

基于三相电流变化增量的单相接地故障判断的研究

李智玲¹ 徐肃¹ 郑岩¹ 李智博¹ 张瑞强¹ 李航¹ 孙嘉宁²

摘要: 为了解决单相接地故障处理存在高阻故障判断盲区的技术难题,对接地故障发生时三相电流变化增量进行研究。从理论分析和10kV真型模拟试验两方面入手,分析单相接地故障网络,研究接地故障点前后三相电流变化增量的特征,结合10kV真型模拟试验数据、提出完整判据,创新了一种采用三相电流的稳态变化量来判断单相接地故障方法。该方法通过多种类型10kV真型单相接地故障试验,证明其能够对单相接地故障准确选相选线和故障定段,并具有精准判断高阻接地故障的技术优势,可普遍适用于中性点不接地、经消弧线圈和小电阻接地系统。

关键词: 单相接地故障网络; 相电流变化增量; 选相选线; 故障定段; 真型试验

Study on Single-phase Grounding Detection Based on Phase Current Increment Method

Zhiling LI, Su XU, Yan ZHENG, Zhibo LI, Ruiqiang ZHANG, Hang LI,
Jiangning SUN

Abstract: In order to solve the technical problem of high resistance fault blind zone in single-phase grounding fault treatment, the three-phase current variation increment during grounding fault is studied. Starting with theoretical analysis and 10 kV real model simulation test, the paper analyzes the single-phase grounding fault network and studies the characteristics of three-phase current increment before and after the grounding fault point, based on the data of 10 kV real-model Simulation Test, the complete criterion is put forward, a new method of single-phase-to-ground fault diagnosis by using the steady-state variation of three-phase current is proposed. This method is proved to be able to select the phase line and locate the fault segment accurately and to have the technical advantages of accurately judging the high impedance grounding fault through the tests of

收稿日期:XXXX-XX-XX

修回日期:XXXX-XX-XX

接受日期:XXXX-XX-XX

various types of 10 kV true single-phase grounding fault, it can be widely used in neutral non-earthing, arc suppression coil and small resistance earthing system.

Keywords: single-phase ground fault network; phase current change increment; phase selection and line selection; fault location true test

0 引言

三相电流突变增量判断方法是一种不依赖电压和零序电流判断单相接地新方法^[1]。瑞典的赫兹曼公司于2004年开始在一些城市和农村配网应用三相电流突变的相不对称特征检测单相接地故障的装置,取得了较好效果。中国的一些高等院校和科研院所的研究人员于2011年开始,陆续发表有关相电流突变量判断单相接地故障的论文和著作^[2];2018年开始国内一些电力公司也开始试用类似原理技术的产品。

在电力系统中,单相接地故障在配电线路的故障中占比在80%以上^[3-4]。随着我国电网的扩容和电缆线路的增加,系统电容电流越来越大,长时间带单相接地故障运行,会产生过电压造成异相接地或相间短路,扩大为人员伤亡、电气火灾等重大事故^[5]。因此,国家近年颁布的配电网技术导则,明确提出:在躲过瞬时接地故障后,快速就近隔离故障原则^[6-7]。而对单相接地故障准确选相选线和定段是实现“快速就近隔离故障原则”的必要前提。

目前,对单相接地故障选相主要依据故障时电压变化来判断^[8-9],选线主要通过馈线零序电流,利用零序电流有功、无功、暂态变化等方法判断^[7,10]。采用电压变化判据的不足是:当接地过渡电阻为高阻状态时,故障特征模糊,易造成误判^[11]。对于中性点经小电阻接地系统,当发生高阻接地故障时,电压偏移量和零序电流都很小,难以启动保护。常用的零序选线方法大多存在一定局限性^[12],比如零序无功选线方法不适用于中性点经消弧线圈接地或经小电阻接地的配网系统^[13-14],零序有功选线方法仅适用于中性点经电阻接地系统^[10]。目前已有的馈线终端FTU和DTU等设备,判断单相接地故障准确率较低,对高阻接地故障更有较大盲区^[11-12]。因此,需要研究不依赖电压和零序电流的相电流增量判断接地故障的新方法。

文中从理论上进一步分析了单相接地故障导致的三相电流突变增量特征,结合详实的10 kV真型模拟试验数据、提出完整判据,验证了基于三相电流的稳态变化量(简称增量)判断单相接地的新方法具有准确选相、选线、定段和耐受高阻接地故障的优势,可应用于多模中性点接地系统^[15]。

若设 t_0 为故障发生时刻, T 为采样数据窗长度, 则故障时刻相电流增量计算为

$$\Delta I = I_{(t_0)} - I_{(t_0-T)} \quad (1)$$

1.2 单相接地故障复合序网络

根据故障边界的条件, 并利用对称分量法^[11]可得式(2)

$$\begin{cases} \dot{U}_{fa} = -\dot{U}_{fA} - R_f \dot{I}_{fa} \\ \dot{I}_{fb} = \dot{I}_{fc} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: U_{fa} 为故障点 A 相正向电压源, kV; $-U_{fA}$ 为故障点 A 相反向电压源, kV; R_f 为故障点电阻, Ω ; I_{fa} 为故障点电流, kA; I_{fb} 、 I_{fc} 分别为故障时 B、C 相电流, kA。

由式(2), 可推出式(3)

$$\begin{cases} \dot{U}_{fa+} + \dot{U}_{fa-} + \dot{U}_{fa0} = -\dot{U}_{fA} - R_f(\dot{I}_{fa+} + \dot{I}_{fa-} + \dot{I}_{fa0}) \\ \dot{I}_{fa+} = \dot{I}_{fa-} = \dot{I}_{fa0} \end{cases} \quad (3)$$

假设电路中各元件的参数均为三相对称, 则各序分量具有独立性, 式(3)可写成式(4)

