

配电网单相电弧接地故障选线暂态分析法

束洪春¹, 肖 白²

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南省昆明市 650051; 2. 东北电力学院电力工程系, 吉林省吉林市 132012)

摘要: 小电流接地系统发生最多的故障是单相接地故障。现有的基于稳态零序电流的故障选线方法, 受弧光接地、运行方式等因素的影响较大, 选线精度并不理想。文中在充分研究电弧故障暂态零序电流变化的基础上, 指出电弧因素对故障选线准确性的影响。由于对称分量法对接地故障进行暂态分析十分不便, 文中采用 Clarke 变换, 并运用小波变换技术建立新的基于暂态电气量的选线方法。应用 EMTP 对电弧接地故障进行了仿真, 在不同采样频率以及不同的 A/D 分辨率情况下进行了大量的仿真试验, 结果表明新方法是正确、有效的, 而且具有较强的鲁棒性。

关键词: 配电网; 故障选线; 消弧线圈; 电磁暂态; 小波变换; 电弧故障

中图分类号: TM727; TM711

0 引言

我国 3 kV~60 kV 的配电网普遍采用小电流接地系统。这种系统发生单相接地时故障选线困难, 主要是由于稳态电流幅值较小以及间歇性电弧接地造成的。对此, 基于负序分量的选线方法具有抗弧光接地能力强的优点^[1]。然而, 使用对称分量法提取负序时的变换矩阵是一个复数矩阵, 该变换过程是一个相量运算的过程, 计算过程比较复杂, 不利于暂态过程的分析。另外, 暂态分量通常比稳态分量明显得多, 使用暂态分量有助于提高选线精度^[2]。此时, 采用 Clarke 变换的选线方法不但具有负序电流选线法的优点, 而且具有很好的计算性, 其在时域中分析暂态过程时可以使用采样点的值直接进行计算。

因此, 本文把小波分析原理与 Clarke 变换结合, 提出一种基于暂态分析的选线方法, 并利用 EMTP 进行大量的仿真分析, 得到了令人满意的结果。

1 基本原理

1.1 α 分量电流分布

由文献[3]可知, Clarke 变换是相模变换中的一种, 可得到 0, α , β 分量。典型辐射状小电流接地系统单相接地故障时的 α 分量的等效电路如图 1 所示。图中: $Z_{\alpha s}$ 为系统的 α 分量阻抗; $Z_{\alpha j}$ 为母线到故障

点间故障线路 j 的 α 分量阻抗, $Z_{\alpha j}'$ 为故障线路其他部分的 α 分量阻抗; $Z_{\alpha k}$ 为正常线路 k 的 α 分量阻抗 ($k=1, 2, \dots, n, k \neq j$); $Z_{\alpha i}$ 为线路 i 负载的 α 分量阻抗 ($i=1, 2, \dots, n$); R_f 为故障点的过渡电阻。

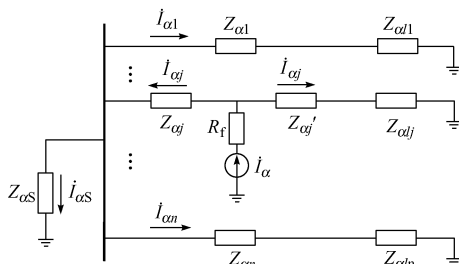


图 1 单相接地故障分量电流分布

Fig. 1 Distribution of α -component currents with single-phase-to-ground fault

1.2 小波基的选取^[4]

小波函数在理论上无限多种, 由其引出的小波基所具有的性质也各不相同, 可满足各种问题的需要。但对同一个信号利用不同的小波基进行处理, 取得的效果并不相同, 甚至差异较大, 故应根据分析的对象和目的采用合适的小波函数。

在工程信号分析和处理中选择小波函数, 除了考虑它的连续性、时频窗中心及面积、小波消失矩及衰减性外, 还要分析对称性、正交性、紧支性等特性。考虑到上述特性, 并结合小电流接地系统故障选线的具体问题, 为减小频谱的泄漏和混叠, 要求小波函数具有好的频域特性, 即分频严格。Meyer 小波的小波函数和尺度函数都是在频域中进行定义的, 是具有紧支撑的正交小波, 分频效果相对较好。所以本文选用 Meyer 小波, 其尺度函数和小波函数的波形如图 2 所示。

