲信号在 0.5s 时发射， 0.56s 时接收到反射波，其脉冲电压波形如图 1 所示，计算得时间差 ΔT 为 0.06s 。

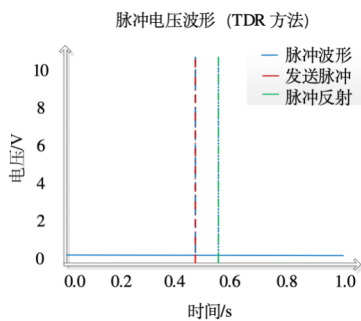


图 1 脉冲电压波形 (TDR 方法) 图

电缆的介电常数 $\varepsilon_r=2.2$ ，信号传播速度 $v=2.02 \times 10^8 \text{m/s}$ 。通过以下公式计算故障距离：

$$d = \frac{2.02 \times 10^8 \times 0.06}{2} = 6.06 \text{km} \quad (6)$$

分析计算结果，可以得出，运用基于 TDR 的方法计算得到的故障位置与实际设置的 6km 位置接近，验证了 TDR 方法的有效性。

3 TDR 方法评价

3.1 方法优点

1) 定位精度高：TDR 方法对电缆故障的定位误差较小，特别适合短距离电缆的故障测距。

2) 适用范围广：TDR 不仅可以用于开路故障，还适用于短路和高阻故障。

3) 实时响应：TDR 通过脉冲信号的反射，能够快速检测故障点，减少故障排查时间。

3.2 方法缺点

1) 高阻故障识别困难：TDR 对于高阻故障的反射信号较弱，容易受到干扰影响，导致测距误差增大。

2) 环境影响：电缆的周围环境（如湿度、温度）和敷设方式会影响信号的传播速度，从而影响测距精度。

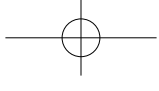
3) 长电缆局限性：对于特别长的电缆，TDR 的反射信号衰减较大，测距的精度可能下降。

3.3 TDR 方法的应用与前景

TDR 方法已广泛应用于电力、通信等领域的电缆故障测距中，特别是在地下电缆、海底电缆等无法直接接触的电缆系统中具有重要的应用价值。随着电力系统复杂性增加和智能电网的发展，未来 TDR 方法将与其他故障定位技术（如行波法、桥式法）结合，形成更加综合、智能的故障定位方案。此外，TDR 方法可以通过与硬件在环（HIL）仿真技术结合，进一步提高在线监测和实时故障排查的能力。

4 结束语

本文详细介绍基于 TDR 的电力电缆故障定位与测距方法，并通过 PSCAD 仿真平台验证 TDR 方法在开路故障定位中的有效性。仿真结果表明，TDR 可以快速准确地定位电缆中的故障点。虽然 TDR 方法在高阻故障和长电缆的应用中存在一定的局限性，但其作为一种高效的故障定位手段，在电力电缆运行维护中具有广泛的应用前景。



参考文献

- [1] 唐丹, 吴浩, 蔡源. 电力电缆早期故障诊断研究综述 [J]. 电线电缆, 2023 (6): 1-5.
- [2] 王沐雪, 王紫叶, 陈语柔, 等. 高压电力电缆故障分析及相关技术 [J]. 通信电源技术, 2019, 36 (5): 202-203.
- [3] 董海迪, 张瑞, 王浙娜, 等. 基于时域反射法的电力电缆网络故障诊断方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (3): 30-36.
- [4] 闫志恒. 基于 SSTDR 电缆故障检测及定位系统研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- [5] 张锴, 罗家健, 陈诗韵. 基于时域反射法的电缆受潮中间接头定位的研究 [J]. 电工技术, 2021 (17): 48-51, 54.
- [6] 吴昊谦. 基于时域反射法的中压电缆中间接头定

位研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.

- [7] 黎津池, 孟毅, 黄卫东, 等. 10 kV 电磁式电压互感器高压侧熔断器频繁熔断事故的诊断分析及改善措施 [J]. 电工技术, 2023 (24): 139-141.
- [8] 石小帅, 顾智广, 仲昭峰, 等. 基于 PSCAD 的自耦变空载投运谐振过电压仿真分析 [J]. 电工技术, 2023 (21): 150-151, 153.
- [9] 刘一民, 郑少明, 董鹏, 等. 基于 PSCAD 的光伏电站交流侧故障暂态特性分析 [J]. 自动化技术与应用, 2023, 42 (10): 180-184.
- [10] 吴仲孝, 洪宁宁, 高磊. 无卤耐高温低介电常数材料及应用研究进展 [J]. 电线电缆, 2024, 67 (3): 11-17.

(收稿日期: 2024-09-23)

202508.DQGY
39

(上接第 34 页)

- [4] 商立群, 张建涛. 计及储能电池寿命衰减的居民小区光储优化配置 [J]. 电气技术, 2024, 25 (2): 1-11, 20.
- [5] 王鑫, 姚一鸣, 唐瞻文, 等. 计及电池寿命折损成本的微电网储能系统容量分层优化配置 [J]. 云南电力技术, 2022, 50 (2): 2-9.
- [6] 曾振松, 郑洁云, 魏鑫, 等. 微电网的氢-氨混合储能系统容量优化配置研究 [J]. 广东电力, 2024, 37 (7): 42-49.
- [7] 赵宇洋, 赵钰欢, 郭英军, 等. 离网型风光氢储系统容量配置与控制优化 [J]. 太阳能学报,

2024, 45 (7): 50-59.

- [8] 刘秋华, 王明康, 杨圣城. 基于全寿命周期内经济收益最大化的退役电池储能容量配置方法研究 [J]. 太阳能学报, 2024, 45 (7): 143-152.
- [9] 冯龙祥, 汤旭晶, 李昕, 等. 计及电池全寿命周期的船舶复合储能多目标容量配置研究 [J]. 中国航海, 2023, 46 (1): 30-38.
- [10] 杨晓辉, 袁志鑫, 肖锦扬, 等. 考虑电池寿命的混合储能微电网优化配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (4): 22-31.

(收稿日期: 2024-10-10)