

注入电流分布特性辨识的配电网故障选线方法

王晓卫¹, 岳阳¹, 郭亮², 王雪¹, 王毅钊³, 张志华³, 杨峰峰⁴

(1. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330000; 3. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100;
4. 浙江省送变电工程有限公司, 浙江 杭州 310020)

摘 要: 针对谐振接地系统单相接地故障特征微弱, 基于故障特征的选线方法灵敏度和可靠性降低的问题, 提出一种主动注入信号辨识的故障选线方法。首先, 推导了注入电流受线路对地导纳影响下的分布特性, 利用此分布特性构造选线判据。然后, 从不同角度分析了注入信号对系统运行的影响, 选择适宜参数的注入信号。考虑降低注入频率能够提高主动注入式选线方法的耐过渡电阻能力, 故选择注入低频信号。测量注入信号后各条馈线的零序电流, 选择稳态零序电流时间窗, 利用 Prony 算法辨识各条线路零序电流中 25 Hz 电流幅值完成故障选线。最后, Pscad 仿真和现场实测波形验证结果表明, 该方法在不同故障场景下均能准确实现故障选线, 且具有良好的耐过渡电阻能力。

关键词: 配电网; 单相接地故障; 注入法; Prony 算法辨识; 故障选线

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202401043

0 引言

谐振接地配电网中, 单相接地故障最为频发, 约占所有故障 70%~80%。由于消弧线圈的补偿, 当发生单相接地故障时, 故障点的故障残流较小, 一般不超过 10 A^[1-3]。较小的故障残流导致线路保护装置不能识别, 无法正常启动。尽管较小的接地残流在短时间内对电力系统中的电力设备危害不大, 允许带故障运行一段时间。但是, 如果未能及时发现并处理接地故障, 很可能会引发火灾及人身触电等事故灾害, 造成巨大经济损失。因此, 为避免事故进一步发展, 造成不必要的损失, 有必要尽快进行故障选线, 处理接地故障。

现有针对配电网单相接地故障选线方法的研究按照利用信息量不同可以分为主动式和被动式。被动式选线方法根据信号处理方法不同, 又可以分为基于稳态量和暂态量的选线方法。由于谐振接地系统单相接地故障时故障点电流微弱, 故障特征不明显^[4]。基于稳态的故障选线方法会

存在灵敏度不足, 选线效果不佳的问题; 基于故障暂态信息的选线方法故障特征明显, 但故障暂态过程短、受线路结构、参数影响^[5-7]。而越来越多的电力电子装置接入配电网, 针对主动式选线方法得到了进一步研究, 且主动式选线方法具有故障特征明显、注入信号可控、注入时间灵活等优点^[8-14]。主动式故障选线方法即利用单相有源逆变装置、级联 H 桥变流器或者静止无功发生器等信号发生装置通过零序电压互感器二次侧、母线电压互感器或者系统中性点等位置注入特征信号, 以增强故障信息, 相较于利用故障特征信息选线的方法可靠性更高, 故障线与非故障线之间的故障特征差异更加明显。

考虑到系统发生单相接地故障时故障馈线与健全馈线参数之间的差异, 会造成注入电流信号在故障馈线与健全馈线的分布差异, 进而构造选线判据。文献[8]利用脉宽调制有源逆变器注入基波零序电流, 构建了基波零序电流在配网各条馈线中的精准分布模型, 并以“分担系数”表征线路零序导纳与系统总零序导纳的比值, 提出通过分析不同线路分担系数的幅相特征来进行故障选线的新方法, 但其利用不同接地电阻下分担系数的变化趋势进行故障选线的方法, 不利于在工

收稿日期: 2024-01-09; 修回日期: 2024-02-23。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177114)。

程中应用。文献[9]利用直流配网中模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)注入探测信号,然后计算归一化后的各馈线零模电流值与馈线零模电流参考值的皮尔森波形相关性系数,认为健全馈线接近于1,故障馈线接近于-1,并进行了信噪比20 dB的抗噪验证。文献[10]在现有柔性消弧研究成果之上,提出改变级联H桥变流器注入电流的大小,通过测量各条线路零序电流变化量进行选线的新方法。文献[11]考虑在逆变型DG接入的配电网发生单相接地故障时注入的低次谐波电流对故障特征的影响,提出交叉小波变换和离散小波变换提取零序电流序列进行能量大小比较的故障选线方法。

考虑到现有主动式选线方法多是利用注入电流后母线电压、电流参数差异,构建选线判据。很少有通过辨识各条馈线中注入信号进而基于注入信号分布差异特性构造选线判据的研究。因此,针对配电网单相接地故障后故障线与健全线零序导纳特征差异,并结合注入法中低频零序电流耐过渡电阻能力强的特点[12]。

本文利用单相有源逆变器由中性点向系统注入零序低频信号,给出了注入零序电流的流动及分布模型,推导了配网正常运行时和单相接地故障时的多条馈线零序导纳分布特征。基于故障馈线与健全馈线中注入零序电流分布差异,提出利用Prony算法辨识线路中注入低频零序电流分量进行故障选线的方法。最后,在Pscad电磁暂态仿真软件中搭建了10 kV配电网模型,在不同工况下验证了本文所提方法的有效性。此外,为验证本文方法在现场实际工况中的适应性,选择了2组来自不同配电网系统的故障现场录波波形,利用Prony算法辨识各条实测波形中25 Hz电流信号的幅值大小,完成故障选线,验证该方法的有效性。实验结果表明,即使是现场录波波形,本文方法仍然具有一定的适应能力,能够准确识别出故障线路,同时具有较高的耐过渡电阻能力。

1 低频注入电流在配网中的分布特性

1.1 正常运行状态注入电流分布

配电网一般包含多条馈线,当发生单相接地

故障时,配网的选线问题既是重点也是难点。多年来,随着研究人员的不断探索,配网故障选线可靠性越来越高。但是,在谐振接地系统中,发生单相接地故障时暂稳态故障特征微弱,被动式故障定位方法易发生误判。而基于注入信号的主动式故障选线方法是配网接地故障保护的重要方法之一。因此,对于多条馈线的配网,在正常或者故障状态下,分析注入电流在各条馈线中的分布特性变得尤为重要。

文献[12]采用“S注入法”进行故障选线,推导了耐受过渡电阻能力的表达式,认为接地电阻的大小影响注入电流的分布情况,并给出了3点改进措施以提高注入法的耐过渡电阻能力,但未给出注入信号的辨识方法。文献[13]分解各条馈线零序电流,属于被动式选线方法,各条馈线零序电流未包含注入电流成分。因此,对于注入零序电流的选线方法,可以通过分解各条馈线的稳态零序电流,进而得到注入电流信号在故障线与健全线中的流动和分布特性,以此构建选线判据。文献[14]对注入法进行了改进,由负载端柔性开关设备注入三相低频交流信号,并给出了零序低频信号的流通过程及分布特性,但未分析零序电流注入的情况。

多条馈线的谐振接地系统中注入信号的流动和分布情况示意,如图1所示。 $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$ 为

