

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222578

基于广义折刀最小二乘估计的系统侧谐波阻抗计算方法

吴玉涛¹, 张瑗君², 胡元潮¹, 陈小娣³, 张 阳⁴

(1. 山东理工大学电气与工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 国网山东省电力公司寒亭区供电公司, 山东 潍坊 261100;
3. 国网山东省电力公司泰安供电公司, 山东 泰安 271000; 4. 国网山东省电力公司潍坊供电公司, 山东 潍坊 261000)

摘要: 针对背景谐波电压波动和异常谐波测量样本显著影响谐波阻抗估计准确性的问题, 提出一种基于广义折刀最小二乘估计和数据筛选的系统侧谐波阻抗的计算方法。根据波动量法与最小二乘回归法假设的一致性原理, 筛选背景谐波电压波动平稳的时段用于回归计算, 抑制背景谐波电压波动对阻抗估计的影响。依据折刀法原理对谐波测量数据进行再抽样, 并结合广义最小二乘法, 进一步抑制异常谐波测量样本对回归计算的影响, 最后基于仿真和工程实测数据验证了所提方法的准确性和实用性。

关键词: 系统侧谐波阻抗; 折刀原理; 广义最小二乘; 背景谐波; 数据筛选

中图分类号: TM935 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)12-0215-05

1 引言

目前绝大多数中小型水电站都存在由高耗能企业负荷导致的谐波污染问题, 这给水电站的保护、绝缘等系统带来安全隐患^[1-2]。随着新能源设备和电力电子装置的大量并网, 谐波污染问题变得愈发严重^[1-10], 为了保障电力系统的安全、稳定运行, 必须实施可靠有效的谐波治理方案, 而准确计算系统侧谐波阻抗是其必要前提^[5-10]。系统侧谐波阻抗计算方法主要分为“干预法”和“非干预法”两类。由于“非干预法”不干预电网运行状态, 且其所需的谐波数据在实际工程中较易测得, 因此得到广泛关注。“非干预法”主要包括波动量法^[5]、回归法^[6]、协方差法^[7]和独立成分分析法^[8]等经典方法, 以及贝叶斯^[9]和粒子群^[10]等学习算法。波动量法和协方差法分别基于公共连接点(PCC)处谐波电压和谐波电流波动量的比值特性、PCC处谐波电流与系统侧谐波电压近似独立^[7]计算系统侧谐波阻抗。这两种方法均需假设系统侧谐波电流和阻抗的幅值远小于用户侧, 而实际工程往往难以满足该条件; ICA法根据系统侧和用户侧谐波源的独立性将两者从观测信号中

分离^[8], 然而当系统中存在明显的正弦扰动时, 两侧谐波电流信号的相关度显著提高; 另外, ICA法分离出的谐波电流信号具有尺度缩放和次序不稳定性, 因此ICA法在实际应用中需要附加先验条件以确定分离信号的归属。回归类方法通过建立回归方程求解回归系数确定系统侧谐波阻抗^[6], 其关键假设是背景谐波电压恒定, 而实际工程中背景谐波电压存在一定波动; 同时, 由测量装置误差和测量环境中噪声信号导致的若干异常测量样本亦会对回归结果产生影响。对此, 本文提出一种基于折刀原理和广义最小二乘估计的系统侧谐波阻抗计算方法, 并通过仿真和工程实测数据验证了该方法的准确性和实用性。

2 “非干预法”的基本原理

2.1 “非干预法”基本模型

“非干预法”基于PCC处的谐波电压、电流测量数据计算系统侧谐波阻抗。PCC两侧的诺顿等效电路^[5-10]见图1, 其中 V_p 、 I_p 分别为PCC处的谐波电压和谐波电流; I_u 、 I_c 分别为系统侧和用户侧的等效谐波电流源; Z_u 、 Z_c 分别为系统侧

收稿日期: 2022-12-12, 修回日期: 2023-03-29

基金项目: 山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QE215)

