

应用科技
Applied Science and Technology
ISSN 1009-671X, CN 23-1191/U

《应用科技》网络首发论文

题目: 基于数据统计相关性分析的多谐波源责任评估
作者: 张岩, 张青青, 许庆燊, 王华佳, 于丹文
收稿日期: 2020-05-04
网络首发日期: 2021-04-13
引用格式: 张岩, 张青青, 许庆燊, 王华佳, 于丹文. 基于数据统计相关性分析的多谐波源责任评估. 应用科技.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20210413.1607.010.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.11991/yykj.202005003

基于数据统计相关性分析的多谐波源责任评估

张岩¹, 张青青¹, 许庆森², 王华佳¹, 于丹文¹

1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东省济南市 250003

2. 山东大学 电气工程学院, 山东省济南市 250061

摘 要: 为了有效利用电能质量监测数据评估谐波责任, 本文分析了多谐波源系统中各谐波源谐波电流与畸变谐波电压之间的相关性, 提出了基于数据统计相关性确定多谐波源系统中各谐波源责任的方法。首先结合偏相关分析确定了谐波源的谐波电流和超标节点的谐波电压之间的统计规律, 选择出主要谐波源, 然后基于偏最小二乘法, 建立了各谐波源的谐波贡献评价指标。利用负荷水平分割法将实测数据划分为波动性较小的数据段归类储存, 并选择合适的数据段计算各谐波源的谐波责任定量大小。最后通过仿真分析与实测数据验证了所提方法的有效性。所提方法计算方便, 工程实践性强, 能为针对性治理主要谐波源提供依据。

关键词: 多谐波源; 谐波责任区分; 统计相关性; 数据选择; 偏最小二乘法; 电能质量; 实测数据; 线性回归
中图分类号: TM761 **文献标志码:** A

Harmonic contribution evaluation of multiple harmonic sources based on the data statistical correlation analysis

ZHANG Yan¹, ZHANG Qingqing¹, XU Qingshen², WANG Huajia¹, YU Danwen¹

1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan, 250003, China

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan, 250061, China

Abstract: In order to effectively use the power quality monitoring data to evaluate the harmonic responsibility, this paper analyzes the correlation between the harmonic current of each harmonic source and the distorted harmonic voltage in the multiple harmonic source system, and proposes a method to determine the responsibility of each harmonic source based on the statistical correlation analysis of the data. Firstly, the statistical law between the harmonic current of the harmonic source and the harmonic voltage of the observation node is determined by the partial correlation analysis. Then, based on the partial least square method, the harmonic contribution evaluation index of each harmonic source is established. To meet the calculation needs, the measured data is divided into small data segments and stored using the load level segmentation method, so as to extract the data segments and calculate the harmonic magnitude of each harmonic source. Finally, simulation analysis and measured data verify the effectiveness of the proposed method. The proposed method is convenient in calculation and practical in engineering, it can provide a basis for targeted treatment of main harmonic sources.

Keywords: multiple harmonic sources; harmonic contribution evaluation; statistical correlation; data selection; partial least squares method; power quality; measured data; linear regression

在当前能源变革背景下, 大量分布式能源与可控负荷接入电网^[1-3], 电力系统的“电力电子化”程度愈加严重。电力电子技术的广泛应用有效提升了

电能的转换和传输效率, 但同时也向电力系统引入了大量谐波^[4]。由谐波导致的电能质量问题威胁电网的安全、可靠和稳定运行, 给电网的优质供电带来挑战。

针对谐波污染亟需治理的现状, 国际上提出了谐波治理的“奖惩性方案”^[5], 而谐波源定位与责任划分是经济奖惩措施有效实施的前提^[6-11]。谐波源辨识作为谐波污染治理的基础, 其研究开展相对

收稿日期: 2020-05-04.

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目(520626190063)。

作者简介: 张岩, 男, 高级工程师, 博士;

张青青, 女, 工程师, 硕士

通信作者: 张岩, E-mail: zysol@126.com.

