

基于小波包分析的配电网故障选线新方法

庞清乐^{1,2}, 孙同景¹, 孙波¹, 钟麦英¹

(1. 山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061;

2. 聊城大学 计算机学院, 山东 聊城 252059)

摘要: 提出了基于小波包分析的配电网故障选线新方法用于解决低频采样零序电流信号因发生不同程度的能量衰减而导致的选线错误问题。当发生单相接地故障时, 分别对零序电流信号进行低频采样和低频采样, 计算高频采样零序电流信号的首波头极性和最大值以及低频采样零序电流信号的最大值, 以此为依据对低频采样的零序电流信号做增强处理, 然后利用小波包分析方法对增强的信号进行小波包分解, 根据能量最大的原则实现故障选线。基于上述原理研制了配电网接地选线装置, 给出了装置的硬件结构及软件流程。分别针对零序电流信号能量衰减严重和极性检测错误的情况进行仿真试验。结果表明, 该方法有效地提高了小电流接地选线的准确性。

关键词: 电力系统; 配电网; 小波包变换; 故障选线

中图分类号: TM 773; TP 183

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)04-0019-04

0 引言

小电流接地系统单相接地故障选线问题一直未能彻底解决^[1]。国内外学者对此做了大量的研究工作, 提出了诸多选线方法, 主要可分为基于稳态信号的方法^[1-4]和基于暂态信号的方法。基于暂态信号的故障选线方法^[5-9], 由于具有灵敏度高且不受消弧线圈影响的优点而受到人们的普遍关注。最近, 又出现了智能化的故障选线方法^[10-14]。

小波理论的出现, 为分析暂态信号提供了一个非常好的工具, 采用小波理论对暂态信号进行分析选线的研究逐渐增多^[6-9]。基于小波包变换的故障选线方法^[7-9], 利用了小波包的分频特性, 克服了小波分频不细的缺点, 选线的可靠性有了较大的提高。但是, 实际采样的零序电流信号, 由于采样频率的限制, 有些故障信息可能丢失, 致使故障线路的故障特征不明显, 造成“误选”或“漏选”。为了克服这种问题, 提出了基于小波包分析的故障选线新方法, 首先对采样的零序电流信号进行增强处理, 然后再用小波包对该信号进行分析, 实现故障选线的目的。

1 基于小波包的故障选线新方法

1.1 小波包选线方法原理

当配电网发生单相接地故障时, 利用小波包将流经各线路的暂态零序电流按一定频带宽度进行分解并剔除工频所在最低频段后, 能量较大的频段即为该线路暂态电容电流分布较集中的频段, 也是

故障特征最明显的特征频段。线路在能量较集中的几个频段的总能量定义为

$$W = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [\omega_{li}^{k_i}(j)]^2 \quad (1)$$

式中 $\omega_{li}^{k_i}(j)$ 为小波包分解在第 (k_i, l_i) 子频段下的系数。

比较各线路在各自特征频段的能量, 能量明显大于其他线路能量的线路判断为故障线路, 若各线路能量相差不大, 则判断为母线故障^[10]。

1.2 小波包选线方法存在的问题

实际采样的零序电流信号, 由于受硬件电路的限制, 采样频率不可能太高。经低频采样的零序电流信号会发生不同程度的能量衰减, 致使基于能量的选线方法的选线结果错误。因此, 需要对衰减的信号进行增强处理, 使故障线路的零序电流信号增强的比例较大, 而非故障线路的零序电流信号增强的比例较小, 从而达到正确选线的目的。

1.3 改进的小波包选线方法原理

利用高速采集电路对零序电流信号进行高频采样, 采样后的信号接近实际信号。高频采样信号最大值和低频采样信号最大值的差值越大, 说明信号衰减越严重, 信号需要增强的比例就越大。一条线路的高频采样信号首波头极性和其他多数线路的极性相反, 说明该线路可能是故障线路, 信号需要增强的比例大。但考虑到由于干扰等因素的存在可能会出现检测首波头极性错误的现象, 因此, 当检测到某线路首波头极性和其他线路相反时信号不能增强比例太大。如果增强比例太大, 当首波头极性检测错误时, 有可能使增强后非故障线路零序电流信号的能量

