

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240302

计及电网参数不平衡的灵活接地系统高阻接地故障选线方法

李晓波, 张世乐, 谢剑锋, 彭超红, 刘栩鹏, 梁睿

(中国矿业大学电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 灵活接地系统采用的零序过电流保护存在耐过渡电阻能力低的问题, 并且现有的选线方法对互感器精度要求较高, 也未考虑电网参数不平衡对判据的影响, 存在保护误判的风险。针对上述问题, 首先在计及电网参数不平衡条件下, 探究了并联小电阻投入前后各电气信号变化量与线路对地参数、不平衡电流的关系。研究发现健全线路零序电流变化量与零序电压变化量之比等于该线路对地导纳, 故障线路的零序电流变化量与零序电压变化量之比则为线路对地导纳与接地导纳的总和。在此基础上, 提出了一种适用于灵活接地系统单相高阻接地故障的选线方法。该方法不受电网参数不平衡与零序 CT 极性反接影响, 能够有效降低保护对互感器精度的要求。此外, 该方法还可利用故障信息实现电网参数不平衡条件下对过渡电阻及单条线路对地导纳的测量。最后, 在搭建的仿真电路中验证了所述方法的正确性和有效性。

关键词: 灵活接地系统; 电网参数不平衡; 零序电压变化量; 零序电流变化量; 高阻接地故障

A high resistance ground-fault line selection method for flexible grounding system considering unbalanced power grid parameters

LI Xiaobo, ZHANG Shile, XIE Jianfeng, PENG Chaohong, LIU Xupeng, LIANG Rui

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

Abstract: Zero sequence overcurrent protection adopted in the flexible grounding system faces the problem of low tolerance to transition resistance. The existing fault line selection methods also require high-precision current transformers and do not take into account the influence of grid parameter imbalances, increasing the risk of protection misjudgment. To address the issues, this paper first explores the relationship between the changes in electrical signals and line-to-ground parameters and unbalanced current before and after the introduction of a small parallel resistance, taking into account the unbalanced conditions of grid parameters. The research finds that the ratio of zero sequence current change and zero sequence voltage change of a healthy line is equal to the line-to-ground admittance, and the ratio of the change of the fault line is the sum of line-to-ground admittance and grounding admittance. On this basis, a method of line selection applicable to single-phase high-resistance ground faults in flexible grounding systems is proposed. This method is not affected by the unbalance of grid parameters and the zero sequence CT polarity reversal, effectively reducing the precision requirements of current transformers. In addition, the method can also utilize the fault information to measure transition resistance and the ground admittance of individual lines under unbalanced grid parameters. Finally, the correctness and effectiveness of the described method are verified in the simulation circuit model.

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

Key words: flexible grounding system; unbalanced power grid parameters; zero sequence voltage variation; zero sequence current variation; high resistance ground fault

0 引言

配电网中性点接地方式的选择以及伴随而来的单相高阻接地故障保护问题, 一直是中压配电领域的研究热点^[1-2]。当前, 我国配电网中绝大多数中性

点仍采用不接地或是谐振接地^[3]。近些年也有部分地区相继完成了由谐振接地到中性点经小电阻接地的改造工作^[4-5]。但无论谐振接地或是经小电阻接地, 总存在一些难以妥善解决的问题, 例如谐振接地有着良好的熄弧能力与较强的供电可靠性, 但也存在故障后过电压水平高、选线困难的问题; 小电阻接地系统能够有效抑制故障过电压且在低阻值故

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52077215)

障时选线能力强,但也存在无法区分瞬时性接地故障与永久性接地故障、供电可靠性低的问题。

为解决上述问题,一种结合了谐振接地与小电阻接地方式优点、并克服了相应缺点的新型接地方式(灵活接地方式)近些年被广泛讨论,目前已在部分地区推广使用^[6-7]。灵活接地系统的初衷是正常运行和瞬时接地故障时投入消弧线圈,实现对瞬时性接地故障熄弧;短暂延时后若故障仍然存在,则判定故障类型为永久性接地故障并投入并联小电阻,增大故障线路电流,使其满足零序过电流保护的動作条件^[8]。但根据文献^[7]的记录,我国某地几处采用灵活接地方式的变电站,保护动作率仅为 25.94%,零序过电流保护的保護效果未能达到预期。因此,随着灵活接地系统的推广,亟需开展灵活接地系统高阻接地故障保护相关研究。

为此,众多研究人员分别从稳态特征^[9-12]、暂态特征^[13]、电流行波^[14]等角度对灵活接地系统进行了深入研究。其中,文献^[9]分析了各电气量的幅值、相位特征及其在不同阶段内的变化规律,并阐述了零序过电流保护效果不如预期的原因。文献^[10]分析了并联小电阻投入前后各线路零序测量导纳模值的比值,提出了将零序测量导纳模值比大于阈值的线路判定为故障线路的选线方法,该方法克服了传统零序导纳法易受线路结构或参数变动影响的弊端,但未能从原理上消除电网参数不平衡对判据的影响。文献^[11]分析了并联小电阻投入前后各线路零序电流相位与零序电压相位差的变化量,提出以相位差变化量为判据,将相位差变化量在 $(135^\circ, 318.47^\circ)$ 的线路判定为故障线路,理论上能够将保护的耐过渡电阻能力提升至 3 k Ω ,但该方法一方面易受电网参数不平衡的影响,另一方面互感器误差与极性反接也可能导致保护误判。文献^[13]构建了各电气信号量在低频段的暂态数学模型,所提保护方法具有耐过渡电阻能力强、对互感器检测精度要求低等优点。文献^[14]通过检测并联小电阻投入后产生的电流行波可实现快速选线,且在选线的同时还可实现故障测距,但当过渡电阻阻值较大时,配电自动化馈线终端(the feeder terminal unit, FTU)可能难以检测到反射行波,导致选线失败。

上述基于稳态特征构成的选线方法虽然在理论上均可大幅度提高保护的耐过渡电阻能力,但可靠性均依赖于能否精确获取并联小电阻投入后各线路零序电流与系统零序电压,且均未考虑到电网参数不平衡对判据的影响。高阻接地故障时投入并联小电阻,将使得系统零序电压与健全线路零序电流急剧下降,难以达到零序 TV 与零序 CT 的最小精确

工作电压、电流要求,测量值与实际值可能存在较大误差。此外,由于不平衡电流不受系统零序电压下降的影响,仅与三相参数的不对称程度有关,因而不平衡电流也将极大地影响健全线路零序电流的幅值与相位特征,进而引起保护误判。

