

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.012

基于最小范数的系统侧谐波变阻抗求解技术

徐方维¹, 曾雪^{1,2}, 王川¹, 郑鸿儒¹

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:准确计算系统侧谐波阻抗对新型电力系统的安全稳定运行有至关重要的意义。在现有谐波阻抗估计算法中,通常假设系统侧谐波阻抗在测量周期中恒定不变。然而,系统侧电压会随着电网运行方式或负荷端大电源用户的接入而发生变化,从而导致系统侧谐波阻抗大小呈现波动的状态。但系统侧谐波阻抗在相邻采样时间间隔内变化并不大,基于此,文中提出一种新的非干预式系统侧谐波变阻抗求解技术,以测量周期内相邻采样时间间隔谐波阻抗二阶变化量和电压二阶变化量的范数为目标函数,通过最小化目标函数求解系统侧谐波阻抗。经过仿真和实际案例分析,验证了该方法在较强背景谐波和用户侧谐波阻抗并非远大于系统侧谐波阻抗条件下的准确性和可靠性。

关键词:谐波阻抗;阻抗变化量;最小范数;背景谐波;电能质量;非干预式

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)06-0110-07

0 引言

随着电力电子设备在电力系统中的广泛使用,电能质量已成为备受关注的主要问题之一^[1]。由于高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)、可再生能源系统和电动汽车充电站等新技术的广泛应用,大量谐波注入电力系统,导致电网中电压和电流的波形产生畸变,对电力网络稳定运行产生影响。为减小谐波的影响并支撑谐波管理策略,系统侧谐波阻抗计算成为近年来的研究热点^[2-3]。

目前,已有许多学者针对电网谐波阻抗的估算提出了不同的方法,这些方法可以分为干预式方法和非干预式方法2类。干预式方法经济性不高且会对电网的正常运行产生影响,相比之下非干预式方法更具应用前景^[4]。非干预式方法包括波动量法^[5-6]、二元线性回归法^[7-9]、独立成分分析(independent component analysis, ICA)法^[10-11]等。在背景谐波稳定、用户谐波阻抗远大于系统侧谐波阻抗的前提下,波动法和回归法可以获得较为准确的计算结果。而ICA法是一种广泛使用的盲源分离算法,用于估算双方的谐波阻抗。基于双方谐波源是独立的假设,ICA法可以将源信号与混合信号可靠地分离,然后计算出每个源的谐波阻抗和贡献值,但其受采样数据幅值的影响很大^[12-13],且易受谐波源的相关性影响。ICA法以基于两侧谐波源的波动独

立为前提^[14],却无法通过严格的数学推导证明其独立性。当两侧谐波源的相关性很强、源信号不独立时,分离的信号可能与原始源不一致。此外,上述方法都是基于测量周期内的系统侧谐波阻抗以及系统侧电压是恒定不变的条件,虽然电网的运行模式不会突然改变,但实际上系统侧谐波阻抗以及系统侧电压均会随时间变化^[15],只是在相邻采样时间间隔内阻抗的变化非常小,因此上述方法均具有一定的局限性。

目前,考虑阻抗变化和电压变化因素的谐波阻抗估计研究较少。文献[16]提出基于密度的噪声应用空间聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)和数据筛选相结合的系统谐波阻抗估计方法,通过筛选保留背景谐波电压波动较小的数据段,一定程度上可克服由系统运行方式改变导致的阻抗变化,但电力系统阻抗持续变化的情况具有局限性。文献[17]提出基于盲源分离的移位阻断(shifted blocks for blind source separation, SHIBSS)方法和数据优选的系统侧谐波阻抗估计方法,着重于提升数据筛选质量从而提高估算精度。但该方法的前提为系统侧谐波阻抗远小于用户侧谐波阻抗且用户侧谐波发射电流波动量不远小于系统侧谐波发射电流波动量,具有一定的局限性。文献[18]提出基于粒子群ICA的系统谐波阻抗估计方法,有效降低了系统侧谐波干扰对谐波阻抗估计产生的影响,但其计算时间较长。除此以外,在用户侧谐波阻抗并非远大于系统侧谐波阻抗的情况下,采用该方法所获得的谐波阻抗也并不

收稿日期:2023-06-21;修回日期:2023-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52277113, 518771-41)

理想^[19-21]。

因此,文中提出了一种基于最小范数的系统侧谐波变阻抗求解技术,将电网谐波阻抗变化量和电网谐波电压变化量的范数组成目标函数,通过最小化目标函数来获得系统侧谐波阻抗估计值。该方法可以在背景谐波发射水平较高、用户侧谐波阻抗并非远大于系统侧谐波阻抗的情况下获得准确的计算结果且计算时间较短。

