

基于电容器投切的复小波选线方法

周登登, 刘志刚

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:在对配电网单相接地故障电流行波仔细分析的基础上, 得出了各出线电流初始行波之间的恒定关系式, 通过采用具有时移不变性的双树复小波来构造选线算法从而避免了实小波的各种缺点, 防止选线失效, 同时也解决了仅含两相电流互感器的选线问题。另外考虑了母线分布电容对选线算法的影响, 得出分布电容不但不会削弱选线效果反而更有利于选线的结论。最后通过仿真实例验证了所提出的算法有效、可行, 灵敏度高, 能够适用于任何出线线路类型相同的配电网。

关键词:单相接地故障; 电流行波; 双树复小波; 时移不变性

Abstract: Based on the analysis of the current traveling wave of the single-phase grounding fault in distribution network, the identity function relation of current initial traveling wave of every phase is obtained. Various disadvantages of real wavelet can be avoided by using complex wavelet transform which possesses the advantage of shift invariant, so the problem of line selection failure can not be occurred. This algorithm can also solve the problem when the distribution network has only two-phase current transformer. Otherwise, the influence of bus distributed capacitance on the algorithm also is considered, then a conclusion that the distributed capacitance can be beneficial to line selection rather than weaken that. At last, the simulation examples prove the effectiveness and high sensitivity of the proposed algorithm. This method can be used at the distribution network which has the outgoing lines of the same type.

Key words: single-phase grounding fault; current traveling wave; dual-tree complex wavelet; shift invariant

中图分类号: TM727.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0013-05

中国配电网中性点普遍采用不接地或经消弧线圈接地(统称非有效接地)的运行方式^[1]。到目前为止, 虽然有部分选线装置在使用, 但选线成功率极低, 不少变电站将其停运, 中性点非有效接地系统的选线问题仍然是一个困扰电力工作者的难题。

近年来, 对配电网的选线问题研究越来越多, 出现了利用稳态分量、暂态分量和注入法的三类选线方法, 如幅比相法^[2]、有功分量法、五次谐波法、首半波法^[3]和信号注入法^[4]。这些方法各有优缺点, 多数只能适用于中性点不接地或不直接接地系统, 具有局限性, 并且选线准确性受到一定质疑^[5]。

配网行波选线法的思想是受输电系统行波测距原理所启发。国内对配电系统的行波选线原理研究较少, 但已有学者证明配电系统行波选线甚至测距都是可行的, 并且做了一些有意义的工作^[6~11]。这些方法多使用零模或线模电流进行判断, 这在仅含有两相电流互感器的线路中选线算法失效。为此有人想出了适用于仅含两相电流互感器线路的选线方

法^[11]。在前人工作的基础上, 着重分析了行波在含有电容的母线处的传播特性, 得出了基于投切电容的复小波选线原理。该原理的最大创新在于它通过故障时投入母线电容, 使已有的选线算法的检测准确率大大提高, 并且通过复小波检测, 克服了现有的实小波检测的各种缺陷。这种原理具有独立性, 它可以与现有的任何行波选线算法相融合, 从而使这种方法可以应用在现有的仅含两相电流互感器的配电网中。值得一提的是现有算法在两出线系统中准确率很低或失效, 而若采用基于电容投切的原理, 应用现有选线算法则可使选线准确率大幅度提高。最后通过一些算例对比验证了该方法耐过渡电阻、过渡相角、故障距离能力都很好, 且与中性点接地方式无关。

1 复小波检测的优点

到目前为止用于选线的小波都属于实小波, 但是实小波有几个突出的缺点: 时移敏感性、缺乏方向性和缺少相位信息。由于文中选线算法与后两个缺点无关, 因此主要考虑它的时移敏感性。造成实小波时

基金项目: 教育部霍英东青年教师基金资助项目(101060); 四川省杰出青年基金项目(07ZQ026-012)

移敏感性的主要原因在于实小波的下采样或者说实小波基函数不解析,而双树复小波^[12]所设置的双树变换具有半采样点延迟关系,等价于加倍采样率,从而克服了下采样所导致的各种问题,或者说是复小波的解析性克服了时移敏感性。双树复小波具有近似解析性、双树正交性、线性相位、精确重构性、低复杂度(2倍于实小波变换),被认为是理想的小波变换工具。通过下面的仿真实例可以看到复小波的优点。

