

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230831

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

曾超, 喻锐, 曾祥君, 李理, 贺世庚, 贺芳煜

(电网防灾减灾全国重点实验室(长沙理工大学), 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对谐振接地系统对地参数测量不准确以及高阻接地故障选线困难的问题, 提出了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。基于消弧线圈并联阻尼电阻的投切特性, 利用投切阻尼电阻前后零序电压幅值与相位的变化关系, 测量系统对地电导与电容参数。在系统正常运行时, 通过调整并联阻尼电阻值大小, 测量各馈线零序导纳值。在发生接地故障后退出阻尼电阻, 测量故障后各馈线零序导纳值, 可消除系统参数不对称、互感器采样不同步的影响, 主动构造故障前后各馈线的零序导纳相角差, 实现故障线路的准确判别。在 PSCAD 仿真环境下对所提方法进行验证, 结果表明: 所提方法能够精确测量对地电导与电容参数, 测量相对误差不高于 0.6%; 在不同馈线、不同过渡电阻下发生接地故障时, 能准确判别故障线路, 耐过渡电阻能力达 10 k Ω 。

关键词: 阻尼电阻; 谐振接地系统; 对地参数测量; 高阻故障; 故障选线

A new method for measuring ground parameters and selecting high resistance fault lines in parallel damping resonant grounding systems

ZENG Chao, YU Kun, ZENG Xiangjun, LI Li, HE Shigeng, HE Fangyu

(State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410114, China)

Abstract: There are problems of inaccurate measurement of ground parameters and difficulty in selecting high resistance grounding fault lines in resonant grounding systems. Thus this paper proposes a new method for measuring ground parameters and selecting high resistance fault lines in parallel damping resonant grounding systems. Based on the switching characteristics of parallel damping resistance of an arc suppression coil, the system's ground conductance and capacitance parameters are measured by using the relationship between the zero-sequence voltage amplitude and phase change before and after switching the damping resistor. During normal operation of the system, the zero sequence admittance value of each feeder line is measured by adjusting the parallel damping resistance value. After a ground fault occurs, the damping resistance is exited and the zero sequence admittance value of each feeder after the fault is measured. This can eliminate the influence of system parameter asymmetry and asynchronous transformer sampling, actively construct the zero sequence admittance phase difference of each feeder before and after the fault, and achieve accurate identification of the faulty line. The proposed method is validated in the PSCAD simulation environment, and the results show that it can accurately measure the ground conductivity and capacitance parameters, with a relative measurement error of no more than 0.6%; when grounding faults occur in different feeders and transition resistors, the fault line can be accurately identified, and the resistance to transition resistance can reach 10 k Ω .

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52037001 and No. 52177070).

Key words: damping resistance; resonant grounding system; measurement of ground parameters; high resistance fault; fault line selection

0 引言

我国 10~35 kV 中压配电网多采用谐振接地方

式, 在发生接地故障时, 消弧线圈所产生的感性电流能够有效补偿系统对地电容电流, 限制接地故障电流, 降低对系统设备及绝缘的危害^[1-2]。谐振接地系统高阻故障信息微弱, 现有接地故障保护方法对于高阻接地故障选线困难, 如果选线错误可能会导致故障长期存在, 甚至有可能扩大故障范围, 导致

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52037001, 52177070);
湖南省教育厅项目资助(22A0231)

电气火灾或停电事故的发生^[3-5]。

接地故障选线方法发展至今, 研究人员通过提取系统各类电气量信息, 提出了许多接地故障选线方法, 主要包括零序导纳法^[6]、5次谐波法^[7]、首半波法^[8]、行波法^[9]等。传统零序导纳法主要是利用故障馈线与健全馈线的零序导纳极性上的差异实现故障选线, 在谐振接地系统中, 故障馈线与健全馈线零序导纳差异较小, 受系统参数不对称以及互感器采样精度影响较大, 可靠性不高^[10]。文献[11]利用灵活接地系统并联小电阻投入前后电流幅值比特征实现接地故障选线, 中性点与健全线路零序电流幅值比增大, 而中性点与故障线路零序电流幅值比减小。文献[12]通过测量的系统5次谐波分量, 计算馈线导纳不对称度参数, 构成单相接地故障选线判据。然而系统中的5次谐波含量远远少于基波含量, 检测装置获取难度大, 限制了该方法的应用。首半波法利用故障馈线与健全馈线零序电流初始极性相反的特点实现故障选线^[13], 但该特点持续时间短, 装置采样频率以及时间同步对选线结果影响较大。行波法一般利用电流、电压行波的模极大值、极性及波头到达时差等实现故障选线^[14], 该方法在输电网中的应用较多, 但配电网分支多线路短, 行波反射复杂, 实际尚未在配电网的工程应用中普及。综上所述, 现有故障选线方法在高阻接地故障、系统不对称度较高或互感器采样不同步情况下具有一定局限性, 无法准确判别故障线路。

预调式消弧线圈在正常运行时预先将消弧线圈档位调节至谐振点附近, 接入阻尼电阻对中性点位移电压进行抑制^[15-16]。由于阻尼电阻在系统零序阻抗中占比较小, 传统对地参数测量方法往往未考虑阻尼电阻的影响。文献[17]通过注入谐振频率电流, 测量返回电压, 计算系统对地电导与电容参数, 当阻尼电阻接入消弧线圈接地回路后, 导致系统谐振频率发生偏移, 测量对地参数产生偏差。文献[18]提出中性点参数扰动法, 通过改变中性点接地阻抗产生位移电压求解对地参数, 但未考虑改变中性点阻抗对系统谐振过电压的影响。文献[19]提出基于柔性接地装置的对地参数双端测量方法, 通过注入变压器向配电网中性点注入一特定频率零序电流, 并从消弧线圈内部电压互感器空载二次侧测量该特定频率下的返回电压, 即可测量配电网的等效对地泄漏电导及对地电容值, 此方法考虑了消弧线圈阻尼电阻, 但需要接入柔性接地装置, 实际尚未在配电网的工程应用中普及。

