

DOI: 10.7667/PSPC180339

行波故障定位装置闭锁策略探讨

崔柳^{1,2}, 李书勇^{1,2}, 郭琦^{1,2}, 黄立滨^{1,2}

(1. 直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广东 广州 510663;

2. 中国南方电网公司电网仿真重点实验室, 广东 广州 510663)

摘要: 为了得到合适的双端行波故障定位算法闭锁策略, 使其能够屏蔽后续折反射波头的同时尽快开放测距算法, 对行波在线路上的折反射进行了分析。分析了各种波阻抗不连续点处的电流折反射系数, 计算出区内故障、正向区外故障、反向区外故障情况下的后续折反射波头与故障初始波头的时-幅值关系。给出了一种合理的闭锁策略: 在故障发生后 5 ms 内闭锁故障测距, 5~40 ms 内闭锁大于故障初始波头 60% 的波头, 40 ms 之后开放故障测距。通过最后的 EMTP 仿真分析证明了该闭锁策略的有效性。

关键词: 行波; 故障定位; 闭锁策略

Study on blocking algorithm of traveling wave fault location

CUI Liu^{1,2}, LI Shuyong^{1,2}, GUO Qi^{1,2}, HUANG Libin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of HVDC, China Southern Power Grid Electric Power Research Institute,

Guangzhou 510663, China; 2. CSG Key Laboratory for Power System Simulation, China

Southern Power Grid Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to obtain an appropriate blocking algorithm of double terminal travelling wave fault location, so that it can block the subsequent catadioptric wave and open the fault location algorithm as soon as possible, this paper analyzes the refraction and reflection of the traveling wave on the line. It analyzes all kinds of the current reflection and refraction coefficients at surge impedance discontinuous point, and calculates the time-amplitude relationship between the initial wave front and the subsequent catadioptric wave front in the internal fault, forward external fault and reverse external fault. It provides an appropriate blocking algorithm: block the fault location in 5 ms after fault occurring, block the wave front that greater than 60% initial wave front in 5~40 ms, and open fault location after 40 ms. At last, the EMTP simulation proves the effectiveness of the blocking algorithm.

This work is supported by Key Technology Project of China Southern Power Grid “Development of High Precision Digital Simulation Experiment Research Platform for Traveling Wave Fault Location” (No. KYKJXM00000006).

Key words: traveling wave; fault location; blocking algorithm

0 引言

行波原理目前被广泛应用于电力系统故障定位^[1-7], 其主要原理为双端行波测距法^[8-10], 辅助以单端行波测距法^[11-12], 目前大部分行波测距装置利用电流行波进行测距^[13-15]。双端行波测距原理用到故障后第一个波头^[16], 单端测距原理用到故障后前两个波头^[17]。在一次故障测距中, 如果闭锁时间过

短, 会把第一个折反射波头误认成另外一次故障的初始波头, 使得双端行波测距给出错误结果, 单端测距由于丢失第二个波头而无法给出测距结果。如果闭锁时间过长, 易丢失相继故障的初始波头, 使得第二次故障测距无法给出结果^[18]。

目前行波故障定位多采用时间闭锁方式来保证采样得到的行波波头是故障初始波头^[19-21]。即在上一次测距启动后闭锁一段时间, 之后重新开放采样和测距算法, 进行下一次判断。例如, 中电普瑞的行波测距装置录波时间为 60 ms, 启动 20 ms 后可进行下一次启动判断。山大电力的行波测距装置在

基金项目: 中国南方电网重点科技项目资助“行波测距高精度数字仿真实验研究平台开发”(KYKJXM00000006)

“故障后录波周数”后开放下一次启动判断，故障后录波周数分为低速录波段和高速录波段，低速录波段允许范围为 5~25 个周波，高速录波段允许范围为 1~4 个周波。

然而对于上述闭锁时间并无理论分析。本文将对此进行分析并给出闭锁策略。

1 故障后行波行为分析

电力系统中的一次故障会形成一个故障波，当这个故障波到达测距装置安装处时，行波测距装置将检测到一个故障初始波头^[22]。行波测距就是基于这一波头实现的。故障初始行波将在线路上传播，遇到波阻抗不连续点发生折反射，形成后续折反射波头。经过大量的仿真实验，得到这样一个经验规律：后续折反射波头普遍小于故障初始波头。随着时间的增加，折反射次数增加，后续波头迅速减小。一些特殊的系统结构下，也会出现后续折反射波头大于故障初始波头的情况。但这些后续大波头在时间上只会紧紧跟随故障初始波头，而不会在故障发生很长一段时间后再次出现^[23]。

由于行波测距通常用电流模量行波构成^[4]，故本文以下分析中提到的行波均为 α 模量电流行波。目前行波测距技术中对行波的提取分析方法通常是小波变换后取模极大值，本文也应用此方法对行波进行分析。一个典型的故障波形如图 1 所示。