$$-\dot{U}_{fA} = (Z_+ + Z_- + Z_0 + 3R_f) \dot{I}_{fa0} \quad (4)$$

式(4)中, Z_+ 、 Z_- 、 Z_0 分别为正序、负序、零序阻抗, Ω 。

由此可得单相接地故障的复合序网络见图 3。

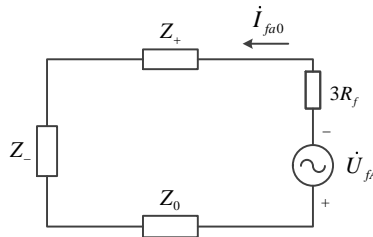


图 3 单相接地故障复合序网络

Fig. 3 Single-phase ground fault compound sequence network

根据式(4)或者图 3 可得故障点的零序电流 I_{fa0} 为

$$\dot{I}_{fa0} = \frac{-\dot{U}_{fA}}{Z_+ + Z_- + Z_0 + 3R_f} \quad (5)$$

对应的故障电流 I_f 为

$$\dot{I}_f = \frac{-3\dot{U}_{fA}}{Z_+ + Z_- + Z_0 + 3R_f} \quad (6)$$

故障网络(图3)对应的正序网络和零序网络, 负序网络和正序同、略去见图4、5。

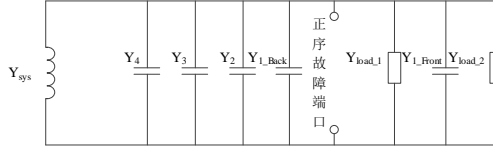


图4 正序网络

Fig. 4 Positive sequence network

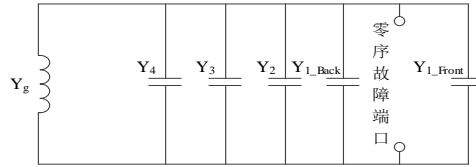


图5 零序网络

Fig. 5 Zero sequence network

图4、5中: 各支路均为导纳; Y_{sys} 为 110 kV 侧系统阻抗和主变压器漏抗换算到 10 kV 侧的等效导纳; Y_{g} 为系统接地支路等效导纳, 其值根据接地方式的不同而不同^[16]:

- 1)当系统为不接地系统时, Y_{g} 的值为 0;
- 2)当系统为消弧线圈接地系统时, Y_{g} 的值为

$$Y_{\text{g}} = \frac{1}{j\omega(L_{\text{zig}} + 3L_{\text{g}})} \quad (7)$$

式(7)中: L_{g} 为系统接地支路等效电感; L_{zig} 为曲折变压器等效电感。

- 3)当系统为小电阻接地系统时, Y_{g} 的值为

$$Y_{\text{g}} = \frac{1}{3R_{\text{g}} + j\omega L_{\text{zig}}} \quad (8)$$

式(8)中, R_{g} 为系统接地支路等效电阻。

1.3 电流分支系数与相电流增量

根据式(5)可计算得故障端口的零序电流, 且由于 A 相接地故障时, 零序电流与正序电流以及负序电流相等, 所以在已知故障端口零序电流的前提下, 各序故障端口可用等效电流源来代替。那么可以定义电流分支系数为: 序电流分支系数=其序电流分量/故障端口序电流^[17]。

则故障网络中某点的各序电流分量分别为

$$\begin{cases} \dot{I}_+ = \dot{k}_+ \times \dot{I}_{fa+} = \dot{k}_+ \times \dot{I}_{fa0} \\ \dot{I}_- = \dot{k}_- \times \dot{I}_{fa-} = \dot{k}_- \times \dot{I}_{fa0} \\ \dot{I}_0 = \dot{k}_0 \times \dot{I}_{fa0} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中： \dot{I}_+ 、 \dot{I}_- 、 \dot{I}_0 分别为正序、负序和零序电流分量； \dot{k}_+ 、 \dot{k}_- 、 \dot{k}_0 分别为正序、负序、零序的电流系数。

根据该点各序电流分量可分别计算对应的A、B、C三相电流增量为

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_A = (\dot{k}_0 \times 1 + \dot{k}_+ \times 1 + \dot{k}_- \times 1) \dot{I}_{f0} = (\dot{k}_0 + \dot{k}_+ + \dot{k}_-) \dot{I}_{f0} \\ \Delta \dot{I}_B = (\dot{k}_0 \times 1 + \dot{k}_+ \times \alpha + \dot{k}_- \times \alpha^2) \dot{I}_{f0} = (\dot{k}_0 + \dot{k}_+ \times (-1)) \dot{I}_{f0} \\ \Delta \dot{I}_C = (\dot{k}_0 \times 1 + \dot{k}_+ \times \alpha^2 + \dot{k}_- \times \alpha) \dot{I}_{f0} = (\dot{k}_0 + \dot{k}_+ \times (-1)) \dot{I}_{f0} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中： α 为位移因子。

可见，故障相电流增量与非故障相电流增量存在一定的差异，见式(11)

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{\text{faulty_phase}} = (\dot{k}_0 + 2\dot{k}_+) \dot{I}_{f0} \\ \Delta \dot{I}_{\text{healthy_phase}} = (\dot{k}_0 - \dot{k}_+) \dot{I}_{f0} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中： $\Delta \dot{I}_{\text{faulty_phase}}$ 为故障相电流增量； $\Delta \dot{I}_{\text{healthy_phase}}$ 为非故障相电流增量。

由式(11)可得：故障相电流增量和非故障相电流增量与故障电流存在一定的比例关系，其与正序和零序网络的电流分支系数 \dot{k}_+ 和 \dot{k}_0 直接相关。以故障点前后电流为例进行计算，其对应的正序、零序电流分支系数分别为：

$$\Delta \dot{I}_{1_Back} \begin{cases} \dot{k}_+ = \frac{Y_{\text{sys}} + Y_2 + Y_3 + Y_4}{Y_{\text{sys}} + Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_{\text{load}_1} + Y_{\text{load}_2}} \\ \dot{k}_0 = \frac{Y_g + Y_2 + Y_3 + Y_4}{Y_g + Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4} \end{cases} \quad (12)$$

$$\Delta \dot{I}_{1_Front} \begin{cases} \dot{k}_+ = \frac{Y_{1_Front} + Y_{\text{load}_2}}{Y_{\text{sys}} + Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_{\text{load}_1} + Y_{\text{load}_2}} \\ \dot{k}_0 = \frac{Y_{1_Front}}{Y_g + Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4} \end{cases} \quad (13)$$

式(12)、(13)中： $\Delta \dot{I}_{1_Back}$ 为故障点后电流； $\Delta \dot{I}_{1_Front}$ 为故障点前电流； Y_{load_1} 、 Y_{load_2} 分别为故障端口前的负荷等效导纳； Y_{1_Front} 为故障点前的电容等效导纳； Y_g 为系统中性点对地导纳； Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 分别为各线路对地电容的等效导纳。

2 故障测量终端方向与相电流增量

2.1 反向终端测得相电流增量特征

设线路的正方向为母线指向线路，那么故障在测量终端下游的即为正向故障，故障在测量终端上游的即为反方向故障，则在一个故障中，测量终端可按此分为正向终端和反向终端^[1]，并设正向终端对应的零序网络电流分支系数为 k_1 ，正序网络电流分支系数为 k_2 ，设反向终端对应的零序网络电流分支系数为 k_3 ，正序网络电流分支系数为 k_4 。由于比较的是三相电流增量的相对大小，所以后面的分析只关注分支系数的向量和^[18]。见式(14)、(15)：

$$\text{positive} \begin{cases} \Delta \dot{I}_{\text{faulty_phase}} = \dot{k}_1 + 2\dot{k}_2 \\ \Delta \dot{I}_{\text{healthy_phase}} = \dot{k}_1 - \dot{k}_2 \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{negative} \begin{cases} \Delta \dot{I}_{\text{faulty_phase}} = \dot{k}_3 + 2\dot{k}_4 \\ \Delta \dot{I}_{\text{healthy_phase}} = \dot{k}_3 - \dot{k}_4 \end{cases} \quad (15)$$

