文章编号:1008-1542(2021)03-0257-08

基于小波包分解的剩余电流接地故障选线方法

李秉宇[1],杜旭浩[1],苗俊杰[1],王浩彬[2],马延强[2],李　争[3]

(1.国网河北省电力公司电力科学研究院,河北石家庄　050021;2.河北创科电子科技有限公司,河北邯郸　056000;3.河北科技大学电气工程学院,河北石家庄　050018)

摘　要:为解决电网发生单相接地故障后,无法对故障线路精确辨识的问题,提出了一种基于小波包分解的剩余电流接地故障智能感知方法。依据小波分析法和智能感知原理,针对接地故障产生的剩余电流进行故障信息采集,将收集到的剩余电流信息进行分析对比,以感知接地故障并进行故障识别;通过研究交流电源剩余电流在线式监测和基于小波变换方法的弧光接地故障诊断技术,利用小波包分解得到电流时频特性进行故障选线;分析故障线路和正常线路中电流特性的差异,并精确辨识出故障点;在仿真软件中对所提出的小波包分解基础上的故障线路选线方法进行了仿真。仿真结果表明,该方法能精确提取时频信息,有效确定故障线路。研究结果为站用交流电源接地故障选线方法提供了参考。

关键词:电能;剩余电流;小波分析法;接地故障;智能感知;故障选线

中图分类号:TM773　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.7535/hbkd.2021yx03007

Residual current grounding fault intelligent sensing technology based on wavelet packet decomposition

LI Bingyu[1], DU Xuhao[1], MIAO Junjie[1], WANG Haobin[2], MA Yanqiang[2], LI Zheng[3]

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 2. Hebei Chuangke Electronic Technology Company Limited, Handan, Hebei 056000, China; 3. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to solve the problem that the fault line cannot be accurately identified after single-phase grounding fault occurs in power grid, an intelligent sensing method of residual current grounding fault based on wavelet packet decomposition was proposed. Based on wavelet analysis and intelligent sensing principle, the residual current generated by grounding fault was collected, and the collected residual current information was analyzed and compared to sense the grounding fault and identify the fault. By researching on-line monitoring of residual current of AC power supply and arc grounding fault diagnosis tech-

收稿日期:2021-03-19;修回日期:2021-04-16;责任编辑:冯　民

基金项目:河北省自然科学基金(E2018208155);国网河北省电力有限公司科技项目(KJ2020-069)

第一作者简介:李秉宇(1981—),男,河北石家庄人,正高级工程师,硕士,主要从事交直流电源与储能方面的研究。

E-mail: bingyu5752@163.com

李秉宇,杜旭浩,苗俊杰,等.基于小波包分解的剩余电流接地故障选线方法[J].河北科技大学学报,2021,42(3):257-264.

LI Bingyu, DU Xuhao, MIAO Junjie, et al.Residual current grounding fault intelligent sensing technology based on wavelet packet decomposition[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2021,42(3):257-264.

nology which is based on wavelet transform, the time-frequency characteristics of current obtained by wavelet packet decomposition were used for fault line selection; the fault line selection method based on the proposed wavelet packet decomposition was simulated. The results show that the time-frequency information can be extracted accurately and the fault line can be determined effectively by using the method, and the fault line can be accurately identified with the difference of current characteristics between fault line and normal line. The research result provides a reference for the design of intelligent sensing system of AC power grounding fault.

Keywords: electric energy; residual current; wavelet analysis; ground fault; intelligent perception; fault line selection

变电站的交流电源依靠稳定的站用交流电源系统,由变压器、交流供电网、变压器电源等部分组成的站用交流电源系统对变电站的稳定运行有重要意义。变电站配电系统中一些装置需要直流电源系统,如变电站的保护回路、控制回路、事故照明回路、信号回路等,这些系统的安全可靠可为变电站的稳定运行提供保障[1]。安装过程中的不恰当操作、外力破坏导致的机械损伤、过电压或过电流、绝缘老化等许多因素都会导致电网电缆线在运行中出现故障[2]。随着中国智能电网的发展,SF6气体绝缘在智能变电站全封闭中的使用越来越普遍,使得系统中电容电流增加,由此导致单相接地引发的弧光风险随之增加[3]。因此,对弧光接地故障的建模分析、检测已逐渐成为业内学者关注的热点、难点问题[4-5]。

小波分析法是现代信号分析中普遍应用的一种分析方法,小波分析法基于傅里叶变换理论,又克服了傅里叶变换理论中存在的一些缺陷,比如精度较低等问题,使其可以获取信号频域内的频率分布状态[6-10]。对已有文献进行分析可知,故障发生时,小波分析法可以获取故障电流中的故障特征,还可提取故障电流的高频分量[11-12]。此外,电网发生故障时,线路中电流流向不再一致,线路故障段与非故障段的两端电流流向相反,零序电流流向也存在相同特征[13-14],为故障线路辨别与诊断结果分析提供了研究依据。