量比故障线路零序电流信号的能量还大,造成选线错误。鉴于以上原因,根据下式对低频采样的信号做增强处理:

$$i_s^L = \begin{cases} \left(1 + \frac{I_{\max}^H - I_{\max}^L}{2I_{\max}^L}\right) i^L & p=0 \\ \left(1 + \frac{I_{\max}^H - I_{\max}^L}{I_{\max}^L}\right) i^L & p=1 \end{cases} \quad (2)$$

式中 i_s^L 为增强后低频采样零序电流信号的瞬时值; $I_{\max}^H$ 为高频采样信号的最大值; $I_{\max}^L$ 为低频采样信号的最大值; i^L 为增强前低频采样信号的瞬时值; $p=0$ 表示该线路高频采样信号的首波头极性和其他多数线路相同, $p=1$ 表示该线路高频采样信号的首波头极性和其他多数线路相反。

因为经过低频采样后信号都产生了能量衰减,所以,无论是 $p=0$ 还是 $p=1$ 时都要做增强处理。而 $p=1$ 的线路有可能是故障线路,因而此时信号增强的比例比 $p=0$ 时大一倍。

根据式(1),利用小波包理论对增强的低频采样信号进行处理,实现故障选线。当一条线路的小波包分解系数的能量明显大于其他线路,则判断该线路为故障线路;若没有一条线路的小波包分解系数的能量明显大于其他线路,则判断为母线故障。

2 接地选线装置

2.1 硬件结构

图 1 为基于改进小波包的故障选线装置硬件结构图,系统主要由下位机系统和上位机系统组成。下位机系统主要实现信号采集及处理,由测频、低速数据采集和高速数据采集单元组成。测频的标准信号取自电网的线电压,由 CPLD 实现测频功能。零序电流信号来自安装在各馈线的零序电流互感器的二次侧,经负载电阻转换成电压信号,再经放大和 3 kHz 的低通滤波后,分别经过低速和高速采样保持器(S/H)得到相应的零序暂态信号。低速采样信号经多路开关和 A/D 变换后输入下位机,等待处理。

高速采样信号经多路开关和 A/D 变换后,由 CPLD 控制循环存入静态 RAM A 中。当出现接地故障时,由 CPLD 控制在 RAM A 中存储半个周期的高速采样信号后,将 RAM B 作为循环存储器,把 RAM A 中的数据输入到下位机,用于信号增强。上位机系统的主要任务是实时检测零序电压,判断接地故障是否发生,实现键盘管理、数据显示、接地历史数据存储及与上级监控系统通信。

2.2 软件流程

故障选线系统在常态下上位机实时监测、显示电网零序电压,判断电网状态,定期对系统自检,依据键盘命令进行打印、查看历史记录等操作。下位机实时采集 32 路电压、电流信号,将高速、低速采样信号分别存入对应的数据区。当发生单相接地故障后,提取 2 个周期的低频采样零序暂态电流信号和半个周期的高频采样零序暂态电流信号,计算出低频采样信号的幅值衰减程度和信号的首波头极性,由式(2)对低速采样的 2 个周期信号进行增强处理,对增强后的信号利用小波包分析方法进行故障选线。基于改进的小波包变换的故障选线装置软件流程如图 2 所示。

3 试验结果

仿真模型采用文献[10]的模型。用 ATP 仿真软件仿真试验,将仿真输出的零序暂态电流信号数据输入到暂态信号发生器^[15],将暂态信号发生器的输出信号加到该选线装置的信号输入端。考虑到暂态电容电流的自由振荡频率一般集中在 300~1 500 Hz,采用 3.2 kHz 的低频采样频率对零序电流信号进行采样,采样数据窗取故障前 $\frac{1}{4}$ 周期和故障后 $1\frac{3}{4}$ 周期;高速采样频率取为 500 kHz,由于最大值出现在故障初期,所以采样数据窗取为故障前 $1/8$ 周期和故障后 $3/8$ 周期。根据式(2)对低频零序电流信号做增强处理,利用小波包方法对增强的信号分解,实现故障选线。

