

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250003

融合两阶段暂态信息的灵活接地系统高阻接地故障选线研究

李晓波, 彭超红, 袁璐健, 张世乐, 周俊, 刘建华, 梁睿

(中国矿业大学电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 灵活接地系统兼具谐振接地系统与小电阻接地系统的优点, 但其采用零序过电流保护, 存在耐过渡电阻能力低的问题。对此, 提出了综合利用灵活接地系统中小电阻投入阶段与消弧线圈补偿阶段暂态信息的选线方法。首先分析了消弧线圈补偿阶段和小电阻投入阶段各线路的零序暂态电流, 发现在消弧线圈补偿阶段故障线路暂态零序电流比非故障线路多了一个流经过渡电阻的电流分量, 而在小电阻投入阶段各线路的暂态零序电流表达式相同。其次根据小电阻投入阶段的暂态零序电流计算各线路对地电容比值, 利用该比值对消弧线圈补偿阶段各条线路的暂态零序电流做差, 发现故障线路与非故障线路暂态零序电流之差为流经过渡电阻的电流, 非故障线路间的暂态零序电流之差为 0。再次通过构建零序电流差值矩阵, 比较矩阵各行各列元素实现故障选线。最后在 PSCAD/EMTDC 和低压实验平台验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 灵活接地; 高阻接地故障; 消弧线圈补偿阶段; 小电阻投入阶段; 暂态零序电流

Research on fault line selection method for high-resistance grounding faults in flexible grounding systems based on integration of two-stage transient information

LI Xiaobo, PENG Chaohong, YUAN Lujian, ZHANG Shile, ZHOU Jun, LIU Jianhua, LIANG Rui

(School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Flexible grounding systems combine the advantages of resonant grounding and low-resistance grounding systems. However, when using zero-sequence overcurrent protection, they exhibit poor tolerance to transition resistance. To address this issue, a fault line selection method is proposed to comprehensively utilize transient information in the low-resistance input stage and arcing coil compensation stage in flexible grounding systems. First, the zero-sequence transient currents of each line during the arc suppression coil compensation stage and the low-resistance input stage are analyzed. It is found that, during the arc suppression coil compensation stage, the faulted line has an additional current component passing through the transitional resistance compared to the healthy lines, while the expressions of transient zero-sequence currents of each line are the same during the low-resistance input stage. Next, by calculating the line-to-ground capacitance ratio based on the transient zero-sequence currents during the low-resistance input stage, the difference between the transient zero-sequence currents of each line during the arc suppression coil compensation stage is obtained using this ratio. The difference of transient zero-sequence currents between the faulted and healthy lines is the current passing through the transitional resistance, while that among the healthy lines is zero. Furthermore, by constructing a matrix of zero-sequence current difference, the fault selection is achieved by comparing the elements of each row and column of the matrix. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed method are validated in PSCAD/EMTDC and a low-voltage experimental platform.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52077215).

Key words: flexible grounding; high-resistance grounding fault; arc suppression coil compensation stage; low-resistance input stage; transient zero-sequence current

0 引言

由于中性点经消弧线圈接地能够有效熄灭并抑

制电弧重燃, 可保证系统带故障运行 2 h, 供电可靠性高, 因而在我国配电网中得到了广泛应用^[1]。但随着配电网的发展, 电缆线路大规模使用导致的对地电容电流激增的问题, 使中性点经消弧线圈接地方式的经济性逐渐降低。鉴于此, 多地开始采用中

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助 (52077215)

性点经小电阻接地方式^[2]。小电阻接地方式在发生故障时,具有过电压水平低、快速切除故障线路等优点^[3],但其供电可靠性较低。为兼顾小电阻接地方式和消弧线圈接地方式的优点,有学者提出了灵活接地方式^[4]。

目前灵活接地方式多采用零序过电流保护构成单相接地保护,耐过渡电阻能力不超过 $300\ \Omega$,且保护的灵敏性随故障距离的增大不断降低^[5-6]。现实中存在高阻接地故障,其过渡电阻阻值可高达上千欧,故障线路电流远低于保护启动门槛值,导致保护拒动^[7-9]。高阻接地故障电流虽小,但若任其长期存在,将严重威胁人身安全和设备安全,甚至引发更为严重的故障^[10]。因此,探究对高阻接地故障有效识别的保护方法是灵活接地系统迫切需要解决的难题。

现有故障选线方法主要包括稳态法、暂态法以及行波法等。文献[9]通过监测线路零序电流与零序电压夹角的变化以控制小电阻的投入,进而比较各线路零序电压与零序电流的夹角,实现对故障线路的辨识,但小电阻投入后健全线路零序电流十分微弱,可能导致互感器测量误差变大甚至失真,造成保护误判。文献[10]利用小电阻投入前后各馈线零序测量导纳的变化特征,对传统零序导纳法进行改进,克服了其易受线路结构、参数变化的影响,但该方法同样存在健全线路保护误动的可能。文献[11]利用小电阻投入后中性点与健全线路零序电流幅值比增大,而与故障线路零序电流幅值比减小的特点构造选线判据,但该方法耐过渡电阻能力仅有 $3000\ \Omega$ 。文献[12]将小电阻投入后各馈线零序电流分别与投入前母线零序电压和中性点电流做内积投影,由此构造故障判据,但该方法的操作与判定过程较为繁琐。文献[13]详细分析了并联小电阻投入后各条线路的暂态特征,提出一种利用暂态量测量各线路过渡电阻的选线方法,但该方法需采用线性拟合方法构造目标函数,计算过于复杂。文献[14]提出了一种基于 spiking 神经网络 P 系统和贝叶斯估计的故障区段定位方法,但人工智能算法需要较多的训练数据,目前该方法应用较少。

针对上述问题,本文首先详细分析了灵活接地系统中不同阶段各线路零序电流的暂态特征,发现小电阻投入阶段故障线路与健全线路零序暂态电流表达式相同,而消弧线圈补偿阶段故障线路零序暂态电流比健全线路多出一个流经过渡电阻的电流分量。以此为基础,提出了一种融合两阶段暂态信息

的灵活接地系统高阻接地故障选线方法。最后在 PSCAD/EMTDC 和低压实验平台验证了所提方法的正确性。

1 灵活接地系统各阶段故障特征分析

若将研究范围框定在低频段 $200\ \text{Hz}$ 以内,则线路感抗与串联电阻远小于线路容抗^[13,15],且高阻接地故障时暂态谐振频率较低,主要为消弧线圈与系统对地电容的并联谐振过程,可只考虑线路容抗^[16],故可得如图 1 所示的灵活接地系统单相接地故障示意图^[13]。图中 u_f 为故障点电压; u_0 为中性点位移电压; $i_{0k}(k=1,2,\dots,m)$ 为各线路首端的零序电流; $C_{0k}(k=1,2,\dots,m)$ 为各条线路单相对地电容,假定线路 m 为故障线路,流经过渡电阻 R_f 的电流为; L_p 与 R_N 分别为中性点消弧线圈与中性点并联小电阻, R_N 一般取 $10\ \Omega$ ^[10,12]; i_{0L_p} 、 i_{0R_N} 分别为流经消弧线圈和中性点并联小电阻的电流。根据开关 S 是否闭合可将灵活接地系统分为两个阶段,当开关 S 断开时处于消弧线圈补偿阶段,开关 S 闭合时为小电阻投入阶段。

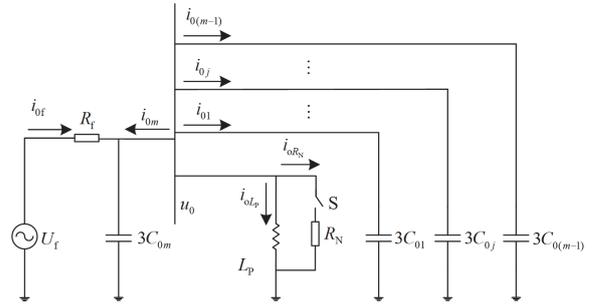


图 1 灵活接地系统单相接地故障示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-phase grounding fault in flexible grounding system

1.1 消弧线圈补偿阶段暂态分析

系统发生接地故障时,根据基尔霍夫定律可得如式(1)所示的二阶非齐次线性微分方程。

$$\begin{cases} u_f = R_f \left(3C_{0\Sigma} \frac{du_0}{dt} + i_{0L_p} \right) + u_0 \\ u_0 = L_p \frac{di_{0L_p}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_f = U_m \sin(\omega_0 t + \theta)$ 为故障点虚拟电源, U_m 与 θ 分别为故障点虚拟电源幅值与故障初相角, ω_0 为工频角频率; $3C_{0\Sigma} = 3C_{01} + 3C_{02} + \dots + 3C_{0m}$ 。

为求解式(1)所示的微分方程,先求解其对应的特征根方程及特征根 p_1 、 p_2 ,如式(2)所示。

$$\begin{cases} L_p R_f 3C_{0\Sigma} p^2 + pL_p + R_f = 0 \\ p_1 = -\frac{1}{6R_f C_{0\Sigma}} - \sqrt{\left(\frac{1}{6R_f C_{0\Sigma}}\right)^2 - \frac{1}{3L_p C_{0\Sigma}}} \\ p_2 = -\frac{1}{6R_f C_{0\Sigma}} + \sqrt{\left(\frac{1}{6R_f C_{0\Sigma}}\right)^2 - \frac{1}{3L_p C_{0\Sigma}}} \end{cases} \quad (2)$$

分析式(2)可知, 当 $R_f < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_p}{3C_{0\Sigma}}}$ 时为过阻尼状

态, 对应低阻接地状态, 特征根的表达式为实数解;

当 $R_f \geq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_p}{3C_{0\Sigma}}}$ 时为欠阻尼状态, 对应高阻接地故障, 特征根的表达式为虚数解^[17]。