收稿日期: 2002-02-27; 修回日期: 2002-07-24。

云南省科技攻关项目 (15B2-02); 云南省应用基础研究项目 (98E0409M, 99E006G); 云南省中青年学术和技术带头人培养经费资助项目。

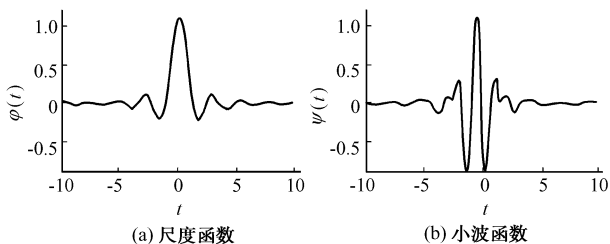


图2 Meyer 尺度函数和小波函数

Fig. 2 Scale and wavelet function of Meyer

1.3 选线过程

使用 Meyer 小波对 α 分量电流的增量进行小波分析,建立判据,实现选线。具体步骤如下:

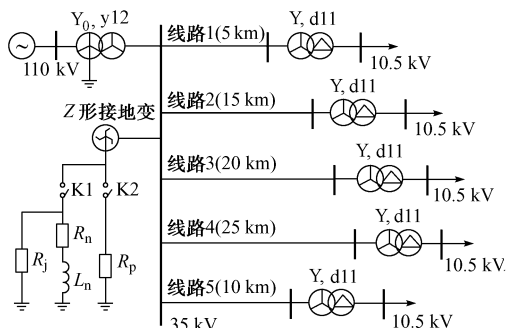
a. 以故障点数据为中心,取其前后各 2 个周期的数据作为分析数据窗。对采样数据进行 Clarke 变换,计算出故障前后电流中 α 分量的突变量。

b. 取 $S = \int_0^T |W_i(t)| dt$ 作为 α 分量电流突变量的一种测度,其中 $W_i(t)$ 是 α 分量突变电流在尺度 i 上的小波分解。通过对采样数据进行频谱分析,能够确定小波分解的较佳尺度。

c. 找到 S_j 使得 $S_j > S_k (k=1, 2, \dots, n, \text{且 } k \neq j)$ 成立,那么可以判定线路 j 是故障线路(若是母线故障,则所有线路都应该被切除,相当于所有线路都是故障线路,故上述选线过程不会引起误动)。如果在一个数秒的延时之后,故障没有自动消除,那么就切除线路 j 。如果切除线路 j 之后,故障仍然存在,则可判定为母线故障。其中, S_j 是线路 j 的测度,其定义方法如上所述。

2 仿真分析

本文用于仿真分析的小电流接地系统是由架空线组成的典型辐射状配电网,中性点运行方式是用开关 K1, K2 控制的,如图 3 所示。



R_p 为高值电阻; L_n 为消弧线圈的电感; R_n 为消弧线圈的电阻; R_j 是与消弧线圈并联的一个非线性电阻。

图3 辐射状小电流接地系统

Fig. 3 Schematic diagram of a radical ungrounded neural system

2.1 电弧过程的零序电流

实际的电弧过程非常复杂,无法用一个确定的数学模型来进行定义,但故障相电弧的重燃和熄灭有一定的规律。工频熄弧理论和高频熄弧理论在实际中都有可能成立。因在空气中工频熄弧的可能性较大,为便于分析,本文按工频熄弧理论进行仿真试验,即相恢复电压达到最大值时发生重燃,工频电流过零时,电弧自动熄灭。在进行 EMTP 仿真时,可用压控开关作为实际电弧接地的理想化数学模型。

仿真用系统如图 3 所示,距线路 4 始端 24 km 处发生电弧接地。故障线路(线路 4)和非故障线路(以线路 2 为例)的零序电流波形,分别如图 4(a)和图 4(b) 所示。

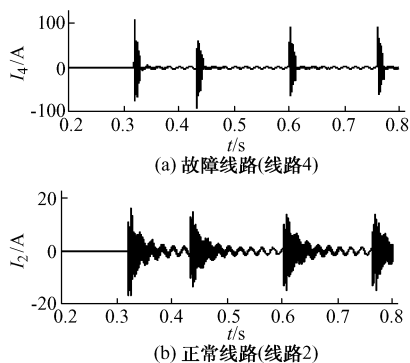


图4 电弧过程中的零序电流波形

Fig. 4 Zero sequence currents during arcing fault

由图 4 可知,小电流接地系统单相电弧接地是一个不稳定的息弧、拉弧过程,不存在稳定的短路过程,基于稳态分量的选线方法在这种情况下就很难发挥效用。

2.2 新方法在不同采样频率下的选线结果

对图 3 所示仿真系统,距线路 4 始端 24 km 处于 0.315 s 时 A 相发生电弧接地。以 10 kHz 采样频率为例,按照上述方法实现选线,使用其他采样频率时的选线过程与其相同。限于篇幅,仅给出线路 2 (正常线路)和线路 4(故障线路)的分析波形。

