

配电网中谐波电流责任划分定量分析

马宏忠, 徐刚, 宋树平, 赵宏飞, 任立志

(河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为能够明确配电网中供电侧和用户侧对电网谐波污染的责任, 提出基于 QR 分解的递归最小二乘 (QR-RLS) 算法来分析谐波电流。该算法能够提取出指定次数的谐波电流在公共耦合点 (PCC) 处的瞬时值, 并能求出供电侧和用户侧谐波电流在 PCC 处的相位差, 在此基础上计算出供电侧和用户侧独自产生的谐波电流。最后通过 PSCAD/EMTDC 软件搭建仿真电路, 并用 MATLAB 软件进行数据分析, 结果验证了所提算法的正确性。

关键词: 配电; 谐波分析; 定量分析; QR-RLS 算法; 仿真

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.008

0 引言

正确识别谐波源的位置是区分各方谐波责任的前提^[1]。对于谐波源识别问题, 文献[2]提出了有功功率法, 文中提出谐波功率是谐波电压、电流间相角差的函数, 但谐波功率的方向主要受系统侧和用户侧谐波电压相角差 δ 的影响, 当 δ 在一定范围时, 该方法失效^[3]。文献[4]提出了基于无功功率的检测法, 其主要思路是: 电力系统中有功功率主要与相角有关, 而无功功率主要取决于系统电压幅值, 故无功功率的方向能反映系统侧和用户侧谐波电压源的谐波发射水平, 即可通过无功功率方向判断两侧谐波源的相对大小, 从而定位谐波源。但受阻抗的影响, 其结果的准确率一般只能达到 50%。文献[5]提出了无功功率变化法, 该方法指出无功功率的变化率为在一定时间内流入减去流出系统的无功功率, 该方法无需知道系统侧和用户侧的阻抗, 但只能定性分析主谐波源, 而不能判断另一方是否也产生谐波, 且无法定量分析。文献[6-8]提出用临界阻抗法辨识谐波源, 该方法在一定程度上解决了无功功率方向法的不足, 但也有自身的缺陷, 即无法分析出谐波源间的相互影响, 无法定量分析。文献[9-10]提出了基于参数辨识的谐波源定位方法, 该方法从谐波产生的机理出发, 能克服背景谐波的影响并提高谐波源定位的准确性, 但会产生测量矩阵奇异的问题^[11], 因此文献[12]提出了基于奇异值分解 (SVD) 方法来进行谐波源定位, 该方法能比较准确地分辨出各个谐波源, 但并不能定量地分析谐波源。

在上述背景下, 本文针对基于奇异值分解方法识别谐波源不能定量分析的不足, 提出了基于 QR 分解的递归最小二乘 (QR-RLS) 方法来定量地分析谐波

源, 其主要思路是: 在奇异值分解方法定性地找出谐波源后, 用 QR-RLS 方法来定量地分析各个谐波源对配电网的影响, 从而能够更加准确地划分出各方的谐波责任。最后通过 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型进行仿真分析, 验证了该方法的准确性和实用性。

1 QR-RLS 方法基本原理

QR-RLS 算法^[13]作为一种自适应滤波算法主要用在通信系统上, 但对于自适应谐波电流检测仍然适用, 其基本原理如图 1 所示, 其中滤波器输入信号 $i_L(n)$ 表示实际采集的电流信号, 参考输入信号 $x_0(n)$ 、 $x_1(n)$ 表示幅值为 1、频率为所需检测的谐波电流的频率的信号, 两参考信号相差 90° ; $w_0(n)$ 、 $w_1(n)$ 为参考信号的权值; $y(n)$ 为自适应滤波器的输出信号; $e(n)$ 为自适应滤波器误差反馈信号。

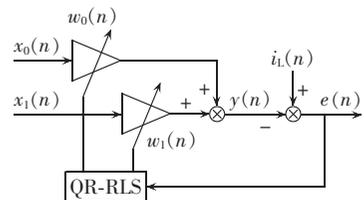


图 1 QR-RLS 算法原理图

Fig.1 Principle of QR-RLS algorithm

QR-RLS 算法相比其他自适应算法有如下优点。

a. 它比递归最小二乘 (RLS) 算法有更好的数值稳定性, QR-RLS 算法是通过直接处理经 QR 分解的输入数据矩阵来完成最小二乘权向量的计算, 而 RLS 算法是通过处理输入数据的 (时间平均) 相关矩阵来完成权向量计算。因此, QR-RLS 算法在数值上比标准的 RLS 算法更稳定^[13]。

b. QR-RLS 算法比最小均方 (LMS) 算法有更快的收敛速度, 在电力有源滤波器对谐波检测的时间要求非常高的情况下, 此算法比 LMS 算法更有优势, 如图 2 所示, 况且 LMS 及其改进算法在其收敛速度和稳态失调间难以平衡^[13-15]。

