

基于改进偏最小二乘法的系统谐波阻抗及谐波发射水平估算

李丽¹, 马宏忠², 姜宁³, 王春宁³, 李俊⁴

(1. 福建电力职业技术学院电力系, 福建 泉州 362000; 2. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098;
3. 江苏省电力公司南京供电公司, 江苏 南京 210008; 4. 江苏省电力公司东台供电公司, 江苏 盐城 224231)

摘要: 提出了用改进的偏最小二乘回归法估算供电系统谐波阻抗的方法。对公共点采样的电压和电流信号进行快速傅里叶变换, 得出各次谐波电压和电流分别作为回归方程的因变量和自变量, 以系统侧阻抗为回归系数, 利用改进的偏最小二乘法求解出回归系数即为系统侧阻抗。该方法克服了传统偏最小二乘法可能漏选有用成分的缺陷。仿真及实例结果验证了利用改进偏最小二乘法估算系统侧谐波阻抗和用户侧谐波发射水平的有效性。

关键词: 谐波; 改进的偏最小二乘回归; 谐波阻抗; 回归系数

Assessing harmonic impedance and the harmonic emission level based on improved partial least-squares regression method

LI Li¹, MA Hong-zhong², JIANG Ning³, WANG Chun-ning³, LI Jun⁴

(1. Electrical Department, Fujian Electric Vocational and Technical College, Quanzhou 362000, China; 2. College of Electric Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Nanjing Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China; 4. Dongtai Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Company, Yancheng 224231, China)

Abstract: An improved partial least-squares regression method is used for assessing harmonic impedance of power supply system. Through processing the voltage and current sampling signals in PCC with fast Fourier transform, the harmonic voltage and current which are respectively taken as the dependent variable and the independent variable of the regression equation are obtained, then, an improved partial least-squares regression is used to solve the regression coefficient which is the system-side impedance. This method overcomes the defect of partial least-squares regression method that may omit the useful elements. Simulation results and examples prove that it is effective to assess harmonic impedance and the harmonic emission of customer-side level using the improved partial least-squares regression method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50477010).

Key words: harmonic; improved partial least-squares regression; harmonic impedance; regression coefficient

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0092-04

0 引言

随着电力电子装置与非线性用电设备在各部门的广泛使用, 谐波污染问题日益严重, 对用户用电设备以及电力系统的运行均产生很大的影响。电力部门对于电能的质量非常关注, 为了解决谐波治理的难题, 达到准确划分谐波责任的目的, 必须明确电力系统中谐波源的位置及其发射水平。

目前谐波源识别最主要有两类方法: 一种是基于谐波状态估计的方法^[1-2], 该方法计算出系统各节点的谐波电压及支路的谐波电流, 从而判断谐波源

位置。传统的状态估计法估计结果是检测设备数量和安装位置的函数, 需要较多的谐波检测设备, 使得该方法实现成本较高^[3]。另一种方法是在公共电气耦合点(PCC点)将供电系统等效成两部分, 即系统U(Utility)和用户C(Customer)两侧^[4-5], 然后根据相应的等效电路模型确定哪一侧含有谐波源, 估算出谐波发射水平^[6-7], 具体有有功功率法、无功功率法、临界阻抗法^[8]及线性回归法。有功功率法和无功功率法比较直观, 应用较广, 但均由于各谐波源之间的相位差的影响, 识别谐波时产生了较大的误差^[9]; 文献[10]及临界阻抗法避免了谐波源之间相位差的影响, 不足的是测量误差会影响识别精度。线性回归法利用等效电路中PCC点处电压和电流的实部、虚部构造回归方程, 估算出系统谐波

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50477010); 中国水利水电科学研究院开放研究基金

阻抗^[11-12], 定量地确定出用户侧的谐波发射水平。在已应用到系统谐波阻抗估算的线性回归法中, 偏最小二乘回归法估算的效果较好^[13], 但偏最小二乘回归可能漏选对因变量解释能力强的成分, 限制了估算的准确度。

本文利用在公共点采样的电流和电压信号, 通过快速傅里叶变换, 得出各次谐波电压和电流分别作为回归方程的因变量和自变量, 以系统侧阻抗为回归系数, 并利用改进的偏最小二乘法^[14]求解出回归系数即系统侧阻抗, 克服了偏最小二乘回归法的缺陷, 精确地估算出系统谐波阻抗值及用户谐波发射水平。