较早^[12-13]。谐波源责任划分方法主要有线性回归法^[14-15]、波动量法^[16]、概率类方法^[17]和盲源分离法^[18-19]等。当前已开展的研究工作多集中于评估公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)系统侧和用户侧的谐波责任。然而,实际电力系统中 PCC 处的谐波畸变通常是多个谐波源共同作用产生^[20],除了计算单个谐波源对 PCC 的谐波贡献,还应考虑谐波源之间的相互影响。特别是现代电力系统中,随着可再生能源和电动汽车的广泛接入,还需考虑不同谐波源的时变特性^[21]。由于实际系统中,运行状态以及设备、负荷的时变性,获取准确的系统参数存在一定难度,而直接基于实测历史数据评估谐波责任具有较好的应用前景^[22-23]。

本文提出了基于数据统计相关性分析的多谐波源责任评估方法。首先基于 PCC 点谐波畸变电压与谐波源电流之间的相关规律,提出利用偏相关分析和多元线性回归分析谐波责任,选择出主要谐波源,基于偏最小二乘回归法建立了评价多谐波源系统各谐波源的责任指标;为选择满足分析要求的实测数据段,提出利用负荷水平分割法将谐波超标节点的谐波电压和谐波电流数据分段;结合统计相关性分析衡量谐波源的谐波电流和超标节点的谐波电压之间的统计规律,计算出谐波指标,确定谐波源的谐波责任定量大小。

1 谐波数据相关性分析

1.1 谐波电压与谐波电流的线性相关性

系统中 PCC 节点的谐波电压幅值与谐波源的谐波电流幅值之间存在线性相关性^[24]。以某系统的实测数据为例,谐波电压超标节点的 5 次谐波电压幅值(V_5^X)与谐波源节点 A 的 5 次谐波电流幅值(I_{5A})之间的线性相关性如图 1 所示。针对图中谐波电压和电流的关系,利用线性回归法得到,

$$V_5^X (\%) = 0.26I_{5A} (\%) + 4.82 (\%) \quad (1)$$

利用式(1)的回归系数对谐波责任进行评估适用于各谐波源相互独立的系统^[11]。但在实际电力系统中,往往存在多个分散式谐波源^[16],且谐波源的谐波电流 I_{ha} 和 I_{hb} 间存在相关关系,利用式(1)评估各谐波电流对 PCC 谐波电压的贡献大小存在难度。

1.2 谐波源偏相关性分析

实际系统中,谐波源数目的增多带来复杂的谐波数据选择问题。针对某一特定的谐波问题,选择出贡献较大的 3-4 个谐波源,即可有针对性的进行谐波治

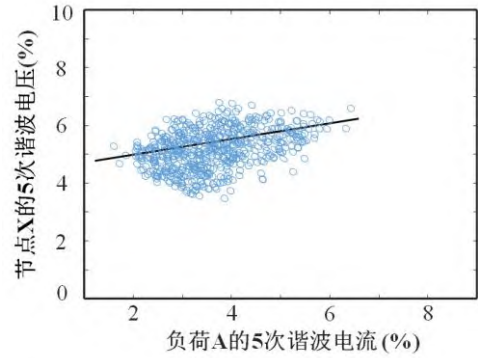


图 1 谐波电压与谐波电流数据间的线性相关性

理,提高评估精度。基于前述谐波电压和谐波电流数据之间的线性相关性,提出基于偏相关分析^[18]的数据预处理。

假设电力系统中含有 n 个谐波源,即有 n 个相关变量 x_1, x_2, \dots, x_n , 取 m 组观测数据,其 $n-2$ 级偏相关系数的计算过程如下。首先计算即直线相关系数 r_{ij} ,

$$r_{ij} = \frac{SP_{ij}}{\sqrt{SS_i SS_j}} \quad (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中 $SP_{ij} = \sum (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)$, $SS_i = \sum (x_i - \bar{x}_i)^2$, $SS_j = \sum (x_j - \bar{x}_j)^2$, 由简单相关系数 r_{ij} 组成相关系数矩阵 R , 然后求 R 的逆矩阵 C :

$$C = R^{-1} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

则相关变量 x_1, x_2, \dots, x_n 之间的偏相关系数为

$$p_{ij} = \frac{-c_{ij}}{\sqrt{c_{ii} c_{jj}}} \quad (i, j=1, 2, \dots, m, i \neq j) \quad (4)$$

式(4)中的偏相关系数越大,说明变量间相关性越强,谐波源间的耦合和相互干扰越强。利用偏相关分析,对实测数据进行预处理,找出对观测节点谐波电压影响较大的主要谐波源。基于对 PCC 点和谐波源、谐波源与谐波源间的谐波电压和谐波电流数据的相关性分析,可进一步利用偏最小二乘回归划分谐波责任。

