



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105353269 B

(45)授权公告日 2018.02.02

(21)申请号 201510673397.5

(22)申请日 2015.10.16

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105353269 A

(43)申请公布日 2016.02.24

(73)专利权人 上海电力学院

地址 200090 上海市杨浦区平凉路2103号

(72)发明人 唐忠 杨建

(74)专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

代理人 叶敏华

(51)Int.Cl.

G01R 31/08(2006.01)

(56)对比文件

CN 102253315 A,2011.11.23,

CN 104062549 A,2014.09.24,

US 2014300370 A1,2014.10.09,

WO 2014053174 A1,2014.04.10,

CN 101232176 A,2008.07.30,

CN 101867178 A,2010.10.20,

徐汝俊.配电网故障测距方法的仿真分析.

《电力科学与工程》.2010,第26卷(第4期),

Stefan Gustafsson 等.Electromagnetic

Dispersion Modeling and Measurements for

HVDC Power Cables.《IEEE TRANSACTIONS ON

POWER DELIVERY》.2014,第29卷(第6期),

审查员 李俊红

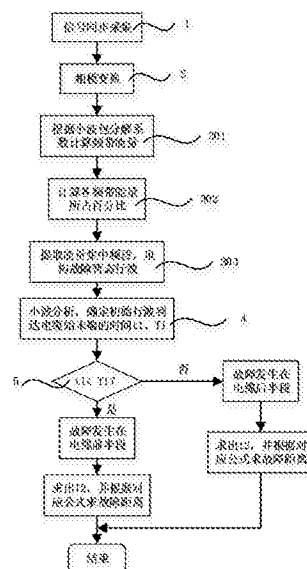
权利要求书3页 说明书12页 附图5页

(54)发明名称

一种高压电缆在线故障测距方法

(57)摘要

本发明涉及一种高压电缆在线故障测距方法,包括以下步骤:(1)在电缆始末端采集暂态行波电流信号;(2)将步骤(1)中的电流信号通过相模变换转换成互相独立的模量电流信号 $i_1 \sim i_6$;(3)选取步骤(2)中的模量电流信号 i_4 进行小波包分解,利用小波包分解系数求得各个频带的能量比,然后提取能量比较高的频带,重构暂态行波;(4)对步骤(3)中的重构暂态行波进行小波分析,确定初始暂态行波到达电缆始末端的时间 t_1 、 T_1 ;(5)根据步骤(4)中 t_1 、 T_1 的大小判断故障发生的区域,求出故障点距电缆始端的地理距离。与现有技术相比,本发明具有测距精度高、干扰少等优点。



1. 一种高压电缆在线故障测距方法,其特征在于,该故障测距方法包括以下步骤:

(1) 信号采集:在电缆始末端采集暂态行波电流信号;

(2) 相模变换:将步骤(1)中的电流信号通过相模变换转换成6个互相独立的模量电流信号 $i_1 \sim i_6$;

(3) 暂态行波的分解与重构:选取步骤(2)中的模量电流信号 i_4 进行小波包分解,利用小波包分解系数求得各个频带的能量比,然后提取能量百分比>5%的频带,重构暂态行波;

(4) 小波分析:对步骤(3)中的重构后的暂态行波进行小波分析,确定初始暂态行波到达电缆始端时间 t_1 和到达电缆末端的时间 T_1 ;

(5) 故障点距电缆始端的地理距离计算:根据步骤(4)中 t_1 、 T_1 的大小判断故障发生的区域,如果故障发生在电缆前半段,则求出电缆末端第二个暂态行波波头到达测量点的时间 T_2 ,进而求出故障距离;如果故障发生在电缆后半段,则求出电缆始端第二个暂态行波波头到达测量点的时间 t_2 ,进而求出故障点距电缆始端的地理距离。

2. 根据权利要求1所述的一种高压电缆在线故障测距方法,其特征在于,所述的步骤(2)中模量电流信号 $i_1 \sim i_6$ 的计算式如下:

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c + i_A + i_B + i_C) \\ i_2 = \frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - 2i_b + i_c + i_A - 2i_B + i_C) \\ i_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_a - i_c + i_A - i_C) \end{cases} \begin{cases} i_4 = -\frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c) \\ i_5 = -\frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - 2i_b + i_c) \\ i_6 = -\frac{1}{\sqrt{2}}(i_a - i_c) \end{cases}$$

其中, i_a, i_b, i_c 分别为a相线芯电流、b相线芯电流、c相线芯电流, i_A, i_B, i_C 分别为a相护套电流、b相护套电流、c相护套电流。

3. 根据权利要求1所述的一种高压电缆在线故障测距方法,其特征在于,所述的步骤(3)具体为:

(301) 采用小波包分析法将模量电流信号 i_4 分解为低频近似部分和高频细节部分,再将所述的低频近似部分和高频细节部分分解成第二层低频部分与高频部分,经过 i 层分解,模量电流信号 i_4 就被分解在 2^i 个不同的频带,利用小波包分解系数计算各个频带能量的大小,各个频带的能量计算式如下:

$$E_{i,j} = \sum_{k=1}^N |d_{j,k}|^2$$

其中, i 为小波包分解的层数, N 为暂态行波信号的采样点数, $d_{j,k}$ 表示第 i 层、第 j 个节点对应的暂态行波信号第 k 个采样点的小波包分解系数,其中, $j=0,1,2,\dots,2^i-1, k=1,2,\dots,N$;

(302) 对第 i 层每个频带的能量进行归一化处理,可得各个频带能量所占的百分比 η_j ,其计算式如下:

$$\eta_j = \frac{E_{i,j}}{\sum_{j=0}^{2^j-1} E_{i,j}} \times 100\%$$

(303) 提取 $\eta_j > 5\%$ 的频带, 重构暂态行波。

4. 根据权利要求1所述的一种高压电缆在线故障测距方法, 其特征在于, 所述的步骤(5) 具体为: 若 $t_1 < T_1$, 则说明故障发生在电缆前半段, 求出电缆末端第二个暂态行波波头到达测量点的时间 T_2 , 进一步求出故障点距电缆始端的地理距离 L_f , L_f 计算式如下:

$$L_f = \frac{L(T_2 - T_1)}{2(T_2 - t_1)},$$

其中, L 为电缆的地理长度;

若 $t_1 > T_1$, 则说明故障发生在电缆后半段, 求出电缆始端第二个暂态行波波头到达测量点的时间 t_2 , 进一步求出故障点距电缆始端的地理距离 L_f , L_f 计算式如下:

$$L_f = L - \frac{L(t_2 - t_1)}{2(t_2 - T_1)},$$

其中, L 为电缆的地理长度。

5. 根据权利要求4所述的一种高压电缆在线故障测距方法, 其特征在于, 所述的故障点距电缆始端的距离 L_f 的具体计算过程如下: 设电缆的实际长度为 l 、地理长度为 L , 假设两者之间的关系近似为: $l = \lambda L$, λ 为电缆实际长度 l 与地理长度 L 之间的比例系数,

