

基于负荷时域等值模型非线性度的谐波源定位

龚华麟, 肖先勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 谐波源定位是划分电网谐波污染责任的关键理论和技术难题。基于产生谐波污染的非线性负荷的非线性度特性, 研究负荷非线性度与负荷谐波发射水平的关系, 提出了一种适合于单相和三相负荷的谐波源定位方法。该方法利用负荷时域等值模型确定负荷非线性特征, 用删除残差法对负荷线性参数进行识别, 计算负荷非线性度, 以此确定负荷谐波发射水平, 判定 PCC 点处主要谐波源, 该算法能有效减少测量噪声影响。实验仿真及实际工程数据分析验证了该方法的有效性和准确性。

关键词: 谐波源定位; 非线性负荷; 非线性度; 谐波发射水平; 时域等值模型; 删除残差法

Abstract: It's difficult to determine the responsibility of the harmonic pollution which is produced by both the utilities and the customers. Due to the harmonic emission level in proportion to the nonlinear index of the load, an algorithm to calculate the nonlinear index of loads used in harmonic source location is proposed. Through the harmonic load model in time domain, the algorithm firstly calculates the nonlinear parameters of the load, secondly it computes the linear parameters of the same load by the delete residual method, then it estimates the non-linearity index and finally it finds the main harmonic source at the Point of Common Coupling. The proposed method can eliminate the measurement noise effectively in the data. The simulation analysis and the analytic result of the practical data testify that the proposed method is valid and accurate.

Key words: harmonic source location; nonlinear load; non-linearity; harmonic emission; time-domain equivalent model; deleting difference method

中图分类号: TM734 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2009)01-0009-04

随着工业的高速发展, 大量非线性负荷如整流装置、电弧炉、变频装置等接入电网, 引起系统内电压、电流波形发生畸变, 造成的电网谐波污染越来越严重。为了有效防止污染, 国内外重点在谐波发射、标准、抑制手段等方面开展了大量研究, 提出了一系列方案和标准^[1,2]。在负荷接入电网的公共连接点 (PCC) 处检测到的谐波包含: 由非线性负荷产生的用户侧分量 and 由系统或其他负荷产生的系统侧分量两部分, 如图 1。为划分责任, 定量评估用户侧和系统侧的谐波发射水平是关键。

现有 PCC 点谐波源定位法主要包括定性分析和定量分析两大类方法。定量分析法通过估计系统侧和用户侧参数, 计算用户发射的谐波电压, 主要有参考阻抗法^[3]、波动法^[4]和线性回归法^[5~7]等; 这类方法能定量确定用户侧和系统侧谐波发射水平, 但需预先判定被评估负荷是主要谐波源。定性分析法通过谐波功率和用户非线性度判别主要谐波源, 主要有有功功率法、临界阻抗法、瞬时负荷参数分割法等。有功功率法^[8], 根据谐波有功方向判定谐波源, 方法简

基金项目: 四川省应用基础研究 (2008JY0043-2)。

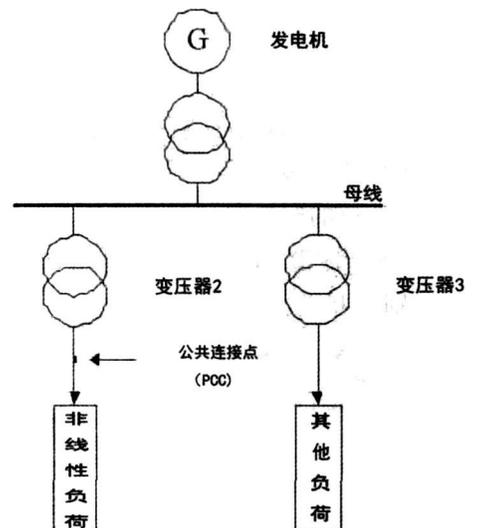


图 1 简化配电系统网络

单直观, 但由于谐波源相位在 4 个坐标象限内任意变化, 谐波有功方向实际上很难准确反映真实谐波源^[9]; 临界阻抗法^[10], 首先计算完全吸收系统无功功率所需临界阻抗, 通过系统侧、用户侧平均阻抗大小确定谐波源, 该方法能判断主要谐波源, 但对系统侧、用户侧阻抗的估计在实际中难以实现; 瞬时负荷参数分割法^[11]基于负荷的非线性度识别谐波源, 原理简

单, 无需系统和负荷参数, 通过线性阻抗计算负荷线性电压, 但线性阻抗如何求取尚需进一步研究, 其准确性易受测量噪声影响; 文献 [12、13] 改进了上述算法, 通过单相基波电压、电流计算非线性负荷的线性分量, 再估计负荷的非线性指数, 但三相不平衡引起的参数不对称的影响值得进一步研究。

