

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.226430

# 一种基于故障支路判定和迭代计算的单回 T 型输电线路故障测距新方法

陈晓龙<sup>1</sup>, 余联课<sup>1</sup>, 裴东锋<sup>2</sup>, 袁 姝<sup>1</sup>, 薛曙光<sup>2</sup>, 姜艳丰<sup>2</sup>, 李书旺<sup>2</sup>

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;  
2. 国网河北省电力有限公司邯郸供电分公司, 河北 邯郸 056000)

**摘要:** 针对单回 T 型输电线路, 根据其在故障情况下的正序网络提出了一种基于集中参数模型的故障测距新方法。该方法包括故障支路判定和故障测距两部分。在故障支路判定阶段, 为简化故障支路判定函数, 在不考虑线路对地电容作用的情况下, 推导并设计了故障支路判定函数, 根据该函数在各支路首末端函数值是否异号的特征, 即可实现故障支路判定。另外, 为保证支路首端附近和 T 节点附近发生故障时故障支路判定的准确性, 给出了故障支路判据。在故障测距阶段, 为保证测距精度, 计及了输电线路对地电容作用, 给出了基于正序分量和正序故障分量的故障距离解析表达式, 根据该表达式只需数次迭代即可求解出故障距离。所提方法适用于各种故障类型, 在 T 节点附近发生高阻故障时故障支路判别不存在死区, 且计算量小、易于编程实现。理论分析和仿真测试表明, 该方法的有效性和准确性不受故障位置、过渡电阻以及 T 接位置等因素的影响。

**关键词:** T 型输电线路; 故障支路判定; 故障测距; 迭代计算

## A new fault location method for single-circuit three-terminal transmission lines based on fault branch determination and iterative calculation

CHEN Xiaolong<sup>1</sup>, YU Lianke<sup>1</sup>, PEI Dongfeng<sup>2</sup>, YUAN Shu<sup>1</sup>, XUE Shuguang<sup>2</sup>, JIANG Yanfeng<sup>2</sup>, LI Shuwang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China;  
2. Handan Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Handan 056000, China)

**Abstract:** From the positive-sequence network, a new fault location method based on a lumped parameter model is proposed for single-circuit three-terminal transmission lines. This method includes two stages, including fault branch determination and fault position calculation. At the fault branch determination stage, the fault branch determination function is deduced and designed without considering the line-to-ground capacitance – this to simplify this function. From the opposite signs between the function values at both ends of each branch, the fault branch can be determined. In addition, to ensure the accuracy of fault branch determination when faults occur near the branch head-end and T-node, the fault branch criterion is also given. At the fault position calculation stage, the effect of the line-to-ground capacitance is considered to ensure the accuracy of the calculation. Then, an analytical expression of fault distance is given based on positive-sequence component and positive-sequence fault component. Based on this expression, the fault distance can be solved by only several iterations. The proposed method is applicable to various types of faults, and it is suitable for high-resistance faults near the T-node without dead zone. Moreover, the method has low computational overhead, which makes it easy for programming. Theoretical analysis and simulation tests show that the effectiveness and accuracy of the proposed method are not affected by fault location, transition resistance or T-junction position.

This work is supported by the Joint Project of Commission of National Natural Science Foundation of China-Smart Grid of State Grid Corporation of China (No. U2066210).

**Key words:** three-terminal transmission lines; fault branch determination; fault location; iterative computation

**基金项目:** 国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金项目资助(U2066210); 国网河北省电力有限公司科技项目资助-高压输电线路故障先兆诊断与智慧处置技术研究(kj2021-042)

## 0 引言

随着我国电力系统的不断发展, T 型输电线路凭借输电走廊窄、建设周期短、占地面积小以及设备投资低等优势, 越来越多地出现在高电压等级输电网中。然而, T 型输电线路具有传输功率大、电力负荷重的特点, 当其发生故障时, T 型结构的存在导致故障位置不易确定<sup>[1-4]</sup>。因此, 亟需快速、准确的 T 型输电线路故障定位方法, 以便及时清除故障、缩短故障恢复时间、提高供电可靠性<sup>[5-8]</sup>。

根据所采用的原理不同, 针对 T 型输电线路的故障测距方法可分为行波测距法<sup>[9-12]</sup>和故障分析测距法<sup>[13-16]</sup>。行波测距法通过捕捉故障点产生的暂态行波信号, 并利用其包含的故障特征实现故障测距。但该类方法存在故障行波波头识别困难等问题, 且需要额外配置 GPS 系统和专门的高速采样设备, 硬件成本较大<sup>[17-20]</sup>。故障分析测距法则通过对线路模型分析与推导来构造故障测距函数, 进而基于各端电气量测数据实现故障定位。相比于行波测距法, 故障分析测距法对硬件设备的要求较低, 所需成本较少, 因此更加广泛地应用于实际工程中。

T 型输电线路含有三段支路, 这种结构上的特殊性, 使其故障分析测距法可分为基于故障支路判定的故障测距方法和无需预先进行故障支路判定的故障测距方法。基于故障支路判定的故障测距方法在故障测距之前, 先进行故障支路判定, 再利用双端测距方法实现故障位置的定位。基于  $\pi$  型等值线路模型, 文献<sup>[13-14]</sup>利用 T 节点的计算电压值判断故障支路。在此基础上, 文献<sup>[13]</sup>针对故障支路构造一元二次方程求解故障距离, 文献<sup>[14]</sup>则通过构造测距方程, 采用一维搜索算法确定故障位置。基于分布参数模型, 文献<sup>[15]</sup>考虑各端数据的非同步性, 根据 T 节点的正序电压构造故障支路判据, 并针对对称故障和不对称故障分别推导故障测距方程, 在辨别伪根后得到测距结果。无需预先故障支路判定的故障测距方法通过构造故障测距函数, 分别对三段支路进行分析, 判断所得结果是否符合故障点对应的性质, 进而筛选出故障测距结果。文献<sup>[21]</sup>利用过渡电阻的纯电阻性质, 分析并构造不同故障类型下的 T 型线路的故障测距方程, 通过对三段支路遍历搜索来确定故障支路及故障位置。文献<sup>[22-23]</sup>则根据故障点两侧故障测距函数相位发生突变的性质, 对每条支路进行搜索计算, 确定故障位置。

然而, 现有方法存在以下问题: 1) 当 T 节点附近发生高阻短路故障时, 故障支路判别存在判别死区; 2) 故障支路判别或故障测距时, 需要在全线范

围内搜索, 降低了故障定位速度; 3) 测距方程的数值求解需要进行伪根判别等。

针对现有方法存在的问题, 本文提出了一种基于故障支路判定和迭代计算的单回 T 型输电线路故障测距新方法。该方法采用集中参数模型进行建模, 分两个阶段实现故障定位: 1) 在故障支路判定阶段, 仅考虑线路阻抗作用, 推导并设计了故障支路判定函数, 且为保证线路首端附近和 T 节点附近故障时故障支路判定的准确性, 提出了故障支路选取判据; 2) 在故障测距阶段, 考虑线路对地电容的影响, 基于  $\pi$  型等值电路将非故障支路合并, 使 T 型线路的三端测距问题转变为双端测距问题, 并基于正序分量和正序故障分量, 推导故障支路的故障距离解析表达式, 通过少量迭代计算即可实现准确故障定位。

## 1 故障支路判定方法

### 1.1 故障支路判定函数推导与设计

T 型输电线路拓扑结构如图 1 所示。其中, MT 支路、NT 支路、PT 支路的线路长度分别设为  $L_M$ 、 $L_N$ 、 $L_P$ ;  $\dot{U}_{M1}$ 、 $\dot{U}_{N1}$ 、 $\dot{U}_{P1}$  分别为 M、N、P 端母线的正序电压;  $\dot{I}_{M1}$ 、 $\dot{I}_{N1}$ 、 $\dot{I}_{P1}$  分别为 M、N、P 端母线流向线路的正序电流;  $Z_1$  为输电线路单位长度阻抗。

