

# 基于故障可观性的输电线路故障定位方法

姜臻<sup>1</sup>, 苗世洪<sup>2</sup>, 刘沛<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司珠海供电局, 广东 珠海 519000;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 广泛研究的基于 WAMS 的故障定位算法都基于理想化的量测条件, 这使得它们在实际应用中受到限制。为了使电网在信息不全条件下(如极端气候、通信故障等)提供可靠的故障定位方案, 提出了一种基于故障可观性的输电线路故障定位方法。该方法采用分布参数输电线路模型, 可以更准确地考虑分布电容电流对故障定位精度的影响; 算法性能优异, 且不受故障初始相位角、负荷及故障路径阻抗的影响; 仅需要相量测量单元(PMU)的暂态数据信号, 无需系统阻抗等其他信息; 算法没有迭代过程, 计算速度快。诸多仿真分析验证了该方法的有效性和鲁棒性。

**关键词:** 故障定位; 故障可观性模型; 分布参数; 信息不全条件; 故障路径阻抗

## Fault observability model based fault location technique for transmission grids

JIANG Zhen<sup>1</sup>, MIAO Shihong<sup>2</sup>, LIU Pei<sup>2</sup>

(1. Zhuhai Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Limited Liability Corporation, Zhuhai 519000, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology

(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Extensive studies on WAMS based fault location technique are based on the idealized conditions of the measurement, so that they are limited in the actual applications in electric power system. In order to make the power grid to be provided reliable fault location technique on incomplete information conditions such as extreme weather, communication failures, etc., an effective fault location technique for transmission grids based on fault observability model is presented. High accuracy in fault location is achieved by using an accurate distributed parameter line model for the transmission lines. The performed work is provided with high performance which is featuring robustness to the uncertainties in fault inception angle, load current and fault path resistance. The transient fault data is obtained from PMUs in the proposed technique, and it does not require any information of the source impedance. This novel fault location technique does not need to be solved in an iterative manner and the calculation is fast. The validity and robustness of the proposed algorithm is evaluated by many simulations.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377068).

**Key words:** fault location; fault observability model; distributed parameters; incomplete information conditions; fault path resistance

## 0 引言

简单、快速、准确的故障定位对输电线路的运行和维护至关重要<sup>[1]</sup>。它必须做到能减轻现有巡线任务的工作负担, 及时发现线路绝缘隐患, 加速线路故障排查, 协助尽快恢复供电, 进而保障电网运

行的可靠性, 减少因停电造成的经济损失。

许多学者已经提出相关单端、双端、三端及多端的输电线路故障定位算法<sup>[2-8]</sup>。随着相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)技术在电力系统中的飞速发展及成熟应用, 许多基于 PMU 的输电线路故障定位技术也被提出<sup>[9-12]</sup>。然而, 为了达到较高的故障定位精度, 这些故障定位算法要求系统所有母线都必须安装 PMU, 这使得它们在实际应用中

受到限制。因此，如何在最少的 PMU 配置下实现快速、准确的故障定位，从而可为电网在信息不全条件下(如极端气候、通信故障等)提供可靠的故障定位方法已成迫切需要解决的关键问题。

类比电力系统状态可观性概念，故障可观性可以定义如下：当电网发生故障时，该故障可由已安装的PMU准确地定位出，这就说明该电网具有基于PMU量测的故障可观性<sup>[13-14]</sup>。文献[13]提出了一种基于PMU最优安装策略的新型输电线路故障定位算法，尽管如此，由于该算法需要进行复杂的数值迭代及接地阻抗评估，这使得该算法的实用性和可靠性大大降低。

在现代微机保护中，电网故障距离可以通过测量电压、电流值计算故障阻抗来求取。然而，由于受到分布电容、负荷电流及故障阻抗的影响<sup>[15-16]</sup>，仅仅通过保护安装处的电压、电流值来求取准确的故障距离是非常困难的。本文在PMU故障可观性的前提下，提出一种实用的输电线路故障定位方法。该方法具有如下几个特征：① 基于PMU故障可观性。也就是说，本方法并不需要在所有母线上都安装PMU，它可以实现PMU的最优配置，可以完成电网在状态信息不全条件下的故障定位功能。② 采用分布参数输电线路模型，从而可以更准确地考虑分布电容电流对故障定位精度的影响。③ 算法计算没有迭代过程，计算速度快。④ 只需要PMU的暂态数据信号，无需系统阻抗等其他信息。⑤ 算法性能优异，且不受故障初始相位角、负荷及故障路径阻抗的影响。本方法可以应对各种线路故障，且便于电力系统实际应用。诸多仿真分析验证了该方法的有效性和鲁棒性。

### 1 故障可观性分析

相量测量单元(PMU)可以实时测量其所在母线的电压相量和该母线所有进出线的电流相量，同时可以给这些测量量打上同步时标<sup>[17-18]</sup>，因此可以用来实现在广域范围内的故障定位算法。本文使用了一种间隔母线配置 PMU 的布点策略：首先将 PMU 装设在线路一端的母线上，然后在与线路没有配置 PMU 一端相邻的任一母线上配置一个 PMU，如此就可以对与这 3 个母线中的任 2 个母线相连的线路实现精确的故障定位。对于故障定位来说，这种 PMU 布点策略是实现故障可观性 PMU 配置量最少的布点策略<sup>[13]</sup>，它为实现电网在信息不全条件下(如极端气候、通信故障等)的故障定位方案提供了保障。根据这一 PMU 配置策略，任何复杂的电力网络都可以被划分为如图 1 所示的简化模型。