针对谐振接地系统对地参数测量不准确与高阻接地故障选线困难的问题, 本文提出了并阻尼谐

振接地系统对地参数测量与高阻故障选线新方法。利用预调式消弧线圈阻尼电阻投切特性, 精确测量系统对地电容、电感参数; 通过在正常状态与故障状态分别调整与投切阻尼电阻, 主动构造零序导纳相角差判据, 实现接地故障选线。在PSCAD仿真环境下进行验证, 结果表明所提方法能够实现对地参数精确测量与高阻接地故障准确选线。

1 并阻尼谐振接地系统运行特性分析

预调式消弧线圈在系统正常运行时, 消弧线圈根据系统电容电流调谐, 在接近谐振点附近容易产生谐振过电压, 尤其是调谐到全补偿状态时, 中性点位移电压很有可能超过规程规定额定相电压的15%, 为了保证满足规程的要求, 通常采用增大阻尼率的办法, 并联阻尼电阻以限制位移过电压。当系统发生单相接地故障时, 阻尼电阻却导致消弧线圈提供电感补偿电流的能力削弱, 消弧线圈须切除阻尼电阻, 使消弧线圈正常发挥补偿作用。

1.1 并阻尼谐振接地系统零序电流分析

由于非有效接地配电网具有天然优势^[20-21], 电源、负荷均未引出中性点, 需通过接地变压器引出中性点, 再连接消弧线圈与阻尼电阻器件, 构成并阻尼谐振接地系统。

并阻尼谐振接地系统单相接地故障示意图如图1所示。其中: \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 分别为三相电源电动势; \dot{U}_0 为零序电压; i_{0i} 为馈线 i 的零序电流; C_{Xi} 为馈线 i 的 X 相的对地分布电容, $X = A, B, C$; L 为消弧线圈等效电感; G_L 为消弧线圈并联阻尼电导; R_f 为接地过渡电阻; K 为阻尼电阻投切开关, 系统

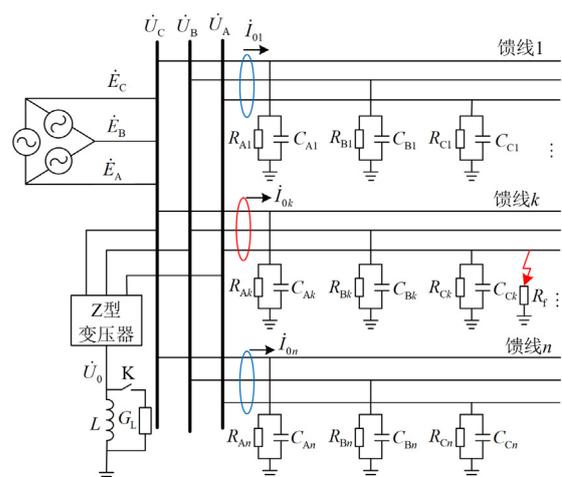


图1 并阻尼谐振接地系统单相接地故障示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-phase grounding fault of parallel damping resonance grounding system

正常运行时为闭合状态, 发生接地故障后为打开状态。

由于电网三相线路普遍对地参数不平衡, 架空线路电网的不对称度通常为 0.5%~1.5%, 理论极限达到 3.5%, 电缆线的不对称度相比架空线要小。由于系统参数不对称的影响, 中性点电压会产生偏移, 导致各馈线存在自然不平衡电流 \dot{I}_{bdi} 。

$$\dot{I}_{bdi} = \dot{E}_A Y_{Ai} + \dot{E}_B Y_{Bi} + \dot{E}_C Y_{Ci} \quad (1)$$

式中, Y_{Xi} 为馈线 i 的 X 相的对地分布导纳, $Y_{Xi} = g_{Xi} + C_{Xi}$, 其中 g_{Xi} 为馈线 i 的 X 相的对地分布电导。

不对称电网接地故障等效电路模型如图 2 所示。其中: \dot{I}_{0N} 为中性点电流; Y_i 为馈线 i 的对地导纳, \dot{U}_f 为故障点虚拟电源, 假设 C 相故障则可表示为 $-\dot{E}_C$ 。

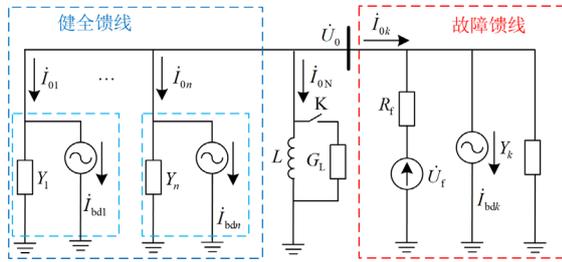


图 2 不对称电网接地故障等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of asymmetric grid grounding fault

谐振接地系统正常运行时, 系统由于三相参数不对称产生的中性点偏移电压 \dot{U}_{bd} 可表示为

$$\dot{U}_{bd} = -\frac{\dot{I}_{bd}}{G_{\Sigma} + G_L + j(\omega C - 1/\omega L)} \quad (2)$$

式中: G_{Σ} 为系统线路对地总电导; C 为系统对地总电容; ω 为工频角频率; \dot{I}_{bd} 为系统自然不平衡电流, 如式(3)所示。

$$\dot{I}_{bd} = \sum_{i=1}^n \dot{I}_{bdi} = \dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C \quad (3)$$

根据节点电压方程, 馈线 i 正常运行时零序电流 $3\dot{I}_{0i}$ 可表示为

$$3\dot{I}_{0i} = (\dot{U}_0 + \dot{E}_A) Y_{Ai} + (\dot{U}_0 + \dot{E}_B) Y_{Bi} + (\dot{U}_0 + \dot{E}_C) Y_{Ci} = \dot{U}_0 Y_i + \dot{I}_{bdi} \quad (4)$$

发生 C 相接地故障后中性点零序电压 \dot{U}_{0f} 可表示为

$$\dot{U}_{0f} = -\frac{\dot{I}_{bd} + \dot{E}_C g_f}{G_{\Sigma} + g_f + j(\omega C - 1/\omega L)} \quad (5)$$