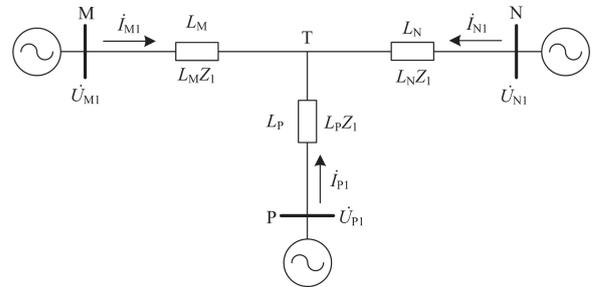


图 1 单回 T 型输电线路拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of single-circuit T-shaped lines

在正常运行情况下, 相电压与相电流即为各端正序电压和正序电流。利用 M、N、P 三端正序电气量能够分别推算出 T 节点的正序电压  $\dot{U}_{MT1}$ 、 $\dot{U}_{NT1}$ 、 $\dot{U}_{PT1}$ , 如式(1)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_{MT1} = \dot{U}_{M1} - \dot{I}_{M1} L_M Z_1 \\ \dot{U}_{NT1} = \dot{U}_{N1} - \dot{I}_{N1} L_N Z_1 \\ \dot{U}_{PT1} = \dot{U}_{P1} - \dot{I}_{P1} L_P Z_1 \end{cases} \quad (1)$$

由于采用的电气量符号较多, 现对符号的命名规则做简要介绍。 $\dot{U}_{MT1}$ 、 $\dot{U}_{NT1}$ 、 $\dot{U}_{PT1}$  表示由 M、N、P 端电气量分别推算得到的 T 节点正序电压;  $\dot{U}_{TM1}$

表示综合利用由 N 端、P 端电气量推算得到的 T 节点正序电压, 用于 MT 支路的分析与计算。

为使所提故障支路判定方法和测距方法适用于不同故障类型, 根据单回 T 型输电线路的正序网络展开分析。图 2 为 MT 支路发生故障时的单回 T 型输电线路正序网络等效图。其中,  $\dot{I}_{TM1}$ 、 $\dot{I}_{TN1}$ 、 $\dot{I}_{TP1}$  分别为 T 节点流入三条支路的正序电流,  $\dot{U}_{f1}$  为故障点正序电压,  $\dot{I}_{f1}$  为故障点对地正序电流;  $x$  为故障点 f 距离 M 端的长度。

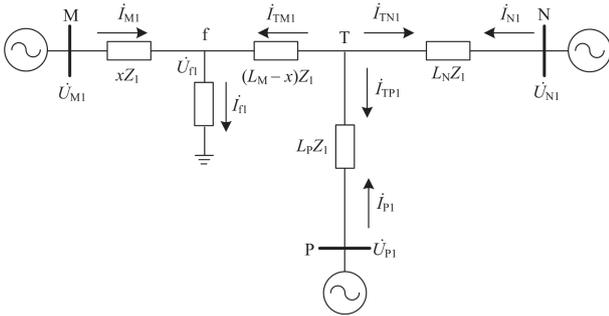


图 2 单回 T 型输电线路正序网络等效图

Fig. 2 Positive sequence equivalent network of single circuit T-shaped lines

针对故障点位于 MT 支路的情况, 分别推导和设计故障支路和非故障支路的判定函数, 实现对故障支路和非故障支路的区分。

### 1) 故障支路上的判定函数

对故障支路 MT 进行分析时, MT 支路的 T 端正序电压  $\dot{U}_{TM1}$  和正序电流  $\dot{I}_{TM1}$ , 可由 NT 支路和 PT 支路的 T 端正序电压均值和正序电流之和表示。由于 NT 支路与 PT 支路不存在故障点, 因此这两个支路的 T 端正序电压仍满足式(1), T 端正序电流为 N 端和 P 端正序电流之和, 可得

$$\begin{cases} \dot{U}_{TM1} = (\dot{U}_{NT1} + \dot{U}_{PT1})/2 \\ \dot{I}_{TM1} = \dot{I}_{N1} + \dot{I}_{P1} \end{cases} \quad (2)$$

MT 支路的正序网络等值电路如图 3 所示, 并设 k 点为 MT 支路上任意一点。在 MT 支路上, 以故障点 f 为分界点, 对 Mf 和 fT 两段线路分别加以分析, 推导故障支路 MT 支路的判定函数。

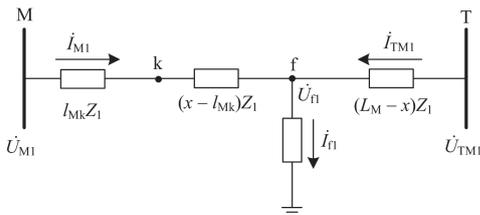


图 3 故障支路的正序网络

Fig. 3 Positive sequence network of fault branch

当 k 位于 Mf 支路时, 其正序电压  $\dot{U}_{Mk1}$  可分别由 M 端和 T 端的正序电气量表示, 如式(3)所示。

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Mk1} = \dot{U}_{M1} - \dot{I}_{M1}l_{Mk}Z_1 = [\dot{U}_{TM1} - \dot{I}_{TM1}(L_M - x)Z_1] - \\ (\dot{I}_{TM1} - \dot{I}_{f1})(x - l_{Mk})Z_1 \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $l_{Mk}$  表示 k 点距离 M 端的线路长度, 此时  $0 \leq l_{Mk} < x$ ; 故障点对地正序电流  $\dot{I}_{f1}$  则满足式(4)。

$$\dot{I}_{f1} = \dot{I}_{M1} + \dot{I}_{TM1} \quad (4)$$

式(3)化简后可得

$$x - l_{Mk} = \frac{(\dot{U}_{M1} - \dot{I}_{M1}l_{Mk}Z_1) - [\dot{U}_{TM1} - \dot{I}_{TM1}(L_M - l_{Mk})Z_1]}{\dot{I}_{f1}Z_1} \quad (5)$$

当 k 位于 fT 支路时, 即满足  $x < l_{Mk} \leq L_M$  时,

其正序电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Mk1} = (\dot{U}_{M1} - \dot{I}_{M1}xZ_1) - (\dot{I}_{M1} - \dot{I}_{f1})(l_{Mk} - x)Z_1 = \\ \dot{U}_{TM1} - \dot{I}_{TM1}(L_M - l_{Mk})Z_1 \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)化简后亦可得到式(5)。

因此, 无论 k 点位于故障点的左侧还是右侧, 均具有完全相同的判定函数, 可统一用式(7)表示。

$$f_{M-T}(l_{Mk}) = \frac{(\dot{U}_{M1} - \dot{I}_{M1}l_{Mk}Z_1) - [\dot{U}_{TM1} - \dot{I}_{TM1}(L_M - l_{Mk})Z_1]}{\dot{I}_{f1}Z_1} = x - l_{Mk} \quad (7)$$

对式(7)进行分析可知: 由于故障点位于 MT 支路, 当  $0 \leq l_{Mk} < x$  时,  $f_{M-T}(l_{Mk}) > 0$ ; 当  $x < l_{Mk} \leq L_M$  时,  $f_{M-T}(l_{Mk}) < 0$ ; 当且仅当  $l_{Mk} = x$  时,  $f_{M-T}(l_{Mk}) = 0$ 。因此, 判定函数具备在故障支路 MT 首末端函数值异号的性质。同时, 根据式(1)、式(2)和式(4)可知, 判定函数所需电气量均为量测量, 因此利用三端量测数据和所选定的  $l_{Mk}$  值即可实现 MT 支路首末端函数值的计算。

