

基于多通道快速傅里叶小波变换的电力系统 主导振荡模式及模态协同辨识方法研究

姜涛¹, 刘方正², 陈厚合¹, 李雪¹, 李国庆¹, 葛维春³

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 北京国电工程招标有限公司, 北京 100040;
3. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110004)

摘要:针对连续小波变换在主导振荡模式辨识中存在效率低的不足,提出一种快速傅里叶小波变换(CWTFT)方法以提高小波变换效率;针对单通道小波辨识的结果受振荡模式可观性影响的缺陷,提出一种多通道CWTFT,实现多通道量测信息的时频域分解,进而获得对应的小波系数矩阵;在此基础上,借助小波尺度相对能量甄别出与主导振荡模式强相关的关键小波尺度,以其为基准重构小波系数矩阵;对重构的小波系数矩阵进行奇异值分解,利用重构小波系数矩阵的第一左、右奇异特征向量辨识系统主导振荡模式及振荡模态。将所提方法应用到16机68节点测试系统和南方电网的广域实测数据中,结果验证了该方法的准确性和有效性。

关键词:电力系统;小扰动稳定;快速傅里叶小波变换;振荡模式;振荡模态

中图分类号:TM 76

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.019

0 引言

随着区域间电网互联规模不断扩大,可再生能源发电大规模并网,电力电子装备规模化应用,电力系统低频振荡已成为限制区域间输电能力、影响电网安全稳定运行的重要因素之一^[1-2]。传统用于分析低频振荡的主要方法为特征值分析^[3-4],该方法可计算出系统所有机电振荡模式,并给出各振荡模式下机组的可观性、可控性及参与因子,有利于运行人员确定系统所面临的动态稳定风险及采取合理措施改善系统的动态稳定性,但在实际应用时,该方法计算结果的真实性和准确性依赖于所建模型和参数准确度,且随着机组数量增加,该方法的计算量急剧增大,因此该分析方法多应用于电力系统的离线动态稳定分析。

近年来,随着同步相量测量单元(PMU)在电网大规模配置,以及各区域和省级电网广域量测平台的建设,利用广域量测信息分析和评估电力系统低频振荡已成为未来电网动态稳定评估的重要研究方法^[4-8]。采用广域量测信息分析和评估系统低频振荡的核心基础是模式识别,通过对隐含在广域量测信息中的低频振荡信息进行模式识别,提取与主导

低频振荡模式强相关的信息来辨识低频振荡的频率和阻尼比^[5]。该方法不依赖于系统模型和参数,完全基于广域量测信息即可实现对低频振荡的分析,其结果可实时反映系统当前运行状态下的小扰动稳定性,因而已在电力系统动态稳定在线监测、广域阻尼控制、交直流混联系统协调控制中得到了广泛应用^[7-10]。

目前,用于基于广域量测信息的电力系统主导振荡模式辨识的常用方法有 Prony 算法^[5]、Kalman 滤波^[7]、最小特征实现^[8]、稀疏时域法(STD)^[9]、随机子空间(SSI)^[10]等。其中以 Prony 算法最为经典, Prony 算法是一种多项式线性拟合的辨识方法,该方法通过求解逼近实测数据的多项式的根来辨识系统主导振荡模式,由于其为线性拟合算法,因而对噪声敏感,抗噪能力差,且该算法只局限于处理电力系统大扰动信号,不适用于处理电力系统的小扰动(类噪声)信号。为此,文献[7]将 Kalman 滤波算法应用到主导振荡模式辨识中,该方法计算速度快,对量测噪声具有强鲁棒性,且对不同的输入信号均具有较好的适用性,但 Kalman 滤波算法的辨识结果无法体现主导振荡模式的阻尼衰减特性。为克服 Kalman 滤波算法不能辨识系统主导振荡模式阻尼系数的不足,文献[11]将 SSI 应用到美国西部电网的动态稳定评估中,实现了美国西部电网主导振荡频率及其阻尼比的有效辨识,但对 SSI 存在的模型定阶难题没有给出一种有效的解决方案。

上述方法均从时域或频域单一维度出发辨识系统的主导振荡模式,不能从时-频域二维空间中揭示系统主导振荡模式随时间推移在空间中的变化趋势。为此,文献[12-13]通过连续小波变换(CWT)

收稿日期:2018-10-06;修回日期:2019-05-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607034);国家重点研发计划项目(2016YFB0900903);国网辽宁省电力有限公司科技项目(2018YF12)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607034), the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900903) and the Science and Technology Program of State Grid Liaoning Electric Power Company(2018YF12)

从电力系统量测信号中辨识系统的主导振荡模式。CWT 是一种时频信号分析方法,它继承和发展了短时傅里叶变换的局部化思想,同时又克服了短时傅里叶变换的窗口大小不随频率变化的不足,对信号具有时、频域的定位能力,适用于处理时变、非平稳信号,因而在研究、分析电力系统的主导振荡模式辨识中得到了广泛的关注。采用 CWT 虽可实现主导振荡模式的有效辨识,但在实际应用中存在如下问题:①辨识效率,在对量测信号进行小波变换时需进行大量的卷积运算,而计算机不能进行连续空间中的卷积计算,需将其转化到离散空间,因而会带来沉重的计算负担;②辨识精度,CWT 是一种单通道的辨识方法,其辨识结果受振荡模式的可观性和量测噪声的影响较大;③辨识结果过于单一,目前 CWT 多用于主导振荡模式辨识,而较少用于与主导振荡模式强相关且可指导运行人员采取措施改善系统动态稳定性的主导振荡模式辨识。

针对上述问题,本文提出一种基于多通道快速傅里叶小波变换(CWTFT)的电力系统主导振荡模式及模态协同辨识方法。首先,针对 CWT 的计算效率问题,提出一种 CWTFT 方法以提高小波变换在电力系统主导振荡辨识中的计算效率;然后,针对单通道 CWT 辨识结果易受振荡模式可观性影响的不足,提出一种多通道 CWTFT,实现多通道量测信息的时频域分解,进而获得对应的小波系数矩阵;在此基础上,通过小波尺度相对能量甄别出与系统主导振荡模式强相关的关键小波尺度系数;以关键小波尺度系数为基准,重构小波系数矩阵;对重构的小波系数矩阵进行奇异值分解,利用重构小波系数矩阵的第一左、右奇异特征向量辨识系统主导振荡模式和振荡模态;最后将所提方法应用到 16 机 68 节点测试系统和南方电网实测数据中进行分析、验证。

