



基于多信号在线辨识的电力系统低频振荡监测与分析

袁野^{①②*}, 孙元章^②, 程林^②, 陈刚^②

① 国核电力规划设计研究院, 北京 100032;

② 清华大学电机系, 电力系统国家重点实验室, 北京 100084

* E-mail: yuanboluo@gmail.com

收稿日期: 2010-01-21; 接受日期: 2010-06-11

国家自然科学基金(批准号: 50595413)资助项目

摘要 广域测量系统的建立为电力系统的监测与控制提供了有效的手段. 基于广域测量信号的 Prony 在线辨识已有大量的研究成果发表, 但对于如何利用辨识得到的幅值和初相位信息对电力系统低频振荡进行监测和分析还研究得不够. 本文基于多信号 Prony 算法, 提出根据各站点的振荡幅值进行低频振荡的检测, 并根据振荡幅值得到各站点的模式可观性; 根据各测量点的初相位得到机组的振荡分群, 给出模态图. 同时, 研究了振荡频率和阻尼比的时变性, 并利用多种可视化方法展现振荡过程和特性. 以贵州电网“11.9”低频振荡实测数据为例, 阐明了所提方法的有效性和可行性, 对于在线应用有着重要的工程意义.

关键词

广域测量系统
低频振荡
Prony 算法
模式可观性

随着大电网的互联, 发生电力系统低频振荡的可能性和造成的危害性日益增加. 要对低频振荡进行有效控制^[1~4], 必然要求对整个电网实时在线地监测与分析. 目前低频振荡的研究还主要基于特征分析, 受到系统模型和参数以及运行方式的制约. 同时, 特征值方法计算量大, 占用内存多, 计算速度慢, 受到电网规模和数学模型阶数的限制^[5]. 另一种是基于对实测动态数据的分析, 常见的有 FFT, Prony, Hilbert-Huang 分析等^[6,7], 这些方法可以克服特征值分析的不足.

基于实测数据的研究工作也有 2 个主要的限制, 一是缺乏现场数据, 大量的研究都靠计算机仿真来进行, 这与实际系统低频振荡过程存在很大的差异; 即使有现场数据, 通常也只是单一测量点上的数据, 有的系统也有多测量点的数据, 但由于数据不同步,

难以充分利用; 二是缺乏应用平台, 目前的分析方法大多是通过计算仿真或实测数据离线分析来检验其有效性, 难以应用于电力系统在线分析. 多年来, 电力工业致力于发展量测设备以便更好地观测和理解低频振荡现象. 广域测量系统(WAMS)技术能全局测量和快速传输表征电网运行状态的几乎所有变量, 使得电网运行能够得到持续的监测和记录, 为分析低频振荡提供了重要的信息^[8].

目前低频振荡的分析和研究多局限在模式辨识^[6,9]. 通常的做法是根据实测数据计算低频振荡的频率, 然后在传统的特征值分析结果中寻找对应的模式及模态. 对于大系统, 可能存在振荡频率值非常接近的几个模式, 给模式辨识带来很大的困难. 同一个模式当工况不同时, 其振荡频率也不相同, 若仅通过频率信息判定振荡模式, 也可能导致错误的结

果^[10]. 文献[10]利用联络线功率相对相位判定低频振荡模式, 取得了很好的效果; 不过该方法仍然依赖于离线分析的结果. Prony 算法能够用于在线计算, 得到站点的振荡频率和阻尼比, 然而根据辨识得到的幅值和初相位进行分析的研究还很少.

本文首先对多信号 Prony 算法进行了阐述, 阐明了通过辨识得到的各站点振荡幅值和初相位的意义和作用. 然后以贵州电网“11.9”低频振荡为例, 给出了利用各站点的振荡幅值和初相位进行低频振荡监测与分析的方法. 同时, 研究了振荡频率值和阻尼比的时变性, 并利用多种可视化方法展现振荡发展的过程和特性.

频率是电力系统最重要的量测量之一. 当低频振荡或其他系统事件发生时, 频率会产生明显的过渡过程和时空分布特征^[11,12]. 事实上, WAMS 的频率算法已经做到了零误差. 通过 WAMS, 可以连续监测不同地点的频率变化, 从而提供了一种快速和直接的方法去监测系统运行状态. 因此, 本文主要利用频率的动态信息开展低频振荡的监测与分析. 给出的监测和分析方法对于功角、功率等变量同样有效.

