

基于动态时间规整算法的用户侧谐波扩散评估

陈盛语, 吴杰康, 陈晓华, 刘国新, 蔡志宏, 王瑞东

广东工业大学自动化学院, 广东 广州

收稿日期: 2021年11月17日; 录用日期: 2021年12月1日; 发布日期: 2021年12月16日

摘要

传统上, 谐波扩散的研究是在恒定背景谐波条件下进行的, 这对于实际的时变系统是不适用的。因此本文提出一种估计背景谐波波动条件下用户侧谐波扩散的新方法。首先利用动态时间规整算法来计算公共耦合点谐波电压波动与谐波电流波动的相似性, 筛选出相似度较高的数据段。再通过复线性回归法计算进行回归计算, 得到与背景谐波波动弱周期相对应的有效阻抗样本, 然后对用户侧谐波扩散进行评估。通过实验验证表明, 该方法相较传统方法有更强的鲁棒性, 能够有效减少背景谐波波动的影响。

关键词

用户侧, 谐波扩散, 谐波阻抗, 动态时间规整算法, 复线性回归

Assessment Method for Harmonic Diffusion in User Side Based on Dynamic Time Warping Algorithm

Shengyu Chen, Jiekang Wu, Xiaohua Chen, Guoxin Liu, Zhihong Cai, Ruidong Wang

School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong

Received: Nov. 17th, 2021; accepted: Dec. 1st, 2021; published: Dec. 16th, 2021

Abstract

Traditionally, the study of harmonic diffusion is carried out under the condition of constant background harmonics, which is not applicable to actual time-varying systems. Therefore, this paper proposes a new method for estimating the harmonic dispersion on the user side under the condition of background harmonic fluctuation. Firstly, the dynamic time warping algorithm is used to calculate the similarity between the harmonic voltage fluctuation and the harmonic current fluctuation at the common coupling point, and the data segment with higher similarity is selected.

文章引用: 陈盛语, 吴杰康, 陈晓华, 刘国新, 蔡志宏, 王瑞东. 基于动态时间规整算法的用户侧谐波扩散评估[J]. 智能电网, 2021, 11(6): 383-393. DOI: 10.12677/sg.2021.116037

Then the regression calculation is performed by the complex linear regression method, and the effective impedance sample corresponding to the weak period of the background harmonic fluctuation is obtained, and then the harmonic diffusion on the user side is evaluated. Experimental verification shows that this method is more robust than traditional methods and can effectively reduce the influence of background harmonic fluctuations.

Keywords

User Side, Harmonic Diffusion, Harmonic Impedance, Dynamic Time Warping Algorithm, Multiple Linear Regression

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着电力电子的飞速发展,大量非线性负荷已大规模接入电力系统,造成严重的谐波电流注入。谐波将增加功率损耗,并减少发电机、输电线路、变压器和负载的使用寿命,很大程度上给电力系统的安全和稳定运行带来了危害[1] [2] [3]。准确估计公共耦合点(PCC)处谐波源的谐波扩散,对于划分电网侧和用户侧谐波污染以及建立智能电网非常重要。用户侧谐波扩散评估的关键在是否能够准确估计系统侧谐波阻抗[4]。

目前,谐波阻抗计算方法一般采用干预式和非干预式两类[5] [6]。在干预式方法中,从注入连接网络的干扰或谐波电流引起的电压和电流的变化中提取实用谐波阻抗,尽管有足够的精确度,但会影响电网的稳定性。并且,昂贵的高速数据采集系统和对干扰注入设备的需求限制了干预式方法的应用[7]。非干预式方法建立在已有的数据基础上,对采集数据进行分析,从而估算系统的谐波阻抗。非干预式的方法主要包括实用谐波阻抗线性回归法和波动量法。波动量法在根据公共耦合处的谐波电压和电流的波动量比值计算系统的谐波阻抗,但该方法仅在系统侧谐波电流源波动程度远小于负荷侧波动程度时使用,否则会产生较大的误差[8] [9]。分别有研究采用二元线性回归[10]、稳健回归[11]、偏最小二乘回归[12]、协方差法[13]以及复线性最小二乘法[14]对传统线性回归方法进行了改进,提高了回归算法的鲁棒性,能一定程度上减少背景谐波、或异常值的干扰。有研究提出了一种 FastICA 盲源分离技术来过滤和分离谐波波动数据,减少了不稳定谐波的影响[15]。

上述文献大多从回归算法的改进着手计算谐波阻抗,但是背景谐波波动量大时,上述方法计算精度会大大降低,有研究提出一种通过线性度校验选择线性度较高的数据集的方法,再通过二元线性回归算法计算筛选后的合格数据的谐波阻抗[16]。有研究提出首先分段计算谐波电压、电流互近似熵,利用阈值筛选法剔除相关性低的数据段,排除背景谐波干扰。然后利用 M 估计稳健回归法对相似度高的数据进行回归计算[17]。但是上述方法都对公共连接点的实部和虚部分别求解计算谐波阻抗,并不是原问题真正的最小二乘解。