1 基于 CWTFT 的振荡模式识别

1.1 基于 CWT 的振荡模式辨识

小波变换的实质就是通过有限长或者快速衰减的母小波进行伸缩和平移,以使所得波形可匹配所研究的信号,进而基于所选择的母小波来分析和研究信号的时频特性。对于电力系统的量测信号 $x(t)$,其小波变换可表示为^[13]:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \phi_{a,b}^*(t) dt \quad (1)$$

其中, a 为小波变换的伸缩尺度系数,描述母小波的伸缩变化; b 为小波变换的位移系数,描述母小波平移的位置变化; $W(a, b)$ 为量测信号 $x(t)$ 的小波系数; $\phi_{a,b}(t)$ 为母小波 $\phi(t)$ 经拉伸 a 和平移 b 之后得

到的子小波,“*”表示取共轭。

选择合适的母小波是提升小波变换分析效率和精度的关键^[13-14]。由于电力系统的主导振荡模式为复数形式,其对应的量测信息体现为复信号形式,为从电力系统广域量测复信号中辨识出系统的主导振荡模式,所选择的母小波必为复小波,而复 Morlet 小波正是所需可辨识系统主导振荡模式的复母小波,为此本文采用复 Morlet 小波作为小波变换的母小波,其母小波和子小波数学表达式为^[12-13]:

$$\begin{cases} \phi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{-j2\pi f_c t} e^{-t^2/f_b} \\ \phi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) = \frac{1}{\sqrt{a\pi f_b}} e^{-j2\pi f_c \frac{t-b}{a}} e^{-\frac{1}{f_b}\left(\frac{t-b}{a}\right)^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中, f_c 为小波变换中心频率; f_b 为小波变换带宽频率。

基于式(2)的复 Morlet 小波,式(1)中含有单一主导振荡模式的电力系统广域量测信号 $x(t)$ 的小波系数为:

$$W(a, b) = \frac{\sqrt{a} A e^{-\zeta \omega_0 b}}{2} e^{-f_b/4[a^2 \omega_d^2 + (2\pi f_c)^2]} (e^{\varphi} + e^{-\varphi}) \quad (3)$$

其中, A 为 $x(t)$ 中主导振荡模式的幅值; ω_0 、 ω_d 和 ζ 分别为主导振荡模式的无阻尼振荡角速度、有阻尼振荡角速度和阻尼比; $\varphi = j(\omega_d b + \theta) + \pi a f_b f_c \omega_d$, θ 为小波系数 $W(a, b)$ 的初始相位角。

由于 $\varphi \gg 1$, 则 $e^{\varphi} \gg e^{-\varphi}$ ^[14], 因此, 式(3)可近似为:

$$W(a, b) = \frac{\sqrt{a} A e^{-\zeta \omega_0 b}}{2} e^{-\frac{f_b}{4}(a \omega_d - 2\pi f_c)^2 + j(b \omega_d + \theta)} \quad (4)$$

进一步,式(1)中含多个主导振荡模式的 $x(t)$ 可表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^m A_i e^{-\zeta_i \omega_{0i} t} \cos(\omega_i t + \theta_i) \quad (5)$$

其中, m 为 $x(t)$ 中所含主导振荡模式的数量; A_i 为第 i 个振荡模式的幅值; ω_{0i} 、 ω_i 、 ζ_i 和 θ_i 分别为第 i 个振荡模式的无阻尼振荡角速度、有阻尼振荡角速度、振荡阻尼比和初始相位角。

其小波系数矩阵 $W(a, b)$ 为:

$$W(a, b) = \begin{bmatrix} W(a_1, b) \\ W(a_2, b) \\ \vdots \\ W(a_k, b) \\ \vdots \\ W(a_p, b) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} W(a_1, b_1) & W(a_1, b_2) & \cdots & W(a_1, b_l) \\ W(a_2, b_1) & W(a_2, b_2) & \cdots & W(a_2, b_l) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ W(a_k, b_1) & W(a_k, b_2) & \cdots & W(a_k, b_l) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ W(a_p, b_1) & W(a_p, b_2) & \cdots & W(a_p, b_l) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, p 为尺度系数 a 的长度; l 为位移系数 b 的长度; $W(a_k, b_i)$ ($k=1, 2, \dots, p; i=1, 2, \dots, l$) 为 $\mathbf{x}(t)$ 在尺度系数 a_k 、位移系数 b_i 处的小波系数; $\mathbf{W}(a_k, b)$ 为 $\mathbf{x}(t)$ 在 a_k 的小波系数向量, 其表达式如式(7)所示。

$$\mathbf{W}(a_k, b) = \frac{\sqrt{a_k}}{2} A_k e^{-\zeta_k \omega_{0k} b} e^{j\omega_k b + \theta_k} \quad (7)$$

式(7)中 $\mathbf{W}(a_k, b)$ 的幅值 $|\mathbf{W}(a_k, b)|$ 以及相位 $\text{angle}(\mathbf{W}(a_k, b))$ 分别为:

$$\begin{cases} |\mathbf{W}(a_k, b)| = \frac{\sqrt{a_k}}{2} A_k e^{-\zeta_k \omega_{0k} b} \\ \text{angle}(\mathbf{W}(a_k, b)) = \omega_k b + \theta_k = \omega_{0k} \sqrt{1 - \zeta_k^2} b + \theta_k \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知:对于确定的小波尺度系数 a_k , 式(7)中小波系数 $\mathbf{W}(a_k, b)$ 的 A_k 、 ω_{0k} 、 ω_k 及 ζ_k 的值均保持不变, 因此 $\mathbf{W}(a_k, b)$ 的模对数 $\ln |\mathbf{W}(a_k, b)|$ 和相位 $\text{angle}(\mathbf{W}(a_k, b))$ 均是关于 b 的一元一次函数。因此, 分别对 $\ln |\mathbf{W}(a_k, b)|$ 和 $\text{angle}(\mathbf{W}(a_k, b))$ 关于位移系数 b 求导可得:

$$\begin{cases} \frac{d(\ln |\mathbf{W}(a_k, b)|)}{db} = -\zeta_k \omega_{0k} \\ \frac{d(\text{angle}(\mathbf{W}(a_k, b)))}{db} = \omega_k = \omega_{0k} \sqrt{1 - \zeta_k^2} \end{cases} \quad (9)$$

联立式(9)求解 ω_{0k} 和 ζ_k , 可得第 k 个关键小波尺度系数 a_k 对应的第 k 个主导振荡模式的振荡频率 f_k 和阻尼比 ζ_k 。

$$\begin{cases} f_k = \frac{\sqrt{\left(\frac{d \ln |\mathbf{W}(a_k, b)|}{db}\right)^2 + \left(\frac{d \text{angle}(\mathbf{W}(a_k, b))}{db}\right)^2}}{2\pi} \\ \zeta_k = -\frac{d \ln |\mathbf{W}(a_k, b)|}{db} / (2\pi f_k) \end{cases} \quad (10)$$

