

考虑行波传输衰减的配电网行波测距布点方法^{*}韩浩然^{1,2} 王 玮^{1,2} 徐丙根^{1,2} 陈 恒^{1,2} 孙中玉^{1,2}

(1. 山东省新型配用电技术与装备重点实验室 淄博 255000; 2. 山东理工大学电气与电子工程学院 淄博 255000)

摘 要: 配电网线缆混合点、分支线众多,易导致故障行波幅值衰减过大而使行波测距装置无法启动。针对该问题,提出了一种考虑行波传输衰减的全区段可靠定位的行波测距装置布点方法。以配电网接地故障为例,从接地故障的初始电压行波定量计算出发,分别对架空-电缆混合连接点、多分支 T 节点对行波传输衰减影响进行了定量分析;通过构建既定拓扑配电网故障行波传播有向衰减矩阵,由此基于装置检测行波阈值实现双端行波测距下的不可测线路判定;进一步地,基于不可测线路中故障行波传输范围,以增配装置最小化为目标选择节点增配装置。实验结果表明,该布点方法综合考虑了多种因素对故障行波幅值的影响,保证了全网络线路行波测距的可靠性。

关键词: 配电网;行波测距;初始电压行波;衰减矩阵;布点方法

中图分类号: TM73;TN79+1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Placement method for traveling-wave fault location in distribution networks with wave attenuation considerations

Han Haoran^{1,2} Wang Wei^{1,2} Xu Bingyin^{1,2} Chen Heng^{1,2} Sun Zhongyu^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of New Power Distribution & Utilization Technology and Equipment, Zibo 255000, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: Distribution networks contain numerous hybrid cable-overhead connections and branches, often causing excessive attenuation of fault-induced traveling waves, preventing traveling-wave fault location devices from activating. To address this issue, this paper proposes an placement method for device placement that ensures reliable fault location across all network segments by accounting for traveling-wave transmission attenuation. Using ground faults as an example, the study begins with a quantitative calculation of the initial voltage traveling wave. It then systematically analyzes the attenuation effects introduced by hybrid cable-overhead connection points and multi-branch T -junctions through quantitative modeling. By constructing a directed attenuation matrix for fault traveling wave propagation in a predefined network topology, the method identifies non-measurable lines in double-ended traveling-wave ranging based on the device detection threshold. Furthermore, by analyzing the transmission range of fault-induced traveling waves in non-measurable lines, additional devices are allocated at optimal nodes with the objective of minimizing the total number of deployed devices. The experimental results show that the placement method ensures the reliability of traveling wave distance measurement for the entire network due to the comprehensive consideration of various factors affecting the amplitude of fault traveling waves.

Keywords: distribution network; traveling-wave fault location; initial voltage traveling wave; attenuation matrix; placement method

0 引 言

故障点的快速精准定位对减少故障抢修时间、提升供电可靠性具有重要意义^[1]。在众多故障定位技术中,通过捕捉故障暂态行波的波头到达时间差或反射波特征实现故

障定位的行波测距技术已经在输电领域得到了广泛应用^[2-3]。近年来,随着配电网规模的不断扩大和分布式电源的广泛接入,电力企业对配电网供电可靠性要求的不断提升,传统故障点区段定位已难以满足实际生产需求,配电网故障行波测距技术逐渐受到业内研究人员的关注^[4]。

收稿日期:2025-12-11

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52077221)项目资助

行波法测距具体的实现原理为单端法和双端法。单端法需要识别来自故障点的反射波^[5],因配电网分支线众多,导致故障初始行波的反射波识别困难,影响测距效果^[6],利用故障行波零、线模分量速度差和时间差的单端定位方法虽不需要识别反射波,但由于配电网线路较短,导致零模、线模行波传输时间差很小,且对零模波速依赖性很强,难以保证测距精度^[7]。与单端法相比,双端法仅需要识别初始行波波头,可靠性高,基于双端法的配电网故障定位因此成为工程化程度最高的测距方法^[8]。

行波测距装置布点是行波测距技术面临的实际工程问题,理想的布点方案应兼顾故障测距的可靠性和经济性。输电网和配电网均面临行波测距装置布点问题。其中,输电网中的相关研究主要针对含有环结构的输电网场景。文献[9]依次设置网络中每段线路为故障线路,以所有线路两端首波头经过的节点取公共集合进行配置,并对测距盲区进行了研究,实现对全网线路的故障测距。文献[10]在此方法基础上对线路 $N-1$ 运行时全网故障可观、行波测距装置退出时全网可测问题进行了研究。

受到输电网拓扑结构差异性影响,输电网布点方法无法直接应用于配电网,因此,研究人员针对配电网行波测距的布点技术开展了研究。文献[11]提出利用改进的灰狼优化算法和树形结构图分析技术,实现了配电网行波定位装置的优化配置。文献[12]基于架空线线零模波速差的单端法完成独立 T 型线路的装置布点优化,该方法由于零模在线路中传输衰减远大于线模分量,因此易造成测距失效。文献[13]针对配网中架空线、电缆混合线路提出一种基于距离矩阵和分支系数的配电网故障定位方法,以双端法为基础并通过提取故障行波的零、线模分量实现了对行波测距装置数量的优化配置,但其对零模分量在线路中衰减的影响考虑不足。文献[14]提出了针对架空配电线路的布点方法,其通过在每一个分支点增设测距装置以应对行波幅值衰减问题,该方法缺乏经济性,且并未考虑电缆-架空线混合线路影响。

对配电网行波测距而言,线路 T 节点、电缆-架空线混合连接点均会造成故障行波信号的衰减。行波测距装置以感受到初始行波作为行波录波的启动依据,当行波衰减过大时可能会导致装置录波无法启动进而导致测距失败^[15]。配电网行波测距应综合考虑上述因素的影响,针对该问题,本文提出一种考虑故障行波幅值传输衰减的配电网行波测距布点方法,以电缆单相接地故障初始行波计算及行波传输过程因分支点和线缆连接点导致的衰减分析和定量计算出发;结合线路参数频率衰减系数与架空线线模、电缆同轴模故障初始行波计算建立故障行波传输矩阵,通过装置监测行波阈值判断装置是否无法检测故障,以各故障线路双端装置集合寻找双端测距失效线路,并根据衰减矩阵寻找测距装置的增配位置,避免了行波量测装置受到行波幅值影响带来的不启动问题,由此保证在任何线路发生故障的

情况下,所部署的量测装置均可被利用相关定位方法完成故障测距。

1 配电网电缆故障行波初始计算

为明确行波测距装置所感受到的故障行波幅值大小,需首先对故障点初始行波幅值进行定量计算,结合行波在传输路径上的衰减特性,由此为提出行波测距布点方案奠定基础。目前,架空线故障初始行波计算已十分成熟^[16],而针对电缆故障的初始行波计算研究较少。考虑到不同故障类型故障下的故障初始行波计算方法不同,本文以单相接地故障为例,对故障初始电压行波进行分析。

单芯电缆因其质量轻、耐高温等级高、输送功率大、占地面积小等优势,在城市配电网得到广泛应用。如图 1 所示,当由环境及长期过载运行等因素影响下,电缆易发生主绝缘击穿,形成缆芯-屏蔽单相接地故障^[17-18]。

