

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.01.003

基于局部-地理加权回归的时变谐波阻抗估计

徐方维¹, 谢佩昂¹, 王川¹, 刘凯¹, 郭凯¹, 樊丽娟²

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510080)

摘要:现有研究中通常假定电力系统谐波阻抗恒定,但不符合真实工况中情况。实际中,系统侧谐波阻抗和背景谐波随运行工况时变,当两谐波电压样本点时间间隔较大时,对应时刻的阻抗和背景谐波的差值可能较大,难以根据时间间隔较远样本点的信息估计关注样本点的阻抗值。由此,文中提出一种基于局部-地理加权回归的时变系统侧谐波阻抗估计方法,首先依据时间间隔大小构建权重矩阵,对与关注样本点时间间隔较大的样本点赋予较小权重,并采用局部加权回归(locally weighted regression, LWR)初步估计系统侧谐波阻抗和背景谐波参考值。然后利用阻抗参考值修正回归方程以降低原回归方程的欠定程度,同时以背景谐波参考值为先验信息,筛选出与关注样本点背景谐波相似的样本点,再基于所筛选样本逐一采用地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)求解各点的背景谐波电压和系统侧谐波阻抗。在强背景谐波波动的情况下,文中所提方法能识别阻抗的突变点、估计系统侧谐波阻抗的变化趋势。最后通过仿真分析可知,文中所提方法相对于传统恒定谐波阻抗估计方法,估计准确度提升约40%;相对于现有变阻抗估计方法,估计准确度提升约30%。

关键词:谐波阻抗;背景谐波;阻抗变化;权重矩阵;局部加权回归(LWR);地理加权回归(GWR)

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)01-0020-10

0 引言

随着风电、光伏等新能源,以及高铁、城市轨道交通等非线性用户大规模入网,电网中谐波源数量增多、分布广泛,电网谐波畸变率显著上升,谐波超标问题愈加严重,导致继电保护装置和自动装置误动作和故障风险升高,干扰通信系统正常运行^[1-4]。谐波导致用户和电网损耗增加、电能质量恶化,同时还可能导致设备损毁、线路停运等,危及电网安全。准确的谐波溯源有利于其源头治理或集中治理,是实现谐波管控的首要条件,但由于新能源场站、非线性用户等发射的谐波与背景谐波耦合作用,用户不能随意通断,背景谐波不可直接测量,谐波溯源的关键转化为利用电力系统中多个用户接入的公共连接点(point of common coupling, PCC)的谐波电压、电流测量数据准确估计系统侧谐波阻抗^[5-7]。谐波阻抗的准确估计有助于确定系统侧与用户侧各自的谐波发射量及谐波责任,从而为实现谐波治理制定相应的奖惩机制提供基础。

常见的系统侧谐波阻抗估计方法有:波动量法^[8-11]、回归法^[12-16]、协方差法^[17-23]、独立分量分析法^[24-30]。其中,波动量法根据PCC谐波电压与电流的波动量之比计算系统侧谐波阻抗。回归法则是以PCC谐波电压与电流为自变量构建回归方程,通

过求解回归系数得到系统侧谐波阻抗。这两类方法均假设背景谐波恒定,当背景谐波波动较大时,方法效果差。协方差法假定背景谐波电压和PCC处谐波电流不相关,且该方法要求用户谐波阻抗远大于系统阻抗,当用户侧安装无功补偿装置或滤波器时,两侧阻抗呈现非远大于关系,该方法失效。独立分量分析法要求两侧谐波源独立,该方法在背景谐波波动较强时仍具有一定适用性。

但是,上述方法均假定系统侧谐波阻抗恒定,难以应用于系统侧谐波阻抗变化的情况。由于新能源的波动性和系统运行方式改变(大用户或电源启停、滤波器投切等),系统侧谐波阻抗可能出现大范围变化甚至突变。针对该问题,文献[31]提出一种时变系统侧谐波阻抗估计方法,通过最小化背景谐波变化量的方差与系统侧谐波阻抗变化量来求解时变系统侧谐波阻抗,但该方法在强背景谐波波动时效果有限。

基于此,文中提出了一种基于局部-地理加权回归的系统侧谐波阻抗估计方法,该方法主要分2个步骤:(1)实际中,系统侧谐波阻抗和背景谐波虽时变,但其相邻样本点的系统侧谐波阻抗及背景谐波差值通常较小,但样本点之间时间间隔越大该差值可能越大。依据时间间隔对回归方程进行加权处理,对与关注样本点时间间隔较大的样本点赋予较小权重,通过局部加权回归(locally weighted regression, LWR)求解系统侧谐波阻抗和背景谐波的参考

收稿日期:2024-09-27;修回日期:2024-11-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52277113)

值。(2) 利用阻抗参考值修正回归方程以降低原回归方程的欠定程度。同时以背景谐波参考值为先验信息,分别筛选出与各样本点背景谐波参考值相似的样本点并赋较大权值,基于所筛选数据逐一采用地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)求解各点的背景谐波电压值,再利用测量数据计算系统侧谐波阻抗。所提方法可有效解决强背景谐波波动且阻抗非恒定情况下系统侧谐波阻抗估计难题。最后,通过仿真和实测案例验证了所提方法的有效性。

1 LWR 算法

PCC 处的谐波等效电路如图 1 所示。

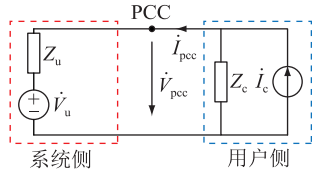


图 1 谐波等效电路

Fig.1 Equivalent harmonic circuit

图 1 中的各符号均为某一谐波频次的复数值, \dot{V}_u 为系统侧谐波电压源; Z_u 为系统侧谐波阻抗; \dot{I}_c 为用户侧谐波电流源; Z_c 为用户侧谐波阻抗; \dot{V}_{pcc} 为 PCC 处测得的谐波电压; \dot{I}_{pcc} 为 PCC 处测得的谐波电流。根据图 1 可以得到:

$$\dot{V}_{pcc} = \dot{I}_{pcc} Z_u + \dot{V}_u \quad (1)$$

将式(1)写为矩阵形式可得到回归方程,如式(2)所示。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}(t) \quad (2)$$

