

谐波阻抗估计的非光滑部分线性回归方法

华回春, 刘哲, 贾秀芳

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 系统谐波阻抗的估计是电能质量研究领域的难点。波动量法作为工程上计算系统谐波阻抗的成熟方法, 在背景谐波波动占主导的情况下是失效的。为了弥补波动量法的缺陷, 提出了系统谐波阻抗计算的非光滑复数域部分线性回归模型, 设计了细分迭代算法, 实现了模型的求解。所提方法不仅能够背景谐波波动占主导的情况下计算系统谐波阻抗, 也能够背景谐波波动不占主导的情况下实现系统谐波阻抗的准确计算。仿真算例和实际测试数据验证了所提方法的有效性。

关键词: 电能质量; 谐波阻抗; 部分线性回归模型; 背景谐波电压; 谐波分析

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.018

0 引言

准确计算系统谐波阻抗是用户谐波发射水平评估、电力系统仿真分析以及无功补偿设备设计的关键^[1]。根据是否会对系统产生干扰, 谐波阻抗估计主要有干预式和非干预式2类方法。干预式方法通过向系统强迫注入谐波电流或间谐波电流, 或通过开断系统某一支路来测量谐波阻抗^[2]。非干预式方法通过测量公共连接点处的谐波电压和谐波源支路接入连接点处的谐波电流估计谐波阻抗。干预式方法中注入的谐波电流过小则谐波阻抗测量结果不准确, 注入谐波电流过大则影响系统的稳定运行。而非干预式方法不需要向系统注入谐波电流, 不会影响系统的稳定运行, 具有显著优势^[3-12]。

工程上应用较为广泛的非干预式方法有解析法^[13]、近似算法^[14-16]、波动量法^[17-18]。解析法通过建立系统各元件的谐波阻抗模型, 根据电路关系进行谐波阻抗的计算。但是, 由于元件的谐波阻抗模型并不精确, 计算结果的误差很难控制。同时, 解析法的计算量巨大, 不适用于大系统的谐波阻抗计算。国际电工委员会(IEC)推荐的方法是近似算法, 某次的谐波阻抗等于谐波阻抗次数和基波电抗的乘积。该方法非常简单, 常用于实际工程的估算分析。但是, 近似算法要求各元件都是电感性的, 并且忽略电阻, 所以近似算法的计算准确性较差。对于实际的电力系统, 在用户侧谐波波动占主导的情况下, 波动量法是非常简单有效的一种方法。波动量法通过测量公共连接点处的谐波电压和谐波源接入母线处的谐波电流进行谐波阻抗的估计, 谐波阻抗等于谐波剧烈波动处的谐波电压差和谐波

电流差的比值。实际上, 波动量法及其改进的方法都要求: 与系统侧相比, 用户侧谐波占主导; 在此前提下与背景谐波波动相比, 关注谐波源的谐波波动也要占主导, 即要求“双主导”。由于电力系统谐波主要由非线性用户产生, 与系统侧相比, 用户侧谐波占主导的条件往往是满足的, 但是与背景谐波波动相比, 关注谐波源的谐波波动占主导的条件却不一定满足。在背景谐波波动占主导的情况下, 利用波动量法计算系统谐波阻抗是失效的。如果能计算出波动的背景谐波, 则在背景谐波波动占主导的情况下也能准确计算系统谐波阻抗。由于在背景谐波波动占主导的情况下, 系统谐波阻抗满足的数学模型实际上是部分线性回归模型^[19-20], 求解部分线性回归模型可得到波动的背景谐波并准确计算系统谐波阻抗。文献[21]采用部分线性核估计方法求解部分线性回归模型, 实现了系统谐波阻抗的计算。但是, 该算法只适用于背景谐波电压曲线光滑的情况。由于实际工程的背景谐波电压曲线不可能是光滑的, 并考虑到谐波阻抗满足的部分线性回归模型是复数域的部分线性回归模型, 因此, 本文将研究谐波阻抗估计的非光滑复数域部分线性回归方法。

本文给出了传统波动量法的适用范围, 分析了在背景谐波波动占主导情况下该方法失效的原因; 然后构建了谐波阻抗计算满足的复数域部分线性回归模型, 设计了模型的细分迭代算法, 实现了非光滑复数域部分线性回归模型的求解; 最后给出了仿真和实测数据分析, 验证了所提算法的有效性。

1 波动量法适用范围及其缺陷

针对系统谐波阻抗的估计, 波动量法是在工程应用中最为常用的方法。以图1为例, 在某变电站母线X处接入了多个谐波源负荷, 假设负荷A为炼钢厂, 负荷B、C和D是其余非线性负荷。

