

基于改进熵权法的调度端小电流接地选线方法

杨 湘, 汤 俊, 周 杨, 段登伟, 杨晓磊

(国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘 要:随着城市电网电缆线路比例加重及消弧线圈投入使用, 谐振接地系统发生单相接地故障时面临着选线难度大、选线时间长、容易造成大量供电服务和安全风险问题。文中提出一种基于改进熵权法的调度端小电流接地选线方法。首先, 分析了小电流接地系统的接地现象, 结合实际运行经验提出了适用于调度主站端的 3 种选线判据, 并通过改进熵权法进行合理的融合; 然后, 提出了针对谐振接地系统的动态补偿法并制定相应选线流程; 最后, 在成都地调主站端 D5000 系统上部署该选线方法并进行长时间实际运行验证。结果表明, 该方法效果显著, 解决了调度端谐振接地系统选线难题, 单相接地平均故障处理时间减少了 95%, 有效提高了单相接地故障处置速度和准确性, 具有较好的应用推广价值。

关键词:调度主站端; 小电流接地选线; 谐振接地系统; 改进熵权法; 动态补偿法

中图分类号: TM 862 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2021)06-38-07

DOI: 12.16527/j.issn.1003-6954.20210608

A Method of Small Current Grounding Line Selection at Dispatching Station Based on Improved Entropy Weight Method

Yang Xiang, Tang Jun, Zhou Yang, Duan Dengwei, Yang Xiaolei

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: With the increasing proportion of cable lines in urban power grid and the application of arc suppression coil, when single-phase grounding fault occurs in resonant grounding system, it is faced with some problems, such as difficult line selection, long line selection time, a large number of power supply services and safety risks. A method of small current grounding line selection at dispatching station based on the improved entropy weight method is proposed. Firstly, the grounding phenomenon of small current grounding system is analyzed. Combined with the actual operation experiences, three line selection criteria suitable for the dispatching master station are proposed, and the reasonable fusion is carried out with the improved entropy weight method. Secondly, the dynamic compensation method for resonant grounding system is proposed, and the corresponding line selection flow chart is formulated. Finally, the selection method is deployed on the D5000 system at the dispatching main station of Chengdu local dispatching and verified for a long time. The results show that the proposed method has a remarkable effect and solves the line selection problems for resonant grounding system at dispatching station. It shortens 95% of the mean processing time for single-phase grounding fault and effectively improves the processing speed and accuracy of single-phase grounding fault, which has good application and popularization value.

Key words: dispatching master station; small current grounding line selection; resonant grounding system; improved entropy weight method; dynamic compensation method

0 引 言

中国 6~35 kV 中压配电网广泛采用中性点非有效接地方式, 即不接地和经消弧线圈接地(谐振接地)的小电流接地系统^[1]。随着城市电网快速发

展, 电缆线路所占比例越来越高, 接地时故障点电流增大不易熄弧, 且同沟电缆单相接地故障处理不及时极有可能会发展成大面积停电事故, 严重影响供电服务质量, 危害极大。故目前大城市配电网多数采用经消弧线圈接地的谐振接地方式。虽然谐振接地能有效减少流过故障点的电流, 使电弧更易于熄

灭,但是消弧线圈掩盖了真实的接地现象,导致故障量不突出、不易辨识^[2]。大量研究认为谐振接地系统很难通过稳态量进行选线^[3-4],导致选线难度较大,选线时间较长,存在的风险也更高,容易造成大量供电服务问题。

