

基于冗余表决的行波小波系数极大值极性法 配电网接地故障选线原理研究

黄景光¹, 刘会家¹, 吕艳萍²

(1. 三峡大学, 湖北 宜昌 443002; 2 武汉大学, 湖北 武汉 430072)

摘要: 研究了配电网中单相接地短路故障时暂态行波的特性, 利用母线电压及各线路电流暂态行波 0 模初始波头的小波系数的极大值极性的特征, 构成了新的基于小波分析的故障选线保护判据, 通过识别初始波头小波系数的极大值, 判断极大值极性特征, 并对多次判断结果进行冗余表决, 完成故障选线工作。该文利用 Matlab 建立了一个典型的配电网系统仿真模型, 通过编写选线保护仿真程序, 完成对仿真结果的计算和分析, 证明了此方法的正确和有效, 并对应用研究提出了有益的建议。

关键词: 小波分析; 故障选线; 极大值极性; 冗余表决

中图分类号: TM711, TM77

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2006)07-0013-05

0 引言

通过对配电网单相接地故障的分析, 我们知道, 对于中性点不接地或者经消弧线圈接地的系统, 基于稳态基波分量的接地保护灵敏度往往不够, 甚至完全失去了应有的选择性, 以至于不能用来构成故障选线保护。存在于电源电压中的奇数整次谐波如 5 次、7 次等, 由于含量仅占基波的百分之几, 数值太小, 传统方法不易提取。因此, 配电网接地故障的特点决定了一般基于稳态电气量原理的选线保护装置存在先天的缺陷, 其准确性和可靠性都难以令人满意^[1~3]。

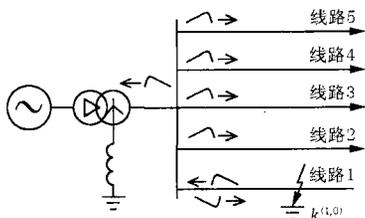


图 1 行波入侵变电站示意图

Fig 1 A travel wave arrives a power transformer substation

当电力系统发生故障时, 由故障点暂态引起的行波, 会由此点以电磁波速向系统的其他部分传播, 对于同一变电站的不同线路, 故障线路行波的方向与其他非故障线路是相反的, 如图 1 所示。本文利用故障暂态引起的行波, 并应用小波分析获取前向行波入侵变电站时各线路中电流波形的极性特点, 构成选线保护算法, 完成配电网单相接地故障选线^[1,2,4,5]。

1 行波的波过程分析及选线保护理论依据

文献 [5] 认为, 行波是一个暂态量, 只有系统中发生接地时才会产生。这样理解是不准确的。电力系统中能量的传输和交换都是行波过程, 无论系统是正常运行、短路、断线, 还是断路器操作等。当我们把电力系统中的各元件理解为分布参数元件时, 电能电力系统中的传输过程就应该理解为电磁波过程, 这就是行波。暂态行波只是电力系统暂态引起的行波过程, 其本质是系统暂态过程中能量的变化和交换。暂态行波由其波源向系统中其它点以电磁波速传播, 在系统中引起一系列波过程。暂态行波的这一特征, 独特而显著, 所以, 行波原理可以用来构成性能优异的继电保护及其它自动化装置^[6]。

1.1 变电站进出线路上的暂态行波过程

在对称三相输电线路中的 x 点, 某时刻 t 的电压、电流瞬时值应满足下列波动方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial x^2} [u_{abc}] = [L] [c] \frac{\partial^2}{\partial t^2} [u_{abc}] \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} [i_{abc}] = [c] [L] \frac{\partial^2}{\partial t^2} [i_{abc}] \end{cases} \quad (1)$$

其中: x 为线路位置, t 为时间, L 、 c 分别为单位长度线路的电感和电容矩阵^[6]。

为求解此波动方程, 通常进行相模变换, 把相互耦合的三相电压电流变换为相互独立的模量, 即模量、模量和 0 模量:

$$\begin{cases} [u_0] = [T] [u_{abc}] \\ [i_0] = [T] [i_{abc}] \end{cases} \quad (2)$$

可以采用变换:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

这样,

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} u \\ i \end{bmatrix}_0 = [Lc] \frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{bmatrix} u \\ i \end{bmatrix}_0 \quad (4)$$

其中: $[Lc] = \text{diag}[L_1 c_1 \quad L_1 c_1 \quad L_0 c_0 \quad L_1 c_1 \quad L_1 c_1 \quad L_0 c_0]$, L_1, L_0, c_1, c_0 分别为线路单位长度的正序和零序电感和电容。

