

基于故障区域快速识别的混合线路故障测距新原理

张斯淇,李永丽,陈晓龙

(天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:提出一种基于故障区域快速识别的架空线-电缆混合线路故障测距新原理。根据故障区域识别函数在线路连接点的相位特征判断故障区域,进而利用混合线路正序测距方程推算得到的故障距离表达式在故障线路段上进行精确测距。该算法无需判断故障类型,在线路连接点附近故障区域识别无死区,测距过程无需迭代搜索和伪根识别,计算量小,易于编程实现。仿真测试表明,新算法不受故障位置、过渡电阻和负荷电流等因素的影响,满足工程对测距精度的要求。

关键词:混合线路;故障测距;故障区域识别函数;相位特征

中图分类号:TM 77

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.026

0 引言

由于城市土地资源紧张,以及受周围建筑物影响,城市输电线路逐步由以往占地较多的明线架空方式改为埋地的电缆方式。高压电力电缆与架空线路相比占用空间少,不易受环境影响,运行更加安全稳定。就电气参数特性而言,电缆线路对地分布电容更大且单位长度电感更小,其线路波阻抗较架空线小得多,故障发生后波过程更加明显。由于电缆线路造价昂贵且施工难度较大,我国多采用架空线-电缆混合输电线路输电。架空线-电缆混合输电线路的架空线路段故障多为瞬时性故障,电缆实际运行时发生故障的概率比架空线小得多,但随着电缆绝缘介质老化,其绝缘性能随之下降,容易引发永久性接地故障。由于架空线和电缆的故障原因以及由此导致的故障性质大不相同,在故障发生后快速划分故障区域并准确定位故障,对于提高重合闸的重合成功率、减轻巡线负担和加快恢复供电具有十分重要的意义^[1-2]。

根据测距原理的不同,架空线-电缆混合输电线路的故障测距算法主要可以分为行波法^[3-8]和故障分析法^[9-14]2类。行波法具有测距速度快、不受过渡电阻影响等优点,但容易受架空线和电缆线路接合处行波多次折反射的影响,存在波头识别问题,且需要投入专门设备,技术较为复杂。故障分析法对设备要求低,投资小,工程实用性强。文献[9]通过比较由线路两端推算得到的架空线、电缆线路连接点处电压幅值的大小关系判断故障区域,但当故障位置靠近架空线和电缆线路连接点时,从线路两端推算的连接点电压幅值几乎相等,容易发生故障区域的误判定;文献[10]采用了与文献[9]相同的故障区段判定方法,同时考虑了测量误差因素,引入误差

限度参数对判定条件进行修改;文献[11]利用线路两端电气量推得线路上沿线各点的电压分布,根据从两端推得的故障点处电压幅值相等确定故障点,由于沿线各点电压幅值曲线可能呈现非单调性,测距结果需要进行伪根判断;文献[12]利用定位函数在架空线-电缆混合输电线路所选参考点与故障点相匹配时相位唯一过零这一特征定位故障,在全线路范围内搜索计算以寻找故障点,计算量较大;文献[13]利用故障区段识别函数在架空线和电缆线路连接点处的正负特征判断故障区域,在故障线路段上搜索或计算得到故障点位置,算法简单实用,但其对于实际工程中的三段混合线路的适用性还需进一步探讨。

针对已有算法中存在的问题,本文提出一种基于故障区域快速识别的架空线-电缆混合输电线路的故障测距新原理。本文算法采用分布参数模型建模,从原理上避免对地分布电容对算法的影响。根据故障区域识别函数在不同区域故障时的相位特征判断故障区域,并利用故障距离表达式实现精确的故障测距。

1 故障区域识别

在实际电网中,架空线-电缆混合输电线路分为A型和B型2种^[15-16]。A型混合输电线路由1段架空线和1段电缆组合而成,B型混合输电线路由1段架空线和2段电缆或者1段电缆和2段架空线组合而成,即电缆-架空线-电缆型线路和架空线-电缆-架空线型线路。本文以B型混合输电线路中的架空线-电缆-架空线型线路(为便于叙述,下文简称混合输电线路)为例阐述故障区域识别的基本原理,并以中间电缆线路段为故障分析对象构造故障区域识别函数。

1.1 故障区域识别函数基本原理

1.1.1 中间电缆线路故障

当故障位于中间电缆线路 ct 时,混合输电线路

收稿日期:2017-06-09;修回日期:2018-06-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900600)

Project supported by the National Key Research and Development Plan of China(2016YFB0900600)

的正序网络示意图如图 1 所示。图中,首端架空线路长度为 l_{Mc} ;中间电缆线路长度为 l_{ct} ;末端架空线路长度为 l_{Nt} ; l_{fc} 为故障点 f 到线路连接点 c 的距离; l_{ft} 为故障点 f 到线路连接点 t 的距离。

