

# 基于模糊聚类分析的电能质量 扰动模式识别方法

陈向群<sup>1,2</sup>, 杨茂涛<sup>1,2</sup>, 刘谋海<sup>1,2</sup>, 黄 瑞<sup>1,2</sup>, 余敏琪<sup>1,2</sup>, 王 智<sup>1,2</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司供电服务中心(计量中心), 湖南 长沙 410004;  
2. 智能电气量测与应用技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004)

**摘 要:** 为了提高电能质量扰动识别的准确性, 弥补基于传统单一特征量模式识别方法易受干扰、精度低的缺陷, 提出基于模糊聚类分析的电能质量扰动模式识别方法。该方法利用 HHT 变换从多种不同类型的电能质量扰动信号中提取出相应的扰动特征量, 再将提取的特征量进行模糊聚类分析, 准确地把这些电能质量扰动信号一一归类至光伏扰动与公共电网扰动两大类, 同时建立基于模糊聚类分析的电能质量扰动识别流程。仿真结果表明, 该方法克服了传统单一特征量模式识别方法的局限性, 优化了扰动信号的识别效果, 提高了识别效率, 识别精度高, 抗噪能力强。

**关 键 词:** 电能质量扰动; 希尔伯特—黄变换; 模糊聚类; 模式识别; 电压突变量

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.02.010 中图分类号:TM76 文章编号:1673-9140(2022)02-0079-07

## Disturbance pattern recognition method of power quality based on the fuzzy clustering analysis

CHEN Xiangqun<sup>1,2</sup>, YANG Maotao<sup>1,2</sup>, LIU Mouhai<sup>1,2</sup>, HUANG Rui<sup>1,2</sup>,  
YU Minqi<sup>1,2</sup>, WANG Zhi<sup>1,2</sup>

(1. Power Supply Service Center(Metrology Center), State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China;  
2. Province Key Laboratory of Intelligent Electrical Measurement and Application Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of power quality disturbance recognition and make up for the shortcomings of traditional single feature quantity pattern recognition methods that are easily disturbed and have low precision, a power quality disturbance pattern recognition method based on fuzzy cluster analysis is proposed. The method uses Hilbert-Huang transformation (HHT) to extract corresponding disturbance feature quantities from various types of power quality disturbance signals, and then performs fuzzy clustering analysis on the extracted feature quantities to accurately classify these power quality disturbance signals into photovoltaic disturbances and public grid disturbances one by one. At the same time, a power quality disturbance identification process based on fuzzy cluster analysis is established. Simulation results show that this method overcomes the limitations of the traditional single-feature pattern

recognition method, optimizes the recognition effect of disturbance signals, improves the recognition efficiency, and has high recognition accuracy and strong anti-noise ability.

**Key words:** power quality disturbance; HHT; fuzzy clustering; pattern recognition; voltage mutation

社会工业的不断发展使得电力系统中非线性负载、冲击性和不平衡负载大批量投入电力网络中,这些负荷中含有大量的非平稳信号,极易引发系统出现电能质量扰动问题,如:设备过热、电动机失速、保护不灵敏以及测量精度不准确等都会导致严重后果,这较大程度影响了广大居民的生活品质,甚至将造成巨大的经济财产损失。如今全球大力推行发展绿色节能电力,光伏和风力发电等绿色能源在发电领域所占的比例逐年上升,使得电网中更多地利用到了电力电子设备,导致非平稳信号的产生出现更加多元性,因此,要求更高质量电能的供应。由此可见,对电能质量扰动准确识别的研究具有重要意义,是优化改善电能质量的一大基础<sup>[1]</sup>。电能质量扰动识别主要分为两步。

