

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231292

# 基于相空间重构的中性点非有效接地系统铁磁谐振故障辨识研究

郭成<sup>1</sup>, 陈波<sup>1</sup>, 陈慧<sup>2</sup>, 杨灵睿<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 中国南方电网公司超高压输电公司曲靖局, 云南 曲靖 655000)

**摘要:** 准确辨识铁磁谐振故障是启动微机消谐装置的前提, 而现有时频分析方法提取铁磁谐振过电压信号特征时存在容易误判和相邻频率模态相互混叠的缺点。针对上述问题, 从铁磁谐振过电压时间序列的混沌特征出发, 提出了基于相空间重构的中性点非有效接地系统铁磁谐振故障辨识方法。首先利用 C-C 法计算相空间重构的特征参数(嵌入维数、延迟时间), 然后通过相空间重构技术将过电压时间序列引入到高维空间, 分析重构吸引子相平面轨迹的属性特征(关联维数、点分布因数)和几何特征(矢径偏移、中心距), 并揭示了不同铁磁谐振类型重构相平面轨迹特征。最后, 引入  $K$  值作为 4 种特征量变化规律的特征参数, 结合特征量变化规律给出不同类型铁磁谐振的参考  $K$  值, 以此作为谐振判据进而辨识谐振类型。通过仿真分析和云南某 10 kV 配电系统发生的铁磁谐振实例验证了所提方法的可行性。

**关键词:** 铁磁谐振; 相空间重构; 相平面; 属性特征; 几何特征

## Identification of ferromagnetic resonance fault in non-effectively grounded neutral system based on phase space reconstruction

GUO Cheng<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, CHEN Hui<sup>2</sup>, YANG Lingrui<sup>1</sup>

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;  
2. Qujing Bureau of CSG EHV Power Transmission Company, Qujing 655000, China)

**Abstract:** Accurate identification of ferroresonance faults is a prerequisite for starting a microcomputer detuning device, but the existing time-frequency analysis methods are prone to misjudgment and mutual aliasing of adjacent frequency modes when extracting the characteristics of ferroresonance overvoltage signals. To solve the above problems, based on the chaotic characteristics of ferroresonance overvoltage time series, this paper presents a method for fault identification of ferromagnetic resonance in non-effectively grounded neutral systems based on phase space reconstruction. First, the characteristic parameters (embedding dimension and delay time) of phase space reconstruction are calculated by C-C method. Then, the overvoltage time series is introduced into the high dimensional space by phase space reconstruction technology to analyze the attribute features (correlation dimension and phase point distribution coefficient) and geometric features (radius vector offset and center distance) of the reconstructed attractor phase plane trajectory. The characteristics of reconstructed phase plane trajectory of different ferroresonance types are revealed. Finally, the  $K$  value is introduced as the characteristic parameter of change law of four kinds of characteristic value, and the reference  $K$  value of different types of ferromagnetic resonance is given in combination with the characteristic change law, which is used as the resonance criterion to identify the resonance type. The feasibility of the proposed method is verified by simulation analysis and a real ferromagnetic resonance case in a 10 kV distribution system in Yunnan province.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52367002).

**Key words:** ferromagnetic resonance; phase space reconstruction; phase plane; attribute feature; geometric feature

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52367002); 云南省联合基金重点项目资助(202201BE070001-15)

### 0 引言

铁磁谐振是中性点非有效接地系统中较为常见的一种非线性故障，受电磁式电压互感器(potential transformer, PT)的励磁特性、线路对地电容和中性点接地方式等多种因素的共同影响<sup>[1-3]</sup>。铁磁谐振的发生并非具有偶然性，而是由于系统受到诸如单相接地故障消失、空载线路合闸等扰动后，PT发生了磁饱和，导致励磁感抗急剧下降，恰好与对地电容发生参数匹配时，就会引发铁磁谐振，进而出现谐振过电压。微机消谐装置未正常投入时，持续的谐振过电压会严重威胁配电网的安全稳定运行<sup>[4]</sup>。因此，对铁磁谐振故障的快速、准确辨识，可有效避免微机消谐装置不动作或误动作事件的发生<sup>[5-6]</sup>。

为有效辨识铁磁谐振，国内外专家学者进行了大量研究。文献[7]运用多重分形理论和多重分形谱的小波局部极大模值进行谐振辨识，该方法可以很好地反映铁磁谐振过电压信号的几何结构特征，但在波形畸变严重时该方法容易出现误判。文献[8]运用同步压缩小波变换和相关系数法提取信号主模态，再进行 Hilbert 变换获取信号频域特征，以实现谐振辨识。该方法可精确分离复杂信号中的固有模态，但面对多频时变信号时存在端点效应，辨识结果的准确性不足。文献[9]基于铁磁谐振零序电压能量集中频带的差异，使用重心频带作为特征量，以识别不同类型谐振。该方法改善了传统时频分析方法提取信号频域特征时，存在端点效应和模态混叠的问题，但不同谐振重心频带阈值范围的整定还不够完善，容易造成误判。文献[10]通过对铁磁谐振前后电压变化特征的分析，利用小波变换提取电压第一层低频能量值、小波能量比值等特征差异量，进行配电网故障类型和铁磁谐振辨识。该方法适用范围较广，但小波变换对非平稳时变信号的分析精度不高，并且受铁磁谐振非线性方程难以获取谐振回路解析解的限制，能量阈值整定困难。文献[11]通过分段线性化获取时域状态方程的解析解，并提出基于相电流均值包络线和相电压频谱特征共同辨识的方法。该方案可有效区分弧光高阻接地故障和工频铁磁谐振，但故障持续时间小于检测窗长时会导致算法失效。文献[12]利用核主成分分析和 S 变换提取铁磁谐振过电压信号的特征量，并结合支持向量机进行铁磁谐振分类辨识。该方法对非线性分类问题具有较强的适应性，但辨识过程需要大量时间进行数据集训练以及参数调整，故辨识速率较低。综上，现有的时频分析方法在提取铁磁谐振过电压信号特征时存在容易误判、能量阈值设定困难、相

邻频率模态相互混叠和辨识速率较低等缺点。

针对上述问题，本文通过分析铁磁谐振电压时间序列的混沌特征，提出了基于相空间重构的中性点非有效接地系统铁磁谐振辨识方法。首先，利用 C-C 法计算相空间重构的特征参数(嵌入维数、延迟时间)，然后通过相空间重构将电压时间序列引入到高维空间，其次，分析相平面吸引子运动轨迹的属性特征和几何特征，即分别提取关联维数、点分布因数、中心距、矢径偏移 4 种特征量在系统正常状态和铁磁谐振发生时混沌特性的变化规律，最后引入  $K$  值作为 4 种特征量变化规律的特征参数，结合特征量变化规律给出不同类型铁磁谐振的参考  $K$  值，以此作为谐振判据进而有效辨识谐振类型。通过仿真分析和实例验证，证明了所提方法的可行性。

