

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210246

# 基于接地故障比的不平衡配电网单相接地故障选相方法

孙震, 徐昊, 朱洪志, 卞辰耀, 于东立

(国网上海嘉定供电公司, 上海 201800)

**摘要:** 为了解决传统故障选相方法可能因配电网不平衡度高或者高故障接地电阻而失效的问题, 提出了一种基于接地故障比的不平衡配电网单相接地故障选相方法。首先建立了发生 A 相单相接地故障后接地故障比幅值和相位的解析表达式, 通过将两个表达式对接地电导进行求导, 并进行不同参数下的单调性分析, 最终确定了发生 A 相 SLG 故障时零序电压幅值和相位的变化规律。然后将两种变化规律进行了整合, 提出基于幅值和相位综合变化规律的故障选相方法。此外, 还将 A 相的变化规律推广到 B、C 两相, 并分析了欠补偿、过补偿和全补偿接地条件对所提方法的影响。最后通过 Matlab 仿真验证了零序电压变化规律和所提故障选相方法的有效性。仿真结果表明: 在阻尼率为 5%、三相不对称度为 4.5% 的 4 种工况下, 传统故障选相方法均会失效, 而所提方法能够保证故障选相的正确性。

**关键词:** 零序电压; 单相对地故障; 故障相识别; 不平衡配电网

## Phase selection method of single line to ground fault in unbalanced distribution network based on ground fault ratio

SUN Zhen, XU Hao, ZHU Hongzhi, BIAN Chenyao, YU Dongli

(State Grid Shanghai Jiading Electric Power Supply Company, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that traditional fault phase selection methods may fail due to high unbalance or high fault ground resistance in distribution network, this paper proposes a phase selection method of single line to ground (SLG) fault in unbalanced distribution network based on ground fault ratio. First, the mathematical expressions of ground fault ratio amplitude and phase after a SLG fault occurs are established. By deriving the two expressions to the ground conductance and analyzing the monotonicity under different parameters, the variation law of zero sequence voltage amplitude and phase under SLG faults of phase A is finally determined. Then the two change laws are integrated, and a fault phase selection method based on the comprehensive variation law of amplitude and phase is proposed. In addition, the variation law of phase A is extended to phase B and C, and the effects of under compensation, over compensation and full compensation grounding conditions on the proposed method are analyzed. Finally, the variation law of zero sequence voltage and the effectiveness of the proposed fault phase selection method are verified by Matlab simulation. The simulation results show that under the four working conditions with damping rate of 5% and three-phase asymmetry of 4.5%, the traditional fault phase selection method will fail, and the proposed method can ensure the correctness of fault phase selection.

This work is supported by the Key Project of Smart Grid Techniques and Equipment of National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900604).

**Key words:** zero sequence voltage; single phase to ground fault; fault phase identification; unbalanced distribution network

## 0 引言

我国配电网普遍采用中性点不接地及经消弧线

圈接地两种方式<sup>[1-2]</sup>。配电网由于结构复杂更易发生接地故障, 其中大部分都是单相接地故障<sup>[3-5]</sup>。故障发生后, 若不及时处理将会危及到电网的安全运行<sup>[6-7]</sup>。为及时处理接地故障引起的电弧, 国内外专家设计了许多针对性的消弧装置以补偿容性电流, 抑制电弧<sup>[8-11]</sup>。然而该类装置的有效运行依赖

**基金项目:** 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项资助 (2016YFB0900604)

于可靠的故障选相, 因此配电网故障选相方法是目前研究的重点方向之一。

目前配电网单相接地故障选线的方法居多, 而故障选相的方法较少。传统故障选相方法判据为: 系统过补偿时三相电压最高相的超前相为故障相, 系统欠补偿时电压最高相的滞后相为故障相<sup>[12-14]</sup>。传统方法是建立在系统参数严格对称的基础上进行识别, 因此不适用于不平衡网络。当配电网不平衡度高, 或者线路发生高阻接地故障时传统判据可能失效。文献[15]通过对比故障前后各相电压的幅值和相位实现故障相辨识, 然而其获得的判据与传统方法类似, 存在局限性; 文献[16]提出了基于相位差的不对称配电网接地故障选相方法, 该方法利用故障相电压和故障前后中性点电压的相位差作为判据, 然而存在判据单一的问题, 并未充分利用故障前后的电压幅值差异来辅助选相; 文献[17]根据故障电流与各相电压的相位关系判别故障相, 但是其依赖于对于网络参数的准确测量; 文献[18]提出了一种基于 D-S 证据理论和稳态量的配电网故障选相方法, 通过正、负和零序电压、电流故障分量之间的幅值和相位关系建立特征量, 通过 D-S 证据理论对各个特征量的值进行融合, 最终得到故障选相结果, 但是该方法算法复杂, 较难应用; 文献[19]考虑了电容参数不对称但未考虑电阻不对称。

针对上述问题, 本文提出了一种基于零序电压轨迹的不平衡配电网单相接地故障选相方法。详细分析了考虑故障接地电阻变化的单相接地故障下零序电压幅值和相角的变化规律。以此为基础, 提出了一种故障选相方法, 最后通过仿真验证了所提故障选相方法的有效性。

## 1 零序电压及接地故障比分析

A 相发生 SLG 故障的中压配电网的等效电路如图 1 所示<sup>[20]</sup>。中压配电网的中性点接地方式可以选择经电感接地、经电阻接地或经电感和电阻的组合接地。若 A 相发生 SLG 故障, 则零序电压可由式(1)表示。

$$U_{0A} = -\frac{E_A Y_{0A} + E_B Y_{0B} + E_C Y_{0C} + E_A G_f}{xG_p + y1/j\omega L_p + Y_{0A} + Y_{0B} + Y_{0C} + G_f} \quad (1)$$