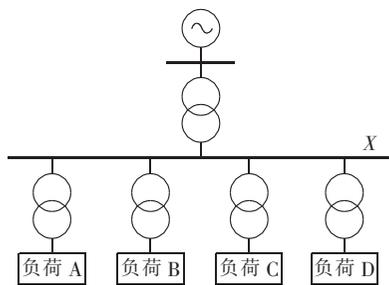


图1 系统谐波阻抗测量示意图

Fig.1 Schematic diagram of harmonic impedance measuring

若要估计除负荷 A 以外其余部分的 h 次系统谐波阻抗,需要利用电能质量监测仪在负荷 A 接入母线处采集 h 次谐波电压和谐波电流数据。若母线 X 处监测到 h 次谐波电压记为 \mathbf{U}_{hX} , 负荷 A 接入母线 X 处的 h 次谐波电流记为 \mathbf{I}_{hA} , $Z_{hX,A}$ 为除负荷 A 以外其余部分等效的 h 次系统谐波阻抗,将除负荷 A 以外的其余谐波源在母线 X 处产生的谐波电压都看作背景谐波电压 $\mathbf{U}_{hX,0}$, 根据电路关系有:

$$\mathbf{U}_{hX} = Z_{hX,A} \mathbf{I}_{hA} + \mathbf{U}_{hX,0} \quad (1)$$

因此,在 2 个相邻的采样时刻 k 和 $k+1$,有:

$$\mathbf{U}_{hX}(k) = Z_{hX,A} \mathbf{I}_{hA}(k) + \mathbf{U}_{hX,0}(k) \quad (2)$$

$$\mathbf{U}_{hX}(k+1) = Z_{hX,A} \mathbf{I}_{hA}(k+1) + \mathbf{U}_{hX,0}(k+1) \quad (3)$$

式(3)与式(2)相减有:

$$Z_{hX,A} = \frac{\mathbf{U}_{hX}(k+1) - \mathbf{U}_{hX}(k)}{\mathbf{I}_{hA}(k+1) - \mathbf{I}_{hA}(k)} - \frac{\mathbf{U}_{hX,0}(k+1) - \mathbf{U}_{hX,0}(k)}{\mathbf{I}_{hA}(k+1) - \mathbf{I}_{hA}(k)} \quad (4)$$

当背景谐波波动很小或者背景谐波波动相对于关注谐波源的谐波波动很小时,式(4)中等号右端第 2 项的分子 $\mathbf{U}_{hX,0}(k+1) - \mathbf{U}_{hX,0}(k)$ 可近似为 0, 则式(4)可以近似为:

$$Z_{hX,A} \approx \frac{\mathbf{U}_{hX}(k+1) - \mathbf{U}_{hX}(k)}{\mathbf{I}_{hA}(k+1) - \mathbf{I}_{hA}(k)} \quad (5)$$

利用上式估计系统谐波阻抗即为波动量法。波动量法的缺陷是当背景谐波波动相对于关注谐波源的谐波波动较大时, $\mathbf{U}_{hX,0}(k+1) - \mathbf{U}_{hX,0}(k)$ 不能近似为 0, 因此系统谐波阻抗不能用式(5)近似。所以在背景谐波波动较大时,波动量法是失效的。

2 等效谐波阻抗计算的复数域部分线性回归模型

考虑系统谐波阻抗满足式(1),希望通过采集到的谐波电压和谐波电流数据计算系统谐波阻抗。若背景谐波电压和系统等效谐波阻抗都是常数,则式(1)是一个复数域的线性回归模型,可以用复线性最小二乘方法求解系统的等效谐波阻抗和背景谐波电压。由于系统的运行方式往往不发生大的变化,因此系统谐波阻抗可以近似看作是不变的。但是,背景谐波源注入公共连接点处的谐波电流随时间变化经常是波动的,因此背景谐波往往不是常数。此时,式

(1)不再是传统的复数域线性回归模型。记:

$$\mathbf{U}_{hX} = \mathbf{U}_{XR} + j\mathbf{U}_{XI} \quad (6)$$

$$Z_{hX,A} = Z_r + jZ_x \quad (7)$$

$$\mathbf{I}_{hA} = \mathbf{I}_{AR} + j\mathbf{I}_{AI} \quad (8)$$

$$\mathbf{U}_{hX,0} = \mathbf{U}_{OR} + j\mathbf{U}_{OI} \quad (9)$$

其中, $\mathbf{U}_{XR}, \mathbf{I}_{AR}, \mathbf{U}_{OR}$ 分别为相量 $\mathbf{U}_{hX}, \mathbf{I}_{hA}, \mathbf{U}_{hX,0}$ 的实部; $\mathbf{U}_{XI}, \mathbf{I}_{AI}, \mathbf{U}_{OI}$ 分别为各相量的虚部; Z_r, Z_x 分别为阻抗的电阻分量和电抗分量。则式(1)可以写成:

$$\mathbf{U}_{XR} + j\mathbf{U}_{XI} = Z_r \mathbf{I}_{AR} - Z_x \mathbf{I}_{AI} + \mathbf{U}_{OR} + j(Z_r \mathbf{I}_{AI} + Z_x \mathbf{I}_{AR} + \mathbf{U}_{OI}) \quad (10)$$

