第48卷 第21期 2024年11月10日 电力系统自动化 Vol. 48 No. 21 Nov. 10, 2024
Automation of Electric Power Systems
DOI: 10.7500/AEPS20240116008

# 考虑电容投切扰动的配电网高阻接地故障检测方法

韩兆儒，石 访，张恒旭，靳宗帅，贠志皓
（山东大学电气工程学院，山东省济南市 250061）

**摘要：** 高阻接地故障的准确、可靠检测是配电网故障处理的难点，正常的电容投切操作可对其产生干扰。针对这一问题，文中提出了一种基于零序李萨如曲线分析的高阻接地故障抗扰检测方法。首先，理论推导了高阻接地故障与电容投切扰动的零序电气量，二者在传统时频域特征角度无规律性差异，从而明确了干扰原因；进一步，将零序电流、电压波形重构为零序李萨如曲线，提出了基于数学形态学理论的李萨如曲线轨迹形状畸变复杂度量化指标，并结合零序李萨如曲线面积概率分布规律设计自适应启动判据，给出了噪声场景下高阻接地故障的抗扰检测方法；最后，利用配电网电磁暂态仿真算例和真型故障试验验证了所提方法的有效性和可靠性。

**关键词：** 配电网；高阻接地故障；电容投切；故障检测；李萨如曲线；数学形态学

## 0 引言

高阻接地故障（high-impedance grounding fault，HIGF）约占中压配电网故障的5%～10%[1]，多发于架空线断线或垂落并与水泥地、树木、草坪等非金属性导体接触之时[2]。通常情况下，接地介质的表面并不光滑，当导线与接地介质形成电气连接并造成接地故障时，会伴随着非线性的空气电弧击穿或固体介质击穿，易引发火灾、人身触电等恶性事故[3]。而HIGF的特征微弱，传统保护装置或熔断器难以检测并及时切除故障线路[4]，通常由接地选线装置、故障指示器等进行故障检测和告警，进而派人工处置。HIGF检测技术的精度和可靠性对其实用效果和推广具有重要影响[5]。

接地点故障电弧会导致信号畸变，从而产生谐波、暂态振荡等，可作为HIGF检测的重要故障特征[6-7]。但因HIGF特征微弱，易与电容器投切等电网正常扰动信号混淆，可引起故障检测误告警，其检测可靠性无法保证[8]。此外，由于HIGF发生后电气量特征呈现波动性，很难设置合适的电气量阈值保证检测灵敏性。如何提升弱特征HIGF检测算法的抗干扰能力是近年来研究的难点。

目前，HIGF检测方法主要基于数学方程推导故障前后的电气量变化，通过提取故障信号的幅值、暂态能量、投影系数等特征并设计检测阈值，实现HIGF快速检测[9-11]，但可能会将电容投切扰动误判为故障，且随着过渡电阻升高故障电流迅速衰减，故障信号信噪比降低，故障特征难以准确提取。为了提高HIGF检测可靠性，部分学者利用故障后波形畸变特征检测并定位故障[12-13]。文献[12]利用斜率量化零序电流“零休期”波形的形态特征，提出一种基于区间斜率曲线的HIGF检测方法；文献[13]通过最小二乘法拟合曲线来反映故障电阻的非线性变化，提出一种基于伏安畸变特性的HIGF检测算法。上述方法通过提取波形非线性形态故障信息，受电容投切扰动影响小，但对于弱非线性HIGF可能失效。

随着先进信号处理技术的发展，部分学者以区分弱特征HIGF与电网正常扰动为目标，提出改进的故障检测算法。文献[14]利用小波变换对零序电压进行多分辨率分解，将特定频带重构信号突变应用于HIGF检测，能从谐波、噪声等干扰中可靠甄别故障；文献[15]基于数学形态学提取弱故障特征，并通过无监督聚类模型区分HIGF与系统噪声。但这两种方法主要针对系统本身存在的谐波与噪声，未讨论电容投切等扰动事件影响。文献[16]通过长时间窗内谐波能量的归一化对不同故障场景下的HIGF统一描述，能够区分故障与系统扰动事件。此外，神经网络、语言模型等人工智能方法[17-18]因其优异的特征提取能力，也被用于故障检测与辨识。但上述方法的特征选取缺乏理论依据，实际故障样

收稿日期：2024-01-16；修回日期：2024-05-28。
上网日期：2024-09-23。
国家自然科学基金资助项目（52107109）；山东省自然科学基金资助项目（ZR2021QE145）；已申请国家发明专利（申请号：CN202310759980.2）。

本少，算法泛化能力不足。

文献[19]将李萨如曲线概念应用到配电网异常事件检测，将电流与电压波形在垂直方向重构，得到可以反映配电网运行状态的图形化特征。HIGF与电容投切扰动的李萨如曲线在时域上表现为不同的封闭图形，将其形状特征进一步量化为灰度矩阵，并输入卷积神经网络实现HIGF和电容投切扰动区分。但卷积神经网络训练精度依赖于大量既定场景的实测数据，难以适应配电系统结构与运行参数随机变化对李萨如曲线形状的影响。因此，具有泛化应用能力的李萨如曲线形状特征量化及分析方法，是提高HIGF检测抗扰能力的有效途径。

本文提出一种基于零序李萨如曲线的HIGF检测方法。首先，基于暂态等值电路分析了HIGF与电容投切事件的零序波形时频特征差异，由零序电流、电压构造零序李萨如曲线，并利用曲线形状描述HIGF与电容投切扰动的时频特征；进一步，提出零序李萨如曲线轨迹形状畸变规则的数学形态学量化指标，实现HIGF与电容投切扰动的准确辨别，并结合曲线面积变化与概率分布模型设计了自适应启动判据；最后，利用PSCAD仿真算例和某10 kV配电网真型故障试验对算法的有效性进行了验证。

## 1　HIGF与电容投切扰动信号分析

电容器是目前配电网最主要的无功补偿装置，通常安装在变电站内并依据实际无功补偿需求进行投切[20-21]。为维持动态无功平衡，配电网中电容投切频繁发生，其投切扰动特征与HIGF特征相似，易导致故障检测误告警，正确区分电容投切扰动与HIGF的特征差异是优化故障检测算法的关键。本章从暂态等值电路角度分析推导了两者零序电气量的数学表达式，明确干扰的原因。

### 1.1　HIGF信号分析

谐振接地系统占中国中压配电网的35%左右，且多位于核心地区，其HIGF检测性能是影响供电可靠性的重要原因，本文以谐振接地系统为例进行分析。假设一个具有$n$条馈线的谐振接地系统，HIGF发生在馈线$l_n$上，其暂态等值电路如附录A图A1所示。图中：$L_p$为消弧线圈零序电感；$C_{0i}$为各馈线对地等效电容；$R$为3倍的过渡电阻；$u_{0c}$为母线零序电压；$i_{0f}$为故障点电流；$i_{0Lp}$为消弧线圈电流；$i_{0C0i}$为各馈线对地零序电流；$i_{0n}$为故障馈线出口电流；$U_f=U_m\sin(\omega_0 t+\phi)$为虚拟电压源，其中，$U_m$为故障前相电压幅值，$\omega_0$为工频角频率，$\phi$为初始故障相角。

