

[电能质量]

基于改进型偏最小二乘法的谐波责任划分

文/张建明¹ 赵巧玲² 贾远温²

1.兰州倚能电力设计咨询有限公司; 2.兰州资源环境职业技术大学

采用改进型偏最小二乘法对谐波责任进行划分。首先由快速傅里叶变换求出公共连接点的各次谐波电压和电流;然后通过改进型偏最小二乘法得到回归系数;最后将得到的回归系数与谐波电流相乘,通过谐波电压和乘积的相互关系评估谐波责任。使用此方法可以消除偏最小二乘法的缺陷,提取无用的响应成分。同时此方法无须进行特殊数据的筛选。对IEEE13节点系统进行仿真,验证了该方法的有效性。

随着现代工业的发展,许多非线性负荷被大量使用,整个电力系统中的谐波污染也变得越来越严重。大量的谐波不但使得设备不能安全可靠的工作,而且有可能造成整个电力系统的不稳定运行,因此电力相关部门非常关注电能质量问题。目前国际上采用一种“奖惩性”方法对电能质量进行控制,准确量化各谐波源在电网的谐波责任是此方法实施的主要条件。

目前,国内外主要是通过计算背景谐波电压和谐波阻抗确定各谐波源对谐波电压畸变应承担的谐波责任。主要分为两类:基于等效电路变换法和基于数据分析法。基于等效电路变换法是通过变换把谐波责任表示成公共连接点测量电压、电流和谐波参考阻抗的形式。基于数据分析法是由所测母线电压、支路电流得到谐波阻抗,再用该谐波阻抗得到谐波责任。如基于线性回归法、基于独立随机矢量协方差特性法。在实际的电网中各母线电压的畸变不是由单个非线性负荷造成的,而是电网中所有非线性负荷共同作用引起的。因而,准确辨别与定量划分每个谐波源对其所连接母线电压的畸变作用十分必要。

为了准确划分系统中多谐波源用户各自的谐波责任,利用改进型偏最小二乘法进行研究。关注节点的

谐波电压是各个分量之和,而谐波源产生的谐波电流和谐波源谐波阻抗之积便是此谐波源在关注节点的谐波电压分量。基于此,建立了关注节点的谐波电压对谐波源负荷的相同次数谐波电流的改进型偏最小二乘回归方程,从而对谐波责任进行划分。

改进型偏最小二乘法原理

在实际计算中,希望可以取得主要成分 t_1, t_2 既要拥有解释矩阵 X 的主要信息,又与响应变量 Y 具有特别高的关联性。即 $\text{Cov}(t_i, Y)$ 要足够大。然而,现实中却存在一些特殊的情况,即 $\text{Cov}(t_i, Y)$ 值非常小,但 $\text{Var}(t_i)$ 却非常大,使得 $\text{Cov}(t_i, Y)$ 同样非常大。当这种现象发生时,有可能遗漏掉一些对响应变量解释能力强的成分,造成回归结果不准确。

改进思路:采用正交投影的方法去除解释矩阵中的一些信息,这些信息与响应变量无关。经过处理后得到的解释矩阵的信息均与响应 $X^T Y Y^T X$ 变量有关,进而满足偏最小二乘回归法的条件,再采用此法进行处理。主要方法步骤为:

1) 求出矩阵的全部特征值,然后求得和特征值0的 $p-1$ 个正交特征向量 $b_1, b_2, \dots, b_{p-1}$ 。这些特征向量均是正交的。

2) 求出矩阵 $\mathbf{B}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{B}$ 的 $p-1$ 个特征值 $\lambda_1, \dots, \lambda_{p-1}$, 同时解得 $p-1$ 个特征值所对应的 $p-1$ 个标准特征向量 $\alpha_1, \dots, \alpha_{p-1}$, 然后选出 m 个特征值, 使得选出的特征值之和占有所有特征值之和的非常大部分。将选出的 m 个非常大特征值对应的特征向量记为 $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ 。

3) 假设 $\mathbf{C} = \mathbf{X} \mathbf{B} \mathbf{A}$, 矩阵 $\mathbf{A} = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ 。 $\mathbf{C}$ 即为必须要用正交投影法去除的信息。