式中, g_f 为过渡电导。发生单相接地故障后, 健全馈线的零序电流 \dot{I}_{0i} 表达式与正常运行时一致, 故障

馈线 k 的零序电流 \dot{I}_{0k} 表达式为

$$\dot{I}_{0k} = -\sum_{i=1, i \neq k}^n \dot{I}_{0i} - \dot{I}_{0N} \quad (6)$$

1.2 传统选线方法局限性分析

传统接地故障选线方法中, 馈线零序导纳定义为馈线零序电流与零序电压的比值, 由式(4)可得馈线 i 零序导纳表达式为

$$\frac{\dot{I}_{0i}}{\dot{U}_0} = Y_i + \frac{\dot{I}_{bdi}}{\dot{U}_0} \quad (7)$$

由式(7)可知, 依据传统方法所测量馈线零序导纳受系统不对称参数影响会发生不平衡偏移^[21]。若三相参数完全对称则 $\dot{I}_{bd} = 0$, 则测量零序导纳为线路实际对地导纳 Y_i 。

由于馈线对地电导和对地电容数量级差距较大, 正常馈线零序导纳一般位于正虚轴附近, 其相角接近 90° , 位于第一象限^[22]; 在中性点不接地系统中, 故障馈线零序导纳等于健全线路零序导纳之和的相反数, 在幅值与相位上与正常馈线具有明显的判别关系, 位于第三象限; 在谐振接地系统中, 消弧线圈一般设定为过补偿状态, 使得故障馈线零序导纳虚部大于零, 位于第二象限, 馈线零序测量导纳平面图如图 3 所示。

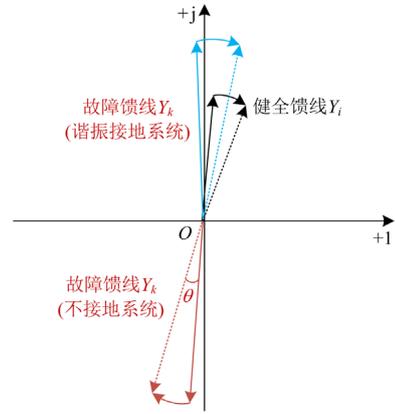


图 3 传统馈线零序测量导纳平面图

Fig. 3 Traditional feeder zero-sequence measurement admittance plan

由图 3 可知, 在谐振接地系统下故障馈线与非故障馈线区别较小, 判据裕度过低, 容易发生误判。考虑实际测量过程中, 由于配电网三相对地参数与互感器采样不同步影响, 使得故障线路与健全线路零序导纳易偏移 to 同一象限, 无法辨识故障线路。即便仅有 1 ms 的采样差异, 在零序导纳相角计算中也会相差 18° ^[23], 这对本来电导分量就很小的线路来说是极大的, 使得故障馈线和健全馈线的区分变得更

加困难,传统零序导纳判据难以准确辨识故障线路。

2 并阻尼谐振接地系统高阻故障选线方法

2.1 并阻尼谐振接地系统故障选线方法

在配电网正常运行时,由于系统参数不对称,中性点电压会产生偏移,由节点电压方程可得正常状态下零序电压 \dot{U}_{N1} 表达式为

$$\dot{U}_{N1} = -\frac{\dot{I}_{bd}}{G_{\Sigma} + G_L + j(\omega C - 1/\omega L)} \quad (8)$$

正常状态下馈线 i 的零序电流表达式为

$$3\dot{I}_{iN1} = \dot{U}_{N1}Y_i + \dot{I}_{bdi} \quad (9)$$

调整并联阻尼电阻大小,应满足阻尼电阻整定范围,此时零序电压为 \dot{U}_{N2} ,可得到调整阻尼电阻后的系统馈线 i 的零序电流表达式为

$$3\dot{I}_{iN2} = \dot{U}_{N2}Y_i + \dot{I}_{bdi} \quad (10)$$

联立式(9)、式(10)可消除对地参数不对称的影响,计算得到配电网正常运行时各馈线零序导纳,如式(11)所示。

$$Y_i = \frac{3(\dot{I}_{iN2} - \dot{I}_{iN1})}{\dot{U}_{N2} - \dot{U}_{N1}} = Y_{Ai} + Y_{Bi} + Y_{Ci} \quad (11)$$

当系统发生 C 相接地故障时,由节点电压方程可得故障后零序电压 \dot{U}_{0f} 表达式为

$$\dot{U}_{0f} = -\frac{\dot{I}_{bd} + \dot{E}_C g_f}{G_{\Sigma} + G_L + g_f + j(\omega C - 1/\omega L)} \quad (12)$$

故障后非故障馈线 i 与故障馈线 k 的零序电流 $3\dot{I}_{if1}$ 、 $3\dot{I}_{kf1}$ 表达式分别为

$$3\dot{I}_{if1} = \dot{U}_{f1}Y_i + \dot{I}_{bdi} \quad (13)$$

$$3\dot{I}_{kf1} = \dot{U}_{f1}(Y_k + g_f) + \dot{E}_C g_f + \dot{I}_{bdk} \quad (14)$$

在发生接地故障后,为了防止接地故障点电弧危害进一步扩大,应及时退出阻尼电阻,使消弧线圈全补偿电容电流。此时零序电压为 \dot{U}_{f2} ,可得到切除阻尼电阻后非故障馈线 i 与故障馈线 k 的零序电流 $3\dot{I}_{if2}$ 、 $3\dot{I}_{kf2}$ 分别为

$$3\dot{I}_{if2} = \dot{U}_{f2}Y_i + \dot{I}_{bdi} \quad (15)$$

$$3\dot{I}_{kf2} = \dot{U}_{f2}(Y_k + g_f) + \dot{E}_C g_f + \dot{I}_{bdk} \quad (16)$$

联立式(13)、式(15)可求得配电网接地故障时非故障馈线零序导纳 Y_{if} 的计算式为

$$Y_{if} = \frac{3(\dot{I}_{if2} - \dot{I}_{if1})}{\dot{U}_{f2} - \dot{U}_{f1}} = Y_{Ai} + Y_{Bi} + Y_{Ci} \quad (17)$$

联立式(14)、式(16),可求得配电网接地故障时故障馈线的零序导纳 Y_{kf} 计算式为

$$Y_{kf} = \frac{3(\dot{I}_{kf2} - \dot{I}_{kf1})}{\dot{U}_{f2} - \dot{U}_{f1}} = Y_{Ak} + Y_{Bk} + Y_{Ck} + g_f \quad (18)$$