①当故障发生在电缆前半段时, 暂态行波在电缆中的波速为:

$$\begin{cases} v = \frac{l}{T_2 - t_1} \\ l = \lambda L \end{cases} \quad (1)$$

故障点距电缆始端的实际距离为:

$$\begin{cases} l_f = \frac{1}{2}v(T_2 - T_1) \\ l_f = \lambda L_f \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)求得故障点距电缆始端的地理距离 L_f 为:

$$L_f = \frac{L(T_2 - T_1)}{2(T_2 - t_1)};$$

②故障发生在电缆后半段时, 暂态行波在电缆中的波速为:

$$\begin{cases} v = \frac{l}{t_2 - T_1} \\ l = \lambda L \end{cases} \quad (3)$$

故障点距电缆始端的实际距离为:

$$\begin{cases} l_f = l - \frac{1}{2}v(t_2 - t_1) \\ l_f = \lambda L_f \end{cases} \quad (4)$$

根据式 (3) 和式 (4) 求得故障点距电缆始端的地理距离 L_f 为:

$$L_f = L - \frac{L(t_2 - t_1)}{2(t_2 - T_1)}。$$

一种高压电缆在线故障测距方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种电缆故障测距方法,尤其是涉及一种高压电缆在线故障测距方法。

背景技术

[0002] 电力电缆一般埋在地下,故障精确定位和修复比较困难,故障发生在电缆线路通常会引起重大的经济损失。研究快速、精确的电缆故障测距方法有助于减少故障巡线时间,尽快修复故障,减少因停电造成的经济损失,对保障城市电网的供电可靠性具有非常重要的意义。

[0003] 电缆故障测距方法通常分为离线测距方法和在线测距方法,在线测距方法还不成熟,目前普遍采用的是离线方式的故障测距仪。由于高压电缆充电电流比较大且故障多为高阻或闪络性故障,实际中很难产生足够高的电压将故障点击穿,并且高压电缆一般采用金属护套层交叉互联的接地方式,行波传播到交叉互联点和直接接地点,会因波阻抗不连续,从而导致行波在交叉互联电缆上传播会产生复杂的折反射,造成故障点反射波难以识别。在直接接地点,外模量会被接地点拦截而流入大地,内模量则完好无损地通过,即在直接接地点,外模量行波不会给内模量行波带来干扰。在交叉互联点,内外模量会因行波的折反射而发生相互转换,由于内、外模量波速不同,行波整体波速表现为内外模量的混合波速。对于直埋电缆,内模量波速大于外模量波速,内模量行波先到达测量点,外模量不会干扰内模量行波。对于架空敷设或隧道敷设的电缆,外模量行波波速大于内模量波速,外模量行波先到达测量点,会给内模量行波波头的识别带来干扰,造成内模量行波波头难以识别。

[0004] 因此,离线方式的故障测距不适用于高压电缆的故障测距,只适用于电压等级在35KV以下的中低压电缆的故障测距。

[0005] 对于交叉互联电缆的故障测距需要先确定故障段,解开交叉互联点,才能进行故障测距,耗费时间长,工作量大。随着高压输电电缆的广泛应用,研究适用于高压电缆的在线故障测距算法是非常有必要的。电缆故障时产生的暂态行波具有从低频到高频的连续频谱,由于不同频率分量的行波传播速度不同,衰减也不同,行波沿电缆线路传播过程中会发生色散。使得行波波头趋于平缓,整体波速趋于下降,给行波测距中波头的识别和波速的确定带来很大困难。由行波色散产生的误差对于架空线路的故障测距而言尚可接受,而对于频变特性更强,测距精度要求更高的电缆线路而言却是不可接受的。传统的高压电缆在线测距算法一般都假设行波在电缆中的传播速度为常数,没有考虑电缆运行参数变化及行波色散对行波波速的影响,测距精度不高。

发明内容

[0006] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种测距精度高、计算方便、干扰少的高压电缆在线故障测距方法。

[0007] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:一种高压电缆在线故障测距方法,

包括以下步骤:

[0008] (1) 信号采集:在电缆始末端采集暂态行波电流信号;

[0009] (2) 相模变换:将步骤(1)中的电流信号通过相模变换转换成6个互相独立的模量电流信号 $i_1 \sim i_6$;

[0010] (3) 暂态行波的分解与重构:选取步骤(2)中的模量电流信号 i_4 进行小波包分解,利用小波包分解系数求得各个频带的能量比,然后提取能量百分比>5%的频带,重构暂态行波;通过对暂态行波的分解与重构,有效降低了暂态行波的频带宽度,减小了暂态行波色散对测距结果的影响。

[0011] (4) 小波分析:对步骤(3)中重构后的暂态行波进行小波分析,确定初始暂态行波到达电缆始端的时间 t_1 和到达电缆末端的时间 T_1 ;

[0012] (5) 故障点距电缆始端的地理距离计算:根据步骤(4)中 t_1 、 T_1 的大小判断故障发生的区域,如果故障发生在电缆前半段,则求出电缆末端第二个暂态行波波头到达测量点的时间 T_2 ,进而求出故障距离;如果故障发生在电缆后半段,则求出电缆始端第二个暂态行波波头到达测量点的时间 t_2 ,进而求出故障点距电缆始端的地理距离。

[0013] 所述的步骤(2)中模量电流信号 $i_1 \sim i_6$ 的计算式如下:

$$[0014] \quad \begin{cases} i_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c + i_A + i_B + i_C) \\ i_2 = \frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - 2i_b + i_c + i_A - 2i_B + i_C) \\ i_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_a - i_c + i_A - i_C) \end{cases} \quad \begin{cases} i_4 = -\frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c) \\ i_5 = -\frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - 2i_b + i_c) \\ i_6 = -\frac{1}{\sqrt{2}}(i_a - i_c) \end{cases}$$

[0015] 其中, i_a 、 i_b 、 i_c 分别为a相线芯电流、b相线芯电流、c相线芯电流, i_A 、 i_B 、 i_C 分别为a相护套电流、b相护套电流、c相护套电流。

[0016] 所述的步骤(3)具体为:

[0017] (301) 采用小波包分析法将模量电流信号 i_4 分解为低频近似部分和高频细节部分,再将所述的低频近似部分和高频细节部分分解成第二层低频部分与高频部分,经过 i 层分解,模量电流信号 i_4 就被分解在 2^i 个不同的频带,利用小波包分解系数计算各个频带能量的大小,各个频带的能量计算式如下:

$$[0018] \quad E_{i,j} = \sum_{k=1}^N |d_{j,k}|^2$$

[0019] 其中, i 为小波包分解的层数, N 为暂态行波信号的采样点数, $d_{j,k}$ 表示第 i 层、第 j 个节点对应的暂态行波信号第 k 个采样点的小波包分解系数,其中, $j=0,1,2 \cdots 2^i-1, k=1,2, \cdots N$;

[0020] 对于交叉互联电缆,选用模量电流信号 i_4 作为行波测距信号,可以最大限度消除内外模量交叉透射给行波测距带来的干扰问题。

[0021] (302) 对第 i 层每个频带的能量进行归一化处理,可得各个频带能量所占的百分比 η_j ,其计算式如下:

$$[0022] \quad \eta_j = \frac{E_{i,j}}{\sum_{j=0}^{2^i-1} E_{i,j}} \times 100\%$$

[0023] (303) 提取 $\eta_j > 5\%$ 的频带, 重构故障暂态行波。通过提取故障暂态行波中能量百分比大于5%的频带进行暂态行波的重构, 这样可以去除能量百分比比较低、对测距结果影响很小的频带, 有效降低了暂态行波的频带宽度, 减小了行波色散对测距结果的影响, 提高了故障测距精度;

