基于支持向量机的谐波阻抗估计方法

康 婕，解绍锋，刘晓菊，魏晓娟

（西南交通大学电气工程学院，四川 成都 610031）

摘要：提出了一种基于支持向量机的谐波阻抗估计方法：利用在公共连接点测量的谐波电压和谐波电流信号，通过支持向量机构造回归模型，进而回归出谐波阻抗。相对于“波动法”、“双线性回归法”和“二元线性回归法”等谐波阻抗估计方法，该方法能解决小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题，当谐波阻抗变化时，也具有良好的泛化性和精度。通过对实验电路的仿真分析验证了该方法的有效性，并与其他谐波阻抗估计方法进行了比较分析。

关键词：谐波阻抗；支持向量机；回归；泛化性能

Assessing the harmonic impedance based on support vector machine

KANG Jie，XIE Shao-feng, LIU Xiao-ju, WEI Xiao-juan

（School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University，Chengdu 610031，China）

Abstract：A new method based on SVM regression for estimating harmonic impedance is presented．Through harmonic voltage and harmonic current measured at PCC，harmonic impedance can be estimated by constructing the regression model of SVM．Compared with fluctuation method，double linear regression，binary linear regression and other harmonic impedance estimation methods，SVM can be used to solve practical problems such as small sample，nonlinear，high dimension, local minimum point, etc．Especially when the harmonic impedance changes，it also has good generalized performance and precision．The validity of this method has been proved through the simulation analysis of laboratorial circuit, and the comparison with other harmonic impedance estimation methods is conducted．

Key words：harmonic impedance；support vector machine；regression；generalization

中图分类号： TM714　　文献标识码：A　　文章编号： 1674-3415(2010)22-0131-04

0 引言

在公共连接点（PCC）处的系统和用户谐波阻抗是估计谐波源谐波发送水平的重要参数。但是由于负荷、电网参数以及系统运行的不断变化，基于系统元件参数的谐波阻抗计算方法仍然不太成熟。现有的谐波阻抗测量估计方法基本上可以分为“干预式”（Invasive）和“非干预式”（Non-Invasive）两种。“干预式”方法主要通过向系统强迫注入谐波电流或是间谐波电流，或是开断系统某一支路来测量谐波阻抗，但该类方法可能会对系统运行造成不利影响，因此不能广泛使用。“非干预式”方法是利用系统已有的谐波源或可测量参数等来估计谐波阻抗，它主要包括：①“波动法”[1]，基于被测电压波动量对电流波动量比值的符号特征的估计方法；②“双线性回归法”[2]，在假设电力系统是纯感性的并且系统谐波阻抗稳定的基础上，通过测量值（复数）的相关系数估计谐波阻抗。方法①对谐波参数测量的准确度要求较高，同时还需要测量值有足够大的波动。方法②需要系统较为稳定，且无法计算系统谐波复阻抗中的电阻分量。③“二元线性回归法”[3]，假定在公共联接点谐波电压、电流基本稳定条件下，以公共联接点谐波电流电压测量参数为观测数据，根据回归方程求取系统侧谐波阻抗。方法③能够估计出谐波阻抗的电阻分量，但仍需系统侧较为稳定。

本文提出的基于支持向量机的谐波阻抗估计方法，能够在电网参数、系统运行发生变化的情况下，以公共连接点谐波电压电流测量参数为支持向量机的输入，利用支持向量机回归求得系统侧谐波阻抗。

基金项目：西南交通大学科研基金（2007A12）

1　基本原理

系统谐波等效模型如图1所示，图中，I_s 与 I_c 分别为系统侧与用户侧等值谐波电流源；Z_s 与 Z_c 分别为系统侧与用户侧等值谐波阻抗；V_{pcc} 为公共连接点测得的谐波电压；I_{pcc} 为公共连接点测得的谐波电流。

