

用户谐波发射水平补偿增量回归评估法

张 鹏, 刘 燕

(成都电业局都江堰供电局, 四川 都江堰 611830)

摘 要:提出用户和系统在公共连接点 (point of common coupling PCC) 的谐波发射水平补偿增量回归估计法。利用系统谐波阻抗一元回归模型能平滑波动且无自变量相关性引起误差的特点, 提出一种系统谐波补偿方法, 降低系统谐波的干扰, 近似消除系统谐波, 以此估计系统谐波阻抗。根据国际电工委员会最新技术报告中关于用户谐波发射水平的定义和所得系统谐波阻抗, 评估用户谐波发射水平, 该方法不再基于传统方法中关于阻抗和谐波源大小关系的假设条件。对理论模型和实际工程算例的仿真证明所提方法的正确性和有效性。

关键词:谐波阻抗; 谐波发射水平; 增量等效电路; 补偿增量回归; 非干预式

Abstract: A novel method to estimate the harmonic emission level of the system and the customer side at the point of common coupling (PCC) is proposed in a power grid by means of the compensated increment regression method. Based on the traits that the unary regression model for the system harmonic impedance can smooth the fluctuations without the error caused by the correlation of independent variables and reduce the estimated error by the system harmonic, an approach to eliminate the system harmonic components from the harmonic data measured at PCC is presented. The system harmonic impedance can be estimated by the harmonic voltage and current without system harmonic elements. According to the estimated system harmonic impedance and the latest technical report made by the international electrotechnical commission, the customer harmonic emission level can be evaluated to get rid of the hypothesis about the relationship of impedances and harmonic sources of the system and customer side. The simulation results of the laboratory simulation and the field test demonstrate that the proposed method is valid and accurate.

Key words: harmonic impedances; harmonic emission level; increment equivalent circuit; compensated increment regression; non-invasive

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0033-05

0 引 言

现代电网中非线性负荷大量投入, 造成严重的电网谐波污染, 不仅危害电网安全, 而且极大影响相邻用户^[1-2], 准确评估用户谐波发射水平是构筑绿色友好智能电网的重要内容之一^[3]。评估用户谐波发射水平的难点^[4]在于准确区分公共连接点 (point of common coupling PCC) 处检测到的谐波扰动中系统和用户各自的贡献量。从系统扰动水平看, 谐波发射水平通常以谐波电压为测度。现有方法^[5-16]通常将其转化为谐波阻抗估计。

已有谐波阻抗估计法包括干预式法^[16]和非干预式法^[5-15]。干预式法为主动法, 通过向系统注入谐波 (间谐波) 电流, 或断开某支路来估计系统谐波阻抗, 该方法需通过提高注入系统的扰动水平来抑制系

统谐波的影响, 可能影响系统正常运行; 非干预式法为被动法, 通过测量 PCC 点谐波电压、电流值估计系统谐波阻抗, 可评估系统谐波阻抗, 是国内外较认同的方法。国内外学者对系统谐波阻抗估计开展了大量研究, 提出的方法主要有: ①波动量法^[7-9], 根据测量到的谐波电压波动量与谐波电流波动量之间的比值符号进行估计, 当系统谐波波动较小时估计精度较高, 但系统侧谐波波动剧烈时, 不能准确估计; ②线性回归法^[10-13], 在假设系统谐波平稳随机且含量少的条件下, 通过诺顿等效电路原理建立回归方程求解系统谐波阻抗, 但系统谐波的随机波动对评估结果影响较大; ③随机矢量协方差法^[14], 在已知用户谐波阻抗远大于系统谐波阻抗且用户侧谐波占主导的前提下, 弱化系统谐波变化的影响, 能较精确求解系统谐波阻抗, 但其先验条件在实际中难以满足。

由于系统侧谐波由接入该系统的多个非线性谐波源叠加而成,从统计意义上看各谐波源相互独立,产生的谐波变化可能相互抵消,而谐波阻抗线性回归模型中的回归系数对系统侧谐波有平滑效果,因此立足于系统谐波阻抗一元回归模型无二元回归模型中自变量相关性干扰的优点,针对其投影确定系统谐波变化和系统谐波本身存在波动造成的估计误差,建立谐波增量电路模型和系统谐波阻抗增量回归方程,抑制系统谐波变化的影响。再根据增量回归方程判定系统谐波增量,用其对增量回归模型进行补偿修正,消除系统谐波干扰,提高系统谐波阻抗估计精度。