1 改进的偏最小二乘回归算法

在偏最小二乘回归算法中, 提取自变量 X 成分 t_i 的基本原理是使得协方差 $\text{Cov}(t_i, Y)$ 最大, 以保证对因变量 Y 的解释能力最强, 同时对自变量集合又有最佳综合能力, 但是根据协方差公式:

$$\text{Cov}^2(t_i, Y) = r^2(t_i, Y) \text{Var}(t_i) \text{Var}(Y) \quad (i=1, 2, \dots, A, A \text{ 为自变量 } X \text{ 的秩})$$

可见, 一个大的 $\text{Cov}(t_i, Y)$ 并不能保证 $r^2(t_i, Y)$ 和 $\text{Var}(t_i)$ 两者同时都大, 这样可能导致 t_i 错误地落选。

改进的方法是, 把与因变量 Y 正交的空间用矩阵 B 来描述, B 是由 $X^T Y Y^T X$ 的相应于其 $p-1$ 个零特征根的特征向量 b_1, b_2, \dots, b_{p-1} 组成。

由于:

$$b_i^T X^T Y Y^T X b_i = 0 \quad (i=1, 2, \dots, p-1)$$

或

$$Y^T X b_i = 0 \quad (i=1, 2, \dots, p-1)$$

所有正交于 Y 的向量都可表示成 XB 的线性组合 $XB\alpha$, α 为单位向量。把使 $XB\alpha$ 方差最大的成分去掉, 这些成分相应于 $B^T X^T X B$ 的最大特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s$ 的特征向量, s 的选择是要使剩下的部分不显著 (往往 $s = p-1$)。把这些向量组成新矩阵 A , 令 $U = XBA$, 则它正交于 U 的方向的投影。

$$(I_n - P_U)X = X - U(U^T U)^{-1} U^T X = X(I_p - BA(U^T U)^{-1} UX) = XD$$

其中: $D = (I_p - BA(U^T U)^{-1} UX)$ 。

利用 XD 进行回归, 能够解决偏最小二乘回归

可能错误地提取成分这一缺陷。

2 估算原理

在公共耦合点将系统等效成图 1 所示电路。

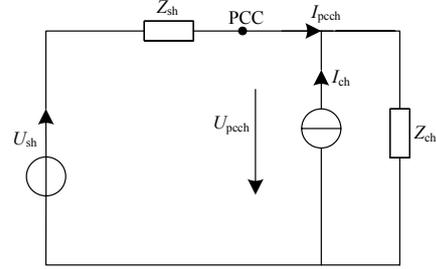


图 1 PCC 点处系统和用户等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of power system and customer in PCC

图中: U_{sh} 、 I_{ch} 分别为系统侧和用户侧的等效谐波源; Z_{sh} 、 Z_{ch} 分别为系统侧和用户侧的等效谐波阻抗。公共点处谐波电流、电压分别是 I_{pcc} 和 U_{pcc} , 可以测量出这两个量。根据电路原理有:

$$\dot{U}_{pcc} = \dot{U}_{sh} - \dot{I}_{pcc} Z_{sh}$$

实部虚部展开得到回归方程:

$$U_{pccx} = U_{shx} - I_{pccx} Z_{shx} + I_{pccy} Z_{shy} \quad (1)$$

$$U_{pccy} = U_{shy} - I_{pccx} Z_{shy} - I_{pccy} Z_{shx} \quad (2)$$

利用改进的偏最小二乘回归算法, 求出回归系数 Z_{shx} 、 Z_{shy} 及 U_{shx} 、 U_{shy} 。 Z_{shx} 、 Z_{shy} 即为系统侧谐波阻抗, U_{shx} 、 U_{shy} 为系统谐波电压源的最小方差估计值。

用户侧谐波发射水平计算:

$$U_{ch} = \left[\left(\frac{V_{pcc}}{Z_{ch}} \right) - I_{pcc} \right] \frac{Z_{ch} Z_{sh}}{Z_{ch} + Z_{sh}} \quad (3)$$

由于 Z_{sh} 为系统侧的短路阻抗, 故 $|Z_{ch}| \gg |Z_{sh}|$, 因而式 (3) 可简化为:

$$|U_{ch}| \approx |Z_{sh}| |I_{pcc}| \quad (4)$$

3 仿真验证

仿真电路见图 2。系统侧基波 (50 Hz) 电压 \dot{U}_{s1} 为 $100 \angle 0^\circ$ V, 3 次谐波电压 $\dot{U}_{s3} = 30 \angle 60^\circ$ V; 用户侧的基波电流为 \dot{I}_{s1} 为 $70 \angle -45^\circ$ A, 3 次谐波电流源 $\dot{I}_{s3} = 10 \angle 30^\circ$ A, 3 次谐波阻抗 $Z_{c3} = 100 + 200j \Omega$ 。这一系统中, 实际系统侧 3 次谐波阻抗为