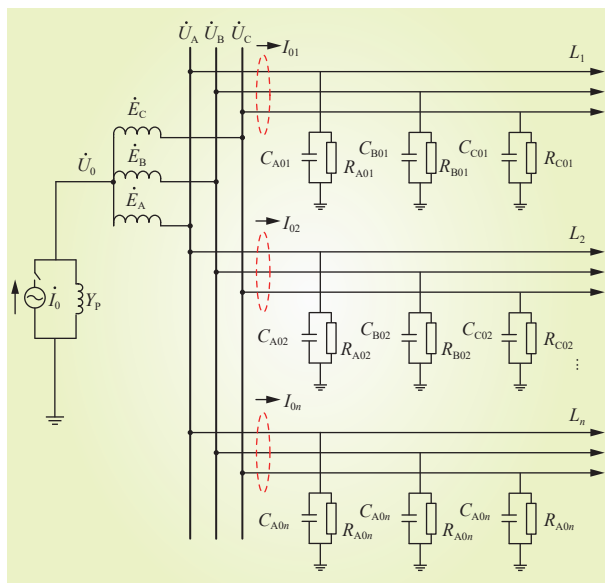


图 1 含多馈线配网的等效运算电路

Fig. 1 Equivalent arithmetic circuits of distribution networks with multiple feeders

三相电源电动势； $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 为各相母线电压； $\dot{U}_0$ 为中性点电压； $\dot{I}_{01}$ 、 $\dot{I}_{02}$ 、 $\dot{I}_{0n}$ 为各条馈线的零序电流； C_{i01} 、 C_{i02} 、 C_{i0n} 为各条馈线零序对地电容； R_{i01} 、 R_{i02} 、 R_{i0n} 为各条馈线单相对地泄露电阻； $\dot{I}_0$ 为低频零序注入电流； Y_P 为中性点接地导纳。主动注入装置与消弧线圈并联于中性点。

考虑到配电网的三相不对称，利用基尔霍夫电流定律计算低频零序电流注入后配电网中性点的零序电压 $\dot{U}_0$ 为

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{I}_0 - \dot{I}_{bd}}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_P} \quad (1)$$

式中： $\dot{I}_{bd}$ 为系统不平衡电流，且 $\dot{I}_{bd} = \dot{E}_C(\dot{Y}_C + \alpha^2 \dot{Y}_A + \alpha \dot{Y}_B)$ ， $\alpha = e^{j120^\circ}$ ； $\dot{Y}_A$ 、 $\dot{Y}_B$ 、 $\dot{Y}_C$ 为三相对地导纳，且 $\dot{Y}_A = 1/R_A + j\omega C_A$ ， $\dot{Y}_B = 1/R_B + j\omega C_B$ ， $\dot{Y}_C = 1/R_C + j\omega C_C$ ； R_A 、 R_B 、 R_C 为所有馈线总的对地分布电阻； C_A 、 C_B 、 C_C 为所有馈线总的对地分布电容。

此时，第 i 条线路的零序电流 $\dot{I}_{0i}$ 为

$$3\dot{I}_{0i} = (\dot{U}_0 + \dot{E}_A)\dot{Y}_{A0i} + (\dot{U}_0 + \dot{E}_B)\dot{Y}_{B0i} + (\dot{U}_0 + \dot{E}_C)\dot{Y}_{C0i} = \dot{U}_0(\dot{Y}_{A0i} + \dot{Y}_{B0i} + \dot{Y}_{C0i}) + \dot{E}_A\dot{Y}_{A0i} + \dot{E}_B\dot{Y}_{B0i} + \dot{E}_C\dot{Y}_{C0i} = \dot{U}_0\dot{Y}_i + \dot{I}_{bdi} \quad (2)$$

式中： $\dot{Y}_{A0i}$ 、 $\dot{Y}_{B0i}$ 、 $\dot{Y}_{C0i}$ 为第 i 条线路三相零序导纳； $\dot{Y}_i$ 为馈线 i 的总零序导纳， $\dot{Y}_i = (\dot{Y}_{A0i} + \dot{Y}_{B0i} + \dot{Y}_{C0i})$ ； $\dot{I}_{bdi}$ 为馈线 i 的自然不平衡电流，且 $\dot{I}_{bdi} = \dot{E}_A\dot{Y}_{A0i} + \dot{E}_B\dot{Y}_{B0i} + \dot{E}_C\dot{Y}_{C0i}$ 。

由式(1)(2)可得，馈线 i 的零序电流 $\dot{I}_{0i}$ 为

$$3\dot{I}_{0i} = -h\dot{I}_{bd} + h\dot{I}_0 + \dot{I}_{bdi} \quad (3)$$

式中： $h = \dot{Y}_i/(\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_P)$ 。

由式(3)可以看出，馈线 L_i 的零序电流由3部分组成，包括系统不平衡电流、部分注入电流、馈线 L_i 的自然不平衡电流。其中，各条馈线中注入电流的大小取决于该馈线的零序导纳与系统总零序导纳的比值，零序导纳值较大的馈线，注入电流的占比更高。此结论同样可以推广至单相接地故障。

1.2 单相接地故障状态下注入电流分布

图1中，假设馈线 L_i 的C相发生单相接地故障，接地电阻为 R_f ，中性点零序电流注入后在各条馈线中的分布情况如图2所示。

此时，系统零序电压 $\dot{U}_{f0}$ 为

$$\dot{U}_{f0} = \frac{\dot{I}_0 - \dot{I}_{bd} - \dot{E}_C/R_f}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_P + 1/R_f} \quad (4)$$

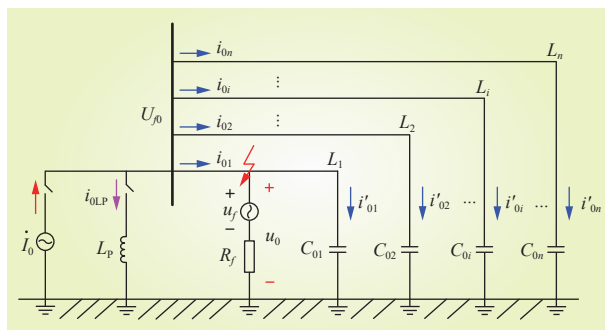


图2 零序电流注入后单相接地等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of single-phase grounding after zero sequence current injection

谐振接地系统中共有 n 条线路， n 条线路中包含总的注入电流分量 $\sum_{i=1}^n \dot{I}_{0i}$ 为

$$\sum_{i=1}^n \dot{I}_{0i} = \frac{Y_A + Y_B + Y_C + 1/R_f}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_P + 1/R_f} \quad (5)$$

由式(5)可知，当发生金属性接地故障时， $\sum_{i=1}^n \dot{I}_{0i} = 1$ ，注入电流全部流向故障线路，这也验证了传统的S注入法。当接地电阻不为0时，各条馈线中均存在注入电流分量。

故障线路 L_i 的零序电流 $\dot{I}_{0i}$ 为

$$3\dot{I}_{0i} = \dot{U}_{f0} \left(\dot{Y}_i + \frac{1}{R_f} \right) + \dot{I}_{bdi} + \frac{\dot{E}_C}{R_f} \quad (6)$$

将式(5)(6)结合，可以进一步化简得

$$3\dot{I}_{0i} = -h'\dot{I}_{bd} + h'\dot{I}_0 + (1-h')\frac{\dot{E}_C}{R_f} + \dot{I}_{bdi} \quad (7)$$