10 kV 配电网对地电容电流一般为 10~200 A^[18], 则欠阻尼状态下 R_f 下限值最大取 300 Ω 。上述分析中, 依据特征根的表达式是否存在实数解, 将低阻接地故障和高阻接地故障进行了区分。考虑到现有的改进零序过电流保护可以将耐过渡电阻能力提高至 760 Ω ^[19], 为保留一定裕度, 本文将 500 Ω 以上定义为高阻接地故障。

谐振接地系统线路的失谐度 ν 如式(3)所示, 一般取值范围为 $-0.1 < \nu < -0.05$ ^[20]。

$$\nu = \frac{3\omega_0 C_{0\Sigma} - \frac{1}{\omega_0 L_p}}{3\omega_0 C_{0\Sigma}} \quad (3)$$

高阻接地故障时, 暂态零序电流为衰减的正弦分量, 衰减因子 δ 和谐振频率 ω_f 如式(4)所示^[21]。

$$\begin{cases} \delta = \frac{1}{6R_f C_{0\Sigma}} \\ \omega_f = \sqrt{\omega_0^2 (1 - \nu) - \delta^2} \end{cases} \quad (4)$$

求解式(1)微分方程可得流经消弧线圈的零序电流 i_{0L_p} 如式(5)所示。

$$i_{0L_p} = B \sin(\omega_0 t + \varphi) + e^{-\delta t} (A_1 \cos \omega_f t + A_2 \sin \omega_f t) \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} A_1 = -B \sin \varphi, A_2 = \frac{-\delta B \sin \varphi - \omega_0 B \cos \varphi}{\omega_f} \\ B = \frac{U_m}{|Z|} \frac{1}{1 - 3\omega_0^2 L_p C_{0\Sigma}}, Z = R_f + \frac{j\omega_0 L_p}{1 - 3\omega_0^2 L_p C_{0\Sigma}} \\ \varphi = \theta - \arctan \frac{\omega_0 L_p}{R_f (1 - 3\omega_0^2 L_p C_{0\Sigma})} \end{cases} \quad (6)$$

进一步可以得出零序电压 u_0 , 如式(7)所示。

$$u_0 = L_p (A_2 \omega_f - \delta A_1) e^{-\delta t} \cos \omega_f t + L_p (-A_1 \omega_f - \delta A_2) e^{-\delta t} \sin \omega_f t + \omega_0 L_p B \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (7)$$

各条非故障线路的零序电流 i_{0j} 为自身对地电容电流, 如式(8)所示。

$$\begin{aligned} i_{0j} &= 3C_{0j} \frac{du_0}{dt} = -3L_p C_{0j} \omega_0^2 B \sin(\omega_0 t + \varphi) + \\ &3L_p C_{0j} (\delta^2 A_1 - A_1 \omega_f^2 - 2\delta A_2 \omega_f) e^{-\delta t} \cos \omega_f t + \\ &3L_p C_{0j} (\delta^2 A_2 - A_2 \omega_f^2 + 2\delta A_1 \omega_f) e^{-\delta t} \sin \omega_f t \end{aligned} \quad (8)$$

进一步地, 非故障线路中的暂态零序电流 $i_{0j.T}$ 与暂态零序电压 $u_{0.T}$ 之间关系如式(9)所示。

$$i_{0j.T} = 3C_{0j} \frac{du_{0.T}}{dt} \quad (9)$$

故障线路零序电流为消弧线圈零序电流和各条非故障线路零序电流的和, 方向与之相反, 如式(10)所示。

$$\begin{aligned} i_{0m} &= -(i_{0L_p} + \sum_{i=1}^{n-1} i_{0i}) = [3\omega_0^2 L_p (C_{0\Sigma} - C_{0m}) - 1] \cdot \\ &B \sin(\omega_0 t + \varphi) - A_3 e^{-\delta t} \cos \omega_f t - A_4 e^{-\delta t} \sin \omega_f t - \\ &3L_p (C_{0\Sigma} - C_{0m}) (\delta^2 A_1 - A_1 \omega_f^2 - 2\delta A_2 \omega_f) e^{-\delta t} \cos \omega_f t - \\ &3L_p (C_{0\Sigma} - C_{0m}) (\delta^2 A_2 - A_2 \omega_f^2 + 2\delta A_1 \omega_f) e^{-\delta t} \sin \omega_f t \end{aligned} \quad (10)$$

由式(4)可得过渡电阻 R_f 与衰减因子 δ 和谐振频率 ω_f 的关系如式(11)所示。

$$\begin{cases} R_f - \frac{L_p \delta}{2} - \frac{L_p \omega_f^2}{2\delta} = 0 \\ 1 - 6R_f C_{0\Sigma} \delta = 0 \end{cases} \quad (11)$$

为进一步对故障线路暂态零序电流 $i_{0m.T}$ 化简, 结合式(6)和式(11)可得式(12)。

$$\begin{cases} A_1 (1 + 3L_p C_{0\Sigma} \delta^2 - 3L_p C_{0\Sigma} \omega_f^2) - 6L_p C_{0\Sigma} \delta A_2 \omega_f = \\ \frac{L_p (\delta A_1 - A_2 \omega_f)}{R_f} \\ A_2 (1 + 3L_p C_{0\Sigma} \delta^2 - 3L_p C_{0\Sigma} \omega_f^2) + 6L_p C_{0\Sigma} \delta A_1 \omega_f = \\ \frac{L_p (\delta A_2 + A_1 \omega_f)}{R_f} \end{cases} \quad (12)$$

根据式(12), 可将式(9)故障线路暂态零序电流 $i_{0m.T}$ 化简为式(13)。

$$i_{0m.T} = 3C_{0m} \frac{du_{0.T}}{dt} + \frac{u_{0.T}}{R_f} \quad (13)$$

由式(9)可以发现, 非故障线路暂态零序电流表达式完全一致, 均为该线路对地电容与暂态零序电压微分的乘积。究其原因, 由于忽略了线路阻抗参数, 非故障线路暂态零序电流仅与对地电容以及暂态零序电压有关。由式(13)可以发现, 故障线路暂态零序电流相较于非故障线路, 故障线路的表达式中多出了一个流经过渡电阻的暂态电流分量^[16]。虽

然流经故障线路的暂态零序电流为所有非故障线路与中性点暂态零序电流之和, 方向与之相反, 但是利用特征根代入式(2)对应的二阶齐次线性微分方程得到的等式后再进行简化计算, 可以得出故障线路零序暂态电流比非故障线路的多了一个流经过渡电阻的电流分量。

1.2 小电阻投入阶段暂态分析

设单相高阻接地故障系统进入稳态后, t_0 时刻投入小电阻, 为方便书写, 记 $t - t_0 = t_1$, 故障点电源表达式记为 $u'_f = U_m \sin(\omega_0 t_1 + \beta)$, 其中 $\beta = \omega_0 t_0 + \theta$, 流经消弧线圈电流为 i'_{0L_p} , 中性点零序电压为 u'_0 , 则小电阻投入后可得二阶微分方程如式(14)所示。

$$\begin{cases} u'_0 + R_f(3C_{0\Sigma} \frac{du'_0}{dt} + i'_{0L_p} + \frac{u'_0}{R_N}) = u'_f \\ u'_0 = L_p \frac{di'_{0L_p}}{dt} \end{cases} \quad (14)$$

记 $i'_{0L_p} = y$, $R_N // R_f = R_{eq}$, 式(14)对应的齐次微分方程如式(15)所示。

$$y'' + \frac{1}{3C_{0\Sigma} R_{eq}} y' + \frac{1}{3L_p C_{0\Sigma}} y = 0 \quad (15)$$

当发生高阻接地故障时, 式(15)的特征根均为实数^[13], 无需考虑虚数解的情况, 其特征根表达式如式(16)所示。

$$\begin{cases} p'_1 = -\frac{1}{6C_{0\Sigma} R_{eq}} + \sqrt{\left(\frac{1}{6C_{0\Sigma} R_{eq}}\right)^2 - \frac{1}{3L_p C_{0\Sigma}}} \\ p'_2 = -\frac{1}{6C_{0\Sigma} R_{eq}} - \sqrt{\left(\frac{1}{6C_{0\Sigma} R_{eq}}\right)^2 - \frac{1}{3L_p C_{0\Sigma}}} \end{cases} \quad (16)$$

记 $\omega_0 t_0 + \varphi = \alpha$, 则小电阻投入瞬间流过消弧线圈的电流为 $B \sin \alpha$, 求解式(14)二阶微分方程可得流经消弧线圈的电流 i'_{0L_p} 如式(17)所示。

$$\begin{cases} i'_{0L_p} = B' \sin(\omega_0 t_1 + \gamma) + A'_1 e^{p'_1 t_1} + A'_2 e^{p'_2 t_1} \\ B' = \frac{U_m}{\sqrt{\omega_0^2 L_p^2 \left(1 + \frac{R_f}{R_N}\right)^2 + \left(\frac{R_f \nu}{1 - \nu}\right)^2}} \\ A'_1 = \frac{\omega_0 (B \cos \alpha - B' \cos \gamma) - p'_2 (B \sin \alpha - B' \sin \gamma)}{p'_1 - p'_2} \\ A'_2 = \frac{p'_1 (B \sin \alpha - B' \sin \gamma) - \omega_0 (B \cos \alpha - B' \cos \gamma)}{p'_1 - p'_2} \\ \gamma = \beta - \arctan \frac{\omega_0 L_p}{R_{eq} (1 - 3\omega_0^2 L_p C_{0\Sigma})} \end{cases} \quad (17)$$

由流经消弧线圈的电流 i'_{0L_p} 可得中性点零序电压如式(18)所示。

$$u'_0 = L_p \frac{di'_{0L_p}}{dt} = L_p \omega_0 B' \cos(\omega_0 t_1 + \gamma) + L_p (p'_1 A'_1 e^{p'_1 t_1} + p'_2 A'_2 e^{p'_2 t_1}) \quad (18)$$