$Z_{s3} = 20 + 12.5j \Omega$ ，现假定求知，通过其他已知参数仿真计算，比较仿真值与该实际值的大小证明本文应用改进的偏最小二乘回归比偏最小二乘回归优越。

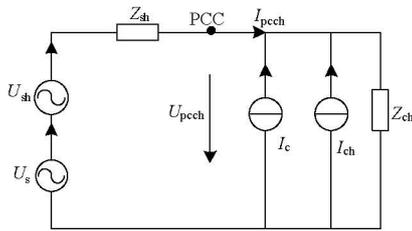


图 2 仿真电路

Fig.2 Circuit of simulation

在公共点抽样 3 次谐波电流 I_{pcc3} 和 3 次谐波电压 U_{pcc3} 各 2 560 点，每段 256 个点分成 $n=10$ 段，根据回归方程每段进行偏最小二乘回归和改进的偏最小二乘回归得到系统侧 3 次谐波阻抗实部和虚部分别见图 3、图 4。

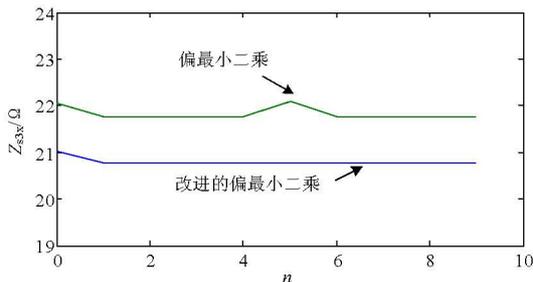


图 3 系统 3 次阻抗实部 Z_{s3x}

Fig.3 Real parts of the 3rd harmonic impedance of supply system Z_{s3x}

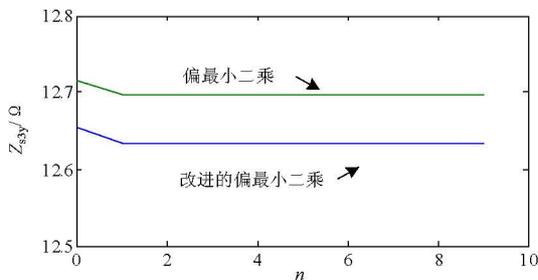


图 4 系统 3 次阻抗虚部 Z_{s3y}

Fig.4 Imaginary parts of the 3rd harmonic impedance of supply system Z_{s3y}

根据式 (4) 计算出用户侧 3 次谐波 U_{c3} 的发射水平:

$$|U_{c3}| \approx |Z_{s3}| |I_{pcc3}| = 52.23\% U_{pcc3}$$

对估算出的阻抗实部、虚部分别计算出平均值，

结果如表 1。

表 1 仿真结果

Tab.1 The simulation results

	参考值	偏最小二乘	误差/%	改进的偏最小二乘	误差/%
Z_{s3x} / Ω	20	21.831 9	9.16	20.785 7	3.93
Z_{s3y} / Ω	12.5	12.698 4	1.59	12.636 3	1.09

从表 1 中看出，用改进的偏最小二乘法估算回归系数比偏最小二乘回归法估算的结果更为精确，因此在本例的数据下，改进的偏最小二乘回归高效地依次提取对因变量解释能力最强的成分，要优于偏最小二乘回归法，评估出的谐波发射水平更接近于真实值。

4 实例分析

图 5 为某 35 kV/10 kV 工业电力系统的等效图，短路容量为 8 MVA，35 kV 母线处含有 2.5% 的 3 次谐波分量，10 kV 处接有线性负荷和非线性负荷整流器。数据来自在 PCC 点各次谐波的电压和电流的采样值。采样频率为 3 200 Hz，采样时间为 10 s，把采样数据分为 $m=250$ 段，分别进行 FFT 变换，得到 PCC 点上述各段 3 次谐波的电压 U_{pcc3} 和 3 次谐波电流 I_{pcc3} 分量的大小如图 6 示。

