

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250725

适用于分布式电源谐波注入的灵活接地系统 高阻故障选线方法

刘晓军, 孙林远, 杨冬锋, 曲岳晗

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对灵活接地系统高阻接地故障场景下, 分布式电源(distributed generator, DG)谐波注入导致故障特征失真的问题, 提出一种计及 DG 谐波注入的灵活接地系统高阻故障选线方法。首先, 建立灵活接地模型, 分析中性点小电阻退出运行的暂态调控过程对系统参数的影响。然后, 基于小电阻退出后的系统参数分布特性, 提取馈线群间的主谐振分量, 并量化故障馈线与非故障馈线主谐振分量的相位差异特征。最后, 采用交叉小波变换提取线路间的高相关时域特征, 并利用平稳性检验消除 DG 注入谐波对高相关时域的干扰, 构建相位差异系数故障选线判据, 实现谐波-暂态双因素耦合场景下的高阻故障选线。Simulink 仿真结果表明, 所提方法适用于过渡电阻不超过 4000 Ω 的接地故障, 在弧光接地、强噪声干扰等极端工况下仍具有较高的可靠性。

关键词: 灵活接地系统; 高阻接地故障; 小电阻退出; 分布式电源; 故障选线

High-impedance fault line selection method for flexible grounding systems considering harmonic injection from distributed generators

LIU Xiaojun, SUN Linyuan, YANG Dongfeng, QU Yuehan

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,
Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

Abstract: In flexible grounding system under high-impedance grounding faults, harmonic injection from distributed generators (DG) can distort fault features, making accurate fault identification difficult. To address this issue, a high-impedance fault line selection method for flexible grounding systems that accounts for DG harmonic injection is proposed. First, a flexible grounding system model is established, and the impact of the transient control process caused by the withdrawal of the neutral-point small resistor on system parameters is analyzed. Then, based on the system parameter distribution characteristics after the small resistance is withdrawn, the dominant resonant components among feeder groups are extracted, and the phase difference characteristics between the dominant resonant components of faulty and healthy feeders are quantified. Finally, the cross-wavelet transform is applied to extract highly correlated time-domain features between lines, and stationarity tests are applied to eliminate the interference of DG-injected harmonics on the highly correlated time-domain signals. A phase difference coefficient fault selection criterion is constructed, enabling high-impedance fault line selection under coupled harmonic-transient scenarios. Simulink simulation results show that the proposed method is applicable to grounding faults with a transition resistance of up to 4000 Ω and maintains high reliability under extreme conditions such as arcing grounding and strong noise interference.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377170).

Key words: flexible grounding system; high-impedance grounding fault; small resistance removal; distributed generator; fault line selection

0 引言

配电网采用中性点灵活接地方式的目的在于, 当

系统发生永久性故障时, 能够借助并联小电阻的故障特征来实现故障选线与定位。然而, 实际运行情况表明, 我国采用该接地方式的变电站, 其保护动作率仅为 25.94%^[1]。进一步分析发现, 保护动作率偏低的主要原因在于: 当发生高阻接地故障时, 中

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377170)

性点并联小电阻常会异常退出运行。

现阶段基于故障暂态信号的小电流接地故障定位与选线方法虽已得到广泛应用^[2-4],但对于灵活接地系统单相接地故障各阶段的暂态特征分析、保护方法,以及逆变型分布式电源(distributed generator, DG)的谐波干扰研究仍存在不足。特别是当含逆变型DG的灵活接地系统发生高阻接地故障时,由于DG谐波输出特性与小电阻退出运行机制的协同作用,可能引发暂态特征耦合效应,导致现有暂态选线方法出现误动作^[5-7]。因此,针对该工况的选线方法仍亟待进一步优化与改进。

针对现有配电网接地保护方法在灵活接地方式下适应性不足的问题,近年来国内外学者提出了多种改进方法。文献[8]提出了一种基于零序电流畸变率的灵活接地高阻保护方法。该方法通过分析并比较故障馈线与非故障馈线低频暂态零序电流中直流分量的比值来进行故障判别。文献[9]提出了一种基于小电阻投入后扰动量标定的定位方法。文献[10-11]研究了小电阻投入前后故障线路与健全线路的零序电流、零序功率及零序导纳的变化规律,虽然耐过渡电阻能力较强,但发生高阻故障时,小电阻投入会导致零序电压稳态分量急剧减小,现有互感器难以满足测量要求。文献[12]重点分析了小电阻投入前后各电气信号变化量与线路对地参数、不平衡电流的关系。然而,上述方法普遍存在高阻故障特征信号微弱、检测困难的问题,而DG接入进一步增加了故障特征识别的难度。因此,亟需开发一种不受DG谐波干扰、耐过渡电阻能力强的故障诊断方法。

为此,文献[13]基于分布式电源接入特征及高阻故障非线性介质击穿原理,提出了一种宽频信号选线方法。文献[14]针对新能源电站接入配电网后源网中性点接地方式兼容性低的问题,提出了配电网单相接地故障协同处理方法。文献[15]研究了不同类型DG接入时的接地故障暂态特征变化规律。上述方法对高阻故障的非线性特征及DG接入的谐波干扰进行了深入分析,其分析对故障特征提取的理论研究具有重要理论支撑价值。但上述研究均基于传统配电网模型,未分析灵活接地系统并联小电阻退出时的暂态特征及分布式电源接入对故障特征的影响。

针对上述问题,本文提出一种适应于灵活接地系统中性点小电阻拒动且含DG注入谐波干扰的单相接地故障暂态选线方法,优势在于:1)能够依据馈线群主谐振分量在中性点电压的投影差异,提取小电阻退出运行时高阻故障的暂态特征;2)能够排除DG注入的谐波干扰并实现故障选线。

首先,建立灵活接地配电网模型,剖析高阻故

障工况下中性点小电阻异常退出的原因;然后,基于馈线群零序电流与中性点电压之间的主谐振分量关系,挖掘馈线群间主谐振分量相位差异特征;最后,针对分布式电源谐波注入场景,提出一种交叉小波变换联合平稳性检验的频域处理方法,突破传统方法在谐波干扰下的选线失效瓶颈,完成复杂场景下的故障选线。

1 含 DG 的灵活接地系统单相接地故障模型

图1为10 kV灵活接地系统示意图,图中: R_f 为过渡电阻; R_z 为小电阻; L_p 为消弧线圈电感; E_a 、 E_b 、 E_c 为三相电源电压; $Y_{G,n}$ 为线路导纳。工作原理为:电网正常运行或发生瞬时性故障时,小电阻控制开关S处于断开状态,中性点仅通过消弧线圈接地,此时灵活接地系统处于第一阶段;若瞬时性故障发展为永久性故障,S闭合,小电阻 R_z 投入,系统进入第二阶段。

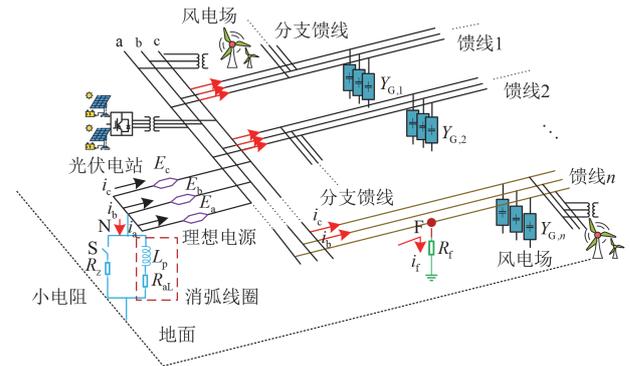


图1 10 kV 灵活接地系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 10 kV flexible grounding system

