

多信号模态参数识别的小波方法

潘学萍, 扈卫卫, 尚 霏

(河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 在小波分析的基础上, 采用优化方法同时从多个信号提取电力系统振荡模式和模态。首先根据小波脊线处的小波系数幅值判断信号对待辨识模式的可观程度, 舍去可观性较小的信号后, 进一步采用优化方法协调剩余信号中的模式参数。同时, 根据这些信号在脊点处的小波系数, 辨识系统的振荡模态参数。由于待辨识模式在各信号中能量衰减至零的时刻不同, 为便于模态分析, 提出在统一的辨识区间辨识系统的模式参数。4 机 2 区域系统和 10 机新英格兰系统算例表明, 所提出的方法可提高振荡频率和阻尼参数的辨识精度, 同时还可以获得多信号间的模态信息。

关键词: 电力系统; 小波变换; 小波脊; 优化; 模式; 模态; 信号分析

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.006

0 引言

低频振荡是当代电力大系统所面临的主要风险之一。历数国内外多次大停电事故, 它们或直接跟低频振荡有关, 或在大停电演化的某个阶段出现低频振荡现象^[1]。在国内外, 低频振荡问题严重影响了电力系统的安全稳定运行, 研究电力系统低频振荡在线监控尤为必要^[2-3]。

随着相量测量单元(PMU)的广泛应用, 可获得同一时标的电力系统实测数据^[4]。基于轨线的模式参数提取, 是将系统受扰轨迹视为某些频率、振幅按特定规律变化的信号组合, 振荡模式提取问题归结为对轨线上频率与阻尼等参数的识别问题。

目前采用信号处理方法识别电力系统的振荡模式时, 通常基于单一受扰轨线。当该受扰轨线对待辨识模式的可观性较小时, 辨识结果可能存在较大的误差。为此文献[5]提出采用 Prony 方法, 同时从多个受扰轨迹识别系统的模式参数, 以提高模式参数的辨识精度。Prony 方法主要有两方面的缺点。

a. 阶数的选取问题。阶数过低容易导致某些振荡模式无法被识别, 而过高则引入大量的杂散模式^[6]。为此文献[7]提出先选取较大的初始阶数, 再从中按照最小平方逼近的原则选取最优子集; 文献[8]提出采用奇异值分解确定阶数。

b. 噪声的预处理问题。传统 Prony 方法对噪声非常敏感, 要求被分析信号具有较高的信噪比。为减小噪声对低频振荡主导模式的识别带来的影响, 文献[9]提出了改进多信号的 Prony 算法。

小波变换可根据小波脊线获得系统的主导振荡频率, 其频率辨识的准确度一般较高, 且抗噪能力强。近年来, 已有小波方法应用于电力系统低频振荡

实时监控平台的报道^[10-11], 但一般只应用于单信号的模式识别。

不同测量地点、不同量测量对待辨识模式的可观程度不同。文献[5]基于多个受扰轨线提取振荡模式时, 未能区分不同受扰轨线对待辨识模式的可观程度。当某轨线对待辨识模式不可观或者可观性较小时, 该模式将不可辨识或者辨识结果存在较大的误差。为此, 本文提出采用小波变换, 根据小波脊线处的小波系数幅值判断其对待辨识模式的可观程度, 舍去可观性较小的信号, 进一步采用优化方法协调从剩余信号提取出的模式参数, 以提高辨识精度。

电力系统低频振荡的特征参数包括振荡模式(频率与阻尼)和模态。为识别受扰轨线的模态参数, 文献[12]应用 Prony 方法分析大扰动下的模态信息; 文献[13-15]采用谱相关函数方法得到系统在负荷随机扰动下的模态参数。针对振荡频率接近的模式, 其模态信息难以区分的问题, 文献[16]提出了一套振荡模式分类系统, 通过特征选择和模式分类 2 个部分, 可成功区分系统的几个主要模式的模态。

将多信号同时进行小波变换时, 还能从多个信号中获得系统的振荡模态信息, 它对明确振荡模式的分群方式、指导控制器的设计与安装地点的选择等具有重要的意义。本文进一步根据这些信号在小波脊点处的小波系数, 辨识多个信号间的模态。

