DOI: 10.7667/PSPC151880

基于多信息源的大电网低频振荡预警及防控决策系统

宋墩文[1]，温渤婴[1]，杨学涛[2]，刘 涛[2]，谷玉宝[3]，马世英[2]

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院，北京 100083；2. 中国电力科学研究院，北京 100192；
3. 国网安徽省电力公司经济技术研究院，安徽 合肥 230022)

摘要：低频振荡是威胁互联电网安全稳定运行的关键因素之一。负阻尼机理低频振荡和强迫功率振荡在我国均有发生。基于 WAMS 和 EMS 实时多信息源相结合，提出一种将低频振荡实时监测预警、扰动源定位、动态稳定控制策略在线搜寻综合应用于大电网的动态稳定防控方法。阐述了系统整体功能架构，介绍了多机理低频振荡防控并行技术方案。通过 Prony 计算、振荡能量指标、运行参数特征值灵敏度分析、模式匹配策略等方法实现低频振荡在线预警及防控，并指出了所涉及的关键技术。该系统可实现大电网低频振荡快速量化评估与辅助决策，对提高电力系统动态安全预警及防控水平，具有重要理论指导和工程实践意义。该原理方法在河南省互联电网低频振荡防控系统中得到实际应用。

关键词：低频振荡；实时监控；弱阻尼；强迫振荡；广域测量；并行计算

A multiple information sources based early warning and preventive control system for low-frequency oscillation in large-scale power system

SONG Dunwen[1], WEN Boying[1], YANG Xuetao[2], LIU Tao[2], GU Yubao[3], MA Shiying[2]

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Grid Anhui Electric Power Company Economy and Technology Research Institute, Hefei 230022, China)

Abstract: Low frequency oscillation is one of the key factors threatening the security and stability of interconnected power grid. Negative damping mechanism low frequency oscillation and forced power oscillation ever have occurred in China. Based on the combined real-time multi-information sources multi-information source of WAMS and EMS, a comprehensive prevention and control method including real-time monitoring and early warning of low frequency oscillations, disturbance source localization, online searching of dynamic stability control strategy applied to large grid is proposed. The overall system function architecture is elaborated and the parallel prevention technical solution of multi-mechanism low frequency oscillation is introduced. By Prony calculation, oscillation energy index, eigenvalue sensitivity analysis of operating parameters and pattern matching strategy methods, the online warning and prevention of low frequency oscillation is achieved, the key technologies involved are pointed out. Using the proposed system, the fast quantitative evaluation and decision support for low frequency oscillation of large power grid can be implemented, and the dynamic security early warning and preventive control level of power grids can be enhanced, which is meaningful both in theoretical guidance and engineering practice. The method gets practical application in Henan interconnected power grid.

Key words: low frequency oscillation; real-time monitoring; weak damping; forced oscillation; wide area measurement; parallel computing

0 引言

近年来，我国坚强智能电网快速发展，特高压交直流电网建设全面提速，资源优化配置和清洁能源消纳能力显著提升。但在特高压互联电网建设过渡期，电网运行特性更加复杂，区域电网稳定裕度下降，电网跨区潮流转移范围更大、影响区域更广，使得故障后的稳定问题更加复杂，给电网实时调控运行带来极大挑战，其中，低频振荡问题是威胁互

基金项目：国家电网公司科技项目“大电网安全稳定控制策略管理和动态性能监测关键技术研究”

联电网安全稳定运行和制约电网输电能力的关键因素之一。

我国近年来发生的低频振荡事件如表 1 所示[1-4]。由表述统计可见，我国近期来发生的低频振荡呈现出多样性和复杂性特点，因此有必要对多机理低频振荡综合防控体系进行研究。

表 1 低频振荡事件一览

Table 1 Low frequency oscillation events

时间	事件	性质
1997.12	河南电网安保线	强迫功率振荡
2003.03	云南电网与南方电网 500 kV 联络线-罗马线功率振荡	负阻尼区间低频振荡
2005.09	蒙西电网机组对系统功率振荡	负阻尼局部低频振荡
2005.05	南方电网 500 kV 联络线及广东电网内部	强迫功率振荡
2008.01	华中电网	区间低频振荡

