

DOI: 10.7667/PSPC160601

局部耦合双回输电线路故障测距时域算法

杜婉琳, 梁远升, 王钢

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 多回耦合输电方式是电网建设的必然趋势, 以局部耦合多回线路为主。受线间局部耦合影响, 现有故障测距方法存在较大误差。为此, 对局部耦合双回输电线路开展故障分析和故障测距方法研究。根据局部耦合同塔双回输电线路的结构和特点, 利用线路解耦理论建立局部耦合双回输电线路耦合分界点处的电压和电流接口方程。在此基础上, 构建各耦合段的故障测距时域分析模型, 从而提出局部耦合双回输电线路的故障测距时域方法。最后, 利用 ATP/EMTP 电磁暂态仿真软件构建局部耦合同塔双回输电线路模型, 并进行全面的仿真验证, 结果表明所提方法精度高。

关键词: 局部耦合; 同塔双回输电线路; 故障测距; 时域法; 接口方程

Fault location algorithm based on time-domain for partial coupling double-circuit transmission lines

DU Wanlin, LIANG Yuansheng, WANG Gang

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Multi-circuit transmission lines on the same tower have become the inevitable trend of power grid construction, mostly partial coupling mode. Affected by the partial coupling characteristics, the existing fault location methods have large error. Therefore, this paper develops a study about the fault analysis and fault location method for the partial decoupling double-circuit transmission lines. Based on its structure and characteristics, as well as the lines decoupling theory, the interface equations of demarcation point are built. On the basis of the above study, the new fault location algorithm based on time-domain for partial coupling double-circuit transmission lines are presented. Finally, ATP/EMTP is used to construct the model of partial coupling of double-circuit transmission lines. After the overall simulation and verification, it shows that the presented algorithm is accurate.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307065).

Key words: partial coupling; double-circuit transmission lines on the same tower; fault location; time-domain method; interface equation

0 引言

输电线路一旦发生故障, 会破坏电力系统稳定运行。精确的故障测距有利于线路的及时修复和供电的快速恢复^[1-4]。而同塔多回输电方式共用杆塔, 所需输电走廊较窄, 可以充分有效地利用有限的输电走廊资源, 增加单位输电容量, 因此同塔多回输电方式势必成为电网规划和建设的重点。而在实际工程中全线使用多回线输电并不常见, 大多数为多回线路局部耦合方式。

目前, 耦合线路故障分析方法大多针对完全同

塔多回线路, 以完全同塔线路的解耦方法为基础^[2]。与完全同塔多回输电方式相比, 局部耦合的多回输电方式中, 至少存在一个耦合分界点, 耦合分界点各侧具有不同特性, 线路参数以及模量特征也不同^[5-6]。现有故障分析方法未考虑线间局部耦合的影响, 故无法准确表述零序电流的分布特征。

现有的故障测距方法主要分为行波法^[7-9]和故障分析法, 其中故障分析法又分为频域法^[10-13]和时域法^[14-15]。频域法以故障工频电气量和长线方程模型为基础, 所需数据时窗较长, 但精度和稳定性较高; 受数据时窗的限制, 频域法往往因数据时窗不足导致测距失败。时域法则是以 Bergeron 模型和电气瞬时量为基础, 所需数据时窗较短, 可作为频域

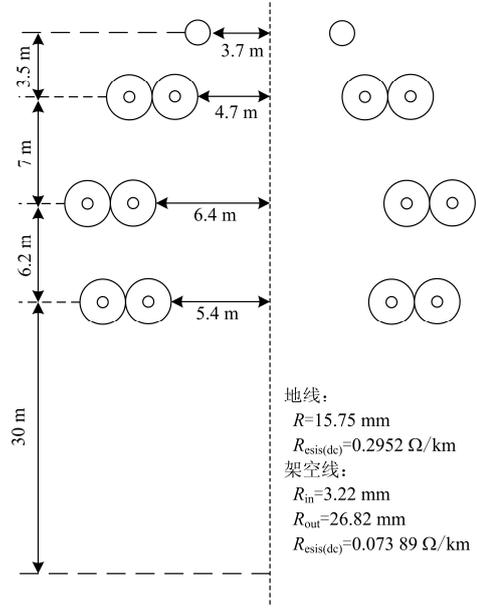
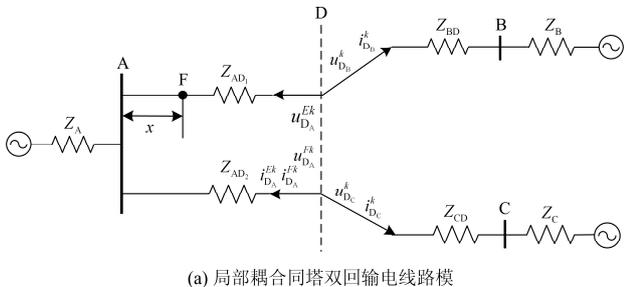
法的有效补充。