1 小波变换提取单个信号的模式参数

1.1 连续小波变换

设待分析信号 $x(t)$ 平方可积, 其连续小波变换定义为:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

其中, $\psi(t)$ 为小波母函数; $*$ 表示复数共轭; a 为尺

度因子; b 为平移因子。

小波变换通过变化的尺度因子 a 及平移因子 b , 将母函数 $\psi(t)$ 伸缩及平移, 从而生成连续小波函数 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$, 将信号 $x(t)$ 分解到具有不同分辨率的尺度上。式(1)也可表示为:

$$W(a, b) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \psi^*(a\omega) e^{i\omega b} d\omega \quad (2)$$

其中, $X(\omega)$ 和 $\psi^*(a\omega)$ 分别为信号 $x(t)$ 和 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的频域表示。

文中采用 Morlet 小波, 其母函数为:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (3)$$

其中, ω_0 为小波中心频率。

Morlet 小波的傅里叶变换为:

$$\hat{\psi}(\omega) = \hat{g}(\omega - \omega_0) = e^{-(\omega - \omega_0)^2/2} \quad (4)$$

1.2 单模式信号的小波模式参数识别

单模式信号 $x(t) = A e^{-\sigma t} \sin(\omega t + \phi_0)$, A 为信号模式幅值, σ 为阻尼, ϕ_0 为初相位。

根据文献[17], 信号 $x(t)$ 的 Morlet 小波变换表达式为:

$$W(a, b) = \sqrt{\frac{a\pi}{2}} A e^{-\sigma b} \hat{g}[(a\omega(b) - \omega_0) + \varepsilon] e^{i(\omega b + \phi_0)} \quad (5)$$

其中, $\omega(b)$ 为 b 时刻的 ω 值; ε 为校正项, 一般较小, 可忽略。

$$|W(a, b)| \approx \sqrt{\frac{a\pi}{2}} A e^{-\sigma b} \hat{g}(a\omega(b) - \omega_0) \quad (6)$$

在 $a = \omega_0 / \omega$ 处, $\hat{g}(a\omega(b) - \omega_0) = 1$ 达到最大值, 此时 $|W(a, b)|$ 也达到极值, 时频点 $(b, \omega_0/a)$ 称为小波脊点。

根据小波脊点信息可得信号的振荡角频率:

$$\omega = \omega_0 / a \quad (7)$$

根据脊点处的小波系数幅值可得信号的阻尼:

$$\sigma = \frac{d \ln |W(a, b)|}{db} \quad (8)$$

其中, d 为微分算子。

1.3 多模式信号的小波模式参数识别

若受扰轨线 $x_k(t)$ 为多模式信号:

$$x_k(t) = \sum_{j=1}^p A_{kj} e^{-\sigma_j t} \cos(\omega_j t + \theta_{0kj}) \quad k=1, \dots, n \quad (9)$$

其中, A_{kj} 、 σ_j 、 ω_j 、 θ_{0kj} 分别为第 j 个模式的幅值、阻尼、振荡角频率及初相。

由于小波变换是线性变换, 则 $x_k(t)$ 的小波系数 $W(a, b)$ 为^[17]:

$$W[x_k(t)](a, b) \approx$$

$$\frac{\sqrt{a\pi}}{2} \sum_{j=1}^p A_{kj} e^{-\sigma_j b} \hat{g}(a\omega_j(b) - \omega_0) e^{i(\omega_j b + \theta_{0kj})} \quad (10)$$

如果 $x_k(t)$ 中各模式频率相差较大, 对于第 j 阶模态, 在脊点 $(b, \omega_j(b))$ 可忽略其他模式的影响, 脊点 $(b, \omega_j(b))$ 的小波系数近似为:

$$W[x_k(t)](a, b) \approx$$

$$\frac{\sqrt{a\pi}}{2} A_{kj} e^{-\sigma_j b} \hat{g}(a\omega_j(b) - \omega_0) e^{i(\omega_j b + \theta_{0kj})} \quad (11)$$