1 电路模型与算法过程

图1为公共连接点(point of common coupling, PCC)处的等效谐波源电路,其中 \dot{V}_u 、 \dot{I}_c 分别为系统侧谐波电压和用户侧谐波电流; Z_u 、 Z_c 分别为系统和用户侧谐波阻抗; \dot{V}_{pcc} 、 \dot{I}_{pcc} 分别为PCC对应谐波电压、谐波电流。

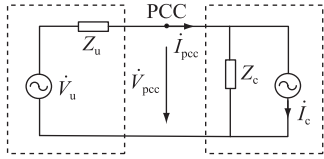


图1 等效谐波源电路

Fig.1 Equivalent harmonic source circuit

文中考虑系统侧电压的波动情况,系统侧采用戴维南回路以便分析推导,而用户侧采用诺顿回路以便分析背景谐波发射水平的影响。由图1可得:

$$\begin{cases} \dot{V}_{pcc} = \dot{V}_u - Z_u \dot{I}_{pcc} \\ \dot{V}_{pcc} = Z_c \dot{I}_c + Z_c \dot{I}_{pcc} \end{cases} \quad (1)$$

由此推算得到:

$$\begin{cases} \dot{I}_{pcc} = \frac{\dot{V}_u - Z_c \dot{I}_c}{Z_u + Z_c} \\ \dot{V}_{pcc} = Z_c \dot{I}_c + \frac{\dot{V}_u - Z_c \dot{I}_c}{Z_u + Z_c} Z_c \end{cases} \quad (2)$$

1.1 基于最小范数准则的目标函数

根据式(1)可以得到:

$$Z_u(n) = (\dot{V}_u(n) - \dot{V}_{pcc}(n)) / \dot{I}_{pcc}(n) \quad (3)$$

式中: n 为采样点,取值范围为 $1 \sim N$, N 为样本数。实际上, Z_u 、 \dot{V}_u 是随时间变化的,但波动很小。为在每个采样点进行谐波阻抗值计算,将阻抗二阶变化量和电网电压二阶变化量引入式(4)、式(5)。

$$\begin{aligned} \Delta^2 Z_u(n) &= \Delta Z_u(n+1) - \Delta Z_u(n) = \\ &= Z_u(n+2) - 2Z_u(n+1) + Z_u(n) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta^2 \dot{V}_u(n) &= \Delta \dot{V}_u(n+1) - \Delta \dot{V}_u(n) = \\ &= \dot{V}_u(n+2) - 2\dot{V}_u(n+1) + \dot{V}_u(n) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\Delta Z_u(n)$ 、 $\Delta \dot{V}_u(n)$ 、 $\Delta^2 Z_u(n)$ 、 $\Delta^2 \dot{V}_u(n)$ 分别为一阶谐波阻抗变化量、一阶电网电压变化量、二阶谐波阻抗变化量、二阶电网电压变化量。

由于电网的稳定性,在相邻采样点的极短时间间隔内, $\Delta^2 Z_u(n)$ 、 $\Delta^2 \dot{V}_u(n)$ 的值几乎为0,因此可以将 $\Delta^2 Z_u(n)$ 、 $\Delta^2 \dot{V}_u(n)$ 的范数线性组合作为优化目标,进而构建如式(6)所示目标函数。

$$J = \|\Delta^2 Z_u\|^2 + \lambda \|\Delta^2 \dot{V}_u\|^2 \quad (6)$$

式中: λ 为影响因子; $\|\cdot\|$ 表示2-范数。

1.2 算法过程

将式(4)、式(5)代入式(6)可以得到:

$$J = \sum_{n=1}^{N-2} \left| \frac{\dot{V}_u(n+2) - \dot{V}_{pcc}(n+2)}{\dot{I}_{pcc}(n+2)} - \frac{2(\dot{V}_u(n+1) - \dot{V}_{pcc}(n+1))}{\dot{I}_{pcc}(n+1)} + \frac{\dot{V}_u(n) - \dot{V}_{pcc}(n)}{\dot{I}_{pcc}(n)} \right|^2 + \lambda \sum_{n=1}^{N-2} |\dot{V}_u(n+2) - 2\dot{V}_u(n+1) + \dot{V}_u(n)|^2 \quad (7)$$