1 多信号 Prony 算法简介

Prony 算法是假设模型由一系列的具有任意振幅、初相位、频率和衰减因子的指数函数的线性组合, 即认为测量输入 $x(0), \dots, x(n-1)$ 的估计值可以表示为

$$\tilde{x}(n) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n, \quad (1)$$

$$\begin{cases} b_i = A_i e^{j\theta_i}, \\ z_i = e^{(\sigma_i + j2\pi f_i)\Delta t}, \end{cases} \quad (2)$$

其中, f_i 为频率, σ_i 为衰减因子, A_i 为幅值, θ_i 为初相位, Δt 为时间间隔, p 为模型的阶数.

参与同一振荡模式的信号在分别辨识时, 各信号的振荡频率可能存在较大的误差, 因此需要利用多信号 Prony 算法进行低频振荡辨识. 对于大系统, 每个信号参与的模式有限, 所以为尽可能多地提取出系统特征, 也需要采用多信号辨识. 多信号算法与单信号算法的主要区别在于样本函数矩阵的确定和每个信号所包含模式的幅值和初相位的确定^[13]. 多信号 Prony 算法能够同时辨识出区间模式和本地模式, 提高了辨识的精确性, 节省了辨识所有模式需要的

时间, 能适合于在线应用. 后文所提 Prony 算法皆指多信号 Prony 算法.

在某个输入 k 下, m 个信号 Prony 辨识的结果可用一个向量集表示为

$$\{f_i, \sigma_i, A_{j,k}^i, \theta_{j,k}^i\} \quad (j=1, 2, \dots, m), \quad (3)$$

其中, f_i 和 σ_i 分别为 m 个信号经 Prony 算法辨识得到的共有频率和衰减因子; $A_{j,k}^i$ 和 $\theta_{j,k}^i$ 分别为第 k 个输入下第 j 个信号关于第 i 个模式的幅值和初相位; $\zeta_i = -\sigma_i / \sqrt{\sigma_i^2 + (2\pi f_i)^2}$ 定义为第 i 个模式的阻尼比.

2 测量信号的相量关系

Prony 算法是针对时域模型进行, 对其结果进行拉氏变换, 可得到相应的频域模型

$$\tilde{G}(s) = \sum_{i=1}^p \tilde{R}_{j,k}^i / s - \lambda_i, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \lambda_i = \sigma_i + j2\pi f_i, \\ \tilde{R}_{j,k}^i = A_{j,k}^i \cdot e^{j\theta_{j,k}^i}, \end{cases} \quad (5)$$

其中, λ_i 为辨识输出信号得到的特征值, $\tilde{R}_{j,k}^i$ 为辨识得到的第 k 个输入作用下, 第 j 个输出关于第 i 个模式的留数.

在模式 i 下, 第 k 个输入所得的 m 个信号留数向量用 $\tilde{\mathbf{R}}_k^i$ 表示为

$$\tilde{\mathbf{R}}_k^i = \begin{bmatrix} \tilde{R}_{1,k}^i \\ \tilde{R}_{2,k}^i \\ \vdots \\ \tilde{R}_{n,k}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{A_{1,k}^i, \theta_{1,k}^i\} \\ \{A_{2,k}^i, \theta_{2,k}^i\} \\ \vdots \\ \{A_{n,k}^i, \theta_{n,k}^i\} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$\tilde{\mathbf{R}}_k^i$ 是由幅值 $A_{j,k}^i$ 和相角 $\theta_{j,k}^i$ 构成的二元集向量. 这里的幅值 $A_{j,k}^i$ 和相角 $\theta_{j,k}^i$ 恰好决定了每个输出量(及相应状态量)的模式, 其中与发电机功角状态量相对应的元素可以反映出机组的振荡分群信息.

在系统状态空间表达中, 第 k 个输入下, 第 j 个信号关于第 i 个模式的留数可表示为^[14]

$$\mathbf{R}_{j,k}^i = \mathbf{C}_j \boldsymbol{\phi}_i \cdot \boldsymbol{\psi}_i^T \mathbf{B}_k, \quad (7)$$

其中, $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{B}$ 分别是系统的输出矩阵和输入矩阵; $\boldsymbol{\phi}_i$ 是由状态矩阵得到的第 i 个模式的右特征向量; $\boldsymbol{\psi}_i$ 是由状态矩阵得到的第 i 个模式的左特征向量.

