

基于联合对角化法与数据筛选的谐波责任划分

罗杰¹, 符玲¹, 臧天磊², 何正友¹

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 清华大学 电机系, 北京 100084)

摘要:针对背景谐波波动的随机性, 为了更加准确地划分谐波责任, 考虑到谐波阻抗的符号特性和电力系统中系统侧谐波阻抗远远小于用户侧谐波阻抗的实际情况, 在联合对角化法的基础上, 提出了一套数据筛选准则。利用联合对角化法对谐波电压和谐波电流进行分解, 得到混合矩阵; 分别通过符号判别法和比例系数法纠正次序不确定性和幅值不确定性; 应用数据筛选准则得到谐波阻抗; 根据谐波责任定义式估算谐波责任。对 IEEE 13 节点系统进行仿真测试和实测数据分析, 结果表明: 与传统方法相比, 所提方法的估算精度和适应性更好。

关键词:谐波分析; 谐波责任划分; 谐波阻抗估算; 联合对角化法; 数据筛选准则; 背景谐波波动

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.012

0 引言

随着整流器、逆变器等非线性负荷大量接入电网, 产生的大量谐波导致了日益严重的谐波污染, 从而引起了电能质量^[1-3]恶化。因此, 谐波治理势在必行。谐波责任的准确划分是谐波治理的重要前提。

当前, 电力系统谐波责任划分主要是基于诺顿等效电路和叠加定理来分析系统侧和用户侧在公共耦合点 PCC (Point of Common Coupling) 处的谐波责任。在实际电网的大多数工况下, 用户侧谐波阻抗要远远大于系统侧谐波阻抗, 因此在计算中往往忽略用户侧谐波阻抗^[4]。

目前, 以波动量法和线性回归法为代表的“非干预类”方法被用来估算系统侧谐波阻抗, 进而计算谐波责任。文献[5-6]采用的波动量法是根据 PCC 处谐波电压和谐波电流的时间波动量估算系统侧谐波阻抗, 不足之处在于当背景谐波波动较小时无法保证估算精度, 同时对谐波电压和谐波电流的测量精度^[7]要求较高。文献[8-11]采用的各种线性回归法在背景谐波波动较小时精确度尚可, 但回归系数的误差会随着背景谐波波动的增大而变得不可接受。在实际电力系统中, 背景谐波波动具有随机性, 波动量法和线性回归法的应用存在一定的局限性, 因此需要一种适应性更强的方法。

联合对角化法 JADE (Joint Approximate Diagonalization of Eigen-matrices)^[12-13]是经典的盲源分离

方法^[14]之一, 其利用源信号的统计独立性对混合信号进行分离, 最早应用于信号领域, 现在也广泛应用于电力系统^[15]中。由于实际电力系统中的谐波源一般是相互独立的, 因此, 本文将采用联合对角化法对 PCC 处的谐波电压和谐波电流进行分解, 得到混合矩阵。针对盲源分离结果中固有的次序不确定性和幅值不确定性, 本文通过引入符号判别法和比例系数法分别纠正次序不确定性和幅值不确定性。

考虑到阻抗矩阵的符号特性和电网的大多数实际情况, 本文将联合对角化法引入谐波责任划分中, 并将其与数据筛选准则相结合, 以提高谐波阻抗的估算精度, 解决背景谐波随机波动条件下的谐波责任划分问题。

1 谐波责任指标因子

PCC 处负荷接入模型如图 1 所示。

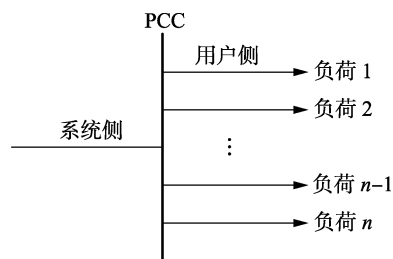


图 1 PCC 处负荷接入模型

Fig.1 Load connection model at PCC

设 U_{pch} 为 PCC 处的 h 次谐波电压, $I_{1h}, I_{2h}, \dots, I_{nh}$ 为 n 个负荷产生的 h 次谐波电流。由叠加原理可知, n 个负荷产生的谐波电压矢量和为 PCC 处的谐波电压 U_{pch} , 即:

$$U_{pch} = U_{1h} + U_{2h} + \dots + U_{nh} = Z_{1h}I_{1h} + Z_{2h}I_{2h} + \dots + Z_{nh}I_{nh} \quad (1)$$