化简得到:

$$J = \sum_{n=1}^{N-2} \left| -\frac{\dot{V}_{pcc}(n)}{\dot{I}_{pcc}(n)} + \frac{2\dot{V}_{pcc}(n+1)}{\dot{I}_{pcc}(n+1)} - \frac{\dot{V}_{pcc}(n+2)}{\dot{I}_{pcc}(n+2)} - \frac{\dot{V}_u(n)}{\dot{I}_{pcc}(n)} + \frac{2\dot{V}_u(n+1)}{\dot{I}_{pcc}(n+1)} - \frac{\dot{V}_u(n+2)}{\dot{I}_{pcc}(n+2)} \right|^2 + \lambda \sum_{n=1}^{N-2} |\dot{V}_u(n+2) - 2\dot{V}_u(n+1) + \dot{V}_u(n)|^2 \quad (8)$$

将式(8)化简为向量形式,有:

$$J = \|\mathbf{b}_u - \mathbf{A}_u \mathbf{x}_u\|^2 + \lambda \|\mathbf{C} \mathbf{x}_u\|^2 \quad (9)$$

令:

$$\mathbf{b}_u = [b_u(1) \quad b_u(2) \quad \cdots \quad b_u(N)]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{x}_u = [x_u(1) \quad x_u(2) \quad \cdots \quad x_u(N+2)]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{A}_u =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\dot{I}_{pcc}(1)} & \frac{-2}{\dot{I}_{pcc}(2)} & \frac{1}{\dot{I}_{pcc}(3)} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\dot{I}_{pcc}(2)} & \frac{-2}{\dot{I}_{pcc}(3)} & \frac{1}{\dot{I}_{pcc}(4)} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{\dot{I}_{pcc}(N)} & \frac{-2}{\dot{I}_{pcc}(N+1)} & \frac{1}{\dot{I}_{pcc}(N+2)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中:

$$b_u(n) = -\frac{\dot{V}_{\text{pec}}(n)}{\dot{I}_{\text{pec}}(n)} + \frac{2\dot{V}_{\text{pec}}(n+1)}{\dot{I}_{\text{pec}}(n+1)} - \frac{\dot{V}_{\text{pec}}(n+2)}{\dot{I}_{\text{pec}}(n+2)} \quad (14)$$

$$x_u(n) = \dot{V}_u(n) \quad (15)$$

化简得到:

$$J = (b_u - A_u x_u)^H (b_u - A_u x_u) + \lambda (C x_u)^H (C x_u) = b_u^H b_u - b_u^H A_u x_u - x_u^H A_u^H b_u + x_u^H (A_u^H A_u + \lambda C^H C) x_u \quad (16)$$

其中,上标 H 表示矩阵的共轭转置,将式(16)变换成以下形式:

$$J = b_u^H b_u - b_u^H A_u (A_u^H A_u + \lambda C^H C)^{-1/2} \times (A_u^H A_u + \lambda C^H C)^{1/2} x_u - x_u^H (A_u^H A_u + \lambda C^H C)^{-1/2} \times (A_u^H A_u + \lambda C^H C)^{1/2} A_u^H b_u + x_u^H (A_u^H A_u + \lambda C^H C) x_u = \| (A_u^H A_u + \lambda C^H C)^{1/2} x_u - (A_u^H A_u + \lambda C^H C)^{-1/2} A_u^H b_u \|^2 - b_u^H A_u (A_u^H A_u + \lambda C^H C)^{-1} A_u^H b_u + b_u^H b_u \quad (17)$$

在式(17)中,由于 $\| (A_u^H A_u + \lambda C^H C)^{1/2} x_u - (A_u^H A_u + \lambda C^H C)^{-1/2} A_u^H b_u \|^2 \geq 0$, 当其为 0 时,目标函数得到最小值。又因为 $A_u^H A_u + \lambda C^H C$ 是一个可逆矩阵,推算得到:

$$\dot{V}_u = x_u = (A_u^H A_u + \lambda C^H C)^{-1} A_u^H b_u \quad (18)$$

将计算出的 \dot{V}_u 中元素分别代入式(3)可计算得到系统侧谐波阻抗 Z_u 。

1.3 目标函数中 λ 的选择

对谐波阻抗估计的结果影响最大的因素主要有 2 个,分别为背景谐波发射水平以及系统侧和用户侧谐波阻抗幅值比。式(6)中,由于相邻采样点的谐波阻抗差值非常小,所以 $\|\Delta^2 Z_u\|^2$ 可视为 0。因此,系数 λ 对谐波阻抗估计结果有更直接的影响, λ 选择不当会导致结果误差较大。文中通过大量仿真来确定 λ 的取值范围,所涉及参数涵盖真实运行环境的所有情况。