进一步可得接地故障时系统非故障与故障馈线故障前后零序导纳相角差关系分别如式(19)、式(20)所示。

$$|\arg(Y_{if}) - \arg(Y_i)| = 0 \quad (19)$$

$$|\arg(Y_{kf}) - \arg(Y_k)| = \left| \arctan\left(\frac{\omega C_k}{g_k}\right) - \arctan\left(\frac{\omega C_k}{g_k + g_f}\right) \right| \quad (20)$$

由上式可知,健全馈线故障前后零序导纳幅值、相角均相等。故障馈线受过渡电阻影响,其故障前后零序导纳差幅值等于过渡电导;零序导纳相角差大小为 $\Delta\theta = |\arg(Y_{kf}) - \arg(Y_k)|$,且均与过渡电阻大小成反比。馈线零序导纳相角差示意图如图 4 所示。

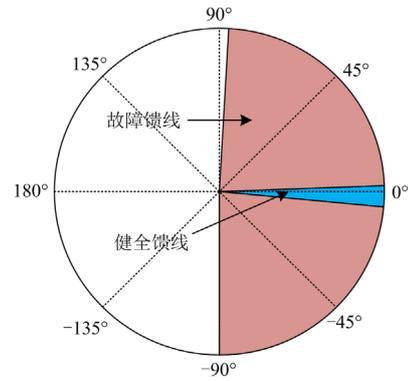


图 4 馈线零序导纳相角差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of phase difference in zero-sequence admittance of feeder lines

非故障馈线由于其线路参数在故障前后一致,零序导纳相角差为 0;故障馈线零序导纳相角差为 $\Delta\theta = |\arg(Y_{kf}) - \arg(Y_k)|$,故障馈线零序导纳相角差与过渡电阻大小有关,当过渡电阻较小时,相角差接近 90°,随过渡电阻值增大而呈现减小趋势,但相角差大小仍然能够保持较明显的特征。本文采用零序导纳相角差判据进行故障选线,馈线零序导纳相角差大于 0.5°时判为故障馈线,否则,判为健全馈线。

2.2 高阻接地故障选线判据整定

由式(20)可知,故障馈线零序导纳相角差与线路对地参数以及过渡电阻大小有关。由于馈线对地电容大小与线路长度呈线性关系,为验证所提相角差大于 0.5°的馈线为故障馈线的判据的适用性,分别对 10 kV 配电网经典参数下不同长度电缆馈线、架空馈线进行分析。不同长度架空线路相角差

随过渡电阻变化曲线如图 5 所示, 不同长度电缆线路相角差随过渡电阻变化曲线如图 6 所示。

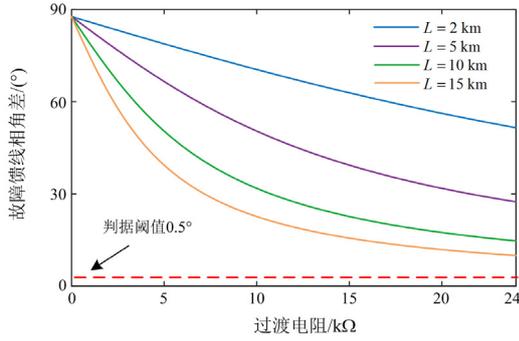


图 5 不同长度架空线路相角差随过渡电阻变化曲线

Fig. 5 Curve of phase angle difference of overhead lines with different lengths changing with transition resistance

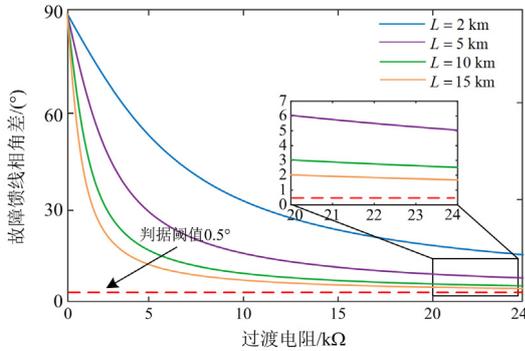


图 6 不同长度电缆线路相角差随过渡电阻变化曲线

Fig. 6 Curve of phase difference of cable lines with different lengths changing with transition resistance

观察图 5 可知, 不同长度架空线路相角差随过渡电阻的增大均呈现下降趋势。由于对地电容参数大小与线路长度呈线性关系, 短架空线路对地电容参数较小, 故障馈线相角差值较大; 长架空线路对地电容参数较大, 故障馈线相角差值相对较小。由于架空线路对地电容参数远小于电缆线路, 在发生 24 kΩ 高阻接地故障时, 故障馈线相角差也远大于本文设定阈值 0.5°, 故本文所提故障选线判据适用于架空线路。

观察图 6 可知, 不同长度电缆线路相角差随过渡电阻的增大均呈现下降趋势。由于电缆线路对地电容参数较大, 故障馈线相角差在发生高阻接地故障时逐渐下降至设定阈值附近, 在发生 24 kΩ 高阻接地故障时, 故障馈线相角差仍大于本文设定阈值 0.5°, 故本文所提故障选线判据适用于电缆线路。

综上所述, 在不同线路类型下发生接地故障时, 本文所提相角差大于 0.5° 的馈线为故障馈线的判据依然能准确判别故障馈线。因此, 本文设定阈值为

0.5° 适用于不同线路类型, 且具有较强的抗过渡电阻能力。

3 不对称谐振接地系统对地参数测量方法

并阻尼谐振接地系统正常运行时, 消弧线圈靠近谐振点运行, 并联阻尼电阻以抑制谐振过电压; 发生接地故障后, 阻尼电阻应及时退出, 确保消弧线圈能够全补偿电容电流。因此, 需要精确测量系统对地参数, 进而实现消弧线圈调谐。