式(1)和图 1 中:  $U_{0A}$  为 A 相发生 SLG 故障时的零序电压;  $E_X$ 、 $Y_{0X}$  分别为  $X(X=A, B, C)$  相的电源电压和导纳,  $Y_{0X} = G_{0X} + j\omega C_{0X}$ ;  $\omega$  为角频率;  $G_f$  为故障点的接地电导;  $G_p$ 、 $L_p$  分别为中性点接地导纳和电感;  $x$ 、 $y$  为 0-1 变量, 表征接地方式。式(1)具有通用性, 其适用于所有的中性点接地方法。用旋转系

数  $a = e^{j2\pi/3}$  可以将式(1)进行简化。

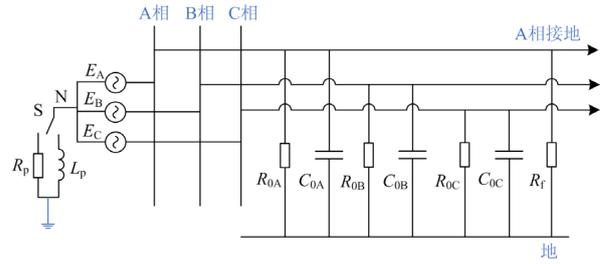


图 1 SLG 故障条件下的典型配电网

Fig. 1 Typical distribution network on SLG fault condition

$$U_{0A} = -E_A \frac{\left( \frac{G_{0\Sigma} + j}{\omega C_{0\Sigma}} \right) \frac{Y_{0A} + a^2 Y_{0B} + a Y_{0C} + xG_p}{Y_{0\Sigma}} + \frac{xG_p}{\omega C_{0\Sigma}}}{j \left( 1 - \frac{y}{\omega^2 L_p C_{0\Sigma}} \right) + \frac{1}{\omega C_{0\Sigma}} (G_{0\Sigma} + G_f + xG_p)} \quad (2)$$

式中:  $G_{0\Sigma}$ 、 $C_{0\Sigma}$  分别为三相对地分布电阻之和及电容之和;  $Y_{0\Sigma}$  为导纳之和;  $j$  表示虚部;  $a = 120^\circ$ ,  $a^2 = 240^\circ$ 。

三相不对称率  $i_a$  可以描述配电网的不平衡度, 其公式为

$$i_a = \frac{Y_{0A} + a^2 Y_{0B} + a Y_{0C}}{Y_{0\Sigma}} = r_a \angle \alpha \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为三相不对称率角, 从理论上讲, 纯架空线路配电网的  $r_a$  最大值为 5%, 纯电缆线路为 0.5%, 混合线路为 1.5%。

配网阻容率  $i_b$  可以描述配电网的阻容性质, 其公式为

$$i_b = \frac{G_{0\Sigma}}{\omega C_{0\Sigma}} + j = r_b \angle \beta \quad (4)$$

式中:  $\beta$  为阻容角;  $r_b$  为对应幅值。

脱谐率  $v$  和阻尼率  $d$  的定义为

$$v = 1 - \frac{y}{\omega^2 L_p C_{0\Sigma}} \quad (5)$$

$$d = \frac{1}{\omega C_{0\Sigma}} (xG_{0\Sigma} + G_f)$$

为避免中性点接地线圈与分布电容之间产生串联谐振, 系统的脱谐率不宜设置过小。通常, 系统采用 10%~20% 的负脱谐率对电容电流进行过补偿<sup>[20]</sup>。

因此, 式(2)可以改写为

$$U_{0A} = -E_A \frac{r_a r_b (\cos(\alpha + \beta) + j \sin(\alpha + \beta)) + G_{fs}}{jv + d + G_{fs}} = -E_A K \quad (6)$$

式中： $K$  为接地故障比； $G_{fs}$  为标幺化的接地电导，即  $G_f/(\omega C_{0\Sigma})$ 。若将  $G_{fs}$  置零，零序电压  $U_{0A}$  变为系统自然不平衡电压  $U_{01}$ ，对应正常工作状态，即

$$U_{00} = -E_A \frac{r_a r_b (\cos(\alpha + \beta) + j \sin(\alpha + \beta))}{jv + d} \quad (7)$$

当  $\alpha + \beta$  从  $0^\circ$  变化到  $360^\circ$ ， $U_{00}$  的轨迹是一个圆，如图 2 所示。

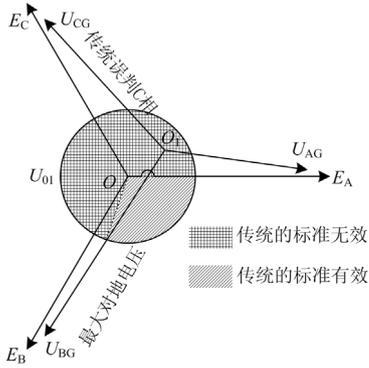


图 2 A 相发生 SLG 故障时的零序电压  
Fig. 2 Zero sequence voltage when SLG fault happens on phase A

可以看出，如果网络是对称的，整个  $-U_{0A}$  轨迹将滞后于  $E_A$ 。这是传统故障选相的基础。根据传统的故障选相判据，在过补偿系统中，找到具有最大对地电压的一相，超前该相电源电压  $120^\circ$  的一相为故障相；在欠补偿系统中，找到具有最大对地电压的一相，滞后该相电源电压  $120^\circ$  的一相为故障相。

图 2 展示了传统标准的有效范围。在有效范围内，B 相具有最大的对地电压，则可以有效地推断出 C 相是故障相<sup>[21-22]</sup>。然而，如果接地故障电阻足够高，则传统标准可能无效。

## 2 零序电压变化轨迹

为了分析发生单相接地故障时，故障接地电阻对于接地故障比幅值和相角的影响，本节在故障相电压固定的情况下，重点讨论了接地故障比  $K$  的变化规律。

当  $G_{fs}$  为 0 时，为  $K$  的轨迹起点  $K_S$ ，其公式为

$$K_S = \frac{r_a r_b (\cos(\alpha + \beta) + j \sin(\alpha + \beta))}{jv + d} \quad (8)$$

