

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200670

基于中值电阻投切的故障选线与定位新方法

李振兴¹, 万佳灵¹, 王新¹, 翁汉琍², 李振华¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要: 消弧线圈接地系统并联中值电阻为故障选线与定位增大了信息的可利用度, 基于此提出利用中值电阻投入前后工频增量系数的选线与定位方法。分析了中值电阻在系统故障时的投切时间, 并梳理了投入前后零序电流工频信息的故障特征及其差异性。研究发现在投切电阻时故障线路零序电流分量突增而健全线路零序电流分量降低; 故障区段的上游段零序电流分量突增而下游段零序电流分量降低。针对此差异性, 计算投入电阻前后零序电流分量半周积分值的比值为工频增量系数 K , 基于故障线路与健全线路的 K 值比较及故障区段的上游与下游 K 值比较, 实现故障选线和区段定位。利用 Matlab/Simulink 建立混合电缆-架空线系统仿真模型, 仿真结果验证了所提出选线定位方法的有效性。

关键词: 消弧线圈接地系统; 并联中值电阻; 故障选线与定位; 零序电流工频分量; 增量系数

A novel method of fault line selection and section location based on the input and cutoff of medium resistance

LI Zhenxing¹, WAN Jialing¹, WANG Xin¹, WENG Hanli², LI Zhenhua¹

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Cascaded Hydropower Stations Operation & Control, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: An arc suppression coil-grounded system with medium resistance increases the availability of information for fault line selection and section location. This paper proposes a novel method of fault line selection and section location based on the increment coefficient of power frequency. It analyses the input time and the cutoff time of medium resistance when the system fails and explains the fault characteristics and differences of power frequency information of zero sequence current between the input and the cutoff of medium resistance. Research shows that the zero-sequence current component of a fault line increases rapidly and the zero-sequence current component of a healthy line decreases. The zero sequence current component of a fault section upstream increases rapidly and downstream it decreases. Aiming at the difference, the half cycle integral values of zero sequence current component are calculated as an increment coefficient of power frequency K . Based on the comparison of the K value of the fault line and a healthy line, and the K value between upstream and downstream in the fault section, the method achieves fault line selection and section location. A hybrid cable-overhead line system simulation model is established in Matlab/Simulink, and results verify the effectiveness of the fault line selection and location method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077120).

Key words: arc suppression coil grounded system; parallel medium resistance; fault line selection and location; power frequency component of zero sequence current; increment coefficient

0 引言

对于配网不接地系统, 发生单相接地故障的概

率最大。当系统发生单相接地故障时接地点电流较大, 会给配网带来严重的安全隐患, 因此现在配网以消弧线圈接地方式应用最为广泛^[1]。消弧线圈采用过补偿的运行方式可以避免故障时严重的中性点电压偏移。又因流过接地点的为电感电流, 熄弧后故障相电压恢复速度较慢, 接地电弧不易重燃, 故

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077120); 三峡大学学位论文培育基金项目资助(2021SSPY056)

普遍采用过补偿的运行方式^[2-4]。在过补偿运行方式下,其产生的感性电流补偿故障线路的容性电流,会使故障线路电流反向,故障线路零序电流与健全线路零序电流趋于一致,常用的选线方法无法适用,这增加了故障线路识别的难度^[5-6]。因此在此基础上引入并联中值电阻,分析中值电阻投切前后零序电流故障特征及其差异性进行故障选线可以解决上述选线困难的问题。

在已有的多种故障选线方法中,基于故障线路和非故障线路零序电流的幅值和相位特征提出了多种稳态量分析的选线方法^[7-9],但对于中性点经消弧线圈接地系统,由于消弧线圈的补偿作用,故障线路零序电流相位和幅值均发生改变,基于稳态量的选线方法不再适用。而基于故障暂态信号分析的选线方法^[10-12]适用于该系统,使用小波工具^[13]在分析暂态信号和非平稳信号时具有优越性。但是在相电压过零点附近或线路末端发生高阻接地故障时,由于其故障暂态分量小,暂态时间短,目前的暂态选线方法无法准确判断故障线路。基于线路零序电流和接地电流比值 K 因子的故障选线方法^[14]能够对金属接地和高阻接地进行正确选线,但没有对中值电阻的投切时间和大小的影响进行分析。基于故障线路与正常线路零序电流之比和系统投切系数的故障选线方法^[15]可以对母线接地和高阻接地进行准确选线,但缺少并联中值电阻前后故障特征差异性分析。因此提出一种更加精确的基于电阻投切前后工频增量系数的故障选线新方法。

本文从经消弧线圈接地系统出发,应用小波变换工具和半周积分算法,分析当系统发生单相接地故障时中值电阻投切前后零序电流故障特征和差异性,解决了因高阻接地等造成的选线困难,达到了提高选线精度、提升供电可靠性的目的。

1 消弧线圈并联中值电阻接地系统

消弧线圈并联中值电阻系统发生单相接地故障模型图如图 1 所示,假设线路 L_3 的 A 相发生单相接地故障,系统容性电流流向如图中实线所示。 U_A 、 U_B 、 U_C 分别表示系统三相等值电源, K 表示中性点并联中值电阻的开关, C_{01} 、 C_{02} 分别表示支路 L_1 、 L_2 对地电容, C_{03} 表示支路 L_3 故障点与母线间对地电容, C'_{03} 表示支路 L_3 故障点与负荷间对地电容。