1 剩余电流在线监测方法

剩余电流的大小是供电线路中所有带电部分瞬时电流代数和的有效值,因绝缘不良或老化所引起的电流损失被称为漏电流,即在数值上剩余电流可包含漏电电流以及其他的谐波干扰成分[15]。检测剩余电流的传统方法主要有3种,分别是霍尔电流传感器法、电磁式电流互感器法、磁调制式电流互感器法[16]。

1.1 剩余电流信号处理

剩余电流检测原理如图1所示,图中IL1,IL2,IL3为线电流,IL4为中性线电流。依据基尔霍夫定律可得出:剩余电流检测元件中穿过的三相四线制主电路的电流有效值,其相量之和应等于对地剩余电流[17-18]。在正常运行情况下,剩余电流互感器的三相相电流的矢量和与IL4中性线中流过的电流大小相等,方向相反,可以相互抵消为零。如果在线路发生相间金属性短路时,因金属性短路而产生的电弧性短路电流就成了剩余电流检测的一个盲区,所以故障感知系统不能准确检测到接地故障。

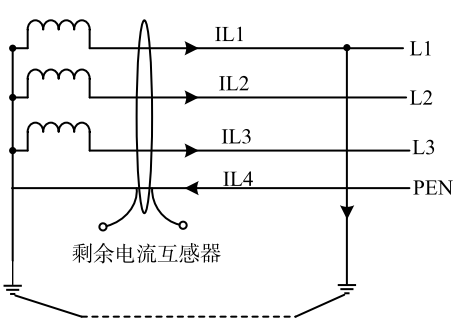


图1 剩余电流检测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of residual current detection

根据国际电工委员会的相关研究,当线路故障点散热环境不佳或者电线绝缘层损坏时,只要其线路的剩余电流值处于280～520 mA的区间内,所产生的电弧就能将局部温度推至2 000 ℃以上,足够引燃与其相邻的物体,从而造成安全隐患[19]。

1.2 站用交流电源接地故障智能感知技术

本文提出的站用交流电源剩余电流在线检测方法是采用基于小波分析的弧光接地故障诊断技术,形成站用交流电源接地故障选线方法。如图2所示,在站用交流电源系统中,在TN-S接线方式下,通过同时卡接电缆的A,B,C,N相进行剩余电流的检测,通过剩余电流测试值判断电缆运行状况,并避免N线重复接地及双回线共用零线的干扰。

而长电缆的首尾两端由于剩余电流采集距离较远(150 m以上),难以由1个装置完成两端电流采集,因而需要开发特定就地电流采集装置,如图3所示,通过远距离传输到相应的主机,对2个从机的数据进行计

