基于递归连续小波变换的电力系统振荡模式辨识

李国庆,王 丹,姜 涛,陈厚合
(东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

摘要:提出一种基于递归连续小波变换的电力系统低频振荡模式辨识新方法。首先,探讨电力系统振荡模式辨识中小波系数选择的基本准则;然后,引入最小二乘支持向量机,通过对信号两端拟合延拓,消除小波变换中固有的边缘效应,改善小波辨识的准确性;在此基础上,将小波辨识与递归最小二乘相结合,递归更新振荡频率和阻尼比,实现电力系统模态参数的动态追踪。IEEE 68 节点系统仿真数据和南方电网实测数据的辨识结果验证了所提方法的有效性和可行性。

关键词:电力系统;低频振荡;连续小波变换;边缘效应;最小二乘支持向量机;递归最小二乘
中图分类号:TM 712 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.002

0 引言

随着电网互联规模不断扩大,电力负荷日益增加,可再生能源大规模接入,区域间功率振荡已成为限制区域间输电能力、威胁电网安全稳定运行的重要因素之一[1-3]。因此,准确地识别出电力系统振荡模式对电网在线安全评估和稳定控制具有非常重要的意义[3]。

为有效分析电力系统的低频振荡模式,长期以来,特征值分析法在电力系统中得到了广泛应用[1-4]。该方法借助电力系统的潮流方程和机电暂态模型,建立电力系统的微分代数方程;将该微分代数方程在系统给定运行点处线性化;计算线性化后系统状态矩阵的特征值;针对所计算的特征值,再依据李雅普诺夫第一定理分析系统的小扰动稳定性。该方法简单、有效,但在应用过程中受系统模型精度和规模限制,不能满足电力系统在线分析的需要。因此,该方法多用于电力系统的离线安全稳定研究。

广域测量系统 WAMS(Wide-Area Measurement System)的大规模应用[5],为基于广域实测信号的电力系统低频振荡模式辨识提供了可能[6]。目前,常用于辨识电力系统低频振荡模式的方法有 Kalman 滤波法[7]、希尔伯特-黄变换 HHT(Hilbert-Huang Transform)[8-9]、Prony 算法[10-11]、连续小波变换 CWT(Continuous Wavelet Transform)[14-20]等。其中,Kalman 滤波算法计算速度快,能消除噪声的影响,且对不同的输入信号适应性好,但该方法无法反映电力系统的阻尼衰减特性[7];HHT 以经验模态分解 EMD(Empirical Mode Decomposition)为核心,适用于非平稳信号的分析,但本身也存在过冲现象、端点效应等缺陷[9];Prony 分析方法是目前非常成熟的电力系统低频振荡模式辨识方法,该方法已广泛应用于基于广域测量信息的电力系统低频振荡模式辨识中[10-13]。但运行和研究人员对电力系统低频振荡机理进行深入研究后发现:电力系统的低频振荡不仅有平稳振荡,还包括非平稳时变振荡[11]。而 Prony 算法应用的假设前提是:振荡系统是一个非时变的系统,且振荡过程可以用线性模型近似[11]。而对于一个频率和阻尼比随时间变化的非平稳振荡过程,该方法的假设前提不成立,因此将 Prony 算法应用于电力系统的非平稳振荡辨识会存在一定缺陷。

作为分析非平稳信号的有力工具,小波变换通过适当地选取小波参数调整时频窗口,能够灵活、精确地将信号在时-频域内展开,进而在每个独立的时间窗口估算各振荡模态分量的频率和阻尼比,是典型的块处理方法[15]。该方法可适用于非平稳信号的分析,能够准确辨识出各振荡时段的模态参数,因而被广泛应用到电力系统低频振荡模式辨识中[14-20]。但在采用小波分析方法来辨识系统的主导振荡模式时,仍有以下问题亟需解决:①小波分析的边缘效应[19],该问题是小波变换的固有问题,边缘效应的存在易导致辨识信号两端的计算结果不准确;②用于振荡模式辨识的小波变换属于块处理法,块处理法在动态追踪时计算量大,且占用较大的储存空间,不利于电力系统振荡模式的动态追踪。

针对上述不足,本文首先采用最小二乘支持向量机 LS-SVM(Least Squares Support Vector Machine)[22],在保留原始信号的带宽和频率特性的基础上,对信号进行拟合延拓,消除边缘效应影响,提高小波端部计算的准确性;此外,在准确选择小波参数的基础上,

收稿日期:2015-09-05;修回日期:2016-06-21
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377016,51477027);长江学者和创新团队发展计划(IRT1114);吉林省科技发展计划(20130206038GX,20140101080JC)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377016,51477027),Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University(IRT1114) and Jilin Provincial Science and Technology Plan Program(20130206038GX,20140101080JC)

将连续小波变换与递归最小二乘法 RLS(Recursive Least Squares)相结合，通过 RLS 对小波系数的模对数和相位递归拟合更新，克服小波变换作为块处理法的一些不足，实现模态参数的动态追踪。最后，将所提方法应用于 IEEE 68 节点系统和南方电网中进行分析、验证。

1　小波变换理论

1.1　连续小波变换

连续小波变换的原理是将信号通过一系列基函数表示出来，使其在时域和频域内分别展开。该基函数是由母小波经过一系列伸缩和平移变换得到的。对于一个电力系统的振荡信号，可以由一系列的阻尼正弦信号表示为：

$$x(t)=A\mathrm{e}^{-\zeta\omega_n t}\cos(\omega_d t+\theta) \tag{1}$$

其中，A 为幅值；ω_n 为无阻尼振荡频率；$\omega_d=\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$ 为有阻尼振荡频率；θ 为相位；ζ 为阻尼比。其连续小波变换形式为[14]：

$$W_x(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty}x(b)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}b \tag{2}$$

其中，$\psi(t)$为母小波；a 为伸缩因子，它的每个值对应着不同的频率，且与对应频率负相关；b 为平移因子；* 表示复共轭。

考虑到连续小波变换对信号解耦能力和时频域分解能力的需要，本文选择 Morlet 小波作为基小波进行分析，其形式为：

$$\psi(t)=\frac{1}{\sqrt{\pi f_b}}\mathrm{e}^{-t^2/f_b}\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_c t} \tag{3}$$

