

# 基于支持向量机回归的电力系统负荷建模

崔晓祥<sup>1</sup>, 李娟<sup>2</sup>

(1.江苏省电力公司检修分公司,江苏南京211102; 2.上海施耐德电力技术有限公司,上海201200)

**摘要:**支持向量机(SVM)是当前一种比较流行的学习机,具有良好的理论背景,从结构风险最小化原则出发以快速寻找到全局最优的特点。针对当前负荷建模的不足,提出了运用SVM回归来进行电力系统的非机理负荷建模,并给出了负荷建模的具体步骤。与人工神经网络(ANN)对同一个线路负荷进行建模结果比较表明,基于SVM回归的建模效果优于ANN的建模结果,证明了运用SVM的回归进行电力系统负荷建模的可行性,也为电力系统的负荷建模提供了新的思路和方法。

**关键词:**电力系统;负荷建模;支持向量机回归;有功负荷;无功负荷

**中图分类号:**TM714

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2012)03-0037-02

目前负荷建模方法大致可以分为两种:统计综合法和总体测办法<sup>[1]</sup>。这些方法一般都是基于梯度的寻优,很容易陷入局部最优,不能有效地克服建模的非线性和连续性,因而得到的负荷模型与实际模型有较大的差别,在进行仿真时难以得出准确的结果。针对此问题,文中对支持向量机(SVM)在电力系统中负荷建模的应用进行了研究,通过实例表明采用SVM进行电力系统负荷建模,不但能描述负荷模型的非线性,且容易得到系统的全局最优解,且收敛速度也比较快。

## 1 SVM简介

SVM是由Vapnik在1979年最早提出的一种统计学习方法,以其良好的理论背景,从结构风险最小化原则为学习机器提供了一个崭新的角度。

简单地说,SVM的函数拟合就是用支持向量机对区域中的样本进行回归,由此确定该区域的映射函数,然后根据得到的拟合函数计算该区域中未知样本的取值。为逼近连续函数 $y=f(x)$ ,用函数集合:

$$f(x, a) = w \cdot x + b \quad (1)$$

式中: $w$ 为权系数; $b$ 为阈值; $x$ 为输入向量。定义损失函数如下:

$$\min L(w, b) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |y_i - (w \cdot x_i) - b|_{\xi} \quad (2)$$

约束条件:

$$(w \cdot w) \leq C \quad (3)$$

式中:约束 $(w \cdot w) \leq C$ 定义了结构风险; $(x_i, y_i)$ 为训练样本; $m$ 为训练样本数目。

$\xi$ 不敏感损失函数,定义为:

$$|y_i - (w \cdot x_i) - b|_{\xi} = \begin{cases} 0, & \text{if } |y_i - (w \cdot x_i) - b| \leq \xi \\ |y_i - (w \cdot x_i) - b| - \xi, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

上面的问题等价于:

$$\min \Phi(w, \xi^*, \xi) = \frac{1}{2} (w \cdot w) + C \left( \sum_{i=1}^m \xi_i^* + \sum_{i=1}^m \xi_i \right) \quad (5)$$

式中:常数 $C$ 为误差惩罚因子,控制对超出误差的样本的惩罚程度。

## 2 运用SVM进行电力系统负荷建模

在电力系统负荷建模时,一般把电压和频率或者其偏差作为输入量,将有功和无功(或者有功电流和无功电流)或者其偏差量作为输出量。由于电网频率变化相对较小,因此,通常在建模时只考虑负荷功率随电压的变化特性。对于电力系统的有功和无功来说,它们是内在耦合的,但是为了建模的方便,可以将有功和无功进行解耦,分别对其进行建模<sup>[2]</sup>。

现在假定从一个给定的电力系统按照时间序列不间断地每隔一个周期采集一个点,该点包括电压、有功、无功数据,共采集 $l$ 个: $\{(u_1, p_1, q_1), \dots, (u_i, p_i, q_i), \dots, (u_l, p_l, q_l)\}$ ,其中 $u_i, p_i, q_i$ 分别为采集的电压、有功和无功值。将无功和有功分别进行建模,假设该系统是一个 $n$ 阶系统,系统输入变量为 $\{(u_1, p_1), \dots, (u_i, p_i), \dots, (u_l, p_l)\}$ , $\{(u_1, q_1), \dots, (u_i, q_i), \dots, (u_l, q_l)\}$ 系统的输出变量为 $p_{k+1}$ 和 $q_{k+1}$ ,以这些输入输出数据为基础,采用一定的算法,找到能够满足NARMAX的函数依赖关系:

$$\begin{cases} p_{k+1} = f_p(s_p(k)) \\ q_{k+1} = f_q(s_q(k)) \end{cases} \quad (6)$$

引入回归矢量:

$$\begin{cases} s_p(k) = [p(k), p(k-1), \dots, p(k-n), \\ \quad u(k), u(k-1), \dots, u(k-n)] \\ s_q(k) = [q(k), q(k-1), \dots, q(k-n), \\ \quad u(k), u(k-1), \dots, u(k-n)] \end{cases} \quad (7)$$

