

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210129

小电阻接地系统高灵敏性接地故障区段定位方法

廖芳群¹, 李海锋¹, 陈嘉权², 梁远升¹, 王钢¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510620)

摘要: 小电阻接地系统中发生单相高阻接地故障时, 由于对地故障电流小, 难以实现可靠的故障区段定位。利用对称分量法和电流分支系数对故障特征进行分析发现, 故障点上游的故障相工频变化量电流要远大于健全相的, 而故障点下游和健全线路的三相电流工频变化量幅值则相近。据此, 提出了一种基于相电流工频变化量比值的高灵敏性故障区段定位方法。基于 PSCAD/EMTDC 进行了大量仿真测试, 结果表明所提方法在过渡电阻达 2 000 Ω 时仍然能够可靠定位故障区段, 且只需电流信息, 易于工程实现。

关键词: 小电阻接地系统; 高阻接地故障; 对称分量法; 电流分支系数; 相电流工频变化量比值

High sensitive ground fault location in a low-resistance grounded system

LIAO Fangqun¹, LI Haifeng¹, CHEN Jiaquan², LIANG Yuansheng¹, WANG Gang¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: When High-Impedance Grounded Faults (HIGFs) occur in Low-Resistance Grounded Systems (LRGSs), it is difficult to locate the fault reliably, because of its small fault current. Symmetrical components and a current branching coefficient are used to analyze the characteristics of three-phase current power frequency variations. The analysis shows that the current power frequency variation in the faulty phase of upstream fault points is much larger than that of healthy phases, while the current power frequency variations in the three-phase of downstream fault points and healthy lines are approximately the same. From this, a highly sensitive HIGFs location method based on the phase current power frequency variation ratio is proposed. A large number of simulations developed on platform PSCAD/EMTDC indicate that the proposed method can locate the fault quickly and reliably, even when the fault impedance value reaches 2 000 Ω . It only uses the current signal, and this is easy to implement.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2021A1515010631).

Key words: low-resistance grounded system; high-impedance ground faults; symmetrical components method; current branching coefficient; phase current power frequency variation ratio

0 引言

由于城市配网系统的高速发展, 电缆线路的比例逐渐增大。配电系统中的电容电流急剧增加, 导致系统发生单相接地故障时易引起高幅值的弧光接地过电压, 威胁人身安全及设备的安全运行^[1-2]。小电阻接地系统因其具有有效抑制弧光接地过电压倍数、快速切除接地故障等优势而在北京、上海、深圳、杭州等大中型城市的配电网中得到广泛应用^[1,3-5]。广东电网目前已全部改为了小电阻接地或消弧线圈并

小电阻接地方式。中性点经小电阻接地系统检测单相接地故障主要是采用零序过电流保护。为了躲过区外故障时流过本线路的对地电容电流值, 该方法可耐受的过渡电阻值一般为 100 Ω 左右, 且随故障点远离母线, 灵敏性不断降低^[4,6]。而架空线由于施工、刮碰等原因断开并掉落到地面后易发生高阻接地故障, 此时过渡电阻值可达上千欧, 故障电流小, 零序过流保护将发生拒动^[7-8]。虽然高阻接地故障电流较小, 但若任其长期存在, 将会严重威胁人身安全和设备安全, 甚至将引发更严重的故障, 扩大故障范围^[9-10]。因此, 如何有效地检测并定位高阻接地故障是小电阻接地系统迫切需要解决的难题^[11-12]。

基金项目: 广东省自然科学基金项目资助 (2021A1515010631)

现有的配电网故障区段定位算法借鉴了故障选线的诸多方法, 但传统的定位方法不能有效解决高电阻接地故障的难题。为此, 文献[13]利用故障区段内选定频带的暂态零序电流能量大于健全区段内的, 进行故障区段定位, 但频带的选定与配电网的拓扑结构关系密切, 而配电网的拓扑结构又常发生变化, 实用性较差; 文献[14]提出了基于零模电流行波的故障区段定位方法, 此方法利用交叉小波变换分析故障区段上下游零模电流行波的相位差, 据此进行故障区段定位, 但存在一定的死区范围; 文献[15]利用故障相电压作为极化量, 分析线路测点零序电流与故障相电压的相似程度进行故障方向检测, 实现高阻定位。此方法提高了过渡电阻的耐受能力, 但对通信的要求较高, 计算量大; 文献[16]指出故障点上下游的零序电流衰减周期分量在相位上存在较大差别, 并利用该相位进行故障区段定位, 但方法复杂, 计算量大; 文献[17]结合卷积神经网络和深度强化学习实现高阻定位。此方法提高了过渡电阻的耐受能力, 但需要大量的训练数据集, 且计算量大; 文献[18]利用相电流暂态突变量波形的一致程度进行故障区段定位, 但利用暂态量所需的采样频率较高且易受干扰, 不利于工程应用。文献[19]利用故障点上下游的零序电流衰减分量的相位差异进行故障区段定位, 但此方法需要采用扩展 Prony 算法重构零序电流衰减分量, 较为复杂, 且对通信的要求较高。此外, 以上方法皆为针对中性点经消弧线圈接地系统或中性点不接地系统提出的高阻接地故障区段定位方法, 在中性点经小电阻接地系统中可能失效。

目前, 小电阻接地系统中针对高阻接地故障的研究主要集中在保护原理方面。文献[20]在现有的零序电流保护原理的基础上引入零序电压信息对测量的零序电流进行修正, 使得修正后的零序电流测量值与故障首端发生金属性接地故障的情况相似, 从而提高小电阻接地系统高阻接地故障的保护灵敏性, 但此方法需要额外测得零序电压信息; 文献[21]提出改进的反时限零序过电流保护降低保护的启动门槛值, 进而提高对高阻接地故障的保护能力, 但需经过一定的动作时限才能切除故障。文献[22]利用故障时各出线零序电流及中性点零序电流的关系选出故障线路, 但需要额外测得中性点零序电流。文献[23]提出了一种综合功率算法以解决互感器极性校验困难的问题, 但此方法易受线路不平衡量影响^[24]。以上方法皆能有效提高小电阻接地系统高阻接地故障时保护的灵敏度, 但是目前针对小电阻接

