DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.47　　**中图分类号**：TM711　　**文献标志码**：A

基于多频段阻抗对比的多谐波源溯源方法

丁 艺[1]，王 羽[2]，何 震[1](中国电源学会会员)，年 珩[1]，章钧星[2]
(1.浙江大学电气工程学院，杭州 310027；2.国电象山海上风电有限公司，宁波 315733)

摘要：随着电力系统电力电子化程度提升，系统中谐波大幅增加，准确追溯谐波扰动源头可精准评估各级节点对电能质量的影响因子，为谐波的针对性治理提供重要支撑。然而，电网的大规模谐波溯源存在挑战：电能质量监测设备间谐波数据采样存在不同时性问题，谐波监测数据时域精确度较低、有效性不足，经溯源过程计算分析，误差被放大将影响量化结果和溯源效果；多谐波源系统中，不同频段阻抗特性复杂化，将影响对特定频次、单一扰动源头的精准追溯。针对上述问题，采用基于不同节点时间尺度基准的谐波状态估计法，进行谐波监测数据的同步性筛选；聚焦不同频段阻抗特性复杂化问题，提出1种基于同节点多频段阻抗对比的多谐波源溯源方法；横向对比同节点不同频段的阻抗结果，可有效辨识各个潜在谐波源节点并量化表征其谐波出力贡献度。最后，搭建含多个新能源场站基地的多谐波源电力系统仿真算例，对所提理论方法的有效性进行了充分验证。

关键词：谐波溯源；多谐波源系统；多频段阻抗对比；诺顿等效

Multi-harmonic Source Tracing Method Based on Multi-band Impedance Comparison

DING Yi[1], WANG Yu[2], HE Zhen[1], *Member*, *CPSS*, NIAN Heng[1], ZHANG Junxing[2]
(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Xiangshan Off-shore Wind Power Co., Ltd., Guodian Power Co., Ltd., Ningbo 315733, China)

Abstract: With the continuous improvement of the degree of electronification in a power system, the proportion of harmonics in the system increases significantly. An accurate tracing of the source of harmonic disturbance is crucial for evaluating the influencing factors for power quality and providing important support for targeted control of harmonics. However, there are challenges in the large-scale harmonic tracing of power grids as follows. The sampling time of harmonic data of each power quality monitoring equipment is not synchronized, resulting in low time-domain accuracy and low effectiveness of the monitoring data. Through the calculation and analysis of the source tracing process, the amplification of errors will affect the quantitative results and source tracing effect. In a multi-harmonic source system, complex in multi-band impedance will affect the accurate traceability of a single disturbance source at a specific frequency. To solve the above problems, a harmonic state estimation method based on the time scale datum of different nodes is used to synchronously screen the monitoring data. With a focus on the complexity in the multi-band impedance characteristics, a multi-harmonic source tracing method based on multi-band impedance comparison at the same node is proposed. Through a comparison of the impedance results in multi-band at the same node, the potential harmonic source nodes can be effectively identified, and the harmonic force contribution of each node is calculated to quantitatively characterize its harmonic contribution. Finally, a simulation example of a multi-harmonic source power system including multiple new energy stations is established, and results fully verify the effectiveness of the proposed theoretical method.

Keywords: Harmonic source tracing; multi-harmonic source system; multi-band impedance comparison; Norton equivalence

收稿日期：2024-07-05；**修回日期**：2024-09-21；**录用日期**：2024-10-21；**网络首发日期**：2024-11-04
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52325702)；国电电力发展股份有限公司科技资助项目(GDDL-23-32)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52325702; the Guodian Power Co., Ltd. Technology Project under the grant GDDL-23-32

在“碳达峰、碳中和”的目标背景下，新能源大规模并网，电力系统中的谐波问题日益凸显，谐波源分布广泛、占比大幅增加。新能源变流器存在开关频率的谐波分量，其输出阻抗与电网耦合[1]，使系统谐波特性呈现高频次、宽频域，易引发电力系统电压谐振[2-3]，造成继电保护装置误动作、线路与设备绝缘遭击穿，甚至引发严重短路事故，影响系统正常运行[4-5]。准确追溯系统中谐波扰动源头，对于精准评估供/用电各级节点对电能质量的影响、针对性地提供谐波治理依据具有重要意义。

工程应用中，谐波溯源多基于实测数据，提炼数据相关性，查找主导谐波源头[6-7]。然而，在电力电子化新形态下，电网大规模谐波溯源工作面临的挑战加剧：①系统中电能质量监测装置配置有限，反应工频正弦量的多数监测仪表误差增大，多个监测设备谐波数据的采样存在不同时性问题，谐波监测数据时域精确度低、冗余度高[8]，经谐波溯源过程进一步计算分析，误差被放大将影响量化结果和溯源效果，因此监测数据须经过处理；②多谐波源系统中，谐波呈现多来源、强耦合[9]，不仅谐波扰动呈现全局化，供用电各方参数也在动态变化，不同频段阻抗特性的复杂化等新特征[10]将影响对特定频次、单一扰动源头的精准追溯，难以进行谐波辨别、追责。