对于某一模态频率 f_i 对应的尺度 $a=a_i$，时域和频域带宽分别为：

$$\Delta t_\psi=(\sqrt{f_b}f_c)/f_i \tag{4}$$

$$\Delta\omega_\psi=f_i/(\sqrt{f_b}f_c) \tag{5}$$

其中，f_b 为小波带宽参数；f_c 为小波中心频率；f_i 为相应的模态频率，与 a_i 相对应。

将式(1)和(3)代入式(2)中做内积，可得到 Morlet 连续小波变换形式为：

$$W_\psi(a,t)=\frac{\sqrt{a}}{2}A\mathrm{e}^{-\zeta\omega_n t}\psi^*(a\omega_d)\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_d t+\theta)} \tag{6}$$

通过选定模态频率对应的尺度系数 $a=a_0$，可得到包含该模态信息的小波系数，相应的小波系数模对数 B 和相位 C 分别为：

$$B=\ln\left|W_\psi(a_0,t)\right|=-\zeta\omega_n t+\ln\left(\frac{\sqrt{a_0}}{2}A\left|\psi^*(a_0\omega_d)\right|\right) \tag{7}$$

$$C=\mathrm{Arg}(W_\psi(a_0,t))=\omega_d t=\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\,t \tag{8}$$

其中，Arg(·)表示角度。

由式(7)和(8)可以看出：特定尺度下的小波系数模对数对时间的函数及相位对时间的函数均为一次函数，其微分形式分别为 $\alpha=-\zeta\omega_n$、$\beta=\omega_d=\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$，表达式中仅含有频率和阻尼比。因此，对应的模态频率和阻尼比可用小波系数的模对数和相位的微分形式表示：

$$f=\sqrt{\alpha+\beta}/(2\pi) \tag{9}$$

$$\zeta=-\alpha/(2\pi f) \tag{10}$$

如前所述，含有多个模态的信号可以由各个模态的线性组合表示为：

$$x(t)=\sum_{i=1}^{N}A_i\mathrm{e}^{-\zeta_i\omega_{ni}t}\cos(\omega_{di}t+\theta_i) \tag{11}$$

其对应的小波变换为：

$$W_\psi(a,t)=\frac{\sqrt{a}}{2}\sum_{i=1}^{N}A_i\mathrm{e}^{-\zeta_i\omega_{ni}t}\psi^*(a_i\omega_{di})\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_{di}t+\theta_i)} \tag{12}$$

由于小波变换本身的带通性质，小波变换相当于用一系列基波确定的滤波器对信号进行带通滤波。对于某一尺度系数 $a=a_i$(与频率相对应)下的基波 $\psi^*(a_i\omega_{di})$，只有包含该模态频率信息的自由响应信号才能通过该基波。因此，当 $a=a_i$ 时，在相邻模态频率间隔比较大的情况下，第 i 阶模态 f_i 对小波系数的贡献最大，其他模态对该尺度下的小波系数的幅值影响很小，可以忽略不计，得到仅含该阶模态信息的小波系数为：

$$W_{\psi i}(a_i,t)=\frac{\sqrt{a_i}}{2}A_i\mathrm{e}^{-\zeta\omega_{ni}t}\psi^*(a_i\omega_{di})\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_{di}t+\theta_i)} \tag{13}$$

类似上述过程，通过特定的尺度系数 a 可得到对应该模态信息的小波系数。最后，再由式(7)—(10)计算出各振荡模式的频率和阻尼比。

1.2　小波参数的选择

在将连续小波变换用于辨识电力系统模态参数时，小波参数选择的合理与否，直接关系到时、频窗口的大小，进而影响到时–频域的分辨率，是影响小波辨识准确性的关键因素之一[14]。为此，本节有必要先对小波变换中的中心频率 f_c、带宽参数 f_b 和伸缩因子 a 的选择进行探讨。

在电力系统低频振荡分析中，运行人员所关心的区域间振荡频率通常位于 0.2~1 Hz[3]。在此借鉴文献[14]所提出的小波中心频率选择需接近于所研究系统的振荡频率的准则。本文在采用小波分析方法辨识系统的振荡频率时，选择小波辨识的中心频率位于 0.3~0.6 Hz。在对含多个振荡模式的信号进行分析时，假设相邻模态频率之间的距离较大，此时相邻模态间小波系数的影响可以忽略不计。但若两相邻振荡模式间的频率相差较小时，无法忽略相邻频率信号的影响，需考虑相邻振荡频率对模态参数辨识结果的影响。因此，小波参数的选择需要考虑到小波变换的解耦能力以保证消除各振荡模式间的相互影

响。由式(5)可以看出:对于某一模态频率,在中心频率 f_c 已选定的情况下,适当地提高带宽参数 f_b 可以减小频域带宽,由此减小2个模态频率之间的联系,进而增加小波变换的解耦能力。

以图1中信号为例,其包含的2个振荡模式分别为:模式1,$A_1=1.0$,$\theta_1=10°$,$f_1=0.6$ Hz,$\zeta_1=14.8\%$;模式2,$A_2=1.0$,$\theta_2=20°$,$f_2=0.8$ Hz,$\zeta_2=8.97\%$。

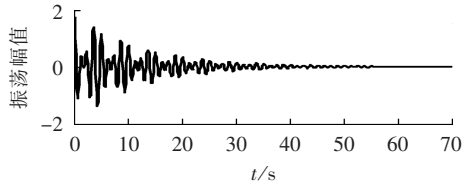


图1 含两阶模式的合成信号

Fig.1 Compound signal of two oscillation modes

对图1所示信号进行小波变换,结果如图2所示。图2为 $a_1=8$ 处相同的中心频率 $f_c=0.6$ Hz 下取不同带宽参数 f_b 计算得到的小波系数模对数,其中 f_a 为系统的振荡频率。显然,由图2可知:带宽参数的增加可以减小相邻两频率间的联系,得到比较理想的计算结果。因此,对于识别振荡模态相对密集的信号,可通过适当增加带宽参数以保证小波变换的解耦能力,进而提高小波计算的准确性。本文参考文献[14],尺度因子和模态频率需满足如下关系:

$$a=(f_c/f_i)\Delta t \tag{14}$$

其中,Δt 为采样周期;f_i 为相应的模态频率。由式(14)可以看出,在中心频率 f_c 和 Δt 已知的情况下,根据所关注的电力系统振荡频率范围就可以确定 a 的范围。