式中: $t(t=1,2,\dots,i,\dots,j,\dots,N)$ 为样本点时刻, N 为样本点时刻总数; \mathbf{Y} 为被解释变量矩阵; \mathbf{X} 为解释变量矩阵; $\boldsymbol{\beta}$ 为 $2 \times N$ 的回归系数矩阵,由 Z_u 和 \dot{V}_u 构成。式(2)中的各矩阵表达式如式(3)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \dot{I}_{pcc}(1) & \dot{I}_{pcc}(2) & \dots & \dot{I}_{pcc}(N) \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{Y} = [\dot{V}_{pcc}(1) \quad \dot{V}_{pcc}(2) \quad \dots \quad \dot{V}_{pcc}(N)]^T \\ \boldsymbol{\beta}(t) = \begin{bmatrix} \dot{V}_u(t) \\ Z_u(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式(2)中系数 $\boldsymbol{\beta}(t)$ 可直接采用最小二乘法求解,对应目标函数和回归系数求解见式(4)、式(5),

式(5)中 \hat{V}_u 和 \hat{Z}_u 的上标 $\hat{\cdot}$ 为该参数的估计值,后文同。但该方法要求系统侧谐波阻抗和背景谐波在

测量时段内恒定。因此,当系统侧谐波阻抗和背景谐波在测量时段内变化时,该方法存在较大误差。

$$\min((\mathbf{Y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}(t))^T(\mathbf{Y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}(t))) \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\beta}(t) = \begin{bmatrix} \hat{V}_u(t) \\ \hat{Z}_u(t) \end{bmatrix} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (5)$$

由于实际系统中的系统侧谐波阻抗和背景谐波通常是连续变化的,其前后样本点之间具有一定的关联性,且两样本点之间的时间距离越远该关联性越弱。因此,可以对时间间隔较大的样本点赋较小权值来降低其对关注样本点系统侧谐波阻抗及背景谐波估计结果的影响。此外,系统阻抗和背景谐波的突变均会导致 $\dot{V}_{pcc}(t)/\dot{I}_{pcc}(t)$ 突变,如式(6)所示,因此,对于可能存在的背景谐波或阻抗的突变情况,可由 $\dot{V}_{pcc}(t)/\dot{I}_{pcc}(t)$ 的变化量大小来判断,对突变点赋较小权值以降低突变样本点对结果的影响。

$$\dot{V}_{pcc}(t)/\dot{I}_{pcc}(t) = Z_u(t) + \dot{V}_u(t)/\dot{I}_{pcc}(t) \quad (6)$$

综合上述赋权原则,构造权重矩阵 $\mathbf{W}(t)$ 如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}(t) = \\ \text{diag}(w_{i1}h_{i1} \quad w_{i2}h_{i2} \quad \dots \quad w_{ij}h_{ij} \quad \dots \quad w_{iN}h_{iN}) \end{aligned} \quad (7)$$

约束条件:

$$\begin{cases} w_{ij} = 1 - \frac{|i-j|}{N} \\ h_{ij} = \begin{cases} 1 & R_{ij} \leq 30\% \\ 0 & R_{ij} > 30\% \end{cases} \\ R_{ij} = \frac{N \times \left| \text{abs}\left(\frac{\dot{V}_{pcc}(i)}{\dot{I}_{pcc}(i)}\right) - \text{abs}\left(\frac{\dot{V}_{pcc}(j)}{\dot{I}_{pcc}(j)}\right) \right|}{\sum_{j=1}^N \left| \text{abs}\left(\frac{\dot{V}_{pcc}(i)}{\dot{I}_{pcc}(i)}\right) - \text{abs}\left(\frac{\dot{V}_{pcc}(j)}{\dot{I}_{pcc}(j)}\right) \right|} \end{cases} \quad (8)$$

式中:在估计样本点时刻 i 的背景谐波与谐波阻抗时, w_{ij} 为根据时间间隔计算得到的样本点时刻 j 权重值; h_{ij} 为根据样本点突变程度计算得到的样本点时刻 j 权重值; $\text{diag}(\cdot)$ 表示以括号内的元素为主对角元素构造主对角线矩阵; $\text{abs}(\cdot)$ 表示对括号内的复数取模。当 $\dot{V}_{pcc}(t)/\dot{I}_{pcc}(t)$ 的变化量大于 30% 时,认为可能存在阻抗或背景谐波的突变。

以观测值和估计值的加权残差平方和最小为约束条件,构建如式(9)所示最小化目标函数,当某一样本点时刻 j 的背景谐波和谐波阻抗与关注样本

点时刻 i 相差较大时,该时刻对应估计值残差较大,可引入较低的权重 (w_{ij} 、 h_{ij}) 降低样本点时刻 j 对最小化目标函数的影响,使关注时刻的估计结果更接近其真实值。

$$\min(\mathbf{W}(t)(\mathbf{Y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}(t))^T(\mathbf{Y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}(t))) \quad (9)$$

对式(9)的目标函数采用加权最小二乘法求解,如式(10)所示, $\hat{\boldsymbol{\beta}}(t)$ 为 t 时刻回归系数列向量的估计值,可逐一计算所有时刻的回归系数,并求得变系统侧谐波阻抗值。

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}(t) = \begin{bmatrix} \hat{V}_u(t) \\ \hat{Z}_u(t) \end{bmatrix} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W}(t) \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W}(t) \mathbf{Y} \quad (10)$$

2 GWR 算法

当系统谐波阻抗和背景谐波均波动或变化时,依据时间间隔大小构造权重矩阵,以最小化残差平方和求得的系统侧谐波阻抗 \hat{Z}_u 和背景谐波值 \hat{V}_u 仅仅反映真值的大体趋势。由此,系统侧谐波阻抗可拆分为两部分,如式(11)所示。

$$Z_u = \hat{Z}_u + \Delta Z_u \quad (11)$$

式中: ΔZ_u 为阻抗残差。将式(11)代入式(1)可得:

$$\dot{V}_{\text{pec}} = \dot{I}_{\text{pec}}(\hat{Z}_u + \Delta Z_u) + \dot{V}_u \quad (12)$$

进一步整理式(12)得:

$$\dot{V}_{\text{pec}} - \dot{I}_{\text{pec}}\hat{Z}_u = \dot{I}_{\text{pec}}\Delta Z_u + \dot{V}_u \quad (13)$$

式(13)左边均为已知值,该式的本质和式(1)一致。为了简化公式,将式(13)中等式左侧的 $\dot{V}_{\text{pec}} - \dot{I}_{\text{pec}}\hat{Z}_u$ 用 \dot{V} 表示。将式(13)写成矩阵形式可得新的回归方程如下:

$$\mathbf{Y}_{\text{GWR}} = \mathbf{X}_{\text{GWR}} \boldsymbol{\beta}_{\text{GWR}}(t) \quad (14)$$