由于实现了模态解耦, 按照式(7)、(8)可识别第 j 个模式在时刻 b 的振荡角频率 ω_j 和阻尼 σ_j :

$$\omega_j(b) = \omega_0 / a_j \quad (12)$$

$$\sigma_j(b) = -\frac{d \ln |W[x_k(t)](a_j, b)|}{db} \quad (13)$$

2 小波模式的多信号优化

如果受扰轨线为平稳信号, 不同受扰轨线的模式参数理论上应相同。然而, 由于实际电力系统的非线性导致受扰轨线非平稳, 从多个信号中辨识得到的小波模式结果往往存在一定的差异。本文采用最小二乘优化方法, 协调多个信号的模式参数, 将其作为系统振荡模式的最终辨识值。

2.1 频率和阻尼参数的优化

对于第 j 个模式, 设 m 个待辨识信号中有 n 个信号 $[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$ 在振荡角频率 ω_j 附近存在小波脊, 振荡角频率在多信号间的协调见式(14):

$$\bar{\omega}_j = \min[F_1(\bar{\omega}_j)] \quad (14)$$

此处:

$$\begin{cases} F_1(\bar{\omega}_j) = \sum_{k=1}^n \int_{b \in \Omega_j} (\omega_{kj}(b) - \bar{\omega}_j)^2 db \\ \bar{\omega}_j \in \omega_{kj}(b) \quad k=1, \dots, n; b \in (0, \dots, t_s) \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\bar{\omega}_j$ 为多信号的优化角频率; $\omega_{kj}(b)$ 为时刻 b 从信号 $x_k(t)$ 辨识得到的振荡角频率; n 为信号数; Ω_j 为小波方法去除端点效应影响后的时间区间, 见 2.3 节。

获得振荡频率参数 $\bar{\omega}_j$ 后, 在该频率点处根据式(13)计算各信号的阻尼, 并采用最小二乘方法获得系统的优化阻尼结果, 见式(16):

$$\bar{\sigma}_j = \min[F_2(\bar{\sigma}_j)] \quad (16)$$

此处:

$$F_2(\bar{\sigma}_j) = \sum_{k=1}^n \int_{b \in \Omega_j} (\sigma_{kj}(b) - \bar{\sigma}_j)^2 db \quad (17)$$

其中, $\bar{\sigma}_j$ 为优化阻尼; $\sigma_{kj}(b)$ 为 b 时刻在频率 $\bar{\omega}_j$ 处从第 k 个信号 $x_k(t)$ 辨识得到的阻尼参数。

2.2 振荡模态的辨识与优化

n 个信号 $[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$ 在模式频率 $\bar{\omega}_j$ 处的小波系数分别为:

$$\begin{cases} W[x_{1j}(t)](a_j, b) = \frac{\sqrt{a_j}}{2} A_{1j} e^{-\bar{\sigma}_j b} e^{i(\bar{\omega}_j b + \theta_{01j})} \\ \vdots \\ W[x_{nj}(t)](a_j, b) = \frac{\sqrt{a_j}}{2} A_{nj} e^{-\bar{\sigma}_j b} e^{i(\bar{\omega}_j b + \theta_{0nj})} \end{cases} \quad (18)$$

参考信号设置为优化频率 ω_j 处小波系数幅值最大的信号,脊点 $(b, \omega_j(b))$ 处信号 $x_k(t)$ 相对于参考信号 $x_{\text{ref}}(t)$ 的小波系数瞬时比值为:

$$\frac{W[x_{kj}(t)](a_j, b)}{W[x_{\text{ref},j}(t)](a_j, b)} = \frac{A_{kj}}{A_{\text{ref},j}} e^{i(\theta_{0kj} - \theta_{0\text{ref},j})} \tag{19}$$