式中： $h' = (\dot{Y}_i + 1/R_f)/(\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_P + 1/R_f)$ 。

由式(7)可知，发生单相接地故障后故障馈线 L_i 中零序电流由4部分组成：系统不平衡电流、注入电流的部分分量、短路电流和线路自然不平衡电流。其中，注入电流为 $h'\dot{I}_0$ ，故障馈线中注入电流大小由接地电阻 R_f 与故障线路对地零序导纳 $\dot{Y}_i$ 决定。

同理，健全馈线 L_j 中零序电流 $\dot{I}_{0j}$ 为

$$3\dot{I}_{0j} = -h''\dot{I}_{bd} + h''\dot{I}_0 - \frac{h''\dot{E}_C}{R_f} + \dot{I}_{bdj} \quad (8)$$

式中： $h'' = Y_j/(Y_A + Y_B + Y_C + Y_P + 1/R_f)$ 。

由式(8)可知，健全馈线中零序电流包含4种成分：系统不平衡电流、注入电流的部分分量、故障点电流和馈线自然不平衡电流。其中，

注入电流为 $h''i_0$ ，健全馈线中注入电流占比取决于该条线路对地零序导纳与系统总零序导纳的比值。

2 低频零序电流注入的故障选线方法

2.1 注入电流参数的选择

随着配网中电力电子设备的接入和柔性接地技术的应用，谐振接地系统发生接地故障残流小，对原有故障判定和故障选线带来挑战^[15-16]，同时，主动注入式故障判别方法给保护增加了更多的可用信息，具有广阔的应用前景。为此，本文提出了基于 Prony 算法辨识注入信号的主动式配电网单相接地故障选线方法。

1) 频率的选择。由式(7)可知，流入故障线的注入特征电流取决于故障线的零序导纳与系统总的零序导纳的比值。通常故障线中注入电流的分量主要由接地电阻决定，由于健全线对地分布电容对于注入电流的分流作用，使得流入故障馈线的注入特征电流减少，进而影响选线装置的准确率^[17-18]。通过降低注入电流信号的频率，使得线路容抗相对于注入信号的容抗增加，流入健全馈线的注入电流减少，耐过渡电阻能力提升。第 j 条线路容抗为

$$X_{Cj} = \frac{1}{j\omega C_j} \quad (9)$$

式中： X_{Cj} 为线路的对地容抗； C_j 为第 j 条线路的对地电容； ω 为系统角频率。

由式(9)可知，可以通过降低注入电流的频率，使得健全馈线对地电容相对于注入电流的容抗增大，分流现象减小，有利于提高选线方法的准确率^[19]。

此外，综合考虑注入信号在系统中传播，对系统电能质量的影响，采用注入低频信号作为探测信号具有一定的优势。但注入的低频信号相当于向系统引入了间谐波，而将间谐波引入配电系统，会造成系统电压波形峰值和均方值的不稳定，引起闪变现象以及视觉干扰等问题^[14]。根据文献^[20]，将基波与某一间谐波混合而成的电压或电流的波动频率称之为调制频率 f ，其计算式为

$$f = |f_H - hf_1| \quad (10)$$

式中： f_H 为间谐波频率； hf_1 为与间谐波频率最接近的谐波次数，频率不超过 50 Hz 的间谐波。当 f_H 大于 25 Hz 时，调制频率为 $50 - f_H$ ；而当 f_H 小于 25 Hz 时，调制频率则为 f_H 。文献^[14]利用 IEC 闪变仪评估 25 Hz 以下频率的注入信号对单位正弦电压波动值的影响，系统对 9 Hz 左右的注入信号频率最敏感，随频率变动，临界电压波动值可以达到 1%。此外，考虑到频率越低，电流互感器的传变能力更弱，使系统电压零点偏移更加严重，检测注入信号的时间会更长，因此，注入信号的频率不宜过低^[21]。综合考虑，选择注入信号为低频 25 Hz 的正弦信号。

2) 幅值的选择。注入信号幅值的选择主要基于母线处电压互感器的测量精度以及注入信号对于电网的冲击强度 2 方面考虑。若注入信号幅值过小，则存在互感器无法测量到注入信号，使得所用选线方法失效。理论上，注入信号强度越大，故障线与健全线中注入信号的差异越明显，越有利于故障选线。但单相接地故障发生后，故障相电压降低，非故障相电压升高，若注入信号的幅值过大，对健全相绝缘造成威胁，可能由单相接地故障发展成更加严重的相间故障，且不利于故障熄弧^[22]。综合考虑，本文选取注入信号幅值为系统额定工频电压的 0.5%，即 $0.5\%U_N$ ，以满足互感器测量精度和对电网冲击这 2 方面要求。

3) 注入时长的选择。注入信号时长一方面要考虑注入信号能被有效识别和提取，另一方面要控制注入时长，尽可能降低其对电网正常运行的影响。本文选择的注入信号时长 t_{in} 为 200 ms。

此外，电流注入装置的启动时间考虑到躲过接地故障发生后的故障零序电流的暂态过程，配电网发生了永久性接地故障之后，存在一定的暂态过程，考虑到本文是基于稳态量的选线方法，因此需要避开故障初始暂态过程，同时确保探测信号稳定注入，选择故障后延时 150 ms 再启动注入装置^[9]。

2.2 Prony 算法

Prony 算法是用一系列具有任意幅值、相位、频率和衰减因子的指数函数的线性组合来拟合等间隔采样数据。假定用拟合样本数据 $x(n)$ ，其离散时间的函数形式 $\hat{x}(n)$ 为

$$\hat{x}(n) = \sum_i^p b_i z_i^n, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

式中： N 为采样数据个数； p 为由样本数据所组成样本矩阵的秩。

假设 b_i 和 z_i 为复数，则有

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p A_i e^{j\theta_i} e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)n\Delta t} \quad (12)$$

式中： A_i 为振幅； θ 为初相位； α 为衰减因子； f_i 为频率； Δt 为采样间隔。

Prony算法的具体计算过程可以参考文献[23]，其辨识准确度与其算法计算时的采样频率和模型阶数的准确程度具有较大关系，通常利用信噪比和动态变化率来进行衡量。

定义动态变化率 S_{DVR} 和信噪比 S_{SNR} 分别为

$$S_{DVR} = \frac{\sum_{n=1}^N |\hat{f}(n) - f(n)|^2}{\sum_{n=1}^N |f(n) - f(1)|^2} \quad (13)$$

$$S_{SNR} = 20 \lg \frac{\text{rms}[f(n)]}{\text{rms}[f(n) - \hat{f}(n)]} \quad (14)$$

式中： $\hat{f}(n)$ 为 Prony 算法估计数据序列； $f(n)$ 为实测数据序列；rms为求取均方根。

一般认为当 S_{DVR} 小于 1% 且 S_{SNR} 大于 40 dB 时，所选阶数较为合理，Prony 算法拟合准确度高。

3 基于 Prony 辨识的故障选线方法

配网通常具有多条馈线，各条馈线导纳各不相同。当发生接地故障时，故障线路的零序导纳会显著增大[24-25]。根据电流分配原则，附加电流在各馈线的分布取决于该馈线零序导纳与系统总零序导纳的比值。通常情况下，故障线的零序导纳远远大于其他健全线的零序导纳，则故障馈线中的注入低频电流的幅值将大于其他健全馈线。因此，辨识发生接地故障后各条馈线中注入低频电流的幅值大小，完成故障选线。