地系统故障区段定位方法的研究较少。

为解决小电阻接地系统中高阻接地故障区段定位困难的问题, 本文利用对称分量法对小电阻接地系统在单相接地故障下不同位置各序电流变化量的分支系数进行推导, 从而得出不同位置的健全相与故障相的相电流工频变化量表达式; 进而利用各相间的相电流工频变化量比值构造判据, 实现对接地故障的高灵敏性区段定位。最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证所提方法的有效性。

1 小电阻接地系统的故障序分量模型

当系统发生单相接地故障时, 可将故障系统等效为正常运行状态与故障附加状态的叠加形式。以图 1 所示的中性点经小电阻接地的 10 kV 配电网为例, P 点发生单相接地故障时, 故障网络可分解为图 1(a)中正常运行状态网络和图 1(b)中引入故障附加电压源 \dot{U}_f , 且不含其他电源的故障附加状态网络。图 1 中: 各段线路的对地电容分别为 $C_1 \sim C_5$; $D_1 \sim D_5$ 为线路的检测终端; R_f 为故障点 P 发生单相接地故障时的过渡电阻; 为了便于分析, 将故障点到母线间的线路阻抗归并到过渡电阻 R_f 中, 并忽略健全线路阻抗; \dot{U}_f 为故障附加电压源, 其大小与正常运行状态时 P 点电压大小相等, 但方向相反; $\Delta I_1 \sim \Delta I_3$ 为发生故障后各线路上的相电流工频变化量。

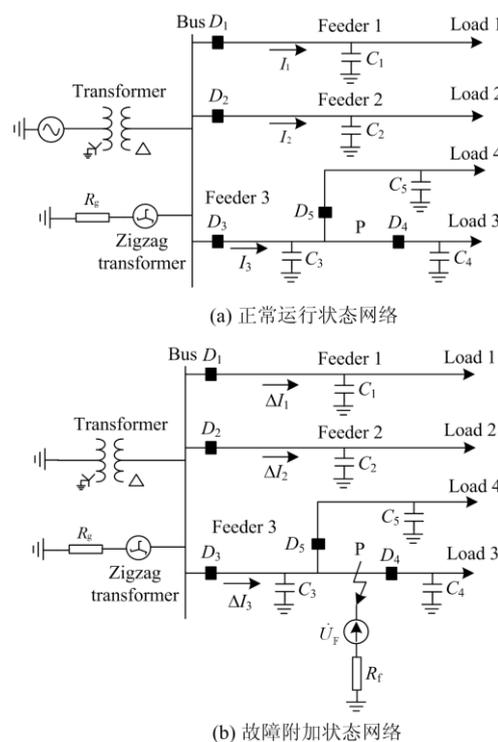


图 1 小电阻接地系统的故障网络分解图

Fig. 1 Networks of normal operation and fault superimposed

利用对称分量法可将故障附加状态网络分解为对应的正、负、零序网络。其中，故障零序网络和故障正序网络如图 2(a)和图 2(b)所示。

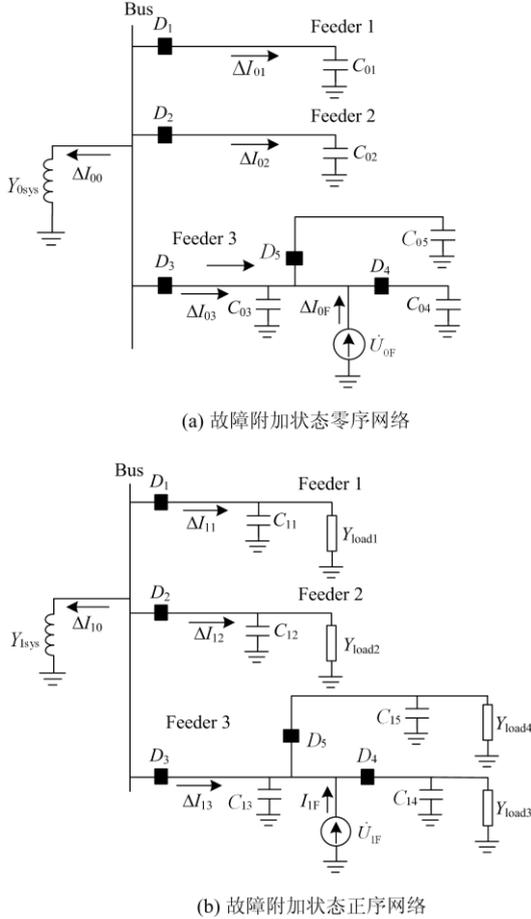


图 2 故障附加状态序网图

Fig. 2 Sequence networks of fault superimposed network

由于负序电流通过的元件与正序电流相同，即从故障端口 P 看入，负序网络结构与正序网络结构相同，且各元件的正序、负序阻抗相等，此处不再展示。 Y_{0sys} 为零序网络中系统接地支路等效导纳； Y_{1sys} 为正序网络中高电压侧系统阻抗和主变压器漏抗换算到低电压侧的等效导纳； Y_{loadi} 为出线所接的负荷导纳，由于系统中的降压变压器一般为 V/Y 接法，因此零序网络中不包含负荷导纳。 C_{0i} 为出线对地零序电容； C_{1i} 为出线对地正序电容。过渡电阻和附加电压源可以在零序和正序网络中等效为电流源，分别流出故障零序电流 \dot{I}_F^0 和故障正序电流 \dot{I}_F^1 ，其电压分别为 \dot{U}_F^0 和 \dot{U}_F^1 。 $\Delta I_{00} - \Delta I_{03}$ 和 $\Delta I_{10} - \Delta I_{13}$ 分别为故障发生后零序和正序网络中各线路上的序电流变化量。