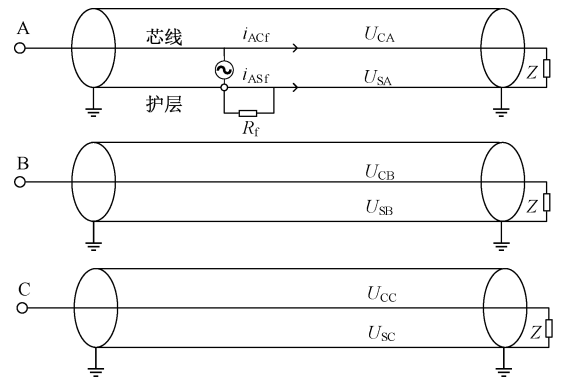


图 1 三相单芯电缆结构

Fig. 1 Three-phase single core cable structure

故障瞬间产生的暂态行波信号为高频信号,受到电缆集肤效应影响,芯线电流仅在本同轴回路中流动^[19],不涉及其他相芯线、外皮和大地。结合工程中常用拓展 Clarke 变换矩阵^[20],可得到高频下三相单芯电缆系统电压模量与相量的关系如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{CA} \\ u_{CB} \\ u_{CC} \\ u_{SA} \\ u_{SB} \\ u_{SC} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_c 、 u_s 分别为相域下的线芯和护层电压; u_0 为护层地模电压; u_1 、 u_2 为护层线模电压; u_3 、 u_4 、 u_5 分别为 A、B、C 三相同轴模电压。

对架空线来说,其线模分量衰减远小于零模分量;对电缆而言,其同轴模分量衰减程度也远小于其护层外部模分

量,且外部模分量波速度受介质特性影响较大。同时,当发生单相接地故障时,故障电流行波微弱,信号不易检测,且故障电压行波较电流行波灵敏度^[21]。因此,本文选用架空线模电压分量和电缆同轴模电压分量进行故障测距。

如图 1 所示,当三相单芯电缆发生缆芯-屏蔽单相接地故障时,由叠加定理可将正常网络分解为突变前网络和故障附加网络,故障附加网络如图 2 所示,故障源电压幅值等于故障点故障前电压,相位相反^[22],其值如式(2)所示。

$$u_F = -u_x \sin(100\pi t_f + \varphi_0) \quad (2)$$

式中: u_F 为故障点虚拟电压源; u_x 为正常时刻峰值电压; t_f 为故障时刻; φ_0 为故障相角。

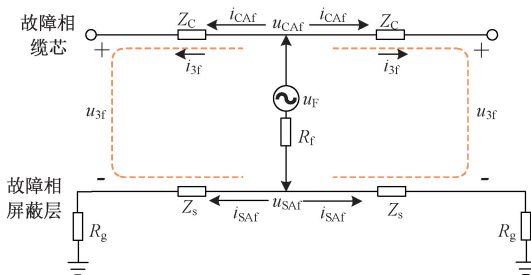


图 2 电缆单相接地故障点附加网络

Fig. 2 Additional network of cable single-phase grounding fault point

如图 2 所示,对电缆故障点处边界条件的描述可由式(3)表示。

$$\begin{cases} u_F = u_{CAF} - u_{SAF} \\ u_{CAF} - u_{SAF} - u_F + 2R_f i_{CAF} = 0 \\ i_{CAF} = -i_{SAF} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{CAF} 、 u_{SAF} 分别为故障附加网络中线芯、护层电压幅值; u_{CAF} 、 i_{CAF} 分别为故障点产生的线芯故障初始电压、电流行波; u_{SAF} 、 i_{SAF} 分别为故障点产生的护层故障初始电压、电流行波; R_f 为故障点过渡电阻。

通过电缆相模变换矩阵可得到模域波阻抗,并联立式(1)和(3),得到三相单芯电缆发生单相接地故障时的同轴模故障初始电压行波大小,如式(4)所示。

$$u_{3f} = \frac{Z_3}{Z_3 + 2R_f} \cdot (u_{CAF} - u_{SAF}) \quad (4)$$

式中: u_{3f} 为故障同轴模初始电压; Z_3 为电缆 A 相同轴模波阻抗。

2 不同因素下故障行波幅值衰减计算

复杂配电网场景多包含电缆-架空线混合线路及多分支线路,是造成配网行波衰减的主要原因,本文以图 3 所示的配网拓扑对故障行波在线缆混合点及 T 节点处的传输衰减计算进行分析。

2.1 电缆-架空线混合线路因素

1) 电缆故障行波传输至架空线

如图 3 所示,当电缆段 $N_1 N_2$ 发生单相接地故障 f_1 时,在线缆连接点 N_1 、 N_2 处,电缆段 $N_1 N_2$ 产生的同轴电

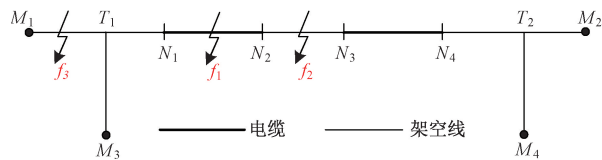


图 3 多分支架空线-电缆混合线路

Fig. 3 Multi branch and overhead-cable hybrid lines

压浪涌会注入架空线单相导体对地之间。根据折反射规律可得式(5),从而将线缆连接点 N_1 、 N_2 处的相关量关联,方便进行下一步分析。

$$\begin{cases} u_{3q} + u_{3r} = u_{At} \\ i_{3q} - i_{3r} = i_{At} \\ u_3 = Z_3 i_3 \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_{3q} 、 i_{3q} 代表电缆 A 相同轴电压、电流入射行波; u_{3r} 、 i_{3r} 代表电缆 A 相同轴电压、电流反射行波; u_{At} 、 i_{At} 代表架空线 A 相电压、电流折射行波。

系统中架空线模量电压电流关系可用独立的模量电压、电流方程来表示:

$$\begin{cases} u_0 = Z_0 i_0 \\ u_a = Z_a i_a \\ u_\beta = Z_\beta i_\beta \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_0 、 u_a 、 u_β 分别为架空线的零模和两个线模电压; i_0 、 i_a 、 i_β 分别为架空线的零模和两个线模电流; Z_a 、 Z_β 为架空线线模波阻抗; Z_0 为架空线零模波阻抗。

利用架空线三相 Karenbauer 变换^[23],可将式(6)转换为如式(7)所示形式。

$$\begin{cases} u_A + u_B + u_C = Z_0 (i_A + i_B + i_C) \\ u_A - u_B = Z_a (i_A - i_B) \\ u_A - u_C = Z_\beta (i_A - i_C) \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_A 、 u_B 、 u_C 分别代表架空线三相电压; i_A 、 i_B 、 i_C 分别代表架空线三相电流。

当电缆发生故障时,其故障点 f_1 边界条件如式(8)所示。

$$\begin{cases} i_{ACq} = -i_{ASq} \\ u_{CBq} = u_{CCq} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: i_{ACq} 、 i_{ASq} 分别为电缆 A 相线芯、护层入射电流; u_{CBq} 、 u_{CCq} 分别为电缆 B 相和 C 相线芯入射电压。

联立式(5)~(8)并结合三相 Karenbauer 变换得到线缆连接点 N_1 、 N_2 处的模量初始行波关系,如式(9)所示。

$$\begin{cases} u_{at} = u_{\beta t} = u_{0t} = \frac{2(Z_0 + 2Z_a)}{3(Z_0 + 2Z_a + 3Z_3)} u_{3q} \\ i_{at} = i_{\beta t} = \frac{2(Z_0 + 2Z_a)}{3Z_a(Z_0 + 2Z_a + 3Z_3)} u_{3q} \\ i_{0t} = \frac{2(Z_0 + 2Z_a)}{3Z_0(Z_0 + 2Z_a + 3Z_3)} u_{3q} \end{cases} \quad (9)$$