由于系统灵活接地故障模型的构建未考虑DG接入场景,导致其实际适用性受限。鉴于DG并网变压器网侧采用非接地方式,其零序电流无法直接注入电网,而是通过谐波耦合方式影响系统。因此,DG可等效为谐波源进行建模。图2所示的零序等效网络包含 n 条馈线,其第 n 条馈线发生故障。图中: U_f 与 U_0 分别为故障点与母线的零序电压; i_{0n} 为故障线路零序电流; $3L_p$ 为零序等效电感; $3R_z$ 为零序等效并联电阻; $3R_f$ 为零序等效过渡电阻; C_{0k} ($k=1,2,\dots,n-1$)为健全线路零序对地电容; C_{0n} 为故障线路零序对地电容。

2 含 DG 的灵活接地系统高阻接地故障小电阻退出暂态特征分析

基于图2的零序网络拓扑分析可知,小电阻退

出引发的固有暂态激励会与 DG 谐波交互生成的附加暂态分量发生混叠。这一复合特性显著增加了暂态特征提取的不确定性。为此, 本文提出采用 DG 并网前、后的双工况解耦分析法。通过分别研究 DG 无源接入与谐波注入场景下的动态响应, 辨识中性点与 DG 两类扰动源的作用路径, 从而有效解决多激励耦合下传统单维度判据的适应性问题。

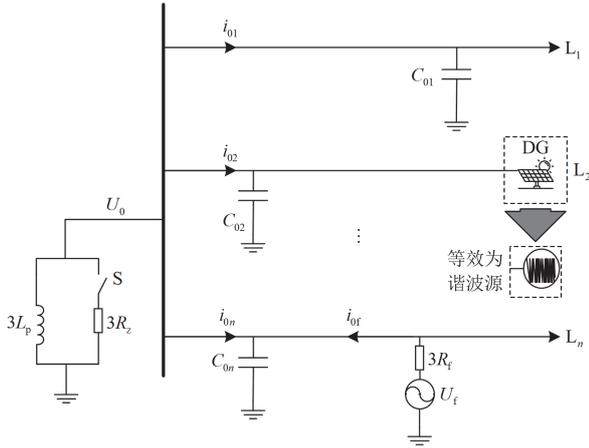


图2 含 DG 的灵活接地系统单相接地零序等效模型

Fig. 2 Single-phase ground fault zero-sequence equivalent model of a flexible grounding system with DG

2.1 中性点小电阻退出原因分析

灵活接地系统中, 小电阻的闭合与断开直接影响中性点检测系统对故障的感知能力。目前国内相关研究主要包括两类: 中性点电流突变启动保护^[16-17]和零序电压阈值启动保护^[18-19]。小电阻的状态变化与中性点的电压和电流特征相关。根据文献[16]可知, 小电阻并联后的零序电压如式(1)所示。

$$\begin{cases} U_0 = \frac{U_f}{1 + R_f/R_z + j3\omega v R_f C_{0\Sigma}} \\ i_{0n} = \frac{U_f}{3\omega L_p [-3\omega v R_f C_{0\Sigma} + j(1 + R_f/R_z)]} + \frac{U_f}{3R_z + 3R_f + j9\omega v R_f R_z C_{0\Sigma}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为公频频率; v 为消弧线圈补偿脱谐度, 过补偿状态下取值一般为 $-10\% \sim -5\%$ ^[20]; $C_{0\Sigma}$ 为网络对地分布电容, $C_{0\Sigma} = \sum_{i=1}^{n-1} C_{0i} + C_{0n}$ 。

根据式(1), 令 $v = -10\%$, $R_z = 10 \Omega$, $|U_f| = 10\sqrt{2}/\sqrt{3} \text{ kV}$, 对不同过渡电阻和系统对地零序电容情况下的零序电压和零序电流特征进行分析, 分别如图 3、图 4 所示。

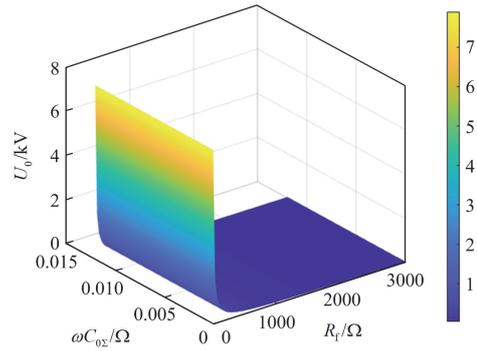


图3 并联小电阻投入后母线零序电压分布

Fig. 3 Busbar zero-sequence voltage distribution after the parallel small resistor is connected

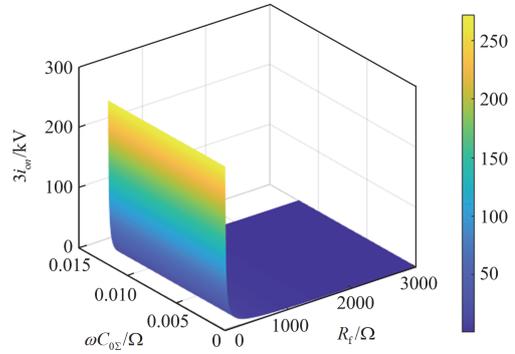


图4 并联小电阻投入后 $3i_{0n}$ 分布

Fig. 4 Distribution of $3i_{0n}$ after the parallel small resistor is connected

由图 3 与图 4 可知, 当系统发生 $R_f > 1000 \Omega$ 的高阻接地故障时, 中性点小电阻的投入将导致中性点零序电压及零序电流骤降。该暂态过程使零序电气量低于故障检测阈值, 保护装置误判为故障已消除, 进而触发小电阻的退出机制, 退出形成的二次暂态过程会严重干扰传统暂态选线算法。

2.2 基于暂态电流主谐振分量差异的高阻故障特征

为实现灵活接地系统在小电阻异常退出工况下的高阻故障选线, 本节将构建暂态零序模型解析暂态演化机理。小电阻退出时的单相接地简化零序模型如图 5 所示。

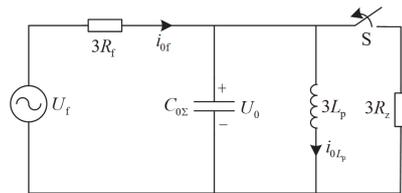


图5 中性点小电阻退出时等效零序模型

Fig. 5 Equivalent zero-sequence model when the small resistor at the neutral point is disconnected

当系统发生高阻接地故障时, 中性点小电阻投入运行, 引起中性点电压骤降, 系统误认为故障已清除, 小电阻异常退出。其暂态过程可归因于消弧线圈等效电感 L_p 与网络对地分布电容 $C_{0\Sigma}$ 间的动态匹配关系。可列出小电阻退出运行的暂态方程为

$$\begin{cases} U_f = 3R_f \left(C_{0\Sigma} \frac{dU_0}{dt} + i_{0L_p} \right) + U_0 \\ U_0 = 3L_p \frac{di_{0L_p}}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_{0L_p} 为流经消弧线圈的电流; $U_f = U_{ph} \cos(\omega t + \varphi)$, U_{ph} 为故障相电压幅值, φ 为故障初相角。

系统的阻尼特性可依据过渡电阻阻值划分为欠阻尼和过阻尼两种状态^[21]。由前文可知, 当过渡电阻超过 1000 Ω 时, 中性点零序电压与电流均显著衰减, 此时系统处于欠阻尼状态。基于此特性, 本文将重点研究高阻故障下中性点小电阻异常退出后的欠阻尼暂态过程。