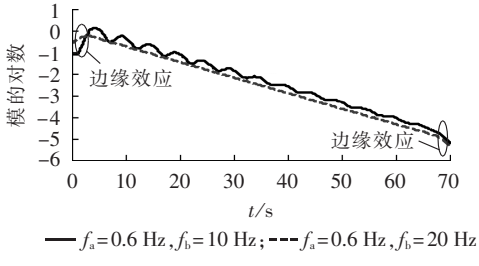


图2 合成信号小波变换在 $a_i=8$ 对应的小波系数的模对数

Fig.2 Logarithm plot of wavelet coefficients corresponding to $a_i=8$

2 小波变换的边缘效应

需要指出的是:图2中虚线为解耦后小波脊处的小波系数模对数,其中两端圆线标识部分并非直线,存在着明显的衰减现象,该现象即为小波变换的边缘效应。由式(2)可看出:小波变换的理论积分区间是 $(-\infty,+\infty)$,而在实际计算中,信号的采样长度是有限的,因此两端的计算结果必然会存在误差,导致边缘效应的出现。图3给出了小波变换出现边缘效应的基本原理图,从图3(a)中可看出:假设小波的时域带宽为 Δt_1,在计算 $t=t_i$ 时,轴线右侧小波覆盖部分已不存在信号,这部分积分将变为零,对应信号为无限长时,同样位置的积分相对较小,导致小波变换在信号两端计算结果与理论值不符,影响计算的准确性。此外,由式(4)可知,为改善小波变换的解耦能力而增大时域带宽参数,会进一步加剧边缘效应。因此,对信号进行小波变换时,边缘效应问题不容忽视。

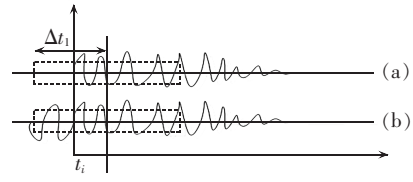


图3 边缘效应原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of edge effect

数据延拓是解决边缘效应的有效方法之一,该方法如图3(b)所示:将信号两端延拓后,受边缘效应影响的区域含有填充的虚拟量测信息,这部分积分将不再是零。对改进后的数据进行连续小波变换,再截取原始信号长度处的数据进行辨识,既保留了原信号的相关信息,又降低了边缘效应的影响。

信号延拓是处理边缘效应的有效方法之一,信号延拓的方法有很多种,如零延拓、周期延拓等[19]。其中零延拓是在进行滤波时,将超出原始边界的数据用零来代替,该方法应用简单,但这种方式带来了2个问题[22]:① 如果要求小波变换后保持数据量不变,那么补零延拓是不能完全重构信号的;② 补零延拓会使边界信号产生突变,导致延拓后的信号中含有高频分量。周期延拓是将有限的原始信号作为一个周期,拓展到整个时间轴上,如果信号首尾特征有很大的差异,周期延拓将引入高频信息,使数据段边界处的时频信息误差较大[22]。由于电力系统低频振荡信号多属于衰减振荡信号,信号两端特征差异较大,因此采用上述2种方法对电力系统的低频振荡信号延拓时,均会在信号两端产生突变,影响信号辨识结果的准确性。LS-SVM对信号进行延拓能够保证边界信号的连续性,且由于该方法对输入数据进行延拓后能够保留原信号的频率及带宽特性[19],适用于处理衰减的振荡信号,因此本文借鉴文献[21]的方法引入LS-SVM对所辨识的电力系统振荡信号进行拟合延拓。

SVM是一种基于结构风险最小化原理的新型机器学习算法,可较好解决小样本、非线性、高维数、局部极小值等问题,弥补了人工神经网络泛化能力差的缺陷[21]。LS-SVM是SVM的一种拓展,通过引入最小二乘线性系统,采用等式约束条件代替SVM中

的不等式约束，将二次规划问题转换为线性方程组的求解问题，降低计算难度。以图 1 所示信号为例，原始信号采样点数为 700 个。若采用 LS-SVM 对该数据两端进行拟合延拓，前后各延拓 140 个点，如图 4 所示。对延拓后的信号进行连续小波变换，将延拓前、后的结果进行对比，结果如图 5 所示。图中结果表明：经 LS-SVM 延拓后，可有效消除边缘效应所带来的辨识缺陷，得到较为满意的辨识结果。

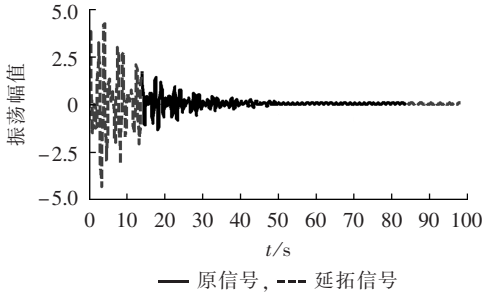


图 4 数据两端预测延拓图

Fig.4 Predicted extension at both ends of data

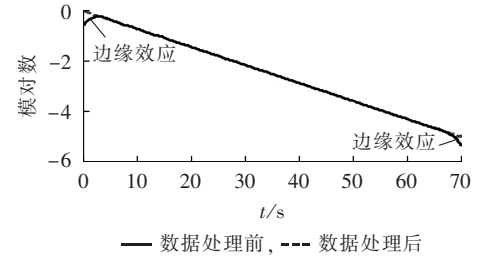


图 5 数据处理前后 a_i=8 处对应的小波系数的模对数图

Fig.5 Logarithm plot of wavelet coefficients corresponding to a_i=8, before and after data processing