显然, Prony 辨识得到的结果 $\tilde{\mathbf{R}}_{j,k}^i$ 经过修正^[15]即

可得到对应的 $R_{j,k}^i$. 因此, Prony 辨识的幅值 $A_{j,k}^i$ 和相角 $\theta_{j,k}^i$ 从根本上反映了第 j 个输出对第 i 个模式的模式能观性 $C_j\phi$. 对于不同的输入 k_1 和 k_2 , 各输出量的相对大小和相对相角并不发生变化, 即振荡模态保持不变. 对于不同输入作用下得到的向量 $\tilde{R}_{k_1}^i$ 和 $\tilde{R}_{k_2}^i$, 各个输出量在 2 个模态图上的相对大小和相对相位关系仍然是固定的.

Prony 分析的幅值结果表征了每个测量点的模式可观性. 那么, 具有较大模式可观性的测量点在整个低频振荡过程中具有较大的幅值, 所以低频振荡首先在这些测量点检测到. 也就是说, 对低频振荡而言, 各测量点的频率振荡幅值(或强度)并不是和扰动地点直接相关, 而是和测量点的模式可观性直接相关. 传统上认为“离扰动点越近, 频率变化越剧烈”^[16]的观点是不完全的.

3 低频振荡监测与分析

2008 年 11 月 9 日, 贵州电网检测到一次低频振荡, 并且被贵州 PMU 站点记录下来. 图 1 给出了记录本次低频振荡的 9 个 PMU 站点.

3.1 应用振荡幅值检测低频振荡

图 2 给出了整个低频振荡过程中 3 条频率曲线. 其他站点的频率曲线与这 3 条相似, 但是不同曲线的振荡幅值是不同的. 通过曲线图能够实时观测低频振荡的全过程.

放大 9 个站点频率振荡曲线的开始部分如图 3 所示. 明显地, 各站点频率的振荡幅值逐渐增大, 但频率曲线有严重的交叉, 因此很难判断各站点频率

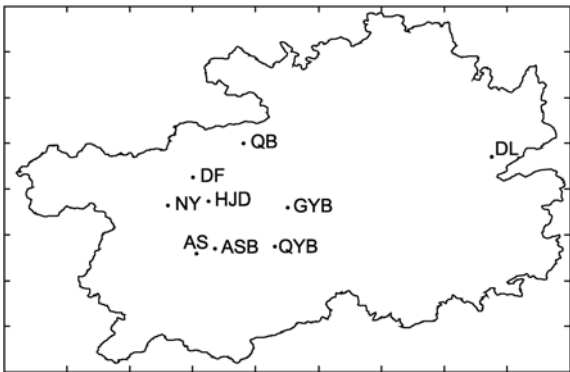


图 1 PMU 配置点

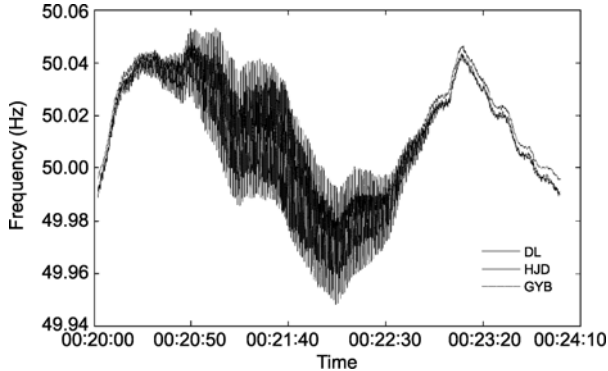


图 2 实测频率振荡曲线

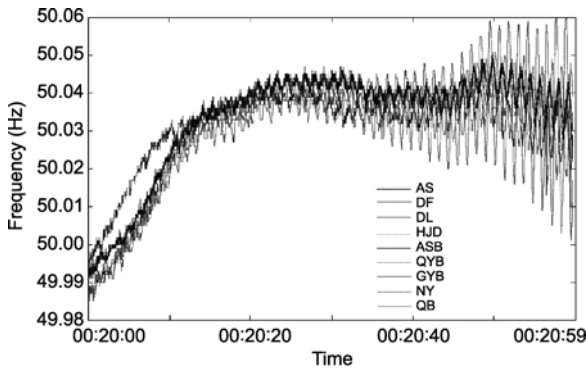


图 3 频率起振曲线

波动发散的开始时间和顺序. 在这种情况下, 文献[11, 17]提出的扰动定位算法和文献[18]提出的机电波传播速度算法就不可行了.

