

基于信息熵的多谐波源定位研究

王允建, 陈丰

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对复杂配电网中缺少有效划分非线性负荷谐波污染责任和不能准确确定主谐波源位置的状况, 提出了一种基于信息熵的多谐波源定位方法。通过支持向量机进行谐波分离, 获得测量量的各次谐波数据。接着利用 B 样条法对测量数据进行概率密度估计, 从而计算出母线电压与各支路电流的互信息值, 根据互信息值的大小来确定主谐波源位置。通过对典型配电系统在 ATP(选择性暂态程序)软件中仿真分析, 所提方法具有定位准确、能够进行实际谐波责任区分的优点。

关键词: 互信息; B 样条; 支持向量机; 谐波分离; 多谐波源定位

Research on multiple harmonic sources localization based on information entropy

WANG Yunjian, CHEN Feng

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: As there is lack of effective division for liability of harmonic pollutions caused by non-linear loads and there is no accurate localization of harmonic sources in complex distribution network, the method based on information entropy for localization of multiple harmonic sources is proposed. All the harmonic data measured is gained by harmonic separation using support vector machine and then probability density is estimated by using the B-spline method, thus, the value of mutual information regarding bus bar voltage and current of each branch can be figured out and the position of main harmonic sources can be confirmed according to the value of mutual information. Through simulation analysis of typical power distribution system in alternative transient process (ATP) software, the result shows that the method proposed has the advantage of accurate location and is able to divide the real liability of harmonic pollutions.

Key words: mutual information; B-spline functions; Support Vector Machine (SVM); harmonic separation; multiple harmonic sources localization

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0035-06

0 引言

随着国民经济和电力工业的发展, 高压直流输电、柔性交流输电和用户电力技术不断推广应用所引起的大规模能量转换、控制^[1-2]以及电弧炉、调速电动机等非线性负荷的大量增加, 使得电力系统谐波污染问题日益突出^[3]。要想监测、治理电力谐波必须首先确定谐波源的分布。由于谐波源往往不是孤立存在于电网的; 各母线电压的畸变也不是由单一非线性负载引起的, 而是电网中所有非线性设备共同作用的结果。因此, 在实际应用中寻找一种在复杂配电系统中进行谐波源识别的判据更具现实意义^[4]。目前常见的谐波源定位方法可以分为基于功率方向的方法和基于谐波阻抗的方法两大类^[5-9]。基

于功率方向的方法如有功与无功功率方向法、临界阻抗法, 简单直观、易于实现, 但是负荷注入系统的谐波功率受制约因素很多。在一定的条件下, 即使综合负荷中存在谐波源, 也有可能从系统中吸收正的谐波功率, 所以向系统注入正的谐波功率只是负荷存在谐波源的充分不必要条件, 仅在单谐波源条件下能够得到准确的辨识结果。在复杂的配电系统中, 采用这一判据进行谐波源的识别难免会造成遗漏和错误。基于谐波阻抗的方法如微分方程法、助增助减比率法, 原理简单、清晰, 因为谐波阻抗是在扰动情况下测量的, 实际中的扰动具有随机性, 很不稳定, 使得系统阻抗的获取难以实现。总之, 这些判断准则有较多适用条件的限制, 在复杂的网络中也只能对局部支路的谐波源进行识别。

在众多研究领域,通过求取变量之间的互信息来获得研究对象识别匹配的结果,已经越来越引起人们的重视。图像配准方面,互信息只利用图像灰度值的统计结果,根据单个图像的灰度值的概率和两个图像重叠区域内对应位置上灰度值的联合概率来衡量两个图像的相似程度。使得互信息测度广泛应用于各种图像配准中,已成为使用最多的相似性测度^[10];语音识别方面,Okawa等提出了利用互信息准则提高音素模式训练精度以及多频带分配与组合的方法,上海大学的俞一彪博士提出能够全面反映发音特征的说话人模型以及相适应的互信息匹配算法来自动检测识别说话人的身份^[11]。文本分类方面,互信息特征选择方法有效地表达了特征与类别之间的依赖程度具有较好的分类效果,目前已是常用的文本特征选择方法之一^[12]。

