

结合暂态零序电流及小波分解的谐振接地系统故障选线方法

王建南

(国网浙江省电力有限公司宁波供电公司, 浙江 宁波 315100)

摘要 由于城市配电网结构复杂, 多为电缆及架空混合线路, 且中性点往往经消弧线圈接地, 当系统发生单相接地故障时, 故障点接地电流通常比较微弱, 难以通过稳态电气量直接选出故障线路。鉴于此, 本文提出结合暂态零序电流及小波分解的谐振接地系统故障选线方法, 对故障特征值进行量化定义, 并给出故障判断逻辑。多组仿真数据表明, 本文所提方法不受配电网结构、发生接地故障时的合闸角度、故障点位置、故障点电阻的干扰, 具有较好的工程应用前景。

关键词: 故障选线; 小波分析; 故障特征值; 相关性分析; 谐振接地系统

Fault line selection method for resonant grounding system combining transient zero sequence current and wavelet decomposition

WANG Jiannan

(Ningbo Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd, Ningbo, Zhejiang 315100)

Abstract Due to the complex structure of urban distribution networks, which are mostly cable and overhead mixed lines, and the neutral point is often grounded through arc suppression coils, when the system is single-phase grounded, the grounding current at the fault point is often weak, making it difficult to directly select the fault line by steady-state electrical quantities. This article creatively proposes a fault line selection method that combines transient zero sequence current and wavelet decomposition. The method quantifies the fault characteristic values and provides a fault diagnosis logic. Multiple sets of simulation data show that the fault line selection method proposed in this paper is not affected by factors such as distribution network structure, fault point location, closing angle during grounding fault, and resistance of fault point, and has good prospects for engineering application.

Keywords: fault line selection; wavelet analysis; fault eigenvalue; correlation analysis; resonant grounding system

0 引言

我国城市配电网网架结构日趋复杂, 配电网单相接地故障快速选线问题一直未得到很好解决。当前, 各城市配电网新建变电站基本均具备故障选线功能, 老旧变电站在消弧线圈上加装选线模块, 将选线结果上传至变电站监控后台及调度主站, 但实际应用效果并不理想。对于市中心的纯电缆线路, 其电容性故障电流较大且电缆故障基本为永久性故障, 故选线结果较准确; 对于城郊或农村地区的电缆-架空混合线路, 其稳态故障电流较小, 且间歇性

故障很多, 故障点过渡电阻往往较大, 导致选线结果误判率高, 需要调控中心依次拉路来寻找故障线路, 严重影响故障处理时间^[1-3]。虽然中性点谐振接地配电系统发生单相接地后, 允许系统运行 2h, 但是非故障相电压会被抬升至线电压水平, 容易在绝缘薄弱处引起击穿, 进而导致两相接地, 造成保护动作, 线路跳闸; 此外, 接地点附近还存在一定的人身安全隐患。因此, 在对供电可靠性要求越来越高、对安全隐患零容忍的形势下, 配电网发生单相接地时, 快速自动地选出接地线路, 并在第一时间进行隔离显得尤为重要^[4-6]。

中性点谐振接地系统发生单相接地故障时, 暂态信息比较丰富, 且几乎不受故障形式和消弧线圈补偿方式的影响^[7], 部分学者提取相关暂态量进行分析利用, 但故障定义仍不明确, 实际选线效果不甚理想^[8-9]。因此, 本文提出一种结合暂态零序电流及小波分解的谐振接地系统故障选线方法, 使用小波分解方法对暂态故障电气量进行分解, 并量化定义故障特征值, 设计故障选线判断逻辑, 最后通过多组仿真对所提方法进行验证。

1 中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障特征

谐振接地系统发生单相接地故障时, 接地点的暂态零序电流 i_G 可分解为暂态故障感性电流 i_L 和暂态故障容性电流 i_C 两部分^[10], 即

$$i_G = i_L + i_C \quad (1)$$

暂态故障感性电流 i_L 中的非周期分量与暂态故障容性电流 i_C 中的振荡分量频率不一致, 不能相互补偿, 因此配电线路发生单相接地故障时, 暂态零序电流与稳态故障电流遵循同样的规律, 即非故障线路的暂态零序电流与故障线路暂态零序电流的方向相反, 且故障线路的暂态零序电流绝对值在所有线路中最大。