1.2 基于 CWTFT 的 CWT

采用 CWT 可从广域量测信息中辨识出系统的主导振荡模式, 但其计算过程极为复杂, 计算效率极为低下。为此, 本文将 CWTFT 与其逆变换相结合计算小波系数矩阵, 以提高小波变换效率, 基本处理过程如下。

首先, 根据式(2), 将式(1)进一步表示为:

$$\mathbf{W}(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{x}(t) \frac{1}{\sqrt{a\pi f_b}} e^{j2\pi f_c \frac{t-b}{a}} e^{-\frac{1}{f_b} \left(\frac{t-b}{a}\right)^2} dt \quad (11)$$

式(11)的连续卷积积分可近似为式(12)所示的离散卷积求和形式。

$$\mathbf{W}(a, d) = \frac{1}{\sqrt{a\pi f_b}} \sum_{k=1}^N \mathbf{x}(k\Delta t) e^{j2\pi f_c \frac{(k-d)\Delta t}{a}} e^{-\frac{(\Delta t)^2}{f_b} \left(\frac{k-d}{a}\right)^2} \quad (12)$$

其中, k 和 d 分别表示离散后的时间变量, 对应式(11)中的变量 t 和 b ; N 为总离散时间点, 即离散点的总采样数; Δt 为采样周期; $d = b/\Delta t$ 。

由式(12)的离散卷积求和公式可知:对给定的尺度 a 和离散位移 d , 离散小波系数 $\mathbf{W}(a, d)$ 的计算耗时与量测数据总采样点数 N 密切相关, 其对应的计算时间复杂度为 $O(N)$, 进一步可推断出该量测数据小波系数矩阵的计算时间复杂度为 $O(pN^2)$ 。而在基于广域量测的电力系统主导振荡模式辨识中, 辨识精度与量测数据的长度密切相关, 量测数据越长, 辨识结果的准确性越高, 反之亦然。而量测数据的增加必然带来量测数据的离散小波系数矩阵 $\mathbf{W}(a, d)$ 计算耗时的急剧增加。为降低小波系数矩阵 $\mathbf{W}(a, d)$ 的计算耗时, 参考文献[14], 对式(12)中第 k 次采样数据进行离散傅里叶变换:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \frac{1}{N} \sum_{z=1}^N \mathbf{x}(z\Delta t) e^{-\frac{j2\pi kz}{N}} \quad (13)$$

在式(13)的基础上, 对式(12)进行离散傅里叶变换和反变换, 得到式(12)的小波系数 $\mathbf{W}(a, d)$ 计算表达式为:

$$\mathbf{W}(a, d) = \frac{1}{N\sqrt{a\pi f_b}} \times \sum_{k=1}^N \left(\sum_{z=1}^N \mathbf{x}(z\Delta t) e^{-\frac{j2\pi kz}{N}} \right) e^{j2\pi f_c d \Omega_k \Delta t} e^{-\frac{(d\Omega_k \Delta t)^2}{f_b}} e^{j\Omega_k d \Delta t} \quad (14)$$

$$\Omega_k = \begin{cases} \frac{j2\pi k}{N} & k \leq \frac{N}{2} \\ \frac{-j2\pi k}{N} & k > \frac{N}{2} \end{cases}$$

式(14)是通过离散傅里叶变换计算 \mathbf{x} 的小波系数矩阵的基本表达式。由式(14)可知:采用离散傅里叶变换计算 \mathbf{x} 的小波系数矩阵时, 其计算时间的复杂度仍为 $O(pN^2)$, 与式(12)相比, 并未提高小波系数矩阵的计算效率。进一步从提高离散傅里叶变换计算效率的角度出发, 借鉴目前常用的高效快速傅里叶变换方法, 对式(12)中的变量进行离散傅里叶变换和逆变换, 其对应的小波系数矩阵的计算时间复杂度降为 $O(pM \log_2 N)$ 。对比式(12)的小波系数矩阵计算时间复杂度可知:采用快速傅里叶变换和逆变换的小波系数矩阵计算方法, 可降低对应的

小波系数矩阵的计算时间复杂度,进而有效提高量测数据的小波变换效率。

1.3 关键小波尺度系数的确定

采用小波变换可有效从电力系统的广域实测信号中估计出系统主导振荡模式的振荡频率和阻尼比,但其关键为如何从小波系数矩阵的尺度系数中甄别出与主导振荡模式强相关的关键尺度系数。本文参考文献[14]采用小波相对能量来辨识与系统主导振荡模式强相关的小波尺度系数,各小波尺度系数所对应的相对能量计算公式为:

$$R_k = \frac{\sum_{j=1}^l (\alpha_{kj}^2 + \beta_{kj}^2)}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^l (\alpha_{ij}^2 + \beta_{ij}^2)} \quad (15)$$

其中, R_k 为量测信号 $\mathbf{x}(t)$ 在第 k 个小波尺度系数 a_k 处的相对能量; α_{kj} 和 β_{kj} 分别为量测信号 $\mathbf{x}(t)$ 在尺度系数 a_k 、位移参数 b_j 处小波系数 $W(a_k, b_j)$ 的实部和虚部。根据式(15)可得量测信号 $\mathbf{x}(t)$ 经小波变换后在小波尺度系数 a_1, a_2, \dots, a_p 处的相对小波能量 R_1, R_2, \dots, R_p , 设置相对小波能量阈值 R_0 , 若 $R_k \geq R_0$, 则认为该小波相对能量对应的小波尺度系数 a_k 为系统的关键小波尺度系数, 其对应的振荡模式为系统的主导振荡模式。然后针对所甄别出的关键小波尺度系数, 根据式(10)计算该关键小波尺度系数所对应的主导振荡模式的振荡频率和阻尼比。

2 多通道 CWTFT

虽然 CWTFT 相较于传统的 CWT 可有效提高主导振荡模式辨识的辨识效率, 但该方法仍是一种单通道辨识方法, 对多通道的广域量测信息只能逐一进行主导振荡模式辨识。理论上, 系统的主导振荡模式辨识结果是唯一的, 但在实际系统中, 受振荡模式的可观性影响, 各量测通道的辨识结果不尽相同, 因而多通道辨识结果不能全面、整体地给出系统的动态稳定评估结果。为全面、整体地评估电力系统的动态稳定性, 并进一步为电网运行调度人员提供更多信息为后续的动态稳定控制提供支持, 本节参考文献[15], 基于奇异值分解提出一种可实现主导振荡模式及模态协同评估的多通道 CWT, 该方法整体辨识过程如下。