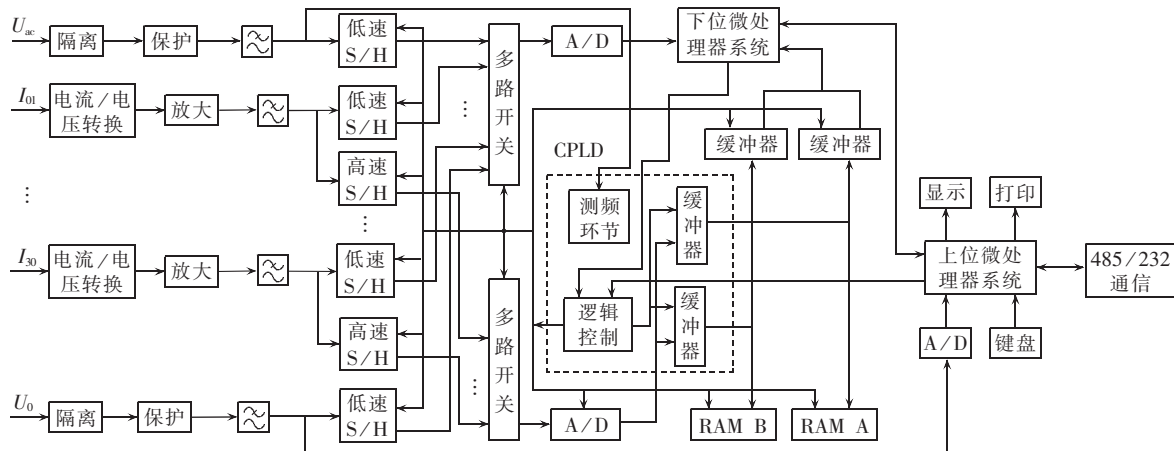


图 1 故障选线装置硬件结构图

Fig.1 Hardware of faulty line detection device

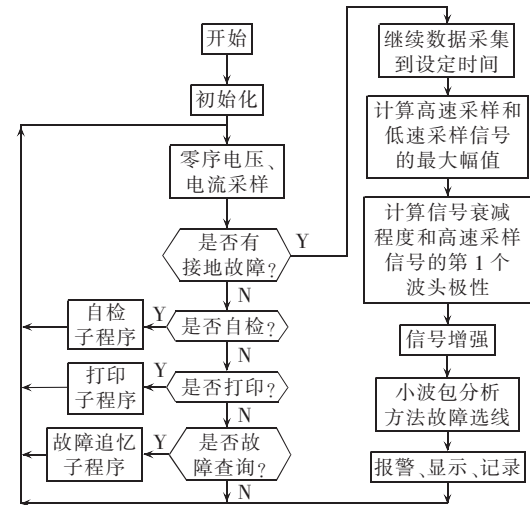


图 2 故障选线装置的软件流程图

Fig.2 Software of faulty line detection device

3.1 仿真试验 1

在相电压相位为 90° 时,在线路 L₁ 的 10 % 处出现接地电阻为 50 Ω 单相接地故障。L₁ 和 L₆ 增强前、后的信号如图 3 所示(*i*₁ 为增强前,*i*₂ 为增强后)。增强前、后信号的小波包处理结果见表 1。由表 1 可知,若根据增强前的信号进行选线,因为没有一条线路的能量明显大于其他线路,故判断为母线故障,判断错误。若根据增强后的信号进行选线,因为 L₁ 的能量明显大于其他线路,故判断为 L₁ 故障,判断正确。

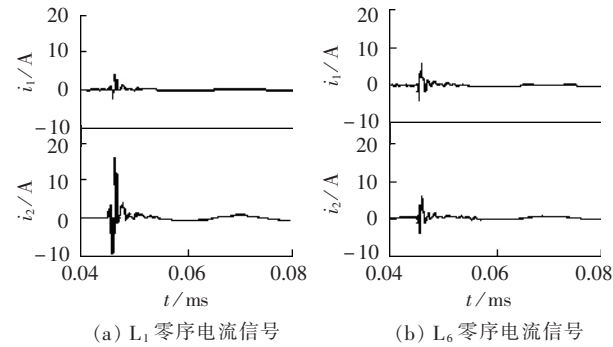


图 3 增强前、后信号

Fig.3 Signals before and after enhancement

表 1 增强前、后的小波包信号处理结果

Tab.1 Signal processing results by wavelet packet before and after enhancement

线路	增强前		增强后	
	W_k/A^2	W_k/W_{Σ}	W_k/A^2	W_k/W_{Σ}
L ₁	16.390 8	0.10	262.252 5	0.47
L ₂	12.410 9	0.07	57.917 1	0.10
L ₃	24.503 6	0.15	30.848 6	0.06
L ₄	30.588 8	0.18	71.885 9	0.13
L ₅	32.710 0	0.20	66.006 0	0.12
L ₆	50.734 2	0.30	64.931 8	0.12
总和	167.338 3		553.841 9	