因此,有:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{XR} = Z_r \mathbf{I}_{AR} - Z_x \mathbf{I}_{AI} + \mathbf{U}_{OR} \\ \mathbf{U}_{XI} = Z_r \mathbf{I}_{AI} + Z_x \mathbf{I}_{AR} + \mathbf{U}_{OI} \end{cases} \quad (11)$$

写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{XR} & \mathbf{U}_{XI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{AR} & \mathbf{I}_{AI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_r & Z_x \\ -Z_x & Z_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{OR} & \mathbf{U}_{OI} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中,阻抗矩阵为常数矩阵,背景谐波电压矩阵的数值随时间发生改变,因此式(12)表示的模型是数理统计学领域中的实数域部分线性回归模型。可通过核估计方法同时求解出该模型不变的系统谐波阻抗和变化的背景谐波电压,但是要求背景谐波电压随时间变化而形成的曲线是光滑的,即曲线上每一点处都应具有切线,且切线随切点的移动而连续转动。对于工程应用而言,这几乎是不可能的。因此目前数学中的实数域部分线性回归模型对于工程中计算系统谐波阻抗问题并不适用。同时,式(1)中电压、电流均为相量,有着自身特定的物理含义,不能拆分为实部与虚部分别进行参数的回归。基于以上原因,本文考虑直接在复数域上定义部分线性回归模型并设计算法进行求解更符合实际。目前,在数理统计学中未见有复数域部分线性回归模型的研究,仿照实数域部分线性回归模型的定义,给出系统等效谐波阻抗满足的复数域部分线性回归模型表达如下:

$$\mathbf{U}_{hX}(k) = Z_{hX,A} \mathbf{I}_{hA}(k) + \mathbf{U}_{hX,0}(k) \quad k=1,2,\dots,n \quad (13)$$

其中, n 为经 FFT 后得到的离散值个数; $\mathbf{U}_{hX}(k)$ 为在公共连接点处测量的电压经 FFT 后得到的第 k 个 h 次谐波电压; $\mathbf{I}_{hA}(k)$ 为负荷 A 接入母线处测量的电流经 FFT 后得到的第 k 个 h 次谐波电流; $\mathbf{U}_{hX,0}(k)$ 为与第 k 个 h 次谐波电压和谐波电流同时刻发生的未知的背景谐波电压相量值,在不同的时刻,背景谐波电压的取值会不一样。系统等效谐波阻抗 $Z_{hX,A}$ 也是未知的。式(13)中所有量都是复数形式的,因此,式(13)可定义为复数域部分线性回归模型。

3 模型的细分迭代求解方法

由于背景谐波电压的变化曲线是非光滑的,核光滑估计算法不适合于求解如式(13)所示的复数域部分线性回归模型,设计迭代算法求解复数域部分线性回归模型。算法描述如下。

a. 设置初始值,令细分次数 $d=2$,计算精度 δ_0 、最小窗宽 b_0 。

b. 计算窗宽 $b = \left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor$,若 $b < b_0$,求解失败,算法终止,否则转步骤 c。

c. 将 U_{hx} 与 I_{ha} 数据分成 d 段,每段窗宽为 b 。记第 p 段数据如下:谐波电压为 $U_{hx}(b(p-1)+1), U_{hx}(b(p-1)+2), \dots, U_{hx}(b(p-1)+b)$;谐波电流为 $I_{ha}(b(p-1)+1), I_{ha}(b(p-1)+2), \dots, I_{ha}(b(p-1)+b)$ 。用上述数据构造复数域部分线性回归模型:

$$U_{hx}(l) = Z_{hx,A} I_{ha}(l) + U_{hx,0}(l) \quad (14)$$

其中, $l = b(p-1)+1, b(p-1)+2, \dots, b(p-1)+b$ 。

将式(14)近似为复线性回归模型:

$$U_{hx}(l) = Z_{hx,A}(p) I_{ha}(l) + U_{hx,0}(p) \quad (15)$$

表示成矩阵形式:

$$y = Ax \quad (16)$$

$$y = \begin{bmatrix} U_{hx}(b(p-1)+1) \\ U_{hx}(b(p-1)+2) \\ \vdots \\ U_{hx}(b(p-1)+b) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} I_{ha}(b(p-1)+1) & 1 \\ I_{ha}(b(p-1)+2) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ I_{ha}(b(p-1)+b) & 1 \end{bmatrix}$$

$$x = [Z_{hx,A}(p) \quad U_{hx,0}(p)]^T$$

则第 p 段系统谐波阻抗和背景谐波电压求解结果为:

$$x = (\bar{A}'A)^{-1} \bar{A}'y \quad (17)$$

令 $\varepsilon = y - Ax$, 计算 $e(p) = \sum_{l=1}^b |\varepsilon_l|$, 分别令 $p=1, 2, \dots, d$, 可以求得 $[Z_{hx,A}(1) \quad Z_{hx,A}(2) \quad \dots \quad Z_{hx,A}(d)]$ 以及 $[e(1) \quad e(2) \quad \dots \quad e(d)]$ 。

