

# 基于小波分析的次同步振荡检测研究

刘海洋, 李兴源, 徐大鹏

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 考虑次同步振荡和轴系的特殊关系, 使用小波变换实时监测轴系次同步分量, 并在突发故障的情况下, 及时检测到突发故障的奇异点, 达到及时报警和采取相应对策的目的。该方法简单实用, 监测设备易于实现。

**关键词:** 小波; 次同步振荡; 轴系; 实时监测

**Abstract:** Because of the special relationship between SSO (subsynchronous oscillation) and shafting of turbine-generator set, wavelet analysis is applied to torsional oscillation real-time detection and fault feature extraction of sudden fault, so that it can alarm in time and take some corresponding countermeasures. The method is simple and practical, and the detection device is easy to be realized.

**Key words:** wavelet; subsynchronous oscillation (SSO); shafting; real-time detection

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2008)01-0005-03

电力系统次同步振荡与轴系扭振有着密切的联系, 轴系扭振是电力系统次同步振荡在汽轮发电机组轴系上的反映, 而轴系扭振又进一步加剧了电力系统中电气次同步谐振<sup>[1]</sup>。次同步振荡的后果可能是危险的, 如果扭转振荡加大, 汽轮发电机的轴系会裂断, 造成灾难性后果; 即使振荡不是不稳定的, 系统的扰动可能造成大幅值的轴系转矩, 引起轴系疲劳寿命的损耗<sup>[2]</sup>。

预防和抑制轴系扭振的措施可以从设计制造、运行方式、机-电配合、在线监测和控制调节等几方面针对不同情况进行采用。实时监测是防止大型汽轮发电机组出现过大扭应力和疲劳损坏的最有效手段<sup>[3]</sup>。

由于发生次同步谐振时谐波通常表现出复杂性和非线性, 特别是动态和突发性谐波的存在, 所产生的振动信号也随之出现非平稳性。由于傅里叶变换在时间局部性的缺点, 以及短时傅里叶变换存在固定时频窗的缺点<sup>[4]</sup>, 所以它们并不适合次同步问题的分析。

小波变换通过伸缩和平移运算对信号进行多尺度分解, 从而能够有效地从信号中获取各种时频信息<sup>[5]</sup>, 是分析非平稳信号的一种有效的手段。

这里将用小波提取低频分量, 实时监测大轴转速, 并在突发故障引发的次同步振荡信号的情况下,

利用小波分析来分析信号的奇异性以及奇异性的位置和大小, 以采取相应对策。仿真表明采用此种方法能有效避免高次谐波和基频分量的干扰, 使监测设备的结构更简单, 更便于实现。

## 1 小波变换

小波, 其特点是具有波动性与衰弱性, 直流分量为0<sup>[6]</sup>。为了克服傅里叶变换没有任何局部化特性和短时傅里叶变换固定分辨率的缺陷, 要求对某时变信号分解的基函数具有足够的光滑性, 函数本身及其倒数在无穷远处速降, 具有紧支撑集和高阶消失矩, 该函数即为小波基函数。

令  $\Psi(t) \in L^2(R)$  (能量有限), 其傅里叶变换为  $\Psi(\omega)$ 。当  $\Psi(\omega)$  满足下面允许条件时:

$$C_{\Psi} = \int_R \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

$\Psi(t)$  就为一个基本小波。将基本小波函数  $\Psi(t)$  伸缩和平移后, 就得到一个小波基函数:

$$\Psi_{\alpha, \tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{|\alpha|}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) \quad (2)$$

其中:  $\alpha$  为尺度参数,  $\tau$  为位置参数。与此对应, 在频域上有:

$$\Psi_{\alpha, \tau} = \sqrt{\alpha} e^{-j\omega\tau} \Psi(\alpha\omega) \quad (3)$$

由式(1)可知:

$$\begin{aligned} \Psi(0) &= 0 \\ \int_R \Psi(t) dt &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(505954128-50577044); 国家重点基础研究专项经费资助项目(2004CB217907)

这说明小波  $\Psi(t)$  具有衰减性和振荡性, 即时域上表现为一个衰减而振荡的波, 频域上具有带通性, 其带通的中心随着伸缩因子  $\alpha$  的增减前后移动。因此  $\Psi(t)$  在时、频域都具有良好的局部化能力<sup>[7]</sup>。

小波变换就是将任一平方可积或能量有限信号表示成小波系数的叠加。函数  $f(t) \in L^2(R)$  的小波变换定义为:

$$W_f(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{|\alpha|}} \int_R f(t) \Psi^* \left( \frac{t-\tau}{\alpha} \right) dt \quad (5)$$