本文提出了一种基于动态时间规整算法的用户侧谐波扩散评估方法,将采集数据划分为若干数据段,利用动态时间规整算法将各段实测谐波电压、电流数据进行相似度计算,筛选相似度较高的区段,以达到排除背景谐波干扰的目的。利用复线性回归对筛选后的数据进行回归计算得到系统谐波阻抗,从而较为准确地实现用户侧谐波扩散评估。通过算例分析及方法对比,验证了本文所提方法的有效性和优越性。

2. 谐波扩散的分析方法

2.1. 谐波扩散的等效电路

谐波分析等效模型通常采诺顿等值电路进行分析，如图 1 所示。

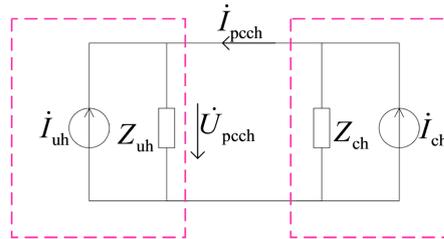


Figure 1. Norton equivalent circuit diagram of harmonic diffusion on user side
图 1. 用户侧谐波扩散的诺顿等效电路图

图 1 所示为谐波分析的基本模型，对于 h 次谐波， \dot{U}_{pcch} 和 \dot{i}_{pcch} 分别表示公共耦合点的 h 次谐波电压和谐波电流矢量。 \dot{i}_u 为系统侧 h 次谐波电流源， \dot{i}_c 为用户侧 h 次谐波电流源， Z_{ch} 和 Z_{uh} 分别为系统侧和用户侧的等效 h 次谐波阻抗。根据电路拓扑结构可知，公共耦合点的 h 次谐波电压和电流可由下式计算。

$$\begin{cases} \dot{U}_{pcch} = \frac{Z_{ch}Z_{uh}}{Z_{ch} + Z_{uh}}(\dot{i}_c + \dot{i}_u) \\ \dot{i}_{pcch} = \frac{Z_{ch}}{Z_{ch} + Z_{uh}}\dot{i}_c - \frac{Z_{uh}}{Z_{ch} + Z_{uh}}\dot{i}_u \end{cases} \quad (1)$$

根据叠加定理，可将图 1 所示谐波分析模型分解为图 2 所示两个子模块[11]。

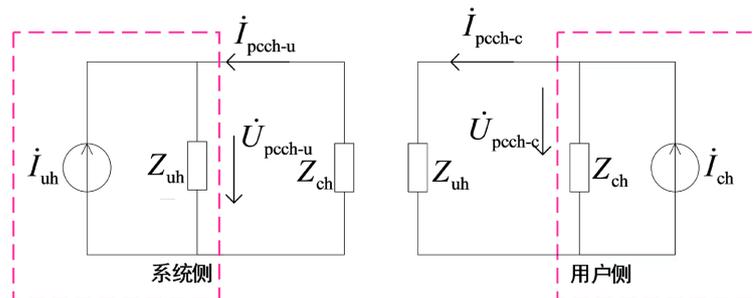


Figure 2. Decomposition circuit diagram of superposition theorem
图 2. 叠加定理分解电路图

由上图可以计算系统侧和用户侧对 PCC 的谐波扩散为

$$\begin{cases} \dot{U}_{pcch-u} = \frac{Z_{uh}Z_{ch}}{Z_{uh} + Z_{ch}}\dot{i}_u \\ \dot{U}_{pcch-c} = \frac{Z_{uh}Z_{ch}}{Z_{uh} + Z_{ch}}\dot{i}_c \end{cases} \quad (2)$$

其中， \dot{U}_{pcch-c} 和 \dot{U}_{pcch-u} 分别代表系统侧和用户侧在公共耦合处产生的等效 h 次谐波电压，用向量图表示如图 3 所示，将式(1)代入式(2)可得

$$\dot{U}_{\text{pcc-h-c}} = \frac{Z_{\text{uh}}Z_{\text{ch}}}{Z_{\text{uh}} + Z_{\text{ch}}} \left(\frac{\dot{U}_{\text{pcc-h}}}{Z_{\text{ch}}} + \dot{i}_{\text{pcc-h}} \right) \quad (3)$$

由于用户侧谐波阻抗往往远大于系统侧谐波阻抗，即 $Z_{\text{ch}} \gg Z_{\text{uh}}$ ，因此用户侧谐波在 PCC 处产生的 h 次谐波电压可由下式近似计算

$$\dot{U}_{\text{pcc-h-c}} = \frac{1}{1 + \frac{Z_{\text{uh}}}{Z_{\text{ch}}}} \left(\frac{Z_{\text{uh}}}{Z_{\text{ch}}} \dot{U}_{\text{pcc-h}} + Z_{\text{uh}} \dot{i}_{\text{pcc-h}} \right) \approx Z_{\text{uh}} \dot{i}_{\text{pcc-h}} \quad (4)$$