目前，多回耦合线路故障测距研究大都是围绕完全同塔多回线路开展的^[16-20]，如：文献[18]考虑零序互感，根据不同类型故障的序网和故障边界条件，针对同塔双回线的单回线故障，提出了一种基于故障线路双端电气量的故障测距算法，且不受过渡电阻、系统阻抗和负荷电流影响。文献[19]采用JMarti模型，提出了适应于同塔四回线故障测距的模变换分析方法，在此基础上，提出了一种基于环流模分量的同塔四回线双端故障测距频域算法。此外，针对特殊类型的线路如T型线路，文献[20]利用过渡电阻的纯电阻性质，提出了一种新的T型线路三段故障测距方法。该方法不需要先判断故障支路即可测距。目前，未见相关的局部耦合多回线路故障测距方法的报道。而因耦合线路故障导致零序保护或接地距离保护误动的情况时有发生，线间零序耦合也必将影响故障测距的准确性。因此有必要对局部耦合多回线路时域故障测距方法进行研究。

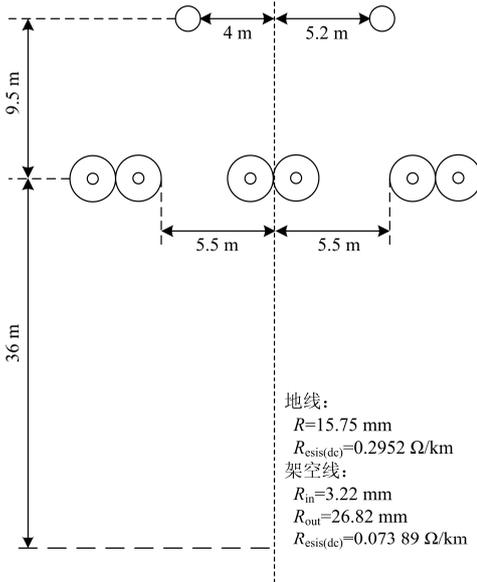
为此，本文对局部耦合双回输电线路开展故障分析和故障测距时域方法研究。根据局部耦合同塔双回输电线路的结构和特点，利用多回线解耦理论建立局部耦合双回输电线路耦合分界点处的电压和电流接口方程。在此基础上，构建各耦合段的故障测距时域方程，从而提出局部耦合双回输电线路的故障测距时域方法。最后，利用ATP/EMTP电磁暂态仿真软件构建局部耦合同塔双回输电线路模型，进行全面的仿真验证。

1 局部耦合分界点处接口方程

图1(a)为局部耦合同塔双回输电线路模型，图1(b)为耦合双回线杆塔布局，图1(c)为单回线杆塔布局，杆塔布局和线路详细参数参考了220 kV输电线路标准设计参数。根据杆塔布局和线路详细参数即可得线路完全解耦后的正、零序参数。在图1(a)中，D点为耦合分界点。ADB为局部耦合同塔双回输电线路I回线，ADC为II回线。线路AD段为双回线耦合段，其长度为 L_{AD} ，正序(α 、 β 模)参数为：分



地线：
 $R=15.75 \text{ mm}$
 $R_{\text{esis(de)}}=0.2952 \text{ } \Omega/\text{km}$
 架空线：
 $R_{\text{in}}=3.22 \text{ mm}$
 $R_{\text{out}}=26.82 \text{ mm}$
 $R_{\text{esis(de)}}=0.073 \text{ } 89 \text{ } \Omega/\text{km}$



地线：
 $R=15.75 \text{ mm}$
 $R_{\text{esis(de)}}=0.2952 \text{ } \Omega/\text{km}$
 架空线：
 $R_{\text{in}}=3.22 \text{ mm}$
 $R_{\text{out}}=26.82 \text{ mm}$
 $R_{\text{esis(de)}}=0.073 \text{ } 89 \text{ } \Omega/\text{km}$

图1 局部耦合同塔双回输电线路模型

Fig. 1 Partial coupling double-parallel transmission lines on the same tower

布电阻 r_{d1} ，波速 v_{d1} ，波阻抗 z_{d1} ；零序(0模)参数为：分布电阻 r_{d0} ，波速 v_{d0} ，波阻抗 z_{d0} 。线路BD段和CD段为单回线无耦合段，其长度分别为 L_{BD} 和 L_{CD} ，正序(α 、 β 模)参数为：分布电阻 r_{s1} ，波速 v_{s1} ，波阻抗 z_{s1} ；零序(0模)参数为：分布电阻 r_{s0} ，波速 v_{s0} ，波阻抗 z_{s0} 。

