

# 配电网中性点电压主动调控的接地故障 零序电流多判据选线方法

白浩<sup>1</sup>, 黄升平<sup>2</sup>, 潘姝慧<sup>1</sup>, 李珊<sup>3</sup>, 袁智勇<sup>1</sup>

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663; 2. 广西电网有限责任公司崇左供电局, 广西 崇左 532299;  
3. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023)

**摘要:**为解决小电流接地系统中高阻接地故障选线准确率的问题,从主动调控中性点电压角度出发,提出一种基于零序电流变化量的多判据接地故障选线方法。在特制接地变压器系统侧均匀设置多个接地档位,系统发生单相接地故障后柔性调节接地档位大小,将故障相电压抑制到故障电弧重燃电压以下。若故障电弧无法熄灭,判断线路发生永久性接地故障,通过降低变压器接地档位,放大故障馈线零序电流、减小非故障馈线零序电流,利用降档前、后各馈线零序电流增减差异进行选线。在过渡电阻较大的情况下,非故障馈线零序电流呈线性变化趋势,故障馈线零序电流呈非线性变化趋势,利用各馈线零序电流非线性畸变程度辅助选线。仿真结果表明,该方法针对瞬时性接地故障能够实现故障电弧快速熄灭,针对永久性接地故障可准确识别十数千欧接地故障馈线,有效提高小电流接地系统高阻故障选线准确率。

**关键词:**小电流接地系统;中性点电压;档位调节;故障选线;零序电流变化量;故障辨识

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.012 中图分类号:TM773 文章编号:1673-9140(2022)04-0105-09

## Zero sequence current multi-criteria line selection method based on active regulation of neutral voltage in distribution networks

BAI Hao<sup>1</sup>, HUANG Shengping<sup>2</sup>, PAN Shuhui<sup>1</sup>, LI Shan<sup>3</sup>, YUAN Zhiyong<sup>1</sup>

(1. China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. Chongzuo Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Chongzuo 532299, China; 3. Electric Power Science Research Institute, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China)

**Abstract:** In order to solve the low accuracy of high-resistance grounding fault selection in small-current grounding systems, a multi-criteria grounding fault selection method based on the changing amount of zero-sequence current is proposed from the perspective of active regulation of neutral point voltage. Multiple grounding levels are uniformly set on the system side of the special grounding transformer. When a single-phase ground fault occurs in the system, the grounding level size is flexibly adjusted to suppress the fault phase voltage until no higher than the fault arc reignition voltage. If the fault arc can not be extinguished, the line will be judged as a permanent ground fault line. In that case, the transformer grounding level will be decreased to amplify the fault feeder zero sequence current and the non-fault feeder zero sequence current. The difference between the zero sequence current increase and decrease of each

收稿日期:2021-06-27;修回日期:2021-10-19

基金项目:广西电网有限责任公司科技项目(ZBKJXM20190061)

通信作者:白浩(1987-),男,博士,工程师,主要从事配电自动化、主动配电网以及人工智能在配电网运维中的应用研究;E-mail:baihao@csg.cn

feeder before and after the lowering gear level can then be incorporated for line selection. Next, in the case of large transition resistance, the non-faulted feeder zero sequence current has a linear trend and the faulted feeder zero sequence current has a non-linear trend, and the degree of this non-linear distortion of each feeder zero sequence current can be exploited in line selection. Simulation results show that the method can achieve rapid extinguishing of the fault arc for transient grounding faults, can accurately identify ten kilo-ohm grounding fault feeders for permanent grounding faults, and effectively improving the accuracy of high resistance fault selection for small current grounding systems.

**Key words:** small current grounding system; neutral point voltage; gear level adjustment; fault line selection; zero sequence current change; fault identification

目前针对低阻接地故障的选线研究已取得一系列成果,基本满足电网可靠性要求。例如群体比幅比相法<sup>[1-4]</sup>、五次谐波分量法<sup>[5-6]</sup>、注入信号法<sup>[7]</sup>、负序电流法<sup>[8-9]</sup>以及基于智能算法的接地保护等。但是,馈线单相接地故障导致的人身触电伤亡、诱发山火等恶性事故屡见报道<sup>[10]</sup>,主要原因是故障支路呈现高阻状态,大部分还伴随呈现出弧光接地的非线性<sup>[11]</sup>。相比于金属性接地与低阻接地,高阻接地故障电气量特征更不明显(零序电压可能小于相电压的15%,故障电流可能小于1 A)、故障点更不稳定。因此,目前单相接地故障检测的难点主要集中在高阻故障的灵敏检测以及消弧、过电压防护上。

在过电压防护方面,在接地故障相转移装置基础上研发的消弧柜技术已逐步得到推广,该项技术通过在站内设置故障旁路接地支路,实现故障相电压抑制到零,从而达到消弧效果。但消弧过程中电压调控缺乏灵活性,非故障相电压上升为线电压,增加了长时间运行时线路绝缘薄弱处的击穿风险。未来,基于注入电流的零序电压柔性控制及故障有源电压消弧将成为新的发展方向。文献<sup>[12]</sup>首次提出通过向配电网注入零序电流,改变中性点位移电压的相位与幅值,有效降低中性点电压至零,但缺乏对初始注入量选取的研究,初始注入电流的幅值和相位会严重影响试注入法的效果,如何选取既能引起电压明显变化又不提高不平衡电压的补偿电流是该技术的难点。文献<sup>[13]</sup>采用迭代的方式,先确定注入电流的最优相位,后确定最优幅值,原理类似二分法,操作繁琐,且计算速度较慢,当电网参数发生变化时,因为其收敛速度较慢,无法快速响应,补偿效果较差。

