

基于暂态电流助增的单相接地故障选线方法

史燕琨¹, 周友明², 王东²

(1. 施耐德电气(中国)投资有限公司, 北京 100016; 2. 张家港市供电公司, 江苏 张家港 215600)

摘要: 提出一种基于暂态电流助增的小电流接地系统单相接地故障选线方法。通过在各馈线始端并联一定频率的谐振装置, 改变故障后暂态电流在高频段的成分, 强化谐振装置两侧相应频带暂态电流能量的差异, 从而提高了故障选线暂态判据的灵敏度。理论及仿真试验表明, 此方法简化了采用暂态信号选线时需选择分析频带的过程, 判据适用于各种中性点不直接接地的配电系统。

关键词: 故障选线; 暂态信号; 电流助增

New method of line selection for single phase grounding fault based on aggrandized transient current signal

SHI Yan-kun¹, ZHOU You-ming², WANG Dong²

(1. Schneider Electric (China) Investment Co., Ltd, Beijing 100016, China;

2. Zhangjiagang Power Supply Company, Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: Transient signals can be taken usage for fault line selection when there is single phase grounded fault in the ungrounded neutral network. One method based on aggrandized transient fault current signal is presented in this paper. With one special designed resonance circuit parallel installed with the power line, the difference of fixed frequency components in the transient fault current between before and after the resonance circuit is enlarged, which can increase the sensitivity of selection criterions and simplify the process of frequency choosing when take use of transient signals for line selection. The stability of line selection for different types of network is proved by simulating test.

Key words: fault line selection; transient signal; aggrandized current

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)19-0010-04

0 引言

中性点不直接接地的配电系统在发生单相接地短路时, 由于故障电流较小, 为故障选线带来了一定困难^[1]。研究表明, 在短路初期, 故障电流中往往包含大量的暂态分量, 在稳态接地电流很难难以利用的情况下, 这是非常有利的因素^[2]。随着信号检测和处理速度的不断提高, 许多文献中利用故障后的暂态信息, 通过比较信号在一定频带的方向和幅值构成各种快速的选线方法^[3-6]。但由于故障暂态过程持续时间非常短, 一般只有半个工频周期, 且信号频谱受线路结构和元件参数的影响很大, 很难确定一个固定频带作为所有小电流接地系统选线的依据。

基于此, 本文提出一种基于暂态电流助增的故障处理方法, 通过在各馈线出线端安装一定频率的

谐振滤波装置, 强化故障线路处滤波装置两侧相应频带暂态电流成分的差异, 提高故障选线暂态判据的灵敏度, 从而为故障选线提供更加快速可靠的判断依据。

1 暂态电流助增的选线原理

1.1 单相接地故障暂态信号分析

单相接地故障可以等效为接入同故障前电压幅值相同, 极性相反的虚拟电压源。电压源的接入产生行波并向线路两端扩散, 到达母线及其它线路元件时, 由于波阻抗的突然改变, 产生波的反射和折射, 反射波和折射波同初始波相互叠加, 形成故障初期的暂态高频电流信号, 这些暂态高频故障信号相对于稳态分量幅值较大, 且带有强烈的故障特征信息。但由于这个暂态过程持续时间非常短, 且信号频谱受线路结构和元件参数的影响很大, 很难找

到一个固定频带作为所有小电流接地系统选线的依据。为更加充分利用故障初期的暂态电流信号, 本文通过在各馈线出线端并联一定频率的谐振滤波装置, 构成基于暂态电流助增的选线方法。

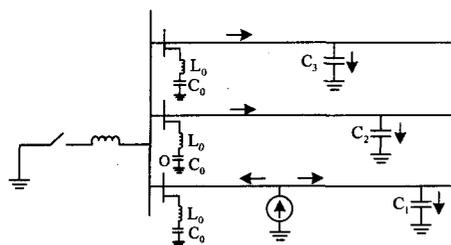


图1 暂态电流助增选线方法原理

Fig.1 Transient current aggrandize theory for fault line selection

选线原理如图1所示, 将故障时的虚拟电压源做 Clark 分解为几个模量上的电压源的叠加, 故障产生的电流同样按照模量的方式分解到相互独立的模量上, 其中零模分量 $E(0)$, $I(0)$ 同稳态分析的零序分量有相同物理意义。