为解决上述问题,本文在计及电网参数不平衡的条件下提出了一种适用于灵活接地系统的单相高阻接地故障选线方法。该方法不受电网参数不平衡与零序 CT 极性反接的影响,能够将保护的耐过渡电阻能力提升至 4500 Ω 以上,且当线路绝缘良好时,耐过渡电阻能力还可进一步提升。此外,所提方法还可以实现电网参数不平衡条件下单条线路对地导纳与过渡电阻的测量。最后,给出了所提方法与零序过电流保护的配合方案,并通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了所述理论的正确性和有效性。

1 系统等效模型与零序电压分析

1.1 灵活接地系统等效模型搭建

研究配电网单相接地故障的稳态故障特征时,线路电阻与感抗远远小于线路容抗,故可以忽略线路电阻与电感,并且考虑到线路对地泄露电导的存在以及电网受线路架设方式、非全相供电等因素的影响^[15-16],三相参数不对称情况时有发生,因此可以将系统简化为如图 1 所示的计及电网参数不平衡的灵活接地系统集中参数等效模型。故障发生前,灵活接地系统中性点接地方式为谐振接地,故障发生后,系统进入消弧线圈补偿阶段,一定时延后开关 S 闭合,投入并联小电阻,系统由消弧线圈补偿阶段转变为消弧线圈与小电阻并联运行阶段。

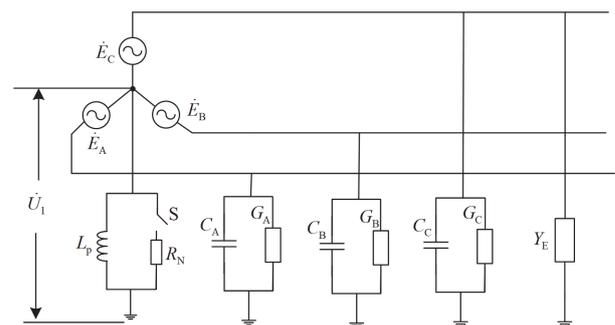


图 1 灵活接地系统集中参数等效模型

Fig. 1 Equivalent model of flexible grounding system with concentrated parameters

图 1 中, G_A 、 G_B 、 G_C 和 C_A 、 C_B 、 C_C 分别为 A、B、C 相对地泄露电导之和与分布电容之和,一般情况下总有 $G_A = G_B = G_C$ ^[1]。以 A 相为例,若某一电网存在 m 条线路,则有 $C_A = C_{A1} + C_{A2} + \dots +$

C_{Am} , $G_A = G_{A1} + G_{A2} + \dots + G_{Am}$ 。 \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 分别为 A、B、C 相电源电势, \dot{U}_1 为中性点对地电压即系统零序电压, L_p 、 R_N 分别为消弧线圈电感与并联小电阻, R_N 通常取 10Ω , Y_E 为接地导纳。其中, L_p 与三相分布电容满足 $1/(\omega L_p) = (1-\nu)\omega(C_A + C_B + C_C)$, ω 为工频角频率, ν 为系统脱谐度, 通常在 $-10\% \sim -5\%$ 。

1.2 不同运行状态下系统零序电压分析

若电网处于正常运行状态($Y_E = 0$), 且并联小电阻未投入系统(开关 S 打开), 以大地为节点列写 KCL 方程, 如式(1)所示。

$$\dot{U}_1 \dot{Y}_0 + (\dot{U}_1 + \dot{E}_A) \dot{Y}_A + (\dot{U}_1 + \dot{E}_B) \dot{Y}_B + (\dot{U}_1 + \dot{E}_C) \dot{Y}_C = 0 \quad (1)$$

整理后得系统零序电压 \dot{U}_1 , 如式(2)所示。

$$\dot{U}_1 = -\frac{\dot{E}_A \dot{K}_\Sigma}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0} = -\frac{\dot{E}_A \dot{K}_\Sigma}{\dot{Y}_\Sigma + \dot{Y}_0} \quad (2)$$

式中: $\dot{Y}_0 = 1/(j\omega L_p)$, $\dot{Y}_A = G_A + j\omega C_A$, $\dot{Y}_B = G_B + j\omega C_B$, $\dot{Y}_C = G_C + j\omega C_C$; \dot{K}_Σ 为电网三相参数不对称矢量和, $\dot{K}_\Sigma = \dot{Y}_A + \alpha^2 \dot{Y}_B + \alpha \dot{Y}_C$, $\alpha = e^{j120^\circ}$; \dot{Y}_Σ 为电网三相总导纳参数, $\dot{Y}_\Sigma = \dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C$ 。

当前, 已有众多成熟方法可实现对 \dot{Y}_Σ 的精确测量^[17-18], 因而在现场操作中仅需要获取系统零序电压, 即可实现不对称参数 \dot{K}_Σ 的测量。

同样, 若电网中某一线路的 δ ($\delta = A、B、C$) 相发生接地导纳为 Y_E 的单相接地故障, 则消弧线圈补偿阶段以及消弧线圈与小电阻并联运行阶段系统零序电压 \dot{U}_2 、 \dot{U}_3 分别如式(3)、式(4)所示。

$$\dot{U}_2 = -\frac{\dot{E}_A \dot{K}_\Sigma + \dot{E}_\delta Y_E}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0 + Y_E} \quad (3)$$

$$\dot{U}_3 = -\frac{\dot{E}_A \dot{K}_\Sigma + \dot{E}_\delta Y_E}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_1 + Y_E} \quad (4)$$

式中, $\dot{Y}_1 = \dot{Y}_0 + 1/R_N$ 。

式(3)除以式(4)消除故障相的影响, 整理后可得

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_3} = \frac{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_1 + Y_E}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_0 + Y_E} \quad (5)$$

式(5)进一步整理后, 可得式(6)。

$$Y_E = \frac{1}{R_N} \frac{\dot{U}_3}{\dot{U}_2 - \dot{U}_3} - \dot{Y}_0 - \dot{Y}_\Sigma \quad (6)$$

由式(6)可知, 在故障发生后, 仅需测量并联小电阻投入前后系统零序电压, 而无需逐一测量各馈线的零序电流, 即可准确获取接地导纳的数值, 大

大简化了测量步骤。

2 故障选线方法

2.1 健全线路与故障线路零序测量导纳分析

鉴于目前对电网总的对地导纳的测量技术已经十分成熟, 但对单条线路对地导纳的测量研究较少。本节在分析健全线路与故障线路零序测量导纳的同时, 给出一种利用并联小电阻投入前后各电气信号变化量实现对单条线路对地导纳测量的新方法。