2 单相接地故障的相电流工频变化量特征分析

2.1 序电流分支系数

定义故障附加状态序网络中任一 M 点的序电流分支系数 k_{jM}^x 为该点的序电流 $\Delta \dot{I}_{jM}^x$ 与故障端口处的故障序电流 \dot{I}_F^x 之比，如式(1)所示。

$$k_{jM}^x = \frac{\Delta \dot{I}_{jM}^x}{\dot{I}_F^x} \quad j=0,1,2 \quad (1)$$

式中，下标 j 等于 0、1、2 时分别表示零序、正序和负序分量。由于故障附加状态的正序、负序网络拓扑结构及各元件参数近似相等，因此正序、负序网络各点的电流分支系数相等。

通过图 2 给出的附加状态序网络可计算序网络中任意 M 点的序电流分支系数。为便于描述，根据 M 点所在位置，序电流分支系数的计算公式可分成两种情况：

1) M 点位于故障点上游

即 M 点位于故障点与母线之间，则由图 2 可得其分支系数为

$$k_{jM}^x = \frac{(\sum Y_{C_{j,L}} + \sum Y_{C_{j,up}} + Y_{j,sys} + t \cdot \sum Y_{load,L}) \dot{U}_{jF}}{(\sum Y_{C_j} + Y_{j,sys} + t \cdot \sum Y_{load}) \dot{U}_{jF}} = \frac{\sum Y_{C_{j,L}} + \sum Y_{C_{j,up}} + Y_{j,sys} + t \cdot \sum Y_{load,L}}{\sum Y_{C_j} + Y_{j,sys} + t \cdot \sum Y_{load}} \quad (2)$$

2) M 点位于线路其他位置

若 M 点位于故障线路故障点的下游、故障线路的支路或是健全线路上，其序电流分支系数则为

$$k_{jM}^x = \frac{(\sum Y_{C_{j,down}} + t \cdot \sum Y_{load,down}) \dot{U}_{jF}}{(\sum Y_{C_j} + Y_{j,sys} + t \cdot \sum Y_{load}) \dot{U}_{jF}} = \frac{\sum Y_{C_{j,down}} + t \cdot \sum Y_{load,down}}{\sum Y_{C_j} + Y_{j,sys} + t \cdot \sum Y_{load}} \quad (3)$$

式中： t 为标识变量，若分析的序网络为零序网络，则 t 置 0，否则置 1； $Y_{C_{j,L}}$ 、 $Y_{load,L}$ 分别为各健全出线的 j 序对地电容导纳和负荷导纳； $Y_{C_{j,up}}$ 和 $Y_{C_{j,down}}$ 分别为故障线路上 M 点上、下游的对地导纳； $Y_{load,down}$ 为故障线路上 M 点下游的负荷导纳； $\sum Y_{C_j}$ 为 j 序网络所有对地导纳之和； $Y_{j,sys}$ 为 j 序网络的系统等效导纳。

2.2 相电流工频变化量特征

利用对称分量法变换，可将故障附加状态序网中任意 M 点的序电流变化量 $\Delta \dot{I}_{j,1,2}^x$ 变换为故障附加状态网络中该点的相电流工频变化量 $\Delta \dot{I}_{a,b,c}^x$ ，如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_a \\ \Delta \dot{I}_b \\ \Delta \dot{I}_c \end{bmatrix} = S \dot{I}_{1,2,0} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \\ \Delta I_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, S 为对称分量法变换矩阵。

在发生单相接地故障时, 以故障相正序电流为参考相量, 故障点处的正序、负序、零序故障电流 \dot{I}_F 相等, 结合式(1)和式(4)可推导出系统内任一 M 点处的相电流工频变化量的表达式为

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{Ma} = (\kappa_{0M} + 2\kappa_{1M}) \dot{I}_F \\ \Delta \dot{I}_{Mb} = (\kappa_{0M} - \kappa_{1M}) \dot{I}_F \\ \Delta \dot{I}_{Mc} = (\kappa_{0M} - \kappa_{1M}) \dot{I}_F \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta \dot{I}_{Ma}$ 、 $\Delta \dot{I}_{Mb}$ 和 $\Delta \dot{I}_{Mc}$ 为故障附加状态网络中 M 点处三相电流工频变化量; κ_{jM} ($j=0, 1$) 为 M 点的 j 序电流分支系数; \dot{I}_F 为故障端口处的故障零序电流。

由式(5)可知, 故障相 a 和非故障相 b 、 c 的表达式间存在差异, 两健全相的相电流工频变化量相等。可将(5)改写成式(6)统一形式。

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{fault} = (\kappa_{0M} + 2\kappa_{1M}) \dot{I}_F \\ \Delta \dot{I}_{health} = (\kappa_{0M} - \kappa_{1M}) \dot{I}_F \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta \dot{I}_{fault}$ 为故障相电流工频变化量; $\Delta \dot{I}_{health}$ 为健全相电流工频变化量。

式(6)表明相电流工频变化量与电流分支系数有关; 而电流分支系数由系统拓扑结构和参数决定, 下面具体分析。

2.2.1 故障线路

根据终端相对于故障点的位置, 选取图 1 中故障出线 3 上典型的检测终端 D_3 、 D_4 和 D_5 的电流分支系数进行分析, 其中 D_3 为故障点上游检测终端, D_4 为故障点下游检测终端, D_5 为故障线路支路上的检测终端。