式(14)、(15)中：**positive**为正向故障；**negative**为反向故障。

以 $\Delta \dot{I}_{1_Back}$ 和 $\Delta \dot{I}_{1_Front}$ 的分支系数进行分析

$$\begin{cases} \dot{k}_1 = \frac{Y_g + Y_2 + Y_3 + Y_4}{Y_g + Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4} \\ \dot{k}_2 = \frac{Y_{\text{sys}} + Y_2 + Y_3 + Y_4}{Y_{\text{sys}} + Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_{\text{load}_1} + Y_{\text{load}_2}} \\ \dot{k}_3 = \frac{Y_{1_Front}}{Y_g + Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4} \\ \dot{k}_4 = \frac{Y_{1_Front} + Y_{\text{load}_2}}{Y_{\text{sys}} + Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_{\text{load}_1} + Y_{\text{load}_2}} \end{cases} \quad (16)$$

由于110 kV侧系统阻抗和主变压器漏抗换算到10 kV侧的等效导纳 Y_{sys} 远大于线路导纳和负载导纳，所以 $k_4 \approx 0$ ，由式(16)可得

$$\Delta \dot{I}_{\text{faulty_phase}} \approx \Delta \dot{I}_{\text{healthy_phase}} \quad (17)$$

即反向终端测得三相电流增量的大小相近。

2.2 正向终端测得相电流增量特征

分析正向终端的分支系数 k_1 和 k_2 。同理，由于 Y_{sys} 远大于线路导纳和负载导纳，所以可认为 $k_2 \approx 1$ 。由于 k_1 在不同的接地方式下差异较大，所以需分别对不同接地方式进行分析。

2.2.1 不接地系统相电流增量

在不接地系统中 $Y_g=0$ ，所以 k_1 可以写成

$$\dot{k}_1 = \frac{Y_2 + Y_3 + Y_4}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4} \quad (18)$$

从式(18)可见 k_1 为健全线路对地导纳占全部出线对地导纳的比例^[17]，即健全线路对地电容占全部出线对地电容的比例，则 k_1 的变化范围为 0~1， $|\Delta I_{\text{faulty_phase}}|$ 随 k_1 增大而增大， $|\Delta I_{\text{healthy_phase}}|$ 随 k_1 增大而减少。

利用下式估算两者之间的最小比值

$$P = \left| \frac{k_1 + 2}{k_1 - 1} \right|, k_1 \in (0, 1) \quad (19)$$

式(19)中， P 为比例值。

可求得 P_{\min} 无限接近 2，且 k_1 越大， P 值越大，即故障线路对地电容所占比例越小， P 值越大。由此可见故障相电流增量至少大于非故障相电流增量 2 倍以上。

2.2.2 消弧线圈接地系统相电流增量

根据消弧线圈的补偿度可得 Y_g 为

$$Y_g = -r(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) \quad (20)$$

其中 r 为补偿度。则 k_1 可写成

$$\dot{k}_1 = \frac{(1-r)(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) - Y_1}{(1-r)(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)} = 1 + A \quad (21)$$

从式(21)可见， k_1 与补偿度 r 以及故障线路电容占比有关^[19]。根据补偿方式的不同可得以下规律：

1) 当消弧装置设置为过补偿时， $r > 1$ ， $k_1 > 1$ 。当 r 增大时， k_1 减小。

2) 当消弧装置设置为欠补偿时， $0 < r < 1$ ， $k_1 < 1$ 。当 r 减小时， k_1 增大，且 k_1 将接近于 $1 - [Y_1 / (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)]$ 。

仿照式(19)可得以下不等式

$$P = \left| \frac{k_1 + 2}{k_1 - 1} \right| \geq P_{act} \quad (22)$$

式(22)中： P_{act} 为一个假定的门槛值。

当上述不等式成立时，以 k_1 为变量，求解式(22)，并假设 P_{act} 大于 1， k_1 的取值应满足范围为

$$\begin{cases} \frac{P_{act}-2}{P_{act}+1} < k_1 < 1 - \frac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_3+Y_4} & (\text{欠补偿}) \\ 1 < k_1 < \frac{P_{act}+2}{P_{act}-1} & (\text{过补偿}) \end{cases} \quad (23)$$

由式(22)可以得到以下结论:

1)当消弧线圈处于过补偿状态时,要使故障相与非故障相的电流增量存在明显差别,即 P_{act} 尽可能大时,由于 $(P_{act}+2)/(P_{act}-1)$ 随 P_{act} 的增大而减小,则 k_1 可取范围向1收缩, r 就越大。即当过补偿点离完全补偿点越远, P_{act} 可取较大值。同时可得,在过补偿状态, P_{act} 恒大于1。

2)当消弧线圈处于欠补偿状态时,同理,要使 P_{act} 尽可能大时,由于 $(P_{act}-2)/(P_{act}+1)$ 随 P_{act} 的增大而增大,则 k_1 可取的范围将向 $1-[Y_1/(Y_1+Y_2+Y_3+Y_4)]$ 收缩,此时 r 就减小。即,当欠补偿点离完全补偿点越远, P_{act} 可取较大值。

2.2.3 小电阻接地系统相电流增量

$$Y_g = \frac{1}{3R_g + jX_g} = \frac{3R_g}{(3R_g)^2 + X_g^2} - j \frac{X_g}{(3R_g)^2 + X_g^2} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{Y_g + Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 - Y_1}{Y_g + Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4} \\ &= 1 - \frac{|Y_1|X_A}{R_A^2 + X_A^2} - j \frac{|Y_1|R_A}{R_A^2 + X_A^2} \\ &= 1 + A - jB \end{aligned} \quad (25)$$

式(24)中: X_g 为曲折变压器零序感抗。

由于 $3R_g$ 与曲折变压器零序感抗 X_g 相比大得多,所以 $R_A/(R_A^2 + X_A^2) \approx 1$,且 $|Y_1|$ 的数量级为 10^{-4} ,所以 k_1 的虚部B的影响可忽略不计^[20]。而A的正负与 X_A 相反,即取决于全部出线对地电容的大小与曲折变压器零序感抗 X_g 在接地支路中的占比。同样的,A与1相比小得多,所以 k_1 接近1,而由式(22)可知, P_{act} 可取较大值,即故障相电流增量远大于非故障相电流增量。