当过渡电阻 R_f 满足式(3)时, 系统为欠阻尼状态。

$$R_f > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_p}{C_{0\Sigma}}} \quad (3)$$

此时, 流经消弧线圈的零序电流暂态分量 i_{0L_T} 为

$$i_{0L_T} = e^{-\delta t} [A_1 \cos(\omega_f t) + A_2 \sin(\omega_f t)] \quad (4)$$

式中: ω_f 为主谐振频率; δ 为衰减因子; A_1 、 A_2 、 ω_f 、 δ 的具体表达式见附录 A 式(A1)。

由式(4)可知, 流经消弧线圈的零序电流暂态分量为频率 ω_f 所对应的分量, 即主谐振分量, 该分量信号能量最大, 最能表征故障电流的暂态特征^[21]。因此, 可采用主谐振分量表征小电阻退出运行后的暂态特征。

进一步可得出母线零序电压主谐振分量 U_{0_T} 为

$$U_{0_T} = 3L_p (di_{0L_T} / dt) = 3L_p (A_2 \omega_f - \delta A_1) e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega_f t) + 3L_p (-A_1 \omega_f - \delta A_2) e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) \quad (5)$$

各健全馈线对地电容电流主谐振分量 i_{0k_T} 为

$$i_{0k_T} = C_{0k} \frac{dU_{0_T}}{dt} = 3L_p C_{0k} (\delta^2 A_1 - A_1 \omega_f^2 - 2\delta A_2 \omega_f) e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) + 3L_p C_{0k} (\delta^2 A_2 - A_2 \omega_f^2 + 2\delta A_1 \omega_f) e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) \quad (6)$$

故障点零序电流主谐振分量 i_{0f_T} 可表示为

$$i_{0f_T} = i_{0L_T} + i_{0C_{0\Sigma_T}} = -\frac{L_p (A_2 \omega_f - \delta A_1)}{R_f} e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega_f t) - \frac{L_p (-A_1 \omega_f - \delta A_2)}{R_f} e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) \quad (7)$$

式中: $i_{0C_{0\Sigma_T}}$ 为系统总对地电容电流暂态分量。

故障馈线出口处零序电流主谐振分量 i_{0n_T} 为

$$i_{0n_T} = -i_{0f_T} + i_{C_{0n_T}} = -[A_1 + L_p (C_{0\Sigma} - C_{0n}) (A_1 \delta^2 - A_1 \omega_f^2 - 2A_2 \omega_f \delta)] \cdot e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) - [A_2 + L_p (C_{0\Sigma} - C_{0n}) \cdot (A_2 \delta^2 - A_2 \omega_f^2 + 2A_1 \omega_f \delta)] e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) \quad (8)$$

式中: $i_{C_{0n_T}}$ 为故障馈线对地电容电流暂态分量。

由式(6)可知, 健全馈线主谐振分量具有同相位特性。对于故障馈线与健全馈线间的主谐振分量相位关系, 式(6)、式(8)未能表征其数学关联。本文将通过对故障、健全馈线主谐振电流分量与中性点电压上的主谐振分量差异特性, 表征故障特征的相位偏移量。

式(6)表明: 健全馈线主谐振分量由衰减的正弦分量与余弦分量组成, 定义健全馈线零序电流主谐振分量中余弦分量与正弦分量的幅值比为 X , 如式(9)所示。

$$X = \frac{\delta^2 A_1 - A_1 \omega_f^2 - 2\delta A_2 \omega_f}{\delta^2 A_2 - A_2 \omega_f^2 + 2\delta A_1 \omega_f} \quad (9)$$

由式(9)可知, X 是关于 δ 、 A_1 、 A_2 的函数, 且这些参数由 R_f 、 $C_{0\Sigma}$ 、 L_p 构成。由于 10 kV 配电网中, 系统总对地电容电流极限值为 200 A^[22], 消弧线圈需满足 $0.0835 \text{ H} \leq L_p \leq 1.750 \text{ H}$, 网络对地分布电容满足 $1.838 \mu\text{F} \leq C_{0\Sigma} \leq 36.75 \mu\text{F}$, 最终可得 $X_{\min} = 11.328$ 。这表明在健全馈线零序电流主谐振分量中, 余弦分量占比远大于正弦分量, 因此, 为便于分析, 将忽略健全馈线中衰减的正弦分量, 如式(10)所示。

$$i_{0k_T} = 3L_p C_{0k} (\delta^2 A_1 - A_1 \omega_f^2 - 2\delta A_2 \omega_f) e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) \quad (10)$$

可得健全馈线与中性点电压主谐振分量的相位差为

$$\varphi_{U, i_{0k_T}} = 90^\circ + \frac{\sqrt{A_1 + 2\delta \omega_f \sin(\omega_f t)}}{\omega_f C_{0\Sigma} \sqrt{A_2^2 + A_1 R_f \cos(\omega_f t)}} \quad (11)$$

由式(11)可知, 健全馈线与中性点电压间的主谐振分量相位差大于 90° 。

根据式(5)与式(7), 可得故障点主谐振分量与中性点电压的关系, 如式(12)所示。

$$i_{0f_T} = -\frac{L_p (A_2 \omega_f - \delta A_1)}{R_f} e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) - \frac{L_p (-A_1 \omega_f - \delta A_2)}{R_f} e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) = -\frac{U_{0_T}}{3R_f} \quad (12)$$

故障馈线出口零序电流主谐振分量由馈线对地

电容电流暂态分量 $i_{C_{0n_T}}$ 与故障点主谐振分量 i_{0f_T} 构成, 故障馈线出口零序电流主谐振分量为

$$i_{0n_T} = -i_{0f_T} + i_{C_{0n_T}} \approx -i_{0f_T} = \frac{U_{0_T}}{3R_f} \quad (13)$$

因 $i_{0f_T} \gg i_{C_{0n_T}}$, 可将式(13)中故障馈线出口零序电流等效简化为故障点的零序电流主谐振分量。由式(13)可知, 故障馈线出口处零序电流与中性点电压间的主谐振分量比值为大于零的常数, 表明故障馈线出口处零序电流与中性点电压间的主谐振分量同相。因此, 故障馈线与健全馈线主谐振分量之间的相位差可等效为健全馈线与中性点电压主谐振分量之间的相位差。由式(11)可知, 健全馈线与中性点电压间的主谐振分量相位差大于 90° 。因此, 中性点小电阻退出后, 故障馈线与健全馈线的主谐振分量差异显著。

2.3 DG 注入谐波对馈线原有暂态特征的影响

逆变型 DG 通过并网逆变器向系统注入不平衡电流, 低次谐波含量尤为明显。且受并网逆变器影响, 对于 DG 注入谐波, 频率最低为 5 次谐波^[23]。设 DG 接入馈线 n , 注入点处的 q 次主谐振分量为 i_{0q} , 非 DG 注入馈线 x 首端的 q 次主谐振分量为

$$i_{0xq} = [Z_n(\omega_q) + Z_{DG}]i_{0q}/Z_x(\omega_q) \quad (14)$$

式中: $x=1,2,\dots,M, x \neq n$; ω_q 为 q 次谐波频率; $Z_n(\omega_q)$ 为非 DG 接入馈线 x 的输入阻抗; $Z_x(\omega_q)$ 为馈线 x 从 DG 接入点到母线的输入阻抗; Z_{DG} 为 DG 的等效输出阻抗。