上述为单一混合点时电缆故障行波传至架空线的故障行波模量折射关系,当故障行波经架空线 $N_2 N_3$ 传输至电

缆 N_3N_4 时,在线缆连接点 N_3 处会再次发生故障行波的折反射。假设此段电缆参数与上述电缆参数相同,根据式(5)同理可得此线缆连接点的相关量关系如式(10)所示。

$$\begin{cases} u_{Aq} + u_{Ar} = u_{3t} \\ i_{Aq} - i_{Ar} = i_{3t} \end{cases} \quad (10)$$

此时架空线B、C相故障电压行波为0,结合式(7),可得线缆连接点 N_3 处模量行波关系如式(11)所示。

$$u_{3t} = \frac{18Z_3}{3Z_3 + Z_0 + 2Z_a} u_{aq} \quad (11)$$

2) 架空线故障行波传输至电缆

以架空线 N_2N_3 单相接地故障 f_2 为例,对架空线故障行波在线缆连接点 N_3 的传播特性进行分析。由行波折反射规律将线缆连接点处的相关量关联,如式(12)所示。

$$\begin{cases} u_{Aq} + u_{Ar} = u_{3t} \\ u_{Bq} + u_{Br} = u_{4t} \\ u_{Cq} + u_{Cr} = u_{5t} \\ i_{Aq} - i_{Ar} = i_{3t} \\ i_{Bq} - i_{Br} = i_{4t} \\ i_{Cq} - i_{Cr} = i_{5t} \end{cases} \quad (12)$$

式中: u_{Aq} 、 u_{Bq} 、 u_{Cq} 分别为架空线三相入射电压; u_{Ar} 、 u_{Br} 、 u_{Cr} 分别为架空线三相反射电压; u_{3t} 、 u_{4t} 、 u_{5t} 分别为电缆三相同轴折射电压; i_{Aq} 、 i_{Bq} 、 i_{Cq} 分别为架空线三相入射电流; i_{Ar} 、 i_{Br} 、 i_{Cr} 分别为架空线三相反射电流; i_{3t} 、 i_{4t} 、 i_{5t} 分别为电缆三相同轴折射电流。

同时,故障点 f_2 故障行波边界条件如式(13)所示。

$$i_{Bq} = i_{Cq} = 0 \quad (13)$$

结合电缆与架空线相模变换可得线缆连接点 N_3 处初始行波模域数值关系如式(14)所示。

$$u_{3t} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_a} u_{4t} = \frac{6Z_3}{Z_3 + Z_a} u_{aq} \quad (14)$$

由于电缆同轴模波阻抗约 $15 \sim 30 \Omega$,架空线线模波阻抗约 300Ω 左右,且当A相故障时, $u_{3t} \gg u_{4t}$,经实验验证 u_{4t} 不超过 u_{3t} 的10%,且后续传输过程误差不超过10%,为方便分析,考虑架空线单相接地故障时的故障行波传输时忽略对 u_{4t} 折射的影响,则式(14)可近似为式(15)。

$$u_{3t} = \frac{6Z_3}{Z_3 + Z_a} u_{aq} \quad (15)$$

若故障行波经电缆 N_3N_4 再次传输至架空线 N_4T_2 时,由于故障行波在电缆 N_3N_4 A相同轴模传播,所以故障行波在线缆连接点 N_4 处的传输与上述电缆发生故障后行波传输衰减一致。

因架空线线模波阻抗一般为电缆同轴模波阻抗10倍左右,计算上述公式所得折射系数均小于1,证明架空线或电缆故障时经线缆连接点均发生较大衰减。

2.2 T接线影响因素

在配电网中存在较多分支线,一般地,假设线路参数一致,经简单分支线后折射系数为 $2/3$ ^[24],即经T节点后故障

行波衰减至初始值的 $2/3$ 倍。特殊地,当故障发生在T线路中的主线路时,分支线的长度会对主线路上游装置检测值产生影响。以架空线 M_1T_1 发生故障 f_3 为例,采样频率为1 MHz,当分支线 T_1M_3 长度为150 m时,由于架空线波速度约为 3×10^8 m/ μ s,在1 μ s时间内行波在架空线传播的距离为300 m,所以当行波传至分支点 T_1 后,经1 μ s来自分支线 T_1M_3 末端的反射波会到达分支点 T_1 发生折射。

由于线路末端通常与变压器相连,且变压器的高频阻抗很大^[25],传播至变压器的故障初始行波可近似认为发生了全反射,反射后的行波传播至分支点后,其折射系数同样为 $2/3$,故障点行波传播网格如图4所示。当架空线 < 150 m时,当测距装置启动后,第2个采样点为第1次折射波与经单分支末端反射后折射波幅值相加,约等于故障点行波幅值。若分支线参数不同于主干线路,仍可按照上述思路进行推导。

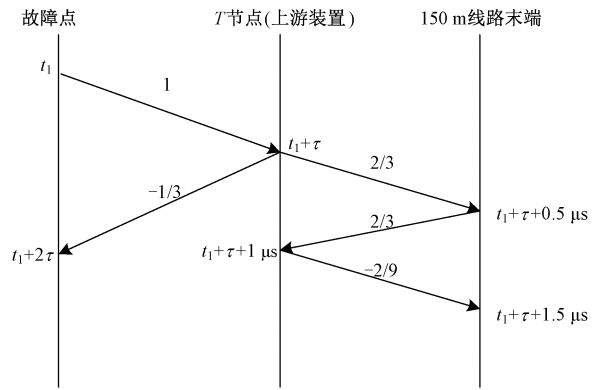


图4 T接线路行波传播网格

Fig. 4 Traveling wave transmission grid of T-branch lines

分别设置架空线分支线 T_1M_3 长度为150和1 000 m,观察主线路上游装置检测幅值情况,如图5所示。横轴初始时刻“0”为归一化的波头起始时间。当分支线长度为150 m时,经T节点后幅值约等于故障点初始行波幅值;

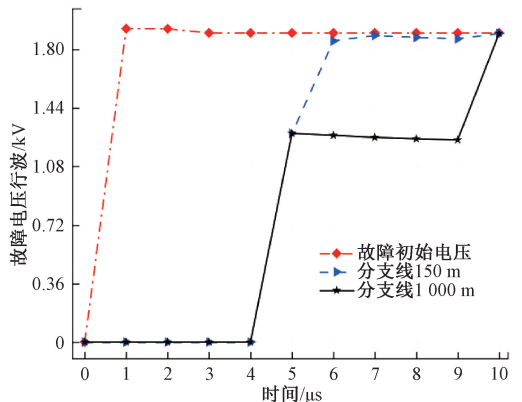


图5 分支线长度对检测幅值影响

Fig. 5 Comparison of influence of branch line length on detection amplitude

分支线长度为 1 000 m 时,其值为初始电压的 2/3 倍,验证了上述结论。

由此可见,若架空线或电缆分支线满足式(16)时, T 节点对主线路上游的行波测距装置检测到的主线故障初始波头的幅值的影响可以忽略不计。

$$L_T \leq \frac{V_{\text{line}} t}{2} \quad (16)$$

式中: L_T 为架空线或电缆分支线长度; V_{line} 为架空线或电缆波速度; t 为行波检测装置采样间隔。

3 考虑行波幅值衰减的测距装置布点方法

3.1 量化指标

故障行波信号有效传变至测量互感器二次侧的幅值一般不得低于最大值的 10%,且电压初始行波幅值大于启动阈值时,才可被正确监测并进行后续的行波定位^[26],本文以架空线故障线模初始电压行波作为检测目标,当发生 A 相单相接地故障时,为保证高阻故障条件下的故障行波可测性,其装置检测故障行波幅值启动阈值设置为^[26]:

$$X_0 = \frac{Z_a}{Z_0 + 2Z_a + 6R_f} U_{AF} \cdot x\% \quad (17)$$

式中: X_0 为测距装置启动阈值; U_{AF} 为故障分量网络中 A 相电压源幅值,受故障相角影响; $x\%$ 为单相接地故障行波最大值的比例系数。

接地故障多发生在相电压峰值附近,为高压击穿故障,其故障相角一般涉及 $30^\circ \sim 90^\circ$ 范围,接地故障过渡电阻值一般在 $0 \sim 1\,000\ \Omega$,极端情况下,可达到 $10\ \text{k}\Omega$ ^[27]。电缆缆芯-屏蔽单相接地故障为低阻故障,一般不超过其自身波阻抗的 10 倍^[28]。因此,工程中,一般按照故障角 90° ,架空线故障电阻 $300\ \Omega$ 进行考虑。而 x 值的设定为一个工程经验值,当阈值设置过小时,容易将负荷投切、雷电干扰误判为故障,导致装置频繁误启动;当阈值设置过大时,装置仅能识别少数低阻故障,且会使增配装置数量过多,影响经济性。本文以电压互感器二次侧启动电压 600 mV,根据电子式电压互感器参数^[29],可得到电子式电压互感器一次侧启动电压为 101 V,根据式(17)计算可得 $x \approx 15$,因此,本文监测装置的电压启动阈值按照上述条件下故障电压行波幅值的 15% 进行设定,也即当装置感知的行波电压幅值小于上述条件下的故障行波电压理论最大幅值的 15% 时,测距装置便无法启动。

本文布点方法中,为充分考虑高阻故障下的行波定位可靠性,按照故障初相角 30° ,架空线故障过渡电阻 $300\ \Omega$ 和电缆故障电阻 $50\ \Omega$ 作为故障条件进行判据设定,以式(18)进行装置可测性检验。

$$m = \text{INT} \left[\min \left(\frac{k}{X_0}, 1 \right) \right] \quad (18)$$

式中: $\text{INT}[\]$ 为取整运算; $\min(\)$ 为取最小值运算; k 为实际幅值; m 为可测性系数,取 1 时可测,取 0 时不可测。

3.2 故障有向衰减矩阵的构建

当配电网拓扑中的某一线路发生故障后,由于故障行波测距装置安装在线路末端节点,经上述因素传播衰减后,故障初始行波传至该线路某一侧所有末端节点时其幅值小于测距装置启动幅值时,多端行波定位方法无法确定故障点位置,称该线路为不可测线路。为此,本文提出一种确认拓扑所有线路发生故障时故障行波传输范围的方法。

一个网络拓扑结构可以用图论中的无向图 $G=(V, E)$ 进行描述,其中, V 是节点集合, E 是边集合,其中规定 M_j 为终端节点, T_n 为交叉节点,包括多分支节点及线缆连接点,每条边为 e_i 。

首先,根据架空线线模、电缆同轴模故障初始电压行波计算建立网络各线路发生单相故障接地时的故障模量初始电压行波矩阵,如式(19)所示。

$$\mathbf{F}_{\text{line}} = \begin{bmatrix} F_{e_1} & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & F_{e_2} & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & F_{e_3} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{F}_{\text{line}}$ 为故障模量初始电压行波矩阵,对角元素代表相应线路发生单相接地故障时的模量故障初始电压行波幅值。

需要说明的是,当 T 节点所接两条线路末端存在测距装置并且这两条线路故障初始行波大于测距装置启动阈值时,这两条线路发生故障时一定可测,为减少矩阵运算,不将其归纳进矩阵。

为体现故障行波传播至各装置情况,假设每条边均发生故障,并且各故障通过最短路径到达各装置,以各边 e_i 为行,末端节点 M_j 为列建立行波传输衰减系数矩阵,如式(20)所示。

$$\boldsymbol{\alpha}_t = \begin{bmatrix} \alpha_{e_1 \rightarrow M_1} & \alpha_{e_1 \rightarrow M_2} & \alpha_{e_1 \rightarrow M_3} & \cdots \\ \alpha_{e_2 \rightarrow M_1} & \alpha_{e_2 \rightarrow M_2} & \alpha_{e_2 \rightarrow M_3} & \cdots \\ \alpha_{e_3 \rightarrow M_1} & \alpha_{e_3 \rightarrow M_2} & \alpha_{e_3 \rightarrow M_3} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: $\boldsymbol{\alpha}_t$ 为全线行波传输衰减系数矩阵; $\alpha_{e_i \rightarrow M_j}$ 为故障边 e_i 传输至末端节点装置处的衰减系数。

$\boldsymbol{\alpha}_t$ 中每一元素值为所经交叉节点 T_n 的衰减系数与故障点至末端节点 M_j 最短路径长度线路参数衰减值的乘积,如式(21)所示。

$$\alpha_{e_i \rightarrow M_j} = \alpha_{\Pi T_n} \cdot e^{-\alpha_{\text{line}} L_{f \rightarrow M_j}} \quad (21)$$

式中: $\alpha_{\Pi T_n}$ 表示故障边传输至各装置 M_j 所经交叉节点衰减系数的累乘; α_{line} 为线路频率衰减系数; $L_{f \rightarrow M_j}$ 为故障点至各装置的最短路径距离。

结合模量故障初始电压行波矩阵与行波传输衰减系数矩阵可得到各装置检测故障边行波幅值,如式(22)所示。

$$\mathbf{A}_{\text{total}} = \mathbf{F}_{\text{line}} \cdot \boldsymbol{\alpha}_t \quad (22)$$

3.3 行波测距装置部署流程

对于故障行波幅值衰减矩阵,结合式(17)可得到相应

线路发生故障后其故障行波能否被线路末端装置监测情况。结合基于双端法的多端行波测距方法,判断不可测线路集合。考虑到实际工程场景,为满足线路装置的经济部署,本文规定当分支线长度 L 满足式(23)时,不安装行波测距装置,采用人工巡检的方式对此分支线进行故障排除。

$$L \leq 5L_0 \quad (23)$$

式中: L 为架空线或电缆的实际长度; L_0 为架空线或电缆的测距精度。

为此,考虑故障初始行波幅值衰减的配电网行波测距装置布点方法流程如图 6 所示。

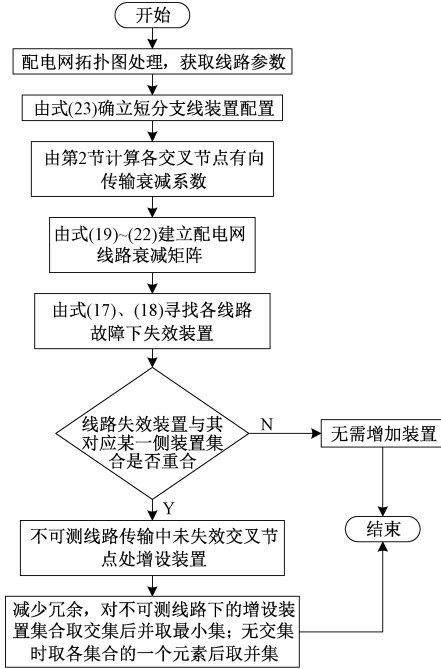


图 6 行波装置布点方法流程

Fig. 6 Traveling wave device layout process

其具体步骤如下:

1) 将电力网络抽象为图, 对各节点进行编号; 获取线路参数, 求得各线路模量波阻抗与低频参数衰减系数。

2) 线路长度满足式(23)时, 该线路末端不设置装置, 其余线路末端设置装置。

3) 采取 100 kHz 下的线路参数基于式(19)、(21)计算各线路模量故障初始电压行波幅值与各节点有向衰减系数, 建立配网故障行波传输衰减矩阵。

4) 根据式(18)和故障传输衰减矩阵判断各线路故障时装置监测情况, 结合线路两端装置判断该线路是否为不可测线路。

5) 基于不可测线路故障行波传输路径中 $m=1$ 的交叉节点可作为增设装置位置, 从而获得可增配装置节点集合。

6) 减少监测范围冗余, 对各不可测线路增配装置节点集合取交集后取最小集; 无交集时取各集合的一元素后取并集, 最终获得增配装置集合。

4 仿真算例

4.1 行波测距装置布点配置

本文以 10 kV 含复杂多分支混合线路的配电网场景为例, 对其进行拓扑装置部署规划, 如图 7 所示。

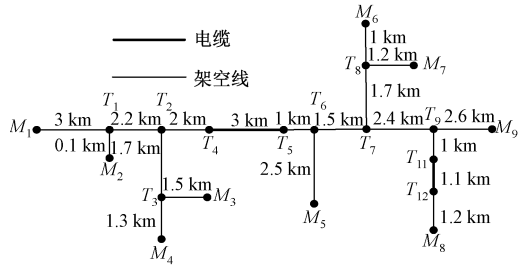


图 7 某 10 kV 配电网模型

Fig. 7 A 10 kV distribution network model

1) 简化配电网, 建立拓扑结构图, 对各节点进行编号, 如图 7 所示, 确立各边集合。

$$\begin{bmatrix} e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, \\ e_8, e_9, e_{10}, e_{11}, e_{12}, e_{13}, \\ e_{14}, e_{15}, e_{16}, e_{17}, e_{18}, e_{19} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 M_1, T_1 M_2, T_1 T_2, T_2 T_3, T_3 M_3, \\ T_3 M_4, T_2 T_4, T_4 T_5, T_5 T_6, T_6 M_5, \\ T_6 T_7, T_7 T_8, T_8 M_6, T_8 M_7, T_7 T_9, \\ T_9 T_{11}, T_{11} T_{12}, T_{12} M_8, T_9 M_9 \end{bmatrix} \quad (24)$$

2) 由于 $T_1 M_2$ 线路为 100 m, 据式(23)确立 M_2 处不装设行波测距装置, $M_1, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9$ 处装设行波测距装置。

3) 据 3.1 节所设条件及式(17)可得装置设置阈值为 108 V, 根据第 2 节传输衰减计算及式(22)建立故障初始行波传输衰减矩阵:

	M_1	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9
e_1	698	305	306	73	32	32	4	31
e_3	674	307	308	73	33	32	4	31
e_4	458	464	464	74	33	33	4	32
e_7	466	312	312	107	48	48	9	48
e_8	592	398	398	599	264	264	48	263
e_9	107	72	72	469	207	207	55	206
e_{10}	73	49	49	699	207	207	55	206
e_{11}	73	49	49	463	306	306	82	304
e_{12}	48	32	33	306	464	464	82	304
e_{15}	48	32	33	306	307	307	115	456
e_{16}	32	21	21	202	202	203	186	461
e_{17}	27	18	18	394	263	263	905	598
e_{18}	6	4	4	57	54	54	699	123
e_{19}	32	21	21	202	203	203	116	699

(25)

利用式(18)判断各线路故障时装置失效集合,如表 1 所示。

表 1 各线路故障时测距装置检测情况 ($m=0/1$)

Table 1 Monitoring status of the device during line faults ($m=0/1$)

线路	M_1	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9
T_1M_1	1	1	1	0	0	0	0	0
T_1T_2	1	1	1	0	0	0	0	0
T_2T_3	1	1	1	0	0	0	0	0
T_2T_4	1	1	1	0	0	0	0	0
T_4T_5	1	1	1	1	1	1	0	1
T_5T_6	0	0	0	1	1	1	0	1
T_6M_5	0	0	0	1	1	1	0	1
T_6T_7	0	0	0	1	1	1	0	1
T_7T_8	0	0	0	1	1	1	0	1
T_7T_9	0	0	0	1	1	1	1	1
T_9T_{11}	0	0	0	1	1	1	1	1
$T_{11}T_{12}$	0	0	0	1	1	1	1	1
$T_{12}M_8$	0	0	0	0	0	0	1	1
T_9M_9	0	0	0	1	1	1	1	1

4)根据表 1 各线路失效装置集合与相应一侧末端装置集合对比,得到当 T_2T_4 、 T_5T_6 线路发生故障时,利用两端法测距失效,需要增加测点。故障线路为 T_2T_4 时,其左侧可测,右侧故障行波传播范围至 T_4 节点;故障线路为 T_5T_6 时,其右侧可测,左侧故障行波传播范围至 T_5 节点,两者无交集,即在 T_4 、 T_5 节点各增设一个测距装置即可保证全线路故障行波幅值可测。

4.2 幅值衰减验证及定位计算

利用 PSCAD/EMTDC 暂态仿真软件对图 7 配电网进行搭建,根据行波测距装置布点配置方案,在 M_1 、 M_3 、 M_4 、 T_4 、 T_5 、 M_5 、 M_6 、 M_7 、 M_8 、 M_9 节点处配置行波测距装置, T_4T_5 、 $T_{11}T_{12}$ 为电缆线路,采样频率为 1 MHz。在线路 T_2T_4 距离节点 T_2 500 m 处设置 A 相接地故障,在线路 T_5T_6 距离 T_6 800 m 处设置 A 相接地故障。

1) T_2T_4 线路

对 T_2T_4 线路设置故障电阻为 300 Ω ,故障初始角度为 30°的故障条件,并与相应时刻正常状态电压作差得到到达各线路末端的电压幅值,为了方便关注波头幅值部分,对波头幅值进行了延展,其结果如图 8 所示。

参考文献[8]对优化配置结果进行故障区段定位,后根据三端行波法计算故障距离。通过小波变换模极大值^[30],确定故障初始电压行波到达各装置的时间,如表 2 所示。

将 M_1 、 M_4 、 M_{T_4} 的行波到达时间代入式(26)计算,得到故障距离为 443 m,误差为 57 m,在工程允许范围内,因此可见 T_2T_4 在发生高阻故障时,依靠 T_4 处的增配装置,

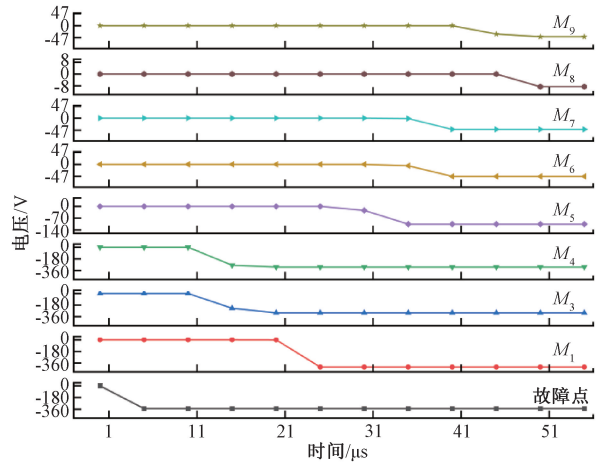


图 8 T_2T_4 线路故障时各监测点电压值

Fig. 8 Voltage value of each monitoring point in case of T_2T_4 line fault

表 2 电压行波到达装置初始时间

Table 2 Initial time of voltage traveling wave reaching the device (μs)