求解后得到 0 模量电压和电流的前行波和反行波应该满足方程:

$$\begin{cases} i_f \begin{cases} t - \frac{x}{v} \\ v \end{cases} = \frac{1}{z} u_f \begin{cases} t - \frac{x}{v} \\ v \end{cases} \\ i_r \begin{cases} t + \frac{x}{v} \\ v \end{cases} = -\frac{1}{z} u_r \begin{cases} t + \frac{x}{v} \\ v \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

其中: v, z 为对应 0 模量的电磁波速和波阻抗:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 c_1}}, \quad v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 c_0}}, \quad z = \sqrt{\frac{L_1}{c_1}}, \quad z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{c_0}}, \quad u_f, i_f,$$

u_r, i_r 分别为前向波和反向波电压电流。线路上任意一点的电压、电流都是通过其前行波与反行波之和。

在配电网中某条线路上发生单相接地故障时,故障点产生的暂态行波由故障线路向变电站传播,前行波到达母线时,因波阻抗的突变,折射波进入母线,反射波返回故障线路。母线的尺寸较小,其波过程将很快结束,由故障线路折射过来的行波将迅速折射到母线上的其它元件中去,在这些元件中形成前行波,只是波形将稍有变化。在这些前行波在各元件末端的反射波到达母线之前,除了故障线路,各元件中都只有前行波,这一过程可以称为初始波过程。其间,母线电压为 u_b , 各非故障线路中的电流为电流前行波:

$$i_{qn} = \frac{1}{z_n} u_b \quad (6)$$

n 为非故障线路编号,方向为从母线指向线路。故障线路中的电流大小为:

$$\sum_n i_{qn} = u_b \sum_n \frac{1}{z_n} \quad (7)$$

方向为从线路指向母线,与所有非故障线路中的电流行波的方向相反。

这一行波过程特征十分显著,是行波法配电网单相接地故障选线保护的主要理论依据。

如果线路有分支点,在行波到达分支点时,将会

有一个与母线类似的波的折反射过程,但在反射波到达母线之前,分支点对母线上的波过程没有任何影响。一般配电线路的长度都不会太长,其末端都有分支的可能,但从后文的论述可以知道,只要线路长度到达几百米,在反射波到达母线之前,装置就获得足够的的数据,对运用本文算法就没有影响。

1.2 变压器中的暂态行波过程

变压器中的暂态行波过程十分复杂。对于单相变压器,在 $t=0$ 瞬间的初始波过程中,由于绕组电感很大,电流不能突变,可以认为电感回路开路,此时,无论绕组末端是否接地,都可以认为,绕组各点对地电位分布可近似为:

$$u = u_0 e^{-x} \quad (8)$$

在 $t=0$ 时刻绕组端部 ($x=0$) 的电位为 u_0 。因此,在初始波过程中,无论绕组末端是否接地,都可以把变压器绕组近似等效为其入口电容 c_1 , 初始电压分布主要集中在入口电容上,电感回路中的电流很小^[6]。

三相变压器也可以用同样的方法等效。单相接地故障时的暂态行波到达变压器瞬间的初始波过程中,中性点接地的 Y 形接线变压器,其波过程与单相变压器规律相同,中性点不接地、经消弧线圈接地的 Y 形接线以及 形接线变压器,都与绕组末端接地时的单相变压器规律相似。

因此,无论变压器的中性点是否接地,单相接地故障时的暂态行波到达变压器瞬间的初始波过程中,都可以把变压器近似等效为其入口电容 c_1 , 在 $t=0$ 时刻绕组端部的电位近似为 u_0 。

由彼得森法则,在初始波过程中,从母线到变压器的连接线路中的电流行波可以近似为:

$$i_{lk} = \frac{2u_b}{z_{lk}} e^{-\frac{t}{z_{lk} c_1}} \quad (9)$$

其中: z_{lk} 为连接线路波阻抗。在 $t=0$ 瞬间的初始波过程中,与一条非故障线路中的电流行波近似。

所以,在初始波过程中,无论中性点接地方式如何,变压器都可以近似看作母线上的一条线路,对母线及线路上的电压电流暂态行波的分布和特性影响较小,对应用行波法构成接地故障选线保护没有本质的影响。

2 基于 Matlab 的系统仿真

为了全面地分析中性点不接地或经消弧线圈接地系统在各种条件下的单相接地故障,本文建立了一个基于 Matlab Simulink 的小型配电网系统仿真模

型,见图 2。这是一个有 1 条进线 5 条出线的 35 kV 变电站。电源为一个简化模型的同步发电机,主变压器为 Yn - 11/ 接线,中性点不接地或经消弧线线圈接地(可选),输电线路采用分布参数模型。系统参数都来自实际系统或由实际系统等效而来,各线路可以分别设置为单导线或分裂导线架空线路、电缆线路的典型参数。