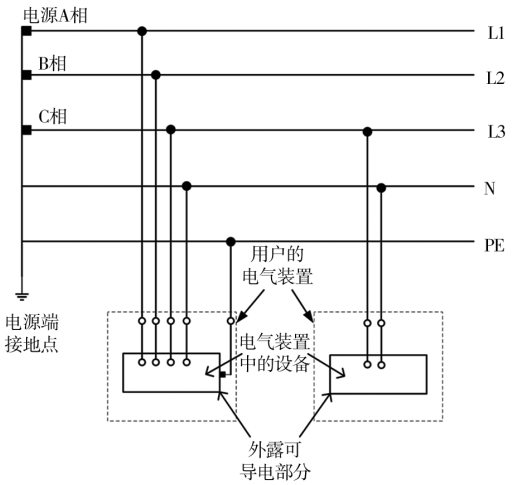


图 2　常用剩余电流检测方法

Fig. 2　Common residual current detection method

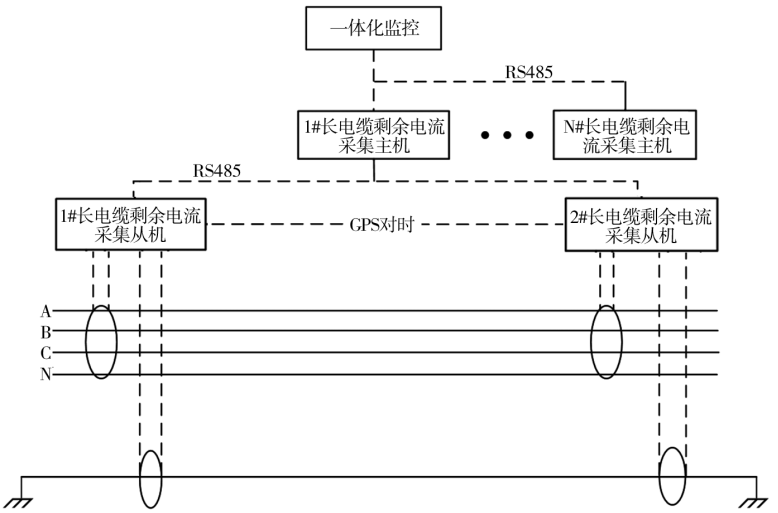


图 3　长电缆剩余电流采集

Fig. 3　Long cable residual current collection

算和整合,获取单电缆的剩余电流数据,进而将数据上传到剩余电流一体化主机。

本文主要目标是对弧光接地故障产生的剩余电流信号分析研究,针对剩余电流信号的复杂性,进一步使用小波包分解算法对采集到的剩余电流进行分析处理,并对剩余电流的时频特点展开特性分析,从而形成站用交流电源接地故障智能选线方法。

2　小波变换理论

2.1　小波选线法

小波分析法的基本思想是:设分析对象 $\psi(t)$ 在实数域上是平方的函数,且在实数域上可积,经傅里叶变换之后表示为

$$C_\psi=\int_R\frac{|\psi(\omega)|}{|\omega|}\mathrm{d}\omega<\infty, \tag{1}$$

即该函数是一个基本小波函数,将该函数进行变换,即缩小 a 倍,平移 b 个单位,如式(2)所示[20],最终得到一组小波基函数簇的二维基底。用该组基底去表示或逼近某一信号,记选取的母小波函数为 $\psi(t)$,定义伸缩因子 c 和平移因子 d,则生成的小波函数簇 $\psi_{c,d}(t)$ 为[21]

$$\psi_{c,d}(t)=c^{-1/2}\,\psi(\frac{t-d}{c}), \tag{2}$$

其中 $c,d\in R,c\neq 0$。对伸缩因子 c 和平移因子 d 进行离散化,取 $c=c_0^m$,$d=nc_0^m d_0$,(c_0,d_0 均为大于 0 的实数,$m,n\in Z$),生成的小波函数簇 $\psi_{m,n}(t)$ 为

$$\psi_{m,n}(t)=\frac{1}{\sqrt{c_0^m}}\psi(\frac{t-nc_0^m d_0}{c_0^m}), \tag{3}$$

其中 $m,n\in Z$。在后面表示的函数中,$x(t)$ 可以是任意的,并且对 $x(t)$ 在实数域平方可积空间 $L^2(R)$ 上进行积分变换,就可以得到式(4)和式(5)[22]:

$$\mathrm{CWT}_x(c,d)=\frac{1}{\sqrt{c}}\int_{-\infty}^{\infty}x(t)\psi(\frac{t-d}{c})\mathrm{d}t\ , \tag{4}$$

$$\mathrm{DWT}_x(m,n)=\frac{1}{\sqrt{c_0^m}}\sum_n x(n)\psi(\frac{t-nc_0^m d_0}{c_0^m})\ 。 \tag{5}$$

2.2　小波包分解

虽采用一般小波变换方法有很多优势,如对收集到的电流和电压信号可实施精确的时域和频域拆分,但是也存在明显的缺陷。在拆分较高频的过程中发现,频域不能很好地体现出其分辨率的特点,因为尺度函数是按照二进制变化的,只能采用等间隔的方式对指数进行划分,因此本文选择了小波包分解这种算法进行优

化。小波包分解算法能够更精细地去分析信号，得到分解后的信号，可以充分考虑信号的时频特性，在已知特征量的情况下选择符合要求的频域，对得到的频域信息进行对比，最终达到增大时域和频域分辨率的目的。

如图4所示，小波包分解关系可表示为

$$F = D_1D_2 + D_1A_2 + A_1A_2 + A_1D_2。 \tag{6}$$

对小波包空间有如下定义[23]：

U_j^n 为函数 $u_n(x)$ 的闭包空间，而 U_j^{2n} 为函数 $u_{2n}(x)$ 的闭包空间，并且 $u_n(x)$ 满足的双尺度方程如式(7)所示。

$$\begin{cases} u_{2n}(x) = \sum_{k\in Z} h_k u_n(2x-k), \\ u_{2n+1}(x) = \sum_{k\in Z} g_k u_n(2x-k), \end{cases} \tag{7}$$