2 接地故障选线方法

2.1 特征频带分解提取

设置暂态信号的采样频率为 4 000 Hz, 依据小波分解后根节点的频带宽度及采样频率, 本文采用 db5 小波包对配电网各条线路的暂态零序电流进行 4 层分解, 并剔除低频分量, 仅保留高频和次高频分量, 再分别计算各频带上的能量值^[11]。因能量值越大越能反映接地故障特征, 故定义能量值最大的频带为特征频带, 下文在此特征频带上进行分解计算。特征频带的能量计算公式^[9-10]为

$$\omega = \sum_n \left[Q_k^{(j)}(n) \right]^2 \quad (2)$$

式中: ω 为特征频带下的能量值; $Q_k^{(j)}(n)$ 为小波包分解子频带下的系数; j 为小波包分解层数; k ($k = 0, 1, 2, \dots, 2^{j-1}$) 为小波包分解后第 j 层节点号; n 为各频带内采样点。

2.2 故障特征值定义

根据单相接地故障时的暂态零序电流规律可

知, 在同一个特征频带上, 故障线的暂态零序电流小波分解系数模值最大, 并且极性与非故障线相反。因此, 可分别计算某条线路相对于其他各线的模值差, 模值差的相对值可作为故障选线依据之一。定义线路 a 相对线路 b 的小波分解系数模值差为

$$C_{ab} = \sum_n (|Q_a(n)| - |Q_b(n)|) \quad (3)$$

式中: $Q_a(n)$ 为线路 a 在特征频带上的小波分解系数; $Q_b(n)$ 为线路 b 在特征频带上的小波分解系数。先将 $Q_a(n)$ 和 $Q_b(n)$ 取绝对值, 再求差, 目的是使小波分解系数的模值比较与下文的相关性比较区分, 提高故障选线的可靠性。

同理, 线路 a 和线路 b 小波分解系数的绝对值相加即为模值和, 有

$$H_{ab} = \sum_n (|Q_a(n)| + |Q_b(n)|) \quad (4)$$

将线路 a 相对线路 b 的模值差除以模值和, 得到线路 a 与线路 b 的模值差系数, 即

$$D_{ab} = \frac{C_{ab}}{H_{ab}} \quad (5)$$

同理, 可分别计算线路 a 相对其他所有线路的模值差系数, 即

$$D_a = [D_{a1} \ D_{a2} \ \dots \ D_{a(a-1)} \ D_{a(a+1)} \ \dots \ D_{am}] \quad (6)$$

式中, m 为研究对象配电网的线路总回数。

将式(6)中各元素进行求和计算, 再除以配电网线路总回数, 即得到线路 a 相对其他所有线路的综合模值差系数, 计算公式为

$$E_a = \frac{\sum_{i=1, i \neq a}^m D_{ai}}{m} \quad (7)$$

由前文分析可知, 故障线路的暂态零序量不仅模值最大, 而且方向与其他线路相反, 根据这一特性, 本文引入相关性计算, 以进一步提高选线准确性。相关系数 ρ 计算公式为

$$\rho_{xy} = \frac{\int_{-T}^T x(t)y(t)dt}{\sqrt{\int_{-T}^T x^2(t)dt} \sqrt{\int_{-T}^T y^2(t)dt}} \quad (8)$$

式中: $x(t)$ 、 $y(t)$ 为两个自变量为 t 的被积函数; T 为积分边界值。

利用上述相关性计算公式, 可得到线路 a 相对其他所有线路的相关系数为

$$\rho_a = [\rho_{a1} \ \rho_{a2} \ \cdots \ \rho_{a(a-1)} \ \rho_{a(a+1)} \ \cdots \ \rho_{am}] \quad (9)$$

同理，将式 (9) 中的各元素进行求和计算，再除以配电网线路总回数，即得到线路 a 相对其他所有线路的综合相关系数，计算公式为

$$P_a = \frac{\sum_{i=1, i \neq a}^m \rho_{ai}}{m} \quad (10)$$

为了同时考虑故障线路暂态零序量的模值关系及相关性关系，本文定义故障线路的故障特征值计算公式为

$$Z_a = \frac{E_a - P_a}{2} \quad (11)$$

其中，综合相关系数 P_a 取反是因为发生接地故障时，故障线路暂态零序电流的方向与非故障线路相反。

2.3 接地故障选线判断原则

中性点经消弧线圈接地的配电网发生单相接地故障时，若各线路的暂态零序电流经小波包 4 层分解后，按上述公式计算得到的故障特征值最大值小于 0，则根据式 (11) 可知，各线路的暂态零序电流方向相同，即故障点发生于母线上；若故障特征值最大值大于 0，则其所对应的线路为故障点所在线路。

