

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

黄景光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: 引入一种新的基于小波包分析的小接地系统单相接地短路故障选线方法: 利用零序电压和零序电流的小波包系数构成零序功率分量, 并以此构成故障选线保护判据, 通过比较其相位特征完成故障选线工作。利用 MATLAB 仿真了一个中性点经消弧线圈接地的小系统, 通过对仿真结果的分析, 证明了此方法的正确和有效。

关键词: 小波包; 故障选线; 功率分量; 消弧线圈; 单相接地

中图分类号: TM773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)06-0001-04

1 引言

我国配电网多采用中性点经消弧线圈接地方式。消弧线圈的参数选择使其电感与系统对地电容接近于工频谐振(一般选择 10% 左右的过补偿方式), 其作用就是补偿线路对地电容电流, 以消除单相接地短路时故障电弧。当这样的系统中发生单相接地短路时, 零序电压作用于系统对地电容产生零序电流, 并以故障点作为回路。稳态下, 非故障线路的零序电流为本线路对地电容电流, 故障线路零序电流为所有非故障线路对地电容电流以及中性点感性零序电流之和, 故障线路和非故障线路的稳态零序电流都很小, 零序功率都是电容性的。

从其单相接地故障特点来看, 稳态基波分量不能构成经消弧线圈接地的电网中的故障选线保护。奇数整次谐波如 5 次、7 次等存在于电源电压中, 因远离谐振而基本不受消弧线圈影响, 但由于在线路电流中仅占百分之几, 数值太小, 不易提取, 运用传统方法构成的基于 5 次、7 次谐波选线保护很不可靠。相比之下, 暂态分量数值较大, 但传统的用于继电保护信号分析的方法, 如: 傅立叶变换、最小二乘法、卡尔曼滤波以及 FIR 滤波器等, 虽然证明对平稳信号都是十分适当和有效的, 但对于电力系统暂态分量, 这些方法的作用就很有限了。小波分析是理想的非平稳信号分析与处理工具, 本文基于小波包分析构成一种利用暂态分量的故障选线保护: 零序功率分量法, 并证明了其优异的可靠性、灵敏性和适应能力。

基金项目: 三峡大学青年基金项目

2 基于 MATLAB 的系统仿真

为了能够方便地分析经消弧线圈接地系统, 在各种条件下(如线路参数、负荷大小、故障时刻、故障点位置以及过渡电阻等)的单相接地故障, 本文建立了一个基于 MATLAB SIMULINK 的小型 35 kV 系统仿真模型, 原理图见图 1。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/ Δ 接线。中性点经消弧线圈接地, 其电感的大小决定补偿方式。考虑系统参数及状态的多样性, 各条线路的长度、参数和所带负荷都不相同, 负荷侧变压器全部为 Δ/Y_g-11 接线, 以隔离零序网络。一个三相故障模型用来模拟经不同过渡电阻的、在不同时刻发生和切除的各种类型的短路故障。

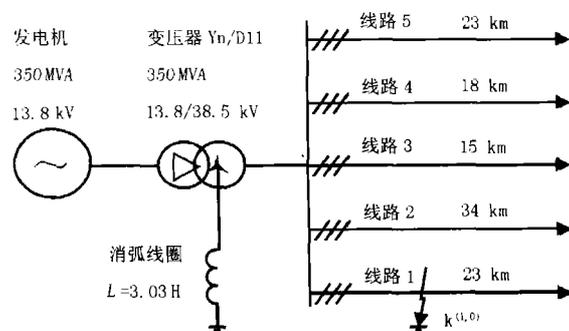


图 1 经消弧线圈接地系统的结构和参数
Fig.1 The structure and parameters of the petersen coil grounded system

在不同条件下运行仿真模型, 输出母线三相电压和零序电压以及各线路零序电流, 运用小波包方法进行分析, 实现故障选线。

3 小波包零序功率分量故障选线保护

3.1 小波包

设正交尺度函数 $\phi(t)$, 小波函数 $\Psi(t)$, 且 $\Psi_0(t) = \phi(t)$, $\Psi_1(t) = \Psi(t)$, 则双尺度函数关系:

$$\begin{cases} \Psi_0(t) = \sum_k h_k \Psi_0(2t - k) \\ \Psi_1(t) = \sum_k g_k \Psi_0(2t - k) \end{cases} \quad (1)$$

于是, 函数 Ψ_n , $n = 2l$ 或 $2l + 1$, $l = 0, 1, \dots$ 且

$$\begin{cases} \Psi_{2l}(t) = \sum_k h_k \Psi_l(2t - k) \\ \Psi_{2l+1}(t) = \sum_k g_k \Psi_l(2t - k) \end{cases} \quad (2)$$