由于互信息可以揭示两个随机信号之间相互携带对方的信息量;在数值上反映了两个随机变量之间相互依存关系的强弱,谐波源向系统中其他支路传播谐波信息,因此计算相关的互信息可以确定用户谐波发射水平从而可以确定主谐波源的位置。本文在配电网仿真模型中利用设置在选定母线上较为足够的相量测量装置所提供的数据,采用支持向量机方法分离数据并且基于B样条法来计算母线谐波电压和支路谐波电流之间的互信息,根据互信息数值大小实现配电网多谐波源定位。通过对典型配电网系统在ATP软件中仿真分析,表明该方法能够准确地找出主谐波源的位置所在。

1 互信息的谐波源定位原理

互信息是信息论中一个重要的物理量,它最初用来表示通信系统中发送端(信源)和接收端(信宿)之间在发送接收信息时信息量的一种测度,表示信宿从信源获得的信息。由于互信息对变量的分布类型没有任何特殊要求,而且它不仅能描述变量间的线性相关关系,也能描述非线性相关关系,目前已广泛应用于变量相关性的评价与变量选择之中。

大量非线性负荷接入电网并向电网注入谐波电流,这些谐波电流流经系统阻抗,在周围与之相连的母线上形成谐波电压。这些电压、电流的测量值并不是随机、独立的而是具有统计学上的意义,谐波源所在的支路谐波电流值与受污染母线上谐波电压值存在着对应关系。互信息反映了两个随机变量之间的统计相关程度,因此利用MI(Mutual Information)理论,母线上所产生的谐波电压和某条支路的谐波电流之间具有最大的MI,说明该母线受到此支路更多的谐波量,可以认为是主谐波源在该

条支路。实际操作中,把单次谐波频率下计算得到的MI值列出表格,用行代表母线谐波电压序号;用列代表支路谐波电流序号,开始比较某一列的MI值,找出最大值,该最大值对应的行序号即是该母线上的主谐波源支路。逐列比较即可找出配电网中所有的主要谐波源所在位置。而且对于同一母线,不同支路之间都是并联的,因此谐波电流是减少的,其他支路的谐波电流都没有谐波源所在支路与母线谐波电压之间的互信息大。要注意的是,在计算它们之间互信息时是在同一次谐波频率下进行计算的,这就需要先对测量数据进行谐波分离工作。

互信息虽然原理简单,根据公式需要先求得变量的概率密度函数,特别是得到联合概率密度函数是求解的难点所在。常见互信息估计方法通常从两个角度提高互信息估计的准确度^[13],一是从概率密度估计的角度尽量提高联合概率密度函数估计的准确度,如核方法、直方图法和B样条法;二是从互信息估计的角度尽量避免对联合概率密度函数的估计,如k近邻法(k nearest neighbor, KNN)和Copula熵法。B样条法^[14]避免了核密度估计中时间消耗较大的数值积分过程,因此与核方法相比计算速度更快;与直方图法比较,通过初始点的轮换缓解了直方图中存在的初始点选择问题的影响;与k近邻方法相比,B样条法的计算时间更少;而Copula熵法需要服从特殊分布。B样条法适用性更广;计算更快,为本文采用的方法。

1.1 谐波检测

目前有关谐波检测方法的研究非常活跃,研究的重点侧重于在同步采样下如何抑制异常值和脉冲性噪声信号对谐波频谱的干扰,也就是提高算法的稳健性^[15-17]。这对于电力系统存在严重电磁干扰下进行谐波分析具有现实意义。

基于结构风险最小化的最小二乘支持向量机(Support Vector Machines, SVM)算法是一种稳健的频谱估计方法,它基于Apnik统计学习理论、Hube稳健回归理论和Wolf对偶规划理论,具有鲁棒性强,对异常值和脉冲性噪声不敏感的特点。已经在电力系统负荷预测^[18]、故障诊断^[19]以及系统建模和模式识别领域^[20]获得了成功应用。下面简要介绍基于SVM回归估计的SVM谐波分析模型^[21]。