因此用户侧的谐波扩散率可计算如下

$$\varepsilon = \frac{|Z_{\text{uh}} \dot{i}_{\text{pcc-h}}| \cos \theta}{|\dot{U}_{\text{pcc-h}}|} \times 100\% \quad (5)$$

式中： θ 为 $\dot{U}_{\text{pcc-h-c}}$ 与 $\dot{U}_{\text{pcc-h}}$ 的夹角， $\dot{U}_{\text{pcc-h}}$ 和 $\dot{i}_{\text{pcc-h}}$ 可由测量获得，因此求得 h 次系统谐波阻抗以及系统侧等效 h 次谐波电压即可对用户侧的谐波扩散进行评估。

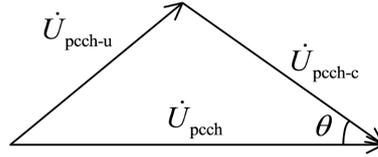


Figure 3. Voltage vector diagram of H-th harmonic at PCC point

图 3. h 次谐波 PCC 点处电压向量图

2.2. 复线性回归计算谐波阻抗

传统的二元线性回归法都是公共连接点的实部和虚部分别求解计算谐波阻抗，并不是原问题真正的最小二乘解[13]。因此本文选择复线性回归法计算谐波阻抗。以公共连接点谐波电流电压测量参数为观测数据，根据系统和用户等值电路推导的复线性回归方程求取系统侧谐波阻抗和背景谐波电压。进而进行用户侧谐波扩散评估。根据图 1 所示可列出方程为：

$$\dot{U}_{\text{pcc}} = Z_{\text{c}} \dot{i}_{\text{pcc}} + Z_{\text{u}} \dot{i}_{\text{u}} \quad (6)$$

在某时段内对式(6)进行复线性回归，其求解方程为

$$\min f(Z_{\text{c}}, U_{\text{u}}) = \sum_{i=1}^N \dot{U}_{\text{pcc}} - Z_{\text{c}} \cdot \dot{i}_{\text{pcc}} - \dot{U}_{\text{u}} \quad (7)$$

其最小二乘解为

$$\begin{bmatrix} R_{\text{u}} + jX_{\text{u}} \\ U_{\text{ux}} + jU_{\text{uy}} \end{bmatrix} = \left(\overline{X^T X} \right)^{-1} \overline{X^T Y} \quad (8)$$

式中：上标“T”表示一个矩阵的转置。系统侧谐波阻抗样本和背景谐波电压可计算为

$$X = \begin{bmatrix} \dot{i}_{\text{pcc}} [1] & 1 \\ \dot{i}_{\text{pcc}} [2] & 1 \\ \vdots & 1 \\ \dot{i}_{\text{pcc}} [l] & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{pcc}} [1] \\ \dot{U}_{\text{pcc}} [2] \\ \vdots \\ \dot{U}_{\text{pcc}} [l] \end{bmatrix} \quad (9)$$

上式成立的条件是背景谐波电压在该数据段内保持稳定。然而，在实际系统中背景谐波是不同的，直接采用复线性回归法将导致较大误差。因此在计算时需要筛选高相似度的样本，排除与背景谐波波动较大的数据样本。

3. 谐波的扩散特性分析

3.1. 谐波电压与谐波电流相关性分析

由 1.1 节式(1)可知 PCC 谐波电压和电流波动量关系如式(10)所示。

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_{\text{pcch}} = \frac{Z_{\text{ch}} Z_{\text{uh}}}{Z_{\text{ch}} + Z_{\text{uh}}} (\Delta \dot{I}_{\text{ch}} + \Delta \dot{I}_{\text{uh}}) \\ \Delta \dot{I}_{\text{pcch}} = \frac{Z_{\text{ch}}}{Z_{\text{ch}} + Z_{\text{uh}}} \Delta \dot{I}_{\text{ch}} - \frac{Z_{\text{uh}}}{Z_{\text{ch}} + Z_{\text{uh}}} \Delta \dot{I}_{\text{uh}} \end{cases} \quad (10)$$

由上式可知，在估计期间保持恒定的系统谐波源即 $\Delta \dot{I}_{\text{uh}} = 0$ ，或者保持恒定的用户谐波源 $\Delta \dot{I}_{\text{ch}} = 0$ 时。PCC 处的谐波电压与电流的波动具有很强的线性关系。例如， $\Delta \dot{I}_{\text{uh}} = 0$ 时， $\Delta \dot{U}_{\text{pcch}}$ 、 $\Delta \dot{I}_{\text{pcch}}$ 可计算如下。

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_{\text{pcch}} = \frac{Z_{\text{ch}} Z_{\text{uh}}}{Z_{\text{ch}} + Z_{\text{uh}}} \Delta \dot{I}_{\text{ch}} \\ \Delta \dot{I}_{\text{pcch}} = \frac{Z_{\text{ch}}}{Z_{\text{ch}} + Z_{\text{uh}}} \Delta \dot{I}_{\text{ch}} \end{cases} \quad (11)$$

合并式(11)可得

$$\Delta \dot{U}_{\text{pcch}} = Z_{\text{uh}} \Delta \dot{I}_{\text{ch}} \quad (12)$$