仿真中,本文采用的时间步长为 1×10^{-7} s,采样率为 10 MHz,在行波以光速传播 1 km 的时间里,能采集 30 多点数据。这样,对于一般长度都不长的配电线路来说,在反行波到达之前,选线保护可以获得足够多的数据。

3 行波小波系数极性法故障选线

运行图 2 所示的系统仿真模型,完成配电网单相接地故障仿真,取故障前后各约 0.4 ms 的三相电压电流数据,将母线三相电压和各线路三相电流变换 0 模量,再运用小波变换方法进行分析,找出故障线路的特征,实现故障选线。

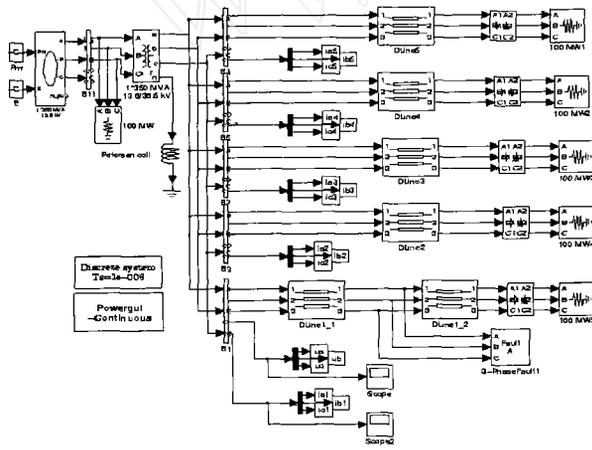


图 2 配电网系统仿真模型

Fig 2 Simulation model of a distribution grid

图 4 是线路中发生单相接地故障时,母线电压 0 模量的连续小波变换系数,计算中运用了 Haar 小波,在 1 及 10 ~ 100 尺度下,对应于母线电压中约 $1.0 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^4$ Hz 频率范围的信号的小波特征。从图 4 中可以看到,各尺度下的小波系数曲线都很相似:在行波的每一个波头到达时,系数波形都有一个明显的极大值,第一个极大值对应于初始波头。分析各条线路电流小波系数,能得到同样的结论。

图 3 和图 5 分别是线路 1 发生单相接地故障时,母线电压和各线路电流行波 0 模量的连续小波

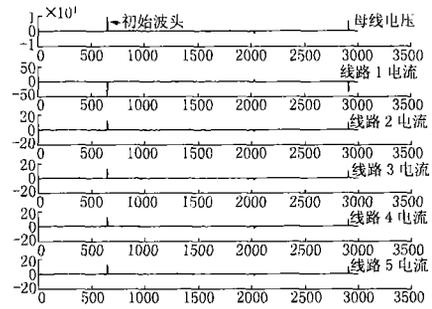


图 3 母线电压和各线路电流 0 模量尺度 10 下的连续小波变换系数

Fig 3 The scale 10 CWT coefficient of the bus voltage and 5 lines currents zero traveling waves

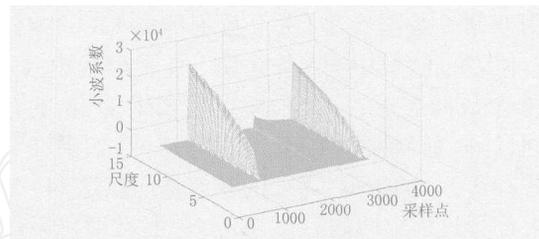


图 4 母线电压 0 模量尺度 1, 10 ~ 100 连续小波变换系数

Fig 4 The scale 1, 10 to 100 CWT coefficients of the bus voltage zero mode traveling wave

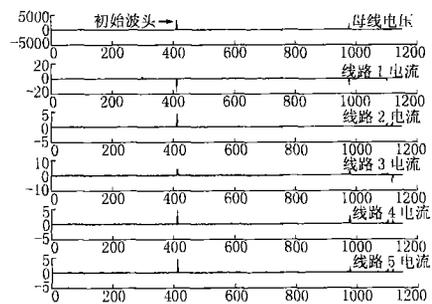


图 5 母线电压和各线路电流 0 模量小波包系数

Fig 5 The WPT coefficient of the bus voltage and 5 lines currents zero mode traveling waves