[0024] 所述的步骤(5)具体为: 若 $t_1 < T_1$, 则说明故障发生在电缆前半段, 求出电缆末端第二个暂态行波波头到达测量点的时间 T_2 , 进一步求出故障点距电缆始端的地理距离 L_f , L_f 计算式如下:

$$[0025] \quad L_f = \frac{L(T_2 - T_1)}{2(T_2 - t_1)},$$

[0026] 其中, L 为电缆的地理长度;

[0027] 若 $t_1 > T_1$, 则说明故障发生在电缆后半段, 求出电缆始端第二个暂态行波波头到达测量点的时间 t_2 , 进一步求出故障点距电缆始端的地理距离 L_f , L_f 计算式如下:

$$[0028] \quad L_f = L - \frac{L(t_2 - t_1)}{2(t_2 - T_1)},$$

[0029] 其中, L 为电缆的地理长度。

[0030] 所述的故障点距电缆始端的距离 L_f 的计算式推导过程如下: 实际中电缆一般采用蛇形敷设, 电缆的实际长度与地理长度并不相等, 设电缆的实际长度为 l 、地理长度为 L , 假设两者之间的关系近似为: $l = \lambda L$, λ 为电缆实际长度 l 与地理长度 L 之间的比例系数,

[0031] ①当故障发生在电缆前半段时, 暂态行波在电缆中的波速为:

$$[0032] \quad \begin{cases} v = \frac{l}{T_2 - t_1} \\ l = \lambda L \end{cases} \quad (1)$$

[0033] 故障点距电缆始端的实际距离为:

$$[0034] \quad \begin{cases} l_f = \frac{1}{2} v (T_2 - T_1) \\ l_f = \lambda L_f \end{cases} \quad (2)$$

[0035] 根据式(1)和式(2)求得故障点距电缆始端的地理距离 L_f 为:

$$[0036] \quad L_f = \frac{L(T_2 - T_1)}{2(T_2 - t_1)};$$

[0037] ②故障发生在电缆后半段时, 暂态行波在电缆中的波速为:

$$[0038] \quad \begin{cases} v = \frac{l}{t_2 - T_1} \\ l = \lambda L \end{cases} \quad (3)$$

[0039] 故障点距电缆始端的实际距离为：

$$[0040] \quad \begin{cases} l_f = l - \frac{1}{2}v(t_2 - t_1) \\ l_f = \lambda L_f \end{cases} \quad (4)$$

[0041] 根据式 (3) 和式 (4) 求得故障点距电缆始端的地理距离 L_f 为：

$$[0042] \quad L_f = L - \frac{L(t_2 - t_1)}{2(t_2 - T_1)}。$$

[0043] 该计算方法不受电缆波速变化的影响在线行波测距算法,算法考虑到了电缆的蛇形敷设,采用该算法进行暂态行波测距所需的已知条件仅为电缆的地理长度,计算方便;

[0044] 1 电缆模量电流信号的计算

[0045] 三相单芯电力电缆是由导电线芯和金属护套组成的六导体系统,该六导体系统之间存在着耦合,为了在电缆系统中采用暂态行波方法测距,必须将电缆的电压、电流信号通过相模变换矩阵转换成互相独立的模量信号进行分析,采用扩展Clark矩阵对电缆系统进行相模变换。由于外模量以金属护套层和大地为回路,传播特性不稳定,衰减系数大,因此我们主要研究电缆内模量电流的传输特性。模量电流信号 $i_1 \sim i_6$ 的在扩展Clark矩阵变换下的计算式如下：

$$[0046] \quad \begin{cases} i_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c + i_A + i_B + i_C) \\ i_2 = \frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - 2i_b + i_c + i_A - 2i_B + i_C) \\ i_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_a - i_c + i_A - i_C) \end{cases} \quad \begin{cases} i_4 = -\frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c) \\ i_5 = -\frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - 2i_b + i_c) \\ i_6 = -\frac{1}{\sqrt{2}}(i_a - i_c) \end{cases}$$

[0047] 其中, i_a, i_b, i_c 分别为a相线芯电流、b相线芯电流、c相线芯电流, i_A, i_B, i_C 分别为a相护套电流、b相护套电流、c相护套电流, i_1, i_2, i_3 为外模量电流信号, i_4, i_5, i_6 为内模量电流信号。

[0048] 2 内模量与外模量波速干扰的解决方法

[0049] 对于交叉互联电缆,由于金属护套层的交叉换位连接,在互联点前后,波阻抗不连续。对互联点前的波阻抗矩阵 Z_1 的行、列进行相应的换位即可得到互联点后的波阻抗矩阵 Z_2 ,即 $Z_2 = PZ_1P^T$ 。对于图3所示的换位情况,变换位矩阵 P 为：

$$[0050] \quad P = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$$

[0051] 其中阻抗矩阵的排列顺序为:a相线芯,b相线芯,c相线芯,a相金属护套,b相金属护套,c相金属护套。

[0052] 通过计算可得某220kv隧道敷设的电缆,采用图3的交叉互联方式,在频率为1KHz时的波阻抗矩阵为:

$$[0053] \quad Z_1 = \begin{bmatrix} 39.84 & 8.12 & 6.71 & 22.8 & 8.13 & 6.71 \\ 8.12 & 39.38 & 8.12 & 8.13 & 22.33 & 8.13 \\ 6.71 & 8.12 & 39.84 & 6.71 & 8.13 & 22.8 \\ 22.8 & 8.13 & 6.71 & 22.77 & 8.14 & 6.72 \\ 8.13 & 22.33 & 8.13 & 8.14 & 22.3 & 8.14 \\ 6.71 & 8.13 & 22.8 & 6.72 & 8.14 & 22.7 \end{bmatrix}$$

[0054] 互联点后的波阻抗矩阵 $Z_2 = PZ_1P^T$,根据 Z_1 、 Z_2 可得电流暂态行波的折射系数矩阵 α_i 和反射系数矩阵 β_i 。电流暂态行波在模量域的折反射关系满足:

$$[0055] \quad \begin{cases} i_q = T_i I_{qm} \\ i_0 = T_i I_{om} \\ i_q = \alpha_i i_0 \end{cases}$$

[0056] 其中: I_{om} 和 I_{qm} 分别为由6个模量电流组成的入射模量电流矩阵和折射模量电流矩阵。由上式可得: $i_{qm} = T_i^{-1} \alpha_i T_i \cdot i_{om}$ 。

[0057] 所以电流暂态行波在模量域的折射系数矩阵为: $\alpha_{im} = T_i^{-1} \alpha_i T_i$,通过MATLAB计算可得:

$$[0058] \quad \alpha_{im} = \begin{bmatrix} 1.0001 & -0.0560 & -0.0302 & 0.0001 & -0.0564 & -0.0457 \\ -0.0092 & 1.8107 & 0.7298 & -0.0117 & 0.4234 & 1.1992 \\ -0.0059 & -0.7132 & 1.8949 & -0.0055 & -1.1612 & 0.4894 \\ -0.0000 & 0.0270 & 0.0156 & 0.9999 & 0.0271 & 0.0232 \\ 0.0012 & -0.8385 & -0.4833 & 0.0020 & 0.1614 & -0.7183 \\ 0.0040 & 0.5015 & -0.8670 & 0.0045 & 0.7262 & 0.1332 \end{bmatrix}$$

