

## 基于起振特性的强迫振荡扰动源定位及解列方案

耿天翔<sup>1</sup>, 张竹竞<sup>2,3</sup>, 项丽<sup>1</sup>, 鲍颜红<sup>2</sup>, 摆世彬<sup>1</sup>, 方勇杰<sup>2</sup>, 徐伟<sup>2</sup>, 李锋<sup>2</sup>

(1. 宁夏电力公司, 宁夏 银川 750001; 2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003; 3. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 强迫振荡已成为目前低频振荡事故的主要形式, 快速定位并解列扰动源是抑制强迫振荡的有效手段。在起振阶段, 由于惯性环节的存在, 离扰动源较远的节点测量量振荡相位较之离扰动点较近的节点滞后, 此特性可作为扰动源定位能量函数法的辅助判据, 用于从多个疑似扰动源所在区域中正确定位扰动源。通过对南方电网某方式的仿真验证了该方法的有效性。结合强迫振荡扰动源解列的特点, 提出两种解列方案, 分别为: 基于电网实际分区, 解列扰动源所在的区域; 基于图论提出适用于扰动源解列的断面调整规则, 确定解列断面。

**关键词:** 强迫振荡; 扰动源; 定位; 起振特性; 主动解列

### A locating and splitting scheme for disturbance source of forced power oscillation based on the propagation characteristic

GENG Tianxiang<sup>1</sup>, ZHANG Zhujing<sup>2,3</sup>, XIANG Li<sup>1</sup>, BAO Yanhong<sup>2</sup>, BAI Shibin<sup>1</sup>, FANG Yongjie<sup>2</sup>, XU Wei<sup>2</sup>, LI Feng<sup>2</sup>  
(1. Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 3. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Locating and splitting the disturbance source is the most efficient way to deal with forced power oscillation. In the initial stage, comparing with the oscillating measurement data of the bus that is close to the disturbance source, the one that is further away is phase lag because of the inertia units. The oscillation starting characteristic is considered to identify the disturbance source from suspected subareas. The scheme is validated by simulations. By combining the characteristic of disturbance source of forced power oscillation islanding control, two separation control schemes are designed. One is splitting the subarea which disturbance source is located in based on actual subarea division of the power systems. The other is determining the splitting surfaces according to the proposed adjustment rules which are applicable to disturbance source islanding control.

**Key words:** forced power oscillation; disturbance source; location; propagation characteristic; active splitting

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0098-06

## 0 引言

随着电力系统网架结构的增强以及系统中各类阻尼控制装置的完善, 目前传统的弱阻尼型低频振荡已经较少发生, 强迫振荡成为目前低频振荡事故的主要形式。经由对强迫振荡的机理分析<sup>[1-4]</sup>, 可知由于机理不同, 现有基于弱阻尼振荡的低频振荡控制手段<sup>[5-7]</sup>不能很好地平息强迫振荡。由于强迫振荡

具有扰动源明确, 扰动消除后系统振荡可自动平息的特点, 定位扰动源, 将扰动源从系统中解列, 是抑制强迫振荡的有效手段。

随着 WAMS 系统在我国电网中的推广, 高压、特高压母线已基本装有 PMU 装置, 快速定位扰动源成为可能。在现有研究中, 强迫振荡扰动源定位方法主要分为行波检测法<sup>[8-10]</sup>与能量法<sup>[11-14]</sup>。行波检测法<sup>[8-10]</sup>通过比较多测点畸变波形相似度以确定扰动源的位置, 但需另行安装装置。能量法<sup>[11-14]</sup>以扰动能量通过扰动源传入全网为基本原理, 由早期的积分计算暂态势能<sup>[11]</sup>, 改良为使用参数辨识<sup>[13]</sup>、耗散功率<sup>[14]</sup>等提升定位速度、减少所需测点的定位

**基金项目:** 国家电网公司科技项目“基于广域信息的大电网安全稳定在线应用关键技术研究及应用”; 宁夏电网公司科技项目“应对大电网严重故障的紧急调控技术研究”

方式。但这种方法仍然受到 PMU 布点条件的限制, 当 WAMS 数据不全时, 可能出现辨识出多个不相连的疑似扰动源所在区域而无法定位的情况。由于强迫振荡的传播存在起振阶段离扰动点距离越近的机组功角振荡相位越超前的特点<sup>[15]</sup>, 本文引入该特性作为强迫振荡扰动源定位的辅助判据, 基于经 HHT 算法辨识的低频振荡信号<sup>[16]</sup>, 从多个疑似区域中识别出扰动源所在位置。