4) 在 $\mathbf{C}$ 上采用正交投影法对 $\mathbf{X}$ 做处理, 得到 $\mathbf{X}_0 = (\mathbf{I}_p - \mathbf{P}_c) \mathbf{X} = \mathbf{X} - \mathbf{C}(\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{X} = \mathbf{X}(\mathbf{I}_p - \mathbf{B} \mathbf{A}(\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{X}) = \mathbf{X} \mathbf{D}$, 则 $\mathbf{X}_0$ 便能够采用偏最小二乘法对响应变量 $\mathbf{Y}$ 进行回归计算。

5) 采用偏最小二乘法使响应变量 $\mathbf{Y}$ 对 $\mathbf{X}_0$ 进行回归计算, 可以得出 $\mathbf{Y}_1 = \mathbf{X}_0 \alpha = \mathbf{X} \beta$, β 即为采用改进型偏最小二乘法对 $\mathbf{X}$ 进行回归而得出的回归系数。

基本原理

系统如图1所示, 母线X两侧分别连接系统的供电侧和多个负荷, 将母线X的两侧叫作系统侧与用户侧。

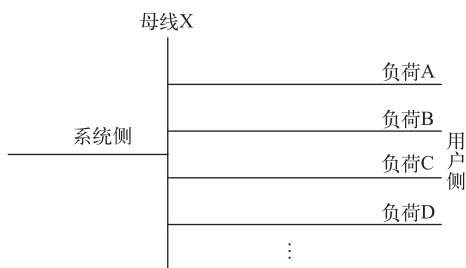


图1 关注母线处多负荷接入模型

当母线X处发生谐波电压的畸变时, 需要知道用户侧负荷与系统侧各自对母线X谐波电压畸变的贡献量, 以此确定各自的责任。

首先假设系统只有负荷A能够产生谐波源, 然后求得负荷A对整个母线X谐波电压畸变的大小。假设 $\mathbf{I}_{hA}$ 为负荷A的 h 次谐波电流, $\mathbf{V}_{hX}$ 为母线X的 h 次谐波电压, 得出

$$\mathbf{V}_{hX} = \mathbf{Z}_{hXA} \mathbf{I}_{hA} + \mathbf{V}_{hX0} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{Z}_{hXA}$ 为除负荷A的所有负荷以及整个系统的谐波阻抗; $\mathbf{V}_{hX0}$ 为整个母线X的 h 次背景谐波电压。

上述背景谐波电压是不包括负荷A在内的其他谐波源在母线X处所产生的谐波电压。默认 $\mathbf{Z}_{hXA}$ 和 $\mathbf{V}_{hX0}$ 在非常短的时间内无变化, 则式(1)右边的第1项便是负荷A在整个母线X处产生的谐波电压, 记

为 $\mathbf{V}_{hXA}$, 即

$$\mathbf{V}_{hXA} = \mathbf{Z}_{hXA} \mathbf{I}_{hXA} \quad (2)$$

$\mathbf{V}_{hXA}$ 、 $\mathbf{V}_{hX0}$ 和 $\mathbf{V}_{hX}$ 之间的关系如图2所示。

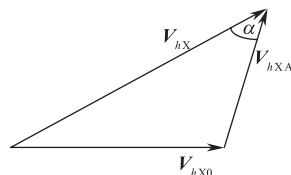


图2 相量关系

由图2可得母线X上负荷A产生的 h 次谐波电压百分比为

$$\mu_h = \frac{\mathbf{V}_{hXA} \cos \alpha}{\mathbf{V}_{hX}} \times 100\% \quad (3)$$

在实际配电系统中, 由于含有多个谐波源, 所以关注节点的 h 次谐波电压是由它们共同作用产生的。用 $\mathbf{I}_i^h$ 表示谐波源负荷 i 的 h 次谐波电流, 则可得到关注节点X处的 h 次谐波电压 $\mathbf{V}_X^h$ 为

$$\mathbf{V}_X^h = \sum_{i=1}^n \mathbf{Z}_{Xi}^h \mathbf{I}_i^h + \mathbf{V}_0^h \quad (4)$$