监测端	时间
M_1	19
M_3	12
M_4	12
M_{T_4}	6

能够被准确定位。

$$l_{T_2f} = \frac{l_{T_4T_2}(t_1 - t_4) + l_{M_1T_2}(t_4 - t_{T_4}) + l_{M_4T_2}(t_{T_4} - t_1)}{2(t_1 - t_4)} \quad (26)$$

2) T_5T_6 线路

对 T_5T_6 线路设置故障电阻为 300 Ω ,故障初始角度为 30°的故障条件,得到各监测点电压值如图 9 所示。

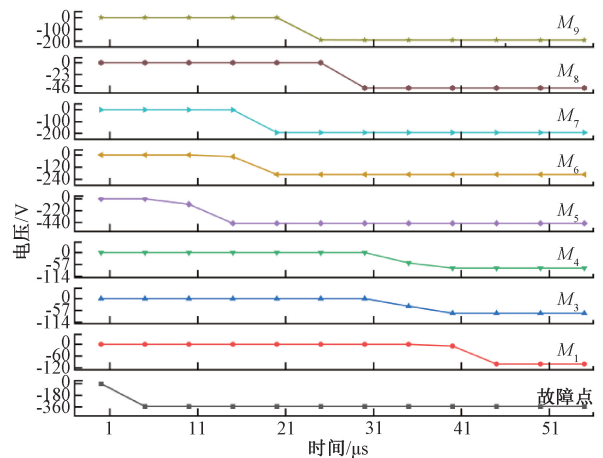


图 9 T_5T_6 线路故障时各监测点电压值

Fig. 9 Voltage value of each monitoring point in case of T_5T_6 line fault

本文以式(27)定义误差率,其结果误差均不超 10%。
 T_2T_4 、 T_5T_6 线路所得误差率如图 10 所示。

$$\epsilon = \left| \frac{A_s - A_v}{A_v} \right| \times 100\%$$

(27)

式中: ϵ 为误差率; A_s 为仿真值; A_v 为实际计算值。

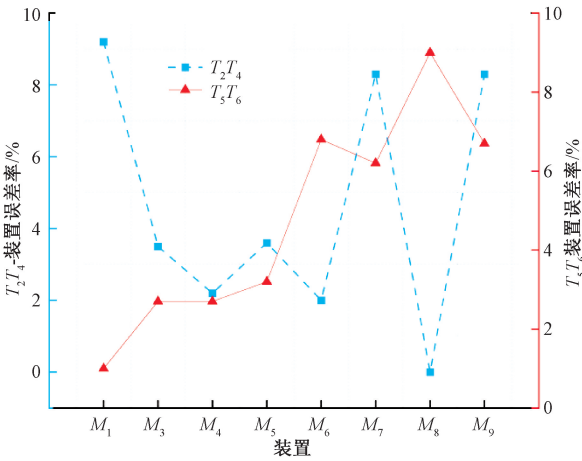


图 10 各监测点电压值误差率

Fig. 10 Error rate of voltage value at each monitoring point

利用小波变换模极大值得到可监测装置初始电压行波信号到达时间,如表 3 所示。

表 3 电压行波到达装置初始时间

Table 3 Initial time of voltage traveling wave reaching

the device		(μs)
监测端	时间	
M_5	12	
M_6	17	
M_7	17	
M_9	26	
M_{T_5}	1	

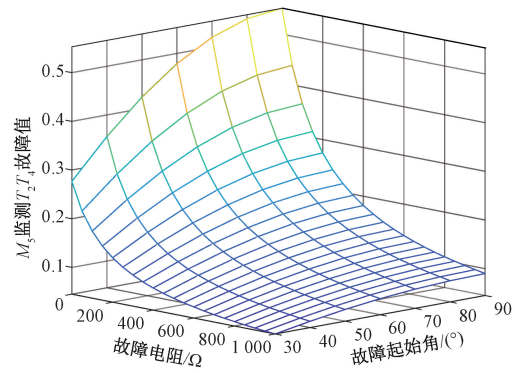
将 M_5 、 M_9 、 M_{T_5} 行波到达时间代入式(28),根据三端行波法计算,得到故障距离为 821 m,误差为 21 m,可见 T_5T_6 在发生高阻故障时,依靠 T_5 处的增配装置,能够被准确定位。

$$l_{T_6f} = \frac{l_{T_5T_6}(t_5 - t_9) + l_{M_5T_6}(t_9 - t_{T_5}) + l_{M_9T_6}(t_{T_5} - t_5)}{2(t_5 - t_9)}$$

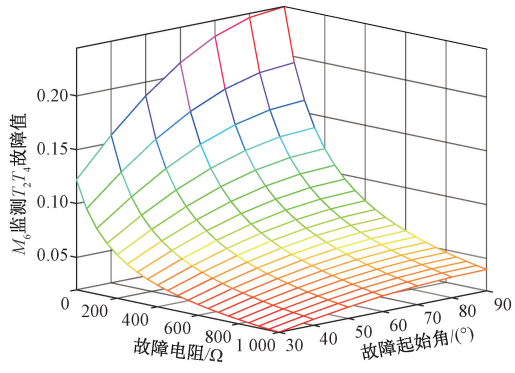
(28)

4.3 故障条件对布点配置的影响性分析

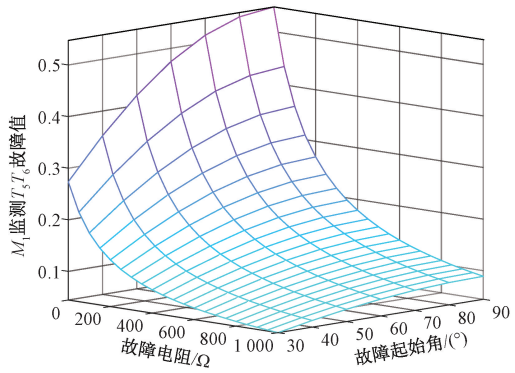
实际线路故障时,故障初相角、故障点过渡电阻均会发生变化,导致在相同配电网结构下的装置检测故障初始行波大小会有明显变化,从而影响装置的增配计划,为满足可靠性的要求。图 11 所示为上述算例中不可测线路不同故



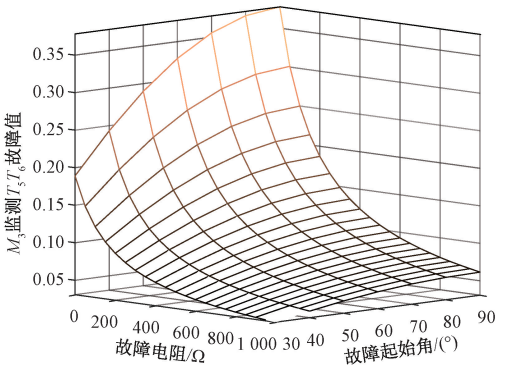
(a) M_5 监测 T_2T_4 线路幅值情况
(a) Amplitude of the T_2T_4 line is monitored by M_5