图 2 为灵活接地系统单相接地故障等效电路。其中, R_{Ai} 、 R_{Bi} 、 R_{Ci} ($R_{Ai} = R_{Bi} = R_{Ci}$) 和 C_{Ai} 、 C_{Bi} 、 C_{Ci} 分别为第 i 条线路 A、B、C 相绝缘电阻与分布电容; \dot{I}_{0i} 为第 i 条线路零序电流; R_f 为过渡电阻, $R_f = 1/Y_E$ 。为便于区分不同阶段各线路零序电流, 规定 \dot{I}_{02i} 、 \dot{I}_{03i} 分别表示并联小电阻投入前与投入后第 i 条线路零序电流。

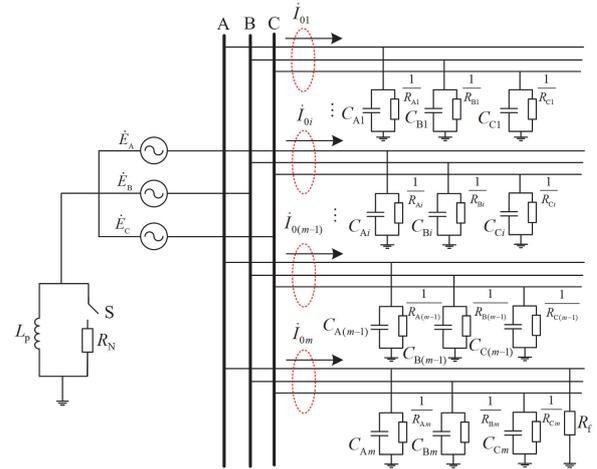


图 2 灵活接地系统单相接地故障等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of single-phase grounding fault in flexible grounding system

定义第 k 条线路的零序测量导纳为 \dot{Y}'_k , 如式(7)所示。

$$\dot{Y}'_k = \frac{\Delta \dot{I}_{0k}}{\Delta \dot{U}_0} \quad (7)$$

式中: $\Delta \dot{I}_{0k}$ 为第 k 条线路零序电流变化量; $\Delta \dot{U}_0$ 为系统零序电压变化量。

假定第 j 条线路的 δ ($\delta = A、B、C$) 相发生接地导纳为 Y_E 的单相接地故障。当电网处于消弧线圈补偿阶段时, 则对任一健全线路 i , 该线路零序电流如式(8)所示。

$$\dot{I}_{02i} = (\dot{U}_2 + \dot{E}_A) \dot{Y}_{Ai} + (\dot{U}_2 + \dot{E}_B) \dot{Y}_{Bi} + (\dot{U}_2 + \dot{E}_C) \dot{Y}_{Ci} = \dot{U}_2 \dot{Y}_i + \dot{I}_{bdi} \quad (8)$$

式中: $\dot{Y}_{Ai} = G_{Ai} + j\omega C_{Ai}$ 、 $\dot{Y}_{Bi} = G_{Bi} + j\omega C_{Bi}$ 、 $\dot{Y}_{Ci} = G_{Ci} + j\omega C_{Ci}$ 、 $G_{Ai} = 1/R_{Ai}$ 、 $G_{Bi} = 1/R_{Bi}$ 、 $G_{Ci} = 1/R_{Ci}$; \dot{Y}_i 为第 i 条线路的对地导纳, $\dot{Y}_i = \dot{Y}_{Ai} + \dot{Y}_{Bi} + \dot{Y}_{Ci}$; \dot{I}_{bdi} 为第 i 条线路的不平衡电流, $\dot{I}_{bdi} = \dot{E}_A \dot{Y}_{Ai} + \dot{E}_B \dot{Y}_{Bi} + \dot{E}_C \dot{Y}_{Ci}$ 。

由式(8)可知, 受不平衡电流影响, 任一线路的零序导纳并非简单地等于该线路零序电流与零序电压比值, 且不平衡电流的大小仅与该线路三相参数不对称程度有关, 与系统零序电压无关。

同理可得并联小电阻投入后健全线路 i 的零序电流 \dot{I}_{03i} , 如式(9)所示。

$$\begin{aligned} \dot{I}_{03i} &= (\dot{U}_3 + \dot{E}_A) \dot{Y}_{Ai} + (\dot{U}_3 + \dot{E}_B) \dot{Y}_{Bi} + \\ &(\dot{U}_3 + \dot{E}_C) \dot{Y}_{Ci} = \dot{U}_3 \dot{Y}_i + \dot{I}_{bdi} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)减去式(8), 消除不平衡电流的影响, 整理后可得系统零序电压变化量与零序电流变化量的关系式, 如式(10)所示。

$$\Delta \dot{I}_{0i} = \Delta \dot{U}_0 \dot{Y}_i \quad (10)$$

式(10)整理后可得第 i 条线路零序测量导纳 \dot{Y}'_i , 如式(11)所示。

$$\dot{Y}'_i = \dot{Y}_i = G_i + j\omega C_i = \frac{\Delta \dot{I}_{0i}}{\Delta \dot{U}_0} \quad (11)$$

由式(11)可知, 健全线路的零序测量导纳等于该线路对地导纳。

同样地, 当电网处于消弧线圈补偿阶段时, 故障线路 j 的零序电流如式(12)所示。

$$\begin{aligned} \dot{I}_{02j} &= (\dot{U}_2 + \dot{E}_A) \dot{Y}_{Aj} + (\dot{U}_2 + \dot{E}_B) \dot{Y}_{Bj} + \\ &(\dot{U}_2 + \dot{E}_C) \dot{Y}_{Cj} + (\dot{U}_2 + \dot{E}_\delta) Y_E = \\ &\dot{U}_2 (\dot{Y}_j + Y_E) + \dot{E}_\delta Y_E + \dot{I}_{bdj} \end{aligned} \quad (12)$$

并联小电阻投入后, 故障线路 j 的零序电流 \dot{I}_{03j} 如式(13)所示。

$$\begin{aligned} \dot{I}_{03j} &= (\dot{U}_3 + \dot{E}_A) \dot{Y}_{Aj} + (\dot{U}_3 + \dot{E}_B) \dot{Y}_{Bj} + \\ &(\dot{U}_3 + \dot{E}_C) \dot{Y}_{Cj} + (\dot{U}_3 + \dot{E}_\delta) Y_E = \\ &\dot{U}_3 (\dot{Y}_j + Y_E) + \dot{E}_\delta Y_E + \dot{I}_{bdj} \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)减去式(12), 消除不平衡电流与故障相的影响, 整理后得到故障线路零序测量导纳 \dot{Y}'_j , 如式(14)所示。

$$\dot{Y}'_j = \dot{Y}_j + Y_E = \frac{\Delta \dot{I}_{0j}}{\Delta \dot{U}_0} \quad (14)$$