大多数情况下， $\Delta \dot{I}_{\text{uh}}$ 和 $\Delta \dot{I}_{\text{ch}}$ 同时变化，而 $\Delta \dot{U}_{\text{pcch}}$ 和 $\Delta \dot{I}_{\text{pcch}}$ 均由 $\Delta \dot{I}_{\text{ch}}$ 和 $\Delta \dot{I}_{\text{ch}}$ 共同贡献产生。此时，PCC 处的电压波动与电流波动之间的关系并不明显。因此筛选相关性高的数据段有利于提高计算精度。

3.2. 动态时间规整算法

通过 3.1 节分析可见，当只有一侧的谐波源发生波动时，PCC 处的谐波电压与电流的波动具有很强的线性关系。因此，本文采用动态时间规整算法(Dynamic Time Warping, 简称 DTW)计算两个随机变量时间弯曲距离，从而得到两个变量相似度的测量方法，通过筛选相关度高的子周期达到降低背景谐波影响的目的。

与欧几里的距离相比，动态时间规整算法对相似度计算具有更强的鲁棒性。它可以用来比较两个不同长度的序列，允许相似的形状相匹配[18]。此外，即使时间序列变换和缩放时，它也具有良好的性能。DTW 的主要思想是构造一个对齐矩阵，然后利用动态规划来寻找最小化时间序列之间的累积距离[17]。该算法具体实施如下：

1) 对于两个时间序列 $X = [x_1, x_2, \dots, x_p]^T$ ， $Y = [y_1, y_2, \dots, y_q]^T$ ，序列长度分别为 p 、 q 。为了将他们按照时间位置排序，首先构造一个 p 行 q 列的距离矩阵 A ，即

$$A = \begin{bmatrix} d(x_1, y_1) & d(x_1, y_2) & \cdots & d(x_1, y_q) \\ d(x_2, y_1) & d(x_2, y_2) & \cdots & d(x_2, y_q) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d(x_p, y_1) & d(x_p, y_2) & \cdots & d(x_p, y_q) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中： $d(x_i, y_j) = \sqrt{(x_i - y_j)^2}$ 对应于 X 和 Y 欧氏距离，其中， $1 \leq i \leq p$ 和 $1 \leq j \leq q$ 。

2) 定义每组相邻矩阵元素的集合称为规整路径, 记作 $W = [w_1, w_2, \dots, w_k]$, 规划路径必须满足以下三个条件:

a) 有界性: $w_1 = (1, 1)$, $w_k = (p, q)$, 即规划路径在 $w_1 = (1, 1)$ 开始, 在 $w_k = (p, q)$ 结束。

b) 连续性: 考虑 $w_k = (i, j)$, 那么 $w_{k+1} = (i', j')$; 其中 $i - i' \leq 1$, $j - j' \leq 1$, 即规划路径具有连续性, 且路径每次移动最多不能跳跃两个采样点。

c) 单调性: $w_k = (i, j)$ 、 $w_{k+1} = (i', j')$, 其中 $i - i' \geq 0$, $j - j' \geq 0$, 表示 i 、 j 在动态路径规划中只能单调增加或者保持位置不变, 而不能向后移动。

3) 目标函数为两序列间最小规整路径

$$f_{\text{DTW}}(X, Y) = \min \sum_{k=1}^K d(w_k) \quad (14)$$

式中: $f_{\text{DTW}}(X, Y)$ 表示 X 和 Y 的 DTW 距离; K 表示最小规划路径的长度; w_k 为最小规划路径中的第 k 个元素。计算 DTW 距离的递归算法如式(15)所示

$$\begin{cases} f_{\text{DTW}}(X, Y) = D(p, q) D(i, j) = 0 \\ D(0, 0) = 0, D(0, \infty) = 0, D(\infty, 0) = 0 \\ D(i, j) = a_{ij} + \min \{D(i-1, j-1), D(i-1, j), D(i, j-1)\} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $D(i, j)$ 表示元素 a_{ij} 与其前断的弯曲路径部分长度最小累计值之和。

4. 谐波扩散的评估方法

根据第 3.1 节的分析, 可以得出结论, 在估计期间背景谐波保持稳定时, $\Delta \dot{U}_{\text{pcc}}$ 和 $\Delta \dot{I}_{\text{pcc}}$ 的具有很强的相似性。为避免数据幅值, 相位对动态时间规整计算结果的影响, 第一步是标准化每段数据。本文采用了最大最小的归一化方法, 将采集的 $\Delta \dot{U}_{\text{pcc}}$ 、 $\Delta \dot{I}_{\text{pcc}}$ 谐波数据映射到 $[0, 1]$ 区间。

$$x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (16)$$

x'_i 为归一化结果, x_i 为 PCC 谐波电压或谐波电流的波动值。 x_{\min} 为谐波电压和谐波电流波动最小值, x_{\max} 为谐波电压和谐波电流波动的最大值。 q 表示计算段中包含的数据总量。规范化后, 计算 ΔU_{pcc} 与 ΔI_{pcc} 之间的动态时间弯曲距离, 相似度定义为:

$$S_i = \frac{\bar{f}_{\text{DTW}}}{\bar{f}_{\text{DTW}} + f_{\text{DTW}}[i]}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