设离散时间序列 $\{y_k\}$, $k=1,2,\dots,N$ 的电力谐波分解模型为

$$y_k = \sum_{h=1}^H [A_h \cos(h\omega t_k) + B_h \sin(h\omega t_k)] + e_k \quad (1)$$

式中: A_h 和 B_h 为 h 次谐波的系数; H 为能够分解

的谐波最高次数; e_k 为 t_k 次采样模型的误差值。

为了便于表示, 定义参数: $\mathbf{w}=[\mathbf{C}^T, \mathbf{D}^T]^T$, $\mathbf{C}=[A_1, \dots, A_H]^T$; $\mathbf{D}=[B_1, \dots, B_H]^T$ 和 $\mathbf{x}_k=[\cos \omega t_k, \dots, \cos H\omega t_k, \sin \omega t_k, \dots, \sin H\omega t_k]^T$ 。

为求出式(1)中的系数 A_h 和 B_h 即 \mathbf{w} , 参考支持向量机算法, 定义目标函数

$$Lp = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \sum_{k=1}^N \alpha_k (y_k - \mathbf{w}^T \mathbf{x}_k - \varepsilon) + \sum_{k=1}^N \alpha_k^* (-y_k + \mathbf{w}^T \mathbf{x}_k - \varepsilon) + \frac{1}{2\gamma} \sum_{k \in I_1} (\xi_k^2 + \xi_k^{*2}) + c \sum_{k \in I_2} (\xi_k + \xi_k^*) - \sum_{k=1}^N [(\beta_k \xi_k + \beta_k^* \xi_k^*) + \alpha_k \xi_k + \alpha_k^* \xi_k^*] \quad (2)$$

在约束条件(3)下最小化目标函数

$$\text{s.t.} \begin{cases} y_k - \sum_{h=1}^H A_h \cos(h\omega t_k) - \sum_{h=1}^H B_h \sin(h\omega t_k) \leq \varepsilon + \xi_k \\ -y_k + \sum_{h=1}^H A_h \cos(h\omega t_k) + \sum_{h=1}^H B_h \sin(h\omega t_k) \leq \varepsilon + \xi_k^* \\ \xi_k, \xi_k^* \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k=1, 2, \dots, N$; ξ_k, ξ_k^* 为松弛变量; I_1 为 $\varepsilon \leq |\xi_k| \leq e_c$ 的采样点的集合; I_2 为 $|\xi_k| > e_c$ 的采样点的集合; $\varepsilon, \gamma, c, e_c$ 为稳健性控制参数, 作用为提高 SVM 分析的泛化能力和鲁棒性; $\alpha_k, \alpha_k^*, \beta_k, \beta_k^*$ 为 Lagrange 乘子, 可得到

$$\mathbf{w}=[\mathbf{I} + \mathbf{X}\mathbf{D}_{\lambda+\lambda^*}\mathbf{X}^T]^{-1} \mathbf{X}[\mathbf{D}_{\lambda+\lambda^*}\mathbf{y} - \mathbf{D}_{\lambda-\lambda^*}\boldsymbol{\varepsilon}] \quad (4)$$

式中: $\mathbf{D}_{\lambda+\lambda^*}$ 和 $\mathbf{D}_{\lambda-\lambda^*}$ 分别为第 k 个对角元为 $\lambda + \lambda^*$ 和 $\lambda - \lambda^*$ 的对角阵; $\mathbf{X}=[x_1, \dots, x_N]^T$; $\mathbf{y}=[y_1, \dots, y_N]^T$; \mathbf{I} 为 $2h \times 2h$ 阶单位阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为 $k \times 1$ 阶数值为 ε 的矩阵。

1.2 B 样条概率密度估计

为了定义 B 样条基函数, 首先定义 B 样条基函数的节点向量 t_i , $i=0, 1, \dots, M+k$, 其中 k 为样条基函数的次数 $k \in [0, M-1]$, M 为分组区间数。

$$t_i = \begin{cases} 0 & i < k \\ i-k & k \leq i \leq M+k-1 \\ M & i > M+k-1 \end{cases} \quad (5)$$