由式(14)可知, 不同于健全线路, 故障线路零序测量导纳由该线路的对地导纳 \dot{Y}_j 与接地导纳 Y_E 共同构成。

对比分析式(11)与式(14)可知, 对任意一条线路而言, 其零序测量导纳本质上反映的是该线路整体的对地参数。若该线路处于正常状态, 零序测量导纳等同于该线路的对地导纳, 因此可通过测量健全线路的零序测量导纳, 获取该线路对地参数; 然而, 一旦发生故障, 零序测量导纳的性质便发生显著变化, 此时零序测量导纳不再仅仅表示线路的对地导纳, 而是转变为线路对地导纳与接地导纳的叠加。

2.2 故障选线方法

由 2.1 节分析可知, 故障线路的零序测量导纳受接地导纳影响, 将不再与该线路对地导纳相等。基于该思路, 本节提出了一种适用于灵活接地系统的单相高阻接地故障选线方法。该方法能够解决现有研究方法在电网不平衡条件下面对高阻接地故障易误判的难题。

在 10 kV 配电网中, 若不考虑极限工况, 单条线路电容电流一般不超过 22.6 A^[10], 线路绝缘良好情况下阻尼率范围为 1.5%~2%, 绝缘老化的电缆线路或者污垢严重的架空线路阻尼率可达 5%^[1,15]。式(15)为任一线路的对地导纳与阻尼率的关系, 单条线路绝缘电阻理论最小值与最大值分别如式(16)和式(17)所示。

$$\dot{Y} = G + jB = (d_0 + j)B \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \min(R) &= \frac{1}{\max(d_0) \max(B)} = \\ &\frac{1}{0.05 \times 22.6 / 5774} = 5109.73 \Omega \end{aligned} \quad (16)$$

$$\max(R) = \frac{1}{\min(d_0) \min(B)} = \frac{1}{0.015 \times 0} \times 10^3 = \infty \quad (17)$$

式中: G 为线路泄露电导; d_0 为线路阻尼率; B 为线路电纳, $B = \omega C$ 。

结合式(11)和式(14)可知, 对于健全线路 i 与故障线路 j , 其零序测量电阻 R'_i 、 R'_j 分别满足式(18)和式(19)。

$$R'_i = R_{Ai} // R_{Bi} // R_{Ci} = \frac{1}{\text{Real}(\dot{Y}'_i)} \gg 5109.73 \Omega \quad (18)$$

$$R'_j = R_{Aj} // R_{Bj} // R_{Cj} // R_f = \frac{1}{\text{Real}(\dot{Y}'_j)} \leq \quad (19)$$

$$\max(R_j) // R_f \approx R_f$$

式中, $\text{Real}(\cdot)$ 表示取复数的实部。

由上述分析可知, 健全线路零序测量电阻远大于 5109.73 Ω , 而故障线路零序测量电阻受过渡电阻影响小于等于 R_f 。若通过并联小电阻投入前后各电气信号的变化量计算零序测量导纳, 进而获取各馈

线零序测量电阻, 将低于阈值的线路判定为故障线路, 该阈值理论最大值为 5109.73Ω , 但考虑到互感器误差以及线路电阻与电感对计算结果的影响, 因此保留一定裕度, 将阈值设定为 4500Ω 。当线路绝缘良好时, 可适当调高阈值, 保护的耐过渡电阻能力还可进一步提升。

进一步地, 为避免现场零序 CT 极性反接导致保护误动作, 将零序测量电阻计算公式修改为式(20)。

$$R'_k = \left| 1/\text{Real} \left(\frac{\Delta \dot{I}_{0k}}{\Delta \dot{U}_0} \right) \right| \quad (20)$$

上述选线方法与零序导纳法^[10,19]相似, 与之不同的是, 本文提出的选线方法不受不平衡电流的影响。零序导纳法认为健全线路的零序电流与零序电压之比等于该线路的对地导纳, 故障线路的零序电流与零序电压之比则为中性点对地导纳与健全线路零序导纳之和的负数。该方法事实上是忽略了不平衡电流的影响, 对于低阻值接地故障, 忽略不平衡电流影响不大, 而在面对高阻接地故障时, 并联小电阻的投入将导致系统零序电压与健全线路零序电压急剧下降^[12-13], 甚至极端工况下故障线路的零序电流也将下降^[7], 此时不平衡电流对零序测量导纳的影响已不容忽视, 零序电流与零序电压之比与该线路对地导纳相差甚大, 易致使保护误判^[20-21](详细分析与仿真对比可见 4.6 节)。而本文通过结合灵活接地系统的特点, 采用零序电流变化量与零序电压变化量计算零序测量导纳, 在原理上消除了不平衡电流的影响, 因而当电网不对称度较大时, 仍可保持选线结果的准确性。

3 故障选线方法适应性分析

3.1 零序电压适应性分析

3.1.1 消弧线圈补偿阶段

消弧线圈补偿阶段系统等效阻抗为消弧线圈电感与系统总分布电容的并联(为便于分析, 忽略线路绝缘电阻的影响), 故系统等效阻抗 \dot{Z}_{eq} 可表示为

$$\dot{Z}_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_p} + j\omega(C_A + C_B + C_C)} = j \frac{(v-1)\omega L_p}{v} \quad (21)$$

我国配电网对地电容电流一般不大于 200 A ^[22], 因此消弧线圈电感 L_p 不小于 0.0835 H , 由此可得系统等效阻抗的最小值为 $Z_{\text{eq.min}} = 288 \Omega$ 。

依据分压定理可得灵活接地系统发生 4500Ω 单相高阻接地时, 系统零序电压 U_2 满足式(22)。

$$U_2 \geq \frac{Z_{\text{eq.min}}}{R_f + Z_{\text{eq.min}}} U_m = \frac{288 \times 10 / \sqrt{3}}{4500 + 288} \times 10^3 = 347 \text{ V} \quad (22)$$

