Vol.43 No.1 Jan. 2023 😵

基于负序电压变化量的灵活接地配电网 永久性单相接地故障定位

尹 力¹, 孔令昌², 王冠华², 王 华¹, 梁 睿², 彭 楠²
 (1. 国网江苏省电力有限公司 连云港供电分公司, 江苏 连云港 222004;
 2. 中国矿业大学 电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:针对灵活接地配电网,提出一种基于负序电压变化量的灵活接地配电网永久性单相接地故障定位方法。首先基于并联小电阻投入前后的负序电压变化量确定故障区域,其次根据零序电流修正投影比例系数 判断故障分支从而确定故障区段,然后利用负序电压变化量测量值与计算值之间的偏差计算故障概率,对比 故障区段内各个虚拟节点的故障概率进行精确定位,同时提出一种适用于该区段定位方法的测量点优化布 置方案。最后利用 PSCAD 搭建仿真模型,仿真数据分析验证了所提永久性单相接地故障定位方法的有效性 及可靠性。

关键词:灵活接地配电网;负序电压变化量;修正投影比例系数;故障概率;故障定位 **中图分类号:**TM 77 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202204070

0 引言

配电网拓扑结构日趋复杂,小电阻接地方式应 用越来越多。中性点经小电阻接地系统可以快速切 断故障电流、降低过电压水平,但小电阻接地方式不 能够区分瞬时接地故障与永久性接地故障类型,使 跳闸次数增多^[1],降低了供电可靠性,而灵活接地方 式能够有效确保发生瞬时接地故障时不会中断给用 户的供电,因此消弧线圈并联小电阻的灵活接地方 式得到了一定应用^[2]。

现有的配电网单相接地故障定位技术可以分为 故障区段定位和精确定位两大类。近年来配电网故 障区段定位技术^[3]日趋成熟,文献[4-5]利用故障点 上下游区段电流与电压相关性的不同来确定故障区 段;文献[6]针对不接地配电网提出一种基于故障方 向测度的配电网故障区段定位方法;文献[7]提出一 种量测条件受限下的基于轻量级梯度提升机算法的 故障区段定位方法;文献[8]通过分析故障线路和健 全线路行波全景波形中幅值、频率与极性的差异和 相似性来确定故障线路;文献[9]通过分析零序网络 的相频特性,提出一种基于零序电流首容性分量能 量的小电流接地故障区段定位方法;文献[10]基于 零序特征量,提出一种适用于谐振接地配电网接地 故障区段定位方法。同时故障精确定位研究^[11]也取

收稿日期:2021-11-05;修回日期:2022-03-19

在线出版日期:2022-04-25

基金项目:国家电网有限公司科技项目(J2021032);国家自然 科学基金面上项目(52077215)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC(J2021032) and the General Program of the National Natural Science Foundation of China(52077215) 得了长足发展,文献[12]通过分析行波传播时差矩 阵与行波到达时差矩阵之间的关系,提出一种配电 网故障精确定位算法;文献[13]基于故障暂态波形 的整体波幅差异来确定故障范围,并利用整体波幅 偏差与故障位置之间的比例关系实现故障精准定 位;此外还有利用零序阻抗法^[14]、故障行波沿线突变 特征^[15]、同步相量测量单元^[16-17]等方法实现故障精 确定位。

配电网灵活接地方式可以充分发挥消弧线圈和 小电阻接地方式的优点^[18],近年来有学者在此方面 进行了故障定位的研究,例如:文献[19]基于灵活接 地系统发生单相接地故障时零序测量导纳特征,提 出了一种基于零序导纳变化的接地故障方向判别算 法;文献[20]利用投入并联小电阻产生的电流行波 来进行故障定位;文献[21]利用并联小电阻投入前 后零序电流与电压相位差的变化特征来实现故障选 线。上述方法应用于灵活接地系统时,仅利用并联 小电阻投入前后单一阶段的故障特征,或所需的测 量节点较多,经济费用高。因此利用有限测量节点, 同时考虑小电阻投入前后的电气量变化特征,研究 应用于中性点灵活接地配电网的故障定位方法具有 重要意义。

针对灵活接地配电网,本文提出在发生永久性 单相接地故障时并联小电阻自动投入后,首先利用 并联小电阻投入前后负序电压变化量和零序电流修 正投影比例系数进行故障区段定位,然后利用负序 电压变化量测量值与计算值的偏差计算故障概率, 最后对比故障区段各个虚拟节点的故障概率得到精 确的故障位置。 基于负序电压变化和零序电流投影的故障
 区段定位

1.1 并联小电阻投入前后负序电压变化规律

灵活接地配电网示意图如图1所示。图中:a端 为母线侧,由b端引出2条分支线路bc和bd,c端和d 端为线路末端,在分支线路bd某一点f发生单相接 地故障;E为主网电压源,视为无穷大电源,其阻抗 近似为0;R_N为中性点并联小电阻;S为故障后投入 小电阻的开关;L为中性点接地消弧线圈电感;l₁—l₄ 分别为线路ab、bc、bf和fd(下文变量下标中分别用 l₁—l₄表示)的长度;R_f为故障过渡电阻。