3 仿真研究

3.1 仿真模型

利用 EMTP-ATP 软件建立 10kV 中性点经消弧线圈接地系统仿真模型如图 1 所示，10kV 出线共 5 条，其中 2 条纯电缆线路，3 条电缆-架空混合线路，线路参数见表 1。其中， R_1 、 R_0 分别为线路的正序电阻、零序电阻， L_1 、 L_0 分别为正序电抗、零序电抗， C_1 、 C_0 分别为正序电容、零序电容。

表 1 线路参数

线路类型	$R_1/$ (Ω/km)	$L_1/$ (mH/km)	$C_1/$ ($\mu\text{F}/\text{km}$)	$R_0/$ (Ω/km)	$L_0/$ (mH/km)	$C_0/$ ($\mu\text{F}/\text{km}$)
架空线	0.176	1.210 0	0.009 7	0.231	5.477 0	0.009
电缆	0.271	0.253 8	0.339 2	2.720	1.019 2	0.282

3.2 仿真分析

1) 在线路 2 末端设置永久性接地故障，并设定接地故障合闸角为 90° ，接地点电阻为 3Ω 。通过小波包变换对发生故障时各条线路的暂态零序电流进行分解，得到各线路的特征频带；然后计算前文所定义的故障特征值。db5 小波包分解系数如图 2 所示，

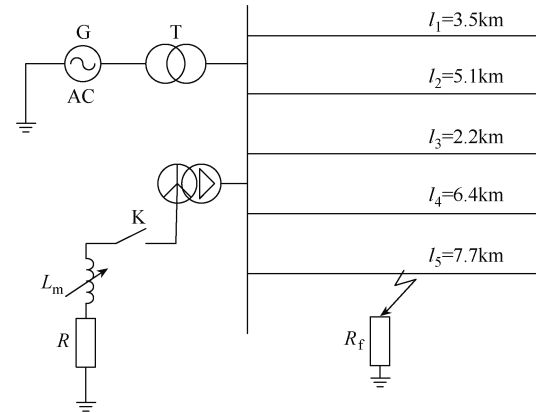


图 1 10kV 中性点经消弧线圈接地系统仿真模型

图中 L1~L5 代表线路 1~5。各线路故障特征值见表 2。

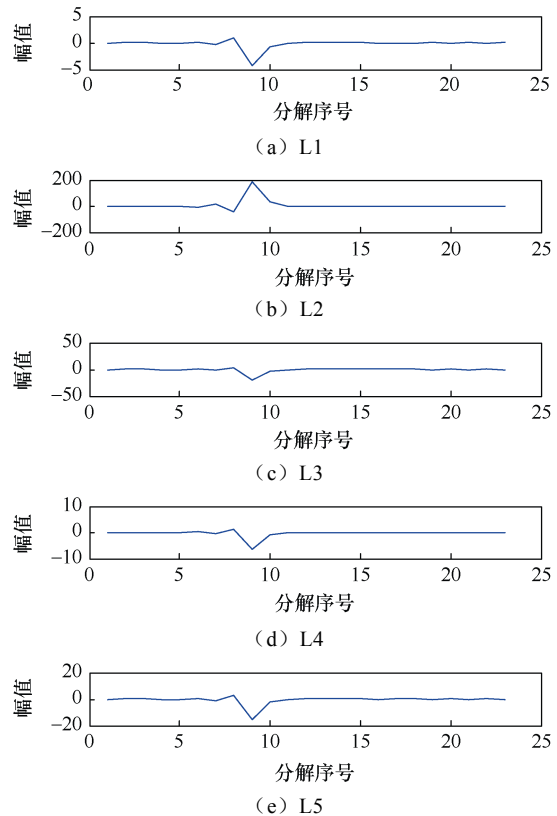


图 2 db5 小波包分解系数

表 2 各线路故障特征值

故障特征指数	L1	L2	L3	L4	L5
E_a	-0.588 5	0.888 2	0.126 8	-0.413 2	-0.013 2
P_a	0.5	-1.0	0.5	0.5	0.5
Z_a	-0.544 2	0.944 1	-0.186 6	-0.456 6	-0.256 6