在高阻接地故障辨识方面,残流增量法通过串并联电阻或改变消弧线圈补偿度,增大了故障线路

与健全线路的零序电流差异,因而受到国内学者的广泛研究。文献<sup>[14]</sup>提出智能接地配电系统的概念,综合消弧柜熄弧与中性点投入中电阻进行故障选线的优点,既能可靠熄弧又解决了单相接地选线难的问题;文献<sup>[15]</sup>采用中电阻与消弧线圈并联的方式来增大故障点上游的零序电流进行故障选线;文献<sup>[16]</sup>对故障各线路零序电流随过补偿度动态调节变化的特性进行了详细分析,为残流增量法的改进提供理论基础;文献<sup>[17]</sup>利用故障相接地实现可靠熄弧,结合故障相接地前后和故障相接地断开前后系统零序电压和各点零序电流的变化特征,进行故障选线。

为解决小电流接地系统发生中(高)阻接地带来的故障特征不明显问题,本文在前人研究基础上,创新性提出基于中性点电压主动调控的零序电流多判据选线方法。该方法通过调节变压器接地档位可实现人为主动调控系统零序电压,针对瞬时性接地故障能够快速熄灭故障电弧,实现系统不停电主动恢复稳定运行;针对永久性接地故障能够有效识别高阻接地故障,灵敏辨识小电流接地系统故障馈线。

## 1 单相接地故障性质辨识

电力系统接地故障分为瞬时性接地故障和永久性接地故障,其中瞬时性接地故障占比高于80%。线路发生瞬时性接地故障后,断开线路两端的断路器,故障电弧可自行熄灭,无需进行选线操作,重合闸便可恢复线路供电;线路发生永久性接地故障后,易在接地点产生弧光过电压,严重威胁设备乃至人身安全,必须切除故障线路才可恢复线路供电。同时,考虑配电网发生单相接地故障后,进行接地故障性质辨识有利于提高接地故障处置与选线的准确

性,提升供电可靠性。

### 1.1 瞬时性接地故障主动熄弧

从调控系统零序电压角度出发,构造新型接地变压器分档调压原理图,如图 1 所示。

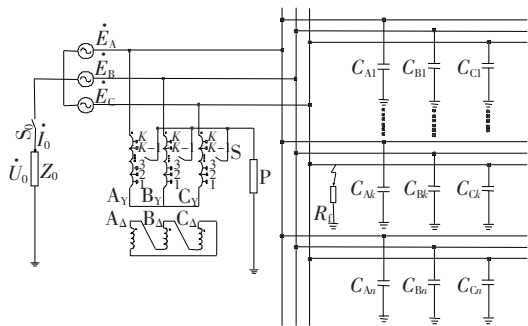


图 1 新型接地变压器分档调压原理示意

Figure 1 Schematic diagram of step-by-step voltage regulation of a new grounding transformer

图 1 中  $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$  对应于三相电源电势,采用 Y 型连接方式,从电源中性点处引出中性线经开关  $S_0$  以及阻抗  $Z_0$  接地。配电网共设置  $n$  条出线,其中,故障馈线为  $L_K$ ,  $C_i$  为馈线  $L_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) 的单相对地电容,  $R_f$  为故障线路过渡电阻。变压器采用 Y/Δ 接线,  $A_Y$ 、 $B_Y$ 、 $C_Y$  表示变压器一次侧绕组,此侧的各绕组上均匀布置多个分接抽头,依据中性点至馈线出口递增的模式将其按 1 至  $K$  编号。

系统正常运行时各相分接抽头处于断开状态。一旦发生单相接地故障,迅速调控故障相接地开关 S 连接分接抽头初始档位,开关 S 经保护装置 P 连接大地,则该接地变可进行等效为三绕组变压器<sup>[18]</sup>:接地点到系统侧等效为 1 号绕组;接地点到变压器中性点等效为 2 号绕组,接地变二次侧等效为 3 号绕组,3 个绕组的漏抗分别为  $x_{1\sigma}$ 、 $x_{2\sigma}$ 、 $x_{3\sigma}$ 。故障相绕组进行接地处理后绘出该相的正、负、零序等值电路,如图 2 所示。

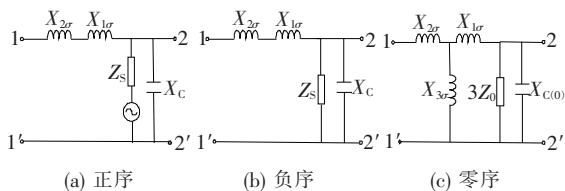


图 2 故障相正、负、零序等值电路

Figure 2 Positive, negative and zero sequence equivalent fault circuit

图 2 中  $Z_0$  为系统中性点阻抗;  $Z_S$  为电源内阻抗;  $X_C$  为线路对地正序或负序电抗;  $X_{C(0)}$  为线路对地零序电抗。等值电路 1-1' 端口对应接地点电压  $\dot{U}_1$ 、电流  $\dot{I}_1$ , 2-2' 端口对应故障点电压  $\dot{U}_2$ 、电流  $\dot{I}_2$ 。