作者简介: 吴玉涛(1994-), 男, 硕士研究生、助理工程师, 研究方向为电能质量、谐波状态估计、配电工程建设等, E-mail: 2287094489@qq.com

通讯作者: 胡元潮(1988-), 男, 博士、讲师、硕导, 研究方向为电力系统防雷与接地技术、电能质量、电工新材料及其应用技术等, E-mail: huyuanchao3211@126.com

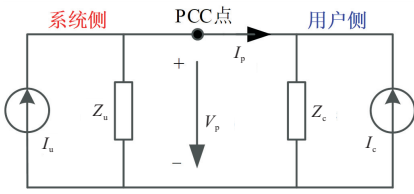


图 1 PCC 两侧的诺顿等效电路模型

Fig. 1 Norton equivalent circuit model on both sides of PCC and user side's equivalent harmonic impedance.

图 1 所示的电路模型中存在 4 个未知变量 Z_u 、 Z_c 、 I_u 、 I_c ，2 个已知变量 V_p 、 I_p ，所以 Z_u 的求解必然是欠定问题。“非干预法”结合工程实际，在求解 Z_u 的过程中添加符合实际的约束，以减少未知方程个数，进而得到 Z_u 的估计值。

2.2 基于最小二乘回归的谐波阻抗估计原理

根据等效电路模型(图 1)，得到 PCC 处谐波电压与谐波电流的关系为：

$$V_p = (I_u - I_p) Z_u \quad (1)$$

根据电源变换定理，式(1)可改写为：

$$V_p = V_u - Z_u I_p \quad (2)$$

式中， V_u 为系统侧谐波电压，满足 $V_u = Z_u I_u$ 。

将式(2)按照实部和虚部展开，即：

$$\begin{cases} V_{ur} = V_{pr} + Z_{ur} I_{pr} - Z_{uy} I_{py} \\ V_{uy} = \dot{V}_{py} + Z_{ur} I_{py} + Z_{ur} I_{pr} \end{cases} \quad (3)$$

式中， V_{ur} 、 V_{uy} 、 I_{pr} 分别为 V_p 、 I_p 、 Z_u 的实部； I_{py} 、 Z_{uy} 、 Z_{uy} 分别为 V_p 、 I_p 、 Z_u 的虚部。

对式(3)进一步变形，得到回归方程：

$$\begin{cases} V_{pr} = V_{ur} - Z_{ur} I_{pr} + Z_{uy} I_{py} \\ V_{py} = V_{uy} - Z_{uy} I_{pr} - Z_{ur} I_{py} \end{cases} \quad (4)$$

假设有 n 个采样时刻，即 V_{pr} 、 V_{py} 均为 $n \times 1$ 阶向量；分别定义观测矩阵 $W_x = [1 \quad -I_{pr} \quad I_{py}]$ ， $W_y = [1 \quad -I_{pr} \quad -I_{py}]$ ；待估计量 $\beta_x = [V_{ur} \quad Z_{ur} \quad Z_{uy}]^T$ ， $\beta_y = [V_{uy} \quad Z_{uy} \quad Z_{ur}]^T$ ，则式(4)可写为：

$$\begin{cases} V_{pr} = W_x \beta_x \\ V_{py} = W_y \beta_y \end{cases} \quad (5)$$

式中， W_x 、 W_y 均为 $n \times 3$ 阶矩阵； β_x 、 β_y 均为 3×1 阶向量。

β_x 、 β_y 的最小二乘解 $\hat{\beta}_x$ 、 $\hat{\beta}_y$ 的形式为：

$$\begin{cases} \hat{\beta}_x = (W_x^T W_x)^{-1} W_x^T V_{pr} \\ \hat{\beta}_y = (W_y^T W_y)^{-1} W_y^T V_{py} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(4)~(6)可看出，基于最小二乘回归原理的系统侧谐波阻抗计算方法将系统侧谐波电压 V_u 视为恒定值，因此仅在背景谐波电压稳定时，该方法才能取得相对准确的结果。随着电网接入的非线性负载增多，谐波分布日益复杂，系统