根据求得的系统谐波阻抗并结合国际电工委员会(International Electrotechnical Commission IEC) 61000-3-6 关于用户谐波发射水平的定义^[17],评估用户谐波发射水平,无需系统谐波阻抗远小于用户谐波阻抗和用户侧谐波占支配地位的假设,提高评估方法的适应性。仿真和实际测试证明了所提方法的准确性和有效性。

1 系统谐波阻抗一元回归法及其不足

评估 PCC 点系统谐波阻抗和用户谐波发射水平的戴维南等效电路如图 1^[1, 5-16, 18], \dot{U}_s 、 \dot{U}_c 分别为系统侧和用户侧谐波电压源; Z_s 和 Z_c 分别为系统侧和用户侧等值谐波阻抗; \dot{U}_{PCC} 、 \dot{I}_{PCC} 为 PCC 点谐波电压和电流测量值。

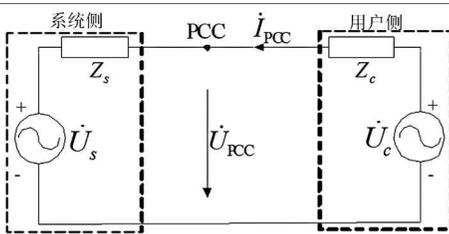


图 1 电力系统戴维南等效电路

系统谐波阻抗一元回归模型^[10]如式(1),式中

\dot{U}_{PCC} 为 PCC 点测量值 \dot{U}_{PCC} 对 \dot{I}_{PCC} 的投影,如式(2),其中 $\varphi_{U_{PCC}}$ 和 $\varphi_{I_{PCC}}$ 分别为 PCC 点谐波电压、电流相角测量值。 \dot{U}_{PCC} 和 \dot{I}_{PCC} 为回归样本点, \dot{U}_s 和 Z_s 为回归系数。

$$\dot{U}_{PCC} = \dot{U}_s + \dot{I}_{PCC} Z_s \quad (1)$$

$$\dot{U}_{PCC} = U_{PCC} \angle (\varphi_{U_{PCC}} - \varphi_{I_{PCC}}) \quad (2)$$

回归系数平稳随机是精确建立回归模型的关键条件,当不满足此条件将减弱回归自变量 (\dot{I}_{PCC}) 与因变量 (\dot{U}_{PCC}) 之间的相关性,导致回归精度下降。回归系数 Z_s 取决于系统短路容量,与运行方式等有关,可认为其变化缓慢,对短时间进行估计时可不考虑其变化,认为满足精确建立回归模型的条件。

从回归系数 \dot{U}_s 上分析,根据式(2)、(3)知,当 \dot{U}_{PCC} 投影到 \dot{I}_{PCC} 计算时,由于负荷的时变特性, Z_c 和 \dot{U}_c 变化引起参考点 $\varphi_{I_{PCC}}$ 不恒定,使 \dot{U}_{PCC} 投影后作相应变化,导致 \dot{U}_{PCC} 中 \dot{U}_s 分量作波动变化不满足平稳随机的条件。即使在 \dot{U}_s 恒定不变的情况下,由于投影计算将导致其产生波动,特别是在系统侧谐波较大的情况下,其值变化尤为剧烈,将导致较大 Z_s 估计误差。

$$\dot{U}_{PCC} = (Z_s \dot{U}_c + Z_c \dot{U}_s) / (Z_c + Z_s) \quad (3)$$

$$\dot{I}_{PCC} = (\dot{U}_c - \dot{U}_s) / (Z_c + Z_s)$$

投影计算导致回归系数非平稳随机造成的误差是系统谐波阻抗一元回归模型固有的缺陷所致。再者 \dot{U}_s 本身由 PCC 点系统侧所有非线性负荷决定,其本身也在作一定的变化也将导致估计 Z_s 误差。故如何消除系统谐波干扰是系统谐波阻抗一元回归方法提高估计精度的关键。

系统谐波中高次谐波含量少,不影响其谐波阻抗评估精度,而低次谐波电压电流矢量为扇形或某个区域内分布,其相角不发生跳变。两个相邻电压电流矢量之间的差值定义为增量,其模值必定小于其实际矢量模值。因此根据谐波增量小于实际取值的特点,提出增量等效电路及系统谐波阻抗增量回归方法。