第 i 个 k 次 B 样条基函数写为 $B_{i,k}(z)$, 约定

$$\frac{0}{0} = 0, \text{ 递归定义为}$$

$$B_{i,0}(z) = \begin{cases} 1 & t_i \leq z < t_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$B_{i,k}(z) = \frac{z-t_i}{t_{i+k}-t_i} B_{i,k-1}(z) + \frac{t_{i+k+1}-z}{t_{i+k+1}-t_{i+1}} B_{i+1,k-1}(z)$$

上述公式通常称为 Cox-de Boor 递归公式。B 样条基函数具有规范性 ($\sum B_{i,k}(z) = 1$), 与概率密度求取提供桥梁。

已知: 变量 x 和 y 的值 x_u 和 y_u , $u=1, 2, \dots, N$; 样条基函数次数 k ; 取适当的 M 的值作为分类区间数, 记区间序号 $n_x=1, \dots, M_x$, $n_y=1, \dots, M_y$; 节点序号 $i'=0, 1, \dots, M_x+k$, $j'=0, 1, \dots, M_y+k$ 。

计算变量 x 和 y 概率密度步骤如下。

$$1) \text{ 对数据 } x \text{ 归一化处理 } z = \frac{x-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}}(M_x-k),$$

令 $\tilde{B}_{i',k}(x) = B_{i',k}(z)$

2) 根据公式(6), 计算 $\tilde{B}_{i',k}(x_u)$

3) 计算每个区间内的概率值

$$p(a_{n_x}) = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \tilde{B}_{i',k}(x_u)$$

4) 同理对 y 同样归一化处理计算 $\tilde{B}_{j',k}(y_u)$ 求出 $p(b_{n_y})$, 接着得到 $M_x \times M_y$ 集合内联合概率密度函数

$$p(a_{n_x}, b_{n_y}) = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \tilde{B}_{i',k}(x_u) \tilde{B}_{j',k}(y_u) \quad (7)$$

如果已知一个随机变量 x 的概率密度函数为 $p(x)$, 那么 x 的熵定义为

$$H(x) = -\sum p(x) \times \log p(x) \quad (8)$$

变量 x 和 y 服从联合分布 $p(x, y)$, 其联合熵

$$H(x, y) = -\sum p(x, y) \times \log p(x, y) \quad (9)$$

变量 x 和 y 的互信息 $MI(x, y)$ 可以表示为

$$MI(x, y) = H(x) + H(y) - H(x, y) \quad (10)$$

因此根据公式(8), 计算随机变量 x 的熵, 即

$$H(x) = -\sum_{n_x=1}^{M_x} p(a_{n_x}) \times \log p(a_{n_x}), \text{ 同理计算出 } H(y) \text{ 和 } H(x, y); \text{ 再根据公式(10)计算出互信息 } MI(x, y)。$$

2 主谐波源定位流程

根据以上的分析推导, 可以得出基于 SVM 的谐波分析和 B 样条法的互信息估计进行多谐波源定位的算法步骤, 计算框图如图 1。

3 系统建模与仿真分析

用本文所提的算法对图 2 所示的典型配电系统进行仿真, 并在 ATP 中建立模型如图 3 所示。ATP 是电磁暂态计算程序 EMTP(Electro-Magnetic

