第35卷 第1期
2007年1月1日

继电器
RELAY

Vol.35 No.1
Jan.1, 2007

基于暂态高频零序瞬时功率的配电网故障选线方法

康忠健，于伟

（中国石油大学（华东）电气工程系，山东 东营 257061）

摘要：在配电网故障特征的基础上，利用小波包分析技术提出了一种基于暂态高频零序瞬时功率的配电网故障选线新判据，解决了小波应用中频带选取困难的问题。该判据以幅值最大高频暂态瞬时功率的符号作为主判据，以大小作为副判据。仿真表明该选线方法对接地阻抗、故障距离、短线远端接地等故障均能准确判断，且不受中性点接地方式、故障接地时刻等因素的影响，具有良好的通用性。

关键词：配电网；故障选线；小波包分析；暂态高频零序瞬时功率

Method of distributed power system fault line selection based on transient high frequency instantaneous zero-sequence power

KANG Zhong-jian, YU Wei

(Electric Engineering Department, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: According to distributed power system fault characteristic, a new criteria based on the transient high frequency instantaneous zero-sequence power is put forward to distinguish the fault line in this paper with multi-resolution analysis of wavelet and the difficulty of frequency zone selection in wavelet application is overcome. The sign of the maxim high frequency instantaneous power is the first criteria and the value of the power is the second criteria in the new criteria. The simulation suggests that the new criteria could distinguish correctly the fault line under various grounding impedance and fault distance, whose performance is independent on the grounding model of centric dot and fault occurring time, and the new criteria has a excellent adaptability to various fault conditions.

Key words: distributed power system; fault line selection; multi-resolution analysis of wavelet; transient high frequency instantaneous zero-sequence power

中图分类号： TM77　　文献标识码： A　　文章编号： 1003-4897(2007)01-0021-05

0 引言

我国的配电网多采取中性点不接地（NUS）、中性点经高阻接地（NRS）或中性点经消弧线圈接地（NES）方式，统称为小电流接地系统。由于小电流接地系统单相接地时故障电流为线路对地电容电流，数值非常小，这一小电流又叠加在数值较大的负荷电流上，很难准确检出；同时，现场电磁干扰相对很大，使得检测出的故障信号中信噪比非常低；而故障状况受电网参数、故障时刻等多种因素的影响，形式多变，造成了小电流接地电网选线的困难。现有的故障选线方法，大体分为基于稳态电气量法[1,2]和基于暂态电气量法[3~5]两类。对于小电流接地系统，故障线路的序电流较小，采用稳态电气量很难确定其幅值的定值，从而降低了选线的可靠性；对于中性点经消弧线圈接地的配电网系统，基频相位关系不再有效，通过比较各馈线故障信号中基波与母线零序 PT 测量电压对应分量的相位关系来选择故障线路可靠性仍得不到保证。

本文针对现有选线方法的不足，将小波包分析用于配电网故障选线中，提出了一种基于暂态高频零序瞬时功率的配电网故障选线新判据，以提高故障选线的可靠性与正确率。仿真表明该选线方法对接地阻抗、故障距离、短线远端接地等故障均能准确判断，且不受中性点接地方式、故障接地时刻等因素的影响，具有良好的通用性。

1 小波包分析理论简介

小波分析是一种用于分析暂态信号的优秀的时频分析工具，它能够把任何信号投影到一个由小波伸缩而成的基函数（即小波基）上，可以清晰地表示故障状态信号在某频段的时域特征，为故障选

线进行深层信息处理提供条件。设 $\varphi_{a,b}(t)=\varphi(\frac{t-b}{a})$ 为一小波基函数，则信号 $x(t)$的连续小波变换的定义为：

$$CWT(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)\overline{\varphi_{a,b}(t)}\mathrm{d}t$$

其离散表达式为：

$$DWT(a,b)=\frac{\Delta T}{\sqrt{a}}\sum_k x(k)\varphi(\frac{k-b}{a})$$

小波分解过程只分解信号的低频部分。小波包分析弥补了小波分析只分解信号低频部分而对高频部分不再进行分解这一不足，可以根据信号特性和要求在一定频域内任意选择分辨率。小波包是建立在小波变换的基础上的。其定义为：选择已知的正交尺度函数 $\varphi(x)$ 及对应的小波基（即共轭滤波器系数）$\{h_k\}$ 和 $\{g_k\}$，有双尺度方程如下：

$$\begin{cases}\varphi(x)=\sqrt{2}\sum_k h_k\varphi(2x-k)\\ \Psi(x)=\sqrt{2}\sum_k g_k\varphi(2x-k)\end{cases}$$