(1) 对系统内 n 台发电机的广域量测信息分别进行 CWTFT 形成 n 个小波系数矩阵。

$$\mathbf{W}_i(a, b) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_i(a_1, b) \\ \mathbf{W}_i(a_2, b) \\ \vdots \\ \mathbf{W}_i(a_k, b) \\ \vdots \\ \mathbf{W}_i(a_p, b) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} W_i(a_1, b_1) & W_i(a_1, b_2) & \cdots & W_i(a_1, b_l) \\ W_i(a_2, b_1) & W_i(a_2, b_2) & \cdots & W_i(a_2, b_l) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_i(a_k, b_1) & W_i(a_k, b_2) & \cdots & W_i(a_k, b_l) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_i(a_p, b_1) & W_i(a_p, b_2) & \cdots & W_i(a_p, b_l) \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{W}_i(a, b)$ 为第 i 台发电机量测信息的小波系数矩阵。

(2) 根据式(15)计算每个发电机小波系数矩阵中各小波尺度系数的相对能量, 确定主导小波尺度系数 a_k 。

(3) 根据所确定的主导小波尺度系数 a_k , 重构小波系数矩阵 $\mathbf{W}'(a_k, b)$ 。

$$\mathbf{W}'(a_k, b) = \begin{bmatrix} W_1(a_k, b_1) & W_1(a_k, b_2) & \cdots & W_1(a_k, b_l) \\ W_2(a_k, b_1) & W_2(a_k, b_2) & \cdots & W_2(a_k, b_l) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_n(a_k, b_1) & W_n(a_k, b_2) & \cdots & W_n(a_k, b_l) \end{bmatrix} \quad (17)$$

(4) 对每个重构的小波系数矩阵 $\mathbf{W}'(a_k, b)$ 进行奇异值分解有:

$$\mathbf{W}'(a_k, b) = \mathbf{U}_k \mathbf{S}_k \mathbf{V}_k \quad (18)$$

其中, $\mathbf{U}_k, \mathbf{S}_k, \mathbf{V}_k$ 分别为 $\mathbf{W}'(a_k, b)$ 经奇异值分解所得左奇异值特征向量矩阵、奇异值矩阵和右奇异值特征向量矩阵。

(5) 在所得的奇异值矩阵 \mathbf{S}_k 中, 奇异值通常由大到小呈对角线排列, 由于最大奇异值 s_1 对应的左、右奇异值向量中包含的电力系统动态信息最丰富, 因此可采用 s_1 对应的左、右奇异值特征向量 $\mathbf{U}_{k,1}$ 和 $\mathbf{V}_{k,1}$ 估计系统的主导振荡模式及振荡模态^[15]。首先, 按式(19)利用 $\mathbf{V}_{k,1}$ 估计与关键小波变换尺度系数 a_k 强相关振荡模式的振荡频率和阻尼比。

$$\begin{cases} f_k = \frac{\sqrt{\left(\frac{d \ln |\mathbf{V}_{k,1}|}{dt}\right)^2 + \left(\frac{d \angle(\mathbf{V}_{k,1})}{dt}\right)^2}}{2\pi} \\ \zeta_k = \frac{\frac{d \ln |\mathbf{V}_{k,1}|}{dt}}{2\pi f_k} \end{cases} \quad (19)$$

进一步, 由第一左奇异特征向量 $\mathbf{U}_{k,1}$ 得第 k 个主导振荡模式的振荡模态 \mathbf{u}_k 为^[15]:

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{U}_{k,1} \quad (20)$$

其中, \mathbf{u}_k 为第 k 个主导振荡模式的振荡模态。

3 算法流程

综上所述, 本文所提基于多通道 CWTFT 的电力系统主导振荡模式及模态协同评估整体流程如下:

- (1) 从 PMU 装置中获取系统的广域实测数据;
- (2) 对每个量测通道的广域实测数据分别进行 CWTFT, 获取各量测通道所对应的小波系数矩阵;
- (3) 计算各小波系数矩阵中各尺度系数的相对能量, 确定与主导振荡模式强相关的关键小波尺度系数;
- (4) 综合各小波系数矩阵的关键小波尺度系数, 确定关键小波尺度系数集合, 按关键小波尺度系数重构小波系数矩阵;
- (5) 对各重构小波系数矩阵进行奇异值分解, 获取各重构小波系数矩阵的第一左、右奇异特征向量 $U_{k,1}$ 和 $V_{k,1}$;
- (6) 根据式(19)从第一右奇异特征向量 $V_{k,1}$ 中辨识该关键小波尺度所对应的主导振荡模式的振荡频率和阻尼比;
- (7) 根据式(20)从第一左奇异特征向量 $U_{k,1}$ 中辨识该关键小波尺度系数所对应的主导振荡模式的振荡模态。

4 算例分析

为验证本文方法的正确性和有效性, 分别以 16 机 68 节点测试系统和我国南方电网为例进行分析、验证。

4.1 16 机 68 节点测试系统

16 机 68 节点测试系统共分为 5 个区域, 其中发电机 $G_1—G_9$ 位于区域 1; 发电机 $G_{10}—G_{13}$ 位于区域 2; 发电机 G_{14} 位于区域 3; 发电机 G_{15} 位于区域 4; 发电机 G_{16} 位于区域 5。系统参数详见文献[3]。

为验证所提方法的正确性和有效性, 本节采用该系统的时域仿真数据模拟电力系统的广域量测数据, 故障设置为支路 1-47 近节点 1 侧发生三相短路故障, 故障持续时间 0.1 s, 0.1 s 后节点 1 侧断路器跳开, 0.12 s 后节点 47 侧断路器跳开。以 G_1 为参考机组, 采样频率为 100 Hz, 故障期间系统中各发电机转子角摇摆曲线如图 1 所示。

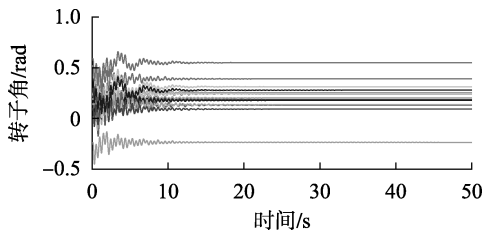


图 1 16 机 68 节点测试系统发电机转子角摇摆曲线图

Fig.1 Oscillation curves of rotor angles for 16-machine 68-bus test system

以图 1 中 20~50 s 的发电机转子角作为本文所提方法的输入信号, 首先对该时间窗口内的转子角信息进行归一化处理; 针对处理后的各发电机转子角信息, 引入 CWTFT 对其进行小波变换, 共得到 15