式中:  $\Psi^*$  是  $\Psi$  的共轭,  $W_f(\alpha, \tau)$  为小波变换系数。

## 2 小波离散化与重构

在测量中, 采样得到的信号是离散信号, 通常对其进行离散二进小波变换。

设  $\alpha = \alpha_0^j, \tau = k\alpha_0^j\tau_0$ , 则对应的离散小波基:

$$\Psi_{j,k}(t) = \alpha_0^{-j/2} \Psi(\alpha_0^{-j}t - k\tau_0) \quad (6)$$

设  $\alpha_0 = 2, \tau_0 = 1$ , 可构造二进离散小波基:

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \Psi(2^{-j}t - k) \quad (7)$$

可得离散二进小波变换系数

$$DW_f(j, k) = \int_R f(t) \Psi_{j,k}^*(t) dt \quad (8)$$

信号在离散小波变换结合多分辨率思想的情况下完成时间和频率不同尺度上的分解。根据 Mallat 塔式算法<sup>[8]</sup>, 信号经多尺度分解后, 实质是被分解为一个低频分量和各尺度下的高频分量之和

$$S = A_N + \sum_{N \in Z} D_N = A_N + D \quad (9)$$

式中,  $A_N$  为低频分量, 反映了信号的整体变化趋势,  $D$  为高频分量, 反映了信号的细节分量。由于从系统信号低频分量进行检测会出现故障漏检的情况, 因此这里采取对信号高频分量进行分析和特征提取。其实质就是频带剥离的过程, 将信号分解为低频和高频分量, 不断滤出频率相对较高频带的分量处理后进行重构<sup>[9]</sup>。

## 3 信号故障特征的提取

信号中不规则的突变部分和奇异点是信号重要特征之一。由于傅里叶变换缺乏空间局部性, 它只能确定一个函数奇异性的整体性质, 而不能确定奇异点在空间的位置和分布情况。小波分析具有良好的空

间局部化性质, 因此, 用小波来分析信号的奇异性以及奇异性的位置和奇异度的大小是很有效的<sup>[10]</sup>。

信号的多尺度奇异性检测是先将信号在不同的尺度上用平滑函数  $\theta(t)$  进行平滑处理, 然后再对信号  $f(t)$  的一阶导数或二阶导数进行分析以检测出信号的突变位置。

平滑  $\theta(t)$  函数应满足以下条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(t) dt = 1$$

$$\lim_{|t| \rightarrow +\infty} \theta(t) = 0 \quad (10)$$

取  $\theta(t)$  为平滑性很好的高斯函数, 令

$$\Psi^{(1)}(t) = \frac{d\theta}{dt} = \frac{-1}{\sqrt{2\pi}} te^{-\frac{t^2}{2}} \quad (11)$$

$$\Psi^{(2)}(t) = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (1-t^2) e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (12)$$

可知  $\Psi^{(1)}(t), \Psi^{(2)}(t)$  均满足小波函数允许性条件, 即:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^{(1)}(t) dt = 0, \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^{(2)}(t) dt = 0$$

故  $\Psi^{(1)}(t), \Psi^{(2)}(t)$  均可用作小波基函数。

以  $\Psi^{(1)}(t), \Psi^{(2)}(t)$  为小波基函数, 信号  $f(t)$  的卷积型小波变换为:

$$W_\alpha^{(1)}f(t) = \frac{1}{\alpha} \int \mathcal{H}f(\tau) \Psi^{(1)}\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) d\tau \quad (13)$$

$$W_\alpha^{(2)}f(t) = \frac{1}{\alpha} \int \mathcal{H}f(\tau) \Psi^{(2)}\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) d\tau \quad (14)$$

$W_\alpha^{(1)}f(t), W_\alpha^{(2)}f(t)$  可以看着信号  $f(t)$  在尺度  $\alpha$  下经平滑函数  $\theta(t)$  平滑处理后的一阶导数与二阶导数。

当小波函数看着某一平滑函数的一阶导数时, 信号小波变换模的局部极值点对应信号的突变点; 当小波函数看着某一平滑函数的二阶导数时, 信号小波变换模的过零点对应信号突变点。因此, 采用检测小波变换系数的过零点和局部极值点的方法可以检测信号的突变点<sup>[11]</sup>。相对而言, 用局部极值点进行检测更具有优越性<sup>[12]</sup>。

## 4 仿真实例和结果

### 4.1 小波基的选择

构造或选择基小波时, 需要从滤波能力和计算代价两方面考虑。一般而言, 滤波器长度越长, 滤波效果越好, 但计算量就越大。如果选择短的滤波器, 则滤波效果可能达不到要求。在文中选择 Daubechies (dbN) 小波系。db4 小波函数图如图 1 所示。