1.1 并联中值电阻的选取

依据中性点并联中值电阻的基本要求^[9],以消弧线圈并联中值电阻仿真模型为基础调节消弧线圈脱谐度与并联中值电阻,记录系统在不同过渡电阻

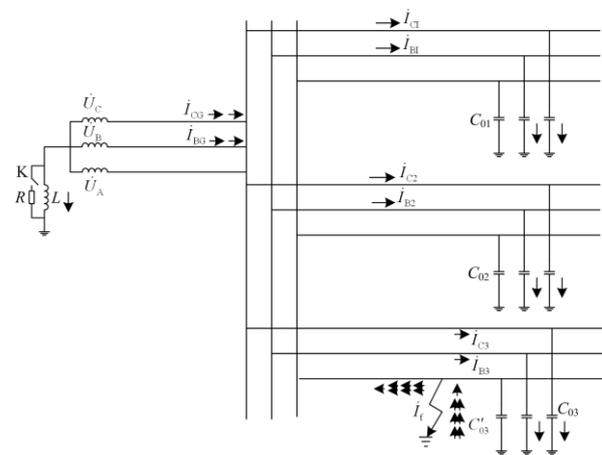


图 1 消弧线圈并联中值电阻系统单相接地故障示意图
Fig. 1 Schematic diagram of single-phase grounding fault of arc suppression coil in parallel with median resistance system

下故障线路零序电流数值。附录中表 1、2、3 分别为过渡电阻为 0Ω 、 150Ω 、 300Ω 时不同脱谐度,不同并联中值电阻下的故障线路零序电流值。通过附录中数值进行分析比较,在满足中性点并联中值电阻的基本要求的前提下有结论:

系统参数脱谐度 ν 绝对值为 10%、中值电阻为 300Ω 的条件下,接地点残余电流满足上述基本要求。在系统参数脱谐度 ν 的绝对值为 20%、中值电阻为 300Ω 的条件下,当系统发生金属性或者低阻故障时,故障线路接地点残余电流幅值略大于 10 A ,但随着过渡电阻的增加,其接地点残余电流呈现减小的趋势,当过渡电阻在 150Ω 附近时,系统残余电流值满足该电压等级下故障电流小于 10 A 的要求。

综合可知以消弧线圈并联中值电阻仿真模型为基础,选取中性点并联中值电阻为 300Ω 时,在满足故障点残余电流小于 10 A 的条件下,保证在不同接地过渡电阻情况下均能够为选线提供足够的故障信息,可以达到最佳仿真效果。

1.2 并联中值电阻投入时间

当系统发生单相接地故障时,中值电阻何时投入效果最佳目前少有研究。考虑到故障初期暂态信号的干扰因素,中性点投入并联电阻的时间应该遵守以下原则:在系统接地由暂态过渡到稳态后,此时投入并联中值电阻。因此,必须分析系统发生单相接地故障时的暂态过渡过程及暂态持续时间。

图 2 所示为中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障暂态零序等效电路,图中, $U_0(t)$ 为零序电压源, L_0 、 $3C_{0\Sigma}$ 分别为系统零序电感和系统对地零序电容之和, R 为故障点的接地电阻。

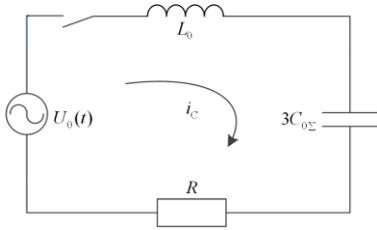


图2 过渡过程等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of transition process

分析图2, 列出此回路的微分方程:

$$Ri_c + L_0 \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{3C_{0\Sigma}} \int_0^t i_c dt = u_0(t) \quad (1)$$

式中, $u_0(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, U_m 表示系统正常运行时线路相电压幅值, φ 为系统故障初始时刻线路相电压的初相角。通过对式(1)进行拉普拉斯变换与反变换处理可得:

$$i_f = i_c + i_L = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\frac{t}{\tau_c}} + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad (2)$$

式中, ω_f 为故障系统等值网络下暂态容性电流自由振荡分量的角频率。

$$\text{令 } i_c'' = I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\delta t}, \text{ 表}$$

示故障线路暂态容性电流自由分量幅值, $\delta = \frac{1}{T_C} =$

$\frac{R}{2L_0}$ 为故障系统暂态容性电流自由分量衰减系数,

T_C 为故障系统等值回路的时间常数。令 $i_c' = I_{Cm} \cos(\omega t + \varphi)$, 表示故障线路容性电流稳态分量幅值。系统中故障线路零序电流的容性分量主要由暂态容性自由分量 i_c'' 和稳态容性分量 i_c' 构成。

当消弧线圈接地系统发生单相的接地故障时, 在故障合闸角达到峰值时, 系统中故障线路的暂态电容电流分量达到最大, 故将 $t = T_f / 4$ 、 $\varphi = \pi / 2$ 代入式(2), 得到此时系统的暂态零序电容电流为

$$i_{C,\max}'' = I_{Cm} \frac{\omega_f}{\omega} e^{-\frac{T_f}{4T_C}} \quad (3)$$

分析式(3)可知, 系统零序电流容性暂态自由分量 i_c'' 随时间衰减的速度取决于衰减系数 T_C , 在实际系统中, 架空线路等值零序电感值很小, 且在单相接地故障时故障回路均有一定数值的过渡电阻, 因此系统等值放电回路的自由振荡分量的衰减系数 δ 值较大, 衰减常数 T_C 较小, 等值放电回路衰减速度