### 1 铁磁谐振原理

现行电力系统中包含许多感性和容性元件；当系统正常运行时，电感和电容不会出现参数匹配，而当系统出现非同期合闸、单相接地故障消失等激发工况时，系统原本的正常运行状态被破坏，电感电容参数可能发生匹配现象，进而引起铁磁谐振过电压<sup>[13-15]</sup>。单相接地故障消失激发铁磁谐振的原理如图 1 所示。

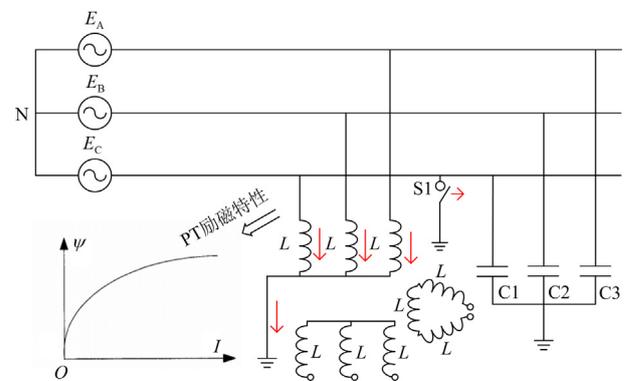


图 1 单相接地故障消失激发铁磁谐振的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of ferromagnetic resonance induced by single-phase ground fault disappearance

如图 1 所示，中性点非有效接地系统为监测母线电压，通常装有接地的电磁式电压互感器 PT，此时系统对地的唯一通道就是 PT 一次绕组的接地点，且由于 PT 的非线性特性，当开关 S1 打开即单相接地故障消失后，非故障相 A、B 在故障期间存储的大量电荷只能通过 PT 一次绕组接地点释放，其流向如图中 1 红色箭头所示，瞬间的涌流使得 PT 磁饱和，励磁阻抗  $\omega L$  骤降，与对地电容参数  $\frac{1}{\omega C}$  匹

配时, 就激发了铁磁谐振; 由于磁饱和程度不同, 非线性振荡回路的自振角频率也会发生变化, 对同一个回路, 可能发生基频谐振、分频谐振、高频谐振<sup>[16-17]</sup>。

## 2 相空间重构原理及铁磁谐振辨识

### 2.1 相空间重构

混沌动力学系统的轨道演化特性是由所有状态变量共同决定的, 而轨道演化特性在一维的空间中难以完整地表现出来, 因此, 为更好地刻画运动点的演化信息, 需要将一维时间序列映射到多维相空间中。对于一维时间序列  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , 通过坐标延迟重构法, 可以将该时间序列扩展到一个  $m$  维的相空间中, 重构后的矩阵可表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_{1+\tau} & \cdots & x_{1+(m-1)\tau} \\ x_2 & x_{2+\tau} & \cdots & x_{2+(m-1)\tau} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_M & x_{M+\tau} & \cdots & x_{M+(m-1)\tau} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为时间延迟参数;  $m$  为嵌入维数;  $M$  为重构后相空间中的点数。

其中时间延迟参数  $\tau$  和嵌入维数  $m$  的选取对相空间重构的结果有很大影响,  $\tau$  太小会导致重构序列数值十分接近, 从而不易相互区分; 反之,  $\tau$  太大会使得重构相空间中的变量特征信息被压缩, 导致变量之间关联性减弱。而  $m$  过大会降低计算速度,  $m$  过小则无法显现出时间序列的隐藏特性, 因此, 需要合适的方法来确定最优时间延迟参数和嵌入维数<sup>[18]</sup>。

本研究采用抗噪能力较强的 C-C 法确定相空间重构参数<sup>[19-20]</sup>; C-C 法原理是固定时间延时窗口, 然后利用关联积分求取嵌入维数和时间延时参数。假设  $X_i$  为重构相空间中的点, 则时间序列关联积分可表示为

$$C(m, N, r, t) = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq M} \theta(r - d_{ij}) \quad (2)$$

式中:  $r$  为半径,  $r > 0$ ;  $t$  为时延;  $d_{ij} = \|X_i - X_j\|_\infty$ ;  $\theta(x)$  为阶跃函数,  $x < 0$  时,  $\theta(x) = 0$ ,  $x \geq 0$  时,  $\theta(x) = 1$ ;  $N$  为采样点数,  $N = M + (m-1)\tau$ 。

关联积分物理意义上表示相空间中任意两点间距离小于  $r$  的概率, 两点间的距离用矢量差的无穷范数表示, 定义检验量

$$S_1(m, N, r, t) = C(m, N, r, t) - C^m(1, N, r, t) \quad (3)$$

式中,  $C^m$  表示  $N = M$  时对应的关联积分。

式(3)将时间序列  $x = \{x_i | i = 1, 2, \dots, N\}$  分解为  $t$  个互不交叉的子序列。

式(3)检验量采用分块平均策略, 即

$$S_2(m, N, r, t) = \frac{1}{t} \sum_{s=1}^t [C_s(m, N/t, r, t) - C_s^m(1, N/t, r, t)]$$

式中:  $C_s$  表示子块  $s$  的关联积分;  $C_s^m$  表示子块  $s$  在  $N/t = M$  情况下的关联积分。

当  $N$  趋于无穷时,

$$S_2(m, r, t) = \frac{1}{t} \sum_{s=1}^t [C_s(m, r, t) - C_s^m(1, r, t)] \quad (4)$$

定义差量

$$\Delta S_2(m, t) = \max \{S_2(m, r_j, t)\} - \min \{S_2(m, r_j, t)\} \quad (5)$$

式中,  $r_j$  表示重构相空间中第  $j$  对相点的半径。

由于有限长电压时间序列各元素间存在相关性,  $S_2(m, r, t)$  通常不为零, 且  $S_2(m, r, t) \sim t$  可表示时间序列的自相关特性。C-C 法主要通过计算  $\bar{S}(t)$ 、 $\Delta \bar{S}(t)$ 、 $S_{\text{cor}}(t)$  三者的值, 得到延迟时间和嵌入维数, 其中  $\bar{S}(t)$  表示检验量均值,  $\Delta \bar{S}(t)$  表示差量均值,  $S_{\text{cor}}(t)$  表示检验量均值与差量均值绝对值之和; 选取  $m = 2, 3, 4, 5$ ,  $r_j = j\sigma/2$ ,  $\sigma$  为时间序列的标准差,  $j = 1, 2, 3, 4$ , 公式如式(6)~式(8)所示。

$$\bar{S}(t) = \frac{1}{16} \sum_{m=2}^5 \sum_{j=1}^4 S_2(m, r_j, t) \quad (6)$$

$$\Delta \bar{S}(t) = \frac{1}{4} \sum_{m=2}^5 \Delta S_2(m, t) \quad (7)$$

$$S_{\text{cor}}(t) = \Delta \bar{S}(t) + |\bar{S}(t)| \quad (8)$$

其中时间延时参数  $\tau$  为  $\Delta \bar{S}(t)$  中第一个局部极小值, 时间窗口  $\tau_w$  为  $S_{\text{cor}}(t)$  的最小值, 依据公式  $\tau_w = (m-1)\tau$  即可求出最佳嵌入维数  $m$ 。

