

# 特高压联网区域实时小干扰稳定分析策略

顾丽鸿<sup>1</sup>, 周孝信<sup>2</sup>, 严剑峰<sup>2</sup>, 李芳<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 闵行区 200240;

2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Real Time Small Signal Stability Analysis of Power Systems Interconnected by Ultra High Voltage Transmission Line

GU Li-hong<sup>1</sup>, ZHOU Xiao-xin<sup>2</sup>, YAN Jian-feng<sup>2</sup>, LI Fang<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China; 2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** A novel strategy for real time study of interarea low frequency oscillations was proposed. Small signal stability analysis in large scale power systems is presently performed through the computation of the dominant eigenvalues and their corresponding eigenvectors. With the rapid development of wide area measurement system (WAMS), online identification is adopted to assess the small signal stability for real-time power system. Each method has been used separately and the performance is not satisfactory. Real time analysis method takes advantage of both online identification and eigenvalue calculation method. It can detect dominant oscillation modes, and calculate corresponding sensitivities and their participation factors. The real time analysis platform has also been developed and implemented on monitoring and analyzing interarea oscillations of power grids which are interconnected by ultra high voltage transmission line in China. The analysis result validates the efficiency and accuracy of the proposed method.

**KEY WORDS:** small signal stability; real time analysis; eigenvalue computation; online identification; ultra high voltage (UHV)

**摘要:** 基于特征值分析法、并行计算技术和低频振荡在线辨识技术, 提出一种互联电网小干扰稳定实时分析策略。传统的特征值分析法存在缺根和计算速度慢的缺点, 无法达到小干扰稳定分析实时应用的需求; 随着广域测量系统的发展, 模态辨识方法被用来在线监测电网的低频振荡, 但是该方法

提供的结果信息有限。所提出的实时小干扰分析方法将低频振荡在线辨识和特征值计算相结合, 有效利用广域测量系统提供的辨识结果, 进行深度小干扰稳定分析, 能准确、全面地实时评估电力系统小干扰稳定情况, 为调度人员及时地采取有效抑制振荡的控制措施提供依据。特高压联网区域的实际算例计算, 验证了该方法的准确性和有效性。

**关键词:** 小干扰稳定; 实时分析; 特征根计算; 在线辨识; 特高压

## 0 引言

2009年1月6日22:00:00, 中国首条特高压试验线路(晋东南—南阳—荆门)顺利通过168 h试运行, 标志着中国电力工业的多项技术迈入了世界领先行列。中国国家电网公司还在紧张有序地推进远期电网特高压互联规划和建设工作, 中国电网的远期规划是将华中—华北同步交流电网通过特高压交流输电线路与华东电网相连, 形成联结晋陕蒙宁煤电基地、西南水电基地和华北、华中、华东负荷中心的“三华”特高压同步电网<sup>[1-2]</sup>。在不远的将来, 中国将会出现一个庞大的跨区交流互联网络, 电网的整体规模和运行控制技术的难度将世属罕见, 这也会给中国的电力系统安全稳定分析工作带来了很大的挑战<sup>[2-6]</sup>。

电网交流互联势必经历一个从弱联系到强联系的发展过程, 过渡阶段会存在十分突出的小干扰安全稳定问题, 在某些极端的运行方式下容易诱发区间模式的低频振荡事故<sup>[7-8]</sup>。传统研究多机系统低频振荡的方法主要是特征值法<sup>[9-11]</sup>, 即根据线性化后的全系统状态方程, 应用全部特征值或部分特征值法

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2004CB217904)。

The National Basic Research Program of China (973 Program)(2004CB217904)。

求系统的关键特征值及特征向量,并据此分析电力系统小干扰稳定情况。此种方法一方面受到系统规模的限制,即当系统规模过大,就需要采用部分特征值法,而部分特征值法都存在着缺根的固有缺点;另一方面特征值法是基于离线方式数据进行系统特征值计算的,无法反映时变系统的小干扰稳定情况。

近年来,广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)的出现给大规模互联电力系统稳定分析与控制的发展带来新的契机<sup>[12-13]</sup>。WAMS可以在同一参考时间下记录大规模互联电力系统各地点的实时运行数据,这些数据使得电力系统实时小干扰分析与控制成为可能<sup>[12]</sup>。目前,WAMS尚处于发展和逐步建设中,相对于系统规模,相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)配置数量相当有限;另外,WAMS借助在线辨识的方法得到系统主要振荡模式,无法揭露低频振荡发生的本质原因,更无法确定该振荡模式的主要参与机组和参与因子等信息<sup>[14]</sup>。