下面对故障点前后各 2 个周期的数据进行分析。线路 2 和线路 4 上的 α 分量电流波形如图 5 所示, α 分量电流增量波形如图 6 所示。对应的第 4 层高频小波分解系数如图 7 所示。

图 5 所示 α 分量电流波形的表现比较相近,即对故障线路(线路 4)上 α 分量电流波形与正常线路(线路 2) α 分量电流波形的区别没有直观、明显地描述出来。此外, α 分量的幅值在系统正常运行时也很大,而且负荷电流的变化影响其幅值大小。所以本文选取电流中 α 的突变量(其波形如图 6 所示)作为故障特征的提取对象,来建立选线判据。

按前面的选线步骤可得到各线路 α 电流突变量的小波测度(见表 1),容易推知线路 4 故障。

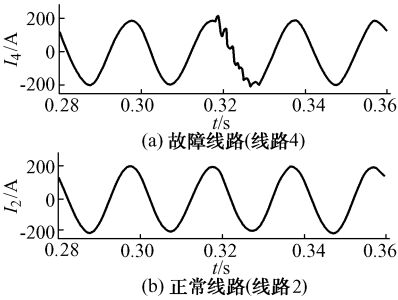


图 5 电弧过程中各线路 α 分量电流波形
Fig. 5 α -component currents during arcing

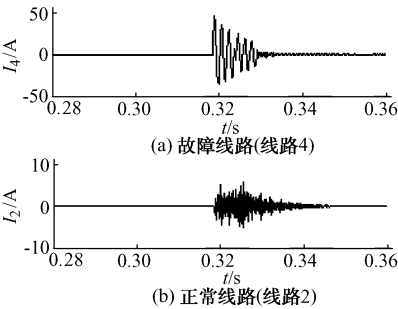


图 6 电弧过程中各线路上 α 分量的突变量波形
Fig. 6 α -component superimposed currents during arcing

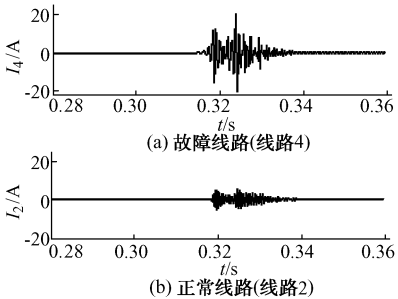


图 7 α 分量电流突变量的第 4 层高频小波分解系数
Fig. 7 Wavelet coefficients in scale 4

表 1 各条出线上分量电流增量的小波测度
Table 1 Wavelet measurement of α -component superimposed currents on all lines

小波测度	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	线路 5
S_{20}	1.87×10^{-3}	4.92×10^{-3}	9.77×10^{-3}	1.25×10^{-1}	3.05×10^{-3}
S_{10}	1.94×10^{-3}	5.88×10^{-3}	9.87×10^{-3}	1.24×10^{-1}	2.84×10^{-3}
S_5	1.40×10^{-2}	1.17×10^{-2}	1.45×10^{-2}	1.91×10^{-1}	1.16×10^{-2}

表 1 中 S_{20} , S_{10} , S_5 分别是 20 kHz, 10 kHz, 5 kHz 采样频率下得到的小波测度。从中可看出,选线精度随采样频率的下降而下降。但采样频率为 5 kHz 时,该方法仍然能够正确选线。可见,本方法对采样频率的要求不高,在实际应用中使用 5 kHz

采样率是可行的。

2.3 不同 A/D 分辨率下的选线结果

采样频率仍为 5 kHz,在第 4 层小波分解下进行分析。分别采用 16,14,12,10 位 A/D 实现新方法的选线过程结果示于表 2。从中可看出,选线精度随着 A/D 精度的下降而下降。在 10 位 A/D 的情况下仍有很高的选线精度。这说明该方法在实现过程中对硬件要求不高,具有很强的鲁棒性。考虑到采用 16,14,12 位 A/D 时选线精度相对接近,而在 10 位 A/D 下的选线精度下降得较快。所以,在实际应用中使用 12 位 A/D 既能满足工程需要又比较经济。

表 2 各条出线上分量电流增量的小波测度
Table 2 Wavelet measurement of α -component superimposed currents on all lines