则流过各非故障线路的零序电流 i'_{0j} 如式(19)所示。

$$i'_{0j} = 3C_{0j} \frac{du'_0}{dt} = -3\omega_0^2 L_p C_{0j} B' \sin(\omega_0 t_1 + \gamma) + 3L_p C_{0j} (p'_1{}^2 A'_1 e^{p'_1 t_1} + p'_2{}^2 A'_2 e^{p'_2 t_1}) \quad (19)$$

故障线路零序电流 i'_{0m} 为中性点消弧线圈与小电阻零序电流和各条非故障线路零序电流之和, 方向与之相反, 如式(20)所示。

$$\begin{aligned} i'_{0m} = & -\sum_{j=1}^{m-1} i'_{0j} - i'_{0L_p} - i'_{0R_N} = \\ & [3\omega_0^2 L_p (C_{0\Sigma} - C_{0m}) - 1] B' \sin(\omega_0 t_1 + \gamma) - \\ & \frac{\omega_0 L_p B' \cos(\omega_0 t_1 + \gamma)}{R_N} - \frac{L_p (p'_1 A'_1 e^{p'_1 t_1} + p'_2 A'_2 e^{p'_2 t_1})}{R_N} \\ & [3L_p (C_{0\Sigma} - C_{0m}) p_1'^2 + 1] A'_1 e^{p_1'^2 t_1} - \\ & [3L_p (C_{0\Sigma} - C_{0m}) p_2'^2 + 1] A'_2 e^{p_2'^2 t_1} \end{aligned} \quad (20)$$

当发生高阻接地故障时 $R_{eq} \approx R_N$, 为进一步对故障线路暂态零序电流 $i'_{0m.T}$ 进行化简, 将式(16)特征根表达式代入式(15)中可得式(21)。

$$\begin{cases} 3L_p C_{0\Sigma} p_1'^2 + \frac{L_p}{R_N} p'_1 + 1 = 0 \\ 3L_p C_{0\Sigma} p_2'^2 + \frac{L_p}{R_N} p'_2 + 1 = 0 \end{cases} \quad (21)$$

根据式(21)等式关系可将故障线路暂态零序电流 $i'_{0m.T}$ 化简为式(22)。

$$i'_{0m.T} = 3L_p C_{0m} p_1'^2 A'_1 e^{p_1'^2 t_1} + 3L_p C_{0m} p_2'^2 A'_2 e^{p_2'^2 t_1} \quad (22)$$

由式(19)和式(22)可得, 小电阻投入后暂态零序电压 $u'_{0.T}$ 与非故障线路暂态零序电流 $i'_{0j.T}$ 和故障线路暂态零序电流 $i'_{0m.T}$ 之间的表达相同, 如式(23)所示。

$$\begin{cases} i'_{0j.T} = 3C_{0j} \frac{du'_{0.T}}{dt} \\ i'_{0m.T} = 3C_{0m} \frac{du'_{0.T}}{dt} \end{cases} \quad (23)$$

对比式(9)、式(13)与式(23)不难发现, 相较于谐振接地状态, 小电阻投入阶段故障线路不存在流经过渡电阻的分量, 故障线路和非故障线路的暂态零序电流表达式一致。究其原因, 高阻接地故障时总

有 $R_{cq} \approx R_N$, 故总可利用式(21)对故障线路暂态零序电流 $i'_{0m.T}$ 进行化简, 实现故障线路表达式的改写。

2 选线原理与适用性分析

由于小电阻投入阶段故障线路和非故障线路暂态零序表达式相同, 根据式(23)可得任意线路 i 与线路 j 的对地电容比值, 如式(24)所示。

$$\frac{C_{0i}}{C_{0j}} = \frac{3C_{0i} \frac{du'_0}{dt}}{3C_{0j} \frac{du'_0}{dt}} = \frac{|i'_{0i.T}[n]|}{|i'_{0j.T}[n]|} \quad (24)$$

式中: $|i'_{0i.T}[n]|$ 、 $|i'_{0j.T}[n]|$ 分别为线路 i 、 j 暂态零序电流采样序列采样值的绝对值, $n=1, 2, \dots, N$ 为采样序列数据个数, N 为每周周期采样点数。需要说明的是该采样序列为暂态分量经滤波后得到的(滤波器截至频率 200 Hz), 考虑到互感器精度问题, 当采样值的绝对值大于 0.1 A 时, 连续对 $x(3 \leq x \leq N/4)$ 个采样序列按式(24)计算并取平均值作为最终结果。

由式(24)可知, 利用小电阻投入后的采样数据可以计算出不同线路的对地电容比值。由式(9)和式(13)分析可知, 在消弧线圈补偿阶段, 故障线路暂态零序电流相比于非故障线路多了一个流经过渡电阻的分量, 非故障线路暂态零序电流表达式相同。在消弧线圈补偿阶段, 故障线路暂态零序电流减去非故障线路暂态零序电流乘以相应的对地电容比值后只剩下流经过渡电阻的分量(该比值为利用小电阻投入后的采样数据计算得出的), 非故障线路暂态零序电流减去非故障线路暂态零序电流乘以相应的对地电容比值后结果为 0。即若线路 i 、线路 j 为非故障线路, 零序电流之差为 0, 故障线路与非故障线路之间的零序电流之差为流经过渡电阻的分量。具体计算结果如式(25)一式(28)所示。需要说明的是, 本文所述选线计算方法在时间层面上是先对小电阻投入后的采样序列计算即式(24), 再对小电阻投入前的采样序列进行计算即式(25)一式(28)。

$$\left| i_{0i.T}[n] - \frac{C_{0i}}{C_{0j}} i_{0j.T}[n] \right| \quad (25)$$

式中: $i_{0i.T}[n]$ 、 $i_{0j.T}[n]$ 为消弧线圈补偿阶段任意两条线路 i 、 j 的暂态零序电流采样序列的采样值(同样该采样序列也为暂态分量经截至频率为 200 Hz 的低通滤波器后得到的), 按电容比做差后再取绝对值。式(25)要分为 3 种不同情况讨论, 即: i 、 j 均为非故障线路; i 为非故障线路、 j 为故障线路; i 为故障线路、 j 为非故障线路。

若线路 i 、 j 都是非故障线路, 则其零序电流差

值定义为 $i_{is\&js}$, 如式(26)所示。

$$i_{is\&js} \triangleq \left| i_{0i.T}[n] - \frac{C_{0i}}{C_{0j}} i_{0j.T}[n] \right| = 0 \quad (26)$$

若线路 i 为非故障线路, 线路 j 为故障线路, 则其零序电流差值定义为 $i_{is\&jf}$, 如式(27)所示。

$$i_{is\&jf} \triangleq \left| i_{0i.T}[n] - \frac{C_{0i}}{C_{0j}} i_{0j.T}[n] \right| = \left| -\frac{C_{0i}}{C_{0j}} \frac{u'_{0T}}{R_f} \right| \quad (27)$$

若线路 i 为故障线路、 j 为非故障线路, 则其零序电流差值定义为 $i_{if\&js}$, 如式(28)所示。

$$i_{if\&js} \triangleq \left| i_{0i.T}[n] - \frac{C_{0i}}{C_{0j}} i_{0j.T}[n] \right| = \left| \frac{u'_{0T}}{R_f} \right| \quad (28)$$

假设总馈线数为 z 的配电网其第 m 条线路发生故障, 则可构建如式(29)所示的零序电流差值矩阵。

$$\frac{1}{x} \begin{bmatrix} \sum_{y=1}^x i_{1s\&1sy} & \sum_{y=1}^x i_{1s\&2sy} & \cdots & \sum_{y=1}^x i_{1s\&mfy} & \cdots & \sum_{y=1}^x i_{1s\&zsy} \\ \sum_{y=1}^x i_{2s\&1sy} & \sum_{y=1}^x i_{2s\&2sy} & \cdots & \sum_{y=1}^x i_{2s\&mfy} & \cdots & \sum_{y=1}^x i_{2s\&zsy} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \sum_{y=1}^x i_{mf\&1sy} & \sum_{y=1}^x i_{mf\&2sy} & \cdots & \sum_{y=1}^x i_{mf\&mfy} & \cdots & \sum_{y=1}^x i_{mf\&zsy} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \sum_{y=1}^x i_{zs\&1sy} & \sum_{y=1}^x i_{zs\&2sy} & \cdots & \sum_{y=1}^x i_{zs\&mfy} & \cdots & \sum_{y=1}^x i_{zs\&zsy} \end{bmatrix} \quad (29)$$

式(29)中矩阵各元素的计算类似于电容比的计算。当采样值的绝对值大于 0.1 A 时, 连续对 $x(3 \leq x \leq N/4)$, 可在该范围中任意取值)个采样序列计算结果取平均值作为矩阵各元素的最终结果。可通过依次比较如式(29)所示矩阵各行各列非对角元素进行故障选线。由式(29)可知, 矩阵的主对角线元素为线路 i 和线路 i 的零序电流差值, 即自身线路零序电流差值, 所以矩阵主对角线元素全为 0。

利用零序电流差值矩阵判别故障线路的方法为: 当第 i 条线路发生故障时, 则每一行元素第 i 列非对角元素均为该行最大值, 每一列元素第 i 行非对角元素都为该行所在列的最大值。即在不考虑对角线元素的情况下, 依次比较第 1 行第 1 列其他各元素, 第 2 行第 2 列其他各元素一直到第 z 行第 z 列其他各元素, 判断某行、某列的非对角元素是否为该行、该列所对应列、行的最大值来判断故障线路。

3 母线故障

由以上分析可知, 母线发生故障时理论上矩阵各行元素都为 0, 但由于实际测量中存在误差以及

理论分析中只考虑了线路对地电容, 导致矩阵中各行元素趋近于 0。但母线故障时并不会出现矩阵第 i 行非对角元素都为该行所对应列元素的最大值、矩阵第 i 列非对角元素都为该列所对应行元素的最大值的情况, 据此可区分母线故障。