对于某线性系统 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}$, 其状态量的响应表达式为 $\mathbf{x} = c_1 \mathbf{u}_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 \mathbf{u}_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + c_n \mathbf{u}_n e^{\lambda_n t}$. 其中 $c_1 \sim c_n$ 与初始值有关, $\mathbf{u}_1 \sim \mathbf{u}_n$ 为右特征向量, $\lambda_1 \sim \lambda_n$ 为 n 个特征根. 对于某一复特征根 λ_j , 在信号 x_j 和 x_{ref} 上观察 λ_j 对应的过渡过程时, 其振幅的比值等于 $|u_{kj}| / |u_{\text{ref},j}|$, 振荡相位差为 $(\angle u_{kj} - \angle u_{\text{ref},j})$. 因而式(19)中幅值比

$$\frac{A_{kj}}{A_{\text{ref},j}} = \frac{|u_{kj}|}{|u_{\text{ref},j}|}, \text{ 相位差 } \theta_{0kj} - \theta_{0\text{ref},j} = \angle u_{kj} - \angle u_{\text{ref},j}.$$

因此复向量

$$\mathbf{u}_j(b) = \left[\frac{W[x_{1j}(t)](a_j, b)}{W[x_{\text{ref},j}(t)](a_j, b)}, \dots, \frac{W[x_{nj}(t)](a_j, b)}{W[x_{\text{ref},j}(t)](a_j, b)} \right] = \left[\frac{A_{1j}}{A_{\text{ref},j}} e^{i(\theta_{01j} - \theta_{0\text{ref},j})}, \dots, \frac{A_{nj}}{A_{\text{ref},j}} e^{i(\theta_{0nj} - \theta_{0\text{ref},j})} \right] \tag{20}$$

定义为时刻 b 处各信号相对于参考信号的模值比和相角差(即模态). 协调各时刻的模态参数, 见式(21):

$$\hat{\mathbf{u}}_j = \min(F_3(\hat{\mathbf{u}}_j)) \tag{21}$$

此处:

$$F_3(\hat{\mathbf{u}}_j) = \int_{b \in \Omega_j} \|\mathbf{u}_j(b) - \hat{\mathbf{u}}_j\|^2 db \tag{22}$$

其中, $\hat{\mathbf{u}}_j$ 为各信号的协调模态; $\mathbf{u}_j(b)$ 为时刻 b 的识别模态.

2.3 模态参数的辨识区间

阻尼较大的模式能量衰减较快, 它在信号初期的可观性较强; 相反, 弱阻尼模式能量衰减慢, 在信号后期其能量占主导. 由于待辨识模式在各信号中的初始能量不同, 其能量衰减至零的时刻也不同. 为有效辨识系统的模态参数, 当待辨识模式在某信号中的能量首先衰减接近于零时, 应在此刻终止模态参数辨识.

由于端点效应的存在, 小波方法在信号初期及信号末端的小波系数模值偏小, 利用这段信号辨识振荡阻尼及模态将产生较大的误差. 文献[17]中给出了考虑端点效应后小波模态参数有效辨识区间:

$$\beta \Delta_i \leq \Omega'_j \leq T - \beta \Delta_i \tag{23}$$

其中, Δ_i 为时域分辨率, $\Delta_i = a r_i$, a 为小波函数的尺度, r_i 为小波母函数的时窗半径; T 为信号长度. 文献[17]指出, $\beta \geq 4$ 可消除端点效应的影响.

综合模式辨识截止时间约束及小波端点效应约束. 根据两约束的交集, 在多信号阻尼及模态参数协调时, 确定相同的参数识别区间 Ω_j .

3 仿真算例

3.1 4机2区域系统算例

4机2区域系统如图1所示, 网络参数以及发电机参数与文献[17]相同. 其中发电机采用双轴模型, 配有静止励磁调节器及电力系统稳定器(PSS).

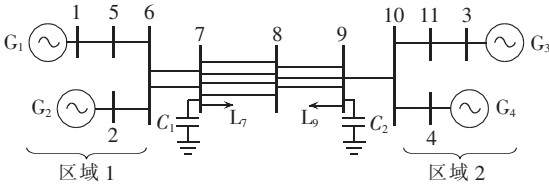


图1 4机2区域系统算例
Fig.1 A 2-area 4-machine system

故障设置为 $t=0$ s 时线路 8-9 首端发生三相瞬时性故障, 在 $t_c=0.5$ s 故障消失, 总仿真时间为 20 s. 仿真得到每台发电机的功角曲线(以同步坐标为参考), 消除曲线的趋势项后各发电机功角曲线见图2.