通常，HIGF的过渡电阻阻值较大，系统处于欠阻尼状态，建立微分方程求解得到故障线路的零序电流和母线零序电压为：

$$\begin{aligned}i_{0n}=&-[A_1+L_p(C_{0\Sigma}-C_{0n})(A_1\delta_1^2-A_1\omega_{f1}^2-\\&2A_2\omega_{f1}\delta_1)]e^{-\delta_1 t}\cos(\omega_{f1}t)-\\&[A_2+L_p(C_{0\Sigma}-C_{0n})(A_2\delta_1^2-A_2\omega_{f1}^2+\\&2A_1\omega_{f1}\delta_1)]e^{-\delta_1 t}\sin(\omega_{f1}t)+\\&[\omega_0^2L_p(C_{0\Sigma}-C_{0n})-1]B\sin(\omega_0 t+\varphi_1)\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned}u_{0c}=&L_p(-A_1\omega_{f1}-\delta_1A_2)e^{-\delta_1 t}\sin(\omega_{f1}t)+\\&L_p(A_2\omega_{f1}-\delta_1A_1)e^{-\delta_1 t}\cos(\omega_{f1}t)+\\&\omega_0L_pB\cos(\omega_0 t+\varphi_1)\end{aligned}\tag{2}$$

式中：$C_{0n}$为故障线路对地等效电容；$C_{0\Sigma}$为系统总对地电容，$C_{0\Sigma}=\sum_{i=1}^{n}C_{0i}$；$\omega_{f1}$为故障时的暂态主谐振频率；$\delta_1$为故障时的衰减因子；$\varphi_1$为故障后的相角；$A_1$、$A_2$、$B$为中间变量。式中各变量的计算过程可参考文献[21-22]。

由上述分析可知，HIGF发生后各电气量包含工频分量与暂态分量，其中，暂态分量为衰减振荡信号，具体振荡特征因系统而异。

考虑到电弧电阻的非线性畸变，过渡电阻不能看作具有固定阻值的电阻，HIGF发生后各电气量变化更加复杂。此时，可将电弧电阻进行分段线性化处理。已有研究表明，每个分段求解出的电流、电压表达式与式(1)、式(2)相似，故每个分段具有不同幅值、衰减因子、主谐振频率的暂态分量[23]，不利于故障信号时频特征的统一分析。

HIGF实测零序波形和时频分析结果如图1所示。

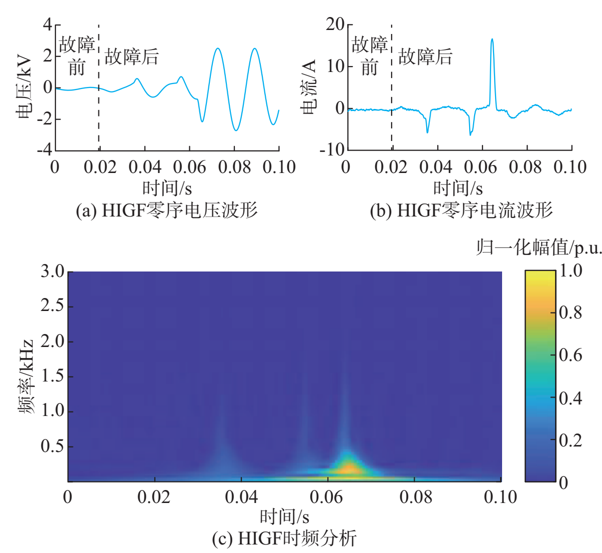



**图1　HIGF实测波形及时频分析结果**

**Fig. 1　Measured waveforms of HIGF and time-frequency analysis result**

由图1(a)、(b)可知,过渡电阻在零序电流过零点呈现高阻态,导致波形形态发生畸变,并且波形畸变程度具有随机性,在不同周期差异较大。由图1(c)可知,波形畸变会导致故障信号宽频化。

### 1.2　电容投切扰动信号分析

现场电容投切时的典型拓扑图如附录A图A2所示。图中,$l_i$为系统出线,母线端利用三相断路器投切并联电容器组$C$,电容器组中性点不接地但存在对地电容效应(用$C_r$表示,通常取50 pF)[24]。

电容投切的暂态等值电路如附录A图A3(a)所示。实际上,投切电容的三相断路器不能完全同期运行[25],假设A相先于B、C相闭合,则出现三相不平衡和零序回路。图中:$R_0$、$L_0$为连接电缆的零序等效电阻与零序等效电感;$C_{ub}$为投切时的零序电容,由电缆对地电容、不平衡投切电容及中性点对地电容构成;$U_s=U_m\sin(\omega_0 t+\theta)$为虚拟电压源,其中,$\theta$为初始投切相角。由于通常$R_0$很小,电容充电速度很快,主谐振频率较大,此时,消弧线圈等效阻抗远大于并联的对地电容容抗[21]。可以忽略消弧线圈对电容投切的暂态影响,简化等值电路如附录A图A3(b)所示。图中:等效电容$C_{eq}=C_{0\Sigma}C_{ub}/(C_{0\Sigma}+C_{ub})$。

建立线性常系数二阶齐次微分方程,可解得投切暂态电流$i_s$为:

$$\begin{aligned}i_s=&\mathrm{e}^{-\delta_2 t}C_{eq}[(A_4\omega_{f2}-\delta_2 A_3)\cos(\omega_{f2}t)+\\&(-A_3\omega_{f2}-\delta_2 A_4)\sin(\omega_{f2}t)]+\\&D\omega_0 C_{eq}\cos(\omega_0 t+\varphi_2)\end{aligned}\tag{3}$$

$$\begin{aligned}u_{0c}=&\mathrm{e}^{-\delta_2 t}\frac{C_{ub}}{C_{ub}+C_{0\Sigma}}[A_3\cos(\omega_{f2}t)+\\&A_4\sin(\omega_{f2}t)]+\frac{DC_{ub}}{C_{ub}+C_{0\Sigma}}\sin(\omega_0 t+\varphi_2)\end{aligned}\tag{4}$$

$$\begin{aligned}i_{0i}=&\mathrm{e}^{-\delta_2 t}\frac{C_{0i}C_{ub}}{C_{ub}+C_{0\Sigma}}[(A_4\omega_{f2}-\delta_2 A_3)\cos(\omega_{f2}t)+\\&(-A_3\omega_{f2}-\delta_2 A_4)\sin(\omega_{f2}t)]+\\&\frac{D\omega_0 C_{0i}C_{ub}}{C_{ub}+C_{0\Sigma}}\cos(\omega_0 t+\varphi_2)\end{aligned}\tag{5}$$

$$\begin{cases}D=\dfrac{U_m}{|1-\omega_0^2 L_0 C_{eq}+\mathrm{j}\omega_0 R_0 C_{eq}|}\\\omega_{f2}=\sqrt{\dfrac{1}{L_0 C_{eq}}-\delta_2^2}\\A_3=-D\sin\varphi_2\\A_4=\dfrac{-\delta_2 D\sin\varphi_2-\omega_0 D\cos\varphi_2}{\omega_{f2}}\\\varphi_2=\theta-\arctan\dfrac{\omega_0 R_0 C_{eq}}{\omega_0^2 L_0 C_{eq}-1}\end{cases}\tag{6}$$

式中:$i_{0i}$为馈线$l_i$零序电流;$\omega_{f2}$为投切时的暂态主谐振频率;$\delta_2$为投切时的衰减因子,$\delta_2=R_0/(2L_0)$;$\varphi_2$为投切后的相角;$A_3$、$A_4$、$D$为中间变量。

电容投切扰动的暂态分量同样为衰减振荡信号,而实际场景中,电容投切暂态还有两个明显特征:1)投切时断路器气隙存在高频电弧,加剧了暂态振荡程度;2)零序暂态过程持续时间短,取决于断路器非同期动作时间[26]。