按照图 1 所示等效谐波源电路设置两侧谐波源和谐波阻抗。参数 k 为 PCC 处两侧谐波电流的幅值比,表示背景谐波发射水平,即 $k = I_u/I_c$; 参数 m 为 PCC 处两侧谐波阻抗的幅值比,即 $m = Z_c/Z_u$ 。PCC 处谐波阻抗估计结果的均方根误差 e 由式(19)计算得到。

$$e = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{(C_{\text{real}}(n) - C_{\text{est}}(n))^2}{C_{\text{real}}^2(n)}} \quad (19)$$

式中: $C_{\text{real}}(n)$ 为第 n 个采样点的真实值; $C_{\text{est}}(n)$ 为第 n 个采样点的测量值。

首先确定 k 和 m 对谐波阻抗估计的影响,再分析在不同背景谐波发射水平、用户侧谐波阻抗远大

于和非远大于系统侧谐波阻抗的情况下,系数 λ 对谐波阻抗估计的影响,从而筛选出最合适的 λ 值。

模型仿真中,模拟电网实际运行中的谐波源点,利用大负荷用户点的负荷波动引起两侧电网波动并提取采样数据,进行谐波阻抗估计。

图 2 给出了参数 m 和 k 不同取值下,PCC 处系统侧估计谐波阻抗误差的变化趋势。

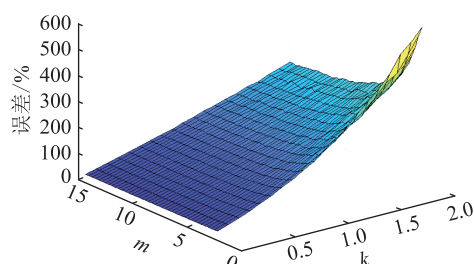


图 2 不同 m 和 k 下阻抗估计误差变化趋势

Fig.2 The variation trend of impedance estimation errors under different k and m

从图 2 中可以看出,参数 m 和 k 的取值对谐波阻抗测量结果的影响很大。在参数 m 一定的情况下,随着 k 的增大(即背景谐波发射水平升高),误差逐渐变大。而当参数 k 在 0.5~1.2 范围内时, m 的变化几乎不影响误差变化; $k > 1.5$ 时, m 越小误差越大。因此,当背景谐波发射水平较低或较高时,无论用户谐波阻抗远大于或非远大于系统侧谐波阻抗,均能获得较为准确的估计值;而在背景谐波发射水平极高的情况下,用户谐波阻抗须远大于谐波阻抗才能获得较为准确的估计值。

取 $k=0.5$ 和 $k=1.2$ 分别模拟背景谐波发射水平较低和较高的运行状况;取 $m=2$ 和 $m=10$ 分别对应系统侧和用户侧谐波阻抗值近似相等及用户侧谐波阻抗大于系统侧谐波阻抗 2 种运行条件。同时,设置 λ 的取值范围为 $10^{-6} \sim 10^6$, 参数 m 的取值范围为 2~10, 参数 k 的取值范围为 0.1~1.2 进行仿真,仿真结果如图 3 所示。

从图 3(a)、(b)中可以看出, k 在 0.1~1.0 范围时(即背景谐波发射水平较低),不论系数 λ 的取值如何,谐波阻抗估计误差均保持在一个较低的水平; k 在 1.0~1.5 范围时(即背景谐波发射水平较高),无论系统侧与用户侧谐波阻抗比值如何, λ 增大,谐波阻抗估计误差随之增大,所以较小的 λ 值有利于测量阻抗的精确估计。从图 3(c)、(d)中也可以看出,不论背景谐波发射水平、两侧谐波阻抗比值是大还是小, λ 越小,估计误差越小。