目前，电力系统中谐波溯源方法主要有功率流向法和谐波阻抗法 2 种。在功率流向法的研究中，利用无功功率方向可在时域内实现电网各次主谐波污染源的辨识[11]，通过谐波有功功率正负可以辨识谐波电流的主要来源[12]。电流跟踪是谐波溯源的关键问题，输入信号中谐波次数、含量繁杂，无法对谐波信号实现无静差跟踪。文献[13]采用比例积分 PI(proportional integral)和重复控制双环电流控制，分析了谐波电流跟踪误差；文献[14-15]提出了临界阻抗法，通过公共连接点PCC(point of common coupling)两侧谐波阻抗与消除电网谐波产生的无功功率所需阻抗的比值来确定主谐波源。在利用谐波阻抗法进行谐波溯源的研究中，文献[16-17]提出负荷参数辨识法，根据负荷阻抗参数和时间参数是否呈线性关系来辨识谐波源，当背景谐波波动较强时，谐波阻抗估计结果误差会显著增大；文献[18]提出了基于不同时间间隔弱相关性的系统侧谐波阻抗估计方法；文献[19]针对实测数据相位缺失且背景谐波波动强的情况，提出了基于阻抗波动判定的系统侧谐波阻抗估计方法。应用较为广泛的有功功率方向法受电压、电流相位差限制较大，特别是在单点谐波溯源时，当系统侧和用户侧均存在谐波源，传统有功功率流向法难以判断主导谐波源。而负荷参数辨识法计算出的负荷阻抗参数仅体现 PCC 负荷电压和电流间的数学关系，不能完全代表负荷的实际参数，在多谐波源电网中难以实现精确谐波溯源与有效的谐波污染责任划分[20-21]。

基于上述挑战与现状，本文针对谐波数据采样不同时性的问题，基于不同节点时间尺度基准的谐波状态估计法，进行不同节点间谐波监测数据的同步性筛选。在此基础上，聚焦多谐波源系统不同频段阻抗特性的复杂化问题，提出了 1 种基于同节点多频段阻抗对比的多谐波源溯源方法，有效辨识各个潜在谐波源节点，量化计算各节点的诺顿等效模型。最后，搭建了含多新能源场站基地的多谐波源电力系统仿真模型，验证所提方法的有效性。结果显示，所提谐波数据同步性筛选方法可提高谐波监测数据时域精确度与适用性；所提基于多频段阻抗对比的多谐波溯源方法，通过横向对比同节点不同频段的阻抗结果，可有效辨识各个潜在谐波源节点，并量化表征其谐波出力贡献度。

1 谐波数据的同步性筛选与状态估计

首先提出基于线路模型、参数的谐波电压同步性筛选方法，并对含多个新能源场站基地的华东某区域电网的谐波监测数据进行了筛选。考虑到谐波监测装置未装设同步时钟信号设备，其在对母线电压、电流进行高速采样时，对电压相角影响更为显著，基于此，提出了基于最小二乘法的不同节点谐波电压相角的精确同步性筛选方法。

1.1 基于线路模型、参数的谐波电压同步性筛选方法

以电网物理模型为理论基础，结合运维人员现场传统操作分析模式，基于线路模型、参数及谐波监测数据，提炼数据相关性。提出了谐波电压数据时间尺度同步性筛选方法，展开谐波溯源数据筛选工作。输电线路采用 π 型等值电路，如图 1 所示，图中：$\boldsymbol{U}_1$ 为首端电压矢量；B 为线路电纳参数；$\boldsymbol{U}_2$ 为末端电压矢量；R 为线路电阻；X 为线路电抗；P_2、Q_2 分别为线路末端节点的有功功率、无功功率。线路参数可表示为

