

电缆集电线路故障行波特征研究

郭政委, 巩秀中, 陈润超, 宋芃阳

华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310030

DOI:10.61369/WCEST.2025120009

摘 要 : 电缆集电线路多采用地下敷设方式, 一旦发生故障, 故障点排查难度极大, 往往需投入大量人力物力开展排查工作, 且过长的故障修复时间会引发额外的停电损失。基于此, 探索精准、高效且经济的电缆集电线路故障定位方法具有重要的现实意义。在利用行波测距原理实现其故障定位时, 针对电缆集电线路故障行波传输特征, 通过开展系统性深度分析, 精准把握其特征与内在规律, 进而明确电缆集电线路行波故障测距的具体实现路径。

关 键 词 : 电缆集电线路; 故障行波特征; 故障定位

Research on Traveling Wave Characteristics of Fault in Cable Collector Line

Guo Zhengwei, Gong Xiuzhong, Chen Runchao, Song Pengyang

Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 310030

Abstract : As cable collector lines are predominantly installed underground, fault diagnosis becomes exceptionally challenging when incidents occur. This process typically requires substantial human and material resources, with prolonged repair durations often resulting in additional power outage losses. Therefore, developing precise, efficient, and cost-effective fault localization methods for these lines holds significant practical value. By applying traveling wave ranging principles to analyze the transmission characteristics of fault-induced traveling waves, this study conducts systematic in-depth research to accurately identify their distinctive features and underlying patterns. These findings ultimately establish a concrete implementation pathway for traveling wave fault location in cable collector lines.

Keywords : cable collector line; fault traveling wave characteristics; fault location

一、故障行波基本原理

(一) 故障行波产生机理

如图1, 电缆集电线路故障行波的生成机制可阐释如下: 在金属性接地故障发生的情况下, 故障点F的电压值会趋近于零^[1]。针对这一故障状态, 可引入叠加定理展开分析, 将电网系统拆解为正常运行网络与故障附加网络两个独立模块分别研判。其中, $-U_F$ 是故障附加网络的行波激励源, 该附加电源作用于故障网络后, 会在故障点处激发出电压行波与电流行波, 两类行波随即沿线向两侧方向传播扩散。

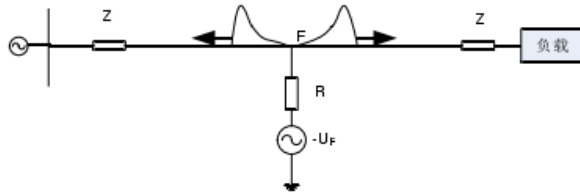


图1 故障行波产生机理布

(二) 行波传导波速度

行波在电缆线路中的传播速率, 是影响故障定位精度的关键参数。为简化理论分析过程, 本文选取均匀无损线路作为研究对

象 ($R_0 = 0$, $G_0 = 0$) :

$$\text{波速: } v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (1-1)$$

一般地, 对于电缆:

$$L_0 = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \ln \frac{R}{r} (H/m) \quad (1-2)$$

$$C_0 = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln \frac{R}{r}} (F/m) \quad (1-3)$$

将式(1-2)和式(1-3)代入式(1-1)可得:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (1-4)$$

电缆集电线路的相对磁导率近似为1, 因此其行波传播速度主要由相对介电常数决定。该参数仅与电缆的绝缘材料属性相关, 而与电缆线径规格、线芯材质以及绝缘层厚度均无关联^[2]。

(三) 电缆集电线路波阻抗

电缆集电线路的波阻抗 (亦称特征阻抗), 用于表征行波传播过程中正向电压与正向电流的对应关系, 以及反向电压与反向电流的对应关系。该参数由电缆自身的阻抗与导纳共同决定, 为简化推

演过程,本分析选取均匀无损线路作为研究模型 ($R_0=0$, $G_0=0$)。

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{j\omega L_0}{j\omega C_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (1-5)$$

根据式 (1-2) 和 (1-3) 中的 L_0 、 C_0 , 代入式 (1-5) 中可得:

$$Z_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \ln \frac{R}{r} (\Omega) \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可知, 电缆波阻抗的取值并非单一因素决定, 既与绝缘材料固有的介电常数、磁导率存在紧密关联, 同时也受电缆截面尺寸、芯线与外皮间距大小的直接影响。由此不难得出结论: 不同类型、不同规格的电缆, 对应的波阻抗数值会表现出显著区别; 并且芯线截面越大, 电缆的波阻抗数值也就越小。

(四) 故障行波折射与反射规律

故障点处生成的行波信号, 会以特定传播速度沿线路两端方向传输扩散。当行波沿电缆线路进行传输的过程中, 若线路参数或波阻抗在某一点节点处出现突变, 该节点即可被界定为波阻抗不连续点。行波在传播至这类不连续点的瞬间, 会随即产生折射与反射效应, 其电压行波信号对应的反射及折射具体表达式如下:

$$\alpha = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \beta = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (1-7)$$