由于不同类型铁磁谐振时间序列混沌特征的差异, 引入高维空间后其重构相平面轨迹必然存在区别。为揭示铁磁谐振前后电压时间序列重构相平面吸引子轨迹的变化规律, 本文引入关联维数、点分布因数、中心距和矢径偏移 4 种特征量作为相平面吸引子轨迹变化规律的衡量指标, 同时引入  $K$  值作为 4 种特征量变化规律的特征参数, 结合特征量变化规律给出不同类型铁磁谐振的参考  $K$  值, 以此作为谐振判据进而有效辨识谐振类型<sup>[21-22]</sup>。综上, 基于相空间重构的铁磁谐振故障辨识流程如图 2 所示。

### 2.2 铁磁谐振辨识

为验证所提方法的可行性, 本文仿真数据来自于 ATP-EMTP 中所搭建的 110/35 kV 配电系统仿真模型, PT 励磁采用 JDJJ2-35 型参数, 低频非线性、分频、基频、高频谐振对地电容参数依次为 0.9  $\mu\text{F}$ 、0.02  $\mu\text{F}$ 、0.005  $\mu\text{F}$ 、0.0008  $\mu\text{F}$ , 故障起止时间除基

频谐振为 0.03~0.2 s，其余均为 0.065~0.27 s。激发方式为配电网发生概率较高的单相接地短路，不同类型铁磁谐振过电压时间序列的波形如图 3 所示。

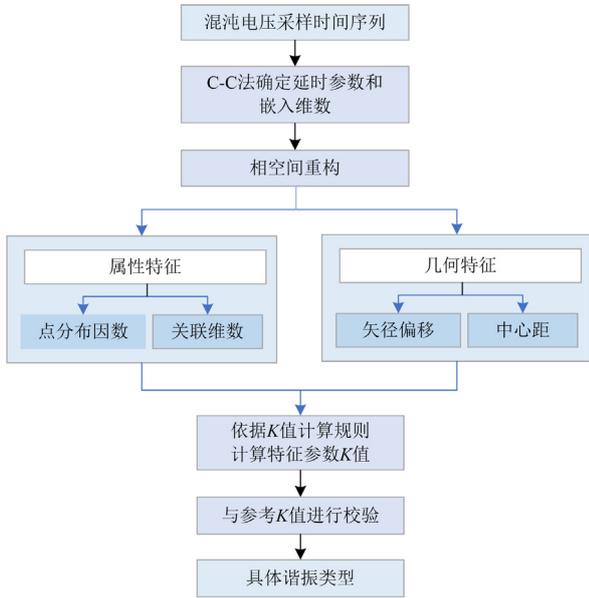
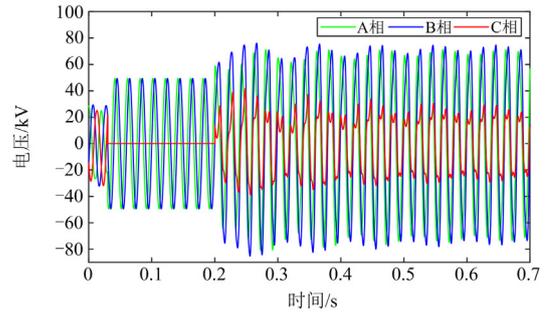
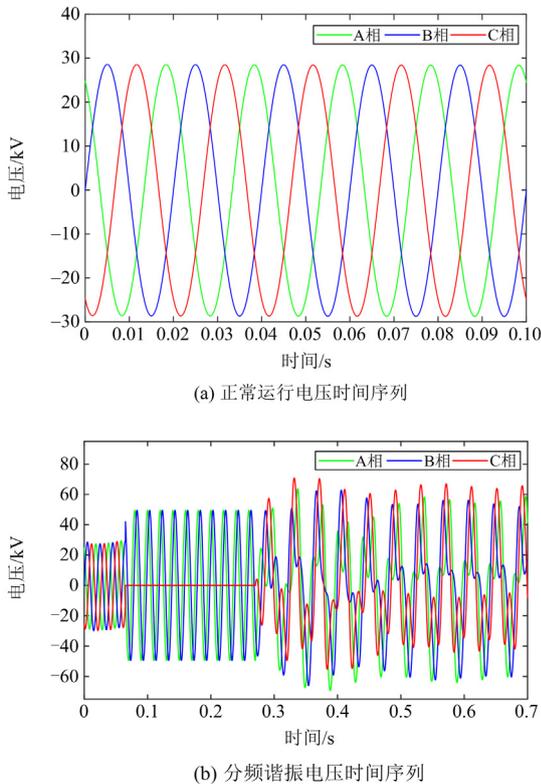


图 2 铁磁谐振故障辨识流程

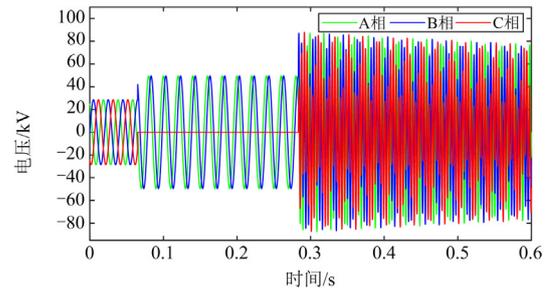
Fig. 2 Identification process of ferromagnetic resonance

### 2.2.1 铁磁谐振过电压时间序列

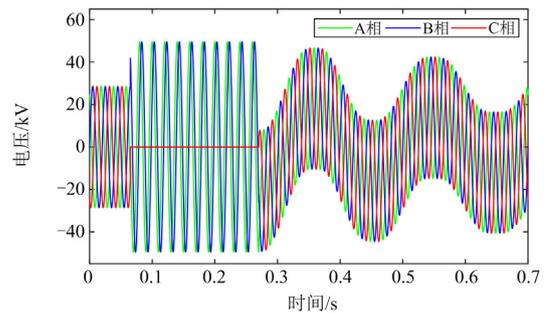
通过对图 3 的分析可知，在铁磁谐振发生后，不同类型谐振时间序列在确定尺度上呈现某一确定