2 基于数据统计相关性的谐波责任划分

假设系统中节点 X(观测节点)的谐波问题由 n 个谐波源共同作用产生。各谐波源的 h 次谐波电流分别表示为 $I_{h1}, I_{h2}, I_{h3}, \dots, I_{hn}$ (相量符号的下标 h 表示谐波次数, 下标 i 表示谐波源的馈线编号), 节点 X 处的 h 次谐波电压为 V_h^X ,

$$V_h^X = Z_{hi}^X I_{hi} + \underbrace{Z_{h1}^X I_{h1} + Z_{h2}^X I_{h2} + \dots + Z_{hn}^X I_{hn}}_{E_h^X} + V_{h0} \quad (5)$$

其中, Z_{hi}^X 为观测节点 X 与谐波源节点 i 之间的 h 次谐波阻抗。X 点的 h 次谐波电压由两部分组成: V_{hi}^X 来自谐波源 i , E_h^X 来自其它谐波源, 其中 V_{h0} 代表背景谐波。衡量谐波源 i 在 X 点处产生的谐波责任指标, 由 h 次谐波电压 V_{hi}^X 在 X 点的 h 次谐波总畸变电压 V_h^X 上的投影表示, 如图 2 所示, 其中 α 为 V_{hi}^X 和 V_h^X 之间的夹角。

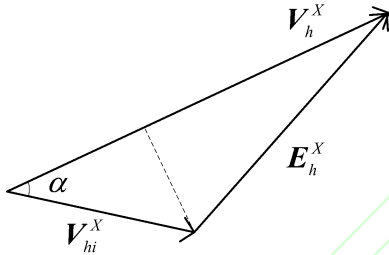


图 2 基于谐波电压投影的谐波贡献相量图

若量化单个谐波源的责任贡献, 谐波源 i 对 X 点的 h 次谐波电压的谐波贡献率 HI_i^X 为,

$$HI_i^X = \frac{|V_{hi}^X|}{|V_h^X|} \cos \alpha \times 100\% \quad (6)$$

式(6)可结合谐波潮流法计算得出, 作为谐波贡献划分的依据。整理式(1)得到,

$$|V_h^X| = \underbrace{|Z_{h1}^X| |I_{h1}| \cos \alpha_1}_{V_{h1}^X} + \underbrace{|Z_{h2}^X| |I_{h2}| \cos \alpha_2}_{V_{h2}^X} + \dots + \underbrace{|Z_{hn}^X| |I_{hn}| \cos \alpha_n}_{V_{hn}^X} + \underbrace{|V_{h0}| \cos \alpha_0}_{V_{h0}^X} \quad (7)$$

其中, $\alpha_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为 V_{hi}^X 和 V_h^X 之间的夹角, 同理, α_0 为背景谐波 V_{h0}^X 和 V_h^X 之间的夹角。各相量之间的关系如图 3 所示。将式(7)中的各成分简化表示为,

$$\begin{cases} \lambda_0 = |V_{h0}^X| \cos \alpha_0 \\ \lambda_1 = |Z_{h1}^X| \cos \alpha_1 \\ \lambda_2 = |Z_{h2}^X| \cos \alpha_2 \\ \vdots \\ \lambda_n = |Z_{hn}^X| \cos \alpha_n \end{cases} \quad (8)$$

式(7)为多元线性方程, 自变量由各谐波源的对应次数谐波电流矩阵表示, 因变量由观测节点的对应次数谐波电压矩阵表示。利用偏最小二乘法回归估计得到式(8)中的系数 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 和常数项 λ_0 。

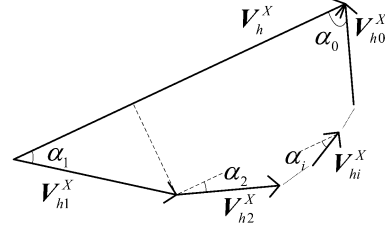


图 3 各谐波源谐波电压向量图

对一段时间内测量的一组数据进行回归分析, 自变量矩阵 X 和因变量矩阵 Y 分别为,

$$X = \begin{bmatrix} |I_{h1}^X(t_1)| & |I_{h2}^X(t_1)| & \dots & |I_{hn}^X(t_1)| \\ |I_{h1}^X(t_2)| & |I_{h2}^X(t_2)| & \dots & |I_{hn}^X(t_2)| \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ |I_{h1}^X(t_m)| & |I_{h2}^X(t_m)| & \dots & |I_{hn}^X(t_m)| \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Y = \begin{bmatrix} |V_h^X(t_1)|^2 & |V_h^X(t_2)|^2 & \dots & |V_h^X(t_m)|^2 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