首先,因电能质量扰动信号多半为非平稳信号,需要对这些扰动信号进行处理,去噪后再提取其特征值,目前有小波变换<sup>[1]</sup>、快速傅里叶变换(fast fourier transformation, FFT)<sup>[2]</sup>、时频原子变换<sup>[3]</sup>、S变换<sup>[4-5]</sup>以及希尔伯特—黄(HILBERT HUANG TRANSFORM, HHT)变换<sup>[6-7]</sup>等特征提取方法。小波变换方法的时频分辨率虽然是变化的,但分辨信号特征的能力不强,且分类器设计较为困难;FFT变换方法的数据窗口宽度恒定,因而其时频分辨率也随之保持不变,因此仅适于平稳信号的处理;S变换方法在分析处理扰动信号方面运用较为广泛,其时频分辨率随时间发生变化,且不敏感于噪声,但对信号频率的追踪效果要求较高,暂态信号的检测结果并不理想;HHT变换方法作为一种适用于非平稳电能扰动信号的时频分析方法,具有优越的信号处理及分析能力,其自适应以及抗噪声能力强,非常适合高频扰动信号的特征提取。

然后,将选取到的特征信息放入模式识别器中对其所表征的电能质量扰动信号进行自主识别。常用模式识别方法有聚类<sup>[8]</sup>、神经网络<sup>[9]</sup>、支持向量机(support vector machine, SVM)<sup>[10]</sup>、专家系统<sup>[11]</sup>以及决策树方法<sup>[12-13]</sup>等。神经网络分析的成效有赖于提供的样本数量;存在的扰动类型较少时 SVM

分类效果优秀,但在扰动过多的情况下,其数据在高维空间的映射可能发生混叠现象,识别的准确率会大幅下降;决策树方法依靠阈值的选择进行扰动识别,受噪声影响大。上述方法虽采用了海量的样本进行分析,排除了特殊情况对模式识别的干扰,但皆只采用单一扰动特征量的变化进行判断,未考虑到不同特征量的适用范围在不同电网结构下可能出现失效的情况,模式识别效果不佳,应用存在较大限制。而聚类方法综合多种扰动特征量进行模式识别,不受单一特征量的局限,识别准确率较高。

为了解决传统的电能质量扰动模式识别方法中仅使用单独一个变量进行识别使得识别错误率较高的难题,提高识别的准确性,本文采取基于模糊聚类分析的电能质量扰动模式识别方法,利用 HHT 变换从多种不同类型的电能质量扰动信号中提取相应的扰动特征量,再将其进行模糊聚类分析,把这些电能质量扰动信号准确归类至光伏与公共电网扰动两大类中,并在 Matlab 仿真环境中搭建模型进行分析。

## 1 基于模糊聚类分析的电能质量扰动模式识别原理

### 1.1 HHT 算法

HHT 变换常用于选取电能质量扰动信号各个特征量,能对系统受到的非线性、非平稳扰动信号进行降噪处理,并提取所需要的扰动特征量,该方法是 EMD、Hilbert 变换 2 个分析方法的统称,先将采集到的各种扰动信号分解成许多固有模态分量(intrinsic mode functions, IMF)之和,获得各信号的局部特征,再变换获得各个 IMF 所对应的瞬时特征量<sup>[14]</sup>。HHT 变换具备较高的时频分辨率,改善了 S 变换方法较难检测暂态信号的问题,且计算简单、快速准确,对各种类型的电能质量扰动信号的特征提取都适用,不受噪声的影响。

EMD 算法:从采集到的电能质量扰动信号中提取出若干固有模态函数(IMF),包含大量的信号局

部特征信息。

假设扰动信号为  $s(t)$ ,对 EMD 进行求解的步骤如下。

1)采集扰动信号  $s(t)$ 的局部极大与极小值,分别绘制该信号的上、下包络线  $v_1(t)$ 、 $v_2(t)$ ,并求出两线的平均值:

$$a(t) = \frac{1}{2}[v_1(t) + v_2(t)] \quad (1)$$

2)将扰动信号  $s(t)$ 与平均值  $a(t)$ 作差,得到:

$$b(t) = s(t) - a(t) \quad (2)$$

3)判断  $b(t)$ 是否满足作为 IMF 所需的条件:①  $b(t)$ 函数极值点数目和过零点数目相等或者最多相差 1;② 作  $b(t)$ 的上、下包络线的平均值,其在任一点处为零。若不满足终止条件,则将  $b(t)$ 作为新的信号  $s(t)$ 重复上述步骤;若满足,则继续步骤 4。