式中, U_m 为故障点电压的有效值。

由式(22)可知, 消弧线圈补偿阶段系统最小零序电压仍大于零序 PT 最小精确电压 120 V ^[23], 满足零序 PT 测量要求。

3.1.2 消弧线圈与小电阻并联运行阶段

系统发生单相高阻接地故障时, 并联小电阻投入后, 零序电压下降幅度可达 95% 以上^[24], 系统零序电压可能低于零序 TV 最小精确电压, 导致无法获取零序电压的精准值, 存在选线失败的风险。因此, 可在系统零序电压低于 120 V 工况下, 采用间接法获取系统零序电压 \dot{U}_3 。

并联小电阻投入后, 并联小电阻的电压与系统零序电压相等, 即

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_{R_N} = R_N \dot{I}_{R_N} \quad (23)$$

式中: \dot{U}_{R_N} 为并联小电阻的电压; \dot{I}_{R_N} 为流过并联小电阻的电流。

3.2 零序电流适应性分析

3.2.1 消弧线圈补偿阶段

“国家电网公司配电设备一二次融合技术方案”指出 10 kV 配电系统零序 CT 准确级为 $5P10$ 级, 最小精确工作电流为 1 A ^[10,12]。

1) 健全线路: 由上述分析可知, 当系统发生高阻接地故障时, 零序电压始终处于较高的水平, 但健全线路零序电流不仅与零序电压有关, 还与线路对地导纳有关。当线路对地导纳较小时, 即线路长度较短时, 其测量值与实际值可能存在较大误差。

2) 故障线路: 故障线路零序电流与其对地导纳(即线路长度)、消弧线圈的补偿程度及系统总的对地电容电流有关。对于较长线路一般均易满足零序 CT 测量精度要求。对于较短的线路, 若系统总的对地电容电流越大, 则其零序电流水平越高, 越易满足零序 CT 测量精度要求; 但当系统总的对地电容电流较小时, 高阻接地故障下故障线路零序电流的测量值同样可能存在误差, 影响选线结果的准确性。

3.2.2 消弧线圈与小电阻并联运行阶段

1) 健全线路: 高阻接地故障时投入并联小电阻, 健全线路的零序电流将急剧下降, 下降百分比与零序电压一致。此时零序 CT 测得的 $I_{03i} \ll 1 \text{ A}$, 测量值与实际值存在较大误差, 但考虑到 $I_{02i} \gg I_{03i}$, 因此 I_{03i} 的测量误差仅对零序测量电阻的计算数值产生影响, 仍可满足 $R'_k \gg 4500 \Omega$ 。相较于现有研究方法, 本文提出的选线方法在 I_{03i} 误差较大的工况下仍然有效, 对零序 CT 精度要求低。特别地, 由上述分析可知, 2.1 节中所述单条线路对地导纳测量方法仅适用于较低阻值的接地故障。

2) 故障线路: 当 10 kV 灵活接地系统发生 4500 Ω 单相高阻接地时, 不计线路对地导纳与消弧线圈电感(由于消弧线圈的过补偿度较小, 因而消弧线圈电感与线路对地导纳的并联阻抗远远大于小电阻的阻值), 可近似得到并联小电阻投入后故障线路零序电流满足式(24)。

$$I_{0j} \geq \frac{U_m}{R_f + R_N} = \frac{10/\sqrt{3}}{4500 + 10} \times 10^3 = 1.28 \text{ A} \quad (24)$$

由式(24)可知, $I_{0j} > 1 \text{ A}$, 故障线路零序电流满足零序 CT 最小精确工作电流要求。

综上所述, 尽管本文所提方法克服了不平衡电流的影响, 有利于提升保护的耐过渡电阻能力, 但考虑到消弧线圈补偿阶段各线路零序电流水平受多重因素影响, 可能低于零序 CT 测量精度的要求, 导致方法的适用性下降。这也是采用稳态工频量原理保护普遍存在的问题, 目前尚未有妥善的解决方案^[9-12,23]。因此, 如何结合灵活接地系统的特点解决这一问题, 将是下一步重点研究的方向。

3.3 故障检测控制方案

本文所述方法与零序过电流保护的配合控制方案具体如下所述。

步骤 1: 谐振接地状态下感知故障, 若满足故障启动条件, 进入步骤 2;

步骤 2: 闭锁零序过电流保护, 记录系统零序电压与各条线路零序电流, 延时 1 s 若故障消失返回步骤 1, 反之投入并联小电阻, 进入步骤 3;

步骤 3: 记录系统零序电压与各条线路零序电流, 若某一线路满足零序过电流保护动作阈值, 切除该线路, 否则进入步骤 4;

步骤 4: 根据记录数据依次计算零序测量电阻、过渡电阻, 切除 $R' < 4500 \Omega$ 的线路。

需要说明的是, 步骤 2 中闭锁零序过电流保护的目的是: 给予消弧线圈一定时长对故障电流进行补偿, 防止零序过电流保护提前动作, 导致系统将可安全消弧的瞬时性接地故障提前切除。

4 仿真验证

4.1 仿真模型搭建

采用 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型, 验证本文所提选线方法的有效性。搭建如图 3 所示辐射状灵活接地系统仿真模型, 具体参数设置见表 1, 并联小电阻为 10 Ω, 系统脱谐度为-8%, L_p 为 0.5208 H, 采样频率为 10 kHz, 故障时刻为 0.5 s, 故障发生后延迟 1 s 在下一个系统零序电压过零点投入并联小电阻。

4.2 弧光高阻模型的选择

现实中, 导线坠地、碰树等情形易产生具有随

机性的电弧, 其过渡电阻并非恒电阻元件, 忽视其中的非线性成分可能导致选线失败。因此, 本文选取文献[22,24-25]所采用的经典 Emanuel 电弧模型模拟弧光高阻接地故障的过渡电阻, 该模型由两个二极管(D_p 、 D_n)、两个电压源(V_p 、 V_n)及两个电阻(R_p 、 R_n)组成, 电弧模型结构见图 4, 相关参数见表 2。