式中: \bar{f}_{DTW} 是所有子区间的动态时间翘曲距离的平均值。 $f_{\text{DTW}}[i]$ 是第 i 子区间的动态时间翘曲距离。 m 是子间隔的总量。线性关系越强, DTW 值越小, S_i 值越接近 1, 因此阻抗样本越适合实际阻抗值。本文选取了具有 $S_i \geq k$ 的数据区间作为有效段, 并选取了该段的谐波阻抗样本, 为保证有足够数量的有效数据段, 本文中 k 为一个动态值, 选取条件为保证筛选后的数据为原样本数据的十分之一。

每个子周期的宽度是系统测阻抗估计的关键因素。如果每个计算窗口的宽度太短, 则回归算法可能会由于缺乏样本数据的统计特性而失败。但如果宽度太长, 就会增加背景谐波波动的概率, 而效用谐波阻抗也可能会改变。本文通过测试, 选择了 10 为窗口数。算法流程如下:

- 1) 获得 PCC 处的电压和电流的测量数据, 采用傅里叶分解方法获得相应次数谐波电压和电流分量。
- 2) 计算 PCC 谐波电压和电流波动量 $\Delta \dot{U}_{\text{pcc}}$ 和 $\Delta \dot{I}_{\text{pcc}}$ 。
- 3) 最大最小化方法归一化 $\Delta \dot{U}_{\text{pcc}}$ 和 $\Delta \dot{I}_{\text{pcc}}$

- 4) 将归一化后的 $\Delta \dot{U}_{\text{pcc}}$ 和 $\Delta \dot{I}_{\text{pcc}}$ 数据划分为 n 个子区间, 每个子区间的数据初始宽度设置为 10。
 - 5) 在每个子区间中, 利用 DTW 计算 $\Delta \dot{U}_{\text{pcc}}$ 与 $\Delta \dot{I}_{\text{pcc}}$ 之间的动态时间弯曲距离, 并通过式(17)计算每个子段的相似度 $\Delta \dot{I}_{\text{pcc}}$, 筛选相似度高的前 10% 数据段。
 - 6) 采用复线性回归算法计算系统测谐波阻抗,
 - 7) 将谐波阻抗和 PCC 处谐波电压电流数据代入式(5)进行用户侧谐波扩散评估。
- 算法流程图如图 4 所示:

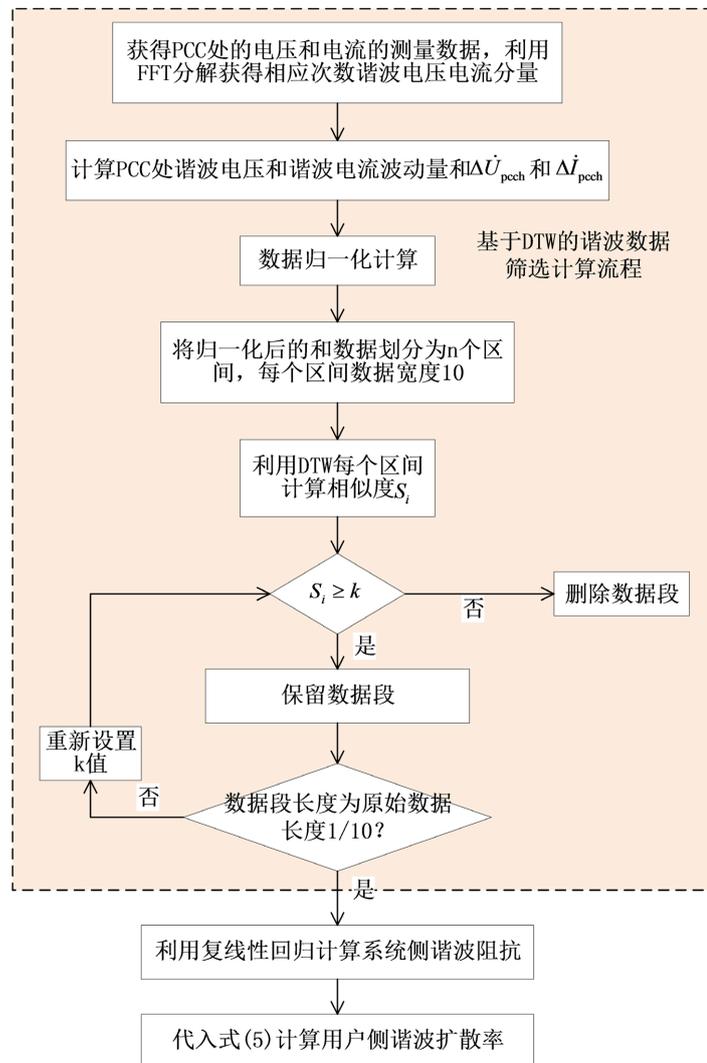


Figure 4. Algorithm execution flow chart

图 4. 算法执行流程图

5. 仿真验证

本节用 MATLAB 基于图 1 中的等效电路模型进行仿真, 以获取 3 次谐波数据, 以测试本文所述方法的有效性。比较了以下三种方法的计算结果: 1) 二元线性回归法; 2) 复线性回归; 3) 本文所提出的方法。