当  $G_{fs}$  趋于无穷时，为  $K$  的轨迹终点，其坐标为 (1,0)。K 的轨迹是一段以  $K_O$  为圆心的圆弧。

$$K_O = \left( \frac{r_a r_b \cos(\alpha + \beta) + v}{2v}, \frac{r_a r_b \sin(\alpha + \beta) + d}{2v} \right) \quad (9)$$

且半径为

$$r = \frac{\sqrt{(r_a r_b \cos(\alpha + \beta) + v)^2 + (r_a r_b \sin(\alpha + \beta) + d)^2}}{2v} \quad (10)$$

### 2.1 幅值变化规律

接地故障比  $K$  的幅值可以表示为<sup>[23]</sup>

$$M(K) = \sqrt{\frac{(G_{fs} + r_a r_b \sin(\alpha + \beta))^2 + r_a^2 r_b^2 \cos^2(\alpha + \beta)}{(G_{fs} + d)^2 + v^2}} \quad (11)$$

由式(11)可知，脱谐率的正负对幅值没有影响，说明  $M(K)$  的变化规律适用于过补偿和欠补偿两种接地方式。

假设网络系数  $r_a$ 、 $r_b$ 、 $v$ 、 $d$  和  $\alpha + \beta$  固定不变，则  $M(K)$  是  $G_{fs}$  的函数。对  $M(K)$  进行求导：

$$\frac{dM(K)}{dG_{fs}} = 0 \quad (12)$$

式(12)的根可以表示为

$$G_{fs} = \frac{r_a^2 r_b^2 - v^2 - d^2}{2(r_a r_b \sin(\alpha + \beta) + d)} \pm \sqrt{\frac{(r_a^2 r_b^2 - v^2 - d^2)^2 + \frac{r_a r_b (\sin(\alpha + \beta)(v^2 + d^2) + d r_a r_b)}{r_a r_b \sin(\alpha + \beta) + d}}{2(r_a r_b \sin(\alpha + \beta) + d)^2}} \quad (13)$$

根据前文的分析，如果满足不等式

$$\frac{\sin(\alpha + \beta)(v^2 + d^2) + d r_a r_b}{r_a r_b \sin(\alpha + \beta) + d} < 0 \quad (14)$$

则  $M(K)$  的轨迹中不会有拐点，即式(12)恒大于零， $M(K)$  呈单调递增特性。根据式(14)可得

$$\sin(\alpha + \beta) \in \begin{cases} \left(-\frac{d}{r_a r_b}, -\frac{d r_a r_b}{v^2 + d^2}\right), & \frac{d}{r_a r_b} < 1 \\ \left[-1, -\frac{d r_a r_b}{v^2 + d^2}\right), & \frac{d}{r_a r_b} \geq 1 \end{cases} \quad (15)$$

假设阻尼率  $d$  大于幅值  $r_a r_b$ ，则使  $M(K)$  单调递增的  $\alpha + \beta$  范围为

$$\alpha + \beta \in \left(\pi + \arcsin \frac{d r_a r_b}{v^2 + d^2}, 2\pi - \arcsin \frac{d r_a r_b}{v^2 + d^2}\right) \quad (16)$$

以网络参数  $v = -15\%$ ， $d = 5\%$ ， $r_a = 4.5\%$ ， $r_b = 3.5\%$  为例，可以计算得到  $M(K)$  的单调递增范围为  $(173.22^\circ, 346.19^\circ)$ 。图 3 展示了 A 相发生 SLG 故障下，不同  $\alpha + \beta$  的接地故障比幅值变化规律。曲线 I 对应于  $\alpha + \beta = 250^\circ$ ，曲线 II 对应于  $\alpha + \beta = 30^\circ$ 。曲线 I 的接地故障比幅值满足单调递增的规律，而曲线 II 的接地故障比幅值呈先减小后增大的趋势。这与理论分析相符，因为曲线 II 的  $\alpha + \beta$  在单调递增范围之外。

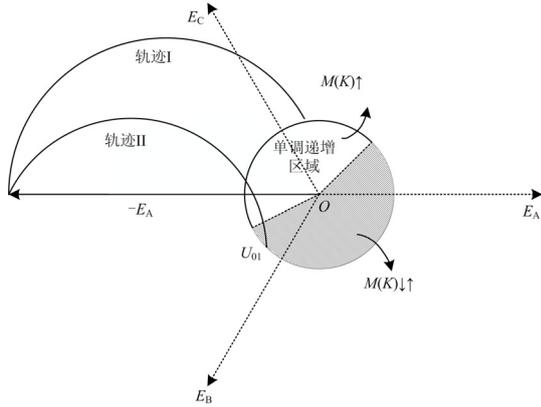


图3 A相发生SLG故障的接地故障比幅值变化  
Fig. 3 Ground fault ratio magnitude variation when SLG fault happens on phase A

## 2.2 相角变化规律

由式(6)可得接地故障比的相位  $P(K)$  表达式为

$$P(K) \in \begin{cases} \arctan \frac{r_a r_b \cos(\alpha + \beta)}{G_{fs} + r_a r_b \sin(\alpha + \beta)} - \arctan \frac{v}{G_{fs} + d}, & G_{fs} > r_a r_b \sin(\alpha + \beta) \\ \pi + \arctan \frac{r_a r_b \cos(\alpha + \beta)}{G_{fs} + r_a r_b \sin(\alpha + \beta)} - \arctan \frac{v}{G_{fs} + d}, & G_{fs} < r_a r_b \sin(\alpha + \beta) \end{cases} \quad (17)$$

同理, 假设网络系数  $r_a$ 、 $r_b$ 、 $v$ 、 $d$ 、 $\alpha$  和  $\beta$  固定不变。对  $P(K)$  进行求导:

$$\frac{dP(K)}{dG_{fs}} = 0 \quad (18)$$

当  $\alpha + \beta$  为  $\pi/2$  或  $3\pi/2$  时, 从式(9)和式(10)可以看出接地故障比的轨迹经过零点, 此时式(18)的根为两个相等的正实数。