(c) 基频谐振电压时间序列



(d) 高频谐振电压时间序列



(e) 低频非线性谐振电压时间序列

图 3 铁磁谐振过电压时间序列

Fig. 3 Ferromagnetic resonance overvoltage time series

的混沌特性。为此本文将铁磁谐振过电压时间序列通过相空间重构引入到高维空间，剖析其重构吸引子相平面轨迹运动特征，进而分析其运动规律。

### 2.2.2 相空间重构

选取上述采集到的不同类型铁磁谐振过电压信号特征相周期序列进行相空间重构，做相平面二维重构吸引子轨迹图，其与正常状态时相平面轨迹的对比结果如图 4 所示。

通过分析相空间重构吸引子轨迹可以发现不同类型的铁磁谐振存在如下规律：

- (1) 正常运行的电压时间序列相平面运动轨迹呈规则的椭圆结构，且整体关于原点对称分布；
- (2) 发生基频谐振时，相平面运动轨迹呈苇叶结构，两端和中部出现不同程度的收缩；

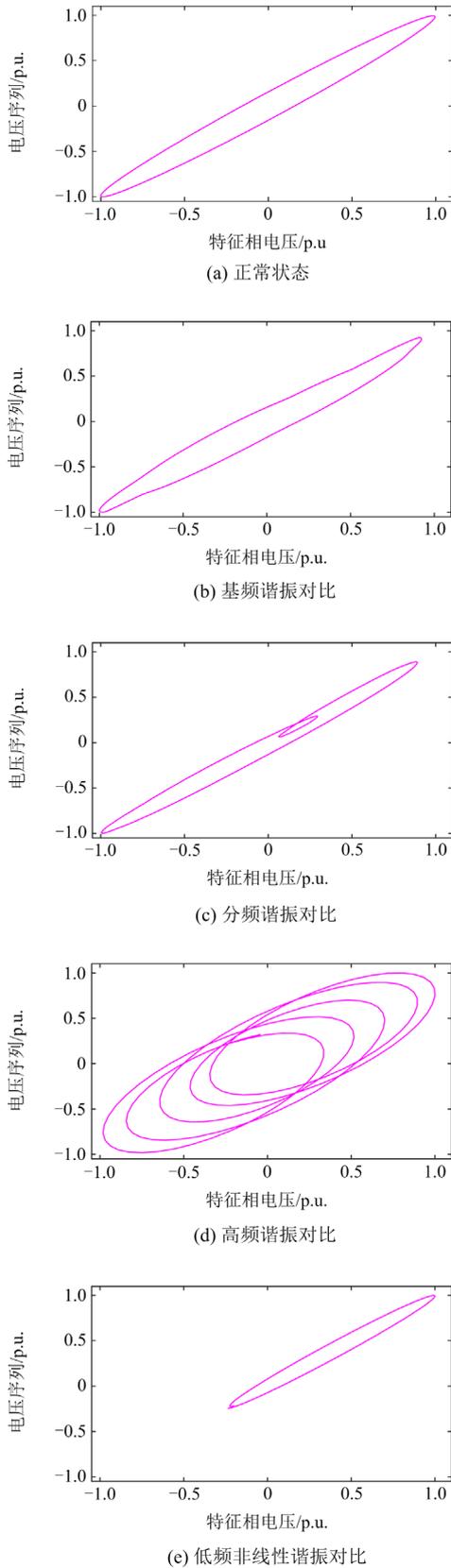


图4 相空间重构相平面轨迹图

Fig. 4 Phase space reconstruction phase plane trajectory

(3) 发生分频谐振时, 由于电压信号在一个周期内存在两个波峰, 故而重构相平面轨迹呈现一大一小椭圆圆内相切的几何构型, 且中间部分略显收缩;

(4) 发生高频谐振时, 在同样的采样周期下, 重构相平面轨迹呈多闭合圆相交的几何构型, 单个圆较正常状态时对主对角线的偏移更大, 且不再关于原点对称分布;

(5) 发生低频非线性谐振时, 相平面运动轨迹呈椭圆或非闭合状的几何构型, 整体结构不再关于原点对称分布, 并偏向某一象限方向。

上述分析表明, 正常电压时间序列重构相平面轨迹呈现规则的几何构型, 而不同类型的铁磁谐振电压时间序列重构相平面轨迹有着各不相同的几何构型。为了更好地表征铁磁谐振发生后的重构吸引子轨迹特征, 本文通过分析重构相平面吸引子轨迹在铁磁谐振前后属性特征和几何特征的变化规律, 并引入  $K$  值作为 4 种特征量变化规律的特征参数, 结合特征量变化规律给出不同类型铁磁谐振的参考  $K$  值, 以此作为判据进行铁磁谐振故障的辨识。具体实现过程和要求如下所述。

### 2.3 相平面吸引子的属性特征

关联维数类属于分形维数, 是非线性学科领域的重要分支, 分形与系统的混沌运动密切相关; 分形维数包括盒子维数、容积维数、信息维数等, 相比于其他, 关联维数计算简单且可以较好地反映系统吸引子的不均匀度<sup>[23-24]</sup>。点分布因数(phase point distribution coefficient, PPDC)是一种求取相空间中选定区域内点和相轨图中所有相点之间平均几何距离的方法, 该方法可以反映相点在相空间内的分布特征, 当时间序列相对稳定时, 点分布因数保持恒定; 一旦时间序列出现混沌状态, 点分布因数将依据混沌状态类型发生不同程度的特征变化。

#### 2.3.1 点分布因数

在相空间重构后的多维空间中选取坐标  $(\bar{y}, \bar{y}, \bar{y}, \bar{y})$  作为超球的球心  $R_c$ , 其中

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n) \quad (9)$$

式中:  $\bar{y}$  为采样时间序列的均值;  $y(n)$  表示第  $n$  个采样值; 相空间中吸引子的半径定义为

$$R_a = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (y(n) - \bar{y})^2} \quad (10)$$

为表征相轨图中的点与相空间区域的平均几何距离, 在相空间区域中均匀选取  $L$  个点, 若  $m$  维超球面上的点的直角坐标系为  $(y_1, y_2, \dots, y_m)$ , 超球体半径为  $r_c$ , 角坐标为  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{m-1})$ , 则直角坐

标和空间坐标的变换公式为

$$\begin{cases} y_1 = r_c \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cdots \sin \alpha_{m-2} \sin \alpha_{m-1} \\ y_2 = r_c \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 \cdots \sin \alpha_{m-2} \sin \alpha_{m-1} \\ \vdots \\ y_{m-1} = r_c \cos \alpha_{m-2} \sin \alpha_{m-1} \\ y_m = r_c \cos \alpha_{m-1} \end{cases} \quad (11)$$

相空间中所有相点与区域内点的平均几何距离  $R_m$  可以表征相轨图中所有相点对于吸引子的分布特性, 其计算公式为

$$R_m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i(n) - y_i(l))^2} \right\} \quad (12)$$

相点分布因数  $P_{PPDC}$  定义为平均几何距离  $R_m$  和吸引子半径  $R_a$  的比值, 如式(13)所示。

$$P_{PPDC} = R_m / R_a \quad (13)$$

### 2.3.2 关联维数

若相空间重构后的一对相点为

$$\begin{cases} X_i = \{x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}\} \\ X_j = \{x_j, x_{j+\tau}, \dots, x_{j+(m-1)\tau}\} \end{cases} \quad (14)$$