1) 故障点上游 D_3

配电网出线一般较短(一般小于 10 km), 因此零序网络中出线对地电容导纳很小^[25]。小电阻接地系统的中性点由曲折变压器引出, 并通过一阻值较小的电阻(一般取 10 Ω)接地^[5], 可推知该系统接地支路等效导纳 Y_{0sys} 很大。由上述分析知零序网络中出线对地电容导纳远小于系统接地支路等效导纳 Y_{0sys} , 因此利用检测终端 D_3 , 由(2)可求出 D_3 的零序电流分支系数 κ_{D_3} 为

$$\kappa_{D_3} = \frac{Y_{C01} + Y_{C02} + Y_{0sys}}{\sum_{i=1}^5 Y_{C0i} + Y_{0sys}} \approx 1 \quad (7)$$

配电网中系统高电压侧系统阻抗和主变压器漏

抗换算到低电压侧的等效阻抗值很小; 而配电网中每条出线的负荷不大, 负荷阻抗却很大, 是系统等效阻抗的近百倍。因此推知系统的正序导纳 Y_{1sys} 远大于系统接入的负荷导纳 Y_{loadi} 。此外, 配电网的出线较短, 因此每条馈线的负荷导纳 Y_{loadi} 远小于馈线的对地导纳^[25]。根据正序网络, 可得检测终端 D_3 的正序电流分支系数 κ_{D_3} 为

$$\kappa_{D_3} = \frac{\sum_{i=1}^2 Y_{C1i} + \sum_{i=1}^2 Y_{loadi} + Y_{1sys}}{\sum_{i=1}^5 Y_{C1i} + \sum_{i=1}^4 Y_{loadi} + Y_{1sys}} \approx 1 \quad (8)$$

结合式(6)可以得出故障出线 3 上故障点上游的检测终端 D_3 的相电流工频变化量表达式为

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{D_3_fault} = (\kappa_{D_3} + 2\kappa_{D_3}) \dot{I}_F \approx 3\dot{I}_F \\ \Delta \dot{I}_{D_3_health} = (\kappa_{D_3} - \kappa_{D_3}) \dot{I}_F \approx 0 \end{cases} \quad (9)$$

2) 故障点下游 D_4 及故障线路支路 D_5

同理, 由式(3)可以分别求出 D_4 、 D_5 处的零序电流分支系数 κ_{D_4} 、 κ_{D_5} 和正序电流分支系数 κ_{D_4} 、 κ_{D_5} 为

$$\begin{aligned} \kappa_{D_4} &= \frac{Y_{C04}}{\sum_{i=1}^5 Y_{C0i} + Y_{0sys}} \approx 0 \\ \kappa_{D_5} &= \frac{Y_{C05}}{\sum_{i=1}^5 Y_{C0i} + Y_{0sys}} \approx 0 \\ \kappa_{D_4} &= \frac{Y_{C14} + Y_{load3}}{\sum_{i=1}^5 Y_{C1i} + \sum_{i=1}^4 Y_{loadi} + Y_{1sys}} \approx 0 \\ \kappa_{D_5} &= \frac{Y_{C15} + Y_{load4}}{\sum_{i=1}^5 Y_{C1i} + \sum_{i=1}^4 Y_{loadi} + Y_{1sys}} \approx 0 \end{aligned} \quad (10)$$

结合式(6), 可进一步给出故障线路故障点下游的检测终端 D_4 故障相和健全相电流工频变化量 $\Delta \dot{I}_{D_4_fault}$ 、 $\Delta \dot{I}_{D_4_health}$, 和故障线路支路上的检测终端 D_5 故障相和健全相电流工频变化量 $\Delta \dot{I}_{D_5_fault}$ 、 $\Delta \dot{I}_{D_5_health}$ 表达式为

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{D_4_fault} = (\kappa_{D_4} + 2\kappa_{D_4}) \dot{I}_F \approx 0 \\ \Delta \dot{I}_{D_4_health} = (\kappa_{D_4} - \kappa_{D_4}) \dot{I}_F \approx 0 \\ \Delta \dot{I}_{D_5_fault} = (\kappa_{D_5} + 2\kappa_{D_5}) \dot{I}_F \approx 0 \\ \Delta \dot{I}_{D_5_health} = (\kappa_{D_5} - \kappa_{D_5}) \dot{I}_F \approx 0 \end{cases} \quad (11)$$

2.2.2 健全线路

以上分析的是故障线路上各检测终端的相电流工频变化量, 健全线路上检测终端处相电流工频变化量分析过程与此相同, 且结果与故障线路故障

点下游检测终端 D_4 、故障线路支路上的检测终端 D_5 类似。以健全线路检测终端 D_1 为例， D_1 故障相和健全相电流工频变化量 $\Delta I_{D_1_fault}$ 、 $\Delta I_{D_1_health}$ 表达式为

$$\begin{cases} \Delta I_{D_1_fault} = (K_{D_1} + 2K_{D_1}) I_F \approx 0 \\ \Delta I_{D_1_health} = (K_{D_1} - K_{D_1}) I_F \approx 0 \end{cases} \quad (12)$$

2.2.3 小结

式(9)和式(11)表明故障线路上只有故障点上游检测终端故障相相电流工频变化量 $\Delta I_{D_3_fault}$ 不为零，约为故障零序电流 I_F 的 3 倍，而其健全相相电流工频变化量则都很小，且根据电流分支系数的定义和式(9)可推知，故障点上游检测终端越靠近故障点，其故障相相电流工频变化量将越大。除此以外其余的区段，包括健全线路、故障点下游区段和分支线路的三相相电流工频变化量都很小。因此，利用相电流工频变化量的幅值特征即可有效判别故障区段。

3 基于相电流工频变化量比值的故障区段定位算法

3.1 相电流工频变化量比值判据

由于实际系统中故障相电流工频变化量会随过渡电阻的增大而减小，健全相的电流工频变化量也并不为零，若仅利用相电流工频变化量的大小作为故障判据，其灵敏性会受到影响。为削弱过渡电阻变化的不利影响，可引入相电流工频变化量比 P 作为故障判据，如式(13)所示。

$$P = \frac{|\Delta I_{fault}|}{|\Delta I_{health}|} = \frac{K_M + 2K_M}{K_M - K_M} \quad (13)$$