其中, $|V_h^X(t_k)|$ 、 $|I_{hi}^X(t_k)| (k=1, 2, \dots, m)$ 分别为各个采样时刻 t_1, t_2, \dots, t_m 的节点 X 的谐波电压的幅值和节点 i 的 h 次谐波电流的幅值。

回归得到各谐波电流幅值的系数估计值, 分别为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 和 β_0 , 估计误差 ξ 。即谐波源 $i (i=1, 2, \dots, n)$ 对 X 点谐波电压的贡献 $|V_{hi}^X|$ 可以通过谐波电流幅值 $|I_{hi}^X|$ 与其系数 β_i 的乘积表示。因此, 回归计算后的 X 点的谐波电压表示为,

$$|V_h^X| = \beta_0 + \beta_1 |I_{h1}^X| + \beta_2 |I_{h2}^X| + \dots + \beta_n |I_{hn}^X| + \xi \quad (11)$$

谐波源 i 对节点 X 的谐波责任为

$$HF_i^X = \frac{\beta_i |I_{hi}^X|}{|V_h^X|} \times 100\% \quad (12)$$

3 统计数据段的选择

在前述谐波责任评估指标计算中, 假设随 $|V_{hi}^X|$ 的增加, $|E_h^X|$ 不变。若能找到一个时间段, 保证在该时段内仅负荷 i 变化, 而其它谐波源基本保持恒定, 则在这个时间段内, 即可认为 $|E_h^X|$ 为常量。考虑到实际系统中, 满足要求的时间段可能会比较短, 而且随谐波源个数的增加, 满足要求的时间段在长度和数量上都会明显减少, 因此提出基于负荷水平等级分割的数据选择方法, 将负荷变化范围分成不同的水平等级。例如, 如果谐波源 i 的谐波电流波动在 0-10% 的范围内, 则可认为该数据段内的所有数据处于同一负荷水

平,即认为负荷*i*基本保持不变。实际应用时可根据精度需要确定每一负荷水平的波动范围。

负荷水平等级分割法将所选择出的数据按等级存储。以电力系统中含有3个谐波源为例,将谐波源分别编号为A、B、C,图4给出了该情况下的数据存储结构。谐波源A、B、C的负荷水平都处于第一等级的所有时间段内的数据存储于单元格 D_{111} 内。同理,谐波源B的负荷水平在第四等级,A和C的负荷水平处于第一等级的所有时间段的数据存储于 D_{141} 内。因此图4所示的数据存储结构的每一列数据均可用来进行相关性分析。例如,图中灰色单元格内的数据可用于评估谐波源A的谐波责任。在这些数据中,负荷B和C基本是保持不变的,只有A负荷在变动。对B、C的任意负荷水平等级,都存在一系列数据,可用来评估负荷A的谐波责任。实际应用时,选择数据最多的一列进行评估。

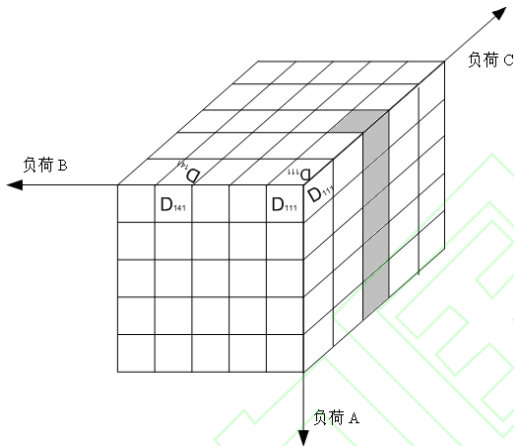


图4 数据存储结构示意图

4 仿真分析

4.1 谐波责任评估流程

要评估多谐波源系统中的各谐波源贡献,首先要获取谐波数据,流程概括如下:

1) 计算基波潮流

将所评估的谐波源视作PQ已知的恒定负荷,利用牛-拉法计算基波潮流,得到各负荷的基波电流 I_{rated} ;

2) 计算谐波电流

基于恒流源法,选择要研究的谐波次数,根据式(13)推算谐波源在该次谐波的注入电流

$$\begin{cases} I_h = I_{rated} \frac{I_{h-spectrum}}{I_{1-spectrum}} \\ \theta_h = \theta_{h-spectrum} + h(\theta_1 - \theta_{1-spectrum}) \end{cases} \quad (13)$$