其中, 反射波与入射波的比值 α 被界定为反射系数, 该系数的取值可正亦可负; 折射波与入射波的比值 β 则被命名为折射系数, 此系数的取值始终为正数。

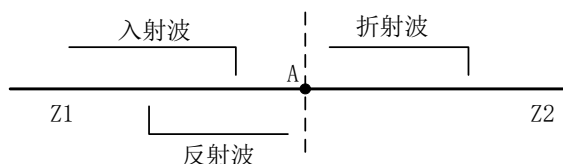


图2 行波的折射和反射

二、电缆集电线路故障行波传播特征仿真

(一) JMarti 仿真模型选取

电缆集电线路品类繁杂、规格多样, 要完成各类电缆电阻 (R)、电感 (L)、电容 (C) 参数的精准测算, 不仅涉及的技术范畴十分宽泛, 实际操作层面也存在较大难度。仿真电缆模型包括集中参数模型、分布参数模型和频变模型^[3]。基于电缆行波传播理论可知, 线路参数通常为频率的函数, 其中尤以零序电阻与零序电感的频变特性表现得最为显著。JMarti 模型是目前应用最广泛的具有频率相关参数的线路模型^[4-5]。

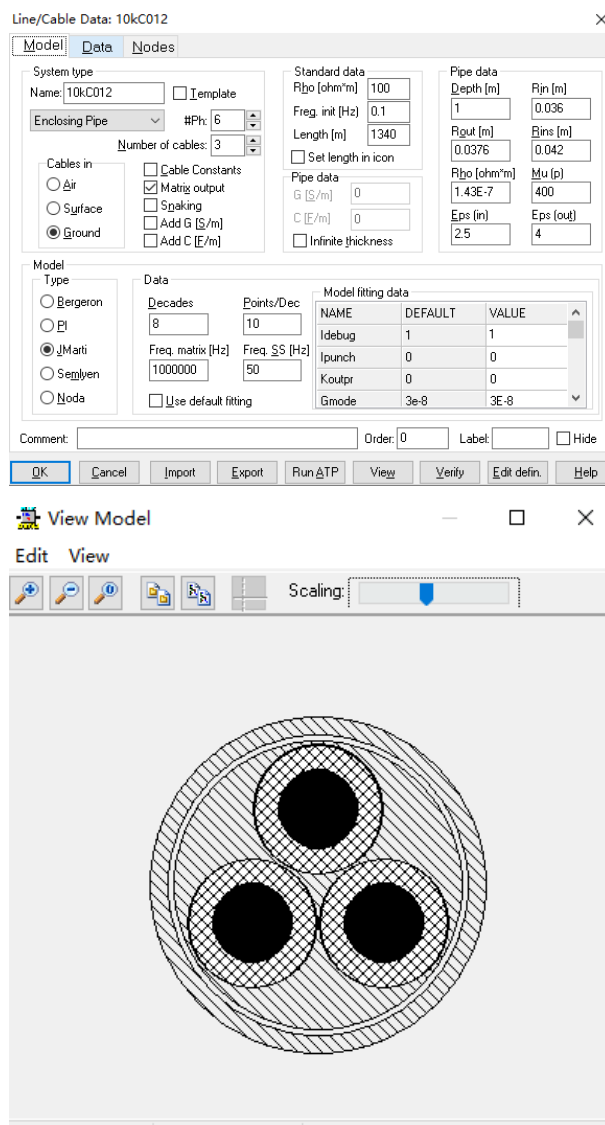


图3 三芯电缆 JMarti 模型

(二) 电缆集电线路行波传输距离衰减仿真

利用 ATP-EMTP 仿真软件建立了电缆模型, 进行了脉冲信号在电缆集电线路中传输的仿真实验。原始脉冲信号经 1000 米、2000 米、4000 米及 6000 米传输后, 其信号衰减的仿真测试结果如图 4 所示。

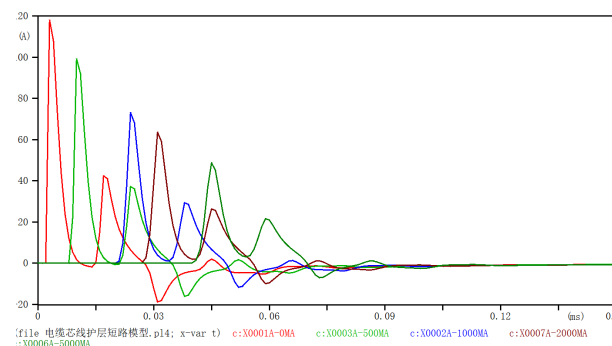


图4 电缆传输衰减波形

随着电缆集电线路长度的增加,脉冲宽度不断变长,即脉冲上升沿在沿电缆集电线路本体的传播过程中高频分量衰减得比低频分量要快得多,各频率成分的衰减倍数随着频率的增加而迅速增加。同时随着长度的变化,脉冲陡度不断降低,这表明电缆集电线路长度越长,输出的上升沿越缓,说明这一衰减过程随着传播距离的增加而更加严重^[6-8]。