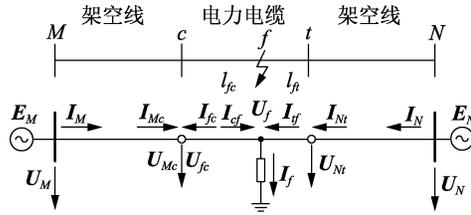


图 1 故障点位于中间电缆线路时混合线路正序网络模型

Fig.1 Positive-sequence model of hybrid line with fault located in middle cable line

根据均匀传输线方程,分别以 M 和 N 端电气量为已知条件,推算点 c 和点 t 的正序电压、电流为:

$$\begin{cases} U_{Mc} = U_M \cosh \gamma_1 l_{Mc} - I_M Z_{c1} \sinh \gamma_1 l_{Mc} \\ I_{Mc} = I_M \cosh \gamma_1 l_{Mc} - U_M \sinh \gamma_1 \frac{l_{Mc}}{Z_{c1}} \\ U_{Nt} = U_N \cosh \gamma_1 l_{Nt} - I_N Z_{c1} \sinh \gamma_1 l_{Nt} \\ I_{Nt} = I_N \cosh \gamma_1 l_{Nt} - U_N \sinh \gamma_1 \frac{l_{Nt}}{Z_{c1}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, γ_1 为架空线路的传输常数; Z_{c1} 为架空线路的特性阻抗。

在线路 ct 内分别利用点 c 和点 t 的电气量推算得到的故障点 f 的正序电压相等,即有:

$$\begin{aligned} U_{Mc} \cosh \gamma_2 x - I_{Mc} Z_{c2} \sinh \gamma_2 x &= U_{Nt} \cosh \gamma_2 (l_{ct} - x) - \\ & I_{Nt} Z_{c2} \sinh \gamma_2 (l_{ct} - x) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, x 为电缆线路上故障点 f 到点 c 的距离; γ_2 和 Z_{c2} 分别为电缆线路的传输常数和特性阻抗。

将式(2)等号右侧展开并化简得:

$$\begin{aligned} \frac{U_{Mc} - U_{Nt} \cosh \gamma_2 l_{ct} + I_{Nt} Z_{c2} \cosh \gamma_2 l_{ct}}{I_{Mc} Z_{c2} + I_{Nt} Z_{c2} \cosh \gamma_2 l_{ct} - U_{Nt} \sinh \gamma_2 l_{ct}} \cosh \gamma_2 x - \\ \sinh \gamma_2 x = \frac{U_{Mc} - U_{Nc}}{(I_{Mc} + I_{Nc}) Z_{c2}} \cosh \gamma_2 x - \sinh \gamma_2 x = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, U_{Nc} 和 I_{Nc} 分别为 N 端电气量推算得到的点 c 的正序电压和正序电流, I_{Nc} 的电流方向为由电缆线路侧流向点 c 。

对式(3)取相位构造故障区域识别函数如式(4)所示,以中间电缆线路为分析对象判断故障区域。

$$f(x) = \arg \left[\frac{U_{Mc} - U_{Nc}}{(I_{Mc} + I_{Nc}) Z_{c2}} \cosh \gamma_2 x - \sinh \gamma_2 x \right] \quad (4)$$

其中, $\arg(\cdot)$ 为取相位函数; U_{Mc} 、 U_{Nc} 、 I_{Mc} 、 I_{Nc} 的计算方法如式(1)和式(3)所示;此时,变量 x 并非表示故障距离,而是代表中间电缆线路上的各点到点 c

的距离,其取值范围为 $0 \leq x \leq l_{ct}$, $x=0$ 表示线路连接点 c , $x=l_{ct}$ 表示线路连接点 t 。

由式(4)的构造过程可知,当故障发生在中间电缆且 x 取为故障点到点 c 的距离时,故障区域识别函数 $f(x) = 0$ 。实际上,当故障发生在中间电缆线路时, $f(x)$ 将在故障点处发生从 90° 到 -90° 的相位突变,其理论证明如下。

由点 t 电气量推算故障点 f 的正序电压、电流值为:

$$\begin{cases} U_f = U_{Nt} \cosh \gamma_2 l_{ft} - I_{Nt} Z_{c2} \sinh \gamma_2 l_{ft} \\ I_{ft} = I_{Nt} \cosh \gamma_2 l_{ft} - U_{Nt} \sinh \gamma_2 \frac{l_{ft}}{Z_{c2}} \end{cases} \quad (5)$$

根据基尔霍夫定理,在故障点 f 处有:

$$I_{cf} = I_f - I_{ft} \quad (6)$$

由故障点处电气量推算点 c 的正序电压、电流值为:

$$\begin{cases} U_{fc} = U_f \cosh \gamma_2 l_{fc} + I_{cf} Z_{c2} \sinh \gamma_2 l_{fc} \\ I_{fc} = -U_f \sinh \gamma_2 \frac{l_{fc}}{Z_{c2}} - I_{cf} \cosh \gamma_2 l_{fc} \end{cases} \quad (7)$$