基于上述分析，本文选择 Prony 算法辨识注入信号在配电系统各条馈线中的幅值差异，从而构建基于主动注入式的稳态量故障选线判据。具体的选线流程如图 3 所示。

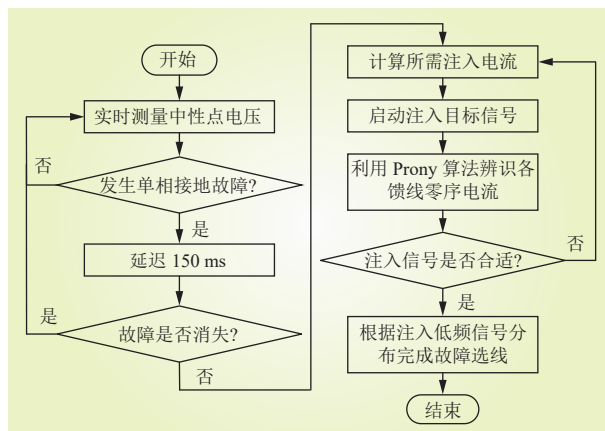


图 3 注入信号辨识选线方法流程
Fig. 3 Injection signal identification flow

具体操作步骤如下。

1) 利用互感器实时监测中性点电压及母线零序电压，当中性点电压 U_N 大于 15% 的系统额定电压时，判定系统发生单相接地故障。

2) 延时 150 ms，再次测量中性点电压，若故障未消失，则启动单相逆变装置由中性点主动注入低频交流信号。

3) 实时测量注入后各条馈线母线处零序电流，延时 50 ms，选取 40 ms 零序电流波形时间窗。利用 Prony 算法辨识 25 Hz 低频信号在各条馈线的幅值大小。根据辨识结果，适当调整注入信号。

4) 根据电流分配定则，各条馈线中注入 25 Hz 低频信号的幅值大小取决于各线路的对地导纳的相对大小。故障后，故障线路的对地导纳通常大于其他健全馈线。因此，辨识结果中 25 Hz 电流信号幅值最大的馈线即为故障馈线。本文构建基于 Prony 算法辨识注入信号在配网各条馈线分布差异的故障选线判据。

4 仿真实验

4.1 仿真模型

为验证本文所提出的基于 Prony 算法辨识低频注入电流信号选线方法的可行性，在 Pscad 中搭建了如图 4 所示的 10 kV 配电网仿真模型。仿真模型采用谐振接地方式，系统共包含 5 条线路。

有源逆变器与消弧线圈并接在中性点，故障发生后，通过有源逆变器由中性点注入低频电流信号，利用母线处电流互感器采集各条馈线出口

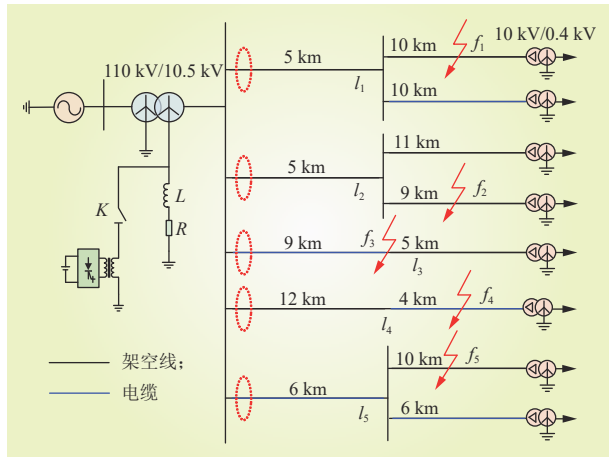


图 4 注入式故障选线多馈线系统

Fig. 4 Schematic diagram of injection fault line selection for multi feeder system

处零序电流波形。由于本文是基于线路零序电流稳态分量的故障选线方法，需要避开故障初始位置处的暂态过程，选取各条馈线稳态量的时间窗，然后利用 Prony 算法辨识注入后线路零序电流分量，以确定各条馈线注入后零序电流波形中的 25 Hz 低频信号幅值大小。故障发生后，故障线路对地导纳显著增大，注入的低频零序电流将较多地流向故障馈线，以此判定 Prony 算法辨识结果中 25 Hz 电流分量最多的馈线为故障馈线。仿真模型中线路采用 Bergeron 模型，线路参数如表 1 所示。主变压器变比为 110 kV/10.5 kV，低压侧负载采用恒功率模型。

表 1 线路参数
Table 1 Line parameters

线路类型	相序	电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电感/($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)	电容/($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)
架空线路	零序	0.2300	5.4800	0.0060
	正序	0.1700	1.2000	0.0097
电缆线路	零序	2.7000	1.0190	0.2800
	正序	0.2700	0.2550	0.3390

图 4 中，共有 5 条馈线，图中标注了各条馈线的长度及类型，其中包括纯架空线路和架空-电缆混合线路。在各条馈线不同位置分别设置故障点 f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 共 5 处故障，设置 3 组接地故障电阻，分别为 50 Ω 、200 Ω 、500 Ω ，验证在不同位置、不同工况下发生单相接地故障时，主动注入低频零序电流信号，采用本文方法进行故障选线的可行性。

在仿真过程中，选择故障后延时 150 ms 启动逆变器，调整控制策略，注入低频 25 Hz 电流信号。由馈线首端电流互感器测量，得到低频电流注入后各条馈线的零序电流。受系统影响，开始注入的暂态过程会产生大量高频信号，对 Prony 算法辨识的准确性形成不利影响，可能导致选线方法失效。为避免注入暂态过程谐波等高频分量的影响，本文选择延迟 50 ms，取稳态过程零序电流 40 ms 时间窗进行辨识。时间窗的选取如图 5 和图 6 所示。

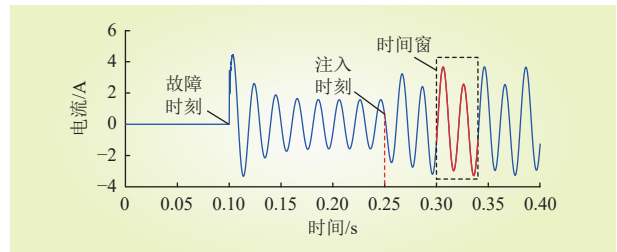


图 5 故障线路零序电流时间窗
Fig. 5 Fault line zero sequence current time window

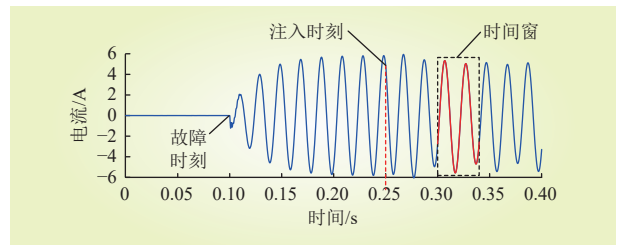


图 6 健全线路零序电流时间窗
Fig. 6 Zero sequence current time window of healthy line

由图 5 和图 6 可知，利用 Prony 算法工具箱辨识各条馈线低频 25 Hz 电流的幅值大小，辨识结果中 25 Hz 电流信号幅值最大的馈线即为故障馈线。基于 Prony 算法辨识的各馈线注入信号选线结果如表 2 所示。仿真验证了不同工况下，当馈线 L_1-L_5 均设置故障，接地电阻分别为 50 Ω 、200 Ω 、500 Ω ，任意 1 条馈线发生接地故障时，信号注入后 Prony 算法辨识出各条馈线 25 Hz 低频分量幅值大小。在各种工况下，本文所提方法均能够准确识别出故障馈线。