耦合双回线同时存在线间互感和相间互感，因此线路各端电压、电流需进行解耦处理，首先根

据平行双线系统的相模变换矩阵对线间互感进行解耦, 解耦后可得同向 E 模量和环流 F 模量; 然后根据适用于时域分析的 Clarke 变换矩阵对各模量的三相进行解耦, 解耦后可得各模量的 0、 α 、 β 序分量^[1]。变化方法为

$$\begin{bmatrix} y_E^{0\alpha\beta} \\ y_F^{0\alpha\beta} \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} y_I^{abc} \\ y_{II}^{abc} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{S} & \mathbf{S} \\ \mathbf{S} & -\mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_I^{abc} \\ y_{II}^{abc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: y_I^{abc} 、 y_{II}^{abc} 分别表示 I、II 回线的 abc 三相瞬时值; $y_E^{0\alpha\beta}$ 、 $y_F^{0\alpha\beta}$ 分别表示解耦后的同向 E 模量和环流 F 模量的 0、 α 、 β 序分量瞬时值; \mathbf{S} 为适合三相线路时域分析的 Clarke 变换矩阵, 如式(2)。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

P 为耦合双回线(AD 段)的解耦变换矩阵:

$$P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{2}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于各段线路解耦后的各模量在不同序网中存在, 需构建各段线路各模量电压和电流在耦合分界点(D 点)的接口方程。

利用式(3)解耦后, AD 段的相分量被分解成六个独立模分量: $E_0, E_\alpha, E_\beta, F_0, F_\alpha, F_\beta$, 其中 E_0, E_α, E_β 为同向量, F_0, F_α, F_β 为环流量。可得 AD 段 D 点(记为 D_A)的电压和电流模量为: $u_{D_A}^{Ek}, u_{D_A}^{Fk}, i_{D_A}^{Ek}, i_{D_A}^{Fk}$, $k=0, \alpha, \beta$, k 表示各序模量, 下同。

利用式(2)对 BD 段 D 点(记为 D_B)和 CD 段 D 点(记为 D_C)进行解耦。BD 段和 CD 段的相分量分解成 0、 α 、 β 序模分量。可得 D_B 点电压和电流模量为 $u_{D_B}^k, i_{D_B}^k$, DC 点电压和电流模量为 $u_{D_C}^k, i_{D_C}^k$ 。

对 D_A 点电压和电流模量, 有:

$$\begin{cases} [u_{D_A}^{E0}, u_{D_A}^{E\alpha}, u_{D_A}^{E\beta}, u_{D_A}^{F0}, u_{D_A}^{F\alpha}, u_{D_A}^{F\beta}]^T = \\ P[u_{Ia}, u_{Ib}, u_{Ic}, u_{IIa}, u_{IIb}, u_{IIc}]^T \\ [i_{D_A}^{E0}, i_{D_A}^{E\alpha}, i_{D_A}^{E\beta}, i_{D_A}^{F0}, i_{D_A}^{F\alpha}, i_{D_A}^{F\beta}]^T = \\ -P[i_{Ia}, i_{Ib}, i_{Ic}, i_{IIa}, i_{IIb}, i_{IIc}]^T \end{cases} \quad (4)$$

对 D_B 点电压和电流模量, 有:

$$\begin{cases} [u_{D_B}^0, u_{D_B}^\alpha, u_{D_B}^\beta]^T = S[u_{Ia}, u_{Ib}, u_{Ic}]^T \\ [i_{D_B}^0, i_{D_B}^\alpha, i_{D_B}^\beta]^T = S[i_{Ia}, i_{Ib}, i_{Ic}]^T \end{cases} \quad (5)$$

对 D_C 点电压和电流模量, 有:

$$\begin{cases} [u_{D_C}^0, u_{D_C}^\alpha, u_{D_C}^\beta]^T = S[u_{IIa}, u_{IIb}, u_{IIc}]^T \\ [i_{D_C}^0, i_{D_C}^\alpha, i_{D_C}^\beta]^T = S[i_{IIa}, i_{IIb}, i_{IIc}]^T \end{cases} \quad (6)$$

式中: $u_{Ia}, u_{Ib}, u_{Ic}, i_{Ia}, i_{Ib}, i_{Ic}$ 为 I 回线三相电压、电流瞬时值; $u_{IIa}, u_{IIb}, u_{IIc}, i_{IIa}, i_{IIb}, i_{IIc}$ 为 II 回线三相电压、电流瞬时值。因耦合分界点同一回同一相线路的电压、电流相等的关系, 由式(4)一式(6)可得:

由 D_B 和 D_C 推算 D_A 的各模量电压、电流接口方程为

$$\begin{cases} u_{D_A}^{Ek} = 0.5(u_{D_B}^k + u_{D_C}^k) \\ u_{D_A}^{Fk} = 0.5(u_{D_B}^k - u_{D_C}^k) \\ i_{D_A}^{Ek} = -0.5(i_{D_B}^k + i_{D_C}^k) \\ i_{D_A}^{Fk} = -0.5(i_{D_B}^k - i_{D_C}^k) \end{cases} \quad (7)$$