在a,c,d端布置测量节点测量负序电压,分析 故障后并联小电阻投入前后的负序电压变化规律, 并联小电阻投入前后的负序网络见附录A图A1。 图中: $Z_{T}^{(2)}$ 为系统侧变压器及母线的负序阻抗之和; $Z_{I_{4}}^{(2)} - Z_{I_{4}}^{(2)}$ 分别为线路 $l_{1} - l_{4}$ 的负序阻抗; $Z_{cload}^{(2)}, Z_{dload}^{(2)}$ 分别为c端和d端的负荷负序阻抗; $\Delta U_{f}^{(2)}, \Delta U_{c}^{(2)}, \Delta U_{a}^{(2)}, \Delta I_{I_{4}}^{(2)} - \Delta I_{I_{4}}^{(2)}$ 和 $\Delta I_{f}^{(2)}$ 分别为并联小电阻投入前后线路 $l_{1} - l_{4}$ 和故障点f处的负序电流变化量。

并联小电阻投入前,系统中性点经消弧线圈接 地,属于小电流接地方式,各测量节点负序电压相差 较小。负荷阻抗通过线路末端的负载变压器折算后 远大于线路阻抗,故障点下游线路负序阻抗和负荷 阻抗之和远大于故障点上游的负序阻抗,所以故障 后的负序电压源产生的负序电流绝大部分通过故障 路径从故障点流向系统侧,而流过非故障区段的负 序电流较小。

并联小电阻投入后,中性点由小电流接地方式 转变为大电流接地方式,系统零序通路阻抗在小电 阻动作后变小,导致负序通路分压相对增大。故障 点的负序电压最大,所以故障点附近的测量节点负 序电压显著升高。因为故障线路增加了阻性电流, 故障点负序电流变大,所以故障点上游故障线路流 经的负序电流增加较大,而故障点上游的非故障线 路和故障点下游流过的负序电流增加较少。因此, 故障点上游非故障线路和故障点下游流过的负序电 流变化量极小,而故障点上游故障线路流过的负序 电流变化量近似等于故障点的负序电流变化量。

综上所述,有以下条件成立:

$$\left[\Delta I_{f}^{(2)} \approx \Delta I_{l_{3}}^{(2)} \approx \Delta I_{l_{1}}^{(2)} \\ \Delta I_{l_{2}}^{(2)} \approx \Delta I_{l_{4}}^{(2)} \approx 0 \right]$$
 (1)

因为负荷阻抗远大于线路和系统阻抗之和,可 将负荷支路视为开路,则并联小电阻投入前后的负 序网络可简化为图2。



图 2 并联小电阻投入前后的简化负序网络 Fig.2 Simplified negative-sequence network before

and after switching parallel small resistor

由图2可见,负序网络中无并联小电阻,因此负 序阻抗不受并联小电阻投入的影响,其大小只表示 测量节点到系统侧的故障路径距离,并联小电阻前 后负序阻抗不变,c端、d端的负序电压变化量分别 如式(2)、(3)所示。

$$\Delta U_{c}^{(2)} = \Delta U_{d}^{(2)} - \Delta I_{f}^{(2)} Z_{1}^{(2)}$$
(2)

$$\Delta U_d^{(2)} = \Delta U_f^{(2)} \tag{3}$$

由上述分析可看出,受到故障线路阻抗压降的 影响,c端的负序电压变化量会小于d端。因此,对 于故障点同侧(都处于上游或下游)的负荷末端测量 节点,其距离故障点越远,负序电压变化量越小。对 于所有的测量节点,由于故障点下游流过的负序电 流极小,可看作开路,下游测量节点负序电压变化量 接近故障点的负序电压变化量。因此测量的负序电 压变化量最大值出现在故障点下游距离故障点最近 的测量节点处,由此可知通过各测量节点的负序电 压变化值可以判断测量节点与故障区段之间的位置 关系。

1.2 零序电流在负序方向的投影

以图1为例研究并联小电阻后故障线路bf、故障点上游非故障线路bc和故障点下游非故障线路fd的负序电流与零序电流的关系,图1所示配电网发生单相接地故障时的复合序网如附录A图A2 所示。图中:i=0,1,2分别表示零序、正序、负序; $I_{f}^{(i)}$ 为故障点的各序分量电流; $Z_{T}^{(i)}$ 为系统侧变压器及母线各序阻抗之和; $Z_{cload}^{(i)}$ 和 $Z_{dload}^{(i)}$ 分别为c端和d端的负荷各序阻抗; $Z_{L}^{(i)} - Z_{L}^{(i)}$ 分别为线路ab、bc、bf和fd的各序阻抗。

设线路阻抗角为α,负荷阻抗角为β。在负序网络中,负荷阻抗折算后远大于线路阻抗,线路bc包含c端负荷,因此在计算线路ab和bc的并联负序阻

抗时可以忽略线路bc;零序网络中,线路fd末端所 接10 kV / 0.4 kV变压器一次侧多为△接线,因此d 端的零序阻抗很大,即故障线路bf的负序电流和零 序电流分别为:

$$I_{l_{3}}^{(2)} \approx I_{f,\text{post}}^{(2)} \frac{Z_{l_{4}}^{(2)} + Z_{d-\text{load}}^{(2)}}{Z_{T}^{(2)} + Z_{l_{1}}^{(2)} + Z_{l_{3}}^{(2)} + Z_{l_{4}}^{(2)} + Z_{d-\text{load}}^{(2)}}$$
(4)

$$I_{l_3}^{(0)} \approx I_{f.\text{post}}^{(0)}$$
 (5)