为区分 2 次回归使用的矩阵及变量,将 GWR 使用的矩阵及变量下标加上 GWR。 \mathbf{X}_{GWR} 为 GWR 使用的解释变量矩阵; \mathbf{Y}_{GWR} 为 GWR 使用的被解释变量矩阵; $\boldsymbol{\beta}_{\text{GWR}}(t)$ 为 GWR 求解的回归系数列向量。式(14)中各矩阵表达式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{\text{GWR}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \dot{I}_{\text{pec}}(1) & \dot{I}_{\text{pec}}(2) & \cdots & \dot{I}_{\text{pec}}(N) \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{Y}_{\text{GWR}} = [\dot{V}(1) \quad \dot{V}(2) \quad \cdots \quad \dot{V}(N)]^T \\ \boldsymbol{\beta}_{\text{GWR}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{V}_{\text{u-GWR}}(t) \\ \Delta Z_u(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\dot{V}_{\text{u-GWR}}$ 为由 GWR 求解的背景谐波电压。

GWR 本质也是一种加权最小二乘法,其假设样本点的回归系数在某一平面呈现聚类分布,即空间距离较近的样本点间回归系数相似,新回归方程中回归系数为阻抗残差与背景谐波电压真实值,阻抗残差值相对于背景谐波真实值较小且阻抗残差波动较小(阻抗残差与 PCC 处谐波电流乘积仍远小于背景谐波电压),因此在新回归方程中可认为阻抗残差为恒定值,只考虑背景谐波电压的变化。由于背景谐波参考值与真实值存在相同的变化趋势,因此背景谐波参考值越相似的样本点,其背景谐波真实值也越相似。构造辅助平面筛选与关注样本点背景谐波参考值相似的样本点,分别以背景谐波参考值归一化后的实部与虚部作为横坐标和纵坐标,构建辅助平面。辅助平面的横坐标和纵坐标分别为 l 和 g 。 (l, g) 的表达式为:

$$\begin{cases} l(t) = \frac{\text{Re}(\hat{V}_u(t))}{\text{mean}(\text{Re}(\hat{V}_u(t)))} \\ g(t) = \frac{\text{Im}(\hat{V}_u(t))}{\text{mean}(\text{Im}(\hat{V}_u(t)))} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\text{Re}(\cdot)$ 、 $\text{Im}(\cdot)$ 分别为对括号内的复数取实部和虚部; $\text{mean}(\cdot)$ 为对括号内复数求均值。

由式(16)可以看出辅助平面上样本点之间的欧式距离越小则背景谐波参考值越相似。

依据样本点与关注时刻样本点之间的距离构造权重矩阵 $\mathbf{S}(t)$, 其计算如式(17)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{S}(t) = \begin{bmatrix} s_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & s_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & s_{iN} \end{bmatrix} \\ s_{ij} = e^{-(d_{ij}/b)^2} \\ d_{ij} = \sqrt{(g(i) - g(j))^2 + (l(i) - l(j))^2} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\mathbf{S}(t)$ 为主对角矩阵, 对角线元素 s_{ij} 的物理意义为在估计样本点时刻 i 的回归系数时, 根据时间间隔计算得到的样本点时刻 j 权重值, 其采用高斯核函数计算; b 为带宽, 是控制高斯函数平滑程度的参数, 其选择方法详见文献[31-33]; d_{ij} 为样本点时刻 i 与时刻 j 在辅助平面上的距离。 $\mathbf{S}(t)$ 的作用为在估计样本点时刻 t 的回归系数时, 筛选出背景谐波相似的样本点赋予较大权重参与回归计算, 同时降低背景谐波相差较大的样本点带来的影响。

以最小化加权残差平方和求解的目标函数和

回归系数计算如下:

$$\min(\mathbf{S}(t)(\mathbf{Y}_{\text{GWR}} - \mathbf{X}_{\text{GWR}}\boldsymbol{\beta}_{\text{GWR}}(t))^T \times (\mathbf{Y}_{\text{GWR}} - \mathbf{X}_{\text{GWR}}\boldsymbol{\beta}_{\text{GWR}}(t))) \quad (18)$$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_{\text{GWR}}(t) = \begin{bmatrix} \hat{V}_{\text{u-GWR}}(t) \\ \Delta\hat{Z}_{\text{u}}(t) \end{bmatrix} = (\mathbf{X}_{\text{GWR}}^T \mathbf{S}(t) \mathbf{X}_{\text{GWR}})^{-1} \mathbf{X}_{\text{GWR}}^T \mathbf{S}(t) \mathbf{Y}_{\text{GWR}} \quad (19)$$

根据图1可以得到式(20)。将式(20)移项变形后可得到谐波阻抗计算如式(21)所示。

$$\dot{V}_{\text{pcc}} = \dot{I}_{\text{pcc}} \hat{Z}_{\text{u-GWR}} + \hat{V}_{\text{u-GWR}} \quad (20)$$

$$\hat{Z}_{\text{u-GWR}} = (\dot{V}_{\text{pcc}} - \hat{V}_{\text{u-GWR}}) / \dot{I}_{\text{pcc}} \quad (21)$$

式中: $\hat{Z}_{\text{u-GWR}}$ 为 GWR 求解的系统侧谐波阻抗估计值。

对每个样本点应用 GWR 即可实现变谐波阻抗估计。GWR 适用于在系统侧谐波阻抗恒定的场景下,解决背景谐波波动为系统侧谐波阻抗估计带来的影响,针对阻抗及背景谐波同时波动的情况,需要2次回归结合使用来求解谐波阻抗。通过第1次 LWR 估计的阻抗参考值修改第2次 GWR 的回归方程,同时根据背景谐波参考值为 GWR 提供赋权依据。由此可见,通过 LWR 的估计结果为 GWR 补充约束条件,可解决阻抗变化、背景谐波波动情况下的谐波阻抗估计难题。文中所提出的算法流程图如图2所示。