现从线性、非线性负荷的时域等值模型出发, 在缺乏系统及用户参数的前提下, 通过负荷非线性指标判定主要谐波源, 同时考虑负荷不对称和噪声可能造成的影响。实验仿真和实际工程验证了该方法的有效性和正确性。

1 负荷谐波发射水平评估原理

如图 2 在实际中, 电压、电流波形的畸变, 即电压 $v(t)$ 、电流 $i(t)$ 之间的非线性关系 [14] 主要由非线性负荷引起。

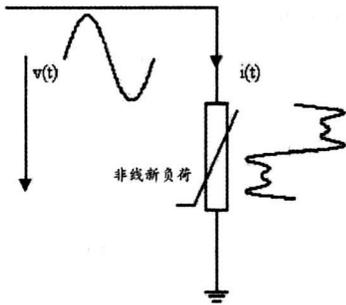


图 2 非线性负荷引起波形畸变

由于负荷大多呈感性, 可用感性时域等值模型表示 [15]。负荷的时域等值模型如图 3。其中, $i_c(t)$ 为负荷等效谐波源; R 、 L 为等效电阻、电感; $i_{pcc}(t)$ 、 $v_{pcc}(t)$ 分别为 PCC 点处电流和电压。

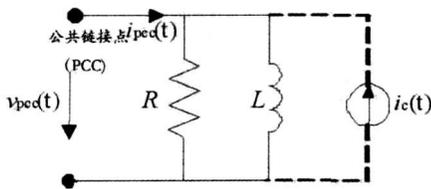


图 3 负荷的时域等值模型

当负荷线性时, 可通过采集 PCC 点电压、电流值由式 (1) 计算负荷的 R 、 L 值, 此时 R 、 L 呈线性变化; 当负荷非线性时, 不满足式 (1), R 、 L 值呈非线性关系, 如图 4。

若负荷为非线性负载, R_{linear} 、 L_{linear} 为其线性化后的等效电阻和电感值, 通过测量电压 $v_{pcc}(t)$, 根据图 3 负荷的时域等值模型, 由式 (2) 可计算得到非线性

负荷线性化后的线性电流 $i_{pcc-linear}$, 并与实际测量电流 i_{pcc} 比较, 以此来判断负荷的非线性大小, 即非线性负荷谐波发生水平高低, 从而找出主要谐波源。

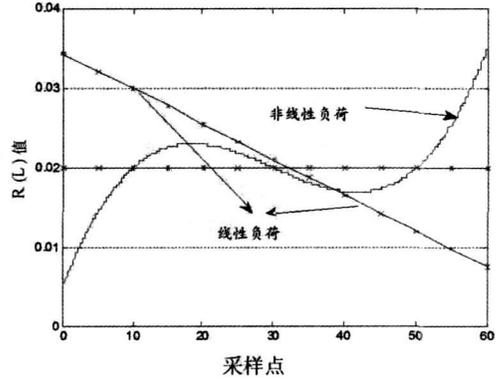


图 4 负荷的 R 、 L 值

$$i_{pcc}(t) = \frac{v_{pcc}(t)}{R} + \frac{1}{L} \int v_{pcc}(t) dt \quad (1)$$

$$i_{pcc-linear}(t) = \frac{v_{pcc}(t)}{R_{linear}} + \frac{1}{L_{linear}} \int v_{pcc}(t) dt \quad (2)$$

2 负荷非线性度

2.1 确定负荷的 R 、 L 值

计算 R 、 L 值时需在 PCC 点采集电压、电流值, 测量中电磁干扰不可忽视。谐波源定位过程中, 有效信号包括工频信号及其整数倍的信号, 利用傅里叶变化能有效提取有效信号, 去除干扰信号, 如式 (3), 其中 h 为谐波次数, $h=1, 2, \dots, N$; V_h 、 I_h 为各次谐波电压、电流模值; α_h 、 β_h 为各次谐波相角对基波电压的相角; ω 为角速度。

$$v_{pcc}(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^N V_h \cos(h\omega t + \alpha_h)$$

$$i_{pcc}(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^N I_h \cos(h\omega t + \beta_h) \quad (3)$$