表 2 的辨识结果表明，针对谐振接地系统、辐射状配网而言，本文方法具有一定的适应性，不同线路、不同工况下的接地故障，均能实现准确选线，有助于提高供电可靠性，且不需要投入

表 2 选线结果
Table 2 Line selection results

故障点	接地电阻/ Ω	$L_1/10^{-3}$	$L_2/10^{-3}$	$L_3/10^{-3}$	$L_4/10^{-3}$	$L_5/10^{-3}$	选线结果
f_1	50	3.40	0.02	0.23	0.11	0.36	L_1
	200	1.40	0.03	0.32	0.15	0.45	L_1
	500	0.66	0.03	0.33	0.15	0.43	L_1
f_2	50	0.27	3.50	0.23	0.11	0.35	L_2
	200	0.36	1.30	0.32	0.15	0.45	L_2
	500	0.35	0.55	0.33	0.15	0.43	L_2
f_3	50	0.29	0.02	3.30	0.12	0.38	L_3
	200	0.36	0.03	1.30	0.15	0.45	L_3
	500	0.35	0.03	0.63	0.15	0.43	L_3
f_4	50	0.27	0.02	0.23	3.40	0.36	L_4
	200	0.36	0.03	0.32	1.30	0.45	L_4
	500	0.36	0.03	0.32	0.57	0.43	L_4
f_5	50	0.28	0.02	0.24	0.11	3.40	L_5
	200	0.36	0.03	0.32	0.15	1.40	L_5
	500	0.35	0.03	0.33	0.15	0.73	L_5

额外设备，具有一定的经济性。

4.2 基于现场实测波形验证

实测波形 1: 为进一步说明本文故障选线方法的有效性, 基于某地配电网现场故障录波数据进行验证。考虑到在实际工程现场, 极少有配电网中性点接入柔性接地装置, 即使配网中性点接入了柔性接地装置, 也很难获取实际工况中单相接地故障中性点注入零序电流的录波数据。因此, 须提出改进措施, 在现有的谐振接地系统配电网单相接地故障的录波数据基础上, 按照零序导纳的分担比例, 模拟中性点注入零序电流的分布特性, 经过数据处理, 向现场录波数据中注入特征频率电流信号, 利用本文所提方法进行验证。

首先,需要对实测数据进行预处理。具体思路如下:根据前文分析可知,中性点注入的零序电流会根据各条馈线的零序对地导纳进行分流,参照仿真模型零序电流分配比例,向各条馈线实测数据中注入 25 Hz 零序特征电流,考虑到仿真模型与配电网实际拓扑存在差异,故综合考虑实测数据中各条馈线零序电流情况,对各条出线实测数据注入的零序电流进行适当调整。实测数据中添加低频 25 Hz 零序电流之后,进行算法数据窗的选取。然后,通过 Prony 算法辨识该数据窗

中所含注入 25 Hz 频率信号的幅值大小, 根据幅值大小进行故障线路的选择。本文给出了 5 条馈线的零序电流波形, 如图 7 所示。

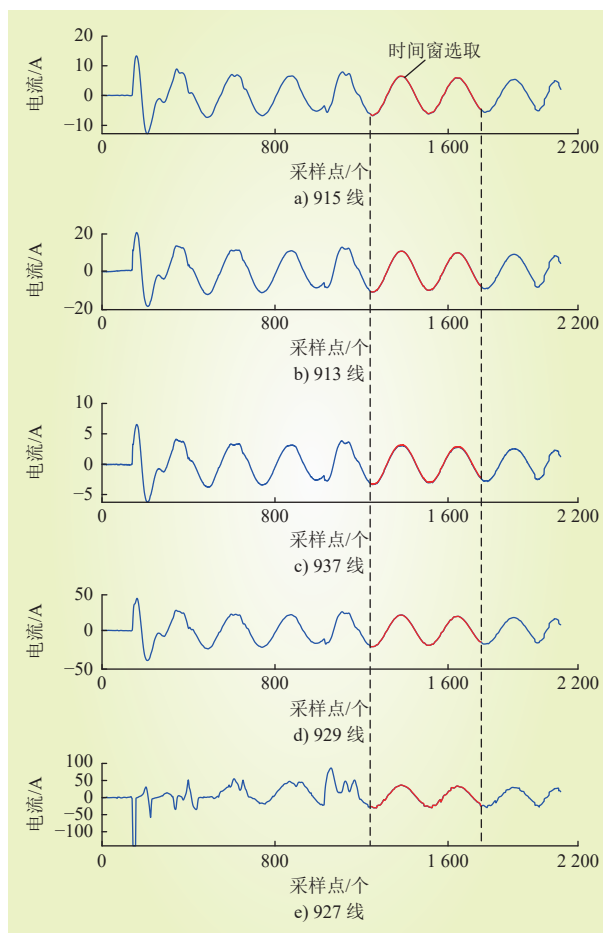


图 7 实测零序电流波形及数据窗选取
Fig. 7 Measured zero sequence current and data window

图 7 为发生单相接地故障后健全线与故障线的零序电流波形, 包括 915 线、913 线、937 线、929 线、927 线共 5 条线路。在图 7 实测波形中提取用于 Prony 算法辨识的数据窗。由于 Prony 算法对于噪音以及高频信号非常敏感, 故障初期的暂态过程含有大量高频信号, 使用 Prony 算法辨识, 可能存在较大误差, 从而导致选线方法失效。因此, 在选择数据窗进行频率辨识时, 综合分析实测数据, 尽可能避开接地故障发生初期的暂态过程以及谐波噪声等的影响, 提取线路稳态零序电流信号, 基于各馈线的零序稳态电流信号完成选线。注入电流信号频率为 25 Hz, 辨识数据窗的选择应至少包含 1 个完整周期, 故数据窗选

择 0.04 s。经过仿真验证，时间窗长选择为 0.04 s 时具有良好的辨识效果。现场录波装置的采样率为 12 800 Hz，仿真中所选数据窗为 0.04 s，共 512 个采样点数，采样区段为 3868~4379。

选择合适的数据窗之后，根据零序导纳分配比例，向各条实测波形中分别注入不同幅值低频 25 Hz 零序电流，利用 Prony 算法辨识注入 25 Hz 零序电流波形。Prony 算法辨识准确度受采样点和模型阶数的影响较大，需要通过调整测试选择较为合适的采样点数和阶数。利用现场实测数据，对本文所提方法的有效性进行验证。各线路零序电流注入 25 Hz 电流信号后的波形如图 8 所示。

按照注入零序电流零序导纳分配原则，向图 7 各条线路的零序电流波形中注入 25 Hz 低频零序电流并根据实测波形做适当调整。图 8 中，零序电流波形中 915 线添加幅值为 2.8 A、913 线添加幅值为 4.3 A、937 线添加幅值为 1.3 A、929 线添加幅值为 8.5 A、927 线添加幅值为 12.4 A。对注入零序电流的波形进行 Prony 算法辨识，验证 Prony 算法应用于实测波形中的可行性。