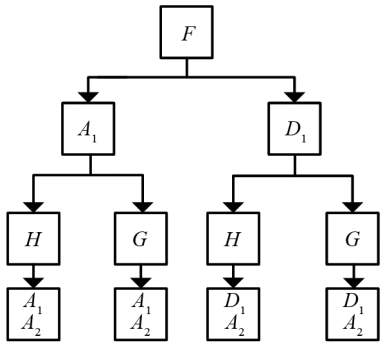


图4 小波包分解原理图

Fig. 4 Schematic diagram of wavelet packet decomposition

式中：$h(k) = \langle \psi(t), \psi_{j-1,k}(t) \rangle$，$g_k = (-1)^k h_{1-k}$。当 $n=0$ 时，由式(7)可得：

$$\begin{cases} u_0(x) = \sum_{k\in Z} h_k u_0(2x-k), \quad \{h_k\} \in l^2, \\ u_1(x) = \sum_{k\in Z} g_k u_0(2x-k), \quad \{g_k\} \in l^2。 \end{cases} \tag{8}$$

根据式(8)可以求得

$$U_{j+1}^n = U_j^{2n} \oplus U_j^{2n+1}, \tag{9}$$

其中基函数 $\varphi(x)$ 确定的小波包为 $\{u_n(x)\}$，是根据式(7)和式(8)联立得出的。由此得到的分解算法如式(10)所示。

$$\begin{cases} d_l^{i,2n} = \sum_k h_{k-2l} d_k^{i+1,n}, \\ d_l^{i,2n+1} = \sum_k g_{k-2l} d_k^{i+1,n}。 \end{cases} \tag{10}$$

最终得到小波包分解的重构算法如式(11)所示：

$$d_l^{i+1,n} = \sum_k (h_{l-2k} d_k^{i,2n} + g_{l-2k} d_k^{i,2n+2}) 。 \tag{11}$$

3 仿真分析

3.1 仿真模型建立

系统单相接地故障模型如图5所示，依据本文推导得出的算法公式进行验证，各线路主要参数为 $R_1 = 0.013\ 73\ \Omega/\text{km}$，$L_1 = 0.943\ 7\ \text{mH/km}$，$C_1 = 12.75\ \text{nF/km}$，$R_0 = 0.376\ 4\ \Omega/\text{km}$，$L_0 = 4.156\ 4\ \text{mH/km}$，$C_0 = 7.753\ \text{nF/km}$。3条线路长度分别为300，400和500 m。

3.2 故障选线分析

获取3条线路剩余电流的时频信号后，通过小波包分解算法进行编程实验，选取Daubechies4小波，分解尺度为4。该小波具有良好的特征，在削弱时域特性的同时，可以提高频域特性，同时能够提高小波的正则性。

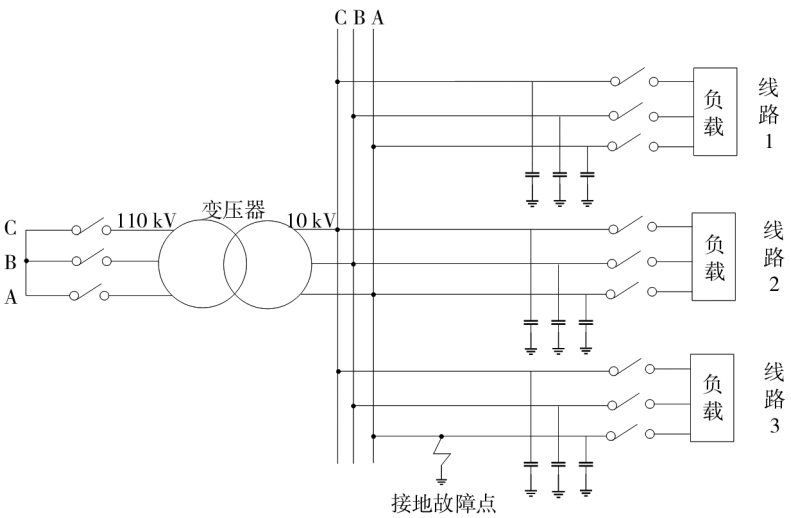


图5 模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the model

在 0.05 s 时，线路 3 发生 A 相接地故障，可以得到图 6 所示的线路 3 的三相电流波形图。从图 6 可以看出，故障发生后，A 相电流幅值比其他两相电流幅值要高出很多，0.1 s 故障消失后，三相电流经过快速的调整后恢复正常。

3 条线路零序电流波形如图 7 所示。从图 7 可以看出，在 0.05 s 之前，3 条线路均正常，各线路零序电流都为零，线路处于正常工作状态。当 0.05 s 时，线路 3 突然产生 A 相弧光接地故障，且非正常线路波形的幅值要高出正常线路波形的幅值，2 条正常线路波形的幅值之和等于非正常线路波形的幅值大小。