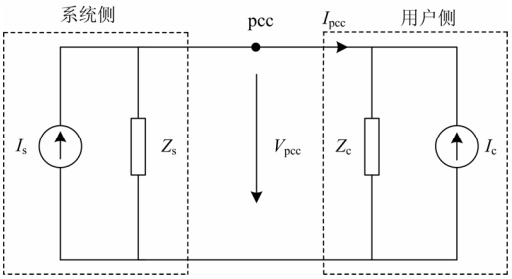


图1 系统与用户等值电路

Fig.1 Equivalent of power system and customer

根据图1可列出方程：

$$V_{pcc}=\frac{Z_S\cdot Z_C(I_S+I_C)}{Z_S+Z_C} \tag{1}$$

$$I_{pcc}=\frac{Z_S\cdot I_S-Z_C\cdot I_C}{Z_S+Z_C} \tag{2}$$

由式(1)、(2)可以看出 V_{pcc}、I_{pcc} 与 Z_s 是非线性关系，用于回归估计的支持向量机方法以可控制的精度逼近非线性函数，具有全局最优、良好泛化能力等优越性能[4]。现在已知PCC点 V_{pcc}、I_{pcc} 的测量值，利用SVM和核函数回归出系统谐波阻抗 Z_s。在SVM回归中，对于训练样本集 $\{(x_i,y_i)\}_{i=1}^n$，$x_i\in R^n$ 为输入变量的值，$y_i\in R$ 为相应的输出值，n 为训练样本个数，函数回归问题就是寻找一个从输入空间到输出空间的映射 $f:R^n\to R$，使得 $f(x)\approx y$。SVM回归方法就是先用一个非线性映射 $\varphi:R^n\to R^m(m>n)$，将输入空间映射到高维的特征空间，再在特征空间中用式(3)线性函数来拟合数据[5-7]：

$$y=f(x)=\langle\omega,\varphi(x)\rangle+b \tag{3}$$

式中：ω、$\varphi(x)$ 为 m 维向量；$\langle\cdot,\cdot\rangle$ 表示特征空间中的点积；b 为阈值。

通过极小化式（4）确定系数 ω 和 b：

$$\min\omega,b:\frac{1}{2}\|\omega\|^2+C\sum_{i=1}^n\left|y_i-\langle\omega,\varphi(x_i)\rangle-b\right|_\varepsilon \tag{4}$$

在式（4）给出的正则化风险泛函中，$\frac{1}{2}\|\omega\|^2$ 是正则化部分，$C\sum_{i=1}^n\left|y_i-\langle\omega,\varphi(x_i)\rangle-b\right|_\varepsilon$ 是经验风险，C 决定经验风险与正则化之间的平衡。$C\sum_{i=1}^n\left|y_i-\langle\omega,\varphi(x_i)\rangle-b\right|_\varepsilon$ 为 ε 不敏感损失函数，由式（5）决定（设 $y-\langle\omega,\varphi(x)\rangle-b=\eta$）：

$$|\eta|_\varepsilon=\begin{cases}0 & |\eta|\le\varepsilon\\ |\eta|-\varepsilon & |\eta|\ge\varepsilon\end{cases} \tag{5}$$

引入松弛变量 ξ_i 与 ξ_i^*，式（4）变为

$$\frac{1}{2}|\omega|^2+C\sum_{i=1}^n(\xi_i+\xi_i^*) \tag{6}$$

其约束条件为

$$\begin{cases}y_i-\omega\varphi(x_i)-b\le\varepsilon+\xi_i\\ \omega\varphi(x_i)+b-y_i\le\varepsilon+\xi_i^*\end{cases}\quad i=1,2,\cdots,n \tag{7}$$

由于特征空间的维数很高且目标函数不可微，直接求解式（4）几乎不可能。引入核函数解决了这些问题，定义内积 $\varphi(x)\cdot\varphi(x_i)=k(x,x_i)$，$k(x,x_i)$ 被称为核函数，尽管通过非线性函数将样本数据映射到具有高维特征空间，但在计算回归估计函数时并不需要显式计算该非线性函数，而只需计算核函数，从而避免高维特征空间引起的维数灾难问题。