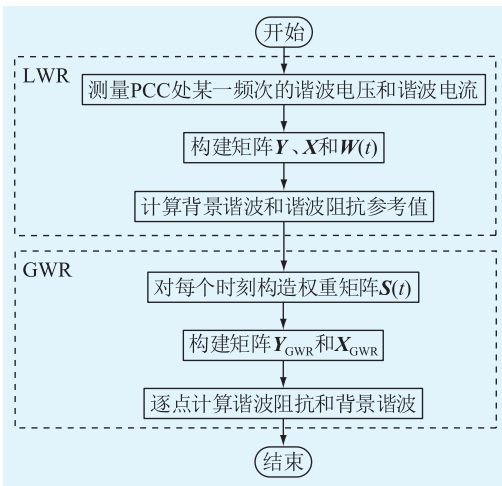


图2 算法流程

Fig.2 Algorithm flow

3 仿真分析

3.1 仿真 I: 阻抗连续变化仿真分析

仿真 I 采用图1中的谐波等效电路,生成2 000个样本点。用户侧谐波电流源 \dot{I}_c 幅值设置为

100 A,相角设置为 0.524 rad,并在幅值和相角上分别叠加 10%的随机扰动。系统侧谐波电压源 \dot{V}_u 幅值设置为 $k \times 1\,000$ V,相角设置为 1.451 rad,并在幅值和相角上分别叠加 5%的随机扰动。系统侧谐波阻抗 Z_u 幅值设置为 10 Ω ,相角设置为 0.785 4 rad,并在幅值上叠加 2.5%的随机波动和 50%的正弦半波波动,相角上叠加 2.5%的随机波动。用户侧谐波阻抗 Z_c 幅值设置为 50 Ω ,相角设置为 0.927 rad,并在幅值和相角上分别叠加 5%的随机波动。同时考虑相角和幅值的系统侧谐波阻抗误差见式(22)。

$$e = |(\hat{Z}_{\text{u}} - Z_{\text{u}}) / Z_{\text{u}}| \times 100\% \quad (22)$$

采用现有估计方法与文中方法对比阻抗估计效果。方法一采用随机独立矢量协方差特性法,方法二采用复独立分量法,方法三采用文献[34]提出的变阻抗估计法,方法四采用文中方法。当 $k=0.5$ 时,方法三、方法四得到的系统侧谐波阻抗和估计误差仿真结果如图3所示。由图3(a)可知,相比于时变阻抗估计方法,应用局部-地理加权估计谐波阻抗更接近于其真实波动趋势。由图3(b)可知,文中所提局部-地理加权估计方法相比于时变阻抗估计方法具有更小的估计误差。

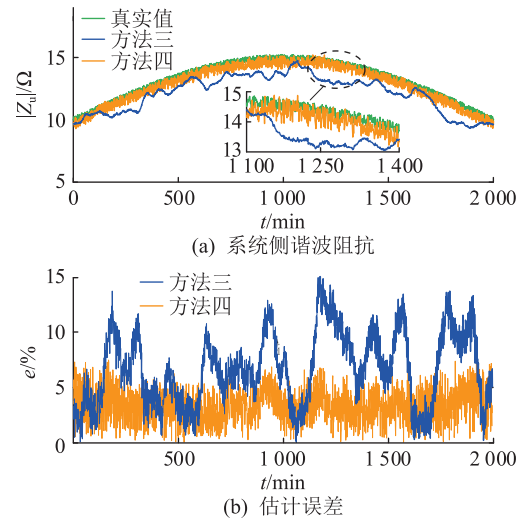


图3 仿真 I 估计结果

Fig.3 Estimation results in simulation I

在仿真数据中,系统侧谐波阻抗 Z_u 随时间变化,而方法一和方法二是恒定阻抗估计方法,二者在该工况下估计的是一个恒定的阻抗值,平均误差较大,且无法估计出阻抗的变化趋势。为此,方法一和方法二采用分段估计,通过减少每次估计使用的样本点数,使系统侧谐波阻抗 Z_u 的变化幅度减小,更趋向于恒定值。分段估计能减小方法一和方法二的估计误差,使仿真更具参考价值。每个估计时段采用 400 个样本点,不同 k 值下各方法的仿真

误差如表 1 所示。

表 1 不同 k 值下仿真 I 估计误差
Table 1 Estimation errors in simulation I under different values of k

k	谐波阻抗估计误差/%			
	方法一	方法二	方法三	方法四
0.3	12.40	6.01	4.21	3.06
0.5	13.04	7.51	6.57	4.54
0.7	15.21	9.09	8.21	5.44
0.9	17.17	10.49	11.37	8.80
1.1	20.28	14.50	15.87	9.72
1.3	24.48	18.03	20.21	14.57
1.5	30.27	23.31	25.77	17.36

由表 1 可知,当 k 值较小时,恒定阻抗估计方法已有较大的估计误差,由此可以看出,系统侧谐波阻抗发生变化会对传统的恒定阻抗估计方法的估计效果造成显著影响。方法三的估计误差随着 k 值的增大而显著提高,这是因为现有的变阻抗估计方法并不适用于强背景谐波波动的工况,而文中所提方法四能有效抑制背景谐波波动带来的影响,该方法在各电压等级下均有最好的估计效果,估计误差最小。当 $k=1.5$ 时,文中所提方法四相对于方法一估计准确度提升约 40%;相对于方法三,方法四的估计准确度提升约 30%。

3.2 仿真 II: 阻抗突变仿真分析

仿真 II 是一个针对阻抗发生突变情况下的案例,验证文中所提方法在阻抗突变情况下的估计效果。系统侧谐波电压源 \dot{V}_u 、用户侧谐波电流源 \dot{i}_c 、用户侧谐波阻抗 Z_c 参数设置参考仿真 I,系统侧谐波阻抗 Z_u 参数设置如表 2 所示,共采用 600 个样本点。

表 2 Z_u 参数
Table 2 Parameters of Z_u

样本点数	幅值/ Ω	相位/rad	随机扰动/%
1~150	10	0.785 4	2.5
151~450	25	0.785 4	2.5
451~600	10	0.785 4	2.5

当 k 取 0.5 时,采用 3.1 节中方法三、方法四进行仿真得到系统侧谐波阻抗和估计误差波形如图 4 所示。

由图 4 可以看出,方法四能有效识别阻抗的突变点,同时方法四不管是在阻抗平稳变化还是阻抗突变点,估计效果均优于方法三。方法三、方法四在不同 k 值下的仿真误差如表 3 所示。