[0059] 交叉互联点前后模量电流之间的关系为:

[0060] $[I_{qm1} I_{qm2} I_{qm3} I_{qm4} I_{qm5} I_{qm6}]^T = \alpha_{im} [I_{om1} I_{om2} I_{om3} I_{om4} I_{om5} I_{om6}]^T$,除对角线元素外 α_{im} 第4列的元素很小,且明显小于其它各列的元素,说明模量电流信号4在交叉互联点透射到其它模量中的分量最小。由 $\alpha_{im44} = 0.9999$, $I_{qm4} = \alpha_{im44} I_{om4}$ 可知入射模量电流信号4在交叉互联点基本全部转化成折射模量电流信号4,不发生反射。因此,采用模量电流信号4作为交叉互联电缆暂态行波测距信号,可以有效解决暂态行波折反射复杂造成的故障点反射波难以识别问题。

[0061] 3暂态行波色散对故障测距的影响

[0062] 高压电缆的线芯和金属护套层在通有交流电时有趋肤效应,线路的电阻和电感会随电流频率的变化而变化。线路对于不同频率分量的行波会呈现出不同的传输特性,电缆系统在频域的传播系数为:

$$[0063] \quad \gamma(\omega) = \sqrt{ZY} = \alpha(\omega) + j\beta(\omega)$$

[0064] 其中:[Z]、[Y]分别为电缆的阻抗矩阵和导纳矩阵, $\alpha(\omega)$ 为幅值衰减系数,使得不同频率信号的幅值衰减不同; $\beta(\omega)$ 为相位系数,使得不同频率信号的波速衰减不同,电流暂态行波和电压暂态行波具有相同的传播系数。

[0065] 电缆故障时产生的暂态行波具有从低频到高频的连续频谱,由于不同频率分量的暂态行波传播速度不同,衰减也不同,暂态行波沿电缆线路传播过程中会发生色散。使得暂态行波波头趋于平缓,整体波速趋于下降,给暂态行波测距中波头的识别和波速的确定带来很大困难。由暂态行波色散产生的误差对于架空线路的故障测距而言尚可接受,而对于频变特性更强,测距精度要求更高的电缆线路而言却是不可接受的。

[0066] 为此,本申请采用如步骤(3)所述的小波包法分解并重构暂态行波,

[0067] 4不受暂态行波波速影响的测距算法

[0068] 本申请采用如步骤(5)所述的测距算法,其中,考虑到现实中电缆一般采用蛇形敷设,电缆的实际长度并不易求得,设电缆的实际长度 l 和地理长度 L 之间的关系近似为: $l = \lambda L$, λ 为蛇形敷设电缆实际长度与地理长度之间的比例系数。

[0069] 与现有技术相比,本发明具有以下优点:

[0070] (1) 本申请通过研究模量电流信号在高压交叉互联电缆中的传播特性,提出了以模量电流作为高压电缆的行波测距信号,有效解决了交叉互联电缆波阻抗不连续造成的行波折反射复杂问题,以及内外模量行波的交叉透射问题;

[0071] (2) 本申请设计了不受电缆波速变化的影响在线行波测距算法,算法考虑到了电缆的蛇形敷设,采用该算法进行行波测距所需的已知条件仅为电缆的地理长度,计算方便;

[0072] (3) 本申请通过提取故障暂态行波中能量百分比比较高的频带进行暂态行波的重构,有效降低了暂态行波的频带宽度,减小了行波色散对测距结果的影响,提高了故障测距精度;

[0073] (4) 对于交叉互联电缆,选用模量电流信号 i_4 作为行波测距信号,可以最大限度消除内外模量交叉透射给行波测距带来的干扰问题。

附图说明

[0074] 图1高压电缆在线故障测距方法流程图;

[0075] 图2单芯交联聚乙烯电缆结构图;

[0076] 图3交叉互联电缆内、外模量的转换图;

[0077] 图4小波分解树示意图;

[0078] 图5电缆前半段故障时暂态行波的折反射示意图;

[0079] 图6电缆后半段故障时暂态行波的折反射示意图;

[0080] 图7电缆故障时的暂态行波;

[0081] 图8始端暂态行波频带能量百分比;

[0082] 图9末端暂态行波频带能量百分比;

[0083] 图10重构后的暂态行波；

[0084] 图11电缆系统仿真模型。

具体实施方式

[0085] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

[0086] 如图1所示,一种高压电缆在线故障测距方法,包括以下步骤:

[0087] (1) 信号采集:在电缆始末端采集暂态行波电流信号;

[0088] (2) 相模变换:将步骤(1)中的电流信号通过相模变换转换成6个互相独立的模量电流信号 $i_1 \sim i_6$;

[0089] (3) 暂态行波的分解与重构:选取步骤(2)中的模量电流信号 i_4 进行小波包分解,利用小波包分解系数求得各个频带的能量比,然后提取能量百分比>5%的频带,重构暂态行波;通过对暂态行波的分解与重构,有效降低了暂态行波的频带宽度,减小了暂态行波色散对测距结果的影响。

[0090] (4) 小波分析:对步骤(3)中重构后的暂态行波进行小波分析,确定初始暂态行波到达电缆始端的时间 t_1 和到达电缆末端的时间 T_1 ;

[0091] (5) 故障点距电缆始端的地理距离计算:根据步骤(4)中 t_1 、 T_1 的大小判断故障发生的区域,如果故障发生在电缆前半段,则求出电缆末端第二个暂态行波波头到达测量点的时间 T_2 ,进而求出故障距离;如果故障发生在电缆后半段,则求出电缆始端第二个暂态行波波头到达测量点的时间 t_2 ,进而求出故障点距电缆始端的地理距离。

[0092] 所述的步骤(2)中模量电流信号 $i_1 \sim i_6$ 的计算式如下:

$$[0093] \quad \begin{cases} i_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c + i_A + i_B + i_C) \\ i_2 = \frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - 2i_b + i_c + i_A - 2i_B + i_C) \\ i_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_a - i_c + i_A - i_C) \end{cases} \quad \begin{cases} i_4 = -\frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c) \\ i_5 = -\frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - 2i_b + i_c) \\ i_6 = -\frac{1}{\sqrt{2}}(i_a - i_c) \end{cases}$$

[0094] 其中, i_a 、 i_b 、 i_c 分别为a相线芯电流、b相线芯电流、c相线芯电流, i_A 、 i_B 、 i_C 分别为a相护套电流、b相护套电流、c相护套电流。

[0095] 所述的步骤(3)具体为:

[0096] (301) 采用小波包分析法将模量电流信号 i_4 分解为低频近似部分和高频细节部分,再将所述的低频近似部分和高频细节部分分解成第二层低频部分与高频部分,经过 i 层分解,模量电流信号 i_4 就被分解在 2^i 个不同的频带,利用小波包分解系数计算各个频带能量的大小,各个频带的能量计算式如下:

$$[0097] \quad E_{i,j} = \sum_{k=1}^N |d_{j,k}|^2$$

[0098] 其中, i 为小波包分解的层数, N 为暂态行波信号的采样点数, $d_{j,k}$ 表示第 i 层、第 j 个节点对应的暂态行波信号第 k 个采样点的小波包分解系数,其中, $j=0,1,2 \cdots 2^i-1, k=1$,

2, …N;