当采样时间变化时, 可以得到不同的电压、电流样本点 $v_i \sim v_n$ 、 $i_i \sim i_n$ 。根据电压、电流不同样本点建立方程组 (4), v_n 、 v_{n-1} 、 i_n 、 i_{n-1} 和 y_n 、 y_{n-1} 分别为 t_n 、 t_{n-1} 相邻两个时间点电压、电流和电压积分样本值。通过矩阵运算可求得负荷的 R 、 L 值。

$$\begin{bmatrix} i_n \\ i_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{n-1} & y_{n-1} \\ v_n & y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{R} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{令 } y(t) = \int v_{pcc}(t) dt$$

$$= \sum_{h=1}^N \frac{V_m}{h\omega} \cos(h\omega t + \alpha_h) \quad (5)$$

2.2 负荷的线性参数

已知 n 个连续的样本点, 每连续 2 个样本可计算出一对负荷的 R, L 值, 其值反映出电压、电流之间的关系。对其进行线性化处理, 可得负荷线性参数值。线性回归是研究数据线性关系的有效工具, 根据式 (6) 分别求出 R, L 的回归系数。

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

$$\beta = (\beta_0, \beta_1)^T \quad (6)$$

根据最小残差平方和原理得到的求解式 (6), 求解过程容易受异常值影响。根据式 (4) 所得负荷的 R, L 值, 由于受到电压、电流和电压积分样本过零点的影响, 导致出现了部分异常值。通过删除残差法^[16], 去除异常值, 再进行线性回归, 可得线性参数

$$R_{L_{linear}}, L_{L_{linear}}$$

2.3 负荷非线性度确定

将 $R_{L_{linear}}, L_{L_{linear}}$ 带入式 (2), 可得负荷线性电流, 并与电流样本作比较, 如式 (6), 得负荷非线性区趋势 $T(t)$, 利用式 (7) 求负荷总体非线性度 NLI (non-linearity index)。

$$T(t) = \frac{i_{pcc} - \text{linear}(t) - i_{pcc}(t)}{i_{pcc}(t)} \quad (6)$$

$$NLI = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N T(t)^2} \quad (7)$$

2.4 对三相平衡负荷的计算

实际中, 三相平衡负荷与单相负荷计算类似。而不平衡负荷的电压、电流值由各相及相间感应决定。因此, 各相电压、电流不能完全反映该相的非线性程度。用对称分量法可将测量到的傅里叶变化后的数据分解为正序、负序和零序分量。由式 (1) ~ 式 (7) 分别计算各序分量的非线性度, 并用式 (8) 计算真实非线性度 NLI_{phase} , 其中 I_+, I_- 和 I_0 表示各序电流, NLI_{phase} 为真实非线性度, NLI_+, NLI_- 和 NLI_0 为各序非线性度。

$$I_+ = \sqrt{\sum_{h=1}^N I_{h+}^2}, \quad I_- = \sqrt{\sum_{h=1}^N I_{h-}^2}, \quad I_0 = \sqrt{\sum_{h=1}^N I_{h0}^2}$$

$$NLI_{\text{phase}} = \frac{I_+ \cdot NLI_+ + I_- \cdot NLI_- + I_0 \cdot NLI_0}{I_+ + I_- + I_0} \quad (8)$$

3 实验仿真

以 6 脉波整流电路为例, 仿真电路如图 5, 用 Matlab/Simulink 进行仿真。系统频率 50 Hz 电压 380 V, 短路容量为 10 MVA。考虑实际系统中存在背景谐波, 根据国标^[2]规定 PCC 允许谐波电压限值设定系统侧背景谐波电压, 如表 1, 其中基波电压相角为 0。用户侧负载 0.5 MVA, 功率因数 0.8。

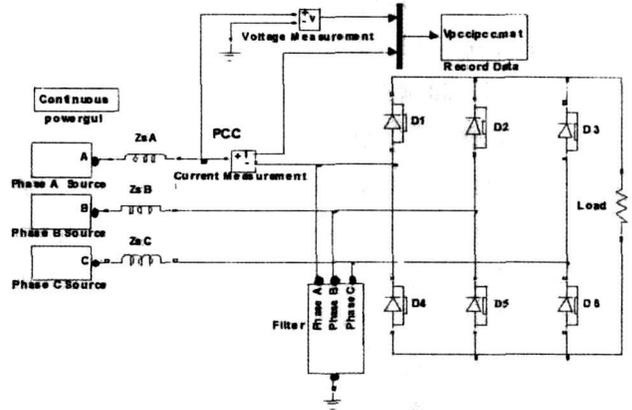


图 5 6 脉波整流仿真模型

表 1 系统侧电压源构成

谐波次数	谐波电压含有率 (%)	相角
1	100	0°
5	2.04	50°
7	2.03	70°
11	2.03	110°
13	2.05	130°

由于负荷对称, 只需要测量其中一相的数据。由于供电侧电压和负荷大小恒定, 负荷产生的谐波电流也为定值, 因此, 通过调节滤波器的不同补偿容量, 控制非线性负荷注入公共连接点的谐波水平, 以得到不同的电压电流畸变率和非线性度, 如表 2 以此验证算法的准确性。