目前，低频振荡相关领域已经做了大量研究，涌现出许多有效方法和成果[5]。准确识别低频振荡发生，定位低频振荡起振点，寻找平息低频振荡的控制措施，是大电网低频振荡防控，尤其是实时防控的三大基本任务。

低频振荡在线识别方面，广域量测系统(Wide area management system，WAMS)真实记录了系统受扰轨迹，为低频振荡分析提供了强有力工具。可通过 WAMS 获取区间的发电机相对转子角和转子角速度信号等实测信息，结合 Prony 算法对振荡模式和模态进行分析，低频振荡监视作为 WAMS 高级应用之一在实际工程中得到普遍应用[6]，但从 WAMS 系统中较难得到进一步抑制甚至平息低频振荡的措施。

扰动源定位方法方面，研究成果包括基于能量的方法[7-9]、基于混合仿真的方法[10]以及基于机电波相关性分析的方法[11]等，无论是效果还是可行性方面，基于能量的方法都具有更大的优势，文献[12]提出了建议在能量管理系统(Energy management system，EMS)增加基于同步相量测量装置(phasor measurement unit，PMU)数据的暂态能量流计算功能，用于锁定强迫振荡源。

控制策略搜寻方面，常采用基于系统模型参数的模态分析法、时域仿真法以及阻尼转矩分析法[13-17]等，但其大多数应用场合仍然在基于某一运行方式的研究态，相关功能软件也仅作为低频振荡研究或事故反演验证工具。

综上分析，现有低频振荡分析手段往往只针对低频振荡防控三大基本任务某一点出发进行分析，存在功能和面向机理单一、无法在线生成辅助控制措施等不足，无法满足新形势下电网低频振荡防控需求。

本文主要工作是将低频振荡实时辨识、强迫功率振荡扰动源定位、动态稳定辅助控制措施在线搜寻有机结合，对相关功能包括 Prony 计算、在线小干扰分析、面向运行参数辅助控制措施以及基于能量的强迫扰动源定位进行研究、扩展与组态集成，研发了基于多信息源的、能够覆盖负阻尼机理低频振荡和强迫功率振荡的大电网低频振荡预警及防控辅助决策系统。

系统能够提高低频振荡防控和智能化决策水平，提升调度人员对电网低频振荡分析和判别能力，增强对电网多机理低频振荡态势的全景感知能力。

1　大电网低频振荡影响因素综合分析

按照低频振荡物理机制本质，可分为负阻尼机理、强迫功率振荡、参数谐振机理及非线性机理等，本文主要讨论目前工程上常见的负阻尼机理和强迫振荡机理功率振荡。

负阻尼机理低频振荡由电网故障或负荷投切激发，与扰动形式无关。长距离、重负荷输电线路易引起负阻尼机理功率振荡，而快速、高放大倍数的励磁系统对此起恶化作用。因此最根本的方法是设法提高系统阻尼力矩(或优化负阻尼振荡模式)。其中，在发电机励磁控制系统中配置电力系统稳定器(Power system stabilizer，PSS)是抑制低频振荡最基本的措施，PSS 已被证明是目前阻尼低频振荡的最有效、最经济的装置。但 PSS 整定设计常在离线阶段完成，参数跟踪运行方式变化存在困难。

原动机机械功率周期性摆动，包括汽轮机主蒸汽压力脉动、水轮机尾水管水压脉动、励磁系统电压周期性波动、负荷周期性扰动、发电机非周期并网等不同形式的周期性小扰动注入电网，当扰动频率频谱覆盖系统固有振荡频率时，会引起不同程度的强迫功率振荡[18-21]。强迫功率振荡三要素(频率、振幅及相位)受扰动源(扰动幅值和扰动地点)、电网结构参数及运行参数等因素的影响。抑制该类振荡的最有效和最直接的方法即为追踪振荡传播途径，识别初始起振点，切除扰动源。

2　系统整体架构

2.1 系统实现目标

大电网低频振荡表现形式和影响因素复杂多样，即使只对常见的负阻尼机理和强迫振荡实施同时防控也存在较大困难。

为便于解决上述低频振荡防控三大基本任务，

指导工程实践，考虑当今低频振荡各类先进算法基础上，针对负阻尼振荡及强迫功率振荡安全问题，提出联合应用现有 EMS 和 WAMS 等多信息源平台，结合大数据处理、并行计算等新技术，综合分析比对各类计算分析结果，在线判别电网低频振荡，寻找抑制振荡控制措施和搜索起振位置的低频振荡综合防控方法，构建新一代电力系统低频振荡监测、预警和防控系统。