由 D_A 和 D_C 推算 D_B 的各模量电压、电流接口方程为

$$\begin{cases} u_{D_B}^k = 2u_{D_A}^{Ek} - u_{D_C}^k \\ i_{D_B}^k = -2i_{D_A}^{Ek} - i_{D_C}^k \end{cases} \quad (8)$$

由 D_A 和 D_B 推算 D_C 的各模量电压、电流接口方程为

$$\begin{cases} u_{D_C}^k = 2u_{D_A}^{Ek} - u_{D_B}^k \\ i_{D_C}^k = -2i_{D_A}^{Ek} - i_{D_B}^k \end{cases} \quad (9)$$

2 线路沿线电压和电流时域分布方程

经解耦后, 各段线路的各个模量可视为单线模型处理, 如图 2 所示, 若已知单线 m 端的 k 序电压瞬时值 $u_m^k(t)$ 和电流瞬时值 $i_m^k(t)$, 根据 Bergeron 时域方程, 可推算距离 m 端 x 处的 n 端在 t 时刻的 k 序电压、电流瞬时值 $u_{n(m)}^k(x, t)$, $i_{n(m)}^k(x, t)$ 。

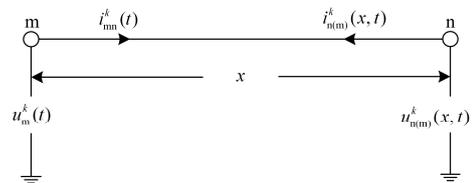


图 2 单回线输电线路模型

Fig. 2 Single transmission line model

$$u_{n(m)}^k(x, t) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{r_k x}{4z_k} \right)^2 \left[u_m^k \left(t + \frac{x}{v_k} \right) - i_{mn}^k \left(t + \frac{x}{v_k} \right) \left(z_k + \frac{r_k x}{4} \right) \right] + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_k x}{4z_k} \right)^2 \left[u_m^k \left(t - \frac{x}{v_k} \right) + i_{mn}^k \left(t - \frac{x}{v_k} \right) \left(z_k - \frac{r_k x}{4} \right) \right] - \left(\frac{r_k x}{4z_k} \right)^2 u_m^k(t) - \frac{r_k x}{4} \left(1 + \frac{r_k x}{4z_k} \right) \left(1 - \frac{r_k x}{4z_k} \right) i_{mn}^k(t) \quad (10)$$

$$i_{n(m)}^k(x, t) = -\frac{1}{2z_k} \left(1 + \frac{r_k x}{4z_k} \right) \left[u_m^k \left(t + \frac{x}{v_k} \right) - i_{mn}^k \left(t + \frac{x}{v_k} \right) \left(z_k + \frac{r_k x}{4} \right) \right] + \frac{1}{2z_k} \left(1 - \frac{r_k x}{4z_k} \right) \left[u_m^k \left(t - \frac{x}{v_k} \right) + i_{mn}^k \left(t - \frac{x}{v_k} \right) \times \left(z_k - \frac{r_k x}{4} \right) \right] + \frac{r_k x}{4(z_k)^2} \left[u_m^k(t) - \frac{r_k x}{4} i_{mn}^k(t) \right] \quad (11)$$

利用式(10)、式(11)，由 A 端各模量电压和电流可推算 AD 段沿线各点的电压和电流瞬时值，并可得 D_A 点的各模量电压、由 D_A 流入 AD 的各模量电流分别为： $u_{D(A)}^{Ek}(L_{AD}, t)$ ， $i_{D(A)}^{Ek}(L_{AD}, t)$ ， $u_{D(A)}^{Fk}(L_{AD}, t)$ ， $i_{D(A)}^{Fk}(L_{AD}, t)$ 。

由 B 端各模量电压和电流推算至 D_B 点的各模量电压、由 D_B 流入 BD 的各模量电流，即： $u_{D(B)}^k(L_{BD}, t)$ ， $i_{D(B)}^k(L_{BD}, t)$ 。

由 C 端各模量电压和电流推算至 D_C 点的各模量电压、由 D_C 流入 CD 的各模量电流，即： $u_{D(C)}^k(L_{CD}, t)$ ， $i_{D(C)}^k(L_{CD}, t)$ 。

