引用格式:李梅,张子健.基于改进椭圆拟合的临界条件下距离保护研究[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):43-53.
Citation: LI Mei, ZHANG Zijian. Research on distance protection under critical condition based on improved ellipse fitting[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(6):43-53.

基于改进椭圆拟合的临界条件下距离保护研究

李　梅,张子健
(安徽理工大学电气与信息工程学院,安徽 淮南 232001)

摘　要:当负荷突变、发电机熄火或输电线路故障等扰动发生时,系统会产生功率振荡(power swing,PS)。此时,距离保护观测到的阻抗轨迹可能会入侵保护Ⅲ区,导致距离保护误动或拒动,发生级联灾难。正确区分功率振荡和故障至关重要。提出一种基于改进椭圆拟合的距离保护方法。该方法先利用保护安装处电压和电流信号构建莉萨如图形(Lissajous figure,LF),并采用临界条件检测(critical condition detection algorithm,CCDA)算法;再通过拟合轨迹,计算椭圆面积及其Hausdorff距离来区分系统临界条件与故障;然后,对各类功率振荡、负荷入侵、电压不稳定、电气中心发生故障等临界条件进行了模拟和分析,并考虑故障位置、故障阻值、类型和起始角等方面的影响;最后,采用算例进行了仿真,证明所提算法适用于各类复杂临界情况,能准确拟合信号轨迹;即使观测到的阻抗轨迹入侵保护Ⅲ区,也不会跳闸,且所提算法能迅速识别并执行振荡闭锁与解闭锁功能。研究结果表明,该方法不依赖高采样率,计算简单,抗噪性佳,响应速度快,能有效区分远端功率振荡和高阻故障。

关　键　词:距离保护;功率振荡;改进椭圆拟合;莉萨如图形;Hausdorff距离;临界条件检测
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.005　**中图分类号**:TM713;TM771　**文章编号**:1673-9140(2025)06-0043-11

Research on distance protection under critical condition based on improved ellipse fitting

LI Mei, ZHANG Zijian
(College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: When disturbances such as sudden load changes, generator tripping, or transmission line faults occur, the system will experience a power swing (PS). In this case, the impedance trajectory detected by the distance protection may encroach into zone Ⅲ of the protection, leading to maloperation or refusal operation of the distance protection and triggering cascade failures. Therefore, it is crucial to accurately distinguish PS and faults. A distance protection method based on improved ellipse fitting is proposed. Firstly, a Lissajous figure (LF) is constructed by using voltage and current signals at the protection mounting location, and a critical condition detection algorithm (CCDA) based on this figure is implemented. Then, the elliptical area and its Hausdorff distance from the fitted signal trajectory are calculated to distinguish the critical conditions and faults of the system. Next, the critical conditions such as various PSs, load intrusion, voltage instability, and faults at the electrical center are simulated and analyzed. The influence of factors including fault location, fault resistance, fault type, and inception angle are also analyzed. Finally, by simulating the case studies, it is demonstrated that the proposed algorithm is applicable to various complex critical conditions and accurately fits signal trajectories; the tripping is avoided even when the observed impedance trajectory intrudes into zone III of the protection; the functions of PS blocking and de-blocking are rapidly recognized and executed. The research results show that the method does not rely on high sampling rates, exhibits easy calculation and good noise immunity,

收稿日期:2025-07-14;**修回日期**:2025-09-06
基金项目:安徽高校自然科学研究项目(KJ20021A0471)
通信作者:张子健(2001—),男,硕士研究生,主要从事输电线路距离保护、电力系统与自动化等方面的研究;E-mail:1274752232@qq.com

and maintains fast response speed, effectively distinguishing remote PSs and high-resistance faults.

Key words: distance protection; power swing; improved ellipse fitting; Lissajous figure; Hausdorff distance; CCDA

当负荷突变、发电机熄火或输电线路故障等扰动发生时,系统会产生功率振荡(power swing,PS)。此时,距离保护观测到的阻抗轨迹可能会入侵保护Ⅲ区,导致距离保护误动或拒动。若该误动或拒动在电力系统中产生连锁反应,则可能导致级联灾难[1-3]。因此,正确区分功率振荡和故障至关重要。目前,主要采用功率振荡闭锁(power swing blocking,PSB)与功率振荡解闭锁(power swing de-blocking,PSD)方法来解决这一问题。当功率发生振荡时,这些方法阻止距离保护动作;如果在功率振荡期间检测到故障,则会迅速发送跳闸信号[4]。

文献[5]提出了一种基于移动窗口平均的新方法,但该方法在多模式及非对称功率振荡场景下的故障检测存在局限性。文献[6-8]使用矩阵束(matrix pencil,MP)方法,解决了在阻抗保护Ⅲ段内发生三相故障时的检测和判别问题。文献[9-10]采用振荡中心电压、电流不对称度和电压特征来识别对称与不对称故障,但该研究未考虑其他临界条件。文献[11-12]利用线路两端电气量,制定振荡闭锁方案,但其通道的可靠性仍然有待提高,且线路传输信号的时间会导致计算延迟。数字信号处理技术可识别电压和电流信号中的微小干扰,故其在功率振荡检测领域得到了广泛应用,如快速傅里叶变换(fast Fourier transformation,FFT)、小波变换、S变换等这些算法均不同程度地存在时频分辨率差、计算量大、基函数预定义等问题[13-23]。文献[24-25]采用经验模态分解(empirical mode decomposition,EMD)算法,获得了更好的滤波响应,得到了可靠的识别功率振荡中的故障事件的指标。文献[26]将改进的Hausdorff距离算法作为新判据,其算法可有效识别发生在区域内、外部的故障。文献[27]提出了一种基于核函数线性判别模型的异常因子检测方法,其相应速度较快,但该方法未考虑临界情况的影响。文献[28]利用保护线路两端的电压与电流来构建莉萨如轨迹(Lissajous curve,LC)拟合中的椭圆,并基于该椭圆周长变化率检测故障。但其椭圆周长只能取近似值,这导致该方法无法识别远端高阻故障,也无法识别不稳定振荡等复杂情况下的故障,且该方法较依赖双端采样,采样过程中的通道影响可能会导致响应延迟。

这些文献提出的保护方法均存在不同程度的限制。基于此,本研究提出一种新的图形拟合方法以检测振荡与故障。该方法利用保护安装处的电压与电流来构建LC,其所拟合的椭圆面积在系统发生功率振荡时的变化很小;但当系统发生故障时,该椭圆面积会产生显著变化;且相邻椭圆间的Hausdorff距离也会随扰动类型发生变化。故该方法能有效反映LC拟合的椭圆的相似度,可识别高阻抗故障等扰动引起的微小变化。临界条件检测算法(critical condition detection algorithm,CCDA)仅使用低采样率的单端信号进行故障检测。其可对功率振荡、负荷入侵、电压不稳定、电气中心故障等情况进行分析,能提供振荡闭锁和解闭锁的功能,且还可在噪声环境(含噪信号为50 dB)中检测到故障,该算法易于实现,响应速度快。