d. 对 $e(1), e(2), \dots, e(d)$ 从小到大进行排序, 记结果为 $e(s_1), e(s_2), \dots, e(s_d)$, 其中 s_1, s_2, \dots, s_d 为 $1, 2, \dots, d$ 的全排列。若 $e(s_1) > \delta_0$, 则 $d=2d$, 转步骤 b, 否则, 记:

$$c = \max \{m | e(s_m) \leq \delta_0, m=1, 2, \dots, d\} \quad (18)$$

则系统侧谐波阻抗为:

$$Z_{hx,A} = \frac{1}{c} \sum_{q=1}^c Z_{hx,A}(s_q) \quad (19)$$

系统侧谐波阻抗估计的平均误差 \bar{e} 为:

$$\bar{e} = \frac{1}{c} \sum_{q=1}^c e(s_q) \quad (20)$$

e. 计算背景谐波电压为:

$$U_{hx,0}(k) = U_{hx}(k) - Z_{hx,A} I_{ha}(k) \quad k=1, 2, \dots, n \quad (21)$$

4 仿真实证

采用如图 2 所示的多电压等级仿真测试系统进行仿真验证。等值系统与 220 kV 母线相连, 经变电站 2 个主变压器降压为负荷侧供电。其中主变压器 1 所连 110 kV 母线所带负载为电气化铁路模型和电弧炉模型; 主变压器 2 所连 110 kV 母线, 经变压器

降压为 35 kV 或 6 kV, 为线性负载 A、B、C、D、E 供电。其中电力机车^[22]、电弧炉模型^[23]电路示意图分别如图 3、图 4 所示, 线性负载参数如表 1 所示。

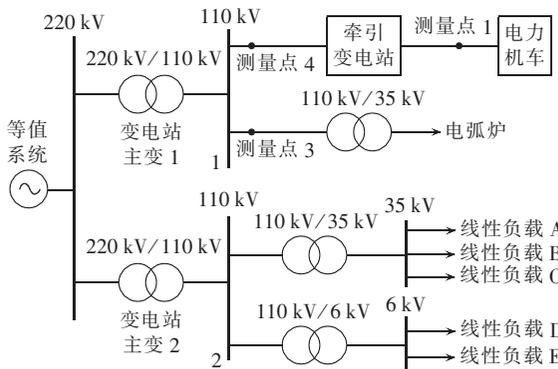


图 2 多电压等级仿真测试系统

Fig.2 Multi-level simulation system

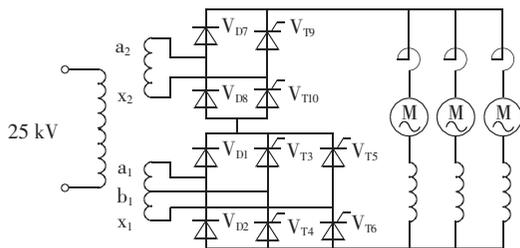


图 3 电力机车主电路图

Fig.3 Main circuit of electric locomotive

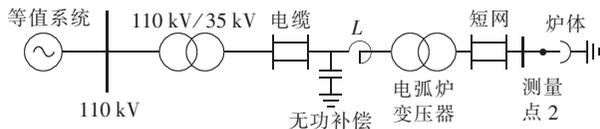


图 4 电弧炉供电系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of power supply system for electric arc furnace

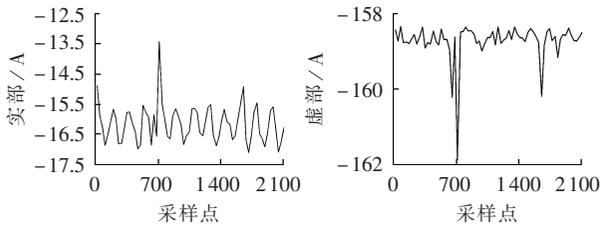
表 1 线性负载参数

Table 1 Parameters of linear loads

负荷	电压等级/kV	有功功率/MW	无功功率/Mvar
A	35	12	0.5
B	35	12	1
C	35	2	0.05
D	6	0.6	0.01
E	6	1.1	0.02

以 5 次谐波为例, 在主变压器 1 所连 110 kV 母线处接入典型的谐波源负荷电力机车和电弧炉。在图 2 中所示的测量点 1 及图 4 所示的测量点 2 处, 对电力机车整流电路和电弧炉炉体等效模型注入系统的 5 次谐波电流进行测量, 谐波电流波形分别如图 5 和图 6 所示。设置计算步长为 1 s, 取 1 min 数据的平均值作为一个样本点, 共取 2 100 个点, 模拟了实际系统中连续 35 h 的变化情况。

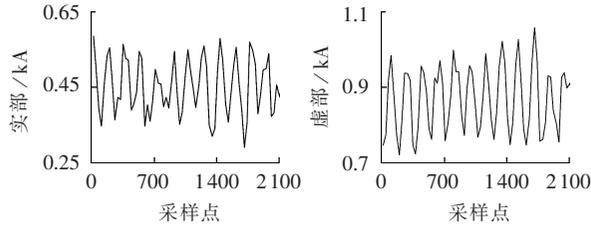
本文以电弧炉支路为例, 进行等效谐波阻抗的计算。将除电弧炉支路以外的系统其余部分等效为