其中, $U_{1h} \sim U_{nh}$ 为 n 个负荷在 PCC 处产生的等效谐波电压; $Z_{1h} \sim Z_{nh}$ 为 n 个负荷的等效谐波阻抗。用相

收稿日期: 2018-01-30; 修回日期: 2018-08-16

基金项目: 国家自然科学基金杰青基金资助项目 (51525702); 国家自然科学基金面上项目 (51777173); 四川省科技支撑计划资助项目 (2016RZ0079)

Project supported by the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars (51525702), the National Natural Science Foundation of China (51777173) and the Science and Technology Support Program of Sichuan Province (2016RZ0079)

量图表示如图 2 所示。图中, $\theta_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为 U_{ih} 与 U_{pcc} 的夹角。

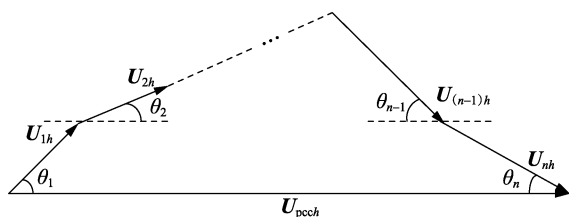


图 2 PCC 处谐波电压相量图

Fig.2 Phasor diagram of harmonic voltage at PCC

以负荷 1 为例, 负荷 1 产生的谐波电压 U_{1h} 在谐波电压 U_{pcc} 上的投影与 U_{pcc} 模值的比值为负荷 1 的谐波责任, 即:

$$\mu_{1h} = \frac{|U_{1h}| \cos \theta_1}{|U_{pcc}|} \times 100\% = \frac{|Z_{1h} I_{1h}| \cos \theta_1}{|U_{pcc}|} \times 100\% \quad (2)$$

由式(2)可知, 谐波电流 I_{1h} 和 PCC 处谐波电压 U_{pcc} 均可通过测量获得。因此谐波责任划分的前提是估算谐波阻抗。

2 联合对角化法原理

Cardoso 最早提出联合对角化法^[12-13], 该方法的目标矩阵为一组特殊的四阶累积量矩阵, 对目标矩阵进行联合对角化, 从而可以得到混合矩阵。

联合对角化法的数学模型为:

$$X = AS \quad (3)$$

其中, X 为 $N \times T$ 阶已知混合量测信号矩阵; S 为 $m \times T$ 阶未知源信号矩阵; A 为 $N \times m$ 阶未知混合矩阵。联合对角化法的数学模型必须满足以下 3 个假设条件:

- 在任意时刻, 各个源信号 S 均是统计独立的;
- 高斯分布在源信号 S 中至多只能有一个;
- 源信号维数不多于量测信号维数。

记白化矩阵为 W , 混合量测信号矩阵 X 先经过白化处理以减少彼此间的相关性, 即:

$$\tilde{X} = WX = WAS = US \quad (4)$$

定义 $U = WA$, 记 U 的第 i 列为 u_i , 即 $U = [u_1, u_2, \dots, u_m]$, 且 $u_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]^T$, 定义 M_i 如式(5)所示。

$$M_i = u_i u_i^T \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

记 M_i 的第 k 行第 l 列元素为 $m_{i,kl}$ 。定义四阶累积量矩阵为 $F(M)$, $F_{p,q}$ 为 $F(M)$ 的第 p 行第 q 列元素, 即:

$$F_{p,q} = \sum_{kl} m_{kl} \text{cum}\{x_p, x_q, x_k, x_l\} \quad (6)$$

其中, $\text{cum}\{\cdot\}$ 为累积量函数; x_q, x_p, x_k, x_l 分别为第 q, p, k, l 个分量。 $F(M)$ 显然是对称矩阵, 假设 λ 为其特征值, 那么 M 为其特征矩阵。可以证明:

$$F(M) = \lambda M \quad (7)$$

式(7)还可以表示成以下形式:

$$F(M) = UAU^T \text{ 或 } U^T F(M) U = A \quad (8)$$

$$A = \text{diag}(\lambda_1 u_1 M u_1^T, \lambda_2 u_2 M u_2^T, \dots, \lambda_m u_m M u_m^T)$$

综上所述, $F(M)$ 可通过 U 对角化, 从而能通过 $U = WA$ 辨识得到混合矩阵 A 。

联合对角化法的算法流程如下:

- 对已知混合量测数据 X 进行白化得 $\tilde{X} = WX$;
- 选定 $M_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 求得相应的四阶累积量矩阵 $F(M)$;
- 求得使 $F(M)$ 联合对角化的矩阵 U ;
- 通过 $U = WA$ 辨识得到混合矩阵 A 。

3 谐波阻抗估算

图 3 为一种典型的系统侧和用户侧的诺顿等效电路模型。图中, Z_u 和 Z_c 分别为系统侧和用户侧等效谐波阻抗; I_u 和 I_c 分别为系统侧和用户侧等效谐波电流。

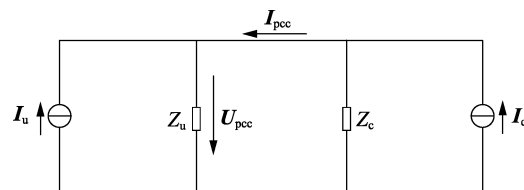


图 3 诺顿等效电路模型

Fig.3 Norton equivalent circuit model

PCC 处谐波电压和谐波电流的关系如式(9)所示。

$$\begin{bmatrix} U_{pcc} \\ I_{pcc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_u Z_c}{Z_u + Z_c} & \frac{Z_u Z_c}{Z_u + Z_c} \\ \frac{Z_c}{Z_u + Z_c} & \frac{Z_u}{Z_u + Z_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c \\ I_u \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)又可以表示为:

$$Y = ZI \quad (10)$$

$$Y = \begin{bmatrix} U_{pcc} \\ I_{pcc} \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} \frac{Z_u Z_c}{Z_u + Z_c} & \frac{Z_u Z_c}{Z_u + Z_c} \\ \frac{Z_c}{Z_u + Z_c} & \frac{Z_u}{Z_u + Z_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} I_c \\ I_u \end{bmatrix}$$

比较式(3)、(10)可得:

$$\begin{cases} X \leftrightarrow Y \\ A \leftrightarrow Z \\ S \leftrightarrow I \end{cases} \quad (11)$$

本文通过符号判别法和比例系数法分别纠正次序不确定性和幅值不确定性。由矩阵 $\mathbf{Z}$ 可看出:

$$\begin{cases} \text{real}(Z_{11})\text{real}(Z_{21}) > 0 \\ \text{real}(Z_{12})\text{real}(Z_{22}) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, real 表示取实部。由式 (12) 可以看出, 混合矩阵 $\mathbf{A}$ 中实部之积大于 0 的列对应于阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$ 的第 1 列, 混合矩阵 $\mathbf{A}$ 中实部之积小于 0 的列对应于阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$ 的第 2 列。由此可纠正次序不确定性。

令:

$$\hat{\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{I}}_c \\ \hat{\mathbf{I}}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \mathbf{I}_c \\ k_2 \mathbf{I}_u \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $\hat{\mathbf{I}}_c$ 和 $\hat{\mathbf{I}}_u$ 分别为 $\mathbf{I}_c$ 和 $\mathbf{I}_u$ 的估计值; k_1 和 k_2 分别为 $\mathbf{I}_c$ 和 $\mathbf{I}_u$ 的比例系数。