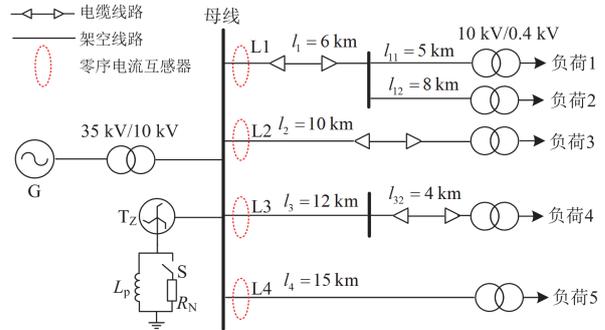


图 3 仿真拓扑图

Fig. 3 Simulation topology diagram

表 1 不平衡电网仿真参数设置

Table 1 Unbalanced grid simulation parameter settings

项目	线路 L1	线路 L2	线路 L3	线路 L4	
分布电容/ μF	A 相	1.7901	2.8395	1.2503	0.1300
	B 相	1.8051	2.8294	1.2363	0.1280
	C 相	1.8051	2.8198	1.2440	0.1250
分布电阻/ Ω	A 相	101 094	61 899	166 524	1 362 567
	B 相	101 094	61 899	166 524	1 362 567
	C 相	101 094	61 899	166 524	1 362 567
阻尼率/%	1.7459	1.8173	1.5371	1.8300	
不对称度/%	0.4059	0.2023	0.3242	1.1410	

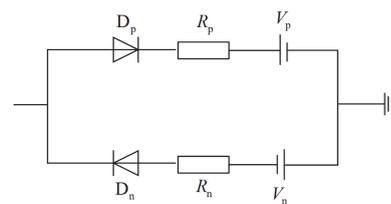


图 4 Emanuel 电弧模型

Fig. 4 Emanuel arc model

表 2 Emanuel 电弧模型参数

Table 2 Emanuel arc model parameters

编号	V_p /kV	V_n /kV	R_p / Ω	R_n / Ω
案例 1	3.8	3.6	400	350
案例 2	2.2	2.0	800	750
案例 3	1.2	1.0	1200	1100
案例 4	0.9	0.8	2550	2350
案例 5	0.6	0.5	4050	3800

图 5 和图 6 分别为线路 L4 发生弧光高阻接地故障与恒电阻高阻接地故障时各线路零序电流波形图, 为便于展示, 仅对健全线路的零序电流波形进行了局部放大; 图 7 为不同故障类型下零序电压波形变化图, 电弧模型参数同案例 4, 恒电阻模型的过渡电阻为 2550 Ω。

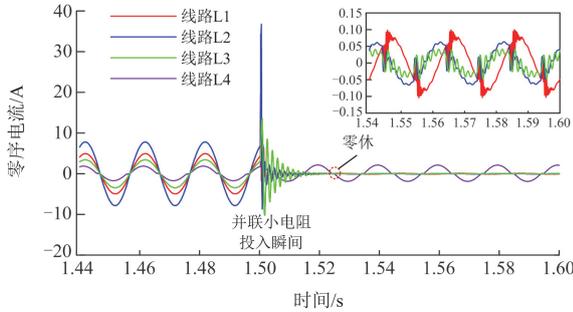


图 5 弧光高阻接地故障时各线路零序电流波形图

Fig. 5 Waveform of zero sequence current of each line during arc high resistance grounding fault

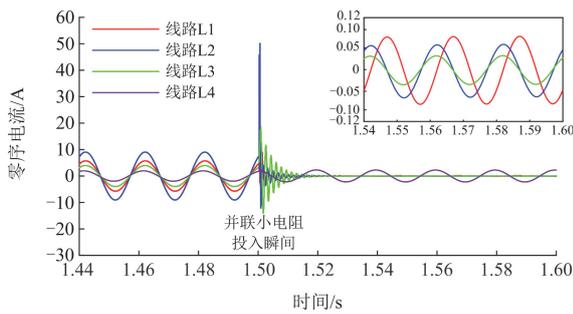


图 6 恒电阻高阻接地故障时各线路零序电流波形图

Fig. 6 Zero sequence current waveform of each line during a constant resistance high resistance grounding fault

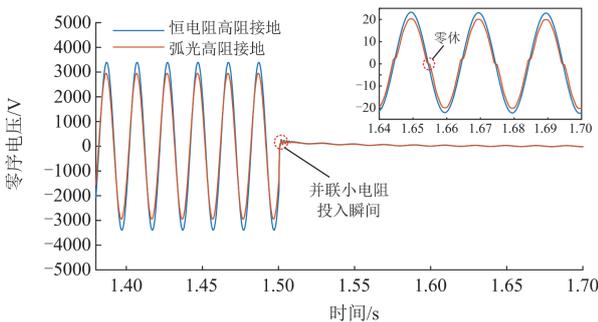


图 7 不同故障类型下系统零序电压波形图

Fig. 7 Zero sequence voltage waveform of the system under different fault types

观察图 5 可以发现, Emanuel 电弧模型能够很好地模拟电弧的随机性和动态特性, 并且能够观测到一定的“零休”现象。结合图 5、图 6 可以发现,

并联小电阻投入后, 健全线路零序电流急剧下降, 稳态幅值远小于 $\sqrt{2} A$, 对零序电流互感器的测量精度提出了更高的要求, 同时也证实了 3.2.2 节中有关零序 CT 误差对选线结果影响的分析; 故障线路零序电流的稳态幅值上升幅度不明显, 并联小电阻的投入并未使得故障线路零序电流达到零序过电流保护动作阈值。由此可见, 灵活接地系统以牺牲部分对高阻接地故障检测的可靠性, 换取了零序过电流保护耐过渡电阻能力的提升, 但在较为极端的情况下提升幅度有限。

4.3 过渡电阻阻值测试

通过对比过渡电阻设置值与计算值, 验证本文所述方法的准确性。分别在线路 L2 设置不同阻值的单相接地故障, 记录并联小电阻投入前后系统零序电压, 代入式(6)求解接地导纳, 进而获取过渡电阻的阻值, 具体仿真测试结果可见表 3。

表 3 过渡电阻仿真测试结果

过渡电阻设置值/Ω	仿真计算值/Ω	误差/%
150	154	2.667
500	508	1.600
1000	1017	1.700
3000	3007	0.233
4500	4496	-0.089

由表 3 结果可以看出, 本文提出的过渡电阻计算方法在不同阻值的接地故障时, 均具有较高的准确度, 能够应用于实际工程。

4.4 高阻故障选线仿真

为充分验证所提方法在面对高阻接地故障时的有效性, 分别在线路 L1 的 A 相设置恒电阻高阻接地故障与弧光高阻接地故障, 并记录并联小电阻投入前后系统零序电压与各线路零序电流, 代入式(20)计算各线路的零序测量电阻, 将零序测量电阻小于 4500 Ω 的线路判断为故障线路, 具体仿真计算结果可见表 4 和表 5。