引入拉格朗日乘子 α_i 和 α_i^*，对任何 $i=1,\cdots,n$，都有等式 $\alpha_i\times\alpha_i^*=0$，$\alpha_i\ge0$，$\alpha_i^*\ge0$，要找到所求的 $\omega=\sum_{i=1}^n(\alpha_i^*-\alpha_i)x_i$，必须找到最大化二次型：

$$\begin{aligned}\max_{\{\alpha_i\}\{\alpha_i^*\}}=&-\varepsilon\sum_{i=1}^n(\alpha+\alpha^*)+\sum_{i=1}^n y_i(\alpha_i-\alpha_i^*)-\\&\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^n(\alpha_i-\alpha_i^*)(\alpha_j-\alpha_j^*)k(x_i\cdot x_j)\end{aligned} \tag{8}$$

的参数 α_i 和 α_i^*，$i=1,\cdots,n$，其约束条件为：

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^n\left(\alpha_i-\alpha_i^*\right)=0\\ 0\le\alpha,\alpha_i^*\le C\end{cases}\quad i=1,2,\cdots,n$$

从而得到回归函数：

$$f(x)=\sum_{i=1}^n(\alpha_i-\alpha_i^*)K(x_i,x_j)+b \tag{9}$$

其中 α_i,α_i^* 不为0，对应的样本就是支持向量。回归函数由支持向量完全表征，回归函数为：

$$f(x)=\sum_{SVs}(\alpha_i-\alpha_i^*)K(x_i,x_j)+b \qquad (10)$$

其中b按式（11）计算：

$$b=\frac{1}{N_{\mathrm{SV}}}\left\{\sum_{0<\alpha_i<c}\left[y_i-\sum_{x_j\in SV}(\alpha_j-\alpha_j^*)K(x_j,x_i)-\varepsilon\right]+\sum_{0<\alpha_i^*<c}\left[y_i-\sum_{x_j\in SV}(\alpha_j-\alpha_j^*)K(x_j,x_i)+\varepsilon\right]\right\} \qquad (11)$$

其中，N_{SV}为支持向量的个数。

由此回归函数各系数ω、b完全确定。给定新的输入数据，即可预测出输出数据。

采用SVM方法的谐波阻抗估计的步骤为：

（1）形成训练样本，训练样本输入为PCC点谐波电压、电流；输出为系统谐波阻抗。预测样本为PCC点谐波电压、电流。

（2）根据样本建立如式（8）的目标函数。

（3）利用SVM优化方法求解式（8），得到解α_i和$\alpha_i^*, i=1,\cdots,n$。

（4）将得到的拉格朗日乘子代入式（10）中，再利用预测样本对未来某一时段的系统谐波阻抗进行预测。

2　试验仿真与结果

系统等值电路如图1所示，系统侧等效谐波电压源为V_{s}，可知$V_s=I_{\mathrm{s}}Z_{\mathrm{s}}$，当$V_{\mathrm{s}}$是平稳的，系统侧谐波电流$I_{\mathrm{s}}$变化会直接影响系统侧谐波阻抗$Z_s$变化，此时利用SVM和其他“非干预”方法对$Z_{\mathrm{s}}$进行回归是必要的。