4)设定  $c = b(t)$ , $c$ 即为分解得到的一个 IMF 分量,继续作差得到:

$$h(t) = s(t) - c \quad (3)$$

5)判断  $h(t)$ 是否满足终止条件,若不满足,则将  $h(t)$ 作为新的扰动信号  $s(t)$ 重复上述步骤,直到满足条件,此时得到第 2 个 IMF 分量。

6)相同地,可以得到更多的 IMF 分量,直到  $h(t)$ 作为残余分量成单调趋势或含量极小,可以忽略不计,则 EMD 求解完毕。

可得扰动信号  $s(t)$ 的 EMD 分解为

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i + h(t) \quad (4)$$

Hilbert 变换:对经 EMD 算法分解得到的各 IMF 进行分析,精确刻画出各个时刻的瞬时频率和幅值。

定义分解得到的某一 IMF 分量信号为  $x(t)$ ,通过 Hilbert 变换可得:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = x(t) \cdot \frac{1}{\pi t} \quad (5)$$

由此可得  $x(t)$ 的复分解信号:

$$z(t) = x(t) + jy(t) = u(t)e^{j\theta(t)} \quad (6)$$

其中, $u(t)$ 对应为瞬时幅值, $\theta(t)$ 为瞬时相位。

$$u(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (7)$$

$$\theta(t) = \arctan \frac{y(t)}{x(t)} \quad (8)$$

易知  $x(t)$ 瞬时频率表示为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \omega(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (9)$$

基于 Hilbert 变换原理,将经过 EMD 分解得到各个 IMF 分量的扰动信号  $s(t)$ 进行变换得:

$$s(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n u_i(t) e^{j \int 2\pi f_i(t) dt} + h(t) \quad (10)$$

其中,因  $h(t)$ 极小,可以忽略不计,取信号  $s(t)$ 的实部,定义为 Hilbert 谱,以  $H(\omega, t)$ 表示,并对时间进行积分,可得 Hilbert 边际谱  $h(\omega)$ ,其通过概率来表示各频率上的总振幅。

$$h(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega, t) dt \quad (11)$$

## 1.2 基于 HHT 变换的电能质量扰动特征提取

电能质量扰动信号主要分为光伏和公共电网扰动两大类。因为光伏信号受外界自然环境的影响较大,其波形存在间歇性、不稳定的特征,因此,对电能质量的干扰也是间歇与不稳定的,不可避免地在电网中引起谐波<sup>[15]</sup>,且谐波的干扰会导致电网电压出现变化,发生电压骤升+谐波或电压骤降+谐波等负荷扰动类型;公共电网扰动主要是电网自身变化导致其节点电压发生骤变引起的电能质量扰动,主要为电压骤升或骤降、电压中断等单一扰动类型。这些扰动信号皆为非平稳信号,利用 HHT 变换从原始扰动信号中得到其瞬时幅值  $u(t)$ 、瞬时相位  $\theta(t)$ 、Hilbert 谱  $H(\omega, t)$ 以及  $h(\omega)$ ,可以提取出扰动信号的频率分布、持续时间、电压幅值有效值以及各频段谐波电压 4 种扰动特征量的数据。

1)扰动信号的频率分布  $x'_{m1}$ 。Hilbert 边际谱  $h(\omega)$ 的波峰值可以清晰地判断系统中的电能质量扰动信号中是否含有谐波成分,系统电压在正常、骤升、骤降、中断以及发生瞬时脉冲的情况下,Hilbert 边际谱显示的波峰值对应频率不大于 50 Hz;而扰动信号中存在谐波时其对应频率大于 50 Hz,可以判断出谐波的存在,从而良好辨识出光伏扰动类型。

2)扰动信号的持续时间  $x'_{m2}$ 。Hilbert 谱  $H(\omega, t)$ 中可知系统受到扰动的初始以及结束时刻,由此得到扰动持续时间,以判断该扰动是瞬时性或持续性信号,光伏扰动信号的持续时间大于 0.5 ms,而公共电网扰动持续时间一般较短,由此特征可以一定程度区分出光伏扰动和公共电网扰动。