将式(5)和式(6)代入式(7)得:

$$\begin{cases} U_{fc} = U_{Nc} + I_f Z_{c2} \sinh \gamma_2 l_{fc} \\ I_{fc} = I_{Nc} - I_f \cosh \gamma_2 l_{fc} \end{cases} \quad (8)$$

由图 1 可知 $U_{fc} = U_{Mc}$ 、 $I_{fc} = -I_{Mc}$,将式(8)代入式(4)并化简可得^[17]:

$$f(x) = \arg(\tanh \gamma_2 l_{fc} \cosh \gamma_2 x - \sinh \gamma_2 x) \quad (9)$$

对于高压输电线路,其传输系数为:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega C_0(r_0 + j\omega L_0)} \approx \frac{r_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + j\omega \sqrt{L_0 C_0}$$

其中, r_0 、 L_0 、 C_0 分别为单位线路长度的电阻值、电感值与电容值。由于高压线路的电阻值很小,即 $\alpha \ll \beta$, 则 $\gamma \approx j\beta$ 。将 $\gamma_2 \approx j\beta_2$ 代入式(9)可得:

$$\begin{cases} f(x) = \arg(jg(x)) \\ g(x) = \tan \beta_2 l_{fc} \cos \beta_2 x - \sin \beta_2 x \end{cases} \quad (10)$$

当混合输电线路发生故障后, l_{fc} 是固定不变的值,由式(10)可知故障区域识别函数 $f(x)$ 的值基本保持在 $\pm 90^\circ$ 的范围内。在实际电网中, $\beta x \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, $g(x)$ 关于 x 单调递减,又由于式(3)在故障点处成立,即 $g(x)$ 为在故障点处过 0 的单调递减函数,所以当 x 增大到接近故障点位置时, $f(x)$ 由 90° 突变为 -90° 。综上可知,当 $x=0$ 时, $f(x)$ 数值约为 90° ; 当 $x=l_{ct}$ 时, $f(x)$ 数值约为 -90° 。利用第 3 节中的线路参数得到中间电缆位置故障时的 $f(x)$ 函数曲线如图 2 所示。

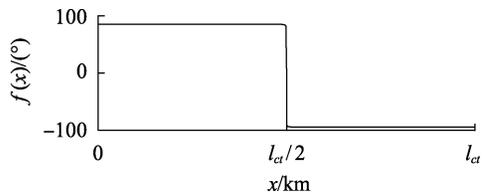


图2 中间电缆线路故障时故障区域识别函数曲线

Fig.2 Curve of $f(x)$ with fault located in middle cable line

1.1.2 首端架空线路故障

当故障位于首端架空线路 M_c 时, $f(x) \approx -90^\circ$, 其理论证明如下。

当故障发生在首端架空线路时, 混合输电线路各电量之间满足如下关系式:

$$U_{M_c} - U_{N_c} = -I_f Z_{c1} \sinh \gamma_1 l_{fc} \quad (11)$$

$$I_{M_c} + I_{N_c} = I_f \cosh \gamma_1 l_{fc} \quad (12)$$

将式(11)和式(12)代入式(4)可得:

$$f(x) = \arg \left(-\frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \tanh \gamma_1 l_{fc} \cosh \gamma_2 x - \sinh \gamma_2 x \right) \quad (13)$$

令 $\gamma_1 \approx j\beta_1$ 、 $\gamma_2 \approx j\beta_2$, 式(13)可化简为:

$$\begin{cases} f(x) = \arg(jg(x)) \\ g(x) = -\frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \tan \beta_1 l_{fc} \cos \beta_2 x - \sin \beta_2 x \end{cases} \quad (14)$$

当混合输电线路发生故障后, l_{fc} 是固定不变的值。

高压输电线路的特性阻抗 $Z_c = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} \approx$

$\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$, 则 Z_{c1} 和 Z_{c2} 可以视为大于 0 的实数, 且在实际

电网中, $\beta x \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, 由式(14)可知 $g(x) < 0$ 。综上

可知, 当首端架空线路发生故障时, $f(x) \approx -90^\circ$, 即故障区域识别函数在 $x=0$ 和 $x=l_{ct}$ 这 2 处的函数值均约为 -90° , 如图 3 所示。

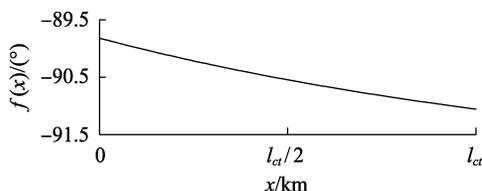


图3 首端架空线路发生故障时故障区域识别函数曲线

Fig.3 Curve of $f(x)$ with fault located in first overhead line

1.1.3 末端架空线路故障

当故障位于末端架空线路 N_t 时, 故障区域识别函数 $f(x)$ 约为 90° , 其理论证明如下。

当故障发生在末端架空线路时, 输电线路各电量之间满足如下关系式:

$$U_{M_c} - U_{N_c} = I_f Z_{c2} \cosh \gamma_1 l_{ft} \sinh \gamma_2 l_{ct} + I_f Z_{c1} \sinh \gamma_1 l_{ft} \cosh \gamma_2 l_{ct} \quad (15)$$

$$I_{M_c} + I_{N_c} = I_f \cosh \gamma_1 l_{ft} \cosh \gamma_2 l_{ct} + I_f \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \sinh \gamma_1 l_{ft} \sinh \gamma_2 l_{ct} \quad (16)$$