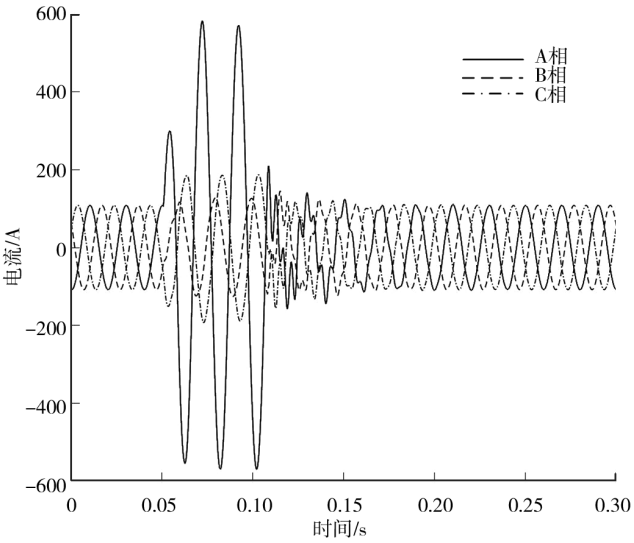


图 6　故障线路的三相电流

Fig. 6　Three-phase current of the fault line

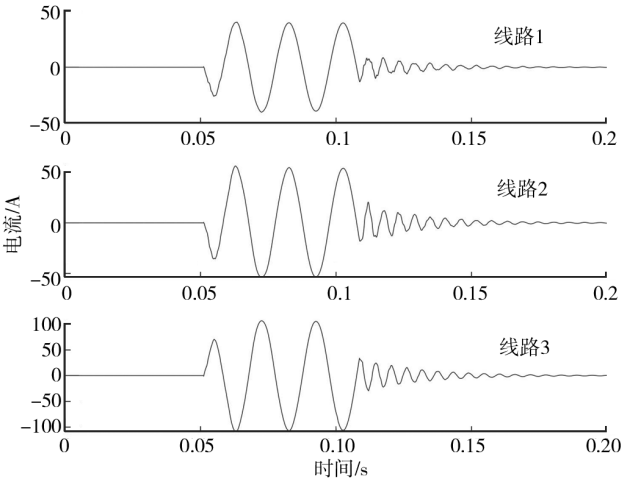
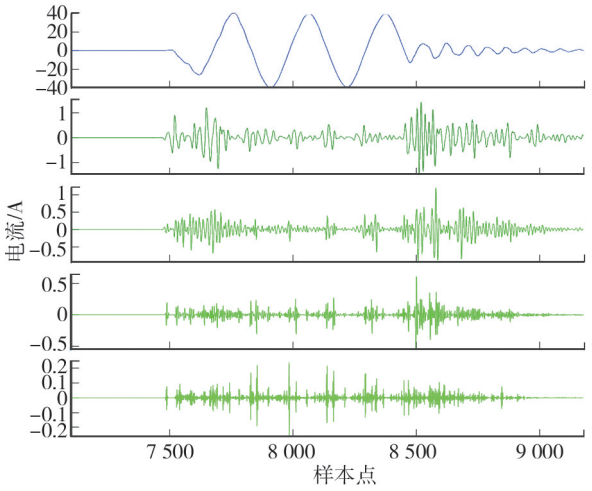


图 7　3 条线路零序电流

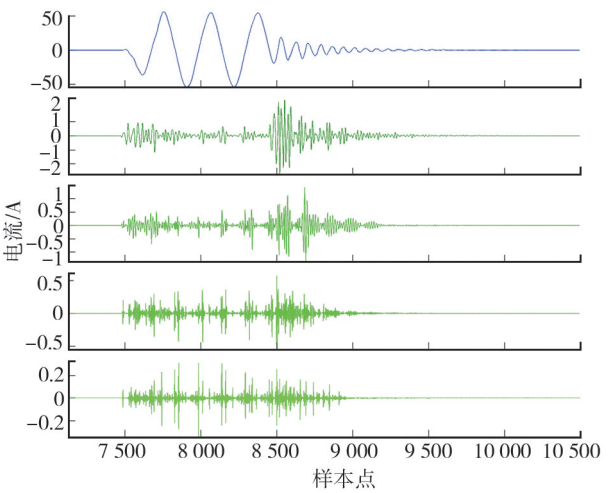
Fig. 7　Zero sequence current of three lines