当  $\alpha + \beta$  既不是  $\pi/2$  也不是  $3\pi/2$  时, 则式(18)的根可以表示为

$$G_{fs} = \frac{v \tan(\alpha + \beta) - d}{v/(r_a r_b \cos(\alpha + \beta)) - 1} \pm \sqrt{\left(\frac{v \tan(\alpha + \beta) - d}{v/(r_a r_b \cos(\alpha + \beta)) - 1}\right)^2 + \frac{v^2 + d^2 - r_a r_b v / \cos(\alpha + \beta)}{v/(r_a r_b \cos(\alpha + \beta)) - 1}} \quad (19)$$

$P(K)$  随  $\alpha + \beta$  的变化规律需要分区间讨论。图4展示了A相发生SLG故障下不同  $\alpha + \beta$  的接地故障比相位变化轨迹 ( $v = -15\%$ ,  $d = 5\%$ ,  $r_a = 4.5\%$ ,  $r_b = 3.5\%$ )。

$$(1) \alpha + \beta \in \left(-\arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2}, \arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2}\right]$$

在这种情况下, 式(18)只有一个正实数根, 这意味着当  $G_{fs}$  从 0 增加到无穷时,  $P(K)$  先下降后上

升。 $\alpha + \beta$  对应的范围为图4中的田字格区域 ( $-69.4^\circ, 69.4^\circ$ ), 该区域的边界正好对应于曲线I和曲线III。曲线I对应于  $\alpha + \beta = 270^\circ$ , 曲线III对应于  $\alpha + \beta = 69.4^\circ$ 。

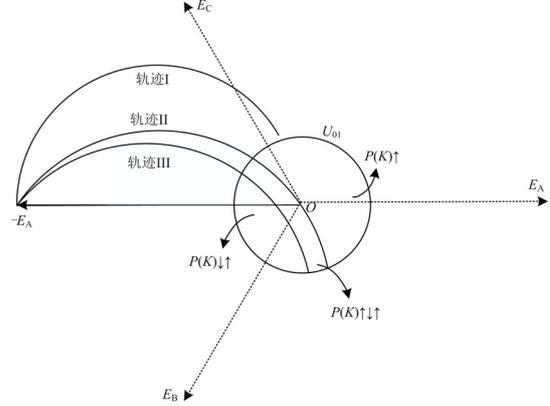


图4 A相发生SLG故障的接地故障比相角变化  
Fig. 4 Ground fault ratio phase variation when SLG fault happens on phase A

$$(2) \alpha + \beta \in \left(\arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2}, \frac{\pi}{2}\right)$$

这种情况下保证了式(18)的根是两个正实数。此时,  $P(K)$  的曲线随着  $G_{fs}$  的增加呈现先上升后下降、最后上升的趋势。值得注意的是, 当  $\alpha + \beta = \pi/2$  时(对应于曲线II), 此时起点的上升和下降同时发生。

$$(3) \alpha + \beta \in \left[\frac{\pi}{2}, 2\pi - \arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2}\right]$$

这种情况下, 式(18)不存在正实数根, 这意味着  $P(K)$  随着  $G_{fs}$  的增加而单调增加。

## 2.3 综合变化规则

对于欠补偿系统, 存在下列不等式。

$$\frac{\pi}{2} < \pi + \arccos \frac{d r_a r_b}{v^2 + d^2} < 2\pi - \arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2} \quad (20)$$

$$-\arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2} < -\arcsin \frac{d r_a r_b}{v^2 + d^2} < \arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2} \quad (21)$$

因此, 接地故障比幅值和相角变化规律可以集成在一个平面内。定义  $\alpha + \beta \in \left(-\arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2}, \arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2}\right]$  为区域I,

$\alpha + \beta \in \left(\arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2}, \frac{\pi}{2}\right)$  为区域II,

$\alpha + \beta \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi + \arcsin \frac{d r_a r_b}{v^2 + d^2}\right)$  为区域III,

$\alpha + \beta \in \left[\pi + \arcsin \frac{d r_a r_b}{v^2 + d^2}, 2\pi - \arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2}\right]$  为区

域 IV,  $\alpha + \beta \in (-\arccos \frac{vr_a r_b}{v^2 + d^2}, -\arcsin \frac{dr_a r_b}{v^2 + d^2}]$  为区域 V。由此可得出欠补偿系统下接地故障比幅值和相角综合变化规律, 如表 1 所示。

表 1 欠补偿系统下接地故障比幅值和相角变化规律

Table 1 Variation rules of ground fault ratio magnitude and phase angle on under-compensated grounding condition

区域	幅值变化规律	相角变化规律
I	先降后升	先降后升
II	先降后升	先升后降再升
III	先降后升	升
IV	升	升
V	升	先降后升

图 5 展示了特定网络参数( $v = -15\%$ ,  $d = 5\%$ ,  $r_a = 4.5\%$ ,  $r_b = 3.5\%$ )下的接地故障比幅值和相角变化规律, 更为直观地展示了表 1 中的区域划分。由于每个区域对应唯一的接地故障比幅值和相角变化规律, 因此只要确定起点, 就可以预测电压轨迹。表 1 所示的规律为 A 相发生 SLG 故障的接地故障比特征, 但是也可以得出在 B 相和 C 相发生 SLG 故障的接地故障比特征, 这将在下一节中讨论。

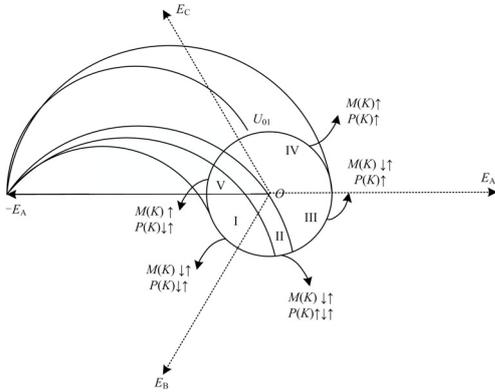


图 5 特定参数下的接地故障比幅值和相角变化规律

Fig. 5 Variation rules of ground fault ratio magnitude and phase angle under specific parameters