考虑 DG 向系统注入不平衡谐波电流后, 各线路首端检测到的零序电流在原来 i_{0q} 的基础上叠加了 i_{0xq} , 即检测到的故障零序电流为

$$i'_{0q} = i_{0q} + i_{0xq} \quad (15)$$

由式(15)可知, 各馈线的 DG 谐波分量 i_{0xq} 间的相位关系由 DG 接入位置决定, 并在系统从故障暂态过渡至稳态期间保持恒定, 不具备时变性。而与单相接地故障暂态过程相关的零序电流主谐振分量 i_{0q} , 相位特征取决于故障位置。

因此, 当故障发生于 DG 接入馈线时, 故障馈线的主谐振分量和 DG 谐波分量均与健全馈线呈现显著相位差异。然而, 当故障发生于非 DG 接入馈线时, 故障馈线的 DG 谐波分量不再与健全馈线的谐波分量呈现显著相位差异; 此时, DG 谐波分量显著的相位差异仅存在于 DG 接入馈线首端与非 DG 接入馈线首端之间。若 DG 谐波分量所在频段与主谐振分量的频段不重合, 则不同馈线中 DG 谐

波分量的相位关系可能对主谐振分量的相位关系构成干扰。此干扰耦合效应改变了故障固有的特征模式, 进而导致基于时频分析与相关性分析的故障选线方法存在误判风险。

3 基于主谐振分量相位差异特征的高阻故障选线方案

DG 谐波注入会干扰主谐振分量的相位特征, 导致传统选线方法可靠性降低。本文采用交叉小波变换提取馈线群间的相位差异特征, 构建故障选线判据。

3.1 利用交叉小波变换剔除 DG 注入谐波方法

交叉小波变换表征馈线零序电流的时频相关性及其相位关系。通过量化两信号在时域内的相关程度, 联合分析非平稳信号的时频域相关性, 提取小电阻退出时的高相关时频窗 (high-resolution window, HRW)^[24]。有效避免了传统方法中存在的模式混叠与过分解问题。

高相关时频窗为所选线路与参考线路交叉小波变换后的高相关重叠区域。该区域通常包含一个或多个不连通时频集合。通常将包含频率峰值最高的重叠区域定义为自适应时频窗。但自适应时频窗通常为谐振频段与谐波频段的混叠区域, 本文将利用平稳性检验剔除 DG 谐波干扰。

当主谐振频率与谐波频率处于不同频段时, 在系统小电阻退出前后, 谐波频段信号的相位未发生明显变化, 这表明谐波分量不受暂态过程干扰。然而, 当主谐振频率与谐波频率处于相同频段时, 中性点小电阻退出引发的暂态过程将对谐波频段产生干扰, 导致其相位特征在切换前后产生异常偏移。定义待选馈线 x' 与馈线 x 在高相关时频窗内的平均相位差 $\theta_{xx'}$ 如式(16)所示。

$$\theta_{xx'} = \frac{\sum_{\eta=\eta_1}^{\eta_2} \theta_{xx'}(\eta, \tau)}{N_{HRW}} \quad (16)$$

式中: η 和 τ 分别表示位移算子和尺度算子; $\theta_{xx'}(\eta, \tau)$ 表示特定时间段内的相位集; N_{HRW} 为闭合时频区域 HRW 内的总点数。

若目标时频窗落在 5 次谐波所在频段, 需截取谐波频段 q 故障前、后各 5 ms 长的相位序列 $\theta_{q1}(y)$ 和 $\theta_{q2}(y)$, $\theta_{q1}(y)$ 表示故障前 5 ms 的相位序列, $\theta_{q2}(y)$ 为故障后 5 ms 的相位序列, 按式(17)进行平稳性检验, 平稳性检验系数 ρ 为

$$\rho = \left| \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1} \right| \quad (17)$$

式中: σ_1 、 σ_2 分别为 $\theta_{q1}(y)$ 、 $\theta_{q2}(y)$ 的标准差。

经大量仿真分析得出, 当出现 $\rho < 3$ 时, 判定中性点小电阻退出后相位序列未发生扰动, 摒弃该高相关时频区域, 在不考虑该高相关时频区域的情况下, 重新确定峰值最高的时频集合为自适应时频窗。当出现 $\rho \geq 3$ 时, 判定中性点小电阻退出后相位序列产生扰动, 该高相关时频区域为自适应时窗。

3.2 基于相位差异系数构建故障选线判据

根据重新确定的自适应时窗, 求取馈线群交叉小波变换后得到的平均相位差 $\theta_{xx'}$ 和相位差异系数, 相位差异系数求取过程如下。

自适应时窗确定馈线间的平均相位差, 得到相位差矩阵 θ 如式(18)所示。

$$\theta = \begin{bmatrix} 0 & \theta_{12} & \cdots & \theta_{1M} \\ \theta_{21} & 0 & \cdots & \theta_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{M1} & \theta_{M2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: θ 为 M 阶方阵。矩阵中元素最大值为 θ_{\max} 。馈线 x 与其余所有馈线间相位差异系数 ζ_x 可通过(19)得到。

$$\zeta_x = \left| \frac{\sum_{x'}^M \theta_{xx'} - \theta_{\max}}{M-2} \right| \quad (19)$$

若馈线 x 为故障馈线时, $\sum_{x'}^M \theta_{xx'}$ 数值接近 θ_{\max} 的 $M-1$ 倍, ζ_x 数值接近 θ_{\max} , 若馈线 x 为健全馈线时, $\sum_{x'}^M \theta_{xx'}$ 数值接近 θ_{\max} , ζ_x 数值接近 0。最终得到相位差异向量为

$$\zeta = [\zeta_1 \zeta_2 \cdots \zeta_M] \quad (20)$$

当检测到特定馈线相位差异系数 ζ_x 明显超出其他线路对应参考阈值时, 馈线 x 被识别为故障馈线。

当出现某一 ζ_x 数值明显大于其余馈线间的相位差异系数时, 则馈线 x 为故障馈线。

根据各馈线的相位差异特征进行故障选线, 利用判据给出选线结果, 考虑到小电阻退出后, 故障过程由暂态向稳态过渡, 且故障馈线与健全馈线间主谐振分量相位差大于 90° , 设定相位差阈值 $\zeta_{\text{set}} = 30$, 设向量 ζ 中元素的最大值为 ζ_{\max} 。

相位判据为

$$\zeta_{\max} < \zeta_{\text{set}} \quad (21)$$

$$\zeta_{\max} \geq \zeta_{\text{set}} \quad (22)$$

若满足式(21), 则为母线故障; 若满足式(22),

则为对应 ζ_{\max} 的馈线发生故障。

3.3 谐波-暂态双因素耦合场景下故障处理流程

1) 故障检测。发生高阻故障后, 灵活接地系统进入第二阶段, 母线零序电压降落在投入前零序电压的 1.7%~4.7%^[16], 然而, 在第二阶段小电阻投入又退出运行后, 母线电压会急剧上升。因此, 可根据灵活接地系统母线零序电压是否激增来判断小电阻的退出情况, 当出现 $u_{02} > 4.7\%u_{01}$ 时, 判定第二阶段小电阻退出运行。其中: u_{01} 为灵活接地系统第一阶段中性点零序电压; u_{02} 为第二阶段零序电压。

2) 信号获取。针对交叉小波变换存在边界失真效应, 截取小电阻退出前后特定时段(前 30 ms/后 40 ms)内所有馈线零模电流采样序列 $i_x(t)$ 。

3) 线路零模电流进行两两交叉小波变换。对馈线 i_x 与 $i_{x'}$ 的零序电流 $i_x(t)$ 和 $i_{x'}(t)$ 实施交叉小波变换, 得到高相关时频窗和平均相位差 $\theta_{xx'}$ 。