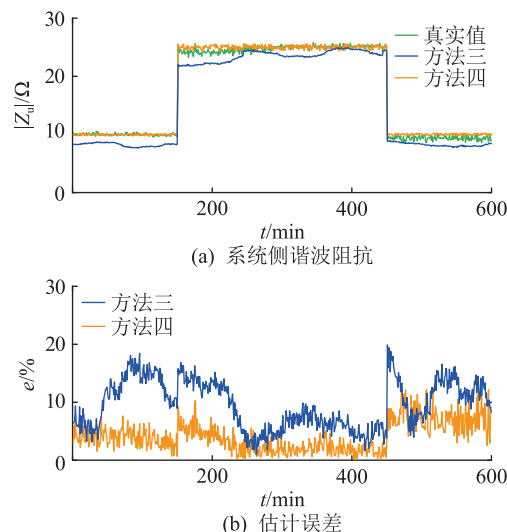


图 4 仿真 II 估计结果

Fig.4 Estimation results in simulation II

表 3 不同 k 值下仿真 II 估计误差

Table 3 Estimation errors in simulation II under different values of k

k	谐波阻抗估计误差/%	
	方法三	方法四
0.3	4.46	3.54
0.5	8.98	5.07
0.7	9.21	7.14
0.9	12.68	9.81
1.1	16.40	10.02

3.3 仿真 III: IEEE 13 节点系统仿真分析

仿真 III 采用 IEEE 13 节点系统进行仿真验证,其系统如图 5 所示,系统参数参考文献[34]。该系统包含 13 条母线,是一个中型工业工厂的典型代表。系统由 69 kV 的电源供电,配电系统在 13.8 kV 下运行。在系统中,7 条母线连接负载(母线 3、5、7、8、10、12、13),母线 13 处的负载为谐波源,在母线 1 处增加一个谐波源,即系统侧谐波源。红色的母线 13 为关注母线,通过母线 13 处测得的谐波电压电流估计母线 13 处的等效系统侧谐波阻抗。

按照文献[34]提供的频谱表,在母线 1 和母线 13 处注入 7 次谐波电流,母线 1 注入谐波电流叠加 10%的随机扰动,母线 13 注入谐波电流叠加 20%的随机扰动。在负载阻抗上叠加 10%的随机扰动。图 5 中电容器的电容设置为 3 000 kvar,并在其上叠加正弦半波波动和 10%的随机扰动。方法三、方法四的仿真系统侧谐波阻抗和估计误差波形如图 6 所示。

由图 6 可知,相比于现有的时变阻抗估计方法,文中所提方法四估计出阻抗的变化趋势更贴近真

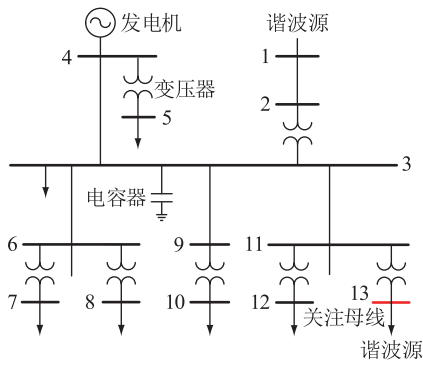
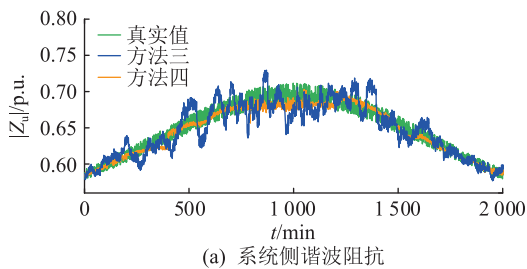
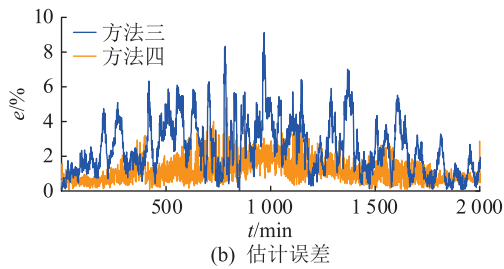


图5 IEEE 13节点系统

Fig.5 IEEE 13-bus system



(a) 系统侧谐波阻抗



(b) 估计误差

图6 仿真III估计结果

Fig.6 Estimation results in simulation III

实工况,大部分样本点的估计误差小于4%。仿真III采用分段估计,共分为4段,分别为时段1(10~500 min)、时段2(500~1 000 min)、时段3(1 000~1 500 min)、时段4(1 500~2 000 min)。每个估计时段采用400个样本点。为体现背景谐波波动的影响,将母线1注入的谐波电流增加 m 倍,各方法仿真估计误差对比情况如表4所示。

表4 不同 m 值下仿真III估计误差Table 4 Estimation errors in simulation III under different values of m

m	谐波阻抗估计误差/%			
	方法一	方法二	方法三	方法四
2	3.08	3.03	2.70	1.62
4	4.57	3.72	3.53	2.25
6	5.17	4.95	4.44	2.72
8	6.72	5.68	5.50	3.81
10	8.49	7.62	6.42	4.76
12	11.25	10.46	8.39	6.12

由表4可知,该仿真中,方法一与方法二仍能保

持较好的估计效果,这是因为该仿真经过分段后每个时段内阻抗的变化幅度小(仿真I时段1的阻抗由 10Ω 变化至 12.5Ω ,仿真III时段1的阻抗由 0.6 p.u. 变化至 0.65 p.u. ,仿真III时段1的阻抗变化幅度约为 $1-0.6/0.65=7.69\%$,远小于仿真I中时段1的阻抗变化幅度 $1-10/12.5=20\%$),在阻抗变化幅度较小时,文中所提出的方法四仍具有最好的估计效果。

4 实测案例

以浙江某500 kV高压直流换流站母线电压和出口电流实测数据为例。在PCC处连接有7个滤波器,均为相同类型的双调谐滤波器。由于换流站检修,4个滤波器在3 h内被逐一退运,引起了系统侧谐波阻抗的变化。由于该案例中的11次谐波超标严重且其系统侧谐波阻抗并非恒定值,因此选择该实测案例的11次谐波测量数据进行分析,求解系统侧谐波阻抗。换流站拓扑及滤波器参数如图7所示。