则式(6)可表达为:

$$\begin{cases} p_{k+1} = f_{\text{SVM}}(s_p(k), b_p) \\ q_{k+1} = f_{\text{SVM}}(s_q(k), b_q) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $b_p$  和  $b_q$  为阈值。建模的主要任务就是确定  $f_{\text{SVM}}(\cdot)$  和  $f_{\text{SVM}}(\cdot)$  以及  $b_p$  和  $b_q$  的具体值。

把电力系统负荷建模和自回归向量机的问题提法相比较可以发现, 只要把回归矢量  $s_p, s_q$  和输出值  $p_{k+1}, q_{k+1}$  看作 SVM 的训练样本  $(p, u), (q, u)$ , 建模过程就是 SVM 的训练过程。因此电力系统的负荷建模完全可以用 SVM 的技术来解决。

### 3 SVM 在线建模的步骤

运用 SVM 建立电力系统负荷模型的步骤:

(1) 电力系统负荷群模型阶数的确定。对于非线性系统模型阶数, 可以用很多种方法确定, 文中采用损失函数法来确定 (运用此方法得出后面的实例阶数为 3 阶)。

(2) 选择 SVM 核类型及其核参数的确定<sup>[3]</sup>。

(3) SVM 的训练。输入训练样本通过求解一个线性约束的二次规划问题, 得到支持向量及其相应权值。对于输入维数很多的情况下, 采用快速算法如 SMO 等特殊的算法, 可以有效地解决回归函数逼近问题。

(4) 模型校验。通过残差的自相关函数和一步预测误差判断模型的有效性, 用不同的测试集进行交叉测试, 如果误差均较小, 则负荷模型可以接受。

### 4 实例仿真和计算结果的比较

文中对上海市电力公司所属的某变电站下的 2 号出线 (该线路负荷较平稳, 但是时有冲击负荷出现, 因此比较适合检验负荷建模方法的精确性) 所带负荷为建模对象, 以 1 s 为周期, 不间断地采样 300 个点 (包括电压、有功和无功)<sup>[4]</sup>, 其中前 200 个点作为训练样本, 后 100 个点作为模型校验。根据上述方法, 得出该负荷群模型的阶数为 3, 因此采集的数据的 SVM 输入格式为:

$$\begin{cases} s_p(k) = [p(k), p(k-1), p(k-2), p(k-3), \\ \quad u(k), u(k-1), u(k-2), u(k-3)] \\ s_q(k) = [q(k), q(k-1), q(k-2), q(k-3), \\ \quad u(k), u(k-1), u(k-2), u(k-3)] \end{cases} \quad (9)$$

负荷建模的 SVM 输入空间为 6 维, 输出空间为 1 维。利用软件包 LIBSVM, 选取的核函数为 RBF, 其中参数  $C$  选取为 1 000。分别对系统的有功和无功负荷进行训练, 经过训练, 有功负荷建模得到 197 个支持向量, 而无功负荷建模得到 199 个支持

向量, 应用这些 SVM 对负荷进行建模, 并与实际系统的有功和无功输出 (即后 100 点的有功、无功) 相比较, 得出其误差分别为 0.005 8 和 0.001 3<sup>[5]</sup>。

为了显示基于 SVM 回归的负荷建模的效果, 运用 ANN 的 BP 算法对此系统进行有功和无功负荷建模<sup>[6]</sup>, 得到有功和无功的误差分别为 0.050 4 和 0.015 1。从误差的比较可以看出: 相对于 ANN 的负荷建模精度, 基于 SVM 负荷建模精度高出一个数量级。从图 1 和图 2 可以发现, 在线路出现冲击负荷时, ANN 的负荷建模相对于 SVM 有明显的误差, 因此, 基于 SVM 回归的负荷建模是一种非常有效的建模方法。