式中: $I_{f,post}^{(2)}$ 、 $I_{f,post}^{(0)}$ 分别为并联小电阻投入后故障点的 负序电流、零序电流。

定义θ为零序电流超前负序电流的夹角,即投 影角,因为故障点在并联小电阻投入后的负序和零 序电流同相位,所以故障线路*bf*的零序电流在负序 方向的投影角θ_b为:

$$\theta_{l_3} = \arg\left(\frac{I_{l_3}^{(0)}}{I_{l_3}^{(2)}}\right) = 0^{\circ}$$
 (6)

故障线路*bf*的零序电流在负序方向的投影量 *I*_H,为零序电流本身的幅值,表达式为:

$$I_{\rm H,l_3} = \left| I_{\rm l_3}^{(0)} \left| \cos \theta_{\rm l_3} = \right| I_{\rm l_3}^{(0)} \right| \tag{7}$$

同理可得故障点上游的非故障线路*bc*的零序 电流在负序方向的投影量*I*_{H.l.}小于零序电流的幅值, 其表达式为:

$$I_{\rm H,l_2} = \left| I_{l_2}^{(0)} \right| \cos \theta_{l_2} = \left| I_{l_2}^{(0)} \right| \cos (\alpha - \beta) < \left| I_{l_2}^{(0)} \right| \qquad (8)$$

故障点下游的非故障线路 fd 的零序电流在负 序方向的投影量 I_{III4}小于零序电流的幅值,其表达 式为:

$$I_{\text{H.l}_{4}} = \left| I_{l_{4}}^{(0)} \right| \cos \theta_{l_{4}} = \left| I_{l_{4}}^{(0)} \right| \cos (\alpha - \beta) < \left| I_{l_{4}}^{(0)} \right|$$
(9)

综上所述,并联小电阻后故障线路的零序电流 在负序方向的投影量等于零序电流本身的幅值,而 非故障线路(包括故障点上游)零序电流在负序方向 的投影量会小于零序电流的幅值。

定义投影比例系数 k 为各线路的零序电流和其 在负序方向的投影量之差与零序电流本身的比值, 其表达式为:

$$k = \frac{\left| I_{1}^{(0)} \right| - I_{\text{H,l}}}{\left| I_{1}^{(0)} \right|} = \frac{\left| I_{1}^{(0)} \right| - \left| I_{1}^{(0)} \right| \cos \theta_{1}}{\left| I_{1}^{(0)} \right|} = 1 - \cos \theta_{1} \quad (10)$$

式中:下标1表示线路。

由此发现投影比例系数 k 最终变为由投影角构成的函数。

理论上,故障线路的零序电流在负序方向的投 影量为其本身的幅值,比例系数*k*应为0,但是考虑 到变压器及母线阻抗角和线路阻抗角不可能完全相 等,即故障线路的零序电流与负序电流的夹角不为 0°,导致比例系数*k*不为0。因此设置一个比例系数 阀值*k*_{set},在*k*较小时,使*k*等于0,本文设置*k*_{set}=0.1,因 此故障线路判据如下:

$$J = \begin{cases} 0 & 0 \le k \le k_{\text{set}} \\ 1 & k_{\text{set}} \le k \le 1 \end{cases}$$
(11)

式中:J为修正投影比例系数。J=0时,线路为故障 线路;J=1时,线路为非故障线路。

1.3 测量点优化布置方案

对于一个大规模配电网系统,为了减少测量设备成本费和降低计算量,本文提出一种测量点优化布置方案,该方案针对不同的节点位置布置负序电压测量节点和序电流测量节点,同时将配电网划分为多个区域,在每个区域内布置1个统计节点,具体的布置原则如下。

1)负序电压测量节点:根据1.1节分析所得结 论,测量的负序电压变化量最大值会出现在故障点 下游距离故障点最近的测量节点,所以在每条线路 的末端布置1个负序电压测量节点以确定故障区段 附近区域。

2)序电流测量节点:根据1.2节分析可知,利用 零序电流修正投影比例系数可有效判别故障分支, 所以在每条线路的分支处布置1个序电流测量节点 以正确判断故障分支。

3)统计节点:为了减少主站压力以及有效降低 计算量,将一个大规模配电网系统划分为多个测量 节点和节点数目大致相等的区域,在每个区域内布 置1个统计节点,该统计节点负责统计所在区域内 所有负序电压测量节点测得的负序电压变化量的最 大值。

本文对一个 IEEE 34 节点系统标准模型进行改进,其具体的测量点布置方案如附录 A 图 A3 所示, 图中将配电网划分为 3 个区域(区域 I、Ⅱ、Ⅲ),实际中可以根据配电网的具体规模大小划分为相应数量的区域。

1.4 故障区段定位流程

由1.1节和1.2节分析可知,故障区段附近的测量节点的负序电压变化量较大,同时根据零序电流 在负序方向的修正投影比例系数可以排除非故障分 支,因此将两者相结合可用于故障区段定位。同时 基于1.3节所提测量点优化布置方案,整个故障区段 定位流程具体的实施步骤如下。

1)采集故障数据:故障发生后,全网所有测量节 点采集并联小电阻投入前后的负序电压变化量,以 及并联小电阻投入后的负序、零序电流相位。

2)确定故障区域:各区域的统计节点统计所在 区域所有负序电压测量节点在并联小电阻投入前后 的负序电压变化量最大值,比较全网统计节点所得 结果从而确定全网的负序电压变化量最大值,将该 最大值所在区域判定为故障区域。 3)确定故障分支:根据采集的负序、零序电流相 位计算故障区域内每条线路的投影比例系数,进而 根据式(11)判断故障分支从而确定故障区段。