2 增量等效电路与增量回归方程

2.1 增量等效电路

实际电力系统中,由于运行方式变化和非线性负荷波动可能引起 PCC 点谐波电压和谐波电流变化,其变化量 $\Delta \dot{U}_{PCC(i)}$ 、 $\Delta \dot{I}_{PCC(i)}$ 定义为增量,即 PCC 点处谐波电压电流相邻两次取值的差,如式(4)、(5)所示,下标 i 和 $i-1$ 分别表示相邻样本点序列。

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{PCC(i)} &= \dot{U}_{PCC(i)} - \dot{U}_{PCC(i-1)} \\ &= \frac{Z_s(\dot{U}_{c(i)} - \dot{U}_{c(i-1)}) + Z_c(\dot{U}_{s(i)} - \dot{U}_{s(i-1)})}{Z_c + Z_s} \quad (4) \\ &= \frac{Z_s \Delta \dot{U}_{c(i)} + Z_c \Delta \dot{U}_{s(i)}}{Z_c + Z_s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{PCC(i)} &= \dot{I}_{PCC(i)} - \dot{I}_{PCC(i-1)} \\ &= \frac{(\dot{U}_{c(i)} - \dot{U}_{c(i-1)}) - (\dot{U}_{s(i)} - \dot{U}_{s(i-1)})}{Z_c + Z_s} \quad (5) \\ &= \frac{\Delta \dot{U}_{c(i)} - \Delta \dot{U}_{s(i)}}{Z_c + Z_s} \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{c(i)} &= \dot{U}_{c(i)} - \dot{U}_{c(i-1)} \\ \Delta \dot{U}_{s(i)} &= \dot{U}_{s(i)} - \dot{U}_{s(i-1)} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\Delta \dot{U}_{s(i)}$ 、 $\Delta \dot{U}_{c(i)}$ 为系统侧和用户侧的谐波电压增量。根据电路原理, 用户谐波阻抗 Z_c 变化的可等效为用户侧谐波电压源的增量, 并 Z_s 变化很小, 因此, 考虑系统和用户侧参数同时变化时, 可将参数变化量等效为系统和用户谐波电压源增量。根据式 (4)、(5), 并结合电路原理知识可以建立 PCC 点处谐波增量等效电路, 如图 2 所示。

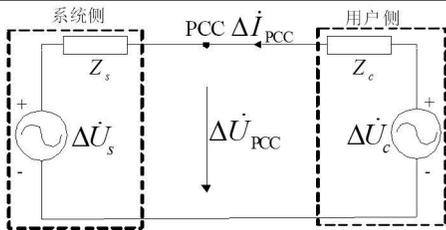


图 2 谐波增量等效电路

2.2 系统谐波阻抗增量回归方程

根据图 2 可列出系统谐波阻抗增量回归方程, 如式 (7) 所示。

$$\Delta \dot{U}_{PCC} = \Delta \dot{U}_s + Z_s \Delta \dot{I}_{PCC} \quad (7)$$

以 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 为参考向量, 按实虚部展开, 得

$$\begin{aligned} \Delta U_{PCCx} &= \Delta U_{sx} + Z_{sx} \Delta I_{PCC} \\ \Delta U_{PCCy} &= \Delta U_{sy} + Z_{sy} \Delta I_{PCC} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, 下标 x 、 y 分别代表实虚部。因此根据式 (8) 建立回归方程, 分别作最小二乘法估计^[19], 可求解得背景谐波增量和系统侧谐波阻抗的均值, 如式 (9)。

$$\begin{aligned} \bar{\Delta U}_s &= \bar{\Delta U}_{sx} + j \bar{\Delta U}_{sy} \\ \bar{Z}_s &= \bar{Z}_{sx} + j \bar{Z}_{sy} \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 、 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 由系统侧和用户侧谐波源增量决定, 虽然 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 向 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 作投影, 同理将会导致 $\Delta \dot{U}_s$ 变化, 影响 Z_s 估计的精度, 但 ΔU_s 小于 U_s , 故由 $\Delta \dot{U}_s$ 造成的误差小, 能够提高 Z_s 估计的精度。如何消除 $\Delta \dot{U}_s$ 干扰是进一步提高 Z_s 估计精度的关键, 具体原理和方法见下节。