4 故障选线流程

4.1 故障启动判据

现有大部分启动判据多是基于中性点零序电压大于 0.15 倍的相电压设定的^[22], 当系统发生高阻接地故障时可能无法达到 0.15 倍的相电压。系统发生单相接地故障时, 中性点电流必然会改变, 可利用中性点电流突变量幅值作为启动判据^[11], 如式(30)所示。

$$\Delta I_n = |\dot{i}_{nf} - \dot{i}_{nz}| > I_{set} \quad (30)$$

式中: ΔI_n 为中性点电流突变量幅值; \dot{i}_{nf} 为故障发生后中性点电流; \dot{i}_{nz} 为系统正常运行时线路参数不平衡引起的中性点电流; I_{set} 为整定值。

系统正常运行时, 中性点零序电压为相电压的 0.5%~1.5%, 个别情况可超过 2.5%^[1]。为避免保护误启动, 本文整定值 I_{set} 按式(31)设置。

$$I_{set} = K_{rel} |\dot{i}_{nz \max}| = K_{rel} \left| \frac{2.5\% \dot{U}_\phi}{\omega_0 L_p} \right| \quad (31)$$

式中: \dot{U}_ϕ 为相电压; $\dot{i}_{nz \max}$ 为中性点最大不平衡电流; K_{rel} 为可靠系数, 取 1.5。

4.2 暂态故障特征量的获取

由式(8)和式(10)可知, 各线路零序电流中包含稳态分量和暂态分量, 依据文献[24]小电阻投入时间在故障发生后 3~10 s, 发生故障后消弧线圈补偿阶段暂态分量衰减时间远小于 3 s^[16,23]。为获取消弧线圈补偿阶段暂态特征量, 取故障发生时的电流采样数据减去故障发生后稳态电流采样数据。小电阻投入阶段的暂态特征量取小电阻投入时的零序电流采样数据减去稳态后零序电流采样数据。需要说明的是, 后续仿真中消弧线圈补偿阶段和小电阻投入阶段给出的暂态电流波形均为减去稳态后的暂态波形。

4.3 故障处理流程

本文在理论推导部分, 依据高阻接地故障下 $R_{eq} \approx R_N$, 实现了式(21)的简化, 因此该方法仅适用于高阻接地故障。考虑到改进零序过电流保护能够将灵活接地系统的耐过渡电阻能力提升至 760 Ω ^[19], 因此为满足保护装置对低阻接地故障的感知要求该方法需与改进零序过电流保护配合, 具体选线步骤如下。

步骤 1: 实时监测中性点电流, 当 $\Delta I_n > I_{set}$ 时, 表明系统发生故障, 启动故障检测系统。

步骤 2: 短暂延时后^[24], 若经过消弧线圈的补偿, 故障消失(即中性点电流突变量幅值降低到阈值以下), 判定为瞬时性接地故障返回步骤 1, 反之投入并联小电阻。

步骤 3: 若某一线路零序电流达到改进零序过电流保护的動作门槛, 切除该线路并返回步骤 1, 否则对获得的消弧线圈补偿阶段和小电阻投入阶段的暂态零序电流数据进行处理, 得到采样序列。

步骤 4: 构建零序电流差值矩阵, 并依据上述选线方法辨识故障线路。

5 仿真实验

采用 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型, 验证本文所提方法的有效性。仿真模型如图 2 所示, 馈线 1、馈线 2、馈线 5 均为 10 kV 电缆线路, 长度分别为 6 km、5 km、9 km。馈线 3 为 10 kV 架空线电缆混合线路, 其中架空线长度为 9 km, 电缆线长度为 8 km, 馈线 4 为 10 kV 架空线电缆混合线路, 其中架空线长度为 6 km, 电缆线长度为 7 km, 线路单位长度参数见附录 A 表 A1。消弧线圈按脱谐度-8%设置, 采样频率为 10 kHz。

本文设计了如下仿真场景: 不同过渡电阻、弧光高阻接地、不同故障初相角、母线故障、采样点偏移等。

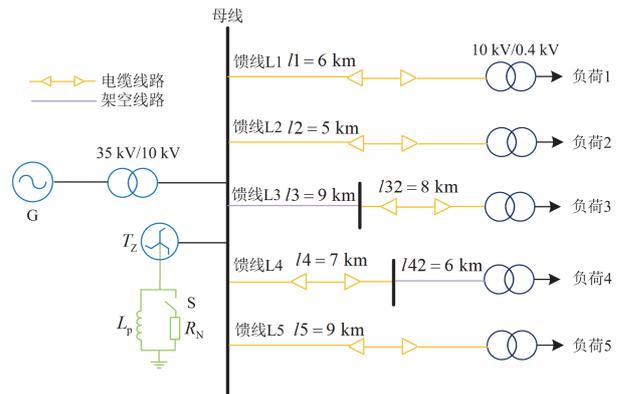


图 2 仿真拓扑图

Fig. 2 Simulation topology diagram

5.1 不同过渡电阻

设置线路 1 距离母线 6 km 处分别发生 500 Ω 、1000 Ω 、3000 Ω 、5000 Ω 、10 000 Ω 的接地故障, 验证不同过渡电阻下, 所述选线方法的正确性。表 1 为不同过渡电阻情况下得到的线路间对地电容比值。

表 1 不同过渡电阻时线路间对地电容比值

Table 1 Ratio of line-to-ground capacitance among lines under different transition resistances

线路间对地 电容比值	实际值	计算值				
		500 Ω	1000 Ω	3000 Ω	5000 Ω	10 000 Ω
C_{01}/C_{02}	1.20	1.04	1.12	1.18	1.19	1.20
C_{01}/C_{03}	0.73	0.63	0.68	0.71	0.72	0.73
C_{01}/C_{04}	0.84	0.73	0.78	0.82	0.83	0.84
C_{01}/C_{05}	0.67	0.58	0.62	0.65	0.66	0.66
C_{02}/C_{03}	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
C_{02}/C_{04}	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
C_{02}/C_{05}	0.56	0.56	0.56	0.56	0.55	0.55
C_{03}/C_{04}	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
C_{03}/C_{05}	0.92	0.92	0.91	0.92	0.91	0.92
C_{04}/C_{05}	0.80	0.80	0.80	0.80	0.79	0.79

限于篇幅, 本文只展示了 10 000 Ω 接地故障的零序电流差值矩阵, 其余不同接地电阻对应的零序电流差值矩阵见附录 A。附录 A 也一并给出不同故障初相角、弧光高阻接地、母线故障、采样点偏移等对应的零序电流差值矩阵, 具体展示了 5000 Ω 接地故障对应的零序电流差值矩阵构造过程。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.05 & 0.04 & 0.04 & 0.04 \\ 0.04 & 0 & 0.01 & 0.005 & 0.01 \\ 0.06 & 0.02 & 0 & 0.004 & 0.02 \\ 0.05 & 0.008 & 0.003 & 0 & 0.02 \\ 0.06 & 0.03 & 0.01 & 0.02 & 0 \end{bmatrix}$$

由 10 000 Ω 接地故障零序电流差值矩阵可知, 除对角线元素外, 矩阵第 1 列各元素均为该列所在行最大值, 矩阵第 1 行各元素均为该行所在列最大值, 可以准确辨识线路 1 为故障线路。在零序电流差值矩阵中, 线路 1 对应的第 1 行 4 个非 0 元素近似相等, 验证了式(28)的正确性, 即消弧线圈补偿阶段, 故障线路暂态零序电流减去乘以电容比值的非故障线路暂态零序电流得到流经过渡电阻的暂态电流。对比表 1 中各条线路间对地电容比值计算值与实际值, 二者近似相等, 验证了式(24)的正确性, 即小电阻投入阶段故障线路与非故障线路零序暂态电流表达式相同。

附录 A 图 A1 展示了线路发生 5000 Ω 接地故障时, 消弧线圈补偿阶段各线路暂态零序电流波形, 附录 A 图 A2 展示了小电阻投入阶段各线路暂态零序电流波形, 为了便于展示将并联小电阻投入瞬间修改为 0 时刻。观察附录 A 图 A1 可以发现故障线路和非故障线路的暂态零序电流波形均为衰减的周期分量, 各条非故障线路的波形高度相似, 符合式

(8)的结论, 故障线路波形相比非故障线路有一定的区分, 对应式(13)即多了一个流经过渡电阻的分量。观察附录 A 图 A2 可以发现故障线路与非故障线路的暂态零序电流波形高度相似, 证实了式(23), 即故障线路和非故障线路暂态零序电流表达式相同。

5.2 弧光高阻接地故障

为进一步验证所提方法对弧光高阻接地故障的适用性, 采用 Emanuel 电弧模型模拟弧光高阻接地故障^[12,25]。电弧模型及具体参数见附录 A 图 A3 与表 A2, 模型均设置于线路 3 距离母线 8 km 处。表 2 为不同案例时得到的线路间对地电容比值。

表 2 不同案例时线路间对地电容比值

Table 2 Ratio of line-to-ground capacitance among lines under different scenarios

线路间对地 电容比值	实际值	计算值			
		案例 1	案例 2	案例 3	案例 4
C_{01}/C_{02}	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
C_{01}/C_{03}	0.73	0.67	0.70	0.73	0.73
C_{01}/C_{04}	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
C_{01}/C_{05}	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
C_{02}/C_{03}	0.61	0.56	0.59	0.61	0.61
C_{02}/C_{04}	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
C_{02}/C_{05}	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
C_{03}/C_{04}	1.15	1.25	1.19	1.25	1.15
C_{03}/C_{05}	0.92	0.99	0.95	0.91	0.91
C_{04}/C_{05}	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80

案例 3 对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.002 & 0.53 & 0.002 & 0.006 \\ 0.001 & 0 & 0.44 & 0.004 & 0.01 \\ 0.73 & 0.72 & 0 & 0.73 & 0.75 \\ 0.002 & 0.005 & 0.63 & 0 & 0.02 \\ 0.009 & 0.02 & 0.81 & 0.02 & 0 \end{bmatrix}$$