（三）多级分支多支路仿真

结合实际线路结构,在仿真软件中搭建仿真模型,如图5所示。其中两级分支线路中,均为2条支线。

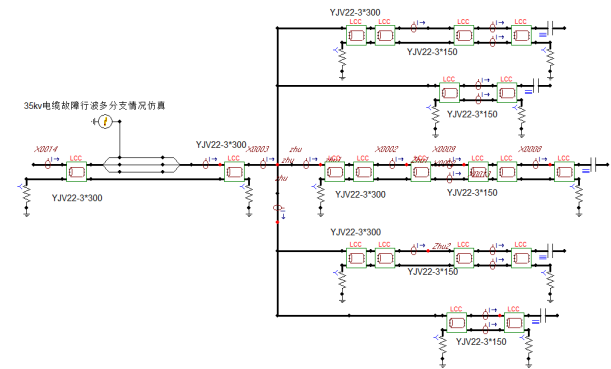


图5 带多级分支的仿真模型

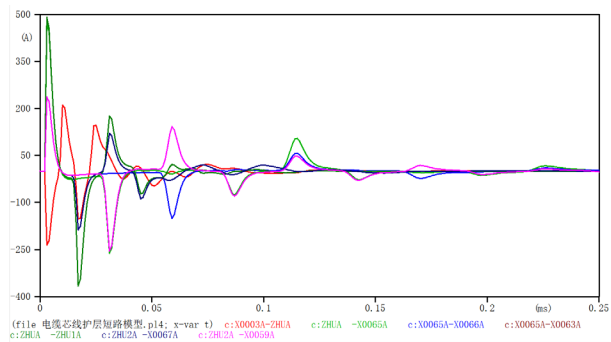


图6 电流行波波形

图6中能够看出多分支下,衰减的比例更剧烈,而且发生的折反射情况越来越明显,但是对波头到达时间没有影响。

三、结论

本文先围绕行波的生成机理,以及行波在线路传输过程中的衰减特性、波阻抗不连续点处的折射反射原理开展系统性研究。随后在仿真软件中搭建电缆长线路模型,针对行波随传输距离增加的衰减规律进行仿真分析,结果显示行波在传输过程中幅值呈逐步降低趋势,高频分量衰减速率更快,同时行波脉宽随之拓宽^[9]。

结合35kV电缆集电线路的实际拓扑结构,本文进一步构建多支路的仿真模型,通过调整分支线路的级数与数量,探究行波途经分支线路时的传播规律及折反射特性。仿真结果表明,行波信号在通过分支线路时会出现一定比例的衰减,且衰减程度会随分支线路数量的增加而逐步增大^[10]。

参考文献

[1] 张宁. 某风电场35kV集电线路分布式故障监测装置加装效果研究 [C]. 第二十届中国风电后市场交流合作大会论文集, 2025, 182-186.
[2] 王万纯. 基于ATP-EMTP的电缆故障测距技术研究 [D]. 南京理工大学, 2013(06).
[3] 杨凌云, 胡斌江, 伍文聪, 等. 基于人工智能优化插值的直流输电线路相域频变建模方法 [J]. 电气工程学报, 2025, 20(05).
[4] 李磊, 马宪民. 适用于输电线路暂态分析的频率相关模型 [J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(06).
[5] 王勇. 风电场集电线路电缆故障定位隔离研究 [J]. 电力设备管理, 2024, (16): 120-122.
[6] 邹欣. 复杂结构的集电线路双端行波定位的可行性仿真研究 [J]. 电工技术, 2024, (12): 106-109. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2024.12.033.
[7] 张丕华. 基于多端信息融合的风电场集电线路故障精确定位研究 [J]. 电气时代, 2024, (06): 85-89.
[8] 李俊恒. 基于行波的集电线路故障跳闸案例分析 [J]. 电气技术与经济, 2024, (01): 134-137.
[9] 梁家瑞. 风电场集电线路过电流自适应保护技术研究 [D]. 齐鲁工业大学, 2023. DOI: 10.27278/d.cnki.gsdqc.2023.000809.
[10] 尹维召, 邓宏纲, 李世栋. 浅析风电场集电线路常见故障及预防措施 [J]. 中国设备工程, 2022, (19): 65-66.