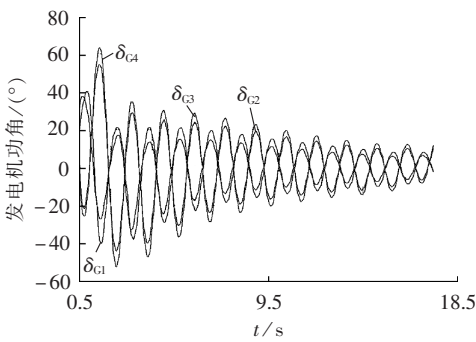


图2 消除趋势项后的功角曲线
Fig.2 Power-angle curve after de-trending

采用小波方法辨识得到各轨线的模式, 进一步在多轨线协调以获得主导模式的频率与阻尼以及以发电机3的功角曲线为参考信号的模态结果. 表1对照给出了模态参数优化结果及特征根结果.

表 1 模态参数辨识结果与特征根结果		
Tab.1 Results of modal parameter identification and characteristic roots		
信号	特征根结果	本文方法结果
	$f=0.70 \text{ Hz}, \zeta=2.13\%$	$f=0.69 \text{ Hz}, \zeta=2.37\%$
δ_{G1}	$0.75 \angle 166.99^\circ$	$0.72 \angle 166.02^\circ$
δ_{G2}	$0.54 \angle 176.52^\circ$	$0.53 \angle 176.59^\circ$
δ_{G3}	$1.00 \angle 0^\circ$	$1.00 \angle 0^\circ$
δ_{G4}	$0.82 \angle 0.17^\circ$	$0.83 \angle 0.11^\circ$

由表1可以看出, 基于多信号优化的小波主导模态参数结果与特征根较吻合, 反映了多信号小波模态参数辨识方法的有效性.

3.2 10机39节点新英格兰系统

进一步以图3所示的10机39节点新英格兰系统为例. 在原IEEE 10机39节点标准算例的模型及参数基础上, 笔者将原发电机经典模型改用双轴模

型,并增设励磁调节器。

根据特征根结果可知,该系统的主导区间模式 1 为机组 G_{39} 相对于其余机组的振荡,振荡频率为 0.534 Hz,阻尼为 0.288,由右特征向量可知该模式在所有发电机功角曲线上可观程度都较高;区间模式 2 为机组 (G_{30}, G_{37}, G_{38}) 与其余机组相对振荡,振荡频率为 0.935 Hz,阻尼为 0.177。该模式在部分机组如 G_{34}, G_{38} 参与程度较高,而机组 G_{39} 因位于该模式的振荡中心,几乎不参与该模式的振荡。上述 2 种模式亦在图 3 中示意。

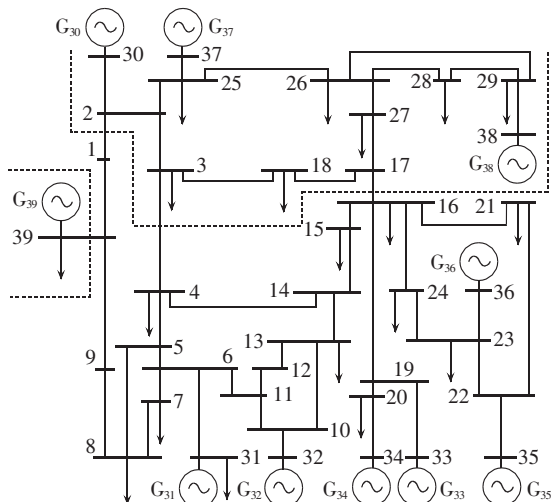
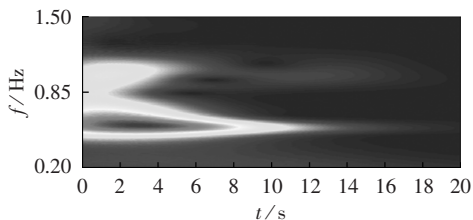