两个相点之间的欧氏距离表示为  $r_{ij}(m)$ , 即

$$r_{ij}(m) = \|X_i - X_j\| \quad (15)$$

假设临界距离为  $r_b$ , 定义距离小于  $r_b$  的向量对在所有向量对中所占的比例为关联积分  $C_m(r_b)$ , 具体表示为

$$C_m(r_b) = \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i,j=1}^M \theta(r_b - r_{ij}) \quad (16)$$

$C_m(r_b)$  遵循幂指数规律, 即  $C_m(r_b) = r_b^{D(m)}$ , 其中  $D(m)$  表示关联维度。

$$D(m) = \lim_{r_b \rightarrow 0} \frac{\ln C_m(r_b)}{\ln(r_b)} \quad (17)$$

采用上述属性特征衡量方法, 对铁磁谐振过电压时间序列重构相平面的属性特征进行分析, 分别提取了正常运行时 3 个周期和谐振发生后 4 个周期的属性特征, 分析结果如图 5、图 6 所示, 本例中分频谐振标识为 FP, 基频谐振标识为 JP, 高频谐振标识为 GP, 低频非线性谐振标识为 FXX。

由图 5 和图 6 可知, 点分布因数和关联维数在系统正常运行时, 其值维持在一个恒定值附近, 几乎没有波动; 而当铁磁谐振发生后, 因为相平面吸引子轨迹特征的差异, 点分布因数和关联维数或大或小均发生了明显的变化, 且不同类型谐振变化趋势不同; 基频谐振时点分布因数并未出现较大偏移,

而关联维数相较于正常状态时出现跳跃式的增长; 分频谐振和基频谐振无论是点分布因数还是关联维数均出现不同程度的下降, 严重偏离了正常值; 低频非线性谐振时, 点分布因数向下偏移最大, 关联维数无明显偏移。以上特征量变化规律可以作为谐振辨识的判据, 但仅依靠属性特征尚无法判别具体的谐振类型。

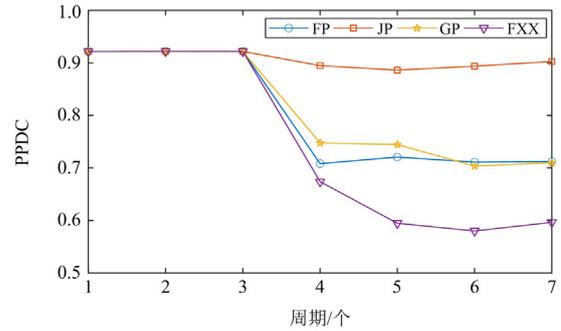


图 5 点分布因数对比图

Fig. 5 Comparison diagram of PPDC

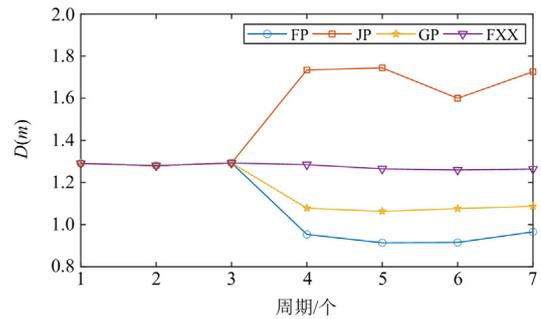


图 6 关联维数对比图

Fig. 6 Comparison diagram of correlation dimension

### 2.4 相平面吸引子的几何特征

由相平面吸引子轨迹可知, 谐振后吸引子轨迹不再关于原点对称分布, 且不同类型谐振存在不同的几何构型。下面以中心距  $H$  即相平面中各矢量点到原点的距离和来表征吸引子的几何特征, 具体表达式为

$$H = \sum_{i=1}^M \sqrt{x_i^2 + (x_{i+\tau})^2} \quad (18)$$

式中,  $(x_i, x_{i+\tau})$  为状态点坐标。

此外, 在正常运行以及不同谐振状态时, 相空间吸引子轨迹的结构均为主对角线方向上的不同几何构型; 相空间中各相点之间的关联性强弱可以通过吸引子在相空间分布上对主对角线方向的聚集程度来反映。因此, 吸引子在对角线方向上的延展性可以通过矢径偏移来表示。利用这一几何特征, 可以

方便地对混沌时间序列的不同变化规律进行表示<sup>[25]</sup>。矢径偏移 $\lambda$ 的计算公式为

$$\lambda = \frac{1}{M} \times \sum_{i=1}^M r_i \sin \delta_i = \frac{1}{M} \times \sum_{i=1}^M \frac{\|x_i\| - \|x_{i+\tau}\|}{\sqrt{2}} \quad (19)$$

式中： $r_i$ 为状态点的矢径； $\delta_i$ 为主对角线与状态矢量的夹角。

利用上述提到的几何特征衡量方法，对上述铁磁谐振过电压时间序列重构相平面的几何特征进行分析，分别提取了正常运行时3个周期和谐振发生后4个周期的属性特征，分析结果如图7和图8所示。

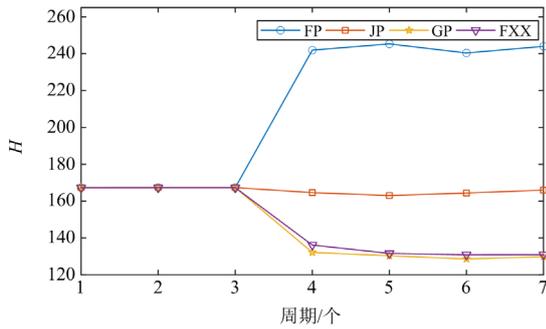


图7 中心距对比图

Fig. 7 Comparison diagram of center distance

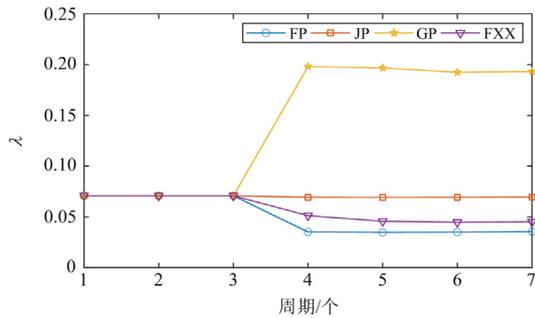


图8 矢径偏移对比图

Fig. 8 Comparison diagram of vector deviation

由图7、图8可知，由于基频谐振时相平面吸引子轨迹较正常运行时仅出现局部收缩的几何构型，故中心距和矢径偏移两种特征量相较于基准并无较大的波动，近似保持在原有的正常值水平。分频谐振时，由于相平面轨迹中内切圆的存在，中心距显著增大，矢径偏移则呈现减小的趋势。高频谐振时由于重构相平面轨迹在对角线上向两端偏移较大且不关于原点对称，故矢径偏移显著增大，而中心距则呈现减小的趋势。低频非线性谐振时，由于吸引子轨迹在相平面对角线上的不对称分布，中心距和矢径偏移均呈现减小的趋势。