2.3 变压器对相电流增量的影响分析

在故障分量网络中,电流增量从故障点附加电源流向各相对地电容。由于母线侧和用户侧变压器阻抗的影响,三相电压突变不相等,导致部分电流增量从用户侧变压器上流过,形成穿越电流,对健全线路电流增量特征造成影响^[2]。

综合考虑典型配电线路,电容电流约为负荷电流的1%,线路对地容抗远大于负荷阻抗等因素,通过电路分析可以得出:单相接地引起的穿越电流比较小,对一般健全线路影响很小。但若健全线路或故障线故障点下游的线路很短,其流过的穿

越电流将大于其本身对地电容电流，因此需要设置专门的判据来躲过穿越电流的影响^[1]。

2.4 负荷突变对相电流增量的影响分析

负荷的变化也会引起电流突变，因此有必要分析负荷电流变化的影响。

1)单相负荷变化。380 V 系统中性点直接接地，单相负荷变化仅导致本相电流变化。对于D-yn11 配变接线，零序电流在D绕组内环流，因而只有正序、负序分量可以进入10 kV系统，表现为：某两相突变电流大小相等、方向相反，另一相突变电流为零，据此可与单相接地故障区别^[1-2]。

对于Y-yn0配变接线，零序电流无法进入配电线路，只有正序、负序分量可以进入。在10 kV系统表现为：某相突变电流的大小为另两相的两倍且方向相反，这与穿越电流特征相同^[1]。

2)三相负荷变化。用户侧三相负荷变化时，三相突变电流呈对称关系：大小相等、角度相差120°，通过计算易知，其相关系数为-0.5。

另外，由于配电变压器变比的作用，用户侧的电流反映到10 kV系统后会显著减小，而且负荷一般不会急剧变化，这些因素也降低了负荷电流突变相电流增量算法的影响。综上所述，通过设置合适的判据就可以避免负荷电流的影响^[1]。

2.5 三相电流不平衡度限值设定

根据国家能源部SD 292—1988《架空配电线路及设备运行规程》第7.5.2条规定：变压器的三相负荷应力求平衡，不平衡度不应大于15%，只带少量单相负荷的三相变压器，零线电流不应超过额定电流的25%，不符合上述规定时，应将负荷进行调整。不平衡度的计算式为：

$$\text{不平衡度}\% = \frac{\text{最大电流} - \text{最小电流}}{\text{最大电流}} \times 100\% \quad (26)$$

据此可知负荷引起的不平衡度一般不大于25%。而单相接地引起的三相电流变化的特征是：故障相电流增量远大于健全相电流增量，按式(26)计算其三相电流不平衡度至少在50%以上(参见式(19))。所以，合理设置不平衡度的限值 β_{set} 为判据，就可以躲过三相负荷不平衡或不对称度扰动等因素对相电流增量判断方法的影响。

2.6 相电流增量特征归纳

通过前面的理论分析及计算可以归纳出单相接地相电流增量的特征：接地故障点前后的三相电流增量不一致、故障线路同健全线路三相电流增量也不一致；正向

测量终端(在接地故障点前端)测得的接地故障相电流的增量最大、且明显超过健全相电流增量,两健全相电流增量近似相等,即正向终端测得接地故障相电流增量特征如下:假设A相接地,则:

$$\Delta I_A = I_{A(t_0)} - I_{A(t_0-T)} \gg \Delta I_B \approx \Delta I_C \quad (27)$$

而反向测量终端(在接地故障点前后端)测得的三相电流增量却大约相等,即:

$$\Delta I_A \approx \Delta I_B \approx \Delta I_C \quad (28)$$

健全线路的三相电流增量也大约相等。利用以上特征作为相电流增量判断单相接地故障的基本判据,可以判断单相接地故障发生、选出故障相和故障线路、以及故障区段。

3 相电流增量判断法的实现

3.1 采用相电流增量法的馈线自动化终端设计

设计实现相电流增量判断方法的NZFTU馈线自动化终端(以下简称终端)、其核心控制器主要由电源模块、遥信模块、遥控模块、主处理核心模块、遥测模块组成,见图6。

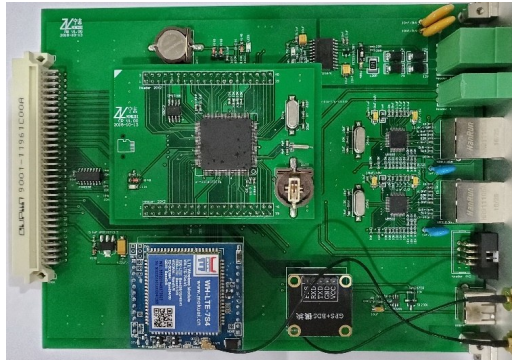


图6 主处理核心模块

Fig. 6 Main processing core module

主处理核心模块包含2个STM32F4主处理芯片分别为作为测控芯片和录波芯片;2个以太网通信接口电路集成了TCP/IP协议栈、10/100 M以太网数据链路层(MAC)及物理层(PHY),使各芯片在应用中拓展网络连接;2个RS485接口;1个北斗校时模块;1个无线4G通信模块;1个USB接口;1个程序调试/下载接口。

3.2 软件设计

软件设计与硬件密切相关，由于终端采用3个处理器的硬件框架，因此需要分别对3个处理器设计软件。测控软件主要实现电压电流采样计算、界内/界外单相接地故障判断、馈线自动化中断保护逻辑、4G无线通信、以太网通信、北斗校时功能等；录波软件主要实现电网系统发生故障自动启动录波；显示软件主要实现人机交互功能，彩屏显示及触控操作。3个微处理器之间的联系见图7。



图7 各微处理器之间的联系

Fig. 7 Connection between microprocessor

测控微处理器将电模拟量采样中断设为优先级最高，每100 μs对所有模拟通道电量进行模-数转换，转换后数字信号存入内存；每隔20 ms计算所有电压电流数据；每隔5 ms扫描开入量信号；实现单相接地故障判断、遥测越限告警等功能，程序流程图见图8。

3.3 单相接地选相选线及定段

设置选相选线定段启动判据及流程如下：

1)终端定时采样线路零序电压 U_0 和三相电压 U_A 、 U_B 、 U_C ，出线侧三相电流 I_A 、 I_B 、 I_C ，周期计算三相电流模增量 ΔI_A 、 ΔI_B 、 ΔI_C 为：

$$\Delta I_A = I_{A(t_0)} - I_{A(t_0-T)} \quad (29)$$

$$\Delta I_B = I_{B(t_0)} - I_{B(t_0-T)} \quad (30)$$

$$\Delta I_C = I_{C(t_0)} - I_{C(t_0-T)} \quad (31)$$

式(28)-(30)中： $I_{A(t_0)}$ 、 $I_{B(t_0)}$ 、 $I_{C(t_0)}$ 为 t_0 故障时刻相电流； $I_{A(t_0-T)}$ 、 $I_{B(t_0-T)}$ 、 $I_{C(t_0-T)}$ 为 t_0-T 正常时刻相电流； T 为采样数据窗长度。