### 2) 非故障支路上的判定函数

由于 T 型线路具有对称性, 因此仅对非故障支路 NT 进行分析, 另一非故障支路 PT 具备相同性质。

对 NT 支路进行分析时, 其 T 端的正序电压和正序电流利用另外两段支路的 T 端正序电压和正序电流来表示。但是, 由于故障点位于 MT 支路, 因此 MT 支路的 T 端正序电压已不再满足式(1), 正序电流也不再等于 M 端正序电流。此时, 由 M 端推算得到的 T 端正序电压  $\dot{U}'_{MT1}$  和正序电流  $\dot{I}'_{MT1}$  分别为

$$\begin{cases} \dot{U}'_{MT1} = \dot{U}_{M1} - \dot{I}_{M1}L_M Z_1 + \dot{I}_{f1}(L_M - x)Z_1 \\ \dot{I}'_{MT1} = \dot{I}_{M1} - \dot{I}_{f1} \end{cases} \quad (8)$$

将此时 NT 支路的 T 端正序电压和正序电流记作  $\dot{U}'_{\text{TNI}}$  和  $\dot{I}'_{\text{TNI}}$ ，则可分别取为

$$\begin{cases} \dot{U}'_{\text{TNI}} = 0.5(\dot{U}'_{\text{MTI}} + \dot{U}'_{\text{PTI}}) \\ \dot{I}'_{\text{TNI}} = \dot{I}'_{\text{MTI}} + \dot{I}'_{\text{PTI}} \end{cases} \quad (9)$$

对照式(2)，为保证后续的非故障支路的判定函数推导结果与故障支路的判定函数式(7)具有完全相同的形式，定义变量  $\dot{U}_{\text{TNI}}$  和  $\dot{I}_{\text{TNI}}$ ，并满足式(10)。

$$\begin{cases} \dot{U}_{\text{TNI}} = 0.5(\dot{U}_{\text{MTI}} + \dot{U}_{\text{PTI}}) \\ \dot{I}_{\text{TNI}} = \dot{I}_{\text{MTI}} + \dot{I}_{\text{PTI}} \end{cases} \quad (10)$$

将式(1)、式(8)和式(10)代入式(9)可得

$$\begin{cases} \dot{U}'_{\text{TNI}} = \dot{U}_{\text{TNI}} + 0.5\dot{I}_{\text{fI}}(L_{\text{M}} - x)Z_1 \\ \dot{I}'_{\text{TNI}} = \dot{I}_{\text{TNI}} - \dot{I}_{\text{fI}} \end{cases} \quad (11)$$

NT 支路的正序网络等值电路如图 4 所示，设 k 点为 NT 支路上任意一点，推导 NT 支路的判定函数。

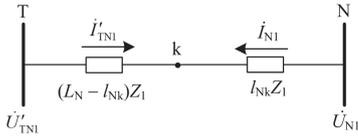


图 4 非故障支路的正序网络

Fig. 4 Positive sequence network of non-fault branch

k 点的正序电压  $\dot{U}_{\text{NkI}}$  为

$$\dot{U}_{\text{NkI}} = \dot{U}_{\text{NI}} - \dot{I}_{\text{NI}}l_{\text{Nk}}Z_1 = \dot{U}'_{\text{TNI}} - \dot{I}'_{\text{TNI}}(L_{\text{N}} - l_{\text{Nk}})Z_1 \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)中，化简可得 NT 支路的判定函数为

$$f_{\text{N-T}}(l_{\text{Nk}}) = \frac{(\dot{U}_{\text{NI}} - \dot{I}_{\text{NI}}l_{\text{Nk}}Z_1) - [\dot{U}'_{\text{TNI}} - \dot{I}'_{\text{TNI}}(L_{\text{N}} - l_{\text{Nk}})Z_1]}{\dot{I}_{\text{fI}}Z_1} = \frac{0.5(L_{\text{M}} - x) + L_{\text{N}} - l_{\text{Nk}}}{0.5(L_{\text{M}} - x) + L_{\text{N}} - l_{\text{Nk}}} \quad (13)$$

对式(13)进行分析可知：由于故障点位于 MT 支路，当  $0 \leq l_{\text{Nk}} \leq L_{\text{N}}$  时， $L_{\text{N}} - l_{\text{Nk}} \geq 0$ ，并且  $0.5(L_{\text{M}} - x) > 0$ ，故  $f_{\text{N-T}}(l_{\text{Nk}}) > 0$  恒成立。因此，对于非故障支路 NT，判定函数具有首末端对应函数值同号的性质。根据式(1)、式(4)和式(10)可知，式(13)所需电气量也为三端量测量。

同理可推导 PT 支路的判定函数为

$$f_{\text{P-T}}(l_{\text{Pk}}) = \frac{(\dot{U}_{\text{PI}} - \dot{I}_{\text{PI}}l_{\text{Pk}}Z_1) - [\dot{U}'_{\text{PTI}} - \dot{I}'_{\text{PTI}}(L_{\text{P}} - l_{\text{Pk}})Z_1]}{\dot{I}_{\text{fI}}Z_1} = \frac{0.5(L_{\text{M}} - x) + L_{\text{P}} - l_{\text{Pk}}}{0.5(L_{\text{M}} - x) + L_{\text{P}} - l_{\text{Pk}}} \quad (14)$$

由于故障点位于 MT 支路，当  $0 \leq l_{\text{Pk}} \leq L_{\text{P}}$  时， $f_{\text{P-T}}(l_{\text{Pk}}) > 0$  成立。因此，对于非故障支路 PT，判定函数同样具有首末端对应函数值同号的性质，而且式(14)所需电气量也为三端量测量。

综合式(7)、式(13)和式(14)可知，当故障点位于 MT 支路时，三段支路的判定函数具有完全一致的形式，便于对故障支路和非故障支路的判定，而且采用的电气量均为三端量测量，能够应用于实际工程中。另外，该判定函数具备如下性质：1) 当故障点不位于故障支路两端时，故障支路首末端对应的判定函数值异号；2) 当故障点不位于 T 节点时，非故障支路首末端对应的判定函数值同号；3) 当 M、N 或 P 端点处出现故障时，对应故障支路首端的判定函数值为 0；4) 当 T 节点出现故障时，三个支路判定函数在本段线路末端处的函数值均为 0。结合三端量测量数据以及判定函数的性质，能够实现故障支路和非故障支路的判定。

## 1.2 故障支路识别判据

T 节点附近出现故障是故障支路判定的难点，而且，上述推导过程未考虑线路对地电容作用，可能对支路首端附近和 T 节点附近发生故障时的故障支路判定结果产生影响。因此，为保证故障支路判定结果的准确性，在 1.1 节分析的基础上，针对故障点位于故障支路不同区域时，对判定函数在支路首末端对应的函数值特性作进一步梳理，提出故障支路识别判据。仍以故障点位于 MT 支路展开分析。另外，将距离支路首端  $\gamma L_i$  和距离 T 节点  $\rho L_i$  长度范围，分别定义为支路首端附近和 T 节点附近， $i = \text{M、N、P}$ 。根据下述判据可知，当  $\gamma$  和  $\rho$  的取值较大时，能够有效保证故障支路判别的可靠性，但  $\rho$  值较大将会增加计算量和耗用时长，进而牺牲一定的快速性。因此，可根据实际需求选取  $\gamma$  和  $\rho$  的大小，本文  $\gamma$  和  $\rho$  取为 3%。

