

# 大规模互联电网区域间低频振荡实用分析方法

姚天亮<sup>1</sup>, 杨德洲<sup>1</sup>, 徐宏雷<sup>2</sup>

(1. 甘肃省电力设计院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省电力科学研究院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**结合 PSASP 小干扰频域分析与发电机功角曲线时域检测, 提出一种大规模电力系统低频振荡实用分析方法。4 台机算例研究了发电机模型、励磁系统与负荷模型对振荡模式的影响, 验证了所提方法的正确性。运用此方法分析大区域互联全国系统, 分两步方便快捷地求出了区域间、弱阻尼主导低频振荡模式。弥补了 PSASP 搜索部分特征值时存在的漏根缺陷, 并且能准确评估系统真实阻尼水平。

**关键词:**大规模电力系统; 区域间低频振荡; 经典二阶模型; 功角曲线检测

**Abstract:** Combining small signal analysis in frequency domain with generator power angle detection in time domain, a practical method of low-frequency oscillation (LFO) analysis in large-scale power systems is proposed. The researches of four machines system reveal the impact of generator model, excitation system and load model on oscillation modes, and it proves the correction of the proposed method. Using this method to analyze the national interconnected power systems, the inter-area weak damping dominant inertial modes are conveniently solved in two steps. And the missing shortcomings when searching some eigenvalues by PSASP are made up, and in the same time the actual damping value of power systems is accurately assessed.

**Key words:** large-scale power system; inter-area low-frequency oscillation; classical second-order model; power angle curve detection

中图分类号: TM712 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2010)02-0021-03

## 0 前言

实施大规模跨区输电和大区联网工程后, 中国地区电网间都是经极少数联络线弱连接, 形成了“长线路、重负荷、弱阻尼”的输电格局, 并且大容量机组静态快速励磁大大降低了系统的阻尼, 很容易造成系统弱阻尼甚至负阻尼而诱发低频振荡。大规模电力系统低频振荡问题越来越成为制约互联电网电能传输的瓶颈和影响电力系统安全稳定的重要因素。

特征值分析方法是电力系统低频振荡分析的经典方法<sup>[1]</sup>, 但是电网规模的扩大和新技术的引入使得系统 A 阵膨胀至数万阶, QR 方法由于存在“维数灾”问题只能望而却步。目前对超大规模电力系统的状态矩阵特征值求解, 仍然没有能求出所有低频振荡模式的算法, 很难求出所有的主导低频振荡模式。因此, 大规模电网低频振荡分析必须通过降阶来求解, 然而大面积降低发电机的模型的阶数又大大影响小干扰稳定分析的有效性和可信度。

文献 [2] 基于电力系统 2 阶、3 阶解析解提出了

大扰动下的功角稳定中起主要作用的仍然是低频振荡模式。PSASP 大干扰暂态稳定计算不受系统规模的限制, 其功角响应曲线蕴含了多个低频振荡模式相互作用的信息, 这样就从理论上提供了直接从系统大、小扰动下的响应曲线来提取振荡模式相关信息的可能性。

下面将综合稳定程序 PSASP 中小干扰计算子程序与大干扰暂态稳定功角响应曲线的检测相结合, 提出一种可以方便地适用于大规模实际电力系统低频振荡分析的方法, 并在四机两区域系统和全国联网后系统验证了该方法的实用性和有效性。

## 1 利用发电机功角曲线检测低频振荡模式

在基于发电机功角曲线检测低频振荡模式的众多方法中, Prony 算法<sup>[3-4]</sup>提取振荡信号特征具有独特的优势。Prony 方法用一组指数项的线性组合来拟合等间隔采样数据, 从中直接计算信号的幅值、相位、阻尼因子、频率等信息。大量的仿真计算表明: Prony 方法只要拟合阶数选择得当, 则拟合精度非常理想;

缺点是如果选择拟合阶数过大,容易出现较多模态参数接近的伪模式,并且难以剔除,原因是模式间的非线性复合作用造成的。

文中将 EMD-MORLET(模态分解-连续小波)方法应用于电力系统低频振荡的分析<sup>[5]</sup>,能够实现单个模态的有效分离,准确有效地找到相应模式;首先利用 EMD 分解实现信号从高频到低频的有效分离,然后在获取低频振荡模式主要特征的基础上,应用连续小波(Morlet)变换中的解析小波形式有效地提取模态参数。数学模型如下。

$$\begin{cases} \Delta \delta(t) = A_0 e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_d t + \varphi_0) \\ w(a, b) = \sqrt{a} / 2A_0 e^{-\zeta \omega_n b} \Psi^*(a\omega) e^{j(\omega_d b + \varphi_0)} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\zeta$  为阻尼比;  $\omega_d$  为有阻尼固有频率;  $\omega_n$  为无阻尼固有频率。再求取模和相角的斜率,即为模态  $a \pm j\omega$  的实部和虚部:  $a = \zeta \omega_n = -\frac{d}{db} (\ln |W(a, b)|)$ ,  $\omega_d = 2\pi f = \frac{d}{db} \angle [W(a, b)]$ 。阻尼  $\zeta = -a / \sqrt{a^2 + \omega_d^2}$ 。