个小波系数矩阵; 根据式(15)计算各小波系数矩阵中各尺度所对应的相对能量, 设相对小波能量阈值 $R_0=0.15$ 。图 2 给出了 G_3 和 G_{16} 小波系数矩阵各尺度所对应的相对能量。由图 2(a)可知, G_3 小波系数矩阵中各尺度相对能量出现 1 个峰值对应的尺度系数为 12, 其相对能量为 0.248 9, 其他尺度的相对能量均低于 0.15, 根据 CWT 中确定主导振荡模式的通用方法可知: 相对能量峰值的尺度对应于系统的主导振荡模式, 而非峰值的尺度对应于系统的虚假振荡模式, 因此可认为 G_3 的转子角量测信息中存在 1 组主导振荡模式, 对应于尺度 12。同理, 由图 2(b)给出 G_{16} 小波系数矩阵各尺度的相对能量, 可知该发电机转子角量测信息中也包含 1 组主导振荡模式, 对应尺度 16, 其相对能量为 0.201 7。通过计算和对比图 1 中各发电机转子角量测信息的小波系数矩阵中各尺度系数的相对能量可得出: 支路 1-47 故障激发出系统的 2 组主导振荡模式, 分别对应小波系数矩阵的尺度 12 和 16。

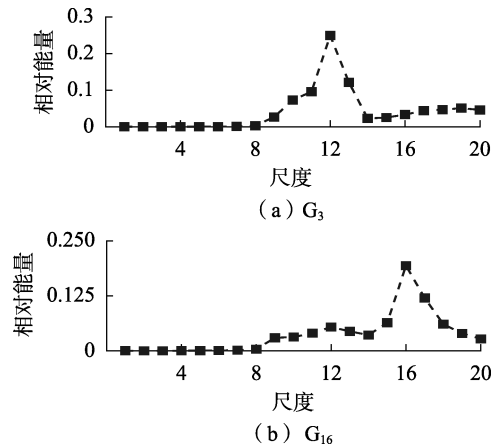


图 2 发电机转子角量测信息的小波尺度系数相对能量

Fig.2 Relative energy of wavelet scale coefficient for measured rotor angles of generators

分别从各发电机转子角量测信息的小波系数矩阵中提取出尺度 12 和 16 所对应的小波系数, 以尺度系数 12 和 16 为基准, 根据式(17)重构小波系数矩阵 W'_{12} 和 W'_{16} 。依据式(18)对重构后的小波系数矩阵 W'_{12} 和 W'_{16} 分别进行奇异值分解, 其对应的第一奇异值分别为 495.145 8 和 860.714 6。进一步, 根据式(19)利用各关键尺度小波系数矩阵第一右奇异特征向量的模对数和相位, 计算关键尺度系数 12 和 16 所对应的系统主导振荡模式, 结果如表 1 所示。表 1 同时给出了采用特征值分析所得的系统主导振荡模式, 对比表中本文所提多通道 CWTFT 和特征值分析结果可知, 采用本文所提方法可准确辨识出系统主导振荡模式。

进一步, 根据式(20), 由第一左奇异特征向量得到上述 2 种主导振荡模式下的振荡模态, 结果如

表 1 本文方法与特征值分析的振荡模式辨识结果对比
Table 1 Comparison of oscillation mode identification results between proposed method and eigenvalue analysis

振荡模式	关键尺度	本文方法		特征值分析	
		f/Hz	$\zeta/\%$	f/Hz	$\zeta/\%$
1	16	0.268 5	19.732 6	0.259 0	19.985 9
2	12	1.142 8	3.740 1	1.140 7	3.509 5

附录中图 A1(a) 和 A2(a) 所示。由图中所辨识的主导振荡模式可知: 振荡模式 1 主要体现为位于区域 1 中的发电机 G_2 — G_7 、 G_9 与分别位于区域 3、4、5 的发电机 G_{14} 、 G_{15} 、 G_{16} 相对振荡, 且发电机 G_{14} 、 G_{15} 、 G_{16} 在该振荡模式下处于主导地位; 振荡模式 2 主要体现为位于区域 1 中的发电机 G_2 — G_9 与分别位于区域 2 发电机 G_{12} 、 G_{13} 和区域 3、4、5 的发电机 G_{14} 、 G_{15} 、 G_{16} 同调, 而与位于区域 1 发电机 G_8 和区域 2 的发电机 G_{10} 、 G_{11} 相对振荡, 且发电机 G_3 、 G_{10} 、 G_{12} 在该振荡模式下处于主导地位。

附录中图 A1(b) 和图 A2(b) 进一步给出了采用特征值分析所得的主导振荡模式 1 和 2 的振荡模式, 对比附录中图 A1 和图 A2 中本文所提方法和特征值分析方法所估计出的系统振荡模式可知, 虽然上述 2 种方法所估计出的振荡模式 1 和 2 的振荡模式不尽相等, 但 2 种方法所得出的振荡模式 1 和 2 的相对振荡机群分布及其主导机群构成总体一致, 该结果表明, 本文所提的多通道连续小波变换方法可有效辨识出系统的主导振荡模式。

由 CWT 和 CWTFT 的振荡模式辨识基本原理可知: CWT 和 CWTFT 均属于单通道的辨识方法, 其辨识结果受振荡模式可观性影响较大。而本文所提的多通道 CWTFT 方法可有效避免单通道辨识的不足, 实现对系统动态稳定性的整体评估, 图 3 分别对比给出了单通道 CWTFT 和多通道 CWTFT 所辨识出的

系统主导振荡模式。由图 3 可知: 受振荡模式可观性影响, 振荡模式 1 仅在 G_{14} 、 G_{15} 和 G_{16} 的转子角量测信息中辨识出, 而未在其他发电机的转子角量测信息中辨识出; 振荡模式 2 仅在 G_2 、 G_3 、 G_5 — G_{10} 和 G_{12} 的转子角量测信息中辨识出, 而未在 G_4 和 G_{11} — G_{16} 的转子角量测信息中辨识出。显然, 由图中单通道和多通道 CWTFT 的辨识结果可知: 由于受振荡模式可观性影响, 单通道 CWTFT 未从 G_2 — G_{13} 辨识出系统的主导振荡模式 1, 若以该辨识结果来评估系统动态稳定性, 易误导运行人员认为该次故障未激发出主导振荡模式 1, 当该振荡模式处于弱阻尼或负阻尼状态时, 运行人员将因该错误信息延误采取快速、有效的措施来抑制该振荡模式的时间, 容易引发大停电事故; 同理, 振荡模式 2 也会因单通道 CWTFT 辨识的不足带来类似的大停电事故。