1 构建LC概述

LC是2个沿着互相垂直方向的正弦振动的合成轨迹。若这两个简谐振动的频率相同,则可形成稳定的椭圆曲线;若这两个简谐振动频率不同,则其合成的运动轨迹较复杂,且曲线不闭合。其对应的参数方程为

$$\begin{cases} x(\theta)=a\sin(\theta) \\ y(\theta)=b\sin(n\theta+\varphi) \end{cases} \tag{1}$$

式中,$x(\theta)$、$y(\theta)$为两个不同简谐信号;θ为相位角;φ为初始角;n为两个信号的频率比。

其中,$0\leqslant\varphi\leqslant\pi/2$,$n\geqslant1$。LC可测量这两个信号的频率比与相位差。当系统正常运行时,电流与电压频率稳定,LC的轨迹变化小且规律;当系统发生扰动时,瞬态突变影响导致LC发生较大变化。为获得更好的滤波响应,方便观测LC,须对信号进行预处理。

EMD算法基于瞬时频率与本征模态函数(intrinsic mode function,IMF),将信号分解为若干个IMF分量,其每一次迭代均可被视为一种信号的逐步筛选过程。基于信号自身的特性,EMD算法可有效处理非平稳与非线性信号。若在EMD算法迭代过程中得到M个IMF,则重构的原始信号$X(t)$为

$$X(t)=\sum_{i=1}^{M}\left(C_i(t)+r(t)\right) \tag{2}$$

式中,$C_i(t)$为t时刻的第i个本征模态分量;$r(t)$为t

时刻的分解后的剩余分量。

峭度是测量输入信号概率密度偏差的无量纲参数，其可反映振动信号的冲击特性。在所有EMD算法的分解层中，故障过程中信息最丰富的分解层的峭度值最高。故可据此选取IMF分量，其计算式为

$$\gamma=\frac{E\left(I_{\mathrm{IMF},i}-\mu\right)^4}{\sigma^4} \tag{3}$$

式中，$I_{\mathrm{IMF},i}$为IMF的第i个分量值；$E(\cdot)$为数学期望值，μ、σ^2和γ分别为各IMF的平均值、标准差和峰度。

系统故障常伴随电压、电流信号发生突变，这些突变将产生高频暂态分量，其包含故障早期信息。电流信号及其IMF分量峭度分布如图1所示。从图1中可以看出，系统于3.0 s时产生故障，IMF的第一个分量对应信号中最高频率的成分，该分量能捕捉峭度带来的高频暂态特征，而其他分量则过于混杂，无法识别振荡期间故障带来的瞬态影响。因此，本研究将IMF的第一个分量($I_{\mathrm{IMF},1}$)作为主信号。

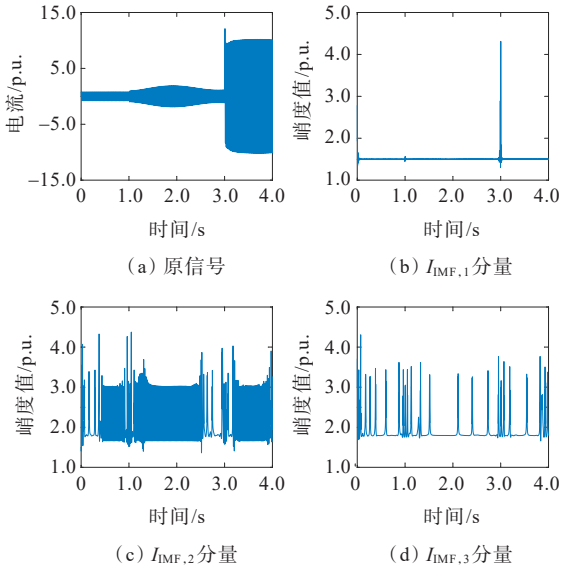


图1　电流信号及其IMF分量峭度分布

Figure 1　Kurtosis distribution of current signal and each IMF component

考虑电力系统的双源等效模型，将瞬时电流$i(t)$和电压$u(t)$表示为

$$i(t)=I_{\mathrm{m1}}\sin(\omega_1 t+\theta_{\mathrm{i1}})+I_{\mathrm{m2}}\sin(\omega_2 t+\theta_{\mathrm{i2}}) \tag{4}$$

$$u(t)=U_{\mathrm{m1}}\sin(\omega_1 t+\theta_{\mathrm{v1}})+U_{\mathrm{m2}}\sin(\omega_2 t+\theta_{\mathrm{v2}}) \tag{5}$$

式中，t为时间；I_{m1}、I_{m2}分别为正弦电流1与正弦电流2分量的幅值，ω_1、ω_2分别为正弦电流1与正弦电流2的角频率；θ_{i1}、θ_{i2}为正弦电流1与正弦电流2的初始电流相位；U_{m1}、U_{m2}分别正弦电流1与正弦电流2的电压的正弦分量幅值；θ_{v1}、θ_{v2}为正弦电流1与正弦电流2的初始电压相位。

若式(4)、(5)中分量的角频率相同，即$\omega_1=\omega_2=\omega$，则可将电压和电流表达式合并为等效的正弦函数，即

$$i(t)=I_{\mathrm{eq}}\sin(\omega t+\theta_{\mathrm{i}}) \tag{6}$$

$$u(t)=U_{\mathrm{eq}}\sin(\omega t+\theta_{\mathrm{u}}) \tag{7}$$

式中，U_{eq}、I_{eq}分别为通过矢量叠加后的电压与电流的等效幅值；θ_{i}、θ_{u}分别为电流与电压的等效相位角。

通过三角变换消去时间变量t，则可得到

$$\left(\frac{u(t)}{U_{\mathrm{eq}}}\right)^2+\left(\frac{i(t)}{I_{\mathrm{eq}}}\right)^2-2\frac{u(t)}{U_{\mathrm{eq}}}\frac{i(t)}{I_{\mathrm{eq}}}\cos(\Delta\theta)=\sin^2(\Delta\theta) \tag{8}$$

式中，$\Delta\theta=\theta_{\mathrm{i}}-\theta_{\mathrm{u}}$。

式(8)可看作一个椭圆方程，故可将每一个椭圆放入信号采集窗口中，该采集窗口长度W为

$$W=\frac{F_{\mathrm{s}}}{F_{\mathrm{f}}} \tag{9}$$

式中，F_{s}为采样频率，本文取其值为1 kHz；F_{f}为系统的基频，本文取其值为50 Hz。

随着时间的延长，该窗口逐渐向前移动，即可绘制不断变化的LC图像，功率振荡期间的电压-电流的LC图像如图2所示。在图2中，稳态下的LC是一个椭圆，但在功率振荡情况下，LC无法维持原有形状。