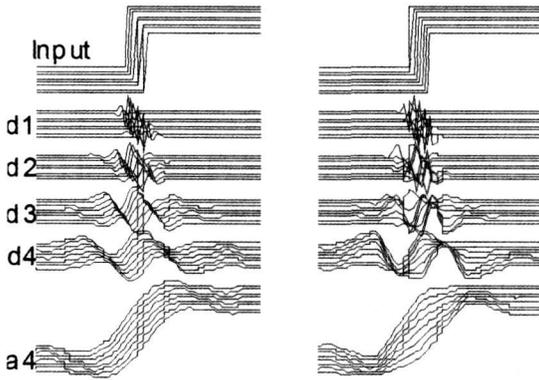


图 1 实、复小波对阶跃信号的变换对比

图 1 中左图是复小波对阶跃信号的变换结果,右图是实小波变换对阶跃信号的变换结果, $d1 \sim d4$, $a4$ 分别表示各尺度重构信号。由图 1 可见,当信号有时延时,复小波变换结果也有相类似的时延,不会像实小波变换那样出现震荡的情况。这说明复小波变换具有时移不变性,而实小波变换没有这个特点,可以预见,当分析信号时,若在时域或小波域对信号做了任何处理,打破了小波变换的平衡,那么实小波变换结果都是不准确的。而复小波变换就避免了这个问题,从而使分析结果更可信。

2 故障选线判据

2.1 未投入母线电容时的行波分析

图 2 是中性点经消弧线圈接地(不接地的)配电系统示意图。图中设置的是 C 相线路经过渡电阻 R_g 接地。

消弧线圈的电感电阻在图中分别用 L R 表示。故障点故障前电压为 U_c ,故障后电压为 U_o ,故障支路电流为 i

对故障情况,由于一般的时域法存在三相之间的耦合导致求解困难,因此多数均选用模域变换法。在此选择应用最广泛的凯伦贝尔(Karrenbauer)变换用于相分量之间解耦。

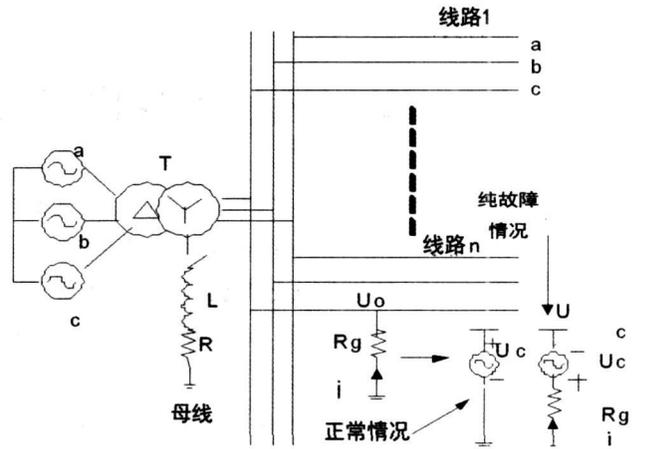


图 2 配电网单相接地示意图

$$\begin{bmatrix} x^0 \\ x^1 \\ x^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a(t) \\ X_b(t) \\ X_c(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, x^0 为零模分量; x^1 , x^2 为线模分量; X_a , X_b , X_c 为相分量。

当采用上述变换后,三相之间的关系就演变成为三个模分量之间的关系。这三个模分量是相互独立的,可以单独用来分析,因此三相系统的问题就转化成单模系统的分析。

设配电系统有 n 条出线,当故障发生后由故障位置所产生的行波就会由故障点向两侧行进,朝左方行驶的行波遇到不连续点(母线)时,就会发生波的折射与反射,折射波进入其他出线,反射波与入射波叠加形成故障线路的测量行波,当反射波行进到故障点时又会发生折射反射,此时的反射波开始向左端的母线行进,而故障点右侧的初始行波在对端母线(或不连续点)所产生的反射波也会透过故障点(折射)朝左端母线行进,当故障点选择不同时,这两个反射波的波头谁先到达左端母线是不确定的,因此下面就着手提取第一个初始行波波头,这就避免了各种反射波的影响,从而使所提出的原理更准确。

由于初始行波频率很高(达 $10 \sim 100$ kHz),配电变压器的阻抗与频率成正比,因此配电变压器很少有行波通过,可视为开路。由于母线尺寸很小,行波在其内的传播过程可以忽略不计。这样当不考虑母线分布电容时,行波的流通过程就只有各条出线。根据彼德逊法则可得故障行波计算示意图,如图 3 所示。