表 2 非线性度计算结果

算例	非线性度 NLI	电压畸变率 (%)	电流畸变率 (%)
1	8.6543	19.20	24.46
2	8.4859	19.03	24.17
3	8.3208	18.83	23.82
4	8.1601	18.56	23.37
5	7.5187	18.23	22.80
6	7.3451	17.77	22.02
7	6.6452	17.13	20.93
8	6.4140	16.16	19.27
9	6.0432	14.51	16.45
10	5.3174	11.10	10.60

由表 2 可知, 当电压、电流畸变率同时降低, 负荷非线性度随之降低, 且能反映细微的畸变率变化, 证明了算法的准确性。负荷在 PCC 点的不同谐波发射水

平对应不同的畸变率,提出的非线性度算法能准确反映其变化,因此,能准确找出 PCC 点处的主要谐波源。

4 工程应用研究

实测数据来自某 35 kV 配电网(如图 6),测量点 A、B、C 分别对应负荷 A、B、C。图 7 给出其中负荷 A 点电压、电流一相的数据。由于负荷接在同一条母线上,在不同时间测得的电压畸变率相差不大,而负荷 A、B 电流畸变率明显不同,如图 7、图 8。

分别对负荷非线性度进行计算,结果如表 3。负荷 A、B 的非线性度大,表明该负荷为主要谐波源。负荷 C 的 R、L 值变化平稳,非线性度低,而负荷 A、B 的 R、L 值波动较大,非线性度趋势高,故负荷非线性程度大,谐波发射水平高。

表 3 负荷非线性度

负荷编号	非线性度
A	5.231 0
B	7.806 6
C	0.855 4

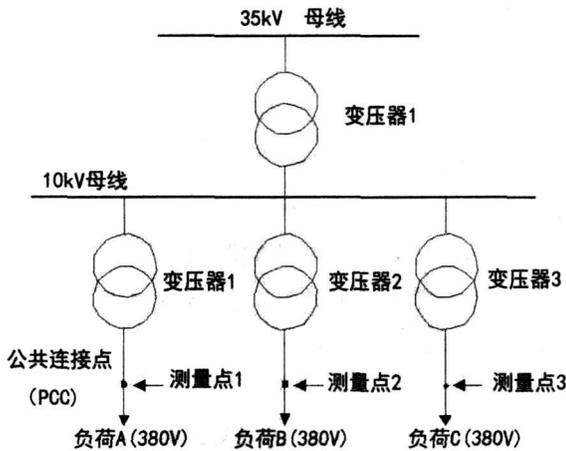


图 6 某 35 kV 配电网

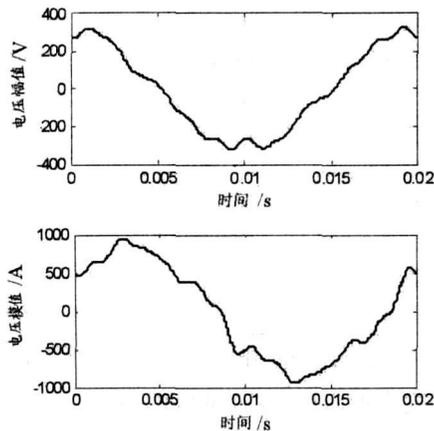


图 7 负荷 A 公共连接点电压电流波形

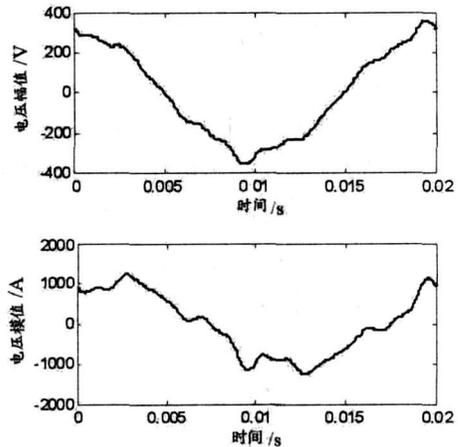


图 8 负荷 B 公共连接点电压电流波形

5 结论

在系统存在背景谐波的情况下,前面提出一种基于三相负荷非线性度的谐波源定位法,该方法不受噪声影响,能准确判断负荷非线性度和谐波发射水平。实验仿真和实际工程运用均验证了该方法的有效性和正确性。该方法原理简单,方案可行,易于进行仪器开发和工程实现,具有一定理论价值和明显的工程应用价值。