图 2 是对于同一组含有 3 次谐波的数据, 分别用

收稿日期: 2013-07-08; 修回日期: 2014-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51177039); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20090094110011)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51177039) and Special Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20090094110011)

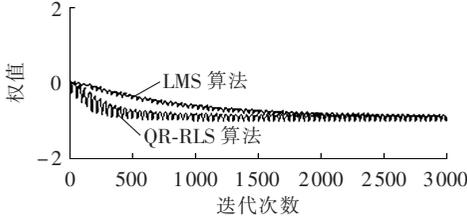


图2 QR-RLS算法与LMS算法收敛性比较

Fig.2 Comparison of convergence between QR-RLS algorithm and LMS algorithm

LMS算法和QR-RLS算法进行谐波检测,达到相同精度时,很容易看出QR-RLS算法权值达到稳态时的迭代次数大概在750次,而LMS算法的权值达到稳态时的迭代次数大约在1800次,因此QR-RLS算法在收敛速度上对于LMS算法的优势是比较明显的。

由文献[12,16]可得指数加权RLS估计的QR-RLS算法在数据都是实数的情况下可表示如下。

数据矩阵:

$$\mathbf{A}^T(n) = [\mathbf{u}(1), \mathbf{u}(2), \dots, \mathbf{u}(n)]$$

期望响应:

$$\mathbf{D}^T(n) = [d(1), d(2), \dots, d(n)]$$

预给参数:

$$\text{指数加权向量系数} = \lambda$$

$$\text{酉旋转} = \Theta(n)$$

调整参数 = δ

初始条件:

$$\Phi^{1/2}(0) = \delta^{1/2} \mathbf{I}$$

$$\mathbf{p}(0) = \mathbf{0}$$

迭代格式如下:

$$\begin{bmatrix} \lambda^{1/2} \Phi^{1/2}(n-1) & \mathbf{u}(n) \\ \lambda^{1/2} \mathbf{p}^T(n-1) & d(n) \\ \mathbf{O}^T & 1 \end{bmatrix} \Theta(n) = \begin{bmatrix} \Phi^{1/2}(n) & \mathbf{O} \\ \mathbf{p}^T(n) & \xi(n) \gamma^{1/2}(n) \\ \mathbf{u}^T(n) \Phi^{-T/2}(n) & \gamma^{1/2}(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{w}^T(n) = \mathbf{p}^T(n) \Phi^{-1/2}(n) \quad (2)$$

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n) \mathbf{u}(n) \quad (3)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (4)$$

$$\Phi(n) = \lambda \Phi(n-1) + \mathbf{u}(n) \mathbf{u}^T(n) \quad (5)$$

$$\mathbf{p}(n) = \Phi^{T/2}(n) \mathbf{w}(n) \quad (6)$$

其中, $n=1, 2, \dots$; \mathbf{I} 为单位阵; \mathbf{O} 为零矩阵块; $\mathbf{u}(n)$ 为参考输入向量; $\mathbf{w}(n)$ 为权值向量; $\Theta(n)$ 为旋转矩阵, 主要作用是使式(1)中等号右侧的阵列的第一行产生一个零块元素; $\Phi(n)$ 为相关矩阵; $\xi(n)$ 为先验估计误差; $\gamma(n)$ 为收敛因子; $\Phi^{1/2}(n)$ 、 $\mathbf{p}^T(n)$ 、 $\mathbf{u}^T(n) \times \Phi^{-T/2}(n)$ 为矩阵块, 其他均为实数, 矩阵块中的上标的负号表示矩阵的逆, T表示向量转置。