2.2 综合防控总体设计

低频振荡综合防控系统设计上，采用分层架构方法，将数据处理、计算分析、结果判断归属于不同的实现层次。整个低频振荡防控系统如图 1 所示。系统通过 WAMS 实测数据波形及阻尼分析，对当前低频振荡机理进行判别，给出改善系统阻尼的控制措施或起振点位置。

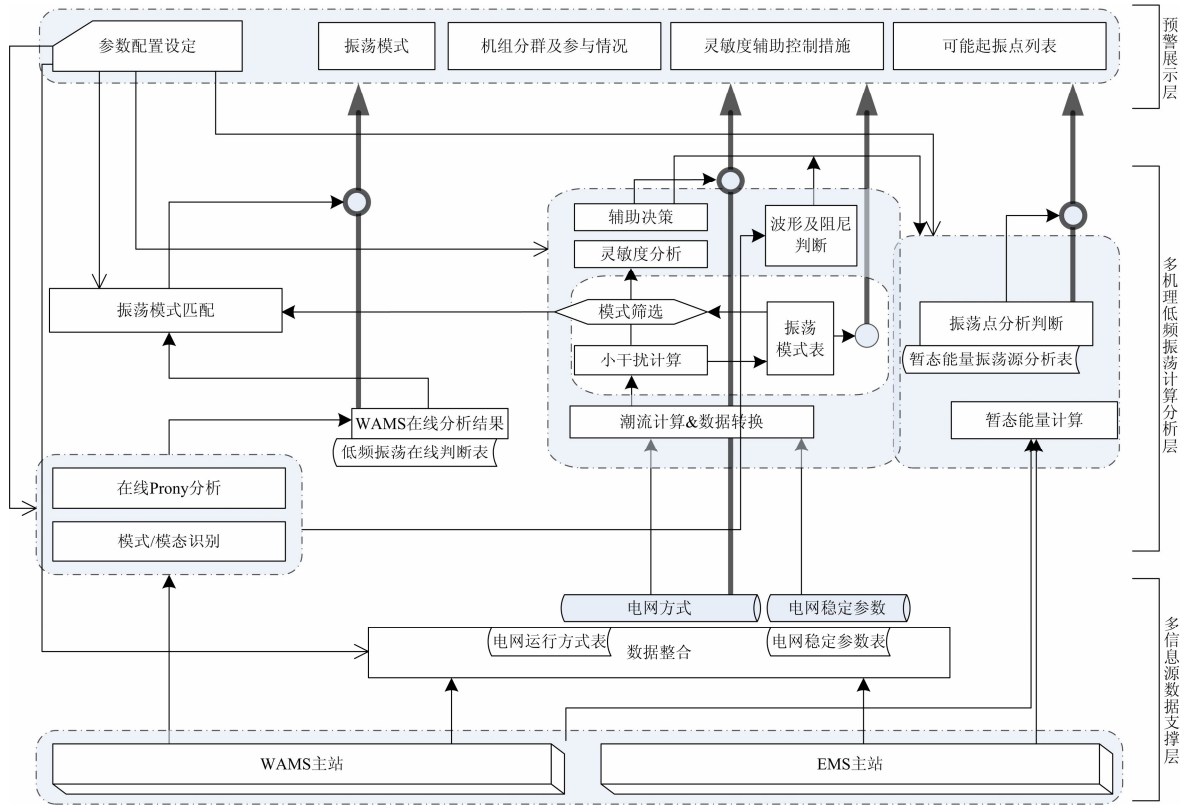

图 1 低频振荡综合防控总体架构

Fig. 1 Overall architecture of low frequency oscillation comprehensive prevention and control system

架构主要分为 6 个部分。

1) 实时多信息源数据处理

包括数据采集与监控系统(Supervisory control and data acquisition，SCADA)/EMS 在线数据、PMU/WAMS 量测数据在线自动获取、整合及接口规范化处理。数据支撑层为多机理低频振荡计算分析提供运行方式、网络拓扑和同步监测信息。