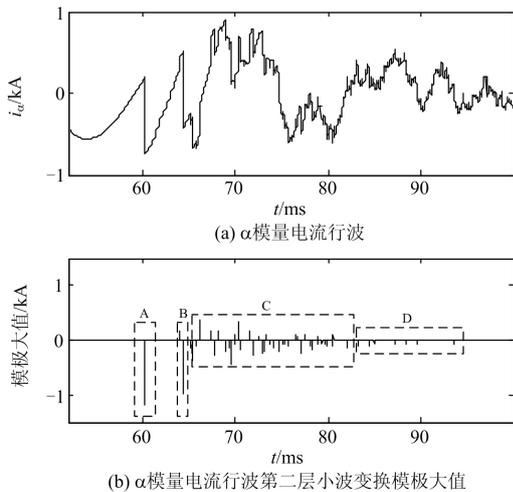


图 1 典型故障行波及其小波变换模极大值

Fig. 1 A typical fault traveling wave and its wavelet transform modulus maximum

图 1 (b)中用虚线框标出了 4 种波头。

A 为故障初始行波波头；B 为后续较大的折反射波头，定义大于 A 波头 80%的波头为该类；C 为较小的折反射波头，但仍可被检测到，定义大于 A

波头 30%的波头为该类；D 为不可被检测到的折反射波头，定义小于 A 波头 30%的波头为该类。

实际行波测距装置中，能被检测到的是波头 A、B、C。闭锁策略需要保证在闭锁时间内包含 A、B 类波头，过滤掉 C 类波头。同时希望能够尽早地进行下一次故障判别，以防漏掉再次故障。

考虑到再次故障的初始行波波头幅值大小和本次故障初始波头及后续折反射波无关，故而可构造一种幅值-时间闭锁方案。设定两个时间阈值 T_1 、 T_2 ，一个幅值阈值 k 。假设故障初始波头幅值为 Amp ，故障开始后开始计时。

$0 < t < T_1$ 时，认为此时会检测到波头 B，在这一时间段中完全闭锁第二次测距；

$T_1 < t < T_2$ 时，认为此时会检测到波头 C，为保证在这一时间段内闭锁波头 C 而又能检测到再次故障的波头，故闭锁幅值小于 $k \cdot Amp$ 的波头；

$t > T_2$ 时，认为此时检测到的是波头 D，由行波测距装置的硬件性能决定，此时的波头和噪声混叠，不能被检测出，可完全开放第二次测距。闭锁策略示意图如图 2 所示。

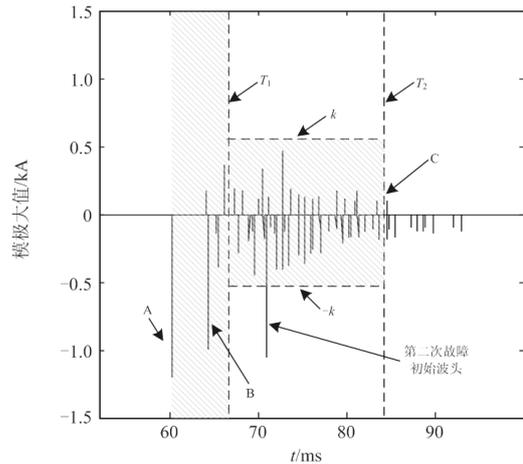


图 2 闭锁策略示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the blocking strategy

图 2 中阴影部分为闭锁区间。在 $T_1 - T_2$ 时间内，又发生第二次故障，此次故障的初始波头在闭锁区域外，可被检测到；A 波头的后续折反射波头 C 在闭锁区域内，被闭锁。

该闭锁策略简单容易理解，关键是要确定 3 个阈值： T_1 、 T_2 、 k 。若要确定这 3 个值，需对后续折反射过程进行细致分析。

2 波阻抗不连续点的折反射系数

当行波在线路上传播遇到不连续点时，将会发

生折反射。写出电流行波折反射系数定义为^[24]

$$\alpha = \frac{i_{2f}}{i_{1f}}, \quad \beta = \frac{i_{1r}}{i_{1f}} \quad (1)$$

式中: α 为电流折射系数; β 为电流反射系数; i_{1f} 为入射电流波; i_{1r} 为反射电流波; i_{2f} 为折射电流波。

电力系统中的波阻抗不连续点通常有母线处和故障处, 以下分别分析。

2.1 母线处的电流行波折反射系数

电流折反射系数和发生折反射处的母线类型有关。母线可分为 3 类^[25]。

第 I 类母线: 母线上只有被保护线路一回出线;

第 II 类母线: 母线上接有两回出线;

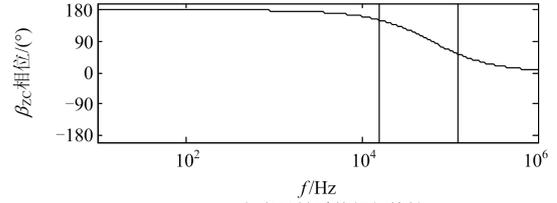
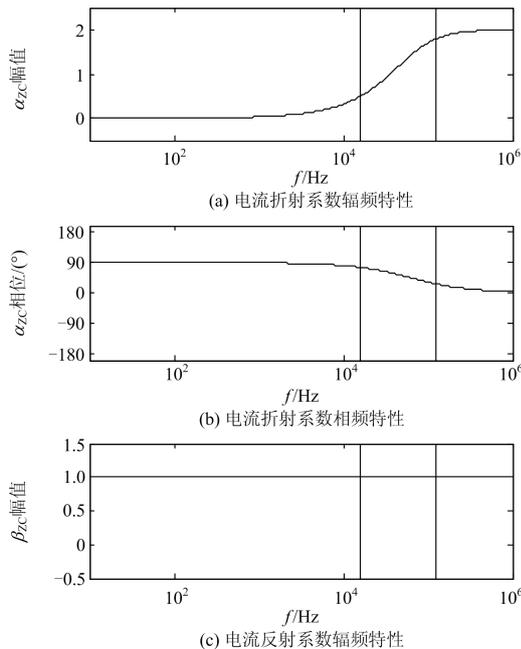
第 III 类母线: 母线上接有三回及以上出线。