系统正常时，三相电流幅值和初相位在周期采样时段(如0、20、40 ms)基本不变，即

$$\Delta I = I_{(t_0)} - I_{(t_0-T)} = 0 \quad (32)$$

当发生接地故障，假设B相单相接地，则

$$\Delta I_B = I_{B(t_0)} - I_{B(t_0-T)} \gg \Delta I_A \approx \Delta I_C \quad (33)$$

2)设置零序电压限值 U_{0set} ，零序电流限值 I_{0set} ，不平衡度限值 β_{set}

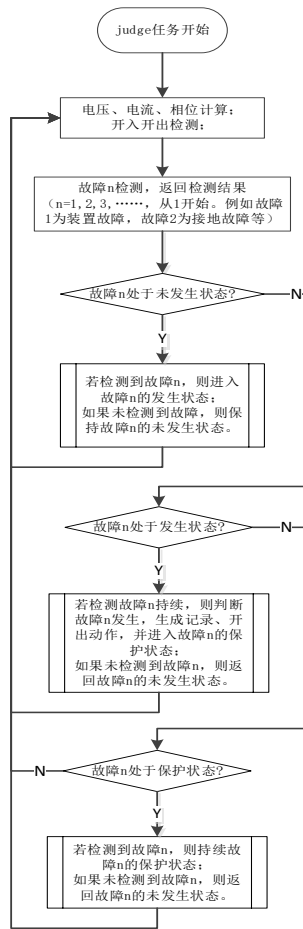


图8 故障判断程序

Fig. 8 Fault diagnosis procedure

$$\beta = \frac{\Delta I_{\max} - \Delta I_{\min}}{\Delta I_{\max}} \times 100\% \quad (34)$$

式(33)中： ΔI_{\max} 、 ΔI_{\min} 各为相电流模增量最大值和最小值。

若 $I_0 > I_{0\text{set}}$ 或 $U_0 > U_{0\text{set}}$ ，且 $\beta > \beta_{\text{set}}$ ，则根据以下3)判据、判断故障相。

3) 根据故障相电流增量特征，正向终端可测得：A相接地， $\Delta I_A > \Delta I_B \& \Delta I_A > \Delta I_C$ ；B相接地， $\Delta I_B > \Delta I_A \& \Delta I_B > \Delta I_C$ ；C相接地， $\Delta I_C > \Delta I_A \& \Delta I_C > \Delta I_B$ 。

4) 根据接地线路与健全线路的三相电流增量不同特征、进行选线。

5) 根据正向终端和反向终端测得的不同相电流增量特征、进行故障定段。

例如，设计试验电路见图9，两条馈线上各安装了2套馈线自动化终端设备、分别为：终端1-1、终端1-2、终端2-1、终端2-2。

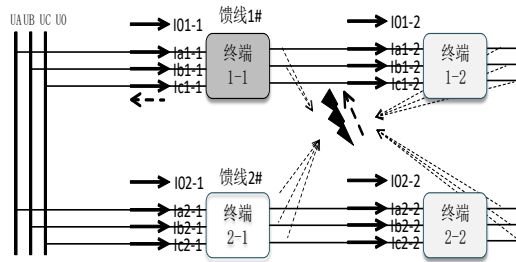


图9 单相接地故障选相选线/定段示意图

Fig. 9 Schematic diagram of phase and line selection/segment determination for single-phase grounding fault

当馈线1号所示位置发生C相接地故障后，各馈线终端采集所在位置的三相电流、三相电流增量按式(29)~(31)计算、并比较。

正向终端1-1位于接地故障点前端、测得 $\Delta I_c > \Delta I_A & \Delta I_c > \Delta I_B$ 、且 $\Delta I_A \approx \Delta I_B$ ；反向终端1-2，位于接地故障点后端，测得 $\Delta I_A \approx \Delta I_B \approx \Delta I_C$ 。对于终端2-1及终端2-2，接地故障点不在本线路；其计算结果与终端1-2的相似。根据以上结果，可正确得出：馈线1号B相接地，接地故障点在终端1-1和终端1-2之间。

4 相电流增量法性能验证

搭建10 kV真型试验平台^[14,21]见图10，做多种类型单相接地试验，验证相电流增量法的准确性。平台系统电容电流10 A，中性点可切换成不接地、经消弧线圈和经小电阻接地，01~03号线路为多级馈线结构，04号为独立单条馈线。

4.1 中性点不接地真型试验

将试验平台中性点配置为不接地模式，分别在01号线路B相、04号线路C相、01号线路C相做不同接地电阻值的单相接地故障，试验结果见表1。

由表1可得：

1)01号线路B相经1 000 Ω电阻接地，馈线终端通过位于01线接地故障点前端的CT₁、CT₂、CT₃采样、测得01线三相电流模增量： $\Delta I_{ia}=24$ mA； $\Delta I_{ib}=111$ mA； $\Delta I_{ic}=26$ mA；符合正向故障的故障相电流增量特征： $\Delta I_{ib} \gg \Delta I_{ia} & \Delta I_{ib} \gg \Delta I_{ic} & \Delta I_{ia} \approx \Delta I_{ic}$ ；计算其相电流增量不平衡度β得： $\beta = \frac{111 - 24}{111} \times 100\% = 78.3\%$ ；终端采样位于03号线前端的CT₇、CT₈、CT₉以及位于04号线前端的CT₁₀、CT₁₁、CT₂，经计算

分别得到： $\Delta I_{3a} \approx \Delta I_{3b} \approx \Delta I_{3c}$ ； $\Delta I_{4a} \approx \Delta I_{4b} \approx \Delta I_{4c}$ 。

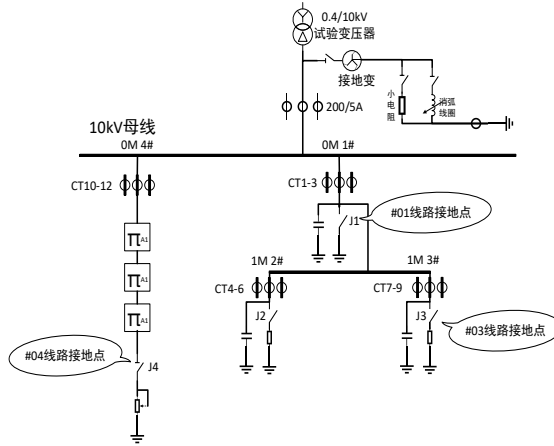


图 10 10 kV 真型模拟试验平台一次电路图

Fig. 10 Primary circuit diagram of 10 kV real simulation test platform

表 1 中性点不接地单相接地电流增量(二次值)