对上述 250 个变化的结果分 $n=25$ 组，利用改进的偏最小二乘回归法估算出系统侧 3 次谐波阻抗平均值为 1.660 3 Ω 。

同样方法估算出系统侧 5 次谐波阻抗 Z_{S5} 如图 7 所示，其平均值为 2.151 6 Ω 。

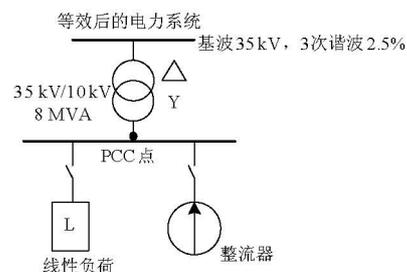
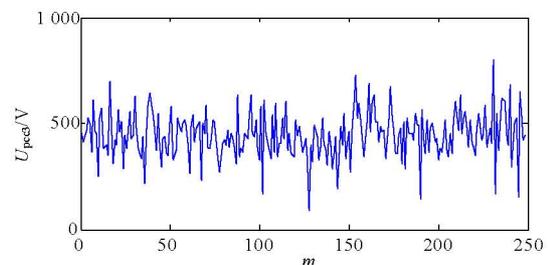


图 5 35/10 kV 工业电力系统的等效图

Fig.5 Equivalent circuit of the 35/10 kV industrial power systems



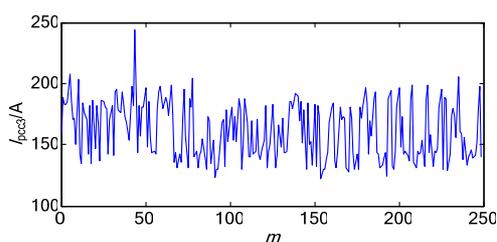


图6 PCC点处3次谐波各段电压、电流分量

Fig.6 Voltage and current components of the 3rd harmonic in PCC

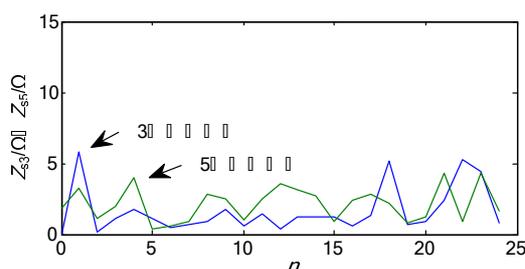


图7 系统侧5次谐波和3次谐波阻抗

Fig.7 5rd and 3rd harmonic impedances of supply system

用户侧5次谐波发射水平为:

$$|U_{c3}| \approx |Z_{s3}| |I_{pcc3}|_{\text{mean}} = 1.6603 \times 161.4089 = 267.9872 \text{ V} = 60.19\% |U_{pcc3}|_{\text{mean}}$$

由此可知用户侧注入PCC点的3次谐波占全部3次谐波的60.19%，高于系统侧注入水平，符合实际情况可以根据这个标准量化用户侧和系统侧各自应负的责任。

5 结论

本文将改进的偏最小二乘回归算法应用于系统谐波阻抗的估算，有效地克服了偏最小二乘法不能完全提取对因变量解释能力强的成分这一缺陷，更准确地估算出了系统谐波阻抗及用户侧的各次谐波发射水平。实例仿真验证了该方法的改良效果。

参考文献

- [1] Srinivasan D, Ng W S, Liew A C. Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 398-405.
 - [2] 徐志向, 侯世英, 周林, 等. 基于奇异值分解的电力系统谐波状态估计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(11): 28-31.
- XU Zhi-xiang, HOU Shi-ying, ZHOU Lin, et al. Power system harmonic state estimation based on singular value decomposition[J]. Electric Power Automation Equipment,

2006, 26(11): 28-31.

- [3] 欧阳森, 任震. 谐波源检测与识别方法综述[J]. 电网技术, 2006, 30(S1): 151-155.
- OUYANG Sen, REN Zhen. A survey on monitoring and identifying methods of harmonic sources[J]. Power System Technology, 2006, 30(S1): 151-155.
- [4] Thunberg E, Soder L. A norton approach to distribution network modeling for harmonic studies[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(1): 272-277.
- [5] Xu Wilsun, Liu Yilu. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.
- [6] Yang H, Pirotte P, Robert A. Harmonic emission levels of industrial loads statistical assessment [C]. //CIGRE. Paris: 1996.
- [7] 贺建闽, 黄治清. 用户谐波电流发射限值计算[J]. 继电器, 2007, 35(1): 42-46.
- HE Jian-min, HUANG Zhi-qing. Determination of emission limit of customer's harmonic current[J]. Relay, 2007, 35(1): 42-46.
- [8] 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 Xiu-ling, WANG Hong-rui, WANG Yong-qing, et al. Application of critical impedance method in harmonic source detecting in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 76-80.
- [9] 田立亭, 程林, 孙元章, 等. 用户侧谐波源对PCC谐波水平的影响与区分[J]. 继电器, 2007, 35(21): 59-63.
- TIAN Li-ting, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, et al. Effect of custom harmonic sources on PCC harmonic level[J]. Relay, 2007, 35(21): 59-63.
- [10] 陈彬, 唐云龙, 徐立明, 等. PCC处谐波分析的新方法[J]. 继电器, 2006, 34(9): 60-63, 86.
- CHEN Bin, TANG Yun-long, XU Li-ming, et al. New method for analyzing the harmonics on PCC[J]. Relay, 2006, 34(9): 60-63, 86.
- [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): 50-54.
- ZHANG Wei, YANG Hong-geng. A methods for assessing harmonic emission level based of binary linear regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 50-54.