国内外对电网的主动解列问题已进行了许多研究, 将电力系统进行等值, 得到电网简化拓扑, 对该图进行解列断面搜索为其中一种研究方向<sup>[17-20]</sup>。但现有主动解列研究着眼于失步解列问题, 对解列强迫振荡扰动源缺少研究。本文提出两种扰动源解列方案。第一种方案结合《电力系统安全稳定导则》中关于电网分层分区的要求, 将电网分为若干个尽量发电与负荷平衡的供电分区, 搜索扰动源位置所对应的分区, 解列断面即为该分区与大电网间的联络线。第二种方案对文献[20]中实时失步解列方案进行改进, 结合扰动源解列的特点, 提出适用于扰动源解列的断面调整规则, 将扰动源所在位置作为初始孤岛, 搜索孤岛的邻接节点对解列断面进行调整, 以满足解列条件。

## 1 强迫振荡扰动源定位判据

### 1.1 根据强迫振荡能量变化特性的判据

在强迫功率振荡稳态过程中, 外施扰动做功注入系统的能量通过势能在网络中传播, 各机组间的振荡动能表现在势能的周期变化上, 系统势能变化可以看作由两个部分组成: 一部分是伴随周期性振荡存在的周期性能量变化; 另一部分是由于外施扰动注入系统, 并在网络中消耗的能量<sup>[6]</sup>。文献[9]提出了根据后一部分能量对扰动源进行定位的方法, 以势能变化的流向作为扰动源所在位置的判据, 定义耗散功率为

$$P_{\text{dis}} = \frac{A_1 A_2}{2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1)$$

式中:  $A_1$  和  $\varphi_1$  分别为功率变化量幅值和变化量初始相角;  $A_2$  和  $\varphi_2$  分别为角频率变化量幅值和角频率变化初始相角。

若  $P_{\text{dis}}$  为正, 表示势能从线路首端传向线路末端; 若  $P_{\text{dis}}$  为负, 表示势能从线路末端流向首端。根据线路上势能的流向, 可以判断出扰动源所在节点。

### 1.2 基于强迫振荡起振特性的判据<sup>[15]</sup>

强迫振荡有着明确的扰动源, 振荡波自扰动点开始, 沿着线路向全网传播, 全网中各状态量的起

振过程并不是同步的。这是因为振荡的传播不能瞬时完成, 需要一定的时间, 对于某节点上的一个扰动, 远方机组的响应并不能立即达到稳态值, 会有一个暂态过程, 这一点与故障功率缺额引起的频率偏移在电网中各个观察点的扰动响应延时类似。起振延时时间长短与网络拓扑和参数、振荡相关机组的惯性时间常数相关, 起主要作用的是网络拓扑和参数, 即与扰动源的电气距离远近, 而扰动源位于机组或负荷上对该特性没有明显影响。对于电气距离相近的观测点, 则难以观察到起振过程的明显差别。

强迫振荡起振特性可以作为定位扰动源的依据。在强迫振荡的起振阶段, 对于扰动源附近的机组, 扰动源与机组间的电气距离较近, 因此响应较快, 振荡相位较为超前; 而距离扰动源电气距离较远的机组其响应较慢, 振荡相位较为滞后。由于强迫振荡的起振暂态过程十分短暂, 难以捕捉, 该判据误差较大, 使用条件较苛刻, 因此, 此判据仅作为能量变化特性的辅助判据使用。

## 2 两种判据结合的强迫振荡扰动源定位方法

强迫振荡扰动源通常位于电压等级较低的机组或负荷上, 而 PMU 装置配备于电压等级较高的节点。基于能量变化特性的扰动源定位方法通过对 PMU 节点相连线路势能进行考察, 以其流向判断扰动源所在方位。当电网发生区域间振荡, 应先计算区域间联络线势能流向, 定位扰动源所在分区, 再针对该分区进行扰动源搜索。

由于区域内电网架构较为复杂, 若 WAMS 数据不全, 则无法将扰动源精确定位, 此时应利用现有数据, 将扰动源定位至与大电网间势能流向只出不入的某一区域。使用这种方法, 可能出现多个疑似扰动源所在区域, 由于强迫振荡扰动源通常只有一处, 应运用强迫振荡起振特性, 以与疑似区域相连的 PMU 监测线路起振先后为判据, 判断扰动源所在位置。