3 系统谐波阻抗补偿增量回归估计

通过对图 2 电路推导可得 PCC 点处电流增量为

$$\Delta \dot{I}_{PCC} = \frac{\Delta \dot{U}_{PCC}}{Z_s} - \frac{\Delta \dot{U}_s}{Z_s} \quad (10)$$

从式 (7)、(10) 可知 $\Delta \dot{U}_s$ 对 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 的贡献量, 如果消去此部分贡献量则可消去系统侧谐波的影响。基于此, 可以通过初次回归得到的 $\bar{\Delta U}_s$ 和 \bar{Z}_s 对测定 PCC 点谐波电压电流增量补偿修正, 近似得到无系统侧谐波增量影响的 PCC 点处的谐波电压电流增量 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{I}_{PCC}$, 如式 (11)。

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{PCC} &= \Delta \dot{U}_{PCC} - \bar{\Delta U}_s \\ \Delta \dot{I}_{PCC} &= \Delta \dot{I}_{PCC} - \frac{\bar{\Delta U}_s}{\bar{Z}_s} \end{aligned} \quad (11)$$

系统谐波电压增量等效两个部分, 即均值部分 $\bar{\Delta U}_s$ 和波动部分 $\epsilon_{\Delta \dot{U}_s}$ 。通过补偿修正后得到 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{I}_{PCC}$, 能够消除 $\bar{\Delta U}_s$ 部分, 且根据式 (8) 作最小二乘估计 Z_s 时, 回归模型有平滑作用能够弱化 $\epsilon_{\Delta \dot{U}_s}$ 影响, 因此通过补偿背景谐波增量回归 Z_s 方法能消除系统谐波的影响, 提高估计精确度。

这里作补充说明, 根据回归方程 (1) 求解的系统谐波电压同样可以作类似式 (11) 的补偿修正, 消除系统谐波电压带来的估计误差, 但根据式 (1) 求解的背景谐波电压和系统谐波阻抗误差大, 作补偿修正无意义。

4 用户谐波发射水平估计

文献 [8—14] 提出的通过系统谐波阻抗计算用户谐波电压发射水平是基于 Z_s 远小于 Z_c 且用户谐波占支配地位的假设, 缩小了用户谐波电压发射水平

评估的范围。IEC 61000-3-6 最新技术报告定义用户谐波电压发射水平 U_{c-PCC} : 非线性负荷投入前后 PCC 点处谐波电压向量差的模值, 其向量差定义为为用户谐波电压发射向量 $\dot{U}_{c-PCC}^{[17]}$ 。根据图 1 电路, 其中 \dot{U}_s 和 \dot{U}_{PCC} 分别为负荷投入前后的 PCC 点谐波电压向量, 因此结合电路知识可得 \dot{U}_{c-PCC} :

$$\dot{U}_{c-PCC} = \dot{U}_{PCC} - \dot{U}_s = Z_s \dot{I}_{PCC} \quad (12)$$

IEC 61000-3-6 技术报告认为, 当用户谐波电压发射水平低于相关规定的谐波发射限制时, 其能够有效控制谐波污染。IEC 61000-3-6 技术报告定义谐波发射水平的优点在于估计用户谐波电压发射水平时, 无需再考虑 Z_c 和用户侧谐波含量是否占主导性的特点, 提高了工程实用性。

5 用户谐波发射水平估计过程

基于补偿增量回归法估计用户谐波电压发射水平过程如下。

- (1) 在 PCC 点测量得到 \dot{U}_{PCC} 、 \dot{I}_{PCC} 样本点, 根据式 (4)、式 (5) 计算 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 、 $\Delta \dot{I}_{PCC}$;
- (2) 作 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 向 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 投影得到回归样本点;
- (3) 根据式 (8) 初次回归计算出 $\Delta \dot{U}_s$ 和 \dot{Z}_s ;
- (4) 根据式 (11), 由步骤 (3) 中计算得到的 $\Delta \dot{U}_s$ 和 \dot{Z}_s 对步骤 (2) 中的回归样本点作修正, 得到近似消除统谐波电压增量后的 PCC 点处谐波电压电流增量 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 、 $\Delta \dot{I}_{PCC}$;
- (5) 根据回归方程 (8) 和步骤 (4) 中计算得到的 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 、 $\Delta \dot{I}_{PCC}$, 估计系统侧谐波阻抗 Z_s ;
- (6) 根据式 (11) 和步骤 (5) 估计出的 Z_s 计算用户谐波电压发射水平 U_{c-PCC} 。

