

电力系统负荷频率控制 LFC的小波神经网络辨识

李正, 杜成涛, 杨文焕

(上海理工大学电气工程学院, 上海 200031)

摘要: 建立了非线性的电力系统负荷频率控制 LFC模型,利用递归 NARMA 模型的小波网络的实现方法对 LFC模型进行了辨识,利用 Akaike's的最终预测误差准则 FPE和信息准则 AIC,进行了隐层节点数目和反馈阶次的计算,理论和仿真表明辨识模型可取得较好效果。

关键词: 小波神经网络; 负荷频率控制; NARMA 模型

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)09-0034-03

0 引言

小波的起源可追溯到 20 世纪初,但小波分析的形成与发展还是在 80 年代后期开始,它是数学理论中调和与分析技术发展的最新成果。1992 年,法国信息科学研究所的 Zhang Qinghua 等提出了小波神经网络的概念和算法。小波神经网络的基本思想是用小波元代替神经元,通过仿射变换建立起小波变换与网络参数之间的连接。

随着电力技术的发展,发电机组的容量日趋增大,电网结构及其运行方式日益庞大和复杂。电力系统中的各个环节存在着非线性和多变量的交叉与融合,使系统的数学模型更加难以建立和求解,并且控制器控制参数的调整也很困难,即使对系统进行简化,对应不同时刻和不同的运行方式,也难以找到合适的控制器参数。因此有必要研究新的更有效的负荷频率辨识和控制方法。本文将小波神经网络应用于电力系统负荷频率辨识中。

1 小波神经网络的辨识模型

1.1 小波神经网络

设函数 $L^2(R)$ $L^1(R)$,且其 Fourier 变换 $\hat{f}(0)=0$,由 T_k 经伸缩和平移得到一族函数:

$$W_k(x) = (\det D_k)^{-1/2} [D_k x - t_k] \quad (1)$$

$$\{t_k \in R^n, D_k = \text{diag}(d_k), d_k \in R^n, k \in Z\}$$

其中: d_k 和 t_k 分别是伸缩和平移矢量。为母小波, W_k 为分析小波。如果 W_k 的 Fourier 变换满足允许性条件,则称母小波 W 为允许小波,允许性条件是下式:

基金项目: 上海理工大学青年科研基金 (03XQN008)

$$C = \int_0^+ \frac{|f(\cdot)|^2}{d} d < \quad (2)$$

如果母小波 W 为允许小波,则可以从连续小波变换中恢复出原始信号,即有如下连续小波分解和重构式:

$$W(d, t) = \int_{R^n} f(x) (\det D)^{-1/2} [Dx - t] dx \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{1}{C} \int_{R^n} \int_{R^n} W(y, t) (\det D)^{-1/2} [Dx - t] dy dt \quad (4)$$

如果 W 满足框架特性:存在两个常数 C_{\min} 和 C_{\max} ,对于所有 $L^2(R^n)$ 中的 f ,满足

$$C_{\min} \int |f|^2 < \sum | < f, W_k > |^2 < C_{\max} \int |f|^2 \quad (5)$$

在求和中, $<, >$ 表示 $L^2(R^n)$ 的内积,求和范围为整个簇中的所有元素。那么就可以从所有框架 $\{W_k\}$ 中的元素的线性组合中恢复出原始信号。

如果 $C_{\min} = C_{\max} = C$,那么框架 $\{W_k\}$ 是紧支框架,有下式成立:

$$f(x) = C^{-1} \sum | < f, W_k > |^2 : \{ \quad \} \quad (6)$$

将式 (6) 和神经网络联系起来,可得小波神经网络:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N w_i \det(D_i)^{-1/2} [D_i x - t_i] \quad (7)$$

考虑到式 (7) 的实用性,将其改为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N w_i [D_i x - t_i] + \bar{g} \quad (8)$$

\bar{g} 是用来处理在有限域中的非零均值函数,在小波分解中,只需确定 $W(d, t)$;相反,在小波网络中,需要确定权值 w_i ,伸缩矢量 D_i 和平移矢量 t_i 。可以采用类似于多层前馈神经网络的结构来实现。常用的小波函数有墨西哥草帽函数, Morlet 小波, Meyer 小