图 4 分别给出图 2 中 3 个站点的频率起振曲线. 容易看出, 在整个低频振荡过程中大龙电厂的频率振荡幅值大于其他站点的振荡幅值. 从图 4 看出, 本次低频振荡应该于 00:20:30(时:分:秒, 下同)首先在

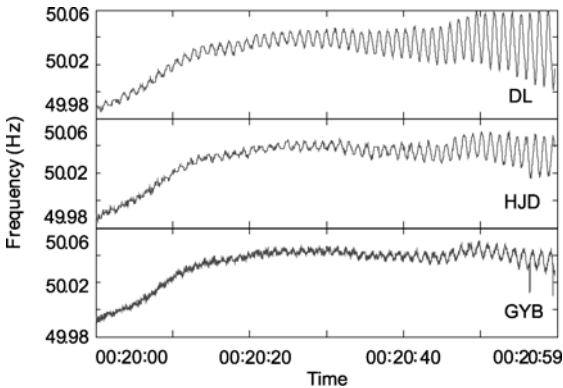


图 4 三站点频率起振曲线

大龙站点处检测到. 可以用 Prony 算法得到该时刻大龙电厂的频率振荡幅值, 并将该值作为实际系统低频振荡检测的阈值.

由于低频振荡的频率一般为 0.3~2.5 Hz, 那么选择从 00:20:30 开始的 3 s 时间长度的数据窗用于 Prony 分析, 这样既包含了至少一个振荡周波又考虑了计算效率. 另外, PMU 记录数据的时间间隔为 20 ms, 满足采样定理. 图 5 给出了 00:20:30 时 Prony 分析所得 9 个站点频率数据的幅频特性. 在频谱中, 存在一系列分量振荡模式, 这些模式是多信号 Prony 算法辨识得到的 9 个站点的共有模式. 对同一个模式, 各个站点对应不同的频率振荡幅值. 从 Prony 分析频谱结果可以看出, 主导振荡模式频率为 0.87 Hz, 是一个小区间模式. 阻尼比为-0.25%, 意味着为负阻尼并会导致进一步的振荡发散. 对于主导振荡模式, 大龙电厂的频率振荡幅值在 9 个站点中是最大的, 这和时域结果相一致. 00:20:30 时其振荡幅值达到了 3.4×10^{-3} , 这个值可以作为低频振荡检测的阈值.

表 1 给出了振荡开始阶段每个站点频率振荡幅

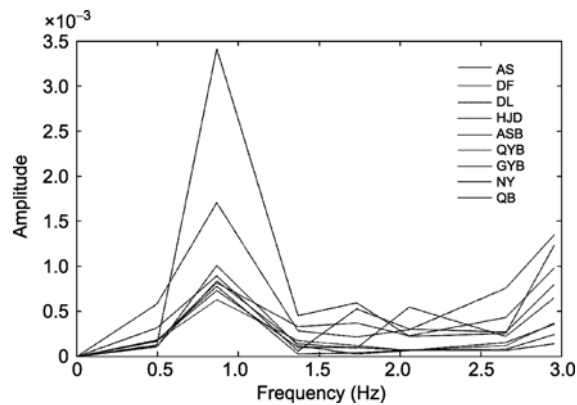


图 5 频率振荡幅频特性

表 1 各站点频率振荡幅值达到阈值的时刻

顺序	站点	时刻(时:分:秒)
1	大龙	00:20:30
2	洪家渡	00:20:45
3	安顺	00:20:58
4	大方	00:20:58
5	贵阳变	00:20:58
6	黔北	00:20:58
7	纳雍	00:21:02
8	安顺变	00:21:03
9	青岩变	00:21:05

值到达 3.4×10^{-3} 的时刻. 如前所述, 低频振荡将首先在模式可观性较大的站点检测到. 因此, 可由此得到各个站点模式可观性的相对大小. 表 2 给出了振荡平息阶段各站点振荡幅值回到 3.4×10^{-3} 的时刻. 各站点振荡幅值回到 3.4×10^{-3} 的顺序和开始阶段的顺序基本相反. 这说明了低频振荡在模式可观性较大的站点较晚平息.