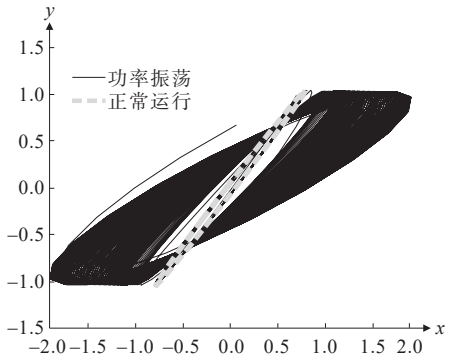


图2　功率振荡期间的电压-电流的LC图像

Figure 2　Voltage-current LC figure during PS

2　构建LC

2.1　拟合改进

常规椭圆拟合法不能检测复杂临界情况与高阻

故障。当系统处于不稳定功率振荡状态时，由于采样点分布复杂，传统方法拟合会出现较大的偏差。

按文献[18]所提传统椭圆拟合方法得到的拟合图形如图3所示。在图3中，该图形是在不稳定功率振荡下观测到的椭圆轨迹，其窗口长度同样为20。从图3中可看出，2.8 s时系统并未发生故障，但该方法拟合的曲线已经出现严重偏差。

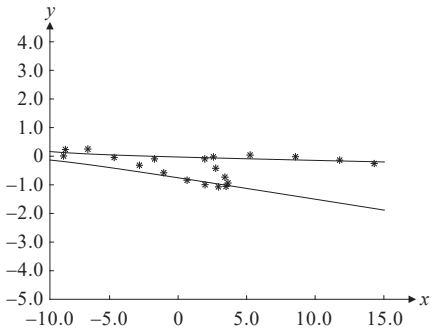


图3 传统椭圆拟合方法

Figure 3 Traditional ellipse fitting method

本文提出一种适用于CCDA算法的新型拟合算法，该算法应对各类临界条件时均可保证有效性，且该算法可较好地反映电流与电压变化的真实情况。椭圆方程可以用隐式二次多项式来描述，即

$$F(x,y)=ax^2+bxy+cy^2+dx+ey+f=0 \tag{10}$$

式中，a、b、c、d、e、f均为椭圆方程系数。

为简化该方程，将其写为矢量形式，即

$$\begin{cases}\boldsymbol{\alpha}=(a,b,c,d,e,f)^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\beta}=(x^2,xy,y^2,x,y,1)^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{11}$$

式中，$\boldsymbol{\alpha}$、$\boldsymbol{\beta}$均为向量。

则该椭圆方程可写作

$$F(x,y)=\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\beta}=0 \tag{12}$$

对一组点(x_i,y_i)进行椭圆拟合，可以通过在二次曲线中最小化样本点到其平方距离之和来实现。令向量$\boldsymbol{\beta}_i=(x_i,y_i)^{\mathrm{T}}$，则$F_\alpha$为关于$\boldsymbol{\beta}_i$的向量值函数，即

$$\min\sum_{i=1}^{N}F(x_i,y_i)^2=\sum_{i=1}^{N}F_\alpha(\boldsymbol{\beta}_i)^2=\min\sum_{i=1}^{N}(\boldsymbol{\beta}_i\cdot\boldsymbol{\alpha})^2 \tag{13}$$

式中，N为窗口内采样数，本文取其值为20。

但常规椭圆拟合法不能区分不稳定振荡等临界情况与故障。使用$\varepsilon\boldsymbol{\alpha}$向量缩放：对$\forall\varepsilon\neq0$，$\varepsilon\boldsymbol{\alpha}$都表示与$\boldsymbol{\alpha}$相同的二次曲线。因此，在进行适当缩放后，约束条件可以变为

$$b^2-4ac=1 \tag{14}$$

式中，a、b、c分别为椭圆的长轴、短轴、焦距。

则对一组点进行椭圆拟合的目标函数为

$$\begin{cases}\min\|\boldsymbol{D\alpha}\|^2\\ \text{s.t.}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C\alpha}=1\end{cases} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{D}=\begin{pmatrix}x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1\\ x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1\\ x_3^2 & x_3y_3 & y_3^2 & x_3 & y_3 & 1\\ x_4^2 & x_4y_4 & y_4^2 & x_4 & y_4 & 1\\ x_5^2 & x_5y_5 & y_5^2 & x_5 & y_5 & 1\\ x_6^2 & x_6y_6 & y_6^2 & x_6 & y_6 & 1\end{pmatrix} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{C}=\begin{pmatrix}0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0\\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{pmatrix} \tag{17}$$

若设$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}$，则最优解可表示为

$$\begin{cases}\boldsymbol{S\alpha}=\lambda\boldsymbol{C\alpha}\\ \boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C\alpha}=1\end{cases} \tag{18}$$

式中，λ为最小特征值。

用一般的零特征向量求解该方程组，易知最优解$\boldsymbol{\alpha}=(a,b,c,d,e,f)^{\mathrm{T}}$存在6个实解$(\lambda_j,\boldsymbol{\alpha}_j)$，将其依次代入式(10)，最终求出拟合椭圆。

不稳定功率振荡场景下改进后方法的拟合轨迹如图4所示。图4的拟合工况与图3的工况一致，但相较于图3的传统拟合方法，图4的拟合精度显著提升，可有效区分振荡与故障情况。

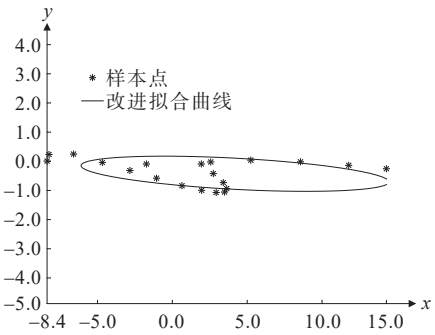


图4 不稳定功率振荡场景下改进后方法的拟合轨迹

Figure 4 Fitting trajectory of improved method under unstable PS scenarios

2.2 功率振荡检测指标

基于LC，可定义每一个周期内LC的椭圆面积$S_{\mathrm{U-I}}$，即

$$\begin{cases} S_{\mathrm{U-I}}=\left|\int_{t=0}^{t=T} u(t)\,\mathrm{d}i(t)\right| \\ u(t)=\sum_{h=1}^{H} U_h\cos(h\omega t+\theta_h) \\ i(t)=\sum_{h=1}^{H} I_h\cos(h\omega t+\gamma_h) \end{cases} \tag{19}$$

式中，ω 为信号基频；h 为谐波阶数；U_h 和 θ_h 分别为电压信号谐波的幅值和相角；I_h 和 γ_h 分别为电流谐波的幅值和相角；H 为最大谐波数；T 为周期。

可将式(19)改写为

$$\begin{cases} S_{\mathrm{U-I}}=\left|\int_{t=0}^{t=T}\left(\sum_{h=1}^{H} U_h\cos(h\omega t+\theta_h)\right)\cdot \right. \\ \left.\left(-\sum_{h=1}^{H} h\omega I_h\sin(h\omega t+\gamma_h)\right)\mathrm{d}t\right| \\ =\left|\sum_{h=1}^{H}(\pi h)\left(U_h I_h\sin(\theta_h-\gamma_h)\right)\right| \\ =\sum_{h=1}^{H}\alpha_h|Q_h| \\ Q_h=U_h I_h\sin(\theta_h-\gamma_h) \\ \alpha_h=\pi h \end{cases} \tag{20}$$