式 (9) 可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\text{pec}} \\ \mathbf{I}_{\text{pec}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{I}}_c \\ \hat{\mathbf{I}}_u \end{bmatrix} \quad (14)$$

将式 (13) 代入式 (14) 可得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\text{pec}} \\ \mathbf{I}_{\text{pec}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_{11}}{k_1} & \frac{A_{12}}{k_2} \\ \frac{A_{21}}{k_1} & \frac{A_{22}}{k_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_c \\ \mathbf{I}_u \end{bmatrix} \quad (15)$$

与式 (9) 比较可知:

$$\frac{Z_u Z_c}{Z_u + Z_c} = \frac{A_{11}}{k_1} \quad (16)$$

$$\frac{Z_c}{Z_u + Z_c} = \frac{A_{21}}{k_1} \quad (17)$$

$$\frac{Z_u Z_c}{Z_u + Z_c} = \frac{A_{12}}{k_2} \quad (18)$$

$$-\frac{Z_u}{Z_u + Z_c} = \frac{A_{22}}{k_2} \quad (19)$$

由式 (16) — (19) 可以求出系统侧谐波阻抗 Z_u 和用户侧谐波阻抗 Z_c 。

4 数据筛选准则

如前所述, 在大多数实际情况下, 用户侧谐波阻抗要远远大于系统侧谐波阻抗, 因此在计算过程中往往忽略用户侧谐波阻抗。结合第 3 节的次序不确定性纠正, 本文采用如下数据筛选准则:

$$\begin{cases} \text{real}(Z_{11})\text{real}(Z_{21})\text{real}(Z_{12})\text{real}(Z_{22}) < 0 & \text{准则 1} \\ Z_u < Z_c & \text{准则 2} \end{cases}$$

通过准则 1 筛选与理论预期相一致的混合矩阵 $\mathbf{A}$; 通过准则 2 筛选与大多数实际情况相一致的谐波阻抗。仿真结果表明, 与仅使用联合对角化法相比,

结合联合对角化法和数据筛选准则对提高求解精度有极大的帮助。

至此, 基于联合对角化法与数据筛选准则的谐波责任划分流程如图 4 所示。

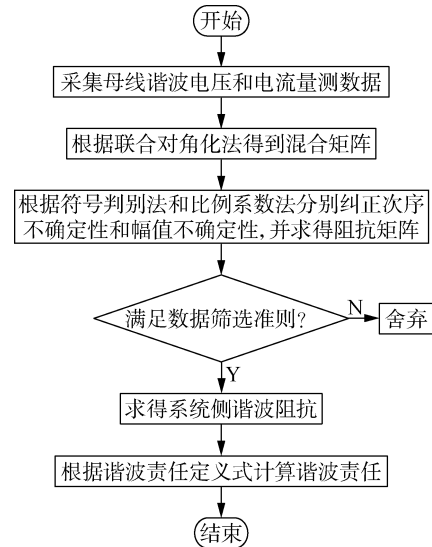


图 4 谐波责任划分流程图

Fig.4 Flowchart of harmonic contribution determination

5 IEEE 13 节点系统算例仿真

IEEE 13 节点系统模型如图 5 所示, 各具体参数设置详见文献 [16]。仿真时, 设定负荷 8、负荷 10 和负荷 11 均为谐波源负荷, 其中负荷 8 为主要谐波源负荷, 母线 3 作为关注母线, 评估负荷 8 在母线 3 处的谐波责任, 以 5 次谐波为例进行仿真。