3.2 低频振荡过程中的时变性

平稳振荡的动态特征不随时间而变, 该模式可用幅值 A , 初相位 θ , 频率 f 和阻尼 σ 这 4 个常数描述为 $y(t) = A \cdot e^{\sigma t} \cdot \cos(2\pi f \cdot t + \theta)$. 通过振荡轨迹不难识别特征根 $\sigma \pm j\omega (\omega = 2\pi f)$ [19].

然而, 电力系统实际上是一个非线性时变系统, 若要将非平稳振荡信号表示为 $y(t) = a(t)\cos\theta(t)$, 则必然要通过信号处理技术将瞬时振幅 $a(t)$ 和瞬时相位 $\theta(t)$ 解耦 [19]. 定义瞬时角频率 $\omega(t) = \theta'(t)$, 则有

$$\theta(t) = \int_{t_0}^t \omega(t)dt + \theta(t_0);$$
 定义瞬时阻尼 $\sigma(t) = \alpha'(t)$, 则有

$$a(t) = Ae^{\alpha(t)},$$
 其中 $\alpha(t) = \int_{t_0}^t \sigma(t)dt + \alpha(t_0)$. 轨迹特征根序列则可被表示为 $\sigma(t) \pm j\omega(t)$. 显然, 当 $\sigma(t)$ 和 $\omega(t)$ 分别退化为常数时, 非平稳振荡就退化为平稳振荡 [19]. 计算时, 可以数据采样间隔 Δt 为步长从长度为 t 的滑动时间窗口中获取轨迹特征根序列 $\sigma(t) \pm j\omega(t)$, 如图 6 所示. 这种方法同样可以从平稳振荡信号中提取平衡点特征根 $\sigma \pm j\omega$. 考虑到多信号 Prony 算法本身的计算效率与实时性需要, 实际工程在线应用中, 选取 $t = 3\text{ s}$, $\Delta t = 1\text{ s}$ 能够取得较好的效果.

利用 Prony 算法对本次低频振荡进行分析, 得到振荡频率、特征值实部、阻尼比和振荡幅值(大龙电

表 2 各站点频率振荡幅值回到阈值的时刻

顺序	站点	时刻(时:分:秒)
1	青岩变	00:21:39
2	安顺变	00:21:40
3	安顺	00:21:44
4	纳雍	00:21:48
5	贵阳变	00:22:08
6	大方	00:22:18
7	黔北	00:22:18
8	洪家渡	00:22:34
9	大龙	00:22:46

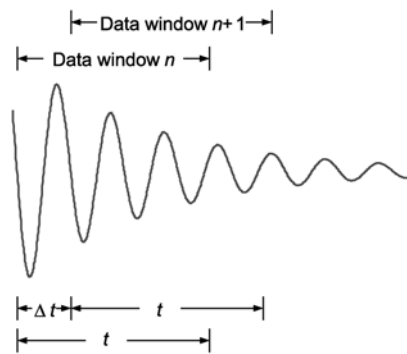


图6 滑动数据窗示意图

厂为例)的时变轨迹,如图7所示.从振荡频率时变轨迹可以看出,本次低频振荡过程中,主导振荡模式的频率在0.84~0.9 Hz之间时变.因此在实际大系统中,单纯根据频率值,在离线的特征值分析结果中找寻对应的模式及模态的分析方法很可能造成错误的结果.而根据第一节介绍的基于多信号Prony辨识的各站点振荡幅值和初相位则可以实时在线得到振荡模态,找出机组振荡分群.后文将给出不同时刻,Prony辨识得到的系统振荡模态示例.

从图7可以看出,随着低频振荡的开始,特征值实部逐渐向正值变化,阻尼比减弱,各站点频率振荡幅值增大;随后,特征值实部、阻尼比、各站点频率振荡幅值维持在一定范围,整个系统表现出明显的低频振荡;采取抑制措施后,特征值实部逐渐减小,阻尼比增大,各站点频率振荡幅值减小,低频振荡平息.

每个时刻都可得到如图5所示的幅频特性图.整个低频振荡过程中,大龙电厂的频谱如图8所示.从图8也可以看出整个低频振荡过程中振荡频率、阻尼、振荡幅值的时变特征,所得结果与图7一致.