$$|Z|=\sqrt{R^2+X^2} \tag{1}$$

$$\phi_Z=\arctan\frac{X}{R} \tag{2}$$

式中：Z 为线路阻抗；ϕ_Z 为线路阻抗角。

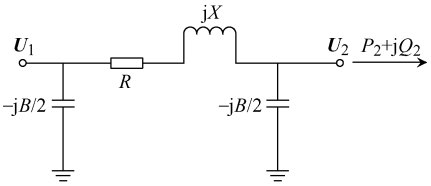


图 1　输电线路模型等效图

Fig. 1 Equivalent diagram of transmission line model

线路上由于阻抗产生的电压横向偏移量 ΔU 和电压纵向偏移量 δU 分别为

$$\Delta U=\frac{P_2R+Q_2X}{\boldsymbol{U}_2} \tag{3}$$

$$\delta U=\frac{P_2X-Q_2R}{\boldsymbol{U}_2} \tag{4}$$

利用线路等效模型与线路参数计算相邻节点之间相角差为

$$\Delta\varphi=\arctan\frac{\delta U}{\boldsymbol{U}_2+\Delta U} \tag{5}$$

基于上述理论基础，除上级电网平衡节点外，分别以各节点为基准进行计算，得到各组电网谐波电压幅值与实测值的平均偏差。以平均偏差最小组的数据作为同步性筛选的依据，以该组数据对应的基准节点作为故障录波器的基准时间，能够有效缩短多端数据的不同步时间，提高谐波监测数据的辨识精度，因此所得谐波数据更加准确。

为验证上述同步性筛选方法的可行性，本文选取华东某区域 220 kV 高压环网，其为包含多个新能源场站基地的多谐波源电力系统，拓扑结构如图 2 所示。电网故障录波数据分析结果主要包括观测电网各个站点的谐波电压幅值、谐波功率流向，各节点故障录波数据的 5 次谐波电压幅值见表 1。经初步谐波含量分析，发现观测电网 5 次谐波含量最高，因此以下谐波电压数据同步性筛选及谐波溯源工作开展主要以 5 次谐波为例。

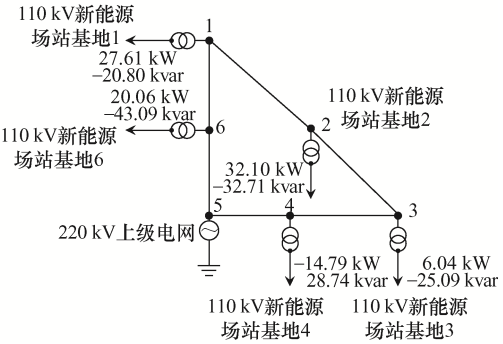


图 2　被观测电网(220 kV 高压环网)拓扑结构

Fig. 2. Topology of observed power grid (220 kV high-voltage ring network)

表 1　220 kV 高压环网各节点 5 次谐波电压幅值

Tab. 1 Fifth harmonic voltage amplitude at each node in 220 kV high-voltage ring network

节点	谐波电压幅值/V	谐波电压百分比/%
1	2 642	2.08
2	2 540	2.00
3	2 515	1.98
4	2 375	1.87
5	2 350	1.85
6	3 099	2.44

对于架空线路，无功功率从电网电压幅值高的节点流向电压幅值低的节点，由此可发现节点 1 与节点 6 之间的 5 次谐波电压幅值存在明显偏差。为了开展精确谐波溯源工作，需要对各个站点谐波监测装置所测得的谐波电压数据进行筛选整定。根据上述谐波电压数据筛选方法所得的 5 组观测电网谐波电压向量幅值及其与实测各节点 5 次谐波电压幅值差值平均值见表 2。

表 2 谐波电压同步性筛选数据结果

Tab. 2 Synchronization screening results of harmonic voltage data

基准节点	***U*_1**/V	***U*_2**/V	***U*_3**/V	***U*_4**/V	***U*_5**/V	***U*_6**/V
1	2 642∠0°	2 481∠0.95°	2 439∠1.59°	1 729∠6.16°	1 267∠6.08°	2 469∠0.91°
2	2 665∠−0.32°	2 540∠0°	2 496∠0.60°	1 797∠4.51°	1 332∠4.31°	2 517∠0.15°
3	2 899∠−0.81°	2 787∠−0.57°	2 515∠0°	1 818∠3.60°	1 696∠2.46°	2 763∠−0.44°
4	3 588∠−0.46°	3 509∠−0.30°	3 332∠0.02°	2 375∠0°	2 470∠0.57°	3 480∠−0.22°
6	3 295∠−0.55°	3 263∠0.03°	3 202∠0.41°	2 632∠2.46°	2 293∠2.08°	3 099∠0°

由表 2 可见，以节点 3 作为基准节点的电网各节点电压幅值偏差最小，因此以表 2 第 3 行数据作为同步性筛选后的各节点 5 次谐波电压向量。

1.2 基于最小二乘法的不同节点谐波电压相角精确筛选方法

虽然 1.1 节所提筛选方法有效缩短了多端数据的不同步时间，但其出发点是选取各节点谐波电压幅值平均偏差最小组的数据，作为同步性筛选的依据。考虑到谐波监测没有装设同步时钟信号设备，其在对母线电压、电流进行高速采样时，对电压相角影响更显著。因此，本节基于最小二乘法提出校正故障录波装置时间基准的方法，进行谐波电压相角的精确筛选。该方法利用最小二乘法对相邻节点不同步角的初值不断迭代，得到最优解，提高数据质量，采用了线路参数，不会受到网络拓扑结构的影响，具有较好的准确性，其流程如图 3 所示。