是关于 $\phi(t)$ 的小波包。

由于 $\Psi_0(t)$ 是由序列 $\{h_k\}$ 唯一确定的, 所以 $\{\Psi_n\}$ 是关于 $\{h_k\}$ 的正交小波包。紧支撑小波包分析就是用一组正交(或双正交)镜象 FIR 滤波器中的分解低通 LD 和分解高通 HD 滤波器, 把信号分解为低频部分(近似像)和 高频部分(细节), 并对分解后的所有分量继续重复这一过程, 得到一个二叉树结构, 见图 2。在此小波树的第 $N(N > 0)$ 层, 信号被分解为 2^N 个带宽相等的频段的分量(小波系数), 并由此实现在时域和频域上的局部化。小波系数经过重构低通 LR 和重构高通 HR 滤波器以后, 可以实现信号的完全重构。为了保持数据量不变, 分解时向下采样, 重构时向上抽样, 见图 3。

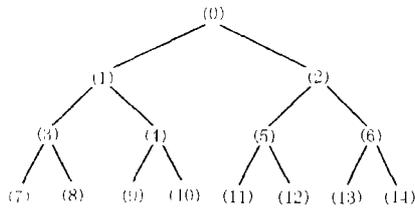


图 2 小波分解树 ($N=3$)

Fig. 2 Wavelet decomposition tree ($N=3$)

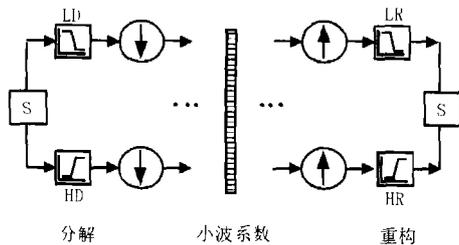


图 3 小波包分解与重构

Fig. 3 Wavelet packet decomposition and reconstruction

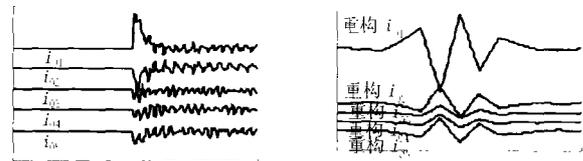
由于小波的正交性和对称性难以同时满足, 而对称性关系到是否能够进行精确重构。所以, 在要求精确重构时, 可以采用双正交小波, 它有两个正交小波函数, 一个作为分解小波, 一个作为重构小波。表 1 所列为本文采用的双正交小波包镜象滤波器组。

表 1 双正交小波包镜象滤波器组

重构低通	重构高通	分解低通	分解高通
0	0	0	0
0	-0.0331	0.0331	0
0	-0.0663	-0.0663	0
0.3536	0.1768	-0.1768	0.3536
0.7071	0.4198	0.4198	-0.7071
0.3536	-0.9944	0.9944	0.3536
0	0.4198	0.4198	0
0	0.1768	-0.1768	0
0	-0.0663	-0.0663	0
0	-0.0331	0.0331	0

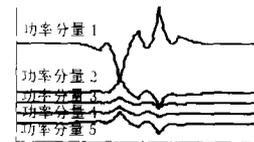
3.2 小波包零序功率分量

在 MATLAB 模型中, 仿真经过渡电阻的单相接地故障, 取故障前后各 1/4 工频周期的数据, 把零序电压、零序电流作小波包分解, 并在小波树各节点重构, 得到原信号在各个频带上的分量。用同一节点的零序电压分量与各零序电流分量, 构成各线路在各频段的零序功率分量。



(a) 故障前后零序电流波形

(b) 零序电流重构波形



(c) 零序功率分量波形

图 4 零序功率分量的构成

Fig. 4 Construction of zero sequence power components

图 4 就是当故障点在线路 1 上时这一“分解—重构”过程的结果。从图中可以看到, 通过在一个节点重构以后, 各线路零序电流分量呈现明显的

波形差异:在图 4(b)中,有 4 个重构零序电流波形的相位基本一致,有且仅有一个波形(线路 1 的重构零序电流)正好与它们相反。这是一个值得重视的特征,它提示着一个选线保护的判据:比较重构的零序电流的波形特征(例如瞬时极性、相位)。但通过作者的反复计算和分析,发现这一方法容易受到系统运行方式的影响,灵敏度不高,也可能出现误选。

把在同一节点重构的零序电压、电流构成零序功率分量,该量反映了故障中各线路的一个狭窄的频段里的零序功率的特征信息。图 4(c)零序功率分量就是由图 4(b)中零序电流与重构零序电压相乘所构成的。从直观上,其波形特征与图 4(b)相比更加明显了,进一步的计算和分析表明,比较零序功率分量波形特征构成选线保护,在可靠性和灵敏性上都要优于直接比较重构零序电流。