实时小干扰分析方法是基于大系统特征值计算方法和并行计算技术提出的<sup>[15-16]</sup>,该方法基于在线整合后的全网实时运行数据,利用并行计算技术,分频段地进行系统小干扰稳定评估,实时地监测和分析跨区互联电网在当前运行方式下的动态稳定情况。同时,实时分析平台还可接入WAMS低频振荡统计结果,针对系统最近一段时间内监测统计的主要振荡模式进行搜索,弥补了传统小干扰计算存在漏根的缺点。该实时分析策略不仅保留了传统特征值分析方法的优点,还能通过引入WAMS统计结果,改善实时小干扰分析的精确性,并且借助并行计算平台极大地提高了计算效率,使小干扰稳定分析达到了在线实时应用的需求。本文提出实时小干扰分析策略,应用它对特高压联网区域的小干扰稳定进行分析,仿真结果与WAMS低频振荡统计结果的一致性将验证该实时分析方法的精确性和有效性。

## 1 小扰动分析方法介绍

### 1.1 在线模态辨识

电力系统遭受到小扰动后的振荡信号可以视为某些固定频率、幅值按指数规律变化的正弦信号(振荡模式)与白噪声的线性组合。理想的电力系统某一状态变量的振荡信号<sup>[17]</sup>可表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^p a_i e^{-\sigma_i t} \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (1)$$

式中: $p$ 为自然数; $a_i$ 为模式 $i$ 的振荡幅值; $\sigma_i$ 为模式 $i$ 的阻尼系数; $\omega_i$ 为模式 $i$ 的振荡角频率; $\phi_i$ 为模式 $i$ 的初相。WAMS在线低频振荡分析方法主要就是根据采样信号,应用傅里叶分变换、小波变换或希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)等系统辨识算法估算出系统主要振荡频率、振荡幅值和阻尼。

普罗尼(Prony)分析是在线辨识电力系统低频振荡中应用最为广泛的一种方法。它用指数函数的线性组合来拟合等间隔采样的信号,从中分析出信号的频率、衰减因子、幅值和相位<sup>[17-19]</sup>。普罗尼方法不仅可对实时测量数据进行分析,在未知系统模型的情况下,得到降阶的传递函数;还可以对系统暂态仿真曲线进行分析。

### 1.2 特征值分析法

电力系统小干扰稳定是指系统受到小扰动后,不发生自发振荡或非周期性失步,自动恢复到起始运行状态的能力。系统小干扰稳定性取决于系统的固有特性,与扰动的大小无关<sup>[10]</sup>。复杂电力系统小干扰稳定分析主要是应用基于一次近似法的特征值法<sup>[20]</sup>。

系统的动态特性由一组非线性微分方程组描述如下:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

在运行点附近将式(2)线性化,将各状态变量表示为其初始值与微增量之和:

$$x_i = x_{i0} + \Delta x_i \quad (3)$$

将所得方程组在初始值附近展开成泰勒级数,并略去各微增量的2次及高次项,可得到

$$\frac{d\Delta x_i}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \Delta x_j, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

将式(4)写成矩阵形式:

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X \quad (5)$$

式(5)就是描述线性系统的状态方程, $A$ 为 $n \times n$ 维状态矩阵。根据李雅普诺夫第一定理,由状态方程描述的线性系统,其小干扰稳定性是由状态矩阵的特征值决定的。

## 2 实时小干扰分析

### 2.1 实时小干扰分析体系

实时小干扰分析模块是整个电力系统动态安全预警平台的一个重要组成部分,动态安全预警平台的具体架构和工作原理参见文献[1],本文仅针对

实时小干扰分析模块作具体分析。

实时小干扰分析是指基于大系统实时数据整合技术、大系统特征值计算方法和并行计算技术，实时评估电力系统当前断面的小干扰稳定情况。实时小干扰分析模块包含 WAMS 监测部分、实时数据整合、并行计算和管理服务功能，如图 1 所示。