2 基于负序电压变化量的故障精确定位

2.1 基于负序电压变化量的故障精确定位原理

第1节分析负序电压变化量时忽略了并联导纳,但是当线路较长时,并联电容较大,此时负序电流会随着距离的变化而变化,节点导纳矩阵必须考虑线路的并联导纳。为了忽略故障区段线路的并联导纳,将电流测量节点的负序电流修正为故障区段首端的负序电流,近似作为故障点的负序注入电流。 以图1为模型,得到如图3所示的负序注入电流修正示意图,基于此说明如何修正注入负序电流。



图 3 负序注入电流修正示意图 Fig.3 Schematic diagram of correction of

negative-sequence injection current

由图3可见,在故障点f发生永久性单相接地 故障时,假设故障区段内有j个虚拟故障节点,即 v_1 、 v_2 、…、 v_i 、…、 v_j ,离故障点最近的虚拟故障节点为 v_j ;b为距离故障区段最近的负序电流测量点,d为负荷 末端; $Z_{1b}^{(2)}$ 、 $Z_{v_j,d}^{(2)}$ 分别为主变到测量节点b的负序 阻抗之和、测量节点b到虚拟故障节点 v_1 的负序阻 抗之和、虚拟故障节点 v_j 到负荷末端d的负序阻抗之 和; $\Delta U_b^{(2)}$ 、 $\Delta I_{co}^{(2)}$ 分别为b端负序电压变化量、b端负序电流变化量、故障点近似修正负序电流变化 量; $Y_{bet}^{(2)}$ 、 $Y_{v_j,d}^{(2)}$ 分别为j则量节点b到虚拟故障节点 v_1 的 负序导纳之和、虚拟故障节点 v_j 到负荷末端d的负序 导纳之和、

将bd段线路用τ型集中参数等值电路表示。先 利用b端到系统侧的阻抗和b端下游负序电流求出b 端负序电压,如式(12)所示。

$$\Delta U_b^{(2)} = \Delta I_b^{(2)} Z_{\text{T-}b}^{(2)}$$
(12)

然后利用b端到 v_1 端的导纳,将b端的负序电流修正为故障区段 v_1 端的负序电流,具体如式(13) 所示。

$$\Delta I_{co}^{(2)} = \Delta I_{b}^{(2)} + \Delta U_{b}^{(2)} Y_{b-v}^{(2)} = \Delta I_{b}^{(2)} \left(1 + Z_{T-b}^{(2)} Y_{b-v}^{(2)} \right)$$
(13)

由此可以得到故障点的负序电流变化量,即注 入负序电流通用表达式为:

$$\Delta I_{f}^{(2)} \approx \Delta I_{eo}^{(2)} = \Delta I_{M}^{(2)} \left(1 + Z_{T-M}^{(2)} Y_{M-v_{1}}^{(2)} \right)$$
(14)
式中:*M*为距离故障区段最近的负序电流测量节点;

 $Z_{\text{T-M}}$ 为主变压器到测量节点M的阻抗之和; Y_{M-r_1} 为测量节点M到故障区段首端节点 v_1 的线路导纳之和。

结合各负序电压测量节点与虚拟故障节点的负 序导纳矩阵以及式(14)可得负序电压变化量矩阵, 如式(15)所示。

$$\Delta \boldsymbol{U}^{(2)} = \left[\boldsymbol{Y}^{(2)}\right]^{-1} \Delta \boldsymbol{I}_{f}^{(2)} \tag{15}$$

利用式(15)求得负序电压变化量矩阵后,从中 提取出虚拟故障节点 v_1 发生故障时,各测量节点的 负序电压计算变化量矩阵 $\Delta U_{ex}^{(2)}$,同时通过测量得到 故障点发生故障时各测量节点的负序电压测量值变 化量矩阵 $\Delta U_{m}^{(2)}$ 。

定义偏差矩阵 σ 为负序电压计算变化量矩阵与测量值变化量矩阵差值的绝对值,从而得到各虚拟故障节点 v_i 的偏差矩阵 σ_v ,其表达式如下:

$$\boldsymbol{\sigma}_{v_i} = \left| \Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{c},v_i}^{(2)} - \Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}^{(2)} \right| \tag{16}$$

对每个虚拟故障节点 v_i 的偏差矩阵计算其2-范数 η_v ,表达式如下:

$$\boldsymbol{\eta}_{v_i} = \left\| \boldsymbol{\sigma}_{v_i} \right\|_2 \tag{17}$$

定义故障概率P为:

$$P = \frac{\eta_{\max} - \eta_{v_i}}{\eta_{\max} - \eta_{\min}} \tag{18}$$

式中:η_{min}和η_{max}分别为所有偏差矩阵2-范数中的最小值和最大值。

依次在故障区段内求取各个故障虚拟节点的故障概率,最大概率对应的故障虚拟节点即为故障节 点v_t,确定为故障位置。

由上述公式推导可知,负序电压偏差矩阵(式 (16))是根据负序电压计算值变化量和负序电压测 量值变化量的差值求取,进而得到每个虚拟故障节 点的故障概率(式(18))。其中并联小电阻投入前后 的负序电压变化量矩阵由负序导纳矩阵和修正负序 电流变化量计算所得,与故障过渡电阻无关,因此从 方法原理上分析可得过渡电阻值不影响本文方法的 故障定位精度。