图 3 10 机 39 节点新英格兰系统

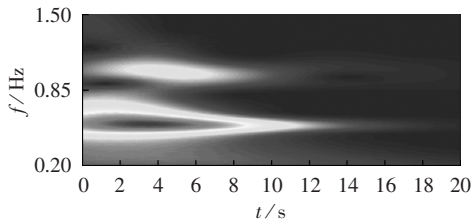
Fig.3 10-machine 39-bus New England system

扰动设置为 0 s 时刻母线 39 发生三相瞬时性故障,0.2 s 后切除消失,总仿真时间为 20 s,仿真得到以同步坐标为参考的各发电机功角曲线,消除曲线趋势项后,基于小波变换获得各受扰轨线的小波谱。部分轨线 $\delta_{34}, \delta_{38}, \delta_{39}$ 的小波谱见图 4。

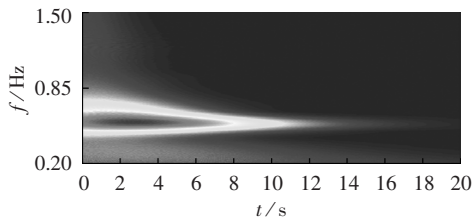
从图 4 可知,模式 1 在上述 3 条轨线上的可观程度都较高;模式 2 在轨线 δ_{39} 不可观,与特征根结果相同。



(a) δ_{34}



(b) δ_{38}



(c) δ_{39}

图 4 部分受扰轨线的小波谱

Fig.4 Wavelet spectrum of some disturbed trajectories

表 2 给出了各信号的小波模式结果以及所有发电机功角曲线的模式优化结果。

表 2 模式辨识结果与特征根结果

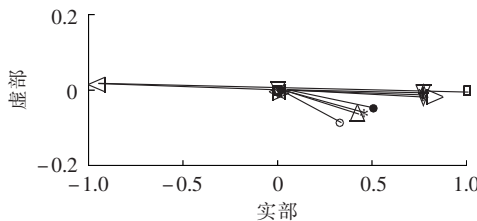
Tab.2 Results of mode identification and characteristic roots

信号	模式 1		模式 2	
	f/Hz	阻尼	f/Hz	阻尼
δ_{30}	0.539	0.290	0.969	0.115
δ_{31}	0.531	0.289	—	—
δ_{32}	0.539	0.288	—	—
δ_{33}	0.539	0.288	0.930	0.122
δ_{34}	0.539	0.288	0.922	0.138
δ_{35}	0.539	0.289	0.930	0.226
δ_{36}	0.539	0.289	0.930	0.223
δ_{37}	0.539	0.287	0.883	0.246
δ_{38}	0.539	0.286	0.989	0.216
δ_{39}	0.539	0.288	—	—
多信号优化结果	0.538	0.288	0.936	0.184
特征根结果	0.534	0.288	0.935	0.177

从表 2 可见,模式 1 在轨线 $\delta_{30} \sim \delta_{39}$ 可观性较强,各轨线的小波模式结果、多信号的模式优化结果以及特征根都很接近;而对于模式 2,在信号 δ_{31}, δ_{32} 及 δ_{39} 能量较弱,无法提取其模式信息,在其余各轨线上提取的频率、阻尼信息与特征根结果有一定的差别,将各信号模式结果进行协调后,所得结果与特征根差别较小。因此采用多信号小波变换的优点在于能够剔除可观性较弱的信号,并能将多个信号的模式结果优化,获得较接近真值的模式/模态信息。

根据表 2 辨识得到的 2 个模式的优化振荡频率,基于式(19)获得 2 个模式的模态,如图 5 所示。

图 5 可以看出,模式 1 为机组 G_{39} 相对于其余机组间的振荡;模式 2 为机组 (G_{30}, G_{37}, G_{38}) 相对于其余机组的振荡,机组 G_{31}, G_{32}, G_{39} 由于参与该模式的能



— δ_{30} , — δ_{31} , — δ_{32} , — δ_{33} , — δ_{34}
— δ_{35} , — δ_{36} , — δ_{37} , — δ_{38} , — δ_{39}