在不对称配电网系统正常运行情况下, 首先选取消弧线圈的电感值为 L_0 , 此时选取消弧线圈电感值应远离谐振点运行, 避免在投切阻尼电阻过程中谐振过电压过大, 导致系统误报警; 系统不投入阻尼电阻时测量系统零序电压的幅值 U_{01} 和相位 φ_1 , 然后在消弧线圈两端并联投入阻尼电阻 G_L , 以改变系统的阻尼率, 此时测量系统零序电压的幅值 U_{02} 和相位 φ_2 。通过两次测量的零序电压幅值与相位关系可计算系统对地电导与电容参数, 计算系统在任意补偿状态下对应的消弧线圈电感值 L 。

在系统投入并联阻尼电阻前, 根据零序电压互感器可以测得幅值 U_{01} 和相位 φ_1 , 由节点电压方程可以表示为

$$\dot{U}_{01} = \frac{-(\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C)}{G_\Sigma + j(\omega C - 1/\omega L_0)} = U_{01} \angle \varphi_1 \quad (21)$$

在系统投入并联阻尼电阻后, 可以测得零序电压幅值 U_{02} 和相位 φ_2 , 可以表示为

$$\dot{U}_{02} = \frac{-(\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C)}{G_\Sigma + G_L + j(\omega C - 1/\omega L_0)} = U_{02} \angle \varphi_2 \quad (22)$$

为消除系统参数的不对称的影响, 式(21)除以式(22)可得

$$\frac{\dot{U}_{01}}{\dot{U}_{02}} = \frac{G_\Sigma + G_L + j(\omega C - 1/\omega L_0)}{G_\Sigma + j(\omega C - 1/\omega L_0)} = 1 + \frac{G_L}{G_\Sigma + j(\omega C - 1/\omega L_0)} \quad (23)$$

整理式(23)可得

$$G_\Sigma + j(\omega C - 1/\omega L_0) = \frac{\dot{U}_{02} G_L}{\dot{U}_{01} - \dot{U}_{02}} \quad (24)$$

通过对阻尼电阻投入前后测量零序电压量进行计算, 分别取其实际部与虚部可得

$$\begin{cases} G_\Sigma = \operatorname{Re} \left(\frac{\dot{U}_{02} G_L}{\dot{U}_{01} - \dot{U}_{02}} \right) \\ \omega C - 1/\omega L_0 = \operatorname{Im} \left(\frac{\dot{U}_{02} G_L}{\dot{U}_{01} - \dot{U}_{02}} \right) \end{cases} \quad (25)$$

计算可得系统对地总电导为

$$G_{\Sigma} = \frac{-G_L U_{02}^2 + G_L U_{01} U_{02} \cos \Delta \varphi}{U_{01}^2 + U_{02}^2 - 2U_{01} U_{02} \cos \Delta \varphi} \quad (26)$$

式中, $\Delta \varphi$ 为投切阻尼电阻前后零序电压相位差值, $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ 。由于系统选取消弧线圈电感值 L_0 已知, 可计算系统对地总电容为

$$C = \frac{G_L U_{01} U_{02} \sin \Delta \varphi}{\omega(U_{01}^2 + U_{02}^2 - 2U_{01} U_{02} \cos \Delta \varphi)} + 1/\omega^2 L_0 \quad (27)$$

系统总电容已知, 则可以根据目标脱谐率控制消弧线圈使其工作在任意补偿状态, 以全补偿目的为例, 则需要调控消弧线圈电感值为

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{L_0(U_{01}^2 + U_{02}^2 - 2U_{01} U_{02} \cos \Delta \varphi)}{U_{01}^2 + U_{02}^2 + U_{01} U_{02} (L G_L \sin \Delta \varphi - 2 \cos \Delta \varphi)} \quad (28)$$

由上述分析可知, 在系统正常运行时调整并阻尼谐振接地系统的阻尼电阻, 测量调整前后零序电压幅值与相位, 可精确测量系统对地电导、电容参数。

4 接地故障选线流程与阻尼电阻整定

4.1 并联谐振接地系统接地故障选线流程

为确保故障馈线的准确选取, 设计并阻尼谐振接地系统接地故障选线方法实现流程如图 7 所示, 具体步骤如下所述。

步骤 1: 短时投切阻尼电阻, 记录正常时阻尼电阻投切前后中性点电压幅值与相位, 计算系统对地电容与对地电导参数, 调整消弧线圈靠近谐振点运行。

步骤 2: 连续监测配电网中性点电压与各馈线零序电流, 调整并联阻尼电阻大小, 测量正常运行时各馈线零序导纳。当零序电压大于 15% 相电压时, 判断配电网发生接地故障。

步骤 3: 若发生接地故障, 退出阻尼电阻, 使消弧线圈全补偿电容电流, 测量阻尼电阻退出前后中性点电压与各馈线零序电流, 计算发生接地故障后各馈线零序导纳。

步骤 4: 判别故障馈线。计算各馈线故障前后零序导纳相角差 $\Delta \theta$, 若测得馈线相角差 $\Delta \theta$ 大于设定阈值, 则判别为故障线路, 否则判别为健全线路。最后, 选线结束并给出跳闸命令切除故障馈线, 实现接地故障选线。

4.2 并联阻尼电阻整定

并阻尼消弧线圈靠近谐振点运行, 阻尼电阻用以抑制系统正常运行时的谐振过电压, 为保证在调整与投切阻尼电阻时保证系统不会因过电压发生误判, 需要对并联阻尼电阻进行整定。

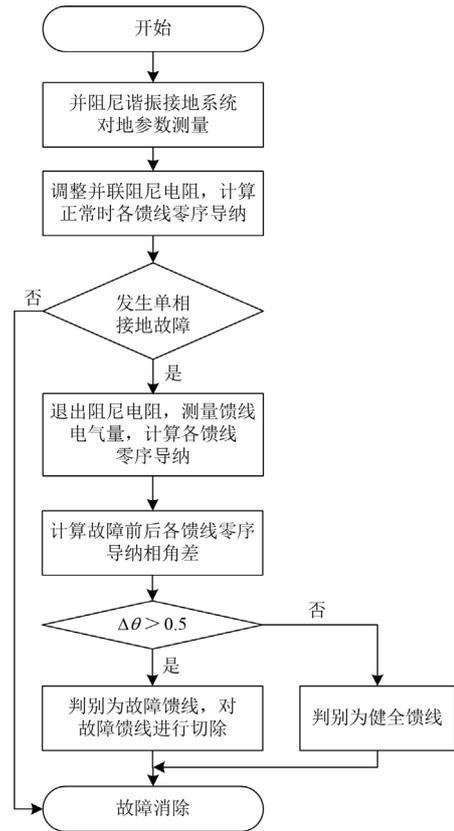


图 7 并阻尼谐振接地系统接地故障选线流程图

Fig. 7 Flow chart of grounding fault line selection for parallel damping resonance grounding system