侧的谐波电压存在明显波动，普通最小二乘法愈发难以准确计算系统侧谐波阻抗。

3 广义折刀最小二乘估计

3.1 广义最小二乘估计和折刀原理

谐波测量数据中除了由监测装置导致的固有随机测量误差，还存在由供电侧背景谐波电压周期性波动引起的干扰，这类干扰不符合传统最小二乘回归法的基本假设(干扰项具有同方差性且不具备序列相关性)。广义最小二乘回归法根据自相关系数对解释变量附加权重，使加权后的回归方程的残差具有同方差性。以式(5)中的回归方程 $V_{pr} = W_x \beta_x$ 为例，若将最小二乘误差项 $(V_{pr} - W_x \hat{\beta}_x)$ 记作 γ ，则其一阶自相关系数的计算公式为：

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (\gamma_i - \mu_\gamma) (\gamma_{i+1} - \mu_\gamma)}{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \mu_\gamma)^2} \quad (7)$$

式中， μ_γ 为最小二乘误差项 γ 的均值。

根据式(6)、(7)可以得到 β_x 的广义最小二乘解 $\hat{\beta}_x^*$ 的形式^[12]，即：

$$\hat{\beta}_x^* = (W_x^T H^{-1} W_x)^{-1} W_x^T H^{-1} V_{pr} \quad (8)$$

$$\text{其中 } H = \frac{1}{1 - \varphi^2} \begin{pmatrix} 1 & \varphi & \cdots & \varphi^{n-1} \\ \varphi & 1 & \cdots & \varphi^{n-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi^{n-1} & \varphi^{n-2} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

谐波监测装置采集的谐波测量数据中存在的异常样本会对回归过程产生影响，广义最小二乘估计通过对解释变量附加权重的方式在一定程度上抑制了该影响，在此基础上结合折刀法，可从样本抽样的角度进一步降低回归过程对异常值的敏感程度，提高广义回归计算的稳健性。折刀法是一种再抽样的非参数估计方法，该方法的原理是依次丢弃观测样本中的第 i 组样本，并研究剩余 $n-1$ 组样本的性质^[11]。通过对数据反复重采样，能够降低异常数据对回归结果的影响权重，具体原理参考文献[11]。

广义折刀最小二乘估计首先依次对除第 i 组样本以外的 $n-1$ 组观测样本进行广义最小二乘回归。以 $V_{pr} = W_x \beta_x$ 为例，记 W_{-ix} 为剔除第 i 个谐波观测值后的观测矩阵，则由剩余 $n-1$ 组谐波观测数据得到的广义最小二乘估计量 $\hat{\beta}_{-i}$ 的计算公式为：

$$\hat{\beta}_{-i}^* = (W_{-ix}^T H^{-1} W_{-ix})^{-1} W_{-ix}^T H^{-1} V_{-ipr} \quad (9)$$

基于广义折刀原理的最小二乘法的解 $\hat{\beta}_x^-$ 的形式为:

$$\hat{\beta}_x^- = n\hat{\beta}_x^* - \frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{\beta}_{x-i}^* \quad (10)$$

3.2 系统侧谐波电压筛选方法

基于折刀原理和广义最小二乘估计提出了系统侧谐波阻抗的求解方法,然而理想的谐波电压、电流数据是将该方法优势最大化的前提。所谓“理想”是指测量数据满足回归法的基本假设,即系统侧的背景谐波电压波动平稳。因此,提出一种筛选背景谐波电压波动平稳时段的方法。即将差分运算 $V_p(n) - V_p(n-1)$ 记作 ΔV_p , 则对式(2)左右两端取差分运算,可得:

$$\Delta V_p = \Delta V_u - Z_u \Delta I_p \quad (11)$$

将式(11)左右两端同除以 ΔI_p 得:

$$\Delta V_p / \Delta I_p = -Z_u + \Delta V_u / \Delta I_p \quad (12)$$

根据式(12),当系统侧电压波动平稳即 $|\Delta V_u| \approx 0$ 时, $\Delta V_p / \Delta I_p \approx -Z_u$ 。然而在测量时段内,系统侧的谐波电压波动 ΔV_u 并非始终平稳,故不能直接通过式(12)计算 Z_u 。