由图 2 可知，线路 2 的小波分解系数远大于其他 4 条线路，且极性与其他线路均相反。

从表 2 可知, 线路 2 的综合模值差系数最大, 为 0.888 2, 综合相关系数最小, 为-1.0, 故障特征值最大, 且远超过其他 4 条线路的故障特征值。根据故障选线判断原则, 可判定故障点位于线路 2, 选线正确。

2) 改变故障参数, 将故障点设置于母线上, 并设定接地故障合闸角为 0°, 接地点电阻为 1 000Ω。通过小波包变换对发生故障时各线路的暂态零序电流进行分解, 并计算故障特征值。故障发生于母线时各线路故障特征值见表 3。

表 3 故障发生于母线时各线路的故障特征值

故障特征指数	L1	L2	L3	L4	L5
Z_a	-0.703 9	-0.043 2	-0.312 1	-0.581 6	-0.341 3

从表 3 可知, 所有线路的故障特征值均小于 0, 根据故障选线判断原则, 可判定故障点位于母线上, 选线正确。

改变各故障点参数, 包括故障点位置、故障时的合闸角度、故障点过渡电阻等, 进行不同故障点的仿真计算, 得到故障特征值和选线结果见表 4。

表 4 不同故障点的故障特征值和选线结果

故障线路	d_g/km	R_g/Ω	$\theta/^\circ$	特征频带上的故障特征值 [$Z_1 Z_2 Z_3 Z_4 Z_5$]	选线结果
L1	0.1	5	0	[0.598 -0.051 -0.248 -0.589 -0.401]	正确
	1.5	150	30	[0.702 -0.051 -0.281 -0.611 -0.397]	正确
	3.6	1 500	90	[0.145 -0.061 -0.325 -0.665 -0.442]	正确
L2	1.6	5	90	[-0.567 0.911 -0.154 -0.487 -0.223]	正确
	3.4	150	60	[-0.588 0.743 -0.165 -0.471 -0.243]	正确
	5.0	1 500	0	[-0.688 0.171 -0.251 -0.588 -0.342]	正确
L3	1.1	5	0	[-0.634 -0.031 0.697 -0.545 -0.322]	正确
	2.5	1 500	30	[-0.641 0.032 0.542 -0.567 -0.291]	正确
L4	0.7	300	0	[-0.681 -0.033 -0.291 0.466 -0.372]	正确
	3.8	5	45	[-0.661 -0.053 -0.288 0.933 -0.351]	正确
	5.4	30	90	[-0.667 -0.056 -0.286 0.933 -0.355]	正确
L5	1.6	300	60	[-0.625 0.011 -0.233 -0.534 0.745]	正确
	4.8	5	30	[-0.621 0.007 -0.234 -0.531 0.751]	正确
	7.8	1 500	0	[-0.681 -0.010 -0.267 -0.588 0.095]	正确
母 线	0	300	0	[-0.742 -0.045 -0.288 -0.634 -0.367]	正确
	0	5	45	[-0.645 -0.043 -0.298 -0.637 -0.368]	正确
	0	1 500	90	[-0.745 -0.042 -0.275 -0.634 -0.366]	正确

其中, d_g 为故障点距线路首端的距离, R_g 为故障点过渡电阻, θ 为故障时的合闸角度。

由表 4 可知, 选线结果均正确, 且故障线路的故障特征值均明显高于其他线路的故障特征值, 可见本文所提故障选线方法具有较高的选线准确性, 且不受故障形式的干扰, 可靠性较高。

4 结论

针对当前城市配电网故障选线的难点, 本文提出了一种结合暂态零序电流及小波分解的谐振接地系统故障选线方法, 综合考虑了故障时各线路暂态量的模值及极性关系, 多组仿真数据表明, 所提故障选线方法不受配电网结构、故障点位置、接地故障时的合闸角度、故障点电阻的干扰, 故障选线准确性及可靠性较好, 具有实际工程应用推广价值。