4) 相位序列平稳性检验。若目标时频窗落在谐波所在频段, 则利用平稳性检验方法判定小电阻退出后相位序列是否发生扰动, 确定自适应时窗。

5) 利用自适应时窗求取相位差异系数。根据重新确定的自适应时窗, 求取所有馈线间交叉小波变换后得到的平均相位差 $\theta_{xx'}$, 并进一步求取 ζ 。

6) 故障选线。根据各馈线的相位差异特征进行故障选线, 利用判据给出选线结果, 本文算法流程图如图 6 所示。

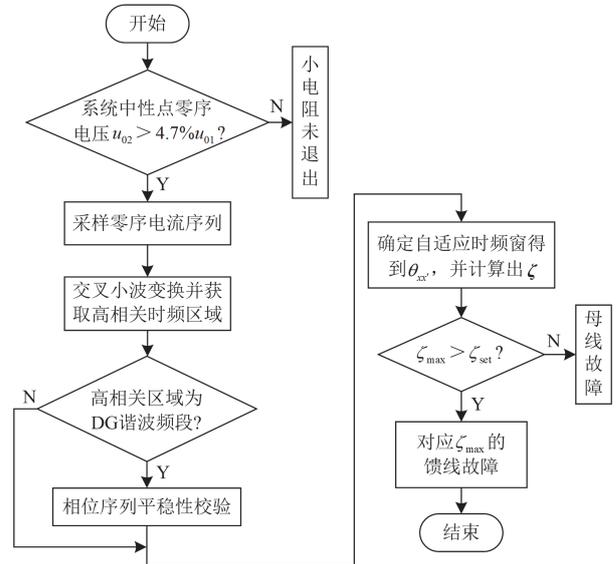


图 6 小电阻退出运行故障处理流程图

Fig. 6 Fault handling flowchart for disconnection of small resistor

4 算例仿真与分析

为验证本文方法对于灵活性接地配电网发生单

相接地故障时选线方法的有效性, 本文在 MATLAB/Simulink 仿真环境中搭建含逆变型 DG 的 10 kV 配电系统, 如图 7 所示, 线路及设备相关参数见附录 A 表 A1、表 A2。

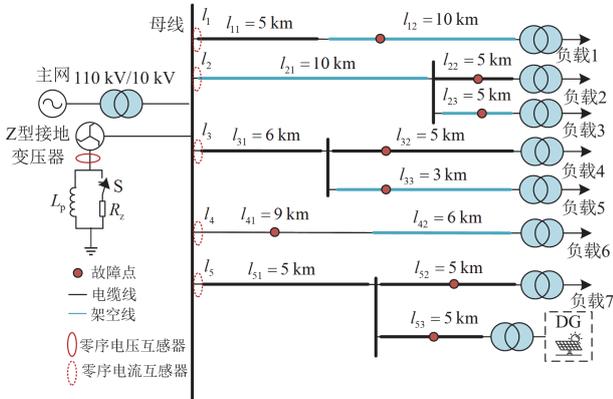


图 7 10 kV 灵活性接地配电网配电系统仿真结构设置

Fig. 7 Simulation structure setup of 10 kV flexible grounding distribution network

4.1 算法可靠性分析

考虑不同故障馈线、过渡电阻、故障位置的干扰验证在中性点小电阻退出时本文选线方法的有效性。以距离母线 12 km 处馈线 l_{22} 发生故障为例, 过渡电阻为 1000Ω , 记录中性点电压出现 $u_0(t) > 4.7\%u_{01}$ 时的小电阻异常退出时刻 t , 并提取小电阻退出前后特定时段内所有馈线零模电流采样序列 $i_x(t)$, 馈线首端零序电流如图 8 所示, 从图 8 可以看出, 各馈线首端的零序电流受谐波干扰明显, 对线路起始端零序电流实施两两交叉小波分析, 受篇幅限制, 本文重点呈现 l_1 与 l_2 组合及 l_2 与 l_3 组合的交叉小波功率谱对比结果, 分别如图 9、图 10 所示。图中, 纵坐标代表尺度因子 c , 其对应的频率为 f_s/c , f_s 表示采样频率, 功率谱各尺度因子之间对应频段编号及频率范围详细见附录 B 表 B1。

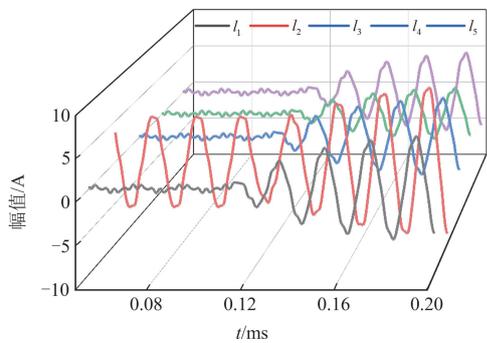


图 8 馈线首端零序电流

Fig. 8 Zero-sequence current at the feeder head

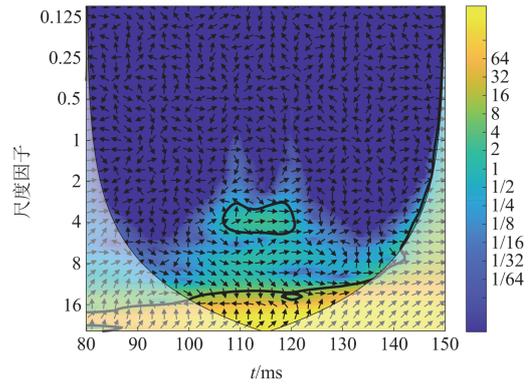


图 9 l_1 与 l_2 的交叉小波功率谱

Fig. 9 Cross wavelet power spectrum of l_1 and l_2

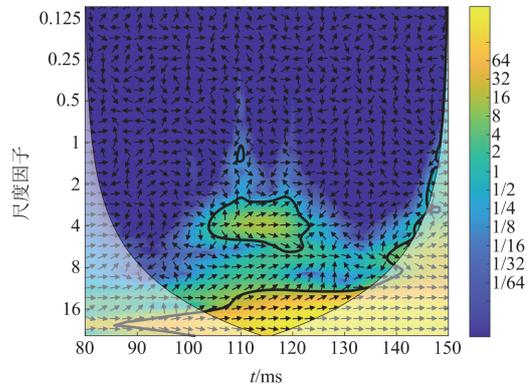


图 10 l_2 与 l_3 的交叉小波功率谱

Fig. 10 Cross wavelet power spectrum of l_2 and l_3

在图 9 与图 10 中, 黑色包络线表示两馈线间相关性最高的时频窗。箭头方向表征信号间相位差异, 具体对应关系为 0° 、 90° 、 180° 、 270° 相位偏移分别对应右向、下向、左向、上向的黑色矢量指示。本文为了方便后续相位比较, 将相位差从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 转换为 $-180^\circ \sim 180^\circ$, 并取绝对值。