记 $\mu_0=\varphi(x)$，$\mu_1=\psi(x)$，则由下面的递推关系定义 μ_n。

$$\begin{cases}\mu_{2n}(x)=\sqrt{2}\sum_k h_k\mu_n(2x-k)\\ \mu_{2n+1}(x)=\sqrt{2}\sum_k g_k\mu_n(2x-k)\end{cases}$$

称函数族 $\{\mu_n(x)|n\in z^+\}$ 为对应于正交尺度 $\varphi(x)$的正交小波包。

2　配电网单相接地故障特征分析

一个简单的小电流接地系统模型如图 1 所示。

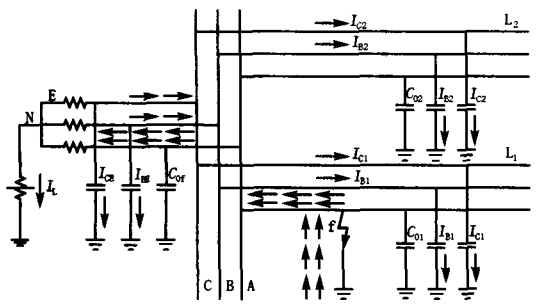

图 1 小电流接地系统单相接地故障示意图

Fig.1　Single-phase grounding fault on grounding fault system with ungrounded neutral

设线路 L_1 上发生 A 相单相接地故障，网内电容电流分布发生变化如图 1 中箭头所示。其零序等效网络图由各条线路的电阻、电感和对地电容等元件组成，如图 2 所示。

由图 2 可知，在非故障线路上的零序电流，其数值等于本身的对地电容电流，幅值较小，容性无功功率方向为从母线流向线路。对于中性点不接地系统（图 2 中不包含 I_L 支路），故障线路零序电流（即保护测量的零序电流）为系统所有非故障线路对地电容电流之和，数值较大，容性无功功率的方向为由故障线路流向母线；而对于中性点经消弧线圈接地系统（图 2 中包含 I_L 支路），由于补偿电流的存在，使得故障线路始端的零序电流中增加了一个感性电流分量，流经线路始端的总零序电流减小，且在过补偿方式下，基频零序电流将反向，使得故障线路始端的容性无功功率的方向改变，变为从母线流向线路。

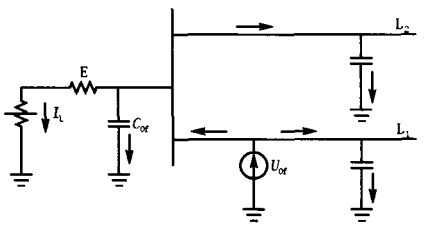

图 2 零序等效网络示意图

Fig.2　Zero-sequence equivalent network

当线路发生单相接地故障的瞬间，由于线路分布电感和分布电容的存在，会产生短暂的电容充放电电流。对于故障相，由于相电压突然降低，引起故障相对地电容放电且放电电流频率比较高；而非故障相由于相电压升高，会产生充电电流，充电电流主要由电源电感提供，故其充电电流频率较低。因此故障瞬间的暂态信号中含有多种频率成分，导致暂态量比稳态量大很多倍。

3　基于暂态高频零序瞬时功率的故障选线判据

从以上对配电网单相接地故障特征的分析可知，在接地瞬间，故障信号的暂态高频分量中含有丰富的故障信息，且暂态分量的幅值比稳态量要大得多。鉴于小波包分析可以进行高频段的多分辨分析，因此以小波包分析为工具，对暂态高频分量进行多尺度分解，通过比较故障线路与非故障线路的相关特征选择故障线路。

单相接地故障发生后的暂态过程中，对于非母线故障，故障线路高频瞬时功率与非故障线路高频

瞬时功率时刻反向，大小为所有非故障线路（包括变压器出线端）瞬时功率大小的和。据此给出如下故障选线主判据（式 1）与副判据（式 2）。

$$ZPJ_i = \max(|W_T P_i(k)|) \times \mathrm{sign}(W_T P_i(k_{\max})) \quad (1)$$

$$FPJ_i = \max(|W_T P_i(k)|) \quad (2)$$

其中：$i=1, 2, \cdots, L$ 为线路编号，L 为线路总条数；$k=1, 2, \cdots, N$ 为选线频带序列点编号，N 为总点数；$W_T P_i(k)$ 为第 i 条线路小波包分解后第 k 点瞬时功率；$k_{\max}$ 为幅值最大瞬时功率对应点位置。故障选线逻辑按如下步骤进行。