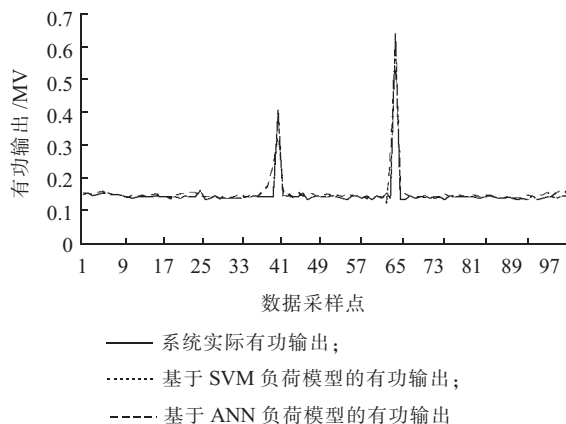


图 1 基于 SVM 和 ANN 负荷建模的有功输出比较

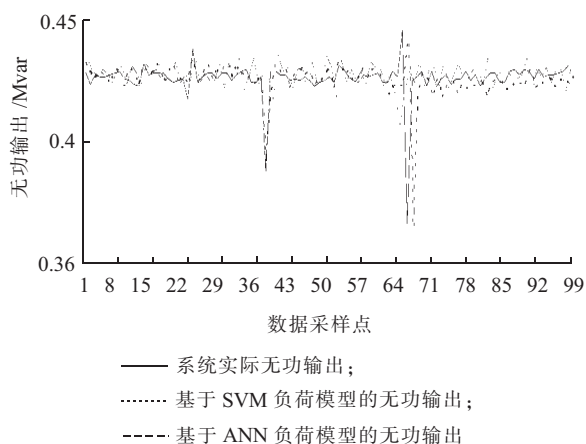


图 2 基于 SVM 和 ANN 负荷建模的无功输出比较

### 5 结束语

文中将 SVM 用于电力系统负荷建模, 与 ANN 对同一线路的负荷群进行建模。结果表明, 基于 SVM 回归的负荷建模的精度明显优于 ANN 的负荷建模。从而表明了应用 SVM 回归进行负荷建模是一种有效的建模方法, 为负荷建模提供了新的途径。

#### 参考文献:

- [1] 牛东晓, 曹树华, 赵磊. 电力负荷预测技术及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

算法和无差拍控制策略,通过移相变压器从电网获得DVR的能量,再通过功率单元的串联输出所需要的补偿电压。在三相平衡和不平衡时都能对系统电压进行很好的补偿,且消除了DVR中的储能元件整流方式引入的谐波影响,同时降低了对LC滤波器中电感的要求,具有较高的实时性和可靠性、良好的动态性能和补偿效果等优点。这种新型DVR控制简单,易于实现,其缺点是采用了较多的功率开关器件和较贵的移相变压器,成本较高。

#### 参考文献:

- [1] 周静,韦统振,赵艳雷,等.低压配电网中单相动态电压恢复器与电力系统之间的能量流动[J].电力自动化设备,2010,30(4):26-30.
- [2] 张国荣,丁明,梁海涛,等.一种应用于单相DVR的检测算法与仿真[J].系统仿真学报,2007,19(4):732-734.
- [3] 杨新华,郭志成.动态电压恢复器电压跌落检测[J].低压电器,2011(5):51-54.
- [4] 马振国,李鹏,赵保利,等.DVR电压波形跟踪无差拍控制方法[J].电力自动化设备,2005,25(3):13-17.

#### 作者简介:

- 吴志坚(1979),男,江苏扬州人,工程师,从事电力系统运行管理工作;
- 徐星星(1987),女,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为电能质量;
- 王宝安(1978),男,江苏扬州人,讲师,从事电能质量方面的研究工作。

## Simulation and Analysis of A New Type DVR for Distribution Network

WU Zhi-jian<sup>1</sup>, XU Xing-xing<sup>2</sup>, WANG Bao-an<sup>2</sup>

(1. Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 225009, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Dynamic voltage restorer (DVR) has good dynamic performance and well regulating function for grid voltage fluctuation. A new type DVR for distribution network is proposed in the paper. And the principle of the new DVR is introduced in detail, including its main circuit structure, detection algorithm and control strategy. Besides, the detailed DVR model is established in PSIM, and simulations of DVR voltage compensation with grid voltage fluctuation are carried on. Simulation results show that the new type DVR has ideal dynamic characteristic and compensation effect.

**Key words:** dynamic voltage restorer (DVR); dq detection algorithm; dead beast control

(上接第38页)

- [2] 李元诚,方廷健,于尔铿.短期负荷预测的支持向量机方法研究[J].中国电机工程学报,2003,23(6):55-59.
- [3] 谢宏,魏江平,刘鹤立.短期负荷预测中支持向量机模型的参数选取和优化方法[J].中国电机工程学报,2006,26(22):17-22.
- [4] 姜惠兰,刘晓津,关颖,等.基于硬C均值聚类算法和支持向量机的电力系统短期负荷预测[J].电网技术,2006,30(8):81-85.
- [5] 牛东晓,贾建荣.改进GM(1,1)模型在电力负荷预测中的应用[J].电力科学与工程,2008,24(4):28-30.
- [6] 康重庆,夏青,沈瑜,等.电力系统负荷预测的综合模型[J].清华大学学报:自然科学版,1999,39(1):8-11.

#### 作者简介:

- 崔晓祥(1979),男,江苏兴化人,工程师,从事电力系统运行、检修工作;
- 李娟(1977),女,甘肃兰州人,工程师,从事电力系统运行、研发工作。

## Load Modeling Based on SVM in Power System

CUI Xiao-xiang<sup>1</sup>, LI Juan<sup>2</sup>

(1. Maintenance Branch of Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 211102, China;

2. Shanghai Schneider Electric Technology Co.Ltd., Shanghai 201200, China)

**Abstract:** Currently, the support vector machine (SVM) is used widely for its good theoretical background and optimizing characteristic based on structural risk minimization principle. For the deficiency of current load modeling, a non-mechanism load modeling method based on SVM regression is put forward and the specific steps of load modeling are also provided. Compared with the modeling results of the same line load using artificial neural network (ANN), the load modeling results using SVM regression is better. Thus, the feasibility of the proposed load modeling method based on SVM is proven, which is also the new idea and method for load modeling in power system.

**Key words:** power system; load modeling; support vector machine (SVM) regression; active load; reactive load