谐波电流源和谐波阻抗的参数设置如下: 系统侧谐波电流源 I_c 的幅值为 5A, 初始相位设置为 -30° ,

分别带有 1% 正态分布扰动。用户侧谐波源 I_u 的幅值设置为 100A，初始相位为 -30 度，分别增加了的幅值和相角 20% 的正态分布扰动。谐波阻抗 Z_u 设置为 $(5 + j15)\Omega$ ， Z_c 设置为 $(60 + j90)\Omega$ 。间隔 0.01 s，采样 2000 个数据点，作为一组 3 次谐波电压与电流数据，分别采用下面三种方法进行计算 1) 二元线性回归法；2) 复线性回归；3) 本文所提出的方法。定义计算误差表达式为

$$e = \left| \frac{R_s - R_u}{R_u} \right| \times 100\% \quad (18)$$

计算结果对应如表 1 所示，可以看出，在系统侧谐波波动较小的时候，3 种方法都能较为准确的计算系统谐波阻抗，本文方法的精确度相对较高，本文方法在进行用户侧谐波扩散评估时，相较于复线性回归法有所改善。

Table 1. Harmonic impedance and emission level calculation

表 1. 谐波阻抗和谐波发射水平计算

方法	实部	误差%	虚部	误差%	用户侧谐波扩散率	误差%
二元线性回归	4.9640	0.72	16.2521	8.35	78.75%	6.40
复线性回归	4.9922	0.16	14.6614	2.26	72.69%	1.80
本文方法	4.9927	0.14	14.6701	2.19	72.72%	1.76

为进一步验证本文方法在系统谐波源大波动时的有效性，改变系统测谐波电流源参数， Z_c 的幅值为 5A，初始相设置为 -30 度，分别带有 20% 正态分布扰动，其他参数不变。采样 2000 个数据点，作为一组 3 次谐波电压与电流数据，采用 FFT 分解获得相应次数谐波电压和电流数据，PCC 处谐波电压及 3 次谐波电流幅值如下图 5 所示，可以看出，由于加入背景谐波扰动，谐波电压和电流都发生了一定程度的波动。

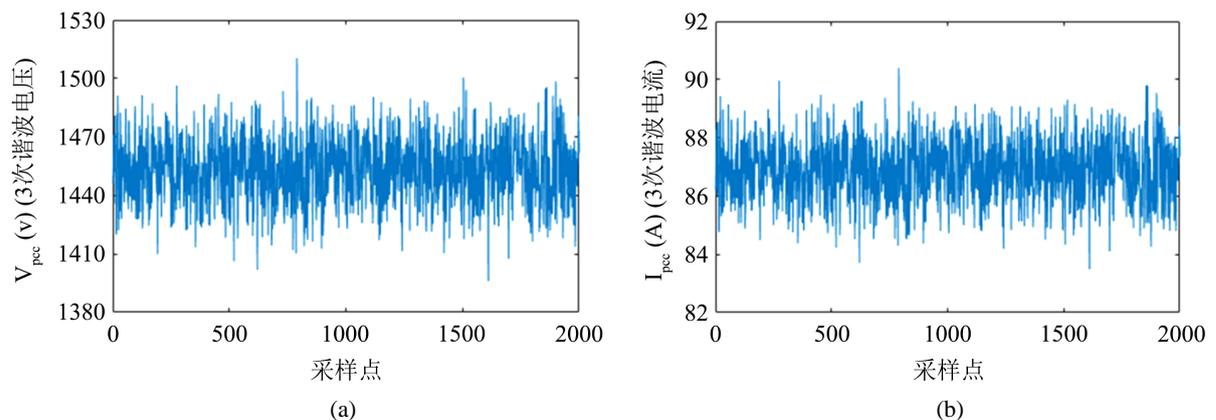


Figure 5. PCC point 3rd harmonic current waveform

图 5. PCC 点 3 次谐波电压电流波形

为了在筛选高相似度数据段的同时避免有效数据被删除，本文在采用 DTW 筛选数据时设置滑动窗口长度为 $L = 10$ ，将由仿真数据计算的 $\Delta \dot{U}_{pcc}$ 和 $\Delta \dot{I}_{pcc}$ 分为 200 组数据段，通过 DTW 将受背景谐波影响较小的数据段筛选出来。数据筛选结果如图 6 所示，图 6(a) 所示为筛选前测量点 PCC 处的谐波电压和谐波电流的散点图，由于加入了背景谐波，部分谐波电压和电流数据偏离线性关系，图 6(b) 所示为筛选后数据，可以看出，采用动态时间规整算法筛选后的数据相关性更强。