3.3 应用多信号辨识结果得到振荡模态

将辨识得到的各站点的振荡幅值和相位在复平面上表示出来,就可以得到主导振荡模式的模态.图9(a)和(b)分别给出了00:20:30和00:20:58时刻的振荡模态.与特征值分析所得模态图不同,由实测数据按Prony算法得到的振荡模态的幅值和相位是随时间变化的.然而,对主导振荡模式来说,不同时刻的振荡模态中,各站点振荡幅值的相对大小和它们的相对相位关系总是一致的:本次低频振荡中,大龙

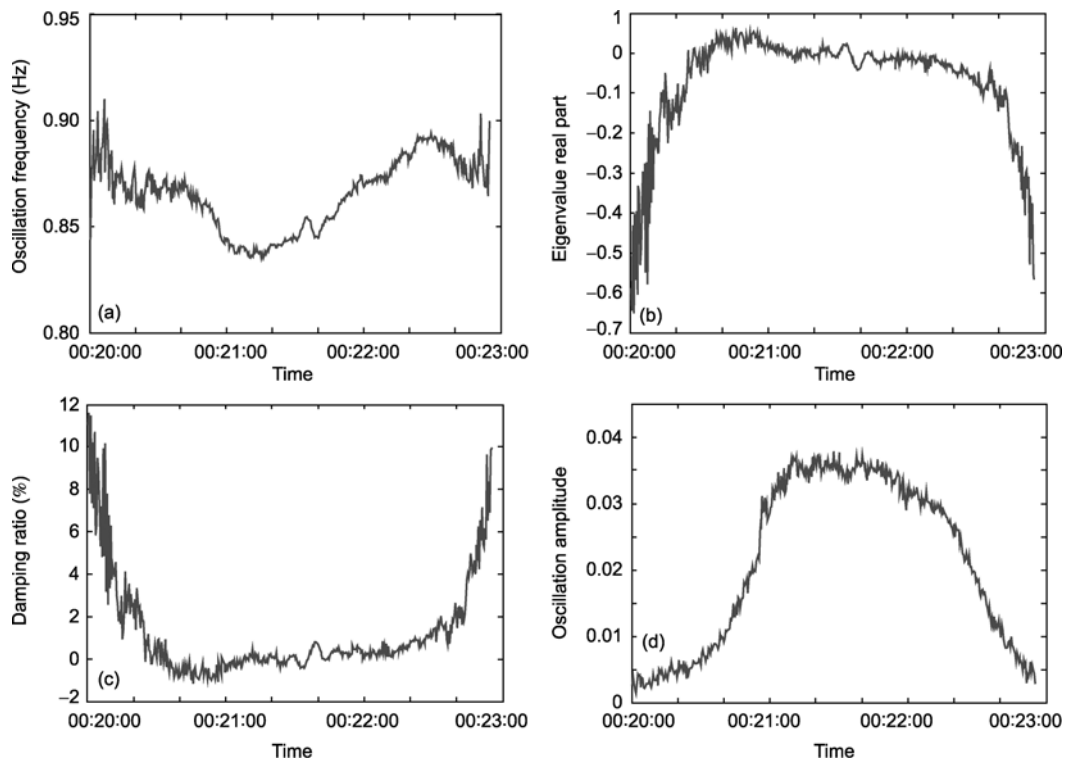


图7 低频振荡时变轨迹

(a) 振荡频率; (b) 特征值实部; (c) 阻尼比; (d) 振荡幅值

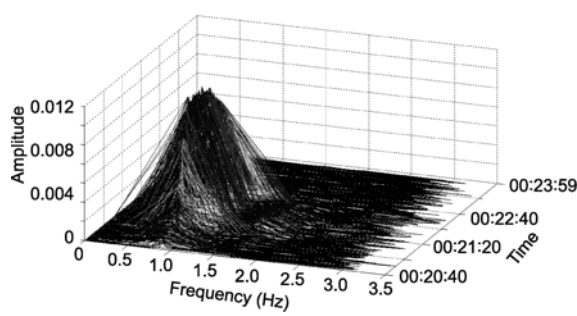


图 8 大龙电厂频谱图

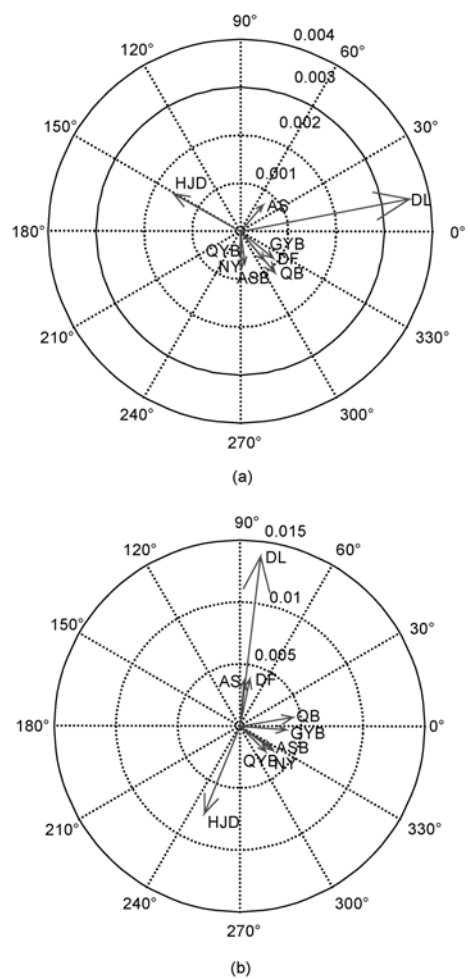


图 9 振荡模态图
(a) 00:20:30; (b) 00:20:58

电厂和洪家渡电厂是相互振荡的主导机组。由振荡模态也可以看到, 大龙电厂和洪家渡电厂有较大的模式可观性, 因此低频振荡应该先在这 2 个站点检测到。这和表 1 的记录是一致的。由于相对相位关系基