观察案例 3 计算得到的零序电流差值矩阵可知除对角线元素外, 矩阵第 3 列各元素均为该行最大值, 矩阵第 3 行各元素均为该列最大值, 可以准确辨识线路 3 为故障线路。

5.3 不同故障初相角

在小电阻投入阶段控制小电阻在零序电压峰值处投入可以获得最大的暂态电流^[13], 但消弧线圈补偿阶段暂态特征受故障初相角影响, 设置线路 2 距离母线 5 km 处分别在故障初相角 0°、30°、45°、60°、90°发生 5000 Ω 接地故障验证该方法是否受故障初相角的影响。表 3 为不同故障初相角时得到的线路间对地电容比值。

表 3 不同故障初相角时线路间对地电容比值
Table 3 Ratio of line-to-ground capacitance among lines under different fault inception angle

线路间对地 电容比值	实际值	计算值				
		0°	30°	45°	60°	90°
C_{01}/C_{02}	1.20	1.22	1.22	1.22	1.21	1.22
C_{01}/C_{03}	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
C_{01}/C_{04}	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
C_{01}/C_{05}	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
C_{02}/C_{03}	0.61	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
C_{02}/C_{04}	0.70	0.69	0.69	0.69	0.70	0.69
C_{02}/C_{05}	0.56	0.55	0.55	0.55	0.56	0.55
C_{03}/C_{04}	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
C_{03}/C_{05}	0.92	0.91	0.92	0.92	0.91	0.92
C_{04}/C_{05}	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80

故障初相角 30° 时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.31 & 0.004 & 0.004 & 0.01 \\ 0.27 & 0 & 0.27 & 0.26 & 0.28 \\ 0.005 & 0.44 & 0 & 0.004 & 0.003 \\ 0.006 & 0.37 & 0.003 & 0 & 0.003 \\ 0.005 & 0.5 & 0.03 & 0.04 & 0 \end{bmatrix}$$

可知除对角线元素外，矩阵第 2 列各元素均为该列所在行最大值，矩阵第 2 行各元素均为该行所在列最大值，可以准确辨识线路 2 为故障线路。

5.4 母线故障

设置母线分别发生 1000 Ω、3000 Ω、5000 Ω、7000 Ω 的接地故障，以验证该方法能否区分母线故障。表 4 为母线经不同过渡电阻接地情况下得到的线路间对地电容比值。

表 4 母线经不同过渡电阻接地时线路间对地电容比值
Table 4 Ratio of line-to-ground capacitance among lines under different busbar transitional resistances

线路间对地 电容比值	实际值	计算值			
		1000 Ω	3000 Ω	5000 Ω	7000 Ω
C_{01}/C_{02}	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
C_{01}/C_{03}	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
C_{01}/C_{04}	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
C_{01}/C_{05}	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
C_{02}/C_{03}	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
C_{02}/C_{04}	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
C_{02}/C_{05}	0.56	0.55	0.55	0.55	0.55
C_{03}/C_{04}	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
C_{03}/C_{05}	0.92	0.92	0.91	0.92	0.92
C_{04}/C_{05}	0.80	0.80	0.80	0.80	0.79

母线发生 3000 Ω 接地故障对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.001 & 0.002 & 0.003 & 0.008 \\ 0.0005 & 0 & 0.08 & 0.004 & 0.01 \\ 0.003 & 0.01 & 0 & 0.0007 & 0.02 \\ 0.004 & 0.005 & 0.0005 & 0 & 0.002 \\ 0.001 & 0.01 & 0.02 & 0.02 & 0 \end{bmatrix}$$

矩阵中所有元素没有出现第 i 行第 i 列元素均为该列该行的最大值情况，判断为母线故障。

5.5 采样点偏移

为模拟现实工况下存在的采样点偏移，在线路 2 末端设置 5000 Ω 单相接地故障，分别将采样起始时刻延迟 0 ms、0.25 ms、0.5 ms，将所得采样点按第 2 节处理方式构建零序电流差值矩阵。为便于展示，本节仅给出了延迟 0.5 ms 情况下的零序电流差值矩阵，其余见附录 A，表 5 为不同延时情况下得到的对地电容比值。

表 5 不同采样延时下各线路间对地电容比值
Table 5 Ratio of line-to-ground capacitance among lines under different sampling delays

线路间对地 电容比值	实际值	计算值		
		0 ms	0.25 ms	0.5 ms
C_{01}/C_{02}	1.20	1.22	1.31	1.27
C_{01}/C_{03}	0.73	0.73	0.71	0.74
C_{01}/C_{04}	0.84	0.84	0.83	0.84
C_{01}/C_{05}	0.67	0.67	0.65	0.67
C_{02}/C_{03}	0.61	0.60	0.54	0.50
C_{02}/C_{04}	0.70	0.69	0.63	0.57
C_{02}/C_{05}	0.56	0.55	0.50	0.46
C_{03}/C_{04}	1.15	1.15	1.16	1.15
C_{03}/C_{05}	0.92	0.92	0.91	0.91
C_{04}/C_{05}	0.80	0.80	0.78	0.80

采样延迟 0.5 ms 得到的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.62 & 0.01 & 0.002 & 0.007 \\ 0.52 & 0 & 0.52 & 0.51 & 0.51 \\ 0.007 & 0.84 & 0 & 0.005 & 0.006 \\ 0.003 & 0.74 & 0.005 & 0 & 0.004 \\ 0.01 & 0.91 & 0.006 & 0.005 & 0 \end{bmatrix}$$

在采样数据延迟 0.5 ms 情况下，观察矩阵可知，除对角线元素外，矩阵第 2 列各元素均为该列所在行最大值，矩阵第 2 行各元素均为该行所在列最大值，可以准确辨识线路 2 为故障线路。

6 低压实验平台验证

为验证所提方法的有效性, 搭建了如附录 B 中图 B1 的实验平台。该实验平台由 0.4 kV/0.4 kV 电源变压器、三相五柱式消弧线圈、4 条出线构成, 其中电源变压器容量为 35 kVA。将三相导线在零序电流互感器一次侧分别缠绕 25 匝, 使得通过互感器一次侧的电流扩大 25 倍, 以模拟 10 kV 电网发生高阻接地故障时的零序电流。实验中采样频率为 12.5 kHz, 设置线路 2 和母线分别发生 1000 Ω、2000 Ω、3000 Ω、5000 Ω、10 000 Ω 接地故障。出线故障和母线故障时计算得到的各线路对地电容比值如表 6 和表 7 所示。为便于展示, 只给出过渡电阻 10 000 Ω 的零序电流差值矩阵, 其余见附录 B。同时附录 B 也给出了过渡电阻为 10 000 Ω 时零序电流波形, 具体见附录 B 图 B2—图 B6。

表 6 线路 2 不同过渡电阻接地时线路间对地电容比值

Table 6 Ratio of line-to-ground capacitance among lines with different transition resistance grounding for Line 2

线路间对地 电容比值	实际值	计算值				
		1000 Ω	2000 Ω	3000 Ω	5000 Ω	10 000 Ω
C_{01}/C_{02}	0.25	0.26	0.25	0.25	0.25	0.28
C_{01}/C_{03}	0.5	0.5	0.54	0.52	0.5	0.52
C_{01}/C_{04}	0.75	0.77	0.7	0.78	0.9	0.8
C_{02}/C_{03}	2	1.92	2.13	2.09	1.96	1.86
C_{02}/C_{04}	3	2.97	2.78	3.17	3.52	2.88
C_{03}/C_{04}	1.5	1.54	1.3	1.52	1.79	1.55

表 7 母线经不同过渡电阻接地时线路间对地电容比值

Table 7 Ratio of line-to-ground capacitance among lines under different busbar transitional resistances

线路间对地 电容比值	实际值	计算值				
		1000 Ω	2000 Ω	3000 Ω	5000 Ω	10 000 Ω
C_{01}/C_{02}	0.25	0.25	0.25	0.27	0.25	0.27
C_{01}/C_{03}	0.5	0.5	0.5	0.53	0.5	0.56
C_{01}/C_{04}	0.75	0.74	0.69	0.75	0.75	0.83
C_{02}/C_{03}	2	1.98	2.03	1.94	2	2.07
C_{02}/C_{04}	3	2.92	2.8	2.77	2.96	3.04
C_{03}/C_{04}	1.5	1.47	1.38	1.43	1.49	1.47

观察线路 2 发生 10 000 Ω 接地故障时零序电流差值矩阵各元素, 不考虑对角线元素, 矩阵第 2 列各元素均为该列所在行最大值, 矩阵第 2 行各元素均为该行所在列最大值, 可以准确辨识线路 2 为故障线路。

线路 2 发生过渡电阻为 10 000 Ω 时零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.08 & 0.03 & 0.03 \\ 0.32 & 0 & 0.22 & 0.2 \\ 0.05 & 0.15 & 0 & 0.01 \\ 0.04 & 0.07 & 0.01 & 0 \end{bmatrix}$$

母线故障过渡电阻为 10 000 Ω 时零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.01 & 0.02 & 0.01 \\ 0.03 & 0 & 0.06 & 0.1 \\ 0.04 & 0.03 & 0 & 0.03 \\ 0.05 & 0.04 & 0.02 & 0 \end{bmatrix}$$

矩阵中所有元素没有出现第 i 行第 i 列元素均为该列该行的最大值情况, 判断为母线故障。

由于实验条件有限, 实验中故障发生时刻与小电阻投入时刻均为手动控制。值得注意的是, 各线路零序电流信号受环境噪声干扰严重, 且线路的三相对地参数并非完全对称, 因而谐波含量与不平衡电流均较大。而在此恶劣条件下, 本文提出的选线方法仍能够实现对故障线路的准确辨识, 进一步说明了所提方法的适用性。