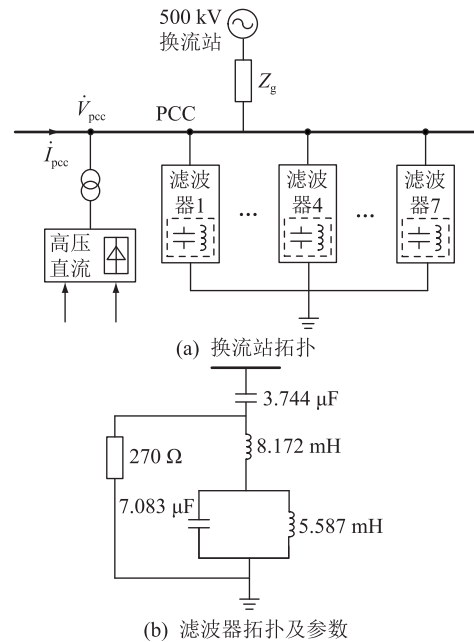


图7 换流站拓扑及滤波器参数

Fig.7 Converter station topology and filter parameters

11次谐波电压、电流测量数据如图8所示。相邻样本之间的时间间隔为1 min。系统侧谐波阻抗由电网谐波阻抗 Z_g 和滤波器总谐波阻抗 Z_f 并联构成。由系统的短路容量计算得到电网11次谐波阻抗 Z_g 为 50Ω ,滤波器总谐波阻抗 Z_f 由滤波器参数计算得到,由于滤波器退出运行造成滤波器总阻抗 Z_f 发生变化,由 3.1Ω 变化至 7Ω (由图7(b)结合11次谐波频率计算得到单个滤波器阻抗,运行中的

滤波器并联可得滤波器总阻抗)。由此,结合并联表达式 $Z_g Z_f / (Z_g + Z_f)$ 可以计算出等效系统侧谐波阻抗的参考值由 2.9Ω 变化至 6Ω 。

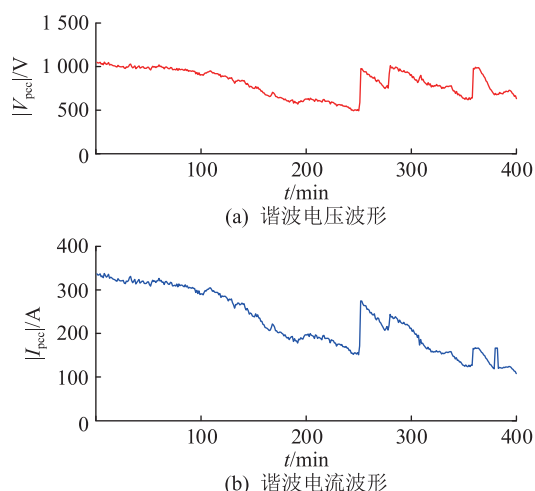


图8 实测电压、电流波形

Fig.8 Waveform of measured voltage, current

采用方法三及方法四进行计算可以得到系统侧谐波阻抗估计值波形,如图9所示。2种方法均能有效估计出系统侧谐波阻抗的真实变化趋势,文中所提出的方法四估计的阻抗值更贴近参考值,同时第4个滤波器退出运行后(图9中阻抗参考值每一次变化,代表滤波器退出运行),2种方法的估计效果均受到显著影响,这是由于滤波器退出运行造成了系统侧谐波阻抗的增大,用户侧与系统侧谐波阻抗比值减小,影响了2种方法的估计效果。各方法的估计误差如表5所示。

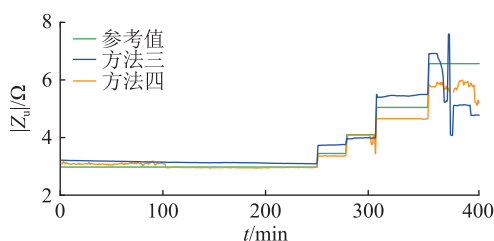


图9 实测案例系统侧谐波阻抗估计结果

Fig.9 Estimation results in field case of utility harmonic impedance

表5 实测案例系统侧谐波阻抗估计误差

Table 5 Estimation errors in field case of utility harmonic impedance

方法	谐波阻抗估计误差/%
方法一	12.41
方法二	10.37
方法三	8.82
方法四	7.21

该实测案例中,大部分谐波阻抗值为恒定值,

但方法一与方法二的估计误差仍较大,由此可以看出,当估计时段内仅有少部分样本点发生变化仍会给恒定阻抗估计方法带来较为显著的影响,相比于方法三,文中所提方法四具有更小的估计误差。

5 结论

谐波阻抗估计是定位谐波源位置、量化谐波超标用户责任以及明确谐波治理责任的关键手段,对于有效管控与治理谐波污染、保障电网安全稳定运行具有重要的理论和工程意义。针对系统运行方式改变、大用户或电源启停等造成的系统侧谐波阻抗时变问题,文中提出一种基于局部-地理加权回归的系统侧谐波阻抗估计方法,文中所提方法具备如下特点:

(1) 基于LWR和GWR方程,可有效拟合系统侧谐波阻抗的变化趋势;

(2) 基于2个权重矩阵的构造原则,在阻抗时变的情况下,通过对强波动点赋极小权重值的方式降低强背景谐波波动数据对目标函数的贡献程度,可有效抑制背景谐波波动对系统侧谐波阻抗估计的影响。

综上,文中所提方法可有效解决强背景谐波波动情况下的时变系统侧谐波阻抗估计难题。通过IEEE 13节点仿真分析和某500 kV换流站实例分析验证了所提方法的有效性。

参考文献:

[1] 曹文君,张岩,张安彬,等. 弱电网条件下分布式光伏并网系统谐振机理及影响特性[J]. 电力建设,2024,45(3):149-159.
CAO Wenjun, ZHANG Yan, ZHANG Anbin, et al. Resonance mechanism and influence characteristics of distributed photovoltaic grid-connected system under weak grid conditions[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3): 149-159.

[2] 徐先峰,马文昊,卢勇,等. 基于充电站谐波特性的频率自适应有源电力滤波控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(21):24-34.
XU Xianfeng, MA Wenhao, LU Yong, et al. Frequency adaptive active power filtering control strategy based on harmonic characteristics of a charging station[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 24-34.

[3] 王俊波,李新,梁年柏,等. 电动汽车充电系统集群接入配电网谐波谐振机理分析[J]. 供用电,2024,41(10):50-59.
WANG Junbo, LI Xin, LIANG Nianbai, et al. Analysis of harmonic resonance mechanism of electric vehicle charging system cluster connected to distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(10): 50-59.

[4] 陈继开,孙崇博,李阳,等. 多端柔直换流站高频谐振及传播机理分析与抑制[J]. 电力建设,2024,45(2):26-36.