本不变, 因此, 可以选取其中一个站点作为参考站点, 得到固定相位的振荡模态图。

3.4 系统动态频率可视化

在图 1 所示的站点地理分布图上, 将各个站点的频率值进行插值可以得到平滑的频率分布面, 从而可以直接观测到低频振荡过程中整个系统的频率分布及变化。图 10(a), (b)和(c)分别给出了半个振荡周期里的 3 个频率分布面。低频振荡过程中, 和这 3 个面相似的视图将重复出现。从频率分布图可以看出: 大龙电厂所在区域和洪家渡电厂所在区域发生了相对振荡。当大龙电厂区域的频率较高时, 洪家渡电厂

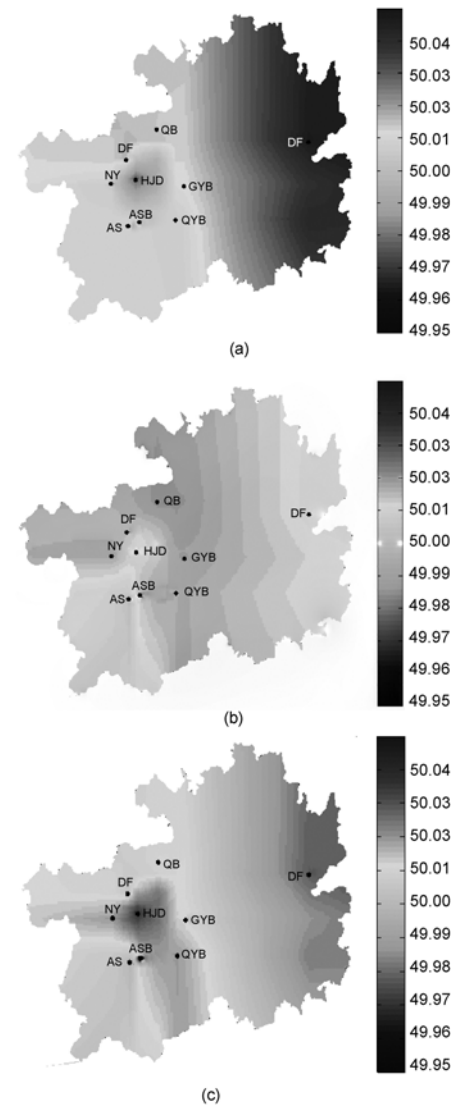


图 10 系统频率分布面

区域的频率则较低(如图 10(a)所示); 反之亦然(如图 10(c)所示). 图 10(b)所示的频率分布则是过渡状态. 频率分布图也可应用在监测机组投切、线路合断等事件及其发生地点上^[20].

4 结语

本文基于多信号 Prony 算法提出了低频振荡在线监测与分析方法, 特别是对各站点的振荡幅值和初相位的利用.