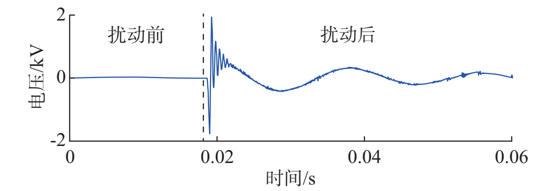
上述分析中,电容投切的主要影响来自三相断路器不完全同步投切引起的三相不平衡;而三相电容器中性点对地电容效应的等效电容很小,对投切过程的影响有限。根据以往投切操作现场试验分析,投切时的振荡回路与振荡频率主要取决于连接电缆的对地电容[27],断路器投切瞬间,电缆对地电容瞬间充电,从而产生冲击电流,并与电缆电感产生高频振荡;在高频暂态之后,由于系统对地电容仍存在电压,将与消弧线圈及阻尼电阻构成零输入响应的RLC串联电路,通常阻尼电阻较小,电路处于欠阻尼状态,零序电压再次发生衰减振荡,振荡频率约为工频。具体计算公式为:

$$\begin{cases}\omega=\sqrt{\dfrac{1}{L_p C_{0\Sigma}}-\left(\dfrac{R_D}{2L_p}\right)^2}=\omega_0\sqrt{(1-v)-\dfrac{\delta^2}{\omega_0^2}}\\\delta=\dfrac{R_D}{2L_p}\end{cases}\tag{7}$$

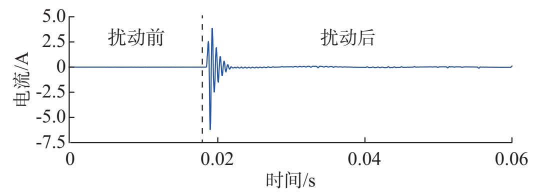
式中:$v$为系统脱谐度;$\delta$为工频衰减因子;$R_D$为阻尼电阻。

电容投切扰动实测零序波形和时频分析结果如图2所示。零序电压与零序电流波形在投切瞬间具有明显的高频暂态,并在短时间内快速衰减。同样利用小波变换对电容投切零序电流进行时频分析,可见电容投切扰动初期的电流成分复杂,主要为高频分量。

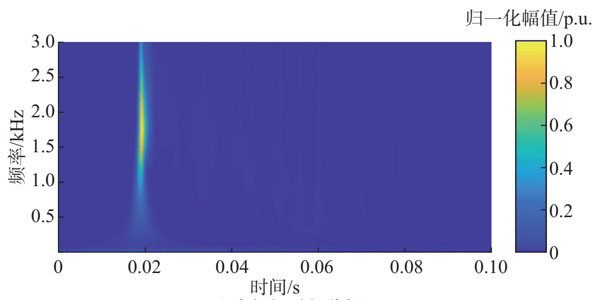
比较图1(c)与图2(c)分析结果可知,发生HIGF时故障信号与电容投切扰动信号的频率分布存在重合部分。分析可知,电容投切暂态过程的振荡频率和衰减速度与连接电缆参数有关,不同型号、长度下具体数值不同;而HIGF虽然理论上的暂态振荡频率和衰减速度较小,但考虑非线性电阻变化,具体的暂态过程十分复杂,由于零休期的出现,电流峰值点存在大量高频信号,其频率和衰减速度同样很大。HIGF与电容投切扰动的时频特征因系统参数与故障场景而异,无法进行定量描述。因此,基于单一特征量的传统HIGF检测方法易与电容投切扰




(a) 电容投切零序电压波形




(b) 电容投切零序电流波形




(c) 电容投切时频分析

**图2　电容投切实测波形及时频分析**

**Fig. 2　Measured waveforms and time-frequency analysis of capacitor switching**

动信号混淆。附录A图A4所示为基于上述HIGF与电容投切扰动波形所提取到的部分归一化特征。在故障或扰动发生后(第2个周期)，各特征量皆发生突变，难以预先整定合理的特征量变化阈值，电容投切将被误认为HIGF而造成检测算法误判。

上文讨论了谐振接地系统的HIGF和电容投切扰动暂态特征以及两者易混淆的原因，而中性点不接地系统和中性点小电阻接地系统的分析过程相似。对于HIGF，当过渡电阻很大时，零序通路的影响减小，不同中性点接地方式故障特征趋于相似。对于电容投切扰动，根据附录A图A3所示暂态等值电路，高频暂态过程不受消弧线圈影响，另外两种系统可建立同样结构的简化电路，式(3)至式(6)同样适用于其暂态分析；高频暂态过程后系统存在另一衰减过程，其可看作零输入响应的RLC串联电路，具体参数与中性点接地方式有关，但谐振接地系统发生投切时，此过程的振荡频率近似于工频且衰减系数较小，更容易与HIGF混淆。但总体而言，不同中性点接地方式下，HIGF与电容投切扰动都存在混淆难辨的问题。

针对正常投切扰动，往往通过延时一段时间或利用长时间窗降低扰动事件的影响，但其思想是躲避投切事件的干扰，而不是从本质特征上将HIGF与投切扰动进行区分，存在一定的局限性。通过对不同事件的波形进行分析，总结波形特征并设计安全可靠的故障判据，在灵敏检测的同时还能保证故障检测安全性成为一种趋势[28-29]。

### 1.3　HIGF与电容投切扰动的零序李萨如曲线差异分析及其量化方法

李萨如曲线是两个波形在垂直方向合成的轨迹，其形状、面积等特征适用于时频域特征差异较小的事件检测与分类。图1和图2所示HIGF和电容投切扰动实测波形的零序李萨如曲线轨迹如附录A图A5所示。系统正常运行时，曲线轨迹沿坐标($t$, 0, 0)移动，HIGF或电容投切扰动下演变为其他形状，并呈现出曲线轨迹形态及其畸变程度等特征差异。从电流-电压的相平面上观察，HIGF零序李萨如曲线轨迹经过故障初期的振荡之后，最终变为周期出现的封闭图形；而电容投切零序李萨如曲线轨迹主要受高频暂态影响，形状呈现不规则畸变，在短时间内具有多个“拐点”。HIGF与电容投切扰动的零序李萨如曲线在三维空间具有差异明显的时空演变规律，如何量化零序李萨如曲线轨迹的差异是区分HIGF与电容投切扰动的关键。

数学形态学是一种非线性分析方法，可量化波形的局部突变特征[30]。本文构建了适用于零序李萨如曲线轨迹的形态学表征公式：

$$\begin{cases} y_{\mathrm{d}}(n)=(f\oplus g)(n)=\max\limits_{m}\ \{|f(n-m)+g(m)|\} \\ y_{\mathrm{e}}(n)=(f\Theta g)(n)=\min\limits_{m}\ \{|f(n+m)-g(m)|\} \\ y_{\mathrm{o}}(n)=(f\bullet g)(n)=(y_{\mathrm{e}}\oplus g)(n) \\ y_{\mathrm{c}}(n)=(f\circ g)(n)=(y_{\mathrm{d}}\Theta g)(n) \\ y_{\mathrm{v}}(n)=|y_{\mathrm{c}}(n)-y_{\mathrm{o}}(n)| \end{cases} \tag{8}$$

式中：$f(n)=i(n)+\mathrm{j}u(n)$为由电压电流信号构造的矢量，其中，j表示复数虚部，$n=1, 2, \cdots, N$，为采样点，$N$为输入信号的长度，采样间隔为$T_{\mathrm{s}}$；$g(m)$为结构元素矢量，$m=0, 1, \cdots, M$，$M$为结构元素的长度，且$N>M$；$\max\limits_{m}$表示选取具有最大幅值的矢量；$\min\limits_{m}$表示选取具有最小幅值的矢量；$y_{\mathrm{d}}(n)$、$y_{\mathrm{e}}(n)$、$y_{\mathrm{o}}(n)$、$y_{\mathrm{c}}(n)$为膨胀、腐蚀、开运算与闭运算；$y_{\mathrm{v}}(n)$为矢量闭开差运算(vector closing opening difference operation, VCODO)结果，用于量化零序李萨如曲线轨迹的畸变特征，$y_{\mathrm{v}}(n)$大于零代表信号在第$n$点发生畸变，其数值大小与畸变程度呈正相关性。经过VCODO处理，可得到输入信号的时序特征序列$y_{\mathrm{v}}=\{y_{\mathrm{v}}(1), y_{\mathrm{v}}(2), \cdots, y_{\mathrm{v}}(N)\}$。