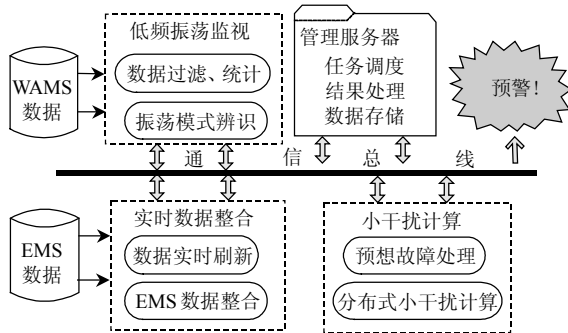


图 1 实时小干扰分析平台

Fig. 1 Real time small signal analysis platform

WAMS 监测部分主要是指广域系统主站根据 PMU 记录系统运行的动态数据，捕捉系统中发生低频振荡事件。该振荡辨识结果与实时小干扰分析平台相交互共享，在管理服务器形成针对性的仿真任务，避免在计算过程中丢失关键的特征值。

实时数据整合指将定时上传的全网能量管理系统(energy management system, EMS)数据进行拼接和状态估计，去除原先区域互联接口的等值发电机，合成反映整个电网运行状态的在线潮流。数据整合一方面及时形成反映当前全网运行状态的实时数据；另一方面也为动态预警系统的高级应用功能提供了满足计算要求的动态数据。

管理服务主要是指管理服务器具有任务调度、结果处理和数据存储功能。管理服务器根据时刻变化的 WAMS 监测结果，动态形成仿真作业，这些作业经过通信单元被动态分配至各个并行仿真计算节点。实时小干扰平台还必须具有紧急事故处理和历史事故分析功能，所以管理服务器要具有灵活的计算启动触发机制。并行计算后的汇总结果经过一定的筛选和分群，才能与 WAMS 统计结果进行模糊匹配，该项功能也安排在管理服务节点完成。低频振荡监视结果和基础数据都是宝贵的历史资料，需要完整地保存下来，这个重要的功能也需要在管理服务节点完成。

## 2.2 实时小干扰分析实现

结合现有的 2 种小干扰稳定分析方法的优点<sup>[21]</sup>，本文提出了实时小干扰稳定分析策略，主要实现过程与优点如下：

1) 任务启动。实时分析平台采用在线数据触发机制，当管理服务器接收到新的实时整合数据和 WAMS 预警信息时，管理服务节点开始启动，形成仿真任务，将计算作业和基础数据下发至并行计算节点。

2) 并行计算。并行计算节点接收小干扰计算作业和基础数据，启动相应数量计算进程(总进程数由计算节点硬件配置决定)并行工作，也可以多计算节点并行工作。由于扫描的频段被分成了多个区间，这样可极大地提高特征值计算的效率。借助于高效的并行计算平台，实时小干扰分析不仅能快速评估当前运行方式下的小干扰稳定情况，还能对系统发生预想事故后的小干扰稳定进行评估。

3) 结果处理。实时小干扰并行计算部分将仿真结果汇总上报至管理服务节点。结果处理功能首先根据频率和阻尼特征对汇总结果进行过滤，然后对过滤后的振荡模式与 WAMS 监测的模式进行模糊匹配，将匹配后的模式分为危险与潜在危险模式，最后形成匹配模式的实时小干扰分析报表。报表不仅包含危险与潜在危险振荡模式的振荡频率，还给出每个模式对应的主要参与机组、参与因子及振荡分群等信息，这些是目前在线低频振荡辨识方法所不能给出的，而这些重要的信息是提出抑制低频振荡控制措施的必要条件。

从上述分析可以看出，实时小干扰分析方法保留了传统特征值计算方法的优点，通过计算得到关键振荡模式、对应的主要参与机组和参与因子等信息；同时借助并行计算技术，极大地提高了小干扰稳定分析的效率；通过引入 WAMS 实时监测的低频振荡结果，弥补了传统特征值计算缺根的固有缺点。因此，实时小干扰分析技术可用于实时监测互联系统的低频振荡，全面精确地分析电力系统的小干扰稳定，辅助给出及时抑制低频振荡的控制措施。

## 2.3 振荡分群算法

WAMS 能通过可观测点的 PMU 记录波形来判断系统的振荡分群情况，但是这种分群的正确性很大程度上受到 PMU 布点的影响。本文提出了简化的动态聚类法，从系统特征向量角度对系统进行振荡分群，确保振荡分群的结果更加全面和精确。

简化的动态聚类基本思想是先选择聚类中心，再根据一定的聚类准则使其余样本向各聚类中心聚集，得到初始分类；然后根据同类判断准则，对

初始的聚类进行合并或者分裂,如此反复迭代,直到获得合理的分类结果<sup>[22]</sup>。考虑一个样本集合  $S = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$ , 定义:  $K$  为期望分类的最大个数;  $N_j$  为类别  $j$  的样本数;  $S_j$  为类别  $j$  的样本空间;  $D_\phi$  为类间的最小距离;  $d_\phi$  为某类别中样本与类中心的最大距离;  $l$  为迭代次数;  $N'$  为最大迭代次数。

