

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240728

小电流接地配电网单相接地过渡电阻估计

刘健^{1,2}, 丁俊鹏², 杨东明², 王毅钊^{1,2}, 常小强¹, 张志华¹, 张小庆¹

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 2. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了通过单相接地故障时过渡电阻的差异来判断故障是发生在电缆段还是架空段, 研究了小电流接地配电网中过渡电阻的估计方法。首先, 论述了4种修正方法的基本原理, 包括全近似估计法, 即直接采用观测到的零序电压、零序电流和正常时的相电压来估计过渡电阻, 以及接地电流幅值修正法、接地电流全相量修正法和接地电流全相量+等效零序电压源幅值修正法。其次, 对上述方法进行了定量误差分析, 并探讨了典型馈线负荷分布的影响。研究表明全近似估计法的误差较大, 但各种修正措施都有助于提高过渡电阻的估计精度。然后, 采取接地电流全相量+等效零序电压源幅值修正法后, 在典型馈线负荷分布情况下, 虽然在低阻接地情况下, 相对误差较大, 但其绝对误差并不大, 能够满足应用需求。最后, 仿真和实验验证结果表明所提方法的可行性和有效性。

关键词: 配电网; 消弧线圈接地系统; 单相接地故障; 过渡电阻估计; 误差分析

Estimation of transition resistance for single-phase grounding faults in small current grounded distribution networks

LIU Jian^{1,2}, DING Junpeng², YANG Dongming², WANG Yizhao^{1,2}, CHANG Xiaoqiang¹, ZHANG Zhihua¹, ZHANG Xiaoqing¹

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To identify whether a single-phase grounding fault occurs in a cable section or an overhead line section based on differences in transition resistance, this paper investigates estimation methods for transition resistance in small-current grounded distribution networks. The fundamental principles of four correction methods are discussed, including total approximation (TA) based on the detected zero-sequence voltage, zero-sequence current, and phase voltage; grounding current amplitude correction (GCAC); grounding current vector correction (GCVC); and GCVC plus equivalent zero voltage source correction (GCVC + EZVC). Next, a quantitative error analysis of these methods is conducted, along with a discussion of the impact of typical load distribution. The study shows that while TA has relatively large errors, all the correction methods significantly improve the estimation accuracy of the transition resistance. With GCVC+EZVC, in the case of typical feeder load distribution, although the relative errors are large during low-resistance grounding, the absolute error remains small enough to meet practical requirements. Finally, simulation and experimental results verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5226SX22001C).

Key words: distribution networks; arc suppression coil grounding system; single-phase grounding faults; transition resistance estimation; error analysis

0 引言

随着配电网规模和电缆化率的逐步提高, 系统电容电流水平逐渐增加, 许多中性点不接地系统需要改造为消弧线圈接地系统, 以更有效地抑制接地

点电流, 且有助于熄灭电弧并抑制电弧重燃^[1-5]。

但随着城市配电网电缆化率的不断提高, 电缆沟拥挤问题逐渐严重。许多城市中, 几十条电缆同沟敷设的现象十分普遍, 有的城市甚至存在110 kV电缆与10 kV电缆同沟敷设的情况。西安、重庆、大连等城市曾多次发生因10 kV配电电缆单相接地故障引发沟道火灾的事件, 导致大面积停电, 严重影响社会的正常生产与生活秩序^[6-8]。作为预防电缆

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助(5226SX22001C)

沟起火的重要措施之一, 西安等城市给小电流接地系统单相接地故障赋予了跳闸机制, 从而有效解决了电缆沟火灾蔓延的问题^[9-10]。

然而, 城市配电线路大多为电缆-架空混合馈线, 发生在架空段的单相接地故障数量远多于发生在电缆段的单相接地故障。通常情况下, 在无山火防治要求的地区, 架空段的单相接地故障因其危害并不大, 无需立即跳闸^[11-12]。但在实际操作中, 并不容易区分单相接地故障发生在电缆段还是架空段。如果对所有单相接地故障都采取跳闸措施, 势必会大幅度增加跳闸率, 从而严重影响供电的可靠性。即使对发生在架空段的单相接地故障采取跳闸措施, 也应随后采取自动重合闸恢复瞬时性故障造成的停电, 而电缆段发生的单相接地故障一般为永久性故障, 因此并不需要对电缆段的单相接地故障采取自动重合闸措施^[13-14]。

因此, 区分单相接地故障发生在电缆段还是架空段对于确保配电网供电可靠性具有重要的实际意义。根据单相接地故障位置的判断结果, 可以采取差异化的处理措施: 对发生在电缆段的单相接地故障采取跳闸措施, 而对发生在架空段的单相接地故障则可采取告警措施, 或较长延时跳闸(如延迟 1 h), 或者立即跳闸后再安排自动重合闸^[15-16]。

通过对实际故障数据分析表明, 在配电网中, 架空段发生单相接地故障, 多因与树枝、水泥、沙土等接触形成, 在这种情况下, 接地过渡电阻数值高达数百欧姆甚至上千欧姆^[17-19]。而电缆段发生单相接地故障, 通常是由于电缆绝缘损坏、老化、分接头松动等原因造成, 此时故障呈现低阻特性, 其接地过渡电阻数值较小, 一般不超过 300 Ω^[20-21]。因此单相接地故障发生在电缆段还是架空段的重要区别在于接地过渡电阻数值的大小。

为了区分单相接地故障是发生在电缆段还是架空段, 本文提出了一种电缆-架空混合馈线接地过渡电阻的估计方法。

1 单相接地过渡电阻的严格表达式

小电流接地系统单相接地故障的零序稳态等效电路如图 1 所示, 模型中考虑了故障线路的线路阻抗。

图 1 中: \dot{E} 为等效零序电压源, 其幅值为故障相未接地时的相电压幅值 E ; L 为消弧线圈等效电感; TU 为故障点上游位置配电终端; C_1 为配电终端安装位置背侧系统的对地等效零序电容; C_2 为配电终端安装位置下游线路至故障点之间的对地等效