(a) 5 次谐波电流实部 (b) 5 次谐波电流虚部

图 5 电力机车注入的 5 次谐波电流

Fig.5 5th harmonic current injected by electric locomotive



(a) 5 次谐波电流实部 (b) 5 次谐波电流虚部

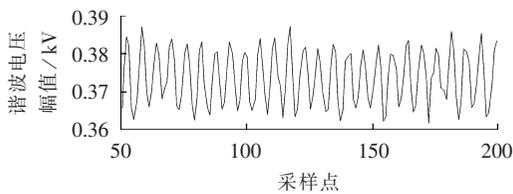
图 6 电弧炉注入的 5 次谐波电流

Fig.6 5th harmonic current injected by electric arc furnace

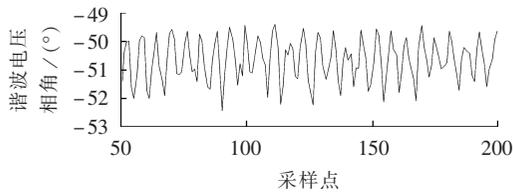
系统侧谐波阻抗,将除电弧炉以外的其余部分产生的谐波看成背景谐波。

以前 6h 为例,分别测量 110kV 母线 1 处的瞬时电压值和电弧炉支路的瞬时电流值,测量点 3 如图 2 所示。根据国家标准 GB/T 14549—1993 的要求,每 3 s 取一个有效值,经 FFT 后,得到一组母线处的 5 次谐波电压相量值和电弧炉支路的 5 次谐波电流相量值,分别如图 7 和图 8 所示。当关注谐波源的谐波波动存在大的突变时,在这些剧烈波动处往往可以忽略背景谐波波动的影响。但是,从图 7 和图 8 可以发现,关注谐波源没有显著的谐波突变,因此背景谐波波动的影响可能存在。

为了判断背景谐波波动的影响能否忽略,在图 2 所示的测量点 4 处测量电力机车支路的 5 次谐波



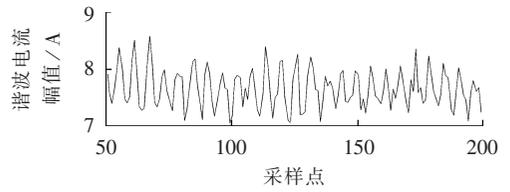
(a) 5 次谐波电压幅值



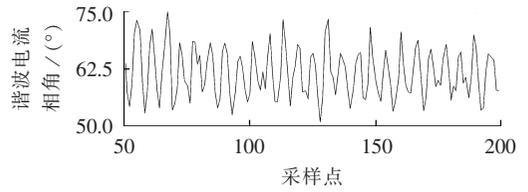
(b) 5 次谐波电压相角

图 7 母线 1 处 5 次谐波电压测量值

Fig.7 Measured 5th harmonic voltage of Bus 1



(a) 电弧炉的 5 次谐波电流幅值

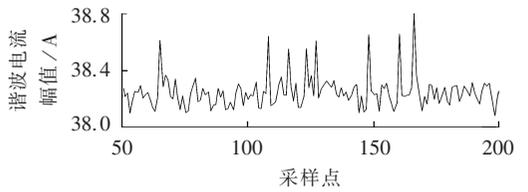


(b) 电弧炉的 5 次谐波电流相角

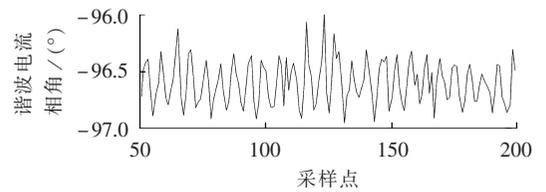
图 8 电弧炉接入母线处的 5 次谐波电流测量值

Fig.8 Measured 5th harmonic current of electric arc furnace branch

电流,如图 9 所示。由图 8 与图 9 的对比可以看出,此时电力机车支路的谐波波动与关注的电弧炉支路相比幅值较大,因此背景谐波波动的影响不能忽略。



(a) 电力机车的 5 次谐波电流幅值



(b) 电力机车的 5 次谐波电流相角

图 9 电力机车接入母线处的 5 次谐波电流测量值

Fig.9 Measured 5th harmonic current of electric locomotive branch

分别采用主导波动量法、独立随机矢量协方差法、二元线性回归法、稳健回归法以及本文提出的方法计算系统等效谐波阻抗,计算结果如表 2 所示。通过单位电流注入法求得系统等效谐波阻抗真实值为 $10.1247 \angle 32.7853^\circ \Omega$ 。可以看出,二元线性回归法在背景谐波波动的情况下,完全无法对等效谐波阻