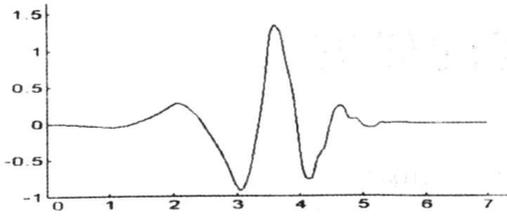


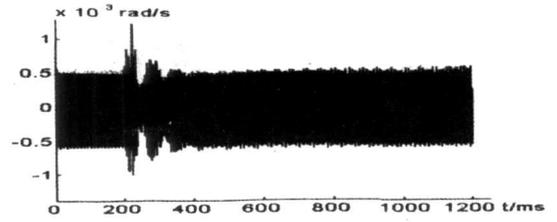
图1 db4小波函数

Daubechies 不仅是连续的和正交的,而且是支集最小的。因此这种小波的滤波器系数个数少,在分解与重构算法中所需要的计算量少,这在信号的实时处理中非常重要。

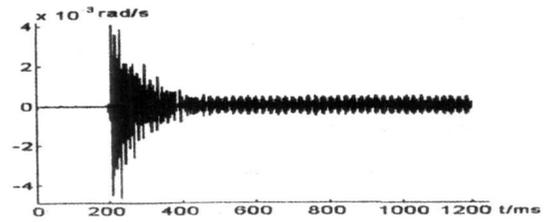
#### 4.2 实例和结果

文中的仿真模型基于某电网实际模型,并有相关文献证明了研究机组发生次同步振荡的可能性,待研究发电机组的振荡频率为 13.6 Hz、24.6 Hz、38.7 Hz<sup>[13]</sup>。在本次仿真实例中,利用小波滤波器对包含的电网模型的次同步分量进行检测,并设置在 0.2 s 发生线路故障并导致了次同步振荡,利用小波滤波器检测该突变信号的位置,从而达到报警和采取相应对策的目的。

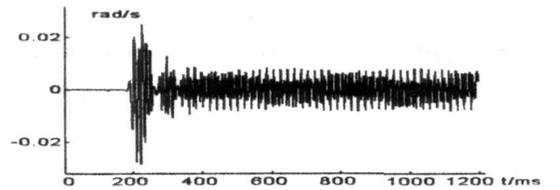
小波滤波器的信号量为转子转速采样信号(见图2),对该采样信号用 db4 小波进行 6 尺度正交小波分解,算法采用 Mallat 塔式算法。考虑到从系统信号低频分量进行检测会出现故障漏检的情况,因此对信号每层高频分量进行分析和特征提取,然后基于分解步骤的逆过程,合成每层的高频部分,分离出次同步分量,高于工频部分结果如图3,次同步分量如图4。



(a) 第一层分解的高频部分

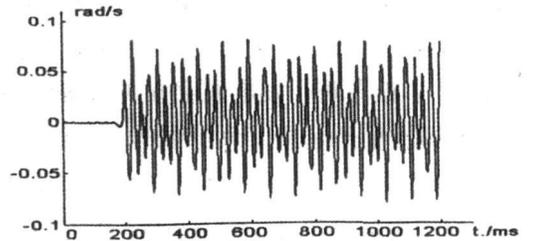


(b) 第二层分解的高频部分

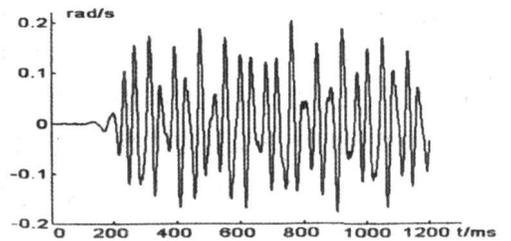


(c) 第三层分解的高频部分

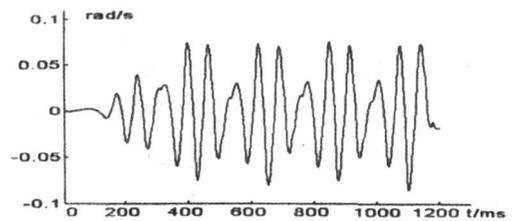
图3 高于工频频率分量提取



(a) 38.7Hz 的次同步分量信号



(b) 24.6Hz 的次同步分量信号



(c) 13.6Hz 的次同步分量信号

图4 基于小波变换的次同步分量提取 (下转第42页)