其中, $I_{h-spectrum}$ 是谐波电流典型频谱^[1]中*h*次谐波电

流的幅值(以基波幅值 $I_{1-spectrum}$ 为参考点), $\theta_{h-spectrum}$ 是*h*次谐波电流的相角(以基波相角 $\theta_{1-spectrum}$ 为参考点)。

3) 计算节点导纳矩阵

基于电力系统网络的支路连接情况和各元件的谐波参数,计算各次谐波对应的节点导纳矩阵 Y_h 。

4) 计算谐波潮流

基于网络节点导纳阵,计算系统的各次谐波潮流,得到观测节点的谐波电压。

5) 各谐波电压计算

根据式(7)把各次谐波电压表示成各谐波源谐波电流的组合。

完成数据采集后,对数据进行预处理,利用负荷水平等级分割法选择出满足要求的数据段。利用偏相关分析判断谐波源间的耦合关系,选定主要谐波源;利用谐波责任指标评估各谐波源的谐波责任,评估整体流程图如图5所示。

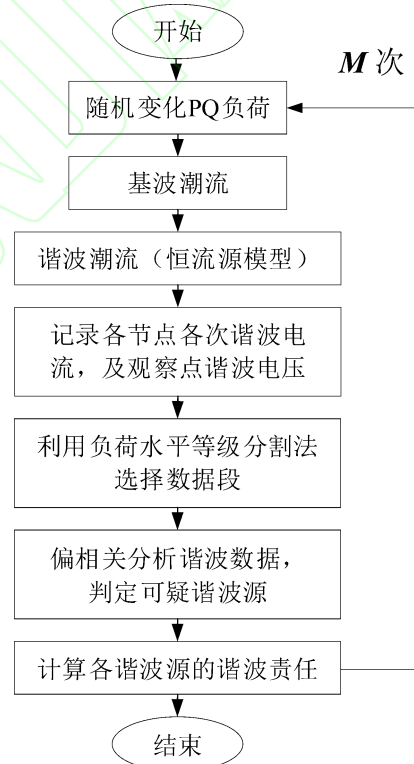


图5 基于仿真评估谐波责任流程图

4.2 算例分析

为验证本文所提算法的正确性,选用IEEE 37节点系统在MATLAB/SIMULINK中仿真和计算。IEEE 37节点网络拓扑图如图6所示。该系统有3个发电机,1个平衡节点,1个PV节点及7个PQ节点。接入分布式电源,研究它们对其它节点的谐波影响,谐波源接入位置及其容量如表1所示。设置所有的PQ节点的有功、无功在±110%额定范围内随机变化。仿真进行了5000次计算,采集了该系

统中 10 个节点的谐波电流和谐波电压, 生成了谐波责任评估所用的基础数据。在此基础上对谐波源在观测节点的谐波责任进行了评估。

取节点 713 为观测节点, 以 5、7、11、13 次谐波为例, 研究分布式电源和负荷谐波源对该节点的谐波影响。利用负荷水平等级分割法对谐波数据进行预处理, 并选取了单元格 D_{111} 内的数据段进行偏相关分析。将各测量节点的 5 次谐波数据与节点 713 的 5 次谐波数据的直线相关系数 r_{ij} 和偏相关系数 p_{ij} 计算结果整理如表 2 所示。由表 2 数据可看出, 节点 705、735、741 与节点 713 的 5 次谐波存在高度相关性, 因此可以确定这 3 个节点接入了对观测节点 5 次谐波电压影响很大的谐波源。该判断与表 1 的谐波源的实际接入情况一致。同理, 对各测量节点与观测节点 713 的 7、11、13 次谐波数据进行偏相关性分析。

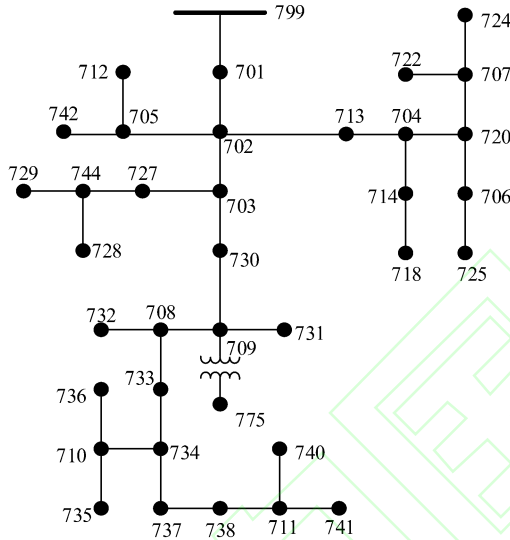


图 6 IEEE 37 节点网络拓扑图

表 1 IEEE 37 系统谐波源接入位置及容量

谐波源	接入位置	容量
风力发电站	735 节点	10MW
负荷	705 节点	4MW
光伏电站	741 节点	6MW

表 2 各测量节点与节点 713 数据的相关系数 (5 次谐波)