对于设定的虚拟故障节点迭代间距,首先需要 保证在发生电压过零附近故障或者高阻故障等特殊 故障时,每迭代1个虚拟故障节点,各负荷末端检测 到的负序电压变化量仍有一定改变;其次需要保证 迭代间距不能过大,否则故障定位的准确度下降,而 迭代间距也不能过小,否则故障定位准确度虽然会 上升,但是基于负序电压变化量的故障精确定位算 法的计算规模会变大,导致计算速度减缓。因此,在 离线状态下每个线路区段要预先设置一个合适的虚 拟故障节点迭代间距,其具体步骤如下。

1)在该线路区段模拟单相故障接地,故障初相

角为0°,故障电阻为100Ω。在0.5%~5%范围内采 用不同的故障定位误差比*e*,分别计算此故障定位误 差比下相邻2个虚拟故障节点的负序电压变化量并 求其差值,最后对该故障区域内的所有电压测量节 点的差值求其平均数*U*_{Δι}。

2)使用最小二乘法并代入步骤1)的U_Δ和e,拟 合故障定位误差比与负序电压计算值变化量差值的 关系,得到拟合曲线。

3)按照电压互感器0.5%的测量误差,求出此故 障区段内的最大波动值U_{fu},然后根据式(19)求出最 小允许负序电压计算值变化量差值U_{Mallow}。

$$U_{\Delta L.\text{allow}} = K U_{\text{flu}} \tag{19}$$

式中:K为可靠系数,K=1.5。

4)将 U_{ΔLallow}代入拟合曲线,求出最小允许故障 定位误差比e。

5)分别根据式(20)和式(21)求得虚拟故障节点 的迭代间距 Δ*L*和个数*N*。

$$\Delta L = eL_{v_1 v_i} \tag{20}$$

$$N = \frac{L_{\nu_1 \nu_j}}{\Delta L} + 1 \tag{21}$$

式中: ΔL 为虚拟故障节点的迭代间距; $L_{v_i v_j}$ 为故障区 段 $v_i v_j$ 的长度。

2.2 故障精确定位流程

本文将故障节点看作负序电流注入点,利用负 序导纳矩阵和注入负序电流求得并联小电阻投入前 后的负序电压计算变化量,并与负序电压实际变化 量进行比较,使用两者的偏差计算不同虚拟故障节 点的故障概率,提出了基于负序电压变化量的故障 精确定位算法,故障精确定位流程图见附录A图 A4,具体步骤如下。

1)设置虚拟节点迭代间距:在离线阶段利用故 障定位误差比和负序电压计算值变化量差值,使用 最小二乘法拟合求出每个线路区段合适的虚拟故障 节点迭代间距。

2)得到负序电压计算值:故障发生后,利用式 (14)计算得到故障点的近似修正负序电流变化量并 将其作为故障点负序电流变化量,在故障区段内的 每个虚拟故障节点注入相同的故障负序电流变化 量,从而求出不同虚拟故障节点下测量节点的负序 电压计算值。

3)计算偏差矩阵故障概率:将负序电压计算值 变化量矩阵依次与负序电压测量值变化量作差,从 而得到各虚拟故障节点v_i的偏差矩阵,利用式(18) 计算每个虚拟故障节点的故障概率。

4)通过比较概率确定故障位置:对比故障区段 各个虚拟故障节点的故障概率,概率最大的节点即 为故障位置。

3 仿真验证

为了验证本文所提方法的有效性以及可靠性, 对IEEE 34节点系统标准模型进行改进,在PSCAD 中搭建中性点灵活接地配电网仿真模型,使其符 合我国配电网系统,包含电源、主变压器(变比为 110 kV / 10.5 kV,容量为100 MV·A)、接地变压器 (容量为2 MV·A)、并联小电阻(现场常用的阻值为 10 Ω)、消弧线圈(电感值为0.1 H);电网电压等级设 为10 kV,包含34个节点(其中包括28个负荷节点)、 33条线路(即33个线路区段),有功负荷为3 MW,线 路类型为电缆架空线混合线路,其具体网络拓扑见 附录A图A3,具体线路数据见附录A表A1。

在区段 818-820 距离首端节点 818 的 2.6 km 处 设置 A 相接地故障, R_i 设置为 1 Ω ,故障初相角 φ 设 置为 90°,故障时间为 0.1 s,并联小电阻投入时间为 0.16 s(在故障线路跳闸后控制切除并联小电阻),仿 真时间为 0.2 s,采样频率为 10 kHz。

仿真得到故障区域 I 的负序电压测量节点 810、822、826以及与故障区段 818-820 最近的负序 电流测量节点 816的结果,分别如图 4(a)、(b)所示, 图中 U⁽²⁾、I⁽²⁾分别为负序电压、电流幅值。由图可 见:负序电流幅值变化量为 168.9 A,计算得到的修 正注入负序电流变化量幅值为 169.1 A。