电压变压器分抽头接地后 1-1' 端口正、负、零序电压和电流将满足:

$$\dot{U}_{1(1)} + \dot{U}_{1(2)} + \dot{U}_{1(0)} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{I}_{1(1)} = \dot{I}_{1(2)} = \dot{I}_{1(0)} \quad (2)$$

式(1)、(2)对应的电路如图 3 所示, 1-1' 端口将变为串联形式。

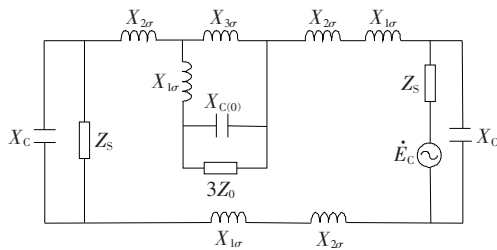


图 3 故障相等效序网

Figure 3 Equivalent sequence network diagram of fault phase

图 2(a)中容抗值  $X_C$  很大、内阻  $Z_S$  很小,可近似忽略;同理,图 2(b)中  $X_C$  与  $Z_S$  亦可忽略;图 2(c)中若中性点不接地或经高阻接地,零序对地电容容抗值很大,可近似看为开路;若中性点经消弧线圈接地,  $3Z_0$  与  $X_{C(0)}$  并联后导纳值较小,也可近似看为开路。因此,  $\dot{U}_{1(0)}$  可近似看为  $x_{3\sigma}$  两端电压,则图 3 近似等效如图 4 所示。

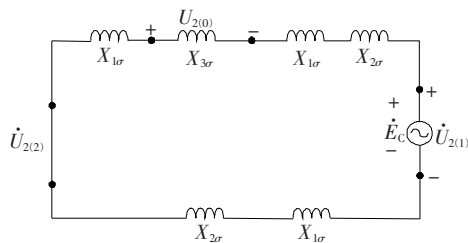


图 4 简化等效序网

Figure 4 Simplified equivalent sequence network diagram

由图 4 可知,故障点正序电压近似电源电压,负序电压近乎为零,故障相电压为正序电压与零序电压之和,即  $\dot{U}_f = \dot{U}_{2(1)} + \dot{U}_{2(0)} = \dot{E}_s + X_{3\sigma} \dot{I}_1$ 。由于图 4 中各元件均呈感性,因此,当变压器分接抽头接地后,故障点处零序电压相位将与正序电压相位近似

相反。在不考虑线损情况下,故障点处零序电压等于中性点电压。因此,中性点电压与故障相电源电压相位相反,接地故障发生后新型接地变压器分档调压相量如图5所示。

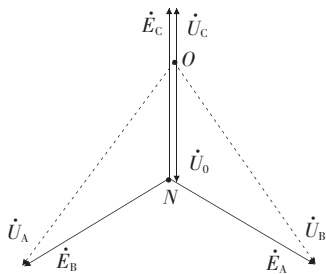


图5 新型接地变压器分档调压相量

Figure 5 Phasor diagram of new type grounding transformer step-by-step voltage regulation

图5中 $N$ 为系统中性点, $O$ 点为发生接地故障时零电位点, $\dot{U}_0$ 为系统中性点电压, $\dot{U}_C$ 为故障相电压。当2号绕组匝数为零时,配电网等效于中性点直接接地系统, $O$ 与 $N$ 点重合,故障相电压为电源电压,即 $\dot{U}_C = \dot{E}_C$ 。随着分抽头档位的增加,零电位点 $O$ 逐渐靠近于故障相,故障相电压 $\dot{U}_C$ 逐渐降低;当2号绕组匝数达到最大值时,故障相被直接接地,故障相电压 $\dot{U}_C$ 为零。因此,通过提高接地档位,可将故障电压抑制到故障电弧重燃电压以下,实现可靠灭弧。

为保障可靠灭弧,变压器分接抽头初始接地档位需满足:

$$X_0 > K - \frac{U_r K}{\sqrt{2} E_C} \quad (3)$$

式中  $U_r$  为故障电弧重燃电压; $K$  为分接抽头总数。

该方法在实现故障消弧的同时,限制了非故障相电压的上升幅度,降低了非故障相绝缘薄弱处的击穿风险,且接地旁路冲击电流较小,有效克服了现有基于消弧柜旁路故障点消弧技术的不足。利用配电网首端已有的接地变压器,在其一次绕组设置档位抽头进行接地,可直接对故障相电压进行分级调控,自然形成中性点位移电压。相较于已有的有源消弧方法,不需考虑注入电流幅值与相位,灭弧效果好且易于实现。