节点	713	703	705	727	709
r_{ij}	1	0.140	0.648	-0.139	0.009
p_{ij}	0	0.061	$7.81e^{-14}$	0.035	0.879
节点	720	732	735	707	741
r_{ij}	0.022	0.311	0.952	-0.002	0.462
p_{ij}	0.629	$7.45e^{-4}$	$9.24e^{-33}$	0.629	$1.95e^{-7}$

利用式 (12) 的谐波责任指标, 分别针对不同次数的谐波, 通过偏最小二乘法计算各谐波源的责任。各谐波源谐波责任的评估值与准确值的对比结果如表 3-表 5 所示。评估结果中的负号(-)表示该谐波源对观测节点的谐波电压有抵消作用。例如, 谐波源

705 在 11 次谐波下对节点 713 的谐波责任为负, 表明在该次谐波下, 谐波源 705 削弱了节点 713 的电压畸变。根据表 3-5 中数据对比显示, 节点 735 接入了系统中的主要谐波源。

表 3 IEEE 37 系统节点 705 的谐波责任 HF_{705}^{713}

谐波次数	准确值/%	评估值/%
5	27.8	25.9
7	20.6	18.7
11	12.2	5.2
13	14.4	13.0

表 4 IEEE 37 系统节点 741 的谐波责任 HF_{741}^{713}

谐波次数	准确值/%	评估值/%
5	28.2	30.1
7	28.6	25.6
11	32.6	34.6
13	40.8	35.1

表 5 IEEE 37 系统节点 735 的谐波责任 HF_{735}^{713}

谐波次数	准确值/%	评估值/%
5	44.0	44.2
7	50.7	46.5
11	56.6	60.2
13	45.2	42.0

对比本文所提方法与准确谐波责任值, 绘制各谐波源的谐波责任对比图, 如图 7 所示。从仿真结果可得, 该方法对各谐波源的谐波责任评估值均能较好地与准确值吻合, 能有效评估各谐波源的谐波责任。同时, 图 7 体现了在各次谐波下, 所提方法对主要谐波源的谐波责任评估结果准确度更高。

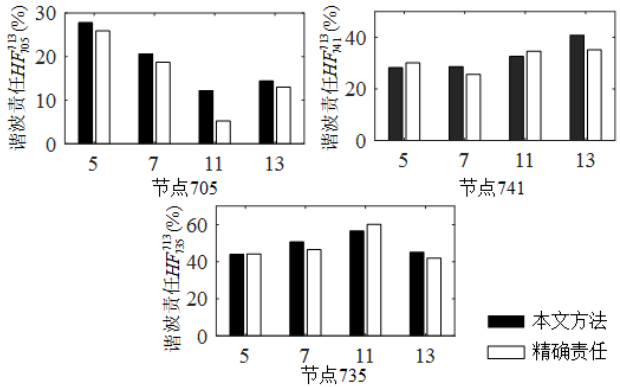


图 7 IEEE 37 系统各谐波源对节点 713 的谐波责任

5 实测数据分析

实测数据来自某变电站 35kV 母线, 该变电站所供负荷含有较多的谐波源。所测母线接有 5 条专供馈线。同步采样母线电压及各条馈线的电流, 每隔

3 秒钟记录 6 个周波数据, 每个周波记录 128 个数据点。连续采集当日 24h 内数据, 并利用傅里叶分析得到采集数据的各次谐波值。以污染较为严重的 3 次谐波为例, 先利用负荷水平等级分割法预处理, 选取实测数据中适合分析的数据段, 然后利用偏相关分析法分析三个主要谐波源, 依次编号为 A, B, C, 分别对应于化工厂专供线、电气化铁路专供线和飞机场专供线。在某段选取分析的数据段内, 由 1200 个连续采样点采集观测母线的谐波电压和三条主要谐波源馈线的谐波电流数据, 绘制波形如图 8 示。该数据段内, 由偏最小二乘法回归评估结果如表 6 所示。