通过对点分布因数、关联维数、中心距、矢径

偏移4种特征量的分析，可以发现不同类型谐振发生后，其几何特征和属性特征均出现不同规律的变化，同时也反映出不同类型谐振混沌特性的差异。为将谐振的判别指标化，而不是局限于特征量变化的图形趋势，本文引入4位K值作为不同类型谐振判别的依据。4位K值分别对应着相平面吸引子的4个特征量，即点分布因数、关联维数、中心距和矢径偏移。K值设置规则为：当特征量相较于正常状态出现 $\pm 10\%$ 以内偏差时值为1；当特征量偏移超过10%时值为2，最后当特征量偏移低于 $-10\%$ 时值为0，K值设置示意如图9所示。

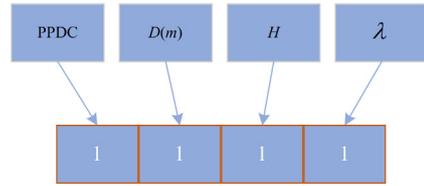


图9 K值设置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of K value setting

将上述4种特征量在铁磁谐振前后的变化规律按照上述规则转换为K值，用于指标化重构相平面吸引子轨迹混沌特征进而判别谐振类型。表1中给出了提取自重构相平面轨迹特征量变化规律的参考K值。由表1可知，谐振发生后由于重构相平面轨迹4种特征量变化规律的差异，分频、基频、高频、低频非线性谐振的K值分别为0020、1211、0002、0100。

表1 不同类型谐振参考K值

Table 1 Reference K values of different types of resonance

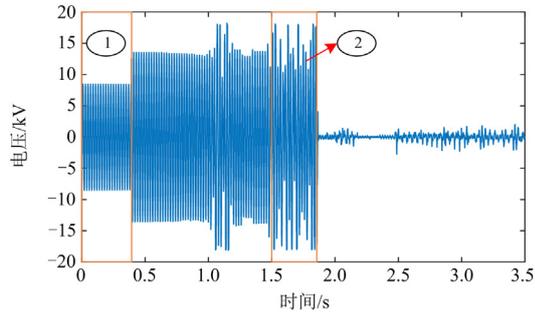
谐振类型	K值
正常	—
分频	0020
基频	1211
高频	0002
低频非线性	0100

本文通过对铁磁谐振过电压时间序列相空间重构后相平面吸引子轨迹特征变化规律的总结，依据点分布因数、关联维数、中心距和矢径偏移4个特征量在铁磁谐振前后的变化规律，给出了参考值，并以此判断具体谐振类型。与传统时频分析方法快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)和近些年兴起的支持向量机、随机森林等分类器模型相比，本文所提方法不会出现容易误判和相邻频率模态相互混叠的问题，同时辨识过程不需要大量时间进行数据集训练以及参数调整，大大缩短了谐振辨识的时间。为验证本文所提方法在实际运用中的准确性，

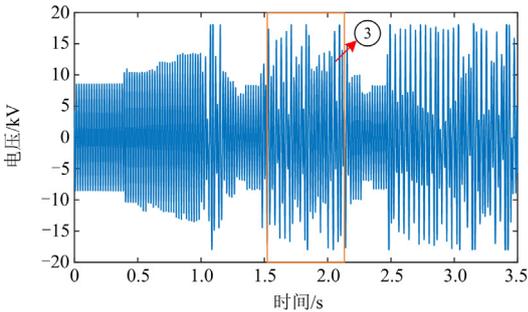
下面用云南电网某配电系统的铁磁谐振故障录波数据进行实用性校验。

### 3 实测数据辨识验证

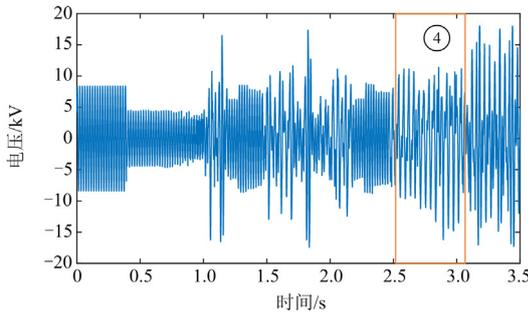
2022 年 6 月,云南电网某 10 kV 配电系统发生了一起由于单相接地故障消失激发的铁磁谐振事件,并导致了 A 相高压熔断器的熔断。事件的故障录波数据如图 10 所示,0~0.4 s 时系统处于正常运行阶段;0.4~1.1 s 系统发生单相接地故障,表现为 A、B 相电压升高而 C 相(故障相)电压降低;1.1 s 单相接地故障消失以后系统发生了铁磁谐振。



(a) A相故障录波数据



(b) B相故障录波数据



(c) C相故障录波数据

图 10 实测铁磁谐振故障录波图

Fig. 10 Recorded wave chart of ferroresonance fault measured

首先采用 FFT 分析故障特征,然后采用本文提出的相空间重构方法进行对比验证,图中依次选取 A、B、C 三相中的 4 个典型故障区间进行分析验证。

利用 FFT 对图 10 中 4 个实测时间序列进行分析,获取时间序列的频率以及幅值信息进行谐振辨识,FFT 分析结果如表 2 所示。

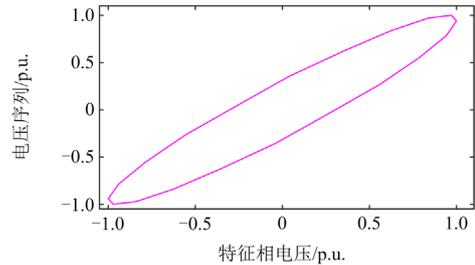
表 2 FFT 分析结果

Table 2 Results of the FFT analysis

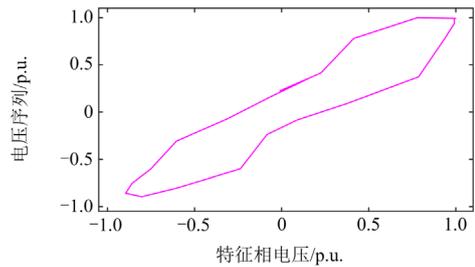
时间序列	幅值/kV	频率/Hz	谐振类型
1	8.37	49.98	正常
2	13.20	49.98	—
3	10.49	49.98	—
4	6.45	24.90	分频

由表 2 可以看出,由于幅值和频率的特征差异,FFT 可以准确辨识时间序列 1 和 4 的谐振状态。而由于基频谐振时的故障特征与系统发生单相接地故障时故障特征相似,仅从频率和幅值上无法有效区分基频谐振和单相接地短路,故 FFT 无法确定时间序列 2、3 的谐振状态。