利用小波包分解算法理论对获取到的零序电流波形进行分解处理，得到分解后 3 条线路的波形图，分解结果如图 8 所示。

由图 8 的小波包分解结果可以看出，发生故障后的线路 3 经过小波包分解后，得到的频域信号的方向与前 2 条正常线路方向相反，同时线路 3 发生故障后的幅值显著比正常线路 1 和线路 2 的幅值要高出很多。通过比较正常和非正常线路的相异之处，可以非常精准地辨识出故障线路所在，并且和之前预设的条件完全吻合。



a）线路1



b）线路2

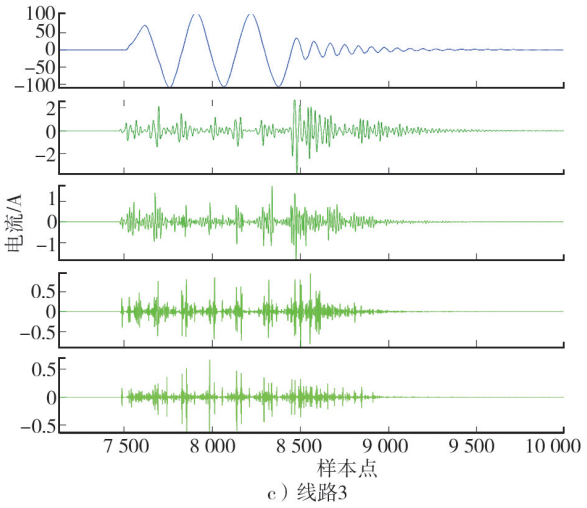


图 8 小波包分解零序电流图

Fig. 8 Zero-sequence current diagrams are decomposed by wavelet packets

通过对小波包分解后信号能量占比的计算，正常线路信号分解能量谱如图 9 a)所示，图 9 b)为故障线路信号的分解能量谱，图 9 中横坐标为分解信号的频率区间，纵坐标为每个频域分布的能量占比。通过对 2 图中信号能量占比的分析，可以看出 2 条线路的信号能量主要分布在第 1 个频率区间内，依据能量占比最高的方法确定频率区间 1 为特征频带所在的区间范围。