目前,国内外对小电流接地选线理论研究主要集中在厂站端选线^[5-21]。其中大部分基于暂态零序量^[5-6]、小波分析^[7-11]、注入法^[12-16]判断方法的小电流接地选线装置尽管在理论上判断更迅速和准确;但受现场电磁干扰较多、安装成本较高、对含消弧线圈的接地选线不够准确,其在变电站实际应用效果并不理想,实际使用程度不高。部分研究融合了人工智能、深度学习^[17-21]的小电流接地选线新算法仍处于理论探索研究阶段,尚未投入实用化经受现场考验。目前中国电网调度部门基本上实现了智能电网调度系统(D5000)的部署应用。调度主站端由于受数据量及传输影响,针对中压配电网只采集了功率、电压、电流等稳态实时数据,无法应用暂态量进行选线判断。这种情况导致相当多的单相接地故障还是依靠调度员凭经验人工拉路的方法实现选线。因此,在调度主站端系统上开发小电流接地选线功能具有更大的实际应用性和经济性,且能够协助调度员在最短时间内判断出单相接地线路,并能充分考虑保电负荷和重要负荷的可靠供电,更好地确保电网安全稳定运行。基于调度主站端的小电流接地选线方法研究迫在眉睫。

针对上述问题,在分析了小电流接地系统接地现象的基础上,结合实际运行经验提出了适用于调度主站端的3种选线判据,并提出了针对谐振接地系统的动态补偿法和选线流程。

1 小电流接地系统接地分析

中性点不接地系统的单相故障如图1所示,正常情况下三相对称,对地电容电流之和为0。以线路1的A相发生接地故障为例进行分析。

1)对于非接地线路,其三相对地电容电流分别为

$$\begin{cases} \dot{I}_{Ai} = 0 \\ \dot{I}_{Bi} = j\dot{U}_{BG}\omega C_{0i} \\ \dot{I}_{Ci} = j\dot{U}_{CG}\omega C_{0i} \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_{0i} 为*i*线路对地电容; \dot{U}_{BG} 、 \dot{U}_{CG} 分别为B、C相对地电压。

非接地线路感受到的零序电流为

$$3\dot{I}_{0i} = \dot{I}_{Ai} + \dot{I}_{Bi} + \dot{I}_{Ci} = -j3\omega C_{0i}\dot{U}_0 \quad (2)$$

式中: \dot{U}_0 为零序电压; $\omega C_{0i}\dot{U}_0$ 为正常运行状态下A相对地电容电流之和。

故非接地线路的零序电流大小由接地零序电压和本线路对地电容决定。

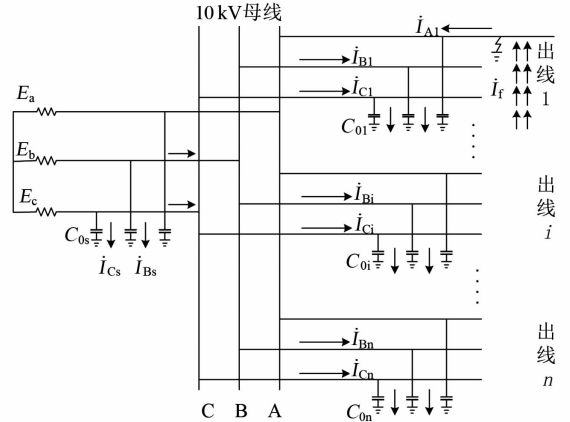


图1 中性点不接地系统单相接地故障

2)对于接地线路,非接地相有其本身的电容电流流过,而流过接地相故障点的电流是电网中所有非接地相对地电容电流之和,即

$$\begin{aligned} \dot{I}_f = & -\sum_{i=1}^n \dot{I}_{Bi} - \dot{I}_{BS} - \sum_{i=1}^n \dot{I}_{Ci} - \dot{I}_{CS} = \\ & -j\omega\dot{U}_{BG}C_{0T} - j\omega\dot{U}_{CG}C_{0T} = j3\omega C_{0T}\dot{U}_0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: \dot{I}_{BS} 、 \dot{I}_{CS} 分别为变压器B、C相等效对地电流; C_{0T} 为系统单相对地电容的总和, $C_{0T} = \sum_{i=1}^n C_{0i} + C_{0S}$, C_{0S} 为变压器等效对地电容。