Fig.4 Simulative results of amplitude of negative-sequence voltage and current

使用上述4个测量节点的信息进行基于负序电 压变化量的故障精确定位。区段818-820的迭代间 距已在离线状态下得到,为110m,即从区段首端开 始,每间隔110m设置一个虚拟故障节点,在区段末 端设置最后一个虚拟故障节点。区段818-820全长 3.5 km,共设置32个虚拟故障节点。根据式(18)计 算各虚拟故障节点的故障概率*P*,结果见附录A图 A5。由图可知,虚拟故障节点*v*₁即节点818的故障 概率为0,虚拟故障节点*v*₂₄的故障概率为100%,在 所有虚拟故障节点中最大,因此故障精确定位结果 为2640m,故障定位误差为40m。如果在节点*v*₂₄未 发现故障,则应根据虚拟故障节点的故障概率由大 到小依次扩展故障定位搜索范围。 为了验证故障距离对故障精确定位方法的 影响,在区段818-820不同位置设置A相接地故障, 其余条件不变,精确故障定位结果如表1所示,其中 故障距离指的是故障点与线路首端节点818之间的 距离。

表1 不同故障距离下精确故障定位结果

Table 1 Accurate fault location results under

different fault distances

故障距	修正负序电流	负序	负序电压变化量 / V		
离 / km	变化量幅值 / A	节点810	节点 822	节点 826	庆左 / m
0.3	174.1	354.4	888.7	743.2	30
0.6	173.7	352.8	891.1	740.0	50
0.9	173.4	351.3	893.3	747.5	20
1.2	172.1	350.0	895.9	733.0	10
1.5	171.4	348.2	898.5	731.4	40
1.8	170.8	346.9	901.2	727.2	40
2.1	170.2	345.5	903.6	725.7	10
2.4	169.5	344.1	906.7	722.3	20
2.7	168.8	342.7	909.3	719.5	50
3.0	166.7	340.6	913.7	714.0	30

为了验证故障过渡电阻和故障初相角对故障精确定位方法的影响,在线路区段816-824中距离节点816 1.5 km处设置A相接地故障, R_t 设置为1、50、100、1000、2000 Ω, φ 设置为0°、45°、90°,在离线状态下得到区段816-824的迭代间距为92 m,共有34个虚拟故障节点,精确故障定位结果见附录A表A2。

由上述故障定位结果可知,本文所提故障精确 定位方法基本不受故障距离、故障过渡电阻和故障 初相角的影响,故障定位误差均小于等于64m。原 因在于上述因素会改变各节点负序电压和电流的幅 值,但本文方法是在有限数量的虚拟故障节点的基 础上,根据负序电压偏差求取不同虚拟故障节点的 故障概率,从而基本不受各节点电气量本身幅值的 影响。

为了更好地说明本文方法具有较好的工程实用 性,分别利用零序阻抗法^[14]、同步相量测量单元 法^[17]以及本文方法进行故障定位,不同过渡电阻下 的故障定位结果对比如表2所示。从表中可知:文 献[14]、[17]所提方法均需要精准同步,且需要在每

耒 2	不同力	6倍空	位古	法的	∆4 F	-
⊼ ₹ ∠	까미며	义涅化	шл	広的	X11	۰L

Table 2 Comparison among different

	faul	t location	methods	8	
方法	所需信号	精准同步 要求	测量点 布置	过渡 电阻 / Ω	平均定位 误差 / %
文献[14]	零序电压、 零序电流	需要	较多	10	0.23
文献[17]	三相电压、 三相电流	需要	较多	2000	0.68
本文方法	零序电流、 负序电压	精确定位 需要	较少	10 2 000	0.20 0.57

个区段首末端布置测量点,所需设备较多;相比之下,本文所提故障区段定位方法具有实施方便且不 需要精准同步的优势,且本文所提适用于该区段定 位方法的测量点优化布置方案有效减少了测量设 备,同时提升了故障定位精度,降低了平均定位误 差,具有较好的实用性。

4 结论

针对中性点灵活接地配电网,本文分析了其并 联小电阻投入前后负序电压的变化规律,发现通过 各测量节点的负序电压变化值可以判断出测量节点 与故障区段之间的位置关系;研究了零序电流在负 序方向的投影,发现并联小电阻投入后故障线路的 零序电流在负序方向的投影量等于零序电流本身的 幅值,而非故障线路(包括故障点上游)零序电流本身的 幅值,而非故障线路(包括故障点上游)零序电流本身的 有方向投影量会小于零序电流的幅值。基于此本 文利用并联小电阻投入前后的负序电压变化量确定 故障区域和根据零序电流修正投影比例系数判断故 障分支从而确定故障区段,同时提出一种适用于该 区段定位方法的测量点优化布置方案;然后利用负 序电压变化量测量值与计算值的偏差计算故障概 率,对比故障区段各个虚拟节点的故障概率进行精 确定位。

本文通过大量不同故障条件下的仿真模拟和分 析,验证了所提中性点灵活接地配电网的故障区段 定位方法以及故障精确定位方法的有效性和可靠 性,且所得故障定位结果具有较小的定位误差。同 时本文所提方法具有故障区段定位实施方便、电流 测量设备不要求同步、不受分支负荷影响等优势。 该技术重点解决永久性单相金属性或者经低电阻接 地的故障定位问题,在电力系统发生复故障时,本文 提出的方法不能同时准确定位多个故障位置,需要 进一步深入研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]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]. Guang-dong Electric Power,2014,27(6):64-67.
- [2] WANG Peng, CHEN Baichao, TIAN Cuihua, et al. A novel neutral electromagnetic hybrid flexible grounding method in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017,32(3):1350-1358.
- [3] XU Junjun, WU Zaijun, YU Xinghuo, et al. Robust faulted line identification in power distribution networks via hybrid state estimator[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019,15(9):5365-5377.
- [4]常仲学,宋国兵,黄炜,等.基于相电压电流突变量特征的配电 网单相接地故障区段定位方法[J].电网技术,2017,41(7):

第1期 2363-2370.