结合式(4),基于广义折刀原理的最小二乘法要求系统侧谐波电压近似为常数,即其波动近似为零,为了筛选 ΔV_u 平稳的时段,先根据式(12)计算测量时段内 $n-1$ 组谐波电压、电流波动量之间的比值,将得到的比值进行排序分组,假设共分为 k 组 ($k < n$): $(\Delta V_p / \Delta I_p)_1 \sim (\Delta V_p / \Delta I_p)_k$ 。分别对 k 组谐波观测数据采用广义折刀最小二乘估计,得到 k 组估计值 $\hat{\beta}_{x1}^- \sim \hat{\beta}_{xk}^-$ 和 $\hat{\beta}_{y1}^- \sim \hat{\beta}_{yk}^-$, 将式(10)、(12)得到的谐波阻抗之差定义为 ϵ , 并根据最小化 ϵ 的原则筛选出最理想的谐波测量数据,即:

$$\min \epsilon = \min |(\hat{Z}_{ux} + j\hat{Z}_{uy})_i + M(\Delta V_{pi} / \Delta I_{pi})| \quad (13)$$

式中, $(\hat{Z}_{ux} + j\hat{Z}_{uy})_i$ 为式(10)根据第 i 组谐波测量数据估算得到的阻抗解; $M(\cdot)$ 为变量 \cdot 的平均值。

式(13)所示的最小化约束能筛选出所有谐波测量数据通过式(10)、(12)估算的 \hat{Z}_u 最相似的时段,该时段的谐波电压波动程度最为平稳,最符合回归方程的假设,由该时段的谐波测量数据回归计算得到的系统侧谐波阻抗也是最准确的。

假设第 m 组 ($m \leq k$) 测量数据对应的 ϵ 最小,那么系统侧谐波阻抗的最优估计值 \hat{Z}_{u-op} 为式(10)与式(12)估算结果的平均值,即:

$$\hat{Z}_{u-op} = [(\hat{Z}_{ux} + j\hat{Z}_{uy})_m + M(\Delta V_{pm} / \Delta I_{pm})] / 2 \quad (14)$$

4 仿真和实测数据验证

4.1 软件仿真

在 Matlab 软件中搭建如图 1 所示的诺顿等效电路,并在 PCC 处采集 1 000 组含噪声的电压和电流数据,经傅里叶变换得到其中的 3 次谐波分量。通过波动量法(方法 1)、广义最小二乘回归法(方法 2)、协方差法(方法 3)、快速独立成分分析法(方法 4)和本文所提出的方法(方法 5)分别计算系统侧 3 次谐波阻抗,5 种方法在两种仿真条件下的谐波阻抗幅值和角度的相对误差 δ_1 、 δ_2 见表 1。

表 1 5 种方法的仿真相对误差

Tab. 1 Simulation relative error of 5 methods %							
方法	相对误差	第 1 组仿真 ($ I_u /\Delta$)			第 2 组仿真 ($ Z_u /\Omega$)		
		5	15	25	15	20	25
1	δ_1	7.45	14.98	26.47	9.74	24.43	34.30
	δ_2	7.14	13.83	22.06	12.47	24.15	33.11
2	δ_1	6.17	10.59	16.51	11.01	17.49	24.62
	δ_2	8.61	12.06	19.25	9.01	12.03	20.05
3	δ_1	5.40	9.28	15.40	8.49	12.47	22.01
	δ_2	8.45	10.43	11.42	8.61	8.43	18.42
4	δ_1	5.45	7.78	12.33	9.21	12.03	25.25
	δ_2	9.23	14.68	20.77	12.11	15.68	19.77
5	δ_1	3.54	6.41	9.54	6.01	8.53	12.33
	δ_2	6.75	9.61	12.90	6.17	9.19	14.12