将图1和图2曲线作为样本数据，计算故障与扰动发生前后的$y_v$，归一化结果如图3所示。

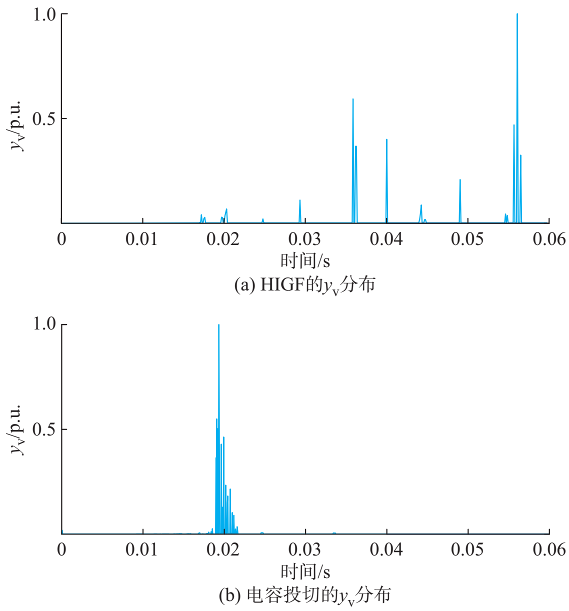



**图3　HIGF与电容投切扰动的$y_v$归一化结果**
**Fig. 3　Normalization results of $y_v$ of HIGF and capacitor switching**

对比发现，HIGF的$y_v$分布复杂，在时域上呈现多簇突变数据的排列；而电容投切扰动的$y_v$分布在扰动初期，可看作一簇突变数据的集合。因此，通过$y_v$分布差异区分HIGF与电容投切扰动，提出形态学复杂度量化指标：

$$P_t = \frac{P_1}{\sum P_z} \tag{9}$$

$$\begin{cases} P_z = \sum\limits_{\phi_z} \mathrm{sgn}\left(y_v(n) > P_{thr}\right) \\ \phi_z: n_z - N_s < n \leqslant n_z + N_s \end{cases} \tag{10}$$

式中：$P_z$为VCODO处理后划分的第$z$个区域的复杂度指标；$P_t$为指标判据；$P_{thr}$为突变判定阈值，归一化后可取值0.1；sgn为符号函数；$\phi_z$为各区域复杂度指标的计算范围；$n_z$为$z$的中心点；$N_s$为中心点到左右边界的长度，本文选择$N_s=N_T/4$，其中，$N_T$为1个周期的采样点数。

假设长度为$N$的$y_v$序列可以划分为$Z$个区域，每个区域$z$以当前序列最大值采样点$n_z$为中心，sgn函数使某点$y_v(n)$超出$P_{thr}$计为1，反之为0。每次复杂度计算后，移除当前序列中属于$z$的部分得到新的特征序列作为计算对象，当剩余序列的$y_v(n)$都小于阈值$P_{thr}$时停止计算；经过以上计算得到$Z$个复杂度指标，将$P_1$作为主要指标，$P_1$占复杂度指标总和的比例越大，说明$y_v$序列分布越集中，利用判据$P_t$区分HIGF以及电容投切扰动。

上述复杂度指标计算过程不同于滑动时间窗计算，而是通过识别最大$y_v$位置以及更新特征序列的方式实现，无论是HIGF还是电容投切，检测到事件发生后，利用VCODO提取长度为$N$的$y_v$序列，并仅计算一次$P_t$。

当过渡电阻阻值发生变化时，根据式(1)、式(2)可知，各线路零序电流与零序电压等比例变化，利用$f_k(n)=k(i(n)+\mathrm{j}u(n))$代表不同过渡电阻阻值下零序李萨如曲线轨迹，代入式(8)可得特征序列$ky_v=\{ky_v(1), ky_v(2), \cdots, ky_v(N)\}$，而归一化后的$ky_{v,pu}$为：

$$ky_{v,pu} = \frac{ky_v - \min(ky_v)}{\max(ky_v) - \min(ky_v)} = \frac{y_v(n) - \min(y_v(n))}{\max(y_v(n)) - \min(y_v(n))} \tag{11}$$

式中：$n=1, 2, \cdots, N$；$ky_{v,pu}$为特征序列$y_v$归一化后结果，$k$为比例系数。式(11)证明复杂度指标$P_t$不受过渡电阻阻值影响，在HIGF故障信号微弱时仍可被有效提取。

此外，HIGF的李萨如曲线畸变受过渡电阻的非线性影响，在弱非线性HIGF下，零序电压、电流波形接近正弦，构成的李萨如曲线畸变程度很小，但数学形态学可以准确提取波形中的细微畸变。因此，上述复杂度指标对弱非线性HIGF同样有效，适应于不同接地介质下的HIGF检测。附录A图A6为强非线性故障和弱非线性故障下的$y_v$分布，红色圆圈对应曲线畸变位置。可见，通过VCODO处理及复杂度量化指标计算，能可靠检测出弱非线性HIGF。

## 2　基于李萨如曲线特征的HIGF检测算法

### 2.1　故障检测算法设计

对于周期信号，李萨如曲线在相平面上表现为一封闭曲线，可以通过曲线面积突变反映配电网故障或扰动发生。计算公式为[31]：

$$A(t) = \left| \int_{i(t-T)}^{i(t)} u(t_s) \mathrm{d}i(t_s) \right| \tag{12}$$

式中：$T$为工频周期；$t_s$为单周期内的采样时刻；$A(t)$为$t$时刻计算的李萨如曲线面积。

以上文两事件零序李萨如曲线为例，曲线面积的时序变化如附录B图B1所示。每一时刻$t$处的曲线面积，由$t-T$到$t$时间段内的连续曲线计算得到。故障或扰动发生前，曲线面积近似为零；而故障

或扰动发生后，曲线面积发生突变。

基于零序李萨如曲线计算方法可检测配电网异常事件的发生，将面积大于阈值作为事件检测启动判据。然而，较低的阈值代表算法在噪声影响下鲁棒性差，较高的阈值则在弱特征高阻接地故障时可能漏检，固定阈值无法兼顾故障检测的灵敏性与可靠性。因此，需要对构成零序李萨如曲线的零序电压、电流波形进行预处理，去除随机噪声，进而基于零序李萨如曲线面积自适应选择恰当阈值，具体步骤如下。

步骤1：采用小波滤波器滤除原始采样数据中的高频噪声，得到去噪后的零序电压、电流波形数据$u_0(t)$、$i_0(t)$。

步骤2：利用式(12)计算曲线面积，为避免波形短时不规则畸变等造成的短时阈值越限，基于历史曲线面积数据设计自适应阈值。

首先，计算得到$t$时刻前一周期内的曲线面积序列$A=\{A(t-T),\cdots,A(t-2T_n),A(t-T_n)\}$，其中，$T_n$为计算步长且$T$为$T_n$的整数倍。假设$A$服从正态分布$X\sim N(\mu,\sigma^2)$，且其概率密度函数为：

$$p(A(r))=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma}\exp\left[-\frac{(A(r)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{13}$$

式中：$A(r)$为第$r$时刻的曲线面积，$r$的取值区间为$[t-T,t-T/T_n]$；$\mu$、$\sigma$分别为$A$的均值和方差。$A(r)$越大，说明该面积代表的事件发生概率越小，将配电网异常事件导致的面积突变认为是小概率事件。