选择合适的类中心:

$$Z^{(0)} = [Z_1^{(0)}, \dots, Z_i^{(0)}, \dots, Z_c^{(0)}]^T, \quad c \leq K \quad (6)$$

分配样本: 对于任一样本  $Z$ , 若存在

$$\|Z - Z_j^{(0)}\| \leq \|Z - Z_i^{(0)}\|, \quad j, i = 1, 2, \dots, c, \quad i \neq j \quad (7)$$

则  $Z \in S_j$ 。重新计算各类别的类中心:

$$Z_j = 1/N_j \sum_{Z \in S_j} Z, \quad j = 1, 2, \dots, c \quad (8)$$

计算类别  $S_j$  中各样本与类中心的距离:

$$d_{is_j} = \|Z_i - Z_j^{(l)}\|, \quad j = 1, 2, \dots, c, \quad i = 1, 2, \dots, N_c \quad (9)$$

对于, 计算类间距:

$$D_{ij} = \|Z_i - Z_j\|, \quad i = 1, 2, \dots, c-1, \quad j = i+1, \dots, c \quad (10)$$

如果  $D_{ij} \leq D_\phi$ , 进行类的合并:

$$Z^{(l)} = [Z_1^{(l)}, Z_2^{(l)}, \dots, Z_{c-1}^{(l)}]^T, \quad l = 0, 1, 2, \dots, N' \quad (11)$$

如果  $\delta_{is_j} > \delta_\phi$ , 进行类的分裂:

$$Z^{(l)} = [Z_1^{(l)}, Z_2^{(l)}, \dots, Z_{c+1}^{(l)}]^T, \quad l = 0, 1, 2, \dots, N' \quad (12)$$

其中新的类中心分为  $Z_i^+$  与  $Z_i^-$ , 是原有  $Z_i$  位置各加上和减去  $k\delta_{is_j}$  后得到的, 其中  $k$  为经验数值。

考虑到低频振荡的实际情况, 本文选取右特征向量位置与参与因子进行振荡分群, 并定义  $K \leq 4$ 。实时小干扰主要关注的是区域振荡模式, 根据分析经验此类振荡模式主要为 2 群, 因此本文选取一对位置距离最远的右特征向量所属机组作为聚类初始中心, 进行振荡分群。

### 3 特高压联网区域实时小干扰稳定分析

#### 3.1 特高压联网现状及模型

特高压交流示范工程晋东南—南阳—荆门输变电工程的顺利投运, 标志着中国电力工业发展迈入输电“高速公路”时代。特高压线路投运初期, 运行方式南送 1 000 MW, 输送距离 645 km, 将晋东南煤电资源与三峡水电资源直接相联, 水火互济, 初步实现了大区特高压交流联网, 如图 2 所示。

为保证实时小干扰仿真结果的精确性, 仿真基础数据采用全网定时刷新的 EMS 整合数据, 避免了传统小干扰稳定分析数据滞后的重要缺陷。其中, EMS 数据具有 220 kV 及以上全部实时采集, 110 kV

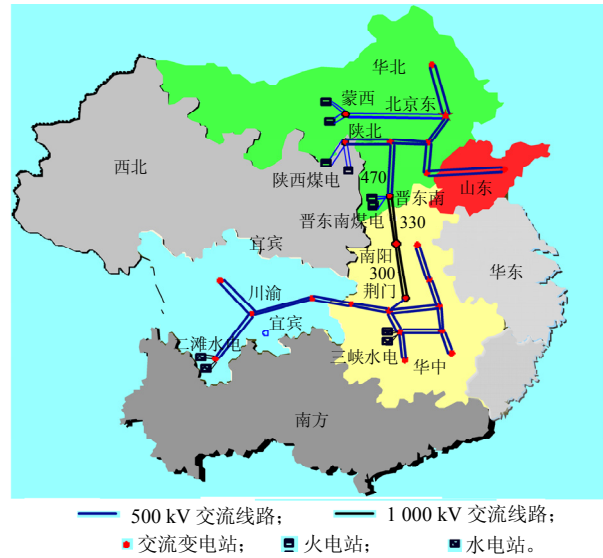


图 2 特高压交流联网系统  
Fig. 2 Power systems interconnected by UHV transmission line

采用大部分实时采集, 小部分采用离线等值的特点。除东北、华东和西北网等值发电机表示外, 系统中所有发电机均保留包含调速器、励磁器的详细动态模型, 装设电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)的均保留稳定器的动态模型。目前, 特高压联网区域发电机总数已经超过 1 000 台, 110 kV 及以上电压等级母线已经超过 1 万节点规模。