3)负荷节点电压幅值变化有效值  $x'_{m3}$ 。以瞬时

幅值  $u(t)$  计算扰动持续时间段内电压的有效值,通过系统所受扰动信号的电压幅值变化情况判断扰动类型,光伏扰动信号的电压变化情况小于 1 V,而公共电网扰动的电压变化远大于 1 V,可以良好区分 2 种电能质量扰动类型。

4) 各频段谐波电压  $x'_{m4}$ 。Hilbert 边际谱  $h(\omega)$  提供了各频段谐波的振幅,即各频段谐波电压,可以清晰地区分电能质量扰动信号中各频段幅值大小,光伏与公共电网扰动信号谐波电压大小往往相差数 10 倍,易进行区分判断。

这些扰动特征量较好地描述了光伏和公共电网扰动类的特征,各特征量都能在一定范围内对扰动信号类别进行识别,但存在较大的局限性,直接使用 HHT 变换后提取的单一扰动特征量进行扰动的辨识易造成错误甚至无法识别的情况。

### 1.3 基于模糊聚类的扰动类别数学模型搭建

为了提高电能质量扰动模式识别准确率,改善当前电能质量扰动模式识别技术仅依靠单独一个扰动特征量判别而导致识别准确率较低的问题,本文提出基于模糊聚类分析的电能质量扰动模式识别方法。首先进行数据的采集及标准化处理,通过现有的配电线路测量设备采集  $n$  种存在扰动的运行状态下被监测线路的数据,并基于 HHT 变换分析提取  $s$  种扰动特征量,这  $n$  个历史特征样本组成一个历史特征样本集,其中第  $m$  个样本表示为

$$\mathbf{x}'_m = (x'_{m1}, x'_{m2}, \dots, x'_{ms})^T \quad (12)$$

其中  $m$  为整数,取值区间为  $[1, n]$ ,  $x'_{m1}, x'_{m2}, \dots, x'_{ms}$  表示第  $m$  种扰动情况下的数据所提取出的  $s$  个扰动特征量的实际值。

标准化处理该样本集可得:

$$x_{mj} = \frac{x'_{mj} - \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n x'_{mj}}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^n (x'_{mj} - \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n x'_{mj})^2}} \quad (13)$$

其中  $j$  的取值范围为  $[1, s]$ 。经标准化处理后,第  $m$  个样本可表示为  $\mathbf{x}_m = (x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{ms})^T$ 。通过式(13)可以同时得到系统实时运行状态下受到扰动信号干扰时被监测线路所提取出的实时特征样本  $\mathbf{x}_g = (x_{g1}, \dots, x_{gj}, \dots, x_{gs})^T$ , 其中  $x_{g1}, x_{g2}, \dots, x_{gs}$  表示被监测线路实时提取出的  $s$  个扰动特征量标准化后的值。

将标准化处理后的样本  $x_1, x_2, \dots, x_n$  代入模糊聚类中进行处理,根据各个样本特征相似程度将样本划分为光伏与公共电网扰动类两大类。设目标函数为

$$J = \sum_{m=1}^n \sum_{i=1}^2 (\mu_{im})^2 \|\mathbf{x}_m - A_i\|^2 \quad (14)$$

其中  $i$  的取值范围为  $[1, 2]$  且为整数,  $A_1, A_2$  分别表示光伏、公共电网扰动类的聚类中心,  $\mu_{im}$  表示标准化处理后的样本  $\mathbf{x}_m$  从属于第  $i$  种聚类类别的隶属度,其满足条件:  $\sum_{m=1}^i \mu_{im} = 1$ 。

同时,计算出光伏、公共电网扰动类各自的聚类中心以及隶属度:

$$A_i = \frac{\sum_{m=1}^n (\mu_{im})^2 \cdot \mathbf{x}_m}{\sum_{m=1}^n (\mu_{im})^2} \quad (15)$$

$$\mu_{im} = \frac{1}{\sum_{j=1}^2 \left( \frac{1}{\|\mathbf{x}_m - A_j\|^2} \right)} \quad (16)$$