### 3 基于接地故障比的故障选相方法

由于故障相对应于特定的接地故障比轨迹, 且三相的轨迹互不交叉, 因此故障选相的有效方法是将发生 SLG 故障时的零序电压与正常情况下的零序电压进行比较。

#### 3.1 B 或 C 相发生 SLG 故障时的接地故障比

与前面的讨论类似, B 相和 C 相发生 SLG 故障时的零序电压可以表示为

$$U_{0B} = -E_B \frac{ja^2 r_a r_b + G_{fs}}{jv + d + G_{fs}} = -E_A \frac{jr_a r_b + a^2 G_{fs}}{jv + d + G_{fs}} \quad (22)$$

$$U_{0C} = -E_C \frac{ja^2 r_a r_b + G_{fs}}{jv + d + G_{fs}} = -E_A \frac{jr_a r_b + a G_{fs}}{jv + d + G_{fs}} \quad (23)$$

可以看出, 如果网络参数确定, 三条零序电压曲线的起始点是唯一的。将式(22)、式(23)与式(6)比较, 可以得出  $U_{0B}$ 、 $U_{0C}$  的幅值、相角与  $U_{0A}$  的变化规律相同。唯一不同的是三相不对称率角与变化范围之间的关系。与表 1 中列出的关系不同, 需要分别用  $\alpha + \beta + 2\pi/3$  和  $\alpha + \beta - 2\pi/3$  来表示 B 相和 C 相的 SLG 故障。例如, 对于  $\alpha + \beta = 0$  时 B 相发生 SLG 故障的接地故障比, 判断其变化规律的简单方法是用  $\alpha + \beta = 2\pi/3$  来查找表 1, 则判定结果为区域 III 的情况。

#### 3.2 故障选相方法

所提故障选相方法流程图如图 6 所示。

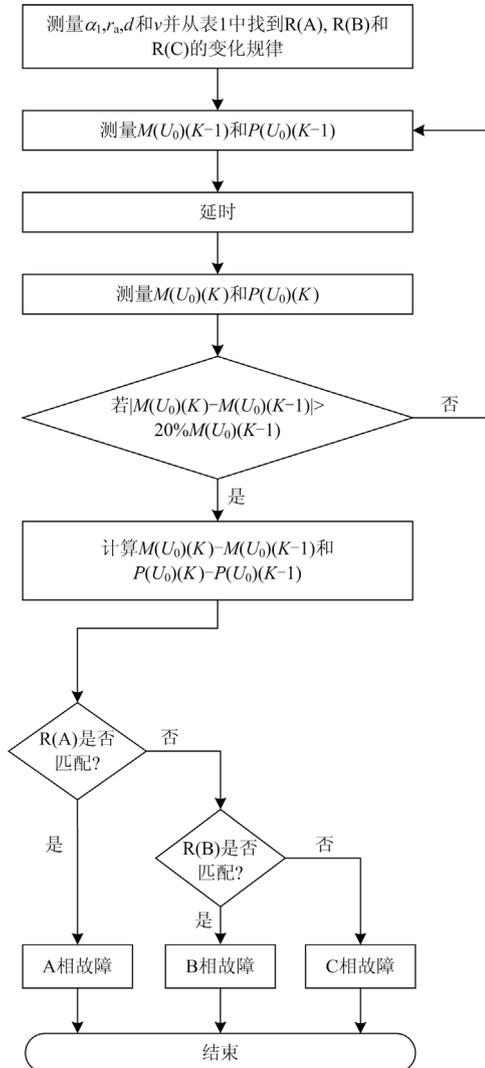


图 6 欠补偿条件下的故障选相方法流程图

Fig. 6 Flowchart of the faulty phase recognition method on under-compensated condition

首先, 测量网络参数, 即  $r_a$ 、 $r_b$ 、 $v$ 、 $d$ 、 $\alpha$  和  $\beta$ 。假设 SLG 故障分别发生在 A、B、C 相, 从表 1 中得到 3 个接地故障比变化规律  $R(A)$ 、 $R(B)$ 、 $R(C)$ 。然后以 1 s 为采样间隔进行零序电压测量。如果零序电压幅值的偏差大于 20%, 则认为发生了 SLG 故障。接着计算零序电压的幅值和相角的变化。最后, 根据零序电压变化规律, 确定故障相。

### 3.3 过补偿和全补偿接地系统的探讨

对于过补偿接地系统, 也可以进行同样的分析, 得出类似的结论。对于零序电压幅值变化规律, 式 (11) 表明, 脱谐率的正负并不影响零序电压幅值的大小。因此, 过补偿接地系统与欠补偿接地系统的零序电压幅值变化规律基本一致。此处主要分析过补偿接地系统的接地故障比相位变化规律。

过补偿系统下接地故障比相角变化规律如表 2 所示。

表 2 过补偿系统下接地故障比相角变化规律

Table 2 Ground fault ratio phase angle variation rules on over-compensated grounding condition

区域	不对称比角 $\alpha$	相角变化规律
I	$(\frac{\pi}{2}, \arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2}]$	先降后升再降
II	$(\arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2}, 2\pi - \arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2}]$	先升后降
III	$(2\pi - \arccos \frac{v r_a r_b}{v^2 + d^2}, \pi]$	降

从表 2 中可以看出, 过补偿系统下接地故障比相角变化规律也分为 3 个区域, 但是其变化规律与欠补偿条件相反。

全补偿系统即为脱谐率  $v = 0$  的特殊系统, 其接地故障比相角变化规律如表 3 所示。

表 3 全补偿系统下接地故障比幅值和相角变化规律

Table 3 Ground fault ratio magnitude and phase angle variation rules on full-compensated grounding condition