波, Daubechies小波等。这些函数有优良的时频局域性,基本上满足允许性条件,通过选择适当的伸缩矢量 d_k 和平移矢量 t_k , 可使 满足框架特性。

1.2 小波神经网络辨识模型

Cybenko, Funahashi, Hornik 等人分别用不同的方法证明了一个共同的结论,即仅含一个隐层的前馈网络能以任意精度逼近定义在 R^n 中的一个紧集上的任意非线性函数。采用隐层单元作用函数为有界连续函数。可以采用 Sigmoid 函数,也可以采用有界连续的小波函数。可将该理论应用于多层前馈小波神经网络。

可以采用非线性自回归滑动平均模型 NARMA (nonlinear auto-regressive moving average model) 进行系统辨识:

$$y_m(k) = f_m(y_m(k-1), \dots, y_m(k-n); u(k-1), \dots, u(k-m)) \quad (9)$$

其中: $u(k)$ 为系统的控制输入; $x_m(k)$ 、 $y_m(k)$ 分别为辨识模型的状态和输出,运用了递归结构, $f_m(\cdot)$ 是动态的,称为递归 NARMA 模型。改写成

$$y_m(k+1) = f_m(y_m(k), \dots, y_m(k-n+1); u(k), \dots, u(k-m+1)) \quad (10)$$

$f_m(\cdot)$ 是关于输入输出变量的非线性多项式。将其分离为

$$y_m(k+1) = h_m(y_m(k), \dots, y_m(k-n+1); u(k-1), \dots, u(k-m+1)) + g_m(y_m(k), \dots, y_m(k-n+1); u(k-1), \dots, u(k-m+1)) \cdot u(k) \quad (11)$$

在式(11)中, $h_m(\cdot)$ 和 $g_m(\cdot)$ 可分别采用一个递归小波神经网络来实现。把控制量 $u(k)$ 从式(10)中分离出来,可以方便以后做 NARMA 小波网络控制器。

1.3 选择小波神经网络的隐层节点数目和反馈阶次

选择小波神经网络的隐层节点数目和反馈阶次是个复杂的工作,本文利用 AIC 准则和 FPE 准则来选择隐层节点数和反馈阶次,还有其它确定模型阶次的方法,如 Schwartz 的 BIC 定阶准则(1978), Ris-sanen 的最小描述长度 MDL 定阶准则(1978), Carr 的 L_1 和 L_2 定阶准则(1981)。

AIC 准则即赤池信息量准则, FPE 准则即最终预测误差准则,是由赤池弘次(H. Akaike)于 1973 年在研究信息论特别是在解决时间序列定阶问题时提出来的^[2]。这是一个在统计分析特别是在统计模型的选择中有着广泛应用的准则。其显著特点之一是“吝啬原理”的具体化。FPE 和 AIC 定义如下:

$$FPE = E(1 + \frac{Q}{M}) / (1 - \frac{Q}{M}) \quad (12)$$

$$AIC = \log(E) + \frac{2Q}{M} \quad (13)$$

其中: E 是代价函数, M 是训练样本的长度, Q 是网络中需要调整参数的个数。

赤池建议,当欲从一组可供选择的模型中选择一个最佳模型时, AIC 和 FPE 为最小的模型是最佳的。当两个模型之间存在着相当大的差异时,这个差异在式(12)和式(13)右边第一项得到表现;而当两个模型间的差异几乎没有时,则第二项起作用,从而参数个数小的模型是好的模型。

对于递归 NARMA 模型的小波神经网络,为了简便计算,输出量和控制量的反馈阶次都相同,模型阶次为 $n = m = n$, m 为输出量的反馈阶次, n 为控制量的反馈阶次,则 $Q = 4 * n * N + 4 * N + 2$ 。选择隐层节点数 N 和模型阶次数 n ,同时使得 FPE 和 AIC 达到最小。