参考文献

- [1] Mitra J, Singh C. Pruning and simulation for determination of frequency and duration indices of composite power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14 (3): 899-905.
- [2] 国家技术监督局. GB/T 14549-93 电能质量 公用电网谐波 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1994.
- [3] Wilson Xu, Yili 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): 3-16.
- [4] Yang H, Piroette P, Robert A. Harmonic emission levels of industrial loads statistical assessment [C]. CIGRE 1996, 36-306.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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,

(下转第 68 页)

电因素的影响,采用自然增长 + 显著增长的基本预测方法, 预计 2008 年 德阳电业局可实现售电能量 73.439 亿 kW·h 同比增长 5.48%; 力争实现售电能量 75.0785 亿 kW·h 同比增长 7.83%。2008 年各月负荷预测见表 3。

5 改善德阳电网负荷特性的主要措施

(1) 加强设备停电管理, 实行《年度停电管理办法》。《年度停电管理办法》的核心就是将德阳电网所辖设备的大修、技改、预试和基建的停电工作都纳入电业局年度停电计划和供电局年度停电计划, “同一设备一年内原则上只安排一次停电计划”。大力推行带电作业和不停电作业。任何单位发生重复计划停电和非计划停电、停电延期, 电业局都将对其进行严格考核。

(2) 加快电网建设。加快中江 220 kV 站及配套的 110 kV 输变电工程、绵竹 220 kV 九岭站及配套的 110 kV 输变电工程等一系列新建、扩建工程项目, 增加变电容量, 提高供电可靠性, 解决供电能力不足的问题。

(3) 加快 10 kV 配电网改造, 适当增加配电变压

器, 对老旧线路进行更新改造, 并新建配电线路, 消除配网“卡脖子”现象。

(4) 加强负荷预测工作。做好每日极值预测; 并根据季节、气温变化的特点进行负荷的预测, 提高负荷预测的准确率, 以减少拉闸限电。如夏季应注意空调负荷、气候突变对负荷变化的影响, 做好降温负荷预测; 冬季电力供应紧缺, 做好负荷预测, 指导用电客户根据供电形势有序用电。

(5) 合理、科学安排运行方式; 及时掌握系统运行的情况、负荷水平、电网薄弱环节, 在此基础上合理安排设备停电检修方式。方式安排中, 杜绝电网设备过载运行。方式变化较大时, 应进行潮流计算, 了解系统潮流、电压的变化及可能对系统带来的影响。

(6) 加强需求侧管理, 有效降低高峰时段的电力需求。

(7) 充分发挥电价在削峰填谷、均衡用电方面的经济杠杆作用。进一步加大峰谷电价政策的执行力度, 区别不同行业的价差比例, 实行分时段按功率因数调整电费, 以增强各类用户对其的响应程度, 指导用户低谷用电, 提高电网负荷率。执行季节性电价、避开电网尖峰时段。

(收稿日期: 2008-11-10)

(上接第 12 页)

2007, 27 (1): 93-97.

[8] Cristaldi L, Ferrero A. Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality [J]. IEEE Trans on Instrum. and Meas. 1995, 44: 683-685.

[9] Wilsun Xu, Xian Liu, Yili Liu. An Investigation on the validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination [J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2003, 18(1): 214-219.

[10] Li Chun, Xu Wilsun, Tayjasanant T. A critical impedance based method for identifying harmonic sources [J]. IEEE Trans on Power Delivery. 2004, 19 (2): 671-678.

[11] Moustafa A A, Moussa A M, El-Gammal M A. Separation of Customer and Supply Harmonics in Electrical Power Distribution Systems [C]. Harmonics and Quality of Power 2000 Proceedings Orlando Florida. 2000, 3 (1): 1035-1040.

[12] Kandil M S, Farghal S A, Elmitwally A. Refined power quality indices [J]. IEE Proceedings - generation Transmission and Distribution. 2001, 148(6): 590-596.

[13] Antonio Dell'Aquila, Maria Marinelli, Vito Giuseppe Monopoli, Pericle Zanchetta. New power-quality assessment criteria for supply systems under unbalanced and non-sinusoidal conditions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2004, 19(3): 1284-1290.

[14] 吴竞昌. 供电系统谐波 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[15] Mahdi M, El Arin. A time domain load modelling technique and harmonics analysis [C]. 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power Athens Greece. 1998, 930-938.

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

作者简介:

龚华鳞 (1985-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向: 电能质量及其控制技术。

肖先勇 (1968-), 男, 四川宜宾人, 副教授, 硕士生导师, 长期从事电能质量及其控制技术等方面的教学和研究。

(收稿日期: 2008-12-08)