1.2 信号能量的定义

根据信号系统理论, 信号 $f(t)$ 具有的能量 $E_{f(t)}$ 可表示为^[7]:

$$E_{f(t)} = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt \quad (1)$$

如果用 $i(f_k)$ 表示中心频率为 f_k , 频带宽度为 Δf 的暂态电流信号, 则此信号在 (t_1, t_2) 时间段内的能量可表示为:

$$E_{i(f_k)} = \int_{t_1}^{t_2} |i(f_k)|^2 dt \quad (2)$$

1.3 信号助增的选线判据分析

线路上出现单相接地故障时, 故障点产生电流行波并向两端扩散, 当线路中 O 点并联有阻抗为 Z_h 谐振回路时, 行波的传输如图2所示, 设 O 电流两侧线路特征阻抗为 Z_1 和 Z_2 。

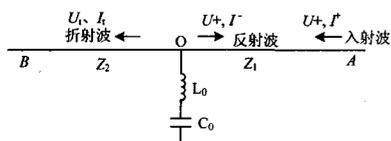


图2 暂态行波在谐振滤波接入点的传输过程

Fig.2 Feeder line parallel connected with resonance circuit

则 A 端传输线在谐振电路接入点 O 的反射系数的象函数为:

$$N_0(s) = \frac{Z_h(s)Z_2/[Z_h(s)+Z_2]-Z_1}{Z_h(s)Z_2/[Z_h(s)+Z_2]+Z_1} = \frac{Z_h(s)Z_2 - Z_h(s)Z_1 - Z_1Z_2}{Z_h(s)Z_2 + Z_h(s)Z_1 + Z_1Z_2} \quad (3)$$

当 AO 同 OB 为同种材料的线路时, 有线路特征阻抗 $Z_1 = Z_2 = Z_c$, 则有:

$$N_0(s) = \frac{-Z_c}{2Z_h(s) + Z_c} \quad (4)$$

由 A 端传输线在 O 点的折射系数的象函数为:

$$T_0(s) = 1 + N_0(s) = \frac{2Z_h(s)}{2Z_h(s) + Z_c} \quad (5)$$

令 $s = j\omega$, 带入上式, 有:

$$\begin{cases} N_0(\omega) = \frac{-Z_c}{2[(1/j\omega C_0) + j\omega L_0] + Z_c} \\ T_0(\omega) = 1 + N_0(\omega) = \frac{2[(1/j\omega C_0) + j\omega L_0]}{2[(1/j\omega C_0) + j\omega L_0] + Z_c} \end{cases} \quad (6)$$

线路并联集中谐振装置后, 边界点处的折射和反射系数是频率的函数, 当通过的电流波的频率为调谐电路的自振频率 ω_0 时, 有 $1/j\omega_0 C_0 + j\omega_0 L_0 = 0$ 。此时 $N_0(\omega_0) = -1$, $T_0(\omega_0) = 0$, 正向入射波的全部能量都被反射回去, 边界处不消耗能量, 即电流增加到 2 倍。通过多次的反射和折射形成的暂态电流, 最终使谐振滤波装置接入处故障侧电流助增。理论上, 通过该谐振装置的相应频率电流分量为零, 但由于线路杂散参数分布以及谐振中心点漂移, 仍会有部分同频率电流成分透射, 但信号能量已经大大衰减。对于无故障的健康线路, 同频率的电流信号成分在通过谐振装置时会有同样的衰减效果, 但由于电流方向不同, 信号衰减的方向同故障线路相反, 由此可以根据故障初始高频暂态电流信号能量衰减方向构成故障选线的判据:

$$Ratio_F = E_L / E_S \quad (7)$$

$$(1) \begin{cases} Ratio_F > CRI_F & \text{故障线路} \\ Ratio_F < 1 & \text{非故障线路} \end{cases} \quad (8)$$

(2) 如果所有 $Ratio_F < 1$, 则为母线故障

其中: E_L 为分析时段内谐振装置靠近负荷侧(如果是故障线路, 则为靠近故障侧)检测到的谐振频带暂态电流能量, E_S 为谐振装置靠近母线侧检测到的频带暂态电流能量, CRI_F 为判断阈值, 为大于 1 的正实数。

2 仿真试验分析

采用 PSCAD/EMTDC 建立仿真线路, 如图3所

示。一个变电站母线上联接4条长度不等的馈线，在每条馈线的出口处安装本文所设计的谐振滤波装置。变电站内电源变压器容量10 MVA，中性点不直接接地，母线杂散电容 C_{BUS} 取0.01 μ F，线路采用频率相关模型，导线直径2 cm，距地最近一相弧垂最低点高7.5 m，地电阻取100 Ω 。故障区段判断装置的谐振频率为13.5 kHz，各选线装置距离母线长度都为20 m。