2 定量分析推导

通过QR-RLS算法检测出特定次数的谐波电流,根据图3所示的仿真电路模型,可以推导出非线性负荷侧和供电侧分别产生的谐波电流量。图3中 $u(t)$ 为供电侧电压, Z_s 为供电侧某次谐波的阻抗, $i_u(t)$ 为供电侧产生的某次谐波电流, $i_c(t)$ 为非线性负荷侧产生的某次谐波电流, $i(t)$ 为线性负荷侧某次谐波的电流, $i'_u(t)$ 、 $i''_u(t)$ 分别为供电侧某次谐波电流流向非线性负荷侧和线性负荷侧的部分,同理 $i'_c(t)$ 、 $i''_c(t)$ 分别为非线性负荷侧产生的某次谐波电流流向供电侧和线性负荷侧的部分, Z 、 Z_c 分别为线性负荷侧和非线性负荷侧在某次谐波下的阻抗。

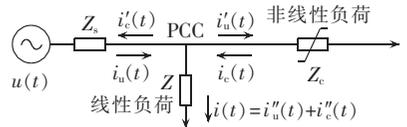


图3 仿真电路模型

Fig.3 Simulation circuit model

设 $i_{us}(t)$ 、 $i_{cs}(t)$ 、 $i_s(t)$ 分别为通过QR-RLS算法从电流中提取出的供电侧、非线性负荷侧以及线性负荷侧某次谐波电流,可写成如下形式:

$$i_{us}(t) = m \cos(h\omega t) \quad (7)$$

$$i_{cs}(t) = q \cos(h\omega t + \alpha_0) \quad (8)$$

$$i_s(t) = l \cos(h\omega t + \beta_0) \quad (9)$$

其中, m, q, l 为已知常数; h 为整数, 表示特定的谐波次数; α_0, β_0 为已知常数, 表示相对于测得的供电侧的初始相位。设供电侧和非线性负荷侧独自产生的谐波电流分别为:

$$i_u(t) = a \cos(h\omega t + \alpha) \quad (10)$$

$$i_c(t) = b \cos(h\omega t + \beta) \quad (11)$$

其中, a, b 为未知量, 分别表示供电侧和非线性负荷侧独自发出某次谐波的幅值; α, β 为未知量, 表示相对于 $i_{us}(t)$ 的初始相位。

对于电流 $i_u(t)$ 有如下表达式:

$$i_u(t) = i'_u(t) + i''_u(t) \quad (12)$$

令:

$$i'_u(t) = a' \cos(h\omega t + \theta') \quad (13)$$

$$i''_u(t) = a'' \cos(h\omega t + \theta'') \quad (14)$$

其中, a', a'' 分别为电流 $i'_u(t)$ 和 $i''_u(t)$ 的幅值; θ', θ'' 为它们相对于 $i_{us}(t)$ 的初始相位。

设 $Z_s = |Z_s| \angle \phi_s$, $Z_c = |Z_c| \angle \phi_c$, $Z = |Z| \angle \phi$, 则根据电路理论可得:

$$k = \frac{a'}{a''} = \frac{|Z|}{|Z_c|} \quad (15)$$

$$\theta_0 = \theta' - \theta'' = \phi - \phi_c \quad (16)$$

由式(15)、(16)可得出电流 $i'_u(t)$ 和 $i''_u(t)$ 的幅值

的比例以及它们的相位差,则式(13)可重写如下:

$$i'_u(t) = k a'' \cos(h\omega t + \theta'' + \theta_0) \quad (17)$$

有如下三角公式:

$$A \sin(\omega t + \varphi_1) + B \sin(\omega t + \varphi_2) = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \times \sin\left[\omega t + \arcsin \frac{A \sin \varphi_1 + B \sin \varphi_2}{\sqrt{A^2 + B^2 + 2AB \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}}\right] \quad (18)$$

把式(10)、(14)、(17)代入式(12),并2次运用式(18)可分别求得电流 $i'_u(t)$ 、 $i''_u(t)$ 的幅值与 $i_u(t)$ 幅值的比例,以及它们的初始相位与 $i_u(t)$ 的初始相位的关系,同理可以求出 $i'_c(t)$ 、 $i''_c(t)$ 的幅值与 $i_c(t)$ 的比例以及相位关系,即:

$$i'_u(t) = k_u a \cos(h\omega t + \alpha + \alpha_u) \quad (19)$$

$$i'_c(t) = k_c b \cos(h\omega t + \beta + \beta_c) \quad (20)$$

其中, k_u 为 $i'_u(t)$ 的幅值与 $i_u(t)$ 的幅值比例; α_u 为 $i'_u(t)$ 与 $i_u(t)$ 的初始相位差; k_c 、 β_c 分别为 $i'_c(t)$ 与 $i_c(t)$ 的幅值比例和初始相位差。