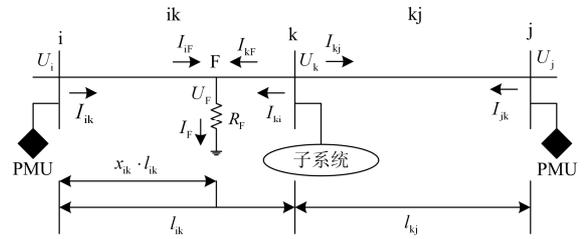


图 1 故障条件下输电网络简化模型

Fig. 1 Simplified model of a transmission network under fault

如图 1 所示，仅在母线 i 和母线 j 上配置 PMU，则母线 i、k、j 的组合就属于具有故障可观性的 PMUs 布点策略。图中仅母线 k 没有配置 PMU。子系统表示与母线 k 相连的其他拓扑，其内部结构不会对算法的结果造成影响。 $U_i$ 、 $U_k$ 、 $U_j$  分别为母线 i、k、j 的电压； $I_{ik}$  为支路 ik 上的电流，电流方向由母线 i 指向母线 k，其他电流量的定义类同。假设线路 ik 之间发生了故障，故障点距离母线 i 的距离占 ik 线路全长的百分比为  $x_{ik}$ 。

本文所描述的故障定位方法需要使用 PMU 测量点的电压和电流量。如表 1 所示，PMU 的相电压、相电流可用于单相接地故障(SLG)的故障定位，而线电压、线电流可用于两相接地故障(DLG)、相间故障(LL)和三相故障的故障定位。

表 1 测量分量说明

Table 1 Summary of the measured components

故障类型	测量分量
单相接地故障 (SLG)	$U_\varphi, I_\varphi$
相间故障 (LL)	$U_{\varphi\varphi}, I_{\varphi\varphi}$
两相接地故障(DLG)	$U_\varphi, I_\varphi$ or $U_{\varphi\varphi}, I_{\varphi\varphi}$
三相接地故障	$U_\varphi, I_\varphi$ or $U_{\varphi\varphi}, I_{\varphi\varphi}$

其中， $\varphi = a, b, c; \varphi\varphi = ab, bc, ca$ 。

### 2 故障定位算法

输电网络简化模型如图 1 所示。相量测量单元 PMU 仅安装在母线 i 和母线 j 上，连接母线 k 的子系统对本故障定位算法没有任何影响，因此对该子系统的类型不做任何限制，所以它可以是发电机、负载或是其他复杂的互联系统。母线 k 到母线 i、母线 j 的距离分别为  $l_{ik}$  和  $l_{kj}$ 。此外，本故障定位算法使用的是分布参数线路模型。

假设故障发生在线路 ik 上，如图 1 所示。尽管母线 k 上没有安装 PMU，但母线 k 的实际电压可以通过母线 j 上的 PMU 测量值来推导。其计算公式为

$$U_k = U_j \cosh(\gamma l_{kj}) - I_{jk} Z_c \sinh(\gamma l_{kj}) \quad (1)$$

其中： $\sinh(\cdot)$  和  $\cosh(\cdot)$  分别为正弦、余弦双曲函数；

$Z_C$  和  $\gamma$  分别表示与系统频率相关的波阻抗和传播常数。

通过母线  $i$  可以计算故障点  $F$  的电压、电流信息:

$$U_F = U_i \cosh(\gamma l_{ik} x_{ik}) - I_{ik} Z_C \sinh(\gamma l_{ik} x_{ik}) \quad (2)$$

$$I_{iF} = -\frac{U_i}{Z_C} \sinh(\gamma l_{ik} x_{ik}) + I_{ik} \cosh(\gamma l_{ik} x_{ik}) \quad (3)$$

其中,  $x_{ik}$  表示故障点  $F$  距母线  $i$  的距离占线路  $ik$  总长度的百分比值。

通过母线  $k$  可以计算故障点  $F$  的电压、电流信息如下:

$$U_F = U_k \cosh(\gamma l_{ik} (1 - x_{ik})) - I_{ki} Z_C \sinh(\gamma l_{ik} (1 - x_{ik})) \quad (4)$$

$$I_{kF} = -\frac{U_k}{Z_C} \sinh(\gamma l_{ik} (1 - x_{ik})) + I_{ki} \cosh(\gamma l_{ik} (1 - x_{ik})) \quad (5)$$

因此, 故障路径总电流为

$$I_F = I_{iF} + I_{kF} \quad (6)$$

根据式(1)、式(3)、式(5)和式(6), 可推故障路径总电流为

$$I_F = \frac{[U_j \cosh(\gamma l_{kj}) - I_{jk} Z_C \sinh(\gamma l_{kj})] - [U_i \cosh(\gamma l_{ik}) - I_{ik} Z_C \sinh(\gamma l_{ik})]}{Z_C \sinh(\gamma l_{ik} (1 - x_{ik}))} \quad (7)$$

对电力系统输电线路故障而言, 不论经电弧接地还是经大树接地, 故障通路都可以认为是纯电阻性的。由此, 故障通路电流  $I_F$  和故障点电压  $U_F$  的相位可以视为相等。此外, 这个性质也适用于金属性短路故障, 这是因为金属性短路故障点电压为 0。因此, 线路故障点应满足如下条件:

$$\text{Arg}(U_F) = \text{Arg}(I_F) \quad (8)$$

此外, 测量电压、电流的正序、负序和零序分量同样满足式(1)~式(7), 只是相应的波阻抗及传播常数需要对应正、负和零序的参数值。在下文中, 正、负和零序分量分别用下标“1”, “2”和“0”区分。为了简化公式表达, 现定义:  $D_{ik1} = \gamma_1 l_{ik}$ ,  $D_{ik0} = \gamma_0 l_{ik}$ ,  $D_{kj1} = \gamma_1 l_{kj}$  及  $D_{kj0} = \gamma_0 l_{kj}$ 。