由图 9 与图 10 可以看出, 高相关时频区域分别落在尺度因子为 3~6 与 16 及以上的频段。由附录 B 表 B1 可知, 尺度因子在 3~6 之间的频段对应 5 次谐波所在频段(即 DG 谐波所在频段), 故需对 DG 谐波所在频段进行平稳性检验。首先对尺度因子在 3~6 的频段进行平稳性检验, 得到 $\rho = 0.231$ 。故排除尺度因子在 3~6 的区域。确定尺度因子在 16 及以上的频段为自适应时频窗, 时间窗为 $[100.1, 123]$ ms。自适应时频窗确定后, 根据式(16)求取各条馈线的平均相位差, 馈线 1 与馈线 2~5 的平均相位差为 $[112.37^\circ \ 2.71^\circ \ 1.22^\circ \ 3.85^\circ]$, 并依次求取馈线 2~5 与各条馈线的平均相位差, 得到平均相位差矩阵 θ 为

$$\theta = \begin{bmatrix} 0 & 112.37 & 2.71 & 1.22 & 3.85 \\ 112.37 & 0 & 109.83 & 113.27 & 108.72 \\ 2.71 & 109.83 & 0 & 0.31 & 1.92 \\ 1.22 & 113.27 & 0.31 & 0 & 1.01 \\ 3.85 & 108.72 & 1.92 & 1.01 & 0 \end{bmatrix}$$

进一步根据式(18)、式(19)求出相位差异向量： $\zeta = [2.29 \ 110.31 \ 0.5 \ 0.85 \ 0.74]$ ， $\zeta_2 = \zeta_{\max} = 110.31 > \zeta_{\text{set}} = 30$ 。馈线 l_2 为故障馈线，选线正确。

为进一步验证本文测试方法的有效性，分别考虑不同故障分支馈线、故障点到母线距离 D 、过渡电阻 R_f 对本文方法进行验证，从表 1 可以看出，本文方法在不同过渡电阻及故障距离情况下均能准确选线。

表 1 高阻故障选线结果

Table 1 High-resistance fault line selection results

故障馈线	D/km	R_f/Ω	ζ	选线结果
l_{12}	8	1000	[113.42 0.79 0.10 0.09 0.32]	l_1
l_{23}	12	1000	[0.82 112.60 0.13 0.03 0.14]	l_2
l_{31}	1	2000	[0.76 0.09 109.27 0.14 0.28]	l_3
l_{33}	8	2000	[0.98 2.21 110.29 0.20 0.71]	l_3
l_{41}	2	3000	[0.86 1.74 0.74 107.61 0.82]	l_4
l_{51}	1	3000	[0.11 0.91 3.26 0.72 106.76]	l_5
l_{53}	14	4000	[0.11 0.91 3.26 0.72 105.23]	l_5

4.2 噪声情况干扰

为验证选线方法对噪声干扰的耐受能力，本文以馈线 l_{33} 距离母线 7 km 处故障、加入信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 为 60 dB 的白噪声、过渡电阻为 1000 Ω 的单相接地故障为例，交叉小波功率谱如图 11 所示。

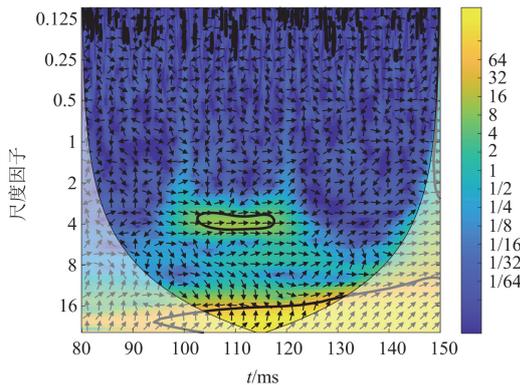

 图 11 噪声干扰下 l_2 与 l_3 的交叉小波功率谱

 Fig. 11 Cross wavelet power spectrum between l_2 and l_3 under noise interference

由图 11 可以看出，白噪声出现在尺度因子为 0.125~0.25 的区间，对应的频率分段为 2000~5000 Hz。而 DG 谐波频段与馈线主谐振频段出现在较高的尺

度因子区间，不受白噪声影响。接下来将以过渡电阻 $R_f = 4000 \Omega$ 为例，考虑不同故障分支馈线、故障点到母线距离 D 、信噪比 SNR 对本文方法进行验证。

由表 2 可知，在噪声干扰条件下，故障线路的 ζ 参数显著高于非故障线路，这表明所提方法不仅能实现准确故障辨识，还具有良好的噪声抑制特性。

表 2 不同噪声干扰下的故障选线结果

Table 2 Fault line selection results under different noise interference

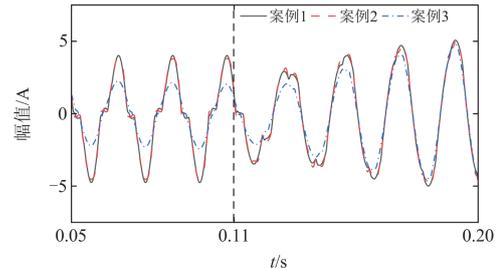
分支馈线	白噪声 SNR/dB	D/km	ζ	选线结果
l_{12}	无噪声	9	[110.39 0.79 0.21 0.09 0.32]	l_1
l_{22}	100	12	[0.38 106.12 0.08 0.19 1.38]	l_2
l_{23}	100	12	[1.27 108.29 3.27 2.31 1.13]	l_2
l_{31}	90	1	[3.77 2.69 106.98 1.02 1.19]	l_3
l_{33}	90	7	[3.21 1.31 105.01 1.81 5.26]	l_3
l_{42}	80	10	[2.92 3.08 1.13 102.37 4.10]	l_4
l_{51}	70	1	[6.37 4.19 4.32 3.75 104.92]	l_5
l_{52}	60	12	[5.53 4.69 7.30 1.31 103.07]	l_5

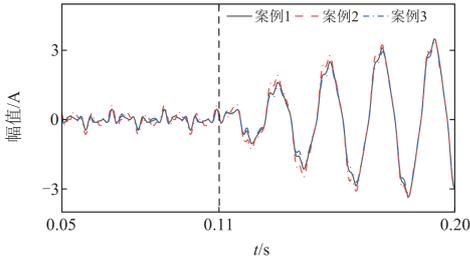
4.3 电弧工况影响

为验证本文方法在弧光接地情况下的适用性，本文采用 Emanuel 电弧模型来模拟电弧故障，电弧模型如附录 B 图 B1 所示。模型回路由两个直流电源 (V_p 、 V_q) 和两个二极管 (D_p 、 D_q) 组成。用 V_p 和 V_q 模拟电弧电压，其值根据系统的电压水平和不对称建模的要求变化，并且这些电压值随时间随机且独立地波动。此外，通过调节电阻 R_p 和 R_q 取值，模型能够模拟电弧电流的不同不对称性。3 种不同的电弧参数配置如附录 B 表 B2 所示^[25-26]。

从图 12 中 3 种案例的馈线首端零序电流可以看出，3 种电流波形熄弧时间存在明显差异，并在中性点小电阻退出后，馈线电流产生了明显的非线性畸变。本文将根据 3 种电弧案例验证选线方法的有效性，判定结果如表 3 所示。

由表 3 实验数据分析可知，在电弧干扰工况下，所提方法仍可对故障馈线进行有效辨识。


 (a) 故障馈线 l_2 首端零序电流



(b) 健全馈线 l_1 首端零序电流

图 12 馈线首端电流

Fig. 12 Feeder first-end current

表 3 电弧故障判定结果

Table 3 Arc fault judgement results

分支 馈线	D/km	电弧 案例	ζ	选线 结果
l_{12}	6	1	[123.82 0.81 0.34 0.06 0.09]	l_1
		2	[118.41 1.77 3.69 1.32 2.91]	l_1
l_{21}	7	1	[1.87 119.87 1.13 0.02 0.75]	l_2
		2	[5.09 116.64 6.87 5.16 1.35]	l_2
l_{31}	3	1	[0.62 0.26 109.62 0.87 0.35]	l_3
		3	[3.16 2.91 107.83 5.85 2.11]	l_3