零序电容; $R_0 + X_0$ 为配电终端安装位置至故障点之间的线路零序阻抗; R_f 为接地过渡电阻; \dot{U}_0 和 \dot{I}_0 分别为配电终端检测所得的零序电压和零序电流; \dot{U}_{of} 为接地故障点的零序电压; \dot{I}_{of} 为流过接地故障点的零序电流。

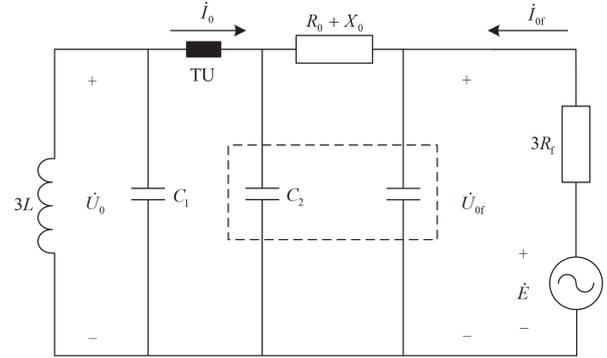


图 1 小电流接地系统单相接地零序稳态等效电路

Fig. 1 Zero-sequence steady-state equivalent circuit for single-phase ground in a small current grounding system

在发生单相接地时, 有

$$R_f \dot{I}_{of} = \dot{E} - \dot{U}_{of} \quad (1)$$

小电流接地配电网一般阻尼率较低, 近似认为 \dot{E} 和 \dot{I}_{of} 的相位差为 90° , 由此可以得出接地过渡电阻 R_f 的严格表达式为

$$R_f = \frac{|\dot{E} - \dot{U}_{of}|}{3I_{of}} = \frac{\sqrt{E^2 - U_{of}^2}}{3I_{of}} \quad (2)$$

然而, 在实际应用中, 发生单相接地故障处的参数 \dot{U}_{of} 、 \dot{I}_{of} 和 \dot{E} 是不可观测的, 通常只能观测到配电终端安装位置的参数 \dot{U}_0 、 \dot{I}_0 和故障相未接地时的相电压 \dot{U}_{ph} 。

为了解决这个问题, 有几种近似估计方法。

2 单相接地过渡电阻的近似估计

2.1 接地过渡电阻全近似估计法(total approximation, TA)

直接采用 \dot{U}_0 、 \dot{I}_0 和 \dot{U}_{ph} 近似 \dot{U}_{of} 、 \dot{I}_{of} 和 \dot{E} , 并近似认为 \dot{U}_0 和 \dot{I}_0 的相位差为 90° , 可以得出接地过渡电阻的全近似估计 R_{f1} 表达式为

$$R_{f1} \approx \frac{\sqrt{U_{ph}^2 - U_0^2}}{3I_0} \quad (3)$$

由于故障点上游线路中有负荷电流流过, 导致线路沿线产生压降, 因此配电终端检测所得的故障相未接地时的相电压幅值 U_{ph} 大于故障点处故障相

未接地时相电压幅值, 即

$$U_{\text{ph}} > E \quad (4)$$

由于消弧线圈通常工作在轻微过补偿状态, 且配电终端检测所得的零序电流幅值 I_0 包括了下游线路自身的电容电流, 因此其大于流过接地故障点的零序电流幅值 I_{of} , 即

$$I_0 > I_{\text{of}} \quad (5)$$

由于消弧线圈失谐度通常设置得较小, 以确保即使在金属性接地时, 残流也不超过 5 A, 从而保障较好的熄弧效果。在实际情况中, 变电站外发生单相接地故障时, 其接地过渡电阻数值通常不低于 20 Ω 。因此, 实际故障线路中流过的零序电流较小, 导致线路上引起的零序压降也很小, 可近似认为线路接地故障点的零序电压幅值 U_{of} 等于配电终端检测所得零序电压幅值 U_0 , 即

$$U_0 \approx U_{\text{of}} \quad (6)$$

则全近似估计法下过渡电阻估计值的绝对误差为

$$\Delta R_{\text{r1}} = |R_{\text{r1}} - R_{\text{r}}| = \left| \frac{\sqrt{U_{\text{ph}}^2 - U_0^2}}{3I_0} - \frac{\sqrt{E^2 - U_{\text{of}}^2}}{3I_{\text{of}}} \right| \quad (7)$$

全近似估计法下过渡电阻估计值的相对误差为

$$R_{\text{eff1}} = \left| 1 - \frac{I_{\text{of}} \sqrt{U_{\text{ph}}^2 - U_0^2}}{I_0 \sqrt{E^2 - U_{\text{of}}^2}} \right| \quad (8)$$

根据式(1)一式(8)可知:

当接地故障线路负荷较轻或线路较短, 导致沿线相电压和零序电压变化不大时, 将 \dot{I}_{of} 近似为 \dot{I}_0 , 是接地过渡电阻估计值误差来源的主要因素。根据式(5), 此时估计值偏小。此外, 接地线路自身电容电流越大, 则估计值与实际值之间的差距越大, 估计误差也越大。

当接地故障线路负荷较重或线路较长, 导致沿线相电压变化较大时, 接地过渡电阻估计值的误差受 \dot{E} 与 \dot{I}_{of} 近似处理的共同影响, 根据式(4)和式(5), 估计值可能偏小也可能偏大。

因此需要进一步修正以降低接地过渡电阻估计值的误差水平。

2.2 接地电流幅值修正法(grounding current amplitude correction, GCAC)

消弧线圈通常采用自动跟踪型消弧线圈, 在系统正常运行时, 实时检测系统电容 C_{Σ} , 并据此调节消弧线圈的补偿容量 L , 以满足预先设定的失谐度要求。自动跟踪型消弧线圈据此计算出额定零序电压 \dot{U}_{on} (额定零序电压幅值 U_{on} 等于标称相电压幅值, 即 $U_{\text{on}} = U_{\text{ph}}$) 下的电容电流 \dot{I}_{Cn} 和电感电流 \dot{I}_{Ln} 。