3 基于递归最小二乘法的小波变换

传统的小波分析方法属于块处理法，该方法对每个时间窗口的参数估计都是独立的，计算量大，会占用大量存储空间，不利于实现电力系统振荡模式的动态追踪。为实现系统振荡模式的动态追踪，本文将递归最小二乘法与小波变换相结合，在进行模态参数估计时，利用当前时刻的量测量及上一时刻的估计值估计当前时刻的模态信息，可有效减小动态估计的计算量。

由式(9)和(10)可见：利用小波变换计算模态参数时，振荡模式的频率和阻尼比是通过某一尺度(与频率相对应)对应的小波系数的模对数及相位分别对时间的一次函数的斜率来求取。采用 RLS 进行递归计算的过程中，通过新时刻的输入数据对前一时刻的估计值进行修正，更新每一时刻的模态参数，实现模态参数的动态追踪。对于某一尺度下的小波系数，由式(7)和(8)可知，其模对数和相位分别为时间的一次函数，因此取时间 t 处的代数方程：

$$a_1(t)x_1+a_2(t)x_2=b(t) \tag{15}$$

其中，$a_j(t)(j=1,2)$以及 $b(t)$为已知量，$x_j(j=1,2)$为待求值。以式(7)表示的小波变换模对数为例，$b(t)=B(t)$，$a_1(t)=t$，$a_2(t)=1$，待求的斜率值 $a=x_1$。则待求解方程转换为：

$$tx_1+x_2=B(t) \tag{16}$$

取递归计算的时间窗口长度为 1 s，首先在时间窗口 0~1 s 内对 α、β(记为 $\boldsymbol{x}$)分别进行估算，取超线性方程组：

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{A}_0\boldsymbol{x}_0=\boldsymbol{B}_0\\&\boldsymbol{A}_0=\begin{bmatrix}t_1 & 1\\ \vdots & \vdots\\ t_m & 1\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{17}$$

其中，$\boldsymbol{x}_0$ 和 $\boldsymbol{B}_0$ 分别由 $x_j(j=1,2)$和 $B(t_i)(i=1,2,\cdots,20)$组成。该方程最小二乘估算值为：

$$\boldsymbol{x}_0=(\boldsymbol{A}_0^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_0)^{-1}\boldsymbol{A}_0^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_0 \tag{18}$$

当数据到达 t_{m+1} 时刻时，对上一时刻的数据进行修正，可以得到新时刻的值：

$$\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_0+\boldsymbol{k}(\boldsymbol{B}-\boldsymbol{t}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_0) \tag{19}$$

其中，$\boldsymbol{k}=\dfrac{1}{1+\boldsymbol{t}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}_0^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_0)^{-1}\boldsymbol{t}}(\boldsymbol{A}_0^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_0)^{-1}\boldsymbol{t}$，依此类推，可以更新每一时刻的斜率值。