式中，Q_h 为无功功率；α_h 为常数。

由式(20)可知，LC 面积可反映各谐波无功功率 Q_h 的加权和。值得一提的是，系统的无功功率可直接测得，这里分析的无功功率变化可在一定程度上表征拟合椭圆面积变化的物理意义。

若将长轴记为 R_{A1}，短轴记为 R_{A2}，椭圆心坐标记为 $(x_{\mathrm{c}}, y_{\mathrm{c}})$，则该椭圆面积 $S(i)$ 为

$$S(i)=\pi R_{\mathrm{A1}}R_{\mathrm{A2}} \tag{21}$$

式中，i 为第 i 个样本的拟合椭圆。

当系统处于正常和振荡状态时，二维平面上的离散点几乎全部处于拟合椭圆上；当系统发生故障时，离散点不再呈椭圆轨迹分布，系统的无功功率发生变化，所拟合椭圆的圆心和面积也会相应地发生变化。因此，为设计故障检测指标(faualt detection index，FDI)I_{FDI}，计算圆心到原点的欧式距离 d：

$$d=\sqrt{x_{\mathrm{c}}^2+y_{\mathrm{c}}^2} \tag{22}$$

当系统发生扰动时，相邻 2 个椭圆的形状与位置会改变，计算相邻窗口的 Hausdorff 距离，度量这 2 个拟合椭圆的相似度。椭圆 A，B 可看作 2 个封闭曲线(点的集合)，令 $h(A,B)$ 为集合 A 到集合 B 最近点的单向最大距离，则其 Hausdorff 距离 $H(A,B)$ 为

$$H(A,B)=\max\{h(A,B),h(B,A)\} \tag{23}$$

则故障检测指标值 I_{FDI} 为

$$I_{\mathrm{FDI}}=S(i)H(i,i+1) \tag{24}$$

将基于拟合椭圆算法的 I_{FDI} 增量作为 CCDA 距离保护的算法流程如图 5 所示。

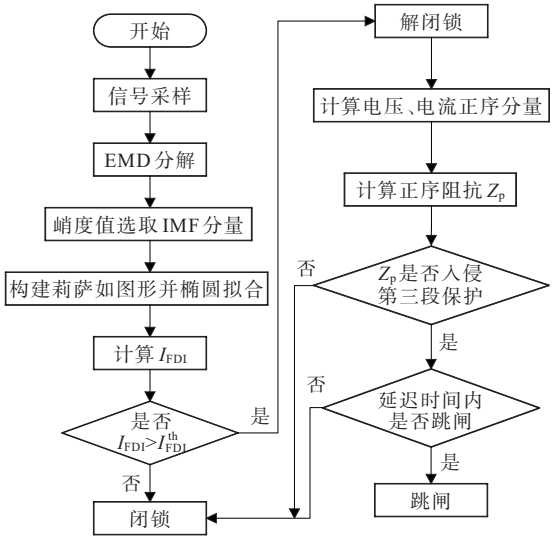


图 5　将基于拟合椭圆算法的 FDI 增量作为 CCDA 距离保护的算法流程

Figure 5　Algorithm flow for CCDA distance protection using FDI increments based on the fitted ellipse algorithm

2.3　算法阈值选取

振荡与故障的判别阈值应通过严格的场景分析确定。本节通过比较不同振荡与故障场景中所测出的 I_{FDI} 值来确定阈值。通过改变故障类型、位置、阻值，尽可能地模拟不同的振荡场景。不同场景的案例模拟 I_{FDI} 值见表 1。

表 1　不同场景的案例模拟的 I_{FDI} 值

Table 1　I_{FDI} value of case simulations under different scenarios

案例	PS 类型	故障类型	位置/%	阻值/Ω	I_{FDI} 振荡	I_{FDI} 故障	检测时间/ms
1	稳定 PS	ABC	10	10	0.107	182.570	1.05
2	稳定 PS	ABC	10	100	0.107	14.282	1.05
3	稳定 PS	AG	50	10	0.107	14.156	5.23
4	稳定 PS	AB	50	100	0.107	10.437	4.24
5	稳定 PS	ABG	50	100	0.107	9.229	2.67
6	稳定 PS	ABC	90	10	0.107	19.080	2.62
7	稳定 PS	ABC	90	100	0.107	8.762	2.62
8	不对称 PS	ABC	10	10	4.21	818.240	0.68
9	不对称 PS	ABC	10	100	4.21	26.732	0.68
10	不对称 PS	AG	50	10	4.21	26.318	7.19
11	不对称 PS	AB	50	100	4.21	10.747	7.36
12	不对称 PS	ABG	50	100	4.21	8.337	8.01
13	不对称 PS	ABC	90	10	4.21	36.040	7.21

续表

案例	PS类型	故障类型	位置/%	阻值/Ω	I_{FDI} 振荡	I_{FDI} 故障	检测时间/ms
14	不对称PS	ABC	90	100	4.21	9.795	7.21
15	不稳定PS	ABC	10	10	7.41	369.020	1.66
16	不稳定PS	ABC	10	100	7.41	16.472	1.66
17	不稳定PS	AG	50	10	7.41	10.811	5.42
18	不稳定PS	AB	50	100	7.41	11.273	8.32
19	不稳定PS	ABG	50	100	7.41	10.404	9.19
20	不稳定PS	ABC	90	10	7.41	12.090	1.94
21	不稳定PS	ABC	90	100	7.41	9.851	1.94

区分振荡和故障的阈值 I_{FDI}^{th} 为

$$I_{FDI}^{th}=\frac{\left(I_{FDI,\min}^{PS}+I_{FDI,\max}^{fault}\right)}{2} \tag{25}$$

式中，$I_{FDI,\min}^{PS}$ 为功率振荡下测得的FDI最小值；$I_{FDI,\max}^{fault}$ 为故障下的FDI最大值。

最终，$I_{FDI}^{th}=7.907$。

3 仿真验证

3.1 仿真系统

为检测CCDA算法能否正确执行功率振荡闭锁和解闭锁功能，在四机两区域系统中进行仿真测试，该系统如图6所示。该仿真通过模拟故障和临界条件来检测所提方法在故障识别上的鲁棒性。在图6中，该系统由G1～G4共4台发电机和11条母线组成，断路器CB1～CB8用于控制线路的通断，保护线路1的保护装置KZ安装在母线7上，其采样频率为1 kHz。