快, 衰减时间短(大约为 5 ms)。基于上述分析, 在系统发生单相接地后的首个工频周期内, 线路的暂态高频分量可认为衰减为零, 且接地点过渡电阻值越大, 系统暂态高频分量幅值越小、衰减速度越快, 由暂态过渡到稳态时间越短。结合系统发生单相接地故障时暂态零序电流波形可知线路零序电流在 1~2 个工频周波内暂态高频分量逐渐衰减至零。

综上可得: 在系统发生单相接地故障 2 个工频周期后, 投入中性点并联中值电阻, 此时不受零序电流暂态高频分量的影响, 具有较好的选线效果。

1.3 对并联中值电阻切除时间的分析

由于投入中值电阻后故障线路除了近乎相等的感性电流和容性电流外还会产生残余电流 I_R , 而 35 kV 配网故障电流不能超过 10 A, 否则因绝缘老化等问题产生的电弧无法自然灭弧, 长时间的电弧会给系统带来严重的安全隐患。将并联中值电阻设置为最佳时进行不同过渡电阻下的仿真研究可以发现残余电流幅值在投入中值电阻后每个周期内都有一段周波超过规定电流值, 长期并联中值电阻的系统发生故障会造成无法自熄的电弧, 电弧温度很高, 可能会引起爆炸和火灾等事故, 伴随电弧产生的能量大而且集中, 会造成一定范围内气压剧增并伴有辐射, 可能会严重损害其他设备^[16-19]。进一步可能会因为发生三相不对称短路产生负序电流, 在发电机中将引起附加加热损耗, 烧毁发电机。因此可以得出结论: 中值电阻投入后, 在完成故障选线后需要尽早切除。

2 并联中值电阻前后的故障特征分析

为使分析过程更加简洁清晰, 本文对系统参数进行以下处理。1) 忽略线路相间电容。对于实际线路, 由于线路与地间电位相差较大, 使得线路对地电容远大于线路相间电容, 其数量级甚至达到百倍, 故在等效电路中可不计线路相间电容对系统的影响。2) 忽略线路对地电导。对于实际线路, 由于线路电导很小, 在晴天情况下, 其产生的泄露电导消耗也很小, 可不考虑其对系统的影响, 故在等效电路中可不计有功损耗对系统的影响。

假设系统三相对称, 考虑到忽略线路相间电容和接地电导后, 消弧线圈并联中值电阻系统等效电路简化结果如图 3 所示。其中, U_0 表示系统中性点零序电压, E_c 表示系统电源电压, R 表示接地过渡电阻, I_D 表示接地点流过的电流, $3C_{0\Sigma}$ 表示线路三相对地电容, I_C 表示三相对地电容电流, L 表示系统中性点消弧线圈, I_L 表示消弧线圈流过电流, k 表示并联中值电阻开关, R_n 表示并联中值电阻, I_R 表示并联中值电阻流过的电流。

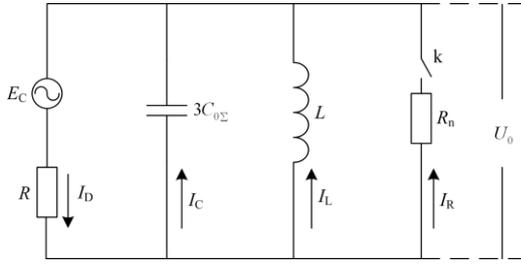


图3 系统等效电路图

Fig. 3 System equivalent circuit diagram

2.1 中值电阻投入前故障特征

中值电阻投入前, 由于消弧线圈的补偿作用, 故障线路零序电流 i_{0n} 数值较小, 为容性电流。且系统补偿点一般位于谐振点附近, 其值较小, 近似为 0, 依据基尔霍夫定律, 可认为母线中性点电压 u_0 近似等于接地点电压 u_f 。结合上述分析, 研究中值电阻投入前系统零序电流及中性点电压变化情况, 由图 3 分析可得:

$$3\dot{I}_{01} = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} = j\omega C_{01}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = 3j\omega C_{01}\dot{U}_0 \quad (4)$$

中值电阻投入前系统中性点零序电压为

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{E}_C}{R + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j3\omega C_{0\Sigma}}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j3\omega C_{0\Sigma}} = \frac{\dot{E}_C}{R\left(\frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j3\omega C_{0\Sigma}}\right) + 1} = \frac{-\dot{E}_C}{1 + jR(3\omega C_{0\Sigma} - \frac{1}{\omega L})} \quad (5)$$

中值电阻投入前故障线路零序电流为

$$3\dot{I}_{03} = \dot{I}_{A3} + \dot{I}_{B3} + \dot{I}_{C3} = \dot{I}_L + \dot{I}_{C\Sigma} = \left\{ j\left[\frac{1}{\omega L} - 3\omega(C_{01} + C_{02}) \right] \right\} \cdot \dot{U}_0 \quad (6)$$

中值电阻投入前故障点区段上游零序电流为

$$\dot{I}_{03f} = \left\{ j\left[\frac{1}{\omega L} - 3\omega(C_{01} + C_{02} + C_{03}) \right] \right\} \cdot \dot{U}_0 \quad (7)$$

中值电阻投入前故障点区段下游零序电流为

$$3\dot{I}_{03'} = \dot{I}_{A3'} + \dot{I}_{B3'} + \dot{I}_{C3'} = j\omega C_{03'}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = 3j\omega C_{03'}\dot{U}_0 \quad (8)$$