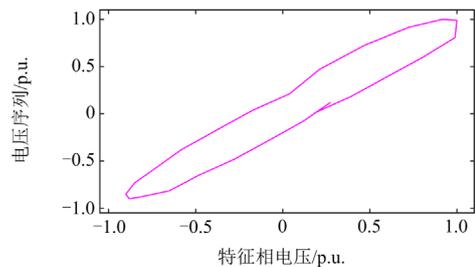
采用本文提出的基于相空间重构的中性点非有效接地系统铁磁谐振辨识方法,通过对时间序列特征周期进行相空间重构,并将其引入到高维空间,相空间重构相平面轨迹如图 11 所示。



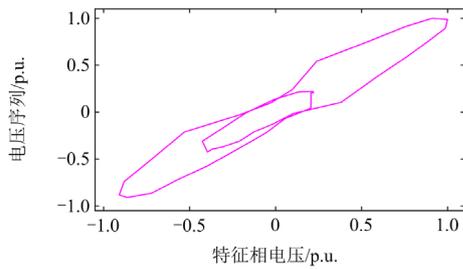
(a) 实测时间序列 1 相平面轨迹



(b) 实测时间序列 2 相平面轨迹



(c) 实测时间序列 3 相平面轨迹



(d) 实测时间序列4相平面轨迹

图 11 实测数据相空间重构相平面轨迹图

Fig. 11 Reconstructed phase plane trajectory diagram of the measured data phase space

由实测时间序列相空间重构吸引子轨迹可以看出, 对于实测时间序列 1 的相平面运动轨迹呈规则的椭圆构型, 且整体关于原点对称分布; 实测时间序列 2、3 的相平面吸引子运动轨迹呈现不规则的闭合圆, 两端和中部有不同程度的收缩, 整体几何构型与仿真数据的基频谐振相平面轨迹图接近; 实测时间序列 4 的相平面吸引子运动轨迹呈现一大一小闭合圆, 圆内相切的几何构型。综上, 实测数据相平面吸引子轨迹与仿真数据提出的不同谐振类型重构相平面轨迹变化规律相同, 进一步验证了本文所提基于重构相平面轨迹特征提取算法的可行性。对相平面吸引子轨迹的 4 个特征量(点分布因数 PPDC、关联维数  $D(m)$ 、矢径偏移  $H$ 、中心距  $\lambda$ )和  $K$  值进行计算, 最终结果如表 3 所示。

表 3 实测数据辨识结果

Table 3 Identification results of measured data

时间序列	PPDC	$D(m)$	$H$	$\lambda$	$K$ 值	谐振类型
1	0.9475	1.0007	81.54	0.1358	—	正常
2	0.8773	1.2078	83.72	0.1262	1211	基频
3	0.9054	1.4233	87.00	0.1233	1211	基频
4	0.7296	0.8043	121.5	0.0870	0020	分频

分析表 3 结果可知, 算例依据实测数据 4 种特征量变化规律所辨识的谐振类型与仿真实验中所提出的谐振判据一致; 同时本文所提算法准确辨识出了 FFT 无法辨识的实测时间序列 2 和 3, 有效避免了虚幻接地事件的发生。并且算法在辨识过程中仅提取一个谐振周期电压时间序列进行谐振辨识, 过程中不需要使用支持向量机、随机森林等分类器模型, 减少了数据集训练以及参数调整的时间, 大大缩短了故障判别的时间。

结合上述实测数据的分析验证可知, 本文所提算法不仅解决了现有时频分析方法提取铁磁谐振过电压信号混沌特征时存在容易误判的问题, 而且辨

识方法简单易行, 可在 1~2 个工频周期内完成谐振辨识。因此该文所提算法在微机消谐装置启动判据领域满足速动性和可靠性的要求。

## 4 结论

本文为了提取铁磁谐振过电压时间序列的混沌特征, 通过相空间重构方法将过电压信号引入高维空间, 分析其相平面重构吸引子轨迹的属性特征和几何特征, 并结合点分布因数、关联维数、矢径偏移、中心距 4 种特征量在系统正常状态和谐振时混沌特性的变化规律, 引入 4 位  $K$  值作为具体谐振类型的衡量指标, 通过仿真分析和实例验证得出如下结论。

1) 通过对重构相平面轨迹 4 种特征量的提取, 发现铁磁谐振发生后, 特征量呈现不同的变化规律。依据其变化规律引入  $K$  值作为相平面轨迹变化趋势的特征参数, 通过仿真分析得到分频、基频、高频、低频非线性谐振的参考  $K$  值分别为 0020、1211、0002、0100, 与参考  $K$  值进行校验便可准确辨识具体的谐振类型。

2) 通过对实测数据的分析验证, 表明传统时频分析方法 FFT 对于非工频谐振具有较好的辨识作用, 而对于与单相接地短路故障特征相似的基频谐振, 易造成虚幻接地现象。本文方法提取的是铁磁谐振时的混沌特征, 不会受到单相接地短路的干扰, 既能准确辨识不同铁磁谐振类型, 又避免了由虚幻接地现象造成的选线装置误动。

3) 本文所提方法揭示了不同类型铁磁谐振重构相平面吸引子的轨迹特征, 并结合其特征变化规律引入参考  $K$  值作为谐振辨识判据, 辨识过程不需要使用支持向量机、随机森林等分类器模型, 减少了数据集训练以及参数调整的时间, 大大缩短了故障判别的时间, 对提高微机消谐装置的快速可靠动作具有积极的促进意义。

由于铁磁谐振过电压信号具有周期性特征, 故本文所提方法需要提取一个谐振周期时间序列进行谐振辨识, 为确保数据可以充分表征铁磁谐振的混沌特性, 要求输入时间序列的采样频率大于 5 kHz。同时本文研究对象、辨识方法和谐振判据主要针对铁磁谐振过电压, 鉴于系统中铁磁谐振过电压和弧光接地过电压类型上的差异性, 算法在实际应用过程中还需要进一步考虑其他过电压工况对谐振辨识结果的影响。