[0099] 对于交叉互联电缆,选用模量电流信号 i_4 作为行波测距信号,可以最大限度消除内外模量交叉透射给行波测距带来的干扰问题。

[0100] (302) 对第 i 层每个频带的能量进行归一化处理,可得各个频带能量所占的百分比 η_j ,其计算式如下:

$$[0101] \quad \eta_j = \frac{E_{i,j}}{\sum_{j=0}^{2^i-1} E_{i,j}} \times 100\%$$

[0102] (303) 提取 $\eta_j > 5\%$ 的频带,重构故障暂态行波。通过提取故障暂态行波中能量百分比大于5%的频带进行暂态行波的重构,这样可以去除能量百分比较低、对测距结果影响很小的频带,有效降低了暂态行波的频带宽度,减小了行波色散对测距结果的影响,提高了故障测距精度;

[0103] 所述的步骤(5)具体为:若 $t_1 < T_1$,则说明故障发生在电缆前半段,此时故障点的暂态行波在电缆线路上的折反射情况如图5所示,求出电缆末端第二个暂态行波波头到达测量点的时间 T_2 ,进一步求出故障点距电缆始端的地理距离 L_f , L_f 计算式如下:

$$[0104] \quad L_f = \frac{L(T_2 - T_1)}{2(T_2 - t_1)},$$

[0105] 其中, L 为电缆的地理长度;

[0106] 若 $t_1 > T_1$,则说明故障发生在电缆后半段,此时故障点的暂态行波在电缆线路上的折反射情况如图6所示,求出电缆始端第二个暂态行波波头到达测量点的时间 t_2 ,进一步求出故障点距电缆始端的地理距离 L_f , L_f 计算式如下:

$$[0107] \quad L_f = L - \frac{L(t_2 - t_1)}{2(t_2 - T_1)},$$

[0108] 其中, L 为电缆的地理长度。

[0109] 所述的故障点距电缆始端的距离 L_f 的计算式推导过程如下:设电缆的实际长度为 l 、地理长度为 L ,假设两者之间的关系近似为: $l = \lambda L$, λ 为电缆实际长度 l 与地理长度 L 之间的比例系数,

[0110] ①当故障发生在电缆前半段时,暂态行波在电缆中的波速为:

$$[0111] \quad \begin{cases} v = \frac{l}{T_2 - t_1} \\ l = \lambda L \end{cases} \quad (1)$$

[0112] 故障点距电缆始端的实际距离为:

$$[0113] \quad \begin{cases} l_f = \frac{1}{2}v(T_2 - T_1) \\ l_f = \lambda L_f \end{cases} \quad (2)$$

[0114] 根据式(1)和式(2)求得故障点距电缆始端的地理距离 L_f 为:

$$[0115] \quad L_f = \frac{L(T_2 - T_1)}{2(T_2 - t_1)} ;$$

[0116] ②故障发生在电缆后半段时,暂态行波在电缆中的波速为:

$$[0117] \quad \begin{cases} v = \frac{l}{t_2 - T_1} \\ l = \lambda L \end{cases} \quad (3)$$

[0118] 故障点距电缆始端的实际距离为:

$$[0119] \quad \begin{cases} l_f = l - \frac{1}{2}v(t_2 - t_1) \\ l_f = \lambda L_f \end{cases} \quad (4)$$

[0120] 根据式 (3) 和式 (4) 求得故障点距电缆始端的地理距离 L_f 为:

$$[0121] \quad L_f = L - \frac{L(t_2 - t_1)}{2(T_2 - T_1)} .$$

[0122] 该计算方法不受电缆波速变化的影响在线行波测距算法,算法考虑到了电缆的蛇形敷设,采用该算法进行暂态行波测距所需的已知条件仅为电缆的地理长度,计算方便;

[0123] 1 电缆模量电流信号的计算

[0124] 三相单芯电力电缆是由导电线芯和金属护套组成的六导体系统(如图2所示),该六导体系统之间存在着耦合,为了在电缆系统中采用暂态行波方法测距,必须将电缆的电压、电流信号通过相模变换矩阵转换成互相独立的模量信号进行分析,采用扩展Clark矩阵对电缆系统进行相模变换。由于外模量以金属护套层和大地为回路,传播特性不稳定,衰减系数大,因此我们主要研究电缆内模量电流的传输特性。模量电流信号 $i_1 \sim i_6$ 的在扩展Clark矩阵变换下的计算式如下:

$$[0125] \quad \begin{cases} i_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c + i_A + i_B + i_C) \\ i_2 = \frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - 2i_b + i_c + i_A - 2i_B + i_C) \\ i_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_a - i_c + i_A - i_C) \end{cases} \quad \begin{cases} i_4 = -\frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c) \\ i_5 = -\frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - 2i_b + i_c) \\ i_6 = -\frac{1}{\sqrt{2}}(i_a - i_c) \end{cases}$$

[0126] 其中, i_a, i_b, i_c 分别为a相线芯电流、b相线芯电流、c相线芯电流, i_A, i_B, i_C 分别为a相护套电流、b相护套电流、c相护套电流, i_1, i_2, i_3 为外模量电流信号, i_4, i_5, i_6 为内模量电流信号。

[0127] 2 内模量与外模量波速干扰的解决方法

[0128] 对于交叉互联电缆,由于金属护套层的交叉换位连接,在互联点前后,波阻抗不连续。对互联点前的波阻抗矩阵 Z_1 的行、列进行相应的换位即可得到互联点后的波阻抗矩阵

Z_2 , 即 $Z_2 = PZ_1P^T$ 。对于图3所示的换位情况, 变换位矩阵 P 为:

$$[0129] \quad P = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

[0130] 其中阻抗矩阵的排列顺序为: a相线芯, b相线芯, c相线芯, a相金属护套, b相金属护套, c相金属护套。

[0131] 通过计算可得某220kV隧道敷设的电缆, 采用图3的交叉互联方式, 在频率为1KHz时的波阻抗矩阵为:

$$[0132] \quad Z_c = \begin{bmatrix} 39.84 & 8.12 & 6.71 & 22.8 & 8.13 & 6.71 \\ 8.12 & 39.38 & 8.12 & 8.13 & 22.33 & 8.13 \\ 6.71 & 8.12 & 39.84 & 6.71 & 8.13 & 22.8 \\ 22.8 & 8.13 & 6.71 & 22.77 & 8.14 & 6.72 \\ 8.13 & 22.33 & 8.13 & 8.14 & 22.3 & 8.14 \\ 6.71 & 8.13 & 22.8 & 6.72 & 8.14 & 22.7 \end{bmatrix}$$

[0133] 互联点后的波阻抗矩阵 $Z_2 = PZ_1P^T$, 根据 Z_1 、 Z_2 可得电流暂态行波的折射系数矩阵 α_i 和反射系数矩阵 β_i 。电流暂态行波在模量域的折反射关系满足:

$$[0134] \quad \begin{cases} i_q = T_i I_{qm} \\ i_0 = T_i I_{om} \\ i_q = \alpha_i i_0 \end{cases}$$

[0135] 其中: I_{om} 和 I_{qm} 分别为由6个模量电流组成的入射模量电流矩阵和折射模量电流矩阵。由上式可得: $i_{qm} = T_i^{-1} \alpha_i T_i \cdot i_{om}$ 。