当系统发生单相接地故障(SLG)时, 如表 1 所示, 测点相电压  $U_\phi$  和相电流  $I_\phi$  将用于故障定位,

$$\text{Con\_ik} = \frac{Z_{C0}}{2Z_{C1}} \cdot \frac{[(U_{j1} + U_{j2}) \cosh D_{kj1} - (I_{jk1} + I_{jk2}) Z_{C1} \sinh D_{kj1}] - [(U_{i1} + U_{i2}) \cosh D_{ik1} - (I_{ik1} + I_{ik2}) Z_{C1} \sinh D_{ik1}]}{[U_{j0} \cosh D_{kj0} - I_{jk0} Z_{C0} \sinh D_{kj0}] - [U_{i0} \cosh D_{ik0} - I_{ik0} Z_{C0} \sinh D_{ik0}]}$$

因此, 可以得到如下关系:

$$\begin{aligned} E_2 \cosh(D_{ik1} x_{ik}) + F_2 \sinh(D_{ik1} x_{ik}) = \\ G_2 \cosh(D_{ik0} x_{ik}) + H_2 \sinh(D_{ik0} x_{ik}) \end{aligned} \quad (14)$$

其中,

此时故障路径电流的正序、负序和零序分量之间的关系如下:

$$I_{F1} = I_{F2} = I_{F0} = \frac{1}{3} I_F \quad (9)$$

根据式(8)可推:

$$\frac{\text{Im}(U_F)}{\text{Re}(U_F)} = \frac{\text{Im}(I_{F1})}{\text{Re}(I_{F1})} \quad (10)$$

其中,

$$\begin{aligned} U_F = & (U_{i1} + U_{i2}) \cosh(D_{ik1} x_{ik}) - \\ & (I_{ik1} + I_{ik2}) Z_{C1} \sinh(D_{ik1} x_{ik}) + \\ & U_{i0} \cosh(D_{ik0} x_{ik}) - I_{ik0} Z_{C0} \sinh(D_{ik0} x_{ik}); \\ I_{F1} = & \frac{[U_{j1} \cosh D_{kj1} - I_{jk1} Z_{C1} \sinh D_{kj1}] - [U_{i1} \cosh D_{ik1} - I_{ik1} Z_{C1} \sinh D_{ik1}]}{Z_{C1} \sinh(D_{ik1} (1 - x_{ik}))} \end{aligned}$$

由于  $D_{ik1}$ ,  $D_{ik0}$ ,  $D_{kj1}$  和  $D_{kj0}$  数值的实部非常小, 而且这些数值的余弦双曲函数值  $\cosh(\cdot)$  可以认为是一个纯实数, 正弦双曲函数值  $\sinh(\cdot)$  可以认为是一个纯虚数。因此, 根据式(10), 可得如下关系:

$$\begin{aligned} E_1 \cosh(D_{ik1} x_{ik}) + F_1 \sinh(D_{ik1} x_{ik}) = \\ G_1 \cosh(D_{ik0} x_{ik}) + H_1 \sinh(D_{ik0} x_{ik}) \end{aligned} \quad (11)$$

其中,

$$E_1 = \text{Im}(U_{i1} + U_{i2}) - \frac{\text{Im}(I_{F1})}{\text{Re}(I_{F1})} \cdot \text{Re}(U_{i1} + U_{i2});$$

$$F_1 = \left( -\text{Im}[j(I_{ik1} + I_{ik2}) Z_{C1}] + \frac{\text{Im}(I_{F1})}{\text{Re}(I_{F1})} \cdot \text{Re}[j(I_{ik1} + I_{ik2}) Z_{C1}] \right) / j;$$

$$G_1 = \frac{\text{Im}(I_{F1})}{\text{Re}(I_{F1})} \cdot \text{Re}(U_{i0}) - \text{Im}(U_{i0});$$

$$H_1 = \left( \text{Im}[j I_{ik0} Z_{C0}] - \frac{\text{Im}(I_{F1})}{\text{Re}(I_{F1})} \cdot \text{Re}[j I_{ik0} Z_{C0}] \right) / j。$$

根据(9)可得:

$$\frac{I_{F1} + I_{F2}}{I_{F0}} = 2 \quad (12)$$

相应地可以表达如下:

$$\frac{\sinh(D_{ik1} (1 - x_{ik}))}{\sinh(D_{ik0} (1 - x_{ik}))} = \text{Con\_ik} \quad (13)$$

其中,

$$\begin{aligned} E_2 = \sinh D_{ik1}, F_2 = -\cosh D_{ik1}, G_2 = \text{Con\_ik} \cdot \sinh D_{ik0}, \\ H_2 = -\text{Con\_ik} \cdot \cosh D_{ik0}。 \end{aligned}$$

根据双曲函数特性  $\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1$ , 式(11)及式(14)可知, 故障定位的结果方程如下:

$$x_{ik} = \frac{1}{D_{ik1}} \operatorname{arccosh} \left( \sqrt{\frac{-f + \sqrt{f^2 - 4eg}}{2e}} \right) \quad (15)$$

其中,

$$a = \frac{E_2 G_1 - E_1 G_2}{H_2 G_1 - H_1 G_2}; \quad b = \frac{F_2 G_1 - F_1 G_2}{H_2 G_1 - H_1 G_2};$$

$$c = \frac{E_2 H_1 - E_1 H_2}{G_2 H_1 - G_1 H_2}; \quad d = \frac{F_2 H_1 - F_1 H_2}{G_2 H_1 - G_1 H_2};$$

$$e = (c^2 - a^2 + d^2 - b^2)^2 - (2ab - 2cd)^2,$$

$$f = 2(c^2 - a^2 + d^2 - b^2)(b^2 - d^2 - 1) + (2ab - 2cd)^2,$$

$$g = (b^2 - d^2 - 1)^2.$$

当系统发生相间故障(LL)时,如表1所示,由于相间故障不会产生零序分量,测点线电压 $U_{\varphi\varphi}$ 和线电流 $I_{\varphi\varphi}$ 将用于故障定位。此时故障点电压 $U_F$ 及故障路径电流 $I_F$ 分别为

$$U_F = U_i \cosh(D_{ik1} x_{ik}) - I_{ik} Z_{C1} \sinh(D_{ik1} x_{ik}) \quad (16)$$

$$I_F = \frac{[U_j \cosh D_{kj1} - I_{jk} Z_{C1} \sinh D_{kj1}] - [U_i \cosh D_{ik1} - I_{ik} Z_{C1} \sinh D_{ik1}]}{Z_{C1} \sinh(D_{ik1}(1 - x_{ik}))} \quad (17)$$