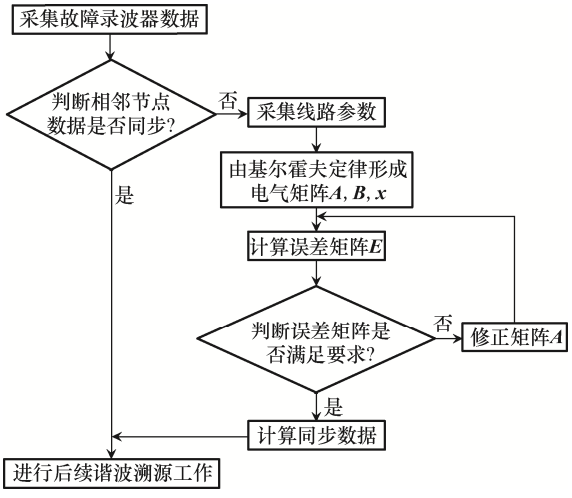


图 3 基于最小二乘法的谐波电压相角精确筛选方法流程

Fig. 3 Flow chart of accurate harmonic voltage phase angle screening method based on least square method

首先，相邻节点之间输电线路模型采用 π 型等值电路，结合线路参数，基于基尔霍夫定律形成相应电气矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\boldsymbol{U}_{1\text{-}5}}{(R+5\mathrm{j}X)L} \\ \dfrac{\boldsymbol{U}_{1\text{-}5}}{(R+5\mathrm{j}X)L}+\boldsymbol{U}_{1\text{-}5}\dfrac{-\mathrm{j}B/2}{5}L-\boldsymbol{I}_{1\text{-}5} \end{bmatrix}= \begin{bmatrix} \dfrac{\boldsymbol{U}_{2\text{-}5}}{(R+5\mathrm{j}X)L}+\boldsymbol{U}_{2\text{-}5}\dfrac{-\mathrm{j}B/2}{5}L-\boldsymbol{I}_{2\text{-}5} \\ \dfrac{\boldsymbol{U}_{2\text{-}5}}{(R+5\mathrm{j}X)L} \end{bmatrix}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta} \tag{6}$$

式中：L 为线路全长；j 为虚数单位；$\boldsymbol{U}_{1\text{-}5}$、$\boldsymbol{I}_{1\text{-}5}$ 分别为首端节点 1 的 5 次谐波电压、电流向量；$\boldsymbol{U}_{2\text{-}5}$、$\boldsymbol{I}_{2\text{-}5}$ 分别为末端节点 2 的 5 次谐波电压、电流向量；δ 为末端电气量相对于首端电气量的相角差，即不同步角。

由于在采集过程中，电压和电流数据的系统误差无法避免，因此引入误差矩阵，式(6)方程可简化为

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{x}+\boldsymbol{E} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{A}$ 为首端节点 1 电气量矩阵；$\boldsymbol{B}$ 为末端节点 2 电气量矩阵；$\boldsymbol{x}$ 为两端电气量不同步角；$\boldsymbol{E}$ 为误差矩阵。在使误差矩阵满足要求的基础上，通过最小二乘法可以不断修正首末两端电气量矩阵。由最小二乘法可知

$$\boldsymbol{x}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{x} \tag{9}$$

在使误差矩阵 $\boldsymbol{E}$ 趋于 0 的条件下，对电气矩阵 $\boldsymbol{A}$ 进行修正，使得方差矩阵 $\boldsymbol{F}$ 最小，$\boldsymbol{F}$ 可表示为

$$\boldsymbol{F}=\sum_{1}^{n}\boldsymbol{x}^{2} \tag{10}$$

重复上述过程直至满足要求。

2　基于不同频段阻抗对比的谐波溯源方法

在第 1 节所提谐波数据同步性筛选的基础上，考虑在存在多谐波源的电力系统中，采用基波谐波阻抗对比结果，对潜在谐波源进行诺顿等效的谐波溯源方法。

2.1　基波频段阻抗和多频段谐波阻抗计算

首先，根据基波潮流数据计算观测电网的各节点基波阻抗，具体表达式为

$$R_{if}+\mathrm{j}X_{if}=\frac{\boldsymbol{U}_{if}}{\boldsymbol{I}_{if}} \tag{11}$$

式中：R_{if} 为基波电阻；X_{if} 为基波电抗；$\boldsymbol{U}_{if}$、$\boldsymbol{I}_{if}$ 分别为由原始基波潮流所得节点 i 的基波相电压、相电流；下标 i 为各节点编号；下标 f 表示基波。