将式(15)、(16)代入故障区域识别函数式(4)可得:

$$f(x) = \arg \left(\frac{Z_{c2} \sinh \gamma_2 l_{ct} + Z_{c1} \tanh \gamma_1 l_{ft} \cosh \gamma_2 l_{ct}}{Z_{c2} \cosh \gamma_2 l_{ct} + Z_{c1} \tanh \gamma_1 l_{ft} \sinh \gamma_2 l_{ct}} \times \cosh \gamma_2 x - \sinh \gamma_2 x \right) \quad (17)$$

令 $\gamma_1 \approx j\beta_1$ 、 $\gamma_2 \approx j\beta_2$, 式(17)可化简为:

$$\begin{cases} f(x) = \arg(jg(x)) \\ g(x) = \frac{Z_{c2} \sin \beta_2 l_{ct} + Z_{c1} \tan \beta_1 l_{ft} \cos \beta_2 l_{ct}}{Z_{c2} \cos \beta_2 l_{ct} - Z_{c1} \tan \beta_1 l_{ft} \sin \beta_2 l_{ct}} \cos \beta_2 x - \sin \beta_2 x \end{cases} \quad (18)$$

当混合输电线路发生故障后, l_{ft} 固定不变, 由 $g(x)$ 表达式可知 $g(x)$ 关于 x 单调递减; 当 x 固定时, $g(x)$ 关于 l_{ft} 单调递增。因为 $0 \leq x \leq l_{ct}$ 、 $0 \leq l_{ft} \leq l_{in}$, 所以当 $x=l_{ct}$ 、 $l_{ft}=0$ 时, $g(x)$ 有最小值。当故障发生在点 t 时, $l_{ft}=0$, 取 $x=l_{ct}$, 此时 $g(x)=0$ 为最小值。当故障发生在线路 N_t 内时, $l_{ft}>0$, 故 $g(x)>0$ 。综上可知 $f(x)$ 数值在 90° 左右, 即故障区域识别函数 $f(x)$ 在 $x=0$ 和 $x=l_{ct}$ 这 2 处的函数值均约为 90° , 末端架空线故障时的 $f(x)$ 函数示意图如图 4 所示。

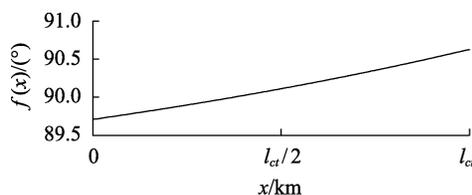


图4 末端架空线路发生故障时故障区域识别函数曲线

Fig.4 Curve of $f(x)$ with fault located in last overhead line

故障发生后, 按照式(4)计算故障区域识别函数, 由于故障发生在不同线路段时, 故障区域识别函数的最终形式和函数特性不同, 进而以此判断故障区域。值得指出的是, 算法以中间电缆为故障分析对象构造故障区域识别函数, 当故障发生在首、末两端架空线路时, 变量 x 的取值范围不变, 根据函数相位特性区分故障区域, 此时 x 的大小与故障位置和架空线路长度无关。

1.2 故障区域识别判据

由上述分析可知, 故障发生在不同线路段时, 故障区域识别函数 $f(x)$ 在 2 个线路连接点 $x=0$ 和 $x=l_{ct}$ 处的函数值均不相同。当故障发生在首端架空线路时, $f(0) \approx f(l_{ct}) \approx -90^\circ$; 当故障发生在连接点 c 时, $f(0) \approx 0^\circ$, $f(l_{ct}) \approx -90^\circ$; 当故障发生在中间电

缆线路时, $f(0) \approx 90^\circ$, $f(l_{ct}) \approx -90^\circ$; 当故障发生在连接点 t 时, $f(0) \approx 90^\circ$, $f(l_{ct}) \approx 0^\circ$; 当故障发生在末端架空线路时, $f(0) \approx f(l_{ct}) \approx 90^\circ$ 。

基于上述特性, 提出一种适用于架空线-电缆混合输电线路故障区域识别判据:

a. 若 $f(0) < 0$ 且 $f(l_{ct}) < 0$, 则故障发生在首端架空线路;

b. 若 $f(0) \geq 0$ 且 $f(l_{ct}) \leq 0$, 则故障发生在中间电缆线路;

c. 若 $f(0) > 0$ 且 $f(l_{ct}) > 0$, 则故障发生在末端架空线。

故障发生后, 通过计算故障区域识别函数 $f(x)$ 在 $x=0$ 和 $x=l_{ct}$ 处的函数值大小判断故障区域。

2 故障定位算法

利用故障区域识别判据判断故障区域后, 按照相应故障线路段的测距公式进行故障定位。

当故障发生在首端架空线路时, 根据线路两端电气量可以计算故障点 f 到点 c 的距离为:

$$l_{fc} = -\frac{1}{\gamma_1} \operatorname{arctanh} \left[\frac{U_{Mc} - U_{Nc}}{Z_{c1}(I_{Mc} + I_{Nc})} \right] \quad (19)$$