6 实验电路仿真分析

根据图 1 搭建实验仿真模型。

- (1) U_c 均值为 173.03 V, 做 $\pm 20\%$ 随机波动, U_c 相角作参考相角恒为 0° ; 为了反映不同系统谐波含量的仿真结果, U_s 均值为 17.2 V 的 k 倍 (k 取 2.2, 1.8, 1.6, 1.5, 1.2, 1.0, 0.7, 0.5, 0.3), 做 $\pm 5\%$ 的随机

波动, \dot{U}_s 相角初始值为 50° ; 在整个估计时段内做 20% 正弦半波变化。

(2) Z_c 恒为 $0.62 + j1.03 \Omega$; Z_s 幅值和相角的初始值分别为 0.12Ω 和 65° , 在整个估计时段内分别做 20% 和 10% 正弦半波变化。

在 PCC 点处抽样 10 000 个样本点做作滑动递推计算。9 种系统谐波含量由 $\Delta \dot{U}_s$ 相对 \dot{U}_{PCC} 百分比表示 (分别对应不同的 k 值), 下用两种方法 (方法 1 基于式 (1) 的原始系统谐波阻抗一元回归模型, 方法 2 为所提出的补偿增量回归模型) 计算得到系统谐波阻抗模值相角最大误差, 以及用户谐波发射水平 95% 值概率误差, 分别如表 1 所示。

从表 1 看出, 系统谐波阻抗一元回归模型估计精度受系统谐波影响较大, 特别是在系统谐波较大时, 误差增大更为明显。而所提出的补偿增量回归模型方法, 能够有效消除系统谐波的干扰, 在同一系统谐波含量水平下, 提高了 Z_s 的估计精度。

由式 (11) 知用户谐波电压发射水平最大误差与 Z_s 模值最大误差相同, 故不再赘述。从 U_{c-PCC} 的 95% 概率值估计误差可见, 所提方法明显提高了用户谐波电压发射水平的估计精度。特别是在 \dot{U}_s 比 \dot{U}_{PCC} 为 83% 时, 其 95% 概率值误差分为 4.68%, 较方法 1 提高了 20.5 倍。

表 1 Z_s 和 U_{c-PCC} 估计结果误差对比

| 仿真 算例 | $\frac{\dot{U}_s}{\dot{U}_{PCC}}$ | Z_s 模值最大 | | Z_s 相角最大 | | U_{c-PCC} 95% 概 | |
|----------|-----------------------------------|------------|-------|------------|-------|-------------------|------|
| | | 误差 / % | | 误差 / % | | 率值误差 / % | |
| | | 方法 1 | 方法 2 | 方法 1 | 方法 2 | 方法 1 | 方法 2 |
| 1 | 83% | 114.1 | 11.97 | 24.96 | 15.30 | 95.56 | 4.68 |
| 2 | 81% | 96.40 | 11.75 | 24.16 | 14.25 | 80.96 | 4.79 |
| 3 | 79% | 73.31 | 11.57 | 22.38 | 12.64 | 61.58 | 4.93 |
| 4 | 76% | 54.20 | 11.39 | 19.93 | 11.26 | 45.23 | 4.96 |
| 5 | 73% | 43.53 | 11.32 | 17.97 | 10.28 | 36.01 | 4.82 |
| 6 | 71% | 34.42 | 10.94 | 15.82 | 9.36 | 28.01 | 4.42 |
| 7 | 68% | 26.75 | 10.13 | 13.55 | 8.23 | 21.20 | 3.99 |
| 8 | 66% | 23.44 | 9.69 | 12.39 | 7.66 | 18.20 | 3.71 |
| 9 | 60% | 15.38 | 8.27 | 9.00 | 6.04 | 10.84 | 2.89 |

7 实际工程应用

实测数据来自直流电弧炉用户的 150 kV 母线, 采样频率为 6 400 Hz 每分钟对采样数据进行快速傅里叶变换获得各次谐波的测量值。所测某日连续 10 h 内负荷运行时的 PCC 处 13 次谐波电压和电流波形