系统正常运行时, 由于系统参数不对称产生中性点偏移电压, 表达式如式(29)所示。

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{G_{\Sigma} + G_L + j(\omega C - 1/\omega L)} = -\dot{E}_A \frac{\dot{\rho}}{v - j(d_0 + d_L)} \quad (29)$$

式中: $\dot{\rho}$ 为配电网的不平衡度, $\dot{\rho} = \frac{Y_A + a^2 Y_B + a Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$,

其中 $a = e^{j120^\circ}$ 为相量算子; d_0 为系统固定阻尼率, $d_0 = G_{\Sigma} / \omega C$, 配电网的正常阻尼率在 2%~5% 之间, 馈线受潮或绝缘破损时可达 10%; d_L 为消弧线圈并联阻尼电阻的阻尼率, $d_L = G_L / \omega C$; v 为系统脱谐度。取不对称度约为 1.5%, 系统固定阻尼率为 2% 时, 中性点偏移电压随消弧线圈并联阻尼率 d_L 变化曲线如图 8 所示, 其中 E_{ϕ} 为系统标称电压。

观察中性点偏移电压随消弧线圈并联阻尼率 d_L 的变化曲线, 可以发现中性点偏移电压随消弧线圈并联阻尼率 d_L 增大呈现减小趋势。在不附加阻尼电阻时, 中性点偏移电压过大, 且在谐振点达到 0.8 倍相电压; 在并联阻尼率为 5% 的阻尼电阻后, 中

性点偏移电压显著降低,但在谐振点附近($-0.05 < \nu < 0.05$)时,中性点偏移电压达到0.15倍相电压;并联阻尼率为10%、20%的阻尼电阻后,中性点偏移电压即使运行在谐振点也明显低于0.15倍相电压。因此,整定阻尼电阻值有利于抑制系统谐振过电压。

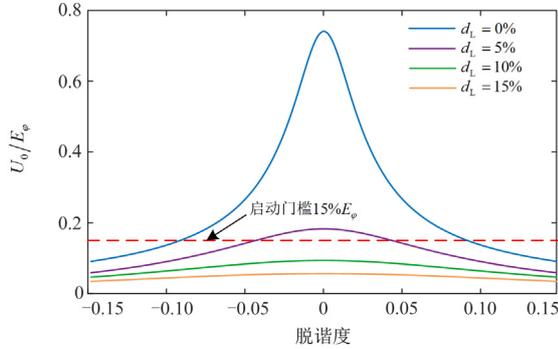


图8 中性点偏移电压随消弧线圈并联阻尼率变化曲线
Fig. 8 Curve of neutral point offset voltage changing with parallel damping rate of arc suppression coil

参考国家标准 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》的规定:正常运行时,自动跟踪补偿消弧装置应确保中性点的长时间电压位移不超过系统标称相电压的15%。消弧线圈调节至谐振状态时,接入阻尼电阻 G_{L1} ,中性点偏移电压为 \dot{U}_{bd} ,若选取阻尼电阻原抑制谐振过电压低于系统相电压的 β 倍,则选取阻尼电阻应满足:

$$G_L > \frac{\dot{U}_{bd} |G_\Sigma + G_{L1}|}{\beta U_N} - G_\Sigma \quad (30)$$

配电网发生接地故障时往往存在阻尼电阻动作延时,而阻尼率越大接地瞬间的故障残流中的有功分量就越大,故障相恢复电压的初速度也会随之增大,将会对接地电弧的熄灭产生不利影响。为更有利于电网的安全性,系统正常运行时消弧线圈并联阻尼率的设定应满足以下原则:在满足中性点位移电压小于15%相电压的前提下尽量减小阻尼率。由于中性点位移电压随着阻尼率的增加而逐渐减小,即将中性点位移电压限制在15%相电压处的阻尼率的值最小。为避免在系统发生扰动时误报警,为系统正常运行留一定裕度,本文选取 $\beta = 0.135$ 。

$$G_L = \frac{\dot{U}_{bd} |G_\Sigma + G_{L1}|}{0.135 U_N} - G_\Sigma \quad (31)$$

5 仿真分析

为了验证并阻尼谐振接地系统对地参数测量与高阻故障选线方法的有效性,在PSCAD/EMTDC仿真环境中搭建如图9所示的10 kV配电网单相接

地故障模型。共设定5条出线, L_1 、 L_2 、 L_3 为电缆线路, L_4 、 L_5 为架空线路,系统参数如表1所示。开关K打开时,阻尼电阻退出;开关K闭合时,阻尼电阻投入。故障可分别设置在5条馈线以验证所提选线方法的有效性,故障发生时间为0.4 s。在系统正常运行时,调控改变阻尼电阻大小,测量正常运行时馈线 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 的零序导纳角分别为 $\angle 88.29^\circ$ 、 $\angle 87.14^\circ$ 、 $\angle 87.92^\circ$ 、 $\angle 85.62^\circ$ 、 $\angle 85.32^\circ$ 。

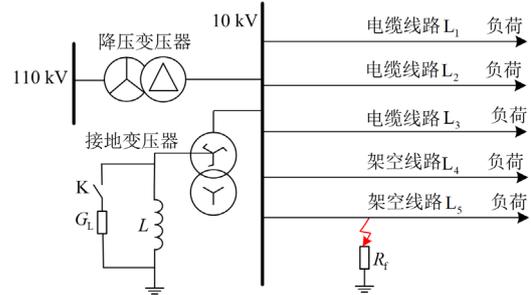


图9 10 kV配电网单相接地故障仿真系统拓扑结构

Fig. 9 Topological structure of single-phase grounding fault simulation system for 10 kV distribution network

表1 10 kV配电网仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters of 10 kV distribution network