根据图1所建立的仿真模型（系统频率50 Hz）：

（1）系统侧等效电压源V_{s}为50 V∠53.1°；

（2）用户侧等值谐波电流源I_{c}服从正态分布，均值为3.73+3.74I（A），实部标准差为0.42，虚部标准差为0.41；

（3）系统侧谐波阻抗Z_{s}服从正态分布，均值为5.0+20.0I（Ω），实部标准偏差为0.206 1，虚部标准偏差为0.309 2；

（4）用户侧谐波阻抗Z_{c}服从正态分布，均值为40.0+296.0I（Ω），实部标准偏差为1.147，虚部标准偏差为2.882 0；

在PCC点进行电压与电流的测量，抽样1 000个数据点。对抽样数据按100个点分段，每段分别作为支持向量机的输入，进行样本的训练，训练样本集$\{(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{y}_i)\}_{i=1}^{n}$中$\boldsymbol{x}_i$为PCC点抽样的谐波电压$V_{\mathrm{pcc}}$与电流$I_{\mathrm{pcc}}$组成的向量；$y_1$为系统侧谐波阻抗$Z_{\mathrm{s}}$初始值，$y_i(i=2,3,\cdots)$为前一次仿真得出的$Z_{\mathrm{s}}$值。设置式（6）中的惩罚函数$C=2$，式（8）中的不敏感系数$\varepsilon$为0.2；目前最常用的核函数有：

a．线性核函数：$k(x,y)=(x\cdot y)$；

b．多项式核函数：$k(x,y)=[(x\cdot y)+1]^q$；

c．径向基核函数：$k(x,y)=exp(-\|x-y\|^2/\sigma^2)$。

本文选择径向基核函数与多项式核函数训练数据。通过仿真分析可知，利用多项式核函数时虽然运算时间较径向基核函数长，但结果更为精确。SVM参数确定后，仿真得到的系统谐波阻抗如图2、图3所示。

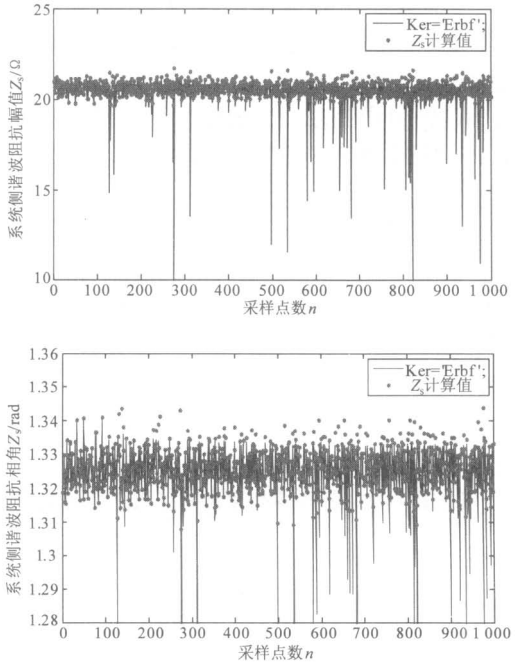
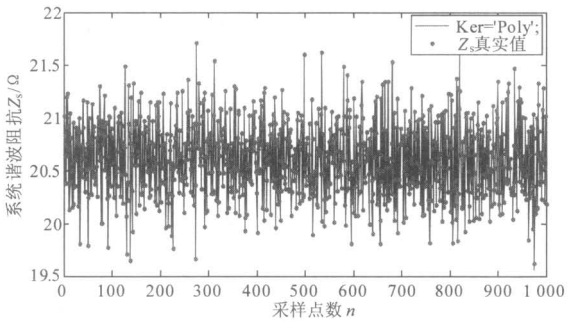


图2 径向基核函数时系统实际阻抗和仿真结果

Fig.2 Power system impedance of design and simulation by ERBF kernel



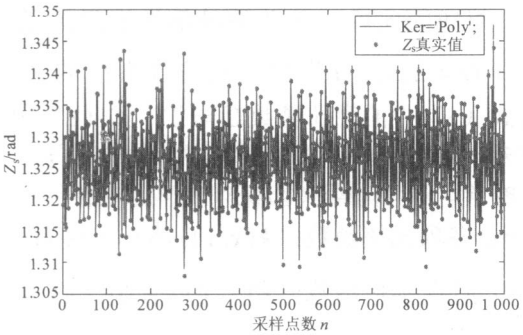


图3 多项式核函数时系统实际阻抗和仿真结果

Fig.3 Power system impedance of design and simulation by POLY kernel

3　对比分析

由上述仿真分析可知，利用多项式（POLY）核函数进行回归时，得到的Z_s与真实值完全相同。用上述同一组PCC点抽样数据，分别采用SVM、波动法、双线性回归法、二元线性回归法进行回归分析[8]，将抽样数据按100个点分段，每段分别进行回归，得出的回归结果如图4所示。