根据图3的电路图有如下关系:

$$i_{us}(t) = i_u(t) - i'_c(t) \quad (21)$$

$$i_{cs}(t) = i_c(t) - i'_u(t) \quad (22)$$

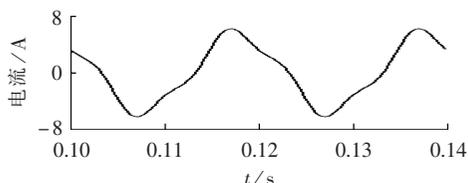
$$i_s(t) = i''_u(t) + i''_c(t) \quad (23)$$

上面3式只有2个方程是独立的,式(23)可由式(21)、(22)得到,取式(21)、(22)作为联立方程组,把式(7)、(10)、(20)代入式(21),式(8)、(11)、(19)代入式(22),运用相量法^[17]求解方程组,即可求得式(10)、(11)中的未知参数 a 、 α 、 b 、 β 。

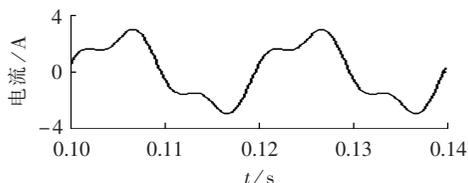
3 算例仿真分析

用 PSCAD/EMTDC^[18-19] 软件搭建如图3所示的仿真电路,供电侧由基波电压和3次谐波电压组成,基波电压有效值为10V,3次谐波电压有效值为3V,非线性负荷侧用3次谐波电压源代替,其有效值为4.5V,3次谐波阻抗分别为 $Z_u = 1 + j2 \Omega$, $Z_c = 3 + j3 \Omega$, $Z = j6 \Omega$,各条支路的电流实际波形见图4。

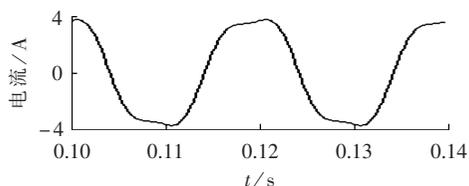
从图4中可以看出,供电侧、非线性负荷侧以及



(a) 供电侧电流



(b) 非线性负荷侧电流

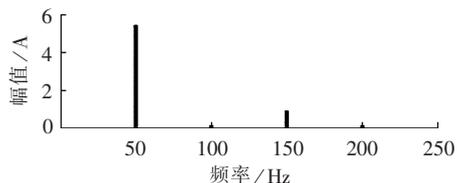


(c) 线性负荷侧电流

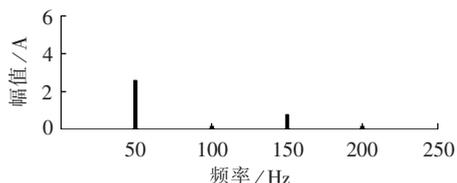
图4 实测数据波形

Fig.4 Waveforms of measured data

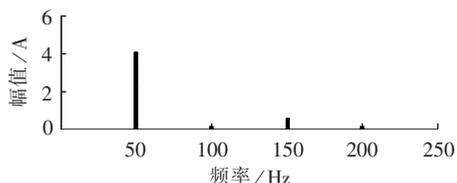
线性负荷支路的电流都发生了畸变,3条支路的频谱图如图5所示。



(a) 系统侧电流频谱图



(b) 非线性负荷侧电流频谱图



(c) 线性负荷支路电流频谱图

图5 电流频谱图

Fig.5 Current spectrum

从图5中可以看出,供电侧、非线性负荷、线性负荷支路均有3次谐波电流,而非线性负荷支路是不产生谐波电流的。

3.1 QR-RLS 算法提取出3次谐波电流

从图5中可以看出各条支路都含有3次谐波,取3次谐波作为分析对象。用第1节介绍的QR-RLS算法可以分别提取出3条支路在公共耦合点(PCC)处的3次谐波波形图,并按照文献^[13,20]的规则取 $\lambda = 0.998$, $\delta = 1$,其他都按第1节所述取初始值,代入测量数据用 MATLAB 软件^[21]求出式(3)中 y 的值,可得如图6所示的3条支路的3次谐波波形图。