$\boldsymbol{I}_{if}$ 的计算式为

$$\boldsymbol{I}_{if}=\frac{\overset{*}{S}_{if}}{\overset{*}{\boldsymbol{U}}_{if}} \tag{12}$$

式中：$\overset{*}{S}_{if}$ 为节点 i 的基波单相视在功率共轭复数；$\overset{*}{\boldsymbol{U}}_{if}$ 为节点 i 的基波相电压的共轭复数。

根据谐波数据筛选所得的谐波电压向量及谐波监测装置所测谐波功率潮流数据，可计算流出至下级电网的谐波电流向量。各节点的谐波电压向量记为 $\boldsymbol{U}_{ih1}$，各节点流出的谐波电流向量记为 $\boldsymbol{I}_{ih1}$，其计算式为

$$\boldsymbol{I}_{ih1}=\frac{\overset{*}{S}_{ih1}}{\overset{*}{\boldsymbol{U}}_{ih1}} \tag{13}$$

式中：$\overset{*}{S}_{ih1}$ 为节点 i 的 h 次谐波的单相视在功率共轭复数；$\overset{*}{\boldsymbol{U}}_{ih1}$ 为节点 i 的 h 次谐波电压的共轭复数；下标 h 为谐波次数；下标 1 表示第 1 组数据。

基于所得各节点的谐波电压向量 $\boldsymbol{U}_{ih1}$、谐波电流向量 $\boldsymbol{I}_{ih1}$，可计算出各节点的等效谐波阻抗 $R_{ih}+\mathrm{j}X_{ih}$，即

$$R_{ih}+\mathrm{j}X_{ih}=\frac{\boldsymbol{U}_{ih1}}{\boldsymbol{I}_{ih1}} \tag{14}$$

2.2　基于不同频段谐波阻抗综合偏差值对比

基于上述理论得到观测电网不同频段的各节点阻抗，即可将基波阻抗与等效谐波阻抗进行对比并检验其可信度，确定至少 1 个潜在谐波源。判定是否为潜在谐波源的依据是某节点的基波谐波电阻、电抗是否满足

$$\left|R_{ih}-R_{if}\right|<\xi R_{if} \tag{15}$$

$$\left|X_{ih}-hX_{if}\right|<\xi hX_{if} \tag{16}$$

式中，ξ 为最大可信偏差范围占比。

在所得的所有潜在谐波源中选择置信度最低的单一节点 p，即综合偏差值 δ 最大的节点，注入谐波电流 $\Delta\boldsymbol{I}_{ph}$，综合偏差值 δ 的计算式为

$$\delta=\left(\frac{R_{ih}-R_{if}}{R_{if}}\right)^2+\left(\frac{X_{ih}-hX_{if}}{hX_{if}}\right)^2 \tag{17}$$

在节点 p 注入同频次的谐波电流后可得到 1 组新谐波潮流数据，并由此重新计算各潜在谐波源节点的谐波电压向量及流出至下级电网的谐波电流向量。各潜在谐波源节点的谐波电压向量记为 $\boldsymbol{U}_{ih2}$，各节点流出的谐波电流向量记为 $\boldsymbol{I}_{ih2}$，其计算式为

$$\boldsymbol{I}_{ih2}=\frac{\overset{*}{S}_{ih2}}{\overset{*}{\boldsymbol{U}}_{ih2}} \tag{18}$$

式中：$\overset{*}{S}_{ih2}$ 为节点 i 的 h 次谐波的单相视在功率共轭复数；$\overset{*}{\boldsymbol{U}}_{ih2}$ 为节点 i 的 h 次谐波电压的共轭复数；下标 2 表示注入谐波电流 $\Delta\boldsymbol{I}_{ph}$ 后得到的新数据。

2.3　基于诺顿等效各潜在谐波源节点量化溯源

至此，可计算各潜在谐波源节点的诺顿等效模型。对于未二次注入谐波电流，即除节点 p 以外的潜在谐波源节点，其诺顿等效模型计算方法为

$$\boldsymbol{I}_{ih}=\boldsymbol{I}_{ih1}+\frac{\boldsymbol{U}_{ih1}}{Z_{ih}}=\boldsymbol{I}_{ih2}+\frac{\boldsymbol{U}_{ih2}}{Z_{ih}} \tag{19}$$

$$Z_{ih}=\frac{\boldsymbol{U}_{ih1}-\boldsymbol{U}_{ih2}}{\boldsymbol{I}_{ih2}-\boldsymbol{I}_{ih1}} \tag{20}$$

$$\boldsymbol{I}_{ih}=\frac{\boldsymbol{U}_{ih1}\boldsymbol{I}_{ih2}-\boldsymbol{U}_{ih2}\boldsymbol{I}_{ih1}}{\boldsymbol{U}_{ih1}-\boldsymbol{U}_{ih2}} \tag{21}$$