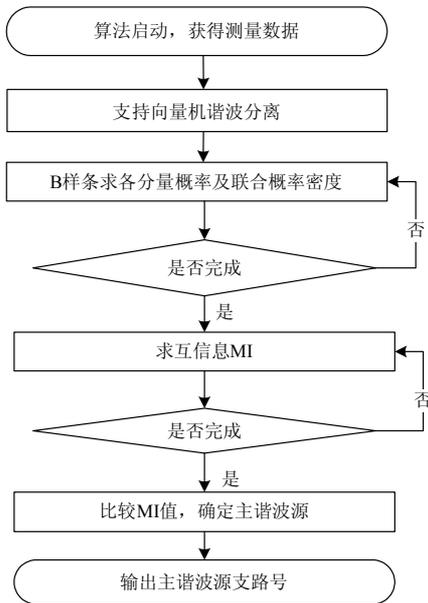


图 1 计算框图
Fig. 1 Calculating diagram

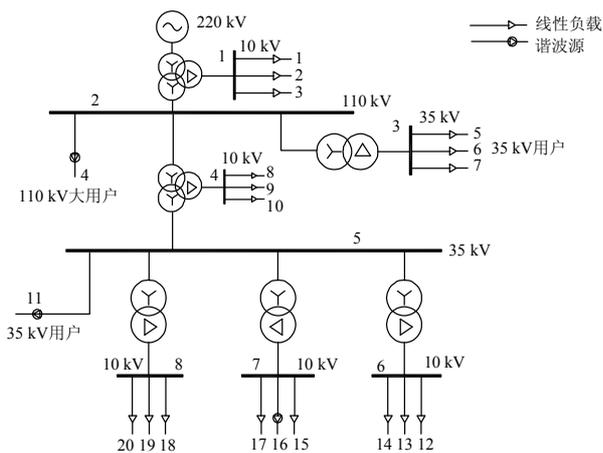


图 2 系统拓扑图

Fig. 2 Topological graph regarding the power system

Transients Program)的免费版本, ATP 提供了大量的元件模型, 同时支持自建模型的设立并且可以实施配电系统计算^[22]。为了接近实际情况, 在各条负载支路中同时投入少量的非线性负荷; 然后在 4、11、16 号支路上放置 3 个主谐波源分别标记为谐波源 1、谐波源 2、谐波源 3, 都包含大量的 5 次、7 次、11 次谐波电流具体如表 1。设置时间步长为 10^{-4} 然后运行仿真, 生成模型中各探针的测量数据。图 4 为模型所产生的各母线单相的谐波电压波形图。把得到波形的坐标数据保存为 .mat 文件, 就可以利用 Matlab 将数据读出。并结合各支路的谐波电流波形数据, 根据事先编译好的算法进行处理。

表 1 谐波源设置情况

Table 1 Harmonic sources

名称	5 次电流	7 次电流	11 次电流
谐波源 1	150 A / 30°	35 A / 60°	25 A / 83°
谐波源 2	55 A / 30°	35 A / 60°	20 A / 83°
谐波源 3	50 A / 30°	20 A / 60°	10 A / 83°

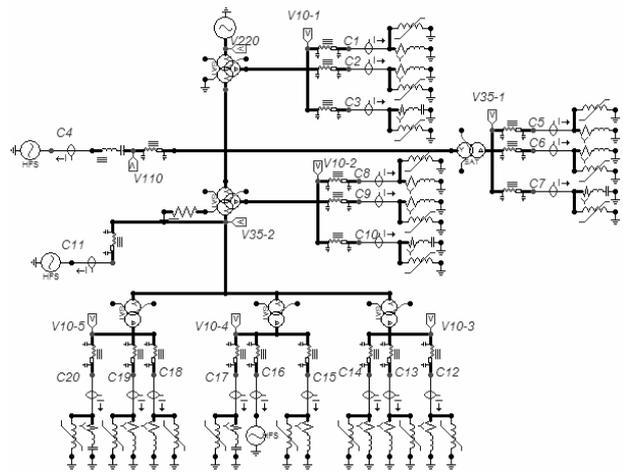


图 3 建立的配电系统模型

Fig. 3 Power distribution system established

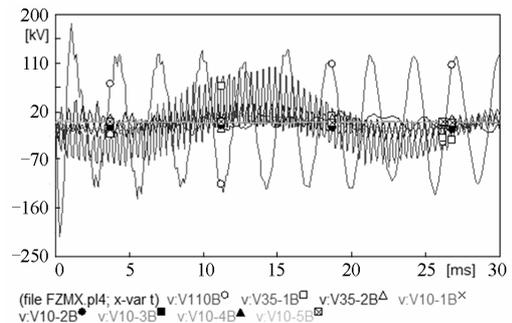


图 4 各母线单相谐波电压波形

Fig. 4 Single-phase harmonic voltage wave forms of each bus

使用 MI 理论计算各次谐波频率下支路谐波电流和母线谐波电压两者的 MI 值。表 2 以 5 次谐波频率下为例计算, 行和列分别代表 5 次谐波频率下母线谐波电压和支路谐波电流的数据信息。每一列和行的交点为 5 次谐波频率下的该母线谐波电压和每条支路谐波电流之间的互信息值。