从图6中可以看出3条支路的3次谐波电流图形的相位和幅值各不相同,求出幅值和相位差之后,可以写出供电侧、非线性负荷侧、线性负荷侧的3次谐波电流分别为:

$$i_{us}(t) = 0.909 \cos(3\omega t) \quad (24)$$

$$i_{cs}(t) = 0.763 \cos(3\omega t + 141.23^\circ) \quad (25)$$

$$i_s(t) = 0.572 \cos(3\omega t + 56.73^\circ) \quad (26)$$

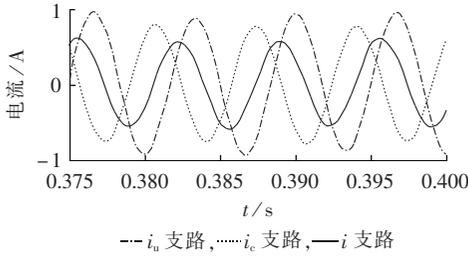


图 6 3 次谐波波形图

Fig.6 Third-order harmonic waveforms

3.2 分析各条支路独自产生的谐波电流

把供电侧、非线性负荷侧和线性负荷侧的 3 次谐波阻抗分别写成如下形式: $Z_u = 2.236 \angle 65.44^\circ \Omega$, $Z_c = 4.243 \angle 45^\circ \Omega$, $Z = 6 \angle 90^\circ \Omega$, 代入式 (15)、(16) 可得 $k = 1.414$, $\theta_0 = 45^\circ$ 。则可以把式 (17) 重写如下:

$$i'_u(t) = 1.414 a'' \cos(3\omega t + \theta'' + 45^\circ) \quad (27)$$

令 $h = 3$, 把式 (10)、(14)、(27) 代入式 (12), 并用式 (18) 的三角公式可得:

$$a \cos(3\omega t + \alpha) = 2.236 a'' \sin \left[3\omega t + \arcsin \frac{1.414 \sin(\theta'' + 45^\circ + 90^\circ) + \sin(\theta'' + 90^\circ)}{2.236} \right] \quad (28)$$

可以求得 $a'' = 0.447 a$, $\theta'' = \alpha - 26.63^\circ$, 即:

$$i'_u(t) = 0.632 a \cos(3\omega t + \alpha + 18.37^\circ) \quad (29)$$

同样可得:

$$i'_c(t) = 0.743 b \cos(3\omega t + \beta + 6.71^\circ) \quad (30)$$

令式 (10)、(11) 中 $h = 3$, 把式 (10)、(24)、(30) 代入式 (21), 把式 (11)、(25)、(29) 代入式 (22) 组成方程组, 运用相量法求得如下值:

$$\begin{cases} a \sin \alpha = 0.6984 \\ a \cos \alpha = 0.5035 \\ b \sin \beta = 0.9972 \\ b \cos \beta = -0.4319 \end{cases}$$

这样可以求得 $a = 0.861$, $\alpha = 54.21^\circ$, $b = 1.087$, $\beta = 113.42^\circ$, 即式 (10)、(11) 可以写成如下两式:

$$i_u(t) = 0.861 \cos(3\omega t + 54.21^\circ) \quad (31)$$

$$i_c(t) = 1.087 \cos(3\omega t + 113.42^\circ) \quad (32)$$

本文前面仿真参数中交代了供电侧由基波电压和 3 次谐波电压组成, 3 次谐波电压有效值为 3 V, 非线性负荷侧用 3 次谐波电压源代替, 其有效值为 4.5 V, 通过阻抗之间的连接关系可以算出 $i_u(t)$ 的幅值为 0.862 A, $i_c(t)$ 的幅值为 1.099 A, 可以看出通过此方法判别出的供电侧和非线性负荷侧独自产生的谐波电流的幅值是准确可靠的。

算出供电侧与非线性负荷侧独自产生的谐波电流后与式 (24)、(25) 两式比较可以看出, 供电侧 3 次谐波电流幅值增大了 5.57%, 而非线性负荷侧则减少了 29.48%。可以看出非线性负荷导致增大了供电侧的谐波电流, 而系统侧则吸收非线性负荷侧大

约 30% 的谐波电流, 为分清供电侧与用户侧对电网谐波污染的责任提供了很好的判别依据。

4 多路非线性负荷谐波电流定量分析

4.1 理论分析

对于多路非线性负荷, 如果不需要知道每一路产生的谐波电流量, 只分析供电侧和综合的非线性负荷侧相互的影响, 可以把综合的非线性负荷等效为单个非线性负荷来计算, 这与前文的算例是一致的。