[0136] 所以电流暂态行波在模量域的折射系数矩阵为: $\alpha_{im} = T_i^{-1} \alpha_i T_i$, 通过MATLAB计算可得:

$$[0137] \quad \alpha_{im} = \begin{bmatrix} 1.0001 & -0.0560 & -0.0302 & 0.0001 & -0.0564 & -0.0457 \\ -0.0092 & 1.8107 & 0.7298 & -0.0117 & 0.4234 & 1.1992 \\ -0.0059 & -0.7132 & 1.8949 & -0.0055 & -1.1612 & 0.4894 \\ -0.0000 & 0.0270 & 0.0156 & 0.9999 & 0.0271 & 0.0232 \\ 0.0012 & -0.8385 & -0.4833 & 0.0020 & 0.1614 & -0.7183 \\ 0.0040 & 0.5015 & -0.8670 & 0.0045 & 0.7262 & 0.1332 \end{bmatrix}$$

[0138] 交叉互联点前后模量电流之间的关系为:

[0139] $[I_{qm1} I_{qm2} I_{qm3} I_{qm4} I_{qm5} I_{qm6}]^T = \alpha_{im} [I_{om1} I_{om2} I_{om3} I_{om4} I_{om5} I_{om6}]^T$, 除对角线元素外 α_{im} 第4列的元素很小, 且明显小于其它各列的元素, 说明模量电流信号4在交叉互联点透射到其它模量中的分量最小。由 $\alpha_{im44} = 0.9999$, $I_{qm4} = \alpha_{im44} I_{om4}$ 可知入射模量电流信号4在交叉互联点基本全部转化成折射模量电流信号4, 不发生反射。因此, 采用模量电流信号4作为交叉互联电缆暂态行波测距信号, 可以有效解决暂态行波折反射复杂造成的故障点反射波难以识别问题。

[0140] 3暂态行波色散对故障测距的影响

[0141] 高压电缆的线芯和金属护套层在通有交流电时有趋肤效应,线路的电阻和电感会随电流频率的变化而变化。线路对于不同频率分量的行波会呈现出不同的传输特性,电缆系统在频域的传播系数为:

[0142]
$$\gamma(\omega)=\sqrt{ZY}=\alpha(\omega)+j\beta(\omega)$$

[0143] 其中:[Z]、[Y]分别为电缆的阻抗矩阵和导纳矩阵, $\alpha(\omega)$ 为幅值衰减系数,使得不同频率信号的幅值衰减不同; $\beta(\omega)$ 为相位系数,使得不同频率信号的波速衰减不同,电流暂态行波和电压暂态行波具有相同的传播系数。

[0144] 电缆故障时产生的暂态行波具有从低频到高频的连续频谱,由于不同频率分量的暂态行波传播速度不同,衰减也不同,暂态行波沿电缆线路传播过程中会发生色散。使得暂态行波波头趋于平缓,整体波速趋于下降,给暂态行波测距中波头的识别和波速的确定带来很大困难。由暂态行波色散产生的误差对于架空线路的故障测距而言尚可接受,而对于频变特性更强,测距精度要求更高的电缆线路而言却是不可接受的。

[0145] 为此,本申请采用如步骤(3)所述的小波包法分解并重构暂态行波,

[0146] 4不受暂态行波波速影响的测距算法

[0147] 本申请采用如步骤(5)所述的测距算法,其中,考虑到现实中电缆一般采用蛇形敷设,电缆的实际长度并不易求得,设电缆的实际长度l和地理长度L之间的关系近似为: $l=\lambda L$, λ 为蛇形敷设电缆实际长度与地理长度之间的比例系数。

[0148] 采用上述方法,利用电磁暂态仿真软件ATP-EMTP建立220KV电缆系统仿真模型(如图11所示),电缆地理长度为4500m,仿真步长为1E-7s,仿真时间为0.01s,电缆的原始参数如表1所示:

[0149] 表1 220KV单芯电缆原始参数

[0150]	结构	参数	参数值
	导体	材料	铜
		电阻率/ $\Omega\cdot m$	1.7E-8
		外径/mm	45.0
		相对磁导率	1
[0151]	主绝缘	内径/mm	49
		外径/mm	103
		相对介电常数	2.3
	金属护套	材料	波纹铝
		电阻率/ $\Omega\cdot m$	2.8E-8
		内径/mm	111
		外径/mm	116.8
		相对磁导率	1
	护层绝缘	外径	148
		相对介电常数	3.5

[0152] 仿真电缆带负荷正常运行,在t=0时刻发生a相线芯对金属护套层短路故障,故障距离设为3000m,选取合适的时间窗,提取故障发生时刻电缆始末端的波形如图7所示,其中横坐标为时间t/ms,纵坐标为电流模量信号幅值I/KA。

[0153] 对电缆始端和末端波形进行3层小波包分解(如图4所示为小波分解树),将故障暂态行波分解成具有相同频宽的8个不同的频带,然后根据每个频带的小波包分解系数计算各个频带的能量百分比如图8和图9所示。

[0154] 由始末端故障行波的能量谱知,行波的能量主要集中在频带1和频带2,分别提取电缆始末端行波频带1和频带2的小波包分解系数,重构故障暂态行波如图10所示。

[0155] 对图10重构故障波形进行小波分析,确定初始行波到达电缆始末端的时间 t_1, T_1 ,根据 t_1, T_1 的大小判断故障发生的区域。如果故障发生在电缆前半段,再求出电缆末端第二个行波波头到达测量点的时间 T_2 ,代入公式(1)求出故障距离。如果判断故障发生在电缆后半段,求出电缆始端第二个行波波头到达测量点的时间 t_2 ,代入公式(2)求出故障距离。