式中, $\mathbf{Z}_{Xi}^h$ ($i=1, 2, \dots, n$) 为谐波源负荷节点 i 和关注节点X之间的谐波阻抗; $\mathbf{V}_0^h$ 为由功率较小的个别未知谐波源产生的背景谐波电压。整个系统中关注节点处的谐波电压能够用各个谐波源同次谐波电流的方程式表示。以含三个谐波源负荷的系统为例, 得到谐波电压相量图如图3所示。图3中, α_i ($i=1, 2, 3$) 为谐波源负荷 i 产生的 h 次谐波电压相量 $\mathbf{Z}_{Xi}^h \mathbf{I}_i^h$ ($i=1, 2, 3$) 与关注节点X的 h 次总的谐波电压相量 $\mathbf{V}_X^h$ 两者的夹角。 α_0 为背景谐波电压相量和关注节点X的 h 次总谐波电压相量 $\mathbf{V}_X^h$ 之间的 $\mathbf{V}_0^h$ 夹角。

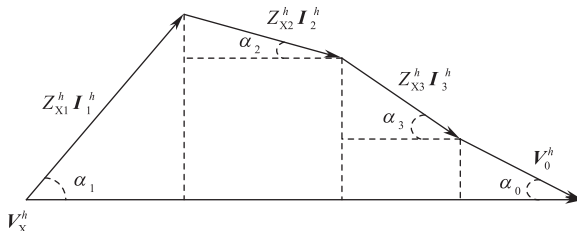


图3 谐波电压相量图

由图3中的相量关系, 可得

$$\begin{aligned} |\mathbf{V}_X^h| &= |\mathbf{Z}_{X1}^h \mathbf{I}_1^h| \cos \alpha_1 + |\mathbf{Z}_{X2}^h \mathbf{I}_2^h| \cos \alpha_2 + |\mathbf{Z}_{X3}^h \mathbf{I}_3^h| \cos \alpha_3 + \\ &|\mathbf{V}_0^h| \cos \alpha_0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{令 } \mathbf{V}_0^h = |\mathbf{V}_0^h| \cos \alpha_0 \quad \mathbf{V}_{1X}^h = |\mathbf{Z}_{X1}^h \mathbf{I}_1^h| \cos \alpha_1$$

$$V_{2X}^h = |Z_{X2}^h| |I_2^h| \cos \alpha_2 \quad V_{3X}^h = |Z_{X3}^h| |I_3^h| \cos \alpha_3$$

则 $V_{iX}^h (i=1,2,3)$ 与 V_0^h 为谐波源 i 与背景谐波形成的 h 次谐波电压分相量在母线 X 处的 h 次谐波电压总相量上的投影。由此可知,关注节点处谐波电压可由各部分分量叠加得到,各个谐波电压的分相量在总相量上的投影便是叠加的各部分。

$$\text{定义参数} \begin{cases} \lambda_0 = |V_0^h| \cos \alpha_0 \\ \lambda_1 = |Z_{X1}^h| \cos \alpha_1 \\ \lambda_2 = |Z_{X2}^h| \cos \alpha_2 \\ \lambda_3 = |Z_{X3}^h| \cos \alpha_3 \end{cases}$$

则式 (5) 可表示为

$$|V_X^h| = \lambda_0 + \lambda_1 |I_1^h| + \lambda_2 |I_2^h| + \lambda_3 |I_3^h| \quad (6)$$

式 (6) 是一个多元线性方程,自变量是各个谐波电流的幅值,因变量是关注节点处的谐波电压幅值。利用改进型偏最小二乘回归建模,通过评估得到其系数和常数项,假设估计值分别为 β_1 、 β_2 、 β_3 和 β_0 ,则式 (6) 可写为

$$|V_X^h| = \beta_0 + \beta_1 |I_1^h| + \beta_2 |I_2^h| + \beta_3 |I_3^h| \quad (7)$$

当系统谐波源个数为 n 时,由式 (7) 可得

$$|V_X^h| = \beta_0 + \beta_1 |I_1^h| + \beta_2 |I_2^h| + \dots + \beta_i |I_i^h| + \dots + \beta_n |I_n^h| = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i |I_i^h| \quad (8)$$