式中：$\boldsymbol{I}_{ih}$为节点i的h次等效谐波电流源的有效值；Z_{ih}为节点i的h次等效谐波。

对于二次注入谐波电流的潜在谐波源节点p，其诺顿等效模型计算方法为

$$\boldsymbol{I}_{ph}=\boldsymbol{I}_{ph1}+\frac{\boldsymbol{U}_{ph1}}{Z_{ph}}=\boldsymbol{I}_{ph2}+\frac{\boldsymbol{U}_{ph2}}{Z_{ph}}-\Delta\boldsymbol{I}_{ph} \tag{22}$$

$$Z_{ph}=\frac{\boldsymbol{U}_{ph1}-\boldsymbol{U}_{ph2}}{\boldsymbol{I}_{ph2}-\boldsymbol{I}_{ph1}-\Delta\boldsymbol{I}_{ph}} \tag{23}$$

$$\boldsymbol{I}_{ph}=\frac{\boldsymbol{U}_{ph1}\boldsymbol{I}_{ph2}-\boldsymbol{U}_{ph2}\boldsymbol{I}_{ph1}-\boldsymbol{U}_{ph1}\Delta\boldsymbol{I}_{ph}}{\boldsymbol{U}_{ph1}-\boldsymbol{U}_{ph2}} \tag{24}$$

式中：$\boldsymbol{I}_{ph}$为节点p的h次等效谐波电流源的有效值；Z_{ph}为节点p的h次等效谐波；$\boldsymbol{U}_{ph1}$、$\boldsymbol{I}_{ph1}$分别为初始潮流下节点p的谐波电压、谐波电流；$\boldsymbol{U}_{ph2}$、$\boldsymbol{I}_{ph2}$分别为注入谐波电流后新潮流下节点p的谐波电压、谐波电流。

3 算例仿真分析

搭建含多个新能源场站基地的多谐波源电力系统，对本文所提基于不同频段阻抗对比的谐波溯源方法进行仿真验证。华东某区域的新能源基地仿真模型如图 2 所示，共包含 6 个节点，其中 1 个节点为 220 kV 上级电网节点(即基波源节点)，其余 5 个节点为 220/110 kV 变电站，分别与多个新能源基地进行电气连接。输电线路均采用 π 型等值电路。由于在本文观测电网监测数据中，5 次谐波是主要的谐波成分，以下谐波电压数据筛选及谐波溯源工作开展均以 5 次谐波为例。

采用初始状态下观测电网中各节点的基波功率数据、三相基波相电压向量数据，根据式(12)计算得到初始状态下各节点三相基波相电流向量数据。同理，采用初始状态下各节点的 5 次谐波功率数据、ABC 三相的 5 次谐波相电压向量数据，根据式(13)计算得到初始状态下各节点 ABC 三相的 5 次谐波电流向量数据。

基于上述初始状态下观测电网各节点基波、谐波潮流数据，根据式(11)、式(14)计算得到各节点单相基波谐波阻抗数据。再根据式(15)~式(17)进行同节点不同频段的阻抗对比，即对比同节点的基波谐波阻抗，可以确定除基波源节点以外的节点 1、节点 3、节点 4 为潜在谐波源节点。在基波谐波阻抗对比结果中选取最大可信偏差范围占比ξ最低，即综合偏差值δ最大的潜在谐波源节点3注入幅值为 20 A 的对称三相 5 次谐波电流后，得到观测电网注入谐波电流$\Delta\boldsymbol{I}_{ph}$后新谐波功率数据，见表 3。新谐波潮流中各节点谐波相电压向量数据见表 4，仿真中三相数据对称，因此仅列举了 A 相仿真数据。

表 3 注入谐波电流 $\Delta\boldsymbol{I}_{ph}$ 后新谐波潮流功率

Tab.3 New harmonic power flow after injecting harmonic current $\Delta\boldsymbol{I}_{ph}$

节点编号	谐波有功功率/W	谐波无功功率/var
3	358 272.24	−2 102 607.16
2	466 798.34	587 687.62
1	158 644.83	−1 079 555.30
4	435 629.54	−1 019 346.63
5	146 702.44	1 843 462.39
6	337 180.53	351 485.79

表 4 新谐波潮流中 A 相谐波电压数据

Tab. 4 Harmonic voltage data of phase A in new harmonic power flow

节点编号	谐波电压有效值/V	谐波电压相角/(°)
3	9 004.19	−51.94
2	9 137.06	−52.45
1	9 052.18	−52.30
4	8 856.91	−51.68
5	8 814.96	−52.09
6	9 131.34	−52.48