2.2 中值电阻投入后故障特征

进一步研究投入电阻后系统零序电流及中性点电压变化。

中值电阻投入后中性点零序电压为

$$\dot{U}'_0 = -\frac{\dot{E}_C}{R + \frac{1}{\frac{1}{R_n} + \frac{1}{j\omega L} + j3\omega C_{0\Sigma}}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_n} + \frac{1}{j\omega L} + j3\omega C_{0\Sigma}} = \frac{\dot{E}_C}{R\left(\frac{1}{\frac{1}{R_n} + \frac{1}{j\omega L} + j3\omega C_{0\Sigma}}\right) + 1} = \frac{-\dot{E}_C}{1 + \frac{R}{R_n} + jR(3\omega C_{0\Sigma} - \frac{1}{\omega L})} \quad (9)$$

中值电阻投入后故障线路零序电流为

$$3\dot{I}_{03'} = \dot{I}_{A3} + \dot{I}_{B3} + \dot{I}_{C3} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_{C\Sigma} = \left\{ -\frac{1}{R_n} + j\left[\frac{1}{\omega L} - 3\omega(C_{01} + C_{02}) \right] \right\} \cdot \dot{U}'_0 \quad (10)$$

中值电阻投入后故障点区段上游零序电流为

$$\dot{I}_{03f'} = \left\{ -\frac{1}{R_n} + j\left[\frac{1}{\omega L} - 3\omega(C_{01} + C_{02} + C_{03}) \right] \right\} \cdot \dot{U}'_0 \quad (11)$$

中值电阻投入后短路点故障电流之和为

$$\dot{I}_D = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_{C\Sigma} = \left(\frac{1}{R_n} + \frac{1}{j\omega L} + j3\omega C_{0\Sigma} \right) \dot{U}'_0 = \left(\frac{1}{R_n} + j\frac{3\omega^2 LC_{0\Sigma} - 1}{\omega L} \right) \dot{U}'_0 \quad (12)$$

分析式(10)一式(12)可知, 中性点接入并联中值电阻后, 故障线路上游与故障点之间增加了有功零序电流分量, 其方向与初始故障线路零序电流方向相同, 两者相互叠加使故障所在区段上游零序电流增加, 而故障所在区段下游即故障区段下一区段上游零序电流减小。故障线路零序电流较于中值电阻投入零序电流幅值发生较大变化, i_{03} 呈现增大趋势, 其数值较大。依据基尔霍夫定律, 并结合式(5)、式(9)可得系统中性点电压 u_0 减小, 再结合式(4)分析可得健全线路零序电流 i_{01} 、 i_{02} 呈现减小趋势, 且过渡电阻越大, 减小趋势越明显, 越有利于高阻故障识别。

综上: 中性点并入中值电阻后, 系统中性点零序电压降低, 故障点的接地电流也随之减小, 因此中值电阻的投入既降低中性点电压对系统绝缘水平的冲击, 又提高系统安全运行的可靠性。由投入中值电阻前后的故障线路与健全线路的零序电流公式可以明显分析出两者的差异性进行故障选线。

3 基于增量系数的故障选线原理

3.1 中值电阻投切前后的增量差异

如何快速完成故障选线, 是系统能够快速恢复正常运行的前提。若有效利用投入后暂态期间故障信息构建选线判据, 可有效保证故障线路的快速识别。结合上一节的理论分析, 中值电阻投切后, 其产生的有功零序电流叠加于故障线路容性零序电流, 使得故障线路零序电流急剧增加, 工频零序电流幅值变化较大。且在投入后的首半波内故障线路经历了暂态波动, 但由于零序电流高频分量较为微弱, 可忽略其对工频分量的影响。中值电阻投入前后其零序电流经历了较小的暂态过程, 数值基本不发生变化。基于上述分析, 在后续的研究中滤除线路零序电流的高频分量, 利用中值电阻投切前后零序电流工频分量差异构建选线判据。

3.2 半周积分算法

基于半周积分算法^[20]求取积分信息。设角频率为 ω , 初相角为 ϕ , 有效值为 I 的正弦电流 $i(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \phi)$, 对其在任意半个周期 $T/2$ ($T = 2\pi/\omega$) 内取绝对值的积分, 其结果是与初相角无关的常数, 即

$$S = \int_0^T |i(t)| dt = \sqrt{2}I \int_0^T \sin(\omega t + \phi) dt = \frac{\sqrt{2}I}{\omega} \left[\int_0^\phi \sin(\omega t) d\omega t + \int_\phi^\pi \sin(\omega t) d\omega t \right] = \frac{2\sqrt{2}I}{\omega} \quad (13)$$

利用矩形法离散求和代替连续积分有 $S = T_s \sum_{k=1}^{N/2} |i(k)|$, 且有 $\omega T_s = 2\pi/N$, 可得

$$S = 2 \frac{\pi}{N\omega} \sum_{k=1}^{N/2} |i(k)| \quad (14)$$

其中: $i(k)$ 为第 k 点电流采样值; T_s 为采样间隔时间; N 为基频周期的采样点数。

3.3 基于增量系数 K 的选线定位判据

假设中值电阻投入时刻为 t_1 , 则选取时间窗口为 $[t_1 - T/2, t_1 + T/2]$ 。基于上述步骤, 利用 db10 小波函数将故障线路零序电流分解为工频小波系数和高频小波系数并进行小波重构, 继而提取出故障线路零序电流工频分量^[21-23]。如图 4 所示, 选取中值电阻投切前后 1/2 个工频周期作为数据窗口, 利用基于中值电阻投切前后故障线路工频电流幅值增量特征构建保护判据。