注: W_k 为线路 k 零序电流在能量集中频段的能量, W_{Σ} 为电网中所有线路零序电流在各自能量集中频段的能量总和; 表 2 同。

3.2 仿真试验 2

在相电压相位为 90° 时,在 L₁ 的 10 % 处出现接地电阻为 5 Ω 单相接地故障。假设存在干扰,使 L₁ 和 L₆ 的极性检测错误。L₁、L₂、L₄ 和 L₆ 的高速采样信号分别如图 4(a)~(d)所示。增强前、后信号的小波包处理结果如表 2 所示。由表 2 可知,故障前、后都判断为 L₁ 故障,判断均正确。所以,在出现首波头极性检测错误时,利用本增强算法同样能实现正确选线。

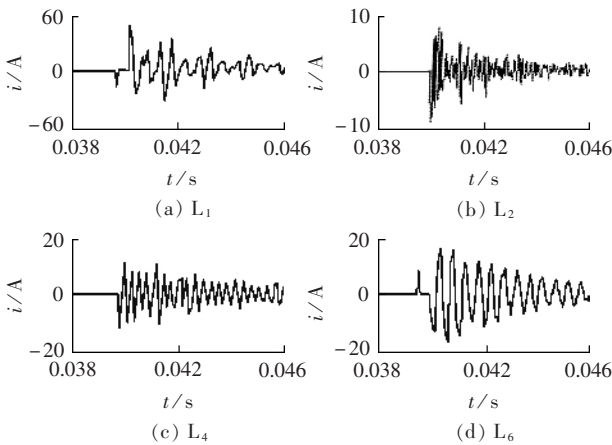


图 4 高频采样信号

Fig.4 Faster sampled signals

表 2 增强前、后的小波包信号处理结果

Tab.2 Signal processing results by wavelet packet before and after enhancement

线路	增强前		增强后	
	W_k/A^2	W_k/W_{Σ}	W_k/A^2	W_k/W_{Σ}
L ₁	1 571.700 0	0.52	2.643 4	0.59
L ₂	27.057 2	0.01	114.312 3	0.03
L ₃	87.892 8	0.03	167.598 5	0.04
L ₄	252.322 2	0.08	301.533 6	0.07
L ₅	317.921 4	0.10	335.620 5	0.07
L ₆	787.333 8	0.26	919.955 5	0.21

4 结论

基于小波包分析的小电流接地系统故障选线的研究越来越引起人们的重视,针对分析小波包选线方法存在的问题,提出了基于小波包分析的故障选线新方法。首先,对采样的零序电流信号进行增强处理,然后再利用小波包分析方法进行故障选线。设计出了基于该方法的故障选线装置的硬件结构和软件流程。试验结果表明,该方法有效地提高了故障选线的准确性。

参考文献:

[1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
[2] 曾祥君,尹项根,张哲,等. 零序导纳法馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):5-10.
ZENG Xiang-jun,YIN Xiang-gen,ZHANG Zhe,et al. Study on feeders grounding fault protection based on zero sequence admittance[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(4):5-10.