### 1) 故障点位于支路首端附近

当故障点位于 MT 支路首端附近时，三段支路首端对应的判定函数值满足： $-\gamma L_i < f_{\text{M-T}}(0) < \gamma L_i$ ， $f_{\text{N-T}}(0) > L_{\text{N}}$ ， $f_{\text{P-T}}(0) > L_{\text{P}}$ 。其中，负值的选取是考虑了线路对地电容以及量测数据误差的影响，这可能导致当故障点非常靠近支路首端时  $f_{\text{M-T}}(0)$  的结果出现误差，成为一个接近 0 的负数。因此，提出故障点位于支路首端附近的判据为

$$\begin{cases} G_{\text{M}} = \{-\gamma L_{\text{M}} < f_{\text{M-T}}(0) < \gamma L_{\text{M}}\} \& \\ \quad \{f_{\text{N-T}}(0) > L_{\text{N}}\} \& \{f_{\text{P-T}}(0) > L_{\text{P}}\} \\ G_{\text{N}} = \{-\gamma L_{\text{N}} < f_{\text{N-T}}(0) < \gamma L_{\text{N}}\} \& \\ \quad \{f_{\text{M-T}}(0) > L_{\text{M}}\} \& \{f_{\text{P-T}}(0) > L_{\text{P}}\} \\ G_{\text{P}} = \{-\gamma L_{\text{P}} < f_{\text{P-T}}(0) < \gamma L_{\text{P}}\} \& \\ \quad \{f_{\text{M-T}}(0) > L_{\text{M}}\} \& \{f_{\text{N-T}}(0) > L_{\text{N}}\} \end{cases} \quad (15)$$

当  $G_i = 1$  时，则判定故障点位于  $i$ -T 支路的首端附近，即故障点位于  $i$ -T 支路。

## 2) 故障点位于 T 节点附近

当故障点位于 MT 支路 T 节点附近时, 三段支路末端对应的判定函数值满足:  $-\rho L_M < f_{M-T}(L_M) < \rho L_M$ ,  $-\rho L_N < f_{N-T}(L_N) < \rho L_N$ ,  $-\rho L_P < f_{P-T}(L_P) < \rho L_P$ , 将判断范围设置在  $\pm \rho L_i$  之间, 同样是考虑了线路对地电容以及量测数据误差的影响。因此, 提出故障点位于 T 节点附近的判据为

$$D = D_M \& D_N \& D_P \quad (16)$$

其中

$$D_i = \begin{cases} 1, & -\rho L_i < f_{i-T}(L_i) < \rho L_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

当  $D=1$  时, 则判定故障点位于 T 节点附近, 需要利用第 2 节所提故障测距方法, 进一步对三段支路作故障测距计算, 以便获得准确的故障支路判别结果和故障位置。

## 3) 故障点位于支路其他位置

当故障点位于除上述两种情况以外的支路上其他位置时, 根据故障支路首末端对应的判定函数值异号、非故障支路首末端对应的判定函数值同号这两条性质进行故障支路判别, 可得判据为

$$C_i = \{f_{i-T}(0) > \gamma L_i\} \& \{f_{i-T}(L_i) < -\rho L_i\} \quad (17)$$

当  $C_i=1$  时, 判定故障点位于  $i-T$  支路上, 即  $i-T$  支路为故障支路。

综上, 由式(15)一式(17)所构成的故障支路识别判据覆盖了 T 接线路所有故障位置, 能够准确实现故障支路判定。

## 2 故障测距方法

### 2.1 故障测距基本原理

在故障支路判定之后, 可将三端线路测距问题转化为两端线路测距问题, 仍按照故障点位于 MT 支路的情况进行分析。

当对输电线路进行故障测距时, 如果不考虑线路对地电容的作用, 将对故障测距精度造成影响, 故采用  $\pi$  型等值电路作为线路模型来设计故障测距方法。由于故障支路已被准确判断出来, 因此基于非故障支路的  $\pi$  型等效电路, 可计算得到 T 节点的正序电压和正序电流。

以非故障支路 NT 支路为例, 其  $\pi$  型等值电路如图 5 所示, 根据基尔霍夫电压和电流定律可得

$$\begin{cases} \dot{I}_{Nd1} = j0.5L_N B_{N1} \dot{U}_{N1} \\ \dot{I}_{NT01} = \dot{I}_{N1} - \dot{I}_{Nd1} \\ \dot{U}_{N-T1} = \dot{U}_{N1} - \dot{I}_{NT01} L_N Z_1 \\ \dot{I}_{NTd1} = j0.5L_N B_{N1} \dot{U}_{N-T1} \\ \dot{I}_{N-T1} = \dot{I}_{NT01} - \dot{I}_{NTd1} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\dot{U}_{N-T1}$ 、 $\dot{I}_{N-T1}$  表示在  $\pi$  型等值电路中由 N 端电气量计算出的 T 端正序电压、正序电流;  $\dot{I}_{Nd1}$ 、 $\dot{I}_{NTd1}$  分别表示 NT 支路上 N 端和 T 端的对地正序电容电流;  $\dot{I}_{NT01}$  表示流过线路阻抗的正序电流;  $B_{N1}$  表示线路单位长度的正序对地导纳。PT 支路计算时, 各电气量的命名规则相同。

综上, NT 支路上 T 端正序电压  $\dot{U}_{N-T1}$  和正序电流  $\dot{I}_{N-T1}$  分别为

$$\begin{cases} \dot{U}_{N-T1} = \dot{U}_{N1} - (\dot{I}_{N1} - j0.5L_N B_{N1} \dot{U}_{N1}) L_N Z_1 \\ \dot{I}_{N-T1} = \dot{I}_{N1} - j0.5L_N B_{N1} \dot{U}_{N1} - j0.5L_N B_{N1} \dot{U}_{N-T1} \end{cases} \quad (19)$$

同理, 可推导出 PT 支路上 T 端正序电压  $\dot{U}_{P-T1}$  和正序电流  $\dot{I}_{P-T1}$  分别为

$$\begin{cases} \dot{U}_{P-T1} = \dot{U}_{P1} - (\dot{I}_{P1} - j0.5L_P B_{P1} \dot{U}_{P1}) L_P Z_1 \\ \dot{I}_{P-T1} = \dot{I}_{P1} - j0.5L_P B_{P1} \dot{U}_{P1} - j0.5L_P B_{P1} \dot{U}_{P-T1} \end{cases} \quad (20)$$

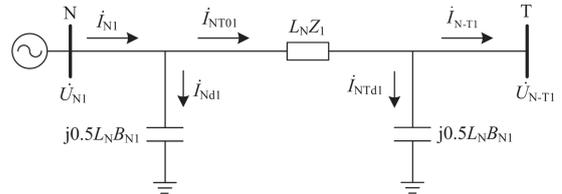


图 5 非故障支路的  $\pi$  型等值电路

Fig. 5  $\pi$ -type equivalent circuit of non-fault branch

另外, 非故障支路 NT 支路的正序故障分量网络如图 6 所示。

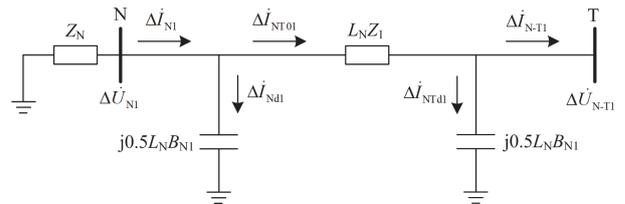


图 6 非故障支路正序故障分量网络

Fig. 6 Positive sequence fault component network of non-fault branch

对正序故障分量网络的分析与前述内容类似, 故 NT 支路和 PT 支路的 T 端正序故障分量分别为

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_{N-T1} = \Delta \dot{U}_{N1} - (\Delta \dot{I}_{N1} - j0.5L_N B_{N1} \Delta \dot{U}_{N1}) L_N Z_1 \\ \Delta \dot{I}_{N-T1} = \Delta \dot{I}_{N1} - j0.5L_N B_{N1} \Delta \dot{U}_{N1} - j0.5L_N B_{N1} \Delta \dot{U}_{N-T1} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_{P-T1} = \Delta \dot{U}_{P1} - (\Delta \dot{I}_{P1} - j0.5L_P B_{P1} \Delta \dot{U}_{P1}) L_P Z_1 \\ \Delta \dot{I}_{P-T1} = \Delta \dot{I}_{P1} - j0.5L_P B_{P1} \Delta \dot{U}_{P1} - j0.5L_P B_{P1} \Delta \dot{U}_{P-T1} \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $\Delta \dot{U}_{N-T1}$ 、 $\Delta \dot{I}_{N-T1}$ 、 $\Delta \dot{U}_{P-T1}$ 、 $\Delta \dot{I}_{P-T1}$  分别表示由 NT 支路和 PT 支路计算出的 T 端正序电压故障分