图中, Z_1 表示故障线路波阻抗; $Z_2 \dots Z_n$ 分别表示 $n-1$ 条正常线路的波阻抗;其他参数意义如式(2)的解释。

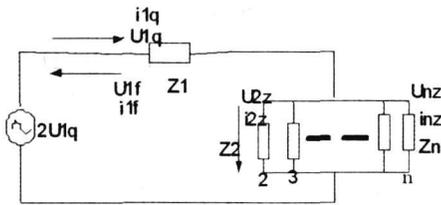


图 3 配电网故障后行波计算示意图

根据电流电压连续性关系可得下式：

$$\begin{cases} \frac{U_{1q}}{Z} = i_{1q}, \frac{U_{1f}}{Z} = -i_{1f} \\ i = i_{1q} + i_{1f} = i_{z_1} + \dots + i_{z_n} \\ U = U_{1q} + U_{1f} = U_{z_1} = \dots = U_{z_n} \end{cases} \quad (2)$$

式中， U_{1q} 、 i_{1q} 为故障线路电压电流前行波； U_{1f} 、 i_{1f} 为故障线路电压电流反行波； Z 为故障线路波阻抗； i_{z_1} 、 i_{z_2} 、 i_{z_3} 、 \dots 、 i_{z_n} 为正常线路电流、电压折射波。一般各出线线路类型一致，因此各出线波阻抗相等。规定由母线流出的电流为正，据此化简上式有：

$$i_z = \frac{2}{n} i_{1q}, i_{\text{合}} = \frac{2}{n} (1-n) i_{1q} \quad (3)$$

式中， i_z 为电流折射波； $i_{\text{合}}$ 为故障线路电流合成波； n 为出线条数。

由于式 (3) 中的 i_z 、 $i_{\text{合}}$ 并未指明是线模行波还是零模行波，因此无论线模还是零模行波都应该满足式 (3)。于是可知故障线路与正常线路的相应模分量之比永远等于 $(1-n)$ ，而非故障线路相应模分量之比恒相等。

2.2 投入母线电容后的行波分析

当出现单相接地故障后，母线电压会降低，可以利用这个信号投入母线电容器，也可以使用在正常情况下一直投入的母线补偿电容器。在母线含有电容的情况下，行波的传播路径相当于多了一条出线，只是这条出线上接的是电容元件。据彼德逊法则可得计算示意图，如图 4 所示。

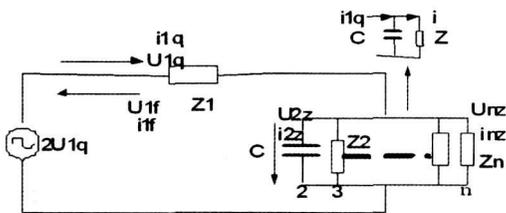


图 4 考虑分布电容时配电网行波计算示意图

图 4 中， C 为母线电容； Z 为除电容外各正常出线的等效波阻抗； Z_1 为故障线路波阻抗； i 为 Z 支路初始行波电流。其他参数同对式 (2) 的解释。

由图 4 可得：

$$\begin{cases} Z = \frac{Z_1}{n-1} \\ i_{1q} = i + C \frac{dZ}{dt} \\ 2U_{1q} = iZ + i_{1q}Z = iZ + i_{1q}Z_1 \end{cases} \quad (4)$$

解得：

$$\begin{cases} i_z = 2i_{1q} \frac{(n-1 + e^{-\frac{t}{ZC}})}{n} \\ i_{\text{合}} = \frac{2i_{1q}}{n} (1 - e^{-\frac{t}{ZC}}) \end{cases} \quad (5)$$

由式 (5) 可知，在母线含有电容情况下，故障线路与正常线路相应模分量之比变成

$$\frac{n-1 + e^{-\frac{t}{ZC}}}{1 - e^{-\frac{t}{ZC}}} = \frac{n}{1 - e^{-\frac{t}{ZC}}} - 1$$

下面考察 $1 - e^{-\frac{t}{ZC}}$ 的具体取值情况。由于影响 $1 - e^{-\frac{t}{ZC}}$ 的有 n 、 C ，而 Z 一般变化较小，尤其是在出线较多时，变化更小，因此主要考察 n 、 C 对 ω 的影响。图 5 列出当 C 、 n 取不同值时的关系曲线。