7 结论

针对灵活接地系统现有保护方法耐过渡电阻能力低的问题, 本文提出了综合利用消弧线圈补偿阶段和小电阻投入阶段暂态信息的选线方法。该方法利用小电阻投入阶段暂态零序电流计算各线路对地电容比值, 利用该比值对消弧线圈补偿阶段各条线路的暂态零序电流做差, 再构建零序电流差值矩阵, 比较矩阵各行各列之间的大小关系进行选线。该方法具有耐过渡电阻能力强, 不受故障初相角影响且能区分母线故障等优点。

本文只考虑了低频下暂态电气量, 下一步将研究高频暂态分量辨识故障线路的机理。

附录 A

不同过渡电阻时对应的零序电流差值矩阵

线路 1 发生 5000 Ω 永久性接地故障时对应的零序电流差值矩阵构造过程如下。

1) 故障先经历消弧线圈补偿阶段, 再经历小电阻投入阶段。先对小电阻投入阶段各线路暂态零序电流进行低通滤波, 滤波器截至频率为 200 Hz, 得到采样序列。考虑一个周波的数据, 当采样值的绝对值大于 0.1 A 时, 连续对 50 个采样序列计算结果

取平均值,求得各条线路对地电容比值如表 1 所示。

2) 对消弧线圈补偿阶段的采样数据,重复上述过程,得到经低通滤波后的采样序列。同样考虑一个周波的数据,当采样值的绝对值大于 0.1 A 时,连续对 50 个采样序列利用电容比值做差,将计算结果取平均值得到零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.15 \\ 0.13 & 0 & 0.03 & 0.01 & 0.04 \\ 0.23 & 0.04 & 0 & 0.01 & 0.04 \\ 0.19 & 0.02 & 0.01 & 0 & 0.04 \\ 0.24 & 0.07 & 0.04 & 0.05 & 0 \end{bmatrix}$$

表 A1 线路单位长度参数

Table A1 Parameters of lines per kilometer

	参数	电阻/ Ω	电感/mH	电容/ μF
架空线	正序	0.178	1.21	0.015
	零序	0.25	5.54	0.008
电缆线	正序	0.21	0.25	0.19
	零序	2.1	0.99	0.30

线路发生经 500 Ω 过渡电阻接地故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 2.87 & 2.87 & 2.87 & 2.87 \\ 2.39 & 0 & 0.01 & 0.004 & 0.01 \\ 3.94 & 0.02 & 0 & 0.005 & 0.008 \\ 3.41 & 0.006 & 0.005 & 0 & 0.001 \\ 4.29 & 0.02 & 0.009 & 0.02 & 0 \end{bmatrix}$$

线路发生经 1000 Ω 过渡电阻接地故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 1.75 & 1.74 & 1.76 & 1.75 \\ 1.91 & 0 & 0.01 & 0.02 & 0.007 \\ 2.01 & 0.09 & 0 & 0.001 & 0.002 \\ 1.97 & 0.03 & 0.005 & 0 & 0.01 \\ 2.19 & 0.007 & 0.02 & 0.004 & 0 \end{bmatrix}$$

线路发生经 3000 Ω 过渡电阻接地故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.16 & 0.17 & 0.17 & 0.18 \\ 0.14 & 0 & 0.01 & 0.005 & 0.01 \\ 0.23 & 0.02 & 0 & 0.003 & 0.02 \\ 0.2 & 0.007 & 0.003 & 0 & 0.02 \\ 0.26 & 0.003 & 0.02 & 0.02 & 0 \end{bmatrix}$$

可知除对角线元素外,上述各矩阵第 1 列各元素均为该行最大值,各矩阵第 1 行各元素均为该列最大值,可以准确辨识线路 1 为故障线路。

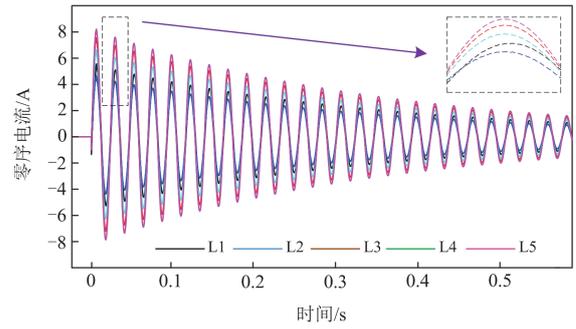
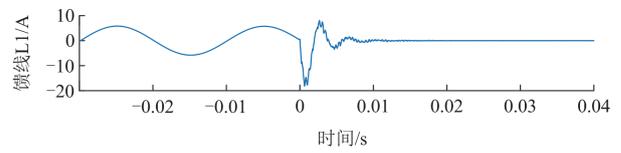
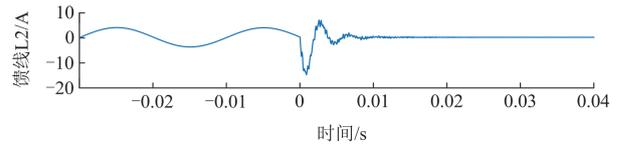


图 A1 消弧线圈补偿阶段暂态零序电流波形

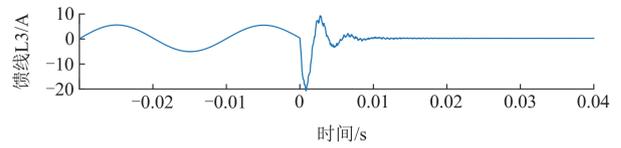
Fig. A1 Transient zero-sequence current waveform during the arc suppression coil compensation phase



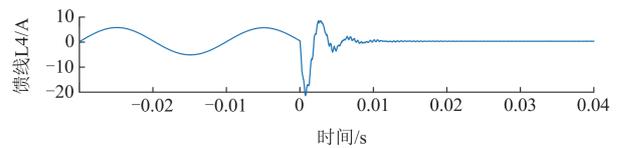
(a)



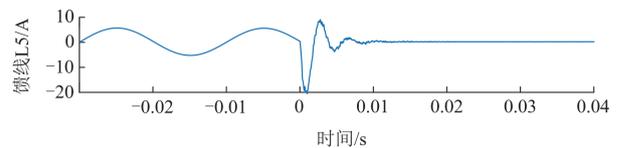
(b)



(c)



(d)



(e)

图 A2 小电阻投入阶段暂态零序电流波形

Fig. A2 Transient zero-sequence current waveform during the low-resistance input phase

弧光高阻接地故障

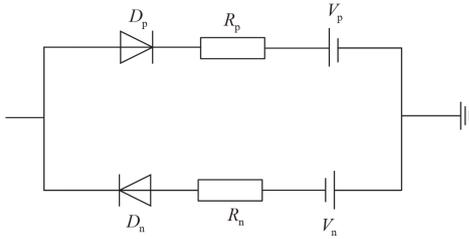


图 A3 Emanuel 电弧模型
Fig. A3 Emanuel arc model

表 A2 电弧模型参数

Table A2 Arc model parameters

案例	V_p/kV	V_n/kV	R_p/Ω	R_n/Ω
1	4.3	4.1	500	400
2	3.8	3.6	1000	900
3	2.2	2.0	2200	1600
4	1.2	1.0	3000	2500

案例 1 对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.001 & 0.77 & 0.001 & 0.006 \\ 0.001 & 0 & 0.64 & 0.002 & 0.01 \\ 1.06 & 1.05 & 0 & 1.06 & 1.08 \\ 0.001 & 0.003 & 0.92 & 0 & 0.01 \\ 0.008 & 0.02 & 1.17 & 0.02 & 0 \end{bmatrix}$$

案例 2 对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.001 & 0.55 & 0.001 & 0.005 \\ 0.001 & 0 & 0.46 & 0.002 & 0.01 \\ 0.77 & 0.76 & 0 & 0.77 & 0.78 \\ 0.001 & 0.004 & 0.67 & 0 & 0.01 \\ 0.009 & 0.02 & 0.85 & 0.02 & 0 \end{bmatrix}$$

案例 4 对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.001 & 0.46 & 0.002 & 0.006 \\ 0.001 & 0 & 0.38 & 0.003 & 0.01 \\ 0.63 & 0.62 & 0 & 0.64 & 0.65 \\ 0.003 & 0.004 & 0.55 & 0 & 0.02 \\ 0.009 & 0.02 & 0.7 & 0.02 & 0 \end{bmatrix}$$

可知除对角线元素外, 各矩阵第 3 列各元素均为该行最大值, 各矩阵第 3 行各元素均为该列最大值, 可以准确辨识线路 3 为故障线路。

不同故障初相角

故障初相角 0° 时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.29 & 0.006 & 0.002 & 0.005 \\ 0.26 & 0 & 0.26 & 0.26 & 0.27 \\ 0.005 & 0.44 & 0 & 0.005 & 0.006 \\ 0.001 & 0.42 & 0.004 & 0 & 0.002 \\ 0.009 & 0.5 & 0.003 & 0.003 & 0 \end{bmatrix}$$

故障初相角 45° 时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.004 & 0.001 & 0.005 \\ 0.31 & 0 & 0.31 & 0.33 & 0.31 \\ 0.001 & 0.47 & 0 & 0.005 & 0.002 \\ 0.007 & 0.43 & 0.005 & 0 & 0.002 \\ 0.001 & 0.53 & 0.003 & 0.003 & 0 \end{bmatrix}$$

故障初相角 60° 时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.31 & 0.004 & 0.001 & 0.005 \\ 0.33 & 0 & 0.36 & 0.33 & 0.33 \\ 0.001 & 0.47 & 0 & 0.007 & 0.003 \\ 0.005 & 0.43 & 0.005 & 0 & 0.002 \\ 0.004 & 0.56 & 0.003 & 0.003 & 0 \end{bmatrix}$$