表 4 恒电阻高阻接地故障下各条线路零序测量电阻

Table 4 Zero sequence measurement resistance of each feeder line under constant resistance high resistance grounding fault

过渡电阻/Ω	各线路零序测量电阻/Ω				选线结果
	线路 L1	线路 L2	线路 L3	线路 L4	
150	149	20 508	54 306	447 009	L1
500	492	20 226	55 408	459 779	L1
1000	971	21 929	53 668	461 674	L1
3000	2751	20 262	52 597	412 490	L1
4500	3978	21 029	53 170	423 085	L1

表 5 弧光高阻接地故障下各条线路零序测量电阻

Table 5 Zero sequence measurement resistance of each feeder line under arc high resistance grounding fault

模型	各线路零序测量电阻/ Ω				选线结果
	线路 L1	线路 L2	线路 L3	线路 L4	
案例 1	772	20 939	55 790	451 386	L1
案例 2	1086	21 284	57 254	443 035	L1
案例 3	1303	21 367	57 630	450 604	L1
案例 4	2558	22 411	59 109	467 697	L1
案例 5	3726	21 150	53 682	482 289	L1

表 4 和表 5 中数据证实了本文所提选线方法在不同工况下均可准确选出故障线路，且故障线路与健全线路判据辨识度高。值得注意的是，在本文所述所有实验中，无论采用何种模型模拟高阻接地故障，波形中总含有一定量谐波。因此，需对参与计算的数据预先进行 FFT 变换，获取原始波形中的基波数据，进而计算各线路零序测量电阻，最终实现故障选线。此外，经过大量实验验证了本文所述选线方法不受零序 CT 极性反接的影响。

4.5 母线故障

在母线处设置不同类型的高阻接地故障，以检验所提方法在母线故障时的可靠性，结果见表 6。

表 6 母线故障时各条线路零序测量电阻

Table 6 Zero sequence measurement resistance of each line during bus fault

故障方案	各线路零序测量电阻/ Ω				选线结果
	线路 L1	线路 L2	线路 L3	线路 L4	
3000 Ω	32 055	20 262	52 597	423 521	不动作
4500 Ω	32 962	23 307	53 169	463 356	不动作
同案例 4	33 886	22 411	56 381	467 697	不动作
同案例 5	32 548	21 150	53 682	433 803	不动作

从表 6 中可以看出，本文所提方法在母线故障工况下能够可靠不动作，具有较高的可靠性。

4.6 与现有选线方法比较

为进一步验证本文所述方法的优点，将本文方法与文献[10]、文献[11]进行比较。故障仿真参数如表 7 所示，详细比较结果见表 8—表 10。

对比表 8—表 10 可以看出，本文所述方法在不同复杂工况下仍能保持良好的选线性能，而文献[10]所述改进零序导纳法与文献[11]所述相位差变化法在过渡电阻大于 1 k Ω 后多次将架空线路 L4 误判为故障线路。究其原因，高阻接地故障时并联小电阻的投入导致系统零序电压急剧下降，进而引起健全线路零序电流骤降，而不平衡电流不受系统零序电压下降的影响，故不平衡电流将严重影响健全线路零序电流的幅值与相位特征。特别地，由于架

空线路 L4 本身对地电容较小，因而不平衡电流对其影响尤为严重。因此，在研究灵活接地系统高阻接地故障保护时，不宜采用单一的相位/幅值特征构成判据，并且在整定阈值时需综合考量不平衡电流与互感器误差对判据的影响。

表 7 故障仿真参数

Table 7 Fault simulation parameters

NO.	类型	参数	故障线路	故障相
1	恒电阻	1000 Ω	L3	A
2	恒电阻	3000 Ω	L2	B
3	弧光接地	同案例 3	L3	A
4	弧光接地	同案例 5	L2	B

表 8 文献[10]选线结果

Table 8 Results of line selection in Reference [10]

NO.	$T_{set} = 3.92$	选线结果	正确与否
1	[1.41 0.85 61.53 2.07]	L3	正确
2	[2.18 31.97 3.62 5.24]	L2、L4	错误
3	[2.05 0.769 61.55 2.56]	L3	正确
4	[1.99 32.39 1.60 6.47]	L2、L4	错误

注： T_{set} 为文献[10]定义的零序测量导纳模值之比，详细计算方法与说明可见文献[10]。

表 9 文献[11]选线结果

Table 9 Results of line selection in Reference [11]

NO.	$(\theta_{I_{0m}} - \theta'_{I_{0m}})/(^{\circ})$	选线结果	正确与否
1	[14.4 10.7 -86.2 80.1]	L3	正确
2	[-15.0 -87.7 42.8 141.6]	L2、L4	错误
3	[18.4 19.7 -86.4 97.2]	L3	正确
4	[62.3 -87.2 -41.3 -82.9]	L2、L4	错误

注： $\theta_{I_{0m}}$ 、 $\theta'_{I_{0m}}$ 分别为并联小电阻投入前后零序电流与零序电压的相位差。

表 10 本文方法选线结果

Table 10 Line selection results of the proposed method

NO.	各线路零序测量电阻/ Ω				选线结果
	线路 L1	线路 L2	线路 L3	线路 L4	
1	32 911	20 345	975	452 867	L3
2	32 055	2613	51 865	423 521	L2
3	34 153	20 319	1365	440 954	L3
4	34 255	3541	57 578	448 983	L2

5 结论

在计及电网参数不平衡条件下，针对现有研究方法的不足，本文提出了一种适用于灵活接地系统单相高阻接地故障的选线方法，具体如下所述。

1) 所提方法利用零序电流变化量与零序电压变化量计算零序测量导纳，消除了电网参数不平衡对判据的影响。

2) 所提方法不仅不受零序 CT 极性反接的影

响, 还可利用故障信息实现电网参数不平衡条件下单条线路对地导纳及故障点接地导纳的测量, 原理简单有效, 可操作性强。

3) 大量仿真实验表明, 所提方法能够将保护的耐过渡电阻能力可靠提升至 $4500\ \Omega$, 并且当线路绝缘良好时, 保护的耐过渡电阻能力还可进一步提升。