变换和小波包系数,计算中运用了 Haar 小波包。图 3 为在尺度 10 下的小波系数,图 5 为各小波树在节点 4 上的小波系数。从图中可以看到各线路电流行波 0 模小波系数呈现明显的波形差异:对应于初始波头的第一个波形极大值,4 条非故障线路电流 0 模小波系数波形极大值的极性完全一致,而且与母线电压 0 模小波系数波形极大值的极性一致,故障线路 1 的电流 0 模小波系数波形极大值的极性正好与它们相反。根据这一特征本文构成了行波小波系数极性法配电网单相接地故障选线保护判据。

4 行波小波系数极性法选线保护程序设计

当配电网系统某线路中发生单相接地故障时,故障相对地电压下降到接近于零,非故障相电压升高到系统相间电压。本文利用零序电压突变量起选线保护并确定故障时刻,再利用三相电压的特点判断故障类型及故障相,在确认是单相接地故障时,读取故障前后各约 0.4 ms 的数据,然后进入故障选线程序^[1,2]。

暂态行波的陡度一般约为几十个 μs ,接近 1 ms 的数据就能够满足小波分析计算的需要。本文采用的采样率为 10 MHz,1 ms 就有近 10 k 组数据,如果采用双精度数据类型,每个数据需要 8B 的存储空间。本文的模型中有 5 条线路,加上母线电压,共 3 × 6 个数据通道,每个采样点需要 1 440B 的存储空间,1 ms 就需要 144 kB 的存储空间,如果在装置中缓存 0.1 s 的数据,需要的存储空间就达 144 MB,加上计算过程中的内存开销等,一般微型机系统都不能支持。所以,仅从内存开销来看,选线保护装置应该是基于工控机或者更高的系统的。

下面是行波小波系数极性法的配电网单相接地故障选线保护程序流程:

- 1) 利用零序电压突变量起选线保护;
- 2) 确定故障类型及故障时刻;
- 3) 提取数据,完成相模转换;
- 4) 运用连续小波分析和小波包算法,计算母线电压及各线路电流 0 模量小波系数;
- 5) 判别初始波头小波系数极大值,比较母线电压及各线路电流 0 模量小波系数极大值的极性,根据选线判据判别故障线路;
- 6) 将在三个小波包节点和四个连续小波变换尺度下共七次判断的结果进行七选五表决,完成故障选线。

必须说明的是,作为电力系统的保护装置,其运行环境电磁干扰严重,而为了应用行波实现数字保护功能,其采样频率很高,装置电路工作频率高,因此行波小波系数极性法故障选线装置必须有很好的防止和消除各种干扰的措施。特别是在程序流程的第五步中,要准确地判断出初始波头,而不是干扰引起的突变点。考虑到故障选线保护在动作时间上要求很低,即使计算几分钟也是允许的。

因此本文采取了如下办法处理,首先认为极大值出现的时间应该接近故障发生时刻,而各数据通道同时受到干扰的概率很低,可以判断各系数在保

护起动时刻前后一定时间范围内是否同时出现极大值,如果满足这一条件,则进行极性判断,找出故障线路,否则换到小波树预定的其它节点进行判断,因为在小波树上除了最低频段节点(相似部分)以外,在很多高频频段节点(细节部分)上,小波系数都有显著的极大值极性关系特点,能够完成选线判断,这样,就可以在干扰信号能量较弱的节点上完成选线判断。同时进行了在多个尺度下的连续小波分析,比较其小波系数极大值极性,进行选线判断,并将多次判断的结果进行冗余表决,得到最终选线结果。本文采用了这样的算法,在小波树节点 2、4、8 三个节点,连续小波变换在 10、20、50、100 四个尺度下,一共进行七次故障选线判断,如果有 5 次以上的结果完全一致,则判定故障线路,否则,输出这七次判断结果,供技术人员参考。

在所仿真的电力系统中,分别采用中性点不接地和经消弧线圈接地条件下,各线路分别采用典型架空线路和电缆线路参数时,在不同线路的不同距离、经过 0 到 500 Ω 过渡电阻发生单相接地短路故障时,本文完成了在不同条件下的一千多次仿真试验,并运行故障选线保护仿真程序,完成选线判断,结果表明:本方法的选线准确性达到 100%。

5 结论与展望

本文采用小波包方法结合连续小波变换,利用配电网单相接地故障时,母线电压和各线路电流的行波 0 模量的初始波头小波系数极大值的极性特征实现故障选线保护。运用本文提出的判据和算法,在进行仿真计算时,一次判断的正确率就接近 100%,算法进一步将七次计算结果进行七选五表决,完成故障线路的判断,充分利用系统资源,实现功能冗余。这样处理后,可以大大提高接地故障选线保护在实际应用过程的正确率和可靠性。