- [3] 牟龙华. 零序电流有功分量方向接地选线保护原理[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 60-62.
MU Long-hua. Principle of selective grounding fault protection based on active component direction of zero sequence current [J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 60-62.
- [4] 齐郑, 杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 1-5.
QI Zheng, YANG Yi-han. Analysis of technology of fault line selection for single phase to earth faults in neutral point non-effectively grounded system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 1-5.
- [5] 薛永端, 徐丙垠, 冯祖仁, 等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56.
XUE Yong-duan, XU Bing-yin, FENG Zu-ren, et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non-solid earthed network [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-56.
- [6] 贾清泉, 刘连光, 杨以涵, 等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 78-82.
JIA Qing-quan, LIU Lian-guang, YANG Yi-han, et al. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 78-82.
- [7] 邢亚辉, 王海军, 吕艳萍. 基于线路零序频率特性的小电流接地系统故障选线[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 59-62.
XING Ya-hui, WANG Hai-jun, LÜ Yan-ping. Faulty line selection in non-solid earthed network based on zero sequence characteristic of transmission lines [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 59-62.
- [8] 王耀南, 霍百林, 王辉, 等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 54-58.
WANG Yao-nan, HUO Bai-lin, WANG Hui, et al. A new criterion for earth fault line selection based on wavelet packets in small current neutral grounding system [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-58.
- [9] 戴剑锋, 张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44-47.
DAI Jian-feng, ZHANG Yan-xia. Study on adaptively choosing fault line under single phase to ground fault based on analysis of multi-frequency bands [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 44-47.
- [10] 庞清乐, 孙同景, 穆健, 等. 基于神经网络的中性点经消弧线圈接地系统故障选线方法[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 78-81.
PANG Qing-le, SUN Tong-jing, MU Jian, et al. Neural network based faulty line detection method for power system with neutral grounding via arc suppression coil [J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 78-81.
- [11] 房鑫炎, 郁惟镛, 庄伟. 模糊神经网络在小电流接地系统选线中的应用[J]. 电网技术, 2002, 26(5): 15-19.
FANG Xin-yan, YU Wei-yong, ZHUANG Wei. Application of fuzzy networks to grounded line detection in neutral point indirectly grounded power system [J]. Power System Technology, 2002, 26(5): 15-19.
- [12] 陈炯聪, 齐郑, 杨奇逊. 基于模糊理论的小电流单相接地选线装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 88-91.
CHEN Jiong-cong, QI Zheng, YANG Qi-xun. A fault line detection device for non-solidly grounded system based on fuzzy sets theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 88-91.
- [13] 齐郑, 艾欣, 王炳革, 等. 基于粗糙集理论的小电流接地系统故障选线方法的有效域[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 43-46.
QI Zheng, AI Xin, WANG Bing-ge, et al. Effective domain of faulty line detection in small current grounding system based on rough set theory [J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 43-46.
- [14] 贾清泉, 杨以涵, 杨奇逊. 应用证据理论实现配电网单相接地故障选线保护[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 35-44.
JIA Qing-quan, YANG Yi-han, YANG Qi-xun. Application of DS evidence theory to single phase to ground fault line detection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 35-44.
- [15] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 暂态信号发生器[J]. 继电器, 1997, 25(5): 38-40, 45.
DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al. Transient signal generator [J]. Relay, 1997, 25(5): 38-40, 45.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

庞清乐 (1971-), 男, 山东聊城人, 博士研究生, 研究方向为计算机先进控制及其在配电网保护中的应用 (E-mail: stefam@163.com);

孙同景 (1948-), 男, 山东菏泽人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为计算机先进控制与系统。

Faulty line detection based on wavelet packet analysis for distribution network

PANG Qing-le^{1,2}, SUN Tong-jing¹, SUN Bo¹, ZHONG Mai-ying¹

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. College of Computer Science, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract: A novel faulty line detection method based on wavelet packet analysis for distribution network is proposed to avoid improper detection caused by energy decay of zero sequence current signals at low sampling rate. When a single-phase-to-earth fault takes place, the zero sequence current signals are sampled with both higher and lower sampling rate. The maximum amplitude and polarity of faster sampled zero sequence current signals and the maximum amplitude of lower sampled zero sequence current signals are calculated, based on which the lower sampled zero sequence current signals are enhanced. Then the enhanced signals are decomposed by wavelet package transform and the faulty line can thus be detected according to maximum energy principle. A device to detect grounding feeder is developed based on the method mentioned above. Its hardware structure and software flowchart are given. Simulation tests are carried out for the severe energy decay and false polarity detection of sampled zero sequence current signals. Results indicate that the method effectively raises the accuracy of faulty line detection for power system with small grounding current.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China (60374021).

Key words: power system; distribution network; wavelet packet transform; faulty line detection