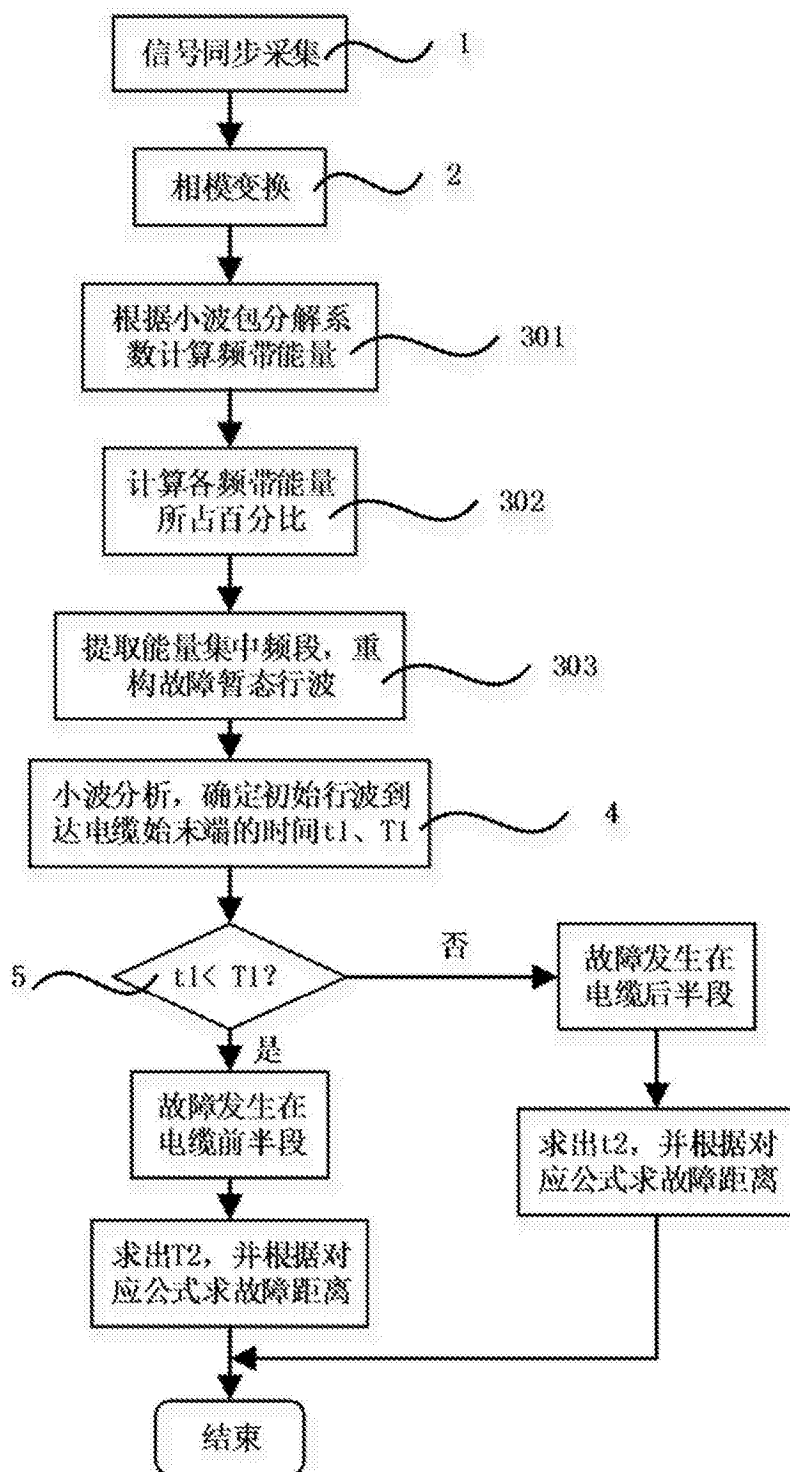


图1

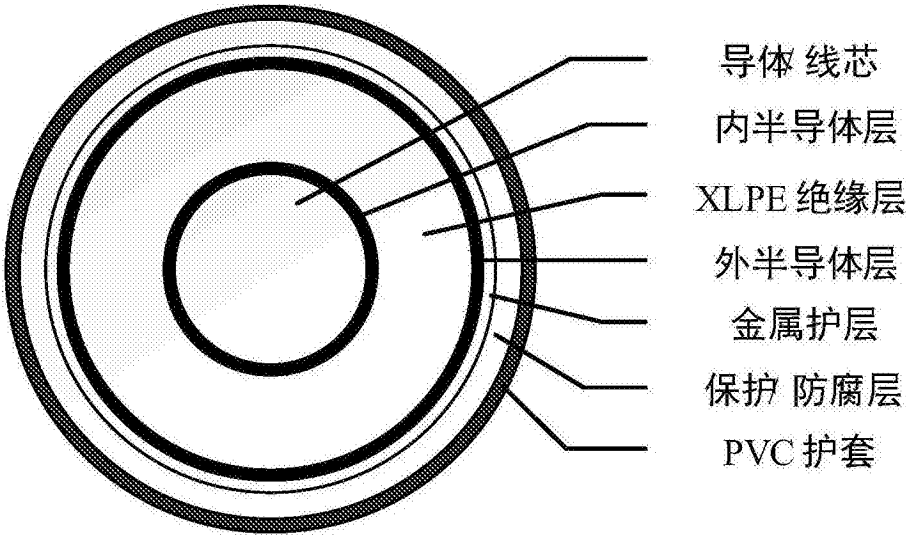


图2

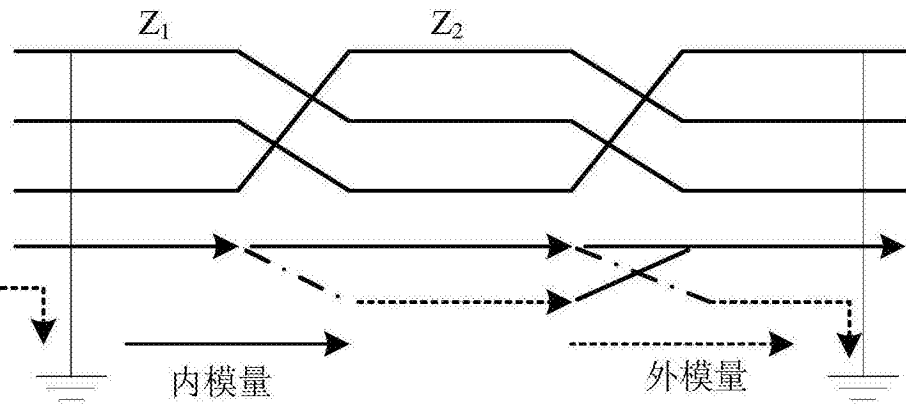


图3

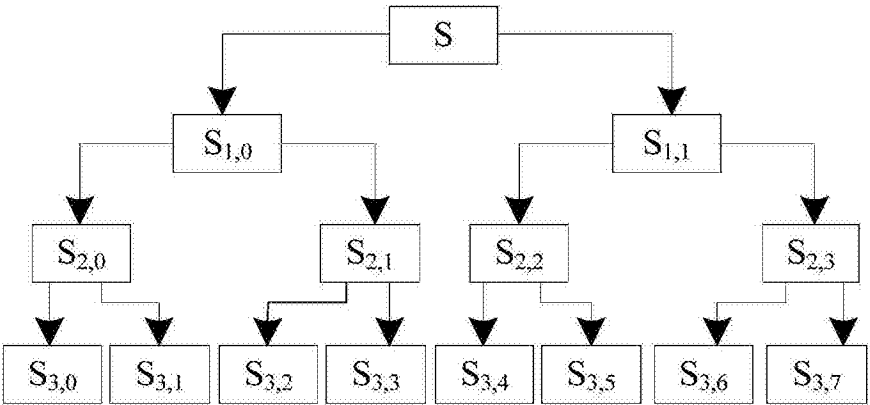


图4

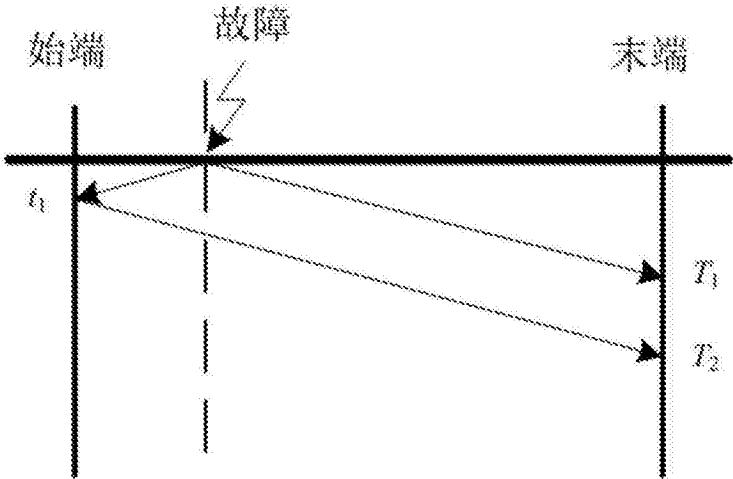


图5

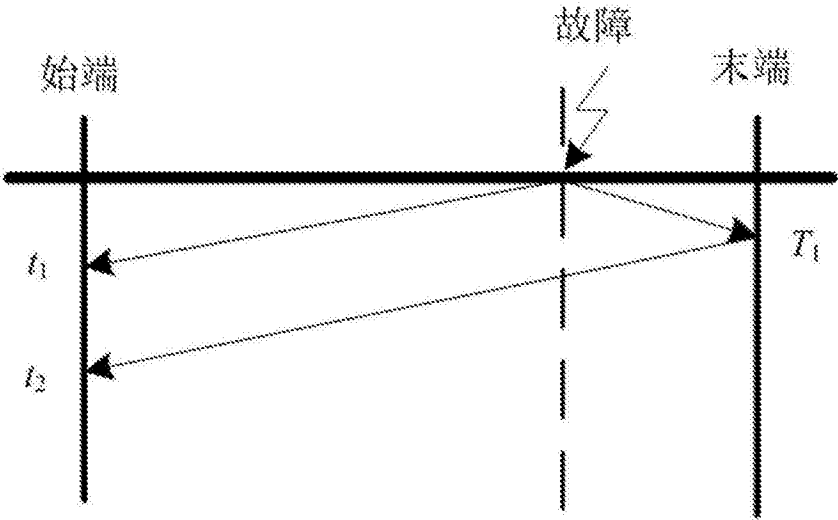