2 仿真研究

2.1 电力系统负荷频率控制(LFC)模型

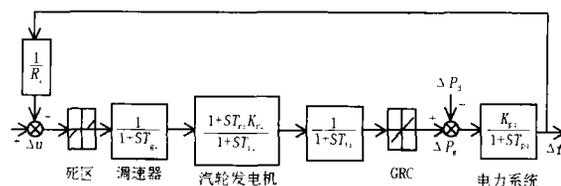


图 1 电力系统负荷频率控制仿真模型

Fig 1 Simulation model of power system load frequency control

电力系统是复杂非线性动态系统。由于电力系统在正常运行时仅仅产生较小负荷变化,常常采用线性化模型表示运行点附近的系统动态,电力系统负荷频率控制仿真模型如图 1 所示。系统频率 $f = 50$ Hz,电力系统增益 $K_{pi} = 120$ Hz/pu,电力系统时间常数 $T_{pi} = 20$ 0 s,再热器增益 $K_{ri} = 0.5$,再热器时间常数 $T_{ri} = 10$ 0 s,汽轮发电机时间常数 $T_{ti} = 0.3$ s,调速器时间常数 $T_{gi} = 0.08$ s,调速器速度调节 $R_i = 2.4$ 。 P_g 为发电机输出功率变化量; u 为控制变化量; f 为频率变化量; P_d 为负荷扰动^[1]。

2.2 电力系统小波神经网络辨识仿真

本文用 Matlab 进行了仿真。第一,选用墨西哥草帽函数作为小波函数,编写了它的 S 函数。第二,编写了墨西哥草帽函数一阶偏导的 S 函数。第三,

用 network 函数,建立了递归 NARMA 模型的小波神经网络结构。第四,用 Simulink 建立了电力系统负荷频率控制仿真模型,产生了训练数据。 P_d 为负荷扰动变化量, u 为控制变化量,用随机函数产生一系列方波来模拟负荷扰动和控制变化量,得到一系列的输出量,即频率变化量 f_o 。第五,

表 1 N 和 h 与方式号的关系

Tab 1 Relations between N and h

方式号	$h=2$	$h=3$	$h=4$
$N=8$	1	2	3
$N=9$	4	5	6
$N=10$	7	8	9

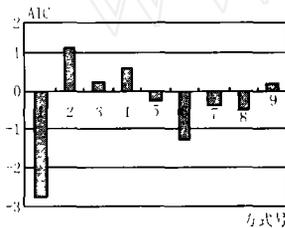


图 2 AIC 信息准则

Fig 2 Information standard of AIC

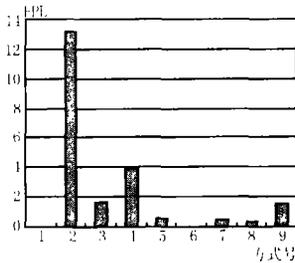


图 3 最终预测误差准则 FPE

Fig 3 Final forecasted error standard of FPE

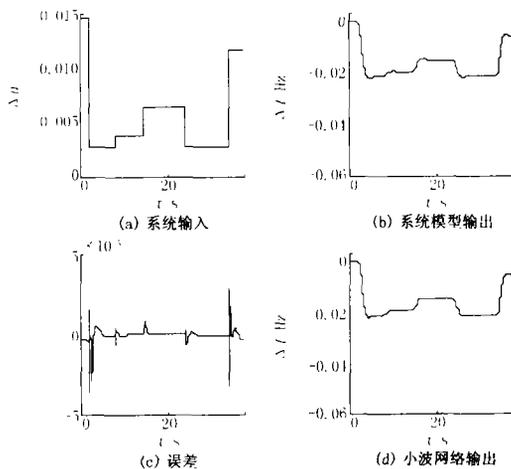


图 4 测波小波神经网络辨识模型

Fig 4 Recognition model of forecasted wavelet neural network

确定 NARMA 模型的小波神经网络的隐层节点数目 N 和反馈阶次 h 。本文建立了 9 种方式号,如表 1 所示。如方式号为 1,表示采用了隐层节点数目为 8 个,输入量 u 反馈阶次和输出量 f 反馈阶次都为 $h=2$,分别根据式 (12)、式 (13) 计算了 9 种方式号下 FPE 和 AIC 值,如图 2、图 3 所示。从图 2 中看出方式号为 1 的 AIC 值最小,从图 3 中看出方式号 1、6 的 FPE 最小。方式号为 2,即隐层节点数目为 8 个,反馈阶次都为 3 有较差的效果。鉴于计算量大,没有计算这 9 种方式外的情况,可能存在其它更好的隐层节点数目和反馈阶次组合。第六,对方式号为 1 的情况进行了详细的仿真,图 4 表示测试小波神经网络辨识模型,从图 4(c) 可见,系统模型输出和小波网络的输出之差在 10^{-5} 数量级。总之,可以看出采用递归 NARMA 模型的小波神经网络来辨识电力系统负荷频率控制,可以取得较好的效果。