将 CWT 与上述递归辨识过程相结合即可实现电力系统低频振荡模态参数的动态追踪，提高电力系统的动态稳定的实时监测能力。

4 算法流程

基于上文所提的递归连续小波变换方法，本文辨识电力系统振荡模式的算法流程如下。

a. 输入信号选取：本文选取联络线上的有功功率作为输入信号进行计算。

b. 信号延拓：采用 LS-SVM 对步骤 **a** 中的输入信号两端进行拟合延拓。

c. 参数设定：参数选取需要根据所关注的电力系统振荡频率范围，选择合理的小波参数。

d. 小波计算：经步骤 **b**、**c** 后，计算延拓后信号的小波系数。截取原信号长度的小波系数用于下一步的计算。

e. 与 RLS 结合动态估算每一时刻的模态参数。

5 算例分析

本节将所提方法应用于 IEEE 68 节点系统的时域仿真数据和南方电网的广域实测数据中，以验证本文所提方法的有效性和可行性。

5.1 IEEE 68 节点系统算例

首先以图 6 所示的 IEEE 68 节点系统为例对本

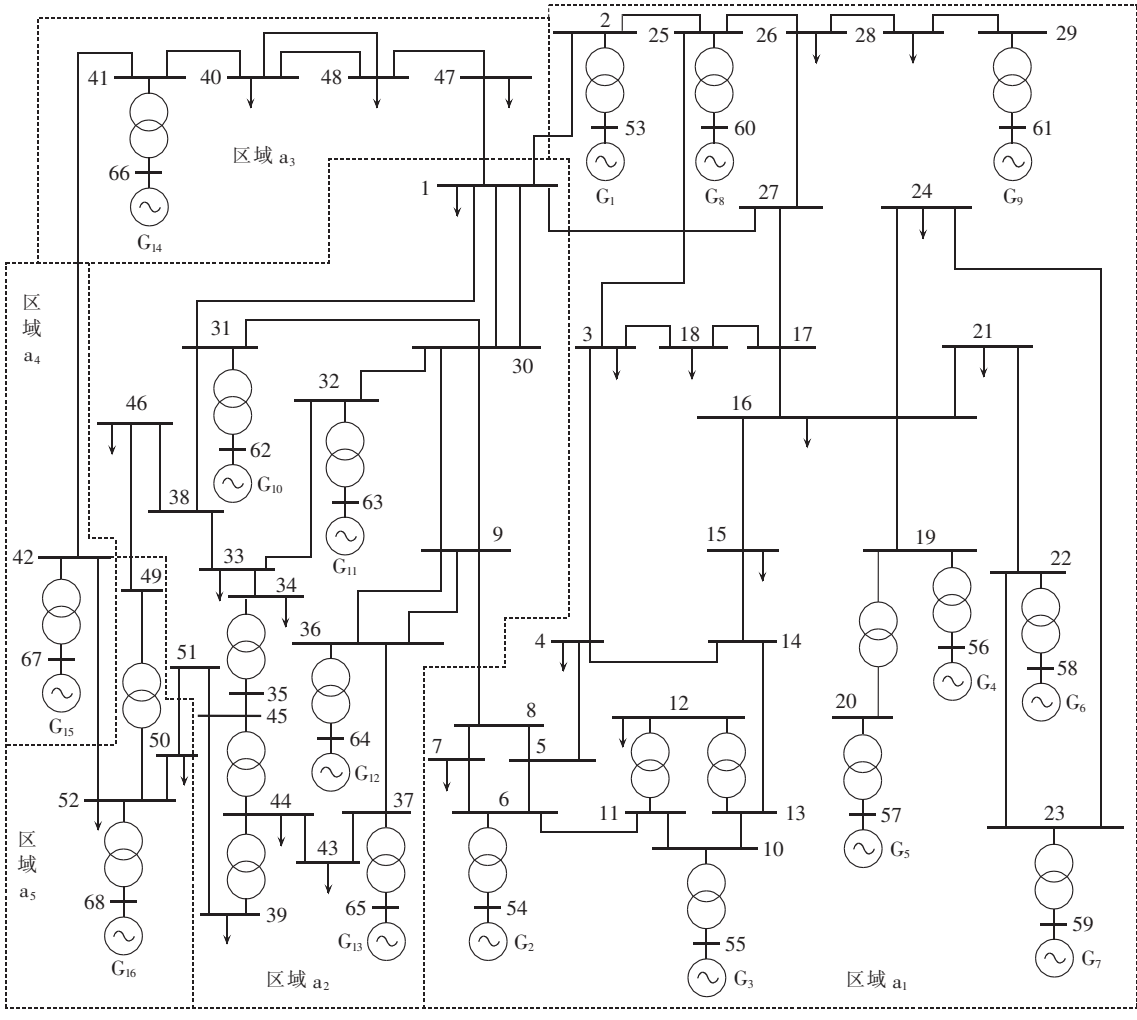


图 6 IEEE 68 节点系统

Fig.6 IEEE 68-bus system

文所提方法进行分析、验证,由文献[2]可知:IEEE 68 节点系统中存在 4 个区域间振荡模式,振荡频率依次为 0.3699 Hz、0.4892 Hz、0.6267 Hz 和 0.7810 Hz。为验证所提方法的准确性和有效性,本文在支路 28–29 间设置三相短路故障,故障持续时间为 0.1 s,0.1 s 后将故障切除。故障过程中系统的 8 条联络线上有功功率振荡曲线如图 7 所示,图中有功功率为标幺值。

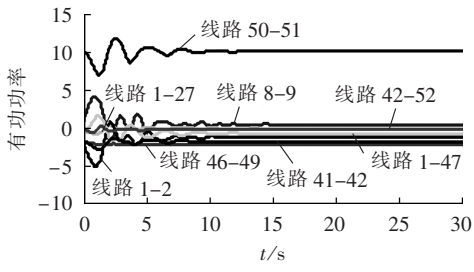


图 7 IEEE 68 节点系统联络线上有功功率

Fig.7 Active power of tie-lines in IEEE 68-bus system

以图 7 中联络线 8–9 的有功功率作为本文所提递归小波变换的输入信号进行分析。首先为避免小波变换过程中边缘效应的影响,对数据两端拟合延拓,前后各延拓原数据的 20%,延拓的结果如图 8 所示。

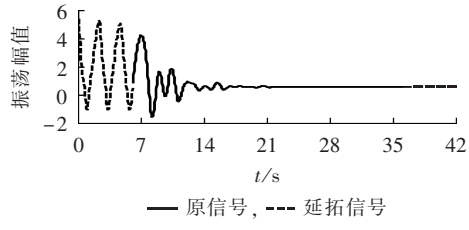


图 8 IEEE 68 节点系统联络线 8–9 上的有功功率,前后各延拓原数据的 20%

Fig.8 Active power of Tie-line 8-9 in IEEE 68-bus system, with 20% extension of original data at both ends

考虑到本文主要研究的是电力系统区域间低频振荡模式辨识,同时参考 1.2 节中小波参数选择的基本准则,取小波变换的中心频率和带宽参数分别为 f_c=0.6 Hz、f_b=20 Hz,对延拓后的联络线有功功率信号进行连续小波变换。各频率下的小波能量系数如图 9 所示。由图 9 可知:图中 3 个峰值点分别对应的振荡频率为 0.357 1 Hz、0.583 3 Hz、0.760 9 Hz,因

此可认为上述振荡频率为该信号所包含的 3 个主导振荡模式。其中最大的小波能量系数对应的振荡频率为 0.357 1 Hz，即表明该振荡模式在支路 8–9 上具有较强的可观性。输入信号中所含主振荡模式的频率确定后，即可确定各振荡模式在小波系数矩阵上对应的尺度 a；然后再根据式(6)和(7)结合 RLS 算法，便可计算各振荡模式的频率及阻尼比的动态值。

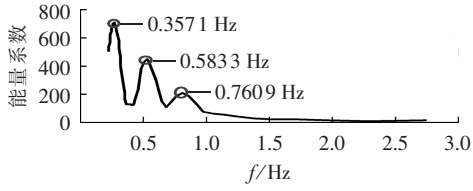


图 9 各频率对应的小波能量系数

Fig.9 Curve of wavelet energy coefficient vs. frequency

图 10 为采用 LS-SVM 对支路 8–9 的有功功率进行延拓前、后频率 f=0.357 1 Hz(对应尺度 a=31)对应的小波系数模对数。其中，实线表示未经延拓的模对数计算结果，图中模对数在 6~25 s 之间近似为一条直线，但由于边缘效应的影响，模对数在 0~6 s 和 25~30 s 之间存在较大的偏差，与理论推导结果显然不相符，在上述两端部分模态频率的计算结果分别为 0.194 Hz、0.852 Hz，与实际频率 0.357 1 Hz 相差很大，即小波变换中的边缘效应对电力系统低频振荡模式辨识的结果存在较大影响；虚线为采用 LS-SVM 延拓后的计算结果，由图 10 可得，延拓后的模对数近似为一条直线且与未延拓的模对数计算结果在 6~25 s 之间完全重合。延拓后在信号两端计算的振荡模态频率为 0.356 1 Hz，可见，此时在信号两端可得到合理的模态估计值，验证了 LS-SVM 在解决小波变换边缘效应问题中的有效性。上述结果表明：本文所提的 LS-SVM 法对信号进行延拓后，可效解决小波变换中存在的边缘效应问题，可提高信号两端模态参数辨识结果的精度。