式中， P 为相电流工频变化量比，它是各出线故障相相电流工频变化量 ΔI_{fault} 与健全相相电流工频变化量 ΔI_{health} 的幅值之比。

当系统中出现不平衡电流时，两健全相电流工频变化量将出现差异，可能导致判据灵敏性下降或误判。为减弱不平衡电流的影响，相电流工频变化量的比值计算可改进为

$$P = \frac{\max\{\Delta I_{a,b,c}\}}{\Delta I_{average}} \quad (14)$$

式中： \max 表示取三相电流工频变化量的最大值； $\Delta I_{average}$ 取除最大相电流工频变化量外剩下两相电流工频变化量的平均值。

由于健全线路和故障点下游检测终端上各相电流工频变化量近似相等，因此健全线路与故障点下游检测终端的相电流工频变化量比 R_{health} 近似为 1。

$$R_{health} \approx 1 \quad (15)$$

而故障点上游检测终端故障相电流工频变化

量为 3 倍的故障零序电流 I_F ，且健全相相电流工频变化量近似为 0，因此故障点上游检测终端处的相电流工频变化量比 R_{fault} 应远大于 1。

$$R_{fault} \gg 1 \quad (16)$$

由于故障点上游检测终端的相电流工频变化量比与健全出线、故障线路支路及故障点下游检测终端的相电流工频变化量比有明显差异，且此差异受过渡电阻、线路拓扑结构关系的影响较小，因此相电流工频变化量比值可用于高阻接地故障的选线和区段定位。

3.2 故障定位流程

故障定位的流程图如图 3 所示。

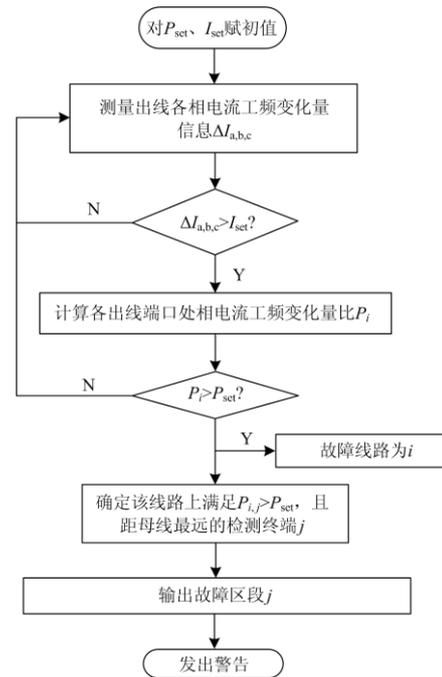


图 3 故障定位流程图

Fig. 3 Fault location flowchart

1) 首先进行故障选线

利用各出线端(靠近母线处)的检测终端采集各馈线中各相电流工频变化量信息 $\Delta I_{a,b,c}$ 。为躲过负荷波动和最大不平衡电流的影响，应给出一个启动判据 I_{set} 。若 $\Delta I_{a,b,c}$ 大于启动判据 I_{set} ，则利用式(14)计算各出线的相电流工频变化量比 P_i (i 为出线编号)；否则，继续检测各出线的相电流工频变化量信息。为保证某一阻值范围内的高阻接地故障都能被准确判定，可利用第 i 条出线经最大可判定过渡电阻接地时的相电流工频变化量 $\Delta I_{min,i}$ 计算该出线的启动判据 $I_{set,i}$ ，如

$$I_{set,i} = \frac{\Delta I_{min,i}}{K_{rel,1}} \quad (17)$$

式中, $K_{rel,1}$ 为可靠系数, 可取 1.1~1.5。

若某条出线端口处检测终端的相电流工频变化量比 P 大于故障判据 P_{set} :

$$P > P_{set} \quad (18)$$

则认为该线路发生了单相接地故障, 启动对应线路的故障区段定位。线路未发生故障时, 各相电流工频变化量近似相同, 根据式(15), 此时线路的相电流工频变化量比值应为 1。为区分健全线路与故障线路, 可根据实际情况确定故障判据:

$$P_{set} = K_{rel,2} R_{health} \quad (19)$$

式中, $K_{rel,2}$ 为可靠系数, 可取 1.5~3.0。

2) 故障区段定位

由上述分析知, 故障出线故障点上游检测终端的相电流工频变化量比值都远大于故障点下游检测终端的相电流工频变化量比值。因此, 按离母线距离由近到远的顺序逐一检测该线路上其他终端上相电流工频变化量比的情况, 满足式(18)的最远检测终端所在区段即为故障区段。

4 仿真验证

根据图 4 给出的 10 kV 小电阻接地系统在 PSCAD/EMTDC 平台搭建模型进行仿真验证, 采样频率为 4 kHz。该模型中, 中性点接地电阻 R_g 为 10 Ω , 共有四条馈线, 各线路的分段情况及具体长度如图 4 所示。线路的正序、零序参数在表 1 给出, 负序参数与正序参数相同。取最大可判定过渡电阻为 2 000 Ω , 可靠系数 $K_{rel,1}$ 取 1.2, 利用式(17)可得出线 1 到出线 4 的启动判据 $I_{set,i}$ 分别为 3.2 A、3.1 A、2.8 A 和 2.6 A。取可靠系数 $K_{rel,2}$ 为 3.0, 因此故障判据 P_{set} 为 3。