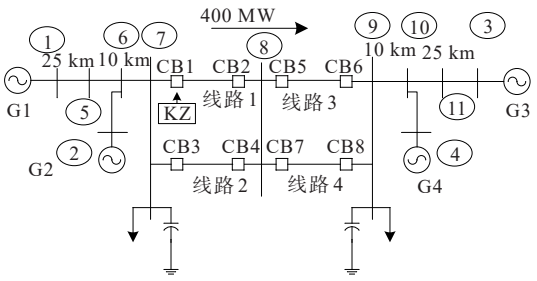


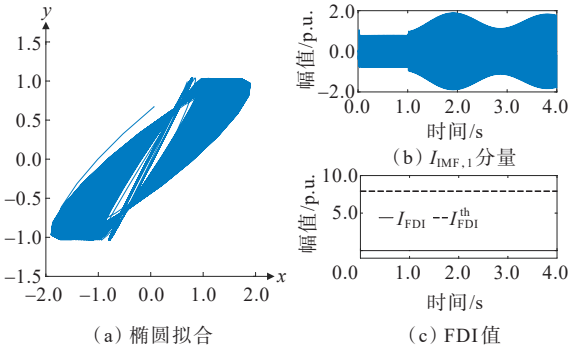
图6 四机两区域系统

Figure 6 Four-machine two-area system

3.2 功率振荡

3.2.1 稳定功率振荡

在电力系统中，相邻线路故障引起的功率振荡分为稳定和不稳定2类。若系统发生稳定PS，则说明经过一段时间后其将重新进入稳定状态。为模拟线路1上的稳定振荡，在1.0 s时断开线路4两端的断路器。图7显示了CCDA算法在稳定PS下的性能。从图7中可以看出，振荡引起的阻抗轨迹在1.708 s进入保护Ⅲ区，且计算的 I_{FDI} 值未超过阈值 I_{FDI}^{th}，保护将保持在闭锁状态，所提算法有效地防止了距离保护的误动作。



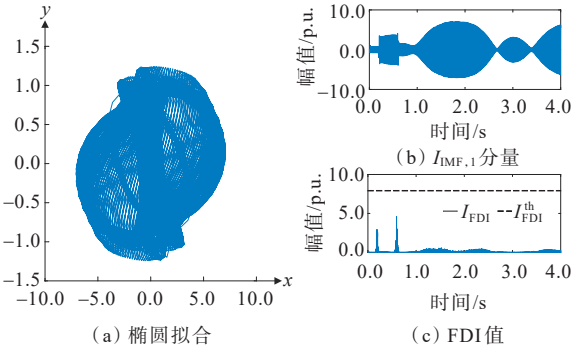
(a) 椭圆拟合 (b) $I_{IMF,1}$ 分量 (c) FDI值

图7 CCDA算法在稳定PS下的性能

Figure 7 Performance of CCDA under stable PS

3.2.2 多模式振荡

当线路发生短路故障并断开该线路时，系统会在相邻线路中产生PS。这种由横向故障引起的存在于多台发电机中的振荡模式被称为多模式PS。为模拟该PS模式，线路4的末端在0.2 s时模拟三相故障，且在400 ms后，在线路两端断路器的帮助下清除该故障。CCDA算法在多模式PS下的性能如图8所示。从图8中可以看出，振荡引起的阻抗轨迹在1.332 s入侵动作区，I_{FDI} 值未超过阈值 I_{FDI}^{th}，保持振荡闭锁功能激活以防止跳出，所提出算法在多模式PS中仍然可正常工作。



(a) 椭圆拟合 (b) $I_{IMF,1}$ 分量 (c) FDI值

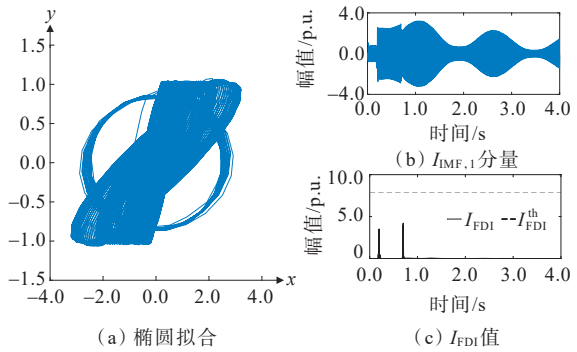
图8 CCDA算法在多模式PS下的性能

Figure 8 Performance of CCDA under multi-mode PS

3.2.3 不对称振荡

根据不同故障类型，功率振荡还可分为对称与不对称2类。为操作方便，若三相线路发生故障，线路会直接断开；若220 kV以上的超高压线路发生故障，则应实施分相跳闸。这个过程可能会在相邻线

路中产生不对称振荡，影响功率振荡闭锁和解闭锁功能的正常运行。设定系统 0.2 s 在线路 4 上产生 AG 单相接地故障，400 ms 后，线路两端断路器切断 A 相。CCDA 算法在不对称 PS 下的性能如图 9 所示。从图 9 中可以看出，在 PS 期间，继电器观察到的阻抗轨迹在 1.3 s 侵入动作区。此时，I_{FDI} 小于阈值 I_{FDI}^{th}，继电器保持 PSB 状态以防止误操作。这说明所提出的 CCDA 算法也可以在非对称 PS 下有效工作。



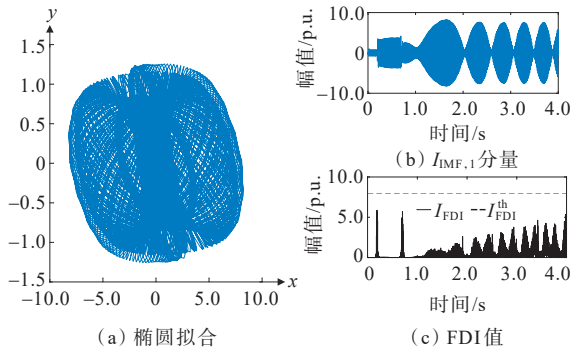
(a) 椭圆拟合　(b) $I_{IMF,1}$ 分量　(c) I_{FDI} 值

图 9　CCDA 算法在不对称 PS 下的性能

Figure 9　Performance of CCDA under asymmetric PS

3.2.4　不稳定振荡

不稳定的 PS 是电力系统级联灾害的主要原因，这种振荡影响相邻区域。随着故障持续时间的延长，系统频率将发生大幅度改变，最终导致系统崩溃。这也是 PSB 及 PSD 面临的最大挑战。在该仿真中，线路 4 在 0.2 s 时出现故障，500 ms 后，两端断路器断开以清除故障。由于故障持续时间的延长，发电机转子在过剩转矩的作用下不断加速，最终失去与其他发电机的同步速度。CCDA 算法在负荷入侵下的性能如图 10 所示。从图 10 中可以看出，与其他振荡相比，不稳定振荡会导致更剧烈的电流变化，这与故障发生时的电流变化相似，I_{FDI} 值明显增加，但仍小于阈值 I_{FDI}^{th}。因此，所提算法在不稳定振荡期间仍能有效工作。