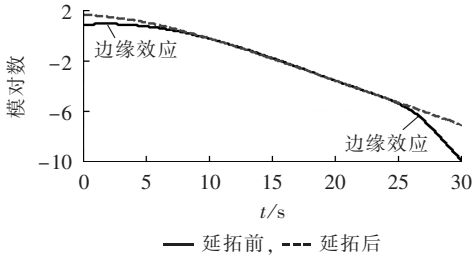


图 10 数据处理前后 a=31 处对应的小波系数模对数图

Fig.10 Logarithm plot of wavelet coefficients corresponding to a=31, before and after data processing

图 11 进一步给出模态频率和阻尼比随时间动态变化的计算结果。图中对比结果表明：本文所提的 RLS-CWT 方法可动态追踪电力系统的模态参数变化趋势，更能反映系统的实际振荡情况。

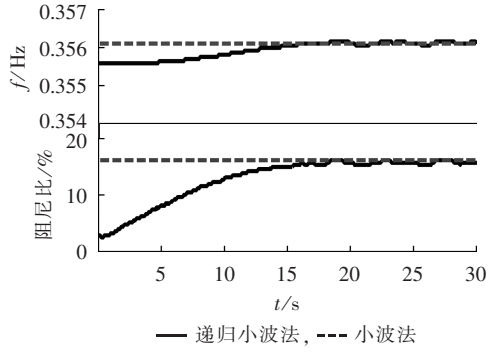


图 11 f=0.357 1 Hz 对应的频率和阻尼比

Fig.11 Frequency and damping rate, corresponding to f=0.357 1 Hz

为验证本文所提方法的正确性，表 1 将本文所提方法与特征值分析方法和传统小波分析方法的结果进行了比较，D 为振荡模式的阻尼比，表中结果验证了本文所提方法的正确性。

表 1 联络线 8–9 模态参数估计值对比

Table 1 Comparison of estimated modal parameters of Tie-line 8-9

方法	模式	f/Hz	D/%
特征值分析	1	0.379 9	14.88
	2	0.626 7	9.15
	3	0.781 0	8.73
小波脊法	1	0.366 1	15.82
	2	0.596 5	9.760
	3	0.794 7	8.132
递归小波变换（平均值）	1	0.356 2	13.020
	2	0.579 2	8.324
	3	0.792 1	7.581

表 2 进一步给出了以图 7 中各联络线的有功功率作为输入信号，采用本文所提方法辨识出的振荡模式，表中 D_1—D_4 分别为振荡模式 1—4 的阻尼比。由表 2 可以看出，在同一故障条件下，系统中区域间振荡模式在各联络线上的可观性各有不同，因而辨识出的振荡模式数量不尽相同，但对比特征值分析结果可看出：本文所提方式可准确估计出各振荡模式的频率及阻尼比。

上述算例分析结果表明：传统的连续小波变换算法虽然能够准确地估算出系统振荡模式，但计算结果易受边缘效应的影响。而采用 LS-SVM 对数据延拓，能有效改善数据两端计算结果的准确性，克服小波变换的边缘效应的影响。同时，将小波变换与 RLS 相结合，可实现动态追踪系统的振荡模式，使其更能反映系统的实际动态稳定性。

5.2 南方电网实测数据

5.1 节将本文所提方法应用于 IEEE 68 节点系

表 2 图 7 中不同联络线上的振荡模式识别结果

Table 2 Results of oscillation mode identification for different tie-lines in fig.7

方法	联络线	f_1/Hz	D_1/%	f_2/Hz	D_2/%	f_3/Hz	D_3/%	f_4/Hz	D_4/%
特征值分析		0.3799	14.880	0.4892	12.270	0.6267	9.150	0.7810	8.730
递归小波变换(平均值)	8–9	0.3493	10.326	—	—	0.5792	7.860	0.7422	8.602
	1–27	0.3545	12.942	—	—	0.6089	8.238	0.7685	7.998
	1–2	0.3571	12.724	—	—	0.6250	8.898	0.7404	7.469
	1–47	0.3711	13.285	—	—	—	—	—	—
	46–49	0.3545	10.739	0.5053	13.842	—	—	—	—
	50–51	0.3769	14.294	—	—	0.6089	8.487	—	—
	41–42	0.3654	12.893	—	—	0.6090	8.324	0.8189	8.239
	42–45	—	—	0.4750	11.254	—	—	0.7661	8.496

统的仿真数据中验证了该方法的正确性,本节进一步将该方法应用于南方电网的实测数据中验证所述方法在实际大电网中应用的可行性。以图 12 所示南方电网某次故障期间 TJ 线上有功功率作为辨识输入信号。对图 12 中时间窗口为 29~59 s 的数据进行分析。考虑到小波边缘效应,对该量测窗口数据进行延拓,结果如图 13 所示。图 14 为频率 f=0.37 Hz 对应的小波系数模对数延拓前后的对比结果,由图 14 可看出:经延拓后的信号,其前半部分边缘效应得到有效改善。图 15 进一步给出了振荡频率为 0.37 Hz 的云广振荡模式和振荡频率为 0.52 Hz 的云贵振荡