进一步, 由图 3 结果可知: 受振荡模式可观性影响, 同一振荡模式在各量测通道中所估计出的振荡频率和阻尼比不尽相同, 如采用单通道 CWTFT 在 G_2 的转子角量测信息中所辨识出的振荡模式 2 的振荡频率和阻尼比分别为 1.056 0 Hz 和 3.620 5%, 而在 G_3 的转子角量测信息中所辨识出的振荡模式 2 的振荡频率和阻尼比分别为 1.196 3 Hz 和 4.132 7%。这些不同的辨识结果不能准确表征系统真实的动态稳定性。为此, 通常的处理方法是采用单通道辨识方法对多个通道量测信息进行辨识, 然后以辨识结果均值来表征系统的动态稳定性。

表 2 进一步以特征值分析结果为参考, 对比分析单通道和多通道 CWTFT 的辨识精度, 其中单通道 CWTFT 的辨识结果为采用单通道 CWTFT 对多个量测通道的量测信息进行辨识后所取均值。显然, 由表 2 不难发现: 所提多通道 CWTFT 的辨识误差均小于单通道 CWTFT 均值的辨识误差, 验证了所提方法相对单通道 CWTFT 方法具有较高的辨识精度。

表 2 单通道与多通道 CWTFT 估计结果对比

Table 2 Estimated results comparison between single-channel CWTFT and multi-channel CWTFT

方法	振荡模式	振荡频率		阻尼比	
		估计值/ Hz	误差/ %	估计值/ %	误差/ %
单通道 CWTFT	1	0.268 7	3.745 2	19.643 3	1.714 2
	2	1.127 1	1.192 3	3.754 4	6.978 2
多通道 CWTFT	1	0.268 5	3.668 0	19.732 6	1.267 4
	2	1.142 8	0.184 1	3.740 1	6.570 7

进一步对比 CWT 和 CWTFT 的辨识原理可知: 采用 CWTFT 可有效降低小波系数计算的复杂度, 提高电力系统振荡模式辨识的效率。为此, 表 3 进一步对比了不同量测数据窗口下 CWT 和 CWTFT 的辨识效率(计算平台硬件配置为: CPU Intel Core i5-3210M, 主频 2.5 GHz, 内存 8 GB)。由表 3 的主导振

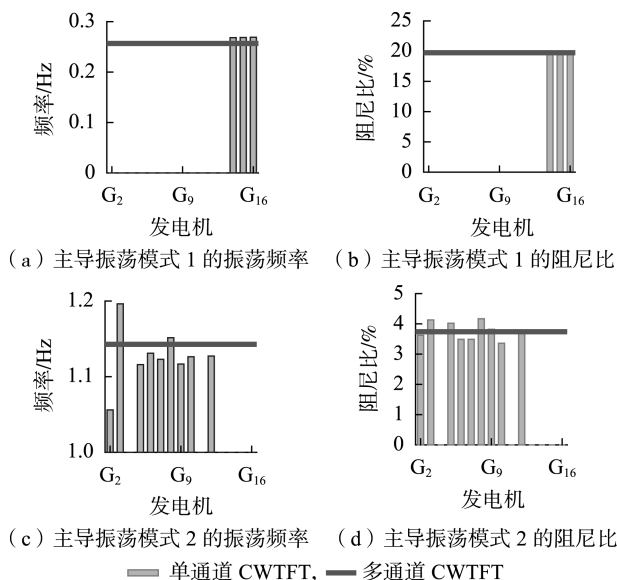


图 3 模式辨识结果对比图

Fig.3 Comparison of mode identification results

荡模式的计算耗时可看出:虽然随着量测数据窗口的增加,CWT和CWTFT的计算耗时都会增长,但CWTFT的计算耗时均较CWT的低,该结果验证了本文所提的CWTFT辨识方法相对CWT辨识方法可有效提高电力系统主导振荡模式及模态的辨识效率。

表3 CWT和CWTFT计算时间对比

Table 3 Computational time comparison between CWT and CWTFT

方法	计算时间/s					
	0~10 s	0~20 s	0~30 s	0~40 s	0~50 s	20~50 s
CWT	0.323 7	0.598 9	0.976 6	1.534 6	2.129 9	0.957 0
CWTFT	0.201 5	0.416 6	0.781 3	1.281 3	1.937 3	0.776 4

注:表头中时间范围表示时间窗口。

4.3 南方电网广域实测数据

本节进一步以附录中图A3所示南方电网某次故障下LP、YS、XR-I、XR-II、LD、SD、SZ、ZQ、HD、ZZ站PMU实测频率作为所提方法的输入,来辨识该次故障下系统主导振荡模式及其振荡模态,以验证所提方法的实用性。图中LP和YS位于云南;XR-I和XR-II位于贵州;LD、SD、SZ、ZQ、HD和ZZ位于广东。长期运行经验表明:南方电网存在以云广和云贵为主的区域间振荡模式和以滇西北—滇西南、粤西—粤东、黔东南—黔西南为主的局部振荡模式。其中云广振荡模式主要表现为处于云南电网内部的机组相对处于广东电网内部的机组振荡,贵州电网机组与云南电网机组同调,广东电网机组同调;云贵振荡模式主要表现为处于云南电网内部的机组相对处于贵州电网内部的机组振荡,广东电网机组随故障位置不同存在与云南或贵州电网机组同调的可能性。

分别对附录图A3中的多通道广域实测频率进行CWTFT,形成对应的小波系数矩阵,依据式(15)计算各小波系数矩阵中各小波尺度系数的相对能量,图4给出了ZZ站实测频率的小波系数矩阵中各小波尺度系数的相对能量,通过综合附录图A3中各量测通道实测频率小波系数矩阵中各小波尺度系数的相对能量可知:该次故障主要激发了2组主导振荡模式,分别对应尺度15和16。

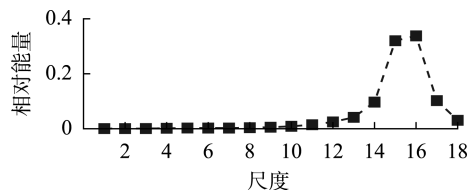


图4 ZZ站实测频率的小波尺度系数相对能量

Fig.4 Relative energy of wavelet scale coefficient for measured frequencies of ZZ station

分别对附录图A3中各量测通道实测频率小波系数矩阵尺度15和16所对应行重构小波系数矩阵 W'_{15} 和 W'_{16} 进行奇异值分解,然后利用 W'_{15} 和 W'_{16} 第

一右奇异特征向量 $V_{15,1}$ 和 $V_{16,1}$ 估计出该次故障中所激发出的2种主导振荡模式,结果如表4所示。进一步,由式(20)根据 W'_{15} 和 W'_{16} 第一左奇异特征向量 $U_{15,1}$ 和 $U_{16,1}$ 估计这2种主导振荡模式所对应的振荡模态,结果如附录中图A4所示。

表4 南方电网实测频率的主导振荡模式辨识结果

Table 4 Dominant modes identification results for measured frequencies of China Southern Power Grid