为使谐波阻抗估计误差较小且比较稳定,目标函数应选择一个合适的 λ 值区间。由于式(6)中目

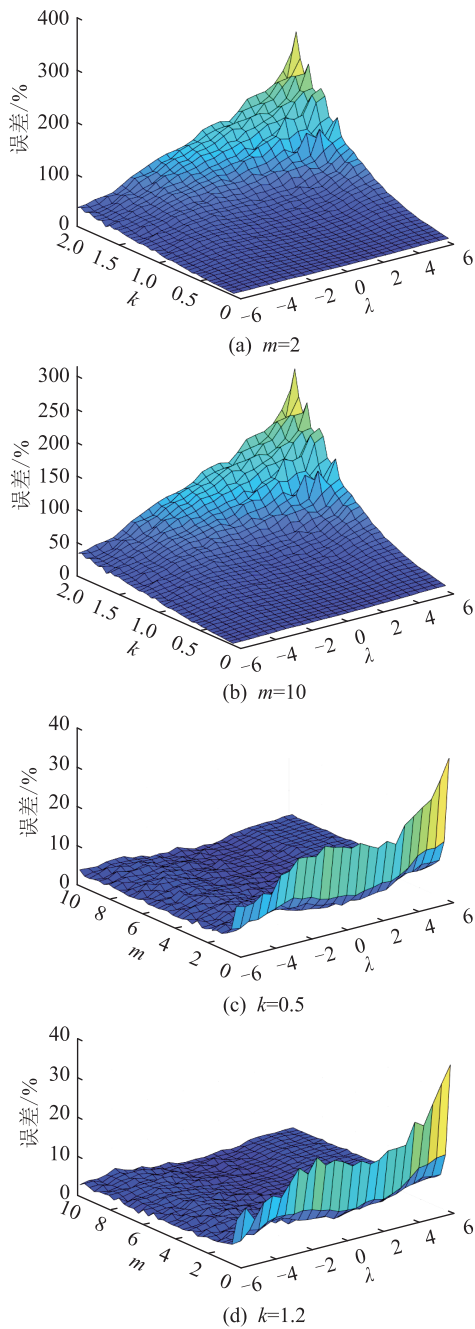


图3 不同 m, k, λ 下阻抗估计误差变化趋势

Fig.3 The variation trend of impedance estimation errors under different m, k and λ

标函数由二阶谐波阻抗变化量范数和二阶电网电压变化量范数两部分组成,当 k 和 λ 都变大时,二阶电网电压变化量范数的值远远大于二阶谐波阻抗变化量范数,此时目标函数是以背景谐波为主。随着 λ 增大,谐波阻抗估计结果是不理想的,特别是在背景谐波发射水平较高的情况下,谐波阻抗估计误差急剧增大,最极端的情况下,二阶谐波阻抗变化量的范数很小甚至可以忽略不计,这与文中提出的假设不相符。

另一方面,虽然谐波阻抗估计误差随着 λ 的减

小而减小,但是 λ 值不能为 0,否则目标函数将仅受二阶谐波阻抗变化量范数的影响而完全不受背景谐波影响。

综上,合适的 λ 值区间有利于谐波阻抗的估计。文中模拟背景谐波发射水平较低至较高,系统侧和用户侧谐波阻抗值近似相等至用户侧谐波阻抗大于系统侧谐波阻抗多种实际电网运行条件,涵盖了真实运行环境的所有情况,所以 λ 取值具有通用性。从仿真结果的误差趋势来看,当 λ 的值在区间 $[10^{-6}, 10^{-4}]$ 内时,文中所提方法具有比较准确且稳定的估计值,因此选取该区间可运用于目标方程式(7)。

1.4 算法总结

文中所提出的方法总结如下:

- (1) 获取 PCC 处谐波电压和谐波电流的测量数据;
- (2) 将测量数据划分为适当的子区间,一般子区间的样本数量小于 200;
- (3) 在每个子区间,根据式(9)生成 b_u, x_u 和 A_u ;
- (4) 根据式(18)计算出 \dot{V}_u ;
- (5) 根据式(3)计算出 Z_u 。

2 模拟仿真

根据图 1 中的谐波源等效模型进行仿真,以检验所提方法的有效性。比较文中提出的最小范数法(方法 1)、基于随机向量协方差法(方法 2)、基于二元线性回归法(方法 3)和波动量法(方法 4)的测量阻抗结果误差。谐波电流和谐波阻抗值设置如下:(1) 电网谐波阻抗设置为 $5+j10 \Omega$,用户侧谐波阻抗是系统侧的 m 倍,测量期间,系统侧阻抗幅值和相位有 1%的波动,用户侧谐波阻抗幅值和相角有 5%的波动;(2) 用户侧初始谐波电流设置为 $60+j80 \text{ A}$,系统侧谐波电流为用户侧的 k 倍,用户侧谐波电流幅值和相位有 30%的波动,系统侧谐波电流幅值和相位有 10%的波动。

仿真过程中,在 PCC 处生成 2 000 个谐波电压和谐波电流样本,每个子区间有 200 个样本(即 $N=200$),应用上述 4 种方法来估计系统侧谐波电压。根据误差公式计算幅值和相位角均方根误差,结果如表 1—表 4 所示,计算时间如表 5 所示。