对于第 I 类母线, 除了一条出线外母线上还接有其他设备, 这些设备具有一定数值的杂散电容。一般情况下, 电容值在数千 pF 到数万 pF 之间。对于第 II 类、第 III 类母线, 行波主要在线路间传播, 故忽略这些电容。

对于第 I 类母线, 电流折反射系数为

$$\begin{cases} \alpha_{zc} = \frac{2j\omega CZ}{1+j\omega CZ} \\ \beta_{zc} = \frac{j\omega CZ - 1}{j\omega CZ + 1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C 为母线的杂散电容; Z 为线路单位长度波阻抗。取 $C=10$ pF、 $Z=249.6$ Ω , 绘出 α 、 β 的依频曲线如图 3 所示。当故障测距装置提取频率为 15~125 kHz 时, 折射系数幅值为 1 左右, 反射系数幅值恒等于 1。



(d) 电流反射系数相频特性

图 3 I 类母线上电流折反射系数的依频特性曲线

Fig. 3 Frequency characteristic curve of the current reflection and refraction coefficient on bus I

对于第 II 类母线, 当波从波阻抗为 Z_m 的线路 l_m 传到波阻抗为 Z_n 的线路 l_n 时, 折反射系数分别为

$$\begin{cases} \alpha_{mn} = \frac{2Z_m}{Z_m + Z_n} \\ \beta_{mn} = \frac{Z_m - Z_n}{Z_m + Z_n} \end{cases} \quad (3)$$

α_{mn} 的最大值出现在 $Z_m \gg Z_n$ 或 $Z_n=0$ 时, 此时 $\alpha_{mn}=2$ 。 $Z_n=0$, 意味着该母线直接接地, 系统正常运行时不会出现这种情况。实际系统中单条线路的波阻抗值不会相差很大, $Z_m \gg Z_n$ 情况出现在母线上接有多回出线, 其并联等效波阻抗 $Z_n \ll Z_m$, 这种情况下母线为第 III 类母线。

$|\beta_{mn}|$ 的最大值出现在 $Z_m \gg Z_n$ 或 $Z_m \ll Z_n$ 处, 此时, $|\beta_{mn}|=1$, 称这种情况为行波发生全反射。 $Z_m \gg Z_n$ 情况出现在母线上接有多回出线, 其并联等效波阻抗 $Z_n \ll Z_m$, 这种情况下母线为第 III 类母线。 $Z_m \ll Z_n$ 情况出现在 Z_n 是开路时, 此时母线为第 I 类母线。

对于第 III 类母线, 当波从波阻抗为 Z_m 的线路 l_m 传到波阻抗为 Z_n 的线路 l_n , 且母线上还连有等值阻抗为 Z_Σ 的线路时, 折反射系数分别为

$$\begin{cases} \alpha_{mn} = \frac{2}{1 + \frac{Z_n}{Z_m} + \frac{Z_n}{Z_\Sigma}} \\ \beta_{mn} = \frac{Z_m Z_\Sigma^2 + Z_m^2 Z_\Sigma + Z_m^2 Z_n - Z_n Z_\Sigma^2}{(Z_m + Z_\Sigma)(Z_m Z_\Sigma + Z_n Z_\Sigma + Z_m Z_n)} \end{cases} \quad (4)$$

假设系统中各条线路波阻抗相差不大, 令 $Z_n=pZ_m$ 、 $Z_\Sigma=qZ_m$, 式(4)化为式(5)。

$$\begin{cases} \alpha_{mn} = \frac{2}{1 + p\left(1 + \frac{1}{q}\right)} \\ \beta_{mn} = 1 - \frac{2}{\frac{1}{p} + \frac{1}{q} + 1} \end{cases} \quad (5)$$

母线上除了线路 l_m 的出线越少, 线路 l_m 的波阻抗 Z_m 越小, α_{mn} 越大。实际情况中, α_{mn} 的最大值出

现在第 II 类母线且 $Z_m < Z_n$ 情况下。

$|\beta_{mn}|$ 是 $p、q$ 的减函数, $|\beta_{mn}|$ 的最大值出现在 $p=0$ 且 $q=0$, 或 $p、q$ 皆为无穷时, 即 $Z_n \gg Z_m$ 且 $Z_\Sigma \gg Z_m$, 或 $Z_n \ll Z_m$ 且 $Z_\Sigma \ll Z_m$ 。实际系统中, 母线上线路的并联波阻抗总是会小于单条线路的波阻抗, 故而只可能在母线上接多条出线情况下能满足 $Z_\Sigma \ll Z_m$, 此时取得 $|\beta_{mn}|$ 的最大值。无论何时, 总有 $|\beta_{mn}| < 1$ 。

总结对 3 类母线的分析, 可以得到如下结论:

1) 实际情况中, 折射系数 α 的最大值出现在第 II 类母线, 且 $Z_n > Z_m$ 情况下。

2) 反射系数 $|\beta|$ 的最大值出现在第 I 类母线情况下, 或第 III 类母线且母线上有多条出线情况下, 即行波发生全反射。

2.2 故障点处的电流行波折反射系数

文献[26]指出, 在故障点处零模行波和线模行波将发生交叉透射行为。线模电流行波到达故障点时, 其电流行波折反射系数和反射系数如式(6)所示。

$$\begin{cases} \alpha_F = \frac{Z^0 + 6R_f}{Z^0 + 2Z^1 + 6R_f} \\ \beta_F = \frac{-2Z^1}{Z^0 + 2Z^1 + 6R_f} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Z^1 和 Z^0 分别为线路单位长度线模和零模波阻抗; R_f 为故障过渡电阻。

α_F 的最大值出现在 $R_f \gg Z^1、Z^0$ 时, 此时 $\alpha_F = 1$, 但在实际系统中这种情况不存在。当发生金属性故障时, $\alpha_F < 1$ 。

$|\beta_{mn}|$ 最大值出现在 $R_f = 0$ 时, 过渡电阻越小, 反射系数越大。

3 后续折反射波头及整定值

故障发生的位置不同, 保护采集到的后续折反射波头和初始波头的关系也不同。以下分别分析发生区内故障、正向区外故障和反向区外故障情况下的后续折反射波头和初始波头的关系。

3.1 区内故障

当发生区内故障时, 系统示意图及行波折反射示意图如图 4 所示。

图 4 中, R 点为保护安装点, F 点为故障点, R_f 为过渡电阻, $Z_1 \sim Z_4$ 分别为该段线路单位长度波阻抗。 i 为故障点发出的故障行波初始波头, i_0 为保护测量到的故障初始波头。 i_1 为故障点的反射波; i_2 为对侧母线的反射波; i_3 为背侧母线的反射波。在故障初始阶段, 保护安装点能检测到的后续折反射波头只有 $i_1 \sim i_3$, 见式(7)。

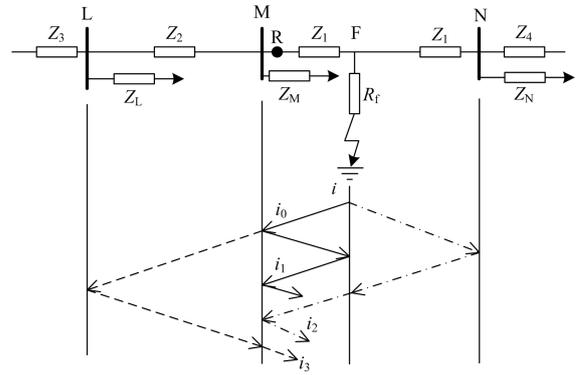


图 4 区内故障折反射示意图

Fig. 4 Catadioptric phenomenon of the internal fault

$$\begin{cases} i_0 = i(1 + \beta_{12}) \\ i_1 = i\beta_{12}\beta_{1F}(1 + \beta_{12}) \\ i_2 = i\beta_{14}\alpha_{11}(1 + \beta_{12}) \\ i_3 = -i\alpha_{12}\beta_{23}\alpha_{21} \end{cases} \quad (7)$$

以下分别计算并分析 $i_1 \sim i_3$ 与 i_0 的比值。

$$k_1 = \frac{i_1}{i_0} = \beta_{12}\beta_{1F} = -\frac{Z_1^1 - Z_2^1}{Z_1^1 + Z_2^1} \cdot \frac{2Z_1^1}{Z_1^1 + 2Z_1^1 + 6R_f} \quad (8)$$

$|k_1|$ 的最大值出现在母线 M 处发生全反射, 过渡电阻 $R_f = 0$ 情况下, 此时 $|k_1|$ 的值和线路的线模、零模波阻抗参数有关。取一组实际 500 kV 线路的线路参数如表 1。

表 1 实际 500 kV 线路参数表

Table 1 Actual parameters of a 500 kV line

线路参数	正序	零序
$R/(\Omega/\text{km})$	0.012 7	0.272 9
$L/(\text{mH}/\text{km})$	0.853 1	2.673 8
$C/(\mu\text{F}/\text{km})$	0.013 69	0.009 3

在这组参数下, 线模波阻抗 $Z^1 = 249.63 \Omega$, $Z^0 = 536.20 \Omega$ 。 $|k_1|$ 的最大值为 0.482 2。根据第 1 节对后续折反射波头的定义, 该波头为 C 类波头。

同理分析后续波头 $i_2、i_3$ 与 i_0 的比值 $k_2、k_3$, 将其同 i_1 一同列表如表 2。其中 k_2 的值随着过渡电阻 R_g 的增加而增大, 取 $R_g = 500 \Omega$ 时的值为 k_2 的最大值。

表 2 区内故障情况下的后续折反射波分析

Table 2 Subsequent catadioptric wave at internal fault

比值	最大值	波头类型
k_1 $\beta_{12}\beta_{1F}$	0.482 2	C
k_2 $\beta_{14}\alpha_{1F}$	0.876 3	B
k_3 $\beta_{23}\alpha_{21}$	>1	B