结合表 4 并根据式(19)~式(24)，可量化潜在谐波源节点，诺顿等效结果见表 5。

表 5　潜在谐波源节点诺顿等效结果

Tab. 5 Norton equivalent results at potential harmonic source nodes

三相	节点编号	等效谐波阻抗 Z/Ω	电流源幅值/A	电流源相角/(°)
A 相	3	193.66+141.31j	70.74	0.01
	4	342.92+655.52j	35.38	−0.01
	1	116.89−74.69j	21.19	−0.03
B 相	3	193.66+141.31j	70.74	−119.99
	4	342.92+655.52j	35.38	−120.01
	1	116.89−74.69j	21.19	−120.03
C 相	3	193.66+141.31j	70.74	120.01
	4	342.92+655.52j	35.38	119.99
	1	116.89−74.69j	21.19	119.96

4　结语

正确处理实际电网中谐波监测装置在不同节点的采样数据，以减小数据时间尺度的不同步性偏差，是开展精确谐波溯源工作的重要前提。本文针对谐波数据采样存在不同时性的问题，提出了以不同节点时间尺度为基准筛选谐波电压幅值数据，并基于最小二乘法对电压相角进一步精确筛选，可以有效减小监测数据的冗余程度，提高溯源过程中监测数据的适用性。在此基础上，聚焦不同频段阻抗特性的复杂化问题，提出了 1 种基于同节点多频段阻抗对比的多谐波源溯源方法。最后，通过搭建含多个新能源场站基地的多谐波源电力系统仿真算例，对所提方法的有效性进行了充分验证。结果显示，所提谐波溯源方法通过横向对比同节点不同频段的阻抗结果，进行相应精确诺顿等效，可量化表征其谐波出力贡献度。

参考文献：

[1] 徐德鸿, 陈文杰, 何国锋, 等. 新能源对电力电子提出的新课题[J]. 电源学报, 2014, 12(6): 4-9, 30.
Xu Dehong, Chen Wenjie, He Guofeng, et al. New power electronics topics brought by the development of renewable energy [J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(6): 4-9, 30. (in Chinese)

[2] 李海盼, 年珩, 胡彬, 等. 风电并网系统宽频振荡分析与抑制方法综述[J]. 新型电力系统, 2023(3): 237-255.
Li Haipan, Nian Heng, Hu Bin, et al. Review of analysis and suppression methods for wide-band oscillation in wind power grid-connected systems [J]. New Type Power Systems, 2023(3): 237-255. (in Chinese)

[3] 叶诚炜, 何震, 曾平良, 等. 光伏并网系统的等效惯量评估及调频控制参数整定[J/OL]. 电源学报, 1-13. (2024-04-26)[2024-10-23]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=_f4imrocbXmWg88MV8dGUXkYO9pv0KgTyxwPSXy4w62-fgV7Oho0HwDdzgwNYpiGi2QdsYeZPK1uqw-Rrfqc_S7onwzKST4xi4YdbpRlhYUKSw4ngkjqJ7Sl8Luow7DYCGEsGk4ujpJwxkTdqw2bMN8n0wUPf4xgKJLo0acZfFIfQzNSu-BTDTYB3S3r-kCp&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
Ye Chengwei, He Zhen, Zeng Pingliang, et al. Inertia evaluation and frequency modulation control parameter tuning for photovoltaic grid-connected system [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-13. (2024-04-26)[2024-10-23]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=_f4imrocbXmWg88MV8dGUXkYO9pv0KgTyxwPSXy4w62-fgV7Oho0HwDdzgwNYpiGi2QdsYeZPK1uqw-Rrfqc_S7onwzKST4xi4YdbpRlhYUKSw4ngkjqJ7Sl8Luow7DYCGEsGk4ujpJwxkTdqw2bMN8n0wUPf4xgKJLo0acZfFIfQzNSu-BTDTYB3S3r-kCp&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)

[4] 周柯, 涂春鸣, 谢伟杰, 等. 宽频域谐波谐振劣化问题及其对谐波标准的影响分析[J]. 电工技术学报, 2018,

33(S2): 567-576.
Zhou Ke, Tu Chunming, Xie Weijie, et al. Analysis on the deterioration of broadband harmonic resonance and its influence on harmonic standards [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 567-576. (in Chinese)

[5] 吴宇奇, 李正天, 林湘宁, 等. 基于变电站高频滤波边界特性的配电网线模行波选线方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 2072-2088.
Wu Yuqi, Li Zhengtian, Lin Xiangning, et al. The faulty line selection method using line mode traveling wave based on high-frequency filtering characteristics of the substation line boundary in the distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 2072-2088. (in Chinese)

[6] 付勉, 刘志涵, 宋振浩, 等. 配电网络电能质量综合治理设备优化配置策略[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 336-344.
Fu Mian, Liu Zhihan, Song Zhenhao, et al. Optimal allocation strategy for comprehensive control equipment of power quality in distribution area [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 336-344. (in Chinese)