则故障点与 M 端的距离 $l_f = l_{Mc} - l_{fc}$ 。

当故障发生在中间电缆线路时, 根据线路两端电气量可以计算故障点 f 到点 c 的距离为:

$$l_{fc} = \frac{1}{\gamma_2} \operatorname{arctanh} \left[\frac{U_{Mc} - U_{Nc}}{Z_{c2}(I_{Mc} + I_{Nc})} \right] \quad (20)$$

则故障点与 M 端的距离 $l_f = l_{Mc} + l_{fc}$ 。

与首端架空线故障情况相类似, 当故障发生在末端架空线路时, 根据线路两端电气量可以计算故障点 f 到点 t 的距离为:

$$l_{ft} = \frac{1}{\gamma_1} \operatorname{arctanh} \left[\frac{U_{Mt} - U_{Nt}}{Z_{c1}(I_{Mt} + I_{Nt})} \right] \quad (21)$$

其中, U_{Mt} 、 I_{Mt} 与 U_{Nt} 、 I_{Nt} 分别为由 M 端和 N 端推算得到的点 t 正序电压和正序电流, I_{Mt} 与 I_{Nt} 的电流方向分别为由 M 和 N 端流向点 t 。则故障点与 M 端的距离 $l_f = l_{Mc} + l_{ct} + l_{ft}$ 。

综上所述, 本文算法利用故障区域识别函数的相位特征对故障区域进行快速识别, 利用故障距离表达式实现精确测距, 避免了对故障点的搜索式计算。

文献[14]同样利用故障区段识别函数的相位特征判断故障区域, 其需要在混合线路连接点处分别建立故障区段识别函数, 确定故障区域后采用折半查找法在故障线路段上搜索故障点, 计算量较大, 且测距精度受门槛值的影响; 本文所提算法在判断故障区域时只需将代表线路连接点的变量值代入故障区域识别函数进行验证, 定位故障时无需繁琐的

搜索过程, 测距速度快, 易于编程和实现。

本文算法以架空线-电缆-架空线混合输电线路为例进行原理说明, 对于电缆-架空线-电缆混合输电线路也适用, 而 A 型混合输电线路可以看作 B 型混合输电线路的一部分, 所以本文算法同样适用于 A 型混合输电线路。

3 仿真实验

本文采用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建架空线-电缆-架空线混合输电线路模型对本文算法进行验证, 线路模型如图 5 所示, 参数如下。

a. 系统电压等级为 500 kV, 两侧电源幅值分别为 1.05 p.u. 和 1 p.u., 两端系统相位差为 65° 。

b. 架空线路参数为: 正序阻抗为 $Z_{h1} = 0.034 \ 6 + j0.421 \ 6 \ \Omega/\text{km}$; 零序阻抗为 $Z_{h0} = 0.030 \ 0 + j1.140 \ 0 \ \Omega/\text{km}$; 正序电容为 $C_{h1} = 0.008 \ 64 \ \mu\text{F}/\text{km}$; 零序电容为 $C_{h0} = 0.006 \ 175 \ \mu\text{F}/\text{km}$ 。

c. 电缆线路参数为: 正序阻抗为 $Z_{c1} = 0.024 \ 0 + j0.148 \ 5 \ \Omega/\text{km}$; 零序阻抗为 $Z_{c0} = 0.412 \ 0 + j0.481 \ 9 \ \Omega/\text{km}$; 正序电容为 $C_{c1} = 0.281 \ 1 \ \mu\text{F}/\text{km}$; 零序电容为 $C_{c0} = 0.152 \ 9 \ \mu\text{F}/\text{km}$ 。

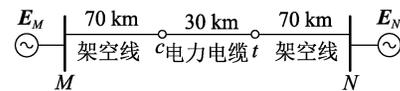


图 5 架空线-电缆-架空线混合线路模型

Fig.5 Model of overhead-cable-overhead hybrid line

暂态数据采样频率为 10 kHz, 采用带通滤波器滤波并利用全波傅氏算法提取基波相量。城市电缆线路长度较短, 混合线路两端电气量受电缆波过程影响较小, 本文采用故障发生后第 2 个周期的基波相量进行测距。

a. 故障区域判别结果验证。

表 1 列出了混合输电线路在不同位置处发生 A 相经 $300 \ \Omega$ 电阻接地故障时, 本文所提方法的故障区域判别结果, 其中故障距离为故障点与 M 端的距离。由表 1 可知, 本文所提方法在线路连接点附近发生接地电阻较高的接地故障时依然能够可靠识别故障区域, 且故障区域函数值差别较大, 不会由于数据舍入误差而造成误判。

b. 故障位置、过渡电阻、负荷电流对本文测距算法的影响。

表 2 为混合输电线路在不同位置处发生各种类型故障时的测距结果, 其中相对测距误差表示的是测距结果与故障距离差值占线路总长度的百分比。由表 2 可知, 本文所提算法对于混合输电线路不同位置处的各类故障均具有良好的适用性, 最大相对测距误差保持在 $\pm 0.5\%$ 以内, 具有较高的测距精度。