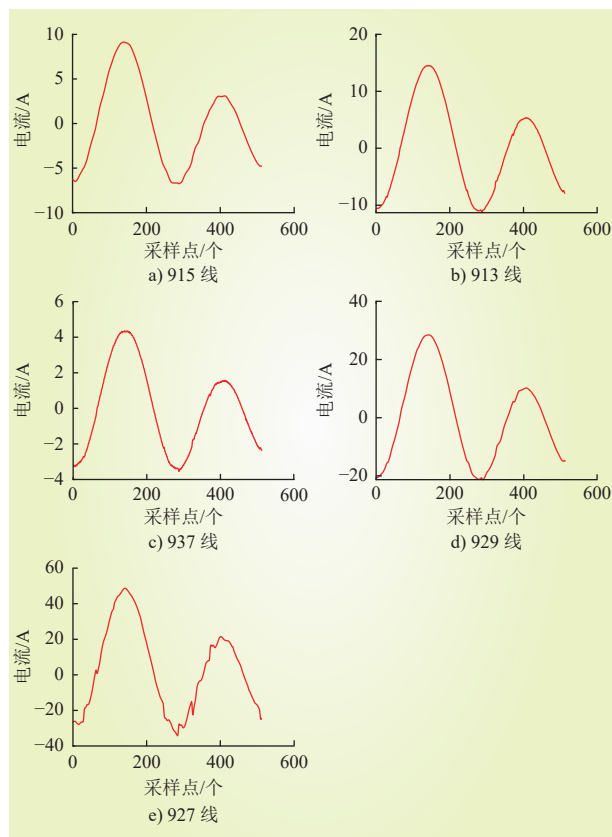


图 8 注入后零序电流波形

Fig. 8 Zero sequence current waveform after injecting

尽管数据窗选取时已经尽可能避开暂态过程，但故障稳态分量中可能仍然存在大量高频噪声信号，从而对 Prony 算法的准确性产生影响。因此，为提高算法辨识的准确性，需要先对含有高频噪声信号的线路低通滤波，滤除其中的高频分量。

由图 8 可以看出，927 线路波形畸变严重，含有大量高频噪声信号，先对其进行滤波之后再利用 Prony 算法进行辨识，低通滤波的截止频率为 200 Hz。以 927 线为例，具体说明本文方法的实施步骤。对 927 线路录波的零序电流波形中注入低频 25 Hz 电流信号，并对注入后的波形进行滤波处理，滤除其中的高频噪声信号，然后通过 Prony 算法进行拟合，辨识其中 25 Hz 低频分量，经滤波处理后的零序电流信号如图 9 所示，Prony 算法拟合结果如图 10 所示。

由图 10 可以看出，Prony 算法的采样点数和阶数能够很好地还原原始波形信号，拟合度较高。对于实测波形注入低频信号的 Prony 算法辨识结果如表 3 所示。

根据表 3 的辨识结果，不同线路中低频 25 Hz 分量各不相同，由前文分析可知，选取各条线路中注入 25 Hz 电流分量最大为故障馈线。5 条馈线中，927 线路所含注入低频电流分量最大，判定 927 线为故障馈线，判定结果与现场运行结果相

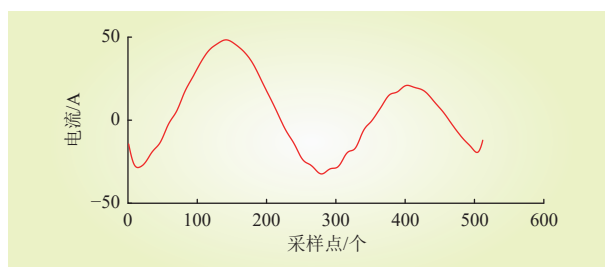


图 9 滤波后的电流波形

Fig. 9 Current waveform after filtering

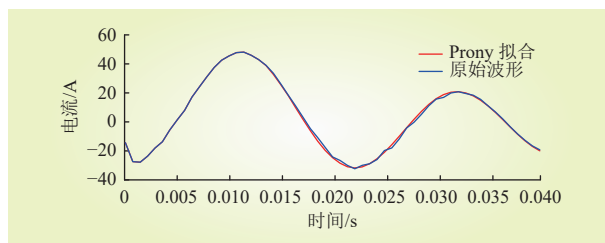


图 10 Prony 拟合效果

Fig. 10 Schematic diagram of Prony fitting effect



表 3 实测波形辨识结果
Table 3 Identification results of measured waveforms

线路	注入低频信号幅值/A	辨识结果/A
915	2.8	3.1
913	4.3	4.7
937	1.3	1.8
929	8.5	9.8
927	12.4	31.0

一致，验证了本文所提方法。

实测波形 2：为排除选择实测数据的偶然性，增选了另一组实测数据再次进行辨识。所选 2 组实测数据来自 2 个不同的谐振接地系统，且 2 组系统的拓扑结构和现场运行工况各不相同，尽可能排除实测数据选择的偶然性。系统 2 发生单相接地故障后的现场实测波形及 Prony 算法辨识数据窗选取如图 11 所示，选择其中 5 条线路的零序电流波形进行验证。

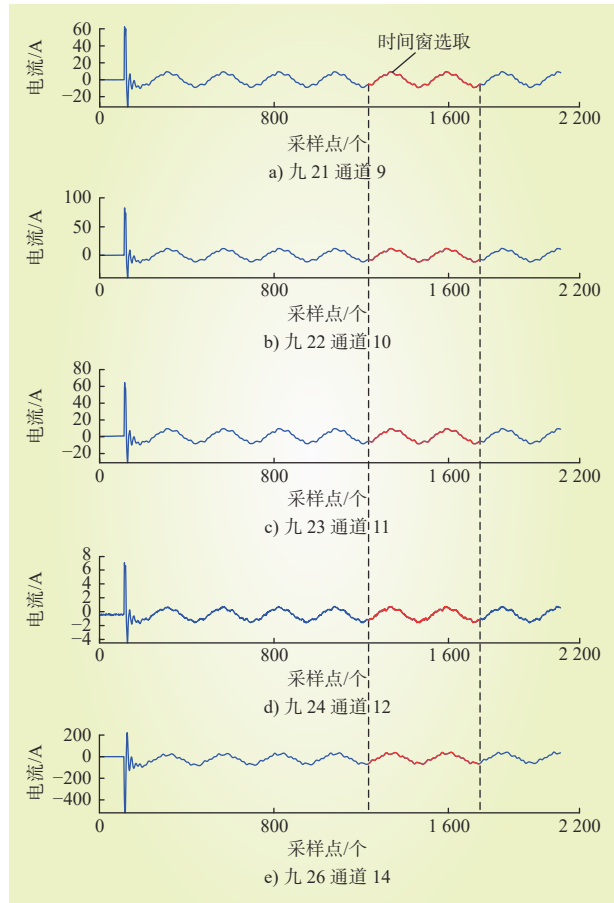


图 11 实测零序电流及数据窗选取
Fig. 11 Measured zero sequence current and data window

同理，这组数据中提取 0.04 s 的数据窗进行辨识。采样波段选择 12 632~14 745，避开故障的暂态过程，选择各条馈线的稳态零序电流波形进行辨识。由图 11 可知，通道 9、通道 10、通道 11 零序电流波形中谐波较小。Prony 算法辨识结果准确度较高，而通道 12 与通道 14 零序电流波形中还含有较高的高次谐波信号，需要先进行滤波，然后再添加 25 Hz 零序信号。添加 25 Hz 信号后的数据窗如图 12 所示。