#### 3.2 特高压互联区域 WAMS 低频振荡统计

为保障特高压交流电网的安全稳定运行, 中国国家电网公司在特高压交流线路、相关区域和厂站都装设了 PMU, 实时监控特高压线路的稳定运行状况。本文选取其中某一典型运行日的低频振荡统计数据为例, 表 1 给出了当日联网区域主要振荡事件的统计情况; 图 3 给出了当日特高压线路振荡模式分布情况, 图中  $f$  表示振荡频率,  $N_o$  表示振荡次数。从统计表和模式分布图可看出, 特高压联网区域主要有 0.17、0.30 和 0.56 Hz 3 个潜在的振荡模式。基于 PMU 在线辨识方法可监测线路的主要振荡模式, 却不能深入揭示低频振荡发生的本质原因, 更无法提出有效抑制振荡的控制措施。

表 1 特高压互联区域低频振荡统计表

Tab. 1 Low frequency oscillation statistics of power systems interconnected by UHV transmission line grid

项目	振荡总次数	振荡频率/Hz	最大振幅时间/s
长南 1 线有功	260	0.17	89
荆斗 3 线有功	239	0.17	88
荆斗 2 线有功	217	0.17	78
葛岗线有功	28	0.56	14
辛卯 1 线有功	287	0.30	52

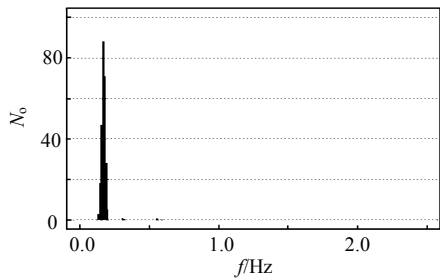


图 3 特高压联网区域主要振荡模式分布图  
Fig. 3 Main oscillation modes of power systems interconnected by UHV transmission line

### 3.3 特高压联网区域实时小干扰分析

为了验证实时小干扰分析策略的有效性和精确性，本文应用该方法对特高压联网区域的小干扰稳定情况进行分析。计算采用 WAMS 统计当日 18:00 时的在线整合数据进行小干扰分析，经过实时小干扰分析平台计算，给出下述几个关键模式：

#### 1) 0.19 Hz 振荡模式。

经过实时小干扰分析计算，可得到 0.19 Hz 为频率最低的机电振荡模式。表 2 给出该振荡模式的分群机组、主要参与机组及参与因子；图 4 为离线计算的振荡模态图，图中  $\lambda$  表示对应该特征值的右特征向量。从图 4 中可看出表 2 的实时分群结果完全正确。从实时小干扰分析结果报表中可看出，该模式为华中主网对华北主网的振荡模式，华中机组的参与因子较高，因此通过调整华中机组的运行方

表 2 0.19 Hz 振荡模式主要参与机组及参与因子  
Tab. 2 Generators with participation factors under oscillation mode at 0.19 Hz

振群 1 机组	参与因子	区域	振群 2 机组	参与因子	区域
湘潭	0.77	湖南	邯峰	0.27	河北
二滩	0.6	四川	黄台	0.23	山东
方山	0.56	四川	邹县	0.22	山东
金堂	0.52	四川	盘山	0.17	天津
黄金埠	0.51	江西	王滩	0.14	唐山
金堂	0.5	四川	岱海	0.14	内蒙

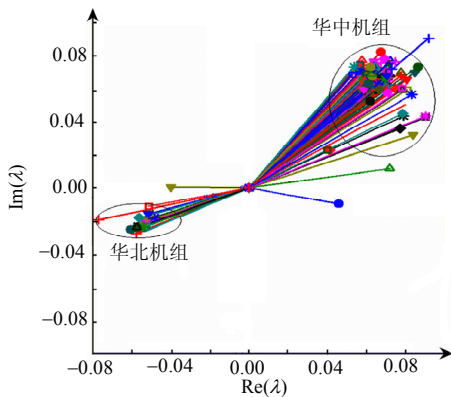


图 4 0.19 Hz 振荡模态图  
Fig. 4 Mode shape of oscillation mode at 0.19 Hz

式，或者通过对华中机组施加阻尼控制能更有效地改善该振荡模式。这里特别指出的是该模式是特高压投运后新出现的大区振荡模式，振荡频率很低 ( $<0.2$  Hz)，涉及机组数量很多，其振荡机制与预防控制措施需要重点分析与关注。