针对变压器选择问题,由于配电网正常运行时,系统中性点可能存在不平衡电压与谐波电压,但

此时电压、电流较小。因此,选择发生单相金属性接地故障时最大接地短路电流进行计算,中性点对地工频电压为故障相相电压 $\dot{U}_N$ ,配电网系统对地总电容为 $\dot{I}_{\Sigma C}$ ,变压器计算容量可表示为 $S = \sqrt{3} \dot{U}_N \dot{I}_{\Sigma C} / K_{gb}$ ,其中 $K_{gb}$ 为过负荷系数,通常按过负荷持续1 min确定,可取4.7<sup>[19]</sup>,并考虑配电网网架结构发展规划可留有裕度,则若系统电容电流总在45A左右时,变压器容量可选取120 kV·A。

## 1.2 永久性接地故障动态辨识

进一步分析小电流系统零序电流网络,可将图1零序网络等效简化为如图6所示。非故障馈线零序电流 $\dot{I}_{oi}$ 为支路对地电容电流,假定线路三相对地电容近似平衡,则各馈线对地电容电流可表述为

$$\dot{I}_{oi} = (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) j\omega C_{oi} = 3\dot{U}_0 j\omega C_{oi} \quad (4)$$

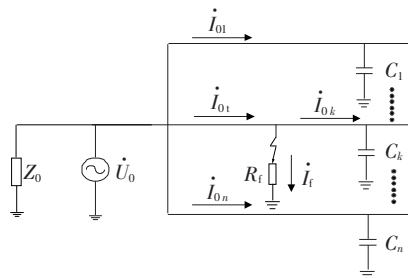


图6 小电流接地系统馈线等值零序网络

Figure 6 Equivalent zero sequence network diagram of feeders in small current grounding system

当系统发生单相接地故障时,非故障馈线以及故障馈线的非接地相对地拓扑不发生改变,支路对地电容不变;故障相接地点通常是点接触,即所占区域相对该段导线总长度可忽略不计,故障相对地电容也基本不变。因此,可认为各馈线零序电容电流正比于系统零序电压。

故障馈线零序电流 $\dot{I}_{ot}$ 应为零序电容电流 $\dot{I}_{ok}$ 与故障接地电流 $\dot{I}_{of}$ 之和,即

$$\dot{I}_{ot} = \dot{I}_{ok} + \dot{I}_{of} = \dot{U}_0 j\omega C_{ok} + \frac{\dot{U}_C}{R_f} \quad (5)$$

发生接地故障后将变压器的接地开关调节至初始档位进行故障灭弧,一定延时后逐级降低分接抽头接地档位。若为瞬时性接地故障,故障电弧熄灭,线路总零序电流 $\dot{I}_0 = 3j\omega C_0 \dot{U}_0$ , $C_0$ 为系统总对地电容。逐级降档过程中 $\dot{U}_0$ 线性减小,由齐性定理可知

$\dot{I}_0$  也随之呈线性减小。若为永久性接地故障,故障电弧无法熄灭,  $\dot{I}_0 = \dot{U}_C/R_f + 3j\omega C_0\dot{U}_0$ , 在降档过程中  $\dot{U}_0$  线性减小,  $\dot{U}_C$  线性增大,  $\dot{I}_0$  与  $\dot{U}_0$  呈非线性关系, 不满足线性减小趋势。因此, 线性降档调压  $\dot{U}_0$  过程中, 通过监测  $\dot{I}_0$  变化情况, 即可判别接地故障类型。

## 2 基于零序电流变化量的配电网接地故障多判据选线

### 2.1 基于零序电流比例增量的故障选线判据

在发生永久性接地故障时, 需快速识别故障馈线选线跳闸。在发生低阻接地故障条件下, 线路零序容抗远大于故障点对地电阻, 式(5)可近似简化为

$$\dot{I}_{0i} \approx \frac{\dot{U}_C}{R_f} \quad (7)$$

故障电流正比于故障相出口电压  $U_C$ , 对比式(4)、(7)可知, 降低变压器接地档位, 实质为提高故障相出口电压  $U_C$  以及降低中性点电压  $U_0$ , 等效为故障线路电流呈增大、非故障线路电流呈减小趋势的过程。据此, 在降档过程中观测各馈线零序电流变化情况, 可实现小电流接地系统故障馈线辨识。

建立接地故障选线判据, 当发生故障后, 选取变压器分接抽头处于初始档位  $X_0$  时, 测得各馈线零序电流作为参考基准电流, 定义零序电流比例系数为

$$K_{iX} = \frac{I_{0iX}}{I_{0iX_0}} \quad (8)$$

式中  $I_{0iX_0}$  为初始档位下测得的线路  $i$  零序电流;  $I_{0iX}$  ( $X=1, 2, \dots, X_0$ ) 为接地档位降低为  $X$  后测得的线路  $i$  零序电流。

根据式(4)可得, 非故障线路零序电流比例系数满足:

$$K_{iX_s} = \frac{U_{0X}}{U_{0X_0}} = \frac{X}{X_0} \leq 1 \quad (9)$$

根据式(7)可知, 故障线路零序电流比例系数满足:

$$K_{iX_f} \approx \frac{U_{CX}}{U_{CX_0}} = 1 + \frac{X - X_0}{K - X} > 1 \quad (10)$$