本文采用了比较零序功率分量波形相位差的方法构成了一种新原理的故障选线保护。图 5 为零序功率分量间的相位差,从图中可以清楚地看到:有且仅有“相差 1-2”在 180° 附近,且平均值为 180° ,其它都在 0° 附近,且平均值为 0° ,也就是说,非故障线路间的相位差在 0° 附近,故障线路与非故障线路间的相位差在 180° 附近。因此,可以通过相位差的特点来判断故障线路。

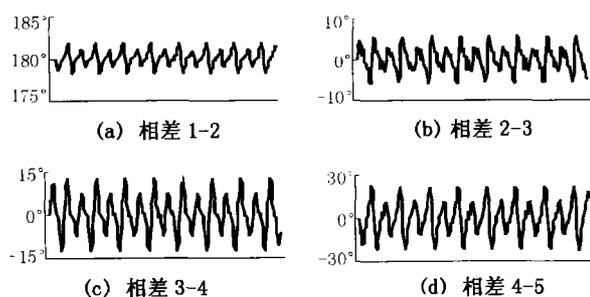


图 5 零序功率分量间的相位差

Fig. 5 The phase differences between zero sequence power components

当按照运行线路的顺序计算相位差时,相位差变量个数比运行线路条数少 1,例如,有 m 条线路,则变量个数为 $m - 1$,当有一条线路发生单相接地故障时,变量就有四种情形:

- (1)当故障线路序号 $n = 1$ 时,第 1 个相位差在 $\pm 180^\circ$ 附近,其它都在 0° 附近;
- (2)当故障线路序号 $n = m$ 时,第 $m - 1$ 个也就是最后一个相位差在 $\pm 180^\circ$ 附近,其它都在 0° 附近;
- (3)当故障线路序号 $1 < n < m$ 时,第 $n - 1$ 和 n 两个相位差在 $\pm 180^\circ$ 附近,其它都在 0° 附近;

(4)当母线发生单相接地故障时,所有相位差都在 0° 附近。

在小电流接地系统中,计算机保护装置判断短路故障的发生及故障相都有很好的成熟的方法,因此,只有在单相接地故障时,程序才会进入故障选线模块。所以,在发生单相接地故障时,上述规律是一定存在的,而当相位差特征符合四种情形之一时,就可以判断出发生单相接地故障的线路。

3.3 选线保护程序设计

当小电流接地系统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,利用零序电压突变量启动选线保护,再利用三相电压的特点判断故障相,在确认是单相接地故障时,读取故障前后各 $1/4$ 工频周期的数据,进入故障选线程序。

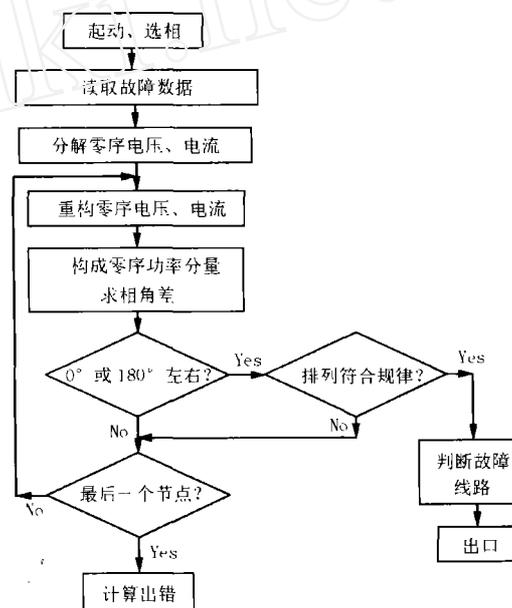


图 6 零序功率分量法选线程序流程图

Fig. 6 The program flow of fault detection technique based on the zero sequence power components

必须说明的是,由于电力系统运行的多样性、故障时刻以及过渡电阻等因素的作用,并非在小波树的所有节点,零序功率分量都会有 3.2 条所描述的相位特征及其四种排列规律,因此本文采用了沿小波树逐节点搜索判断的方法来完成故障选线工作,其程序流程见图 6。在判断框“ 0° 或 180° 左右”里,程序中设定了阈值,当其值为 90° 时,正好把坐标平面分为“ $-90^\circ \sim 90^\circ$ ”和“ $90^\circ \sim 270^\circ$ ”两个半平面, 0° 所在半平面为动作区, 180° 所在半平面为制动区。值得说明的是,零序功率分量相位差具有对称性,当满