(a) 椭圆拟合　(b) $I_{IMF,1}$ 分量　(c) FDI 值

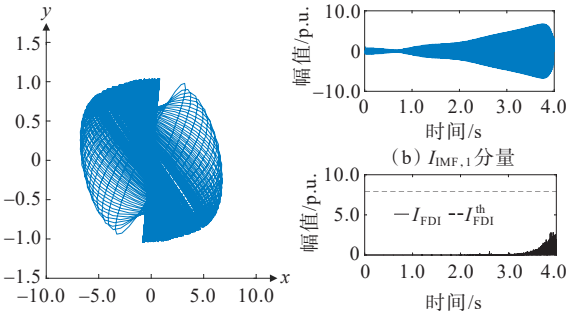
图 10　CCDA 算法在不稳定 PS 下的性能

Figure 10　Performance of CCDA under unstable PS

3.3　负荷入侵

负荷入侵是一种非故障事件，随着负载需求的不断增加，距离保护观测到的阻抗轨迹会逐渐入侵动作区，这可能给所提方法带来新的挑战。本节通过以 0.2 s 为间隔，逐步增加总线 7 的负荷（每次增幅为额定功率的 10%），模拟负荷入侵场景，使负荷逐步进入重负载状态。

图 11 展示了 CCDA 算法在负荷入侵下的性能。从图 11 中可以看出，随着负荷的持续增加，2.537 s 时，阻抗开始入侵动作区域。在整个过程中，I_{FDI} 值始终低于阈值 I_{FDI}^{th}，所提算法成功使负荷入侵下的距离保护保持闭锁。



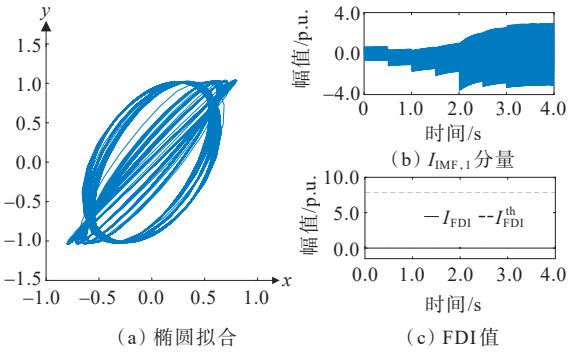
(a) 椭圆拟合　(b) $I_{IMF,1}$ 分量　(c) FDI 值

图 11　CCDA 算法在负荷入侵下的性能

Figure 11　Performance of CCDA under load intrusion

3.4　电压不稳定

电力系统的无功需求增大会降低线端电压，距离保护观测到的阻抗也会进入保护区，这将导致保护误动作而断开线路。本节测试 CCDA 算法在这种临界条件下的性能表现，通过连续增加受保护线路上的无功需求来模拟电压不稳定，无功负荷的增加将造成电压在一定范围内的降低。图 12 展示了 CCDA 算法在电压不稳定状态下的性能。



(a) 椭圆拟合　(b) $I_{IMF,1}$ 分量　(c) FDI 值

图 12　CCDA 算法在电压不稳定下的性能

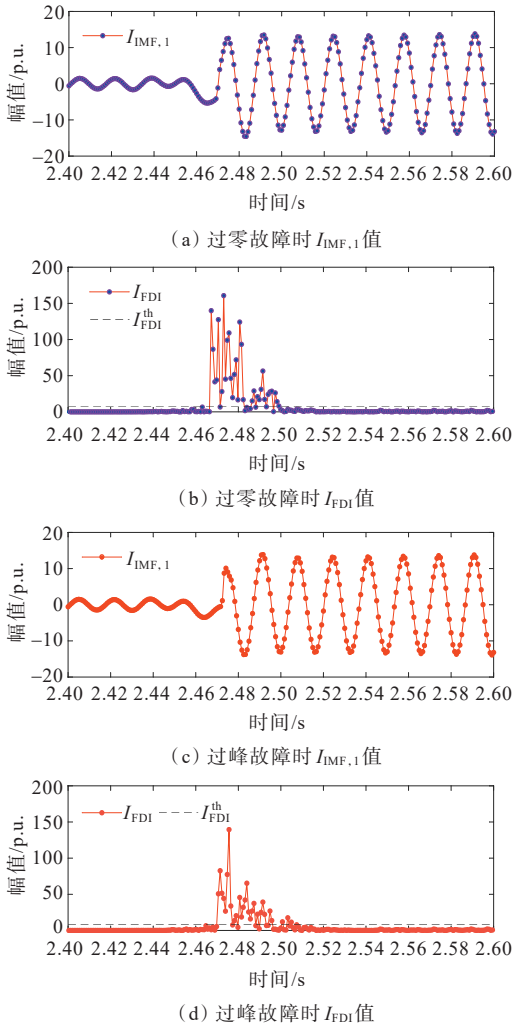
Figure 12　Performance of CCDA under unstable voltage

从图 12 中可以看出，随着电压的降低与电流的增加，距离保护所观测到的阻抗在 2.3 s 时进入保护

Ⅲ区域，这将导致保护断开线路，PSB功能失效。但所提算法监测到的I_{FDI}值始终低于阈值，保护装置不会运作，系统始终处于闭锁状态，电压不稳定不会影响所提算法的闭锁功能。

3.5 故障起始时刻对CCDA的影响

在一个周期内，不同位置故障引起的瞬态突变可能不尽相同，其对应的结果也大相径庭。故障发生时，电流信号可分解为稳态分量和衰减的直流分量。衰减的直流分量的初始值越大，瞬态突变越显著。其最大值与最小值分别对应了电压信号的过零点和极值点，过零故障比过峰故障引入了更多的暂态。为测试并验证所提算法的可行性与有效性，分别在线路1上功率振荡时的过零点(2.467 s)和极值点(2.477 s)处产生三相故障。过零和过峰故障时的电流波形和各FDI值如图13所示。从图13中可以看出，在故障发生后，FDI值逐渐增加；与极值点相比，过零故障引起的幅值变化更大。因此，所提算法在一个功率周期内的任意时刻均可检测到故障。



(a) 过零故障时$I_{IMF,1}$值

(b) 过零故障时I_{FDI}值

(c) 过峰故障时$I_{IMF,1}$值

(d) 过峰故障时I_{FDI}值

图13 过零和过峰故障时的电流波形和FDI值

Figure 13 Current waveform and FDI value during zero-crossing and peak-overload fault

3.6 振荡期间电气中心附近发生故障

PS期间，电气中心发生的故障难以检测。此时，功率角为180°，距离保护观测到的阻抗接近保护范围的整定边界，该值位于动作区与非动作区的过渡带，电源助增效应使实际测量阻抗偏离预期值，保护难以区分区内、外故障，可能导致误动或拒动。当故障发生时，测量阻抗变化不明显，难以进行故障识别。在本节中，通过分析位于保护中心区域的阻抗轨迹上的几个特殊点来评估所提方法在电气中心附近发生故障时的性能表现。振荡中心附近的阻抗轨迹如图14所示。从图14中可以看出，仅存在振荡时的测量阻抗侵入电气中心的过程。分别在特殊点a、b、c、d、e处模拟对称故障(故障发生时刻为3.0 s)，故障发生于距线路起点为总长路的10%处，故障阻抗R_f=10 Ω)。