模式可观性大的站点通常具有较大的振荡幅值, 所以低频振荡将首先在这些站点检测到. 反之, 可根据振荡幅值得到各站点的模式可观性, 判定主导振

荡机组.

低频振荡过程中, 主导振荡模式的频率、阻尼比、振荡幅值都是时变的. 因此在实际大系统中, 单纯根据频率值, 在离线的特征值分析结果中找寻对应的模式及模态的分析方法很可能造成错误的结果. 而基于多信号 Prony 辨识的各站点振荡幅值和初相位则可以实时在线得到振荡模态, 找出机组振荡分群. 利用频率分布面也可以得到相互振荡的主要区域.

文中提出的监测和分析方法面向于直接的工程实现, 因此研究的数据采用低频振荡事故的实测数据. 所提方法已基于贵州电网 PMU 主站进行开发. 这些方法在故障后分析和实时运行控制方面也有应用潜力.

参考文献

- 1 Du W, Wang H, Cheng S, et al. Effect of embedded voltage source converter on power system oscillation damping. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53: 892—901
- 2 卢强, 郑少明, 梅生伟, 等. 大型同步发电机组 NR-PSS 及 RTDS 大扰动实验研究. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008, 38: 979—992
- 3 Du W, Wang H, Cheng S. A novel method to analyze damping effect of VSC based FACTS. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2008, 51: 2112—2119
- 4 卢强, 梅生伟, 郑少明. 大型同步发电机组 NR-PSS 白山电厂 300MW 机组现场试验. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2007, 37: 975—978
- 5 Grund C E, Paserba J J, Hauer J F, et al. Comparison of Prony and eigenanalysis for power system control design. *IEEE T Power Syst*, 1993, 8: 964—971
- 6 Browne T J, Vittal V, Heydt G T, et al. A comparative assessment of two techniques for modal identification from power system measurements. *IEEE T Power Syst*, 2008, 23: 1408—1415
- 7 Meunier M, Brouaye F. Fourier transform, wavelets, Prony analysis: Tools for harmonics and quality of power. In: *The 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Athens, Greece, 1998. 71—76
- 8 何光宇, 孙英云, 阮前途, 等. 现代电力调度控制中心的革新—由 EMS 走向 AEMS. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2009, 39: 729—734
- 9 Laila D S, Messina A R, Pal B C. A refined Hilbert—Huang transform with applications to interarea oscillation monitoring. *IEEE T Power Syst*, 2009, 24: 610—620
- 10 武诚, 徐政, 张静. 利用联络线功率相对相位判定低频振荡模式. *中国电机工程学报*, 2009, 29: 36—40
- 11 张恒旭, 刘玉田. 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述. *中国电机工程学报*, 2009, 29: 64—70
- 12 Hashiguchi T, Yoshimoto M, Mitani Y, et al. Oscillation mode analysis in power systems based on data acquired by distributed phasor measurement units. In: *International Symposium on Circuits and Systems*, Bangkok, Thailand, 2003. 367—370
- 13 马燕峰, 赵书强, 顾雪平. 基于改进多信号 Prony 算法的低频振荡传递函数降阶辨识及 PSS 的设计. *电网技术*, 2007, 31: 16—25
- 14 Aboul-Ela M E, Sallam A A, McCalley J D, et al. Damping controller design for power system oscillations using global signals. *IEEE T Power Syst*, 1996, 11: 767—773
- 15 芦晶晶, 郭剑, 田芳, 等. 基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计. *电网技术*, 2004, 28: 31—34
- 16 Zuo J, Baldwin M, Zhang H, et al. Use of frequency oscillations to improve event location estimation in power systems. In: *IEEE PES General Meeting*, Tampa, 2007. 1—7
- 17 Gardner R M, Wang J K, Liu Y. Power system event location analysis using wide-area measurements. In: *IEEE PES General Meeting*, Montreal, QC, Canada, 2006
- 18 Tsai S S, Li Z, Phadke A G, et al. Study of global frequency dynamic behavior of large power systems. In: *IEEE PES Power System Conference and Exposition*, New York, 2004. 328—335
- 19 郝思鹏, 薛禹胜, 唐茂林, 等. 通过轨迹特征根分析时变振荡特性. *电力系统自动化*, 2009, 33: 1—5
- 20 Bank N J, Gardner M R, Tsai S S, et al. Visualization of wide-area frequency measurement information. In: *IEEE PES General Meeting*, Tampa, 2007