振荡模式	关键尺度	f/Hz	$\zeta/\%$
1	15	0.361 8	6.648 9
2	16	0.308 0	3.850 2

对比表4和附录中图A4结果可知:表4中小波关键尺度15对应的主导振荡模式1体现为位于云南的LP和YS相对位于贵州和广东的XR-I、XR-II、LD、SD、SZ、ZQ、HD和ZZ相对振荡;表4中小波关键尺度16对应的主导振荡模式2体现为位于云南和贵州的LP、YS、XR-I和XR-II相对位于广东的LD、SD、SZ、ZQ、HD和ZZ振荡。

显然,由上述振荡模式及模态结果可推断:关键尺度系数15所对应的振荡模式为南方电网的云贵区域间振荡模式;关键尺度系数16所对应的振荡模式为南方电网的云广区域间振荡模式。上述结果表明:本文所提方法可应用于实际电力系统的主导振荡模式及模态的协同辨识。

5 结论

本文提出一种基于多通道CWTFT的电力系统主导振荡模式及模态协同辨识方法,将本文所提方法应用到16机68节点测试系统和南方电网广域实测数据中进行分析、验证,相关结论如下:

(1)通过与特征值分析结果对比,验证了本文所提方法可准确、有效地从电力系统广域量测信息中辨识出系统的主导振荡模式和主导振荡模态;

(2)通过与传统的CWT进行对比,验证了本文所提方法可有效提高主导振荡模式及模态的辨识效率;

(3)通过与单通道CWTFT方法进行对比,验证了本文方法可有效避免单通道CWTFT辨识结果受振荡模式可观性和量测噪声的影响,实现对系统扰动稳定性的整体、准确评估。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 姜涛. 基于广域量测信息的电力大系统安全性分析与协调控制[D]. 天津:天津大学,2015.
JIANG Tao. Wide area security assessment and control for bulk power system with WAMS data[D]. Tianjin:Tianjin University,2015.
- [2] 秦超,曾沅,苏寅生,等. 基于安全域的大规模风电并网系统低频振荡稳定分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):100-106.

- QIN Chao, ZENG Yuan, SU Yinsheng, et al. Stability analysis of low-frequency oscillation of large-scale wind power grid-connected system based on security domain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 100-106.
- [3] ROGERS G. Power system oscillation[M]. Norwell, MA, USA: Kluwer, 2000: 3-4.
- [4] 马静, 彭明法, 王彤, 等. 故障系统低频振荡特征值分析方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 13-19.
MA Jing, PENG Mingfa, WANG Tong, et al. Analysis methods for low-frequency oscillation eigenvalue of faulty system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 13-19.
- [5] 张俊峰, 杨婷, 陈珉, 等. 基于 Prony 滑动平均窗算法的电力系统低频振荡特征分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 178-183.
ZHANG Junfeng, YANG Ting, CHEN Min, et al. Analysis of low-frequency oscillation characteristics of power system based on Prony sliding average window algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 178-183.
- [6] HAUER J F, DEMEURE C J, SCHARF L L. Initial results in Prony analysis of power system response signals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(1): 80-89.
- [7] PENG J C H, NAIR N K C. Enhancing Kalman filter for tracking ringdown electromechanical oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1042-1050.
- [8] 高洁, 李群湛, 汪佳, 等. 基于模糊聚类的 NEX-T-ERA 低频振荡类噪声辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 40-49.
GAO Jie, LI Qunzhan, WANG Jia, et al. Modal parameter identification of low frequency oscillation through NEX-T-ERA based on fuzzy clustering[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 40-49.
- [9] 韩润, 滕予非, 谢剑, 等. 基于改进 STD 法的电力系统低频振荡辨识[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 58-63.
HAN Run, TENG Yufei, XIE Jian, et al. Power system low-frequency oscillation identification based on improved STD method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 58-63.
- [10] JIANG T, MU Y F, JIA H J, et al. A novel dominant mode estimation method for analyzing inter-area oscillation in China Southern Power Grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5): 2549-2560.
- [11] ZHOU N, PIERRE J W, HAUER J F. Initial results in power system identification from injected probing signals using a subspace method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(C-3): 1296-1302.
- [12] 喻敏, 王斌, 陈绪轩, 等. 同步挤压小波变换在电力系统低频振荡模态参数提取中的应用[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 14-20.
YU Min, WANG Bin, CHEN Xuxuan, et al. Application of synchro-squeezed wavelet transform for extraction of the oscillatory parameters of low frequency oscillation in power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 14-20.
- [13] 李国庆, 王丹, 姜涛, 等. 基于递归连续小波变换的电力系统振荡模式辨识[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 8-16.
LI Guoqing, WANG Dan, JIANG Tao, et al. Power system oscillation mode identification based on recursive continuous wavelet transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 8-16.
- [14] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bull Amer Meteorol Soc, 1998, 79(1): 61-78.
- [15] 章国稳, 汤宝平, 唐光武. 基于数据缩减的分频段小波模态参数快速识别[J]. 振动工程学报, 2012, 25(1): 49-54.
ZHANG Guowen, TANG Baoping, TANG Guangwu. Sub-frequency band rapid modal identification using wavelet based on data reduction[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(1): 49-54.

作者简介:



姜涛

姜涛(1983—),男,湖北随州人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统安全性与稳定性、可再生能源集成、综合能源系统(E-mail: t.jiang@aliyun.com);

刘方正(1993—),男,吉林长春人,硕士,研究方向为电力系统稳定性;

陈厚合(1978—),男,江苏徐州人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为电力系统安全性与稳定性(E-mail: chenhouhe@126.com);

李雪(1986—),女,陕西西安人,副教授,博士,研究方向为电力系统安全性与稳定性、电力系统高性能计算;

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与稳定性、柔性直流输电、配电系统自动化。

Cooperated identification method of dominant oscillation modes and mode shapes for power system based on multi-channel fast Fourier transform based continuous wavelet transform

JIANG Tao¹, LIU Fangzheng², CHEN Houhe¹, LI Xue¹, LI Guoqing¹, GE Weichun³

(1. Department of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Beijing Guodian Engineering Tendering Co., Ltd., Beijing 100040, China;

3. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110004, China)

Abstract: Aiming at the shortage of low efficiency of continuous wavelet transform in dominant oscillation mode identification, a CWTFT (fast Fourier Transform based Continuous Wavelet Transform) method is proposed to improve the efficiency. Since the results of single-channel wavelet identification are influenced by the observability of oscillation mode, a multi-channel CWTFT is proposed to realize time-frequency domain decomposition of measured data from multi-channel and obtain the corresponding wavelet coefficient matrix, on this basis, the relative wavelet scale energy is used to identify the critical wavelet scales strongly related to the dominant oscillation modes, with which the wavelet coefficient matrix is reconstructed. The matrix is carried out with SVD (Singular Value Decomposition), and the left and right singular eigenvectors of first singular value of the matrix are adopted to identify the dominant oscillation modes and mode shapes. The proposed method is applied in the measured data of a 16-machine 68-bus test system and China Southern Power Grid, and the results verify the correctness and effectiveness of the method.