配电终端通过与消弧线圈控制器的通信, 可获得 \dot{I}_{Cn} 、 \dot{I}_{Ln} 以及两者之和, 即在金属性单相接地故障条件下的故障点残流 \dot{I}_{en} 。

$$\dot{I}_{\text{en}} = \dot{I}_{\text{Cn}} + \dot{I}_{\text{Ln}} \quad (9)$$

实际上, \dot{I}_{en} 为线路发生金属性单相接地故障时流过接地故障点的三相零序电流。

在发生接地过渡电阻为 R_{r} 的单相接地故障时, 流过接地故障点的零序电流 \dot{I}_{of} 将与接地故障点的零序电压 \dot{U}_{of} 同比例降低, 结合式(6)可得

$$\dot{I}_{\text{of}} = \frac{\dot{I}_{\text{en}} \dot{U}_0}{-3\dot{U}_{\text{ph}}} = \frac{(\dot{I}_{\text{Cn}} + \dot{I}_{\text{Ln}}) \dot{U}_0}{-3\dot{U}_{\text{ph}}} \quad (10)$$

若配电终端不具备与消弧线圈控制器通信的功能, 则可使用相控消弧线圈(如随调式消弧线圈、相控预调式消弧线圈)。相控消弧线圈可以连续调节输出的感性电流, 将接地故障点的残流幅值精确补偿到预先设定的残流补偿目标值 $I_{\text{e,set}}$, 将 $I_{\text{e,set}}$ 预先输入配电终端, 在发生单相接地故障时, 即可根据式(10)计算得到 I_{of} 。

$$I_{\text{of}} \approx \frac{I_{\text{e,set}} \cdot U_0}{-3U_{\text{ph}}} \quad (11)$$

这样, I_{of} 就成为已知量, 将其代入式(2), 便可得到接地电流幅值修正法下接地过渡电阻估计 R_{r2} , 即

$$R_{\text{r2}} \approx \frac{\sqrt{U_{\text{ph}}^2 - U_0^2}}{3I_{\text{of}}} \quad (12)$$

则接地电流幅值修正法下接地过渡电阻估计值的绝对误差 ΔR_{r2} 为

$$\Delta R_{\text{r2}} = |R_{\text{r2}} - R_{\text{r}}| = \left| \frac{\sqrt{U_{\text{ph}}^2 - U_0^2} - \sqrt{E^2 - U_{\text{of}}^2}}{3I_{\text{of}}} \right| \quad (13)$$

接地电流幅值修正法下过渡电阻估计值的相对误差 R_{eff2} 为

$$R_{\text{eff2}} = \left| 1 - \frac{\sqrt{U_{\text{ph}}^2 - U_0^2}}{\sqrt{E^2 - U_{\text{of}}^2}} \right| \quad (14)$$

根据式(4)一式(6)以及式(13)和式(14)可知:

接地过渡电阻的估计值偏大, 且当接地故障线路负荷越重或线路越长, 导致沿线相电压变化越大时, 估计误差也会越大。

与 2.1 节论述的方法不同, 接地电流幅值修正后的接地过渡电阻估计值始终偏大而不会偏小。

由式(14)可知:

在高阻单相接地故障情况下, U_0 和 U_{of} 均较小, 根据整定原则, 当配电终端在检测到 $10\%U_{\text{ph}}$ 时, 保

护启动。考虑到 10 kV 配电网允许的电压偏差为 $\pm 7\%U_{ph}$, 即极端情况下, $E = 86\%U_{ph}$ 。根据式(14), 在这种极端情况下 $R_{\varepsilon 12} = 16.5\%$ 。

在低阻单相接地故障情况下, U_{of} 接近 E ; 而在金属性接地时 $U_{of} \approx E$ 。此时式(14)中的分母非常小, 接近于 0, 因此在低阻单相接地故障时, $R_{\varepsilon 12}$ 会非常大。

2.3 接地电流全相量修正法(grounding current vector correction, GCVC)

在 2.2 节的方法中, 虽然修正了接地电流幅值, 但未对其相位进行修正。

以 \dot{U}_{of} 作为参考, φ 表示 \dot{U}_{of} 与 \dot{I}_{of} 之间的相位差, 则根据式(1), 在考虑相位差后有

$$\dot{E} = U_{of} + 3R_f I_{of} \cos \varphi + j3R_f I_{of} \sin \varphi \quad (15)$$

由此可得考虑相位差后的接地过渡电阻 \hat{R}_f 表达式为

$$\hat{R}_f = \frac{-U_{of} \cos \varphi + \sqrt{(U_{of} \cos \varphi)^2 + (E^2 - U_{of}^2)}}{3I_{of}} \quad (16)$$

由 2.2 节分析可得

$$\varphi = \angle \dot{I}_{of} - \angle \dot{U}_{of} = \angle \dot{I}_{en} - \angle -\dot{U}_{ph} + \angle \dot{U}_0 - \angle \dot{U}_{of} \quad (17)$$

式中: $\angle \dot{I}_{of}$ 、 $\angle \dot{U}_{of}$ 、 $\angle \dot{I}_{en}$ 、 $\angle -\dot{U}_{ph}$ 和 $\angle \dot{U}_0$ 分别表示 \dot{I}_{of} 、 \dot{U}_{of} 、 \dot{I}_{en} 、 $-\dot{U}_{ph}$ 和 \dot{U}_0 的相位。根据第 1 节分析可知, 零序网络中线路零序电流很小, 且线路零序参数中 $R_0 \gg X_0$, 因此

$$\angle \dot{U}_{of} \approx \angle \dot{U}_0 \quad (18)$$

则有

$$\varphi \approx \angle \dot{I}_{en} - \angle -\dot{U}_{ph} \quad (19)$$

根据 2.2 节的分析, $\angle \dot{I}_{en}$ 可看作线路在金属性单相接地故障时流过接地故障点的零序电流相位, 该相位可近似为配电终端检测到的零序电流相位 $\angle \dot{I}_0$; $\angle -\dot{U}_{ph}$ 则可看作线路在金属性单相接地故障时配电终端所检测到的零序电压相位, 即金属性接地时的 $\angle \dot{U}_0$ 。