表 2 各方法计算等效谐波阻抗结果比较

Table 2 Equivalent harmonic impedance calculated by different methods

算法	等效谐波阻抗/ Ω	误差/%
主导波动量法	$7.0232 \angle 31.5706^\circ$	30.68
独立随机矢量协方差法	$8.8277 \angle 32.1845^\circ$	12.85
二元线性回归法	$0.3555 \angle 44.5146^\circ$	96.56
稳健回归法	$4.6286 \angle -11.8453^\circ$	74.72
本文方法	$9.9680 \angle 32.1573^\circ$	1.89

抗进行计算;稳健回归法在背景谐波平稳随机的情况下,可以通过反复加权进行分析以得到理想的结果,但由图 5 和图 9 可见,此时背景谐波波动较大,导致稳健回归法对等效谐波阻抗的计算误差较大,达 74.72%;主导波动量法在用户谐波占主导的情况下,可通过有效的筛选手段剔除不良数据,在一定程度上避免背景谐波波动的影响,但由图 8 与图 9 的对比可见,此时背景谐波波动占据主导地位,运用主导波动量法无法得到足够的样本点,会造成估计信息删失,不能准确反映等效谐波阻抗;而本文所提方法可准确计算波动的背景谐波,在考虑了波动的背景谐波的前提下实现了系统等效谐波阻抗的计算,计算结果的相对误差为 1.89%,效果非常显著。

5 实测数据计算分析

在实际工程中,准确的谐波阻抗是未知的。为了能够实现比较和分析,采用能够利用波动量法求解谐波阻抗的谐波电压和谐波电流数据,否则在不能得到用于作为对比的谐波阻抗参考值的前提下,难以说明所提算法结果的准确性。同时,也要求数据存在背景谐波波动占主导的区间,否则难以说明所提方法较波动量法及其改进方法具有更广的适用性。

实测数据来自江苏省某县某 35 kV 铸钢专线用户,测试点为 110 kV 供电变电站 35 kV 侧的用户进线处,用户接入系统的主接线示意图如图 10 所示。

利用 Fluke 1760 采集测试点的电能质量数据,采样频率 10.24 kHz,1 min 记录一个点,采样时间为 2011 年 6 月 27 日 16:53 至 23:53。以 11 次谐波为例进行分析,基波电流、11 次谐波电压和 11 次谐波电流的有效值分别见图 11—13,11 次谐波电压与 11 次谐波电流的相角差见图 14。

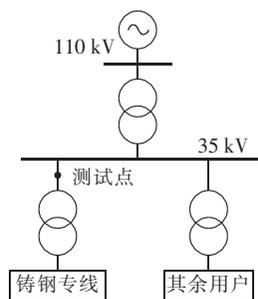


图 10 测试系统主接线
Fig.10 Schematic diagram of test system

(1) 计算谐波阻抗参考值。

若测试数据有大扰动,并且这种扰动由用户主导产生,用波动量法计算系统等效谐波阻抗非常有效。图 11 中基波电流大小主要由用户的工作情况决定,由图 11 可以看出基波电流存在大的扰动,在这些大扰动处图 12 与图 13 有相应的变化趋势,表明扰动是用户主导的。选择几个大的扰动点,如图中虚线框所示(从左至右记为扰动点 1、2、3),利用波动量法计算谐波阻抗,结果如表 3 所示。

利用本文方法计算得到的系统等效谐波阻抗为 $3.32 + j44.53 \Omega$,与波动量法的计算结果相对误差仅

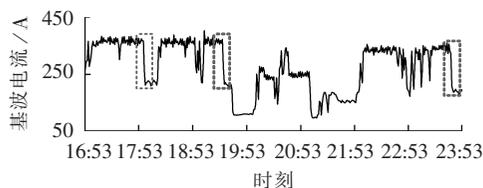


图 11 谐波负荷的基波电流

Fig.11 Fundamental current of harmonic load

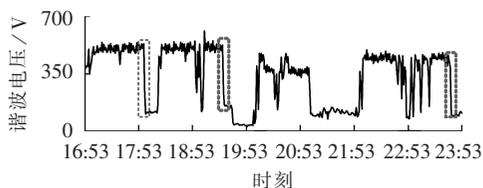


图 12 PCC 处的 11 次谐波电压

Fig.12 11th harmonic voltage at PCC

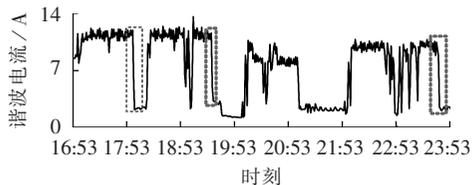


图 13 谐波负荷的 11 次谐波电流

Fig.13 11th harmonic current of harmonic load

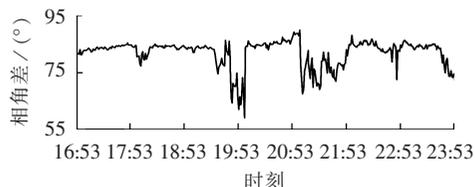


图 14 11 次谐波电压超前谐波电流的角度

Fig.14 Phase difference between 11th harmonic voltage and 11th harmonic current

为 1.6%。这一结果在充分验证了本文方法正确性的同时,也表明可以将 $3.32 + j44.53 \Omega$ 作为计算结果对比中的谐波阻抗参考值。

(2) 谐波没有大波动,即背景谐波波动占主导情况下,本文方法与传统方法计算性能比较。

选择 17:00 至 17:50 之间的数据段,这段时间内没有大的扰动。波动量法是工程上应用成熟的方法,首先与波动量进行对比。对 2 个相邻点使用波动量法计算谐波阻抗,谐波阻抗的幅值、实部和虚部分别如图 15 和图 16 所示。