故障初相角 90° 时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.33 & 0.005 & 0.001 & 0.005 \\ 0.34 & 0 & 0.34 & 0.35 & 0.36 \\ 0.004 & 0.49 & 0 & 0.005 & 0.003 \\ 0.003 & 0.45 & 0.005 & 0 & 0.003 \\ 0.003 & 10.57 & 0.006 & 0.002 & 0 \end{bmatrix}$$

可知除对角线元素外, 各矩阵第 2 列各元素均为该行最大值, 各矩阵第 2 行各元素均为该列最大值, 可以准确辨识线路 2 为故障线路。

母线故障

当母线发生经 1000Ω 过渡电阻接地故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.002 & 0.008 & 0.01 & 0.006 \\ 0.003 & 0 & 0.008 & 0.003 & 0.006 \\ 0.008 & 0.001 & 0 & 0.009 & 0.005 \\ 0.001 & 0.004 & 0.007 & 0 & 0.004 \\ 0.003 & 0.01 & 0.005 & 0.006 & 0 \end{bmatrix}$$

当母线发生经 5000Ω 过渡电阻接地故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.001 & 0.004 & 0.002 & 0.001 \\ 0.001 & 0 & 0.005 & 0.001 & 0.002 \\ 0.006 & 0.003 & 0 & 0.004 & 0.003 \\ 0.004 & 0.002 & 0.004 & 0 & 0.002 \\ 0.006 & 0.007 & 0.005 & 0.005 & 0 \end{bmatrix}$$

当母线发生经 7000Ω 过渡电阻接地故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.008 & 0.005 & 0.004 & 0.005 \\ 0.001 & 0 & 0.001 & 0.002 & 0.006 \\ 0.003 & 0.001 & 0 & 0.004 & 0.004 \\ 0.002 & 0.003 & 0.004 & 0 & 0.001 \\ 0.009 & 0.001 & 0.003 & 0.007 & 0 \end{bmatrix}$$

各矩阵中所有元素均没有出现第 i 行第 i 列元素均为该列该行的最大值情况, 判断为母线故障。

采样点偏移

采样点偏移 0 ms 得到的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.8 & 0.07 & 0.1 & 0.05 \\ 0.61 & 0 & 0.61 & 0.63 & 0.63 \\ 0.2 & 1.17 & 0 & 0.01 & 0.04 \\ 0.02 & 0.9 & 0.007 & 0 & 0.02 \\ 0.01 & 1.21 & 0.02 & 0.05 & 0 \end{bmatrix}$$

采样点偏移 0.25 ms 得到的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.81 & 0.13 & 0.05 & 0.13 \\ 0.62 & 0 & 0.69 & 0.65 & 0.66 \\ 0.18 & 1.27 & 0 & 0.05 & 0.04 \\ 0.06 & 1.04 & 0.05 & 0 & 0.12 \\ 0.2 & 1.31 & 0.05 & 0.16 & 0 \end{bmatrix}$$

观察矩阵可知除对角线元素外, 矩阵第 2 列均为该列所在行最大值, 矩阵第 2 行元素均为该行所在列最大值, 可以准确辨识线路 2 为故障线路。

附录 B



图 B1 低压等值实验平台

Fig. B1 Low voltage equivalent experiment platform

低压实验平台经 1000 Ω 过渡电阻接地故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.35 & 0.19 & 0.01 \\ 1.08 & 0 & 1.02 & 1.03 \\ 0.13 & 0.76 & 0 & 0.08 \\ 0.16 & 0.29 & 0.14 & 0 \end{bmatrix}$$

低压实验平台经 2000 Ω 过渡电阻接地故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.17 & 0.06 & 0.1 \\ 0.53 & 0 & 0.29 & 0.55 \\ 0.02 & 0.18 & 0 & 0.01 \\ 0.07 & 0.25 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

低压实验平台经 3000 Ω 过渡电阻接地故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.12 & 0.05 & 0.04 \\ 0.49 & 0 & 0.28 & 0.65 \\ 0.1 & 0.14 & 0 & 0.07 \\ 0.05 & 0.21 & 0.12 & 0 \end{bmatrix}$$

低压实验平台经 5000 Ω 过渡电阻接故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.07 & 0.01 & 0.02 \\ 0.27 & 0 & 0.22 & 0.2 \\ 0.02 & 0.2 & 0 & 0.01 \\ 0.02 & 0.07 & 0.01 & 0 \end{bmatrix}$$

观察各矩阵第 2 行第 2 列各个元素, 不考虑对角线元素矩阵第 2 列均为该列所在行最大值, 矩阵第 2 行均为该行所在列最大值, 可以准确辨识线路 2 为故障线路。

图 B2 为线路 2 发生 10 000 Ω 接地故障时各线路全过程零序电流波形。图 B3 为消弧线圈补偿阶段各线路暂态零序电流波形。图 B4 为小电阻投入阶段各线路暂态零序电流波形, 为便于展示将暂态初始时刻修改为 0 时刻。图 B5 为消弧线圈补偿阶段各线路暂态零序电流滤波后的波形。图 B6 为小电阻投入阶段各线路暂态零序电流滤波后的波形。

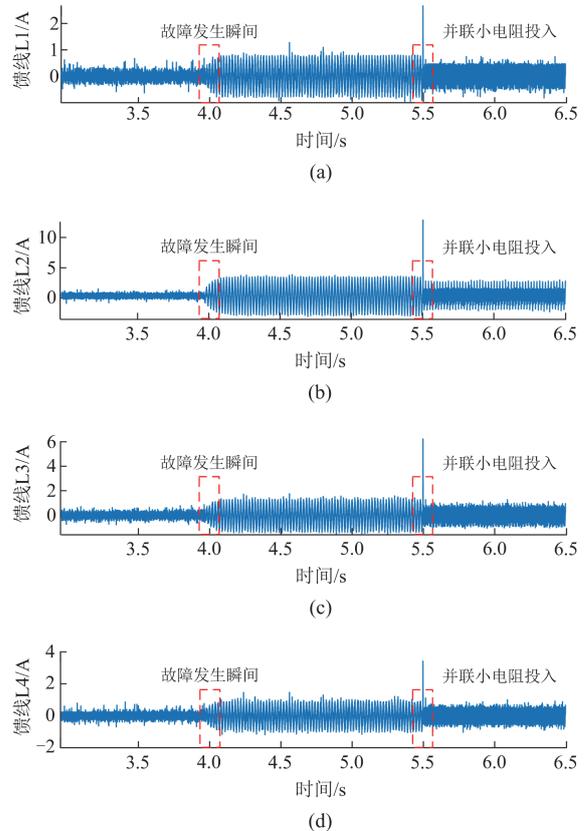


图 B2 过渡电阻为 10 000 Ω 时的零序电流波形

Fig. B2 Zero-sequence current waveform with 10 000 Ω transient resistance

观察图 B3 可以发现在消弧线圈补偿阶段各非故障线路暂态零序电流为衰减的周期分量, 符合式 (8) 的结论。由于现场实验条件有限以及过渡电阻高达 $10\ 000\ \Omega$, 在图 B5 中, 故障线路暂态零序电流波形与非故障线路暂态零序电流波形不像仿真中有明显的区分。观察图 B6 可以发现故障线路与非故障线路的暂态零序电流波形高度相似, 也证实了式 (23) 的准确性, 即故障线路和非故障线路暂态零序电流表达式相同。

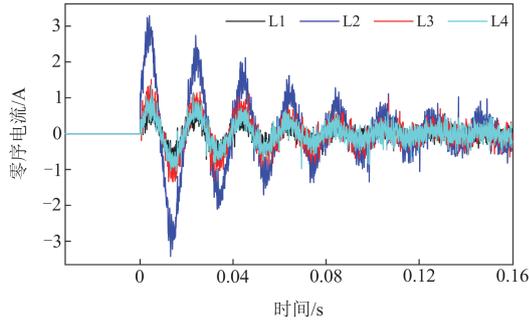


图 B3 消弧线圈补偿阶段暂态零序电流波形

Fig. B3 Transient zero-sequence current waveform during the arc suppression coil compensation phase

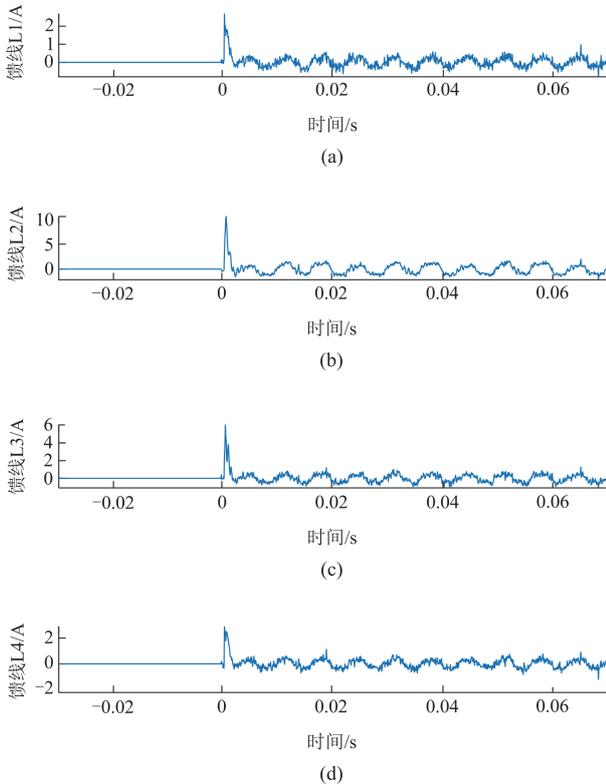


图 B4 小电阻投入阶段暂态零序电流波形

Fig. B4 Transient zero-sequence current waveform during the low-resistance input phase