强迫振荡扰动源定位方案如下:

1) 当系统发生强迫功率振荡时, 以能量函数法计算 PMU 监测线路的势能流向, 若存在所有连接线路势能流向只出不入的某一节点, 则将该节点作为扰动源; 否则, 进入步骤 2)。

2) 删除势能流入节点并进行拓扑分析, 确定由此形成的无连接关系的节点集合, 若集合唯一, 将该节点集合为扰动源所在区域; 否则, 将各无连接关系的节点集合作为疑似扰动源所在区域, 进入步骤 3)。

3) 若存在连接线路势能流向均为流出的疑似扰动源所在区域, 将该区域作为扰动源所在区域; 否则, 对疑似扰动源所在区域节点集合的连接线路中 PMU 监测的线路, 计算强迫振荡初始阶段线路有功功率曲线的相位, 将起振相位最超前线路所连接的区域作为扰动源所在区域。

以图 1 为示例, 设图中仅有节点 3、4 装有 PMU 装置, 图中箭头代表势能流向。首先以能量函数法进行扰动源判断, 不存在所有连接线路势能只进不出节点, 则删除势能流入节点 2、3、4、6, 进行拓扑分析, 余下无连接关系的节点集合为节点 {1} 和节点 {5,7}, 即为疑似扰动源所在区域。不存在连接线路势能流向均为流出的疑似扰动源所在区域, 则对比与这两个区域相连的 PMU 监测线路强迫振荡初始阶段线路有功功率曲线的相位, 即线路 4-1 与线路 3-5 的起振先后, 起振相位超前者所连区域为扰动源所在区域。

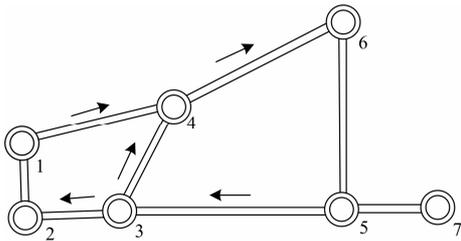


图 1 电网架构示例

Fig. 1 An example of power system structure

### 3 算例验证

以南方电网为例, 验证两种判据相结合的强迫扰动源定位方法。图 2 为云南部分电网架构图, 对其中小龙潭机组上施加频率为 0.466 Hz 的机械扰动, 激发南方电网强迫振荡, 该模式是全网的区域间振荡。

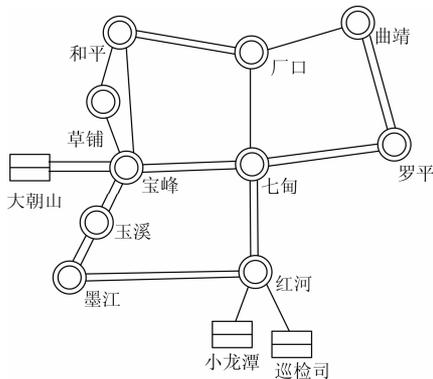


图 2 云南电网部分区域

Fig. 2 Part of Yunnan power system

### 3.1 强迫振荡的起振特性验证

该模式为南方电网区域间振荡, 考察云南-广西间联络线罗百线及广西-贵州间联络线河独线有功功率的起振情况, 结果如图 3。

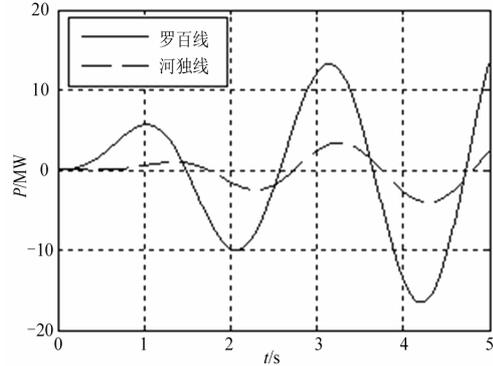


图 3 罗百线及河独线起振时有功功率振荡

Fig. 3 Active power oscillations of Luo-Bai and He-Du in the initial stage

分析图 3 可知, 在强迫振荡的起振过程中, 罗百线有功振荡曲线于 1.03 s 第一次达到峰值, 而河独线约于 1.36 s 第一次达到峰值, 即罗百线起振先于河独线。振荡源位于云南省, 可见振荡波经由罗百线传至广西电网, 再由河独线传至贵州电网。由于电网中惯性环节的存在, 根据距离扰动源的远近, 起振阶段存在超前-滞后关系, 验证了电网中强迫振荡的起振特性。