参数	数值
系统额定电压/kV	10
对地电容/ μF	50.51
对地泄漏电导/ μS	343.47
脱谐度/%	-2
接地变压器容量/kVA	20
接地故障电阻/ Ω	10 000、5000、2000、500、100、10

5.1 不同阻尼电阻下对地参数测量仿真结果

并阻尼谐振接地系统通过在系统正常运行时投切阻尼电阻,测量投切前后零序电压幅值与相位,进而测量系统对地电容与电导参数。通过设置不同阻尼电阻,研究在不同阻尼电阻下所提对地参数测量方法的准确性,阻尼电阻分别为20 Ω 、25 Ω 、30 Ω 、35 Ω 、40 Ω 时的对地参数测量结果如表2所示。

由表2可知,所提并阻尼谐振接地系统对地参数测量方法,可从原理上消除阻尼电阻对于对地电导参数测量的影响,从而提升对地绝缘参数测量精度,测量相对误差均低于0.6%。对地电容与电导参数测量相对误差随阻尼电阻增大而减小,阻尼电阻从20 Ω 增大至40 Ω ,对地电导参数测量误差由0.431%下降为0.086%,对地电导参数测量误差由

0.573%下降为 0.215%，选取合适的阻尼电阻值，能有效提高对地参数测量精度。

表 2 不同阻尼电阻下对地参数测量结果

Table 2 Measurement results of ground parameters under different damping resistances

阻尼电阻/ Ω	测量对地电导值/ μS	相对误差/%	测量对地电容值/ μF	相对误差/%
20	341.98	0.431	50.22	0.573
25	342.16	0.381	50.24	0.527
30	342.45	0.297	50.29	0.439
35	342.83	0.186	50.31	0.391
40	343.17	0.086	50.40	0.215

5.2 不同线路与过渡电阻接地故障选线仿真结果

在并阻尼谐振接地系统下分别设置经不同线路、不同过渡电阻发生接地故障。在系统正常运行时调控阻尼电阻大小，计算正常时各馈线零序导纳；在发生接地故障后，退出阻尼电阻，同时测量退出前后中性点零序电压与各馈线零序电流，计算馈线零序导纳值。馈线 L_3 发生 500Ω 接地故障时，各馈线零序导纳相角变化如图 10 所示。不同接地故障工况下，故障发生前后各馈线零序导纳相角差及故障馈线判定结果如表 3 所示。

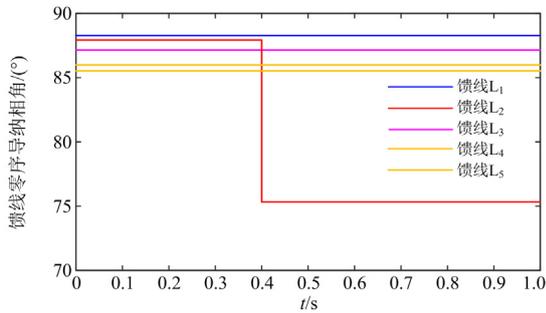


图 10 故障前后馈线零序导纳相角变化图

Fig. 10 Change diagram of zero-sequence admittance phase angle of feeder before and after fault

观察图 10 可知，在发生接地故障后，正常馈线零序导纳相角与故障前一致，而故障线路由于过渡电阻的影响，零序导纳相角下降。由表 3 仿真结果可见，针对不同过渡电阻情形，本文所提故障选线方法依据馈线故障前后零序导纳相角特征差异，在设定误差范围内均准确选取了故障馈线，且随着过渡电阻的增大，故障线路相角差呈减小趋势。在过渡电阻为 10Ω 时，相角差高达 82.8° ；在过渡电阻为 500Ω 时，相角差降低为 11.8° ，仍明显大于本文所设定阈值 0.5° 。

表 3 并阻尼谐振接地系统接地故障选线判定结果

Table 3 Judgment results of parallel resonance grounding system grounding fault line selection

故障馈线	过渡电阻/ Ω	故障前后零序导纳相角差 $\Delta\theta/^\circ$				
		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
L_3	10	0.26	0.31	82.81	0.27	0.19
	100	0.12	0.15	43.29	0.13	0.16
	500	0.05	0.03	11.82	0.04	0.05
L_5	10	0.24	0.29	0.26	0.31	82.76
	100	0.17	0.13	0.15	0.11	42.78
	500	0.03	0.02	0.06	0.03	11.80

5.3 高阻接地故障选线仿真结果

考虑到高阻接地故障一直对传统零序导纳选线方法有较大影响，且本方法随过渡电阻增大，相角差呈现下降趋势，需验证此方法在高阻接地故障选线时的准确性，在谐振接地系统中分别设置 $2 \text{ k}\Omega$ 、 $5 \text{ k}\Omega$ 、 $10 \text{ k}\Omega$ 的过渡电阻故障，故障线路为 L_2 、 L_4 ，高阻故障发生前后各馈线零序导纳相角差及故障馈线判定结果如表 4 所示。

表 4 并阻尼谐振接地系统高阻接地故障选线判定结果

Table 4 Judgment results of high resistance grounding fault line selection for parallel resonance grounding system

故障馈线	过渡电阻/ $\text{k}\Omega$	故障前后零序导纳相角差 $\Delta\theta/^\circ$				
		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
L_2	2	0.02	3.01	0.03	0.01	0.02
	5	0.03	1.21	0.01	0.04	0.02
	10	0.02	0.61	0.61	0.01	0.01
L_4	2	0.03	0.01	0.02	3.26	0.03
	5	0.02	0.03	0.05	1.32	0.01
	10	0.02	0.01	0.03	0.73	0.04

由表 4 仿真结果可知，本文所提并阻尼谐振接地系统选线方法在高阻接地时仍有较高的判别准确率。在高阻接地故障时，相角差特征量依旧十分明显，能够有效区分故障与非故障馈线。根据本文设定阈值 0.5° ，零序导纳相角差判据耐过渡电阻能力可达 $10 \text{ k}\Omega$ ，抗过渡电阻能力强。上述结果充分验证了该方法在高阻接地故障情况下故障馈线识别的准确性、可靠性与工程适用性。

6 结论

本文提出了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，并在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下验证所提方法的正确性，得出以下结论：