3.2 正向区外故障

当发生正向区外故障时, 系统示意图及行波折

反射示意图如图 5 所示。

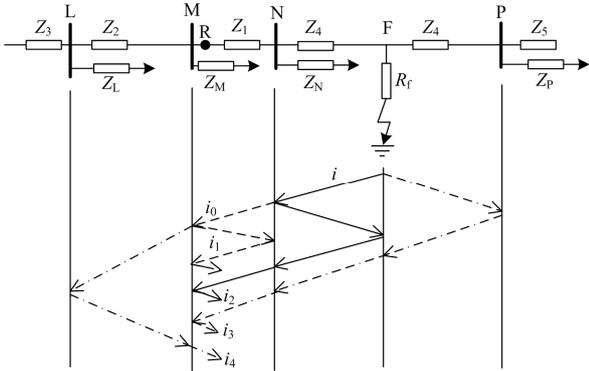


图 5 正向区外故障折反射示意图

Fig. 5 Catadioptric phenomenon of the forward external fault

图 5 中各符号意义和图 4 中相同。仍如 3.1 节一样, 将各个后续波头列表如表 3。

表 3 正向区外故障情况下的后续折反射波分析

Table 3 subsequent catadioptric wave at forward external fault

	比值	最大值	波头类型
k_1	$\beta_{12}\beta_{14}$	0.6	C
k_2	$\beta_{41}\beta_{4F}$	0.482 2	C
k_3	$\beta_{43}\beta_{4F}$	0.876 3	B
k_4	$\beta_{23}\alpha_{21}$	>1	B

需要注意的是 k_1 的最大值取值。若 k_1 取得最大值, 则需 $|\beta_{12}|=1$, 即母线 M 处发生全反射。理论上 $|\beta_{14}|$ 可取到最大值 1, 但这意味着 $Z_4 \gg Z_1$ 或 $Z_1 \gg Z_4$ 或 $Z_N \gg Z_1$ 、 Z_4 。实际系统中, $Z_4 \gg Z_1$ 或 $Z_1 \gg Z_4$ 不可能出现, 以 $Z_4=4Z_1$ 计算, $|\beta_{14}|=0.6$ 。 $Z_N \gg Z_1$ 、 Z_4 意味着母线 N 上有很多出线。以母线 N 上接 5 条出线, 每条出线的单位长度波阻抗相等进行计算, $|\beta_{14}|=0.5$ 。因此, 考虑到电力系统实际情况的 k_1 最大值为 0.6。

3.3 反向区外故障

当发生反向区外故障时, 系统示意图及行波折反射示意图如图 6 所示。

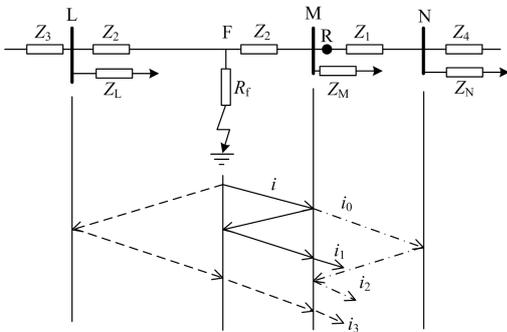


图 6 反向区外故障折反射示意图

Fig. 6 Catadioptric phenomenon of the reverse external fault

图 6 中各符号意义和图 4 中相同。仍如 3.1 节一样, 将各个后续波头列表如表 4。

表 4 反向区外故障情况下的后续折反射波分析

Table 4 Subsequent catadioptric wave at reverse external fault

	比值	最大值	波头类型
k_1	$\beta_{21}\beta_{2F}$	0.337 5	C
k_2	$\beta_{14}\alpha_{12}$	>1	B
k_3	$\beta_{23}\alpha_{2F}$	0.876 3	B

3.4 远方线路折反射后续波头

在以上 3 种分析中, 只分析了距离测量点最近的几条母线或线路的情况, 以下分析远方的折反射情况。对于远方的线路和该线路连接的母线, 波要从故障点经测量点传到远方线路再经母线反射传回测量点, 必然要两次经过同一母线的折射。不失一般性地, 画出波的这一传播过程如图 7。

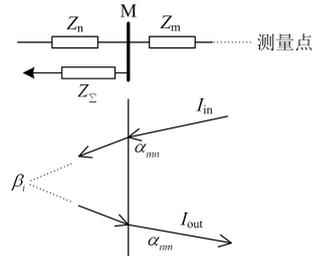


图 7 远方线路折反射示意图

Fig. 7 Catadioptric phenomenon of the distance line

仍写出后续波头和故障初始波头的比值如式(9)所示。

$$k_{\text{far}} = \frac{i_{\text{out}}}{i_{\text{in}}} = \alpha_{mn} \alpha_{nm} \beta_i \quad (9)$$

为求得最大值, 假设在远方发生全反射, 即 $|\beta_i|=1$ 。由 2.1 节分析可知, 折射系数 α 的最大值出现在第 II 类母线处。

$$k_{\text{far}} = \alpha_{mn} \alpha_{nm} = \frac{4Z_m Z_n}{(Z_m + Z_n)^2} \leq 1 \quad (10)$$

当且仅当 $Z_m=Z_n$ 时, $k_{\text{far}}=1$ 。即除非测量点到全反射点经过的所有母线均为第二类母线且母线所接两条线路波阻抗相等, 否则从远处传来的后续波小于初始波, 经过越多的母线, 后续波减少越多。故而只需分析距离测量点附近的几条线路。