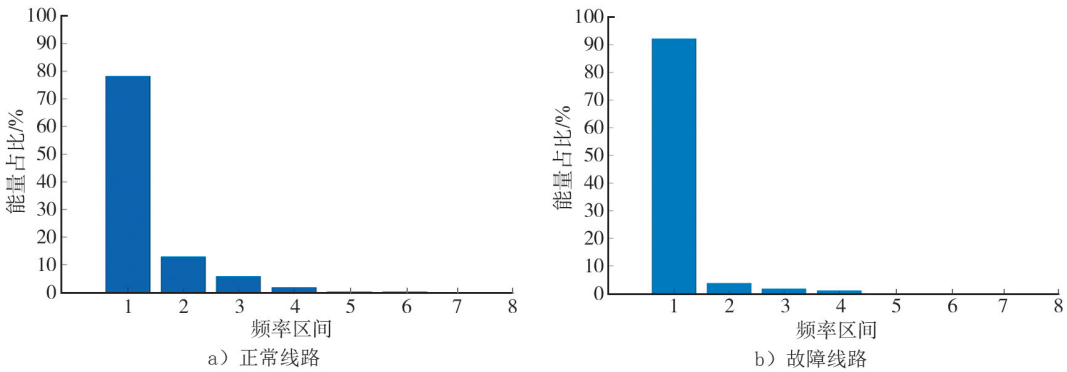


图 9 信号分解能量谱图

Fig. 9 Signal decomposition energy spectrum

对小波包分解后的零序电流信号进行重构，重构图如图 10 所示。

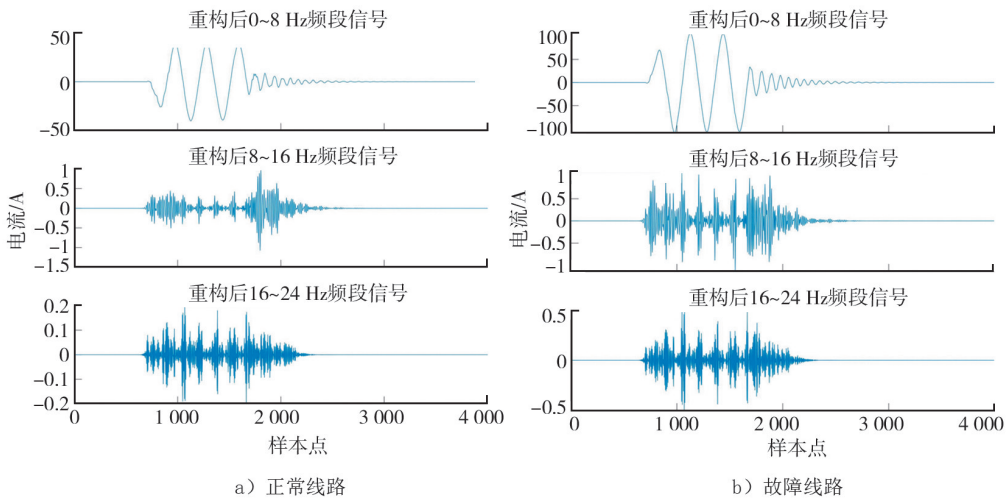


图 10 重构信号对比图

Fig. 10 Reconstructed signal comparison chart

可以发现频率区间 0～8Hz 的频率范围内能够重构分解前零序电流信号的波形，说明在频率区间 1 范围内，即 0～8Hz 内信号能量占比最高，从而证明了图 9 中信号分解能量谱的正确性。依据模极大值理论，取模极大值点处的极性来判断故障线路，通过图 10 可以看出，图 10 a)模极大值处的极性为负，图 10 b)模极大值处的极性为正，因此通过重构后的波形可以得出图 10 b)为故障线路。

4　结　语

本文提出了一种基于小波包分解算法的剩余电流接地故障选线方法，该方法一方面克服了传统方法效率低、无法完成在线路首尾两端同时检测等缺点；另一方面依据小波包分解算法，对线路两端的剩余电流同时采集，并对采集到的剩余电流信号进行分解和重构；最后通过仿真对零序电流信号进行小波包分解，根据模极大值理论进行选线，并根据重构后的信号验证了小波包分解的正确性。本文所提出的方法能够同时处理多线路剩余电流数据，实现了多条线路接地故障一体化智能选线。本研究的局限性在于需要依赖剩余电流采集设备的精度，在信息传输过程中需要克服噪声干扰的影响，同时在如何选择高维小波基方面，有待进一步研究。

参考文献/References：

[1] 刘渝根，陈超，杨蕊菁，等.基于小波相对熵的变电站直流系统接地故障定位方法[J].高压电器，2020，56(1)：169-174.
LIU Yugen，CHEN Chao，YANG Ruijing，et al.Location method of ground fault in DC system of substation based on wavelet relative entropy[J].High Voltage Apparatus，2020，56(1)：169-174.

[2] 赵传宗，王中杰，穆景龙，等.基于小波变换和遗传算法的小电流接地故障定位技术研究[J].工业安全与环保，2019，45(1)：62-65.
ZHAO Chuanzong，WANG Zhongjie，MU Jinglong，et al.Research on single phase-earth fault location in distribution network based on wavelet and genetic algorithm[J].Industrial Safety and Environmental Protection，2019，45(1)：62-65.

[3] 刘科研，盛万兴，董伟杰.配电网弧光接地故障建模仿真与实验研究综述[J].高电压技术，2021，47(1)：12-22.
LIU Keyan，SHENG Wanxing，DONG Weijie.Overview of modeling simulation and experimental research on arc grounding fault in distribution network[J].High Voltage Engineering，2021，47(1)：12-22.

[4] 王宾，崔鑫.中性点经消弧线圈接地配电网弧光高阻接地故障非线性建模及故障解析分析[J/OL].中国电机工程学报.[2021-02-07].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20200820.1147.004.html.
WANG Bin，CUI Xin.Nonlinear modeling and fault analysis of arc-light high-resistance grounding faults in distribution networks grounded by arc suppression coils[J/OL].Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering.[2021-02-07].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20200820.1147.004.html.

[5] WANG B，GENG J Z，DONG X Z.High-impedance fault detection based on nonlinear voltage-current characteristic profile identification [J].IEEE Transactions on Smart Grid，2018，9(4)：3783-3791.

[6] 王鹏，冯光，韦延方，等.10 kV 配电网的接地故障测试述评及真型实验场设计[J].电力系统保护与控制，2020，48(11)：178-187.
WANG Peng，FENG Guang，WEI Yanfang，et al.Review of grounding fault testing and design of real experiment field for 10 kV distribution network[J].Power System Protection and Control，2020，48(11)：178-187.

[7] 向国杰，曾祥君，喻锟，等.基于相位差的不对称配电网接地故障选相方法[J].电测与仪表，2020，57(22)：70-76.
XIANG Guojie，ZENG Xiangjun，YU Kun，et al.Phase selection method for grounding faults of asymmetric distribution network based on phase difference[J].Electrical Measurement & Instrumentation，2020，57(22)：70-76.

[8] YU J J Q，HOU Y H，LAM A Y S，et al.Intelligent fault detection scheme for microgrids with wavelet-based deep neural networks [J].IEEE Transactions on Smart Grid，2019，10(2)：1694-1703.

[9] SABUG L Jr，MUSA A Jr，COSTA F Jr，et al.Real-time boundary wavelet transform-based DC fault protection system for MTDC grids [J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2020，115：105475.