δ_1 、 δ_2 的计算公式为:

$$\begin{cases} \delta_1 = [||Z_u| - |\hat{Z}_u|| / |Z_u|] \times 100\% \\ \delta_2 = [|\varphi(Z_u) - \varphi(\hat{Z}_u)| / |\varphi(Z_u)|] \times 100\% \end{cases} \quad (15)$$

用户侧谐波电流基准幅值 $|I_c|$ 设置为 35 A,对其附加 10% 的随机干扰和 2% 的正弦干扰;用户侧和系统侧谐波电流基准角度 $\varphi(I_c)$ 、 $\varphi(I_u)$ 分别设置为 50° 、 30° ,并对其附加 5% 的随机干扰;用户侧谐波阻抗 Z_c 设置为恒定值 $17 + j23 \Omega$;在第 1 组仿真中, Z_u 设为恒定值 $7 + j12 \Omega$,在第 2 组仿真中 Z_c 另行设置。

4.1.1 第 1 组仿真测试

第 1 组仿真的目的是检验系统侧的背景谐波波动对谐波阻抗计算方法的影响。分别设置 $|I_u|$ 的基准值为 5、15、25 A,附加基准幅值 3% 的随机干扰及 1% 的正弦干扰。图 2 为 $|I_u|$ 的基准值为 15 A 时, PCC 处的 3 次谐波电压 $|V_p|$ 和电流 $|I_p|$ 测量数据,图 3~5 为该参数条件下,所提方法计算系统侧谐波阻抗的过程。

由图 3 可看出,所提方法将 PCC 处谐波电压和电流波动比值按大小进行排序分组,共分为 14 组,再按照该分组顺序对各组谐波电压和电流分

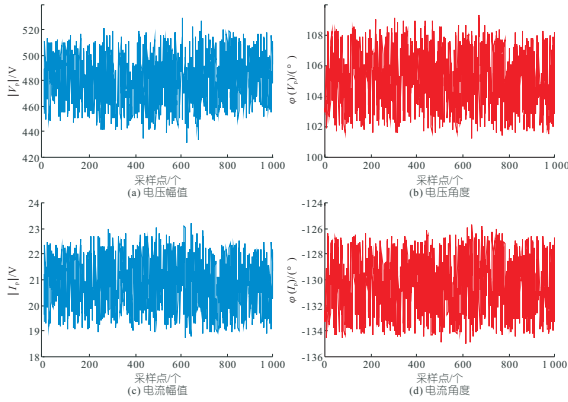


图2 3次谐波电压和电流测量数据 ($|I_u| = 15 \text{ A}$)

Fig. 2 3rd harmonic voltage and current measurement data ($|I_u| = 15 \text{ A}$)