利用接口式(7)一式(9)可计算另一段线路的耦合分界点各模量电压和电流。

由 D_B 和 D_C 推算 D_A 的各模量电压、电流为

$$\begin{cases} u_{D_A}^{Ek}(L_{AD}, t) = 0.5[u_{D(B)}^k(L_{BD}, t) + u_{D(C)}^k(L_{CD}, t)] \\ u_{D_A}^{Fk}(L_{AD}, t) = 0.5[u_{D(B)}^k(L_{BD}, t) - u_{D(C)}^k(L_{CD}, t)] \\ i_{D_A}^{Ek}(L_{AD}, t) = -0.5[i_{D(B)}^k(L_{BD}, t) + i_{D(C)}^k(L_{CD}, t)] \\ i_{D_A}^{Fk}(L_{AD}, t) = -0.5[i_{D(B)}^k(L_{BD}, t) - i_{D(C)}^k(L_{CD}, t)] \end{cases} \quad (12)$$

由 D_A 和 D_C 推算 D_B 的各模量电压、电流为

$$\begin{cases} u_{D_B}^k(L_{BD}, t) = 2u_{D(A)}^{Ek}(L_{AD}, t) - u_{D(C)}^k(L_{CD}, t) \\ i_{D_B}^k(L_{BD}, t) = -2i_{D(A)}^{Ek}(L_{AD}, t) - i_{D(C)}^k(L_{CD}, t) \end{cases} \quad (13)$$

由 D_A 和 D_B 推算 D_C 的各模量电压、电流为

$$\begin{cases} u_{D_C}^k(L_{CD}, t) = 2u_{D(A)}^{Ek}(L_{AD}, t) - u_{D(B)}^k(L_{BD}, t) \\ i_{D_C}^k(L_{CD}, t) = -2i_{D(A)}^{Ek}(L_{AD}, t) - i_{D(B)}^k(L_{BD}, t) \end{cases} \quad (14)$$

获得另一段线路耦合分界点的各模量电压和电

流后，可继续推算另一段线路的沿线电压和电流。

3 故障测距时域算法

3.1 基本原理

本文对故障线路沿线等间隔划分为多个计算观测点(计算间隔距离为 dx)，根据前述计算方法，结合耦合线路各端电气量，分别由故障线路两端推算至各个计算观测点的各模量瞬时电压，并计算各观测点的两端推算瞬时电压差值。若观测点越接近故障点，则推算的瞬时电压差值越小；反之则差值越大。上述规律在故障发生后任意时刻都成立。因此，可通过选取多组不同时刻的采样数据构建故障测距观测模型，查找电压差值最低点判断为故障点。根据不同故障段，有不同的故障测距观测模型。

3.2 AD 段的故障测距模型

若观测点位于耦合双回段 AD 段，即 $0 \leq x \leq L_{AD}$ ，利用式(10)一式(12)计算 A 端和 D_A 点分别推算至观测点处的 E、F 模量电压 $u_{F(A)}^{Ek}(x, t)$ ， $u_{F(A)}^{Fk}(x, t)$ ， $u_{F(D_A)}^{Ek}(L_{AD} - x, t)$ ， $u_{F(D_A)}^{Fk}(L_{AD} - x, t)$ ，可得 AD 段的故障测距观测模型为

$$\begin{cases} \Delta u_{F(AD)}^{Ek}(x, t) = u_{F(A)}^{Ek}(x, t) - u_{F(D_A)}^{Ek}(L_{AD} - x, t) \\ \Delta u_{F(AD)}^{Fk}(x, t) = u_{F(A)}^{Fk}(x, t) - u_{F(D_A)}^{Fk}(L_{AD} - x, t) \end{cases} \quad (15) \quad (0 \leq x \leq L_{AD})$$

3.3 BD/CD 段的故障测距观测模型

若观测点位于单回段，即 $x > L_{AD}$ ，且故障线路为 I 回线，即 BD 段，利用式(10)一式(13)计算 B 端和 D_B 点分别推算至观测点处的模量电压 $u_{F(D_B)}^k(x - L_{AD}, t)$ ， $u_{F(B)}^k(L_{AD} + L_{BD} - x, t)$ ，可得 BD 段故障测距观测模型为

$$\Delta u_{F(BD)}^k(x, t) = u_{F(D_B)}^k(x - L_{AD}, t) - u_{F(B)}^k(L_{AD} + L_{BD} - x, t) \quad (x > L_{AD}) \quad (16)$$

类似地，若故障线路为 II 回线，即观测点位于 CD 段，由式(10)一式(14)可得 CD 段故障测距观测模型为

$$\Delta u_{F(CD)}^k(x, t) = u_{F(D_C)}^k(x - L_{AD}, t) - u_{F(C)}^k(L_{AD} + L_{CD} - x, t) \quad (x > L_{AD}) \quad (17)$$