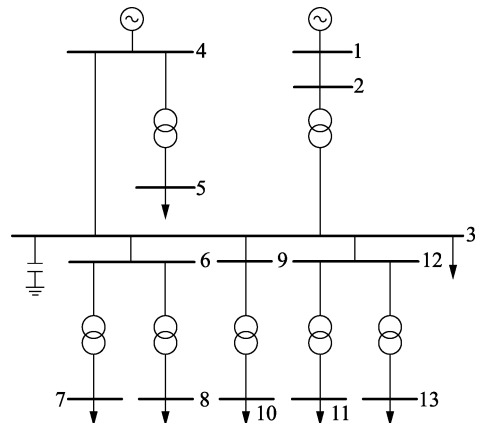


图 5 IEEE 13 节点系统模型

Fig.5 Model of IEEE 13-bus system

在仿真时, 首先利用牛顿-拉夫逊法进行潮流计算, 以潮流计算的结果作为基准值, 生成谐波责任划分所需要的谐波电压和谐波电流的基准值。

为了验证在背景谐波随机波动的情况下本文所提方法的准确性, 设定节点 8 注入谐波电流的幅值和相角作平均值为基准值、标准差为 0.5 的正态波动, 节点 10 和节点 11 的注入谐波电流的幅值和相

角作平均值为基准值、标准差为 0~1 之间随机数的正态波动,生成 86 400 个样本点,每 200 个样本点为一组,分别采用传统波动量法、主导波动量法、本文所提方法(联合对角化法与数据筛选相结合)估算负荷 8 的谐波阻抗。为了减小估算的偶然误差,以重复计算 100 次的平均值作为估算结果,结果如表 1 所示(表中的谐波阻抗为标么值)。

表 1 负荷 8 谐波阻抗估算结果

Table 1 Estimated harmonic impedance of Load 8

方法	谐波阻抗		谐波阻抗 估算误差/%
	精确值	估算值	
传统波动量法		7.270 3	121.547 4
主导波动量法	3.281 6	3.798 8	15.759 9
本文方法		3.443 7	4.940 8

由表 1 可知,在背景谐波随机波动的情况下,传统波动量法和主导波动量法均无法有效估算谐波阻抗;而本文所提方法的估算结果更加精确,说明本文所提方法能够有效估算谐波阻抗。

100 次仿真的运行数据统计结果和相对误差如表 2 和图 6 所示。由表 2、图 6 可以看出,在处理相同数据量的情况下,本文所提方法的运行时间并未大幅增加,同时相对误差更小且稳健性更好,验证了本文所提方法用于估算谐波阻抗是可行并且准确的。

表 2 运行数据统计结果

Table 2 Statistical results of running data

方法	相对误差/%		标准差	平均运行 时间/s
	最大值	最小值		
传统波动量法	265.382 7	5.255 4	67.431 8	109.183 4
主导波动量法	40.999 9	0.233 5	10.169 7	116.902 3
本文方法	16.391 2	0.068 9	3.530 0	144.288 6

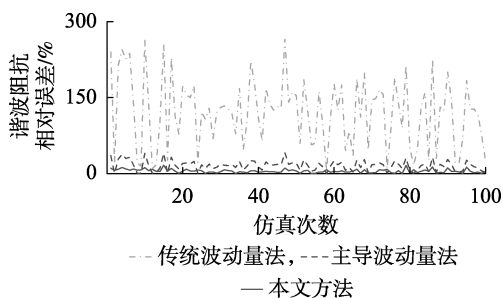


图 6 负荷 8 谐波阻抗相对误差

Fig.6 Relative error of harmonic impedance of Load 8

为了验证在背景谐波随机波动的情况下本文所提方法的抗噪性,在前述仿真设定的基础上,同时在节点 10 和节点 11 的注入谐波电流上施加信噪比(SNR)从 120 dB 到 0 的高斯白噪声,然后估算负荷 8 的谐波阻抗。由于传统波动量法的误差极大,故不再作对比,本文所提方法与主导波动量法求得的谐波阻抗相对误差如图 7 所示。