量、正序电流故障分量： $\Delta \dot{U}_{N1}$ 、 $\Delta \dot{I}_{N1}$ 、 $\Delta \dot{U}_{P1}$ 、 $\Delta \dot{I}_{P1}$  分别表示 N 端和 P 端的正序电压故障分量和正序电流故障分量。

对 MT 支路进行故障测距时，其 T 端的正序分量和正序故障分量可由 NT 支路和 PT 支路的 T 端正序分量和正序故障分量求取均值得到，如式(23)、式(24)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_{T-M1} = 0.5(\dot{U}_{N-T1} + \dot{U}_{P-T1}) \\ \dot{I}_{T-M1} = \dot{I}_{N-T1} + \dot{I}_{P-T1} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_{T-M1} = 0.5(\Delta \dot{U}_{N-T1} + \Delta \dot{U}_{P-T1}) \\ \Delta \dot{I}_{T-M1} = \Delta \dot{I}_{N-T1} + \Delta \dot{I}_{P-T1} \end{cases} \quad (24)$$

式中： $\dot{U}_{T-M1}$ 、 $\dot{I}_{T-M1}$  表示 MT 支路上 T 端的正序电压和正序电流； $\Delta \dot{U}_{T-M1}$ 、 $\Delta \dot{I}_{T-M1}$  表示 MT 支路上 T 端的正序电压故障分量和正序电流故障分量。

在故障测距之前，由于故障点位置未知，故障点两侧支路难以直接应用  $\pi$  型等值电路。因此，在初次故障测距时，先不考虑对地电容的作用，通过测距计算，获得初次故障测距结果  $x_M^{(0)}$ 。MT 支路故障测距过程中使用的正序网络如图 7 所示。

在初次故障测距时，根据图 7(a)和图 7(b)，利用 M 端和 T 端正序分量和正序故障分量，计算故障点 f 处的正序电压  $\dot{U}_{Mf1}$  和正序电压故障分量  $\Delta \dot{U}_{Mf1}$  为

$$\begin{cases} \dot{U}_{Mf1} = \dot{U}_{M1} - \dot{I}_{M1} x_M^{(0)} Z_1 = \\ \dot{U}_{T-M1} - \dot{I}_{T-M1} (L_M - x_M^{(0)}) Z_1 \\ \Delta \dot{U}_{Mf1} = \Delta \dot{U}_{M1} - \Delta \dot{I}_{M1} x_M^{(0)} Z_1 = \\ \Delta \dot{U}_{T-M1} - \Delta \dot{I}_{T-M1} (L_M - x_M^{(0)}) Z_1 \end{cases} \quad (25)$$

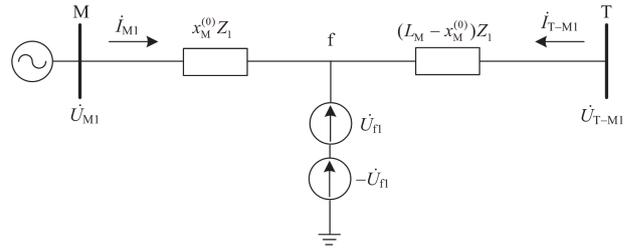
将式(25)中的两式化简并相除，可得初次故障测距结果为

$$x_M^{(0)} = \frac{A_1^{(0)} - A_2^{(0)}}{A_3^{(0)} - A_4^{(0)}} \quad (26)$$

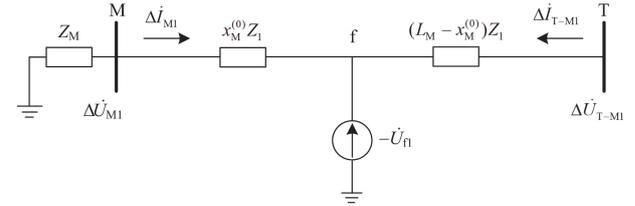
其中

$$\begin{cases} A_1^{(0)} = (\dot{U}_{M1} - \dot{U}_{T-M1}) \dot{I}_{T-M1} L_M \\ A_2^{(0)} = (\Delta \dot{U}_{M1} - \Delta \dot{U}_{T-M1}) \dot{I}_{T-M1} L_M \\ A_3^{(0)} = (\dot{U}_{M1} - \dot{U}_{T-M1}) (\Delta \dot{I}_{M1} + \Delta \dot{I}_{T-M1}) \\ A_4^{(0)} = (\Delta \dot{U}_{M1} - \Delta \dot{U}_{T-M1}) (\dot{I}_{M1} + \dot{I}_{T-M1}) \end{cases}$$

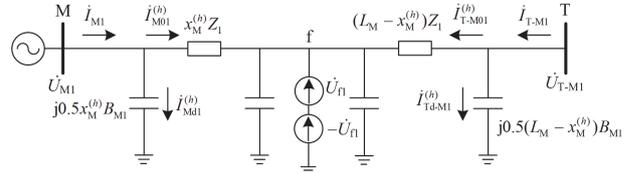
根据初次故障测距结果，考虑故障点两侧支路对地电容的作用，得到故障支路正序网络和正序故障分量网络分别如图 7(c)和图 7(d)所示，从而进行迭代测距。假设进行第  $h$  次( $h \geq 1$ )迭代，首先计算 M 端和 T 端的对地电容电流正序分量和正序故障分量如式(27)。



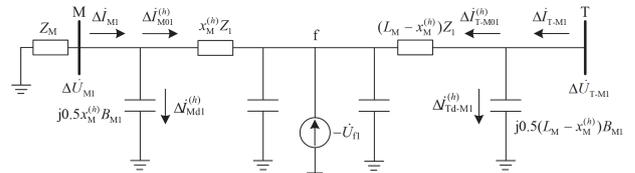
(a) 初次测距时故障支路正序网络



(b) 初次测距时故障支路正序故障分量网络



(c) 迭代测距时故障支路正序网络



(d) 迭代测距时故障支路正序故障分量网络

图 7 故障支路测距过程的正序网络

Fig. 7 Positive sequence network for fault branch location process

$$\begin{cases} \dot{I}_{Mdl}^{(h)} = j0.5 x_M^{(h-1)} B_{M1} \dot{U}_{M1} \\ \dot{I}_{Td-M1}^{(h)} = j0.5 (L_M - x_M^{(h-1)}) B_{M1} \dot{U}_{T-M1} \\ \Delta \dot{I}_{Mdl}^{(h)} = j0.5 x_M^{(h-1)} B_{M1} \Delta \dot{U}_{M1} \\ \Delta \dot{I}_{Td-M1}^{(h)} = j0.5 (L_M - x_M^{(h-1)}) B_{M1} \Delta \dot{U}_{T-M1} \end{cases} \quad (27)$$

式中： $\dot{I}_{Mdl}^{(h)}$ 、 $\dot{I}_{Td-M1}^{(h)}$  分别表示第  $h$  次迭代时 M 端和 T 端正序对地电容电流； $\Delta \dot{I}_{Mdl}^{(h)}$ 、 $\Delta \dot{I}_{Td-M1}^{(h)}$  分别表示第  $h$  次迭代时 M 端和 T 端正序对地电容电流故障分量。