3.4 线路沿线计算观测点处故障测距判据

利用式(15)一式(17)，可得到沿线不同区段各计算观测点的推算瞬时电压差值。计算双回线 AD 段各

观测点的同向/环流量瞬时电压差值 $\Delta u_{F(AD)}^{Ek}(x, t)$ 、 $\Delta u_{F(AD)}^{Fk}(x, t)$ 与 AD 段上相同模量沿线最大瞬时电压差的比值, 作沿线瞬时电压差比值变化曲线, 对各计算观测点, 求所有模量的瞬时电压差比值的平均值。BD/CD 段沿线模量电压差 $\Delta u_{F(BD)}^k(x, t)$ 、 $\Delta u_{F(CD)}^k(x, t)$ 的计算方法与 AD 段相同。因此, 可得故障线路沿线各计算观测点的瞬时电压差比值平均值综合曲线, 该综合曲线最低点所在位置判定为故障点。算法流程图如图 3。

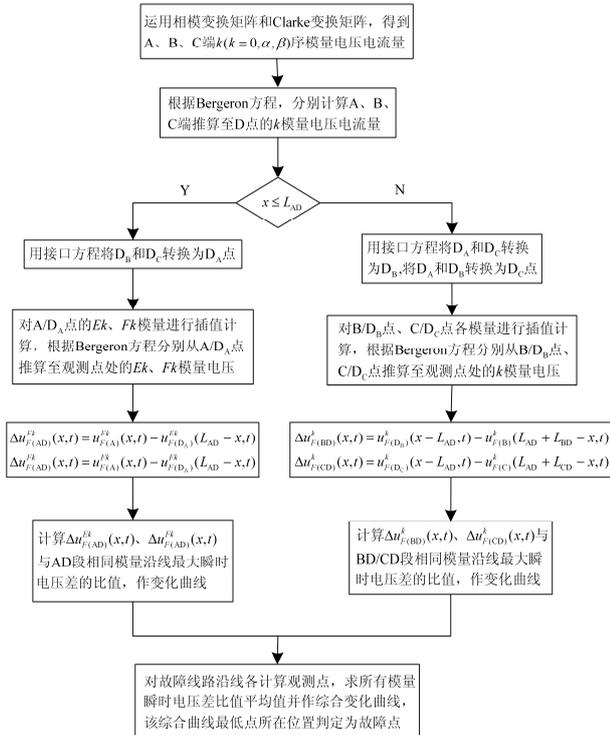


图 3 局部耦合双回输电线路故障测距时域算法流程图

Fig. 3 Flow chart of fault location algorithm based on time-domain for partial coupling double-circuit transmission lines

4 仿真、分析与验证

为了验证本文所提时域算法, 采用 ATP/EMTP 建立局部耦合同塔双回输电系统模型进行故障仿真, 系统模型如图 1 所示, 电压等级为 220 kV, 线路各段长度分别为 $L_{AD}=20$ km, $L_{BD}=20$ km, $L_{CD}=20$ km, 线路和杆塔模型参数参考了 220 kV 输电线路标准设计参数, 仿真数据采样频率为 20 kHz。本文提取故障后数据窗长度为 20 ms 的电压和电流采样数据作为输入, 以 0.01 km 的计算间隔设置线路沿线计算观测点。

为验证所提算法与传统算法的测距效果差异, 分别在距离 A 端 10 km 处(耦合双回段)和 30 km 处(单回段)设置单相金属性接地故障, 再分别采用未考虑线间耦合影响的传统测距算法和本文所提方法进行故障测距计算。为验证所提方法的耐受过渡电阻能力, 进行了全面的仿真分析与验证。

4.1 传统算法的测距结果

传统故障测距算法未考虑线间耦合, 仅收集故障线路两端的电压和电流量进行计算, 同样计算线路沿线各观测点的推算电压差值, 所得各模量计算曲线分别列于附录图 A1 和 B1。如附录图 A1 所示, 故障发生在 I 回线距离 A 端 10 km 处, 为 A 相金属性接地故障, 根据综合曲线的最低点, 测距结果为 6.6 km, 误差为 -3.4 km。如附录图 B1 所示, 故障发生在 I 回线距离 A 端 30 km 处, 为 A 相金属性接地故障, 测距结果为 31.07 km, 误差为 1.07 km (α , β 模测距曲线重合)。

可见, 传统算法因不计线间局部耦合, 测距误差较大, 尤其当故障发生在耦合双回段时。

4.2 本文所提算法的测距结果

采用本文所提时域算法, 故障线路沿线故障测距计算曲线列于附录图 A2 和图 B2。如附录图 A2 所示, 故障为 I 回线距离 A 端 10 km 处的 A 相金属性接地, 综合曲线显示测距结果为 9.24 km, 误差为 -0.76 km。如附录图 B2 所示, 故障位于 30 km 处, A 相金属性接地故障, 测距结果为 30.41 km, 误差为 0.41 km。可见相比于传统算法, 本文算法因考虑了线间耦合影响, 测距精度大大提升。