由图 7 可以看出,本文所提方法的相对误差整

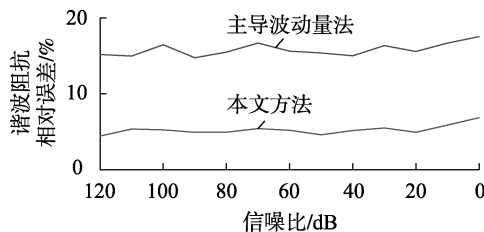


图 7 负荷 8 谐波阻抗相对误差随信噪比的变化情况

Fig.7 Relative error of harmonic impedance of Load 8 vs. SNR

体上较小,具有良好的抗噪性。为了验证本文所提方法对背景谐波波动的适应程度,设定节点 8 的节点注入谐波电流作平均值为基准值,标准差为 0.5 的正态波动,同时设定节点 10 和节点 11 的节点注入谐波电流作平均值为基准值、标准差在 0.1~1 变化的正态波动,然后估算负荷 8 的谐波阻抗,其谐波阻抗相对误差如图 8 所示。

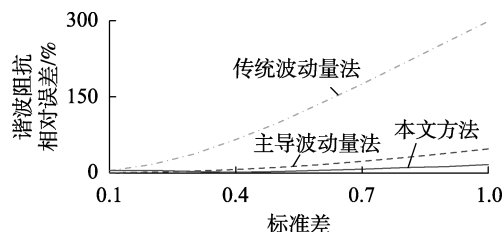


图 8 负荷 8 谐波阻抗相对误差随标准差的变化情况

Fig.8 Relative error of harmonic impedance of Load 8 vs. standard deviation

由图 8 可以看出,在节点 10 和节点 11 的注入谐波电流的标准差从 0.1 至 1 逐渐增大的情况下,3 种方法的谐波阻抗相对误差均有所增大,但是本文所提方法计算所得谐波阻抗的相对误差变化最小,说明相较于其他 2 种方法,本文所提方法能够有效抑制背景谐波波动的影响。

在正确估算谐波阻抗的基础上,设定节点 8 的节点注入谐波电流的幅值和相角作平均值为基准值、标准差为 0.5 的正态波动,节点 10 和节点 11 的注入谐波电流的幅值和相角作平均值为基准值、标准差为 0~1 之间随机数的正态波动,评估负荷 8 的谐波责任。估算结果和谐波责任相对误差统计图分别如表 3 和图 9 所示。

结合表 3 和图 9 可以看出,本文所提方法的估算误差最小,说明该方法的准确性较强。虽然本文所提方法计算所得结果存在一定的波动,但总体上仍具有稳健性。

表 3 负荷 8 谐波责任估算结果

Table 3 Estimated harmonic responsibility of Load 8

方法	谐波责任		谐波责任 估算误差/%
	精确值	估算值	
传统波动量法		61.475 3	31.401 0
主导波动量法	46.784 5	50.513 1	7.969 6
本文方法		48.605 8	3.892 9

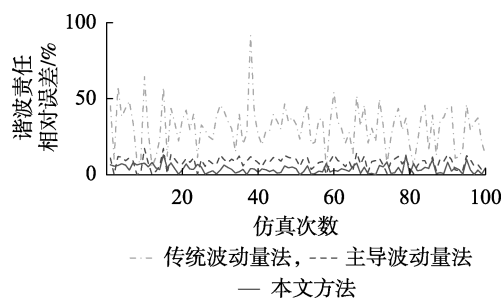


图 9 负荷 8 谐波责任相对误差

Fig.9 Relative error of harmonic responsibility of Load 8

6 实测数据分析

为了进一步验证本文所提方法的适应性,采用现场实测数据进行分析。实测数据来自某牵引变电所的三相 5 次谐波电流,每隔 3 s 采集一个数据点,共采集 24 h 总计 28 800 个数据点。其中 A 相 5 次谐波电流幅值如图 10 所示(5 次谐波电流幅值为标幺值)。