(a) 模式 1

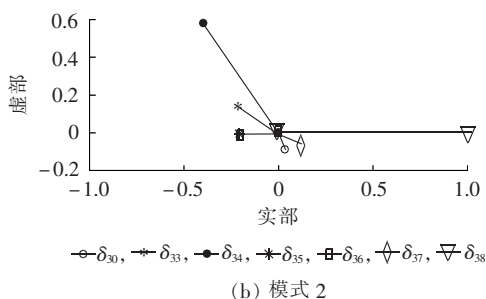


图 5 小波模态

Fig.5 Modal shapes from wavelet transform

量较小,在图 5(b)的模态图中无法给出。由于机组 G_{30} 参与模式 2 的能量偏弱,其模态角度误差偏大,但不影响模态 2 的定性判别。

4 结论

针对单一信号提取模式参数可能存在误差偏大的问题,本文提出采用小波变换,根据小波脊线处的小波系数幅值判断其对待辨识模式的可观程度,舍去其中可观性较小的信号,并采用优化方法协调从剩余信号提取出的模式参数,以提高辨识精度。

本文还提出了根据各信号在小波脊线处的小波系数,辨识系统的振荡模态参数。由于待辨识模式在各信号中能量衰减为零的时刻不同,为便于模态分析,提出在统一的辨识区间辨识系统的模式参数。

4 机 2 区域系统算例表明,在受扰轨线对主导模式的可观性较高时,本文方法可准确获得系统的模式/模态参数。通过 10 机 39 节点新英格兰仿真算例可知,本文方法对主导模式的频率、阻尼及模态参数的辨识准确性较高;同单个信号的辨识精度相比,采用多信号可提高局部模式的辨识精度。

当信号数量较多时,为使得振荡的在线监控成为可能,可采用双层监控的思路。底层监控中心根据就地 PMU 实测轨线,并行提取各信号的振荡模式信息;上层监控中心根据底层提供的模式信息,采用协调优化获得区域振荡模式信息。针对可能出现的弱阻尼/负阻尼模式,进一步提取其振荡模态,为控制手段的施加做准备。该“就地分析、协调优化”的思路可以快速从大量 PMU 数据中获得区域振荡模式、模态信息,为互联电力大系统的振荡实时监控提供了可行方案。

参考文献:

[1] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):8-16.
XUE Yusheng. Space-time cooperation framework for defending blackouts part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(1):8-16.
[2] 徐伟,鲍颜红,徐泰山. 电力系统低频振荡实时控制[J]. 电力自

动化设备,2012,32(5):98-101.
XU Wei,BAO Yanhong,XU Taishan. Real-time control of power system low-frequency oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):98-101.
[3] 田立峰,李成鑫,刘俊勇. 电网低频振荡在线可视化监视的理论和实现[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):28-33.
TIAN Lifeng,LI Chengxin,LIU Junyong. Theory and implementation of visualized online low-frequency oscillation monitoring [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):28-33.
[4] 姜宪国,王增平,李琛. 基于稀疏 PMU 布点的广域保护全网时间同步方案[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):122-127.
JIANG Xianguo,WANG Zengping,LI Chen. Whole-network time synchronization of wide-area protection based on sparse PMU placement [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):122-127.
[5] TRUDNOWSKI D J,JOHNSON J M,HAUER J F. Making Prony analysis more accurate using multiple signals[J]. IEEE Trans on Power Systems,1999,14(1):226-231.
[6] TRUNDNOWSKI D J. Order reduction of large-scale linear oscillatory system models[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994,9(1):451-458.
[7] KUMARESAN R,TUFTS D W,SCHARF L L. A Prony method for noisy data:choosing the signal components and selecting the order in exponential signal models[J]. Proceedings of the IEEE, 1984,72(2):230-233.
[8] 郭成,李群湛,王德林. 互联电力系统低频振荡的广域 Prony 分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):69-73.
GUO Cheng,LI Qunzhan,WANG Delin. Wide-area Prony analysis of low frequency oscillation in interconnected power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5): 69-73.
[9] 马燕峰,赵书强,刘森. 基于改进多信号 Prony 算法的低频振荡在线辨识[J]. 电网技术,2007,31(15):44-49.
MA Yanfeng,ZHAO Shuqiang,LIU Sen. Online identification of low-frequency oscillations on improved multi-signal Prony algorithm[J]. Power System Technology,2007,31(15):44-49.
[10] 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] // IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. Atlanta,Georgia,USA:[s.n.], 2006:436-443.
[11] BRONZINI M,BRUNO S,de BENEDICTIS M,et al. Power system modal identification via wavelet analysis [C] // Power Tech Conference. Lausanne,Switzerland:[s.n.],2007:2041-2046.
[12] MESSINA A R,VITTAL V. Extraction of dynamic patterns from wide-area measurements using empirical orthogonal function[J]. IEEE Trans on Power Systems,2007,22(2):682-692.
[13] BANEJAD M,LEDWICH G. Correlation based mode shape determination of a power system[C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing. Orlando,USA:[s.n.],2002:3832-3835.
[14] TRUDNOWSKI D. Estimating electromechanical mode shape from synchrophasor measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems,2008,23(3):1188-1195.
[15] TRUDNOWSKI D,HAUER J,PIERRE J. Using the coherency function to detect large-scale dynamic system modal observability