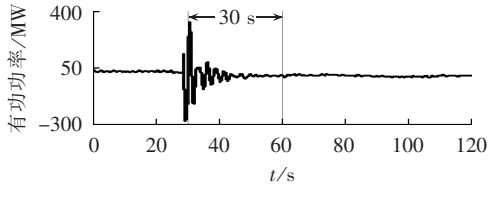


图 12 南方电网系统 TJ 线上有功功率

Fig.12 Active power of Line TJ of CSG

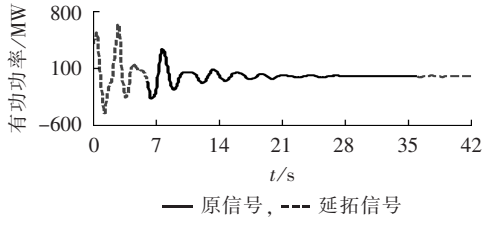


图 13 数据两端前后各延拓 20%

Fig.13 20% extension at both ends of original data

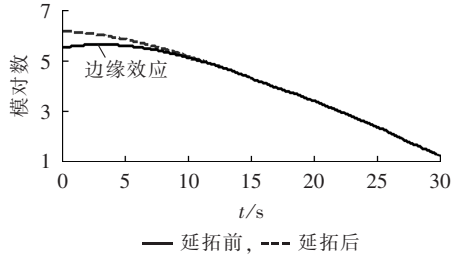
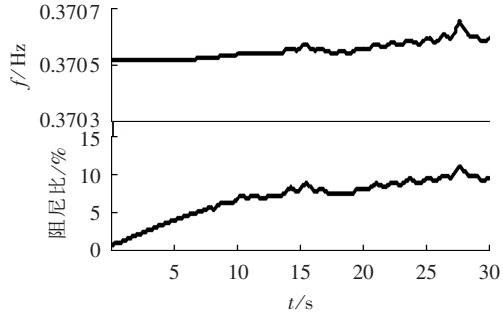
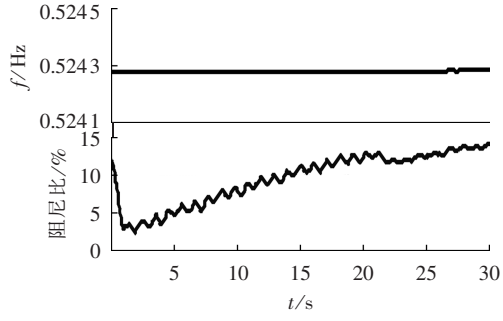


图 14 数据处理前后频率 f=0.37 Hz 对应小波系数模对数

Fig.14 Logarithm plot of wavelet coefficients corresponding to f=0.37 Hz, before and after data processing



(a) 云广振荡模式



(b) 云贵振荡模式

图 15 实测数据的辨识结果

Fig.15 Results of identification based on measured data

模式的频率与阻尼比随时间动态变化的趋势。由图中结果可知,在系统故障初始阶段,上述 2 种振荡模式的阻尼比较弱,故障切除后,系统逐渐恢复到稳定运行状态,且振荡阻尼比均恢复到 10% 以上,系统具有较强的阻尼特性。

表 3 进一步对比给出了该方法与 Prony 算法的辨识结果[22],表中结果表明:本文所提方法辨识出的振荡频率与文献[24]中 Prony 算法辨识出的振荡频

表 3 某大型互联电网联络线上的模态参数辨识结果对比

Table 3 Comparison of identified tie-line modal parameters for a large-scale power grid

方法	振荡模式	f/Hz	D/%
Prony	云广振荡模式	0.3730	9.0000
	云贵振荡模式	0.5090	7.0000
递归小波变换(平均值)	云广振荡模式	0.3706	8.7653
	云贵振荡模式	0.5243	12.9829

率结果基本一致,但在分析云贵振荡模式的阻尼比时,由于受到阶数的限制,Prony 算法识别结果不够准确,而本文所提方法对这 2 种区域间振荡模式的阻尼比均能辨识出较为准确的结果。此外,Prony 算法也属于一种块处理方法,也不能揭示系统振荡模式随时间变化的动态特征。

6　结语

本文提出一种辨识电力系统低频振荡模式的递归小波变换算法。在合理选择小波参数的基础上,采用 LS-SVM 消除小波变换中的边缘效应。然后引入 RLS 技术,将其与小波变换相结合,实现对电力系统模态参数的动态追踪。将该方法分别应用于 IEEE 68 节点系统和南方电网实测数据中进行分析、验证。结果表明:该方法可有效改善小波辨识的边缘效应影响,提高两端模态参数辨识的准确性;同时可满足电力系统振荡模式的动态追踪需要。将本文所提方法与特征值分析法、Prony 算法的辨识结果进行对比,进一步验证了本文所提方法的准确性和可行性。

参考文献:

[1] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw-Hill,1994:790-810.

[2] ROGERS G. Power system oscillation[M]. Norwell,MA,USA: Kluwer,2000:3-4.

[3] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社有限公司,2002.

[4] DEMELLO F P,CONCORDIA C. Concept of synchronous machine stability affected by excitation control[J]. IEEE Trans on PAS, 1969,88(4):361-329.

[5] 杨德友,蔡国伟. 减载控制灵敏度及其在广域低频保护中的应用[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):124-128.
YANG Deyou,CAI Guowei. Loading shedding control sensitivity and its applications in wide-area low-frequency protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):124-128.

[6] 蒋长江,刘俊勇,刘友波,等. 基于广域测量系统和 CELL 理论的强迫振荡在线感知与定位[J]. 电力自动化设备,2015,35(2): 125-132.
JIANG Changjiang,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. Online forced oscillation detection and identification based on wide area measurement system and CELL theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):125-132.

[7] KORBA P,LARSSON M,REHTANZ C. Detection of oscillations in power systems using Kalman filtering techniques[C]// Proceedings of IEEE Control Applications Conference. Istanbul,Turkey: IEEE,2003:183-188.

[8] 李天云,谢家安,张方彦,等. HHT 在电力系统低频振荡模态参数提取中的应用[J]. 中国电机工程学报,2007,27(28):79-83.
LI Tianyun,XIE Jiaan,ZHANG Fangyan,et al. Application of HHT for extracting model parameters of low frequency oscillations in power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27 (28):79-83.

[9] HUANG N E,WU M C,LONG S R,et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis[C]// Proceedings:Mathematical,Physical and Engineering Sciences. London,UK:The Royal Society Press,2000:855-904.

[10] 肖晋宇,谢小荣,胡志祥. 电力系统低频振荡在线辨识的改进 Prony 算法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2004,44(7):883-887.
XIAO Jinyu,XIE Xiaorong,HU Zhixiang. Improved Prony method for online identification of low-frequency oscillations in power systems[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology),2004,44(7):883-887.

[11] 李鹏,徐光虎,刘春晓,等. 从时频角度重新审视南方电网的区间功率振荡[J]. 电力系统自动化,2010,34(22):18-23.
LI Peng,XU Guanghu,LIU Chunxiao,et al. A review of inter-area oscillations in China Southern Grid in a time-frequency perspective[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34 (22):18-23.