2) 低频振荡监测预警

包括功率振荡越限识别、基于实时 WAMS 数据和 Prony 计算的振荡模式识别、基于同调分群技术的模态识别。该环节实现了低频振荡监测预警，且为灵敏度辅助控制措施生成及强迫振荡源定位提供基础信息。

3) 在线低频振荡分析决策

包括基于在线方式数据和隐式重启动 Arnoldi 算法，实现在线小干扰计算分析，对振荡模式进行扫描；基于有功功率特征值灵敏度方法，生成与振荡模式具有对应关系的辅助控制措施表。

4) 基于模式匹配的控制措施自动筛选

应用模式匹配策略，对 2)和 3)结果信息进行最小二乘匹配，自动获得抑制当前功率振荡的可用控制措施。

5) 低频振荡源搜索定位

综合应用在线运行方式拓扑信息、WAMS 量测信息、Prony 分析得到的振荡预警信息，基于能量分析方法获得扰动传播路径，实现扰动源定位。

6) 人机交互及控制

面向调度运行人员，将多机理低频振荡计算分

析得到的关键结果形成电网低频振荡预警及控制措施决策可视化信息。

2.3 综合防控总体设计

1) 兼顾多机理低频振荡防控，包括负阻尼振荡机理和强迫功率振荡机理；

2) 充分利用多信息源数据特征，包括 WAMS 数据实时性、同步性和精确性，以及 EMS 数据网络拓扑及信息全局性；

3) 将多个方法的优点进行有机结合，包括基于模型的小干扰分析分析方法和基于量测的轨迹分析方法；

4) 预防控制与紧急控制相结合，当无振荡发生时，可给出阻尼优化措施；当振荡发生时，在基于模式匹配方法实现实时推送基于功率调整的在线辅助决策；

5) 系统采用开放自适应组态架构设计，可实现后续功能自由嵌入。

3　关键技术

3.1 多信息源数据整合

电网的 EMS 数据反映了电网的实时运行拓扑和运行状态。其数据结果是基于 SCADA 量测数据基础上，经过状态估计而获得的。系统基于 OpenMP 并行技术的多线程快速在线 EMS 数据整合方法，实现了区内电网和区外电网运行数据拼接，提高了数据整合效率，增强了应对电网实时拓扑变化的适应性。

WAMS 在同一参考时间框架下捕捉到大电网各点的实时动态信息，信息包括有功、无功、电压、相角、频率等关键量，准确反映了电网的运行状态。为提高 EMS 数据用于振荡防控计算的数据质量，通过限值过滤、冗余校核、定性判断等多种方法，将 WAMS 数据与 EMS 数据进行有效整合，提高实时计算数据可用率。对于低频振荡预警，本方法直接采用 WAMS 各监测点的数据进行计算分析；对于辅助控制措施及起振源搜索采用在线整合数据进行计算分析。

3.2 WAMS 低频振荡在线监测

通过阈值计算，可检测到功率振荡是否发生；通过对线路有功和母线相角连续 Prony 跟踪计算，可及时得到反应低频振荡特征量的振荡频率、阻尼大小等信息；通过全网机群相角相位关系，可得到振荡模态信息，即机组分群情况。

1) 功率越限告警启动判据

$$\frac{P_{\max}-P_{\min}}{P_{\text{ave}}}\geq c \tag{1}$$

其中：$P_{\max}$、$P_{\min}$ 和 P_{ave} 分别为观察时窗内有功功率时间序列最大值、最小值和平均值；c 为越限阈值。时间窗口选为 1 s。满足上述判据时，说明功率发生明显波动，此时需要进一步启动数据分析，判别是否为低频振荡。其中，观测变量也可选电流 $i(t)$ 或功角 $\delta(t)$ 等。

2) 模式识别

Prony 算法用复指数衰减线性模型组合来拟合等间隔采样数据，估算给定信号的频率、衰减因子、幅值和相位。拟合模型为

$$x_n=\sum_{i=1}^{p}b_i z_i^n=\sum_{i=1}^{p}A_i\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_i}\mathrm{e}^{(\alpha_i+\mathrm{j}2\pi f_i)nT}\quad n=0,1,\cdots,N-1 \tag{2}$$