中性点不接地系统接地线路感受到的零序电流为

$$3\dot{I}_{0f} = \dot{I}_{Af} + \dot{I}_{Bf} + \dot{I}_{Cf} = j3\omega(C_{0T} - C_{01})\dot{U}_0 \quad (4)$$

式中: \dot{I}_{Af} 、 \dot{I}_{Bf} 、 \dot{I}_{Cf} 分别为接地线路三相故障电流; C_{01} 为故障线路对地电容。

经上述分析可知,对于中性点不接地系统,接地线路的零序电流值将远大于其他线路的零序电流值,调度主站端可根据零序电流幅值大小进行选线。

接地前后电流矢量如图2所示,设 \dot{I}_{iA_normal} 为故障前*i*线路A相正常负荷电流; θ_1 为接地前负荷功率因数角; \dot{I}_f 为流过接地点故障电流; \dot{I}_{iA_fault} 为故障后A相电流; θ_2 为接地后的负荷功率因数角。对于

不同的接地情况、不同的接地线路及不同的接地相别,其接地后产生的 I_f 幅值大小均将不同。故障后线路的 A 相电流 $i_{iA_fault} = i_f + i_{iA_normal}$, 故障前后接地相相电流幅值变化量为

$$|\Delta I_{iA}| = |i_{iA_fault} - i_{iA_normal}| \quad (5)$$

对于接地线路,绝大多数情况下,由于 $|\theta_2| \neq |\theta_1|$, 幅值变化量 $|\Delta I_{iA}| > 0$, 其将发生明显的变化;极特殊情况下当 $|\theta_2| = |\theta_1|$ 时, $|\Delta I_{iA}| = 0$ 。对于非接地线路而言,由于 A 相电压为 0, A 相对地电容电流为 0, 非接地线路 A 相电流幅值将几乎没有变化。因此,调度主站端可以将线路接地前后接地相的相电流变化量作为选线判据之一。

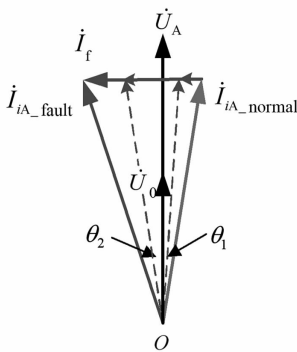


图 2 接地前后电流矢量

线路接地后,由于对地电容电流的存在,各条线路将产生零序电流,其将直接导致线路的无功功率发生相应的变化,变化量为

$$\begin{aligned} \Delta Q_i &= \Delta S_i \sin \theta \\ &= (\dot{U}_{ab} \dot{I}_{iA_fault} - \dot{U}_{ab} \dot{I}_{iA_normal}) \sin \theta \\ &= \dot{U}_{ab} \dot{I}_f \sin 60^\circ \end{aligned} \quad (6)$$

式中: ΔS_i 为 i 线路功率变化量; \dot{U}_{ab} 为 AB 相间电压; θ 为负荷功率因数角。

对于接地线路,接地点故障电流较大,其无功功率变化量也较大;对于非接地线路而言,其无功功率的变化量仅由本身对地电容电流产生,其无功功率变化量将远小于接地线路。因此,调度主站端可以将线路接地前后无功功率变化量作为选线判据之一。

2 改进熵权法选线判据权重计算

单一的选线判据具有其独立的适用范围,受现

场实际影响,目前仍有多数地区电网未全部实现零序电流采样及覆盖,仅仅依靠零序电流单一判据进行选线判断具有一定的局限性。由上一章分析可知,接地前后接地相相电流及无功功率的变化量同样可作为调度主站端小电流接地选线的判据。调度主站端小电流接地选线各判据比较情况如表 1 所示。

表 1 调度主站端小电流选线判据比较

选线判据	判据优势	判据劣势
零序电流	1) 直观准确	1) 未实现零序采样全覆盖 2) 零序电流准确性无法保证
相电流变化量	1) 直观且变化明显	1) B 相电流可能未采集 2) 可能受负荷突变影响
无功变化量	1) 无功采集全覆盖 2) 基本不受负荷影响	1) 单位较大变化可能不明显