在降档过程中, 非故障馈线零序电流比例系数

始终小于 1 且呈下降趋势; 故障馈线零序电流比例系数大于 1 且呈上升趋势, 二者差异愈发明显, 据此构造零序电流比例增量判据(判据 1)为

$$K_{iX} > K_{\text{rel}} \frac{X}{X_0} \quad (11)$$

其中,  $K_{\text{rel}}$  为可靠系数, 取值为 1.1~1.2。

当过渡电阻值增大时, 无法忽略系统零序电压激励作用, 对地电容阻抗不再远大于对地电阻, 线路对地电容电流将占主导地位, 故障馈线零序电流随档位降低呈非线性减小趋势, 与非故障馈线差异不明显。此时, 降低变压器接地档位至一个较低数值, 可提升故障接地电流, 从而有效放大微弱故障特征。结合式(11), 选线动作门槛随档位降低逐步减小, 因此, 在过渡电阻值较大时, 所提选线方法仍可实现故障馈线的准确辨识。

### 2.2 基于零序电流斜率方差的故障选线判据

为提高高阻接地故障下的馈线辨识精度, 提出一种基于不同档位调节下线路零序电流斜率变化方差极值的选线补充判据。对比公式(4)、(5)可知: 在过渡电阻值较大时, 降档过程中非故障馈线呈线性变化趋势, 故障馈线呈非线性变化趋势。为判定各馈线零序电流线性变化情况, 定义不同档位间零序电流斜率为

$$K'_{iX} = I_{0iX} - I_{0i(X-1)}, X \geq 2 \quad (12)$$

同时, 构造高阻接地下的零序电流斜率方差判据(判据 2):

$$S^2[I_{0i}] = \frac{1}{X_0 - 1} \sum_{n=2}^{X_0} (\bar{K}'_{0iX} - K'_{0iX})^2 \quad (13)$$

筛选各馈线的零序电流斜率方差, 若满足:

$$S^2(I_{0i}) = \max[S^2(I_{0i})] \quad (14)$$

则馈线即可视为故障馈线。

利用降档过程中相邻档位间零序电流斜率方差大小来判断各馈线是否呈线性变化趋势, 将方差最大馈线视为故障馈线。判据 1、2 在实际操作过程中互为补充关系: 当故障点对地电阻远小于线路零序容抗时, 可忽略故障接地电流, 降档过程中故障馈线与非故障馈线均为线性变化趋势, 此时判据 1 有效动作, 判据 2 无法动作。当单相接地故障过渡电阻大于某一边界值时, 故障接地电流无法忽略且占主导作用, 在降档过程中故障馈线零序电流呈非线性递减, 判据 1 在高档位值可能出现拒动现象, 需要依

靠判据2实现选线操作。

与现有残留增量选线方法进行对比,本文所提选线方法抗过渡电阻值能力提升,通过在系统变压器设置分接抽头,可实现系统零序电压的主动调控,逐级放大故障特征分量,有效解决小电流接地系统发生高阻接地故障时选线困难问题。

### 3 配电网接地故障选线方法实现

配电网发生单相接地故障后故障性质辨识与选线方法实现框图如图7所示。

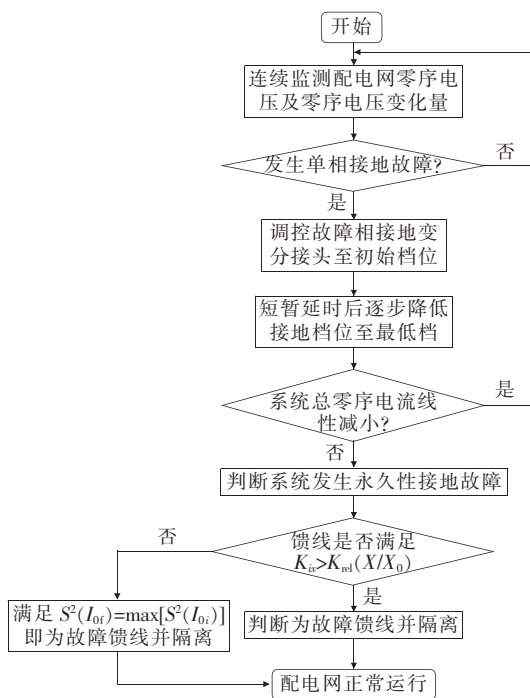


图7 配电网接地故障辨识与选线实现流程

Figure 7 Flow chart of ground fault identification and line selection in distribution network

系统运行过程中对配电网三相电压进行密切监测,当满足  $U_0 > 15\%U_P$  或  $\Delta U_0 > 3\%U_P$  时,判定系统发生单相接地故障。此时,将接地变分接抽头初始档位接地进行灭弧操作,为确保瞬时性接地故障电弧得以完全熄灭,需在初始档位停留5 s,随后逐步降低分接抽头的接地档位至最低档位,监测并记录降档过程中系统总零序电流  $I_0$  以及各馈线零序电流  $I_{0i}$  变化趋势。若  $I_0$  随档位降低呈线性递减趋势,判定为瞬时性接地故障,无需切断故障线路,退出接地变分档调压装置。若  $I_0$  随档位降低呈非线性变化,则可判定发生永久性接地故障,依据公