3.5 整定值

由以上分析可知, B 类波头只会出现在 3.1—3.3 节中的列表中, 而不会出现在远方折反射中。这些 B 类波头最远的传播距离是 2 倍的所在线路长度。取波速度为 292.6 km/ms, 以每条线路 500 km 为例进行计算, 各 B 类波头到达时间为

$$t = \frac{2 \times 500}{292.6} = 3.42 \text{ ms} \quad (11)$$

即当线路长度为 500 km 时, 只需屏蔽 3.42 ms 即可躲过最大的折反射后续波头。这一随着线路长度减小而缩短。考虑到一定裕度, 将 T_1 整定为 5 ms。

考察各个 C 类行波, 最大值为 0.6。这种情况出现在两条线路单位长度波阻抗相差 4 倍, 或母线上接了 5 条以上出线时。在输电网中, 以上两种情况几乎不可能出现, 故 k 可整定为 60%。

T_2 的整定值和实际的行波保护装置噪声有关。根据经验, T_2 可整定为 40 ms。

在这样的整定值下, 只要第二次故障发生在第一次故障 5 ms 后, 且故障初始波头大于第一次故障初始波头的 60%, 即可被检测到。

故障初始波头的大小和故障初相角紧密相关。以最不利的情况进行分析计算: 第一次故障发生在 90° , 初始波头幅值为 Amp , 则只要故障初始波头大于 $0.6Amp$ 的第二次故障均可被检测到。 $\arcsin(0.6)=36.9^\circ$, 只要第二次故障角度大于 36.9° 即可被检测到。

4 仿真分析

在实际故障测距的应用中, 如果发生区内故障, 则保护会给出跳闸信号, 开断该线路。这种情况下若过早开放测距算法, 则有可能因检测到断路器动作而给出错误的行波测距结果, 但这个结果通常为线路全长, 且对第一次真实的故障测距结果无影响。

对行波测距结果有影响的情况出现在发生区外故障后再发生区内故障。若开放测距算法后将后续折反射波头误认为故障初始波头, 则行波测距有可能给出不正确结果。这种误判的可能性出现在 3.2 节和 3.3 节分析的情况中。以下以反向区外故障为例进行分析。

在 EMTP 中搭建模型, 示意图如图 8。

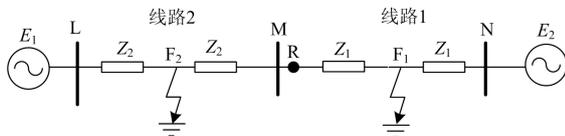


图 8 仿真系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the simulation system

图 8 中 E_1 、 E_2 为系统两侧电源; Z_1 、 Z_2 为对应线路的单位长度波阻抗; 线路参数如表 5 所示, 线路 2 除长度外各个参数是线路 1 的 90%。R 点为测距装置安装点, F_1 、 F_2 点为故障点, 发生 A 相单相接地金属性故障。F1 点故障发生在 0.07 s, F1 点距

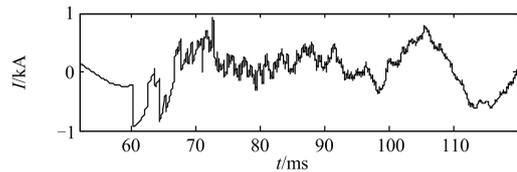
R 点 350 km; F2 点故障发生在 0.06 s, F2 点距 R 点 150 km。系统中发生了一次区外故障, 10 ms 后发生了区内故障。L、M、N 分别为 3 条母线。

表 5 线路参数表

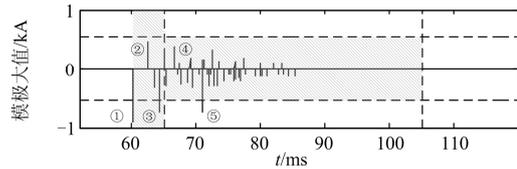
Table 5 Line parameters

线路参数	线路 1	线路 2
$R/(\Omega/\text{km})$	0.012 7	0.011 4
$L/(\text{mH}/\text{km})$	0.853 1	0.767 8
$C/(\mu\text{F}/\text{km})$	0.013 69	0.015 21
$R_0/(\Omega/\text{km})$	0.272 9	0.245 6
$L_0/(\text{mH}/\text{km})$	2.673 8	2.406 4
$C_0/(\mu\text{F}/\text{km})$	0.009 3	0.010 3
线路长度/km	600	500

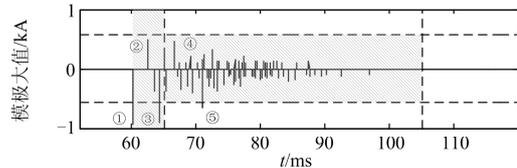
绘制出电流 α 模量行波及其小波变换模极大值的 2、3、4 层如图 9 所示。并以 $T_1=5 \text{ ms}$ 、 $T_2=40 \text{ ms}$ 、 $k=60\%$ 为整定值标出闭锁区域。