考虑对地电容电流后，式(25)可变为

$$\begin{cases} \dot{U}_{M1} - (\dot{I}_{M1} - \dot{I}_{Mdl}^{(h)}) x_M^{(h)} Z_1 = \\ \dot{U}_{T-M1} - (\dot{I}_{T-M1} - \dot{I}_{Td-M1}^{(h)}) (L_M - x_M^{(h)}) Z_1 \\ \Delta \dot{U}_{M1} - (\Delta \dot{I}_{M1} - \Delta \dot{I}_{Mdl}^{(h)}) x_M^{(h)} Z_1 = \\ \Delta \dot{U}_{T-M1} - (\Delta \dot{I}_{T-M1} - \Delta \dot{I}_{Td-M1}^{(h)}) (L_M - x_M^{(h)}) Z_1 \end{cases} \quad (28)$$

同理, 化简可得第  $h$  次故障测距结果为

$$x_M^{(h)} = \frac{A_1^{(h)} - A_2^{(h)}}{A_3^{(h)} - A_4^{(h)}} \quad (29)$$

其中

$$\begin{cases} A_1^{(h)} = (\dot{U}_{M1} - \dot{U}_{T-M1})(\Delta \dot{I}_{T-M1} - \Delta \dot{I}_{Td-M1}^{(h)})L_M \\ A_2^{(h)} = (\Delta \dot{U}_{M1} - \Delta \dot{U}_{T-M1})(\dot{I}_{T-M1} - \dot{I}_{Td-M1}^{(h)})L_M \\ A_3^{(h)} = (\dot{U}_{M1} - \dot{U}_{T-M1})(\Delta \dot{I}_{M1} - \Delta \dot{I}_{Mdl}^{(h)} + \Delta \dot{I}_{T-M1} - \Delta \dot{I}_{Td-M1}^{(h)}) \\ A_4^{(h)} = (\Delta \dot{U}_{M1} - \Delta \dot{U}_{T-M1})(\dot{I}_{M1} - \dot{I}_{Mdl}^{(h)} + \dot{I}_{T-M1} - \dot{I}_{Td-M1}^{(h)}) \end{cases}$$

取  $\varepsilon = 0.001$ , 当  $x_M^{(h)} - x_M^{(h-1)} < \varepsilon$  时, 迭代收敛, 输出  $x_M = x_M^{(h)}$ ; 否则, 重复式(27)一式(29)的迭代步骤, 直至收敛。

该测距原理基于测距初值的求解, 只需经过数次迭代计算即可获得准确的测距结果, 既不出现伪根, 也无需全线搜索, 具有原理简单、计算速度快的特点。而且, 从式(26)和式(29)可知, 当故障点不位于故障支路两端时, 故障距离解析表达式与故障支路的线路单位长度阻抗参数无关, 因此故障测距结果不受故障支路单位阻抗的影响。

当故障点位于 T 节点附近时, 即  $D=1$ , 此时为保证故障支路判别和故障定位的准确性, 对三段支路分别进行上述故障测距方法计算。在故障支路上测距时, 由于对非故障支路的处理是正确的, 因此测距结果也是正确的; 在非故障支路进行测距时, 由于故障点不位于本支路上, 所以测距结果将超过本段线路的长度, 测距结果是不正确的。因此, 基于本节所提故障测距算法, 对比三段支路的测距结果, 能够实现对 T 节点附近故障的准确定位。

本文所提方法利用三端系统的同步测量数据进行测距, 因此采样数据的同步性是影响测距精度的重要因素。目前, 高压输电线路已广泛采用了光纤分相电流差动保护, 而线路的光纤分相电流差动保护装置能够同时获取线路电流及母线电压数据<sup>[24-26]</sup>。因此, 借助高压输电线路保护装置, 能够获取所需的同步测量数据, 所提方法具备应用基础。

## 2.2 故障测距算法流程

根据前述内容, 本文所提故障测距算法的程序流程图如图 8 所示。

所含具体步骤如下所述。

步骤 1: 当线路故障发生后, 相应的故障录波测距程序启动, 故障测距流程开始;

步骤 2: 采集 M、N、P 端的母线电压、线路电流等相量数据;

步骤 3: 经过全波傅里叶算法滤波, 计算 M、N、P 三端的母线电压正序分量以及正序故障分量、三段支路电流的正序分量以及正序故障分量等相量

数据;

步骤 4: 计算三段支路首末端对应的判定函数值, 根据故障支路识别判据判定故障支路, 若  $D=1$ , 则转至步骤 5, 若  $D=0$ , 则转至步骤 6;

步骤 5: 三段支路均依据所提故障测距方法进行测距计算, 根据测距结果确定故障支路并得到故障位置  $x$ , 转至步骤 7;

步骤 6: 根据  $G_i=1$  或  $C_i=1$ , 对  $i$ -T 支路进行测距计算, 得到故障位置  $x$ ;

步骤 7: 输出故障位置  $x$ ;

步骤 8: 测距流程结束。

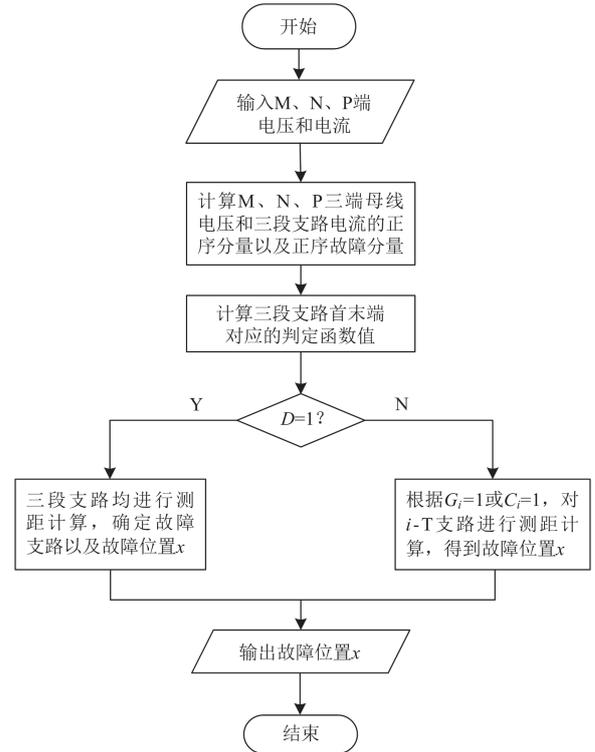


图 8 程序流程图

Fig. 8 Program flow chart

## 3 仿真实验

利用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建 110 kV 单回 T 型输电线路模型进行仿真实验, 仿真模型如图 1 所示。各支路长度  $L_M$ 、 $L_N$ 、 $L_P$  分别取 60 km、40 km、30 km。线路参数设置为  $R_1 = 0.029 \Omega/\text{km}$ ,  $X_1 = 0.362 \Omega/\text{km}$ ,  $C_1 = 0.014 \mu\text{F}/\text{km}$ ;  $R_0 = 0.225 \Omega/\text{km}$ ,  $X_0 = 0.971 \Omega/\text{km}$ ,  $C_0 = 0.009 \mu\text{F}/\text{km}$ 。系统三端电源分别取为  $110 \angle 0^\circ \text{ kV}$ 、 $110 \angle 30^\circ \text{ kV}$ 、 $110 \angle 10^\circ \text{ kV}$ 。三端数据采集频率为 10 kHz, 采用带通滤波器滤波并用全波傅氏算法提取基波相量, 利用故障后第三周波数据以及故障前一周波数据进行测距。故障距离均以各支路端点为起始点, 并定义相对测距误差

的计算式为

$$\sigma = \frac{\text{测距结果} - \text{故障距离}}{\text{支路长度}} \times 100\%$$

1) 故障支路判定结果验证

表 1 中列出了各支路在不同位置处发生 A 相经 100 Ω 电阻接地故障时, 所提故障支路判定方法的判断结果。根据故障支路识别判据以及是否需要进行三段支路故障测距计算, 将故障支路判断结果分为 T 节点附近和具体支路两类。由表 1 可知, 本文所提方法对这两类工况均能准确判断, 有效避免了 T 节点附近发生故障时出现判别死区的问题。