#### 2) 0.35 Hz 振荡模式。

表 3 是实时小干扰分析的结果报表，表中给出了 0.35 Hz 振荡模式的分群情况、主要参与机组和机组参与因子。图 5 为 0.35 Hz 振荡模式的离线模态图，该模态图证明了 0.35 Hz 模式实时分析的结果是正确的。从实时小干扰分析结果可看出，该模式为山东省内机组对蒙西机组的振荡模式，其中邹县和威海为山东代表机组，岱海和达四为蒙西代表机组，这些机组处于华北电网东西两端，电气距离较长，因此容易发生相对振荡。该振荡模式长期存在，本文建议该不稳定模式应予以重视，电网发展远期规划应考虑进一步加强华北地区省间电网联系，改善该振荡模式。

表 3 0.35 Hz 振荡模式主要参与机组及参与因子  
Tab. 3 Generators with participation factor under oscillation mode at 0.35 Hz

振群 1 机组	参与因子	区域	振群 2 机组	参与因子	区域
邹县	1.24	山东	岱海	0.35	蒙西
威海	1.06	山东	达四	0.31	蒙西
黄岛	0.9	山东	乌拉	0.26	蒙西
潍坊	0.73	山东	托电	0.25	蒙西
费县	0.7	山东	丰三	0.24	蒙西
潍坊	0.73	山东	盘山	0.24	天津

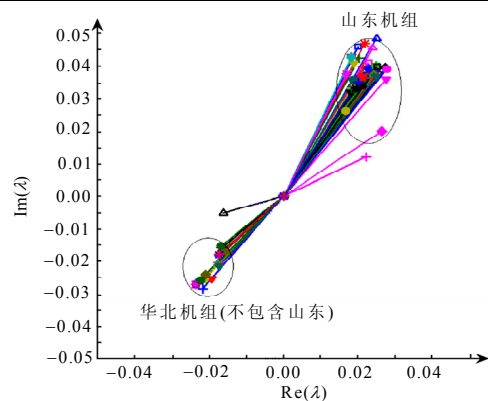


图 5 0.35 Hz 振荡模态图  
Fig. 5 Mode shape of oscillation mode at 0.35 Hz

#### 3) 0.47 Hz 振荡模式。

表 4 是实时小干扰分析的结果报表，表中给出了 0.47 Hz 振荡模式的分群情况、主要参与机组和机组参与因子。图 6 为 0.47 Hz 振荡模式的离线模态图，该模态图有效地证明了 0.47 Hz 模式实时分

析结果的正确性。从实时分析的结果报表可看出，该模式为华中电网内川渝机组相对东部电网的振荡模式，东部以江西机组为代表。该模式在特高压线路运行之前表现为川渝主网对河南电网的振荡。由于特高压线路的投运，河南与华北的联络线路断开，华中电网区域内潮流流向发生较大改变，河南机组不再对该模式产生重大影响，并且该模式频率变大，阻尼变强，正常运行方式下相当稳定。

表4 0.47 Hz 振荡模式主要参与机组及参与因子  
Tab. 4 Generators with participation factor under oscillation mode at 0.47 Hz

振群 1 机组	参与因子	区域	振群 2 机组	参与因子	区域
赣九三期	8.67	江西	二滩	0.92	四川
赣九二期	1.84	江西	江油	0.72	四川
黄金埠	1.25	江西	方山	0.41	四川
分宜	0.54	江西	金堂	0.39	四川
赣贵二期	0.51	江西	宝珠寺	0.32	四川
万安	0.49	江西	重庆	0.31	重庆

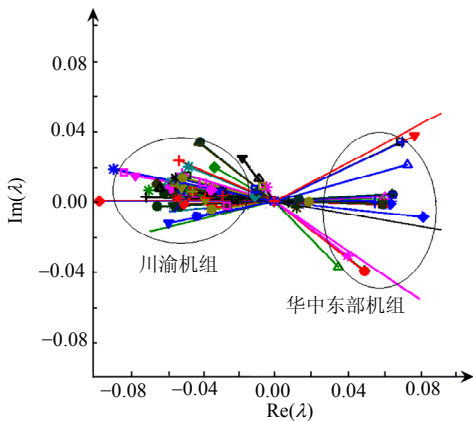


图6 0.47 Hz 振荡模态图  
Fig. 6 Mode shape of oscillation mode at 0.47 Hz

4) 0.56 Hz 振荡模式。

表5是实时小干扰分析的结果报表，表中给出了0.56 Hz 振荡模式的分群情况、主要参与机组和机组参与因子。图7为0.56 Hz 振荡模式的离线模态图，该模态图可有效地证明0.56 Hz 模式实时分析结果的正确性。从实时小干扰分析结果可看出，该模式同样为华中电网湖南机组相对其他地区的振荡模式，西部以川渝机组为代表。该模式主要也