> CHANG Zhongxue, SONG Guobing, HUANG Wei, et al. Phase voltage and current fault components based fault segment location method under single-phase earth fault in distribution network[J]. Power System Technology, 2017, 41(7):2363-2370.

- [5]常仲学,宋国兵,张维. 配电网单相断线故障的负序电压电流 特征分析及区段定位[J]. 电网技术,2020,44(8):3065-3074.
 CHANG Zhongxue,SONG Guobing,ZHANG Wei. Characteristic analysis and fault segment location on negative sequence voltage and current of single phase line breakage fault in distribution network[J]. Power System Technology,2020,44(8): 3065-3074.
- [6] 贾清泉,郑旭然,刘楚,等. 基于故障方向测度的配电网故障区 段定位方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(20):5933-5941.
 JIA Qingquan, ZHENG Xuran, LIU Chu, et al. A method of fault section location in distribution networks based on fault direction measures[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(20): 5933-5941.
- [7] 郑一斌,王慧芳,张磊,等.基于LightGBM算法的配电网单相接地故障区段定位方法[J].电力自动化设备,2021(12):54-61.
 ZHENG Yibin, WANG Huifang, ZHANG Lei, et al. Single-phase grounding fault section location in distribution network based on LightGBM algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2021(12):54-61.
- [8] 邓丰,梅龙军,唐欣,等.基于时频域行波全景波形的配电网故障选线方法[J].电工技术学报,2021,36(13):2861-2870.
 DENG Feng, MEI Longjun, TANG Xin, et al. Faulty line selection method of distribution network based on time-frequency traveling wave panoramic waveform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(13):2861-2870.
- [9] 王雪文,石访,张恒旭,等.基于暂态能量的小电流接地系统单 相接地故障区段定位方法[J].电网技术,2019,43(3):818-825.
 WANG Xuewen, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. A singlephase earth fault location method based on transient energy for non-effectively grounded system [J]. Power System Technology,2019,43(3):818-825.
- [10] 朱革兰,李松奕,兰金晨,等.基于零序特征量的配电网接地故障区段定位方法[J].电力自动化设备,2021,41(1):34-40,68.
 ZHU Gelan,LI Songyi,LAN Jinchen, et al. Fault section location method for grounding fault of distribution network based on zero-sequence characteristic[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(1):34-40,68.
- [11] 贾科,李论,杨哲,等. 基于贝叶斯压缩感知理论的配网故障定 位研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(12):3475-3486.
 JIA Ke,LI Lun,YANG Zhe, et al. Research on distribution network fault location based on Bayesian compressed sensing theory[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(12):3475-3486.
- [12] 刘晓琴,王大志,江雪晨,等.利用行波到达时差关系的配电网 故障定位算法[J].中国电机工程学报,2017,37(14):4109-4115,4290.
 LIU Xiaoqin,WANG Dazhi,JIANG Xuechen, et al. Fault loca-

tion algorithm for distribution power network based on relationship in time difference of arrival of traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(14):4109-4115,4290.

- [13] 李泽文,刘基典,席燕辉,等.基于暂态波形相关性的配电网故障定位方法[J].电力系统自动化,2020,44(21):72-79.
 LI Zewen,LIU Jidian,XI Yanhui,et al. Fault location method for distribution network based on transient waveform correlation[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(21): 72-79.
- [14] LIANG Rui, PENG Nan, YANG Zhi, et al. A novel single-

phase-to-earth fault location method for distribution network based on zero-sequence components distribution characteristics [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 102:11-22.

[15] 束洪春,刘佳露,田鑫萃.基于故障行波沿线突变和模型匹配的辐射状配电网故障定位[J].电力系统自动化,2020,44(9): 158-163.

SHU Hongchun, LIU Jialu, TIAN Xincui. Fault location of radial distribution network based on sudden changes of fault traveling wave along line and model matching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 158-163.

- [16] 邓丰,李鹏,曾祥君,等. 基于 D-PMU 的配电网故障选线和定位方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(19):160-167.
 DENG Feng,LI Peng,ZENG Xiangjun, et al. Fault line selection and location method based on synchrophasor measurement unit for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(19):160-167.
- [17] 王小君,任欣玉,和敬涵,等. 基于μPMU相量信息的配电网络 故障测距方法[J]. 电网技术,2019,43(3):810-817.
 WANG Xiaojun, REN Xinyu, HE Jinghan, et al. Distribution network fault location based on μPMU information[J]. Power System Technology,2019,43(3):810-817.
- [18] 韩静,徐丽杰.中性点经消弧线圈瞬时并联小电阻接地研究
 [J].高电压技术,2005,31(1):38-39,52.
 HAN Jing,XU Lijie. Study of a neutral grounding method with an arc suppression coil and a parallel low resistance
 [J]. High Voltage Engineering,2005,31(1):38-39,52.
- [19] 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. Dicrimination 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.
- [20] 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.
- [21] 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.