区域	不对称比角	幅值变化规律	相角变化规律
I	$(0, \pi/2]$	降	升
II	$(\pi/2, \pi]$	降	降
III	$(\pi, 3\pi/2]$	降	升
IV	$(3\pi/2, 2\pi]$	升	升

## 4 仿真验证

为了验证理论分析的正确性和故障相识别方法的有效性, 在 Matlab 中对给定参数的 10.5 kV 配电网进行了仿真, 其拓扑结构与图 1 相同。

仿真结果分为 3 组。第 1 组是验证欠补偿条件下发生 A 相 SLG 故障时不同接地故障比变化规律。

第 2 组是将结论推广到 B 相 SLG 故障。第 3 组验证了过补偿条件下的变化规律。

### 4.1 接地故障比变化规律验证

第 1 组选取 5 个不同的  $\alpha + \beta$  分别对应欠补偿条件下发生 A 相 SLG 故障时接地故障比变化规律的 5 个区域, 每个  $\alpha + \beta$  下分配 5 个不同的  $G_f$ , 仿真结果如表 4 所示。每个  $\alpha + \beta$  对应的区域以及其对应的  $U_{01}$  的位置如图 7 所示。表 4 仿真结果与表 1 的理

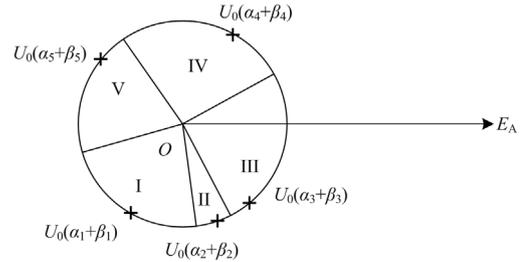


图 7 典型不对称率角及其对应  $U_{01}$

Fig. 7 Typical asymmetry ratio angles and the allocation of their corresponding  $U_{01}$

表 4 A 相发生 SLG 故障时的接地故障比

( $v = -15\%$ ,  $d = 5\%$ ,  $r_a = 4.5\%$ ,  $r_b = 3.5\%$ )

Table 4 Ground fault ratio on phase-A SLG fault

( $v = -15\%$ ,  $d = 5\%$ ,  $r_a = 4.5\%$ ,  $r_b = 3.5\%$ )

$(\alpha + \beta) / (^\circ)$	$G_f / S$	$M(U_{0A}) / kV$	幅值变化	$P(U_{0A}) / (^\circ)$	相位变化
45	$10^{-5}$	1.90	不变	-118.60	不变
	$10^{-4}$	1.63	降低	-122.53	降低
	$10^{-3}$	1.79	升高	-191.96	降低
	$10^{-2}$	5.33	升高	-186.70	升高
	$10^{-1}$	5.83	升高	-182.66	升高
85	$10^{-5}$	1.91	不变	-77.52	不变
	$10^{-4}$	1.60	降低	-74.16	升高
	$10^{-3}$	1.05	降低	-216.04	降低
	$10^{-2}$	5.11	升高	-188.42	升高
	$10^{-1}$	5.81	升高	-183.29	升高
105	$10^{-5}$	1.91	不变	-56.03	不变
	$10^{-4}$	1.50	降低	-52.46	升高
	$10^{-3}$	1.18	降低	118.05	升高
	$10^{-2}$	5.26	升高	167.92	升高
	$10^{-1}$	5.97	升高	176.15	升高
225	$10^{-5}$	1.80	不变	64.07	不变
	$10^{-4}$	1.98	升高	73.58	升高
	$10^{-3}$	3.70	升高	116.59	升高
	$10^{-2}$	5.69	升高	166.84	升高
	$10^{-1}$	6.02	升高	175.84	升高
300	$10^{-5}$	1.83	不变	138.26	不变
	$10^{-4}$	2.21	升高	138.05	降低
	$10^{-3}$	3.96	升高	143.29	升高
	$10^{-2}$	5.87	升高	170.50	升高
	$10^{-1}$	5.98	升高	176.50	升高

论分析结果相吻合，这不仅验证了理论分析的正确性，而且也说明了高接地故障电阻与低接地故障电阻的接地故障比变化规律完全不同，需要特别考虑。

第 2 组为 B 相发生 SLG 故障时的接地故障比，仿真结果如表 5 所示。本组选取 3 个不同的  $\alpha+\beta$  进行验证，从上到下的 3 个角度分别对应了表 1 中的区域 III、IV 和 I。仿真结果与分析的变化规律吻合较好，验证了 B 相发生 SLG 故障条件下接地故障比变化规律。此外，可以认为三三相的接地故障比变化规律之间具有互换性，因此，C 相发生 SLG 故障条件下的接地故障比变化规律也是正确的，无需额外对 C 相进行 SLG 故障仿真。

表 5 B 相发生 SLG 故障时的接地故障比

( $v = -15\%$ ,  $d = 5\%$ ,  $r_a = 4.5\%$ ,  $r_b = 3.5\%$ )

Table 5 Ground fault ratio on phase-B SLG fault

( $v = -15\%$ ,  $d = 5\%$ ,  $r_a = 4.5\%$ ,  $r_b = 3.5\%$ )

$(\alpha+\beta)/(^{\circ})$	$G_f/S$	$M(U_{0A})/kV$	幅值变化	$P(U_{0A})/(^{\circ})$	相位变化
0	$10^{-5}$	0.64	不变	187.56	不变
	$10^{-4}$	0.34	降低	207.16	升高
	$10^{-3}$	2.30	升高	357.07	升高
	$10^{-2}$	5.68	升高	47.54	升高
	$10^{-1}$	5.92	升高	58.65	升高
120	$10^{-5}$	0.87	不变	-52.44	不变
	$10^{-4}$	0.97	升高	-41.45	升高
	$10^{-3}$	3.54	升高	0.08	升高
	$10^{-2}$	5.87	升高	49.10	升高
	$10^{-1}$	5.90	升高	58.02	升高
240	$10^{-5}$	0.69	不变	65.18	不变
	$10^{-4}$	0.73	升高	47.11	降低
	$10^{-3}$	2.80	升高	18.84	降低
	$10^{-2}$	5.56	升高	49.42	升高
	$10^{-1}$	5.83	升高	58.36	升高