设定聚类中心  $A_i$  的初始值,并通过  $\mu_{im}$  与  $A_i$  的相互迭代不断更新各类别的聚类中心数据,当其满足目标函数时停止迭代,此时将得到光伏、公共电网扰动类各自最终的聚类中心,由此构建出电能质量扰动信号历史特征模型。

### 1.4 电能质量扰动模式识别判据的选取

在配电网中被监测线路出发生电能质量异常情况时,为了能够实时判断其受到的扰动模式,需计算实时特征样本  $\mathbf{x}_g$  与各聚类中心的相似度,本文提出全频段电压突变值相似性度量判据,即通过 2 个样本电网电压突变量情况进行电能质量扰动模式的识别。

实时特征样本  $\mathbf{x}_g$  与第  $i$  类聚类中心  $A_i$  之间的全频段电压幅值变化量表示为

$$\Delta U_{gi} = \frac{\sum_{k=1}^s x_{gk} A_{ik}}{\sqrt{\sum_{k=1}^s x_{gk}^2 \sum_{k=1}^s A_{ik}^2}} \quad (17)$$

其中,  $\Delta U_{g1}$  表示实时特征样本  $\mathbf{x}_g$  与光伏扰动类聚类中心  $A_1$  的变化量;  $\Delta U_{g2}$  表示实时特征样本  $\mathbf{x}_g$  与公共电网扰动类聚类中心  $A_2$  的变化量。

定义光伏扰动测度为

$$\lambda_{g1} = \frac{\Delta U_{g1} + 1}{\Delta U_{g1} + \Delta U_{g2} + 2} \quad (18)$$

公共电网扰动测度为

$$\lambda_{g2} = \frac{\Delta U_{g2} + 1}{\Delta U_{g1} + \Delta U_{g2} + 2} \quad (19)$$

若  $\lambda_{g1} < \lambda_{g2}$ , 则表示被监测线路所采集的数据样本  $x_g$  被归类于公共电网扰动类, 线路中包含有公共电网扰动; 若  $\lambda_{g1} > \lambda_{g2}$ , 则线路中包含光伏扰动。如图 1 所示, 当配电网的电能质量存在异常时, 可能存在各条线路受到不同类别的扰动情况, 提取出各条线路的实时特征样本, 并计算与各类别聚类中心的扰动测度, 将所有信息进行综合分析, 即可实现对电能质量扰动的精确识别, 并为后续电能质量的有效治理提供方向。

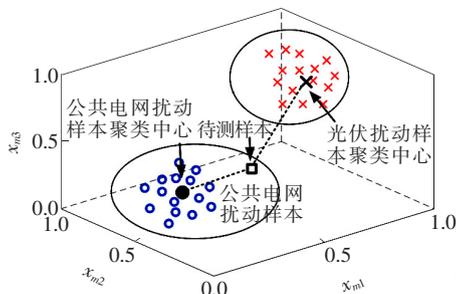


图 1 三判据扰动特征量不同扰动模式聚类

Figure 1 Schematic diagram of three criterion perturbation characteristic quantities with different perturbation patterns

## 2 配电网电能质量扰动模式识别流程设计

基于模糊聚类分析的电能质量扰动模式识别原理, 提出配网线路电能质量扰动模式识别流程, 如图 2 所示, 线路扰动判断步骤如下:

1) 采集电能质量异常状态下的配电网各线路上的数据, 并通过 HHT 变换进行各线路扰动特征量的提取, 之后将选取出的  $s$  种各样本扰动特征量定义为一个历史特征样本  $x'_m$ , 对其进行标准化处理, 得到  $x_m$ ;

2) 运用模糊聚类算法对全部历史特征样本数据不断迭代, 最终分类为光伏、公共电网扰动两大类, 并计算得到各类别的聚类中心  $A_i$ ;

3) 实时监测该配电系统中各个节点的电压变化, 一旦系统中出现电能质量扰动信号, 导致电压长时间

的偏移额定电压值, 立刻启动扰动模式识别方案;