因此, 针对式(17), 进一步可得

$$\varphi \approx \varphi' = \angle \dot{I}_0 - \angle \dot{U}_0 \quad (20)$$

式中: φ' 为 \dot{U}_0 和 \dot{I}_0 间的相位差。

则根据式(6)和式(16), 接地电流全相量修正法下接地过渡电阻估计 $R_{\varepsilon 13}$ 表达式为

$$R_{\varepsilon 13} = \frac{-U_{of} \cos \varphi' + \sqrt{(U_{of} \cos \varphi')^2 + (U_{ph}^2 - U_{of}^2)}}{3I_{of}} \quad (21)$$

则接地电流全相量修正法下接地过渡电阻估计

值的绝对误差 $\Delta R_{\varepsilon 13}$ 为

$$\Delta R_{\varepsilon 13} = \left| R_{\varepsilon 13} - \hat{R}_f \right| = \left| -U_{of} \cos \varphi' + U_{of} \cos \varphi + \frac{\sqrt{(U_{of} \cos \varphi')^2 + (U_{ph}^2 - U_{of}^2)}}{\sqrt{(U_{of} \cos \varphi)^2 + (E^2 - U_{of}^2)}} \right| / 3I_{of} \quad (22)$$

接地电流全相量修正法下接地过渡电阻估计值的相对误差 $R_{\varepsilon 13}$ 为

$$R_{\varepsilon 13} = \left| \frac{-U_{of} \cos \varphi' + \sqrt{(U_{of} \cos \varphi')^2 + (U_{ph}^2 - U_{of}^2)}}{-U_{of} \cos \varphi + \sqrt{(U_{of} \cos \varphi)^2 + (E^2 - U_{of}^2)}} - 1 \right| \quad (23)$$

通常将消弧线圈设置在过补偿状态, 则故障线路上游配电终端处零序电流 \dot{I}_0 为感性, 且流向母线的方向与零序电流的参考方向相反。在不考虑系统阻尼的情况下, \dot{U}_0 和 \dot{I}_0 间的相位差 φ' 为 90° 。然而, 在考虑系统阻尼的影响后, 相位差 φ' 会偏离 90° , 零序分量的具体相位关系如图 2 所示。

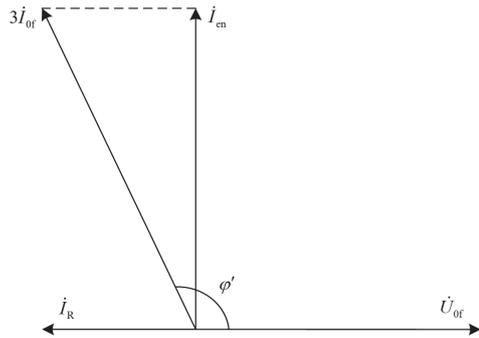


图 2 零序分量相位图

Fig. 2 Phase diagram of zero-sequence components

由式(23)可知, 当 $\varphi' = 90^\circ$ 的低阻单相接地故障发生时, 由于 U_{of} 接近 E , 这将导致相对误差非常大。因此, 需分析系统阻尼率最小的极端场景。

在正常运行条件下, 系统阻尼率 d 通常不低于 2%。若按 $d = 2\%$ 考虑, 则系统电容电流幅值 I_C 对应的系统阻性电流幅值 I_R 为 $2\%I_C$ 。通常, 将消弧线圈的脱谐率 γ 设置为 5%~10% 的过补偿状态, 此时接地故障点的残流幅值 I_{en} 为 γI_C 。

则根据上述分析, 并结合图 2 所示的相位关系, 可以得到 \dot{U}_0 和 \dot{I}_0 间的相位差 φ' 为

$$\varphi' = 90^\circ + \arctan \frac{I_R}{I_{en}} = 90^\circ + \arctan \frac{I_R}{\gamma I_C} \quad (24)$$

由式(24)可以看出, 使 φ' 最接近 90° 的情况对应于 I_{en} 最大的场景, 也即 γ 和 I_C 最大的情况。通常, 当 I_C 大于 200 A 时, 系统倾向于采用小电阻接地方

式, 因此 I_C 的最大值可以按 200 A 考虑, γ 按 10% 考虑。在此最不利场景下, 有

$$\varphi' = 90^\circ + \arctan \frac{200 \times 2\%}{200 \times 10\%} = 101.3^\circ \quad (25)$$

由式(25)可知: 在高阻单相接地故障情况下 $R_{ef3} = 16.1\%$; 在低阻单相接地故障情况下 $R_{ef3} = 109.3\%$ 。

综上所述, 在对接地电流全相量进行修正后, 低阻单相接地故障时, 接地过渡电阻估计值的相对误差仍然较大。其主要原因在于修正后的过渡电阻估计式中, 采用故障区段上游配电终端采集的未接地时的相电压 \dot{U}_{ph} 近似代替 \dot{E} 。然而, 在实际情况中, 由于线路上的负荷电流引起的压降, 导致 $E < U_{ph}$ 。因此, 对 E 的修正也是必要的。

2.4 等效零序电压源幅值修正法(equivalent zero voltage source correction, EZVC)

在配电线路中, 通常配置有分段开关, 在部分分段开关上部署配电终端, 即一段线路上存在多个用于采集数据的配电终端, 如图 3 所示的 $TU_1 - TU_N$ 。

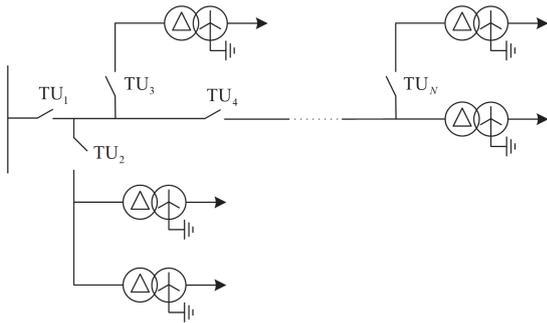


图 3 典型配电终端配置

Fig. 3 Typical distribution terminal configurations

在发生故障后, 分段开关动作, 配电终端将故障区段的信息上传。可以根据故障区段两端配电终端所采集的稳态电压对 E 进行修正, 即

$$E' \approx \frac{\sum_{i=1}^N U_{ph,i}}{N} \quad (26)$$

式中: E' 为 E 的修正值; N 为单相接地故障区段周边配置的配电终端数量; $U_{ph,i}$ 为第 i 个配电终端所采集到的相电压幅值, 当 $i=1$ 时, 表示单相接地故障区段入点处的配电终端所采集到的未接地时的相电压幅值。