[10] 苏继锋.配电网中性点接地方式研究[J].电力系统保护与控制，2013，41(8)：141-148.
SU Jifeng.Research of neutral grounding modes in power distribution network[J].Power System Protection and Control，2013，41(8)：141-148.

[11] 高杰，谷雨，潘祎希，等.基于经验小波变换和高频分量的微电网保护方法[J].电力系统保护与控制，2020，48(19)：50-56.
GAO Jie，GU Yu，PAN Yixi，et al.A microgrid protection method based on an empirical wavelet transform and a high frequency component[J].Power System Protection and Control，2020，48(19)：50-56.

[12] GARCÍA-GRACIA M，MONTAÑÉS A，EL HALABI N，et al.High resistive zero-crossing instant faults detection and location scheme based on wavelet analysis[J].Electric Power Systems Research，2012，92：138-144.

[13] COSTA F B.Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy[J].IEEE Transactions on

Power Delivery,2014,29(1):140-153.
[14] 吴志强,王德坤,赵海龙,等.遏制电气火灾多发的阻性漏电检测技术分析[J].消防科学与技术,2020,39(7):991-993.
WU Zhiqiang,WANG Dekun,ZHAO Hailong,et al.Analysis of resistance leakage detection technology to prevent frequent electrical fires [J].Fire Science and Technology,2020,39(7):991-993.
[15] 陈作开,许志红.基于磁调制式电流互感器的剩余电流检测[J].供用电,2019,36(12):22-28.
CHEN Zuokai, XU Zhihong. Residual current detection based on magnetic modulation current transformer [J]. Distribution & Utilization,2019,36(12):22-28.
[16] 高园.高层建筑电气火灾监控系统[J].现代建筑电气,2017,8(3):60-64.
GAO Yuan.Electrical fire monitoring system in high-rise building[J].Modern Architecture Electric,2017,8(3):60-64.
[17] 李传东,李海波.剩余电流动作保护装置的正确接线分析[J].电世界,2018,59(10):40-43.
[18] 周晨.剩余电流在线监测平台的研究[D].南京:南京师范大学,2016.
ZHOU Chen.Research on Residual Current Online Monitoring Platform[D].Nanjing:Nanjing Normal University,2016.
[19] 袁燕岭,周灏,董杰,等.高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J].高电压技术,2015,41(4):1194-1203.
YUAN Yanling,ZHOU Hao,DONG Jie,et al.Sheath current in HV cable systems and its on-line monitoring for cable fault diagnosis [J].High Voltage Engineering,2015,41(4):1194-1203.
[20] 王福忠,刘倩,王要东,等.基于小波理论和故障暂态信号的小电流接地故障选线策略[J].河南理工大学学报(自然科学版),2017,36(2):105-110.
WANG Fuzhong,LIU Qian,WANG Yaodong,et al.Small current grounding fault line selection strategy based on wavelet theory and fault transient signal[J].Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science),2017,36(2):105-110.
[21] 阙波,陈蕾,邵学俭.一种配电网单相接地故障判断新方法及其应用[J].高压电器,2017,53(6):191-196.
QUE Bo,CHEN Lei,SHAO Xuejian.Novel detection method and its application for single phase grounding fault in distribution network [J].High Voltage Apparatus,2017,53(6):191-196.
[22] 高正中,张政,龚群英.基于小波变换的配电网单相接地故障仿真研究[J].现代电子技术,2016,39(20):142-145.
GAO Zhengzhong,ZHANG Zheng,GONG Qunying.Study on wavelet transform based simulation of single-phase grounding fault in power distribution network[J].Modern Electronics Technique,2016,39(20):142-145.
[23] 杨申.配电线路故障辨识与诊断方法研究[D].贵阳:贵州大学,2018.
YANG Shen.Research on Fault Identification and Diagnosis of Distribution Lines[D].Guiyang:Guizhou University,2018.

向本期载文的审稿专家致谢

本期《河北科技大学学报》共发表论文14篇。这些论文的发表是与有关专家的认真审读、细查资料、推敲分析、中肯评价分不开的。对此,本编辑部特向这些专家表示敬意,对他们的辛勤劳动表示感谢。

本期载文的审稿专家名单如下(按姓名的汉语拼音顺序排列):

曹建春 柴争义 丛 茜 戴 林 邓金花 贺志荣
姜保军 李国禄 李天平 李永忠 刘庆锁 倪有源
沈 伟 苏 勇 汤志松 王震洲 武文俊 向军淮
杨金显 张炳烛 张 宁 张 兴 张 毅 赵国英
赵朋成 赵中英 朱兴一

(本刊编辑部)