是“ 0° 或 $\pm 180^\circ$ 左右”时,其均值就是 0° 或 $\pm 180^\circ$,程序进行选线判断时,充分考虑相位差的这一规律,对提高灵敏度和可靠性都很有帮助。

4 试验结果分析

我们知道,选择一定阶数消失矩的小波包,可以把信号的能量集中在小波树的少数节点,而使干扰得到有效地抑制。小波包把信号频域 $0 \sim \Omega$ ($\Omega = 2\pi f$)划分为 2^N 个严密而无重叠的频带,通过多尺度分析,可以实现信号在时域和频域的局部化。对于具有对称性的小波,其分解是可以精确重构的,如果把某个频段的小波系数进行重构,实际上就相当于把原信号中的这个频段的信息保留下来,抑制或抛弃其它频段的信息。

在理想情况下,消弧线圈在工频 50 Hz 与系统对地电容总和接近于参数谐振,对高频分量,感抗很大而容抗较小,消弧线圈的作用是可以忽略的。通过小波分解再在各节点重构的零序功率分量,除了较深层次的低频近似部分外,基本是不受消弧线圈影响的,消弧线圈可认为是开路或者不存在的。因此,高频零序功率分量在方向上符合规律:故障线路零序功率近似为纯感性,非故障线路零序功率近似为纯容性,它们的相位相反。

本文的零序功率分量法采用双正交小波包,把故障暂态分量中的零序功率按频带分开,构成零序功率分量。其中的一些频带较好保持了零序容性功率的方向特征,通过对各频带的零序功率分量逐个子地严密逻辑判断,识别出发生单相接地故障的线路。

5 结论

本文仿真了一个小电流接地系统在下列条件下的单相短路:

- (1)故障点分别在母线和各线路首端、中点、末端;
- (2)金属性和经 100Ω 以上过渡电阻的短路;
- (3)不同的线路长度、参数和负荷;
- (4)中性点不接地和经消弧线圈接地;
- (5)不同故障初始角即故障时刻。

运用基于小波变换的零序功率分量法,对各种条件下单相接地进行故障选线。表 2 是在系统采用消弧线圈过补偿方式时的一组实验数据,从中可以看到,在 100Ω 以上过渡电阻条件下,相位差的波动范围都不大,保持了很高的灵敏度。对大量各种条件下的单相故障进行选线实验的结果表明:本方法

可靠性好、灵敏度高,适应能力强,选线正确率为 100%,能满足应用的要求。

在装置设计时,需要着重考虑:

(1)由于小波分析有大量的乘法运算,计算量较大,CPU 可选择较高性能的 DSP;

(2)考虑到应用本算法成功完成选线工作时对应的信号频段,并参照实时动态仿真系统 RTDS 的采样周期 $50 \sim 100 \mu\text{s}$,采样率选择在 1 万 \sim 2 万 Hz 是比较合适的;

(3)小波包分析是要向下抽样的,数据窗应有足够的长度,以免边缘效应影响保护动作,但数据窗越长计算量就越大,加上计算的中间结果,RAM 的开销会很大,考虑到本算法针对的是暂态信号,在故障后会迅速衰减,因此,装置起动后仅锁存故障时刻前后各 $1/4$ 工频周期的数据。

表 2 故障选线结果

Tab.2 The results of fault detection

故障线路	故障位置	过渡电阻/ Ω	相位差变量值范围				选线结果
			θ_{1-2}	θ_{2-3}	θ_{3-4}	θ_{4-5}	
L1	首端	100	$180^\circ \pm 1^\circ$	$\pm 3^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 6^\circ$	✓
	中点	100	$180^\circ \pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 2^\circ$	$\pm 2^\circ$	✓
	末端	500	$-180^\circ \pm 14^\circ$	$\pm 11^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 5^\circ$	✓
L2	首端	100	$180^\circ \pm 12^\circ$	$-180^\circ \pm 10^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 28^\circ$	✓
	中点	100	$180^\circ \pm 13^\circ$	$-180^\circ \pm 9^\circ$	$\pm 3^\circ$	$\pm 7^\circ$	✓
	末端	500	$-180^\circ \pm 4^\circ$	$180^\circ \pm 7^\circ$	$\pm 1.2^\circ$	$\pm 5.5^\circ$	✓
L3	首端	100	$\pm 40^\circ$	$-180^\circ \pm 11^\circ$	$180^\circ \pm 10^\circ$	$\pm 40^\circ$	✓
	中点	100	$\pm 18^\circ$	$180^\circ \pm 7^\circ$	$-180^\circ \pm 12^\circ$	$\pm 20^\circ$	✓
	末端	500	$\pm 11.4^\circ$	$-180^\circ \pm 6^\circ$	$-180^\circ \pm 18^\circ$	$\pm 30^\circ$	✓
L4	首端	100	$\pm 8^\circ$	$\pm 7^\circ$	$180^\circ \pm 4^\circ$	$-180^\circ \pm 5^\circ$	✓
	中点	100	$\pm 22^\circ$	$\pm 24^\circ$	$180^\circ \pm 10^\circ$	$-180^\circ \pm 3^\circ$	✓
	末端	500	$\pm 50^\circ$	$\pm 42^\circ$	$180^\circ \pm 18^\circ$	$-180^\circ \pm 22^\circ$	✓
L5	首端	100	$\pm 10^\circ$	$\pm 12^\circ$	$\pm 9^\circ$	$180^\circ \pm 11^\circ$	✓
	中点	100	$\pm 20^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 11^\circ$	$180^\circ \pm 9^\circ$	✓
	末端	500	$\pm 24^\circ$	$\pm 38^\circ$	$\pm 36^\circ$	$180^\circ \pm 14^\circ$	✓
母线	A 相	100	$\pm 11.9^\circ$	$\pm 47.4^\circ$	$\pm 25.4^\circ$	$\pm 34.9^\circ$	✓