[12] 李大虎,曹一家. 基于模糊滤波和 Prony 算法的低频振荡模式在线辨识方法[J]. 电力系统自动化,2007,31(1):14-19.
LI Dahu,CAO Yijia. An online identification method for power system low-frequency oscillation based on fuzzy filtering and Prony algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2007, 31(1):14-19.

[13] 竺炜,唐颖杰,周有庆,等. 基于改进 Prony 算法的电力系统低频振荡模式识别[J]. 电网技术,2009,33(5):44-47.
ZHU Wei,TANG Yingjie,ZHOU Youqing,et al. Identification of power system low frequency oscillation mode based on improved Prony algorithm[J]. Power System Technology,2009,33(5):44-47.

[14] RUEDA J L,JUÁREZ C A,ERLICH I. Wavelet-based analysis of power system low-frequency electromechanical oscillations[J]. IEEE Trans on Power Systems,2011,26(3):1733-1743.

[15] HUANG S J,HSIEH C T,HUANG C L. Application of Morlet wavelets to supervise power system disturbances[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1999,14(1):235-243.

[16] BRUNO S,DE BENEDICTIS M,LA SCALA M. Taking the pulse of power systems:monitoring oscillations by wavelet analysis and wide area measurement system[C]// 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. Atlanta,GA, USA:[s.n.],2006:436-443.

[17] 栾某德,刘涤尘,廖清芬,等. 基于改进小波系数奇异值分解和小波去噪的低频振荡时变模式辨识[J]. 电网技术,2012,36 (6):141-147.
LUAN Moude,LIU Dichen,LIAO Qingfen,et al. A method to identify time-varying mode of low frequency oscillation by continuous wavelet transform based on raising singular value decomposition of wavelet coefficient and wavelet denoising[J]. Power System Technology,2012,36(6):141-147.

[18] AVDAKOVIC S,NUHANOVIC A,KUSLJUGIC M,et al. Wavelet transform applications in power system dynamics[J]. Electric Power Systems Research,2012,83(1):237-245.

[19] GRINSTED A,MOORE J C,JEVREJEVA S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics,2004,11(5/6): 561-566.

[20] 张鹏飞,薛禹胜,张启平. 电力系统时变振荡特性的小波脊分析[J]. 电力系统自动化,2004,28(16):32-35.

ZHANG Pengfei,XUE Yusheng,ZHANG Qiping. Power system time-varying oscillation analysis with wavelet ridge algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(16):32-35.

[21] 李素洁,吴亚锋,裘焱. 小波模态参数辨识的边缘效应问题研究[J]. 噪声与振动控制,2009,29(2):93-96.
LI Sujie,WU Yafeng,QIU Yan. Investigation on edge-effect of modal parameter identification using wavelet transform[J]. Noise and Vibration Control,2009,29(2):93-96.

[22] 袁礼海,宋建社. 小波变换中的信号边界延拓方法研究[J]. 计算机应用研究,2006,23(3):25-27.
YUAN Lihai,SONG Jianshe. Research on signal extended methods in wavelet transform[J]. Application Research of Computers,2006,23(3):25-27.

[23] 胡国胜. 支持向量机及在电力系统中的应用[J]. 高电压技术,2007,33(4):101-105.
HU Guosheng. Study on support vector machines algorithm and its application to power system[J]. High Voltage Engineering,2007,33(4):101-105.

[24] JIANG T,JIA H,ZHAO J,et al. Mode matching pursuit for estimating dominant modes in bulk power grid[J]. Generation, Transmission & Distribution,2014,8(10):1677-1686.

作者简介:

李国庆

李国庆(1963—),男,吉林长春人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统安全性和稳定性分析、控制与决策、配电系统自动化(**E-mail**:lgq@nedu.edu.cn);

王 丹(1989—),女,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为电力系统安全性与稳定性(**E-mail**:860692656@qq.com);

姜 涛(1983—),男,湖北随州人,副教授,博士,通信作者,研究方向为电力系统安全性和稳定性、可再生能源集成、综合能源系统(**E-mail**:electricpowersys@163.com);

陈厚合(1978—),男,江苏徐州人,副教授,博士,研究方向为电力系统安全性和稳定性(**E-mail**:chenhouhe@126.com)。

Power system oscillation mode identification based on recursive continuous wavelet transform

LI Guoqing,WANG Dan,JIANG Tao,CHEN Houhe

(School of Electrical Engineering,Northeast China Dianli University,Jilin 132012,China)

Abstract: A method of low-frequency oscillation mode identification based on the recursive continuous wavelet transform is proposed for power system. The fundamental principles of wavelet coefficient selection for the oscillation mode identification of power system are discussed. The least squares support vector machine is applied to fit and extent both ends of signal data for eliminating the inherit edge effect of wavelet transform and improving the accuracy of wavelet identification. The wavelet identification is combined with the recursive least squares to recursively update the oscillation frequency and damping ratio for the dynamic tracking of modal parameters of power system. The simulative data of IEEE 68-bus system and the measured data of China Southern Power Grid verify the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: electric power systems; low-frequency oscillation; continuous wavelet transform; edge effect; least squares support vector machine; recursive least squares

(上接第7页 continued from page 7)

New generation of cyber-energy system:Energy Internet

ZHANG Yongjun,CHEN Zexing,CAI Zexiang,LI Licheng,SONG Weiwei

(Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology,School of Electric Power, South China University of Technology,Guangzhou 510640,China)

Abstract: "Internet plus" is gradually penetrating into the energy industry and driving the in-depth combination of smart grid and energy-net. The morphological characteristics of CES(Cyber-Energy System) built by the Energy Internet are analyzed under the background of this combination in three aspects:the stochastic dynamic characteristics of multi-coupling energy flow,the information integration capability of wide-area Internet and the interactive characteristics of energy-information flow. Three core techniques,i.e. CES modelling,systemic analysis method and control method,are discussed to outline the development of CES in smart grid. The developmental challenges of related core techniques in the new generation of CES are proposed.

Key words: cyber-energy system; Energy Internet; Internet plus; technical challenge