图6

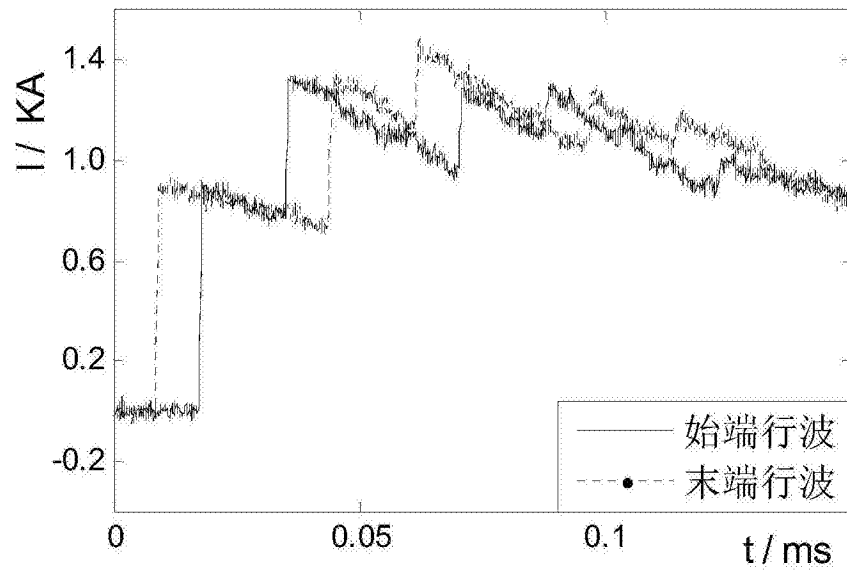


图7

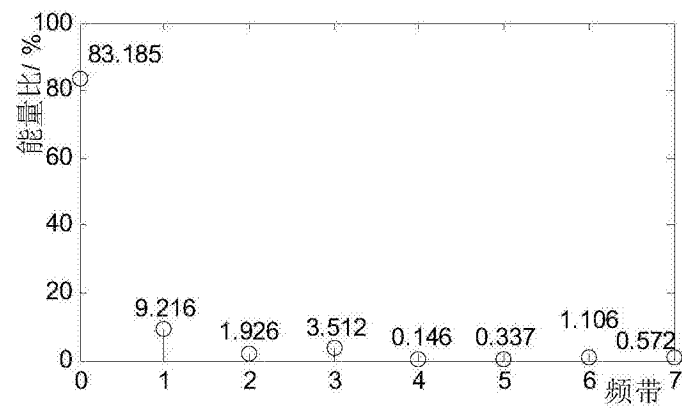


图8

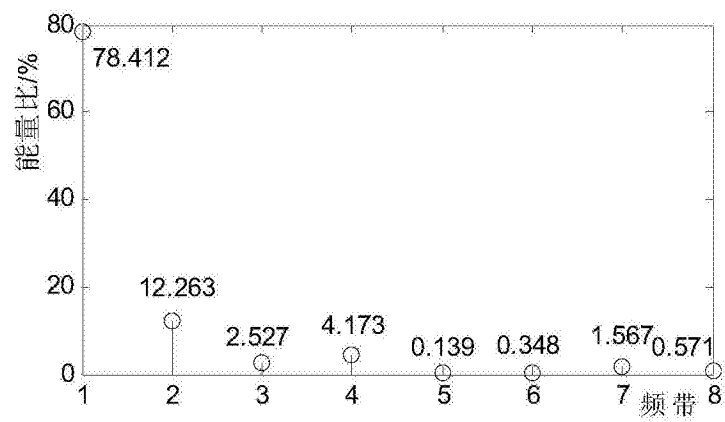


图9

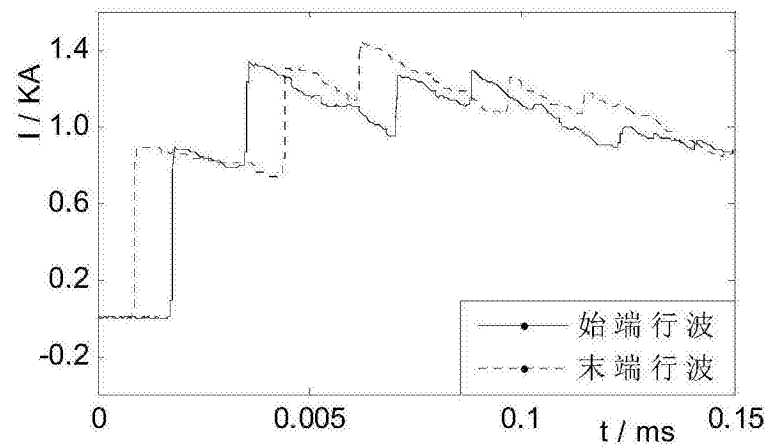


图10

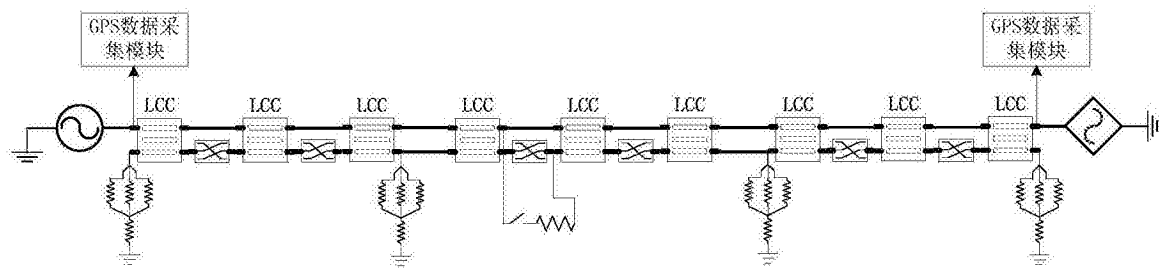


图11