(b) M_6 监测 T_2T_4 线路幅值情况
(b) Amplitude of the T_2T_4 line is monitored by M_6



(c) M_1 监测 T_5T_6 线路幅值情况
(c) Amplitude of the T_5T_6 line is monitored by M_1



(d) M_3 监测 T_5T_6 线路幅值情况
(d) Amplitude of the T_5T_6 line is monitored by M_3

图 11 故障线路初始行波与故障起始角、电阻关系

Fig. 11 Relationship between traveling wave amplitude and fault starting angle, transition resistance

障相角及故障电阻时到达部分不可测端装置时的幅值大小。可以看出,不同故障初相角和故障过渡电阻下的故障初始行波幅值差距较大,分别以故障初相角 30°、60°、90°,故障过渡电阻 100、300、500、1 000 Ω 组合下得到具体的测距装置部署规划如表 4、5 所示。

表 4 T_2T_4 线路不同故障条件部署情况
Table 4 Deployment of T_2T_4 line under different fault conditions

区段	故障 角度	故障 电阻	失效装置	是否增配 装置
T_2T_4	30	100	$M_6、M_7、M_8、M_9$	否
	30	300	$M_5、M_6、M_7、M_8、M_9$	是 $\{T_4\}$
	60	100	M_8	否
	60	300	$M_6、M_7、M_8、M_9$	否
	60	500	$M_6、M_7、M_8、M_9$	否
	60	1 000	$M_5、M_6、M_7、M_8、M_9$	是 $\{T_4\}$
	90	100	M_8	否
	90	300	$M_6、M_7、M_8、M_9$	否
	90	500	$M_6、M_7、M_8、M_9$	否
	90	1 000	$M_5、M_6、M_7、M_8、M_9$	是 $\{T_4\}$

表 5 T_5T_6 线路不同故障条件部署情况
Table 5 Deployment of T_5T_6 line under different fault conditions

区段	故障 角度	故障 电阻	失效装置	是否增配 装置
T_5T_6	30	100	无	否
	30	300	$M_1、M_3、M_4$	是 $\{T_5\}$
	60	100	无	否
	60	300	无	否
	60	500	$M_3、M_4$	否
	60	1 000	$M_1、M_3、M_4$	是 $\{T_5\}$
	90	100	无	否
	90	300	无	否
	90	500	无	否
	90	1 000	$M_1、M_3、M_4$	是 $\{T_5\}$

在该配电网场景下,500 Ω 以下故障电阻或 90°附近故障起始角的故障条件下,无需增配装置;1 000 Ω 故障电阻或 30°以下故障起始角的故障条件下,为保证全线测距可靠性需增设装置。实际工程中,可按照可靠性需求选择具体行波测距装置部署规划。

为验证本文所提布点方法的有效性,参考文献[13]所采用的行波装置最优配置原则,仅在图 7 的 $M_1、M_4、M_6、M_9$ 布置装置。表 6 为 $T_2T_4、T_5T_6$ 线路失效端在两种装置布点方法下的可监测故障条件范围,可见本文所提方法

监测故障条件范围更广。线路发生低阻故障时,两种方法均能实现故障点的精确定位;当按照本文线路故障设置条件时,故障线路为 T_2T_4 时, $M_6、M_9$ 装置无法监测;故障线路为 T_5T_6 时, $M_1、M_4$ 装置无法监测,因此文献[13]所提方法无法准确判断故障支路,而本文 $T_4、T_5$ 处增配装置可以克服上述两条线路高阻故障下故障定位失效的难题。为实现所有线路的故障精确定位,文献[14]所提布点方法需要在图 7 所示配电网拓扑中安装 16 台行波测距装置,而本文布点方法需要安装 10 台,减少了 60% 的装置安装数量。因此,本文所提布点方法在提高了线路高阻故障定位的可靠性的同时兼顾了经济性。

表 6 与现有方法对比
Table 6 Comparison with existing method

方法	线路	过渡电阻/Ω	故障初始角/(°)
本文方法	T_2T_4	0~1 255	7~90
	T_5T_6	0~1 255	7~90
最优配置	T_2T_4	0~350	20~90
原则	T_5T_6	0~980	10~90

5 结 论

本文针对故障行波幅值过低导致的行波监测装置不可测问题提出了一种考虑故障行波幅值衰减的行波测距装置优化部署策略。故障行波幅值受故障点初始行波幅值、混合连接点和 T 节点多种因素的影响,其中,故障类型、故障相角和故障过渡电阻决定故障初始行波大小,而电缆-架空线混合连接点和 T 节点是故障初始行波在传输中衰减的主要因素。当 T 接线路长度小于行波在一个采样间隔时间内所传输距离的一半时,可忽略故障行波经 T 节点后的衰减。文中方法通过建立故障行波传播衰减矩阵以实现不可测线路的识别,进而通过增配行波监测装置以达到消除测距盲区的目的。

实验结果表明,本文所提布点方法简单可行,可显著提高测距可靠性。此外,本文仅考虑幅值因素对行波装置的不可测影响,实际中,行波上升速度、采样频率、噪声等也是影响其测距效果的外在因素,如行波上升速度影响测距可行性和精度、采样频率和噪声影响测距精度等。后续应进一步研究上述因素的影响,以进一步完善测距装置的部署规划和测距精度。

参考文献

[1] 宋佳宇,高雪莲,陈哲煊.实复域多尺度多层次融合的复合故障定位方法[J].电子测量技术,2025,48(5): 118-127.
SONG J Y, GAO X L, CHEN ZH X. Compound fault location algorithm based on multi-scale and multi-layer feature fusion in real domain and complex