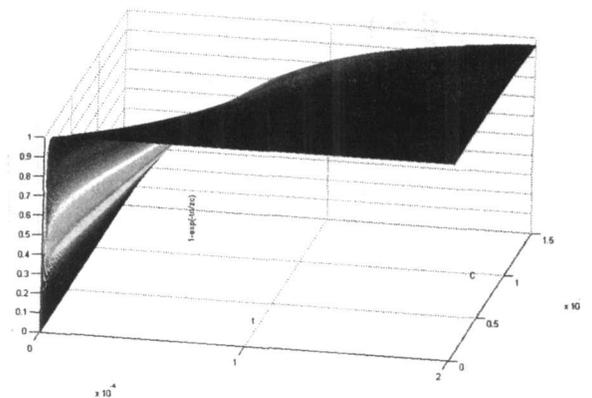
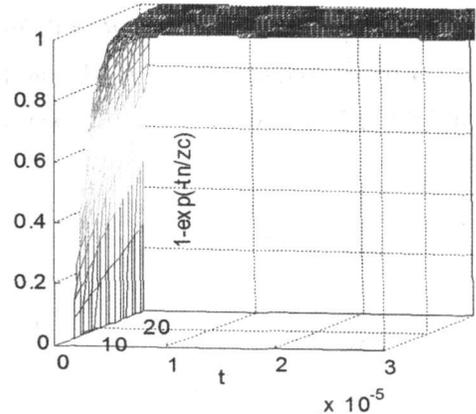


图 5 C 、 n 变化时 $1 - e^{-\frac{t}{ZC}}$ 的曲线图

由图 5 曲线变化情况可以知道，当 C 很大，出线 n 在 20 左右时，上述绝对值远大于 $(n-1)$ ，从而使现有的选线判据更灵敏。 n 减小时，上述比值进一步

加大。当 C 较小时,上述比值稍大于 $n-1$ 。由于不论 C、n 如何变化, $1 - e^{-\frac{C}{n}}$ 永远处于 (0, 1) 之间, 因此上述比值永远大于 $n-1$, 故在故障后投入母线电容器会使现有的选线判据更加灵敏。

2.3 基于投切电容的选线判据

发生故障后依靠检测到的电压行波信号启动母线投切电容, 此时检测各线路的零序电流信号, 并对其进行复小波变换, 通过比较各出线零序电流复小波变换模极大值的大小来判断线路故障类型: 若这些值都相等, 则是母线故障; 若有一条出线模极大值远远大于其他出线的模极大值, 则模极大值最大的那条线路故障。

3 仿真验证

图 6 为搭建的四出线 10 kV 系统仿真模型, 消弧线圈接地 (10% 过补偿), 线路参数如下: 变压器 110/10 kV; 正序参数: $R_1 = 0.48 \Omega / \text{km}$, $L_1 = 0.9283 \text{ mH} / \text{km}$, $C_1 = 0.07038 \mu\text{F} / \text{km}$; 零序参数: $R_0 = 0.79 \Omega / \text{km}$, $L_0 = 4.2146 \text{ mH} / \text{km}$, $C_0 = 0.0436 \mu\text{F} / \text{km}$; 四条出线的长度分别为 6 km、16 km、24 km、20 km, 输电

线路采用贝杰龙分布参数模型。

算例 1: 不投入电容, 过渡电阻为 500Ω , 故障相角为 20° , 距母线 20 km 处线路 3C 相短路各线路模分量复小波变换结果如图 7(a)。相同条件下投入母线电容各线路模分量复小波变换结果如图 7(b)。

从中可以看到未投入电容时线路 3 初始模极大值与其他线路初始模极大值之比为 3, 而线路 1、2、4 初始模极大值比值为 1, 证明这三条线路特性一致, 均与线路 3 特征相反, 由此可判定为线路 3 短路接地。但是投入电容后, 故障线路与正常线路电流行波初始模极大值之比扩大为 903.3, 非故障线路之间比值仍为 1。可见投入电容器会使故障线路故障特征更明显, 相当于起了放大镜的“作用”, 从而更有利于选出故障线路。