不同的选线判据存在结合的可能。为了弥补独立选线判据准确性不高、存在一定限制条件缺陷的情况,可以通过将零序电流、无功功率变化量和相电流变化量 3 个判据进行合理的融合,得到调度主站端小电流接地选线综合判据。

熵权法是一种客观的赋权方法,通过对各个评价指标进行归一化处理及熵值计算,可以确定各项指标的权重值。

每次接地有 n 条线路,共有零序电流、相电流变化量和无功功率变化量 3 个特性指标,接地后各条线路特性指标值可记为

$$\mathbf{R} = [I_0, |\Delta I_{i_f}|, |\Delta Q|] \quad (7)$$

式中: I_0 为接地后各条线路零序电流矩阵; ΔI_i 为接地前后第 i 条线路接地相相电流幅值变化量矩阵; ΔQ 为接地前后各条线路无功功率变化量值矩阵。

对 \mathbf{R} 中值进行归一化处理,可得第 i 条线路在第 x 个指标中的贡献度 f_{xi} 为

$$f_{xi} = \frac{r_{xi}}{\sum_{i=1}^n r_{xi}} \quad (8)$$

式中: $r_{xi} \in \mathbf{R}$; $i = 1, 2, \dots, n$; $x = 1, 2, \dots, m$; m 为特性指标总数。

第 x 个指标的熵值 h_x 可通过式(8)求得。

$$h_x = -k \sum_{i=1}^n f_{xi} \ln f_{xi} \quad (9)$$

式中, $k = 1/\ln n$ 。

由于零序电流、相电流和无功功率具有一定的相似性,为了减少相似指标产生的误差,采用改进熵权法计算公式对传统熵权计算公式方法进行修正^[22],每个指标的熵权 w_x 为

$$w_x = \frac{\exp(\sum_{l=1}^m h_l + 1 - h_x) - \exp(h_x)}{\sum_{l=1}^m \exp(\sum_{l=1}^m h_l + 1 - h_l) - \exp(h_l)} \quad (10)$$

式中: $l=1, 2, \dots, m$; $t=1, 2, \dots, m$ 。

最终通过式(7)一式(10)得到零序电流、相电流和无功功率变化量3种选线判据指标对应的的权重向量 $\mathbf{W} = [w_1, w_2, w_3]$ 。

通过改进熵权法可得到每条线路接地概率,并以此进行选线。

$$P_i = \sum_{x=1}^n f_{xi} w_x \quad (11)$$

3 谐振接地系统动态补偿法

当中性点经消弧线圈接地时,在中性点电压的作用下系统产生的电感电流为

$$\dot{I}_L = -\dot{U}_0 / X_L = j\dot{U}_0 / \omega L \quad (12)$$

式中: X_L 为消弧线圈感抗; L 为消弧线圈电感。

电感电流将经接地点沿接地相返回,故此时接地线路感受到的零序电流可由式(4)和式(12)计算得到。

$$3\dot{I}_{0i}' = 3\dot{I}_{0i} - \dot{I}_L = j(3\omega C_{0T} - 3\omega C_{0i} - \frac{1}{\omega L})\dot{U}_0 \quad (13)$$

对于谐振接地系统,由于消弧线圈电感电流的作用,接地线路的零序电流经补偿后将变小,甚至小于大多数不接地线路的零序电流,使得真实的接地信息和特征量被掩盖,这将给调度员选线造成相当大的困扰。

任意试拉开一条线路,如果此线路为非接地线路(其零序电流幅值为 $3I_{0i} = 3\omega C_{0i} U_0$),接地点将不再流过被拉掉线路的对地电容电流,接地线路感受到的零序电流与接地初始状态相比将动态变化为

$$3\dot{I}_{0i}'' = 3\dot{I}_{0i}' - 3\dot{I}_{0i} = j(3\omega C_{0T} - 3\omega C_{0i} - \frac{1}{\omega L} - 3\omega C_{0i})\dot{U}_0 \quad (14)$$