根据式(8),故障距离 $x_{ik}$ (从母线i到故障点F)满足如下关系:

$$\frac{\operatorname{Im} A_{ik} \cdot \cosh(D_{ik1} x_{ik}) - B_{ik} \cdot \sinh(D_{ik1} x_{ik})}{\operatorname{Re} A_{ik} \cdot \cosh(D_{ik1} x_{ik}) - C_{ik} \cdot \sinh(D_{ik1} x_{ik})} = \frac{\operatorname{Im} I_F}{\operatorname{Re} I_F} \quad (18)$$

其中, $A_{ik} = U_i$ ;  $B_{ik} = \operatorname{Im}(jI_{ik} Z_{C1})/j$ ;  $C_{ik} = \operatorname{Re}(jI_{ik} Z_{C1})/j$ 。

因此,可以准确地推出 $x_{ik}$ 计算值如下:

$$x_{ik} = \frac{1}{D_{ik1}} \operatorname{arctanh} \left( \frac{\operatorname{Im} A_{ik} \cdot \operatorname{Re} I_F - \operatorname{Re} A_{ik} \cdot \operatorname{Im} I_F}{B_{ik} \cdot \operatorname{Re} I_F - C_{ik} \cdot \operatorname{Im} I_F} \right) \quad (19)$$

当系统发生两相接地故障(DLG)和三相接地故障时,故障定位可按式(19)进行计算。由于 $D_{ik1}$ 是一个复数,所以式(15)和式(19)的计算结果也应该是一个复数。考虑到 $D_{ik1}$ 的实数部分非常小,所以 $x_{ik}$ 计算结果的虚数部分几乎为0。因此, $x_{ik}$ 的实数部分就可以视为准确的故障发生距离。

同理,假设故障发生在线路kj上,故障距离 $x_{kj}$ 可以通过类似的方法进行计算。

### 3 故障定位计算流程

基于PMU故障可观性配置的新型故障定位方法工作流程如图2所示。PMU*i*和PMU*j*的三相电压、电流测量信号被同步采集,这包括各相电压 $U_\varphi$ 、相电流 $I_\varphi$ 、各线电压 $U_{\varphi\varphi}$ 及线电流 $I_{\varphi\varphi}$ 。其中,各相电压 $U_\varphi$ 、相电流 $I_\varphi$ 可根据对称分量变换分解为正、

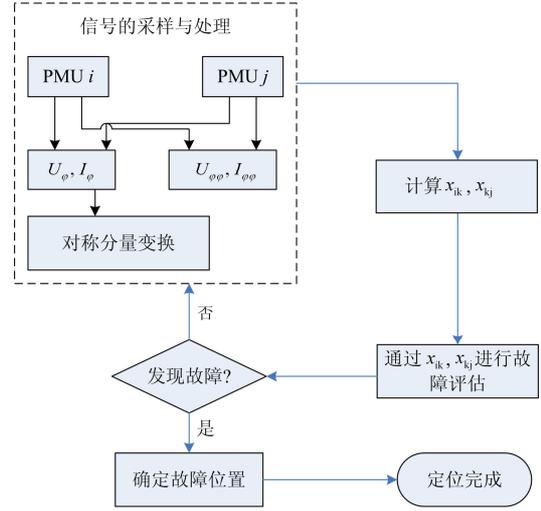


图2 故障定位技术流程图

Fig. 2 Flowchart of the fault location scheme

负和零序分量,以便用于故障定位的计算。根据式(16)和式(19),就可以求得故障距离 $x_{ik}$ 。同理,也可以求得 $x_{kj}$ 。

假设故障发生在线路ik或者线路kj上,可以相应地计算出两个故障定位值 $x_{ik}$ 和 $x_{kj}$ 。由于二者之中只有一个是正确的故障距离,因此,为了选择正确的故障距离,就需要对这两个故障定位值进行故障评估。现将两个故障定位值 $x_{ik}$ 和 $x_{kj}$ 划分成如下五种类型:

- 1)  $x_{ik} \in (0,1), x_{kj} \notin (0,1)$ ;
- 2)  $x_{ik} \notin (0,1), x_{kj} \in (0,1)$ ;
- 3)  $x_{ik} \in (0,1), x_{kj} \in (0,1)$ ;
- 4)  $x_{ik} \notin (0,1), x_{kj} \notin (0,1)$ ;
- 5)  $x_{ik} = 1, x_{kj} = 0$ 。

由于 $x_{ik}$ 和 $x_{kj}$ 相应地表示故障发生在线路ik和线路kj上的距离百分比,而正确的 $x_{ik}$ 或 $x_{kj}$ 必须满足故障定位值假设: $x_{ik} \in (0,1)$ 或 $x_{kj} \in (0,1)$ 。因此,上述类型1)、类型2)的故障发生距离就可以认定为 $x_{ik}$ 、 $x_{kj}$ 。如果所求 $x_{ik}$ 、 $x_{kj}$ 结果符合类型3),这说明计算过程发生错误,从而故障将被判定为外部故障。如果所求结果符合类型4),由于 $x_{ik}$ 、 $x_{kj}$ 值都未落在内部故障区间(0,1)中,因此可以认定故障没有发生在线路ik和线路kj上(外部故障或无故障)。可视类型5)为母线k上的故障,尽管此时的 $x_{ik}$ 计算值并不一定严格等于1。鉴于母线故障探测的重要