## 参考文献

[1] 齐郑, 李鸿毅. 孤岛模式下的微网多 PT 铁磁谐振的研

- 究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 52-58.  
 QI Zheng, LI Hongyi. Research on multi-PT ferroresonance in island microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 52-58.
- [2] YING Huamei, DENG Changhong, XU Zhenghua, et al. Short-term prediction of wind power based on phase space reconstruction and BiLSTM[J]. Energy Reports, 2023, 9(8): 474-482.
- [3] 魏菊芳, 姚创, 崔涵, 等. 配电网低频非线性振荡引发PT保险熔断的机理及抑制措施[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 155-163.  
 WEI Jufang, YAO Chuang, CUI Han, et al. Mechanism and suppression of PT fuse caused by low-frequency nonlinear oscillation in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 155-163.
- [4] CHAN H L, CHANG H W, HSU W Y, et al. Convolutional neural network for individual identification using phase space reconstruction of electrocardiogram[J]. Sensors, 2023, 23(6): 3164-3164.
- [5] ZHANG Mingming, ZHANG Jia, ANPING H, et al. Dynamic system modeling of a hybrid neural network with phase space reconstruction and a stability identification strategy[J]. Machines, 2022, 10(2): 122-122.
- [6] 杨耿杰, 王康, 高伟. 基于相空间重构和迁移学习的配电网高阻接地故障检测[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 151-162.  
 YANG Gengjie, WANG Kang, GAO Wei. High impedance fault detection in a distribution network based on phase space reconstruction and transfer learning[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 151-162.
- [7] 刘凡, 司马文霞, 孙才新, 等. 多重分形在铁磁谐振过电压信号分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 138-142.  
 LIU Fan, SIMA Wenxia, SUN Caixin, et al. Application of multifractal spectrum to analyze ferroresonance overvoltage signals in neutral grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 138-142.
- [8] 谢家安, 王玉荣. SST在铁磁谐振过电压模式参数辨识中的应用[J]. 广东电力, 2020, 33(4): 82-89.  
 XIE Jiaan, WANG Yurong. Application of SST for extracting model parameters of ferroresonance overvoltage in power system[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(4): 82-89.
- [9] 金涛, 许立彬, 高伟, 等. 一种基于LCD-Hilbert变换和奇异谱熵的配电网暂时过电压类型识别方法[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(11): 26-36.  
 JIN Tao, XU Libin, GAO Wei, et al. Temporary overvoltage classification and recognition method of distribution network based on LCD-Hilbert transform and singular-spectrum entropy[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(11): 26-36.
- [10] 张驰, 张慧芬, 孙刚, 等. 基于电压变化特征的配电网故障类型及铁磁谐振辨识方法[J]. 广东电力, 2022, 35(6): 50-59.  
 ZHANG Chi, ZHANG Huifen, SUN Gang, et al. Identification method of distribution network fault types and ferroresonance base on voltage variation characteristics[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(6): 50-59.
- [11] 张超, 王宾, 张海, 等. 中性点直接接地电网单相串联铁磁谐振检测与类型辨识[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 172-179.  
 ZHANG Chao, WANG Bin, ZHANG Hai, et al. Detection and type identification of single-phase series ferroresonance in neutral point solid grounding power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 172-179.
- [12] MOKRYANI G, SIANO P, PICCOLO A. Identification of ferroresonance based on S-transform and support vector machine[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18(9): 1412-1424.
- [13] 李自强, 魏磊, 韩大鹏, 等. 基于相空间重构的高压断路器机械故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 129-135.  
 LI Ziqiang, WEI Lei, HAN Dapeng, et al. Research on mechanical fault diagnosis of high voltage vacuum circuit breaker based on phase space reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 129-135.
- [14] 王宾, 张超, 丁心志. 中性点直接接地系统单相串联铁磁谐振时域解析分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2124-2133.  
 WANG Bin, ZHANG Chao, DING Xinzhi. Time domain analytical analysis of single-phase series ferromagnetic resonance in neutral point solid grounding power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2124-2133.
- [15] 朱保军, 咸日常, 刘兴华, 等. 35 kV PT爆炸事故及其谐振过电压分析和预防[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 185-191, 197.  
 ZHU Baojun, XIAN Richang, LIU Xinghua, et al. Explosion accident analysis and prevention of resonance overvoltage of 35 kV potential transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 185-191, 197.
- [16] 李玉龙, 杨明, 杨倬, 等. 抑制谐波谐振的并网逆变器机侧电流反馈的CVFAD设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 125-136.  
 LI Yulong, YANG Ming, YANG Zhuo, et al. Design method

- for CVFAD of grid-connected inverter inverter-side current feedback with harmonic resonance suppression[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 51(18): 125-136.
- [17] 何龙, 谭栋, 李勇, 等. 用于铁磁谐振过电压故障辨识的 VMD 参数优化方法研究[J]. *数学的实践与认识*, 2022, 52(9): 102-114.
- HE Long, TAN Dong, LI Yong, et al. Research on data feature extraction method for ferroresonance over-voltage fault identification[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2022, 52(9): 102-114.
- [18] SEBASTIAN R, THOMAS N. Reconstructed phase spaces and LSTM neural network ensemble predictions[J]. *Engineering Proceedings*, 2022, 18(1): 40-44.
- [19] 陆振波, 蔡志明, 姜可宇. 基于改进的 C-C 方法的相空间重构参数选择[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(11): 2527-2782.
- LU Zhenbo, CAI Zhiming, JIANG Keyu. Determination of embedding parameters for phase space reconstruction based on improved C-C method[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(11): 2527- 2782.
- [20] 赵书涛, 李小双, 李大双, 等. 基于相空间重构与 GSA-LVQ 的有载调压变压器分接开关机械故障诊断[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(10): 136-141.
- ZHAO Shutao, LI Xiaoshuang, LI Dashuang, et al. Mechanical fault diagnosis of on-load voltage regulating tap-changer based on CEEMD-phase space reconstruction and GSA-LVQ[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(10): 136-141.
- [21] 郭霖徽, 刘亚东, 王鹏, 等. 基于相空间重构与平均电导特征的配电网单相接地故障辨识[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(7): 192-198.
- GUO Linhui, LIU Yadong, WANG Peng, et al. Single-phase grounding fault recognition in distribution network based on phase-space reconstruction and average conductance characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(7): 192-198.
- [22] 崔芮华, 李泽, 佟德栓. 基于相空间重构和 PCA 的航空电弧故障检测[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(14): 5054-5065.
- CUI Ruihua, LI Ze, TONG Deshuan. Arc fault detection based on phase space reconstruction and principal component analysis in aviation power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(14): 5054-5065.
- [23] 阮江军, 杨秋玉, 黄道春, 等. 高压断路器机械振动信号混沌吸引子形态特性[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(3): 187-193.
- RUAN Jiangjun, YANG Qiuyu, HUANG Daochun, et al. Shape characteristic analysis of chaotic attractor for mechanical vibration signal of high-voltage circuit breaker[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(3): 187-193.
- [24] 侯慧, 王晴, 赵波, 等. 关键信息缺失下基于相空间重构及机器学习的电力负荷预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(4): 75-82.
- HOU Hui, WANG Qing, ZHAO Bo, et al. Power load forecasting without key information based on phase space reconstruction and machine learning[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(4): 75-82.
- [25] 盛健, 银星茜, 邓玮丹, 等. 基于相空间重构技术的断路器振动信号边缘特征提取[J]. *高压电器*, 2022, 5(9): 27-36.
- SHENG Jian, YIN Xingxi, DENG Weidan, et al. Edge feature extraction of circuit breaker vibration signal based on phase space reconstruction[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(9): 27-36.

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2023-11-21

作者简介:

郭成(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事电能质量分析与控制、电力系统稳定性分析、铁磁谐振辨识研究工作。  
E-mail: gc325@126.com

(编辑 周金梅)