Table 1 Single phase grounding and current increment (secondary value) of ungrounded neutral system

接地相	接地馈线	接地电阻/ Ω	U_a/V	U_b/V	U_c/V	U_0/V	CT ₁₋₃ (01 号线)/mA			CT _{7,9} (03 号线)/mA			CT ₁₀₋₁₂ (04 号线)/mA		
							ΔI_{1a}	ΔI_{1b}	ΔI_{1c}	ΔI_{3a}	ΔI_{3b}	ΔI_{3c}	ΔI_{4a}	ΔI_{4b}	ΔI_{4c}
正常时刻			57.2	56.5	57.4	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	01 号	1 000	84.3	47.2	50.0	46.8	24	111	26	11	9	11	17	16	18
C	04 号	6 000	55.7	59.2	56.9	3.5	2	2	2	0	1	1	1	2	11
C	01 号	金属	100.1	100.4	3.7	100.5	38	77	241	16	33	21	26	53	34

即健全线路 03 号和 04 号线路三相电流增量近似相等，符合健全线路相电流增量特征。终端正确判断出 01 号线路的 B 相接地。

2)04 号线路 C 相经 6 000 Ω 电阻接地，终端测算得出： $\Delta I_{4a}=1$ mA， $\Delta I_{4b}=2$ mA， $\Delta I_{4c}=11$ mA，04 号线故障 C 相电流增量 ΔI_{4c} 远大于健全 A、C 相电流增量，计算其不平衡度 $\beta=90\%$ 。

健全线路 01 号和 03 号线三相电流增量近似相等。此时，系统零序电压 U_0 只有 3.5 V，终端利用相电流增量判断方法，正确判断出 04 号线路的 C 相接地。

3)01 号线路 C 相金属性接地，终端测算得出：01 号线故障 C 相电流增量 $\Delta I_{1c}=241$ mA、远大于健全相电流增量： $\Delta I_{1a}=38$ mA、 $\Delta I_{1b}=77$ mA，计算其不平衡度 $\beta=84\%$ 。

健全线路03号和04号线路三相电流增量近似相等，符合健全线路单相接地相电流增量特征，终端正确判断出01号线路的C相接地。

4.2 中性点经消弧线圈接地真型试验

将试验平台的中性点配置为经消弧线圈接地，分别在01号线路B相、04号线路C相、01号线路C相做单相接地、试验结果见表2。

表2 中性点消弧线圈接地单相接地相电流增量(二次值)

Table 2 Increment of single-phase grounding current (secondary value) for neutral arc suppression coil grounding

接地相	接地馈线	接地电阻/ Ω	U_a/V	U_b/V	U_c/V	U_0/V	CT1-3(01号线)/mA			CT7-9(03号线)/mA			CT10-12(04号线)/mA		
							ΔI_{1a}	ΔI_{1b}	ΔI_{1c}	ΔI_{3a}	ΔI_{3b}	ΔI_{3c}	ΔI_{4a}	ΔI_{4b}	ΔI_{4c}
正常时刻			57.6	57.1	57.8	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	01号	弧光	57.8	41.2	91.6	62.2	70	143	77	14	14	13	22	22	22
C	04号	6000	61.2	53.6	58.0	7.3	4	3	6	2	3	3	3	2	18
C	01号	金属	100.1	100.4	3.7	100.5	50	42	180	21	19	18	33	29	28

由表2可得：3种类型单相接地试验所得的相电流向量模的增量均符合其相电流增量特征。

1)01号线路B相弧光接地。提取01号线三相电流故障录波数据(见图11)，进行向量分析、其结果见图12。三相电流模增量 $\Delta I_{1a}=70$ mA, $\Delta I_{1b}=143$ mA, $\Delta I_{1c}=77$ mA, 与终端测算数据一致(见表2)。由表2由此可见，故障相B相的模增量比两健全相的大一倍，且两健全相增量基本相等，计算其不平衡度为50%，符合单相接地相电流增量特征，终端正确判断出01号线路的B相界内接地。

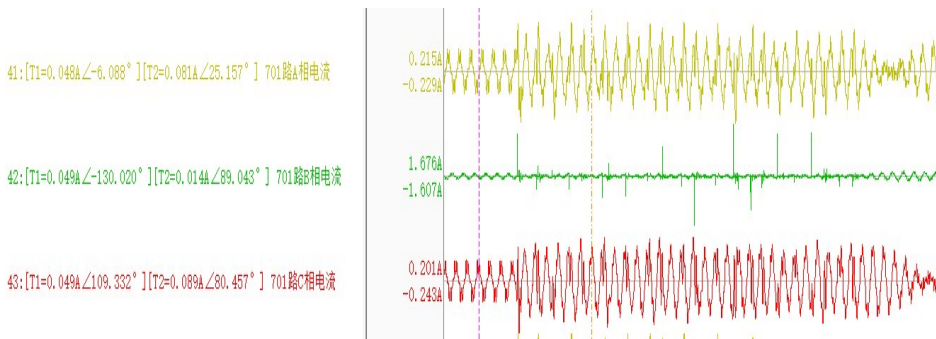


图11 B相弧光接地三相电流波形图

Fig. 11 B-phase arc grounding three-phase current waveform

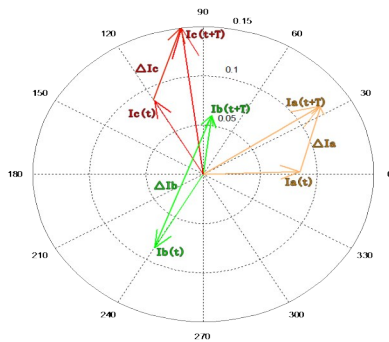


图 12 B相弧光接地三相电流向量分析

Fig. 12 B-phase arc grounding three-phase current vector analysis

2)04号线路C相经6 000 Ω 电阻接地时,由表6可得:零序电压 U_0 只有7.3 V,已处于消弧线圈系统判断盲区,终端测算 $\Delta I_{4c}=18$ mA,明显大于健全相电流增量 $\Delta I_{4a}=3$ mA, $\Delta I_{4b}=2$ mA;健全01号和03号线路三相电流增量近似相等,终端正确选出04号线路C相接地。计算其不平衡度 $\beta=88.9\%$ 。

3)01号线路C相金属性接地时,该线路C相电流增量 $\Delta I_{1c}=180$ mA,明显大于健全相电流增量 $\Delta I_{1a}=50$ mA、 $\Delta I_{1b}=40$ mA;健全03号和04号线路三相电流增量近似相等,终端正确选出01号线路C相接地。计算其不平衡度 $\beta=77.8\%$,