其中：N 为采样数据个数；p 为拟合复指数函数个数；A_i、θ_i、α_i、f_i 分别为幅值、初相位、衰减因子和频率。

根据频率 $f_{\text{s}}=\dfrac{1}{\Delta t}=\dfrac{2\pi f_i}{\arctan\left[\mathrm{Im}(z_i)/\mathrm{Re}(z_i)\right]}$ 和 Nyquist 采样定理，采样频率约为 $4f_{i\max}$。

3) 基于全网 PMU 数据的振荡机群快速判别技术

基于 Prony 针对不同节点、同一时间序列监测功率相角和母线频率波动曲线辨识得到的初始相位信息，对同调机群进行分类。具体分为以下几个步骤：

a. 对相对振荡幅值进行排序，选取最大的振荡曲线相位为参考值；相对振荡幅值计算参考公式(1)；

b. 根据其他振荡越限点与参考点初相位对机组进行聚类分群和归一化处理；

c. 获得相对振荡机群和振荡中心位置。

3.3 低频振荡抑制措施在线计算

利用数据整合得到的潮流模型，结合描述电网的暂态稳定参数化模型，可以实现整个电网的动态稳定性计算。采用隐式重启动 Arnoldi 方法，在频率范围内对电力系统动态特性进行特征值求解，在求解过程中产生的左、右特征相量矩阵，包含了振荡模式、振荡频率、阻尼比、机电回路相关比和参与因子等信息。特定低频振荡模式的同调机群信息可由特征向量相角信息得到。

系统运行方式是影响小干扰稳定性的重要因素，通过计算特征值对系统运行方式的灵敏度，对于系统可能存在或真实发生的低频振荡采取措施，改变系统运行方式，以避免或抑制低频振荡。电力系统数学模型可由一组微分代数方程描述如式(3)。

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\mu)\\ \boldsymbol{0}=\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\mu)\end{cases} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{x}\in R^n$ 是状态变量；$\boldsymbol{y}\in R^m$ 是代数变数；

$\mu \in R$ 是某一参量；f 和 g 分别是 n 维和 m 维的非线性向量值函数。

将式(3)在稳态平衡点附近线性化，得到 $\Delta \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}(\mu)\Delta \boldsymbol{x}$，则特征值对参数的灵敏度为[22]

$$\frac{\mathrm{d}\lambda(\mu)}{\mathrm{d}\mu} = \frac{\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(\mu)\dfrac{\mathrm{d}\mathbf{A}(\mu)}{\mathrm{d}\mu}\boldsymbol{v}(\mu)}{\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(\mu)\boldsymbol{v}(\mu)} \tag{4}$$

式中，$\lambda(\mu)$，$\boldsymbol{u}(\mu)$ 和 $\boldsymbol{v}(\mu)$，分别是系数矩阵的特征值和相应的左、右特征向量，μ 为有功功率(或无功功率)。根据灵敏度排序便可得到一个发电机节点序列，将对阻尼指标的影响较大发电机节点定义为主导控制节点，也是优化阻尼的调整对象。

因此，采用运行参数(有功功率和无功功率)特征值灵敏度分析，找出危险振荡模式下的调控措施，形成动态稳定控制策略表。

3.4 模式匹配策略

充分利用时域 Prony 算法计算速度快、频域小干扰及灵敏度计算结果信息丰富的优点，基于模式匹配思想，将 3.2 节实时得到的振荡信息与 3.3 节的辅助控制策略表进行耦合，“正向”充分利用 WAMS 数据和 Prony 算法的实时性，将扫描得到的电网振荡信息与小干扰分析得到的动态稳定控制策略表，基于多指标信息最小二乘法进行匹配；“反向”将灵敏度计算出的措施在线推给调度员，在整体上提高大电网低频振荡问题“发现即解决”的实时性和准确性。

3.5 强迫振荡扰动源搜索

若系统阻尼良好仍有振荡发生，则有可能为强迫功率振荡。系统采用能量法进行扰动源定位：

$$W_{ij} = \int_0^t \Delta P_{ij}\mathrm{d}\Delta\theta_i + \Delta Q_{ij}\mathrm{d}\ln U_i \tag{5}$$

式中，变量物理含义见文献[8-9,23]。若在连续时窗内恒满足 $\mathrm{d}W_{ij}/\mathrm{d}t > 0$，则认为扰动源位于该发电机或母线侧。