其有效值将变大为

$$3I_{0i}'' = \left| 3\omega C_{0T} - 3\omega C_{0i} - \frac{1}{\omega L} - 3\omega C_{0i} \right| U_0 \quad (15)$$

因此,可根据拉开线路前后所有线路零序电流的变化量进行选线。被拉开线路的零序电流越大,接地线路动态感受到的零序电流变化量也将越大;对

于非接地线路,其零序电流将不会受影响。由前两章分析可知,相电流变化量、无功功率变化量和零序电流3个特性指标均是由对地电容电流引起,相电流变化量和无功功率变化量也将与零序电流有同样的变化规律。改进熵权法选出线路接地概率最高的线路即为电容电流变化最大的线路。

对于谐振接地系统,为了打破由于消弧线圈补偿掩盖真实信息的状态,提出“动态补偿法”:接地后先通过改进熵权法选择出电容电流变化最大的线路将其拉开,再计算出接地初始状态和动态拉开后的各线路特征量的补偿差量;再次利用改进熵法选出动态补偿后电容电流变化最大的线路,此线路即为真实的接地线路。

采用动态补偿法后,各条线路特性指标值可记为

$$\mathbf{R}_2 = [\Delta\mathbf{I}_{02}, |\Delta\mathbf{I}_{i,12}|, |\Delta\mathbf{Q}_2|] \quad (16)$$

式中: $\Delta\mathbf{I}_{02}$ 为动态补偿前后各条线路零序电流变化量矩阵; $\Delta\mathbf{I}_{i,12}$ 为动态补偿前后前后 i 条线路接地相相电流幅值变化量矩阵; $\Delta\mathbf{Q}_2$ 为动态补偿前后各条线路无功功率变化量矩阵。

调度主站端小电流接地选线流程如图3所示。

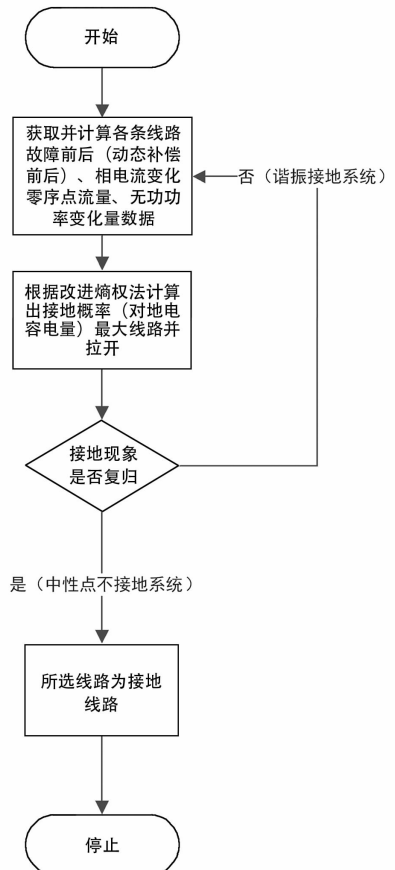


图3 调度主站端小电流接地选线流程

当系统发生单相接地时,可首先获取并计算各条线路故障前后零序电流、相电流变化量、无功功率变化量,根据改进熵权法计算出接地概率(对地电容电流)最大的线路并拉开。对于中性点不接地系统,所选线路即为接地故障线路,选线结束;对于谐振接地系统,此操作相当于进行“动态补偿”操作,可计算出动态补偿前后各条线路的零序电流、相电流变化量、无功功率变化量,再通过改进熵权法计算出接地概率(对地电容电流)最大的线路拉开,进行故障选线。此操作可重复进行,直至选出故障线路。

4 实例验证

目前,基于改进熵权法的调度端小电流接地选线方法及所对应程序已经部署在国网成都地调 D5000 智能电网调度系统中,并已实现程序自动计算、自动选线排序、自动拉合断路器进行故障处理查找接地线路。