4.3 全面分析验证

为进行全面分析验证, 分别设置不同的故障类型、故障距离和过渡电阻, 通过大量的仿真分析, 采用本文所提方法进行故障测距计算, 计算结果列于表 1。其中, 故障类型包括 IAG(I 回 A 相接地)、IAIIAG(I 回 A 相和 II 回 A 相接地)等, 接地故障包括金属性接地和过渡电阻(200 Ω)接地两种情况。

由表 1 的测距结果可见, 金属性接地时所提算法的最大误差为 0.87 km, 高阻接地时, 最大误差为 0.33 km, 误差都在 1 km 范围内。

通过上述故障仿真分析, 说明了本文所提方法测距精度较高, 不受过渡电阻影响, 解决了线路之间局部耦合的影响。

表 1 本文所提方法的测距结果

Table 1 Fault location results of presented algorithm

故障距离 (距 A 端)/ km	故障 区段	故障 类型	金属性接地		高阻接地	
			结果/km	误差/km	结果/km	误差/km
1	AD	IAG	1.29	0.29	0.93	-0.07
		IABG	0.96	-0.04	0.97	-0.03
		IAB	0.88	-0.12	0.98	-0.02
		IABCG	0.92	-0.08	1.01	0.01
		IAIIAG	1.50	0.50	0.96	-0.04
		IAIIBC	1.34	0.34	0.95	-0.05
5	AD	IAG	4.76	-0.24	4.89	-0.11
		IABG	4.96	-0.04	5.01	0.01
		IAB	4.90	-0.10	4.94	-0.06
		IABCG	4.41	-0.59	4.93	-0.07
		IAIIAG	4.66	-0.34	4.75	-0.25
		IAIIBC	5.06	0.06	4.97	-0.03
10	AD	IAG	9.24	-0.76	9.95	-0.05
		IABG	9.61	-0.39	9.99	-0.01
		IAB	9.37	-0.63	9.97	-0.03
		IABCG	9.51	-0.49	10.00	0.00
		IAIIAG	9.21	-0.79	9.95	-0.05
		IAIIBC	9.44	-0.56	9.90	-0.10
15	AD	IAG	15.29	0.29	14.85	-0.15
		IABG	15.21	0.21	14.98	-0.02
		IAB	15.68	0.68	15.01	0.01
		IABCG	15.65	0.65	15.01	0.01
		IAIIAG	15.06	0.06	14.89	-0.11
		IAIIBC	15.86	0.86	14.99	-0.01
20	D 点	IAG	20.01	0.01	19.94	-0.06
		IABG	20.01	0.01	19.98	-0.02
		IAB	20.49	0.49	19.98	-0.02
		IABCG	19.63	-0.37	19.75	-0.25
		IAIIAG	20.01	0.01	20.01	0.01
		IAIIBC	20.01	0.01	19.74	-0.26
25	BD	IAG	24.87	-0.13	25.06	0.06
		IABG	25.11	0.11	24.98	-0.02
		IAB	24.86	-0.14	25.10	0.10
	CD	IABCG	24.92	-0.08	24.97	-0.03
		IIAG	24.87	-0.13	25.04	0.04
		IIABG	25.11	0.11	25.00	0.00
30	BD	IIAB	25.03	0.03	25.19	0.19
		IIABCG	24.92	-0.08	24.92	-0.08
		IAG	30.41	0.41	29.97	-0.03
	CD	IABG	30.66	0.66	29.99	-0.01
		IAB	30.71	0.71	30.04	0.04
		IABCG	30.87	0.87	29.99	-0.01
35	BD	IIAG	30.39	0.39	29.97	-0.03
		IIABG	30.66	0.66	29.99	-0.01
		IIAB	30.85	0.85	30.00	0.00
	CD	IIABCG	30.87	0.87	29.99	-0.01
		IAG	34.90	-0.10	35.02	0.02
		IABG	34.89	-0.11	35.01	0.01
39	BD	IAB	34.88	-0.12	34.93	-0.07
		IABCG	34.72	-0.28	34.96	-0.04
		IIAG	34.90	-0.10	35.02	0.02
	CD	IIABG	34.89	-0.11	35.01	0.01
		IIAB	34.67	-0.33	34.85	-0.15
		IIABCG	34.87	-0.13	34.91	-0.09
39	BD	IAG	38.68	-0.32	38.95	-0.05
		IABG	39.11	0.11	38.99	-0.01
		IAB	39.85	0.85	39.33	0.33
	CD	IABCG	39.77	0.77	39.02	0.02
		IIAG	38.71	-0.29	38.95	-0.05
		IIABG	39.11	0.11	38.97	-0.03
CD	IIAB	39.74	0.74	39.01	0.01	
	IIABCG	39.77	0.77	39.01	0.01	