式(8)计算降档过程中各馈线零序电流比例系数  $K_{ix}$ ,若存在馈线满足  $K_{ix} > K_{rel}(X/X_0)$ ,即可判断为故障馈线并隔离。若不满足上述条件,计算各馈线零序电流方差  $S^2[I_{0i}]$ ,方差最大即为故障馈线,隔离并恢复供电。

### 4 仿真分析

在PSCAD/EMTDC中搭建配电网单相接地故障模型,如图8所示,共设置4条出线,各出线的仿真参数如表1所示, $l$ 对应于长度, $d$ 表示阻尼率, $C_0$ 为对地电容。

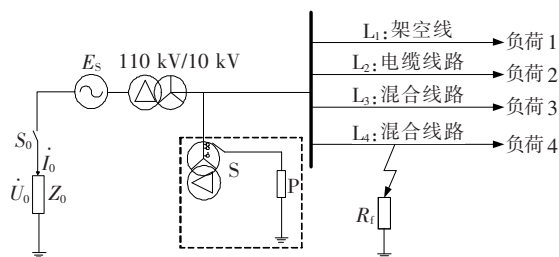


图8 10 kV配电网单相接地故障仿真模型

Figure 8 Single-phase ground fault simulation model of 10 kV distribution network

表1 馈线仿真参数

Table 1 Feeder simulation parameters

馈线编号	线路类型	$l/\text{km}$	$d/\%$	$C_0/\mu\text{F}$
L <sub>1</sub>	架空线	15	4.00	0.075
L <sub>2</sub>	电缆线	15	3.00	0.900
L <sub>3</sub>	混合线	28	3.08	0.855
L <sub>4</sub>	混合线	24	3.11	0.670

接地变系统侧各相绕组均匀布置10个分接抽头,按照越靠近系统侧档位越高的顺序将其从1~10进行编号。系统采用中性点经消弧线圈接地方式消弧线圈电感为0.924 H。

#### 4.1 接地故障性质辨识

为验证本文所提故障类型辨识方法的准确性,模拟线路发生瞬时性接地故障以及  $R_f = 200, 1\,000 \Omega$  的永久性接地故障。

已知10 kV配电网的临界熄弧峰压为0.22 Uphm<sup>[20]</sup>,本实验设置电弧重燃电压  $U_r = 1.8 \text{ kV}$ ,计算可得接地变初始档位为  $X_0 = 8$ 。设置线路L4发生C相接地故障,将初始档位进行接地,5 s后逐步降低分接抽头的接地档位,记录降档过程中系统

总零序电流  $I_0$  变化趋势,如图 9 所示,当系统发生瞬时性接地故障时,经过接地变分档调压干预后故障电弧熄灭,线路总零序电流随着档位降低呈线性减小趋势;当系统发生  $R_f=200\ \Omega$  的永久性接地故障时,由于  $R_f$  较小,故障线路零序电流占主导地位,线路总零序电流随着档位降低呈非线性增大趋势;当系统发生  $R_f=1\ 000\ \Omega$  的永久性接地故障时,  $R_f$  较大,系统对地电容电流占主导地位,线路总零序电流随着档位降低呈非线性减小趋势。因此,通过观测降档过程中系统总零序电流变化情况,即可判断线路故障类型。

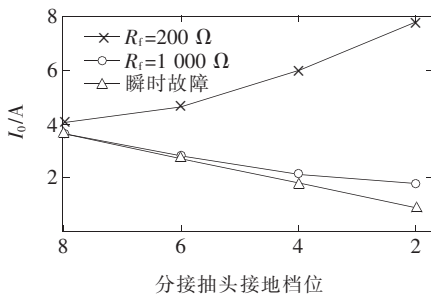


图 9 变压器降档过程中零序电流变化情况

Figure 9 Changes of zero sequence current during transformer downshift

#### 4.2 基于零序电流比例增量的配电网接地故障选线

为验证本文所提判据 1 在中(低)阻接地故障下选线的准确性,模拟谐振接地运行方式下线路  $L_4$  发生  $R_f=200,1\ 000,2\ 000\ \Omega$  的永久性接地故障,调控接地变压器的档位依次为  $X=8,6,4$ ,监测降档过程中各馈线零序电流比例系数变化情况,如图 10 所示;记录零序电流比例系数,如表 2 所示。

将表 2 所得数据绘制为直角坐标图(图 10),虚线为本文所提判据 1 在  $K_{rel}=1.2$  时随档位变化情况,虚线上半部分为保护动作范围。系统发生  $R_f=200\ \Omega$  的永久性接地故障时,由于  $R_f$  较小,可近似认为故障馈线零序电流正比于故障相电压,因此,降档过程中故障馈线呈线性递增趋势,非故障馈线呈线性递减趋势,此时判据 1 有效动作,判据 2 无法动作。当系统发生  $R_f=1\ 000\ \Omega$  的永久性接地故障时,由于  $R_f$  较大,无法忽略故障馈线对地电容电流,但此时故障接地电流仍占主导地位,线路总零序电流随着档位降低呈非线性增大趋势,此时判据 1、2 均可正常动作。继续增大过渡电阻值,当  $R_f=2\ 000\ \Omega$  时,零序电容电流占主导地位,线路总零序