- CHEN Jikai, SUN Chongbo, LI Yang, et al. Analysis and suppression of high-frequency resonance and propagation mechanism in multiterminal flexible direct converter station[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(2): 26-36.
- [5] 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): 3149-3157.
- XU Fangwei, WANG Chuan, GUO Kai, et al. Improvement of system-side harmonic impedance estimation method based on phase-free measured data[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(9): 3149-3157.
- [6] 陈林, 徐永海, 王天泽, 等. 弱电网下计及背景谐波的多并网逆变器阻抗重塑谐振抑制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(1): 59-72.
- CHEN Lin, XU Yonghai, WANG Tianze, et al. Resonance suppression method for multiple grid-connected inverters with impedance remodeling with background harmonics in a weak power grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(1): 59-72.
- [7] 田新成, 李华, 晏坤, 等. 基于改进贝叶斯的新能源场站并网处系统谐波阻抗估计[J]. *供用电*, 2023, 40(10): 35-45.
- TIAN Xincheng, LI Hua, YAN Kun, et al. Estimation of utility harmonic impedance at grid-connected new energy field stations based on improved Bayesian methodology[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(10): 35-45.
- [8] 程阅, 徐交国, 左灵玉, 等. 基于线性回归的系统侧谐波阻抗估计方法改进[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2023, 44(4): 55-61.
- CHENG Yue, XU Jiaoguo, ZUO Lingyu, et al. Improvement of harmonic impedance estimation method of system side based on linear regression[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2023, 44(4): 55-61.
- [9] 何逢广, 李朝阳, 张华赢, 等. 基于实测数据的牵引供电系统并联谐波谐振概率识别方法[J]. *电网技术*, 2024, 48(5): 2084-2094.
- HE Fengguang, LI Zhaoyang, ZHANG Huaying, et al. Parallel harmonic resonance probability identification of traction power supply system based on measured data[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(5): 2084-2094.
- [10] 王清亮, 韩悦萍, 陈轩, 等. 基于加权高斯混合概率模型的系统谐波阻抗估计[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(9): 38-46, 53.
- WANG Qingliang, HAN Yueping, CHEN Xuan, et al. System harmonic impedance estimation based on weighted Gaussian mixture probability model[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(9): 38-46, 53.
- [11] 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.
- [12] 倪俊贤, 史明明, 姜锋, 等. 基于窗宽优化与数据筛选的系统谐波阻抗估计[J]. *自动化与仪表*, 2024, 39(9): 1-5.
- NI Junxian, SHI Mingming, JIANG Feng, et al. Harmonic impedance estimation of system based on window width optimization and data screening[J]. *Automation & Instrumentation*, 2024, 39(9): 1-5.
- [13] 夏焰坤, 唐文张, 林欣懿. 基于LS-SVM的谐波阻抗估计方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(2): 94-99.
- XIA Yankun, TANG Wenzhang, LIN Xinyi. Harmonic impedance estimation method based on least squares support vector machine[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2022, 34(2): 94-99.
- [14] 徐海松, 张大宁, 胡冉, 等. 基于谐波分量的配电电缆绝缘劣化状态带电检测技术[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(7): 2161-2173.
- XU Haisong, ZHANG Daning, HU Ran, et al. A live detection technology of distribution network cable insulation deterioration state based on harmonic components[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(7): 2161-2173.
- [15] 高敏, 朱明星, 张华赢, 等. 基于无相位谐波监测数据的谐振源辨识方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(4): 166-175.
- GAO Min, ZHU Mingxing, ZHANG Huaying, et al. Resonance source identification method based on phase-free harmonic monitoring data[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(4): 166-175.
- [16] 林顺富, 李育坤, 程卫健, 等. 一种改进递推最小二乘的系统谐波阻抗估计方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(7): 2879-2886.
- LIN Shunfu, LI Yukun, CHENG Weijian, et al. An improved recursive least square method for system harmonic impedance estimation[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(7): 2879-2886.
- [17] 徐方维, 郑鸿儒, 杨洪耕, 等. 基于无相位实测数据的系统侧谐波阻抗估计方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(21): 170-176, 212.
- XU Fangwei, ZHENG Hongru, YANG Honggeng, et al. Harmonic impedance estimation method on system side based on measurement data without phase angle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(21): 170-176, 212.
- [18] 吴雅翔, 徐方维, 张伟骏, 等. 基于修正独立随机矢量的系统侧谐波阻抗估计[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(20): 146-152.
- WU Yayue, XU Fangwei, ZHANG Weijun, et al. System-side harmonic impedance estimation based on modified independent random vectors[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(20): 146-152.
- [19] SHU Q, WU Y Y, XU F W, 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] 黄蔓云, 王天昊, 卫志农, 等. 基于长短期记忆网络的UKF动态谐波状态估计[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50