如图 3 所示,其中 1 h 停机数据可作系统谐波分析,图中横坐标为采样时间 t

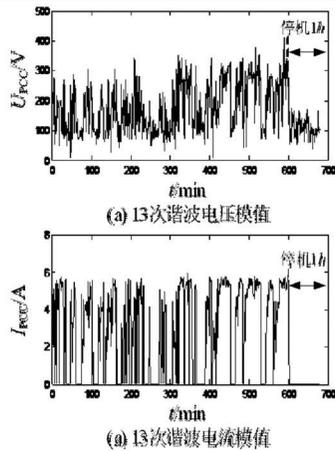


图 3 PCC 处 13 次谐波电压电流波形

分别采用上节中两种方法对 PCC 处 13 次谐波数据作滑动计算,系统谐波阻抗计算结果如图 4 所示。

从图 4 阻抗模值图看出系统谐波阻抗一元回归法估计值波动剧烈,而所提出的补偿增量回归模型法的估计值较平稳。由于系统侧谐波阻抗模值短时间内变化较小,因此基于补偿增量回归模型法方法在阻抗模值估计上更为合理。

从系统谐波阻抗相角上分析,系统谐波阻抗一元回归法和补偿增量回归法估计最大值分别为 91.18° 和 73.92° ,而文献 [20] 指出 Z_s 相角绝对值不超过 85° ,说明所提方法对 Z_s 相角有很好的估计。

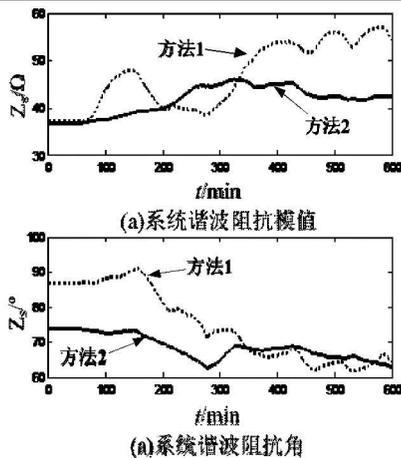


图 4 系统 13 次谐波阻抗估计值

根据式 (12),用方法 1 和方法 2 对实测数据进行分析,分别计算用户在 PCC 点处 13 次谐波发射水平和系统谐波电压模值的 95% 概率值,结果如表 2 所示。

实测数据中负荷停止运行时的 13 次谐波电压可

表 2 U_{c-PCC} 和 U_s 的 95% 概率值计算结果对比

| 谐波电压 /V | 方法 1 | 方法 2 |
|-------------|--------|--------|
| U_{c-PCC} | 303.12 | 244.70 |
| U_s | 173.64 | 158.65 |

以作系统谐波电压分析,计算其 95% 概率值为 163.94 V 。对比表中的数据,知所提方法计算出的 U_s 是最接近这一结果,从而证明对用户谐波电压发射水平 95% 概率值 244.70 V 结果的准确性。

为了进一步证明所提方法的准确性,比较两种方法估计的 \dot{U}_s 和测量得到的 \dot{U}_s 散点图,如图 5 所示。所提方法估计出的系统谐波电压和负荷停机运行时的谐波电压模值相角在同一个范围,而方法 1 部分估计值相角发生跳变到第 3 现象,从而再次证明所提方法准确可信。

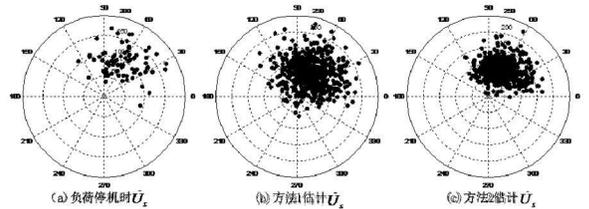


图 5 \dot{U}_s 散点极坐标图

7 结 论

1) 立足于系统谐波在非干预式法估计系统谐波阻抗时引起的误差,根据谐波增量弱化系统谐波影响的原理,提出了增量等效电路和系统谐波阻抗增量回归模型,在此基础上进一步提出了补偿系统谐波分量的方法,近似消除系统谐波的干扰,提高估计系统谐波阻抗的准确度。

2) 根据 IEC 6100-3-6 最新技术报告计算用户谐波发射水平,不再基于用户谐波阻抗远大于系统谐波阻抗和用户谐波源占支配地位的假设,提高了实用性。

3) 仿真和实际工程测试证明所提方法的有效性和准确性。所提方法准确估计系统谐波阻抗不仅可用于用户谐波电压发射水平估计,还对电力滤波器合理设计有指导意义。

4) 如何通过用户谐波发射向量准确求取用户在 PCC 点处的贡献量,即划分出系统和用户的谐波责任,以及如何通过智能电网中的电能质量检测设备估计用户谐波电压发射水平,都是进一步值得研究的课题。

(下转第 41 页)

参考文献

[1] 孙旭,任震.空间负荷预测在城市电网规划中的应用[J].继电器,2005,33(14):79-81.