表 2 各检测终端电流分支系数

Table 2 Current branching coefficients of test points

	仿真值				理论值	理想值
	$R_f=10 \Omega$	$R_f=500 \Omega$	$R_f=1\ 000 \Omega$	$R_f=2\ 000 \Omega$		
$k_{0D_{11}}$	1.003 2	1.002 9	1.002 7	1.002 2	0.999 7	1.000 0
$k_{1D_{11}}$	0.900 1	0.901 4	0.903 2	0.906 8	0.956 8	1.000 0
$k_{0D_{12}}$	1.001 0	1.001 0	1.000 8	1.000 3	0.999 9	1.000 0
$k_{1D_{12}}$	0.939 7	0.940 6	0.941 6	0.943 4	0.973 8	1.000 0
$k_{0D_{13}}$	0.000 9	0.000 9	0.000 8	0.000 9	0.000 2	0
$k_{1D_{13}}$	0.041 8	0.041 3	0.040 7	0.039 6	0.024 8	0
$k_{0D_{14}}$	0.001 1	0.001 1	0.001 1	0.001 1	0.000 3	0
$k_{1D_{14}}$	0.042 7	0.042 1	0.041 6	0.040 5	0.024 8	0
k_{0D_1}	0.000 6	0.000 6	0.000 6	0.000 6	0.000 2	0

根据表 2 给出的各检测终端处的电流分支系数可验证文中理论分析:

1) 各序电流分支系数仅与系统的拓扑结构和参

在系统内的不同区段设置不同过渡电阻的单相接地故障(如图 4 中的 F_1 和 F_2), 以验证基于相电流工频变化量比的故障区段定位方法的准确性。

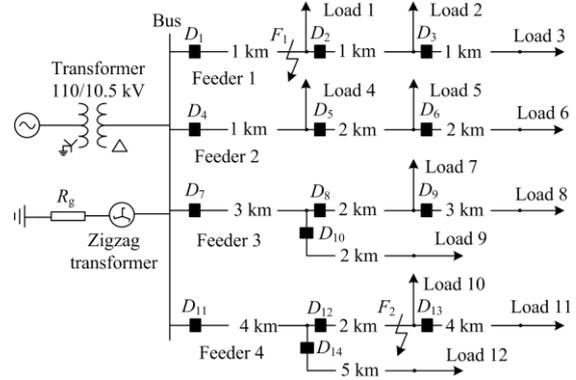


图 4 10 kV 小电阻接地系统

Fig. 4 10 kV low-resistance grounded system

表 1 线路参数

Table 1 Transmission line parameters

相序	电阻/(Ω /km)	电容/(μ F/km)	电感/(mH/km)
零序	0.275 0	0.005 4	4.600 0
正序	0.125 0	0.009 6	1.300 0

4.1 电流分支系数

在故障点 F_2 的 b 相设置不同过渡电阻的单相接地故障。利用仿真得到的各检测终端相电流, 经对称分量法变换后, 按式(1)所给定义可计算各检测终端的电流分支系数实际值, 并与理论计算值和理想值进行比较以验证式(7)、式(8)和式(10), 其结果如表 2 所示。

数有关, 受过渡电阻的影响很小。

2) D_{11} 和 D_{12} 为故障点上游的检测终端, 其零序电流分支系数 $k_{0D_{11}}$ 、 $k_{0D_{12}}$ 和正序电流分支系数 $k_{1D_{11}}$ 、

$k_{1D_{12}}$ 皆近似等于理论值；且由于对地电容的分流作用，离故障点越近的上游检测终端，其序电流分支系数就越接近于理想值。以 D_{12} 的正序电流分支系数 $k_{1D_{12}}$ 为例，该值在过渡电阻分别为 $300\ \Omega$ 和 $2\ 000\ \Omega$ 时与测点位置的关系如图 5 所示。

3) 故障点下游检测终端 D_{13} 、故障线路支路检测终端 D_{14} 和健全线路上的检测终端 D_1 的正序、零序电流分支系数皆近似为 0。以 D_1 的正序电流分支系数 k_{1D_1} 为例，该值在过渡电阻分别为 $300\ \Omega$ 和 $2\ 000\ \Omega$ 时与测点位置的关系如图 5 所示。

4.2 所提方法的性能测试

在 F_1 的 a 相、 F_2 的 b 相设置不同过渡电阻的单相接地故障。故障定位流程中各终端测得的相电流工频变化量比值及故障定位结果在表 3、表 4 中给出。

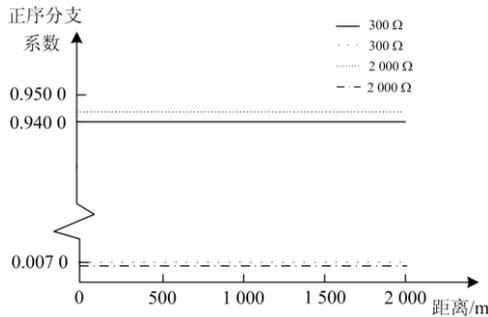


图 5 正序电流分支系数与测点位置的关系

Fig. 5 Relation between positive sequence current branching coefficient and test position

表 3 F_1 点 a 相接地故障检测结果

Table 3 Location results of phase-a-to-ground fault at F_1

过渡电阻 R_f/Ω	相电流工频变化量比 P					诊断线路	定位区段
	D_1	D_4	D_7	D_{11}	D_2		
10	120.8	1.7	1.6	1.5	1.9	1	D_1
300	120.5	1.8	1.6	1.5	1.9	1	D_1
500	120.1	1.8	1.6	1.5	1.9	1	D_1
1 000	119.1	1.7	1.5	1.5	1.9	1	D_1
1 500	118.1	1.7	1.5	1.4	1.9	1	D_1
2 000	117.1	1.7	1.7	1.5	1.9	1	D_1

表 4 F_2 点 b 相接地故障检测结果

Table 4 Location results of phase-b-to-ground fault at F_2

过渡电阻 R_f/Ω	相电流工频变化量比 P								诊断线路	定位区段
	D_1	D_4	D_7	D_{11}	D_{12}	D_{13}	D_{14}			
10	1.8	1.7	1.6	25.6	44.4	1.9	1.9	4	D_{12}	
300	1.8	1.7	1.5	25.8	44.7	1.9	1.9	4	D_{12}	
500	1.8	1.7	1.5	26.0	44.9	1.9	1.9	4	D_{12}	
1 000	1.8	1.7	2.6	26.3	45.5	2.0	1.9	4	D_{12}	
1 500	1.8	1.8	2.4	26.7	46.1	1.9	1.9	4	D_{12}	
2 000	1.8	2.2	2.2	27.1	46.7	1.9	1.9	4	D_{12}	