4.3 中性点经小电阻接地真型试验

中性点经小电阻接地真型试验场见图13,该试验场电源来自电网中性点经16 Ω 小电阻接地的10 kV馈线。2023年3月2号,在该试验场分别进行了01号线路B相经水泥地接地、03号线路C相经沙地接地的高阻接地试验,试验结果见表3。



图 13 10 kV小电阻接地系统真型试验场

Fig. 13 10 kV small resistance grounding system true type test field

由表3可得:

1)01号线路B相经水泥地接地,系统零序电压 U_0 只有0.9 V,已远离零序保护

范围，终端测算出01号线三相电流增量模： $\Delta I_{1a}=32\text{ mA}$ ； $\Delta I_{1b}=0$ ； $\Delta I_{1c}=0$ 。健全03号线与04号三相电流增量均为0，终端正确选出01线B相界内接地。

表3 中性点小电阻接地单相接地相电流增量(二次值)

Table 3 Increment of single-phase grounding phase current (secondary value) for neutral low resistance grounding

接地相	接地馈线	接地电阻	U_a/V	U_b/V	U_c/V	U_0/V	CT1-3(01号线)/ mA			CT7-9(03号线)/ mA			CT10-12(04号线)/ mA		
							ΔI_{1a}	ΔI_{1b}	ΔI_{1c}	ΔI_{3a}	ΔI_{3b}	ΔI_{3c}	ΔI_{4a}	ΔI_{4b}	ΔI_{4c}
正常时刻			60.0	60.0	60.0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	01号	水泥	59.2	59.9	60.2	0.9	32	0	0	0	0	0	0	0	0
C	03号	湿沙	60.2	60.1	59.1	1.2	0	0	39	0	0	42	0	0	0

2)03号线路C相经湿沙地接地， U_0 只有1.2 V，零序电压无法启动，但终端采用相电流增量法正确测算出03号线电流增量模： $\Delta I_{3a}=0$ ； $\Delta I_{3b}=0$ ； $\Delta I_{3c}=42\text{ mA}$ 。03号线的上级01号线表现出同样的特征： $\Delta I_{1a}=0$ ； $\Delta I_{1b}=0$ ； $\Delta I_{1c}=39\text{ mA}$ 。健全04号线三相电流增量为0，终端正确选出03线C相界内接地。

以01号线C相接湿沙地三相电流故障录波(见图14)为例，做三相电流增量的向量分析。

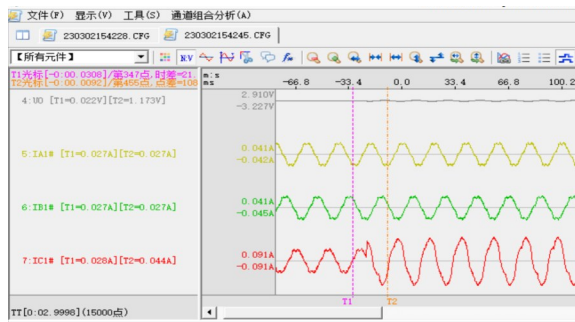


图14 01号线路C相经湿沙接地录波

Fig. 14 No.01 line C phase through wet sand grounding record the waveform

图14中光标 T_2 为故障发生时刻，光标 T_1 为故障发生之前20 ms处，由录波分析软件提取 T_1 和 T_2 时刻三相电流向量和数据见图15、16。

由图15可见， T_1 时刻接地尚无发生，三相电流幅值基本相等， $I_{1a(T_1)}27\text{ mA}$ 、 $I_{1b(T_1)}27\text{ mA}$ 、 $I_{1c(T_1)}28\text{ mA}$ ，相位差近 120° 。由图16可见， T_2 时刻、C相经沙地接地，零序电压只有1.17 V，但故障C相电流幅值和相位比 T_1 时刻都有明显变化： $I_{1c(T_2)}$ ($45\text{ mA}\angle 58.880^\circ$)，非故障相电流 $I_{1a(T_2)}$ 、 $I_{1b(T_2)}$ 幅值和相位都基本没变化。

图 15 T_1 时刻01号线三相电流向量及数据Fig. 15 T_1 Time No.01 line three-phase current vector and data图 16 T_2 时刻01号线三相电流向量及数据Fig. 16 T_2 time No.01 line three-phase current vector and data

用 T_2 时刻01号线三相电流向量减去 T_1 时刻01号线三相电流向量，得到三相电流增量见图17。

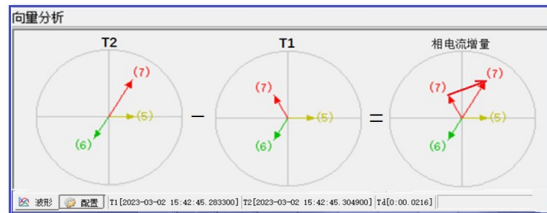


图 17 三相电流增量向量分析

Fig. 17 three-phase current increment vector analysis

由图17可得： $\Delta I_{ia}=0$ ， $\Delta I_{ib}=0$ ， $\Delta I_{ic}=39\text{ mA}$ ；与终端测算数据一致。计算 T_2 时刻01号线三相电流不平衡度 $\beta=100\%$ 。

由以上试验可见，当故障相经水泥地和湿沙地等高阻介质接地时，其过渡电阻大于 $2\ 000\ \Omega$ ，零序电压受小电阻钳制只有 1 V 左右，远离零序保护范围。但其故障相电流变化仍较明显，应用相电流增量算法能够准确选出故障相、故障线路和故障区段。比较常规 10 kV 中性点经 $16\ \Omega$ 小电阻接地，零序保护定值为 40 A ，耐受接地过电阻值范围 $\leq 130\ \Omega$ ，而相电流增量算法耐受过渡电阻大于 $2\ 000\ \Omega$ ，明显超过常规方法15倍以上，能够有效消除小电阻接地系统的高阻保护盲区，扩大系统保护范围。

5 结论

1) 接地故障会造成线路三相电流变化, 用故障后的三相电流减去故障前的对应采样点的电流, 可以提取出时域的三相电流突变增量。由于故障点上游线路与健全线路以及与故障点下游线路的三相电流变化增量特征不同, 以这些特征为判据能够正确选出单相接地的故障相、故障线路和故障区间。

2) 负荷变化和电压不平衡等因素造成的三相电流不平衡度、一般小于单相接地引起的三相电流增量不平衡度, 合理设置不平衡度限值为判据, 可以避免这些因素对相电流增量判断方法的影响。

3) 三相电流增量的相对大小随中性点接地方式的不同而不同。若中性点为不接地或小电阻接地系统, 故障相电流增量明显大于健全相和健全线路的电流增量; 若中性点为消弧线圈接地系统, 故障相与健全相电流增量之间的相对大小受消弧线圈的补偿度影响。若为过补偿, 则补偿度越大, 两者之间的比值就越大。由于消弧线圈接地系统一般为过补偿^[1], 所以该特征也可普遍适用。