如果需要分清每一条非线性支路各自产生的谐波电流大小, 上述的方法依然可行。图 7 为多路非线性负荷电路模型, 图中 $i_u(t)$ 表示供电侧独自产生的某次谐波电流, $i_{h1}(t)$ 、 \dots 、 $i_{hn}(t)$ 表示非线性负荷支路独自产生的某次谐波电流, $i(t)$ 表示线性负荷侧的某次谐波电流。

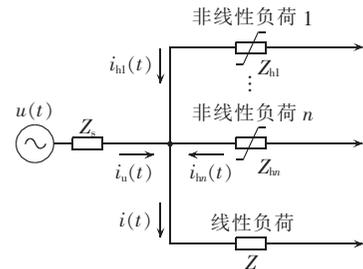


图 7 多负荷电路模型

Fig.7 Multi-load circuit model

设每条支路测量得到的某次谐波电流分别为:

$$i_{us}(t) = m \cos(h\omega t) \quad (33)$$

$$i_{h1s}(t) = n_1 \cos(h\omega t + \alpha_1) \quad (34)$$

\vdots

$$i_{hns}(t) = n_n \cos(h\omega t + \alpha_n) \quad (35)$$

$$i_s(t) = l \cos(h\omega t + \beta_1) \quad (36)$$

其中, $i_{us}(t)$ 为供电侧提取出的某次谐波电流; $i_{h1s}(t)$ 、 \dots 、 $i_{hns}(t)$ 为 n 条非线性负荷支路提取出的某次谐波电流; $i_s(t)$ 为线性支路中的某次谐波电流。

设供电侧和非线性负荷支路独自产生的某次谐波电流分别为:

$$i_u(t) = a \cos(h\omega t + \varphi) \quad (37)$$

$$i_{h1}(t) = b_1 \cos(h\omega t + \gamma_1) \quad (38)$$

\vdots

$$i_{hn}(t) = b_n \cos(h\omega t + \gamma_n) \quad (39)$$

其中, φ 、 γ_1 、 \dots 、 γ_n 为相对于 $i_s(t)$ 的初始相位。对于电流 $i_u(t)$ 有如下表达式:

$$i_u(t) = i'_u(t) + i_{uh1}(t) + \dots + i_{uhn}(t) \quad (40)$$

其中, $i'_u(t)$ 为供电侧某次谐波流向线性负荷侧的部分; $i_{uh1}(t)$ 、 \dots 、 $i_{uhn}(t)$ 为分别流向 n 条非线性负荷侧的某次谐波电流。根据阻抗关系以及式 (15)、(16) 可以求得 $i'_u(t)$ 、 $i_{uh1}(t)$ 、 \dots 、 $i_{uhn}(t)$ 的幅值比例以及它们之间的相位差, 再通过式 (18) 即可求得与 $i_u(t)$ 的关系,

同理对每条非线性负荷支路做同样的分析,最后根据图7的电路关系,列出与测量量的关系,可以求得每条支路独自产生的谐波。

4.2 算例分析

在图3的仿真电路中加上一条非线性负荷支路,电流方向为流向公共耦合点,其余电流方向与图3一致,该支路的3次谐波阻抗 $Z_{c2}=1+j3\ \Omega$ (记为非线性支路2),其余各支路参数如前文所述,分别为供电侧阻抗 $Z_u=1+j2\ \Omega$,线性支路谐波阻抗 $Z=j6\ \Omega$,另一条非线性负荷支路阻抗 $Z_{c1}=3+j3\ \Omega$ (记为非线性支路1),通过QR-RLS算法提取出的3次谐波电流分别为:

$$i_{us}(t)=0.727\cos(3\omega t) \quad (41)$$

$$i_{c1s}(t)=0.826\cos(3\omega t+145.30^\circ) \quad (42)$$

$$i_{c2s}(t)=0.336\cos(3\omega t-6.09^\circ) \quad (43)$$

$$i_s(t)=0.578\cos(3\omega t+48.74^\circ) \quad (44)$$

式(41)为供电侧提取出的3次谐波电流,式(42)、(43)分别为非线性支路1和2的3次谐波电流,式(44)为线性负荷侧提取出的3次谐波电流。

设供电侧、非线性负荷1和2独自产生的3次谐波电流分别为:

$$i_u(t)=a\cos(3\omega t+\varphi) \quad (45)$$

$$i_{c1}(t)=b_1\cos(3\omega t+\alpha) \quad (46)$$

$$i_{c2}(t)=b_2\cos(3\omega t+\beta) \quad (47)$$

根据式(15)、(16)可以求得供电侧流向非线性负荷支路1和2的谐波电流分别为:

$$i_{u-c1}(t)=0.343a\cos(3\omega t+\varphi+22.17^\circ) \quad (48)$$

$$i_{u-c2}(t)=0.460a\cos(3\omega t+\varphi-4.4^\circ) \quad (49)$$

同理可得非线性负荷支路1流向供电侧和非线性支路2的谐波电流分别为:

$$i_{c1-u}(t)=0.487b_1\cos(3\omega t+\alpha+6.43^\circ) \quad (50)$$

$$i_{c1-c2}(t)=0.344b_1\cos(3\omega t+\alpha+0.30^\circ) \quad (51)$$

同理可得非线性负荷支路2流向供电侧和非线性支路1的谐波电流分别为:

$$i_{c2-u}(t)=0.546b_2\cos(3\omega t+\beta-0.91^\circ) \quad (52)$$

$$i_{c2-c1}(t)=0.288b_2\cos(3\omega t+\beta+19.53^\circ) \quad (53)$$

根据电路知识可以列出如下方程组:

$$\begin{cases} i_{us}(t)=i_u(t)-i_{c1-u}(t)-i_{c2-u}(t) \\ i_{c1s}(t)=i_{c1}(t)-i_{u-c1}(t)-i_{c1-c2}(t) \\ i_{c2s}(t)=i_{c2}(t)-i_{u-c2}(t)-i_{c1-c2}(t) \end{cases} \quad (54)$$

代入数据运用相量法可以求得: $a=1.148$, $\varphi=51.02^\circ$, $b_1=1.199$, $\alpha=114.19^\circ$, $b_2=0.894$, $\beta=54.01^\circ$ 。

将这些参数代入式(45)——(53)即可知道所有未知电流,这样就可以进行谐波电流定量分析,以非线性支路谐波电流对供电侧谐波电流影响性分析为例,供电侧提取出的谐波电流与独自产生的谐波电流相比减少了36.67%,由式(41)与式(50)可以求出非

线性负荷支路1使供电侧谐波减少了4.88%,由式(41)与式(52)可以求出非线性负荷支路2使供电侧谐波减少了42.51%,可以看出供电侧的谐波电流减少的量主要是由于非线性负荷支路2的贡献,共同作用时减少了36.67%,这里减少的量不是2条非线性支路减少量的和,这是因为电流的模值为实部和虚部的平方根,是非线性关系,但这并不影响判断非线性负荷支路2对供电侧的谐波电流减少起主要作用,同理可以分析其他支路。

5 结论

本文针对基于奇异值分解方法识别谐波源不能定量分析的不足,在用奇异值分解方法判别出非线性负荷与线性负荷后,采用QR-RLS算法提取谐波电流,并在此基础上定量分析谐波源。该算法简单实用、易于实现,能够很好地提取出电流中的各次谐波以及它们之间的相位差,从而能够求出供电侧和非线性负荷侧独自发出的谐波电流,并且在多谐波源电路中也能够准确地求出各谐波支路独自产生的谐波电流,在此基础上分析各用户侧对供电侧谐波电流的影响,其意义在于为分清供电侧和用户侧对电网谐波污染的责任提供准确的数据参考,有利于电网谐波污染的治理。

参考文献:

- [1] 齐勇,江亚群,黄纯,等. 谐波源和闪变源的识别方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):60-63.
QI Yong,JIANG Yaqun,HUANG Chun,et al. Identification algorithm of harmonic source and flicker source[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):60-63.
- [2] YANG H,POROTTE P,ROBERT A. Assessing the harmonic emission level from one particular customer[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Power Quality. Amsterdam, Netherlands:[s.n.],1994:160-166.
- [3] 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.
ZHOU Lin,ZHANG Feng,LI Qiuhua,et al. Methods for localizing the harmonic source in power distribution network[J]. High Voltage Engineering,2007,33(5):103-108.
- [4] LI Chun,XU W,TAYJASANANT T. A critical impedance based method for identifying harmonic source[J]. IEEE Trans on PWRD,2004,19(2):571-678.
- [5] HAMZAH N,MOHAMED A. Methods for determining utility and customer harmonic contributions at the point of common coupling[C]//National Power and Energy Conference 2003 Proceedings. Bangi,Malaysia:[s.n.],2003:167-171.
- [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.
LIU Xiuling,WANG Hongrui,WANG Yongqing,et al. Application of critical impedance method in harmonic source detecting in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(14):76-80.