表 1 不同故障位置处发生 A 相经 300 Ω 接地时的故障区域判断结果

Table 1 Fault section identification results of phase-A-to-ground fault with transition resistance 300 Ω at different fault positions

故障距离/km	$f(0)/(^{\circ})$	$f(l_{cr})/(^{\circ})$	故障区域判断结果	判断结果性质
10	-90.60	-91.15	M_c	正确
40	-90.31	-91.38	M_c	正确
69.8	-92.04	-94.51	M_c	正确
70.1	46.45	-94.46	ct	正确
70.2	90.11	-94.58	ct	正确
80	85.54	-94.65	ct	正确
99.8	85.47	-121.70	ct	正确
99.9	85.54	-157.76	ct	正确
100.2	85.55	93.63	Nt	正确
120	88.28	89.83	Nt	正确
160	88.89	89.52	Nt	正确

表 2 故障位置对不同故障类型故障测距结果的影响

Table 2 Influence of fault position on fault location results for different fault types

故障距离/km	故障测距结果/km			最大相对测距误差/%
	B 相接地故障	BC 相间故障	三相相间故障	
25	24.56	24.95	25.70	0.412
60	59.95	59.74	59.98	-0.153
78	78.11	78.32	78.33	0.194
90	89.80	90.26	90.16	0.153
137	136.36	137.73	137.08	0.429
164	164.13	164.03	164.11	0.076

表 3 给出了当故障发生在距离 M 端 80 km 处时,过渡电阻对各种类型故障测距结果的影响(表中,20 Ω、100 Ω、300 Ω 为过渡电阻阻值)。由表 3 可知,本文算法在各种过渡电阻情况下均能可靠定位故障,具有良好的适用性。

表 3 过渡电阻对不同故障类型测距结果的影响

Table 3 Influence of transition resistance on fault location results for different fault types

故障类型	测距结果/km			最大相对测距误差/%
	20 Ω	100 Ω	300 Ω	
A 相接地故障	80.11	80.04	79.98	0.065
AB 相接地故障	79.93	79.94	79.94	-0.041
三相接地故障	79.91	79.91	79.91	-0.053

图 6 将过渡电阻和故障位置对本文算法的 AC 相接地故障测距精度的影响情况呈现于 3 维立体图中。由图可见,本文算法的相对故障测距误差控制在 $\pm 0.3\%$ 范围内。图 7 绘出了过渡电阻和负荷电流对 50 km 处 C 相接地故障测距精度的影响,由图可见,本文算法的相对测距误差保持在 $\pm 0.5\%$ 范围内。图 8 绘出了负荷电流和故障位置对金属性三相接地故障测距精度的影响,由图可见,本文算法的相对测距误差在 $\pm 0.2\%$ 范围内。

由表 2、3 和图 6—8 可知,本文故障测距方法不受故障位置、过渡电阻和负荷电流的影响,其最大

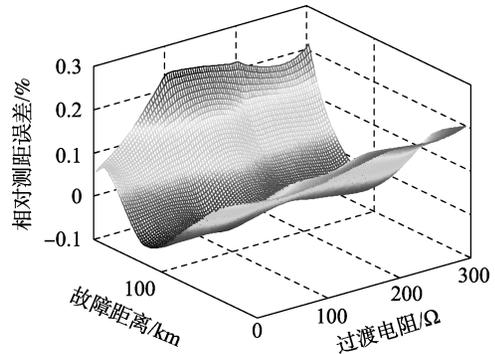


图 6 过渡电阻和故障位置对 AC 相接地故障测距精度的影响

Fig.6 Influence of fault impedance and fault position on fault location accuracy of ACG fault

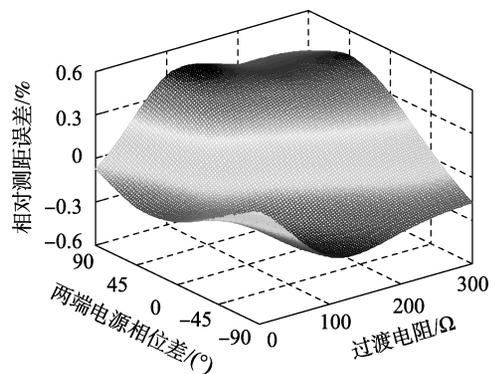


图 7 过渡电阻和负荷电流对 50 km 处 C 相接地故障测距精度的影响

Fig.7 Influence of fault impedance and load current on fault location accuracy of CG fault at 50 km away from Terminal M