为进一步验证运行方式变化对故障定位的影响，切除出线 3，再分别对 F_1 的 a 相、 F_2 的 b 相设置不同过渡电阻的单相接地故障，检测终端测得的相电流工频变化量比和故障定位结果在表 5、表 6 中给出。由表 5 和表 6 可见，所提方法受运行方式的影响很小。

表 5 切除出线 3 时 F_1 点 a 相接地故障检测结果

Table 5 Location results of phase-a-to-ground fault at F_1 when cutting off feeder 3

过渡电阻 R_f/Ω	相电流工频变化量比 P				诊断线路	定位区段
	D_1	D_4	D_{11}	D_2		
10	120.6	1.7	1.5	1.9	1	D_1
300	120.2	1.8	1.5	1.9	1	D_1
500	119.8	1.8	1.5	1.9	1	D_1
1 000	118.8	1.7	1.5	1.9	1	D_1
1 500	117.8	1.7	1.4	1.9	1	D_1
2 000	116.6	1.7	1.5	1.9	1	D_1

表 6 切除出线 3 时 F_2 点 b 相接地故障检测结果

Table 6 Location results of phase-a-to-ground fault at F_2 when cutting off feeder 3

过渡电阻 R_f/Ω	相电流工频变化量比 P						诊断线路	定位区段
	D_1	D_4	D_{11}	D_{12}	D_{13}	D_{14}		
10	1.8	1.7	25.6	44.3	1.9	1.9	4	D_{12}
300	1.8	1.7	25.8	44.7	1.9	1.9	4	D_{12}
500	1.8	1.7	25.9	44.9	1.9	1.9	4	D_{12}
1 000	1.8	1.7	26.3	45.5	1.9	1.9	4	D_{12}
1 500	1.8	1.8	26.7	46.1	1.8	1.9	4	D_{12}
2 000	1.8	2.2	27.0	46.7	1.9	1.9	4	D_{12}

4.3 不同采样频率下的性能测试

为验证不同采样频率对所提方法的性能影响，在 F_1 的 a 相设置不同过渡电阻的单相接地故障，分别选取 1 kHz、2 kHz 和 4 kHz 的采样频率对相电流进行采样分析。表 7 给出不同采样频率下故障点上、下游检测终端 D_1 、 D_2 及健全线路上的检测终端 D_4 测得的相电流工频变化量比值。

从表 7 知，不同采样频率下，各终端测得的相电流工频变化量比值没有明显区别，表明所提故障区段定位原理受采样频率的影响较小。

5 结论

本文针对小电阻接地系统的高阻接地故障，提出了基于相电流工频变化量比的故障区段定位方法。通过大量的仿真验证，所得结论如下：

1) 所提方法利用相电流工频变化量比突出故障线路上故障相与健全相的相电流工频变化量差异，减弱了过渡电阻对故障特征的影响，原理清晰，判据简洁。

表 7 不同采样频率下的相电流工频变化量比
Table 7 Phase current power frequency variation ratio
with different sampling frequency

过渡电阻 R_f/Ω	采样频率	相电流工频变化量比		
		D_1	D_2	D_4
10	1 kHz	120.8	1.9	1.7
300		121.4	1.9	1.7
500		121.2	1.9	1.7
1 000		121.1	1.9	1.6
1 500		120.6	1.9	1.6
2 000		119.8	1.9	1.6
10	2 kHz	120.8	1.9	1.7
300		120.2	1.9	1.8
500		119.6	1.9	1.8
1 000		118.1	1.9	1.8
1 500		116.6	1.9	1.8
2 000		115.1	1.9	1.7
10	4 kHz	120.8	1.9	1.7
300		120.5	1.9	1.8
500		120.1	1.9	1.8
1 000		119.1	1.9	1.7
1 500		118.1	1.9	1.7
2000		117.1	1.9	1.7