谐波源负荷 $i (i=1,2,\dots,n)$ 对关注节点 X 的谐波责任可以用谐波电流幅值 $|I_i^h|$ 与其系数 β_i 的乘积表示。定义谐波源负荷 i 对关注节点 X 的 h 次谐波电压的谐波责任评估指标 HI_{iX} 为

$$HI_{iX} = \frac{\beta_i |I_i^h|}{|V_X^h|} \times 100\% \quad (9)$$

仿真实验

1. 基本算例

采用 IEEE 13 节点系统进行算例实验,如图 4 所示。此实验系统具有 2 台发电机、7 台变压器及 13 条母线。在母线 7、母线 10 及母线 13 上连接的负荷带有谐波源。将母线 3 作为关注母线,通过实验确定各谐波源负荷对关注母线 3 电压畸变的贡献率。利用 MATLAB 编写程序,采用前述算法对谐波贡献率进行计算。仿真实验时,先将系统 PQ 节点的有功、

无功在额定值的 95%~105% 之间进行变化,变化次数为 1 000 次,然后通过潮流计算得到基础数据,这些数据用于对谐波责任的估算。

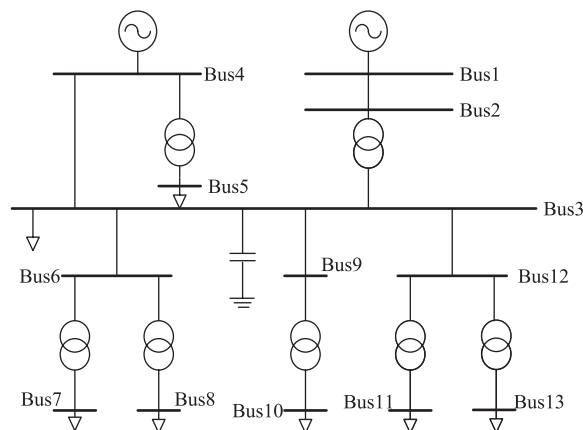


图4 IEEE 13节点系统

将所得基础数据代入前述的改进型偏最小二乘回归法进行建模,然后得到回归系数。将所得结果代入式 (7),便可得出系统中每个谐波源作用于关注母线 3 的电压畸变大小。采用不同方法得到的评估结果见表 1~表 3。

表1 负荷7的谐波责任

谐波次数	精确值/ (%)	稳健回归/ (%)	偏最小二乘/ (%)	改进型偏最小二乘/ (%)
5	-18.34	-17.10	-12.94	-16.65
7	-28.54	-28.21	-32.57	-27.84
11	15.34	11.60	17.64	17.35
13	19.42	21.12	20.14	20.56

表2 负荷10的谐波责任

谐波次数	精确值/ (%)	稳健回归/ (%)	偏最小二乘/ (%)	改进型偏最小二乘/ (%)
5	26.47	25.74	24.60	23.54
7	29.87	29.11	28.64	29.63
11	19.91	18.70	18.15	18.62
13	17.60	15.55	14.87	15.68

表3 负荷13的谐波责任

谐波次数	精确值/ (%)	稳健回归/ (%)	偏最小二乘/ (%)	改进型偏最小二乘/ (%)
5	91.86	90.99	89.04	87.23
7	98.67	99.30	103.90	96.56
11	64.74	69.11	73.54	68.45
13	62.97	64.72	66.42	64.65