性, 并为能及时探测出母线故障, 现设定判据如下:

$$|x_{ik} - 1| < \varepsilon \cap |x_{kj}| < \varepsilon \quad (20)$$

其中,  $\varepsilon$  可以设定为一个非常小的正实数。

## 4 算例分析

### 4.1 仿真模型

为了验证所提算法的有效性和鲁棒性, 本文使用PSCAD/EMTDC仿真平台, 建立了一个经典的500 kV、50 Hz输电系统模型, 如图3所示。该模型为两台800 MVA发电机组通过输电线路向大电网(无穷大系统)供电。测量单元PMUs分别安装在母线1和母线3上。相应的仿真简化模型如图4所示。其中, 故障分别设置在线路12(母线1到母线2之间的输电线路)、线路23(母线2到母线3之间的输电线路)、母线2、线路13(母线1到母线3之间的输电线路)上。F1, F2和F3可以认为是内部故障, 而F4则可认定为外部故障。尽管如此, F4仍然可以通过母线1和母线3上的PMU精确定位出, 而且这种基于线路两端PMU的故障定位技术已经十分成熟<sup>[2,18]</sup>, 故而这种情况不在本文研究范围之内。该系统仿真模型的相关参数如图3所示。整个仿真时间为3 s。

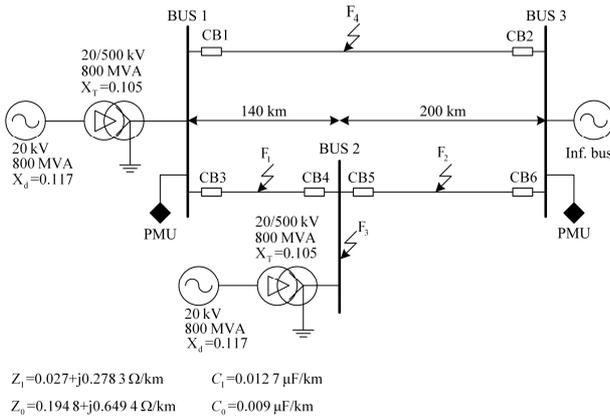


图3 仿真系统模型

Fig. 3 System model for simulation

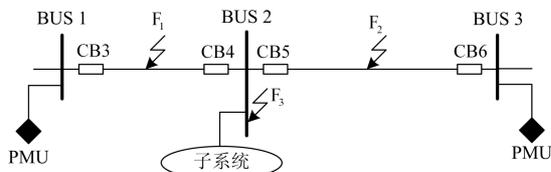


图4 仿真系统简化模型

Fig. 4 Simplified system model for simulation

故障定位的百分比误差定义如下:

$$\text{误差} = \frac{|\text{实际故障距离(p.u.)} - \text{故障距离计算值(p.u.)}|}{\text{故障距离计算值(p.u.)}} \times 100\% \quad (21)$$

为了验证故障定位方法的相关性能, 本文进行了大量的算例分析, 这些分析详见以下几个小节。

### 4.2 故障定位精度评估

为了评估本文故障定位方法的精度, 如图3所示的PSCAD/EMTDC仿真系统模型设置了不同类型、通道电阻及发生距离的输电线路故障。在这部分的仿真研究中, 故障发生时刻 $t$ 设置为2 s。其中, 仿真设置的故障类型包括: A-g(单相接地故障), BC-g(两相接地故障), CA(两相相间故障)和ABC-g(三相接地故障)。仿真结果详见表2~表4, 它们分别列出了线路12、线路23和线路13上的故障定位结果, 其中 $x_{12}$ 表示从母线1到故障点距离占线路12总距离的百分比,  $x_{23}$ 表示从母线2到故障点距离占线路23总距离的百分比。从表中结果可以看出, 本文故障定位方法故障定位的最大误差值仅为2.12%。

现举例说明, 如表2所示, 两相相间故障(CA相间故障带5 Ω故障通道电阻)发生在线路12上, 距离母线10.25 p.u. (35 km)处。在这个算例中,  $x_{12}$ 计算值为0.245 4 p.u., 而 $x_{23}$ 计算值为-0.735 9 p.u.,

表2 线路12上故障定位精度评估表

Table 2 Summary for the performance of the proposed

fault location scheme on line 12

故障类型	实际故障点/ p.u.	$x_{12}$ /p.u.	$x_{23}$ /p.u.	误差/ %
A-G with 10 Ω	0.1	0.093 4	-1.114 9	0.66
A-G with 100 Ω	0.5	0.488 0	-0.661 9	1.20
A-G with 300 Ω	0.9	0.921 2	-0.222 7	2.12
BC-G with 5 Ω	0.4	0.393 0	-0.591 6	0.70
BC-G with 10 Ω	0.8	0.788 7	-0.209 1	1.13
CA with 5 Ω	0.25	0.245 4	-0.735 9	0.46
CA with 10 Ω	0.75	0.738 5	-0.256 2	1.15
ABC-G	0.6	0.599 9	-0.399 3	0.01
ABC-G	1.0	0.998 8	-0.001 4	-

表3 线路23上故障定位精度评估表

Table 3 Summary for the performance of the proposed

fault location scheme on line 23

故障类型	实际故障点/ p.u.	$x_{12}$ /p.u.	$x_{23}$ /p.u.	误差/ %
A-G with 10 Ω	0.1	1.427 5	0.103 5	0.35
A-G with 100 Ω	0.5	3.394 0	0.489 0	1.10
A-G with 300 Ω	0.9	6.118 2	0.879 6	2.04
BC-G with 5 Ω	0.4	2.310 6	0.399 6	0.04
BC-G with 10 Ω	0.8	3.727 7	0.790 2	0.98
CA with 5 Ω	0.25	1.829 8	0.248 6	0.14
CA with 10 Ω	0.75	3.540 2	0.730 3	1.97
ABC-G	0.6	2.995 1	0.600 1	0.01