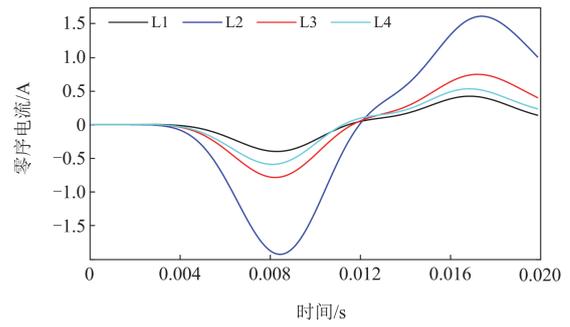


图 B5 消弧线圈补偿阶段滤波后波形

Fig. B5 Waveform after filtering during arc extinction coil compensation phase

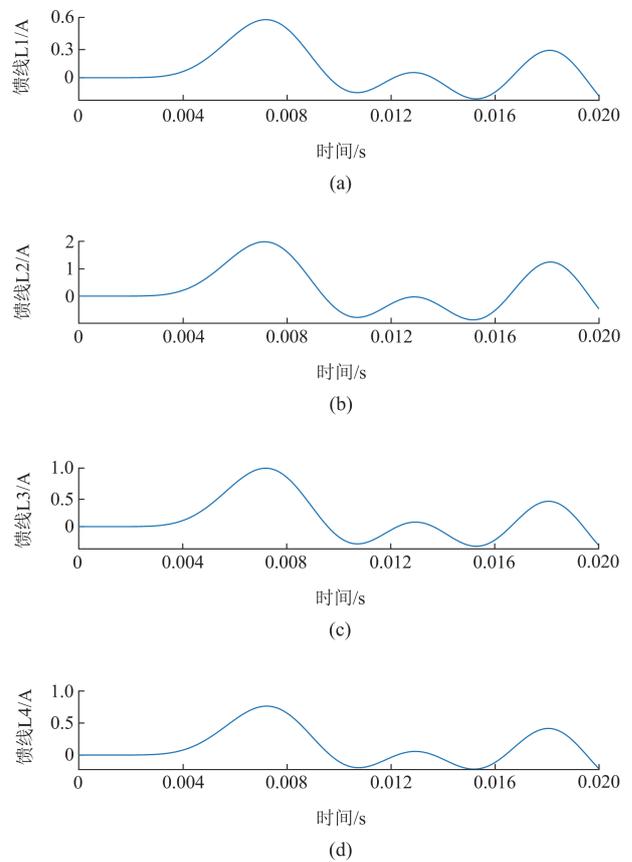


图 B6 小电阻投入阶段滤波后波形

Fig. B6 Waveform after filtering during low-resistance input phase

当母线发生经 $1000\ \Omega$ 过渡电阻接地故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.01 & 0.08 & 0.11 \\ 0.12 & 0 & 0.07 & 0.1 \\ 0.03 & 0.04 & 0 & 0.12 \\ 0.05 & 0.02 & 0.07 & 0 \end{bmatrix}$$

当母线发生经 2000 Ω 过渡电阻接地故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.08 & 0.14 & 0.1 \\ 0.35 & 0 & 0.05 & 0.21 \\ 0.1 & 0.02 & 0 & 0.09 \\ 0.1 & 0.05 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

当母线发生经 3000 Ω 过渡电阻接地故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.01 & 0.02 & 0.07 \\ 0.1 & 0 & 0.04 & 0.02 \\ 0.06 & 0.05 & 0 & 0.03 \\ 0.1 & 0.01 & 0.03 & 0 \end{bmatrix}$$

当母线发生经 5000 Ω 过渡电阻接地故障时对应的零序电流差值矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.01 & 0.02 & 0.05 \\ 0.03 & 0 & 0.1 & 0.06 \\ 0.09 & 0.01 & 0 & 0.02 \\ 0.07 & 0.06 & 0.02 & 0 \end{bmatrix}$$

观察各矩阵中所有元素没有出现第 i 行第 i 列元素均为该列该行的最大值情况,判断为母线故障。

参考文献

[1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[2] 束洪春. 配电网故障选线[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[3] 俞小勇, 李克文, 吴丽芳, 等. 计及相位偏移的小电阻接地系统电压梯度测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(23): 65-73.
YU Xiaoyong, LI Kewen, WU Lifang, et al. Voltage gradient location method for a small resistance grounding system considering phase offset[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(23): 65-73.

[4] 李晓波, 张世乐, 谢剑锋, 等. 计及电网参数不平衡的灵活接地系统高阻接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(5): 59-68.
LI Xiaobo, ZHANG Shile, XIE Jianfeng, et al. A high resistance ground-fault line selection method for flexible grounding system considering unbalanced power grid parameters[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 59-68.

[5] 曾嵘, 李勇, 谢李为, 等. 一种城市配电网自适应全线电流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 154-163.
ZENG Rong, LI Yong, XIE Liwei, et al. An adaptive full-line current protection method for an urban distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 154-163.

[6] 吴海江, 陈锦荣, 廖峰, 等. 小电阻接地配电系统集中式接地保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 141-149.
WU Haijiang, CHEN Jinrong, LIAO Feng, et al. Centralized protection for a grounding fault in a low-resistance grounding distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 141-149.

[7] 王小帅, 薛永端, 刘萃萃, 等. 灵活接地系统小电阻退出暂态特征及对暂态故障选线方法影响[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(16): 174-183.
WANG Xiaoshuai, XUE Yongduan, LIU Cuicui, et al. Transient characteristics of small resistor exit in flexible grounding system and implications for transient faulty-line selection methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 174-183.

[8] 邓祥力, 赵磊鑫, 熊小伏, 等. 基于多元暂态特征故障度的配电网单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 69-80.
DENG Xiangli, ZHAO Leixin, XIONG Xiaofu, et al. A single-phase grounding line selection method for a distribution network based on multivariate transient characteristic fault degree[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 69-80.

[9] 邵文权, 刘一欢, 程远, 等. 基于零序阻抗突变特征的谐振接地系统高阻接地故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 120-126.
SHAO Wenquan, LIU Yihuan, CHENG Yuan, et al. Fault line selection method of grounding fault with high resistance in resonant grounding system based on intensive zero-sequence impedance characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 120-126.

[10] 杨帆, 金鑫, 沈煜, 等. 基于零序导纳变化的灵活接地系统接地故障方向判别算法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 88-94.
YANG Fan, JIN Xin, SHEN Yu, et al. Discrimination algorithm of grounding fault direction based on variation of zero-sequence admittance in flexible grounding system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 88-94.

[11] 周宇, 汤涛, 曾祥君, 等. 基于零序电流幅值比倍增系数的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 112-120.
ZHOU Yu, TANG Tao, ZENG Xiangjun, et al. Fault line detection method for a flexible grounding system based on a zero-sequence current amplitude ratio multiplication coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 112-120.

[12] 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.

- WANG Xiaowei, LIU Weibo, GUO Liang, et al. High impedance fault line selection method based on inner product projection of different time periods for flexible grounding systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 154-167.
- [13] 汤涛, 周宇, 曾祥君, 等. 基于过渡电阻评估的灵活接地系统暂态故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 171-179.
TANG Tao, ZHOU Yu, ZENG Xiangjun, et al. Transient fault line selection method for flexible grounded system based on transition resistance evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 171-179.
- [14] WANG Y, WANG T, LIU L. A fault segment location method for distribution networks based on spiking neural P systems and Bayesian estimation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(3): 1-12.
- [15] 李晓波, 张世乐, 彭超红. 基于低频暂态零序电流畸变率的灵活接地系统高阻接地保护[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(13): 171-183.
LI Xiaobo, ZHANG Shile, PENG Chaohong. High-resistance grounding protection for flexible grounded systems based on low-frequency transient zero-sequence current distortion rate[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(13): 171-183.
- [16] 薛永端, 李娟, 陈筱菁, 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, 5223.
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaoru, et al. Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5037-5048, 5223.
- [17] 王宾, 崔鑫, 董新洲. 配电线路弧光高阻故障检测技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 96-107, 377.
WANG Bin, CUI Xin, DONG Xinzhou. Overview of arc high impedance grounding fault detection technologies in distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 96-107, 377.
- [18] 徐丙垠, 薛永端, 冯光, 等. 配电网接地故障保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 1-7.
XU Bingyin, XUE Yongduan, FENG Guang, et al. Discussion on several problems of earthing fault protection in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 1-7.
- [19] 薛永端, 金鑫, 刘晓, 等. 灵活接地系统中配电网接地保护的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5): 112-121.
XUE Yongduan, JIN Xin, LIU Xiao, et al. Analysis on adaptability of grounding protection for distribution network in flexible grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5): 112-121.
- [20] 李高明, 黎皓彬, 卢颖, 等. 基于暂稳态电流幅值比较的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(10): 97-103.
LI Gaoming, LI Haobin, LU Ying, et al. Fault line selection method for resonance grounding system based on comparison between transient and steady-state current amplitudes[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2022, 34(10): 97-103.
- [21] 秦苏亚, 薛永端, 刘砾钰, 等. 有源配电网小电流接地故障暂态特征及其影响分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 655-666.
QIN Suya, XUE Yongduan, LIU Lizheng, et al. Transient characteristics and influence of small current grounding faults in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 655-666.
- [22] 韦莉珊, 贾文超, 焦彦军. 基于导纳不对称原理的小电流接地系统选线方案[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 162-167.
WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun. Fault line selection scheme in small current grounding system based on admittance asymmetry principle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 162-167.
- [23] 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. Frequency spectrum characteristic analysis of single-phase grounding fault in resonant grounded systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 79-84.
- [24] 国家能源局. 消弧线圈并联低电阻接地装置技术条件: DLT 2482—2022[S].
- [25] ELKALASHY N I, LEHTONEN M, DARWISH H A. Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(2): 375-383.

收稿日期: 2025-01-02; 修回日期: 2025-06-06

作者简介:

李晓波(1976—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为供配电安全、微机保护、智能电器、电能质量等; E-mail: xbli_cumt@126.com

彭超红(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障识别; E-mail: 2221285445@qq.com

刘建华(1973—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统自动化、智能电网、供电安全、电能质量治理等。E-mail: 13382679966@163.com

(编辑 石晋美)