在观察谐波责任动态变化时, 设置统计数据段选择时的负荷波动范围为 6%。先将 24h 的谐波数据归类到如图 4 所示的存储结构中, 然后在各数据段内计算偏相关系数, 综合定位谐波主要来源。以 2h 为时间尺度, 即每 2h 内进行一次各条馈线对母线的谐波责任评估。绘制 24h 内 3 条馈线的 5 次谐波责任变化趋势图, 如图 9 所示。结果显示, 在 5 次谐波下, B 线(化工厂专供线)对母线的电压畸变贡献最大, 其次是 A 线(电气化铁路专供线), 而 C 线(飞机场专供线)对母线的电压畸变有抑制作用。通过实际结果推断, 在复杂的多谐波源电网系统中, 谐波源有可能吸收谐波功率。同时, 针对时变特性进行分析, A 线和 B 线在凌晨期间对于 5 次谐波的贡献是全天中最大的, 正午其次, 即每日出现两次大的波动; 而 C 线则在下午 4 时呈现爆发式的谐波贡献, 其余时间的波动极小。同一谐波源在一天内不同时刻的谐波责任的波动, 与负荷自身的功率及开启时间的长短等因素有关。评估结果与系统的实际运行状况吻合, 可为谐波治理的责任划分提供参考依据。

表 6 各馈线的谐波责任评估结果

谐波次数	准确值/%	评估值/%
A 线	25.6	18.1
B 线	72.5	69.4
C 线	-10.2	-11.2

6 结论

1) 本文采用基于统计规律的相关性分析方法, 从实测数据入手, 分析了各谐波源电流与谐波超标节点谐波电压之间的映射关系, 并通过偏相关分析识别出主要谐波源, 进而评估多谐波源的谐波责任, 解决了因多谐波源相关性导致谐波责任评估不准确的问题。