如表 2 所示, 粗体的 MI 值代表母线的谐波电压和相关支路谐波电流之间具有的最大 MI, 因此主谐波源在该条支路上。例如, 5 次谐波次数下 1 号母线与 4 号支路具有最大的 MI 值 2.65, 可见是这一列最大值。这意味着 1 号母线受到来自 4 号支路更多的谐波量, 可以确定 1 号母线的主谐波源位于

4号支路上。从表中显然可见,主谐波源位置位于4、11、16号支路上,这也正是仿真时所设置的谐波源位置。

表2 5次谐波频率下MI值计算结果
Table 2 MI values under the 5 harmonic frequencies

电流序号	电压序号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	2.56	1.23	1.52	1.22	1.04	0.61	0.71	0.64
2	2.55	1.25	1.56	1.31	1.04	0.61	0.65	0.66
3	2.62	1.31	1.53	1.15	0.97	0.72	0.66	0.69
4	2.65	2.75	2.52	2.56	1.23	1.27	1.25	1.31
5	1.02	1.53	2.46	1.07	0.87	0.79	0.97	0.76
6	1.05	1.56	2.34	1.12	0.81	0.90	0.89	0.87
7	1.04	1.55	2.38	1.13	0.74	0.98	1.02	0.79
8	1.32	1.64	1.22	2.44	1.21	1.08	1.21	1.11
9	1.35	1.67	1.10	2.37	1.35	1.06	1.19	1.21
10	1.36	1.65	1.17	2.33	1.32	1.08	1.22	1.34
11	1.65	1.67	1.63	1.72	1.86	1.72	1.65	1.73
12	0.65	0.96	0.73	1.21	1.33	2.22	1.45	1.46
13	0.68	1.23	0.78	1.21	1.42	2.31	1.55	1.62
14	0.66	1.22	0.65	1.21	1.33	2.25	1.73	1.44
15	0.95	1.56	0.72	1.03	1.32	1.43	2.42	1.67
16	1.55	1.62	0.92	1.39	1.43	2.42	2.79	2.43
17	0.89	1.45	0.67	1.23	1.21	1.45	2.35	1.73
18	0.67	1.18	0.59	1.17	1.09	1.21	1.67	2.12
19	0.68	1.25	0.64	1.23	1.12	1.23	1.67	2.24
20	0.65	1.22	0.66	1.22	1.12	1.17	1.72	2.13

4 结论

本文提出了一种在配电网中通过应用 SVM 和 B 样条法计算 MI 值来定位多谐波源的新方法。该方法中使用支持向量机的稳健频谱估计算法处理所测量的电压、电流数据,实现谐波分离;B 样条法用于估计分离后相关两变量的概率密度,通过计算出的互信息值进行谐波责任划分,指出了配电网中主谐波源位置。该方法基本思路清晰,结果准确;可以为谐波污染责任的划分提供新的判断依据。

参考文献

- [1] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-125.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-125.
- [2] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-29.
- [3] 吴笃贵, 徐政. 基于相量量测的电力系统谐波状态估计(I)[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 64-65.
WU Dugui, XU Zheng. Power system harmonic state estimation based phasor measurements (I)[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 64-65.
- [4] 张哲, 陈红坤. 谐波源辨识研究的现状和发展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 37-39.
ZHANG Zhe, CHEN Hongkun. Status and development of harmonic source identification[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(5): 37-39.
- [5] 周林, 张凤, 栗秋华, 等. 配电网中谐波源定位方法综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 103-105.
ZHOU Lin, ZHANG Feng, LI Qiuhua, et al. Methods for localizing the harmonic source in power distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 103-105.
- [6] 于淼, 张炳达. 配电网中谐波源检测方法的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(1): 36-40.
YU Miao, ZHANG Bingda. Study of detecting harmonic sources method in distribution systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(1): 36-40.
- [7] 杨源, 林圣, 臧天磊, 等. 基于改进稀疏表示法的谐波源定位[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1279-1282.
YANG Yuan, LIN Sheng, ZANG Tianlei, et al. Improved sparse representation-based location of harmonic sources in power system[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1279-1282.
- [8] 黄雯, 曾江. 基于多因素相关度的下级谐波源查找技术[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 85-87.
HUANG Wen, ZENG Jiang. The sub-harmonic source searching method based on multifactor relevancy[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 85-87.
- [9] 惠锦, 杨洪耕, 叶茂清. 多谐波源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): 48-49.
HUI Jin, YANG Honggeng, YE Maoqing. Research on the responsibility partition of harmonic pollution of multiple harmonic sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 48-49.
- [10] LI Qi, ISAO SATO, YUTAKA MURAKAMI. Interpolation effects on accuracy of mutual information