通过图 8 可以看到, 投入电容前后, 故障线路模分量波形没有发生变化, 而正常线路模分量的波形上升速度变缓, 显得更加平滑, 由于小波变换相当于检测奇异点的导数, 很明显, 故障线路的小波变换要明显大于正常线路, 这就是投入电容对选线精度带来的好处。

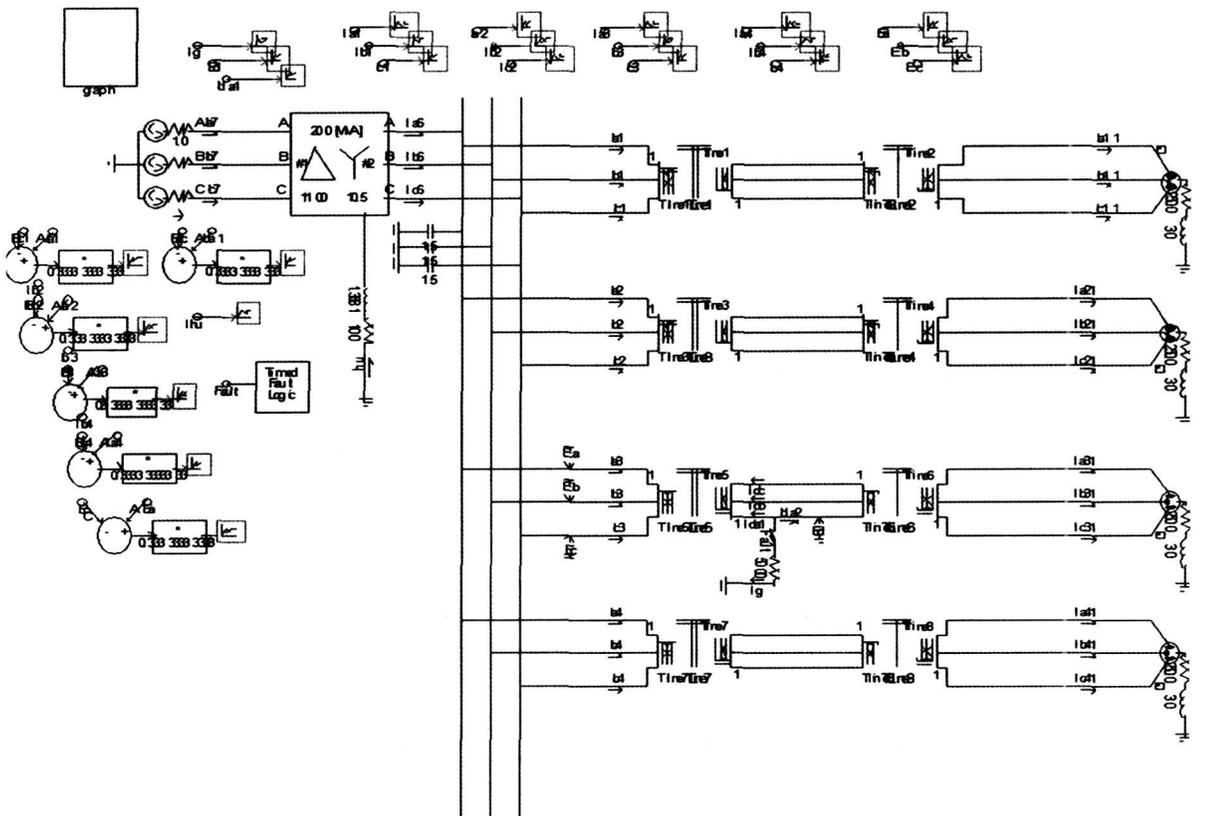


图 6 系统仿真模型

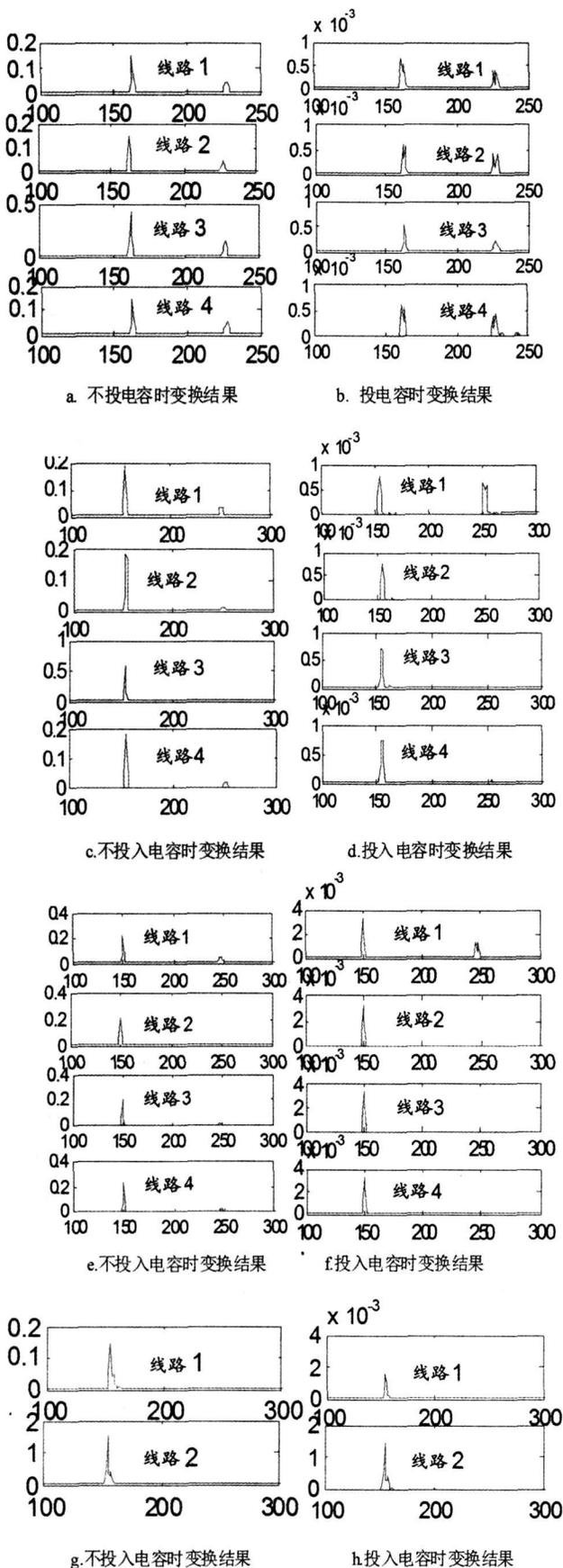


图 7 各算例变换结果

算例 2: 图 7(c) 表示不投电容, 故障相角为 20° , 距母线 0.5 km 处经 500Ω 过渡电阻短路的情况。相同条件下投入电容的变换结果见图 7(d)。从图中可以看到, 虽然此时距母线很近, 但是故障线路特征依然很明显, 故障线路与正常线路的初始行波变换模极大值之比为 1 000, 远大于不投入电容时的比值 3。因此很容易判定为是线路 3 故障。

算例 3: 考虑母线故障的情况, $C=1.5 \mu\text{F}$, 过渡电阻仍为 500Ω , 故障相角为 20° 。不投入电容时的变换结果见图 7(e), 投入电容后的变换结果见图 7(f)。