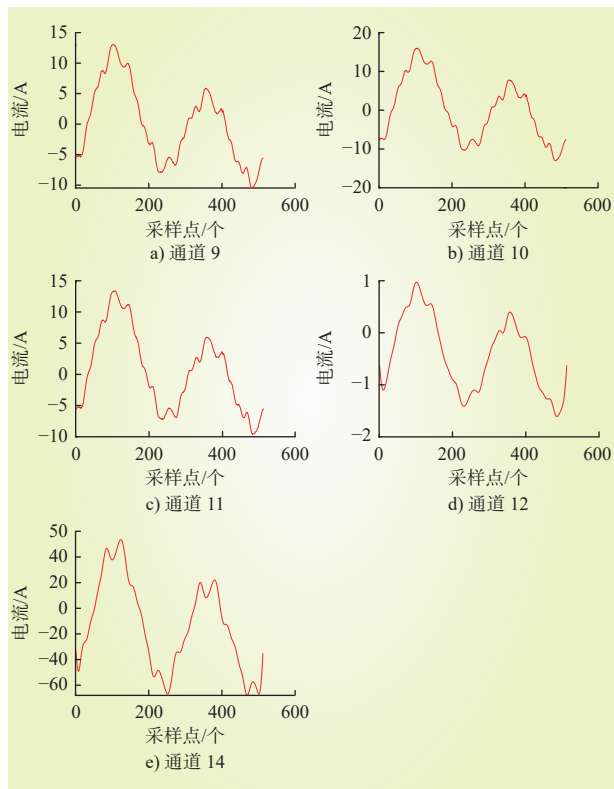


图 12 注入后零序电流波形
Fig. 12 Zero sequence current waveform after injecting

由图 12 可知，根据不同线路零序电流差异，分别向各条馈线添加不同比例的 25 Hz 零序电流分量，各条线路具体添加 25 Hz 分量幅值及 Prony 算法的最终辨识结果如表 4 所示。由表 4 的波形辨识结果也可看出，通道 14 中 25 Hz 频率分量含量最高，判定为故障线路。选线结果与现场工况一致。

根据表 4 的辨识结果，该 5 条馈线中，通道 14 发生故障导致接地导纳增大，使得注入低频信号大部分流向通道 14，故注入信号分量最大，判为故障线路，判定结果与现场运行结果相一致。

表 4 实测波形辨识结果

Table 4 Identification results of measured waveforms

线路	注入低频信号幅值/A	辨识结果/A
通道9	3.8	4.2
通道10	4.3	5.4
通道11	3.9	6.8
通道12	0.3	1.2
通道14	16.8	14.0

该结果表明，本文方法在工程实际中具有一定的应用价值。

文献[8]通过注入基波零序电流，构建基波零序电流精准分布模型，以“分担系数”表征线路零序导纳与系统总零序导纳比值，分析分担系数的幅相特征选线，但其需要仿真模拟出不同接地电阻下的分担系数，不利于工程应用。而本文方法无需得到注入电流分布趋势，利用注入信号的分布特性，仅需辨识出各馈线的注入信号差异即可实现故障选线，有利于工程实现。

5 结论

本文提出了一种基于 Prony 算法辨识的主动注入式故障选线新方法，得出以下结论。

1) 谐振接地系统中，注入电流在各馈线中的分布由线路的对地导纳决定。单相接地故障时，注入电流分布情况受到接地电阻影响，分布情况为该线路零序导纳与系统总零序导纳的比值。

2) 降低注入电流信号的频率，使健全馈线对地电容相对于注入电流的容抗增大，减小分流，有利于提高选线方法的准确率。单相接地故障后，故障馈线的零序导纳增大，注入电流分担比例增大，可根据健全线与故障线零序导纳的差异进行选线。

3) 通过现场实测波形验证了本文方法的适应性。工程应用中，只需得到各馈线的零序电流波形，利用本文方法即可实现故障选线，具有一定的工程应用价值。

参考文献：

- [1] 张帆, 薛永端, 徐丙垠. 基于信号注入的谐振接地系统故障点残流测算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 132–138.
- [2] 郑涛, 王赞鹏, 马家璇, 等. 适用于 UPFC 接入线路的主动注入式故障测距方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 138–145.
- [3] ZHANG Fan, XUE Yongduan, XU Bingyin. A method for calculating residual current in a resonant grounding system based on signal injection[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 132–138.
- [4] ZHENG Tao, WANG Yunpeng, MA Jiaxuan, *et al.* Fault locating method based on active injection for transmission lines equipped with UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 138–145.
- [5] WANG X W, GAO J, WEI X X, *et al.* Faulty feeder detection under high impedance faults for resonant grounding distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(3): 1880–1895.
- [6] 董俊, 李一凡, 束洪春, 等. 配电网馈出线单相永久性接地故障性质辨识方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4576–4585.
- [7] DONG Jun, LI Yifan, SHU Hongchun, *et al.* Study on identification method of single phase permanent ground fault in distribution network feedout line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4576–4585.
- [8] 曹赋禄, 赵晋斌, 潘超, 等. 基于 DFFT 的低压直流线路主动式接地故障定位方法[J]. 中国电力, 2023, 56(4): 184–191.
- [9] CAO Fulu, ZHAO Jinbin, PAN Chao, *et al.* An active ground fault location method for low-voltage DC lines based on DFFT[J]. Electric Power, 2023, 56(4): 184–191.
- [10] 黄亚峰, 王浩天, 朱登宝, 等. 基于零序电流特性的中性点灵活接地系统的故障选线方法[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(3): 16–22, 71.
- [11] HUANG Yafeng, WANG Haotian, ZHU Dengbao, *et al.* Fault line selection method for neutral flexible grounding system based on zero sequence current characteristics[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(3): 16–22, 71.
- [12] 王尊贤, 武守远, 栾晓明. 基于虚拟能量变化率的谐振接地系统高阻接地故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 137–146.
- [13] WANG Zunxian, WU Shouyuan, LUAN Xiaoming. Fault line selection method for high-impedance grounding fault of resonant grounded system based on change rate of virtual energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 137–146.
- [14] 刘宝稳, 曾祥君, 张慧芬, 等. 注入电流馈线分布特征及其在接地故障检测中的应用[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2731–2740.
- [15] LIU Baowen, ZENG Xiangjun, ZHANG Huifen, *et al.* Distribution model of injection current in feeder and its application in single phase