电流随着档位降低呈非线性减小趋势,此时判据 1 在低档位点仍可正确动作,高档位点出现拒动情况,需要依靠判据 2 进行选线操作。

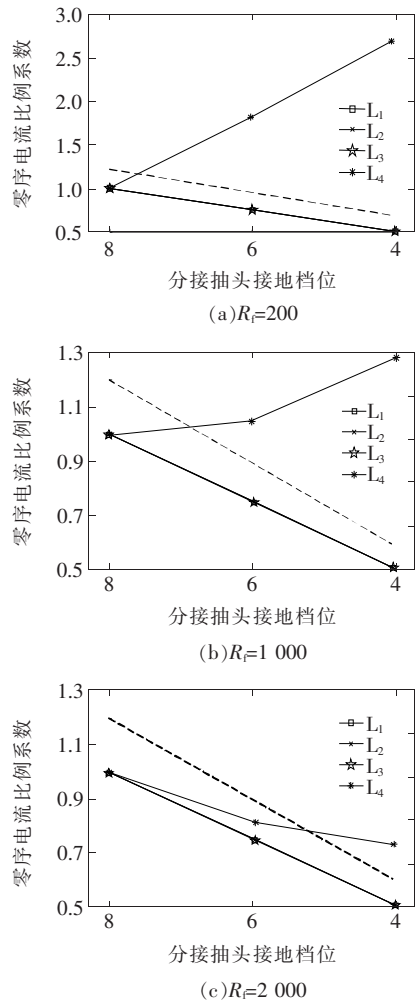


图 10 变压器降档过程中各馈线零序电流比例系数变化情况

Figure 10 Change of zero sequence current proportional coefficient of each feeder during transformer downshift

表 2 不同档位下各馈线零序电流比例系数

Table 2 The measured value of feeders' zero-sequence currents under different winding taps

$R_f/\Omega$	$X$	$K_{1X}$	$K_{2X}$	$K_{3X}$	$K_{4X}$
200	8	1.000	1.000	1.000	1.000
	6	0.752	0.754	0.755	1.834
	4	0.504	0.506	0.506	2.746
1 000	8	1.000	1.000	1.000	1.000
	6	0.752	0.753	0.754	1.047
	4	0.504	0.504	0.504	1.284
2 000	8	1.000	1.000	1.000	1.000
	6	0.752	0.754	0.754	0.828
	4	0.504	0.504	0.504	0.750

### 4.3 基于零序电流斜率方差的配电网接地故障选线

为验证本文所提判据2在高阻接地故障下选线的准确性,模拟谐振接地方式下发生 $R_f=3\ 000$ 、 $5\ 000\ \Omega$ 时的永久性接地故障,调控变压器分接抽头由初始档位到最低档位,降档过程中观测各馈线零序电流变化情况,并将零序电流斜率方差记录如表3所示,可知馈线 $L_4$ 的零序电流方差最大。因此,可判馈线 $L_4$ 为故障馈线,与实际模拟的故障馈线吻合。

$R_f=3\ 000\ \Omega$ 时各馈线零序电流变化情况如图11所示,可见在线路发生高阻接地故障时,逐级降低变压器接地档位,非故障馈线零序电流呈线性递减趋势,故障馈线零序电流呈非线性递减趋势,与理论相符。

表3 不同档位下各馈线零序电流斜率方差

Table 3 Variance of the zero sequence current slope of each feeder in each gear level

$R_f/\Omega$	各馈线零序电流斜率方差				选线结果
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	
3 000	0.020	0.068	0.069	0.200	$L_4$
5 000	0.029	0.083	0.075	0.146	$L_4$

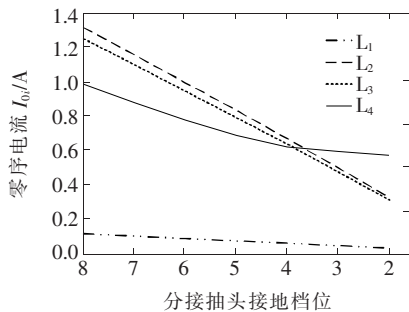


图11 变压器降档过程中各馈线零序电流变化情况

Figure 11 Changes of zero sequence current during transformer downshift

## 5 结语

本文针对小电流接地系统发生高阻接地故障后准确选取故障馈线困难的问题,建立了基于中性点电压主动调控的零序电流多判据选线方法。相较于现有方法,本文所提方法具有如下优势:

1) 针对瞬时性接地故障能够直接调控系统零序电压,实现故障电弧快速熄灭,操作简单且有效降低

非故障相击穿风险;

2) 针对永久性接地故障,在中低阻情况下利用零序电流比例增量法进行选线,在高阻情况下利用零序电流斜率方差法进行选线,原则上不受过渡电阻影响,显著提升小电流接地系统选线准确性。