4.1 中性点不接地系统案例

2020 年 10 月 21 日 06:11,成都寿安站 10 kV II 母发生 A 相接地($U_A = 0.89$ kV, $U_B = 9.64$ kV, $U_C = 10.42$ kV)。由于该站未接入零序电流,其接地故障前后接地相电流变化量和无功功率变化量以及采用改进熵权法($W = [0.460, 0.540, 0.000]$)后的选线结果如表 2 所示。

表 2 成都寿安站中性点不接地系统选线结果

10 kV 负荷线路	故障前后 接地相电流 变化量/A	故障前后 无功功率 变化量/kVar	接地概率/%	选线排序
寿民路	2.160	0.057	30.6	1
寿业二路	4.720	0.021	24.2	2
寿工路	2.213	0.035	21.6	3
寿博路	3.680	0.001	12.7	4
寿长路	0.827	0.008	6.0	5
寿德二线	0.373	0.009	4.9	6

06:11:54 接地后,系统按照改进熵权法选线结果对接地概率第 1(30.6%)的寿民路 924 断路器自动进行控分操作;06:12:30 时,系统发现小电流接地信号复归,接地现象消失,证明该方法选线成功,整个故障处理仅耗时 36 s。

4.2 谐振接地系统案例

2021 年 6 月 10 日 12:28,成都沙堰子站 10 kV

II、III 母发生谐振系统 A 相单相接地($U_A = 1.98$ kV, $U_B = 8.76$ kV, $U_C = 10.42$ kV),接地后各判据指标及采用改进熵权法($W_1 = [0.307, 0.314, 0.379]$)后的选线结果如表 3 所示。

表 3 成都沙堰子谐振系统接地系统第 1 次选线结果

10 kV 负荷线路	故障前后 接地相电流 变化量/A	故障前后 无功功率 变化量/kVar	故障后 零序 电流/A	接地 概率/%	选线 排序
堰航线	0.638	0.037	23.107	31.8	1
堰白线	0.912	0.084	6.440	13.8	2
堰昌线	6.354	0.041	3.880	13.6	3
堰桥线	6.402	0.073	0.000	13.2	4
堰铝线	7.516	0.035	2.347	13.0	5
堰镇线	3.028	0.004	6.720	9.2	6
堰天线	1.158	0.021	2.700	5.4	7

12:28:57 接地后,系统按照改进熵权法选线结果对接地概率最高(31.8%)的堰航线 922 断路器自动进行控分操作,等待一段时间后故障并未消失,系统随即采用“动态补偿法”。动态补偿前后其他线路零序电流变化量、相电流变化量和无功功率变化量以及采用改进熵权法($W_2 = [0.203, 0.268, 0.529]$)后的选线结果如表 4 所示。12:30:33 时,系统按照第 2 次改进熵权法选线结果对接地概率最高(74.6%)的堰白线 923 断路器进行控分操作,随后于 12:30:38 发现小电流接地信号复归,接地现象消失。仅通过两次拉路即实现谐振接地系统故障选线,整个故障处理仅耗时 101 s。

表 4 成都沙堰子谐振系统接地系统第 2 次选线结果

10 kV 负荷线路	拉开线路 前后接地 相电流 变化量/A	拉开线路前后 无功功率 变化量/kVar	拉开线路 零序电流 变化量/A	接地 概率/%	选线 排序
堰白线	7.908	0.247	20.480	74.6	1
堰铝线	12.292	0.027	0.280	9.9	2
堰桥线	6.494	0.021	0.000	5.3	3
堰昌线	1.320	0.054	0.130	4.7	4
堰天线	3.290	0.023	0.040	3.6	5
堰镇线	0.998	0.018	0.073	2.0	6