- to ground fault detection[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(7): 2731–2740.
- [9] 王晨清, 陈实, 齐贝贝, 等. 基于波形相关性的直流配电网主动式接地故障选线[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(3): 1–10.
- WANG Chenqing, CHEN Shi, QI Beibei, *et al.* An active grounding fault line selection method for DC distribution network based on waveform correlation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(3): 1–10.
- [10] 郭谋发, 陈静洁, 张伟骏, 等. 基于单相级联 H 桥变流器的配电网故障消弧与选线新方法[J]. *电网技术*, 2015, 39(9): 2677–2684.
- GUO Moufa, CHEN Jingjie, ZHANG Weijun, *et al.* A novel approach for fault arc extinguishing and feeder selection in distribution networks based on single-phase cascade H-bridge converter[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(9): 2677–2684.
- [11] 何瑞江, 胡志坚, 王天一. 计及分布式电源注入谐波的谐振接地系统故障选线方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 670–680.
- HE Ruijiang, HU Zhijian, WANG Tianyi. A fault line selection method for resonant grounding system considering injected harmonics of distributed generation[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 670–680.
- [12] 潘贞存, 张慧芬, 张帆, 等. 信号注入式接地选线定位保护的分析与改进[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(4): 71–75.
- PAN Zhencun, ZHANG Huifen, ZHANG Fan, *et al.* Analysis and modification of signal injection based fault line selection protection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(4): 71–75.
- [13] LIU B W, MA H Z, XU H H, *et al.* Single-phase-to-ground fault detection with distributed parameters analysis in non-direct grounded systems[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2019, 5(1): 139–147.
- [14] 叶雨晴, 马啸, 林湘宁, 等. 基于 SOP 的主动式谐振接地配电网单相接地故障区段定位方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(5): 1453–1465.
- YE Yuqing, MA Xiao, LIN Xiangning, *et al.* Active fault locating method based on SOP for single phase grounding faults in the resonant grounding distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(5): 1453–1465.
- [15] 白浩, 黄升平, 潘姝慧, 等. 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[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(4): 105–113.
- BAI Hao, HUANG Shengping, PAN Shuhui, *et al.* Zero sequence current multi-criteria line selection method based on active regulation of neutral voltage in distribution networks[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(4): 105–113.
- [16] 杨喜行, 黄纯, 申亚涛, 等. 基于损失功率匹配的配电线路故障定位方法[J]. *中国电力*, 2022, 55(8): 113–120.
- YANG Xixing, HUANG Chun, SHEN Yatao, *et al.* Fault location method for distribution lines based on loss power matching[J]. *Electric Power*, 2022, 55(8): 113–120.
- [17] 刘红文, 曾祥君, 柴晨超, 等. 配电网柔性接地装置注入非工频小信号的接地故障检测与区段定位方法[J]. *南方电网技术*, 2022, 16(6): 44–53.
- LIU Hongwen, ZENG Xiangjun, CHAI Chenchao, *et al.* Grounding fault detection and section location method of injecting non power frequency small signal into flexible grounding device of distribution network[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(6): 44–53.
- [18] 刘映彤, 黄纯, 袁静泊, 等. 谐振接地系统两点同相接地故障暂态特征及选线[J]. *中国电力*, 2022, 55(10): 62–70.
- LIU Yingtong, HUANG Chun, YUAN Jingbo, *et al.* Transient characteristics and line selection of two-point grounding faults on same phase in resonant grounding system[J]. *Electric Power*, 2022, 55(10): 62–70.
- [19] 盛亚如, 丛伟, 卜祥海, 等. 基于中性点电流与零序电流投影量差动的小电阻接地系统高阻接地故障判断方法[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(3): 17–22, 29.
- SHENG Yaru, CONG Wei, BU Xianghai, *et al.* Detection method of high impedance grounding fault based on differential current of zero-sequence current projection and neutral point current in low-resistance grounding system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(3): 17–22, 29.
- [20] TAYJASANANT T, WANG W C, LI C, *et al.* Interharmonic-flicker curves[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(2): 1017–1024.
- [21] 邵文权, 程畅, 卫晓辉, 等. 利用暂态电流 Hausdorff 距离的谐振配电网故障选线方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(8): 33–42.
- SHAO Wenquan, CHENG Chang, WEI Xiaohui, *et al.* Fault line selection scheme using the Hausdorff distance of transient current in resonant distribution networks[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(8): 33–42.
- [22] 何小龙, 高红均, 高艺文, 等. 基于 GA 优化 BP 神经网络的有源配电网高阻接地故障选线方法[J]. *智慧电力*, 2023, 51(4): 54–61.
- HE Xiaolong, GAO Hongjun, GAO Yiwen, *et al.* High resistance grounding fault line selection method for active distribution network

- based on GA optimized BP neural network[J]. *Smart Power*, 2023, 51(4): 54–61.
- [23] 束洪春. 电力工程信号处理应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [24] 郭亮, 屈新宇, 王晓卫, 等. 基于改进 Hough 变换的消弧线圈接地配电网故障选线新方法 [J]. *中国电力*, 2024, 57(7): 132–142.
- GUO Liang, QU Xinyu, WANG Xiaowei, *et al.* A novel fault feeder selection method for resonant grounding distribution networks based on improved Hough transform[J]. *Electric Power*, 2024, 57(7): 132–142.
- [25] 杨舟, 杨仁炘, 施刚, 等. 一种用于多端直流输电系统交流故障穿越的新型控制策略 [J]. *发电技术*, 2022, 43(2): 268–277.
- YANG Zhou, YANG Renxin, SHI Gang, *et al.* A novel control

strategy for AC fault ride through in multi-terminal DC system[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(2): 268–277.

作者简介:

王晓卫 (1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 从事电力系统继电保护、配电网接地故障处理研究, E-mail: proceedings@126.com;

岳阳 (1995—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护研究, E-mail: yue4230@126.com;

郭亮 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事配电网继电保护研究, E-mail: guoliangxinyu@126.com。

(责任编辑 于静茹)

Injection Current Distribution Characteristics Identification Based Distribution-Level Fault Line Selection

WANG Xiaowei¹, YUE Yang¹, GUO Liang², WANG Xue¹,
WANG Yizhao³, ZHANG Zhihua³, YANG Fengfeng⁴

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China; 2. Institute of Electric Power Research of Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330000, China; 3. Institute of Electric Power Research of Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710100, China; 4. Zhejiang Electric Transmission & Transformation Co., Ltd., Hangzhou 310020, China)

Abstract: Addressing the challenges posed by the subtle characteristics of single-phase grounding faults in resonant grounding systems, which lead to decreased sensitivity and reliability in fault line selection methods reliant on these characteristics, an innovative approach for fault line selection through active injection signal identification is proposed. Initially, the distribution characteristics of the injected current, influenced by line-to-ground conductance, are derived. These characteristics then form the foundation for constructing a robust line selection criterion. Furthermore, a thorough analysis is conducted to assess the impact of the injected signal on system operation from various perspectives. This analysis leads to the selection of an optimal injection signal with suitable parameters. Notably, to enhance the method's resilience against transition resistance, a decision is made to inject a low-frequency signal. Subsequently, the zero-sequence current of each feeder line is measured after injecting the signal. A specific steady-state zero-sequence current time window is identified, and the Prony algorithm is employed to accurately discern the 25Hz current amplitude within the zero-sequence current of each line. This approach enables precise fault line selection. Extensive PSCAD simulations and on-site waveform measurements validate the effectiveness of this method. The results demonstrate its ability to accurately identify fault lines across a range of fault scenarios, while maintaining excellent resistance to transition resistance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.52177114).

Keywords: distribution network; single phase ground fault; injection method; Prony algorithm identification; fault line selection