由表 1 可知,背景谐波发射水平较低(即 $k=0.2$)时,与其他方法相比,文中所提出的基于最小范数的系统侧谐波阻抗估计方法具有较低的误差,优势明显。由表 2 可知,随着背景谐波发射水平的明显增加(即 $k=1.5$),方法 1—方法 4 的误差都有所

表 1 谐波阻抗误差 ($k=0.2$)

m	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
1.5	0.370 3	0.486 9	0.811 5	39.264 1
2	0.354 3	0.493 4	0.539 1	33.434 1
3	0.214 8	0.269 7	0.295 0	28.680 7
5	0.078 0	0.337 0	0.528 6	25.119 3
10	0.095 1	0.191 0	0.144 7	22.498 7

表 2 谐波阻抗误差 ($k=1.5$)

m	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
1.5	15.299 4	16.162 8	32.194 6	571.721 2
2	9.753 7	10.697 6	14.534 8	463.215 2
3	6.955 7	7.939 1	9.363 5	269.791 4
5	4.357 6	4.591 1	5.175 1	190.828 6
10	1.513 2	1.878 1	3.273 5	150.481 3

表 3 谐波阻抗误差 ($m=2$)

k	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
0.2	0.141 8	0.155 1	0.407 1	33.566 3
0.5	1.719 6	2.022 1	3.273 2	100.246 3
0.7	2.136 8	3.208 5	3.606 7	162.646 2
0.9	6.639 3	6.837 9	7.882 0	247.689 1
1.1	9.662 5	11.117 4	11.847 7	377.918 9
1.2	11.642 2	11.855 9	13.867 0	465.783 1
1.4	14.229 2	15.473 1	20.564 7	753.845 8

表 4 谐波阻抗误差 ($m=10$)

k	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
0.2	0.046 0	0.201 7	0.182 1	22.501 3
0.5	0.199 6	0.219 7	0.504 4	57.663 1
0.7	0.297 8	0.786 3	1.155 0	82.778 9
0.9	1.271 8	1.348 6	2.086 4	150.486 1
1.1	1.519 3	1.699 0	2.096 6	136.571 3
1.2	1.645 4	2.124 4	2.753 6	109.667 9
1.4	1.688 8	1.697 8	3.569 0	180.682 6

表 5 4 种方法的谐波阻抗估计计算时间对比

Table 5 Comparison of calculation time for harmonic impedance estimation using four methods

方法	计算时间/s			
	$k=0.2$	$k=1.5$	$m=2$	$m=10$
方法 1	0.019 0	0.018 1	0.017 6	0.017 5
方法 2	0.008 8	0.008 8	0.011 2	0.015 1
方法 3	2.809 5	1.592 9	1.434 9	1.443 6
方法 4	0.002 0	0.000 4	0.002 9	0.001 0

增大,其中方法 3、4 的误差增大更明显,而文中所提方法仍能保持较小的误差范围。

由于方法 4 体现的是在电力系统某处电压、电流急剧变化引起的谐波阻抗变化,受背景谐波波动的影响较大,从表 2 中可以看出,计算所得的阻抗误差极大。方法 3 主要体现的是某一时段谐波阻抗的均值,计算谐波阻抗相对于方法 4 而言更为平稳,但同样受背景谐波波动的影响,在某些时段阻抗幅值估计结果误差偏大。方法 2 相比方法 3、4,从统计意义上抑制了背景谐波波动对谐波阻抗估计的影响,但没有考虑电网电压变化和系统侧谐波阻抗变化的影响。综上,无论电网背景谐波发射水平高低、系统侧和用户侧谐波阻抗值如何,文中提出的方法在结果误差上与其他方法相比都较小。

由表 5 可知,方法 3 所需时间最长,其余算法的计算时间则相对较短。文中所提方法须迭代求解系统侧谐波阻抗值,计算时间略长于方法 2 和方法 4,但相比于方法 3 仍有明显优势。

3 实例验证

文中的现场实测数据来自于某工业电弧炉用户的 150 kV 母线为容量为 100 MV·A 的直流电弧炉供电的过程,测量装置为 LEM TOPAS 1000 型电力网络分析仪,采样频率为 6 400 Hz,总测量时间为 10 h。由于用户侧安装了 5 次、7 次谐波的滤波器,滤除了系统中绝大多数 5 次、7 次谐波,而系统中其他次谐波含量本来就少,所以在采样点处测量的 5 次、7 次谐波电流及其他次谐波电流均太小,文中没有将其用于计算相应的谐波阻抗,而 3 次谐波对阻抗估计的影响也是极小的。图 4 显示了 PCC 处 3 次谐波电压和电流波形。由文献 [19] 可知,算例中 3 次谐波阻抗参考值为 $3.433 + j9.486 \Omega$ 。该实测数据包含了 \dot{V}_{pcc} 和 \dot{I}_{pcc} 各自的幅值和相位信息。