由上述分析可知中值电阻投切前后零序电流工

频分量幅值变化较大, 利用半周积分算法分别求取投切前故障线路零序工频电流积分为 S_1 , 投切后零序工频电流积分值为 S_2 。定义增量系数 K 为

$$K = \frac{S_2}{S_1} \quad (15)$$

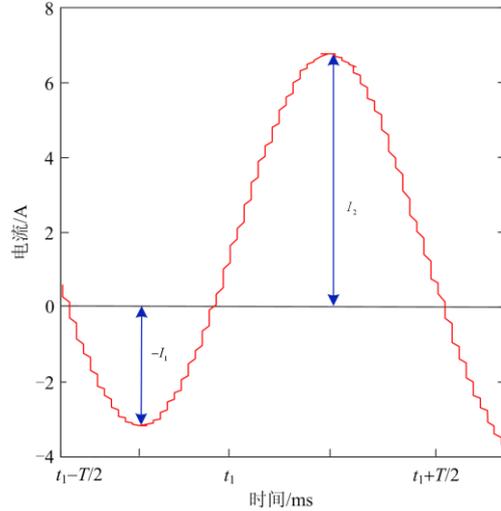


图 4 故障线路中值电阻投切前后零序电流工频分量

Fig. 4 Power frequency component of zero sequence current between the input and the cutoff of medium resistance

式(15)中, K 值大小能够反映中值电阻投切前后线路零序电流工频分量面积大小差异关系。针对故障线路, 由于零序电流工频分量突变特性, 中值电阻投入后其面积增大, 前后面积差异较大, 故 K 值明显大于 1; 对于健全线路而言, 由于中值电阻的投入不会引起健全线路参数变化, 中值电阻投入后其面积几乎不变, 前后面积差异较小, 但零序电流工频分量幅值随着中值电阻投入后中性点电压降低而降低, 因此线路 K 值小于 1 并趋向于 1。综上可得, 健全线路 K 值小于故障线路 K 值。当发生母线故障时, 各线路零序电流在中值电阻投切前后几乎不变, 因此各线路 K 值差异不大。因故障区段上游零序电流增加, 计算各区段上游 K 值, 同样通过故障区段 K 值与可靠系数的大小来区分, 计算过程与选线时相同。

为保证故障选线的可靠性, 选线判据要有足够的裕度。考虑到测量误差与计算精度的影响, 故障选线判据为

$$K > k_{rel} \quad (16)$$

式中, k_{rel} 为可靠系数, 取 1.1~1.2。当线路 K_i 满足上述条件时, 即认为线路 i 为故障线路, 否则, 认为线路 i 为健全线路。区段 K_j 定位判据同上, 当线路 K_j 满足上述条件时, 即认为区段 j 为故障区段,

否则, 认为区段 j 为健全区段。对各线路各区段 K 值逐个进行计算和判断。

故障选线定位流程图如图 5 所示。

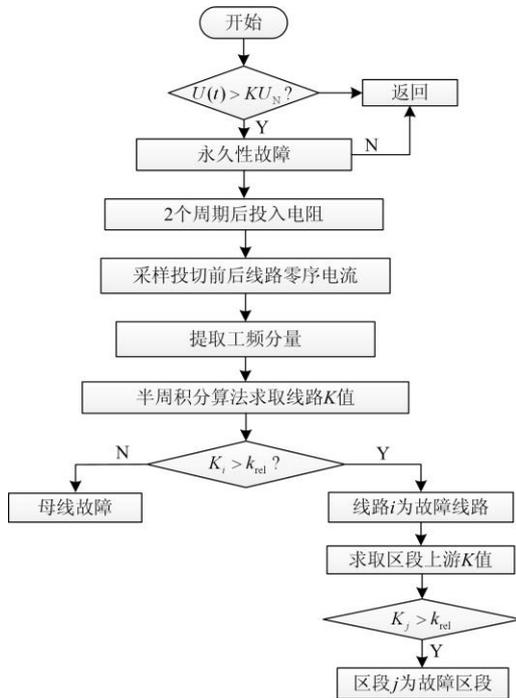


图 5 故障选线流程图

Fig. 5 Fault line selection flowchart

4 消弧线圈并联中值电阻系统仿真验证

4.1 消弧线圈并联中值电阻仿真模型

基于 Matlab/Simulink 建立 35 kV 配电网多馈出线仿真系统, 其结构拓扑如图 6 所示。本文根据《电工技术手册》中的架空线路杆塔模型标准参数, 标准 35 kV 电缆线路(单芯额定电压 35 kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆)的参数值进行等值计算后, 将等值数据导入所建立的模型线路中进行仿真验证。