表5 0.56 Hz 振荡模式主要参与机组及参与因子  
Tab. 5 Generators with participation factor under oscillation mode at 0.56 Hz

振群 1 机组	参与因子	区域	振群 2 机组	参与因子	区域
湘潭	6.74	湖南	赣九三期	2.07	江西
五站	4.27	湖南	江油	1.51	四川
华岳	1.82	湖南	二滩	1.46	四川
益阳	1.80	湖南	珞璜	0.88	重庆
金厂	1.78	湖南	方山	0.64	四川
长沙	1.37	湖南	金堂	0.60	四川

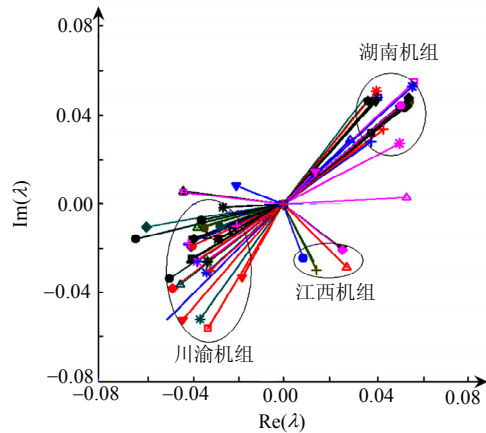


图7 0.56 Hz 振荡模态图

Fig. 7 Mode shape of oscillation mode at 0.56 Hz

是华中大区内部振荡模式，该振荡模式主要受到湖南机组运行方式的影响，因此需要考虑在湖南机组施加阻尼控制。

#### 4 结论

特高压试验线路投入运行后，中国国家调度中心 WAMS 统计出一天中特高压联网区域主要存在的低频振荡模式有特高压线路 0.17~0.2 Hz 的低频振荡模式、辛聊线路 0.30 Hz 的低频振荡模式和葛岗线 0.56 Hz 的低频振荡模式。本文应用实时小干扰分析平台对当日 18:00 在线整合数据进行分析，计算出系统主要存在 4 个振荡模式，其中 3 个振荡模式与 WAMS 监测结果都能很好地匹配，最大频率误差为 0.05 Hz，但 0.47 Hz 振荡模式未监测到，原因可能如下：首先，统计表中列出的是特高压线路两侧 PMU 监测点的低频振荡事件统计信息，而实时小干扰计算的 0.47 Hz 模式主要参与机组在川渝和江西 2 个区域，这 2 个区域内的 PMU 量测结果暂时未上传至中国国家电网调度中心，因此该振荡模式没有被监测到；另外，该振荡模式的阻尼比较高，权重系数较小，可能被权重系数高的振荡模式所掩盖，以至于未被辨识出来。

本文提出了一种实时小干扰分析方法，不仅保留了原有特征值分析方法的优点，而且引入 WAMS 振荡监测统计结果，弥补了传统小干扰计算方法存在漏根的固有缺点。同时，借助并行计算技术，实时小干扰分析方法极大地提高了工作效率。该分析方法成功应用到实时分析特高压联网区域的小干扰稳定，揭示联网后的系统存在 4 个主要振荡模式，并针对这些振荡模式进一步提出了预防控制和改善阻尼的措施。同时，这些实时分析得出的振荡模式与 WAMS 系统监测结果的一致性，验证了该分