- domain[J]. Electronic Measurement Technology, 2025,48(5):118-127.
- [2] 张翼,刘富州,朱永利,等. 广域行波信息与图注意力网络相结合的输电网故障定位[J]. 仪器仪表学报,2022,43(6):140-150.
- ZHANG Y, LIU F ZH, ZHU Y L, et al. Fault location of transmission network combining Wide-area traveling wave information and graph attention network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(6):140-150.
- [3] 余昕越,杨凡,吕勃翰. 考虑暂态电流行波的高压输电线路非同步故障测距方法[J]. 国外电子测量技术, 2025,44(7):82-88.
- YU X Y, YANG F, LYU B H. Non synchronous fault location method for high-voltage transmission lines considering transient current traveling waves[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2025,44(7):82-88.
- [4] 王有鹏,曾祥君,刘丰,等. 基于行波全频带特征的配电网故障行波波头标定方法[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(1):171-180.
- WANG Y P, ZENG X J, LIU F, et al. Fault traveling wave head calibration method for a distribution network based on the full band characteristics of a traveling wave[J]. Power System Protection and Control,2025,53(1):171-180.
- [5] 刘金凯,梁永亮,郭宏,等. 脐带电缆故障电压行波相模分量特征分析及测距方法研究[J]. 供用电,2021,38(2):19-25.
- LIU J K, LIANG Y L, GUO H, et al. Characteristics analysis of traveling wave phase-mode component of umbilical cable fault voltage and study of fault distance measurement[J]. Distribution & Utilization, 2021,38(2):19-25.
- [6] 陈洪圳,王莉,徐昊,等. 基于信号分离的扩展频谱时域反射法盲区消除研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(9):280-289.
- CHEN H ZH, WANG L, XU H, et al. Research on blind spot elimination of spread spectrum time domain reflectometry based on signal separation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(9):280-289.
- [7] 董新洲,陈彬书,董启环,等. 应用分布式电压传感技术的配电线路行波故障测距[J]. 电网技术,2023,47(12):4837-4846.
- DONG X ZH, CHEN B SH, DONG Q H, et al. Traveling waves fault location of distribution lines based on distributed voltage sensing technology[J]. Power System Technology,2023,47(12):4837-4846.
- [8] 李练兵,孙腾达,曾四鸣,等. 基于多端行波时差的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(3):140-147.
- LI L B, SUN T D, ZENG S M, et al. Fault location method for distribution networks based on traveling wave time difference[J]. Power System Protection and Control,2022,50(3):140-147.
- [9] 梁睿,徐成,王飞,等. 复杂输电网中基于全网行波信息的测距装置最优配置[J]. 电工技术学报,2016,31(21):30-38.
- LIANG R, XU CH, WANG F, et al. Optimal deployment of fault location devices based on wide area travelling wave information in complex power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(21):30-38.
- [10] 李振兴,程宜兴,吴李群,等. 基于初始波头广域传输路径的行波定位单元优化配置[J]. 电力系统自动化,2017,41(18):60-66.
- LI ZH X, CHENG Y X, WU L Q, et al. Optimal placement of traveling wave fault location equipment based on wide area transmission path of initial wave head[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017,41(18):60-66.
- [11] 蒋素霞,邓丰,祖亚瑞,等. 基于全网故障可观测的配电网行波定位装置优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(20):25-35.
- JIANG S X, DENG F, ZU Y R, et al. Optimal configuration method of traveling wave fault location equipment in a distribution network based on fault observability of the whole network[J]. Power System Protection and Control, 2023,51(20):25-35.
- [12] 王浩宇,谭阳红,张海霞,等. 配电网行波定位优化配置新方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(9):22-28.
- WANG H Y, TAN Y H, ZHANG H X, et al. A new method for optimal configuration of traveling wave location in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2018,30(9):22-28.
- [13] 谢李为,李勇,罗隆福,等. 基于距离矩阵与分支系数的配电网故障定位方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(7):2180-2191,2397.
- XIE L W, LI Y, LUO L F, et al. Fault location method for distribution networks based on distance matrix and branch coefficient[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(7):2180-2191,2397.
- [14] 张璇,于洋,王敬华,等. 配电网行波测距装置布点研究[J]. 山东电力技术,2017,44(10):12-16.

- ZHANG X, YU Y, WANG J H, et al. Research on the layout of traveling wave distance measuring devices in distribution networks[J]. Shandong Electric Power, 2017, 44(10):12-16.
- [15] 胡明峰, 刘洋, 华斌. 量测装置优化配置下的分布式配电网故障定位方法[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2616-2622.
- HU M F, LIU Y, HUA B. Distributed fault location for distribution networks under optimal configuration of measuring devices[J]. Power System Technology, 2021, 45(7):2616-2622.
- [16] 吴佳享. 基于故障行波的多分支配电网故障定位研究[D]. 武汉:武汉大学, 2023.
- WU J X. Research on fault location of multi-branch distributed network based on fault traveling wave[D]. Wuhan:Wuhan University, 2023.
- [17] 邢毓华, 魏子薇. MFWVD 时频分析在时延估计中的研究与应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(2): 240-250.
- XING Y H, WEI Z W. Research and application of MFWVD time-frequency analysis in delay estimation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(2):240-250.
- [18] 王晓卫, 王雪, 王璐, 等. 基于矩阵变换与模态分析的电缆型配电网单相接地故障区段定位[J]. 电工技术学报, 2025, 40(15):4845-4859.
- WANG X W, WANG X, WANG L, et al. Single-phase grounding fault section location of the distribution cable networks based on matrix transformation and mode analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2035, 40(15):4845-4859.
- [19] 孙中玉, 徐丙垠, 王玮, 等. 电缆故障脉冲电流测距系统建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 142-147.
- SUN ZH Y, XU B Y, WANG W, et al. Modeling and simulation of cable fault location system based on pulse current [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4):142-147.
- [20] 于毅. 交叉互联电缆行波故障定位方法研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2021.
- YU Y. Traveling wave fault location algorithm for cross-bonded cable[D]. Zibo:Shandong University of Technology, 2021.
- [21] 张翠玲, 江雪晨, 宁一. 树型配电网单相接地故障行波测距的组合方法[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 166-172.
- ZHANG C L, JIANG X CH, NING Y. Combined method for traveling wave location of single phase grounding fault in tree type distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8):166-172.
- [22] 张恽宁, 陈可做, 罗易萍, 等. 基于暂态电流相关系数的混合多端高压直流输电线路保护[J]. 电力建设, 2021, 42(5):113-121.
- ZHANG Y N, CHEN K AO, LUO Y P, et al. Hybrid multi-terminal HVDC transmission line protection based on transient current correlation coefficient [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(5):113-121.
- [23] 袁发庭, 李昊樾, 李胡强, 等. 基于 SSA-BP 和 ICEEMDAN-NTEO 算法的电缆故障识别及精确定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2026, 41(2):127-144.
- YUAN F T, LI H Y, LI H Q, et al. Cable fault identification and precise location method based on SSA-BP and ICEEMDAN-NTEO algorithms [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(2):127-144.
- [24] 常仲学, 闫吉飞, 张志华, 等. 利用磁环构造配电线路边界的单端量全线速动保护(2): 基于电压行波峰值时间的保护原理 [J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1864-1875.
- CHANG ZH X, YAN J F, ZHANG ZH H, et al. Single-ended whole-line high-speed protection by using magnetic ring as distribution line boundary (2): Protection principle based on peak time of voltage travelling wave[J]. Power System Technology, 2023, 47(5):1864-1875.
- [25] 乔文, 师琛, 李舟, 等. 基于行波折反射特征和网络拓扑的配电网单相接地故障定位方法[J]. 供用电, 2022, 39(1):65-73.
- QIAO W, SHI CH, LI ZH, et al. Single-phase ground fault location method of distribution network based on traveling wave refraction and reflection characteristics and network topology [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(1):65-73.
- [26] 姜博, 董新洲, 施慎行. 配电网单相接地故障选线典型方法实验研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 67-74.
- JIANG B, DONG X ZH, SHI SH X. Experimental research on typical single-phase grounding line selection methods of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11):67-74.
- [27] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15):4399-4409, 4640.
- DENG F, LI X R, ZENG X J, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave

time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(15):4399-4409,4640.

[28] 孙胜兰,任旭虎,葛文博,等. 基于差异增强的电缆微弱缺陷诊断方法研究[J]. 电子测量技术, 2025,48(21): 98-107.

SUN SH L, REN X H, GE W B, et al. Research on the diagnosis method of weak defects in cables based on difference enhancement[J]. Electronic Measurement Technology,2025,48(21):98-107.

[29] 束洪春,刘鑫,张青瑞. 基于电子式电压互感器的行波测距技术[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(4): 367-372.

SHU H CH, LIU X, ZHANG Q R. Traveling wave fault location technology based on electronic voltage transformer[J]. Journal of Shenyang University of Technology,2016,38(4):367-372.

[30] 俞小彤,赵若辰,宁晓琳. 多通道权重融合和小波分解的癫痫棘波检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2024, 38(10):24-34.

YU X T, ZHAO R CH, NING X L. Multichannel weight fusion and wavelet decomposition method for detecting epileptic spines[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10): 24-34.

作者简介

韩浩然,硕士研究生,主要研究方向为配电网故障行波测距。
E-mail:1293608943@qq.com

王伟(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为配电网故障检测。
E-mail:wwsdut@163.com