表 4 线路 13 上故障定位精度评估表(外部故障)  
Table 4 Summary for the performance of the proposed fault location scheme on line 13 (external fault)

故障类型	实际故障点/ p.u.	$x_{12}$ /p.u.	$x_{23}$ /p.u.	误差/ %
A-G with 10 $\Omega$	0.1	1.321 1	-1.774 7	-
A-G with 100 $\Omega$	0.5	1.561 0	-2.787 8	-
A-G with 300 $\Omega$	0.9	2.414 3	-3.373 4	-
BC-G with 5 $\Omega$	0.4	-1.098 0	-2.127 0	-
BC-G with 10 $\Omega$	0.8	-1.741 8	-2.661 7	-
CA with 5 $\Omega$	0.25	-0.753 4	-1.827 3	-
CA with 10 $\Omega$	0.75	-1.677 5	-2.610 1	-
ABC-G	0.6	-1.461 9	-2.433 4	-

因此, 正确的故障定位值可以认定为 0.245 4 p.u. (34.356 km), 同时, 故障定位误差为 0.46%。如表 3, 两相接地故障(BC 两相接地故障带 10  $\Omega$  故障通道电阻)发生在线路 23, 距离母线 2 0.8 p.u. (160 km) 处。在这个算例中,  $x_{12}$  计算值为 3.727 7 p.u., 而  $x_{23}$  计算值为 0.790 2 p.u., 因此, 正确的故障定位值可以认定为 0.790 2 p.u. (158.04 km), 同时, 故障定位误差为 0.98%。如表 2, 三相接地故障(ABC 三相接地故障)发生在母线 2 上。在这个算例中,  $x_{12}$  计算值为 0.998 8 p.u., 而  $x_{23}$  计算值为 -0.001 4 p.u.。由于故障定位误差极小(故障定位的最大误差值仅为 2.12%), 所以式(20)中的  $\varepsilon$  只需要设置为一个很小实数即可。在本仿真算例中,  $\varepsilon$  设置为 0.025。因此, 该算例计算值可以认定为故障发生在母线 2 上。如表 4 所示, 单相接地故障(A 单相接地故障带 300  $\Omega$  故障通道电阻)发生在线路 13 上, 距离母线 1 0.9 p.u. (306 km) 处。在这个算例中,  $x_{12}$  计算值为 2.414 3 p.u., 而  $x_{23}$  计算值为 -3.373 4 p.u., 因此, 该算例故障可仍定为外部故障。

### 4.3 暂态响应评估

这部分对故障定位方法的暂态响应进行了评估。图 5(a)显示的是线路 12 上距离母线 1 0.25 p.u. (35 km) 处 CA 相间故障(带 5  $\Omega$  故障电阻)的暂态故障定位轨迹。图 5(b)是线路 23 上距离母线 2 0.8 p.u. (160 km) 处 BC 两相接地故障(带 10  $\Omega$  故障电阻)的暂态故障定位轨迹。图 5(c)是母线 2 上 ABC 三相接地故障的暂态故障定位轨迹。图 5(d)是线路 13 上距离母线 1 0.9 p.u. (306 km) 处 A 相接地故障(带 300  $\Omega$  故障电阻)的暂态故障定位轨迹。从这些算例可以看出,  $x_{12}$  和  $x_{23}$  是按照不同的轨迹巡行的。故障发生时刻为 2 s, 从这些暂态响应评估图可以看出, 正确的故障定位结果可以在故障发生 20 ms 后得到。

### 4.4 故障初始相位角对定位的影响评估

为了验证本文故障定位方法的鲁棒性, 考虑电

力系统事件的多变性, 本小节重点评估故障初始相位角对定位的影响。不同故障初始角的暂态响应轨迹如图 6 所示。现设置单相接地故障(A 相带 30  $\Omega$  故障电阻)发生在线路 12 上距离母线 1 0.50 p.u. (70 km) 处, 并评估 6 个故障初始相位角的暂态响应, 这 6 个故障初始相位角分别是: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°和 225°(相对于 A 相电压过零点的相位角度)。结果表明: 不同故障初始相位角的故障暂态响应轨迹虽然不同, 但它们并不影响最终的故障定位误差。