1) 本文提出了并阻尼谐振接地系统高阻接地故障选线新方法，通过调整与投切阻尼电阻，计算故障前后各馈线零序导纳值，构造零序导纳相角差

判据,能够准确判别故障线路;

2) 本文所提选线方法考虑系统对地参数不对称与互感器采样不同步影响,能够实现高阻接地故障下的准确选线,耐过渡电阻能力强,在过渡电阻达 10 k Ω 时,依然能准确判别故障馈线;

3) 本文提出了并阻尼谐振接地系统对地参数测量方法,利用阻尼电阻投切特性精确测量对地电导与电容参数,测量相对误差低于 0.6%。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 龙茹悦,黄纯,汤涛,等. 一种谐振接地系统的配电线路接地故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 21-29.
LONG Ruyue, HUANG Chun, TANG Tao, et al. Line selection method for grounding fault in resonant grounding distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 21-29.
- [3] 韦明杰,石访,张恒旭,等. 基于同步零序电流谐波群体比相的谐振接地系统高阻故障选线及区段定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8358-8372.
WEI Mingjie, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. Feeder selection and section location of high impedance fault at resonant networks based on the phase differences between the synchronous harmonics of the zero sequence currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8358-8372.
- [4] 刘战磊,曾祥君,喻锴,等. 基于不平衡过电压动态抑制的谐振接地配电网单相接地故障保护新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 41-49.
LIU Zhanlei, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A new method of single-phase grounding fault protection for a resonant grounding distribution network based on unbalanced overvoltage dynamic suppression[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 41-49.
- [5] 曾祥君,李理,喻锴,等. 配电网相电源馈入中性点的接地故障相主动降压消弧新原理[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 2953-2966.
ZENG Xiangjun, LI Li, YU Kun, et al. Novel principle of arc suppression for grounding phase voltage actively reduced based on phase power supply feedback in distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2953-2966.
- [6] 李振兴,王新,王朋飞,等. 综合工频与特征频率零序导纳角差的选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 13-21.
LI Zhenxing, WANG Xin, WANG Pengfei, et al. Line selection method based on the zero-sequence admittance angle difference of power frequency and characteristic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 13-21.
- [7] 余斌. 配电网复杂接地方式下故障特征分析与故障区域定位研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
YU Bin. Analysis of fault characteristics and research on fault location for distribution network with complex grounding mode[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [8] 孙其东,张开如,刘建,等. 基于五次谐波和小波重构能量的配电网单相接地故障的选线方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(16): 1-4.
SUN Qidong, ZHANG Kairu, LIU Jian, et al. Research on single-phase fault earth fault line selection method for the distribution network based on fifth harmonics and wavelet reconstruction[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(16): 1-4.
- [9] 王建元,朱永涛,秦思远. 基于方向行波能量的小电流接地系统故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4085-4096.
WANG Jianyuan, ZHU Yongtao, QIN Siyuan. Fault line selection method for small current grounding system based on directional traveling wave energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4085-4096.
- [10] 李党,白浩,霍建彬,等. 基于零序导纳的小电阻接地系统馈线高阻接地故障保护方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(7): 95-102, 114.
LI Dang, BAI Hao, HUO Jianbin, et al. High-resistance ground fault protection method based on zero-sequence admittance in low-resistance ground systems[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(7): 95-102, 114.
- [11] 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.
- [12] 韦莉珊,贾文超,焦彦军. 基于 5 次谐波与导纳不对称度的配电网单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 77-83.
WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun. Single-phase fault line selection scheme of a distribution system based on fifth harmonic and admittance asymmetry[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 77-83.
- [13] 李鑫. 配电网单相接地故障定位及选线研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.

LI Xin. Study on single-phase ground fault location and selection of distribution line[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.

[14] 王雪菲, 李京, 陈平, 等. 基于行波波形综合相似度比较的电缆故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 51-59.

WANG Xuefei, LI Jing, CHEN Ping, et al. Cable fault line selection based on comprehensive similarity comparison of traveling wave waveforms[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 51-59.

[15] 喻锬, 邹豪, 曾祥君, 等. 谐振接地配电网对地绝缘参数双端谐振测量新方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 154-161.

YU Kun, ZOU Hao, ZENG Xiangjun, et al. A novel double-terminal resonant measurement method of insulation-to-ground parameters for resonant grounding distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 154-161.

[16] 白浩, 欧阳健娜, 潘姝慧, 等. 基于零序电压调控的配电网对地泄漏电阻测量技术[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 26-132.

BAI Hao, OUYANG Jianna, PAN Shuhui, et al. Measurement technology of grounding leakage resistance of distribution network based on zero sequence voltage regulation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 126-132.

[17] 卓超, 曾祥君, 喻锬, 等. 基于双电压互感器的中性点不接地配电网对地参数实时测量新技术[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2657-2664.

ZHUO Chao, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A novel real-time measurement technique of grounded parameters of dual voltage transformers in neutral point ungrounded distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2657-2664.

[18] 赵军, 袁雪琼, 扈海泽, 等. 基于变电阻电压扰动的配电网对地参数精确测量新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 51-56.

ZHAO Jun, YUAN Xueqiong, HU Haize, et al. A new method of accurately measuring grounded parameters of distribution network based on variable resistor voltage disturbance[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 51-56.

[19] 喻泉, 曾祥君, 喻锬, 等. 基于对地参数双端测量及闭环控制的配电网柔性接地有源消弧方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1011-1021.

YU Quan, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Flexible grounding active arc-suppression method for distribution network based on double-end measurement of ground parameters and closed-loop control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1011-1021.

[20] 苏继锋. 配电网中性点接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 141-148.

SU Jifeng. Research of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 141-148.

[21] 龙茹悦. 谐振接地系统单相高阻接地故障检测方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.

LONG Ruyue. Research on high impedance grounding fault detection method of distribution network[D]. Changsha: Hunan University, 2020.

[22] 陈柏宇, 喻锬, 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.

[23] 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.

收稿日期: 2023-07-01; 修回日期: 2023-10-14

作者简介:

曾超(1999—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 15507468101@163.com

喻锬(1989—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 1393009168@qq.com

曾祥君(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: eexjzeng@qq.com

(编辑 魏小丽)