4.4 方法对比分析

为了突出本文所提方法的有效性，在图 7 中不同故障位置、过渡电阻情况下进行接地故障实验，将本文所提方法与采用馈线间电流相位差异特征的故障选线方法^[16]进行对比分析。仿真数据如表 4、表 5 所示。

表 4 本文方法的故障选线结果

Table 4 Fault line selection results of this paper's method

故障馈线	D/km	R_f/Ω	ζ	选线结果
l_{12}	8	1000	[113.42 0.79 0.10 0.09 0.32]	l_1
l_{31}	1	2000	[0.76 0.09 109.27 0.14 0.28]	l_3
l_{41}	10	3000	[0.86 1.74 0.74 107.61 0.82]	l_4
l_{53}	14	4000	[0.11 0.91 3.26 0.72 105.23]	l_5

表 5 文献[16]方法的故障选线结果

Table 5 Fault line selection results of the method in Reference [16]

故障馈线	D/km	R_f/Ω	$[\mu_1 \mu_2 \mu_3 \mu_4 \mu_5]$	选线结果
l_{12}	8	1000	[261.31 3.51 1.06 0.82 1.31]	l_1
l_{32}	7	2000	[1.48 5.28 97.31 0.14 7.32]	l_3
l_{42}	10	3000	[6.64 7.21 8.57 64.72 35.71]	l_4
l_{52}	11	4000	[1.48 8.21 43.16 4.52 21.5]	l_5

通过对比表 4、表 5 的实验结果可知，本文提出的故障选线方法在过渡电阻及故障距离动态变化时，仍能准确区分故障馈线与健全馈线。相比之下，

文献[16]提出的方法虽能将异常馈线识别为故障线路，但在过渡电阻大于 2000 Ω 时，故障线路的差动系数 μ_n 减小，其选线准确率明显下降，具体表现为对健全馈线的误判率升高。进一步分析表明，文献[16]的局限性主要源于两方面：1) 高阻故障导致馈线群间的暂态特征差异性衰减；2) DG 注入的谐波会干扰零序电流相位特征。若通过算法补偿 DG 谐波的影响，文献[16]仍可实现对故障馈线的有效辨识。该对比结果突显了谐波抑制策略对高阻故障选线性能的关键作用，同时也验证了本文方法在复杂工况下的可靠性优势。

5 结论

本文研究了高阻接地故障时小电阻退出的暂态过程，分析发现主谐振频率能较好地反映中性点小电阻退出时的暂态特征，可利用馈线群零序电流主谐振分量的差异性特征，实现有效的故障选线。但 DG 谐波的耦合效应将导致主谐振频段相位特征发生畸变，利用交叉小波变换提取主谐振频段，并采取平稳性检验消除 DG 谐波影响，可完成灵活接地系统高阻故障下谐波-暂态双因素耦合下的故障选线。

本文方法将小电阻退出后各馈线零序电流主谐振分量与中性点零序电压主谐振分量相结合，发现故障馈线与中性点电压主谐振分量接近同向，而健全馈线与中性点电压间的主谐振分量相位差异较大，相位差大于 90°。本文利用馈线群与中性点电压的主谐振分量差异特征，显著提高了高阻故障选线的准确性。

本文方法深度融合 XWT 的扰动免疫特性，通过时-频双维度联合滤除 DG 谐波扰动分量，建立纯净故障特征场量，并构建相位差异系数选线判据，最终实现谐波-暂态双因素耦合场景下的故障选线。仿真表明该方法在强噪声干扰、电弧工况、过渡电阻达 4000 Ω 时仍能够准确判定故障馈线。

附录 A

$$\begin{cases}
 \delta = \frac{1}{6R_f C_{0\Sigma}} \\
 \omega_f = \sqrt{\frac{1}{L_p C_{0\Sigma}} - \left(\frac{1}{6R_f C_{0\Sigma}}\right)^2} \\
 B = \frac{1}{1 - \omega_f^2 L_p C_{0\Sigma}} \\
 A_1 = -B \sin \varphi \\
 A_2 = \frac{-\delta B \sin \varphi - \omega B \cos \varphi}{\omega_f}
 \end{cases} \quad (A1)$$

表 A1 线路参数

Table A1 Line parameters

线路类型		电阻/(Ω/km)	电感/(mH/km)	电容/(μF/km)
架空线	正序	0.178	1.210	0.015
	零序	0.250	5.540	0.008
电缆线	正序	0.270	0.255	0.376
	零序	2.700	1.020	0.280

表 A2 设备参数

Table A2 Equipment parameters

设备类型	正序 漏抗/p.u.	空载 损耗/p.u.	短路 损耗/p.u.	额定功率/ MW
主变压器	0.000 01	0.000 062	0.003 77	31.5
负载变压器	0.100 000	0.001 15	0.010 30	3
Z型变压器	0.100 000	0.003 40	0.016 65	0.2

设配电网某 10 kV 节点不带负荷, 仅接入 DG 装置。根据《GB/T14549—1993 电能质量公用电网谐波》, 公共连接点的全部用户向该点注入的谐波电流分量(方均根值)不应超过规定的允许值。

以 5 次谐波为例, 设该节点最小短路容量为 100 MVA, 查表可得逆变器允许电流值为 20 A。按照《GB/T19939—2005 光伏系统并网技术要求》, 假设 DG 的 5 次谐波发射水平为最大值的 4%, 则该点接入的单台逆变器的容量 S_{DG} 应满足式(A2)。

$$\frac{S_{DG}}{\sqrt{3} \times 10 \text{ kV}} \times 4\% \leq 20 \text{ A} \quad (\text{A2})$$

解得 S_{DG} , 即以 5 次谐波为约束得到的 DG 准入功率限值为 2.66 MW。按照同样的方法计算以 7 次谐波为约束得到的 DG 准入功率限值为 2 MW。综上, 取 DG 仿真模型的容量为 2 MW。

附录 B

表 B1 尺度与频率的对应关系

Table B1 Correspondence between scales and frequencies

尺度因子	频段编号	详细频率范围/Hz
0.125~1	D1	1314.72~10 517.76
1~2	D2	657.36~1314.72
2~4	D3	328.68~657.36
4~8	D4	164.34~328.68
8~16	D5	82.17~164.34
16~底端之间	A5	0~82.17

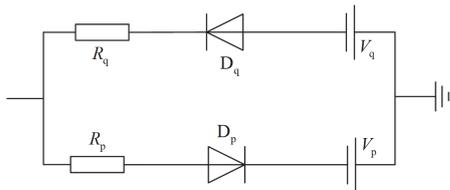


图 B1 Emanuel 电弧模型

Fig. B1 Emanuel arc model

表 B2 3 种类型电弧参数

Table B2 Parameters of three types of arcs

案例	V_p/kV	V_q/kV	R_p/Ω	R_q/Ω
1	2.2(1±20.45%)	2.0(1±20%)	800	750
2	3.8(1±10%)	3.6(1±10%)	400	350
3	1.2(1±10%)	1.0(1±10%)	1200	1100