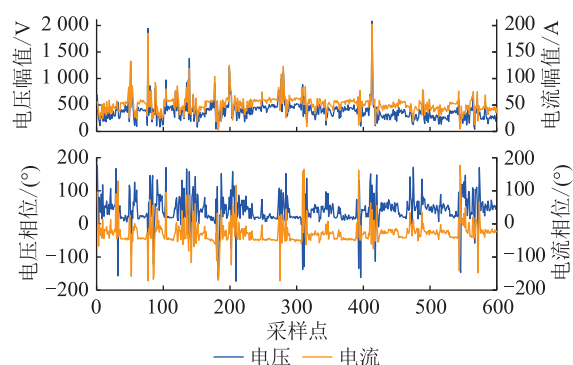


图 4 3 次谐波电压和电流的幅度和相位角波形
Fig.4 Amplitude and phase angle waveforms of 3rd harmonic voltage and current

在每个子区间设置 60 个样本,对测量数据应用

滑动方法(即 1~60、2~61、...),计算结果见表 6。

表 6 谐波阻抗计算结果

Table 6 Harmonic impedance calculation results

方法	计算结果/ Ω	计算误差/%
方法 1	3.555+j9.511	1.655 0
方法 2	3.667+j9.446	2.660 0
方法 3	3.800+j9.416	3.994 0
方法 4	2.436+j7.028	25.954 6

由表 6 可知,方法 4 的计算误差较大,而方法 1、2、3 都能取得较好的估计效果,这 3 种方法的误差并不大,均在 5%以内。相比于现有方法,文中所提方法的计算结果更加接近于参考值,能更好地估计系统侧谐波阻抗。

4 结语

文中提出了基于最小范数的系统侧谐波变阻抗求解技术,相比现有方法,文中考虑了系统侧谐波阻抗波动的影响,更符合实际电网运行状况。当系统侧运行方式发生变化,系统侧谐波阻抗出现波动时,文中所提出的方法依然有一个较为准确的值。当用户侧谐波阻抗接近于系统侧谐波阻抗且背景谐波波动较大时,所提方法依旧能获得一个比较精准的值且在测量时段内谐波阻抗相对稳定。但对于背景谐波发射水平极高的情况,用户侧谐波阻抗须远大于系统侧谐波阻抗才能获得较为准确的阻抗估计值,具有一定的局限性。另外,在系统侧谐波阻抗波动幅度较大的场景下,文中方法的测量结果并不理想,因此将进行进一步研究。

参考文献:

- [1] 金祖洋,杨洪耕,潘爱强. 多直流馈入城市输电网谐波放大特性分析[J]. 电网技术,2016,40(12):3857-3864.
JIN Zuyang, YANG Honggeng, PAN Aiqiang. Analysis on harmonic amplification characteristics of urban transmission network with multi-infeed DC system[J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3857-3864.
- [2] SAFARGHOLI F, MALEKIAN K, SCHUFFT W. On the dominant harmonic source identification—part I: review of methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3):1268-1277.
- [3] SAFARGHOLI F, MALEKIAN K, SCHUFFT W. On the dominant harmonic source identification—part II: application and interpretation of methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3):1278-1287.
- [4] XU F W, YANG H G, ZHAO J S, et al. Study on constraints for harmonic source determination using active power direction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6):2683-2692.
- [5] 吴俊,毛南平,王行亚,等. 基于波动和相关性复线性回归的系统谐波阻抗计算方法[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,

42(1):114-119.

WU Jun, MAO Nanping, WANG Hangya, et al. Harmonic impedance calculation method of system based on complex linear regression of fluctuation and correlation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1):114-119.