4) 从配电网被监测线路中采集扰动发生后的数据, 同样基于 HHT 变换方法选取出  $s$  种扰动特征量, 作为实时特征样本  $x'_g$ ;

5) 标准化处理特征样本  $x'_g$  得到  $x_g$ , 分别求取  $x_g$  与光伏扰动类聚类中心  $A_1$ 、公共电网扰动类聚类中心  $A_2$  的扰动测度  $\lambda_{g1}$ 、 $\lambda_{g2}$ ;

6) 若  $\lambda_{g1} > \lambda_{g2}$ , 则表示被监测线路发生光伏扰动, 将  $x_g$  归类至光伏扰动类样本集, 然后返回步骤 3; 若  $\lambda_{g1} < \lambda_{g2}$ , 则表示线路发生公共电网扰动, 将  $x_g$  归类至公共电网扰动类样本集。

按照上述流程运行模式识别方案可以准确进行电能质量扰动模式的识别。

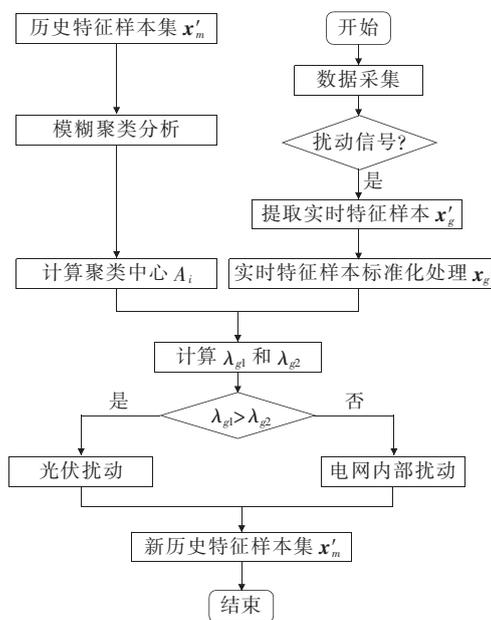


图 2 电能质量各类扰动识别流程

Figure 2 Identification process of various disturbances in power quality

## 3 仿真分析

为了对本文电能质量扰动模式识别新方法有效性进行验证, 在 Matlab 仿真环境中搭建典型的配电网模型, 其中包含有 3 条架空线路和 1 条电缆线路, 馈线具体参数如表 1 所示。在每条线路始端处设置测量元件, 并在各线路的末端施加不同类型的扰动, 广泛采集各扰动信号所包含的数据, 并基于 HHT 变换提取其中包含的各类扰动特征量, 依次定义为  $x'_{m1}$ 、 $x'_{m2}$ 、 $x'_{m3}$ 、 $x'_{m4}$ 。

以表1配电网的参数设置模拟光伏、公共电网扰动这2种不同类型的电能质量扰动情况,采集50组数据样本(仅具体列出表征光伏、线路发生公共电网扰动的历史特征样本中的典型8组样本的扰动信号识别情况并分析)。16个样本中各自的4个扰动特征量数值如表2所示。利用50个历史特征样本中的扰动特征量数据,通过式(15)计算得出光伏、公共电网扰动类各自的聚类中心(具体坐标数据如表3所示),得到电能质量扰动模式历史模型。

表1 配网系统参数

Table 1 Distribution system parameters

线路	长度/ km	每相对地 电容/ $\mu\text{F}$	相间电 容/ $\mu\text{F}$	负荷/ ( $10^3 \text{ kV} \cdot \text{A}$ )	功率 因数
1	30	0.15	0.038	2	0.8
2	100	0.50	0.125	10	0.8
3	30	1.80	0.720	2	0.8
4	20	0.10	0.025	1	0.8