3 结论

本文建立了非线性的电力系统负荷频率控制 (LFC) 模型,利用递归 NARMA 模型的小波网络的实现方法对 (LFC) 模型进行了辨识,并进行了隐层节点数目和反馈阶次的计算。仿真实验表明,递归 NARMA 模型的小波网络辨识方法可以取得较好效果。

参考文献:

[1] 李正. CPS/DCS 标准在大区互联电网自动发电控制 AGC 中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15 (2): 27-32
 LI Zheng Application of AGC Control Strategy Based on CPS/DCS Standards in Interconnected Power Systems [J]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2003, 15 (2): 27-32
 [2] Akaike H. A New Look at the Statistical Model Identification [J]. IEEE Trans on Automation Control, 1974, 19: 716-723.

收稿日期: 2005-09-23; 修回日期: 2006-01-04

作者简介:

李正 (1974 -), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为电力电子及电力拖动、电力系统自动化; E-mail: soft1976@sina.com

杜成涛 (1974 -), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为智能交通自动化;

杨文焕 (1954 -), 男, 教授, 研究方向为电力电子及电力拖动。

(下转第 44 页 continued on page 44)

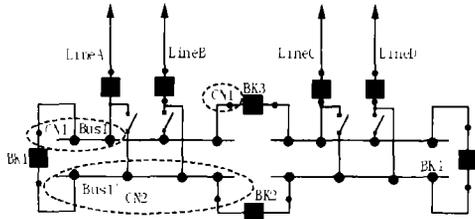


图 5 220 kV 变电站电气接线图

Fig 5 220 kV substation electric wiring diagram

对于第二类断路器的分析如图 5 所示,按照上述方法可得母联断路器 BK1 为第二类断路器,用 I_k 作为流经 BK1 的短路电流,和遮断容量相比较。

3 结论与展望

随着对开放式系统需求的日益增加,新一代的 EMS 系统及其应用软件将按照 IEC61970 标准运行和开发。本文介绍的基于 CM 的短路电流实时监控软件正是以开放式应用软件为目的而设计的,用 CM 模型来定义程序中用到的类。考虑到软件的实时性要求,在设计过程中,坚持速度优先、兼顾精度的设计理念。此外,本软件对于断路器上短路电流的计算,根据 CM 中类的定义及其关系,提出了一种新的可行方法。

参考文献:

- [1] 于尔铿,刘广一,周京阳. 能量管理系统 [M]. 北京:科学出版社,1998
YU Er-keng, LU Guang-yi, ZHOU Jing-yang Energy Management System [M]. Beijing: Science Press, 1998
- [2] IEC 61970, Energy Management System Application Program Interface (EMS2API), Part I CC-API Guidelines Preliminary Draft [S].
- [3] IEC 61970, Energy Management System Application Program Interface (EMS2API), Part 301: Common Information Model (CM) Base Draft Revision 5 [S].
- [4] IEC 61970, Energy Management System Application Program Interface (EMS2API), Part 401: CIS Schema Draft Revision 2 [S].

收稿日期: 2005-12-14; 修回日期: 2005-12-29

作者简介:

王婷婷 (1982 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析; E-mail: wzwangtingting@163.com

许旭锋 (1981 -), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统规划。

Real-time check of circuit breaker interrupting capacity based on CM

WANG Ting-ting, XU Xu-feng

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A CM based real-time short circuit current check application is introduced in this paper, as well as its specified structure, critical steps of the algorithm and the implementation. And a new method based on CM database that calculates the breakers short circuit current is illustrated by examples. Considering energy management system's present operation state, this software complies with Standard IEC61970 to satisfy the development of the opening EMS, which is a sort of plug-in EMS software.

Key words: CM; real-time; circuit breaker interrupting capacity; short-circuit current

(上接第 36 页 continued from page 36)

Load frequency control identification using wavelet neural networks in power system

LI Zheng, DU Cheng-tao, YANG Wen-huan

(College of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200031, China)

Abstract: This paper builds a load frequency control model in power system and identify this model using NARMA of WNN. The numbers of neurons in layer and the feedback orders using the Akaike Final Prediction Error and its Information Criterion are selected. Simulations shows that the method is highly effective.

Key words: wavelet neural networks; load frequency control; NARMA model