发电机势能或支路势能被视为发电机对振荡影响的一种指标，发电机流向网络能量的正负反应出该发电机对振荡是激励作用还是抑制作用。因此通过观察各机组的能量变化，便可以区分出扰动源所在的机组。

研究表明，对于同一振荡模式的相同扰动量，若扰动源位于参与因子较大机组，则系统发生强迫功率振荡较为严重。因此本文在割集能量法[9]的基础上，充分考虑和利用模式匹配得到的结果信息，在锁定割集内部，将参与因子较大机组作为优先扫描对象，为进一步快速锁定危险扰动提供依据。

3.6 预警及决策控制

每次实时数据更新都会“驱动”低频振荡监测、控制措施搜索以及振荡源定位三项基本任务并行处理，当 WAMS 监测电网出现低频振荡后，系统对对有用信息进行整合，选择匹配最优或次优的辅助控制措施推向调度人员。若为强迫功率振荡，则在预警振荡模式下，给出振荡源传播途径，列出可能起振点或起振范围。

4 低频振荡防控系统研制及应用

第 3 节所述低频振荡综合防控方法的各技术要点已通过原理和测试案例验证，为充分检验其工程实用价值，采用该方法研制了河南省低频振荡防控决策支持系统且在河南省电力公司得到应用。该系统由一台通信前置机、管理服务器、WAMS 振荡监测计算服务器、动态稳定及振荡源定位并行计算服务器和展示工作站构成。通信前置机实现与 WAMS 和 EMS 系统接口；管理服务器实现数据整合、任务的调度和辅助控制决策的选择输出；WAMS 振荡监测计算服务器实现基于各监测点母线电压的非参数化 Prony 实时计算分析，并向管理服务器提供低频振荡判断结果；并行计算服务器实现小干扰、振荡能量计算分析。振荡预警结果、振荡抑制措施及起振位置判定结果通过显示工作站展现给调度分析人员。

5 结论

低频振荡是威胁互联电网安全稳定运行的关键因素之一。本文利用 WAMS 和 EMS 实时数据，采用 Prony 算法、隐式重启动算法、能量分析法、运行参数特征值灵敏度计算等判断方法，提出了一套大电网低频振荡防控方法，给出了解决低频振荡监测预警、振荡源搜索定位、振荡抑制平息控制措施三大基本低频振荡防控问题的解决方案。提出了多机理低频振荡防控系统的技术架构，研发了基于多信息源的大电网低频振荡预警及防控决策系统。为大电网低频振荡防控探索出一条工程化应用途径，对提高电力系统动态安全预警及防控水平具有重要理论指导和工程实践意义。

参考文献

[1] 董明齐, 杨东俊, 黄涌, 等. 华中电网 WAMS 实测区域低频振荡仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 64-69.
DONG Mingqi, YANG Dongjun, HUANG Yong, et al. Simulation of regional low frequency oscillation based on data measured by WAMS of central China power

grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 64-69.

[2] 王铁强. 电力系统低频振荡共振机理的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2001.

[3] 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.

[4] 苗友忠, 汤涌, 李丹, 等. 局部振荡引起区间大功率振荡的机理[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 73-77.
MIAO Youzhong, TANG Yong, LI Dan, et al. Tentative study of inter-area large power oscillation mechanism caused by the local mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 73-77.

[5] 宋墩文, 杨学涛, 丁巧林, 等. 大规模互联电网低频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 22-28.
SONG Dunwen, YANG Xuetao, DING Qiaolin, et al. A survey on analysis on low frequency oscillation in large-scale interconnected power grid and its control measures[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 22-28.

[6] 胡昊明, 郑伟, 徐伟, 等. Prony 和 HHT 算法在低频振荡在线辨识中的适用性比较[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 33-40.
HU Haoming, ZHENG Wei, XU Wei, et al. Comparison of the applicability of Prony and HHT algorithms for on-line identification of low-frequency oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 33-40.

[7] 余一平, 闵勇, 陈磊, 等. 基于能量函数的强迫功率振荡扰动源定位[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 1-6.
YU Yiping, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Disturbance source location of forced power oscillation using energy functions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 1-6.