4) 相电流增量判断单相接地的方法通过 10 kV 真型试验场各种接地故障试验, 证明了其能够对不同中性点接地模式的单相接地故障准确选相选线和故障定段, 并具耐受接地过渡电阻能力较强, 能够消除高阻保护盲区, 精准判断高阻接地故障, 扩大各种中性点接地方式的处置单相接地故障的保护范围, 增强配网的运行可靠性和安全性。

参考文献

- [1] 刘健, 王毅钊, 张小庆, 等. 配电网单相接地故障处理保护化关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 18-23.
LIU Jian, WANG Yizhao, ZHANG Xiaoqing, et al. Key technologies on single-phase earthed fault protection for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 18-23.
- [2] 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.
- [3] 程斌. 基于 10 kV 配电线路单相接地故障的研究[J]. 中国电业(技术版), 2012(10): 27-29.
CHENG Bin. Research of single-phase grounding fault based on 10 kV distribution lines[J]. China Electric Power(Technology Edition), 2012(10): 27-29.
- [4] 白鹏飞, 张荣荣, 张双双. 变电站 35 kV 系统单相接地故障分析及防范措施[J]. 电气技术与经济, 2019, 12(6): 66-68.
BAI Pengfei, ZHANG Rongrong, ZHANG Shuangshuang. Analysis and preventive measures

- of single-phase grounding fault in 35 kV substation system[J]. *Electrical Technology and Economics*, 2019, 12(6): 66-68.
- [5] 李传东. 变电站中性点不接地系统单相接地故障解析[J]. *电世界*, 2022, 63(5): 21-25.
LI Chuandong. Analysis of single-phase grounding fault in ungrounded neutral system of substation[J]. *Electrical World*, 2022, 63(5): 21-25.
- [6] 侯义明. 《配电网技术导则》修订背景和编制原则[J]. *供用电*, 2017, 34(1): 28-31.
HOU Yiming. The background and principles of revision to technical guidelines for distribution network[J]. *Distribution & Utilization*, 2017, 34(1): 28-31.
- [7] 张乃刚, 张加胜, 郑长明, 等. 基于零序电流幅值分布相似性的小电流接地故障定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(13): 120-125.
ZHANG Naigang, ZHANG Jiasheng, ZHENG Changming, et al. Fault section location based on similarity of zero sequence current amplitude distribution in non-solidly-earthed network[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(13): 120-125.
- [8] 窦仁宇. 配电线路单相接地故障的分析判断[J]. *农村电气化*, 1999(4): 30-30.
DOU Renyu. Analysis and judgment of single-phase grounding fault of distribution line[J]. *Rural Electrification*, 1999(4): 30-30.
- [9] 邹豪, 曾祥君, 喻锐, 等. 基于零序电压调控的故障选线选相新方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(15): 69-76.
ZOU Hao, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A new method of fault line selection and phase selection based on zero sequence voltage regulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(15): 69-76.
- [10] 赵凤贤, 闫钿, 孙丽颖. 基于暂态零序无功功率的小电流系统单相接地选线[J]. *继电器*, 2007(s1): 59-62.
ZHAO Fengxian, YAN Dian, SUN Liying. Zero sequence transient reactive power for a single-phase-earth feeder on non-solid distribution[J]. *Relay*, 2007(s1): 59-62.
- [11] 王琦. 中性点不接地系统带过渡电阻单相接地时故障相的判别方法[J]. *电世界*, 2020, 61(7): 30-33.
WANG Qi. Identification method of fault phase in neutral ungrounded system with single phase grounding with transition resistance[J]. *Electrical World*, 2020, 61(7): 30-33.
- [12] 李广. 配电网单相接地故障区段定位研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2012.
LI Guang. Research on the location of single-phase ground fault sections in distribution networks [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2012.
- [13] 韦仁琼, 唐复怡. 针对中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障稳态分析[J]. *电工技术*, 2016(9): 2.
WEI Renqiong, TANG Fuyi. Steady state analysis of single-phase grounding fault in neutral grounding system through arc suppression coil[J]. *Electrical Technology*, 2016(9): 2.
- [14] 王鹏, 冯光, 韦延方, 等. 10 kV 配电网的接地故障测试述评及真型实验场设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(11): 178-187.
WANG Peng, FENG Guang, WEI Yanfang, et al. Review of grounding fault test of 10 kV dis-

- tribution network and design of true type test field[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 178-187.
- [15] 梁改革, 袁光伟. 配电网中性点接地方式对比分析[J]. 电工技术, 2018(6): 34-36.
LIANG Gaige, YUAN Guangwei. Comparative analysis of neutral ground modes in distribution network[J]. Electrotechnical Engineering, 2018(6): 34-36.
- [16] 于永源, 杨绮雯. 电力系统分析[M]. 第3版. 北京: 中国电力出版社, 2007.
YU Yongyuan, YANG Qiwen. Electric power system analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [17] 艾 芊. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
AI Qian. Power system steady state analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [18] 平绍勋, 周玉芳. 电力系统中性点接地方式及运行分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
PING Shaoxun, ZHOU Yufang. Neutral ground mode and operation through arc suppression coil and small resistance grounding system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [19] 曾祥君, 王媛媛, 李 健, 等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 137-143.
ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 137-143.
- [20] 杨以涵, 齐 郑. 中压配电网单相接地故障选线及定位技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
YANG Yihan, QI Zheng. Line selection and location technology of single phase earth fault in medium voltage distribution network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [21] 李传健, 孙嘉宁, 胡青山, 等. 配网单相接地故障模拟试验平台的研究与实现[J]. 机电工程技术, 2015(9): 122-126.
LI Chuanjian, SUN Jianing, HU Qingshan, et al. Research and implementation of a distribution network single-phase-to-ground fault simulated experiment platform[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2015(9): 122-126.
- 李智玲(1977—), 女,
工程硕士, 高级工程师, 研究方向电力自动化等技术
- 徐 肃(1984—), 男,
工程硕士, 高级工程师, 研究方向电力系统自动化等技术。
- 郑 岩(1987—), 男,
工程硕士, 工程师, 主要从事配电网运行维护管理。
- 李智博(1993—), 男,
大学本科, 工程设计, 研究方向电网调度、工程管理。
- 张瑞强(1982—), 男,
工学博士, 高级工程师, 研究方向输电运检技术。
- 李 航(1989—), 男,

大学本科，高级工程师，研究方向配电运检。

作者简介

孙嘉宁(1954—)，女，工学硕士，高级工程师，研究方向为电力自动化技术、高电压技术等(通信作者)(E-mail: 13922314141@126.com)。1