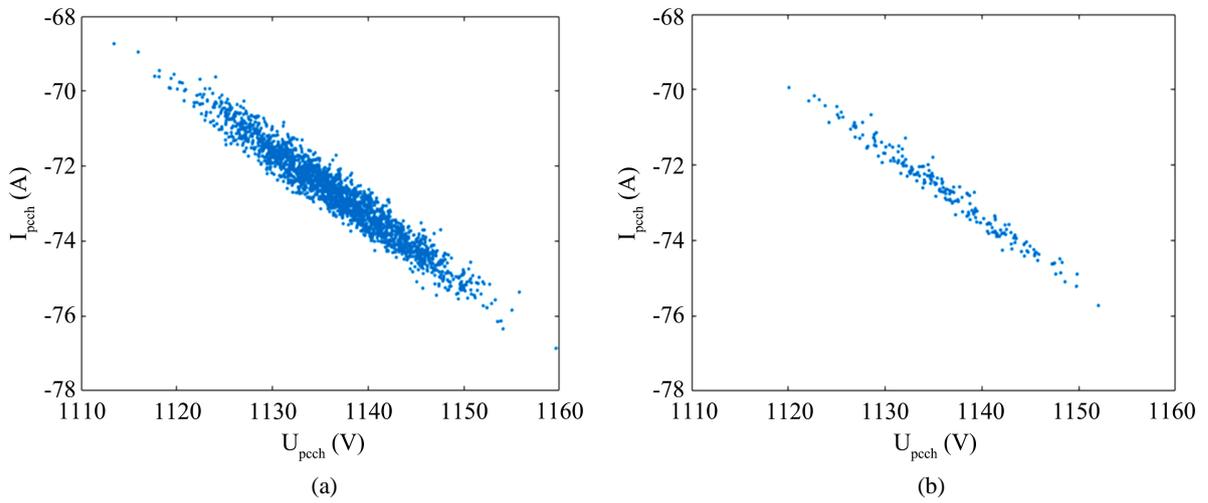


Figure 6. Harmonic voltage and current at PCC before and after screening
图 6. 筛选前后 PCC 处谐波电压电流

分别采用二元线性回归法、复线性回归、本文所提出的方法三种方法计算系统侧谐波阻抗并且进行谐波扩散评估，利用式(18)计算各方法的估计误差，结果如表 2 所示。

Table 2. Calculation of harmonic impedance and harmonic emission level when the fluctuation amount is large
表 2. 波动量较大时谐波阻抗和谐波发射水平计算

方法	实部	误差%	虚部	误差%	用户侧谐波扩散率	误差%
二元线性回归	4.3305	13.39	41.2119	174.75	/	/
复线性回归	4.9203	1.59	14.5152	3.23	71.89%	2.89
本文方法	5.0155	0.31	14.7384	1.74	73.06%	1.31

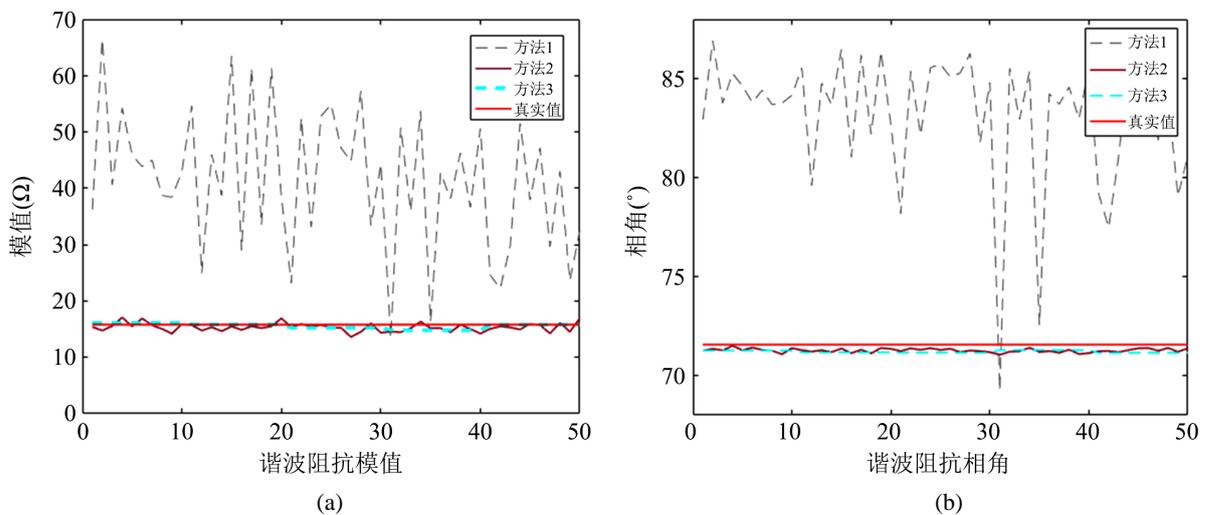


Figure 7. Comparison results of calculation of equivalent harmonic impedance by various methods
图 7. 各方法计算等效谐波阻抗的比较结果