为了提高检测启动判据的可靠性，根据正态分布概率设置曲线面积突变判断的自适应阈值$D_{set}$[32]：

$$D_{set}=\mu+4\sigma \tag{14}$$

自适应阈值实际上是观察任意时刻的李萨如曲线面积$A(t)$在历史曲线面积数据高斯分布中的位置，即$D_{set}>\mu+4\sigma$对应配电网异常事件的置信区间，若$A(t)$处于该置信区间，则认为此时的曲线面积与配电网正常运行时的曲线面积相差极大，将其归为异常事件。如果$A(t)$小于$D_{set}$，则将$A(t)$作为历史曲线面积数据，用于之后的自适应阈值计算。

以附录B图B1(a)所示故障发生后$t$=0.038 s时刻为例，$A(t)$=1.291，序列$A$的概率分布如图B2所示，自适应阈值$D_{set}$=0.563 9，可有效检测到故障发生。

通过小波滤波对原始采样数据进行处理，可以有效滤除高频背景噪声。同时，基于正态分布4$\sigma$原则整定自适应阈值，曲线面积大于阈值时认为事件发生，保证故障信号微弱时仍可触发启动判据，并且自适应阈值整定参数$\mu$与$\sigma$根据历史曲线面积数据实时更新，避免配电网正常运行时因残余噪声、微小畸变等造成误检。利用上述方法可灵敏检测出HIGF或电容投切事件的发生。附录B图B3所示为滤波后自适应阈值$D_{set}$的变化过程。图B3(a)为增加了白噪声和谐波干扰后的HIGF零序电压、电流波形，滤波后的波形仍存在一些微小畸变；图B3(b)中，故障发生前(0.1 s)曲线面积不规则波动，利用长度一周期的滑动时间窗更新阈值$D_{set}$(粉色虚线)，可有效避免误判。

步骤3：检测到异常事件发生后，以事件发生前后3个周期电流、电压数据作为输入信号$i_0(n)+\mathrm{j}u_0(n)$，利用式(8)提取特征序列$y_v=\{y_v(1),y_v(2),\cdots,y_v(3f_s/f)\}$，其中，$f_s$为采样频率，$f$为工频频率；利用式(9)计算复杂度指标判据$P_t$，设置事件辨识阈值$P_{set}$，$P_t>P_{set}$判断为电容投切扰动，$P_t<P_{set}$判断为HIGF。

## 2.2　算法流程

本文所提出的配电网故障检测方法流程图如图4所示。

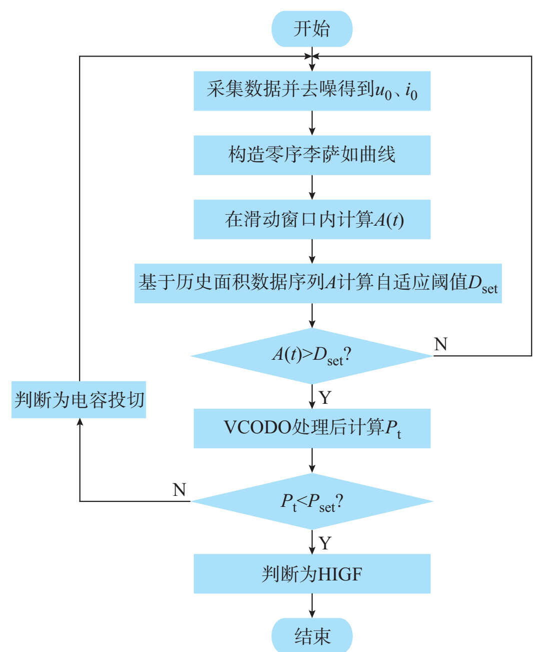



**图4　HIGF识别流程图**
**Fig. 4　Flow chart of HIGF identification**

通过馈线终端单元量测装置采集母线零序电压和零序电流，利用小波滤波器进行降噪处理得到$u_0(t)$、$i_0(t)$，并以电流为横坐标、电压为纵坐标构造李萨如曲线；取长度为$T$的滑动时间窗，在时间窗内计算曲线面积，滑动步长设为$T/20$，利用$A=$

$\{A(t-T),\cdots,A(t-2T/20),A(t-T/20)\}$计算$t$时刻曲线面积$A(t)$的自适应阈值$D_{set}$，当满足$A(t)>D_{set}$时启动事件诊断；将事件发生前后3个周期作为辨识时间窗，利用VCODO提取特征序列$y_v$并计算复杂度指标判据$P_t$，$P_t$小于设定阈值认为事件类型为HIGF，反之为电容投切等扰动。

## 3　案例分析验证

### 3.1　仿真分析

#### 3.1.1　测试场景与结果分析

基于PSCAD仿真软件搭建如附录C图C1所示典型10 kV谐振接地系统配电网模型，并进行HIGF和电容投切扰动仿真分析。系统包括3条馈线，其中，线路$H_1$为架空线路、线路$H_2$为架空线-电缆混合线路、线路$H_3$为电缆线路，参数如表C1所示。

由于HIGF常伴随着电弧发生，采用文献[33]中的模型设置HIGF以模拟电弧特性；为了模拟现场电容投切扰动，设置三相断路器非同期动作。

分别在馈线$H_1$与$H_2$设置HIGF，过渡电阻设置区间为[200, 5 000]Ω，步长为100 Ω，分别由M1和M2测点获取录波数据，共生成98组故障样本；在母线处设置电容投切操作，随机生成20次电容投切事件，通过M1、M2测点分别获取共40组录波数据。录波数据采样率设置为10 kHz，共获取138组数据，各特征量的计算值如附录C图C2所示。图C2(a)为曲线面积$A(t)$首次大于自适应阈值$D_{set}$的统计结果，利用两者差值表示；图C2(b)为复杂度指标判据$P_t$的统计结果，阈值设置为$P_{set}=0.95$，所有样本均可正确辨识出HIGF和电容投切事件。

为检验算法适用性，设定过渡电阻为2 000 Ω，设置不同故障位置、不同故障相角及不同消弧线圈补偿度下HIGF并检测算法的效果，结果如附录C表C2所示。可见，所提算法能够有效实现HIGF的检测与识别，不受故障位置、故障初始相角及系统补偿度的影响。

#### 3.1.2　谐波、噪声对检测结果的影响

根据文献[14]设置不同信噪比下的噪声与谐波干扰实验，选用过补偿下线路$H_1$距离母线1 km处2 000 Ω的HIGF进行测试，仿真结果如表1和表2所示。

**表1　不同噪声干扰下的检测结果**

**Table 1　Detection results under different noise interference**

| 事件类型 | $A(t)-D_{set}$ | | | | $P_t$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 40 dB | 30 dB | 20 dB | 10 dB | 40 dB | 30 dB | 20 dB | 10 dB |
| HIGF | 0.119 | 0.099 | 0.460 | 0.279 | 0.263 | 0.267 | 0.154 | 0.211 |
| 电容投切 | 0.516 | 0.501 | 0.445 | 0.304 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

**表2　不同谐波干扰下的检测结果**

**Table 2　Detection results under different harmonic interference**

| 事件类型 | $A(t)-D_{set}$ | | | | $P_t$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 40 dB | 30 dB | 20 dB | 10 dB | 40 dB | 30 dB | 20 dB | 10 dB |
| HIGF | 0.148 | 0.183 | 0.289 | 0.155 | 0.200 | 0.235 | 0.273 | 0.458 |
| 电容投切 | 0.519 | 0.519 | 0.519 | 0.519 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

由仿真结果可知，面对不同信噪比下噪声和谐波干扰，经过小波滤波后，再通过李萨如曲线面积与自适应阈值判断，可灵敏检测出HIGF与电容投切；同时，HIGF的形态学复杂度量化指标$P_t$都小于辨识阈值$P_{set}$，而电容投切的$P_t$都大于$P_{set}$。因此，本文所提检测方法能在谐波和噪声的影响下准确检测和区分HIGF与电容投切。