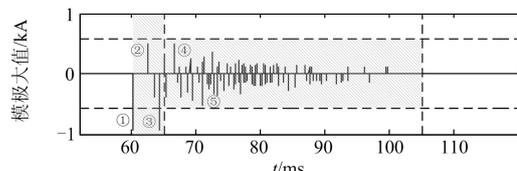
(a) α 模量电流行波



(b) α 模量电流行波第 2 层小波变换模极大值



(c) α 模量电流行波第 3 层小波变换模极大值



(d) α 模量电流行波第 4 层小波变换模极大值

图 9 小波变换模极大值

Fig. 9 Wavelet transform modulus maximum

由图 9(b)、图 9(c)和图 9(d)能明显看出在初始波头后有 3 个较大的后续波头, 其中两个和初始波头极性相同, 另一个和初始波头极性相反。将这 4 个波头分别标号为①—④如图 9 所示。第二次故障的波头标号为⑤, 对比图 9(b)、图 9(c)和图 9(d)可以看出, 这个波头随着分解层数的增高(频率降低、

频带变窄)而减小。

将初始波头和后续波头的幅值列表,并计算出后续波头相对初始波头的幅值,一同列表于表6。

经测量,在3层小波变换下,各个波头到来时间相等。计算出后续波头②—④和初始波头①的时间差,并取波速度 $v=292.6\text{ km/ms}$,计算出行波传播距离,均列于表6。

对比图8中的系统结构(线路长度)、图6中的

各个波头和表6中各个波头的传播距离,可以看出①是图6中的 i_0 ,②是图6中的 i_3 ,③是图6中的 i_2 ,④是图6中的 i_3 经母线N后的反射波。观察波头②、③、④的比值可知,波头②、④是C类波头,波头③是B类行波。波头③、④符合3.3节中的分析。在3.3节的分析中,波头②应为B类行波。这是因为在3.3节中最大值取得的条件为 $R_g=500\ \Omega$,而在本例中 $R_g=0$ 。

表6 各类行波波头幅值时间表

Table 6 Amplitude-time of all kinds of wave front

行波波头		第2层	第3层	第4层	时间/ms	时间差/ms	传播 距离/km
		小波变换	小波变换	小波变换			
①	幅值/kA	-0.906 1	-0.937 4	-0.943	60.31	—	—
②	幅值/kA	0.465 4	0.489 7	0.501 3	62.70	2.39	699
	百分比	-51.36%	-52.24%	-53.16%			
③	幅值/kA	-0.745 8	-0.896 0	-0.934 0	64.41	4.1	1 200
	百分比	82.31%	95.58%	99.05%			
④	幅值/kA	0.384 3	0.471 9	0.506 6	66.8	6.49	1 899
	百分比	-42.41%	-50.34%	-53.72%			
⑤	幅值/kA	-0.741 1	-0.650 0	-0.529 7	71	10.69	—
	百分比	81.79%	69.34%	56.17%			

应用第1节中的闭锁策略和3.5节中的整定值对该故障进行闭锁,绘出图9(b)、图9(c)和图9(d)中阴影。观察图9(b)、图9(c)和图9(d)的闭锁区间可知,B类波头③被时间闭锁策略闭锁,C类波头②、④被幅值闭锁策略闭锁。由图9(b)和图9(c)中后续故障初始波头⑤并未被闭锁,这意味着紧接着初始故障的再次故障可被检测出。图9(d)中后续波头较小,落在闭锁区域内,再次故障不可被检测出。可见这种整定值的设定适用于高频带部分,而不适用于低频带部分。通过观察也可发现,反映低频带部分的图9(d)中波头⑤已混叠在C类波头中,即使阈值更改也不可能被区分。

5 结论

本文通过对故障初始行波波头及其后续折反射波头的分析,提出了一种行波故障定位的时间-幅值闭锁策略并给出了整定值。这种闭锁策略有效地屏蔽了后续折反射波头对行波故障定位的影响,同时能尽快地开放算法,做好监测下一次故障的准备,最大可能性地监测所有时刻发生的故障。只要第二次故障发生于首次故障的5 ms之后,故障初始角大于 36.9° ,第二次故障即可被可靠地捕捉到。

仿真分析证明了该闭锁策略的有效性,同时指出该闭锁策略宜应用于行波高频部分。

参考文献

- [1] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-80.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Fault location method for HVDC transmission lines on the basis of the distributed parameter model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80.
- [2] 丁晓兵, 陈玉林, 史泽兵, 等. 线路保护行波测距一体化装置设计与关键技术研究[J]. 南方电网技术, 2017, 11(6): 57-62.
DING Xiaobing, CHEN Yulin, SHI Zebing, et al. Research on integrated device of transmission line protection and traveling wave fault location[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(6): 57-62.
- [3] 于华楠, 马聪聪, 王鹤. 基于压缩感知估计行波自然频率的输电线路故障定位方法研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 140-148.
YU Huanan, MA Congcong, WANG He. Transmission line fault location method based on compressed sensing estimation of traveling wave natural frequencies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 140-148.
- [4] 李聪聪. 交流输电线路双端行波测距方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.