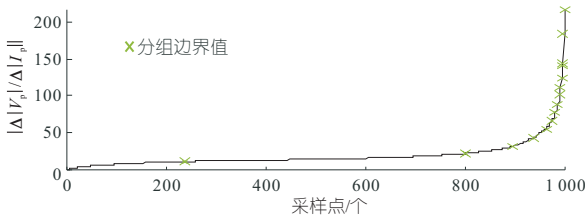


图3 3次谐波电压和电流波动比值的分组

Fig. 3 Grouping of 3rd harmonic voltage and current fluctuation ratio

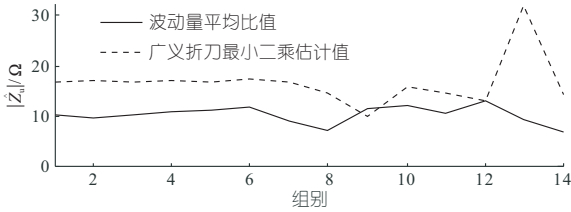


图4 各组测量数据的计算结果

Fig. 4 Calculation results for each group of measurement data

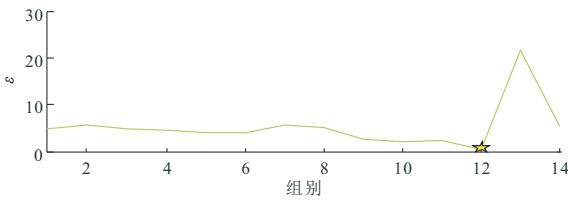


图5 各组测量数据的 ϵ 值

Fig. 5 ϵ for each group of measurement data

别通过式(10)、(12)计算系统侧谐波阻抗,最后分别比较14组计算结果并计算各组结果的差异指标 ϵ (图4、5),发现差异指标 ϵ 最小的测量数据为第12组 ($\epsilon \approx 1.24$),因此根据式(14)得到的 Z_u 最优估计值 \hat{Z}_{u-op} 为该组测量数据对应的两个估计结果的平均值 $7.64 + j10.52 \Omega$ 。根据表1,在该参数条件下,方法5的幅值和角度误差分别为6.41%、9.61%,明显低于其他4种方法。同时,当系统侧谐波电流远小于用户侧 ($|I_u| = 5 \text{ A}$) 时,5种方法的准确度相差不大,平均相对误差均低于15%;而随着 $|I_u|$ 的增大,5种方法的误差

明显上升,但方法5的误差增长速度明显低于其他方法。

4.1.2 第2组仿真测试

第2组仿真的目的是探究PCC两侧谐波阻抗幅值相对大小对方法的影响。设置 $|I_u|$ 为恒定值15 A,并分别将 $|Z_u|$ 设置为15、20、25 Ω , Z_u 设置为 60° 。由表1可看出,随着 $|Z_u|$ 逐渐增大,方法1~5的误差均有不同程度的增大,相比之下,方法5的误差增长速度较低。当 $|Z_u|$ 达到25 Ω 时,方法5的幅值和角度相对误差分别为12.33%、14.12%,说明该方法在PCC两侧的谐波阻抗幅值较接近的条件下,仍能保持较高准确性。

4.2 工程实测数据测试

为了进一步验证所提方法在实际工程中的应用效果,通过5种方法根据国网某供电公司提供的3次谐波电压和电流的现场实测数据(图6,共1440个采样点)计算系统侧谐波阻抗,5种方法计算的谐波阻抗幅值分别为7.85、9.65、13.63、19.47、15.86 Ω 。可见根据该供电公司提供的工程规划资料等信息,工程实例中的系统侧谐波阻抗的幅值约为17 Ω 。

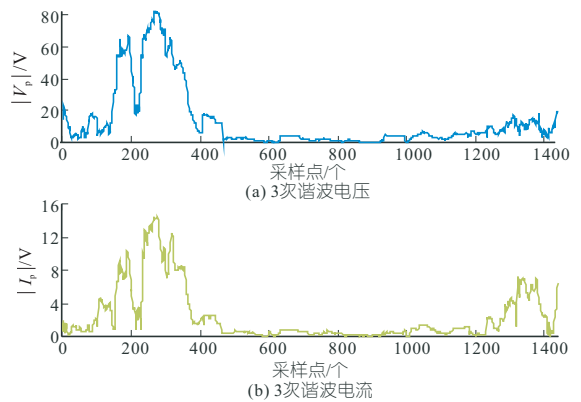


图6 3次谐波电压、电流的工程实测数据

Fig. 6 Actual measured data of 3rd harmonic voltage and current

根据图6,测量点处的3次谐波电压 $|V_p|$ 和电流 $|I_p|$ 的波形均存在明显起伏,说明在采样周期内,背景谐波电压并非平稳,而具有明显波动。结合5种方法计算的谐波阻抗幅值,方法1~4的计算结果明显偏离参考值17 Ω ,造成这种结果的原因为方法1~3易受背景谐波波动的影响。同时在案例中PCC两侧谐波电流或并非完全独立,所以方法4的计算结果也不够准确;方法5首先筛选出谐波电压平稳的时段,进而对每组测量数据基于折刀抽样法和广义最小二乘估计法计算谐波阻抗,最终得到最接近参考值17 Ω 的计