#### 3.1.3　其他投切扰动事件影响

除了电容投切，配电网中其他事件如负荷投切与分布式电源投切，同样会对配电网故障检测造成干扰，下面分析其对本文算法的影响。

对于负荷和分布式电源，其并网变压器高压侧通常采用三角形连接方式，若投切时三相断路器完全同步，则此类投切扰动对零序回路无影响，不会造成本文方法误触发；若三相断路器不同步投切，则负荷投切、分布式电源投切暂态等值电路与附录A图A3中的电容投切暂态等值电路相似。由于并网变压器对地杂散电容很小，投切时的振荡回路与振荡频率同样取决于连接电缆，在投切瞬间发生高频暂态；当不考虑连接电缆时，等值电路中的RLC系数与变压器有关，此时，投切等效电容$C_{ub}$远小于系统总对地电容$C_{0\Sigma}$，根据式(4)和式(5)可知暂态电压、电流幅值很小。附录C图C3所示为接入和不接入电缆下的负荷投切与分布式电源投切零序波形。表3为算法检测结果，可见均不会造成HIGF误判。

**表3　其他扰动下的检测结果**

**Table 3　Detection results under other disturbances**

| 事件类型 | 接入电缆 | $A(t)-D_{set}$ | $P_t$ | 结果 |
|---|---|---|---|---|
| 负荷投切 | 500 m | 0.078 | 1.000 | 扰动 |
| | 无 | | | 未触发 |
| 分布式电源投切 | 1 000 m | 0.246 | 1.000 | 扰动 |
| | 无 | | | 未触发 |

#### 3.1.4　与其他方法对比分析

为了验证所提方法在电容投切扰动时的故障检测可靠性，将其与差分闭开差(dCODO)法[15](方法

1)和谐波能量法[16](方法2)进行比较，测试数据选用仿真实验中HIGF与电容投切扰动发生后的零序电流。

方法1构造了一种dCODO算法增强故障特征，利用dCODO突变准确检测故障发生时刻。然而，该方法对畸变响应敏感，在电容投切扰动下同样发生连续突变，无法与HIGF特征区分，如附录C图C4(a)、(b)所示。方法2利用归一化谐波能量指标阈值检测HIGF的不稳定燃弧阶段，并通过延长检测窗口的方法避免正常扰动事件的影响，以牺牲检测快速性来提升可靠性。当设置检测周期数$k_{window}$=3时，方法2对电容投切与HIGF的检测结果如图C4(c)、(d)所示，发生电容投切扰动时同样有误判风险。

为进一步验证所提算法的抗噪性能，测试本文方法、方法1、方法2以及人工智能-李萨如曲线法[19](方法3)在不同噪声强度下的检测成功率(正确判断的样本数目/样本总数)，对3.1.1节中138组波形数据进行检测，结果如附录C图C5所示。由仿真结果可见，本文方法在3 dB以上噪声强度中具有高可靠性，而其他3种方法抗噪能力较弱，并且方法1与方法2在信噪比较高时也因电容投切扰动导致误判。因此，本文所提方法具有较强的抗噪与抗扰性能。

本文方法需要采集零序电压和零序电流，但在中压配电线路上可能无零序电压信号。本文方法的目的是故障检测，未涉及故障区段定位，故零序电压可在变电站母线处采集，便于量测装置的安装与使用。理论上，利用电压、电流两种电气量的故障检测方法，效果要优于仅采用单一电气量的方法。例如，在附录C图C5中，检测成功率由大到小的排序为：本文方法＞方法3＞方法2＞方法1，这是信息量提升带来的优势。同时，本文方法对通信的依赖度低，可在相量测量装置、馈线终端单元、故障指示器等设备中实现，工程应用性较好。几种检测方法的实现条件及要求如表4所示。

表4　4种方法的比较
Table 4　Comparison of 4 methods

| 参数 | 方法1 | 方法2 | 方法3 | 本文方法 |
|---|---|---|---|---|
| 相电压 | 不需要 | 需要 | 需要 | 不需要 |
| 相电流 | 不需要 | 不需要 | 需要 | 不需要 |
| 零序电压 | 不需要 | 不需要 | 不需要 | 需要 |
| 零序电流 | 需要 | 需要 | 不需要 | 需要 |
| 通信量 | 不需要 | 较大 | 大 | 不需要 |
| 同步信息 | 不需要 | 不需要 | 需要 | 不需要 |

### 3.2　真型故障试验分析

利用某10 kV配电网真型故障试验录波数据验证本文方法的有效性。现场电网接线结构如图5所示。

通过380 V/10 kV星/三角绕组接线变压器供电，接有6条馈线，在馈线$F_2$上设置了不同过渡电阻阻值的HIGF，靠近母线处装有采样频率为10 kHz的故障录波器。通过导线接触水泥地、土地不同介质，模拟实际故障场景，并在母线位置设置电容投切试验。该试验系统可分别选择图5所示3种系统中性点接地方式之一。经消弧线圈接地时，采用故障线路出口采集的零序电压与零序电流进行算法测试，检测结果如附录C表C3和表C4所示。可见，本文所提算法能正确辨识HIGF与电容投切扰动。部分故障数据的具体辨识结果如图6(a)至(f)表示。图6给出了零序电压、电流波形，零序李萨如曲线面积时序变化以及辨识时间窗内的VCODO分布。

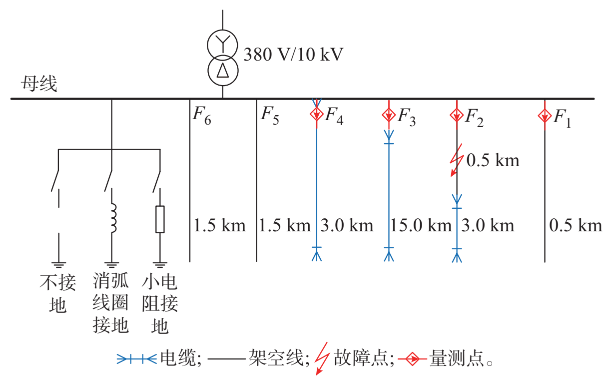



图5　10 kV试验系统的拓扑结构图
Fig. 5　Topology of 10 kV test system

可以看到，配电网故障或扰动发生后李萨如曲线形状发生突变，但不同接地介质下曲线面积差异较大，难以凭经验选择合适的阈值。根据2.1节所提方法，基于虚线框所示滑动时间窗内的历史曲线数据计算自适应阈值$D_{set}$，通过比较某时刻$t$曲线面积$A(t)$与$D_{set}$的差值，能够可靠检测配电网故障或扰动事件(图6中$A(t)-D_{set}$值由判据$A(t)>D_{set}$首次成立计算得到，图6(a)至(f)对应$A(t)-D_{set}$值分别为0.543、0.284、0.654、2.422、0.015、12.240)。以图6(a)与(f)为例，HIGF与电容投切发生后李萨如曲线面积都会发生突变，难以利用单一特征值进行区分，而通过VCODO对李萨如曲线进行处理可以量化曲线的畸变特征。检测到异常事件发生后，选择辨识时间窗并计算复杂度指标判据$P_t$(图6(a)