- LI Congcong. Studies on fault location method for AC transmission line based on double-end traveling wave[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [5] 王博, 谷昌瑞, 吉晓筱, 等. 基于多点故障行波检测的改进分布式故障测距方法研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 120-127.
- WANG Bo, GU Changrui, JI Xiaoxiao, et al. Research on improved distributed fault location method based on multi-point fault's traveling wave detection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 120-127.
- [6] 郝勇奇, 王倩, 周士琼, 等. 基于 LMD 与 Teager 能量算子的 VSC-HVDC 输电线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 81-88.
- HAO Yongqi, WANG Qian, ZHOU Shiqiong, et al. Fault location for VSC-HVDC transmission lines based on LMD and Teager energy operator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 81-88.
- [7] DENG Feng, ZENG Xiangjun, PAN Lanlan. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 199-210. DOI: 10.1186/s41601-017-0042-4.
- [8] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 8-13.
- GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. A new fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 8-13.
- [9] 李振兴, 吴李群, 田斌, 等. 不同步双端数据修正波速的单端行波测距算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 16-22.
- LI Zhenxing, WU Liqun, TIAN Bin, et al. Single-terminal traveling wave location algorithm based on amending wave velocity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 16-22.
- [10] 刘顺桂, 李勋, 张宏钊, 等. 一种采用时间判别法的混合线路故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 41-46.
- LIU Shungui, LI Xun, ZHANG Hongzhao, et al. A traveling wave fault location method of hybrid line using time discrimination[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 41-46.
- [11] 何晓, 雷勇, 周聪聪, 等. 消除零模波速影响的配电网单端行波故障测距算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 39-45.
- HE Xiao, LEI Yong, ZHOU Congcong, et al. A single-terminal fault location algorithm in distribution network for eliminating the effect of the velocity of zero-mode traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 39-45.
- [12] 高效海, 苏晓龙. 一种新的单端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 87-91.
- GAO Xiaohai, SU Xiaolong. A new method for single-ended traveling wave fault location[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 87-91.
- [13] 仇小勇. XC-2000 行波测距装置测距成功率的提高[J]. 江苏电机工程, 2005(4): 60-61.
- QIU Xiaoyong. Improvement of success ration of XC-2000 travelling wave fault location device[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2005(4): 60-61.
- [14] 魏萌. 行波测距装置测距性能测试分析及新型双端法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- WEI Meng. The test and analysis of traveling wave fault location device and research on new double-terminal location method[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [15] 禹超. 行波测距装置在输电线路故障定位中的应用分析[J]. 电工技术, 2014(12): 13-14.
- YU Chao. Application of traveling wave location device in fault location of transmission lines[J]. Electric Engineering, 2014(12): 13-14.
- [16] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 7-11.
- QIN Jian, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao, et al. A new double terminal method of travelling wave fault location using wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 7-11.
- [17] 覃剑, 彭莉萍, 王和春. 基于小波变换技术的输电线路单端行波故障测距[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 62-65, 86.
- QIN Jian, PENG Liping, WANG Hechun. Single terminal methods of traveling wave fault location in transmission line using wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 62-65, 86.
- [18] 江雪晨, 张翠玲, 宁一. 基于透射模量的第 2 个反向行波性质识别方法[J]. 高压电器, 2017, 53(4): 122-128, 136.
- JIANG Xuechen, ZHANG Cuiling, NING Yi. Identification method for the nature of the second reverse traveling wave based on the cross coupling modulus[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4): 122-128, 136.
- [19] 张广斌, 束洪春, 于继来, 等. 220 kV 电网电流行波测距装置的优化布点方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6246-6253.

- ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Optimal placement of traveling wave current fault location devices in 220 kV power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6246-6253.
- [20] 方夏. 电流型行波装置优化布局研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- FANG Xia. Study on optimal layout of current traveling wave location devices[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [21] 钱海, 贾松江, 李治兵, 等. 基于历史故障波形的行波测距装置检验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 139-143.
- QIAN Hai, JIA Songjiang, LI Zhibing, et al. Inspection of traveling wave fault location equipment based on the historical fault waveforms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 139-143.
- [22] 于华楠, 马聪聪, 王鹤. 基于压缩感知估计行波自然频率的输电线路故障定位方法研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 140-148.
- YU Huanan, MA Congcong, WANG He. Transmission line fault location method based on compressed sensing estimation of traveling wave natural frequencies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 140-148.
- [23] 贾惠彬, 苏思岚, 李明舒, 等. 考虑线路参数频变特性的小波域行波信号奇异性增强方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(15): 153-160.
- JIA Huibin, SU Silan, LI Mingshu, et al. A singularity enhancement method in wavelet domain for traveling-wave with considering frequency characteristic of line parameter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(15): 153-160.
- [24] 何金良. 时频电磁暂态分析理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [25] 王世勇. 基于极化电流行波的方向比较式纵联保护研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- WANG Shiyong. Studies on directional comparison pilot protection based on polarized current travelling wave[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [26] 施慎行, 董新洲, 周双喜. 单相接地故障行波分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 29-32, 53.
- SHI Shenxing, DONG Xinzhou, ZHOU Shuangxi. Analysis of single-phase-to-ground fault generated traveling waves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 29-32, 53.
-
- 收稿日期: 2018-03-28; 修回日期: 2018-08-07
- 作者简介:
- 崔柳(1984—), 女, 博士, 工程师, 主要从事行波保护及行波测距、直流运行与控制技术研究; E-mail: cui-liu@csg.cn
- 李书勇(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事直流运行与控制技术研究; E-mail: lisy@csg.cn
- 郭琦(1979—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统安全稳定控制、(特)高压直流输电研究。E-mail: guoqi@csg.cn
- (编辑 周金梅)