### 3.2 强迫振荡扰动源定位方法验证

假设仅有玉溪、厂口节点装有 PMU 装置, WAMS 数据不全, 先使用能量变化特性判据对扰动源进行定位, 结果如表 1 所示。

表 1 能量变化特性判断结果

Table 1 Result of energy function calculation

线路	$P_{dis}$
玉溪-宝峰-1	0.023 94
玉溪-宝峰-2	0.023 94
玉溪-墨江-1	-0.024 25
玉溪-墨江-2	-0.024 25
厂口-七甸	-0.020 93
厂口-曲靖-1	0.030 43
厂口-曲靖-2	0.030 43
厂口-和平-1	-0.019 33
厂口-和平-2	-0.018 59

对表 1 中数据进行分析, 可得到 {草铺, 和平} 与 {七甸, 红河, 小龙潭, 巡检司, 罗平, 墨江} 两组疑似强迫振荡扰动源的判断结果。

使用基于强迫振荡起振特性的扰动源定位判据进行判断。与{草铺, 和平}相连的 PMU 监测线路为厂和线, 与{七甸, 红河, 小龙潭, 巡检司, 罗平, 墨江}相连的 PMU 监测线路为玉墨线及厂七线, 考察线路起振先后, 如图 4。

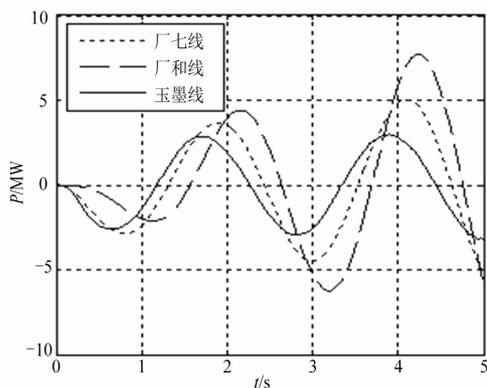


图 4 厂七线、厂和线及玉墨线起振时有功功率

Fig. 4 Active power oscillations of Chang-Qi, Chang-He and Yu-Mo in the initial stage

由图 4 可见, 玉墨及厂七线路有功功率起振均提前于厂和线。则选择节点{七甸, 红河, 小龙潭, 巡检司, 罗平, 墨江}为扰动源所在区域。该判断与实际情况相符。

## 4 强迫振荡扰动源主动解列方案

进行强迫振荡扰动源解列后, 扰动源所在地区形成孤岛。由于解列点通常在输电网中选择, 识别扰动源位置的方法受到 PMU 布点条件的限制, 通常能识别出的扰动源位置电压等级也较高, 因此该孤网电压等级较高, 应尽力保证解列后该网能够独立稳定运行。为此, 结合扰动源解列的特殊性, 本文设计了两种方案。

### 4.1 扰动源位置与电网分区匹配的解列策略

根据《电力系统安全稳定导则》的规定, 在规划电网结构时, 应实现合理的分层分区原则; 运行中的电力系统必须在适当地点设置解列点并装设自动解列装置, 能够有计划地将系统迅速而合理地解列为供需尽可能平衡而各自保持同步运行的两个或几个部分。目前, 500 kV 与 220 kV 电网的分层分区运行已在许多省网付诸实施, 形成了以 500 kV 变电站为主要电源, 配合本地大容量电厂, 经由 220 kV 变电站向该分区供电的电网架构。

将定位得到的扰动源所在地区与电网实际分区相匹配, 即可运用分区间解列装置将扰动源所在分区从大电网中解列。由于电网分区时除去考虑地理

位置、行政辖区等因素, 还考虑了尽量使分区内发电与负荷相平衡的条件, 解列后所形成的孤岛具有独立安全运行的能力。

该方案利用了电网现有的分区规划, 将电网事先分割为 220 kV 电压等级的若干供电分区, 每一分区可保证解列后独立运行; 各分区间断面清晰, 有利于迅速解列与电网恢复, 具有调度运行简单明确的优点, 工程实用性高。