(下转第131页 continued on page 131)

当 220 kV 系统发生接地故障时,假定流过主变中压侧的故障零序电流为 I_{01} , 将此故障电流看作全部由公共绕组提供(即考虑严重状态下高压侧断开), 计算出 I_{01} 对应的公共绕组零序反时限保护的動作时间, 该動作时间要大于 T_{02} , 以确保中压侧无方向定时限零序过流保护与公共绕组零序反时限保护的配合。

(4) 要考虑与 220 kV 侧各出线零序高阻段的整定时间相配合。

综合以上整定, 得出合理的 T_{02} 。

综上所述, 只有选择正确的 I_{01} 与 T_{02} 的大小, 才能保证中压侧零序过流保护动作的正确性, 通过大量计算, 现规定变压器 220 kV 侧出线零序最末段動作时间不大于 5 s。

4 结论

通过前面的分析, 发现 500 kV 变压器中压侧带方向及无方向定时限零序过流保护的整定很难, 特别是无方向定时限零序过流保护的整定考虑因素太多, 只要考虑不周, 就会出现越级动作的可能, 造成保护装置的误动作, 造成事故的扩大。为了解决此整定配合难点, 采取的措施为: 提出 500 kV 变压器的中压侧采用零序反时限保护(零序反时限电流曲线同高压侧零序反时限保护的一致)来代替无方向定时限零序过流保护, 使得保护之间的配合简单化, 即各带方向定时限零序过流保护之间互相配合, 零序反时限保护之间互相配合来解决主变中压侧无方向定时限零序过流保护整定配合困难的难点。同时 220 kV 侧出线的配置改为一段为定时限灵敏段保护, 另一段为零序反时限保护(零序反时限电流曲线同 500 kV 出线零序反时限保护的一致), 以此来杜绝线路发生接地故障时而引起的变压器保护误

动, 从而保证电网的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 庞素红, 张丽, 唐晋. 220 kV 降压变压器保护整定计算的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 128-130.
PANG Su-hong, ZHANG Li, TANG Jin. Discussion on setting calculation of 220 kV step-down transformer protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 128-130.
- [2] 张旭俊, 上官帖, 唐建洪, 等. 采用零序功率绝对值构成反时限零序电流保护的方案探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 41-44.
ZHANG Xu-jun, SHANGGUAN Tie, TANG Jian-hong, et al. Research on inverse time current relay based on the absolute value of zero-sequence power[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 41-44.
- [3] DL/T559-94 220 kV~500 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S]. 北京: 中华人民共和国电力工业部, 1995.
DL / T559-94 The setting procedure of the grid relay protection device operation of 220 kV~500 kV[S]. Beijing: The Ministry of Power Industry of the People's Republic of China, 1995.
- [4] 冯巧玲, 牛月兰. 不同接法变压器保护灵敏度分析[J]. 继电器, 2003, 31(9): 84-85, 87.
FENG Qiao-ling, NIU Yue-lan. The sensitivity analysis of protector in transformer system connected in different modes[J]. Relay, 2003, 31(9): 84-85, 87.

收稿日期: 2010-08-31; 修回日期: 2010-11-08

作者简介:

彭海平(1965-), 女, 高级工程师, 本科, 主要从事电力系统继电保护方面的工作。E-mail: gz_penghaiping@sina.com

(上接第 95 页 continued from page 95)

[12] 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): 39-44.

CHE Quan, YANG Hong-geng. Assessing harmonic emission level based on robust regression method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 39-44.

[13] 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评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 93-97.

HUANG Shun, XU Yong-hai. 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.

[14] 王惠文, 吴载斌, 孟洁. 偏最小二乘回归方法的线性与非线性方法[M]. 北京: 国防大学出版社, 2006.

收稿日期: 2010-01-19

作者简介:

李丽(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动、电能质量分析与控制; E-mail: xzsdli01@126.com

马宏忠(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、新能源发电技术。