[8] 陈磊, 闵勇, 胡伟. 基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位(一)理论基础与能量流计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 22-27.
CHEN Lei, MIN Yong, HU Wei. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location using oscillation energy, part one: mathematical foundation and energy flow computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 22-27.

[9] 李文峰, 郭剑波, 李莹, 等. 基于 WAMS 的电力系统功率振荡分析与振荡源定位(1)割集能量法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 41-46.
LI Wenfeng, GUO Jianbo, LI Ying, et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on WAMS part 1: method of cutset energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 41-46.

[10] 薄博. 共振型低频振荡振源定位研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.

[11] 耿天翔, 张竹竞, 项丽, 等. 基于起振特性的强迫振荡扰动源定位及解列方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 99-103.
GENG Tianxiang, ZHANG Zhujing, XIANG Li, et al. A locating and splitting scheme for disturbance source of forced power oscillation based on the propagation characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 99-103.

[12] 肖鸣, 梁志飞. 南方电网强迫功率振荡事故分析及其处置措施[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 51-54.
XIAO Ming, LIANG Zhifei. Analysis on the forced oscillation failure in china southern power grid and its handling measures[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2): 51-54.

[13] 王青, 孙华东, 马世英, 等. 电力系统小干扰稳定安全评估的一般原则及其在贵州电网中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 24-28.
WANG Qing, SUN Huadong, MA Shiying, et al. General principle of power system small signal stability evaluation and its application in Guizhou power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 24-28.

[14] 项丽, 鲍颜红, 耿天翔, 等. 基于广域信息的发电机电压控制抑制区间低频振荡方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 18-22.
XIANG Li, BAO Yanhong, GENG Tianxiang, et al. Damping inter-area low frequency oscillations method for generator voltage control based on wide-area information[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 18-22.

[15] 李阳海, 黄莹, 刘巨, 等. 基于阻尼转矩分析的电力系统低频振荡源定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 84-91.
LI Yanghai, HUANG Ying, LIU Ju, et al. Power system oscillation source location based on damping torque analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 84-91.

[16] 徐千鸣, 罗安, 马伏军, 等. 考虑低频振荡的 MMC 有源阻尼环流抑制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 118-127.

XU Qianming, LUO An, MA Fujun, et al. Circulating current suppressing method based on active damping control of MMC considering low-frequency oscillation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 118-127.

[17] 李从善, 刘天琪, 刘利兵, 等. 直流多落点系统自抗扰附加阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 10-17.
LI Congshan, LIU Tianqi, LIU Libing, et al. An auto-disturbance rejection controller of multi-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 10-17.

[18] 韩志勇, 贺仁睦, 徐衍会. 汽轮机压力脉动引发电力系统低频振荡的共振机制分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 47-51.
HAN Zhiyong, HE Renmu, XU Yanhui. Study on resonance mechanism of power system low frequency oscillation induced by turbo-pressure pulsation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 47-51.

[19] 徐衍会, 马骢, 邓小文, 等. 汽轮机阀门控制方式切换引发低频振荡的实例及其机理分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 47-51.
XU Yanhui, MA Cong, DENG Xiaowen, et al. Case of low-frequency oscillation induced by steam turbine valve control mode switchover and its mechanism analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 47-51.

[20] 马燕峰, 赵培龙, 赵书强. 多机电力系统的强迫功率振荡特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 23-29.
MA Yanfeng, ZHAO Peilong, ZHAO Shuqiang. Research on characteristics of forced power oscillation in multi-machine power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 23-29.

[21] 赵妍, 李志民, 李天云. 低频振荡模态参数辨识的共振稀疏分解 SSI 分析方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 136-144.
ZHAO Yan, LI Zhimin, LI Tianyun. Low frequency oscillation modal parameter identification using resonance-based sparse signal decomposition and SSI method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 136-144.

[22] 刘涛. 电力系统小干扰稳定分析中特征值灵敏度的算法及其应用研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.

[23] 倪以信, 陈寿松, 孙宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 260-262.

收稿日期：2015-10-26； 修回日期：2016-03-10

作者简介：

宋墩文 (1971 -)，男，通信作者，高级工程师，研究方向为电力系统安全稳定控制研究和电力系统仿真计算分析系统研发。E-mail: songdw@epri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)