Key words: electric power systems; small signal stability; CWTFT; oscillation mode; oscillation mode shape

附录：

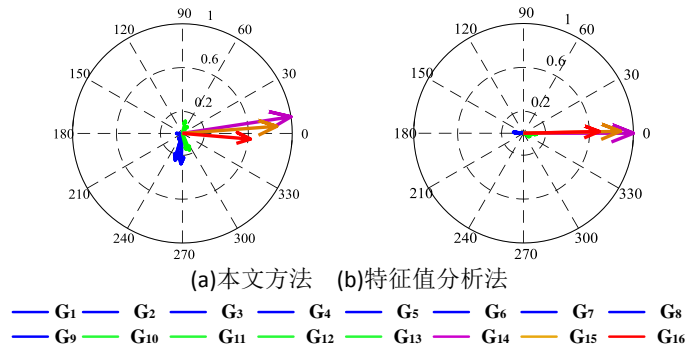


图 A1 主导振荡模式 1 的振荡模式对比图
 Fig.A1 Oscillation modal shapes comparison of dominant oscillation mode 1

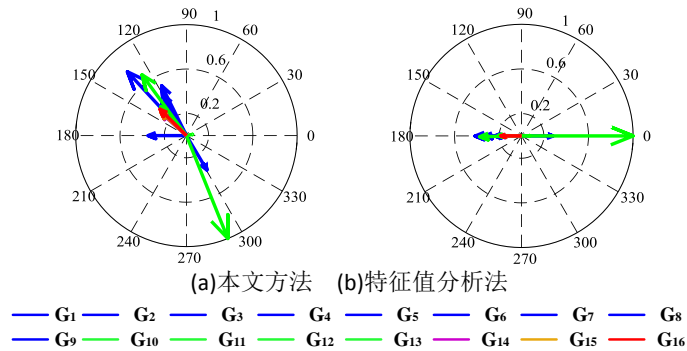


图 A2 主导振荡模式 2 的振荡模式对比图
 Fig.A2 Oscillation modal shape comparison of dominant oscillation mode 2

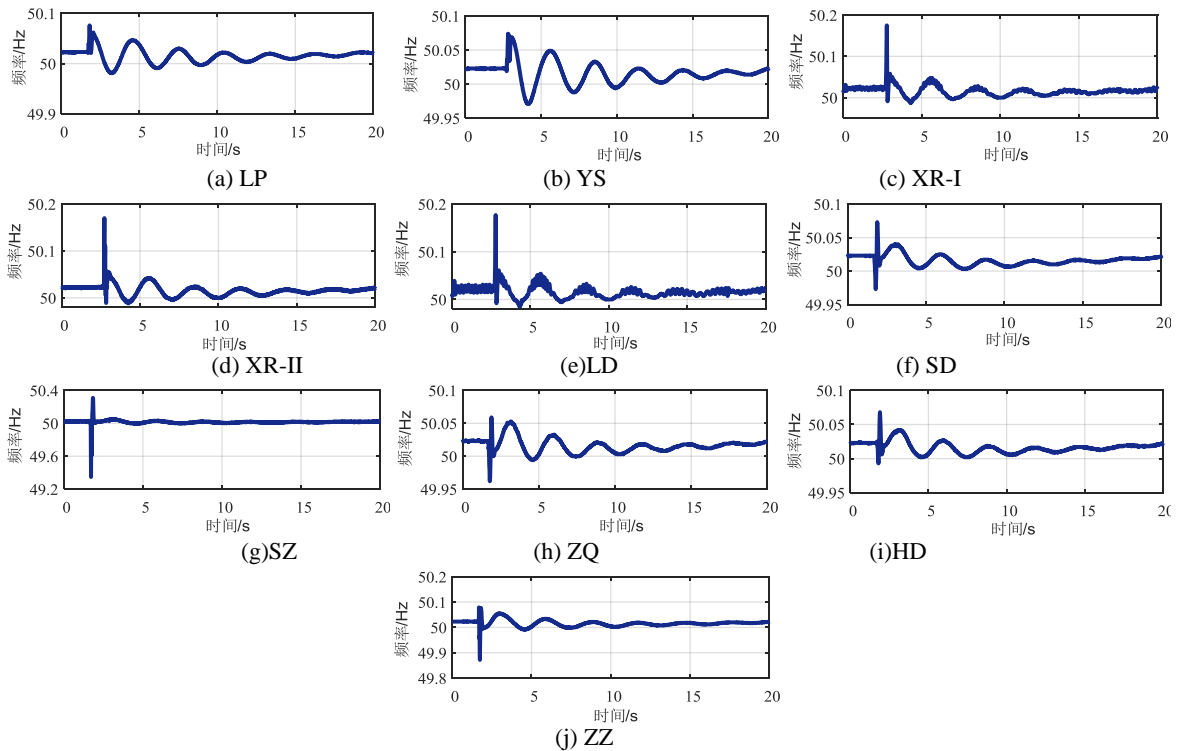


图 A3 南方电网广域实测频率
 Fig.A3 Measured frequencies of China Southern Power Grid

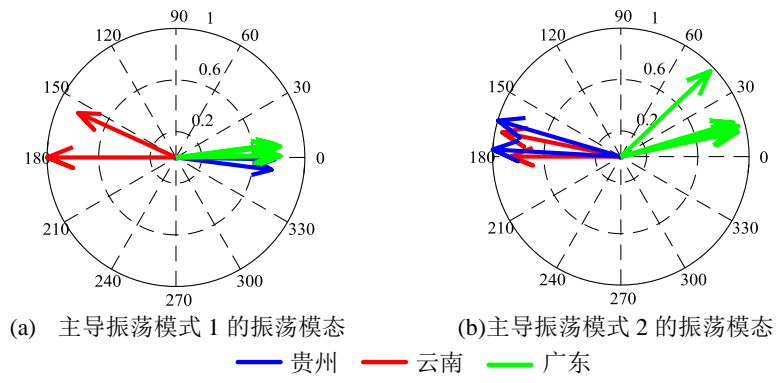


图 A4 南方电网实测频率的主导振荡模态辨识结果

Fig.A4 Identification results of dominant oscillation modal shapes for measured frequencies of China Southern Power Grid