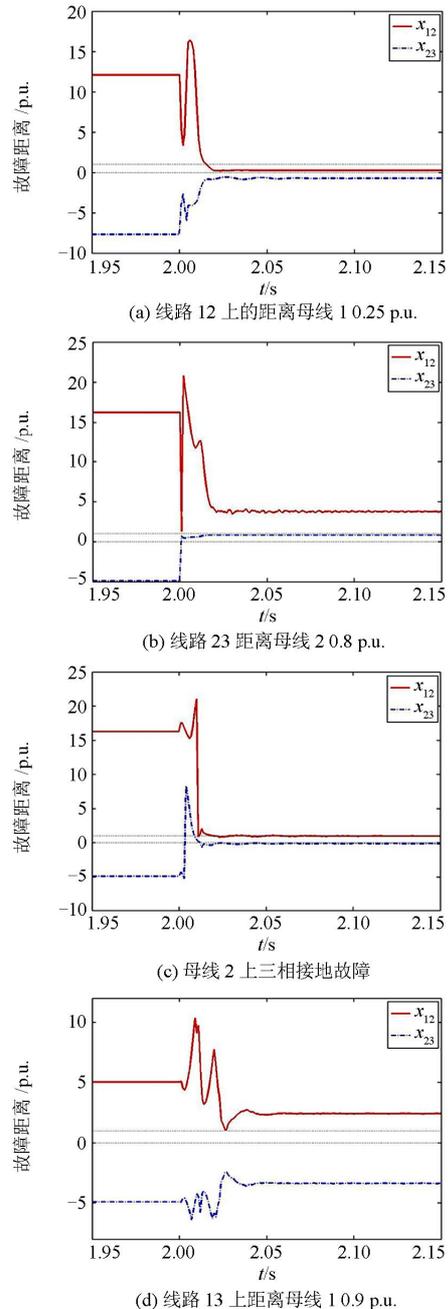


图 5 故障定位暂态响应评估  
Fig. 5 Fault location estimation

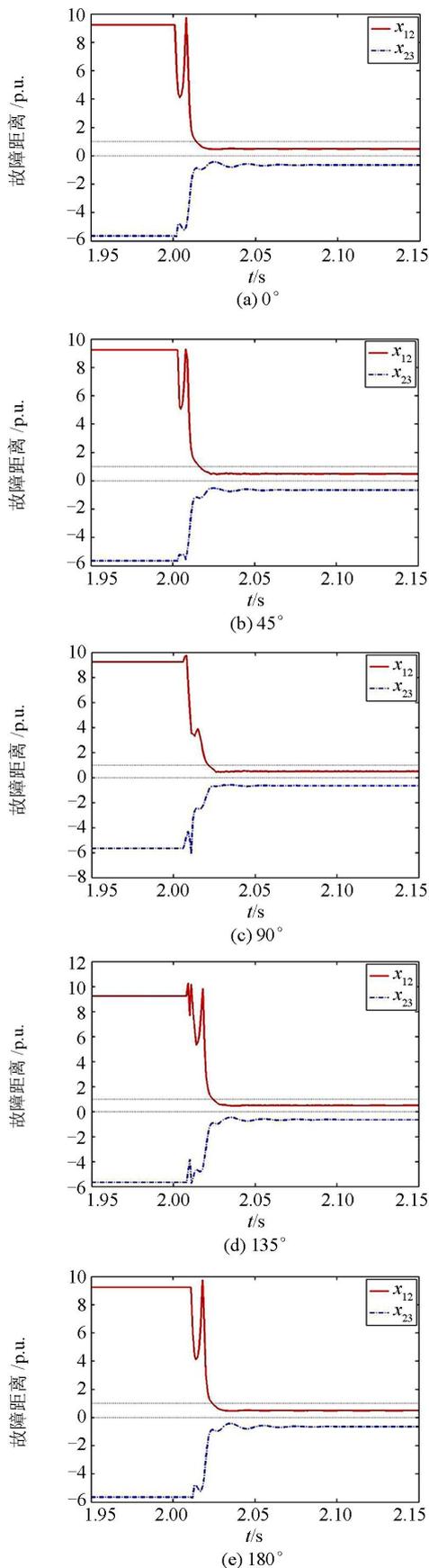


图6 线路12上距离母线10.5 p.u.处A单相接地故障(带30 Ω故障通道电阻)故障初始相位角对定位的影响评估

Fig. 6 Performance evaluation of different fault inception angles for A-g with 30 Ω at 0.50 p.u. away from bus 1 on line 12

#### 4.5 稳态误差评估

线路12上不同类型故障的定位误差的统计评估如图7所示。从图中可以清晰地看出,当故障发生位置不同时,故障定位误差并没有多少变化,同时在算例中,定位误差没有超过0.6%,定位性能优异。此外,也对不同故障通道电阻下的稳态定位误差进行了对比、分析。图8显示的是线路23上单相接地故障(A相接地)带不同故障通道电阻的稳态定位误差分析。分析结果表明,本文故障定位方法的误差并不会随着故障通道电阻大小的改变而发生较大的变化。当故障通道电阻由0向300 Ω变化时,故障定位误差最大值为2.12%。此外,当故障带较小的通道电阻时,定位误差几乎不变,而这是由于本文故障定位方法算法本身的特征决定的。

#### 4.6 误差来源分析

本文故障定位方法基于如下假设:  $D_{ik1}(\gamma_1 l_{ik})$ ,  $D_{ik0}(\gamma_0 l_{ik})$ ,  $D_{kj1}(\gamma_1 l_{kj})$ ,  $D_{kj0}(\gamma_0 l_{kj})$ 的实部非常小,所以它们的余弦双曲函数值  $\cosh(\cdot)$  可以认定为实数,正弦双曲函数值  $\sinh(\cdot)$  可以认定为虚数。

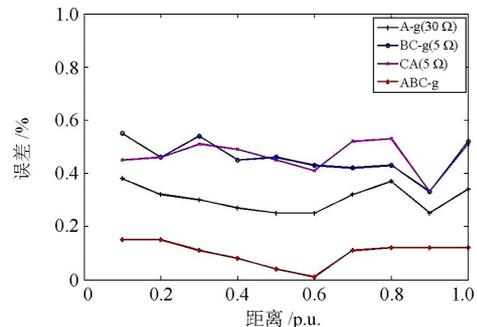


图7 线路12上不同类型故障的定位误差评估

Fig. 7 Statistical evaluation of the fault location estimation with respect to different faults occurred in line 12 away from bus 1

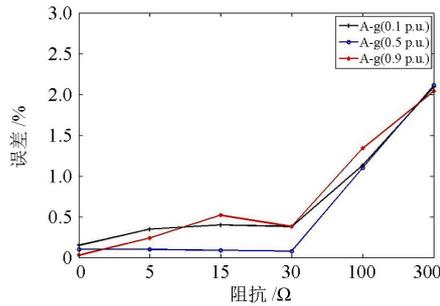


图8 线路23上单相接地故障(A-g)带不同故障通道电阻时的定位误差评估

Fig. 8 Effects of faults resistances on the fault location estimation following an A-g fault occurred in line 23 away from bus 2