[2] 程浩忠,张焰.电力网络规划的方法与应用[M].上海:上海科学技术出版社,2002,27-53.

[3] 何善瑾.上海电力系统最大负荷同时率分析[J].供用电,2008,25(1):13-15.

[4] 朱振伟,方鸽飞,王国福,等.电网夏季气象敏感负荷特性分析[J].华东电力,2008,36(9):53-58.

[5] 杜栋,庞庆华.现代综合评价方法与案例精选[M].北京:清华大学出版社,2005.

[6] 杨志欣.基于模糊-神经网络的电力系统短期负荷预测.[D].广东:广东工业大学,2005.

[7] Willis H L. Power Distribution Planning Reference Book [M]. Marcel Dekker Inc 1997.

[8] Willis H L Northcote Green J E D. Spatial Electric Load Forecasting [J]. A Tutorial Review Proceeding of the IEEE, 1983, 71(2): 1215-1220.

[9] Chiclana F Herrera F Herrera V Viedma E. Integrating Three Representation models in Fuzzy Multipurpose Decision Making Based on Fuzzy Preference Relations [J]. Fuzzy Sets and System, 1998, 33-48.

(收稿日期 2010-09-15)

(上接第 37 页)

参考文献

[1] 杨洪耕,王磊.基于拉盖尔多项式的非线性负荷谐波发射水平估计[J].中国电机工程学报,2005,25(7):81-85.

[2] A. McEachern W. M. Grady W. A. Moncrief et al Revenue and Harmonics: An Evolution of Some Proposed Rate Structures [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 474-482.

[3] 龚华麟,肖先勇.非线性度法在配电网谐波源探测中的应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(8):30-34.

[4] 周林,张凤,栗秋华,等.配电网中谐波源定位方法综述[J].高电压技术,2007,33(5):103-108.

[5] Wilsun Xu Yilu Liu. A method for Determining Customer and Utility Harmonic Contribution at the Point of Common Coupling [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.

[6] 刘秀玲,王洪瑞,王永青,等.临界阻抗法在配电网谐波源探测中的应用[J].电力系统自动化,2007,31(14):76-80.

[7] H Yang P Pirotte A Robert Harmonic Emission Levels of Industrial Loads Statistical Assessment [C]. CIGRE Conference on Large High Voltage Electric Systems Paris France 1996, 36-306.

[8] 张安安,杨洪耕.基于畸变波形同步分层估计谐波阻抗的探讨[J].电力系统自动化,2003,27(9):41-44.

[9] 龚华麟,肖先勇,刘亚梅,等.基于主导波分量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.

[10] 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.

[11] 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):50-53.

[12] 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.

[13] 刘凡,司马文霞,车权,等.基于改进 Madaline 网络的谐波发射水平估计[J].高电压技术,2006,32(10):91-93.

[14] 惠锦,杨洪耕,林顺富,等.基于独立随机矢量协方差特性的谐波发射水平评估方法[J].电力系统自动化,2009,33(7):27-31.

[15] T. Pflajfar B. Blazio I. Papic. Harmonic Contributions Evaluation with the Harmonic Current Vector Method [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 425-433.

[16] 刘秀玲,王洪瑞.电网谐波阻抗的测量及其修正[J].电力系统及其自动化学报,2007,19(2):55-59.

[17] International Electrotechnical Commission (IEC) Subcommittee 77A. Electromagnetic Compatibility (EMC) - part 3-6: Limits - assessment of Emission Limits for the Connection of Distorting Installations to MV, HV and EHV Power Systems [R]. United Kingdom: British Standards Institution, 2008.

[18] E. Thunberg L. Soder A Norton Approach to Distribution Network Modeling for Harmonic Studies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1): 272-277.

[19] 何晓群,刘文卿.应用回归分析[M].北京:北京中国人民大学出版社,2001,18-28.

[20] 程浩忠,艾芊,张志刚,等.电能质量[M].北京:清华大学出版社,2006,229-230.

(收稿日期:2010-10-19)