根据式(26), 接地过渡电阻估计式进一步修正为

$$R_{ef4} \approx \frac{-U_0 \cos \varphi' + \sqrt{(U_0 \cos \varphi')^2 + (E'^2 - U_0^2)}}{3I_{of}} \quad (27)$$

则在接地电流全相量+等效零序电压源幅值修正法下过渡电阻估计值的绝对误差为

$$\Delta R_{ef4} = \left| R_{ef3} - \hat{R}_f \right| = \left| -U_0 \cos \varphi' + U_{of} \cos \varphi + \sqrt{(U_0 \cos \varphi')^2 + (E'^2 - U_0^2)} - \sqrt{(U_{of} \cos \varphi)^2 + (E^2 - U_{of}^2)} \right| / 3I_{of} \quad (28)$$

在接地电流全相量+等效零序电压源幅值修正法下接地过渡电阻估计值的相对误差为

$$R_{ef4} = \left| \frac{-U_0 \cos \varphi' + \sqrt{(U_0 \cos \varphi')^2 + (E'^2 - U_0^2)}}{-U_{of} \cos \varphi + \sqrt{(U_{of} \cos \varphi)^2 + (E^2 - U_{of}^2)}} - 1 \right| \quad (29)$$

根据 2.2 节分析, 10 kV 配电网在极端情况下 $E = 86\%U_{ph}$ 。一般情况下, 一条馈线被划分为多个区段, 并且从变电站出线断路器到首级分段开关的压降最大。为了严谨起见, 通常认为首级开关处的相电压已经降至 $86\%U_{ph}$ 。如果采用该区段的平均相电压作为 E 的修正值 E' , 则在此最不利情况下, $E' \approx 93\%U_{ph}$ 。将其代入式(29)中可得: 在高阻单相接地故障情况下 $R_{ef4} = 8.06\%$; 在低阻单相接地故障情况下 $R_{ef4} = 66.24\%$ 。

综上所述, 在对接地电流全相量和等效零序电压源幅值进行修正后, 高阻单相接地故障时误差显著降低。然而, 在低阻单相接地故障时, 相对误差仍然较大。由于实际馈线上的电压分布并不均匀, 电压降落通常在馈线的首端最为严重。因此, 需要明确馈线电压分布的影响, 以进一步降低接地过渡电阻估计值的误差。

3 典型馈线负荷分布时的估计误差分析

馈线上的电压降落与负荷分布密切相关^[22-23]。图 4 所示为一段典型馈线负荷分布。A 和 B 分别为该馈线两端的分段开关; $S_A \angle S_{AP}$ 为流过 A 的功率, S_A 为 $S_A \angle S_{AP}$ 的幅值, S_{AP} 为 $S_A \angle S_{AP}$ 的功率因数角; $\dot{S}(\lambda)$ 为此馈线在距离 B 端长度为 λ 处的负荷。

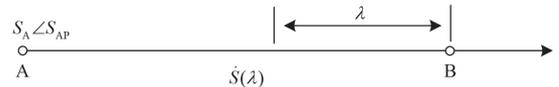


图 4 典型馈线负荷分布

Fig. 4 A typical load distribution on a feeder

考虑到变电站的供电范围一般是以该站为圆心的圆形区域, 而每条馈线的供电范围大致呈扇形。因此, 沿线负荷线性增加的分布形式最为典型, 如图 5 所示, 则负荷分布密度函数 $\rho(\lambda)$ 为^[24]

$$\rho(\lambda) = k(D - \lambda) \quad (30)$$

式中: k 为负荷沿线增加斜率, $k = K \angle \theta$, K 为负荷沿线增加斜率幅值, θ 为负荷沿线增加斜率相角; D 为整条馈线的长度。为了简化分析, 近似认为馈线沿线的负荷功率因数相同, 即 $S_{AP} = \theta$ 。

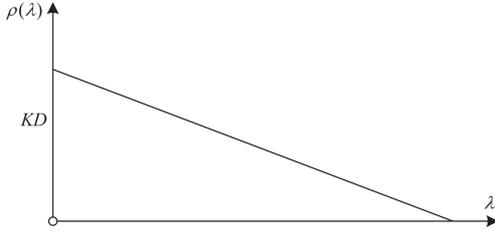


图5 负荷分布图

Fig. 5 Load distribution diagram

根据式(30), 可得

$$\dot{S}(\lambda) = \int_0^\lambda K(D - \lambda) d\lambda = (KD\lambda - K\lambda^2/2)e^{j\theta} \quad (31)$$

从而可以得到距 B 端长度为 m 处的电压降落 $\Delta\dot{U}(m)$ 为

$$\Delta\dot{U}(m) = \int_0^m (r + jx)(KD\lambda - K\lambda^2/2)e^{-j\theta} d\lambda = (R' + jX')(Km^2/3)e^{-j\theta} \quad (32)$$

式中: $r + jx$ 为馈线单位长度的阻抗; $R' + jX'$ 为长度为 m 的线路总阻抗。进一步推导可得

$$|\Delta\dot{U}(m)| = zKm^2/3 \quad (33)$$

式中: $z = \sqrt{r^2 + x^2}$ 。

根据 2.2 节的分析, 在极端情况下, 有

$$U_B = U_A - |\Delta\dot{U}(D)| = U_A - zKD^2/3 = 86\%U_A \quad (34)$$

式中: U_A 和 U_B 分别为 A 端和 B 端未接地时的相电压幅值。

因此, 有

$$|\Delta\dot{U}(D)| = zKD^2/3 = 14\%U_A \quad (35)$$

通常, 一条主干馈线上有 3 台分段开关配置配电终端(TU), 将主干馈线分为 3 段, 如图 6 所示。TU₁ 为变电站出线的自动化终端, TU₂ 和 TU₃ 为馈线开关配备的配电终端。