表2 系统历史特征样本集

Table 2 System history feature sample set

扰动 类型	历史特 征样本	模式特征量			
		$x'_{m1}/\text{Hz}$	$x'_{m2}/\text{s}$	$x'_{m3}/\text{V}$	$x'_{m4}/\text{V}$
光伏	$x'_1$	253	0.594	0.682	0.878
	$x'_2$	250	0.593	0.735	0.601
	$x'_3$	250	0.586	0.637	0.583
	$x'_4$	252	0.659	0.694	0.448
	$x'_5$	247	0.513	0.611	0.442
	$x'_6$	250	0.604	0.474	0.276
	$x'_7$	256	0.711	0.420	0.285
	$x'_8$	252	0.574	0.327	0.147
公共 电网	$x'_9$	50	0.201	14.54	15.77
	$x'_{10}$	49	0.190	10.69	11.25
	$x'_{11}$	50	0.467	9.67	10.55
	$x'_{12}$	50	0.200	6.35	8.87
	$x'_{13}$	52	0.352	8.01	8.34
	$x'_{14}$	56	0.275	4.52	4.76
	$x'_{15}$	47	0.198	3.96	4.72
	$x'_{16}$	50	0.213	2.43	2.93

表3 历史数据的聚类中心坐标

Table 3 Cluster center coordinates of historical data

聚类中心	坐标值			
$A_1$	-0.879	-0.796	-0.758	0.804
$A_2$	0.966	0.917	0.903	-0.870

运用该配电网模型模拟2组光伏和2种公共电网扰动情况,分别采集并利用HHT变换提取各自的扰动特征量作为实时特征样本中的数据记录,如表4所示。根据式(18)、(19)计算各实时特征样本相对于两大扰动类型的扰动测度,如表5所示为被监测线路的扰动模式判断结果,当 $\lambda_{g1} > \lambda_{g2}$ 时,该线路发生光伏扰动;当 $\lambda_{g1} < \lambda_{g2}$ 时,线路发生公共电网扰动,该结果与表4的扰动假设样本形式一致,验证了该模式识别方案可以精确别线路中发生的扰动类型,具有可行性。

表4 实时特征样本识别数据

Table 4 Real time feature sample recognition data

扰动 类型	样本	模式判别特征量			
		$x'_{g1}/\text{Hz}$	$x'_{g2}/\text{s}$	$x'_{g3}/\text{V}$	$x'_{g4}/\text{V}$
光伏	$x'_1$	243	0.578	1.735	0.992
	$x'_2$	252	0.509	0.835	0.433
公共 扰动	$x'_3$	51	0.230	3.780	4.310
	$x'_4$	50	0.343	1.450	0.940

表5 被监测线路扰动识别情况

Table 5 Disturbance identification of monitored lines

样本	$\lambda_{g1}$	$\lambda_{g2}$	模式判断结果	
$x'_1$	0.398	0.602	$\lambda_{g1} > \lambda_{g2}$	光伏扰动
$x'_2$	0.430	0.570	$\lambda_{g1} > \lambda_{g2}$	光伏扰动
$x'_3$	0.701	0.299	$\lambda_{g1} < \lambda_{g2}$	公共电网扰动
$x'_4$	0.598	0.402	$\lambda_{g1} < \lambda_{g2}$	公共电网扰动

## 4 结语

本文提出了基于模糊聚类分析的电能质量扰动模式识别方法,通过分析电压幅值变化量的相似度,判断待测实时特征样本与历史特征样本之间的相似程度,将待测样本分类至光伏扰动类或公共电网扰动类,从而进行精确电能质量扰动模式识别。通过Matlab仿真验证了该识别方法能够有效识别扰动类型,具有较高的精确度,并得出如下结论:

1) 基于HHT变换的电能质量扰动特征量提取方法,可以较简便地提取出电能质量扰动特征量,所提取的特征量可有效描述不同类型的电能质量扰动特征,为模糊聚类分析提供便利;

2) 为解决传统的电能质量模式扰动识别方法中仅使用单独一种特征量进行模式识别的局限,设计了基于模糊聚类的电能质量扰动模式识别的方法,

使用多个扰动特征量多维判断识别电能质量扰动,大幅度提高其准确性。

仿真分析结果表明,该电能质量扰动模式识别方法可有效提取多种扰动特征量,且对扰动类型识别的精度高,增大了该方法的普适性,也可以考虑将该扰动模式识别方法与电能质量治理相结合,具有工程应用价值。