通过前文的分析,我们知道,对于应用初始行波波头小波系数极大值极性特征的故障选线保护来说,变压器的中性点接地方式对判断过程和结果都没有影响,因此,本文介绍的方法具有普遍适用意义。

但如果要完成应用开发,至少应该在以下几个方面加以考虑:装置应用于线路长度可能只有几千米甚至几百米的配电网系统中,线路末端反射波很快就会到达装置安装处,所以要采用很高的采样率,才能在反射波到来之前的短时间里采集到足够多的数据。考虑到其它装置数据共享等因素,装置还应

该缓存一定时间的数据,而且小波分析计算复杂,有大量的乘法运算和中间结果,所以,系统应该有足够的内存容量。高速高精度的数据采集,也要求装置系统 CPU、总线等都能够很好地适应,所以,本选线装置可以采用高性能的工控机,或者直接设计在变电站综合自动化系统的服务器上,以充分利用系统现有资源,减少投资。

参考文献:

- [1] 黄景光,吕艳萍,等.应用小波包构成暂态零序功率分量的消弧线圈接地系统故障选线保护[J].继电器,2003,31(6):1-4.
HUANG Jing-guang, L ü Yan-ping, et al The Peterson Coil Grounded System Single Phase Fault Detection by the Wavelet Packets Zero Sequence Power Components[J]. Relay, 2003, 31(6):1-4.
- [2] 黄景光,吕艳萍,等.小波系数峰值极性法的配电网单相接地故障选线保护[J].继电器,2005,33(12):17-21.
HUANG Jing-guang, L ü Yan-ping, et al The Ungrounded System Single Phase Fault Detection by the Wavelet Packets Coefficient Peak Polarities[J]. Relay, 2005, 33(12):17-21.
- [3] Michel C O, Brouaye F. Wavelet: a New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution Systems Relaying[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3):1301-1308.
- [4] 贾清泉,等.应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流接地故障选线保护[J].中国电机工程学报,2001,21(10):78-

82

JA Qing-guan, et al Abrupt Change Detection with Wavelet for Small Current Fault Relaying[J]. Proceedings of CSEE, 2001, 21(10):78-82.

- [5] 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.
DONG Xin-zhou, BI Jian-guang Analysis on Transient Traveling Wave and Study on Fault Line Selection for Distribution Lines[J]. Proceedings of CSEE, 2005, 25(4):1-6.
- [6] 周泽存.高电压技术[M].北京:水利电力出版社,1988.
ZHOU Ze-cun High Voltage Technology[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1988.
- [7] 崔锦泰.小波分析导论[M].程正兴,译.西安:西安交通大学出版社,1995.
CUI Jin-tai An Introduction to Wavelets[M]. CHENG Zheng-xing, Trans Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1995.

收稿日期: 2005-07-29; 修回日期: 2005-11-18

作者简介:

黄景光(1968-),男,讲师,主要从事信号分析和电力系统继电保护研究;E-mail: huangjingguang@xinhuanet.com

刘家豪(1970-),男,讲师,主要从事电力系统绝缘与过电压研究;

吕艳萍(1955-),女,教授,主要从事电力系统继电保护及变电站综合自动化研究。

Distribution grid earth fault line detection study by the traveling wave wavelets coefficient maximum polarities redundancy voting

HUANG Jing-guang¹, LU Hui-jia¹, L ü Yan-ping²

(1 China Three Gorges University, Yichang 443002, China 2 Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The paper studies the features of the transient traveling waves when a single phase earth fault taking place in distribution grid. And using the traveling wave wavelets coefficient maximum polarities of the bus bar voltage and lines currents' zero modes, a new detection technique based on wavelets is introduced. After identifying the primary ripples and the coefficient maximum polarities, and redundancy voting the results of 7 times detections, the fault line will be identified. The paper simulates a small typical distribution grid. A simulation program is compiled, and the exactness and availability are proved. Some application advices are brought forward as well.

Key words: wavelets analysis; earth fault detection; coefficient maximum polarities; redundancy voting

(上接第 12 页 continued from page 12)

Abstract: The characteristic of breaker failure protection for AC Filter (ACF) sub-bank is presented. In some special fault case, fault current through ACF sub-bank is different a little from normal load current. If only phase current is used in breaker failure protection, miss trip may occur no matter the threshold of current is higher or lower than load current. Zero-sequence current criterion, negative sequence current criterion and phase current variation can be used to improve the performance of breaker failure protection for ACF sub-bank.

Key words: AC filter (ACF); breaker failure protection; phase current criterion; zero sequence current criterion; negative sequence current criterion