2) 所提方法耐受过渡电阻能力强, 在过渡电阻达 2 000 Ω 时仍能准确地识别出故障线路和故障区段。

3) 所提方法只需要交换各终端的相电流工频变化量比值信息, 无需电压信息, 且对采样频率要求不高, 对通信水平要求也较低, 易于工程实现。

参考文献

- [1] 曹小玲, 蒋多晖. 中性点经小电阻接地方式在电力系统中的应用[J]. 华东电力, 2013, 41(11): 2305-2307.
CAO Xiaoling, JIANG Duohui. Application of neutral point after the low resistance mode in power network[J]. East China Electric Power, 2013, 41(11): 2305-2307.
- [2] XIAO Yang, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 111-123. DOI: 10.1186/s41601-020-00156-w.
- [3] 张豪, 詹红霞, 张曦, 等. 基于多端故障电流匹配的配电网故障定位方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 97-103.
ZHANG Hao, ZHAN Hongxia, ZHANG Xi, et al. Distribution network fault location method based on multi-terminal fault current matching[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 97-103.
- [4] 董凯达, 蔡燕春, 金震. 小电阻接地配电网零序保护的改进研究[J]. 供用电, 2020, 37(6): 48-52.
DONG Kaida, CAI Yanchun, JIN Zhen. The research on the improvement of the zero-sequence relay for the low resistance grounded distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(6): 48-52.
- [5] 林志超, 汪洋, 罗步升, 等. 小电阻接地系统高灵敏度接地保护配置与整定[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(3): 25-32.
LIN Zhichao, WANG Yang, LUO Busheng, et al. Configuration and tuning of high-sensitivity grounding fault protection for low resistance grounding system[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2020, 32(3): 25-32.
- [6] 詹启帆, 李天友, 蔡金锭. 配电网高阻接地故障检测技术综述[J]. 电气技术, 2017(12): 16-22.
ZHAN Qifan, LI Tianyou, CAI Jinding. The review of high impedance fault detecting technology of distribution network[J]. Electrical Engineering, 2017(12): 16-22.
- [7] 邱进, 崔鑫, 田野, 等. 小电流接地配电网弧光高阻接地故障电压特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 115-121.
QIU Jin, CUI Xin, TIAN Ye, et al. Analysis of the arc high impedance grounding faults voltage characteristics in non-effective grounding feeders[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 115-121.
- [8] 袁超, 薛永端, 梅睿, 等. 不同接地方式下配电网绝缘监察的灵敏性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 130-137.
YUAN Chao, XUE Yongduan, MEI Rui, et al. Sensitivity analysis of insulation monitoring of distribution network under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 130-137.
- [9] 曾晶. 配电网高阻接地故障诊断方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
ZENG Jing. Research on high impedance grounding fault detection method of distribution network[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [10] 熊卫红, 毛兴华, 李景禄, 等. 小电阻接地方式对人身安全的影响及智能电阻接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 166-172.
XIONG Weihong, MAO Xinghua, LI Jinglu, et al. Influence of small resistance grounding mode on personal safety and research of intelligent resistance grounding mode[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 166-172.
- [11] 陈燕燕, 刘涛, 韩文建, 等. 考虑配电网分布式零序电流关系的单相接地故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 118-126.
CHEN Yanqing, LIU Tao, HAN Wenjian, et al. Single-phase-to-earth fault location in distribution networks considering the distributed relations of the

- zero-sequence currents[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 118-126.
- [12] 刘杰荣, 张耀宇, 关家华, 等. 基于量测大数据和数学形态学的配电网故障检测及定位方法研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(1): 97-104.
LIU Jierong, ZHANG Yaoyu, GUAN Jiahua, et al. Distribution network fault location and detection method based on measurement big data and mathematical morphology[J]. *Smart Power*, 2020, 48(1): 97-104.
- [13] WANG Xuewen, ZHANG Hengxu, SHI Fang, et al. Location of single phase to ground faults in distribution networks based on synchronous transients energy analysis[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 774-785.
- [14] 刘胤良, 曾德辉. 基于零模电流行波的配电网故障区段定位方法[J]. *电气自动化*, 2019, 41(2): 73-75.
LIU Yinliang, ZENG Dehui. Fault section location method for distribution networks based on zero-mode current traveling wave[J]. *Power System & Automation*, 2019, 41(2): 73-75.
- [15] 管廷龙, 薛永端, 徐丙垠. 基于故障相电压极化量的谐振接地系统高阻故障方向检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(23): 73-81.
GUAN Tinglong, XUE Yongduan, XU Bingyin. Method for detecting high-impedance fault direction in a resonant grounding system based on voltage polarization of the fault phase[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(23): 73-81.
- [16] 刘志文, 董旭柱, 邹林, 等. 基于零序电流衰减周期分量的高阻接地故障区段定位[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(7): 161-168.
LIU Zhiwen, DONG Xuzhu, ZOU Lin, et al. Section location method for high impedance grounding fault based on declining periodic component of zero sequence current[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(7): 161-168.
- [17] TEIMOURZADEH H, MORADZADEH A, SHOARAN M, et al. High impedance single-phase faults diagnosis in transmission lines via deep reinforcement learning of transfer functions[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 15796-15809.
- [18] 宋国兵, 李广, 于叶云, 等. 基于相电流突变量的配电网单相接地故障区段定位[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(21): 84-90.
SONG Guobing, LI Guang, YU Yeyun, et al. Single-phase earth fault section location based on phase current fault component in distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(21): 84-90.
- [19] LI Jie, WANG Gang, ZENG Dehui, et al. High-impedance ground faulted line-section location method for a resonant grounding system based on the zero-sequence current's declining periodic component[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 119: 105910-105920.
- [20] 李海锋, 陈嘉权, 曾德辉, 等. 小电阻接地系统高灵敏性零序电流保护[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(9): 198-204.
LI Haifeng, CHEN Jiaquan, ZENG Dehui, et al. High sensitive zero-sequence current protection for low-resistance grounding system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(9): 198-204.
- [21] 汪洋, 薛永端, 徐丙垠, 等. 小电阻接地系统接地故障反时限零序过电流保护[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(20): 150-157.
WANG Yang, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Zero-sequence inverse-time overcurrent protection in low resistance grounding system with grounding fault[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(20): 150-157.
- [22] 廖颖欢, 陈云龙. 10 kV 小电阻接地系统比值法则零序保护[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(11): 50-56.
LIAO Yinhuan, CHEN Yunlong. Zero-sequence protection for 10 kV low-resistance grounding system by specific ratio value rules[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2020, 32(11): 50-56.
- [23] TANG Tao, HUANG Chun, HUA Leng, et al. Single phase high impedance fault protection for low resistance grounded distribution network[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(10): 2462-2470.
- [24] LI Haifeng, CHEN Jiaquan, LIANG Yuansheng, et al. Effects of imbalance on single-phase to ground fault characteristics in low-resistance grounded systems[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 115: 105504-105513.
- [25] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究[J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(6): 85-90.
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study for negative sequence current distributing and ground fault protection in middle voltage power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(6): 85-90.

收稿日期: 2021-01-29; 修回日期: 2021-03-29

作者简介:

廖芳群(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障分析与继电保护; E-mail: liaofq0324@163.com

李海锋(1976—), 男, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为电力系统故障分析与继电保护; E-mail: lihf@scut.edu.cn

陈嘉权(1996—), 男, 研究方向为配电网故障分析与继电保护。E-mail: c.jq02@mail.scut.edu.cn

(编辑 周金梅)