作者简介:



尹 力(1988—),男,高级工程师,硕 士,主要研究方向为配电运检及故障检测与 诊断技术(E-mail:2512388854@qq.com);

孔令昌(1997—),男,硕士研究生,主 要研究方向为电网故障定位、故障选线技术 (E-mail:TS20130115P31TM@cumt.edu.cn); 梁 睿(1981—),男,教授,博士研究

生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力 系统及其自动化、供配电安全及保护(E-mail:

liangrui@cumt.edu.cn).

(编辑 任思思)

Pilot protection algorithm of large-scale wind farm outgoing transmission line based on edge detection

XU Yanchun¹, FAN Zhongyao¹, SUN Sihan¹, MI Lu²

(1. Hubei Provincial Key Laboratory of Operation and Control of Cascaded Hydropower Station,

China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Department of Electrical and Computer Engineering, Texas A&M University, College Station 77840, USA)

Abstract: Due to the fluctuation of wind power output and the frequency offset characteristics of fault current when the outgoing transmission line fails, the sensitivity of the pilot protection of wind farm outgoing transmission line decreases or even protection refuses to operate. Therefore, the pilot protection of wind farm outgoing transmission line based on edge detection is proposed. By constructing the current collected on both sides of the wind farm outgoing transmission line as a matrix, and using Sobel operator for edge detection, the part where the current sampling value changes greatly is determined. Then, the average gradient amplitude is calculated and compared with the set value by the identified part with large changes in the current sampling values on both sides of the line, so as to realize the rapid identification of internal faults and external faults. Finally, a large-scale wind farm outgoing transmission system model is built by PSCAD / EMTDC to verify the applicability, rapidity and ability against transition resistance of the proposed algorithm. Compared with the existing pilot protection of transmission lines, the proposed method is still applicable when the wind farm output is weak and the operation speed is faster.

Key words: large-scale wind farms; pilot protection; relay protection; edge detection; outgoing transmission line

(上接第89页 continued from page 89)

Permanent single-phase grounding fault location in flexible grounding distribution network based on negative-sequence voltage variation

YIN Li¹, KONG Lingchang², WANG Guanhua², WANG Hua¹, LIANG Rui², PENG Nan²

Lianyungang Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Lianyungang 222004, China;
 School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Aiming at the flexible grounding distribution network, a permanent single-phase grounding fault location method in flexible grounding distribution network based on negative-sequence voltage variation is proposed. Firstly, the fault area is determined based on the change of negative-sequence voltage before and after the parallel small resistance is set. Secondly, the fault branch is determined according to the modified projection proportion coefficient of zero-sequence current to determine the fault section. Then, the fault probability is calculated by using the deviation between the measured value and the calculated value of negativesequence voltage change, and the fault probability of each virtual node in the fault section is compared for accurate fault location. At the same time, an optimal layout scheme of measuring points suitable for the location method of this section is proposed. Finally, PSCAD is used to build a simulation model, and the simulation data analysis verifies the effectiveness and reliability of the proposed permanent single-phase grounding fault location method.

Key words: flexible grounding distribution network; negative-sequence voltage variation; modified projection proportion coefficient; fault probability; electric fault location

附录 A













Fig.A3 Simulation model topology diagram of distribution network with flexible neutral grounding





表	A1	IEEE34	节点系统线路数据

Table A1	Line	data	of	IEI	EE	34-	bus	sys	tem

区段	类型	线路长度/km	区段	类型	线路长度/km
800-802	电缆	5.0	854-852	电缆	11.5
802-806	架空线	2.0	852-832	架空线	1.5
806-808	电缆	3.8	832-888	架空线	1.0
808-810	电缆	0.6	888-890	电缆	3.2
808-812	电缆	2.4	832-858	架空线	2.3
812-814	架空线	1.0	858-864	电缆	0.6
814-850	架空线	3.0	858-834	电缆	1.8
850-816	电缆	2.6	834-842	架空线	1.0
816-818	架空线	1.8	842-844	架空线	2.2
818-820	电缆	3.5	844-846	架空线	1.0
820-822	电缆	6.3	846-848	电缆	1.6
816-824	电缆	3.1	834-860	架空线	2.5
824-826	电缆	0.9	860-836	电缆	0.8
824-828	架空线	2.0	836-862	架空线	0.8
828-830	电缆	2.2	862-838	电缆	1.5
830-854	架空线	1.5	836-840	架空线	0.6
854-856	架空线	3.1			

P. (0	(0)	坡工在宣中法立化目标体	负序			
$R_{\rm f}/\Omega$	$\varphi/(\circ)$	修止贝序电流受化重幅值/A	810	822	826	庆差/m
	0	179.6	366.8	772.4	783.6	28
1	45	180.7	367.4	776.0	788.5	29
	90	181.7	370.2	780.9	802.3	30
	0	31.8	64.8	136.7	138.1	30
50	45	32.3	65.8	139.0	140.3	28
	90	33.4	67.3	142.2	143.9	28
	0	13.5	27.3	57.6	58.2	27
100	45	14.2	28.8	60.9	61.5	29
	90	15.0	30.7	65.0	65.7	33
	0	6.9	14.2	28.6	29.6	41
1000	45	7.4	15.1	29.5	30.8	45
	90	8.3	16.3	31.5	33.4	43
	0	3.3	7.1	15.9	16.8	56
2000	45	4.2	8.6	17.2	18.9	64
	90	5.5	11.3	18.6	20.8	62

表 A2 不同故障过渡电阻和故障初相角下精确定位结果

Table A2 Accurate fault location results under different fault transition resistances and initial phase angles