电气中心故障时的电流波形和各FDI值如图15～19所示。其展示了当故障发生在a、b、c、d、e点

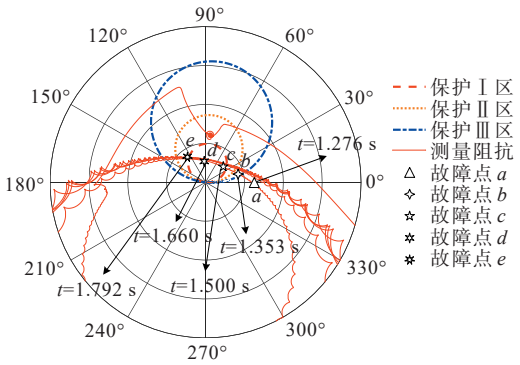
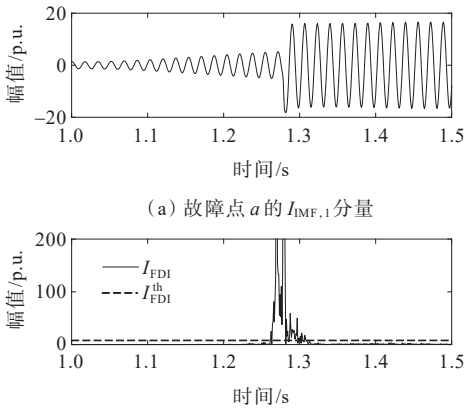


图14 振荡中心附近的阻抗轨迹

Figure 14 Impedance trajectories near PS center



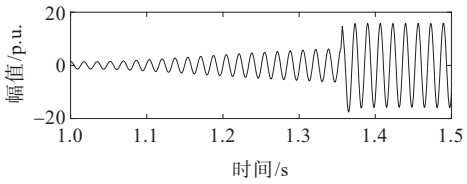
(a) 故障点a的$I_{IMF,1}$分量

(b) 故障点a的I_{FDI}分量

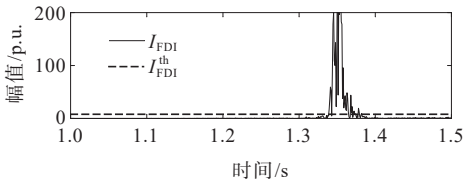
图15 故障点a的电流波形和FDI值

Figure 15 Current waveform and FDI value at fault point a

时的电流波形和各FDI值。分析图15～19可知，电气中心附近的故障在振荡过程中不断叠加，但在故障发生时的I_{FDI}指标仍大于阈值I_{FDI}^{th}。因此，所提方法可以检测发生在电气中心附近的故障。



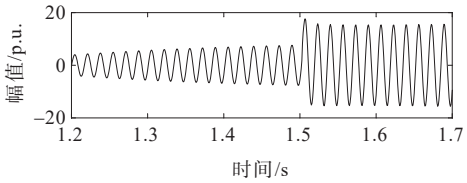
（a）故障点b的$I_{IMF,1}$分量



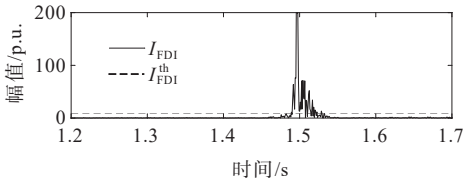
（b）故障点b的I_{FDI}分量

图16　故障点b的电流波形和FDI值

Figure 16　Current waveform and FDI value at fault point b



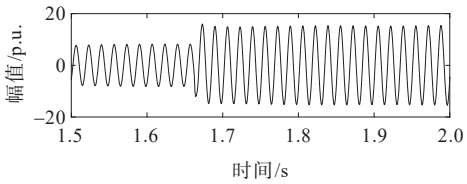
（a）故障点c的$I_{IMF,1}$分量



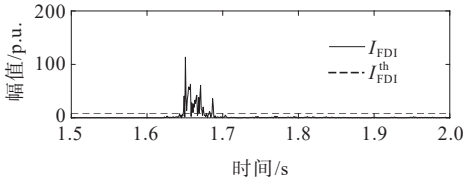
（b）故障点c的I_{FDI}分量

图17　故障点c的电流波形和FDI值

Figure 17　Current waveform and FDI value at fault point c



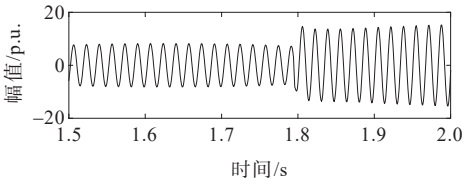
（a）故障点d的$I_{IMF,1}$分量



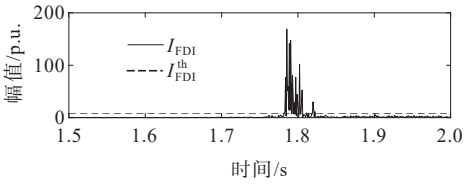
（b）故障点d的I_{FDI}分量

图18　故障点d的电流波形和FDI值

Figure 18　Current waveform and FDI value at fault point d



（a）故障点e的$I_{IMF,1}$分量



（b）故障点e的I_{FDI}分量

图19　故障点e的电流波形和FDI值

Figure 19　Current waveform and FDI value at fault point e

4　算法对比

基于改进拟合椭圆的CCDA算法与其他算法的比较见表2。

表2　基于改进拟合椭圆的CCDA检测算法与其他算法的比较

Table 2　Comparison of CCDA detection algorithm based on improved fitting ellipse with other algorithms

文献	采样率/kHz	输入信号		故障阻抗/Ω	最小检测时间/ms	是否受故障初始时刻影响	能否检测不稳定振荡	计算量小
		U	I					
[5]	1.2		√	×		×	√	√
[10]	NM	√	√	×		√	×	×
[12]	4.0		√	100	4.00	√	√	×
[18]	20.0		√	300	2.00	√	×	×
[24]	10.0	√	√	200	8.00	√	√	×
[25]	1.0		√	100	1.00	√	√	√
[26]	10.0	√	√	×	4.00			√
[28]	10.0	√	√	×	0.35	√	×	×
所提算法	1.0	√	√	100	0.88	√	√	√

由表2可知，文献[11,12]提及的需要双端电气量的算法的通道可靠性有待提高，且其线路传输信号需要时间，而所提算法只测量保护安装处的电气量，延迟时间更短；文献[5,12,17,23,25,27]的算法要求更高的采样率，所提算法则对采样率要求较低，这使得所提算法的运算速度大大加快；与文献[10,17,27]的算法相比，所提算法额外测试了更多临界条件，其可在噪声（含噪信号为50 dB）条件下检测到故障，且能检测到振荡期间的远端高阻抗（R_f=100 Ω）故障，不受起始时刻影响；所提算法

计算过程也比文献[12,17,23]的算法的更简单,且所提算法的响应时间更短。综上所述,所提算法在临界条件与复杂故障场景下的鲁棒性显著优于其他算法的鲁棒性。

5 结语

距离保护中功率振荡过程中的故障检测和判别是一项有挑战性的任务,本研究提出了一种新的基于改进拟合椭圆的CCDA检测算法。得出如下结论:

1)所提算法改进了拟合规则,该规则使椭圆拟合在复杂情况下仍能反映真实信号情况;使用EMD对单端电流与电压信号进行分解,其滤波可保留原信号必要特征并对其进行分析,可依据这些特征绘制不断变化的LC。

2)利用拟合轨迹计算椭圆面积与其Hausdorff距离,区分系统临界条件与故障状态。这些特征能够放大由扰动引起的信号微小变化,从而进行故障识别。所提方法计算简单,具备一定抗噪性,响应速度快。

3)在四机两区域系统中对各类临界条件进行模拟仿真,测试了复杂功率振荡、负荷入侵、无功功率变化、电压不稳定等对所提方法的影响;针对故障类型、位置、起始时间、阻抗大小与电气中心故障进行了测试,验证了所提算法能检测各种临界条件期间发生的故障,并能执行PSB与PSD功能。

所提算法也指出相邻两椭圆存在细微差异。未来可基于该差异开展更深入的测试与分析,也可考虑在新能源并网下测试方法的可用性。

参考文献:

[1] VENKATANAGARAJU K, BISWAL M, MALIK O P. Adaptive third-zone distance protection scheme for power system critical conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1401-1410.

[2] 桂小智, 宋国兵, 常鹏, 等. 适用于新能源并网系统的距离保护方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 250-257.
GUI Xiaozhi, SONG Guobing, CHANG Peng, et al. Distance protection method applicable to renewable energy grid-connected systems[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(3): 250-257

[3] PANG C Z, KEZUNOVIC M. Fast distance relay scheme for detecting symmetrical fault during power swing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2205-2212.

[4] MEHRI A, MAZLUMI K, HASHEMIDEZAKI H, et al. A novel approach for elimination of defects of blocking and unblocking in distance relays during power swing [J]. Sustainability, 2023, 15(18): 13435.

[5] RAO J G, PRADHAN A K. Power-swing detection using moving window averaging of current signals[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 368-376.

[6] MARINDRA A M J, TIAN G Y. Chipless RFID sensor tag for metal crack detection and characterization[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(5): 2452-2462.

[7] ŁUKASZEWSKI P, NOGAL Ł, ŁUKASZEWSKI A. The identification of travelling waves in a voltage sensor signal in a medium voltage grid using the short-time matrix pencil method[J]. Energies, 2022, 15(12): 4307.

[8] CHAHINE K. Rotor fault diagnosis in induction motors by the matrix pencil method and support vector machine [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2018, 28(10): e2612.

[9] 邓华, 高鹏, 王建全. 关于振荡角的振荡中心电压和ucosφ的变化特征[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1): 68-73.
DENG Hua, GAO Peng, WANG Jianquan. Oscillation center voltage of oscillation-angle and the characteristics of ucosφ[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, 2007, 19(1): 68-73.

[10] 王兴国, 姜宏丽, 程琪, 等. 基于m-Ucosφ平面识别振荡期间输电线路不对称故障的方法[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4625-4634.
WANG Xingguo, JIANG Hongli, CHENG Qi, et al. Identification of transmission line unsymmetrical fault during power swing based on m-ucosφ plane[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4625-4634.

[11] ALI EL-SAYED L M, KHALIL IBRAHIM D, IBRAHIM GILANY M, et al. An accurate technique for supervising distance relays during power swing[J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2021, 21(3): 1279.

[12] MUSA M H H, HE Z Y, FU L, et al. A covariance indices based method for fault detection and classification in a power transmission system during power swing[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 105: 581-591.

[13] AKOLKAR S M, JARIWALA H R. An advanced transmission line protection algorithm to detect power swing and fault using speedy wavelet[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 2022, 46(3): 701-711.

[14] MAHAMEDI B, ZHU J G. A novel approach to detect

symmetrical faults occurring during power swings by using frequency components of instantaneous three-phase active power[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1368-1376.

[15] LOTFIFARD S, FAIZ J, KEZUNOVIC M. Detection of symmetrical faults by distance relays during power swings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 81-87.

[16] 陶维青, 李雪婷, 华玉婷, 等. 基于曼哈顿平均距离和余弦相似度的配网单相接地故障定位[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 130-138.
TAO Weiqing, LI Xueting, HUA Yuting, et al. Fault location of single-phase grounding fault based on Manhattan average distance and cosine similarity in distribution network[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(2): 130-138.

[17] MORAIS A P, CARDOSO G, MARIOTTO L, et al. A morphological filtering algorithm for fault detection in transmission lines during power swings[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 122: 10-18.

[18] VALIZADEH M, RAHIMI S, YOUSEFINEZHAD M, et al. Fault detection during asymmetrical power swing in distance relays based on wavelet transform[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2023, 48 (11): 14479-14491.

[19] MAHAMEDI B. A very fast unblocking scheme for distance protection to detect symmetrical faults during power swings[C]//2010 Conference Proceedings IPEC. Singapore. IEEE, 2010: 378-383.

[20] MAHAMEDI B, FLETCHER J E. Setting-free method for detection of asymmetrical faults during power swings [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 181: 106177.

[21] ALSYOUFI Y R, HAJJAR A A. A high-speed algorithm to discriminate between power swing and faults in distance relays based on a fast wavelet[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 172: 269-276.

[22] DAS S, PANIGRAHI B K, JAISWAL P K. Qualitative assessment of power swing for enhancing security of distance relay in a TCSC-compensated line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 223-234.

[23] VALIZADEH M, RAHIMI S, YOUSEFINEZHAD M, et al. Fault detection during asymmetrical power swing in distance relays based on wavelet transform[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2023, 48 (11): 14479-14491.

[24] TAHERI B, HOSSEINI S A, ASKARIAN-ABYANEH H, et al. Power swing detection and blocking of the third zone of distance relays by the combined use of empirical-mode decomposition and Hilbert transform[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(6): 1062-1076.

[25] BISWAL S, BISWAL M. Fault-swing discrimination using Hilbert – Huang transform integrated discrete teager energy operator[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2018, 12(7): 829-837.

[26] 王峰, 黄明辉, 李一泉, 等. 基于改进 Hausdorff 距离算法的发变组大差保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 40-47.
WANG Feng, HUANG Minghui, LI Yiquan, et al. New principle of generator-transformer large differential protection based on improved Hausdorff distance[J]. Power System Protection and Control,2019,47(12):40-47.

[27] 董小瑞, 孙伟, 樊群才, 等. 基于 KLDA-INFLO 的继电保护整定数据异常识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 132-137+149.
DONG Xiaorui, SUN Wei, FAN Quncai, et al. A detection method for anomalies in protection relay setting based on the KLDA-INFLO[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 132-137+149.

[28] ALI EL-SAYED L M, IBRAHIM D K, GILANY M I, et al. Enhancing distance relay performance using wide-area protection for detecting symmetrical/unsymmetrical faults during power swings[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(9): 6869-6886.