1) 取故障后母线零序电压与各线路零序电流第一周波数据，选择 db3 小波作为小波基，进行 $a=\mathrm{int}(\log_2 N)-1$ 层小波包分解至频带宽度为 100～200 Hz 之间，具体视采样频率而定，其中，N 为每周波的采样点数。

2) 去掉最低频（a，0）部分，重构所有高频频带母线零序电压系数，并计算各频带母线零序电压的能量，选择能量最大的频带作为选线频带。

3) 重构选线频带各线路零序电流，计算零序功率。

4) 求各条线路（包括变压器出线端）瞬时功率的代数和作为母线瞬时功率，对母线瞬时功率求平均取绝对值，如果结果大于设定值，则母线发生接地故障；否则计算主判据。

5) 计算主判据。如果只有一条线路异号，则该线路即为故障线路；否则计算副判据。

6) 计算副判据，选择暂态瞬时功率幅值最大的线路，该线路即为故障线路。

4　仿真分析

仿真模型为 Matlab/Simulink 环境下的一个 11 kV（母线）配电系统，如图 3 所示。仿真时间长度为 0.1 s，采样频率为 4 800 Hz，ode15s 方式。其中发电机电压为 63.5 kV，电阻为 0.724 Ω，电感为 0.019 2 H；变压器容量为 38×110 MVA，变比为 110/11，接法为 Δ/ Yn，原副边参数分别为：电压 110/11 kV，电阻 4.08/0.0337（p.u），电感 63.53/0.525（p.u）；消弧线圈电阻为 6.777 Ω，电感为 0.719 7 H，过补偿度为 10%；5 条线路的正序和零序参数均分别为：电阻 0.45/0.70 Ω/km，电感 1.1714e-3/3.9065e-3 H/km，对地电容 61e-9/ 38e-9 F/km，5 条线路长度分别为 18、20、10、16、6 km；各负载均为 0.64 +j0.48 MW，电压为 11 kV，为 Y 型不接地。

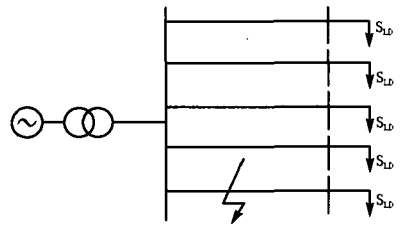

图 3　110 kV 配电网系统模型示意图

Fig.3　110 kV distribution system model

条件 1：中性点不接地，0.018 75 s 时线路 L_2 发生单相接地故障，接地阻抗为 5 kΩ 高阻接地，故障距离为 19 km/20 km 长线远端（相电压过零时长线远端发生高阻接地）；**条件 2**：中性点经消弧线圈接地系统，10%过补偿，0.026 8 s 时线路 L_5 发生单相接地故障，接地阻抗为 100 Ω，故障距离为 5.5 km/6 km；**条件 3**：中性点经消弧线圈接地，10%过补偿，0.007 5 s 时母线发生接地故障，接地阻抗为 100 Ω（为母线单相接地故障情况）。三种条件下仿真结果分别如图 4、5、6 所示。图中 Figure A 为母线消耗的瞬时零序功率，Figure B 为母线电压各频段的能量，Figure C 为各线路在母线零序电压能量最高频带内的重构信号，Figure D 为各线路在母线零序电压能量次最高频带内的重构信号。

从图 4~图 6 中可看出，当母线没有发生故障，母线消耗的瞬时功率即所有线路瞬时功率的代数和始终为零，当母线发生故障时，母线消耗的瞬时功率明显大于较大。以母线零序电压能量最高频带为选线频带进行信号重构的选线结果能正确地选出故障线路，以母线零序电压能量次最高频带为选线频带进行信号重构也能实现正确选线，只是瞬时功率幅值稍有减小。选择能量最大的频带做为选线频带是有效的。

条件 4：中性点经消弧线圈接地，10%过补偿方式，0.0187 5 s 时线路 L_2 发生单相接地故障，此时故障相电压为-0.582 kV，近似过零，接地阻抗为 5 kΩ，故障距离为 19 km/20 km，分别采用传统的零序稳态电流、零序低频暂态电流及本文提出的高频暂态瞬时功率为判据选择故障线路的仿真结果如图 7、图 8 和图 9 所示。