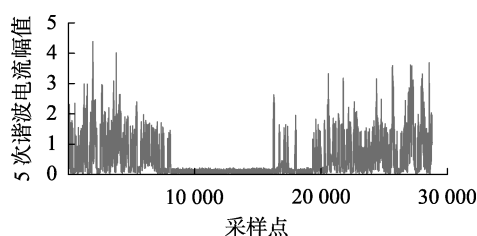


图 10 A 相 5 次谐波电流幅值

Fig.10 Fifth harmonic current amplitude of phase A

将上述实测数据作为谐波电流注入 IEEE 13 节点系统中进行仿真:将 28 800 个数据点每 100 个数据点分为一组,总共分为 288 组,将三相 5 次谐波电流分别注入节点 8、节点 10 和节点 11。采用传统波动量法、主导波动量法和本文所提方法分别估算负荷 8 的谐波阻抗和谐波责任,重复计算 100 次,估算结果分别如图 11 和图 12 所示。

由图 11、12 可知,无论是估算谐波阻抗还是估算谐波责任,相较于传统波动量法和主导波动量法,本文所提方法均表现了较高的准确性和稳健性,可以说明本文所提方法对实际工程应用也有一定的有效性和适应性。

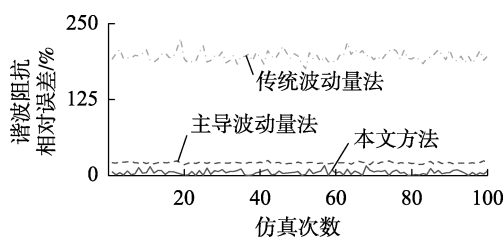


图 11 实测数据下的谐波阻抗相对误差

Fig.11 Relative error of harmonic impedance under measured data

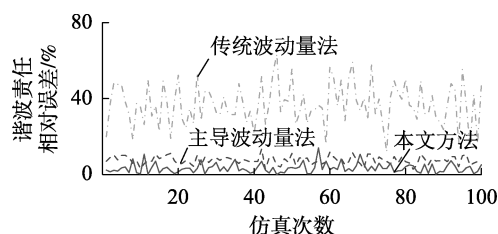


图 12 实测数据下的谐波责任相对误差

Fig.12 Relative error of harmonic responsibility under measured data

7 结论

在背景谐波波动的情况下,本文采用联合对角化法与数据筛选相结合的方法进行谐波阻抗估算和谐波责任划分。对 IEEE 13 节点系统进行算例仿真和实测数据分析可以得到如下结论:

- 采用数据筛选准则可以找到与理论预期相一致的混合矩阵以及与实际工况相一致的谐波阻抗,有助于提高计算精度;
- 与传统波动量法和主导波动量法相比,本文所提方法在谐波阻抗估算和谐波责任划分上均具有更高的计算精度,对仿真和实测数据均具有更好的适应性;
- 本文所提方法计算所得谐波责任划分结果存在一定的波动,如何进一步提高稳健性是后续研究方向。

参考文献:

- [1] 付学谦,孙宏斌,郭庆来,等. 能源互联网供能质量综合评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):1-7.
FU Xueqian, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Comprehensive evaluation of energy quality for energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 1-7.
- [2] 王芳,顾伟,袁晓冬,等. 面向智能电网的新一代电能质量管理平台[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):134-139.
WANG Fang, GU Wei, YUAN Xiaodong, et al. Power quality management platform for smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 134-139.
- [3] 林顺富,赵伦加,刘庆强,等. 基于 0-1 二次规划的非干预式负荷识别算法研究[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(8):85-91.
LIN Shunfu, ZHAO Lunjia, LIU Qingqiang, et al. A nonintrusive load identification method based on quadratic 0-1 programming[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 85-91.
- [4] FARZAD K, SAEID E, SEYED H H. Method for determining utility and consumer harmonic contributions based on complex independent component analysis[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 10(2): 526-534.
- [5] 龚华麟,肖先勇,刘亚梅,等. 基于主导波动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.
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.