- (11):1-11.
HUANG Manyun, WANG Tianhao, WEI Zhinong, et al. Dynamic harmonic state estimation of an unscented Kalman filter based on long short-term memory neural networks[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11):1-11.
- [21] 张明, 徐诗露, 陆东亮, 等. 基于自适应 SRUKF 算法的电力系统动态谐波状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2):102-111.
ZHANG Ming, XU Shilu, LU Dongliang, et al. Dynamic harmonic state estimation of a power system based on adaptive SRUKF[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2):102-111.
- [22] 林洪洲, 邵振国, 陈飞雄, 等. 采用区间型非同步监测数据的鲁棒动态谐波状态估计[J]. 电网技术, 2023, 47(4):1701-1708.
LIN Hongzhou, SHAO Zhenguo, CHEN Feixiong, et al. Robust dynamic harmonic state estimation using interval asynchronous monitoring data[J]. Power System Technology, 2023, 47(4):1701-1708.
- [23] 徐方维, 王朝浩, 周全, 等. 基于互信息数据优选的系统侧谐波阻抗估计[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2):67-74.
XU Fangwei, WANG Chaozhao, ZHOU Quan, et al. Utility harmonic impedance estimation based on mutual information and data optimization[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2):67-74.
- [24] 郑仙, 肖先勇, 王杨. 基于谐波阻抗矩阵约束的系统侧谐波阻抗估计方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4):170-176.
ZHENG Xian, XIAO Xianyong, WANG Yang. Utility harmonic impedance estimation method based on harmonic impedance matrix constrain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4):170-176.
- [25] 徐方维, 王川, 杨洪耕, 等. 一种无须求解谐波转移阻抗的分散式多谐波源责任量化方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7):178-186.
XU Fangwei, WANG Chuan, YANG Honggeng, et al. A method for quantifying the responsibility of decentralized multi-harmonic sources without solving harmonic transfer impedance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7):178-186.
- [26] 林顺富, 颜昕昱, 钟良亮, 等. 基于子带分量分解与独立分量分析的系统谐波阻抗估计方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1):179-185.
LIN Shunfu, YAN Xinyu, ZHONG Liangliang, et al. System harmonic impedance estimation method based on sub-band component decomposition and independent component analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1):179-185.
- [27] ZHAO X, YANG H G. A new method to calculate the utility harmonic impedance based on FastICA[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1):381-388.
- [28] 王俊雄, 臧天磊, 符玲, 等. 一种适应风机接入的配电网谐波责任划分方法[J]. 电网技术, 2020, 44(11):4377-4386.
WANG Junxiong, ZANG Tianlei, FU Ling, et al. A method of distribution network harmonic responsibility division adapted to wind turbine access[J]. Power System Technology, 2020, 44(11):4377-4386.
- [29] 陈飞宇, 肖先勇, 汪颖. 采用稳健独立分量分析的谐波发射水平评估方法[J]. 电网技术, 2020, 44(8):3007-3013.
CHEN Feiyu, XIAO Xianyong, WANG Ying. Evaluation method of harmonic emission level using robust independent component analysis[J]. Power System Technology, 2020, 44(8):3007-3013.
- [30] 赵劲勃, 杨洪耕, 徐方维, 等. 基于稀疏成分分析的多直流馈入城市电网直流落点系统侧谐波阻抗计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7):2016-2024.
ZHAO Jinshuai, YANG Honggeng, XU Fangwei, et al. Calculation method of side harmonic impedance of DC drop point system of multi-DC feed-in urban power grid based on sparse component analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7):2016-2024.
- [31] 贾秀芳, 张韶光, 华回春, 等. 部分线性核估计方法在谐波责任分摊问题中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3):63-68.
JIA Xiufang, ZHANG Shaoguang, HUA Huichun, et al. Application of kernel estimation with partial linear method for harmonic contributions determination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3):63-68.
- [32] 华回春, 刘哲, 韩博, 等. 谐波责任统计特征计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11):2959-2965.
HUA Huichun, LIU Zhe, HAN Bo, et al. Calculation method for the harmonic contribution statistical characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11):2959-2965.
- [33] 罗杰, 臧天磊, 符玲, 等. 一种含光伏接入的配电网谐波责任划分方法[J]. 电网技术, 2019, 43(11):4074-4079.
LUO Jie, ZANG Tianlei, FU Ling, et al. Method for dividing harmonic responsibility of distribution network with photovoltaic access[J]. Power System Technology, 2019, 43(11):4074-4079.
- [34] WANG C, XU F W, SHU Q, et al. A noninvasive method to estimate the variable utility harmonic impedance [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(3):1747-1754.

作者简介:



徐方维

徐方维(1978),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为电能质量及谐波等(E-mail: xufangwei@scu.edu.cn);

谢佩昂(2000),男,硕士在读,研究方向为电能质量谐波阻抗估计;

王川(1996),男,博士在读,研究方向为电能质量及谐波责任划分。

Time-varying harmonic impedance estimation based on locally-geographically weighted regression

XU Fangwei¹, XIE Pei'ang¹, WANG Chuan¹, LIU Kai¹, GUO Kai¹, FAN Lijuan²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: In existing estimation methods for utility harmonic impedance, it is commonly assumed that the harmonic impedance remains invariant, which often diverges from actual conditions. In practice, both the utility harmonic impedance and background harmonics typically time-varying with operating conditions. For the time interval between two sample points, large numerical value probably gives rise to more conspicuous difference between the impedance and the background harmonics at the corresponding time. Based upon the information of the sample points with a far gap, it is difficult to estimate the impedance value of the sample points of concern. As a consequence, a brand new time-varying utility harmonic impedance estimation method is put forward based on locally-geographically weighted regression. Firstly, a weight matrix is constructed based on time interval, assigning smaller weights to sample points with larger intervals from the points of interest. Locally weighted regression (LWR) is then applied to initially estimate the utility harmonic impedance and background harmonic reference values. Secondly, the impedance reference value is used to modify the regression equation to reduce the under determination of the original regression equation. To screen out the sample points that are similar to the background harmonics of the sample points of concern, the background harmonic reference value is simultaneously utilized as the prior information. On the basis of the screened samples, the background harmonic voltage and the utility harmonic impedance at each point are coped well with by geographically weighted regression (GWR). Under strong background harmonic fluctuations, the recommended method can not only identify abrupt changes in impedance, but also estimate the trend of utility harmonic impedance. Lastly, simulation and case studies demonstrate that the proposed method improves estimation accuracy by approximately 40% compared to traditional constant harmonic impedance estimation methods, and by around 30% compared to existing time-varying impedance estimation methods.

Keywords: harmonic impedance; background harmonic; impedance variation; weight matrix; locally weighted regression (LWR); geographically weighted regression (GWR)

(编辑 吴昊)

(上接第 19 页)

Resonant suppression strategy of impedance remodeling for multi-inverter grid-connected system in weak grid

ZHANG Shicong, XU Yonghai, TAO Shun, YU Yongyue, ZHANG Zhi

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In weak grid, a multi-inverter grid-connected system may be simultaneously affected by large grid impedance and background harmonics. The interaction between inverter and grid is enhanced by the large grid impedance, resulting in resonance problems. Furthermore, the grid-connected voltage and current waveforms are distorted by the background harmonics, which makes the system unable to meet the grid-connected requirements. In view of this, firstly, an impedance model for multi-inverter grid-connected system is established, and the mechanism behind waveform distortion and resonance in weak grid is clarified. Subsequently, a control strategy combining improved grid voltage feedforward with parallel adaptive active damping is proposed. The improved grid voltage feedforward is used to reshape the impedance of the multi-inverter grid-connected system in order to mitigate background harmonics effects, while the active damper is employed to synthesize virtual resistance for suppressing system-grid resonance. When there are changes in working conditions of the system, the damping effect can be further improved by adaptively adjusting virtual resistance values through compensation. Simulation results show that background harmonics and resonance problems can be effectively suppressed by the proposed strategy, and the adaptability of multi-inverter grid-connected systems in weak grid is enhanced.

Keywords: weak grid; background harmonic; grid-connected inverter; grid voltage feedforward; impedance reshaping; active damper

(编辑 吴昊)