此时无论是投入电容还是不投电容, 所有出线模电流分量的复小波变换比值都相等, 即各出线特征相同, 应判定是母线故障。此时, 投入电容并不能提高判据精度。不过, 此时由于是母线故障, 各出线特征相同, 也没必要提高判据精度。

算例 4: 当仅有两条出线时, 下面给出最不易区分故障线路的情况: 距母线 0.5 km 处短路, 大过渡电阻接地, 故障电压相角很小。此时分别考察不投入电容与投入电容的情形。由图 7(g)(h) 仿真结果可以看到, 投入电容时, 故障线路与非故障线路复小波变换比值为 1 000, 不考虑电容时, 此比值为 10.7, 可见只存在两条出线时, 通过投入电容仍能正确选线, 并且选线精度更高。

表 1、表 2 分别列出了前述两出线时和四出线时的算例仿真结果。

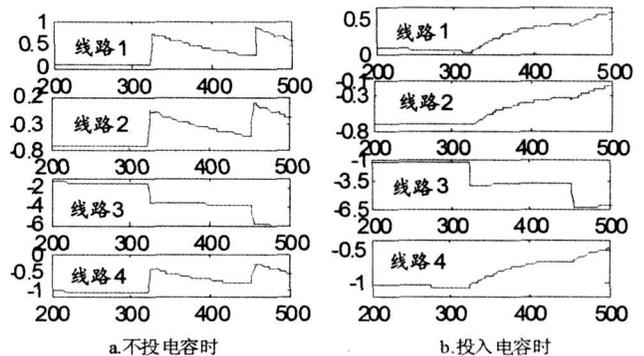


图 8 算例 1 时域图

表 1 两出线时的模极大值情况及选线结果

故障类型	线路 1	线路 2	选线结果
0.5 km 短路, 不考虑 C	$7.3e-2$	$7.79e-1$	线路 2
0.5 km 短路, 考虑 C	$7.435e-4$	$7.442e-1$	线路 2