- [7] CHEN Chaoying, LIU Xiuling, XU W, et al. Critical impedance method—a new detecting harmonic source method in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 288-295.
- [8] 于淼, 张炳达. 配电网中谐波源检测方法的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(1): 36-40.
YU Miao, ZHANG Bingda. Study of detecting harmonic sources' method in distribution systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(1): 36-40.
- [9] MOUSTAFA A A, MOUSSA A M, EL-GAMMAL M A. Separation of customer and supply harmonics in electrical power distribution system[C]//Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Orlando, USA: [s.n.], 2000: 1035-1040.
- [10] 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.
GONG Hualin, XIAO Xianyong. Application of non-linearity degree method in harmonic source detecting in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 30-34.
- [11] 蔡明. 基于参数辨识的配电网谐波源判别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
CAI Ming. Study on harmonic source identification based on parameter identification method in power distributed system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [12] 唐昆明, 蔡明, 罗建, 等. 基于奇异值分解的非线性负荷谐波源定位方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 96-100.
TANG Kunming, CAI Ming, LUO Jian, et al. Harmonic source location based on singular value decomposition method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 96-100.
- [13] SIMON H. 自适应滤波器原理[M]. 4版. 郑宝玉, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 401-410.
- [14] 刘国海, 吕汉闻, 刘颖, 等. 基于改进 RLS 算法的谐波电流检测方法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 46-49.
LIU Guohai, LÜ Hanwen, LIU Ying, et al. Harmonic current detection based on improved RLS algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 46-49.
- [15] 王俊杰, 郑益慧, 姚钢, 等. 有源电力滤波器的动态因子 LMS 谐波检测方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 91-95.
WANG Junjie, ZHENG Yihui, YAO Gang, et al. Dynamic factor LMS algorithm for APF harmonic detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 91-95.
- [16] 张毅, 王辉. 基于 QR 分解的 RLS 算法及在扩频系统的应用研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(24): 6207-6209.
ZHANG Yi, WANG Hui. RLS algorithm based on QR decomposition and its application in spread spectrum system [J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(24): 6207-6209.
- [17] 邱关源, 罗先觉. 电路[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 202-211.
- [18] 孙宏伟, 李梅, 寇晓括, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 谐波仿真分析[J]. 电力电子技术, 2004, 38(3): 22-24.
SUN Hongwei, LI Mei, KOU Xiaokuo, et al. Harmonic simulation analysis based on PSCAD/EMTDC[J]. Power Electronics, 2004, 38(3): 22-24.
- [19] 许加柱, 庞丽忠, 张志文, 等. 多谐波源用户的谐波责任分摊的定量分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 38-42.
XU Jiazhu, PANG Lizhong, ZHANG Zhiwen, et al. Quantitative analysis for harmonic responsibility proration among multiple harmonic sources [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12): 38-42.
- [20] 刘国海, 吕汉闻, 陈兆玲, 等. 基于修正遗忘因子 RLS 算法的谐波电流检测新方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 172-177.
LIU Guohai, LÜ Hanwen, CHEN Zhaoling, et al. A new method for harmonic current detection based on self-adjustable forgetting factor RLS algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 172-177.
- [21] 张平. MATLAB 基础与应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007: 74-85.

作者简介:



马宏忠

马宏忠(1962-),男,江苏南通人,教授,博士研究生导师,研究方向为电气设备状态监测及故障诊断、电力系统谐波分析等(E-mail: hhumhz@163.com);

徐刚(1987-),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统谐波分析(E-mail: xugang87@139.com)。

Quantitative analysis of harmonic current responsibility in distribution network

MA Hongzhong, XU Gang, SONG Shuping, ZHAO Hongfei, REN Lizhi
(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A QR-RLS (Recursive Least-Squares based on QR decomposition) based algorithm of quantitative harmonic current analysis is proposed to explicitly distinguish the harmonic pollution responsibility between utility side and customer side of distribution network, which extracts the instantaneous current of specified order harmonic at PCC (Point of Common Coupling), gets its phase difference between utility side and customer side and calculates their contributions respectively. Simulation circuit is built with PSCAD/EMTDC and MATLAB is applied in data analysis, which verifies the correctness of the proposed algorithm.

Key words: electric power distribution; harmonic analysis; quantitative analysis; QR-RLS algorithm; computer simulation