在成都地调近 1 年的现场生产实际运行中,共发生小电流接地单相故障 120 次,采用基于改进熵权法选线方法的选线成功率达到 100%,平均接地故障处理时间由过往的 30 min 缩减至 1min 左右,平均拉路数由过往 4.8 次下降至 1.5 次。所提方法大大提高了谐振接地系统单相接地选线成功率和故

障处置时间,同时也解决了过往甚至试拉9条线路的不利情景。

5 结 论

针对目前中国广泛存在的谐振接地系统发生单相接地故障后选线难度大、选线时间长问题,基于对小电流接地系统分析理论分析及生产实际,提出了基于改进熵权法的调度端小电流接地选线方法,主要具有以下优点:

1)综合考虑零序电流、相电流、无功功率等特征量进行选线,以改进熵权法增加选线判据合理性,避免了单一判据的局限性,具有更广的适用性。以动态补偿法解决了谐振接地系统选线难题。

2)提高小电流接地选线的自动化水平,减少传统人工拉路法的“盲拉”次数,提高供电可靠性,小电流接地故障平均处理时间缩短了95%,对抑制单相长时间接地可能引发的同沟电缆起火和森林草原火灾有一定的意义。

3)相较于厂站端每个站部署选线装置投资大、须停电施工等缺点,所提方法部署在调度主站端具有更强的实用性和推广性。

4)通过在成都地调长时间运行,检验了所提方法的准确性和有效性。

参考文献

[1] 束洪春. 配电网选线与故障定位[M]. 北京:科学出版社,2016.

[2] 徐丙垠. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京:中国电力出版社,2017.

[3] 薛永端,张秋风,颜廷纯,等. 综合暂态与工频信息的谐振接地系统小电流接地故障选线[J]. 电力系统自动化,2014,38(24):80-85.

[4] 康小宁,刘鑫,索南加乐,等. 基于矩阵束算法的经消弧线圈接地系统故障选线新方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(12):88-93.

[5] 张仲孝,苗世洪,林湘宁,等. 基于多孔算法的小电流接地系统故障选线算法[J]. 电力系统自动化,2011,35(1):66-70.

[6] 张宁. 小电流接地选线方法研究与装置研制[D]. 北

京:华北电力大学,2017.

[7] Qin Hao, Li Tianyou. High impedance fault line selection method for resonant grounding system based on wavelet packet analysis[C]//2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2018:1174-1179.

[8] 安东亮,陈涛,李军,等. 基于半波傅氏算法的小电流接地选线装置设计[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(9):157-163.

[9] 张馥荔,张红旗. 小电流接地系统单相接地故障的小波选线方法[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2021(4):70-74.

[10] 李也白,唐克义,张霄霄,等. 小波包原理小电流接地选线装置的研发与应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(2):159-162.

[11] 唐克义,李也白,张霄霄. 新型小电流接地选线装置的研发与应用[J]. 上海电力学院学报,2013,29(2):143-145.

[12] 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.

[13] 樊淑娴,徐丙垠,张清周. 注入方波信号的经消弧线圈接地系统故障选线方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(4):91-95.

[14] Huang Tantan, Zhang Huifeng, Gao Zhipeng, et al. A Principle of Fault Line Selection Based on Increasing Zero-sequence Current in Non-ground Neutral System [C]//2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), 2018:1-5.

[15] 张峰,梁军,梁正霖,等. 信号注入与暂态信号方法结合的小电流接地选线装置[J]. 高压电器,2009,45(6):83-86.

[16] 许云琪,万峻,保佑智. 信号注入比幅法在电网单相接地故障诊断中的应用[J]. 云南电力技术,2008(S1):38-39.

[17] 徐思旸,范剑英,丁强. 基于GA优化BP神经网络的小电流接地故障选线方法[J/OL]. 电测与仪表:1-7 [2021-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210324-1103.004.html>.

[18] 郝帅,张旭,马瑞泽,等. 基于改进GoogLeNet的小电流接地系统故障选线方法[J/OL]. 电网技术:1-9 [2021-06-25]. <http://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0256>.