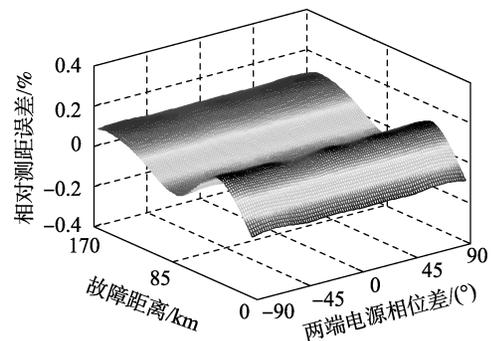


图 8 负荷电流和故障位置对三相金属性接地故障测距精度的影响

Fig.8 Influence of load current and fault position on fault location accuracy for ABCG fault

相对测距误差保持在 $\pm 0.5\%$ 范围内,满足工程对故障测距精度的要求。

4 结论

在分布参数模型的基础上,本文提出一种基于故障区域快速识别的混合输电线路故障测距新算法,该算法具有以下优点。

a. 根据故障区域识别函数在线路连接点的相位特征判断故障区域,当故障发生在首末两端架空线

路时,2 个线路连接点的 $f(x)$ 函数值基本相等,均约为 90° 或 -90° ,当故障发生在中间电缆线路时,2 个线路连接点的 $f(x)$ 函数值分别为 90° 和 -90° ,基于此特性提出的故障区域识别判据在线路连接点附近无判别死区。

b. 通过对故障距离解析表达式的计算在故障线路段上进行精确测距,从原理上不会出现伪根,无需繁琐的搜索和迭代过程,算法简单,易于实现。

c. 无需判断故障类型,测距结果不受分布电容、过渡电阻、负荷电流等因素的影响,对各种类型故障均具有良好的适用性。仿真结果表明,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] 范春菊,宋蓓华,郁惟镛. 电缆-架空混合线路相间距离保护方案研究[J]. 供用电,2006,23(5):33-36.
FAN Chunju, SONG Beihua, YU Weiyong. Study on phase distance protection scheme of cable-overhead line hybrid line [J]. Power Supply, 2006, 23(5): 33-36.
- [2] 孙骏. 500 kV 电缆线路保护研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.
SUN Jun. The research of 500 kV cable-line protection[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [3] 黄震,江泰廷,张维锡,等. 基于两端行波原理的高压架空线-电缆混合线路故障定位方法[J]. 电力系统自动化,2010,24(14):88-91.
HUANG Zhen, JIANG Taiting, ZHANG Weixi, et al. A fault location method for high-voltage overhead lines combined with underground power cables based on double-ended travelling wave principle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 24(14): 88-91.
- [4] 夏璐璐,何正友,李小鹏,等. 基于行波固有频率和经验模态分解的混合线路故障测距方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(18):67-73.
XIA Lulu, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. A fault location method based on natural frequencies and empirical mode decomposition for mixed overhead-cable lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 67-73.
- [5] 王奎鑫,唐毅,陈平,等. 基于组合行波原理的高压架空线-电缆混合线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(10):90-94.
WANG Kuixin, TANG Yi, CHEN Ping, et al. Fault location method based on combined travelling wave principle for high-voltage overhead-cable lines [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 90-94.
- [6] 薛永端,李乐,俞恩科,等. 基于分段补偿原理的电缆架空线混合线路双端行波故障测距算法[J]. 电网技术,2014,38(7):1953-1958.
XUE Yongduan, LI Le, YU Enke, et al. A sectionalized compensation based two-terminal traveling wave fault location algorithm for hybrid transmission line composed of power cable and overhead line [J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1953-1958.
- [7] 束洪春,孙涛. 电缆-架空线混合线路故障行波测距新方法[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):1-7.
SHU Hongchun, SUN Tao. Fault locating based on transient traveling wave for hybrid transmission lines [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 1-7.
- [8] 牛睿,梁军,负志皓,等. 基于故障距离区间的混联线路单端行波测距[J]. 电网技术,2015,39(1):156-163.
NIU Rui, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. A fault distance interval based single terminal traveling wave fault location method for hybrid transmission lines [J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 156-163.
- [9] 吴承恩,邵能灵,郁惟镛,等. 超高压电缆-架空线混合线路故障测寻方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(10):26-29,59.
WU Chengen, TAI Nengling, YU Weiyong, et al. New method of fault detection and location for ehv cables with transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 26-29, 59.
- [10] 刘伟,陈皓. 基于分布参数模型的混合线路故障测距新算法[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(24):76-80,132.
LIU Wei, CHEN Hao. A new fault location algorithm for hybrid transmission line based on distributed parameter model [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 76-80, 132.
- [11] 杨军,伍咏红,江文波,等. 基于两端故障信息的高压电缆-架空线混合线路故障测距方法[J]. 电网技术,2010,34(1):208-213.
YANG Jun, WU Yonghong, JIANG Wenbo, et al. A fault location algorithm for hybrid transmission line composed by high voltage cable and overhead line based on two-terminal information [J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 208-213.
- [12] 曾惠敏,林富洪. 高压电缆-架空线混合线路相位测距法[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):82-87.
ZENG Huimin, LIN Fuhong. Fault locating algorithm based on phase characteristics for hybrid high voltage transmission line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 82-87.
- [13] 李博通,李永丽,胡宇,等. 基于故障区域识别的超高压混联线路故障测距算法[J]. 电力系统自动化,2013,37(5):93-98.
LI Botong, LI Yongli, HU Yu, et al. A new fault location algorithm for extra-high voltage mixed lines based on fault zone identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 93-98.
- [14] ZHANG S, GAO H, SONG Y. A new fault location algorithm for extra-high voltage mixed lines based on phase characteristics of hyperbolic tangent function [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 31(3): 1203-1212.
- [15] ZIPP J, CONROY M, BEHRENDT K, et al. Protective relaying considerations for transmission lines with high voltage AC cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 83-96.
- [16] LEE J B, HA C W, JUNG C H. Development of digital distance relaying algorithm in combined transmission lines with underground power cables [C] // Power Engineering Society Summer Meeting. Vancouver, BC, Canada; IEEE, 2001: 611-616.
- [17] 陈旭,朱永利,高艳丰,等. 基于故障分支快速辨识的 T 型高压输电线路故障定位新算法[J]. 电力系统自动化,2016,40(4):105-110.
CHEN Xu, ZHU Yongli, GAO Yanfeng, et al. A new fault location algorithm for high-voltage three-terminal transmission lines based on fault branch fast identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 105-110.