2) 本文考虑了谐波的时变和波动特性, 采用负荷水平等级分割法将谐波数据归类储存, 针对数据

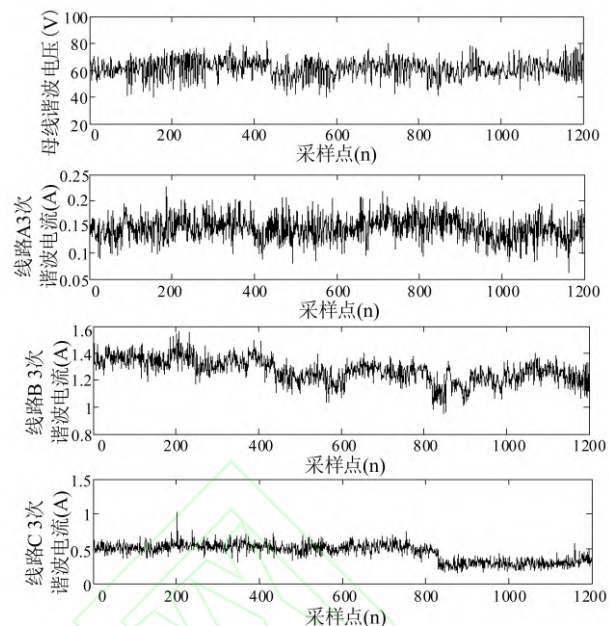


图 8 观测节点和谐波源的谐波电压和电流波形

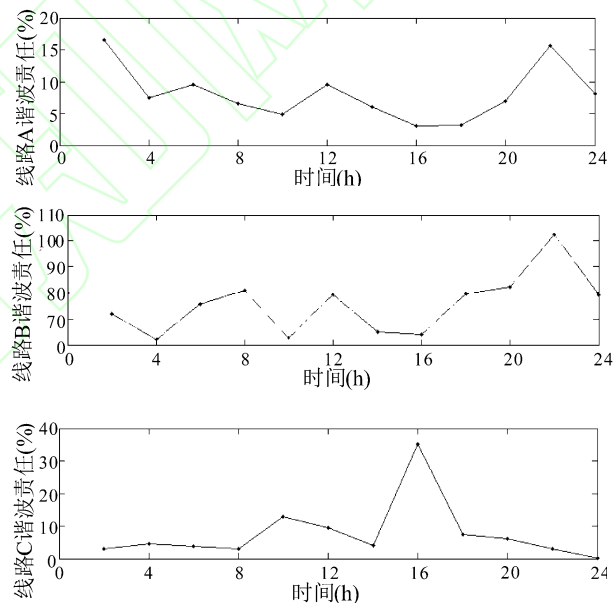


图 9 谐波责任随时间的变化情况

段逐个进行偏相关分析, 通过偏相关系数识别主要谐波源; 通过改变时间尺度, 研究了各谐波源的谐波责任时变特性。

3) 本文考虑分布式电源接入电网场景下的谐波问题, 提出了基于数据统计相关性分析的多谐波源责任评估方法, 可评估含多个分散式谐波源系统的时变谐波责任。

仿真分析和实测结果表明, 本文所提方法在含多谐波源的电网系统中能有效评估各谐波源的谐波责任, 且对主要谐波源有较好的评估精度。方法直观简易、工程实践性强, 可为建立公平有效的谐波奖惩机制和标准来限制和治理谐波污染提供参考。

参考文献:

- [1] 肖湘宁, 廖坤玉, 唐松浩等. 配电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 707-720.
- [2] 周鹏程, 王晟嫣, 陈威成等. 光伏扶贫地区分布式开发利用及消纳研究[J]. 山东电力技术, 2019, 第 46 卷(5):1-5.
- [3] 曹鲁成, 何晋, 王存浩. 含分布式电源的配电网故障定位研究[J]. 山东电力技术, 2019, 第 46 卷(12):7-10.
- [4] 孙媛媛, 张凌菡, 谢香敏,等. 基于谐波耦合主导分量模型的居民负荷集合性谐波评估[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16).
- [5] MCEACHERN A, GRADY W M, MONCRIEFF W A, et al. Revenue and harmonics: an evaluation of some proposed rate structures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 11(2): 123-128.
- [6] 孙媛媛, 李树荣, 石访,等. 含分布式谐波源的配电网多谐波源责任划分[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18).
- [7] LI C, XU W, TAYJASANANT T. A critical impedance based method for identifying harmonic sources[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 671-678.
- [8] XU W, LIU Y. A method for determining customer and utility harmonic contribution at the point of common coupling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.
- [9] 贾秀芳, 董立峰. 基于复数域稳健回归的多谐波源污染责任量化方法[J]. 太阳能学报, 2019, 第 40 卷(5):1309-1315.
- [10] 谭鹏, 杨洪耕, 马晓阳等. 计及风电场侧谐波阻抗影响的谐波发射水平评估[J]. 电力自动化设备, 2019, 第 39 卷(4):167-173.
- [11] 赵勇, 沈红, 李建华. 谐波源的识别及其与非谐波源的分离方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 84-87.
- [12] Hong Y Y, Chen Y C. Application of algorithms and artificial-intelligence approach for locating multiple harmonics in distribution systems[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(3): 325-329.
- [13] Moustafa A A, Moussa A M, El-Gammal M A. Separation of customer and supply harmonics in electrical power distribution systems[C]. Proceedings of 2000 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Orlando, USA, IEEE, 2000: 1035-1040.
- [14] 孙媛媛, 尹志明. 基于 M 估计稳健回归的多谐波源责任区分[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 166-173.
- [15] 贾秀芳, 华回春, 曹东升, 赵成勇. 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.
- [16] 罗杰, 符玲, 臧天磊等. 基于联合对角化法与数据筛选的谐波责任划分[J]. 电力自动化设备, 2018, 第 38 卷(11):79-84.
- [17] 赵熙, 杨洪耕. 基于贝叶斯定理的系统谐波阻抗估计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2935-2943.
- [18] 赵熙, 杨洪耕. 基于快速独立分量分析的系统侧谐波阻抗计算方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 139-144.
- [19] 杨雪萍, 杨洪耕, 马晓阳等. 基于核独立分量分析的谐波责任划分[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(12): 109-114.
- [20] AHMED E E, Xu W, Assessment of potential harmonic problems for systems with distributed or random harmonic sources[J], IEE Proceeding on Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(3): 506-515.
- [21] 惠锦, 杨洪耕, 叶茂清. 多谐波条件下的谐波污染责任划分研究[J].中国电机工程学报, 2011, 31(13): 48-54.
- [22] MAZIN H E, XU W, HUANG B. Determining the harmonic impacts of multiple harmonic-producing loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1187-1195.
- [23] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京: 国防大学出版社, 1998.
- [24] XU W, BAHRY R, MAZIN H. E. TAYJASANANT T. A method to determine the harmonic contributions of multiple loads[C]. Power & Energy Society General Meeting, 2009.