析方法的正确性和有效性。

## 参考文献

- [1] 严剑峰, 于之虹, 田芳, 等. 电力系统在线动态安全分析评估和预警系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 87-93.  
Yan Jianfeng, Yu Zhihong, Tian Fang, et al. Dynamic security assessment & early warning system of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 87-93(in Chinese).
- [2] 赵良, 郭强, 覃琴, 等. 特高压同步电网稳定特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 47-51.  
Zhao Liang, Guo Qiang, Qin Qin, et al. Analysis on stability characteristic of UHV synchronized power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 47-51(in Chinese).
- [3] Klein M, Rogers G J, Kundur P. A fundamental study of inter-area oscillations in power systems[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1991, 6(3): 914-921.
- [4] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11.  
Yu Yixin, Li Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11(in Chinese).
- [5] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国, 等. 电力系统低频振荡机制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 21-25.  
Wang Tieqiang, He Renmu, Wang Weiguo, et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 21-25(in Chinese).
- [6] 朱方, 汤涌, 张东霞, 等. 我国交流互联电网动态稳定性的研究及解决策略[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 69-74.  
Zhu Fang, Tang Yong, Zhang Dongxia, et al. Study on dynamic stability problems of AC interconnected area power grids in China and their solutions[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 69-74(in Chinese).
- [7] 罗国俊, 徐显华, 龙绍清. 广东—香港联网系统的低频振荡[J]. 中国电机工程学报, 1986, 6(1): 29-35.  
Luo Guojun, Xu Xianhua, Long Shaoqing. Low frequency oscillations on the interconnectors between Hong Kong and Guangdong[J]. Proceedings of the CSEE, 1986, 6(1): 29-35(in Chinese).
- [8] 李丹, 苏为民, 张晶, 等. “9.1”内蒙古西部电网振荡的仿真研究[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 41-47.  
Li Dan, Su Weimin, Zhang Jing, et al. Simulation study on west Inner Mongolia power grid oscillations occurred on September 1st, 2005[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 41-47(in Chinese).
- [9] 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, 2002: 235-259.  
Ni Yixin, Chen Shousun, Zhang Baolin. Dynamic power system theorem and analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 235-259(in Chinese).
- [10] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York, McGraw Hill Inc., 1994: 699-826.
- [11] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 325-349.  
Liu Qu. Power system stability and generator excitation control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 325-349(in Chinese).
- [12] 常乃超, 兰洲, 甘德强, 等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2009, 29(10): 46-52.  
Chang Naichao, Lan Zhou, Gan Deqiang, et al. A survey on application of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology, 2009, 29(10): 46-52(in Chinese).
- [13] 鞠平, 谢欢, 孟远景, 等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 56-60.  
Ju Ping, Xie Huan, Meng Yuanjing, et al. Online identification of low-frequency oscillations based on wide-area measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 56-60(in Chinese).
- [14] 肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥, 等. 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, et al. 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(in Chinese).
- [15] Campagnolo J M, Marins N, Falcao D M. An efficient and robust eigenvalue method for small signal stability assessment in parallel[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1995, 10(1): 506-511.
- [16] 石立宝, 郭子健, 倪以信, 等. 一种暂态稳定约束 TTC 评估的分布式并行计算方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 44-48.  
Shi Libao, Guo Zijian, Ni Yixin, et al. A novel distributed parallel computing method for TTC evaluation with transient stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 44-48(in Chinese).
- [17] 张贤达. 现代信号处理[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 119-125.  
Zhang Xianda. Modern signal processing[M]. 2nd edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 119-125(in Chinese).
- [18] Kamwa I. Using MIMO system identification for modal analysis and global stabilization of large power systems[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 37(1): 152-161.
- [19] 王铁强, 贺仁睦, 徐东杰, 等. Prony 算法分析低频振荡的有效性研究[J]. 中国电力, 2001, 11(34): 38-41.  
Wang Tieqiang, He Renmu, Xu Dongjie, et al. The validity study of Prony analysis for low frequency oscillation in power system[J]. Electric Power, 2001, 11(34): 38-41(in Chinese).
- [20] 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序-暂态稳定用户手册[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008.  
China Electric Power Research Institute. User's manual of PSASP: transient stability analysis[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2008(in Chinese).
- [21] Grund C E, Paserba J J, Hauer J F. Comparison of Prony and eigen-analysis for power system control design[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1993, 8(3): 964-971.
- [22] 袁玉波, 杨传胜, 黄廷祝, 等. 数据挖掘与最优化技术及其在应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 100-127.  
Yuan Yubo, Yang Chuansheng, Huang Tingzhu, et al. Data mining and optimization techniques with applications[M]. Beijing: Science Press, 2007: 100-127(in Chinese).



顾丽鸿

收稿日期: 2009-11-27。

作者简介:

顾丽鸿(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统在线动态安全分析、广域低频振荡与阻尼控制技术, lihonggu@epri.sgcc.com.cn;

周孝信(1940—), 男, 中科院院士, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统仿真以及 FACTS 技术等。

(责任编辑 谷子)