## 4.2 基于图论的扰动源解列策略

### 4.2.1 网络化简

由于解列点电压等级较高, 只需要对 220 kV 及以上电压等级的母线和支路进行电网拓扑分析和化简。原则如下: 以连接母线的输电线路作为图的边集, 以母线或母线段形成图的节点集。将节点所连接的发电功率及负荷功率统计到该节点, 发电/负荷间的不平衡功率即为节点的权值, 根据其有功的正负判断该点为发电/负荷节点。

### 4.2.2 解列断面的调整规则

与扰动源位置相对应的节点或节点集与大电网间的断面即为初始解列断面。虽然初始解列断面可以将扰动源与系统解列, 但无法保证解列后子系统的安全稳定问题, 为达到此目的, 需设立符合扰动源解列特点的约束, 对初始断面进行调整。

共振机理低频振荡的频率, 即系统的自然振荡频率公式为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2)$$

式中:  $M$  为机组惯性时间常数;  $K$  为同步力矩系数,

$$K = \frac{E'U}{X_{\Sigma}} \cos \delta。$$

振荡解列后, 扰动源依然存在解列所形成的孤岛中。在所得子系统中, 原本参与振荡的发电机台数减少, 该振荡相关机组的等值惯性时间常数减小; 系统等值阻抗  $X_{\Sigma}$  减小, 则同步力矩系数  $K$  增大。该子系统的自然振荡频率升高, 振荡源频率的扰动不能引起该子系统的强迫振荡。由此, 孤岛中包含参与振荡的发电机台数应尽量少, 系统等值阻抗应尽量小。

同时, 为保证孤岛的稳定运行, 解列断面应满足功率平衡约束, 解列后孤岛内的发电与负荷尽可能平衡, 以减少解列后系统的停电损失。在算法上, 可规定发电/负荷不平衡量不得大于该区域紧急工况下切机切负荷的最大容许值。

### 4.2.3 节点调整搜索方法

1) 以扰动源所在区域与剩余系统之间的联络断面作为初始解列断面, 若扰动源区域满足功率平

衡的条件, 则进入步骤 5); 否则, 进入步骤 2)。

2) 将解列断面边界节点的邻接节点加入修正节点集合, 集合中包含与扰动源区域直接相连的节点。

3) 当扰动源区域的发电大于负荷时, 若修正节点集合中的某负荷节点归入扰动源区域不会造成解列后非扰动源区域形成孤岛, 将其归入扰动源区域; 当扰动源区域的负荷大于发电时, 若修正节点集合中的某发电机节点归入扰动源区域不会造成解列后非扰动源区域形成孤岛, 将其归入扰动源区域, 进入步骤 4); 当修正节点集合中无可归入扰动源区域的节点时, 进入步骤 5)。

4) 若扰动源区域满足孤岛功率平衡条件, 则进入步骤 6); 否则, 返回步骤 3)。

5) 将修正范围集内节点的邻接节点(除扰动源区域节点)也归入该集合内, 返回步骤 3)。

6) 建议对扰动源区域与系统的联络断面线路进行解列操作, 完成强迫振荡扰动源区域的解列方案。

## 5 结论

强迫振荡的起振阶段存在距离扰动源电气距离较近的测点各测量量起振相位要超前于距离扰动源电气距离较远的测点的特性。本文将该特性作为辅助判据, 与强迫振荡的能量变化特性相结合, 提出了一种强迫振荡扰动源定位方法。该辅助判据可从多个疑似扰动源所在区域中有效判断扰动源所在位置, 弥补了能量变化扰动源定位法的不足, 为 WAMS 数据不足时强迫振荡扰动源定位方法提出一种新方法。另提出两种扰动源主动解列方案, 基于电网分区的方案具有较高的工程实用性, 基于图论的智能解列方案可有效搜索解列最优解。