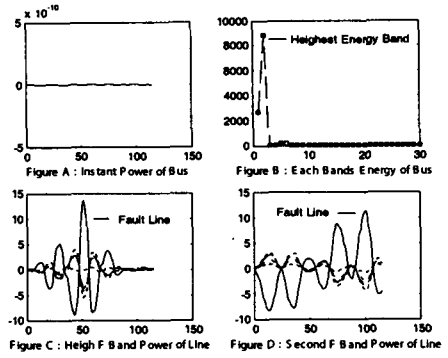

图 4　条件 1 仿真结果

Fig.4　Simulation result under condition one

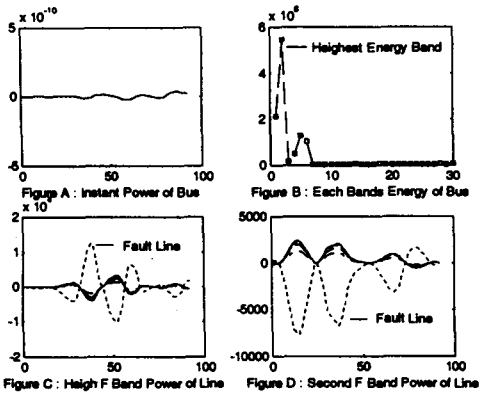

图 5　条件 2 仿真结果

Fig.5　Simulation result under condition two

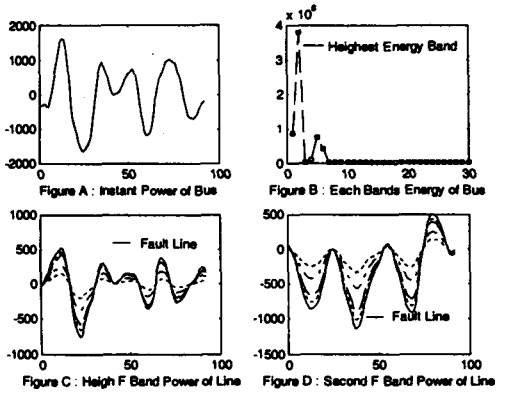

图 6　条件 3 仿真结果

Fig.6　Simulation result under condition three

由图 7～9 可以看出，在比较恶劣的情况下，传统基于零序电流幅值方向选线判据及基于小波分析的零序电流幅值方向选线判据均失效，而本文提出的基于高频暂态瞬时功率选线判据仍然能够准确选线。

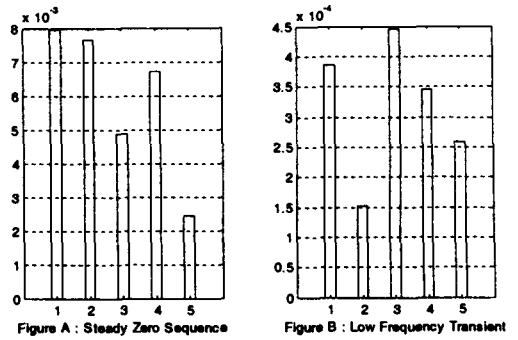

图 7 条件 4 仿真结果（1）　图 8　条件 4 仿真结果（2）

Fig.7 Simulation result I under condition four　Fig.8 Simulation result II under condition four

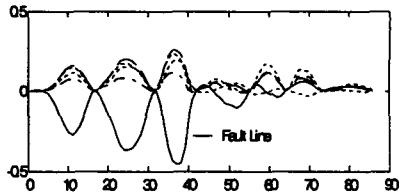

图 9　条件 4 仿真结果（3）

Fig.9 Simulation result III under condition four

5　结论

本文在分析配电网故障特征的基础上，提出了一种基于暂态高频零序瞬时功率的配电网故障选线新判据，以幅值最大高频暂态瞬时功率的符号作为主判据，以大小作为副判据，由此选出故障线路。该判据与现有故障选线判据相比有以下优点：①基于瞬时量，克服了以往选线方法中因为求幅值或能量引起的暂态信号故障信息的弱化导致选线失败或结果不可靠的问题，提高了选线的准确率。②基于高频暂态量，使得该选线判据不受中性点接地方式的影响，且暂态量幅值较大，便于检测；减小了计算误差，增强了选线的可靠性。③以零序功率作为比较对象，克服了当故障相过零时发生接地故障造成的零序电流过小导致选线结果不可靠的问题。

参考文献

[1]　马珂，张保会. 中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望[J]. 继电器, 2003, 31(5): 65-70.
MA Ke , ZHANG Bao-hui. Development and Prospect of the Single-phase Grounding Fault Detection in Unearthed or

Compensated Neutral Networks[J].Relay,2003,31(5):65-70.