33(9):192-195.

- [21] 陈刚,段晓,张继红,等. 基于 ARMA 模型的低频振荡模式在线辨识技术研究[J]. 电网技术,2010,34(11):48-54.
CHEN Gang, DUAN Xiao, ZHANG Jihong, et al. A new approach for online identification of low frequency oscillation modes based on auto-regressive moving-average model [J]. Power System Technology, 2010, 34(11):48-54.
- [22] 徐东杰. 互联电力系统低频振荡分析方法与控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2004.
XU Dongjie. Analysis and control of low frequency oscillations in interconnected power systems [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.

作者简介:



张俊峰

张俊峰(1978—),男,湖北襄阳人,高级工程师,硕士,主要研究方向为发电机励磁系统以及电力系统稳定器控制技术(E-mail: flyleaf170@126.com);

杨婷(1991—),女,湖南邵阳人,硕士研究生,主要研究方向为发电机励磁系统(E-mail: tingyang@hust.edu.cn);

陈珉(1993—),男,湖北随州人,硕士研究生,研究方向为全控器件励磁。

Power system low-frequency oscillation characteristic analysis based on Prony moving average window algorithm

ZHANG Junfeng¹, YANG Ting², CHEN Min², ZHANG Tiantian², XIAO Jun², MAO Chengxiang²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;

2. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Prony algorithm can identify related characteristic parameters of power system according to the measured data, which can help to analyze the low-frequency oscillations of the system. However, the traditional Prony algorithms are sensitive to noise and can only analyze partial of the data. A Prony moving average window algorithm is proposed to analyze the data in separate windows, which can not only make full use of the data, but also weaken the noise and obtain correct identification results even if the SNR (Signal-to-Noise Ratio) is very small. The simulative results based on PSASP software verify the accuracy of the Prony moving average window algorithm.

Key words: electric power systems; low-frequency oscillation; Prony algorithm; moving average window; SNR

(上接第 171 页 continued from page 171)

作者简介:

张斯淇(1991—),女,黑龙江富裕人,硕士研究生,主要研究方向为输电线路故障测距(E-mail: hitzhangsiqi@163.com);

李永丽(1963—),女,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: lytju@163.com);



张斯淇

陈晓龙(1985—),男,河南濮阳人,讲师,博士,主要研究方向为含分布式电源配电网以及微电网的保护与控制(E-mail: promising1207@163.com)。

Novel fault location algorithm for mixed lines based on fault section fast identification

ZHANG Siqi, LI Yongli, CHEN Xiaolong

(Key Laboratory of Smart Grid, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A novel fault location algorithm for overhead-cable mixed lines based on fault section fast identification is proposed. The fault section is determined according to the phase characteristics of fault section recognition function at the line connection points, and then the fault distance on the fault section is calculated precisely by using the fault distance expression deduced by the positive-sequence fault location equation of mixed lines. The proposed algorithm does not need to judge the fault type, it has no dead-zone when the fault section is near the line connection points. No iterative search and pseudo-root recognition are required during fault location, and the proposed algorithm has small calculation amount and is easy to be programmed. Simulative tests show that the proposed algorithm is not affected by such factors as fault location, transition resistance and load current, and satisfies the engineering requirements for accuracy.

Key words: mixed lines; fault location; fault section recognition function; phase characteristics