将除关注负荷以外的其余部分并联等效为系统等效谐波阻抗,其大小会随着各支路负荷的投入与退出等情况的发生而改变。但由于实际系统侧谐波

表 3 波动量法计算
谐波阻抗结果
Table 3 Harmonic
impedances calculated by
fluctuation method

扰动点	谐波阻抗/ Ω
1	$3.38 + j43.26$
2	$3.31 + j43.48$
3	$3.07 + j44.71$
平均值	$3.25 + j43.82$

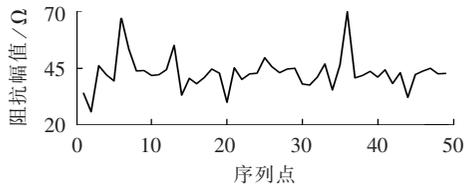
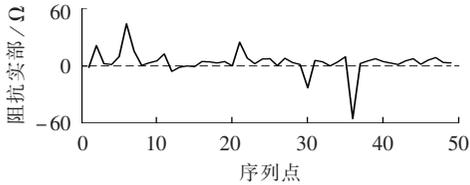
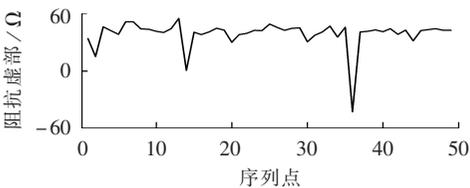


图 15 波动量法计算的谐波阻抗幅值

Fig.15 Harmonic impedance calculated by fluctuation method



(a) 谐波阻抗实部



(b) 谐波阻抗虚部

图 16 波动量法计算的谐波阻抗实部与虚部

Fig.16 Real and imaginary parts of harmonic impedance calculated by fluctuation method

阻抗远小于各支路负荷,所以等效谐波阻抗应仍与实际系统侧谐波阻抗相近。而实际系统侧谐波阻抗并不随各支路负荷的变化而变化,所以等效谐波阻抗只会在一数值附近进行小范围的波动。而从图 15 和图 16 可以看出,传统波动量法估计值波动剧烈,因此,波动量法的估计结果很不合理。并且从图 16(a)还可以看出,在很多点处谐波阻抗估计结果的实部接近 0,而谐波阻抗参考值为 $3.32 + j44.53 \Omega$,波动量法谐波阻抗实部的估计结果误差非常大。利用本文方法计算得到的谐波阻抗为 $2.56 + j42.32 \Omega$,相对误差为 5.23%。因此,本文方法在波动量法失效的情况下具有显著优势。

针对本段数据,分别利用主导波动量法、随机矢量协方差法、二元线性回归法、稳健回归法计算等效谐波阻抗,与本文所提方法进行比较,结果如表 4 所示。可见,与传统方法相比,所提方法能在谐波波动不明显的情况下得到更准确的谐波阻抗估计结果。

表 4 各方法计算等效谐波阻抗结果比较

Table 4 Comparison of calculated equivalent harmonic impedance among different methods

算法	等效谐波阻抗 / Ω	相对误差 / %
主导波动量法	$2.04 + j38.24$	14.38
随机矢量协方差法	$2.23 + j37.51$	15.90
二元线性回归法	$1.12 + j28.27$	36.73
稳健回归法	$1.54 + j32.68$	26.84
本文方法	$2.56 + j42.32$	5.23

6 结论

a. 本文提出了基于非光滑复数域部分线性回归模型的谐波阻抗计算方法,解决了背景谐波波动占主导情况下的谐波阻抗计算问题,弥补了波动量法在背景谐波占主导情况下无法计算谐波阻抗的缺陷。

b. 仿真算例表明基于非光滑复数域部分线性回归模型的谐波阻抗计算结果是准确的,实测数据测试验证了所提谐波责任定量评估方法在工程应用中是可行的。

参考文献:

- [1] 华回春,贾秀芳,曹东升,等. 系统谐波阻抗估计的极大似然估计方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(10):1692-1699.
HUA Huichun, JIA Xiufang, CAO Dongsheng, et al. A maximum likelihood method for harmonic impedance estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1692-1699.
- [2] 吕洋,徐政. 投切电容器时的电网谐波阻抗测量方法[J]. 高压技术,2009,35(7):1780-1784.
LÜ Yang, XU Zheng. Network harmonic impedance measurement using capacitor switching[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1780-1784.
- [3] 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,2004,24(6):50-54.
ZHANG Wei, YANG Honggeng. A methods for assessing harmonic emission level based of binary linear regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 50-54.
- [4] 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.
CHE Quan, YANG Honggeng. Assessing the harmonic emission level based on robust regression method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 39-42.
- [5] 黄舜,徐永海. 基于偏最小二乘回归的系统谐波阻抗与谐波发射水平的估计方法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(1):93-97.
HUANG Shun, XU Yonghai. Assessing harmonic impedance and the harmonic emission level based on partial least-squares regression method[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 93-97.
- [6] HUI J, YANG H, LIN S. Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1778-1786.
- [7] HOUMAN E, XU W. Determining the harmonic impacts of multiple harmonic-producing loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1187-1195.
- [8] 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.
JIA Xiufang, HUA Huichun, CAO Dongsheng, et al. Determining harmonic contributions based on complex least squares method [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 149-155.
- [9] 解绍锋. 基于秩次回归的系统谐波阻抗分析与谐波评估方法[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):29-33.
XIE Shaofeng. Harmonic impedance analysis and harmonic assessment based on rank regression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 29-33.
- [10] 王诗超,沈沉,程建洲. 考虑电流波动特性的系统侧谐波阻抗估计方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(3):65-70.

- WANG Shichao, SHEN Chen, CHENG Jiangzhou. A power system harmonic impedance assessment method considering current's fluctuation characteristic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 65-70.
- [11] 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.
- SUN Yuanyuan, YIN Zhiming. Quantifying harmonic responsibilities of multiple harmonic sources based on M-estimation robust regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 166-173.
- [12] 杨少兵, 吴命利. 基于广义柯西分布的系统侧谐波阻抗估计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1159-1166.
- YANG Shaobing, WU Mingli. An assessment method of power system harmonic impedance based on generalized Cauchy distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1159-1166.
- [13] 王铭诚, 宣伟良. 电力系统谐波阻抗计算[J]. 华北电力学院学报, 1987(2): 13-18.
- WANG Mingcheng, XUAN Weiliang. Calculation of harmonic impedances of power systems[J]. Journal of North China Institute of Electric Power, 1987(2): 13-18.
- [14] International Electrotechnical Commission. 2014-ElectroMagnetic Compatibility(EMC)-part 3-2: limits-limits for harmonic current emissions(equipment input current ≤ 16 A per phase): IEC61000-3-2[S]. Geneva, Switzerland; International Electrotechnical Commission, 2001.
- [15] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [16] 华回春, 贾秀芳, 曹东升, 等. 电能质量数据交换格式下的谐波责任估计[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3110-3117.
- HUA Huichun, JIA Xiufang, CAO Dongsheng, et al. Harmonic contribution estimation under power quality data interchange format[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3110-3117.
- [17] YANG H, PIROTTÉ P, ROBERT A. Harmonic emission levels of industrial loads statistical assessment[C]// Proceedings of CIGRE 1996. Paris, France: International Council on Large Electric Systems, 1996: 36-306.
- [18] 龚华麟, 肖先勇, 刘亚梅, 等. 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.
- GONG Hualin, XIAO Xianyong, LIU Yamei, et al. A method for assessing customer harmonic emission level based on the dominant fluctuation filtering principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 22-27.
- [19] HÄRDLE W, LIANG H, GAO J T. Partially linear models[M]. Heidelberg, Germany: Physica Verlag, 2000: 19-50.
- [20] GRACIELA B, HE Xuming, ZHOU Jianhui. Robust estimates in generalized partially linear models[J]. The Annals of Statistics, 2006, 34(6): 2856-2878.
- [21] 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 in partial linear method for Harmonic contributions determination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 63-68.
- [22] 刘友梅. 韶山 6B 型电力机车[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003: 10-12.
- [23] 王育飞, 姜建国. 用于电能质量研究的新型交流电弧炉混沌模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 106-110.
- WANG Yufei, JIANG Jianguo. A novel chaotic model of AC electric arc furnace for power quality study[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 106-110.

作者简介:



华回春

华回春(1980—), 男, 江西于都人, 讲师, 博士, 主要研究方向为电能质量分析与评估(E-mail: huahuichun@ncepu.edu.cn);

刘哲(1992—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析与评估(E-mail: liuzheacyy@163.com);

贾秀芳(1966—), 女, 辽宁庄河人, 副教授, 主要研究方向为电能质量分析与评估

(E-mail: xiufangjia@163.com)。

Unsmooth and partially linear regression model for harmonic impedance estimation

HUA Huichun, LIU Zhe, JIA Xiufang

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: It is difficult to estimate the harmonic impedance in the domain of power quality research. As a mature method for calculating the harmonic impedance in the engineering applications, the fluctuation method becomes ineffective when the background harmonic fluctuation is dominant. In order to get rid of its defect, an unsmooth and partially linear regression model is proposed and an iterative subdivision method is derived to solve the model, which calculates the harmonic impedance accurately no matter whether the background harmonic fluctuation is dominant or not. Case simulation and actual test data verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: power quality; harmonic impedance; partially linear regression model; background harmonic voltage; harmonic analysis