(下转第 27 页)

也是一次世界性的重大创新,对四川相关产业和企业带来重要的发展机遇。在电力企业中,对设计院、试研院、送变电、铁塔厂、金具厂、电建公司来说都将是一个促进技术进步向电力高端发展的大好机会。利用特高压在四川的地域优势,抓住机遇,就将为今后的发展赢得更为广阔的空间。

综合考虑特高压输电技术的优越性,可以看出,

发展特高压电网有着巨大的经济效益和社会效益。中国经济飞速发展,发展特高压输电势在必行。发展特高压输电,对实现四川“工业强省”战略,对建设环境友好型、资源节约型的美好四川都将具有强大的推动作用。

(收稿日期:2008-12-30)

(上接第 17 页)

表 2 四出线时的模极大值情况及选线结果

故障类型	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	选线结果
20 km 处短路	0.224	0.222 9	3.034	0.222 4	线路 3
0.5 km 短路, 不考虑 C	$7.93e^{-2}$	$7.887e^{-2}$	$9.147e^{-1}$	$7.856e^{-2}$	线路 3
0.5 km 短路, 考虑 C	$7.447e^{-4}$	$7.459e^{-4}$	$7.44e^{-1}$	$7.576e^{-4}$	线路 3
母线处短路	$2.665e^{-3}$	$2.648e^{-3}$	$2.673e^{-3}$	$2.641e^{-3}$	母线

4 结 论

在对中性点非有效接地 不接地系统单相接地故障行波传输规律分析的基础上,提出了基于复小波变换的相电流行波选线算法。由于复小波的时移不变性克服了实小波变换结果的不稳定性,从而使本选线算法更可靠。本算法简单,仅需判定幅值即可,不必做大量计算,适于在线分析。实际变电站母线端都含有分布电容,而通过理论和仿真证明了分布电容对所提出的选线算法不但不影响选线效果,反而能增强选线灵敏度,从而使选线结果更准确。理论与仿真表明,本算法不受过渡电阻、补偿方式、故障相角和故障距离的影响,在各类出线线路类型相同的变电站均适用。

参考文献

[1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

[2] 郝玉山,杨以涵,任元恒. 小电流接地微机选线的群体比幅比相原理 [J]. 电力情报. 1994, 5(2): 15-19.

[3] 陈奎,唐轶. 小电流接地系统电弧接地选线方法的研究 [J]. 继电器. 2005, 33(16): 5-9.

[4] 桑在中,张慧芬,潘贞存. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护 [J]. 电力系统自动化. 1996, 20(2): 11-13.

[5] 徐青山. 电力系统故障诊断及故障恢复 [M]. 北京: 中

国电力出版社, 2007.

[6] 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): 29-33.

[7] 张帆,潘贞存,等. 基于方向行波的小电流接地系统故障选线 [J]. 中国电机工程学报. 2007, 27(34): 70-75.

[8] 徐青山,陈锦根,唐国庆. 考虑母线分布电容影响的单端行波测距法 [J]. 电力系统自动化. 2007, 31(2): 70-73.

[9] 董新洲,毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究 [J]. 中国电机工程学报. 2005, 25(4): 1-6.

[10] 孔瑞忠,董新洲,毕见广. 基于电流行波的小电流接地选线装置的实验 [J]. 电力系统自动化. 2006, 30(5): 63-67.

[11] 毕见广,董新洲,周双喜. 基于两相电流行波的接地选线方法 [J]. 电力系统自动化. 2005, 29(3): 17-21.

[12] N. G. Kingsbury. Shift invariant properties of the dual-tree complex wavelet transform, in "Proc ICASSP 99, Phoenix AZ paper SPTM 3. 6, March 16 - 19, 1999."

作者简介:

周登登 (1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统故障诊断。

刘志刚 (1975-),男,教授,博士生导师,研究方向为现代信号处理及其在电力系统中的应用。

(收稿日期:2008-12-20)