### 参考文献:

- [1] 陈珍萍,欧阳名三,刘淮霞.小波能量差分布和 SVM 结合的 PQD 识别[J]. 计算机工程与应用,2011,47(20):241-244.  
CHEN Zhenping, OUYANG Mingsan, LIU Huaixia. Identification of PQD based on wavelet energy difference distribution and SVM[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(20):241-244.
- [2] 汪飞,全晓庆,任林涛.电能质量扰动检测与识别方法研究综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(12):4104-4121.  
WANG Fei, QUAN Xiaoqing, REN Lintao. Summary of research on power quality disturbance detection and recognition methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12):4104-4121.
- [3] 王宁,李林川,贾清泉,等.应用原子分解的电能质量扰动信号分类方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):51-58.  
WANG Ning, LI Linchuan, JIA Qingquan, et al. Classification of power quality disturbance signals using atomic decomposition method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4):51-58.
- [4] SALEM M E, MOHAMED A, SAMAD S A. Rule based system for power quality disturbance classification incorporating S-transform features[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(4):3229-3235.
- [5] 刘云鹏,步雅楠,贺鹏,等.基于 S 变换和 ELM 的变压器绕组应变检测识别[J]. 高压电器,2020,56(1):9-17.  
LIU Yunpeng, BU Yanan, HE Peng, et al. Transformer winding strain detection identification based on S-transform and ELM[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):9-17.
- [6] 杨桢,马钰超,李丽,等.基于 HHT 和 GA-BP 的电压暂降源定位方法[J]. 中国电力,2022,55(3):97-104.  
YANG Zhen, MA Yuchao, LI Li, et al. A novel method for voltage sag source location based on HHT and GA-BP[J]. Electric Power, 2022, 55(3):97-104.
- [7] 李天云,赵妍,韩永强,等. Hilbert-Huang 变换方法在谐波和电压闪变检测中的应用[J]. 电网技术,2005,29

(2):73-77.

LI Tianyun, ZHAO Yan, HAN Yongqiang, et al. Application of Hilbert-Huang transform method in detection of harmonic and voltage flicker[J]. Power System Technology, 2005, 29(2):73-77.

- [8] BISWAL B, PANIGRAHI B K. Power quality disturbance classification using fuzzy c-means algorithm and adaptive particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(1):212-220.
- [9] MISHRA S, BHENDE C N, PANIGRAHI B K. Detection and classification of power quality disturbances using S-transform and probabilistic neural network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1):280-287.
- [10] MORAVEJ Z, ABDOOS A A, PAZOKI M. Detection and classification of power quality disturbances using wavelet transform and support vector machines[J]. Electric Power Components and Systems, 2010, 38(2):182-196.
- [11] 赵伟哲,崔成,严干贵,等.用于次同步振荡分析的直驱风电场等值模型[J]. 智慧电力,2022,50(2):22-28+68.  
ZHAO Weizhe, CUI Cheng, YAN Gangui, et al. Equivalent model of D-PMSG-based wind farm for subsynchronous oscillation analysis[J]. Smart Power, 2022, 50(2):22-28+68.
- [12] 甄超,张健,季坤,等.电能质量治理设备运行状态识别及其治理效果评价[J]. 电测与仪表,2020,57(3):60-65.  
ZHEB Chao, ZHANG Jian, JI Kun, et al. Operation status identification of power quality compensation equipment and its effect evaluation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(3):60-65.
- [13] ZHANG M, LI K C, HU Y S. A real-time classification method of power quality disturbances[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(2):660-666.
- [14] 赵洪山,李静璇,米增强,等.基于 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 的电能质量分级评估方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(3):1-8.  
ZHAO Hongshan, LI Jingxuan, MI Zengqiang, et al. Grading evaluation of power quality based on CRITIC and improved Grey-TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3):1-8.
- [15] 王鸣阳,刘昌嘉,刘仁和.并网型光伏电站储能功率波动平滑控制研究[J]. 电网与清洁能源,2022,38(1):115-120+134.  
WANG Mingyang, LIU Changjia, LIU Renhe. A study on the smooth control of energy storage power fluctuation of grid-connected photovoltaic power station[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1):115-120+134.