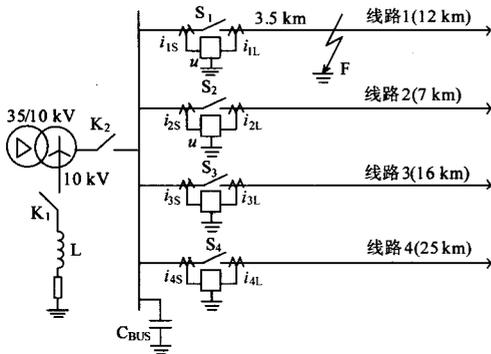


图3 单相接地选线的仿真线路

Fig.3 Simulating circuit for single phase to ground fault detection

提取故障发生后半个工频周波的电流信号，采样频率选30 kHz，采用谐波小波滤波提取同谐振频率相同的电流成分，判断阈值取 $CR I_F = 10$ 。分别分析系统在中性点不接地及经消弧线圈接地的情况下发生单相接地故障时的暂态电流成分变化情况。

2.1 中性点不接地时线路故障

设定线路1上距离变电站出口3.5 km处发生A相接地故障，故障过渡电阻为1 Ω ，故障初始角度30°。图4 (a) 给出了各定位装置两侧在滤波频带内的暂态电流成分的波形，其中 I_{FS} 为装置母线侧CT采集的数据， I_{FL} 为装置负荷侧CT采集的数据。

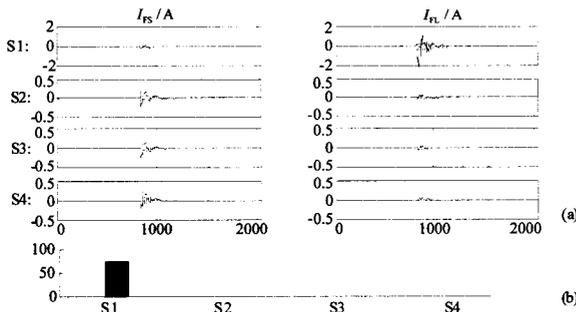


图4 线路故障后各装置两侧带内电流信号及能量关系

Fig.4 In-band current and energy ratio when single phase to ground fault occurs

从图4 (a) 可以看出，由于谐振滤波器的衰减

作用，装置 S_1 在靠近故障的负荷侧测得的频带内暂态电流成分的幅值明显大于母线侧，衰减方向为负荷侧向母线侧；在其他非故障线路上则幅值相对小很多，且衰减方向同故障线路相反。图4 (b) 给出了各条线路上装置两侧带内电流能量的幅值比较关系，可计算出各能量比例，如表1所示。可见，故障线路谐振滤波装置两侧的带内能量比接近70，远大于判据阈值，其它非故障区段衰减方向同故障线路相反，且衰减不如故障线路明显，满足故障判据的要求。

表1 中性点不接地系统线路故障暂态电流能量比

Tab.1 Energy ratio of transient current in non-neutral grounded system line faulted

线路	1(故障)	2(非故障)	3(非故障)	4(非故障)
Ratio _F	69.80	0.138 6	0.124 7	0.128 4

2.2 中性点不接地时母线故障

当变电站母线上发生单相接地故障时，线路上的暂态电流方向都为自母线流向线路，图5 (a) 给出了各谐振装置两侧在带内暂态电流成分的波形，图5 (b) 为相应的能量比较关系，表2给出了各装置两侧能量比值。可见，所有线路上的能量比值都小于1，且衰减方向相同，根据判据，可判断故障发生在母线上。

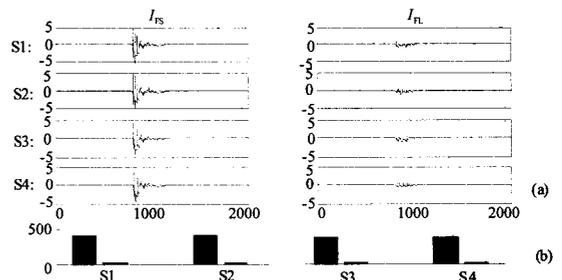


图5 母线故障后各装置两侧带内电流信号及能量关系

Fig.5 In-band current and energy when single phase to ground fault occurs on the bus

表2 中性点不接地系统母线故障暂态电流能量比

Tab.2 Energy ratio of transient current in non-neutral grounded system bus faulted