算结果(15.82 Ω),相对误差仅为 6.9%,说明该方法在实际工程中具有良好的应用效果。

5 结论

a. 通过比较 PCC 处谐波电压和电流的波动量比值,以及系统侧谐波阻抗回归估算值的相似度,筛选背景谐波波动近似平稳的时段,保证用于回归计算的数据可靠性。

b. 提出通过广义折刀最小二乘估计的系统侧谐波阻抗计算方法。相较于同类方法,所提方法受背景谐波波动及异常谐波测量样本的影响较低,具有一定优势。

参考文献:

[1] 马士英,粟时平,李和平. 中小型水电站谐波污染的特点及抑制措施[J]. 电力自动化设备,2005,25(8):39-42.
 [2] 陈方. 石塘水电站机组并网失败原因分析及对策[J]. 水电能源科学,2010,28(4):122-123.
 [3] 张立臣,金运策,徐步权,等. 基于改进蚁群算法的独立分量谐波检测方法[J]. 水电能源科学,2013,31(6):218-221.

[4] 张涵瑞,王雅静,张晓阳,等. 双自适应神经网络和快速 TLS-ESPRIT 的谐波检测方法及其仿真[J]. 水电能源科学,2020,38(9):203-205,113.
 [5] 惠锦,杨洪耕,叶茂清. 基于阻抗归一化趋势判别的谐波发射水平评估[J]. 中国电机工程学报,2011,31(10):73-80.
 [6] 贾秀芳,华回春,曹东升,等. 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.
 [7] HUI JIN, YANG HONGGENG, LIN SHUNFU, et al. Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors[J]. IEEE transactions on power delivery, 2010, 25(3): 1778-1786.
 [8] 李庆,张金平,谭鹏. 基于参数自适应 FastICA 的风电场谐波发射水平评估[J]. 水电能源科学,2019,37(5):202-206.
 [9] 赵熙,杨洪耕. 基于贝叶斯定理的系统谐波阻抗估计[J]. 中国电机工程学报. 2016,36(11):2935-2943.
 [10] 颜昕昱,钟良亮,林顺富. 基于粒子群独立成分分析的系统谐波阻抗估计[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(11):81-87.
 [11] 赵琳. 刀切贝叶斯估计方法[D]. 吉林:吉林大学,2008.

Utility Harmonic Impedance Calculation Method Based on Generalized Jackknife Least Square Estimation

WU Yu-tao¹, ZHANG Yuan-jun², HU Yuan-chao¹, CHEN Xiao-di³, ZHANG Yang⁴

(1. Electrical and Electronic Engineering College, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. State Grid Hanting Electric Power Company, Weifang 261100, China; 3. State Grid Taian Electric Power Company, Taian 271000, China; 4. State Grid Weifang Electric Power Company, Weifang 261000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the background harmonic voltage fluctuation and the abnormal harmonic measurement samples significantly affect the accuracy of harmonic impedance estimation, a method for calculating utility harmonic impedance based on generalized jackknife least square estimation and data screening is proposed. According to the principle that the assumption of the fluctuation method and least squares regression are the same, the measurement period when the background harmonic voltage fluctuation is stable is selected for the regression calculation, which can restrain the influence of background harmonic voltage fluctuation on impedance estimation. According to the jackknife principle, the harmonic measurement data is resampled, and the generalized least square method is combined to effectively suppress the adverse effects of abnormal measurement data on the regression. The accuracy and practicability of the proposed method are verified by simulation and actual measured data test.

Key words: utility harmonic impedance; jackknife principle; generalized least squares; background harmonic; data screening