参考文献

- [1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [2] 曾超, 喻锟, 曾祥君, 等. 并阻尼谐振接地系统对地参数测量与高阻故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 67-76.
ZENG Chao, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. A new method for measuring ground parameters and selecting high resistance fault lines in parallel damping resonant grounding systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 67-76.
- [3] 张玉玺, 王增平, 李振钊, 等. 基于特征频带暂态无功功率的配电网故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 1-11.
ZHANG Yuxi, WANG Zengping, LI Zhenzhao, et al. A new method of fault line selection in a distribution network based on characteristic frequency band transient reactive power[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 1-11.
- [4] 廖芳群, 李海锋, 陈嘉权, 等. 小电阻接地系统高灵敏性接地故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 150-158.
LIAO Fangqun, LI Haifeng, CHEN Jiaquan, et al. High sensitive ground fault location in a low-resistance grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 150-158.
- [5] 曾嵘, 李勇, 谢李为, 等. 一种城市配电网自适应全线电流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 154-163.
ZENG Rong, LI Yong, XIE Liwei, et al. An adaptive full-line current protection method for an urban distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 154-163.
- [6] 黄志方, 魏立新, 李刚. 消弧线圈并联小电阻的灵活接地方式[J]. 广东电力, 2014, 27(6): 64-67.
HUANG Zhifang, WEI Lixin, LI Gang. Flexible grounding via arc-suppression coil and low resistance in parallel[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(6): 64-67.
- [7] 金鑫. 灵活接地系统单相接地故障特征分析及保护[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- [8] 国家能源局. 消弧线圈并联低阻值接地装置技术条件: DLT 2482—2022[S].
- [9] 廖德辉, 金鑫, 田君杨, 等. 灵活接地配电网单相接地故障全过程特征分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 90-97.
LIAO Dehui, JIN Xin, TIAN Junyang, et al. Analysis of the entire process characteristics of single phase-to-ground faults in flexible grounded distribution networks[J]. Smart Power, 2024, 52(5): 90-97.
- [10] 杨帆, 金鑫, 沈煜, 等. 基于零序导纳变化的灵活接地系统接地故障方向判别算法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 88-94.
YANG Fan, JIN Xin, SHEN Yu, et al. Discrimination algorithm of grounding fault direction based on variation of zero-sequence admittance in flexible grounding system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 88-94.
- [11] 李建蕊, 李永丽, 王伟康, 等. 基于零序电流与电压相位差变化的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4847-4855.
LI Jianrui, LI Yongli, WANG Weikang, et al. Fault line detection method for flexible grounding system based on changes of phase difference between zero sequence current and voltage[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4847-4855.
- [12] 周宇, 汤涛, 曾祥君, 等. 基于零序电流幅值比倍增系数的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 112-120.
ZHOU Yu, TANG Tao, ZENG Xiangjun, et al. Fault line detection method for a flexible grounding system based on a zero-sequence current amplitude ratio multiplication coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 112-120.
- [13] 汤涛, 周宇, 曾祥君, 等. 基于过渡电阻评估的灵活接地系统暂态故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 171-179.
TANG Tao, ZHOU Yu, ZENG Xiangjun, et al. Transient fault line selection method for flexible grounded system based on transition resistance evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 171-179.
- [14] 齐郑, 杭天琦, 李悦悦. 消弧线圈并联小电阻接地方式下的行波故障测距[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 175-182.
QI Zheng, HANG Tianqi, LI Yueyue. Traveling wave fault location for arc-suppression coil in parallel with low resistance grounding mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 175-182.
- [15] 刘宝稳, 曾祥君, 张慧芬, 等. 有源柔性接地配电网弧光高阻接地故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 4001-4013.
LIU Baowen, ZENG Xiangjun, ZHANG Huifen, et al.

- Arc high resistance grounding fault detection method for active flexible grounding distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4001-4013.
- [16] 刘宝稳, 王晨雨, 曾祥君, 等. 三相分布参数不对称配电线路接地故障检测与消弧技术综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3684-3695.
- LIU Baowen, WANG Chenyu, ZENG Xiangjun, et al. Review on the single line-to-ground fault detection and arc suppression techniques of distribution lines with asymmetric three-phase distribution parameters[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3684-3695.
- [17] 刘宝稳, 曾祥君, 马宏忠, 等. 参数不对称配电线路的等效模型与接地故障检测方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 159-167.
- LIU Baowen, ZENG Xiangjun, MA Hongzhong, et al. Equivalent model and grounding fault detection method for distribution lines with asymmetry parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 159-167.
- [18] 薛永端, 李广, 徐丙垠. 利用熄弧后暂态信息测量谐振接地系统的对地电容[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1521-1528.
- XUE Yongduan, LI Guang, XU Bingyin. Measuring method of capacitance to ground in resonant grounding system based on transient information after arc extinguishing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1521-1528.
- [19] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 零序导纳法馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 5-10.
- ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on feeder grounding fault protection based on zero sequence admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 5-10.
- [20] 陈柏宇, 喻锟, 曾祥君, 等. 基于柔性接地装置的不对称配电网接地故障选相选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 1-10.
- CHEN Boyu, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. A method of phase selection and line selection for grounding faults in an asymmetric distribution network based on a flexible-grounding device[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 1-10.
- [21] 栾晓明, 武守远, 贾春娟, 等. 基于改进零序导纳法的单相接地故障选线原理[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 353-360.
- LUAN Xiaoming, WU Shouyuan, JIA Chunjuan, et al. Fault line selection principle of single-phase-to-ground fault based on improved zero-sequence admittance[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 353-360.
- [22] 徐丙垠, 薛永端, 冯光, 等. 配电网接地故障保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 1-7.
- XU Bingyin, XUE Yongduan, FENG Guang, et al. Discussion on several problems of earthing fault protection in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 1-7.
- [23] 国家标准化管理委员会. 互感器第 5 部分: 电容式电压互感器的补充技术要求: GB/T 20840.5—2013[S].
- [24] 王晓卫, 刘伟博, 郭亮, 等. 基于不同时段内积投影的灵活接地系统高阻故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 154-167.
- WANG Xiaowei, LIU Weibo, GUO Liang, et al. High impedance fault line selection method based on inner product projection of different time periods for flexible grounding systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 154-167.
- [25] 杨耿杰, 王康, 高伟. 基于相空间重构和迁移学习的配电网高阻接地故障检测[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 151-162.
- YANG Gengjie, WANG Kang, GAO Wei. High impedance fault detection in a distribution network based on phase space reconstruction and transfer learning[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 151-162.

收稿日期: 2024-03-16; 修回日期: 2024-05-28

作者简介:

李晓波(1976—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为供配电安全、微机保护、智能电器、电能质量等;

E-mail: xbli_cumt@126.com

张世乐(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网高阻接地故障诊断。E-mail: ts22230070a31@cumt.edu.cn

(编辑 魏小丽)