表 1 不同故障位置处 A 相经 100 Ω 接地时的故障支路判断结果

Table 1 Branch identification results of phase A-to-ground fault with 100 Ω at different fault position

故障支路	故障距离/km	D	G <sub>M</sub>	G <sub>N</sub>	G <sub>P</sub>	C <sub>M</sub>	C <sub>N</sub>	C <sub>P</sub>	故障支路判断
MT	0.1	0	1	0	0	0	0	0	MT
	3	0	0	0	0	1	0	0	MT
	29	0	0	0	0	1	0	0	MT
	59.3	1	0	0	0	0	0	0	T 附近
	59.7	1	0	0	0	0	0	0	T 附近
NT	0.1	0	0	1	0	0	0	0	NT
	3	0	0	0	0	0	1	0	NT
	20	0	0	0	0	0	1	0	NT
	39.3	1	0	0	0	0	0	0	T 附近
	39.7	1	0	0	0	0	0	0	T 附近
PT	0.1	0	0	0	1	0	0	0	PT
	5	0	0	0	0	0	0	1	PT
	25	0	0	0	0	0	0	1	PT
	29.3	1	0	0	0	0	0	0	T 附近
	29.7	1	0	0	0	0	0	0	T 附近

针对 T 节点附近(即 D = 1)时的故障, 需要对三段支路分别进行故障测距, 以辨别故障支路并实现故障定位, 测距结果如表 2 所示。由表 2 可知, 本文所提故障测距方法能够有效实现 T 节点附近故障的故障支路判定和准确的故障定位。

表 2 D = 1 时三段支路测距结果

Table 2 Distance measurement results of three branches when D = 1

故障支路	故障距离/km	X <sub>M</sub> /km	X <sub>N</sub> /km	X <sub>P</sub> /km	故障支路判断	测距结果/km
MT	59.3	59.307	40.368	30.348	MT	59.307
	59.7	59.707	40.168	30.148	MT	59.707
NT	39.3	60.358	39.317	30.347	NT	39.317
	39.7	60.157	39.718	30.148	NT	39.718
PT	29.3	60.358	40.368	29.299	PT	29.299
	29.7	60.158	40.168	29.698	PT	29.698

2) 故障位置、过渡电阻对算法的影响

考虑不同故障类型, 仿真分析故障位置和过渡电阻对故障测距结果的影响。表 3 为单回 T 型输电线路在各支路不同位置处发生故障时的测距结果。由表 3 可知, 本文所提故障测距算法的结果不受故障位置影响, 具有较高的故障测距精度。

表 3 故障位置对于不同故障类型测距结果的影响

Table 3 Influence of fault position on fault ranging results of different fault types

故障支路	故障类型	故障距离/km	测距结果/km	相对测距误差/%
MT	AG	0.1	0.097	-0.005
		5	5.000	0
		16	16.004	0.006
		45	44.999	-0.001
		57	57.004	0.006
NT	BC	0.1	0.110	0.025
		3	3.015	0.038
		15	15.079	0.197
		30	30.085	0.213
		39	39.031	0.078
PT	ABCG	0.1	0.084	-0.053
		2	2.056	0.186
		12	12.047	0.157
		20	20.029	0.096
		28	28.002	0.007

表 4 给出了当故障发生在距离三段支路端点 25 km 处时, 不同过渡电阻对不同类型故障的测距结果的影响。由表 4 可知, 算法在各种过渡电阻的情况下均具备较高的测距精度, 能够可靠定位故障。

表 4 不同过渡电阻对不同类型故障的测距结果

Table 4 Ranging results of different transition resistances to different types of faults

故障支路	故障类型	10 Ω	100 Ω	300 Ω	最大相对测距误差/%
MT	AG	25.003	25.002	25.003	0.005
	BCG	25.001	24.993	24.994	-0.012
	ABCG	25.001	25.001	25.001	0.002
NT	AG	25.005	25.008	25.008	0.020
	BCG	25.026	25.029	25.030	0.075
	ABCG	25.023	25.023	25.023	0.058
PT	AG	25.001	25.003	25.003	0.010
	BCG	24.999	24.998	25.028	0.093
	ABCG	25.006	25.006	25.006	0.020

3) T 接位置对算法的影响

在图 1 所示的仿真模型中, 保持 MN 线路与 PT 线路长度不变, 通过改变 PT 接线位置验证 T 节点位置差异对测距算法的影响。表 5 给出了 T 节点位于距离 M 端 30 km 和 80 km 处时, 算法对各种故障

类型的测距结果。通过表 5 可知, 当 T 接位置不同时, 本文所提测距算法依然能够准确判断故障支路, 并可可靠定位故障位置。

表 5 不同 T 节点位置时的测距结果

Table 5 Ranging results at different T-node positions

T 节点位置/km	故障类型	故障位置/km	测距结果/km
30	AG	MT,10	MT,9.999
	BC	NT,40	NT,39.994
	ABCG	PT,20	PT,20.002
80	AG	MT,40	MT,40.001
	BC	NT,10	NT,10.056
	ABCG	PT,15	PT,15.059

#### 4) 方案对比

当 T 节点附近区域发生三相和 A 相经过渡电阻  $R_g$  为  $300 \Omega$  的接地故障时, 表 6 列出了均为基于故障分析法的本文方法与文献[16]所提方法的测距结果。从表 6 可知, 在三相高阻接地故障情况下, 两种方法均能准确判定故障支路并计算获得准确的故障距离。但在 A 相经高阻接地故障时, 文献[16]存在无法正确判断故障支路的缺陷, 导致测距失败, 而本文方法凭借所提故障支路识别判据能够有效克服上述缺陷, 并获得高准确度的测距结果。

表 6 T 节点附近高阻接地故障时测距结果的比较

Table 6 Comparison of ranging results for high resistance fault near T node

故障类型	实际故障点		本文方法		文献[16]方法	
	故障支路	故障距离/km	故障支路判断	故障距离/km	故障支路判断	故障距离/km
ABCG ( $R_g=300 \Omega$ )	MT	59.5	MT	59.476	MT	59.515
	NT	39.5	NT	39.507	NT	39.493
	PT	29.5	PT	29.519	PT	29.490
AG ( $R_g=300 \Omega$ )	MT	55	MT	54.992	MT	54.010
	MT	59	MT	58.987	MT	57.246
	MT	59.5	MT	59.487	MT	57.646
	NT	37	NT	37.006	MT	59.251
	NT	39	NT	39.005	MT	58.457
	NT	39.5	NT	39.505	MT	58.251
	PT	26	PT	26.010	PT	28.052
	PT	29	PT	29.009	MT	58.462
	PT	29.5	PT	29.509	MT	58.253

以上仿真结果是在假设 T 型线路三端数据完全同步, 并忽略了测量误差以及线路参数不均匀等因素影响的理想条件下得到的, 此时所提算法具有较高的测距精度, 仿真结果验证了算法的有效性。在实际工程中, 若考虑上述影响因素后, 测距误差有可能增大。另外, 由于本文基于集中参数模型进行

分析, 故所提算法在应用于 T 型短线路和中等长度线路时具有更好的测距效果。

## 4 结论

在集中参数模型的基础上, 针对单回线 T 型输电线路提出了一种基于故障支路判定和迭代计算的故障测距新方法。该方法由故障支路判定和故障测距两个步骤构成。在故障支路判定时, 忽略线路对地电容作用, 利用三端的正序分量电气量推导并设计了判定函数。同时, 给出了故障支路识别判据, 当故障点位于支路首端附近或 T 节点附近时, 保证了故障支路判断的准确性。在故障测距时, 计及线路对地电容作用, 利用三端的正序分量和正序故障分量推导了故障距离解析表达式, 经过数次迭代即可求解出故障距离。该方法具有以下优点:

1) 所提故障支路识别判据覆盖了 T 型线路上所有可能的故障位置, 有效保障了故障支路判定的正确性。

2) 通过对故障距离解析表达式的数次迭代计算即可实现测距, 原理上不会出现伪根, 也无需进行全线搜索, 方法简单且易于实现。

3) 测距结果不受故障位置、过渡电阻和 T 接位置等因素的影响, 具有良好的普适性。仿真结果表明, 在不考虑线路参数变化的情况下, 其最大相对测距误差不超过  $\pm 0.5\%$ , 具有较高的测距精度。

## 参考文献

- [1] 陈旭, 张利花, 张鑫瑞, 等. 考虑测距结果特性的 T 型输电线路非同步故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 132-138.  
CHEN Xu, ZHANG Lihua, ZHANG Xinrui, et al. Asynchronous fault location algorithm for T-shaped transmission line considering characteristics of location result[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 132-138.
- [2] LIN Y H, LIU C W, YU C S. A new fault locator for three-terminal transmission lines using two-terminal synchronized voltage and current phasors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2): 452-459.
- [3] 田羽, 范春菊, 龚震东. 带同杆双回线的 T 型线路故障分支判定算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 71-76.  
TIAN Yu, FAN Chunju, GONG Zhendong. Faulted line selecting method of T circuit of parallel transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,

30(21): 71-76.