### 参考文献:

- [1] 薛永端,李娟,徐丙垠,等. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(22):5703-5714.  
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin, et al. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [2] 王胜,李星月,刘竟成,等. 川渝地区建设天然气化工产业集群的必要性、可行性及实施路径[J]. 天然气工业,2021,41(6):111-119.  
WANG Sheng, LI Xingyue, LIU Jingcheng, et al. Construction of natural gas chemical industry cluster in the Sichuan-Chongqing area: Necessity, feasibility and implementation measures[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 111-119.
- [3] 苏铭. 长江经济带能源协同发展研究[J]. 宏观经济管理,2019(12):37-41+57.  
SU Ming. A study on integrated energy development in the Yangtze River Economic Belt[J]. Macroeconomic Management, 2019(12): 37-41+57.
- [4] 刘朋跃,邵文权,弓启明,等. 利用零序电流相位变化特征的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电网技术,2022,46(5):1830-1838.  
LIU Pengyue, SHAO Wenquan, GONG Qiming, et al. Fault line detection of flexible grounding system based on phase variation characteristics of zero-sequence current[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1830-1838.
- [5] 薛太林,靳贰伟,吴杰. 基于五次谐波和混沌系统的谐振接地系统故障选线[J]. 电测与仪表,2022,59(1):176-182.  
XUE Tailin, JIN Erwei, WU Jie. Fault line selection of resonant grounding system based on fifth harmonic and chaotic system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 176-182.
- [6] 王建元,张峥,杨爽. 基于五次谐波法与改进型锁相环结合的配电网故障选线研究[J]. 东北电力大学学报,2018,38(3):1-7.  
WANG Jianyuan, ZHANG Zheng, YANG Shuang. Fault



- line selection of resonant grounding system based on fifth harmonic and chaotic system[J]. Journal of North-east Electric Power University, 2018, 38(3): 1-7.
- [7] 谢松伟, 薛永端, 吴卫堃, 等. 单相断线坠地故障暂态特征及暂态选线方法适用性[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 126-136.
- XIE Songwei, XUE Yongduan, WU Weikun, et al. Transient characteristics of single-phase line breaking and grounding fault and applicability of transient line selection methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 126-136.
- [8] 王开科, 熊小伏, 肖扬, 等. 基于负序电流的主动配电网单相断线故障保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 10-18.
- WANG Kaike, XIONG Xiaofu, XIAO Yang, et al. Single-phase break fault protection method for an active distribution network based on negative sequence current [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 10-18.
- [9] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 84-89.
- ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study for negative sequence current distributing and ground fault protection in middle voltage power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 84-89.
- [10] COSTA F B, SOUZA B A, BRITO N S D, et al. Real-time detection of transients induced by high-impedance faults based on the boundary wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 5312-5323.
- [11] 朱鹏, 夏向阳, 李明德, 等. 基于能量比值分析的直流输电线路故障判别[J]. 中国电力, 2020, 53(8): 85-90 + 99.
- ZHU Peng, XIA Xiangyang, LI Mingde, et al. Fault identification of DC transmission lines based on energy ratio analysis[J]. Electric Power, 2020, 53(8): 85-90 + 99.
- [12] 曾祥君, 胡京莹, 王媛媛, 等. 基于柔性接地技术的配电网三相不平衡过电压抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 678-684.
- ZENG Xiangjun, HU Jingying, WANG Yuanyuan, et al. Suppressing method of three-phase unbalanced overvoltage based on distribution networks flexible grounding control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 678-684.
- [13] 曾祥君, 黄明玮, 王文, 等. 配电网三相不平衡过电压有源抑制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 61-69.
- ZENG Xiangjun, HUANG Mingwei, WANG Wen, et al. Research on active suppression method of three-phase unbalanced overvoltage for distribution networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 61-69.
- [14] 朱吉然, 康童, 王风华, 等. 基于智能电子装置建模方法的配电终端自描述技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 149-157.
- ZHU Jiran, KANG Tong, WANG Fenghua, et al. Self-description technology of a distribution terminal unit based on IED modeling method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 149-157.
- [15] 吉兴全, 陈金硕, 张玉敏, 等. 基于 CNN-SVM 的配电网故障分类研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 94-100.
- JI Xingquan, CHEN Jinshuo, ZHANG Yumin, et al. Fault classification in distribution network based on CNN-SVM[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 94-100.
- [16] 周鹏, 刘伟博, 王交通, 等. 基于综合内积变换的小电阻接地系统高阻故障检测方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(9): 70-76.
- ZHOU Peng, LIU Weibo, WANG Jiaotong. A high impedance fault detection method of small resistance grounding system based on integrated inner product transformation[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(9): 70-76.
- [17] 刘健, 张志华, 芮俊, 等. 一二次配合的配电线路自适应重合闸[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 26-32.
- LIU Jian, ZHANG Zhihua, RUI Jun, et al. Adaptive reclosing of distribution lines based on primary and secondary device coordination[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 26-32.
- [18] 苏磊, 陈璐, 徐鹏, 等. 基于深度信念网络的变压器运行状态分析[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 56-62.
- SU Lei, CHEN Lu, XU Peng, et al. Operation condition analysis of transformer based on deep belief network [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 56-62.
- [19] 张琦雪, 曾祥君, 徐金, 等. 大型发电机中性点组合型接地方式的分析与探讨[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 217-222.
- ZHANG Qixue, ZENG Xiangjun, XU Jin, et al. Analysis and discussion on combination-type grounding scheme for large-sized generator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 217-222.
- [20] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地(第 2 版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 40-45.