为了更直观地反映比较结果,用 MATLAB 绘

制了各个谐波源负荷的谐波大小对比图，如图5所示。图5中的横坐标表示关注节点的谐波次数，纵坐标表示各个谐波源负荷在不同次谐波情况下谐波责任。

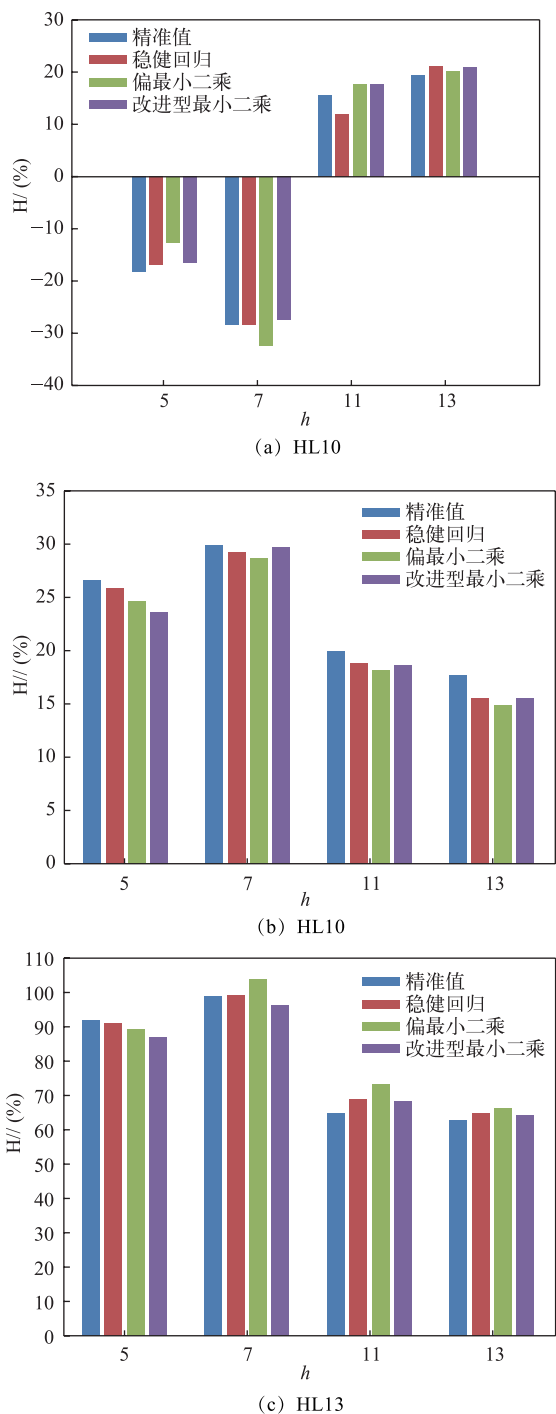


图5 各谐波源负荷对节点3的谐波责任

通过图5的对比能够得出，采用各种方法都能够评估出每个谐波源对电压畸变应承担的责任，而其

中采用改进型偏最小二乘法得到的数据精度相对最高，同时也说明了此方法优于其他方法。

2. 相角的影响

从仿真结果可以看出，用该方法得到的评估值和考虑了相角叠加的精确值总体上比较接近，同时验证了该方法的有效性。研究表明，当分析的数据量逐步增大时，相角对评估精度的影响减弱。把算例中的PQ负荷变化改为5 000次，以5次谐波为例，两种情况下的仿真结果见表4。其中，Case1为PQ负荷变化1 000次的评估结果，Case2为PQ负荷变化5 000次的评估结果。通过表4中数值看出，随着测量数据量的不断增加，相对误差也随之大大降低。

表4 各个谐波源负荷的谐波责任评估结果

仿真情形	谐波责任	负荷7	负荷10	负荷13
Case1	精确值	-18.34	26.47	91.8
	评估值	-16.65	23.54	87.23
	相对误差	9.21	11.06	4.98
Case2	评估值	-17.26	25.55	90.15
	相对误差	5.8	3.4	1.6

结束语

将改进型偏最小二乘法应用于系统谐波责任划分的估算，利用正交投影法消除解释矩阵中和响应无关的信息，有效地解决了偏最小二乘法遗漏有效成分的问题，提高了估算精度。此方法利用数据统计特性，使谐波电流和谐波电压之间形成映射的关系，进行谐波责任的评估。EA

(收稿日期：2023-03-03)

参考文献

- [1] 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．
- [2] 车权，杨洪耕．基于稳健回归的谐波发射水平评估方法[J]．中国电机工程学报，2004，24(4)：39-42．
- [3] 张好勇，张东亮，赵雨，等．基于PCA和GA算法优化最小二乘支持向量机的开关柜温度预测[J]．电气应用，2020，39(2)：59-63．
- [4] 段锐敏，何杰，郭成，等．不同负载下变压器超高次谐波传递特性研究[J]．电气应用，2021，40(8)：36-42．