小波测度	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	线路 5
S_{16}	1.41×10^{-2}	1.18×10^{-3}	1.45×10^{-3}	1.91×10^{-1}	1.17×10^{-2}
S_{14}	1.45×10^{-2}	1.21×10^{-2}	1.49×10^{-2}	1.91×10^{-1}	1.21×10^{-2}
S_{12}	1.56×10^{-2}	1.37×10^{-2}	1.62×10^{-2}	1.92×10^{-1}	1.34×10^{-2}
S_{10}	2.38×10^{-2}	2.19×10^{-2}	2.48×10^{-2}	1.96×10^{-1}	2.01×10^{-2}

2.4 不同故障位置处的选线结果

本方法对于短线路近端、远端和长线路近端、远端的电弧接地故障都有类似的仿真结果(见表 3)。可见,本方法抗电弧接地的能力很强。

表 3 各条出线上分量电流增量的小波测度
Table 3 Wavelet measurement of α -component superimposed currents on all lines

小波测度	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	线路 5
S (短近)	2.48×10^{-1}	2.33×10^{-2}	2.82×10^{-2}	3.67×10^{-2}	1.54×10^{-2}
S (短远)	2.34×10^{-1}	2.08×10^{-2}	2.92×10^{-2}	3.51×10^{-2}	2.17×10^{-2}
S (长近)	1.03×10^{-2}	1.72×10^{-2}	2.46×10^{-2}	2.01×10^{-1}	1.71×10^{-2}
S (长远)	1.40×10^{-2}	1.17×10^{-2}	1.45×10^{-2}	1.91×10^{-1}	1.16×10^{-2}

注: S (短近)表示线路 1 始端 1 km 处小波测度; S (短远)表示线路 1 始端 4 km 处小波测度; S (长近)表示线路 4 始端 1 km 处小波测度; S (长远)表示线路 4 始端 24 km 处小波测度。

3 结论

a. 本文提出的选线方法具有较强的抗电弧接地能力;受系统中性点运行方式的影响较小;选线过程中采用相对值建立判据,能有效地克服测量误差和系统不对称的影响,具有较高的选线精度。

b. 与负序分量选线方法相比,该方法不需要进行相量计算,可以使用其采样值直接计算,在暂态过程的分析与计算中明显占优。

c. 当相电压在过零值附近接地时,暂态分量幅值过小,选线精度会大大下降。所以,实际中应利用暂态分量反映故障特征明显但不稳定,稳态分量反映故障特征不明显但稳定的特点,考虑建立暂态分析与高灵敏度稳态法相结合的综合选线方案。

参 考 文 献

- 1 曾祥君,尹项根,陈德树,等(Zeng Xiangjun, Yin Xianggen, Chen Deshu, et al). 适应配电自动化的馈线接地保护研究(Feeder Grounding Fault Protection To Implement Distribution Automation). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(15): 37~41
- 2 Chaari O, Meunier M, Brouaye F. Wavelet: A New Tool for the Resonant Grounded Power Distributed Systems Relaying. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1301~1308
- 3 吴维韩,张芳榴(Wu Weihang, Zhang Fangliu). 电力系统过电压数值计算(Numerical Value Reckoning of Overvoltage in Power

System). 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 1989

- 4 彭玉华(Peng Yuhua). 小波变换与工程应用(Wavelets Transform and Engineering Application). 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 2000

束洪春(1961—),男,博士,教授,研究方向为电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波。E-mail: kmshe@sina.com

肖 白(1973—),男,硕士,讲师,主要研究小电流接地系统单相接地故障选线与测距。

A TRANSIENT-BASED STUDY OF FAULT LINE SELECTION FOR SINGLE-PHASE TO GROUND FAULTS ON DISTRIBUTION SYSTEM

Shu Hongchun¹, Xiao Bai²

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

(2. Northeast Institution of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China)

Abstract: Most faults in the system which has little short circuit current when it faults to ground via single-phase are single-phase grounding. For the methods with steady zero sequence currents are effected by arcing, operating manner, etc., the accuracy of fault line selection is not satisfied. In this paper, after detailed study of the variation of zero-sequence currents during arcing fault, the disadvantageous effects of arcing on the accuracy of fault line selection are listed. Because symmetry component method is very inconvenient for the transient analysis of grounding fault, the techniques of wavelets and Clarke's transform are used to develop the criterion of fault line selection. Afterwards EMTP is employed to achieve the simulation of arcing faults. Simulation results, which are obtained under different sampling frequency and A/D resolution conditions, show the novel method is correct, effective and robust.

This project is supported by Yunnan Province Science and Technology Key Project (No. 15B2-02), Yunnan Province Applied Basis Research Fund (No. 98E0409M, 99E006G) and the Heading Fund of Yunnan Province Science & Technology.

Key words: distribution system; fault line selection; arc suppressing coils; electro-magnetic transients; wavelets transform; arcing fault