线路	1(非故障)	2(非故障)	3(非故障)	4(非故障)
Ratio _F	0.055 6	0.082 8	0.083 3	0.065 3

2.3 中性点通过消弧线圈接地时线路故障

当图2中的开关 K_1 闭合时，线路中性点通过消弧线圈接地，电感取5%过补偿。图6给出了各谐振装置两侧在带内暂态电流成分的波形，及能量比较关系。

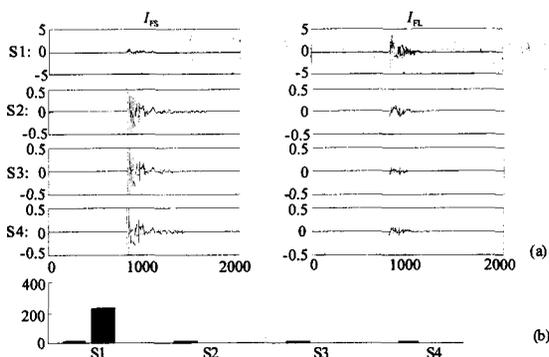


图6 中性点经消弧线圈接地系统中单相接地故障后带内电流信号及能量关系

Fig.6 In-band current and energy when single phase to ground fault occurs in neutral grounded through arc conductor system

可计算出各装置两侧的能量比例关系如表3所示。同未加消弧线圈的情况相比,暂态电流的幅值和能量有所下降,但仍远大于设定的阈值,不影响这种判断方法的正确性。

表3 中性点经消弧线圈接地系统线路故障暂态电流能量比
Tab.3 Energy ratio of transient current in neutral grounded system through arc conductor

线路	1(故障)	2(非故障)	3(非故障)	4(非故障)
Ratio _F	24.114 7	0.099 2	0.067 8	0.067 7

3 结论

(1) 小电流接地系统单相接地短路时,接地电容电流的暂态分量有幅值大,衰减时间短的特点,合理利用暂态信号中的特征分量可以显著提高选线精度。

(2) 故障暂态信号的频谱同线路结构和系统元件参数直接相关,很难找到一个适用于所有线路结构的主振频率作为故障选线的分析依据。

(3) 通过电磁暂态分析,在线路初始端处安装一定频率的谐振装置,可以明显改变该处线路特征阻抗,使相应频率的暂态高频电流成分在通过前的故障侧被放大,通过后则被衰减,从而人为扩大了两侧暂态电流成分的差异,提高了采用信号能量成分进行选线比较的判据可靠性。

(4) 采用小波分析对暂态信号进行多分辨时频分析和多尺度边缘检测,利用谐波小波频域紧支持性强、算法简单的优点,可以对暂态信号进行快速地频带提取和计算,能够满足系统对故障处理实时性的要求。鉴于篇幅有限,本文没有过多叙述。

参考文献

- [1] 肖白, 束洪春, 高峰. 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 继电器, 2001,29(4): 16-20.
XIAO Bai, SHU Hong-chun, GAO Feng. Survey of the Methods of Fault Line Selection for Single-Phase-to-Earth Fault in Networks with Ungrounded Neutral [J]. Relay, 2001,29(4):16-20.
- [2] 陶沛荣. 小电流接地选线方法分析[J]. 电气传动自动化. 2004, 26(6):56-69.
TAO Pei-rong. Analysis of Wire Selection Methods on Small-Current Earthing [J]. Electrical Drive Automation, 2004, 26(6):56-69.
- [3] 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.
- [4] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(4): 1-6.
DONG Xin-zhou, BI Jian-guang. Analysis on Transient Traveling Wave and Study on Fault Line Selection for Distribution Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 1-6.
- [5] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠, 等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9):48-53.
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin, et al. Earth Fault Protection in Non-Solid Earthed Network Based on Transient Zero Sequence Current Comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9):48-53.
- [6] 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): 45-47.
DAI Jian-feng, ZHANG Yan-xia. Study on Adaptively Choosing Fault Based on Analysis of Multi-Frequency Bands [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 45-47.
- [7] ZHANG Dong-jiang, Wu Q H, Bo Z Q, et al. Transient Positional Protection of Transmission Lines Using Complex Wavelets Analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 705-710.

收稿日期: 2008-10-30

作者简介:

史燕琨(1972-), 男, 工学博士, 主要从事配电网优化及电能质量分析与控制等方面研究。E-mail: shiyk@163.com