参考文献:

- [1] 崔锦泰.小波分析导论[M].西安:西安交通大学出版社,1995.
- [2] 黄家裕,陈礼义,孙德昌.电力系统数字仿真[M].北京:水利电力出版社,1995.
- [3] 刘万顺.电力系统故障分析[M].北京:水利电力出版社,1986.

(下转第 8 页)

7 结论

通过对系统 $U-I$ 特性的电压稳定性判据分析, 得出了负荷的不同模型配比与电压稳定性之间的关系, 进而提出了对于多项式的负荷模型, 可以利用公式(10)来判断节点电压稳定性的新方法, 该方法简单、实用, 可以应用于快速在线判断电压稳定性。实例验证了该方法是正确有效的。

参考文献:

- [1] 李宝国, 鲁宝春, 巴金祥. 一种绘制 $P-U$ 曲线的快速方法[J]. 继电器, 2002, (2): 13-15.
 [2] 李宝国, 鲁宝春, 闫钿. 负荷比对静态电压稳定性的影响[J]. 继电器, 2002, (6): 10-12.

- [3] 张伯明. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995. 8.
 [4] Khoi Vu, Miroslav M. BRegovic, Damir Novosel. Use of Local Measurements to Estimate Voltage-stability Margin[J]. IEEE Transactions on Power Systems. 1999, 14(3).

收稿日期: 2002-07-25

作者简介:

李宝国(1966-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定分析与控制;

鲁宝春(1964-), 男, 博士后, 教授, 研究方向为电力系统电压稳定与控制;

刘毅(1969-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统微机保护。

Study on load model and steady-state voltage stability

LI Bao-guo, LU Bao-chun, LIU Yi

(Information Science & Engineering Dept. of Liaoning Institute of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: The characteristics of $U-I$ curves of the supply side and the load side in power system are studied in this paper. A new method is presented to judge node steady-state voltage stability by comparing slopes of two characteristic curves at static balance points. This paper analyzes the relation of the multinomial load models and the node steady-state voltage stability, and deduces the formula of judging node steady-state voltage stability. This formula is suitable for the multinomial load model. This method is simple and fast, and can be applied in real-time on-line voltage stability analysis. The computational results show the correctness and the effectiveness of this method.

Key words: load model; voltage stability; $U-I$ characteristics

(上接第4页)

- [4] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
 [5] Chaari O Michel, 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.
 [6] 毛鹏, 等. 小波包在配电网单相接地故障中的应用[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 9-17.
 [7] 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.

收稿日期: 2002-10-18

作者简介:

黄景光(1968-), 男, 讲师, 主要从事于信号分析和电力系统继电保护研究;

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

Single-phase fault detection based on the wavelet packet analysis of zero-sequence power components in the Petersen-coil grounded system

HUANG Jing-guang¹, LV Yan-ping²

(1. Three-Gorge University, Yichang 443002, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A new single phase earth fault detection technique based on wavelet packet analysis is introduced in this article: The zero sequence power components are formed of the wavelet packets coefficients of the zero sequence voltage and currents, and are used to be the signs of fault detection, the fault detection is accomplished with comparing the phases of the power components. A small Petersen coil grounded system is simulated in the article, analyzing and computing the simulation results, the rightness and availability is proved.

Key words: wavelet packet; fault detection; power component; Petersen coil; single phase earth fault