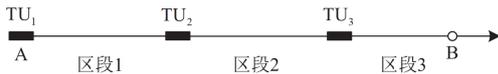


图6 一条典型的三分段馈线

Fig. 6 A typical feeder with three sections

在相邻配电终端间隔距离近似相等的假设下, 根据式(34)和式(35), 可得

$$U_{TU_2} \approx U_B + \left| \Delta\dot{U} \left(\frac{2D}{3} \right) \right| = 0.90U_A \quad (36)$$

$$U_{TU_3} \approx U_B + \left| \Delta\dot{U} \left(\frac{D}{3} \right) \right| = 0.865U_A \quad (37)$$

式中: U_{TU_2} 、 U_{TU_3} 分别为 TU₂、TU₃ 处未接地时的相电压幅值。

由上述分析可以看出, 馈线沿线的电压降落程度呈递减趋势, 因此, 接地点等效零序电压源幅值的估计误差对接地过渡电阻估计精度的影响也会相应减弱。在馈线区段 1 内, 电压降落尤其显著, 因此当单相接地故障发生在此区段 1 内时, 接地过渡电阻估计值的误差将达到最大。

根据式(29)和式(36), 区段 1 内发生单相接地故障时, 高阻单相接地故障情况下接地过渡电阻估计值的相对误差 $R_{\text{err}} = 5.50\%$; 低阻单相接地故障情况下接地过渡电阻估计值的相对误差 $R_{\text{err}} = 48.95\%$ 。

在典型馈线负荷分布的情况下, 虽然在低阻单相接地故障时, 估计值的相对误差仍然偏大, 但绝对误差并不显著, 能够满足应用需求。本文对接地过渡电阻估计的主要研究目的在于判断接地故障发生在架空段还是电缆段。对于低阻单相接地故障, 只要接地过渡电阻估计值控制在电缆段单相接地故障时可能出现的最大值范围内, 就能满足这一目标。

在实际配电网中, 配电终端的数量通常多于三分段式馈线的配电终端数。因此, 在实际应用中, 此方法的估计结果将更加理想。此外, 适当增加馈线首端配电终端的部署密度, 可以进一步降低馈线首端单相接地故障时接地过渡电阻的估计误差。

4 仿真验证

采用 PSCAD 进行仿真验证, 仿真模型如图 7 所示。该模型模拟了一个典型的 10 kV 配电系统, 其中线路由架空线和电缆线组成, 系统电容电流设定为 71.5 A, 采用过补偿方式, 失谐度取 10%。

图 7 所示的配电模型包含 5 条馈线。其中, 馈线 1 和馈线 2 为电缆线路, 馈线 3 至馈线 5 为电缆-架空混合线路。仿真模型线路参数如表 1 所示。

馈线 5 为接地故障所在线路, 共包含①—⑧ 8 个馈线段。其中, 每个馈线段长 0.5 km, ①—③ 馈线段为电缆线路, ④—⑧ 馈线段为架空线路。Q₁—Q₅ 为馈线 5 上分段开关周边配备的配电终端。

馈线 5 中设置了 4 处单相接地故障点, 其中, 故障点 f_1 和 f_2 的接地过渡电阻分别设置为 20、50、100、200、300 和 400 Ω , 共 12 个场景; 故障点 f_3 和 f_4 的接地过渡电阻分别设置为 300、400、500、

800、1000、1500 和 2000 Ω，共 14 个场景。

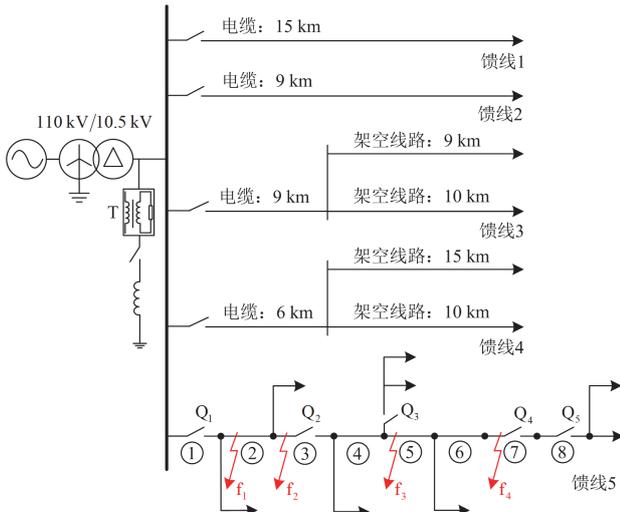


图 7 基于 PSCAD 的配电网仿真模型
Fig. 7 PSCAD based simulation model of a distribution network

表 1 仿真模型线路参数表

Table 1 Simulation line parameters

配电线路	正序/零序参数
电缆线路电阻	[0.123 Ω/km, 1.23 Ω/km]
电缆线路感抗	[0.07 Ω/km, 0.29 Ω/km]
电缆线路容抗	[8.47 kΩ·km, 11.37 kΩ·km]
架空线路电阻	[0.19 Ω/km, 0.25 Ω/km]
架空线路感抗	[0.33 Ω/km, 1.42 Ω/km]
架空线路容抗	[212.21 kΩ·km, 397.89 kΩ·km]

利用基于接地电流全相量 + 等效零序电压源幅值修正法(GCVS + EZVS)的接地过渡电阻估计式对故障点 $f_1 - f_4$ 的接地过渡电阻进行估计，并比较各修正法下接地过渡电阻估计值的误差，结果如表 2—表 5 所示。

由表 2 和表 3 可知，相较于 TA、GCAC、GCVS 和 TA + EZVS 方法，基于接地电流全相量 + 等效零序

表 2 f_1 处单相接地时过渡电阻估计相对误差

Table 2 Relative error in the estimation of transition resistance at f_1 when single-phase grounding

过渡电阻/Ω	各修正法下过渡电阻估计值的相对误差/%				
	TA	GCAC	GCVS	TA+EZVS	GCVS + EZVS
20	279.95	456.55	271.54	100.65	76.17
50	79.84	163.43	86.75	24.764	31.32
100	17.56	72.19	32.07	-2.29	15.91
200	-10.08	31.71	10.62	-16.60	7.98
300	-18.16	19.87	5.45	-21.55	5.29
400	-21.89	14.42	3.45	-24.07	3.94