- [6] 缪江豫. 基于波动量法的用户侧谐波发射水平评估方法研究[J]. 河南科技,2018(14):56-58.
MIAO Jiangyu. Assessing the harmonic emission level based on fluctuation method methodological research[J]. Henan Science and Technology, 2018(14):56-58.
- [7] 王焰宇,随慧斌. 谐波源责任划分技术的工程应用[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(14):140-148.
WANG Zhaoyu, SUI Huibin. Engineering application of harmonic source responsibility division technology[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14):140-148.
- [8] 吕洋. 电网谐波阻抗测量[D]. 杭州:浙江大学,2010.
LYU Yang. Measurement of power system harmonic impedance [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [9] XU Y H, HUANG S, LIU Y Y. Partial least-squares regression based harmonic emission level assessing at the point of common coupling[C]//2006 International Conference on Power System Technology. Chongqing, China. IEEE, 2007:1-5.
- [10] 林顺富,李育坤,李寅,等. 基于混合寻优算法及分离一致性判断的系统谐波阻抗估计[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20):106-116.
LIN Shunfu, LI Yukun, LI Yin, et al. Harmonic impedance estimation based on a hybrid optimization algorithm and separation consistency screening[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20):106-116.
- [11] 王行亚,肖先勇,吴俊,等. 基于线性度校验的多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):2826-2835.
WANG Hangya, XIAO Xianyong, WU Jun, et al. Utility harmonic impedance estimation based on binary linear regression with linearity calibration[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9):2826-2835.
- [12] 杜文龙,杨洪耕,马晓阳. 基于快速独立分量分析的谐波间谐波频谱分离算法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13):115-122.
DU Wenlong, YANG Honggeng, MA Xiaoyang. Harmonic/interharmonic spectrum separation algorithm based on fast independent component analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13):115-122.
- [13] 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. A method for harmonic emission level assessment based on robust independent component analysis[J]. Power System Technology, 2020, 44(8):3007-3013.
- [14] 郭振涛,迟长春,陈俊杰. 基于独立分量分析的谐波检测方法研究[J]. 机电信息, 2018(9):53, 55.
GUO Zhenhao, CHI Changchun, CHEN Junjie. Research on

- harmonic detection method based on independent component analysis[J]. Mechanical and Electrical Information, 2018(9): 53,55.
- [15] 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.
- [16] 雷达,常潇,刘子腾,等. 基于DBSCAN聚类和数据筛选的系统谐波阻抗估算[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 93-98.
LEI Da, CHANG Xiao, LIU Ziteng, et al. Estimation of system harmonic impedance based on DBSCAN clustering and data filtering[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 93-98.
- [17] 刘子腾,徐永海,陶顺. 基于SHIBSS方法和数据优选的系统侧谐波阻抗估算方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 193-199.
LIU Ziteng, XU Yonghai, TAO Shun. Estimation method of harmonic impedance on system side based on SHIBSS method and data optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 193-199.
- [18] 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.
YAN Xinyu, ZHONG Liangliang, LIN Shunfu. Utility harmonic impedance estimation based on independent component analysis improved by particle swarm optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(11): 81-87.
- [19] 江友华,刘子瑜,张煜,等. 基于非参数贝叶斯谐波阻抗估计的谐波责任区分[J]. 浙江电力, 2021, 40(3): 59-65.
JIANG Youhua, LIU Ziyu, ZHANG Yu, et al. Division of harmonic responsibility based on nonparametric Bayesian harmonic impedance estimation[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(3): 59-65.
- [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.
- [21] 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.

作者简介:



徐方维

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

曾雪(1996),女,硕士,研究方向为电能质量及谐波等;

王川(1996),男,博士在读,研究方向为电能质量及谐波责任划分等。

Solution technology of system side harmonic variable impedance based on minimum norm

XU Fangwei¹, ZENG Xue^{1,2}, WANG Chuan¹, ZHENG Hongru¹

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

2. State Grid Sichuan Electric Power Company Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: To calculate the harmonic impedance on the system side is crucial for the safe and stable operation of the new power system. Existing algorithms for harmonic impedance estimation usually assume that the harmonic impedance on the system side is constant during the measurement period. However, the voltage on the system side always changes according to the working mode of the power grid or access of large power load demand, resulting in fluctuations of the harmonic impedance on the system side. Luckily, the harmonic impedance on the system side does not change much in the adjacent sampling time interval. On this basis, the paper proposes a new non-intervention solution for the variable harmonic impedance on the system side. In this method, the second-order change of the harmonic impedance and the second-order change of voltage in the adjacent sampling time interval are taken as the objective function. The harmonic impedance on the system side is solved by minimizing the target function. The proposed method is proved to be accurate and reliable by simulation and practical analysis, especially in the condition that the strong background harmonic or user-side harmonic impedance is not much stronger than the harmonic impedance on the system side.

Keywords: harmonic impedance; amount of impedance change; minimum norm; background harmonics; power quality; non-interventional

(编辑 陆海霞)