参考文献

- [1] 吴建宇. 基于中电阻法的小电流接地选线方法研究[J]. 电气技术, 2023, 24(10): 17-22.
- [2] 欧逸哲, 术茜. 基于 SOM 和 K 均值聚类的谐振接地系统故障选线及区段定位方法[J]. 电气技术, 2023, 24(10): 23-30.
- [3] 刘伟, 杨东风, 王洪志, 等. 基于格拉姆角场-改进残差网络的小电流接地系统故障选线[J]. 电气技术, 2023, 24(12): 14-19.
- [4] 吴宇奇, 李正天, 林湘宁, 等. 基于变电站高频滤波边界特性的配电网线模行波选线方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 2072-2088.
- [5] 亓志滨, 田君杨, 薛永端, 等. 不接地系统异名相两点接地故障工频电气量及其对选线的影响分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3539-3551.
- [6] 王晓卫, 刘伟博, 郭亮, 等. 基于不同时段内积投影的灵活接地系统高阻故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 154-167.
- [7] 韦明杰, 石访, 张恒旭, 等. 基于同步零序电流谐波群体比相的谐振接地系统高阻故障选线及区段定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8358-8372.
- [8] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [9] 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, (下转第 57 页)

- [2] 周广猛,刘伍权,董素荣,等. “以学生为中心”的工程类课程在线教学探索:以“内燃机构造”课程为例[J]. 高等教育研究学报, 2021(44): 72-76.
- [3] 刘战合,张伟伟,罗明强. 面向综合能力提升的连通式实践教学体系构建[J]. 高等教育研究学报, 2021(44): 113-120.
- [4] 刘亚静,段超. 全数字自适应滤波器不同离散结构的性能对比分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(20): 4339-4349.
- [5] 谢佳,段斌,高婷,等. 神经网络认知测量在工程教学课程评价中的应用[J]. 电气技术, 2023, 24(2): 52-58.
- [6] 朱娟娟,贺王鹏,郭宝龙. 新工科电气电子类课程改革与实践:以“信号与系统”为例[J]. 电气技术, 2024, 25(10): 72-78.
- [7] 杨勇,李红斌,文劲宇,等. 新工科电气工程实践教学体系重构与实践[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 5074-5080.
- [8] 赵玲峰. 雷达信号的数字化中频调制解调算法仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(6): 16-20.
- [9] 冯鸿运,林飞,杨中平,等. 应用于自动导引小车无线充电系统的导航与供电一体化线圈研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4294-4304.
- [10] 胡继云,赫刘勤,郑维. 基于FPGA和线阵CCD的麦粒检测系统研究[J]. 电气技术, 2017, 18(4): 84-89.
- [11] 邹应全,吴太龙,彭榆淞,等. 基于线下估计和线上补偿的时间交错采样ADC失配误差补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 226-232.
- [12] 陈顺阳. 高速ADC动态性能的有效评估[C]//中国电子学会电子对抗分会第十三届学术年会论文集,北京, 2003: 674-681.
- [13] 赵智兵,袁雯,郭倩. 数字接收机中的ADC性能分析[J]. 电子技术, 2016, 45(10): 25-26, 21.
- [14] 申富媛,李炜,刘微容,等. “自动控制原理”课程目标达成度统计分析与持续改进[J]. 电气技术, 2023, 24(1): 65-69, 75.
- [15] 何杰. “半导体集成化芯片系统基础研究”重大研究计划进展综述[J]. 中国科学基金, 2005(6): 343-346.

收稿日期: 2024-12-25

修回日期: 2025-01-13

作者简介

李清江(1986—),男,山东省枣庄市人,博士,教授,主要从事智能信息器件与电路方面的研究工作。

(上接第47页)

电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 156-167.

- [35] 申江卫,岩川,刘永刚,等. 基于数据挖掘与大数据分析的电池故障诊断与异常检测[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7979-7994.
- [36] 阳瑞霖,莫凡,金艳,等. 基于重心平均动态时间规整算法的有载分接开关机械故障诊断[J]. 高电压技

术, 2023, 49(4): 1515-1525.

收稿日期: 2024-11-11

修回日期: 2025-01-15

作者简介

杨旺霞(1981—),女,云南省大理市人,硕士,高级工程师,主要从事电力系统继电保护研究工作。

(上接第51页)

2004, 24(6): 54-58.

- [10] 喻锴,兰宇婷,曾祥君,等. 基于零序电压区域放大的配电网高阻接地故障选线新方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-14[2025-02-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240528.1727.015.html>.
- [11] 张德丰. MATLAB小波分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

出版社, 2009.

收稿日期: 2024-12-23

修回日期: 2025-01-24

作者简介

王建南(1987—),男,浙江宁波人,硕士,工程师,主要从事电力系统配电网研究工作。