第 3 组是过补偿条件下的仿真结果，如表 6 所示。该组选取 3 个不同的  $\alpha+\beta$  分别对应表 2 的 3 个区域。从表 6 的数据可以很好地验证表 2 中的相角变化规律。

#### 4.2 故障选相方法的探讨

表 7 展示了传统故障识别准则失效的 4 个工况。其中 2 个工况处于欠补偿接地状态，2 个工况处于过补偿接地状态。所有工况均在 A 相设置了 SLG 故障。

对于工况 I，假设 A 相发生 SLG 故障， $\alpha+\beta$  对应于表 1 中的区域 I。当分别考虑 B 相和 C 相发生 SLG 故障时，对应区域变为 III 和 V。故障后的接地故障比幅值小于正常值，即  $M(U_{0A}) < M(U_{00})$  时，

表 6 过补偿接地条件下 A 相发生 SLG 故障时的接地故障比

( $v = -15\%$ ,  $d = 5\%$ ,  $r_a = 4.5\%$ ,  $r_b = 3.5\%$ )

Table 6 Ground fault ratio on phase-A SLG fault

under over-compensated grounding condition

( $v = -15\%$ ,  $d = 5\%$ ,  $r_a = 4.5\%$ ,  $r_b = 3.5\%$ )

$(\alpha+\beta)/(^{\circ})$	$G_f/S$	$M(U_{0A})/kV$	幅值变化	$P(U_{0A})/(^{\circ})$	相位变化
100	$10^{-5}$	1.76	不变	74.56	不变
	$10^{-4}$	1.41	降低	72.75	降低
	$10^{-3}$	0.99	降低	213.20	升高
	$10^{-2}$	5.06	升高	187.78	降低
	$10^{-1}$	5.83	升高	180.76	降低
220	$10^{-5}$	1.84	不变	-166.36	不变
	$10^{-4}$	2.01	升高	-161.22	升高
	$10^{-3}$	3.67	升高	-153.98	升高
	$10^{-2}$	5.58	升高	-175.72	降低
	$10^{-1}$	5.89	升高	-181.81	降低
340	$10^{-5}$	1.74	不变	-46.03	不变
	$10^{-4}$	1.86	升高	-57.16	降低
	$10^{-3}$	3.21	升高	-114.28	降低
	$10^{-2}$	5.55	升高	-168.76	降低
	$10^{-1}$	5.75	升高	-180.93	降低

根据所提故障选相方法可以排除 B 相和 C 相发生 SLG 故障的可能。但是传统故障选相方法的判别结果却是 C 相。

对于工况 II，分别假设 A 相、B 相或 C 相发生 SLG 故障， $\alpha+\beta$  分别于对应表 1 中的 III、IV 和 V。故障后的接地故障比幅值小于正常值，根据所提故障选相方法可以很容易排除 B 相和 C 相发生 SLG 故障的可能。但是传统故障选相方法的判别结果却是 B 相。

表 7 传统判据不成立时的条件

( $d = 5\%$ ,  $r_a = 4.5\%$ , A 相设为故障相)

Table 7 Conditions when traditional criterion does not stand

( $d = 5\%$ ,  $r_a = 4.5\%$ , phase A is set to be the faulty phase)

参数	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
$(\alpha+\beta)/(^{\circ})$	50	120	100	220
$v/\%$	+8	+8	-8	-8
$G_f/S$	$7 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-4}$
$M(U_{AG})/kV$	4.25	6.45	5.99	4.30
$M(U_{BG})/kV$	4.12	5.59	5.76	6.65
$M(U_{CG})/kV$	6.51	5.87	6.13	7.11
$M(U_{0A})/kV$	0.82	0.27	0.15	1.55
$P(U_{0A})/(^{\circ})$	-165.3	10.6	121.1	167.4
$M(U_{00})/kV$	1.88	1.83	1.88	1.88
$P(U_{00})/(^{\circ})$	-123.5	-57.6	81.2	125.3
传统判据判断结果	C 相	B 相	B 相	B 相

对于过补偿接地情况也可以进行同样的分析。对于指定的网络参数, 表 2 中  $\alpha+\beta$  的区域范围分别为  $(90^\circ, 115.3^\circ)$ ,  $(115.3^\circ, 232.5^\circ)$  和  $(232.5^\circ, 360^\circ)$ 。对于工况 III, 故障后的接地故障比相角大于正常值, 因此可以排除 C 相发生 SLG 故障。假设 B 相发生 SLG 故障, 则  $\alpha+\beta$  是属于接地故障比幅值的单调递增区域  $(179.5^\circ < \alpha + \beta + 120^\circ = 199^\circ < 347.2^\circ)$  内, 其与仿真结果不符, 因此排除 B 相发生 SLG 故障。然而传统故障选相方法的判别结果却是 B 相。

对于工况 IV, 假设 B 或 C 相发生 SLG 故障,  $\alpha+\beta$  均对应于表 2 中的区域 III。该区域内, 接地故障比相角具有单调下降的性质。但是仿真结果表明, 故障后的接地故障比相角大于正常值。因此, 排除 B 相和 C 相发生 SLG 故障。然而传统故障选相方法的判别结果却是 B 相。