参考文献

- [1] 杨帆, 任伟, 沈煜, 等. 消弧线圈并联小电阻系统接地故障灵活处理策略[J]. 供用电, 2019, 36(3): 44-49.
YANG Fan, REN Wei, SHEN Yu, et al. Grounding fault processing strategy in Petersen coil paralleled small resistance grounding system[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3): 44-49.
- [2] 张帆, 王晓卫, 王新茜, 等. 基于幅值比与相位差的灵活接地系统单相高阻故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(11): 41-50.
ZHANG Fan, WANG Xiaowei, WANG Xinqian, et al. Single-phase high-impedance fault detection method for flexible grounding system based on amplitude ratio and phase difference[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(11): 41-50.
- [3] 李纳纳, 王宾. 小电流接地配电网馈线单相接地故障零序阻抗特性分析[J]. 电测与仪表, 2024, 61(6): 58-64.
LI Nana, WANG Bin. The analysis of zero-sequence impedance characteristics of feeder in distribution system with neutral point non-effective grounding[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6): 58-64.
- [4] 王江波, 黑晓捷, 邱鹏玉, 等. 基于 XGBoost 和泛化特征优选的小电流接地故障方向判别方法[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(7): 71-79.
WANG Jiangbo, HEI Xiaojie, QIU Pengyu, et al. Small current grounding fault direction discrimination method based on XGBoost and generalization feature optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(7): 71-79.
- [5] 王小帅, 薛永端, 刘萃萃, 等. 灵活接地系统小电阻退出暂态特征及对暂态故障选线方法影响[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(16): 174-183.
WANG Xiaoshuai, XUE Yongduan, LIU Cuicui, et al. Transient characteristics of small resistor exit in flexible grounding system and implications for transient faulty line selection methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 174-183.
- [6] 李宗博, 崔一嘉, 王昊晴, 等. 含逆变型分布式电源的配电网馈线终端告警信息校正及故障定位方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(4): 1268-1286.
LI Zongbo, CUI Yijia, WANG Haoqing, et al. Method of

- alarm information correction and fault location for distribution network with inverter-interfaced distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(4): 1268-1286.
- [7] 甘锺, 陈益哲, 高宜凡, 等. 基于余弦相似度的小电阻接地有源配电网接地保护方案[J]. 供用电, 2025, 42(9): 55-64.
GAN Kai, CHEN Yizhe, GAO Yifan, et al. Grounding protection scheme for low resistance grounded active distribution network based on cosine similarity[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(9): 55-64.
- [8] 李晓波, 张世乐, 彭超红. 基于低频暂态零序电流畸变率的灵活接地系统高阻接地保护[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(13): 171-183.
LI Xiaobo, ZHANG Shile, PENG Chaohong. Research on single phase high resistance ground fault detection of flexible earthing system based on zero sequence current distortion rate[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(13): 171-183.
- [9] 王晓卫, 张帆, 王毅钊, 等. 基于小电阻投入后扰动量标定的灵活接地系统定位新方法[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1301-1312.
WANG Xiaowei, ZHANG Fan, WANG Yizhao, et al. Novel fault location based on disturbance calibration after small resistance input in flexible grounding system[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1301-1312.
- [10] 闫森, 黄纯, 刘映彤, 等. 基于零序功率比的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(3): 46-52.
YAN Sen, HUANG Chun, LIU Yingtong, et al. Flexible fault selection method of grounding system based on zero-sequence power ratio[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(3): 46-52.
- [11] 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. Discrimination algorithm of grounding fault direction based on variation of zero-sequence admittance in grounding system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 88-94.
- [12] 李晓波, 张世乐, 谢剑锋, 等. 计及电网参数不平衡的灵活接地系统高阻接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(5): 59-68.
LI Xiaobo, ZHANG Shile, XIE Jianfeng, et al. A flexible grounding system high resistance grounding fault line selection method considering unbalanced power grid parameters[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 59-68.
- [13] 韦明杰, 余越, 梁英, 等. 宽频信号在谐振接地有源配电网高阻故障选线中的应用[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19): 166-176.
WEI Mingjie, YU Yue, LIANG Ying, et al. Application of broadband signal in high-resistance fault line selection of resonant grounded active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 166-176.
- [14] 李政洋, 曹一家, 陈春, 等. 含直配式新能源的配电网接地故障协同处理与区域辨识[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(6): 2145-2159.
LI Zhengyang, CAO Yijia, CHEN Chun, et al. Collaborative fault handling and area identification of grounding faults in distribution networks with directly-coupled renewable energy sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(6): 2145-2159.
- [15] 秦苏亚, 薛永端, 刘砾钲, 等. 有源配电网小电流接地故障暂态特征及其影响分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 655-666.
QIN Suya, XUE Yongduan, LIU Lizheng, et al. Transient characteristics and influence of small current grounding faults in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 655-666.
- [16] 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.
- [17] 刘萃萃, 刘晓, 薛永端, 等. 灵活接地系统中性点接地电阻投入暂态特征分析[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 172-182.
LIU Cuicui, LIU Xiao, XUE Yongduan, et al. Analysis on transient characteristics of neutral point grounding resistor throw-in in flexible grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 172-182.
- [18] 王晓卫, 刘伟博, 郭亮, 等. 基于不同时段内积投影的灵活接地系统高阻故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 154-167.
WANG Xiaowei, LIU Weibo, GUO Liang, et al. High impedance fault line selection method based on inner product projection of different time periods for flexible grounding systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 154-167.
- [19] 刘晓, 薛永端, 刘萃萃, 等. 基于电压-电流分区的灵活接地系统故障保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(4): 124-131.

- LIU Xiao, XUE Yongduan, LIU Cuicui, et al. Fault protection of flexible grounding system based on voltage-current partition[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2023, 35(4): 124-131.
- [20] 汤涛, 周宇, 曾祥君, 等. 基于过渡电阻评估的灵活接地系统暂态故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 171-179.
- TANG Tao, ZHOU Yu, ZENG Xiangjun, et al. Transient fault line selection method for flexible grounded system based on transition resistance evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 171-179.
- [21] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 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. Transient equivalent circuit and transient analysis of small current grounding faults in neutral point grounded systems with arc suppression coils[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [22] 徐丙垠, 薛永端, 冯光, 等. 配电网接地故障保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 1-7.
- XU Bingyin, XUE Yongduan, FENG Guang, et al. Discussion on several problems of earthing fault protection in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 1-7.
- [23] 赵舒心, 肖仕武, 梁伟宸. 基于聚合电流的高比例分布式电源接入配电网短路故障计算与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 16-26.
- ZHAO Shuxin, XIAO Shiwu, LIANG Weichen. Calculation and analysis of short-circuit fault of distribution network with high proportion distributed generators based on aggregated current[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 16-26.
- [24] 邓祥力, 赵磊鑫, 熊小伏, 等. 基于多元暂态特征故障度的配电网单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 69-80.
- DENG Xiangli, ZHAO Leixin, XIONG Xiaofu, et al. Single phase grounding line selection method for distribution networks based on multiple transient characteristic fault degrees[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 69-80.
- [25] GAO Jie, WANG Xiaohua, WANG Xiaowei, et al. A high impedance fault detection method for distribution systems based on empirical wavelet transform and differential faulty energy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 900-912.
- [26] 王宾, 崔鑫, 董新洲. 配电线路弧光高阻故障检测技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 96-107, 377.
- WANG Bin, CUI Xin, DONG Xinzhou. A review of detection techniques for arc flash high resistance faults in distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 96-107, 377.
-
- 收稿日期: 2025-07-03; 修回日期: 2025-12-07
- 作者简介:
- 刘晓军(1979—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与稳定控制、综合能源系统优化运行; E-mail: lxjnedu@126.com
- 孙林远(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为故障选线与定位; E-mail: 2664657106@qq.com
- 杨冬锋(1976—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为大规模新能源接入电力系统的优化调度与控制、直流保护技术。E-mail: ydfnedu@126.com
- (编辑 许威)