[7] 唐昆明, 蔡明, 罗建, 等. 基于奇异值分解的非线性负荷谐波源定位方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 96-100.
Tang Kunming, Cai Ming, Luo Jian, et al. Harmonic source location based on singular value decomposition method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 96-100. (in Chinese)

[8] 孔德志, 杨远航, 卢佳, 等. 非同源故障录波数据同步方法[J]. 云南电力技术, 2021, 49(2): 3-6, 10.
Kong Dezhi, Yang Yuanhang, Lu Jia, et al. Method of synchronizing fault recording data on both sides of the line [J]. Yunnan Electric Power, 2021, 49(2): 3-6, 10. (in Chinese)

[9] 熊杰锋, 程桂林. 电力系统谐波溯源方法综述[J]. 电测与仪表, 2021, 58(1): 1-10.
Xiong Jiefeng, Cheng Guilin. Review of harmonics source traceability methods in power system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(1): 1-10. (in Chinese)

[10] 胡彬. 双馈风电机组并网稳定运行分析及同步控制策略研究[D]. 杭州：浙江大学, 2023.
Hu Bin. Investigation on grid-connected stability and synchronization control strategy of DFIG wind power system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023. (in Chinese)

[11] Cataliotti A, Cosentino V. A new measurement method for the detection of harmonic sources in power systems based on the approach of the IEEE std. 1459–2000 [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 332-340.

[12] 袁林, 杨洪耕, 王智琦, 等. 基于区间约束的主谐波电流来源判别方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 143-148.
Yuan Lin, Yang Honggeng, Wang Zhiqi, et al. Identification method for main source of harmonic current based on boundary restriction [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 143-148. (in Chinese)

[13] 许明夏, 林平, 张涛, 等. 有源电力滤波器重复控制方法的设计[J]. 电源学报, 2012, 10(2): 16-20, 83.
Xu Mingxia, Lin Ping, Zhang Tao, et al. Design of the repetitive control method for active power filter [J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(2): 16-20, 83. (in Chinese)

[14] Xu W, Liu Xian, Liu Yilu. An investigation on the validity of power - direction method for harmonic source determination [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 214-219.

[15] Chen Chaoying, Liu Xiuling, Koval D, et al. Critical impedance method - a new detecting harmonic sources method in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 288-297.

[16] 张建明. 电力系统谐波源识别及谐波责任划分的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2015.
Zhang Jianming. Research on harmonic source identification and harmonic responsibility division in power system [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2015. (in Chinese)

[17] 艾永乐, 郑建云. 基于谐波有功功率贡献量的主谐波源定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 16-22.
Ai Yongle, Zheng Jianyun. Localization of the main harmonic source based on the harmonic active power

contributions [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 16-22. (in Chinese)

[18] 蔡明, 唐昆明, 张太勤. 基于参数辨识方法的谐波源定位[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 134-138.
Cai Ming, Tang Kunming, Zhang Taiqin. Harmonic source localization based on parameter identification [J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 134-138. (in Chinese)

[19] Shu Qin, Wu Yayue, Xu Fangwei, et al. Estimate utility harmonic impedance via the correlation of harmonic measurements in different time intervals [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 2060-2067.

[20] 徐方维, 王川, 郭凯, 等. 基于无相位实测数据的系统侧谐波阻抗估计方法改进[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3149-3158.
Xu Fangwei, Wang Chuan, Guo Kai, et al. An improved utility harmonic impedance estimation method based on measurement data without phase angle [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3149-3158. (in Chinese)

[21] 毛荀, 占勇, 刘敏, 等. 基于先导节点选取下优化下垂控制的孤岛运行微电网负荷功率分配方法[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 126-132.
Mao Xun, Zhan Yong, Liu Min, et al. Load power distribution method of islanding microgrid with optimal droop control based on the selection of pilot nodes [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 126-132. (in Chinese)



丁艺

作者简介：

丁艺(2001—)，女，硕士研究生。研究方向：新能源并网运行技术，电力系统谐波治理。E-mail：3190102011@zju.edu.cn。

王羽(1985—)，男，本科，高级工程师。研究方向：海上风电技术，电力储能谐波治理技术。E-mail：50787031@qq.com。

何震(1991—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，专职研究员。研究方向：模块化多电平变换器及其在高压直流输电中的应用，新型电力系统的主动支撑技术。E-mail：hezhen_hz@zju.edu.cn。

年珩(1978—)，男，博士，教授。研究方向：新能源技术，交直流混合供电。E-mail：nianheng@zju.edu.cn。

章钧星(1997—)，男，本科。研究方向：新能源技术，新能源谐波治理。E-mail：20040960@ceic.com。

(责任编辑：耿越)