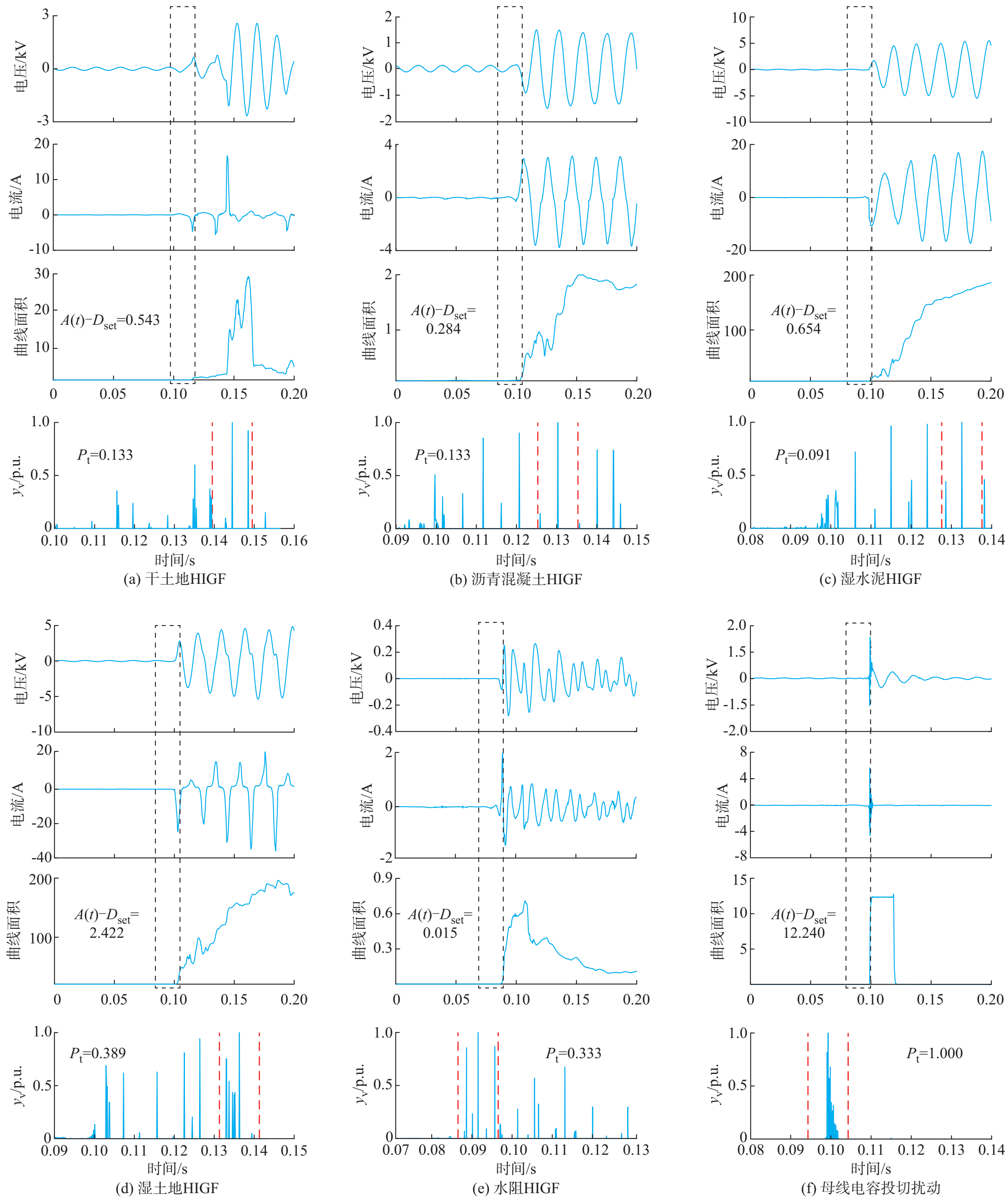



**图6　故障和扰动辨识结果**

**Fig. 6　Identification results of faults and disturbance**

至(f)对应$P_t$值分别为0.133、0.133、0.091、0.389、0.333、1.000),实现HIGF与电容投切事件的准确辨识。

由于本文算法基于曲线面积从无到有的突变,以及曲线畸变特征来检测高阻接地故障,故算法本身受中性点接地方式的影响有限。表5为中性点不接地系统和中性点小电阻接地系统下的HIGF检测结果,本文算法同样适用。

利用附录C表C3和表C4现场实测的16组数据进行对比测试,检测结果如表6所示,括号中为错

表5　不同中性点接地方式下的检测结果
Table 5　Detection results under different neutral grounding modes

| 中性点接地方式 | 接地材料 | $A(t)-D_{set}$ | $P_t$ | 结果 |
|---|---|---|---|---|
| 不接地 | 沥青混凝土 | 0.051 | 0.162 | 正确 |
| | 干土地 | 0.944 | 0.500 | 正确 |
| | 湿土地 | 0.645 | 0.125 | 正确 |
| | 湿水泥 | 3.118 | 0.471 | 正确 |
| 小电阻接地 | 沥青混凝土 | 0.163 | 0.188 | 正确 |
| | 干土地 | 0.391 | 0.175 | 正确 |
| | 湿土地 | 0.752 | 0.286 | 正确 |
| | 湿水泥 | 0.680 | 0.100 | 正确 |

判的事件数目。结果表明，3.1.4节中3种方法均在部分故障场景中失效，其中，方法1和方法2在电容投切时均错判为HIGF，而本文所提方法具有更高的灵敏性与可靠性，适用于多种接地介质场景下的HIGF检测，并能够准确辨识母线电容投切事件。

表6　4种算法检测结果对比
Table 6　Comparison of detection results of four algorithms

| 算法 | 检测到事件数 | | 成功率/% |
|---|---|---|---|
| | HIGF | 电容投切 | |
| 本文方法 | 13 | 3 | 100.0 |
| 方法1 | 8(3) | | 68.8 |
| 方法2 | 7(3) | | 62.5 |
| 方法3 | 9 | 3(4) | 75.0 |

## 4　结语

针对现有HIGF检测方法在配电网电容投切时易误触发的难题，提出一种基于零序李萨如曲线的HIGF检测方法。本文结合历史曲线面积数据与概率分布模型设计了一种自适应启动判据，在避免背景噪声干扰的同时，保证弱特征HIGF可被有效检测。仿真和实测数据表明，所提方法适用性强，在不同过渡阻值、不同故障位置、不同中性点接地方式以及不同接地介质等故障场景下均表现出高可靠性。与传统方法相比，所提方法具有良好的抗扰能力，能有效区分HIGF与电容投切扰动。本文方法仅用于HIGF检测，下一步将研究拓展至故障区段定位技术。

本文现场实测和仿真数据已共享，可在本刊网站支撑数据处下载(http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20240116008)。

**附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)，扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。**

## 参考文献


[1] GHADERI A, GINN H L Ⅲ, ALI MOHAMMADPOUR H. High impedance fault detection: a review[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143: 376-388.

[2] 王鹏玮，徐丙垠，陈恒，等.零序电流互感器误差对小电流高阻接地保护影响及选型[J].电力系统自动化，2023，47(12)：154-162.
WANG Pengwei, XU Bingyin, CHEN Heng, et al. Influence of error of zero-sequence current transformer on small-current high-resistance grounding protection and type selection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 154-162.

[3] WANG B, CUI X. Nonlinear modeling analysis and arc high-impedance faults detection in active distribution networks with neutral grounding via petersen coil[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 1888-1898.

[4] 王宾，崔鑫，董新洲.配电线路弧光高阻接地故障检测技术综述[J].中国电机工程学报，2020，40(1)：96-107.
WANG Bin, CUI Xin, DONG Xinzhou. Overview of arc high impedance grounding fault detection technologies in distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 96-107.

[5] GAUTAM S, BRAHMA S M. Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1226-1234.

[6] AUCOIN M, RUSSELL B D. Detection of distribution high impedance faults using burst noise signals near 60 Hz[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(2): 342-348.

[7] CHRISTIE R D, ZADEHGOL H, HABIB M M. High impedance fault detection in low voltage networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(4): 1829-1836.

[8] 耿建昭，王宾，董新洲，等.中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J].电力系统自动化，2013，37(16)：85-91.
GENG Jianzhao, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Analysis and detection of high impedance grounding fault in neutral point effectively grounding distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 85-91.

[9] 马帅，武志刚，高厚磊，等.适配高渗透率DG接入配电网的幅值比较式保护[J].电力系统保护与控制，2019，47(4)：43-50.
MA Shuai, WU Zhigang, GAO Houlei, et al. Amplitude comparison protection for distribution network with high permeability distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 43-50.