表 3 f_2 处单相接地时过渡电阻估计相对误差

Table 3 Relative error in the estimation of transition resistance at f_2 when single-phase grounding

过渡电阻/Ω	各修正法下过渡电阻估计值的相对误差/%				
	TA	GCAC	GCVS	TA+EZVS	GCVS + EZVS
20	473.21	739.63	539.77	371.17	-82.02
50	149.26	265.11	184.20	112.02	-10.65
100	46.42	114.48	73.18	30.64	3.14
200	0.59	47.34	26.03	-5.34	4.25
300	-12.36	28.38	13.89	-15.59	3.46
400	-18.06	20.02	9.03	-20.19	2.80

序电压源幅值修正的接地过渡电阻估计方法(GCVS + EZVS)表现更优，且随着接地过渡电阻的增大，估计误差逐渐减小。虽然在电缆段发生低阻单相接地故障、接地过渡电阻低于 100 Ω 时，估计值的相对误差存在偏大的现象，但其绝对误差依然较小，仍在电缆段单相接地过渡电阻的合理范围内。因此，在利用接地过渡电阻估计来判别接地故障是否发生在电缆段时，低阻接地时的估计误差不会对结果产生不利影响。

表 4 f_3 处单相接地时过渡电阻估计相对误差

Table 4 Relative error in the estimation of transition resistance at f_3 when single-phase grounding

过渡电阻/Ω	各修正法下过渡电阻估计值的相对误差/%				
	TA	GCAC	GCVS	TA + EZVS	GCVS + EZVS
300	15.411	69.16	54.45	12.71	16.77
400	1.00	47.96	36.85	-0.95	11.38
500	-6.77	36.56	27.63	-8.28	8.55
800	-16.66	22.08	16.44	-17.60	4.98
1000	-19.37	18.12	13.59	-20.16	3.99
1500	-22.40	13.68	10.64	-23.03	2.86
2000	-23.64	11.86	9.57	-24.22	2.39

表 5 f_4 处单相接地时过渡电阻估计相对误差

Table 5 Relative error in the estimation of transition resistance at f_4 when single-phase grounding

过渡电阻/Ω	各修正法下过渡电阻估计值的相对误差/%				
	TA	GCAC	GCVS	TA + EZVS	GCVS + EZVS
300	28.31	87.94	73.17	25.65	-0.62
400	10.11	61.28	50.14	8.19	0.21
500	0.24	46.83	37.88	-1.25	0.40
800	-12.36	28.38	22.73	-13.31	0.24
1000	-15.79	23.35	18.81	-16.60	0.07
1500	-19.62	17.75	14.71	-20.27	-0.23
2000	-21.16	15.49	13.20	-21.75	-0.41

表4和表5展示了各修正法在架空段高阻单相接地故障下接地过渡电阻的估计结果。相比于低阻单相接地故障,高阻故障时的估计相对误差均在10%以内,估计精度更高。这一结果与第2节中理论误差分析一致。

5 实验验证

为了验证所提出的基于接地电流全相量+等效零序电压源幅值修正法(GCVS + EZVS)在实际应用中的可行性,在10 kV真型试验场中开展了多种接地过渡电阻的人工接地实验。根据测得的实验数据,估计接地过渡电阻数值并与真实值进行对比验证。试验系统的一次接线图如图8所示。系统在额定电压下的总电容电流为23.5 A,中性点采用经消弧线圈接地,工作在10%过补偿状态。试验线路为YJLV22-8.7/15-3×50电缆,设置了3处接地故障点,其位置分别为距出线开关柜0.1、0.3和1.3 km处。在线路母线侧和末端侧均配有检测终端。

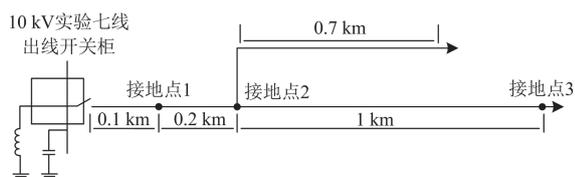


图8 10 kV真型试验系统

Fig. 8 10 kV true type test system

接地点1和接地点2的接地过渡电阻分别设置为66.7、133.3、200、500、700、1500和2000 Ω ,共14种场景。接地点3仅模拟高阻单相接地故障,接地过渡电阻分别设置为500、700、1500和2000 Ω ,共4种场景,实验结果如表6所示。

表6 实验结果的相对误差

Table 6 Relative error of the experimental results

过渡电阻/ Ω	不同故障位置下实验结果的相对误差/%		
	接地点1	接地点2	接地点3
66.7	25.82	68.33	—
133.3	19.05	29.44	—
200	14.45	18.88	—
500	6.87	6.74	9.92
700	5.11	4.73	6.59
1500	2.61	2.31	2.95
2000	2.07	1.84	2.32

根据表6的结果,所提出的基于接地电流全相量+等效零序电压源幅值修正法(GCVS + EZVS)的接地过渡电阻估计方法被验证为有效,能够满足实际接地故障中的工程需求。

6 结论

1) 随着单相接地过渡电阻的增大,各种修正法下估计值的精度逐渐提高。尽管在低阻单相接地故障情况下,接地过渡电阻估计值的相对误差较大,但是其绝对误差相对较小。

2) 直接采用观测到的零序电压、零序电流和正常状态下的相电压进行估计的全近似估计法误差较大。相比之下,接地电流幅值修正法、接地电流全相量修正法以及等效零序电压源幅值修正法,均显著提高了估计精度。

3) 在采用接地电流全相量+等效零序电压源幅值修正法(GCVS + EZVS)并考虑典型馈线负荷分布后,尽管低阻单相接地故障情况下的相对误差较大,但是其绝对误差依然较小,能够满足实际应用需求。