从表 2 可以看出, 在背景谐波波动较大的情况下, 通过传统的二元线性回归进行计算已经大大偏离了真实值, 缺乏实用性。复线性回归法方法通过计算原问题真正最小二乘解, 有较高的计算精度, 本文方法进一步改进了复线性回归法, 使得用户谐波扩散率计算精度提高了 54.68%, 三种方法计算的谐波等效阻抗对比如图 7 所示。

上图更加直观的反映了采用传统二元线性回归算法在背景谐波波动大时计算系统谐波阻抗误差较大, 复线性回归算法相较传统二元线性回归算法有较大改进。本文进一步改进了复线性回归法, 筛选线性相关度高的数据段, 在背景谐波波动较大的情况下, 能够有效提高用户侧谐波扩散评估精度。

6. 结论

本文提出了一种基于动态时间规整算法用户侧谐波扩散评估方法, 利用动态时间规整算法对谐波电压、电流波动数据进行了预处理, 筛选出相似度较高的数据段。把筛选后的数据通过复线性回归方法计算得到了谐波阻抗值, 根据谐波阻抗和 PCC 处的谐波电压电流数据进行用户侧谐波扩散评估。利用动态时间规整算法筛选数据有效规避了背景谐波波动对谐波阻抗计算的影响, 提高了用户侧谐波扩散评估的准确性, 复线性回归方法提高了回归计算的鲁棒性。由仿真和实际案例计算得知, 相比其他两种算法, 本文方法精确程度更高。本文所提出的谐波扩散评估方法不是针对一定的谐波, 而是针对系统侧和用户侧综合谐波扩散比例。通过计算所提出的谐波扩散指标, 可以直接配置合适的奖惩方案在系统侧和用户侧的实施中, 有利于电网谐波发射扩散抑制和谐波管理。

参考文献

- [1] Wu, J., Qiu, H., Xu, J., Zhou, F., Dai, K., Yang, C., *et al.* (2018) Quantifying Harmonic Responsibilities Based on Kurtosis Detection Principle of Amplitude Fluctuations. *IEEE Access*, **6**, 64292-64300. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2875063>
- [2] 孙媛媛, 尹志明. 基于 M 估计稳健回归的多谐波源责任区分[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 166-173+前插 22.
- [3] 王莉虹, 肖先勇, 张逸, 黄勇, 刘亚梅. 考虑测量误差的谐波贡献评估[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3865-3870.
- [4] 赵勇, 张涛, 李建华, 夏道止. 一种新的谐波源简化模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 47-51.
- [5] Huang, X., Nie, P. and Gong, H. (2010) A New Assessment Method of Customer Harmonic Emission Level. 2010 *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Chengdu, 28-31 March 2010, 1-5. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5449329>
- [6] Karimzadeh, F., Esmaili, S. and Hosseinian, S. H. (2015) Novel Method for Noninvasive Estimation of Utility Harmonic Impedance Based on Complex Independent Component Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **30**, 1843-1852. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2398820>
- [7] 惠锦, 杨洪耕, 叶茂清. 基于阻抗归-化趋势判别的谐波发射水平估计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 73-80.
- [8] 惠锦, 杨洪耕, 林顺富, 马豫超. 基于独立随机矢量协方差特性的谐波发射水平评估方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 27-31.
- [9] 龚华麟, 肖先勇, 刘亚梅, 杨洪耕. 基于主导波动能筛选原理的用户谐波发射水平估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 22-27.
- [10] 张巍, 杨洪耕. 基于二元线性回归的谐波发射水平估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 4(6): 50-53.
- [11] 车权, 杨洪耕. 基于稳健回归的谐波发射水平估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 39-42+49.
- [12] 王辉, 刘炜, 李群湛, 易东, 郭成. 基于复数域偏最小二乘法与等值法的多谐波源责任划分[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 78-85+119.
- [13] 贾秀芳, 华回春, 曹东升, 赵成勇. 基于复线性最小二乘法的谐波责任定量划分[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 149-155+前插 19.
- [14] 熊敏, 杨洪耕. 基于改进协方差特性的永磁直驱风电场谐波发射水平评估[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 603-611.

-
- [15] 林顺富, 李扬, 汤波, 符杨, 李东东. 基于改进 FastICA 及偏最小二乘法的系统谐波阻抗估计[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 308-314.
- [16] 王行亚, 肖先勇, 吴俊, 李媛, 刘小林, 曹子恒. 基于线性度校验的二元线性回归系统谐波阻抗估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2826-2834.
- [17] 付慧, 张国江, 史明明, 张宸宇, 沙浩源, 范忠. 基于互近似熵数据筛选的谐波源责任划分方法[J/OL]. 电测与仪表, 2021: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210421.0901.003.html>, 2021-07-12.
- [18] 储佳伟, 袁晓冬, 陈兵, 王旭冲, 邱海峰, 顾伟. 结合小波分析和改进型 DTW 距离的配电网电压暂降源辨识方法[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 637-643.