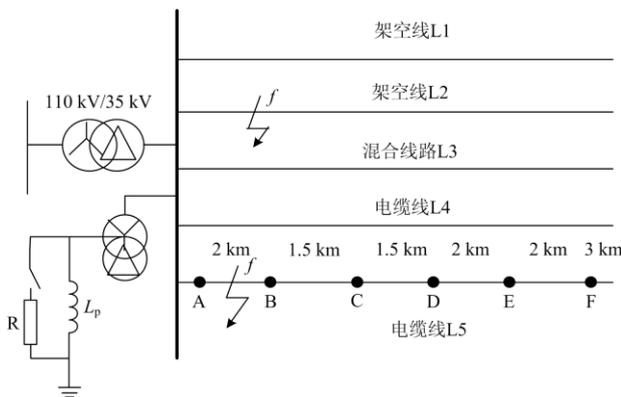


图 6 仿真模型拓扑结构图

Fig. 6 Simulation model topology diagram

模型包含 5 条馈出线, 变压器中性点通过消弧线圈并联中值电阻接地, 变压器采用过补偿方式运行。其中: 架空线路 $L_1=15$ km, $L_2=20$ km; 电缆线路 $L_4=20$ km, $L_5=12$ km; 线-缆混合线路 $L_3=17$ km, 架空线路 7 km, 电缆线路 10 km。根据 1.1 节对本文中消弧线圈并联中值电阻仿真模型的分析, 设置并联中值电阻为 300Ω 进行仿真验证可以达到最佳的仿真效果。在实际应用中可以类似本文中的最佳并联电阻的选取过程, 先在当前系统下做几组预实验, 设置由小到大的几组并联中值电阻值在不同过渡电阻、不同脱谐度下进行实验来选取符合基本要求的最佳并联中值电阻值, 再进行后续的中值电阻投切故障选线流程。

考虑影响选线及定位的因素, 通常的高阻选线容易受到噪声环境等影响, 在使用电流互感器测量时, 其结果偏差较大, 从而影响选线的精度。但是并联中值电阻后, 由于增加了零序电流的有功分量, 零序电流幅值增加, 克服了噪声的干扰。由于采用的半周积分算法不受合闸角影响, 又当过渡电阻一定时, 由于中值电阻投切时间处于系统稳态期间, 线路零序电流大小与故障合闸角无关。

4.2 故障选线仿真

为进一步研究过渡电阻及故障位置对选线新原理的影响, 基于图 6 仿真模型, 仿真得到如图 7 为系统在过渡电阻 500Ω 时, 故障线路 L_5 的零序电流波形。图 8 为系统在过渡电阻 500Ω 时, 健全线路 L_2 的零序电流波形。(图中横轴表示时间, 单位: ms; 纵轴表示电流, 单位: A)

通过图 7 和图 8 分析可知, 在投入中值电阻后故障线路和健全线路零序电流有显著的差异性。对于故障线路而言, 过渡电阻越大, 中值电阻投切后零序电流增量越小, 两者呈现负相关性, 但零序电

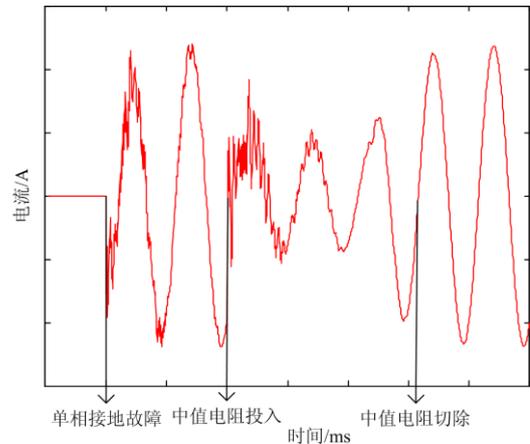


图 7 健全线路零序电流波形

Fig. 7 Sound line zero sequence current waveform

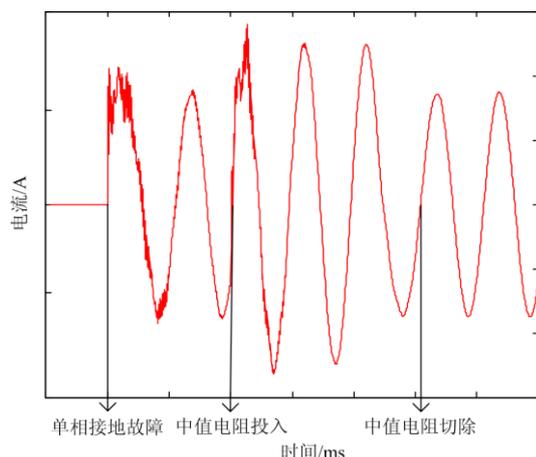


图 8 故障线路零序电流波形

Fig. 8 Fault line zero sequence current waveform

流工频分量仍呈现上升趋势。对于健全线路而言, 当过渡电阻较小时, 其零序电流在中值电阻投切前后几乎不变, 随着过渡电阻的增加, 当电阻值大于一定数值时, 过渡电阻呈现高阻特性, 工频分量在投切后呈现减小趋势, 高频分量呈现上升趋势, 但由于高频分量较为微弱, 对选线原理影响较小, 可忽略高频分量。而健全线路零序电流明显减小, 其趋势不同于故障线路。

设置电缆线路 L_5 、架空线路 L_2 发生不同故障位置、不同过渡电阻下单相接地故障, 其仿真结果如表 1、表 2 所示。表中的 K_1 — K_5 表示不同故障线路、不同过渡电阻下的各线路增量系数值。

表 1 L_5 故障时不同过渡电阻下的选线结果

Table 1 Line selection results under different

transition resistances in L_5 fault

R_g/Ω	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	结果
0	0.99	0.98	1.00	0.99	2.42	正确
100	0.96	0.93	0.96	0.95	1.83	正确
300	0.87	0.87	0.84	0.85	1.58	正确
500	0.74	0.75	0.73	0.78	1.31	正确