对比表1结果可知：波动法估计方式简单，但其要求负荷在PCC点处产生足够大的谐波波动，并且保证系统侧谐波阻抗不变，该法只能准确估计一端的谐波阻抗；双线性回归法与二元线性回归法根据等值电路图列出方程，利用最小二乘回归法回归系统谐波阻抗，能得到系统侧与用户侧各自的阻抗，但是由于系统谐波阻抗的波动，使得回归方程失去了原有的稳健性，因而在结果上出现了差异。

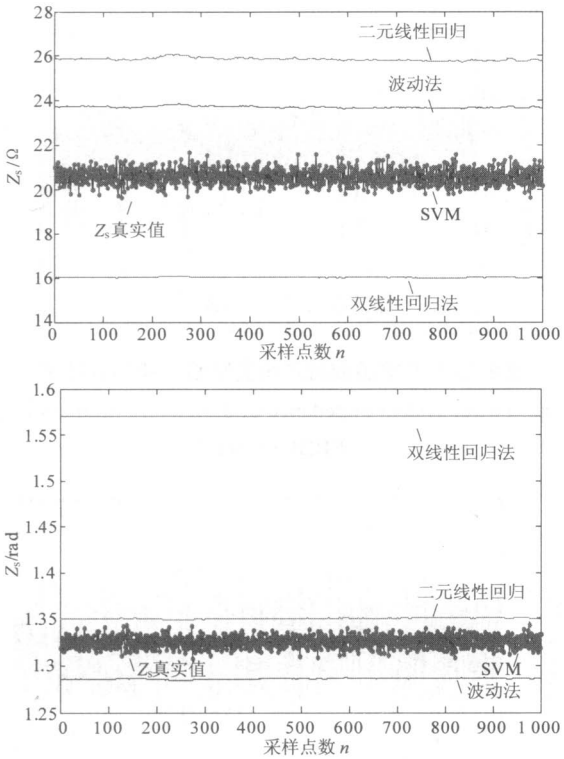


图4 系统谐波阻抗估计值

Fig.4 Estimation of Zs

表1 计算结果对比

Tab.1 Contrast of calculation results

谐波参数	参考值	SVM
Z_{sx}	N（5.0，0.043）	N（5.0，0.043）
Z_{sy}	N（20.0，0.096）	N（20，0.096）
二元线性回归	双线性回归	波动法
N（5.64，0.000 8）	忽略	N（6.66，0.000 8）
N（25.23，0.004 3）	N（16.02，0.000 2）	N（22.75，0.001 9）

4　结论

本文在前人提出的几种“非干预”方法的基础上，提出一种新的估计系统谐波阻抗的方法——支持向量机回归法。仿真结果证明，支持向量机回归法可以准确预测系统侧变化时的谐波阻抗，由于训练 SVM 相当于解线性约束的二次规划问题，SVM 的解是唯一的、全局的和最优的，因而具有较高的预测精度和鲁棒性。而其他几种方法在系统侧变化时误差较大，这是由于波动法、双线性回归法与二元线性回归法都是在假定系统侧谐波阻抗不变的基础上回归系统谐波阻抗。综上所述，可以预见支持向量机回归法对于电网运行方式改变，即系统侧谐波阻抗变化时能够作较准确的回归。

参考文献

[1] Yang H，Porotte P，Robert A. Harmonic emission levels of industrial loadsstatistical assessment[C]. //CIGRE. 1996：36-306.

[2] Chataigner J C. Methods for separating and supply-side harmonic contributions[R]. EDF & CNAM，1996.

[3] 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.

[4] 杜树新，吴铁军. 用于回归估计的支持向量机方法[J]. 系统仿真学报，2003（11）：1580-1586.
DU Shu-xin，WU Tie-jun. Support vector machines for regression[J]. Journal of System Simulation，2003（11）：1580-1586.