- based image registration[C] // Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006: 180-183.
- [11] 俞一彪. 基于互信息理论的说话人识别研究[D]. 上海: 上海大学, 2004: 4-14.
YU Yibiao. The research of speaker recognition based on mutual information theory[D]. Shanghai: Shanghai University, 2004: 4-14.
- [12] 辛竹, 周亚建. 文本分类中互信息特征选择方法的研究与算法改进[J]. 计算机应用, 2013, 33(增刊 2): 116-118.
XIN Zhu, ZHOU Yajian. Study and improvement of mutual information for feature selection in text categorization[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(S2): 116-118.
- [13] 韩敏, 刘晓欣. 基于 Copula 熵的互信息估计方法[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(7): 875-876.
HAN Min, LIU Xiaoxin. Mutual information estimation based on Copula entropy[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(7): 875-876.
- [14] DAUB C O, STEUER R, SELBIH J, et al. Estimating mutual information using B-spline functions——an improved similarity measure for analyzing gene expression data[J]. BMC Bioinformatics, 2004(5): 118.
- [15] 黄纯, 朱智军, 曹一家, 等. 一种电网谐波与间谐波分析新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 32-35.
HUANG Chun, ZHU Zhijun, CAO Yijia, et al. A novel power system harmonic and inter-harmonic analysis method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 32-35.
- [16] 罗蛟, 江亚群, 黄纯, 等. 基于 DRSC 窗递推 DFT 算法的电力谐波检测[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 47-50.
LUO Jiao, JIANG Yaqun, HUANG Chun, et al. Power system harmonic parameters estimation based on recursive DFT algorithm with DRSC window[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 47-50.
- [17] 程志友, 程晨, 付学敏, 等. 基于共轭-旋转矢量不变性技术的谐波检测方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 274-276.
CHENG Zhiyou, CHENG Chen, FU Xuemin, et al. Harmonic detection method based on conjugate signal parameters via rotational invariance techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 274-276.
- [18] 吉训生. 基于偏最小二乘支持向量机的短期电力负荷预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 55-58.
JI Xunsheng. Short-term power load forecasting on partial least square support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 55-58.
- [19] 张姝, 何正友, 王玘, 等. 暂态零序电荷-电压特征与支持向量机结合的谐振接地系统故障选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 71-74.
ZHANG Shu, HE Zhengyou, WANG Qi, et al. Fault line selection of resonant grounding system based on the characteristics of charge-voltage in the transient zero sequence and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 71-74.
- [20] 任先文, 薛雷, 宋阳, 等. 基于分形特征的最小二乘支持向量机局部放电模式识别[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 143-145.
REN Xianwen, XUE Lei, SONG Yang, et al. The pattern recognition of partial discharge based on fractal characteristics using LS-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 143-145.
- [21] 占勇, 丁屹峰, 程浩忠. 电力系统谐波分析的稳健支持向量机方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 43-47.
ZHAN Yong, DING Yifeng, CHENG Haozhong. A robust support vector algorithm for harmonics analysis of electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 43-47.
- [22] 曹祥麟. EMTP 在特高压交流输电研究中的应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 64-68.
CAO Xianglin. Application of EMTP in the research of UHV AC power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 64-68.

收稿日期: 2014-10-17; 修回日期: 2015-01-18

作者简介:

王允建(1973-), 男, 工学博士, 副教授, 现从事非线性系统的自适应控制和电力谐波检测与治理研究;

陈丰(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力谐波分析与定位. E-mail: chenfeng900823@126.com

(编辑 葛艳娜)