[4] HONG Yushen, WEN Junzhang, YU Boduan, et al. A new PMU-based fault location algorithm for three-terminal[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 634: 3925-3929.

[5] 徐彪, 尹项根, 张哲, 等. 矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(5): 152-158.

XU Biao, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(5): 152-158.

[6] 刘江东, 董礼清, 薛晨, 等. 基于零序电压分布特征的小电流接地故障测距初探[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(3): 59-67.

LIU Jiangdong, DONG Liqing, XUE Chen, et al. Fault location of a small current grounding fault based on distribution characteristics of zero sequence voltage[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(3): 59-67.

[7] 马静, 史宇欣, 马伟, 等. 基于分布参数的同杆双回线跨线及接地故障单端定位方法[J]. *电网技术*, 2014, 38(9): 2525-2531.

MA Jing, SHI Yuxin, MA Wei, et al. Distributed parameter based one-end fault location for inter-line fault and earth fault in double-circuit transmission lines on same tower[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(9): 2525-2531.

[8] LIU C W, LIEN K P, CHEN C S, et al. A universal fault location technique for N-terminal ( $N \geq 3$ ) transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(3): 1366-1373.

[9] 王召磊, 刘明光. 基于线性方程组解的 T 型线路行波测距[J]. *电网技术*, 2014, 38(4): 1046-1050.

WANG Zhaolei, LIU Mingguang. Traveling wave fault location for teed transmission line based on solutions of linear equations[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(4): 1046-1050.

[10] 张永健, 胥杰, 孙嘉. 基于静态小波变换的 T 型输电线路行波测距方法[J]. *电网技术*, 2012, 36(6): 84-88.

ZHANG Yongjian, XU Jie, SUN Jia. Travelling wave fault location for three-terminal transmission line based on static wavelet transform[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(6): 84-88.

[11] 李传兵, 谭博学, 高鹏, 等. 基于 D 型行波原理的 T 接线路故障测距方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(18): 78-82.

LI Chuanbing, TAN Boxue, GAO Peng, et al. A fault location method for T-connection lines based on D-type traveling wave theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(18): 78-82.

[12] DING Jiali, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Distributed traveling-wave-based fault-location algorithm embedded in multiterminal transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(6): 3045-3054.

[13] 高厚磊, 安艳秋, 江世芳. 超高压 T 接线路高精度故障测距算法研究[J]. *电力系统自动化*, 2001, 25(10): 51-54.

GAO Houlei, AN Yanqiu, JIANG Shifang. Study on accurate fault location algorithm for EHV teed lines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(10): 51-54.

[14] 李胜芳, 范春菊, 郁惟镛. T 型支接线路的自适应故障测距算法[J]. *电工技术学报*, 2004, 19(10): 59-64.

LI Shengfang, FAN Chunju, YU Weiyong. Adaptive fault location method for three-terminal transmission line[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2004, 19(10): 59-64.

[15] 施世鸿, 何奔腾. T 型输电线路非同步数据故障测距新算法[J]. *电力自动化设备*, 2008, 28(10): 63-67.

SHI Shihong, HE Benteng. Fault locating algorithm for T-type transmission lines with asynchronous sampling[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2008, 28(10): 63-67.

[16] 姚亮, 陈福锋, 陈琦. 一种应用于 T 接线路的自适应故障测距方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(3): 26-30.

YAO Liang, CHEN Fufeng, CHEN Qi. An adaptive method of fault locator for T transmission line[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(3): 26-30.

[17] 姜宪国, 李博通, 张云柯, 等. 基于电压序量变化量的超高压混合线路故障测距方法[J]. *电网技术*, 2015, 39(12): 3578-3583.

JIANG Xianguo, LI Botong, ZHANG Yunke, et al. A fault location method for extra-high voltage mixed lines based on variation of sequence voltage[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(12): 3578-3583.

[18] 张斯淇, 李永丽, 陈晓龙. 基于正序电流差的同塔双回 T 型输电线路故障测距新算法[J]. *中国电机工程学*

- 报, 2018, 38(5): 1488-1495.
- ZHANG Siqi, LI Yongli, CHEN Xiaolong. A new fault location algorithm based on positive sequence current difference for double-circuit three-terminal transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1488-1495.
- [19] 李跃, 郑涛, 文安. 基于单端量的超高压交流输电线路单相接地故障测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 27-33.
- LI Yue, ZHENG Tao, WEN An. A new location method for UHV AC transmission lines with high resistance faults based on single terminal volume[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 27-33.
- [20] 付华, 刘公权, 邢亮. 基于同步挤压小波变换的故障行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 18-24.
- FU Hua, LIU Gongquan, XING Liang. Fault traveling wave ranging method based on synchrosqueezing wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 18-24.
- [21] 施世鸿, 何奔腾, 张武军. T 型高压输电线路故障测距[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 105-110.
- SHI Shihong, HE Benteng, ZHANG Wujun. Fault location for HV three-terminal transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 105-110.
- [22] 林富洪, 王增平, 曾惠敏. 基于测距函数相位特性的 T 型高压线路故障定位原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 107-113.
- LIN Fuhong, WANG Zengping, ZENG Huimin. A novel fault location algorithm based on phase characteristics of fault location function for three-terminal transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 107-113.
- [23] 王增平, 林富洪, 曾惠敏. 利用匹配思想的 T 型线路准确故障定位新算法[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2427-2433.
- WANG Zengping, LIN Fuhong, ZENG Huimin. Accurate fault location algorithm for three-terminal transmission lines using matching idea[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2427-2433.
- [24] 李澄, 邵亮. 基于故障分量计算的高压长线故障测距方法研究[J]. 电气工程学报, 2020, 15(3): 113-119.
- LI Cheng, SHAO Liang. Research on high voltage long line fault location method based on fault component calculation[J]. Journal of Electrical Engineering, 2020, 15(3): 113-119.
- [25] 安建锋. T 接线路差动保护的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(21): 93-96.
- AN Jianfeng. Application of multi-terminal lines current differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(21): 93-96.
- [26] 娄为, 韩学军, 韩俊, 等. 基于 5G 和光纤综合通道的输电线路差动保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 158-166.
- LOU Wei, HAN Xuejun, HAN Jun, et al. A transmission line differential protection method based on 5G and optical fiber integrated channels[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 158-166.

收稿日期: 2021-12-02; 修回日期: 2022-05-24

作者简介:

陈晓龙(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统故障分析、保护与控制; E-mail: xiaolong.chen@tju.edu.cn

余联课(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障分析与保护、输电线路故障定位; E-mail: lianke\_yu@tju.edu.cn

裴东锋(1980—), 男, 高级工程师, 研究方向为电网调度与监控。E-mail: 1046175605@qq.com

(编辑 魏小丽)