- [C]//Proceedings of the American conference. San Diego, California, USA: [s.n.], 1999: 2886-2890.
- [16] 陆超, 陆秋瑜. 电力系统低频振荡模式的自动分类研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 35-38, 48.
- LU Chao, LU Qiuyu. Research on power system low frequency oscillation modes classification[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 35-38, 48.
- [17] ERLICHER S, ARGOUL P. Modal identification of linear non-proportionally damped systems by wavelet transform[J]. Mechanical

System and Signal Processing, 2007, 21(3): 1386-1421.

作者简介:

潘学萍(1972-), 女, 安徽天长人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统分析与控制(**E-mail**: xueping_pan@163.com);

扈卫卫(1986-), 男, 山西孝义人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统低频振荡等(**E-mail**: xxzjnlqf@163.com);

尚 霏(1987-), 女, 天津人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统低频振荡等(**E-mail**: shangfei216@163.com)。

Wavelet analysis based modal parameter identification from multiple signals

PAN Xueping, HU Weiwei, SHANG Fei

(Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: An optimization method based on wavelet analysis is applied to identify the mode and modal shape of power system oscillation from multiple signals, which judges the mode observability of each signal according to the wavelet coefficients at wavelet ridge and adopts an optimization method to coordinate the mode parameters of signals with higher observability while neglects those with poor observability. The modal shape is also identified according to the wavelet coefficients at wavelet ridge. Because the energy of mode to be identified decays to zero at different times in different signals, a unified identification interval is proposed to identify the system modal parameters for easy modal shape analysis. Case study for a 2-area 4-machine system and the 10-machine New England system demonstrates that the identification accuracy of oscillation frequency and damping parameters is improved and the modal shape information among multiple signals is obtained.

Key words: electric power systems; wavelet transforms; wavelet ridge; optimization; mode; modal shape; signal analysis

(上接第 30 页 continued from page 30)

Criterion of current differential protection based on amplitude and phase difference of fault current

CONG Wei¹, ZHANG Linlin², CHENG Xueqi³, QIU Shengxiao³, XUN Tangsheng⁴, SONG Zhiming⁴

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control, Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Shandong Taian Power Supply Company, Taian 271000, China;

3. Shandong Weifang Power Supply Company, Weifang 261021, China;

4. State Grid of China Technology College, Ji'nan 250002, China)

Abstract: A criterion of current differential protection is proposed, which is based on the amplitude and phase difference of fault current component. The differential current is the sum of the fault current amplitude on own side and the product of that on opposite side and the cosine of phase difference between them, while the braking current is the difference. The influences of system impedance, transition resistance and distributed capacitance on the performance of the proposed criterion are analyzed. It is compared in performance with the fault current phasor differential criterion and the scalar product braking differential criterion. Results of simulation with EMTDC show that, the proposed criterion has higher sensitivity to in-zone faults, higher security for out-zone faults and better performance under different system impedances, transition resistances and distributed capacitances.

Key words: electric fault currents; sensitivity analysis; relay protection; amplitude; phase difference; computer simulation