表 2 L_2 故障时不同过渡电阻下的选线结果

Table 2 Line selection results under different

transition resistances in L_2 fault

R_g/Ω	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	结果
0	0.99	2.51	0.98	0.99	0.99	正确
100	0.94	1.75	0.92	0.94	0.93	正确
300	0.84	1.43	0.86	0.89	0.86	正确
500	0.79	1.25	0.83	0.83	0.81	正确

由表 1、表 2 分析可得, 故障线路 K 值均大于门槛值且大于非故障线路 K 值。过渡电阻越小, 故

障线路与非故障线路 K 值差值越大。随着过渡电阻的增加, 故障线路 K 值呈现减小的趋势, 非故障线路 K 值同样呈现减小的趋势, 但两者仍存在一定的数值差异。针对于高阻故障, 两者仍满足判据要求, 能够完成高阻选线, 具备较高的适用性。

4.3 故障区段定位仿真

故障区间定位使在故障选线的基础上进行进一步定位, 在完成上小节故障选线的基础上将电缆线路 L_5 分成 5 个区段 $AB=2$ km, $BC=1.5$ km, $CD=1.5$ km, $DE=2$ km, $EF=2$ km, 将单相接地故障设在区段 AB 内, 通过比较各区段上游增量系数 K 值进行区段定位。

在本文第 2 节中已经对故障区段的上游故障零序电流进行分析, 得出在中值电阻投入后故障区段上游零序电流会变大的结论。由表 3 可看出, 投入中值电阻而后出现故障区段增量系数在不同过渡电阻下均大于可靠系数, 符合理论分析结果。随着过渡电阻的增加, 故障区段 K 值呈现减小的趋势, 非故障区段 K 值同样呈现减小趋势, 但两者仍存在一定数值差异, 因此在高阻接地情况下也能完成故障区段定位。仿真结果表明利用故障与非故障区段上游的增量系数差异可以达到故障区段定位的目的。

表 3 不同过渡电阻下的区段定位结果

Table 3 Section locating results under different transition resistances

R_g/Ω	K_{AB}	K_{BC}	K_{CD}	K_{DE}	K_{EF}	结果
100	2.03	0.75	0.72	0.75	0.74	正确
300	1.32	0.54	0.56	0.55	0.54	正确
500	1.15	0.43	0.45	0.44	0.44	正确

5 结论

本文的工作成果进一步丰富完善了小电流接地系统单相接地故障故障选线和定位的研究, 但是, 鉴于条件和时间所限, 仍有以下问题有待进一步研究与探讨:

1) 目前高阻故障仍为故障选线的难点之一, 本文所提方法虽然能在一定程度上解决该类问题, 但由于高阻故障暂态信号弱, 故障波形高度非线性化, 使得选线精度仍有待提高, 若现场条件复杂, 所提新方法可靠性仍有待进一步研究。

2) 本文所提新原理仍停留在理论仿真阶段, 且对仿真采样频率要求严格、仿真条件相对较为理想, 与实际配网运行条件仍有一定差距。同时随着大量新能源接入配网, 此选线方法是否仍然适用有待后续验证。

附录

表 1 过渡电阻为 0Ω 时的故障电流值Table 1 Fault current when the transition resistance is 0Ω

脱谐度/%	并联电阻/ Ω			
	0	100	300	500
0	30.56	20.97	7.97	6.94
+5	34.58	24.52	8.86	7.85
-5	33.49	24.29	8.75	7.68
+10	36.21	26.28	9.75	8.26
-10	36.17	26.02	9.84	8.52
+20	38.36	29.62	10.65	8.96
-20	38.47	29.74	11.07	8.54

表 2 过渡电阻为 150Ω 时的故障电流值Table 2 Fault current when the transition resistance is 150Ω

脱谐度/%	并联电阻/ Ω			
	0	100	300	500
0	20.35	12.24	5.47	4.04
+5	23.24	13.57	6.86	4.85
-5	23.36	13.35	6.75	4.68
+10	25.32	15.21	7.72	5.06
-10	25.69	15.65	7.61	5.12
+20	29.36	18.62	8.65	6.54
-20	29.47	18.74	8.07	6.33

表 3 过渡电阻为 300Ω 时的故障电流值Table 3 Fault current when the transition resistance is 300Ω

脱谐度/%	并联电阻/ Ω			
	0	100	300	500
0	12.42	7.24	3.96	3.14
+5	12.94	7.97	4.56	3.84
-5	12.83	8.42	4.74	3.62
+10	13.54	9.31	5.53	4.21
-10	13.63	9.61	5.54	4.36
+20	15.54	10.62	6.14	4.74
-20	15.35	10.23	6.23	5.01