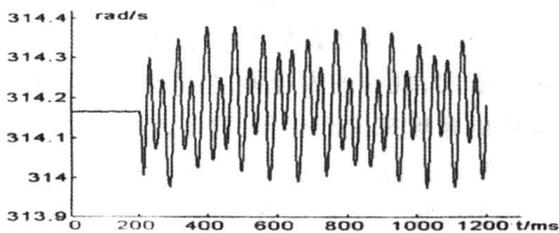


图2 转速采样信号

从仿真实例可以看出,发生故障后,信号频率高于工频的部分振幅的数量级都很小,且迅速衰减到一更小的值,在文中,不考虑它们的影响;而次同步分量的振幅幅值较大,且无衰减趋势。因此,认为系统发生次同步振荡,系统对次同步振荡无正阻尼。

端接地,合上断路器后,即出现满屏大幅值干扰,现象和葫芦坝电站一样。怀疑为套管末屏接地不良,检查高压侧及中性点,末屏接地良好,而低压侧套管套在封闭母线筒内,空间非常狭窄,不方便进去检查,为确定可能是低压套管的末屏接地不良,将低压侧的加压端与接地端交换,干扰消失,由此确定低压端的首端末屏接地不良。由安装单位进入封闭母线筒进行检查,发现该末屏的接地从外观上看也很正常,该套管末屏的接地为弹簧式结构,经检查发现弹簧有卡涩现象,使得末屏接地不良。经处理后试验,干扰消失。

变压器在运行中,套管末屏应该接地良好,如果

接地不良投入运行,在运行中末屏对地有一个悬浮电位将对地放电,导致套管损坏或爆炸,造成变压器运行的安全事故。

近两年来,由于电网建设的步伐加快,安装单位在安装过程中对套管末屏接地的检查不是很仔细,使得套管末屏的接地不良,为变压器的安全运行带来隐患。通过局部放电试验,不仅能够发现变压器内部的绝缘故障,还可以检查出套管末屏的接地不良,可见其意义和作用是非常重大的。

(收稿日期:2007-12-15)

(上接第7页) 前面所提出的方法很好地分析出了次同步分量,并清晰地显示了间断点的准确位置,这对及时报警和能够及时采取诸如投入控制器、改变运行状态、切机等对策提供准确参考信息。事实上如果只是辨别间断点位置,使用 db1 小波将会有更好的效果。

## 5 结论

实时监测是防止大型汽轮发电机组出现过大的扭应力和疲劳损坏的最有效手段,精确提取各次谐波幅值是信号处理精度的核心部分。扭振信号主要是低频谐振和与转速有关的各次谐波组成,傅里叶分析已经不适合此种情况,而小波分析因为其良好的时频局部性,已经成为分析非线性、非平稳信号的有力数学工具。将小波分析用于对轴系进行监测,不但能对次同步分量进行监测,而且能对感兴趣的谐波分量进行监测,其关键技术还是在对信号量采集的传感器的研发,小波基的选择以及算法的进一步简化。

## 参考文献

[1] IEEE Committee Report by Subsynchronous Resonance Working Group of the System Dynamic Performance Subcommittee Reader's guide to subsynchronous resonance IEEE Transaction on Power System, February 1992, 7(1): 150-157.

[2] 李兴源. 高压直流输电系统的运行[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[3] 龚年乐, 冯玉明, 肖富富. 电力系统扰动与汽轮发电机轴系扭振[J]. 中国电机工程学报, 1987, (4): 50-57.

[4] Jing Lin. Feature extraction of machine sound using wavelet and its application in fault diagnosis [J]. NDT&E International. 2001, (34): 25-30.

[5] 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.

[6] Daubechies. The Wavelet Transform, Time-frequency localization and signal analysis, IEEE Trans. Information Theory, 1990, 36(9): 961-1005.

[7] 何正友, 杨卿, 钱清泉. 电力系统暂态信号的小波分析方法及其应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(5): 4-6.

[8] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[9] I. Daubechies, The wavelet transform, Time-frequency localization and signal analysis, IEEE Trans. 1990, 36(5): 961-1005.

[10] Sun Z and Chang C C. Structural damage assessment based on wavelet packet transform[J]. Journal of Structural.

[11] 苏斌, 董新洲, 孙元章. 基于小波变换的行波差动保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 25-29.

[12] Mallat stephane, 杨力华, 戴道清等. 信号处理的小波导引[M]. 机械工业出版社, 2002.

[13] 伍凌云. 复杂交直流输电系统次同步振荡的分析与控制, 四川大学博士学位论文, 2007.

## 作者简介:

刘海洋(1979-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。

李兴源(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分散式发电等方面的研究。

(收稿日期:2007-12-10)