- 30(4):22-27.
- [6] 陈静,符玲,臧天磊,等. 考虑背景谐波波动的谐波责任划分方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):61-66.
CHEN Jing, FU Ling, ZANG Tianlei, et al. Harmonic responsibility determination considering background harmonic fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5):61-66.
- [7] 刘林,林涛,肖英伟,等. 基于组合滤波和时频原子变换的故障录波数据分析新算法[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):83-88.
LIU Lin, LIN Tao, XIAO Yingwei, et al. Fault recording data analysis based on combinational filter and time-frequency transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7):83-88.
- [8] 华回春,刘哲,贾秀芳. 谐波阻抗估计的非光滑部分线性回归方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):120-126.
HUA Huichun, LIU Zhe, JIA Xiufang. Unsmooth and partially linear regression model for harmonic impedance estimation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9):120-126.
- [9] 刘苏婕,肖先勇,刘亚梅,等. 基于 ICG 权重函数复数域多元线性回归算法的谐波责任分摊方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):160-166.
LIU Sujie, XIAO Xianyong, LIU Yamei, et al. Harmonic responsibility allocation method based on complex field multiple linear regression algorithm with ICG weight function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3):160-166.
- [10] 孙媛媛,李佳奇,尹志明. 基于实测数据的集中式多谐波源责任评估[J]. 中国电机工程学报,2014,34(13):2164-2171.
SUN Yuanyuan, LI Jiaqi, YIN Zhiming. Quantifying harmonic impacts for concentrated multiple harmonic sources using actual data[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13):2164-2171.
- [11] 陈静,符玲,臧天磊,等. 考虑系统谐波阻抗改变的谐波责任定量划分方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):215-222.
CHEN Jing, FU Ling, ZANG Tianlei, et al. Harmonic contribution determination considering system harmonic impedance change[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):215-222.
- [12] CARDOSO J F. High-order contrast for independent component analysis[J]. Neural Comput, 1999, 11(1):157.
- [13] CARDOSO J F. On the performance of orthogonal source separation algorithms[J]. In Proc. EUSIPCO, 1994:776-779.
- [14] 李昌利. 盲源分离的若干算法及应用研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.
LI Changli. Study on some algorithms for blind source separation and their applications[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [15] 王艳,臧天磊,何正友. 电网参数变化条件下的谐波状态分段估计方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(17):217-223.
WANG Yan, ZANG Tianlei, HE Zhengyou. Harmonic state segmented estimation method under condition of power grid parameter change[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17):217-223.
- [16] ABUHASHIM R, BURCH R, CHANG G, et al. Test systems for harmonics modelling and simulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2):579-587.

作者简介:



罗杰

罗杰(1991—),男,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统谐波责任划分(E-mail:337818481@qq.com);

符玲(1981—),女,四川泸州人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统故障诊断和谐波源识别(E-mail:lingfu@swjtu.cn);

臧天磊(1986—),男,内蒙古通辽人,博士,研究方向为电力系统谐波源定位与谐波责任划分(E-mail:zangtianlei@126.com);

何正友(1970—),男,四川自贡人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为现代信息理论在电力系统中的应用(E-mail:hezy@swjtu.edu.cn)。

Harmonic responsibility determination based on JADE and data filtering

LUO Jie¹, FU Ling¹, ZANG Tianlei², HE Zhengyou¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In allusion to the randomness of the background harmonic fluctuations and considering the symbolic characteristic of harmonic impedance and the practical situation that the harmonic impedance of the system-side is far less than that of the customer-side, a set of data filtering criterion is proposed based on the JADE (Joint Approximate Diagonalization of Eigen-matrices) to determine the harmonic responsibility more accurately. The mixed matrix is obtained by using the JADE to decompose the harmonic voltage and the harmonic current, the order uncertainty and the amplitude uncertainty are corrected by the symbol discriminant method and the proportional coefficient method respectively, the harmonic impedance is obtained by using the data filtering criterion, and then the harmonic responsibility is calculated according to the definition equation. The simulation test and measured data analysis of IEEE 13-bus system show that the proposed method has better estimation accuracy and adaptability than traditional methods.

Key words: harmonic analysis; harmonic responsibility determination; harmonic impedance estimation; joint approximate diagonalization of eigen-matrices; data filtering criterion; background harmonic fluctuation