[5] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York：Springer，1995.

（下转第 205 页　continued on page 205）

23（2）：38-41.
SONG Jian-cheng，XIE Heng-kun， WANG Yan-xin，et al. Study on phase-sensitive short-circuit protection in underground LV distribution networks based on detecting power factor[J]. Power System Technology，1999，23（2）：38-41.

[3] 宋建成，梁翼龙，孟润泉. 煤矿井下低压电网电流故障保护系统的研究[J]. 电工电能新技术，1994（4）：44-48.
SONG Jian-cheng, LIANG Yi-long, MENG Run-quan. Study on the current fault protective system in underground LV cable networks[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1994（4）： 44-48.

[4] 宋建成，梁翼龙，孟润泉. 矿用隔爆型真空馈电开关中的过电流保护[J]. 继电器，1999，27（5）：24-28.
SONG Jian-cheng，LIANG Yi-long，MENG Run-quan. Over current protection in underground explosion proof vacuum feeder switchgear[J]. Relay，1999，27（5）：24-28.

[5] 冯建勤，宋寅卯. 基于电流采样值的相敏过电流保护[J]. 电力系统及其自动化学报，2006，18（3）：77-80.
FENG Jian-qin，SONG Yin-mao. New type of phase-sensitive overcurrent protection based on sampled value of current[J]. Proceedings of the CSU-EPSA，2006，18（3）：77-80.

[6] 何仰赞，温增银. 电力系统分析[M]. 上册. 武汉：华中科技大学出版社，2006.

[7] 贺家李，宋从炬. 电力系统继电保护原理[M]. 三版. 北京：中国电力出版社，2007.

[8] 游国栋. 基于 PLC 控制的 3.3 kV 移动变电站测控系统的研究[D]. 太原：太原理工大学，2005.
YOU Guo-dong. Study on the measurement and control system of 3.3 kV movable transformer substation based on programmable logic controller[D]. Taiyuan：Taiyuan University of Technology，2005.

[9] Eliasen A N. High-inertia drive motors and their starting characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1980（4）：1472-1482.

[10] 孙波，刘晓明，徐小川，等. 一种负序电流测量装置的设计[J]. 电测与仪表，2006，43（3）：40-42.
SUN Bo，LIU Xiao-ming，XU Xiao-chuan，et al. The design of a negative sequence current measurement device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2006，43（3）：40-42.

[11] 李建奇，罗安，汤赐，等. 一种新型负序基波电流检测方法及其应用[J]. 电力系统自动化，2008，32（15）：71-73.
LI Jian-qi，LUO An，TANG Ci，et al. A novel detecting method for negative sequence fundamental current and its applications[J]. Automation of Electric Power Systems，2008，32（15）：71-73.

[12] 潘松，黄继业. EDA 技术与 VHDL[M]. 北京：清华大学出版社，2006.

收稿日期：2009-11-20；　　修回日期：2009-12-30

作者简介：

张晓明（1985-），男，硕士研究生，研究方向为电力系统自动化、微机继电保护；E-mail：sdust88@126.com

公茂法（1959-），男，教授，工学硕士，主要从事电力系统微机继电保护、测量技术与装置、电力电子技术与应用等方面的研究；

郗忠梅（1971-），女，副教授，博士研究生，主要从事电力系统自动化、电气工程等方面的研究。

（上接第 134 页　continued from page 134）

[6] Smola A J，Scholkopf B. A tutorial on support vector regression[R]. London(U.K): Royal Holloway College, 1998.

[7] Gunn S R. Support vector machines for classification and regression[R]. Southampton：University of Southampton，1998：1-28.

[8] 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.

收稿日期：2009-11-13；　　修回日期：2010-02-24

作者简介：

康　婕（1985-），女，硕士研究生，从事电能质量分析研究；E-mail：kangjie111@yeah.net

解绍锋（1976-），男，副教授，从事牵引供电系统分析、电能质量分析研究；

刘晓菊（1985-），女，硕士研究生，从事电力系统分析研究。