[10] 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 single-phase earth fault location method based on transient energy for non-effectively grounded system [J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 818-825.

[11] XUE Y D, CHEN X R, SONG H M, et al. Resonance analysis and faulty feeder identification of high-impedance faults in a resonant grounding system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1545-1555.

[12] 韦明杰,石访,张恒旭,等.基于零序电流波形区间斜率曲线的配电网高阻接地故障检测[J].电力系统自动化,2020,44(14):164-171.
WEI Mingjie, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. Detection of high impedance grounding fault in distribution network based on interval slope curves of zero-sequence current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 164-171.

[13] WANG B, GENG J Z, DONG X Z. High-impedance fault detection based on nonlinear voltage-current characteristic profile identification[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3783-3791.

[14] 刘科研,叶学顺,李昭,等.基于多分辨率小波变换的配电网高阻接地故障检测方法[J].高电压技术,2023,49(10):4247-4256.
LIU Keyan, YE Xueshun, LI Zhao, et al. Detection method of high resistance grounding fault in distribution network based on multi-resolution wavelet transform [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4247-4256.

[15] 刘硕,刘灏,毕天姝,等.考虑高阻接地的配电网故障检测方法[J].电网技术,2023,47(8):3438-3448.
LIU Shuo, LIU Hao, BI Tianshu, et al. Fault detection method of distribution network considering high impedance faults [J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3438-3448.

[16] 韦明杰,张恒旭,石访,等.基于谐波能量和波形畸变的配电网弧光接地故障辨识[J].电力系统自动化,2019,43(16):148-154.
WEI Mingjie, ZHANG Hengxu, SHI Fang, et al. Identification of arcing grounded fault in distribution network based on harmonic energy and waveform distortion [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43 (16): 148-154.

[17] 巩泉役,彭克,陈羽,等.基于电弧随机性和卷积网络的交流串联电弧故障识别方法[J].电力系统自动化,2022,46(24):162-169.
GONG Quanyi, PENG Ke, CHEN Yu, et al. Identification method of AC series arc fault based on randomness of arc and convolutional network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 162-169.

[18] 赵俊华,文福拴,黄建伟,等.基于大语言模型的电力系统通用人工智能展望:理论与应用[J].电力系统自动化,2024,48(6):13-28.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, HUANG Jianwei, et al. Prospect of artificial general intelligence for power systems based on large language model: theory and applications [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 13-28.

[19] IZADI M, MOHSENIAN-RAD H. A synchronized Lissajous-based method to detect and classify events in synchro-waveform measurements in power distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 2170-2184.

[20] 李建文,杨瑞卿,李戎,等."双高"配电网下变电站并联电容器灵活投切[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(2):132-139.
LI Jianwen, YANG Ruiqing, LI Rong, et al. Flexible switching of shunt capacitors in highly renewable and highly power electronics distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(2): 132-139.

[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 single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.

[22] 方毅,薛永端,宋华茂,等.谐振接地系统高阻接地故障暂态能量分析与选线[J].中国电机工程学报,2018,38(19):5636-5645.
FANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamao, et al. Transient energy analysis and faulty feeder identification method of high impedance fault in the resonant grounding system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5636-5645.

[23] 王宾,崔鑫.中性点经消弧线圈接地配电网弧光高阻接地故障非线性建模及故障解析分析[J].中国电机工程学报,2021,41(11):3864-3872.
WANG Bin, CUI Xin. Nonlinear modeling and analytical analysis of arc high resistance grounding fault in distribution network with neutral grounding via arc suppression coil [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3864-3872.

[24] 杨庆,欧阳沙,司马文霞,等.真空断路器快速合-分闸操作10 kV并联电容器的过电压机理[J].高电压技术,2014,40(10):3135-3140.
YANG Qing, OUYANG Sha, SIMA Wenxia, et al. Mechanism of overvoltage induced by fast switching on-off 10 kV shunt capacitors using vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3135-3140.

[25] 魏旭,周志成,谢天喜,等.真空断路器投入并联电容器的过电压分析及防护[J].高电压技术,2014,40(10):3193-3198.
WEI Xu, ZHOU Zhicheng, XIE Tianxi, et al. Analysis and protection against overvoltages caused by vacuum circuit breakers switching on shunt capacitors [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3193-3198.

[26] 袁涛,唐瑭,司马文霞,等.融合实测数据的配网断路器投切暂态过电压建模方法[J].高电压技术,2021,47(5):1555-1563.
YUAN Tao, TANG Tang, SIMA Wenxia, et al. Switching transient overvoltage modeling method for circuit breaker in distribution networks based on measured data[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1555-1563.

[27] 关永刚,唐琦雯,刘卫东,等.40.5 kV真空断路器开断并联电抗器时过电压的产生机制[J].中国电机工程学报,2012,32(33):124-132.
GUAN Yonggang, TANG Qiwen, LIU Weidong, et al. Overvoltage mechanism of switching off shunt reactors for 40.5 kV vacuum circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 124-132.

[28] GAO J, WANG X H, WANG X W, 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.

[29] WANG X W, WEI X X, GAO J, et al. High-impedance fault detection method based on stochastic resonance for a distribution network with strong background noise[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 1004-1016.

[30] 李庚银，罗艳，周明，等．基于数学形态学和网格分形的电能质量扰动检测及定位[J]．中国电机工程学报，2006，26(3)：25-30.
LI Gengyin, LUO Yan, ZHOU Ming, et al. Power quality disturbance detection and location based on mathematical morphology and grille fractal[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 25-30.

[31] IZADI M, MOHSENIAN-RAD H. Characterizing synchronized Lissajous curves to scrutinize power distribution synchro-waveform measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4880-4883.

[32] JIN Z S, ZHANG H X, SHI F, et al. A robust and adaptive detection scheme for interharmonics in active distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2524-2534.

[33] WEI M J, LIU W S, SHI F, et al. Distortion-controllable arc modeling for high impedance arc fault in the distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 52-63.

韩兆儒(2001—)，男，博士研究生，主要研究方向：配电网故障诊断与定位技术。

石 访(1982—)，男，通信作者，博士，副教授，主要研究方向：电网同步测量技术与应用。E-mail：shifang@sdu.edu.cn

张恒旭(1975—)，男，博士，教授，主要研究方向：电力系统同步测量、稳定分析与控制。

（编辑 代长振）

## High-impedance Grounding Fault Detection Method for Distribution Network Considering Capacitor Switching Disturbance

*HAN Zhaoru, SHI Fang, ZHANG Hengxu, JIN Zongshuai, YUN Zhihao*

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The accurate and reliable detection of high-impedance grounding fault (HIGF) is challenging in the fault handling of distribution networks, and the normal capacitor switching operations can cause interference. Addressing this problem, a disturbance-resistant detection method for HIGFs based on zero-sequence Lissajous curve analysis is proposed in this paper. First, the zero-sequence electrical quantities of HIGFs and capacitor switching disturbances are theoretically derived. There is no regular difference from the perspective of traditional time-frequency domain features between the two, thereby clarifying the cause of the interference. Further, the zero-sequence current and voltage waveforms are reconstructed into zero-sequence Lissajous curves. A quantitative index for the distortion complexity of the Lissajous curve trajectory shape based on the mathematical morphology theory is proposed, and an adaptive starting criterion is designed in combination with the probability distribution law of the zero-sequence Lissajous curve area. A disturbance-resistant detection method for HIGFs in the noise scenario is presented. Finally, the effectiveness and reliability of the proposed method are verified through electromagnetic transient simulation cases and real fault tests in the distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52107109) and Shandong Provincial Natural Science Foundation of China (No. ZR2021QE145).

**Key words:** distribution network; high-impedance grounding fault; capacitor switching; fault detection; Lissajous curve; mathematical morphology