参考文献

- [1] 薛永端, 李娟, 徐丙垠, 等. 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.
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin, et al. Transient equivalent circuit and transient analysis of small current grounding fault in neutral point arc suppression coil grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [2] 安东亮, 陈涛, 李军, 等. 基于半波傅氏算法的小电流接地选线装置设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 157-163.
AN Dongliang, CHEN Tao, LI Jun, et al. Design of small current grounding line selection device based on half-wave Fourier algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 157-163.
- [3] HUANG C, TANG T, JIANG Y Q, et al. Faulty feeder detection by a adjusting the compensation degree of arc-suppression coil for distribution network[J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2018, 12(4): 807-814.
- [4] ARI N, PERTTI J. Identification of high-impedance earth faults in neutral isolated or compensated MV networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1187-1195.
- [5] 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, 2004, 24(6): 54-58.
WANG Yaonan, HUO Bailin, WANG Hui, et al. A new criterion for fault line selection of small current grounding system based on wavelet packet[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-58.
- [6] 邱进, 田野, 李冠华, 等. 基于现场实录波形的小电流接地故障暂态选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 180-187.
QIU Jin, TIAN Ye, LI Guanhua, et al. Research on transient line selection of small current grounding fault based on field recorded waveforms[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 180-187.
- [7] XU Yan, LIU Jingyan, FU Yuan. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.
- [8] 刘谋海, 方涛, 姜运, 等. 基于暂态主频分量相关性分析的故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 74-79.
LIU Mouhai, FANG Tao, JIANG Yun, et al. Fault line selection method based on correlation analysis of transient main frequency components[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 74-79.
- [9] 李森, 宋国兵, 康小宁, 等. 基于时域下相关分析法的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 15-20.
LI Sen, SONG Guobing, KANG Xiaoning, et al. Small current ground fault line selection based on correlation analysis method in time domain[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 15-20.
- [10] 桑振华, 苗晓鹏, 李晓波, 等. 基于调相法的消弧线圈自动跟踪补偿的测量方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 104-107.
SANG Zhenhua, MIAO Xiaopeng, LI Xiaobo, et al.

- Measurement method for automatic tracking compensation of arc suppression coil based on phase modulation method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 104-107.
- [11] 束洪春, 徐亮, 彭仕欣, 等. 谐振接地电网故障选线相关分析法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9): 6-9.
SHU Hongchun, XU Liang, PENG Shixin, et al. Correlation analysis method for fault line selection of resonance grounded power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 6-9.
- [12] 薛永端, 李娟, 陈筱蕾, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5037-5048.
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaolei, et al. Transient line selection and transient resistance identification of high-resistance grounding faults in resonant grounding systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5037-5048.
- [13] 郭爱智, 王勇, 苏晓庆, 等. 利用小波分解重构提取高频 GPS 数据静态永久性变形[J]. 武汉大学学报, 2013, 38(10): 1192-1195, 1261.
GUO Aizhi, WANG Yong, SU Xiaoqing, et al. Using wavelet decomposition and reconstruction to extract static permanent deformation of high-frequency GPS data[J]. Journal of Wuhan University, 2013, 38(10): 1192-1195, 1261.
- [14] 朱以屏. 消弧线圈接地系统采用中电阻选线的原理及应用[J]. 华东电力, 2004, 32(11): 20-22.
ZHU Yiping. Principle and application of medium resistance line selection in arc suppression coil grounding system[J]. East China Electric Power, 2004, 32(11): 20-22.
- [15] 明志强, 许虎. 经消弧线圈接地系统的中电阻快速选线方法[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 112-114.
MING Zhiqiang, XU Hu. A method of rapid line selection for medium resistance through arc suppression coil grounding system[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 112-114.
- [16] 郭谋发, 杨耿杰, 黄世远. 谐振接地系统暂态特征自适应故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 35-41.
GUO Moufa, YANG Gengjie, HUANG Shiyuan. Adaptive fault line selection method based on transient characteristics of resonance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 35-41.
- [17] 张海申, 何正友, 张钧. 谐振接地系统单相接地故障频谱特征分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 79-84.
ZHANG Haishen, HE Zhengyou, ZHANG Jun. Analysis of frequency spectrum characteristics of single-phase grounding faults in resonance grounding system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 79-84.
- [18] 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 Xinzhou, BI Jianguang. Analysis of transient traveling waves in distribution lines and research on grounding line selection[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 1-6.
- [19] 牛云涛, 李华, 宋志宏, 等. 谐振接地系统多判据多周期信息融合故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 512-517.
NIU Yuntao, LI Hua, SONG Zhihong, et al. Multi-criterion multi-period information fusion fault line selection method for resonant grounding system[J]. Transactions of the China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 512-517.
- [20] 佟为明, 李中伟, 赵志衡. 微机式过流继电器输入量的测量方法[J]. 低压电器, 2004(8): 11-14.
TONG Weiming, LI Zhongwei, ZHAO Zhiheng. Measurement method of input quantity of microcomputer type overcurrent relay[J]. Low Voltage Apparatus, 2004(8): 11-14.
- [21] 王艳松, 陈国明, 张加胜, 等. 基于小波包的配电网单相接地故障选线新方法[J]. 高电压技术, 2005, 31(6): 78-80.
WANG Yansong, CHEN Guoming, ZHANG Jiasheng, et al. A new method for single-phase ground fault line selection in distribution network based on wavelet packet[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(6): 78-80.
- [22] 陈乐, 薄志谦, 林湘宁, 等. 基于波形相似度比较的线路快速纵联保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5018-5027.
CHEN Le, BO Zhiqian, LIN Xiangning, et al. Research on fast longitudinal protection of line based on waveform similarity comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5018-5027.
- [23] 翁汉琰, 刘华, 林湘宁, 等. 基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 475-482.
WENG Hanli, LIU Hua, LIN Xiangning, et al. New criterion for transformer differential protection based on Hausdorff distance algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 475-482.

收稿日期: 2020-06-11; 修回日期: 2020-09-23

作者简介:

李振兴(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: lzx2007001@163.com

万佳灵(1995—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 2043113136@qq.com

(编辑 葛艳娜)