[2] 曾祥君，尹项根，张哲，等. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究[J]. 中国电机工程学报，2001，21(6):84-89
ZENG Xiang-jun，YIN Xiang-gen，ZHANG Zhe，et al. Study for Negative Sequence Current Distributing and Ground Fault Protection in Middle Voltage Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6):84-89.

[3] 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 Detetion With Wavelet for Small Current Fault Relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 78-82.

[4] 王娜，周有庆，龚静. 小波变换在配电网单相接地故障选线中的应用[J]. 电力自动化设备，2003，23(10): 27-30.
WANG Na, ZHOU You-qing, GONG Jing. Application of Wavelet Transform to Phase-to-ground Fault Detection in Distribution System[J]. Electric Power Automation Equipment,2003, 23(10): 27-30.

[5] 毛鹏，孙雅明，张兆宁，等. 小波包在配电网单相接地故障选线中的应用[J]. 电网技术，2000，24(6): 9-13.
MAO Peng, SUN Ya-ming, ZHANG Zhao-ning, et al. Wavelet Packet Based Detection of Phase-to-Ground Fault in Distribution Automation System[J]. Power System Technology,2000, 24(6): 9-13.

收稿日期：2005-09-15；　修回日期：2006-10-09

作者简介：

康忠健（1971-），男，博士，副教授，硕士生导师，主要研究方向为电力系统稳定分析及非线性控制、电力系统故障检测与诊断；E-mail:kangzjzh@163.com

于　伟（1980-），男，硕士研究生，主要研究方向为电力系统故障检测与诊断。

（上接第 20 页　continued from page 20）

过电压的几率。该方法抗干扰能力强，判断结果准确可靠，不受接地方式和接地电阻的影响，而且能够在电压过零和最大值时都保持高的选线准确率。

本文中采用的仿真模型是一级线路构成的配电网，对于有二级线路（同一电压等级）的配电网，首先对一级线路进行故障选线，当故障线路含有二级线路时再进一步判定其子网的二级线路是否有故障。

大量的仿真结果表明，利用本文所介绍的方法实现故障选线具有较高的灵敏性和可靠性。

参考文献

[1] 马柯，张保会. 中性点非直接接地系统故障选线原理的发展和展望[J]. 继电器，2003，31（5）：65-70.
MA Ke，ZHANG Bao-hui.Development and Prospect of the Single-phase Grounding Fault Detection in Unearthed or Compensated Neutral Networks[J].Relay,2003,31(5):65-70.

[2] 黄景光，吕艳萍. 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)：1-8.
HUANG Jing-guang, Lü Yan-ping. Single-phase Fault Detection Based on the Wavelet Packet Analysis of Zero-sequence Power Components in the Peterson-coil Grounded System[J]. Relay, 2003, 31(6):1-8.

[3] 戴剑锋，张艳霞，候喆. 小波重构算法在配电网接地选线中的应用[J]. 电网技术，2004，28（3）：43-47.
DAI Jian-feng ,ZHANG Yan-xia, HOU Zhe. Application of Wavelet Reconstruction Algorithm in Phase-to-ground Fault Detection of Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2004,28(3):43-47.

[4] 戴剑锋，张艳霞. 基于多频率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.

[5] 胡昌华，李国华，刘涛，等. 基于 MATLAB 6.X 的系统分析与设计——小波分析（第二版）[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2004.
HU Chang-hua, LI Guo-hua, LIU Tao, et al. System Analysis and Design Based on MATLAB 6.X——Wavelet Analysis [M]. Xi′ an:Xidian University Press, 2004.

[6] 董长虹，高志，余啸海. MATLAB 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京：国防工业出版社，2004.
DONG Chang-hong, GAO Zhi, YU Xiao-hai. The Theory and Application of MATLAB Wavelet Analysis Toolbox[M].Beijing:National Defence Industry Press,2004.

收稿日期：2006-07-25；　修回日期：2006-11-07

作者简介：

陈少华（1954-），女，教授，研究方向为继电保护以及人工智能在电力系统中的应用；

桂存兵（1974-），男，硕士研究生，研究方向为继电保护以及人工智能在电力系统中的应用。

E-mail: ahui200491@126.com