附录

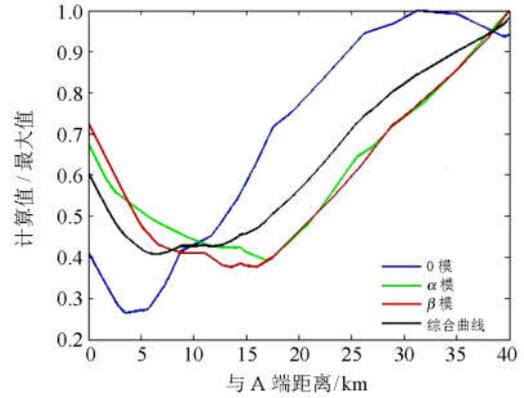


图 A1 传统算法的测距曲线(10 km 处故障)

Fig. A1 Fault location results by existing algorithm (fault distance: 10 km)

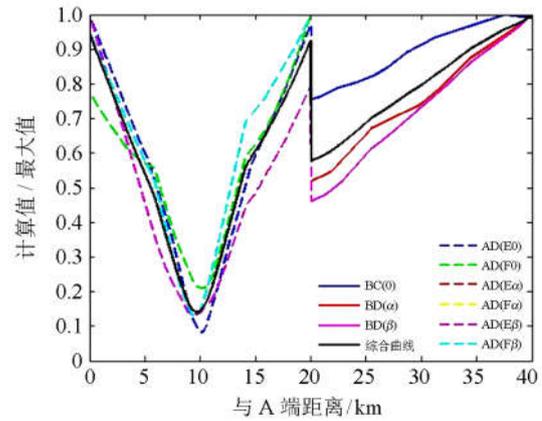


图 A2 本文所提算法的测距曲线(10 km 处故障)

Fig. A2 Fault location results by presented algorithm (fault distance: 10 km)

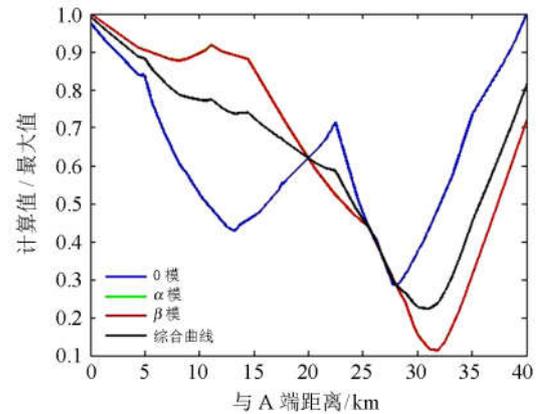


图 B1 传统算法的测距曲线(30 km 处故障)

Fig. B1 Fault location results by existing algorithm (fault distance: 30 km)

- 障精确定位研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 472-479.
- LIANG Rui, YANG Xuejun, XUE Xue, et al. Study of accurate single-phase grounding fault location based on distributed parameter theory using data of zero sequence components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 472-479.
- [14] 王钢, 徐子利, 梁远升, 等. 基于故障电弧方波曲线相似度的输电线路单端故障测距时域算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 109-113.
- WANG Gang, XU Zili, LIANG Yuansheng, et al. Single terminal time domain fault location method based on the similarity of square wave for arc grounding fault[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 109-113.
- [15] 罗显通, 罗建. 一种适于高阻接地的单端时域测距算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 6-9, 14.
- LUO Xiantong, LUO Jian. A time-domain fault location algorithm for high resistance grounding using one terminal data[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 6-9, 14.
- [16] 刘玲, 范春菊. 基于六序分量法的跨电压等级的同塔四回线的故障计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 6-11.
- LIU Ling, FAN Chunju. Fault calculation for joint four transmission lines of different voltage grades on the same tower based on six-sequence-component method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 6-11.
- [17] 林富洪, 王增平. 采用同向正序基频分量的双回线故障测距原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 93-98.
- LIN Fuhong, WANG Zengping. Fault locating method based on two-terminal common positive sequence fundamental frequency component for parallel transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 93-98.
- [18] 刘千宽, 李永斌, 黄少锋. 基于双端电气量的同杆平行双回线单线故障测距[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 27-30.
- LIU Qiankuan, LI Yongbin, HUANG Shaofeng. Single line fault location of parallel double transmission line on same tower based on two-terminal electrical quantities[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 27-30.
- [19] 徐鹏, 梁远升, 王钢. 同杆四回线参数自适应双端故障测距频域算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 59-64.
- XU Peng, LIANG Yuansheng, WANG Gang. A parameter adaptive fault location with two-terminal data for four-parallel transmission lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 59-64.
- [20] 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.

收稿日期: 2016-04-27; 修回日期: 2016-11-29

作者简介:

杜婉琳(1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统同塔多回线故障分析与故障测距;

梁远升(1980-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统故障分析与故障测距; E-mail: ysliang@scut.edu.cn

王钢(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护控制、自动化及可靠性。

(编辑 葛艳娜)