4) 仿真和实验验证表明,所提出的方法具有良好的可行性和有效性,能够在实际工程中提供可靠的接地过渡电阻估计。

参考文献

- [1] 刘健, 宋国兵, 张志华, 等. 配电网单相接地故障处理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [2] 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.
- [3] 刘健, 张薛鸿, 张小庆, 等. 预防电缆沟起火的小电流接地系统单相接地故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 21-29.
LIU Jian, ZHANG Xuehong, ZHANG Xiaoqing, et al. Treatment of a single-phase grounding fault in a small current grounding system to prevent fire in a cable trench[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 21-29.
- [4] 李辉, 李航, 陈尚, 等. 配电网单相接地故障电弧特性分析及真型试验技术研究[J]. 供用电, 2024, 41(4): 45-52.
LI Hui, LI Hang, CHEN Shang, et al. Study on arc characteristics of single-phase grounding fault and true type test technology in distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(4): 45-52.
- [5] 陈洁羽, 左宝峰, 谈震, 等. 配电网单相接地快速处置装置运行情况研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(2): 75-81.
CHEN Jieyu, ZUO Baofeng, TAN Zhen, et al. Operation analysis of rapid disposal device for single-phase grounding fault in distribution network[J]. Smart Power, 2022, 50(2): 75-81.
- [6] 张世栋, 郭雨豪, 张林利, 等. 基于层次分析法的小电流接地故障自适应跳闸方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 28-34.
ZHANG Shidong, GUO Yuhao, ZHANG Linli, et al. Adaptive tripping scheme for non-solidly grounding fault based on analytic hierarchy process[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9): 28-34.
- [7] 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.
- [8] 梁睿, 彭楠, 张政一, 等. 暂态特征模量时频分析的电缆型配电网单相接地故障区段定位[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9098-9114.
LIANG Rui, PENG Nan, ZHANG Zhengyi, et al. Single-phase networks based on the time-frequency analysis of the transient featured moduli[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9098-9114.
- [9] 徐玉琴, 杨浩, 李鹏. 不同接地方式电缆型配电网单相接地故障下的可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 41-47.
XU Yuqin, YANG Hao, LI Peng. Reliability evaluation of different grounding cable networks on single-phase grounding fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 41-47.
- [10] 曾祥君, 王福恒, 李理, 等. 中压配电网接地故障快速安全处置技术[J]. 供用电, 2021, 38(12): 2-8, 14.
ZENG Xiangjun, WANG Fuheng, LI Li, et al. Fast and safe disposal technology of grounding fault in medium voltage distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(12): 2-8, 14.
- [11] 邓雯玲, 卢继平, 苟鑫, 等. 适用于高压电缆-架空线混合线路的新型重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 126-132.
DENG Wenling, LU Jiping, GOU Xin, et al. Novel reclosing scheme for hybrid lines with high-voltage cable and overhead lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 126-132.
- [12] 梁振锋, 李天婷, 伍美娟, 等. 架空-电缆混合线路自适应故障区段重合闸的研究[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1127-1134.
LIANG Zhenfeng, LI Tianting, WU Meijuan, et al. Research on adaptive fault section reclosing of overhead-able hybrid line[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1127-1134.
- [13] 何慧雯, 张敏, 何俊佳. 电缆出线变电站应用自动重合闸的探讨[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 32-36, 68.
HE Huiwen, ZHANG Min, HE Junjia. Application of recloser in substations with cable outlets[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 32-36, 68.
- [14] 李浩, 宋国兵, 樊艳芳, 等. 利用分相开关探测的配电网永久性故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 11-21.
LI Hao, SONG Guobing, FAN Yanfang, et al. Permanent fault identification method of a distribution network based on detection using a phase segregated switch[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 11-21.
- [15] 蒋江波, 解超, 李凤婷, 等. 适用于带并抗的同杆双回线接地故障分相自适应重合闸策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 12-24.
JIANG Jiangbo, XIE Chao, LI Fengting, et al. Phase-separation adaptive autoreclosing strategy for ground faults on double-circuit transmission lines with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 12-24.
- [16] GHOSH B, CHAKRABORTY A K, BHOWMIK A R. Reliability and efficiency enhancement of a radial distribution system through value-based auto-recloser placement and network remodelling[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-14.
- [17] 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.
- [18] 王宾, 崔鑫. 中性点经消弧线圈接地配电网弧光高阻接地故障非线性建模及故障解析分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3864-3873.
WANG Bin, CUI Xin. Nonlinear modeling and analytical analysis of arc high resistance grounding fault in distribution network with neutral grounding via arc suppression coil[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3864-3873.
- [19] WANG X, GAO J, WEI X, et al. Faulty feeder detection under high impedance faults for resonant grounding distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 14(3): 1880-1895.
- [20] 董立明, 秦苏亚, 张宗熙, 等. 谐振接地系统高阻接地故障能量机理分析[J]. 供用电, 2022, 39(4): 52-58, 83.
DONG Liming, QIN Suya, ZHANG Zongxi, et al. Analysis of energy mechanism of high resistance grounding fault in resonant grounding system[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(4): 52-58, 83.
- [21] 袁超, 储海军, 陈燕擎, 等. 考虑金属护层耦合的高压电缆单相接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 115-120.
YUAN Chao, CHU Haijun, CHEN Yanqing, et al. Single phase ground fault location method for high voltage cables considering the metal sheath coupling[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 115-120.
- [22] 李乐萍, 许皓, 王子希, 等. 基于等效负荷分布的含分布式电源配电网线损计算[J]. 供用电, 2024, 41(3): 42-50, 77.
LI Leping, XU Hao, WANG Yuxi, et al. Calculation of line loss in distribution networks with distributed power sources based on equivalent load distribution[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(3): 42-50, 77.
- [23] 马喜平, 贾嵘, 梁琛, 等. 高比例新能源接入下电力系统降损研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4305-4315.
MA Xiping, JIA Rong, LIANG Chen, et al. Review of researches on loss reduction in context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4305-4315.
- [24] 刘健, 毕鹏翔, 武晓蒙. 馈线的等效负荷密度模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 71-74, 112.
LIU Jian, BI Pengxiang, WU Xiaomeng. Equivalent load density models for feeders[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 71-74, 112.

收稿日期: 2024-06-12; 修回日期: 2024-09-08

作者简介:

刘健(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电网及其自动化技术; E-mail: powersys@263.net

丁俊鹏(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网及其自动化技术。E-mail: 2765291385@qq.com

(编辑 魏小丽)