传播常数  $\gamma$  可以按如下算式计算<sup>[19]</sup>:

$$\gamma = \sqrt{(g_0 + j\omega C_0)(r_0 + j\omega L_0)} \quad (22)$$

其中,  $r_0$ ,  $L_0$ ,  $g_0$  和  $C_0$  分别表示输电线路单位长度的电阻、电感、电导和电容值。

对超高压/特高压输电线路来说,  $g_0 \approx 0$ ,  $r_0 \ll \omega L_0$ 。因此, 根据(22)可推:

$$\gamma \approx \frac{r_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + j\omega \sqrt{L_0 C_0} \approx j\omega \sqrt{L_0 C_0} \quad (23)$$

从式(23)可以看出, 对传播常数  $\gamma$  所做的假设是造成故障定位误差的原因, 而且该误差还会随着输电线路阻抗角或 X/R 比值的变化而变化。事实上, 500 kV 典型输电线路的阻抗角为  $86^\circ$ , 并且输电线路的电阻值是十分小的<sup>[20]</sup>。此外, 本文故障定位方法采用的是分布参数模型, 所以该方法的定位精度基本不受分布电容的影响。通过上述仿真可知, 本方法的故障定位精度是非常高的。

## 5 结论

本文提出了一种基于故障可观性的输电线路故障定位方法, 它提供了电网在信息不全条件下的故障定位方法。该方法采用分布参数输电线路模型, 可以更准确地考虑分布电容电流对故障定位精度的影响; 算法性能优异, 且不受故障初始相位角、负荷及故障路径阻抗的影响; 仅需要相量测量单元(PMU)的暂态数据信号, 无需系统阻抗等其他信息; 算法没有迭代过程, 计算速度快。本方法可以应对各种线路故障, 且便于电力系统实际应用。诸多仿真分析验证了该方法的有效性和鲁棒性。

## 参考文献

- [1] TAKAGI T T, YAMAKOSHI Y, BABA J, et al. Development of a new fault locator using the

one-terminal voltage and current data[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(8): 2892-2898.

- [2] XU Z, JIAO S, RAN L, et al. An online fault-locating scheme for EHV/UHV transmission lines[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(6): 789-799.

- [3] GIRGIS A A, HART D G, PETERSON W L. A new fault location technique for two- and three-terminal lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 98-107.

- [4] 徐子华, 王艳松. 基于强跟踪滤波器的输电线路单端故障测距新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 54-59.

XU Zihua, WANG Yansong. A new one-terminal fault location for transmission lines based on strong tracking filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 54-59.

- [5] 曲广龙, 杨洪耕, 吴晓清, 等. 考虑电网拓扑结构的行波故障定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6): 117-122.

QU Guanglong, YANG Honggeng, WU Xiaoping, et al. Fault location with traveling wave considering network topological structure[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2013, 25(6): 117-122.

- [6] 钱佳琪, 叶佳卓, 旷哲, 等. 基于 S 变换的多端输电网络故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 82-88.

QIAN Jiaqi, YE Jiazhao, KUANG Zhe, et al. A fault-location method for multi-terminal transmission network based on S transform[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 82-88.

- [7] 赵军, 袁雪琼, 阮琦, 等. 基于对地参数跟踪测量的不接地系统单相接地故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 81-85.

ZHAO Jun, YUAN Xueqiong, RUAN Qi, et al. Research on single phase grounding fault phase selection based on ground parameter tracking and measurement[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 81-85.

- [8] 任琴, 舒勤, 刘勇. 基于对称注入法反射波特征提取的配电网故障测距算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 19-25.

REN Qin, SHU Qin, LIU Yong. A fault location algorithm for distribution network based on extracting features from the reflected wave of symmetrical injection method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 19-25.

- [9] JIANG J A, YANG J Z, LIN Y H, et al. An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission

- lines, I: theory and algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 486-493.
- [10] JIANG J A, LIN Y H, YANG J Z, et al. An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines, II: PMU implementation and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(4): 1136-1146.
- [11] 鞠平. 电力系统广域测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [12] 王波, 周昱勇. 基于 PMU 的多端传输线路故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 32-35, 39.  
WANG Bo, ZHOU Yuyong. A novel PMU-based fault location algorithm for multi-terminal transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 32-35, 39.
- [13] LIEN K, LIU C, YU C, et al. Transmission network fault location observability with minimal PMU placement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1128-1136.
- [14] BALDWIN T L, MILI L, JR BOISEN M B, et al. Power system observability with minimal phasor measurement placement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(2): 707-715.
- [15] 马杰, 李磊, 李乃永, 等. 基于故障信息的高阻接地故障辨识与定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 74-78.  
MA Jie, LI Lei, LI Naiyong, et al. Identification and location of high-resistance grounding fault based on fault records[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 74-78.
- [16] 张恽宁, 束洪春, 田鑫萃, 等. 特高压直流输电线路接地极线路高阻故障测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 1-7.  
ZHANG Yining, SHU Hongchun, TIAN Xincui, et al. Research on fault location algorithm for HVDC electrode line high impedance fault[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 1-7.
- [17] IEEE Standard C37.118-2005 (Revision of IEEE Std 1344-1995). IEEE standard for synchrophasors for power systems[S].
- [18] 徐浩, 苗世洪, 姜臻, 等. 基于有限相量测量单元测量故障分量信息的故障定位算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 43-48.  
XU Hao, MIAO Shihong, JIANG Zhen, et al. A new fault location algorithm based on fault component from finite synchronized phasor measurement unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 43-48.
- [19] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(上册) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [20] WANG Y J, LIU C W, LIU Y H. A PMU based special protection scheme: a case study of Taiwan power system[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27: 215-223.
- 
- 收稿日期: 2015-08-29; 修回日期: 2015-11-02
- 作者简介:  
姜 臻(1986-), 男, 博士, 研究方向为电力系统安全分析、故障分析、继电保护及变电站自动化; E-mail: Jz8612@126.com  
苗世洪(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全控制、继电保护与自动化; E-mail: sa2000999@126.com  
刘 沛(1944-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护及变电站综合自动化。E-mail: sunliupeiqq.com
- (编辑 葛艳娜)