综上所述, 可以看出所提故障选相方法能克服传统故障选相方法的局限性, 能有效提高故障相识别的准确度。

## 5 结论

由于配电网存在不对称性, 特别是接地故障电阻较高时, 传统故障选相方法不再适用。本文详细介绍了欠补偿接地系统和过补偿接地系统在 SLG 故障条件下接地故障比幅值和相角随接地故障电导变化的规律, 严格划分了幅值和相角变化规律的区域。提出了一种基于该规则的故障相位识别方法, 并给出了该方法的流程图。此外, 本文还将该方法与传统方法进行了比较。结果表明传统方法存在着判断盲区, 而所提方法不受不对称参数和接地电阻的影响, 能实现在不平衡配电网和高阻接地故障情况下故障相的准确识别。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 侯思祖, 郭威. 基于自适应陷波滤波器和混沌振子的配电网故障选线[J]. 电测与仪表, 2020, 57(6): 61-66.  
HOU Sizu, GUO Wei. Fault line selection in distribution network based on adaptive notch filter and chaos oscillator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(6): 61-66.
- [3] 孙玉伟, 刘亚东, 方健, 等. 分布式光伏接入对配电网线路故障定位的影响分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 102-107.  
SUN Yuwei, LIU Yadong, FANG Jian, et al. Influence of distributed photovoltaic access on fault location in distribution network lines[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 102-107.
- [4] 颜炯, 徐敬友, 胡志豪, 等. 配电终端性能动态测试及影响因素评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 178-184.  
YAN Jiong, XU Jingyou, HU Zhihao, et al. Research on the dynamic testing of distribution terminal and evaluation of impact factors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 178-184.
- [5] 李卫国, 许文文, 乔振宇, 等. 基于暂态零序电流凹凸特征的配电网故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 164-173.  
LI Weiguo, XU Wenwen, QIAO Zhenyu, et al. Fault section location method for a distribution network based on concave and convex characteristics of transient zero sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 164-173.
- [6] 王晓伟, 张晓, 赵倩宇, 等. 基于暂态零模电流的配电网故障区段定位[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 103-110.  
WANG Xiaowei, ZHANG Xiao, ZHAO Qianyu, et al. Fault section location in distribution system based on transient zero-mode current[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 103-110.
- [7] 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.
- [8] 蒋凯, 童晓阳, 梁晨. 基于随机矩阵的配电网故障选线方法研究[J]. 电工技术, 2018(13): 1-4.  
JIANG Kai, TONG Xiaoyang, LIANG Chen. Research on fault line selection method for distribution network based on random matrix[J]. Electric Engineering, 2018(13): 1-4.
- [9] 周兴达, 陆帅, 陈杨明, 等. 基于 SVG 两相电流注入的配电网单相接地故障消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 142-149.  
ZHOU Xingda, LU Shuai, CHEN Yangming, et al. Single-phase-to-ground fault arc-extinguishing method for distribution network based on SVG two-phase current injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 142-149.
- [10] CHEN X, CHEN B, TIAN C, et al. Modeling and harmonic optimization of a two-stage saturable

- magnetically controlled reactor for an arc suppression coil[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7): 2824-2831.
- [11] WANG Peng, CHEN Baichao, TIAN Cuihua, et al. A novel neutral electromagnetic hybrid flexible grounding method in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1350-1358.
- [12] WANG W, ZENG X, YAN L, et al. Principle and control design of active ground-fault arc suppression device for full compensation of ground current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4561-4570.
- [13] 郝越峰. 主动干预式消弧装置故障选线方法[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 184-188.  
HAO Yuefeng. Fault line selection method of active interference arc suppression device[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 184-188.
- [14] 王鹏, 张贺军, 徐凯, 等. 主动干预型消弧装置的附加电阻故障选相方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 180-186.  
WANG Peng, ZHANG Hejun, XU Kai, et al. Additional resistance based fault phase identification method suitable for active interference arc suppression device[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 180-186.
- [15] 谢菁, 薛永端, 徐丙垠. 小电流接地系统不对称电压有源补偿控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 115-121.  
XIE Jing, XUE Yongduan, XU Bingyin. An active compensation and control method of asymmetrical voltage in non-solidly grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 115-121.
- [16] 徐波, 张建文, 蔡旭, 等. 电网不对称条件下小电流接地系统接地相辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 175-182.  
XU Bo, ZHANG Jianwen, CAI Xu, et al. Grounding phase determination in non-effective grounding systems in case of unsymmetrical voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 175-182.
- [17] 曾祥君, 黄慧, 喻锴, 等. 基于柔性调控零序电压的配电网高阻接地及单相断线故障的选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 9-18.  
ZENG Xiangjun, HUANG Hui, YU Kun, et al. Voltage phase selection method for high resistance grounding and a single-phase disconnection fault of a distribution network based on flexible control of zero-sequence voltage[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 9-18.
- [18] 赵军, 邓杰文, 胡晨旺, 等. 不对称电网单相接地故障中性点位移电压轨迹分析及应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 159-166.  
ZHAO Jun, DENG Jiawen, HU Chenwang, et al. Analysis and application of trajectory of neutral point displacement voltage during single-phase grounding fault in asymmetrical power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 159-166.
- [19] MENG J, WANG W, TANG X, et al. Zero-sequence voltage trajectory analysis for unbalanced distribution networks on single-line-to-ground fault condition[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 161: 17-25.
- [20] 邹豪, 曾祥君, 喻锴, 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.
- [21] 张钧, 何正友, 臧天磊. 一种基于D-S证据理论和稳态量的配电网故障选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 49-55, 61.  
ZHANG Jun, HE Zhengyou, ZANG Tianlei. A fault phase selection approach in neutral non-effectively grounded system based on D-S evidence theory and stationary component[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 49-55, 61.
- [22] 叶远波, 蔡翔, 谢民, 等. 配电网单相接地故障快速选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 96-103.  
YE Yuanbo, CAI Xiang, XIE Min, et al. Fault phase fast detection of the single-phase-to-ground fault in a power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 96-103.
- [23] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2009.

收稿日期: 2021-04-16; 修回日期: 2022-02-06

作者简介:

孙震(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电网线路运行与检修. E-mail: sifb62725aov@sina.com

(编辑 周金梅)