## 参考文献

- [1] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡分析[J]. 电网技术, 1995, 19(12): 6-10.  
TANG Yong. The analysis of forced power oscillation in power system[J]. Power System Technology, 1995, 19(12): 6-10.
- [2] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 29-33.  
TANG Yong. Fundamental theory of forced power oscillation in power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 29-33.
- [3] 贾勇, 何正友. 基于受扰轨迹的低频振荡分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 140-148.  
JIA Yong, HE Zhengyou. Review on analysis methods for low frequency oscillations based on disturbed trajectories[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 140-148.
- [4] 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.
- [5] 姚伟, 文劲宇, 程时杰, 等. 考虑时滞影响的 SVC 广域附加阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 239-246.  
YAO Wei, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. Design of wide-area supplementary damping controller of SVC considering time delays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 239-246.
- [6] 戚军, 江全元, 曹一家. 采用时滞广域测量信号的区间低频振荡阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 154-159.  
QI Jun, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Design of damping controller for inter-area low-frequency oscillation using time-delay wide-area measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 154-159.
- [7] 马燕峰, 赵书强, 顾雪平. 基于输出反馈和区域极点配置的电力系统阻尼控制器研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 175-184.  
MA Yanfeng, ZHAO Shuqiang, GU Xueping. Research on power system damping controllers based on output feedback and region poles assignment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 175-184.
- [8] 董清, 梁晶, 颜湘武, 等. 大规模电网中低频振荡扰动源的定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 78-83.  
DONG Qing, LIANG Jing, YAN Xiangwu, et al. Locating method of disturbance source of low frequency oscillation in large scale power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 78-83.
- [9] 董清, 张玲, 颜湘武. 低频振荡扰动源机组的自动定位方法[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 265-269.  
DONG Qing, ZHANG Ling, YAN Xiangwu. Automatic location of generation units behaving as disturbance source of low-frequency oscillation[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 265-269.
- [10] 董清, 张玲, 颜湘武, 等. 电网中强迫共振型低频振荡源的自动确定方法[J]. 中国电机工程学报, 2012,

- 32(28): 68-75.  
DONG Qing, ZHANG Ling, YAN Xiangwu, et al. Automatic location source method of compelled resonance low frequency oscillation in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 68-75.
- [11] 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.
- [12] 董超, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于能量函数的电网低频振荡及扰动源定位研究[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 175-181.  
DONG Chao, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Research on low frequency oscillation in power grid and location of disturbance source based on energy function[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 175-181.
- [13] 杨东俊, 丁艰勇, 李继升, 等. 基于参数辨识的强迫功率振荡扰动源定位方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 26-30.  
YANG Dongjun, DING Jianyong, LI Jisheng, et al. A disturbance source location method for forced power oscillations based on parameter identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 26-30.
- [14] 胡伟, 林涛, 高玉喜, 等. 基于耗散功率的区域电网强迫功率振荡扰动源定位[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 1006-1011.  
HU Wei, LIN Tao, GAO Yuxi, et al. Disturbance source location of forced power oscillation in regional power grid based on dissipation power[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 1006-1011.
- [15] 方勇杰, 薛禹胜, 徐泰山, 等. 引发强迫功率振荡的原动机扰动源定位方法: 中国, CN102170127A[P]. 2011-08-31.  
FANG Yongjie, XUE Yusheng, XU Taishan, et al. A locating scheme the prime mover which triggered forced power oscillation: China, CN102170127A[P]. 2011-08-31.
- [16] 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.
- [17] 沈沉, 吴佳耘, 乔颖, 等. 电力系统主动解列控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 1-6.  
SHEN Chen, WU Jiayun, QIAO Ying, et al. Studies on active splitting control power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 1-6.
- [18] 吴学娟, 沈沉, 向学军, 等. 主动解列策略求解过程中的网络化简[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 7-12.  
WU Xuejuan, SHEN Chen, XIANG Xuejun, et al. Network simplification for active splitting strategy searching[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 7-12.
- [19] YANG B, VITTAL V, HEYD G T. A novel slow coherency based graph theoretic islanding strategy[C] // Proc 2007 IEEE General Meeting, Tampa, FL, 2007: 1-7.
- [20] WANG C G, ZHANG B H, HAO Z G, et al. A novel real-time searching method for power system splitting boundary[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4): 1902-1909.

收稿日期: 2014-07-09; 修回日期: 2014-09-29

作者简介:

耿天翔(1982-), 男, 工程硕士, 高级工程师, 研究方向为电力调度运行管理; E-mail: gengtianxiang@nx.sgcc.com.cn

张竹竞(1989-), 女, 研究生, 研究方向为电力系统安全稳定分析及控制; E-mail: zzj19890505@126.com

项丽(1977-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力调度运行管理。E-mail: xiangli@nx.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)