## 2 基于 PSASP 与曲线检测的低频振荡分析方法

(1)在保证系统的潮流不变、网架结构不变、发电机总数不变的前提下,保留要分析地区电网的所有发电机模型不变,外围其他区域电网全部发电机均采用经典二阶模型,负荷采用 100% 恒阻抗,通过 PSASP 程序中“逆迭代 Rayleigh 熵迭代法”搜索部分特征值,求出与该地区电网相关的主导低频振荡模式,分析其频率、参与振荡发电机组的模态及相关因子的大小,找到对主振模式影响较大的关键机组,揭示不稳定的振源。

(2)假设在相关因子大的强相关发电机出口变压器高压侧短路(1.0 s 故障、1.02 s 故障切除)来模拟小扰动,在相关机组功角曲线上检测所含低频振荡模式,与式(1)中结果相互验证,并求得该模式真实的阻尼值。另一方面,还能检测到由于“逆迭代 Rayleigh 熵迭代法”搜索部分特征值而漏掉的那部分特征根,尤其是频率特别低的大区域间振荡模式。

## 3 算例分析

### 3.1 4 机算例验证发电机模型对振荡模式的影响

4 机 11 节点系统如图 1 所示,系统参数及正常情况下的运行工况参考文献[6]。下面分 6 种情况研究不同发电机模型、励磁调压系统、负荷模型对低频振荡模式的影响:①发电机都采用经典二阶模型,阻尼系数 D 取 0.01;②发电机都采用 3 型三绕组模型,不计励磁系统;③发电机均配直流快速励磁;④发电机均配高增益可控硅励磁;⑤退出调压器运行;⑥感应电动机负荷比例由 50% 降到 30%。

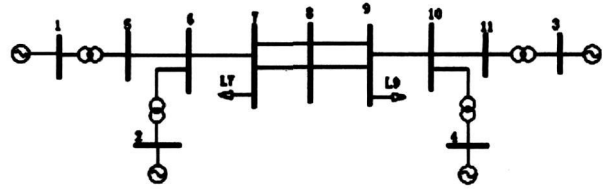


图 1 4 机两区域系统示意图

针对上述 6 种情况,利用 PSASP 进行小干扰稳定计算,求得主振模式的频率、阻尼、模态图及参与因子。表 1 给出了不同发电机模型下 3 个振荡模式的阻尼和频率,其中模式 1 为区域间振荡模式,模式 2、3 为本地振荡模式。

分析表 1,发电机采用模型不同时,系统 3 个主要振荡模式的振荡频率变化不大,只是阻尼有较大变化,尤其是本地振荡模式的阻尼,励磁系统影响区域间振荡的方式取决于励磁机的类型和位置以及负荷的特点。区域间振荡的特性与局部振荡极其不同,感应电动机负荷特性对区域间模式稳定性有很大影响。

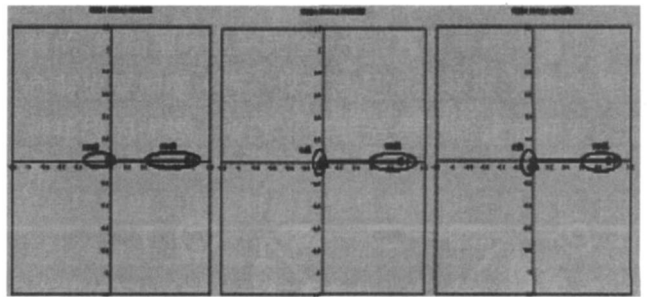


图 2 不同发电机模型区域间振荡模式的模态图

看模态图 2 发电机采用不同模型时,本地模式参与发电机组以及振荡机组的分群完全相同,而区域间模式的振荡模态也大致相同,仅个别机组振荡方位略有改变。

### 3.2 大区域互联后全国联网系统区域间的低频振荡分析

文中仿真计算全国联网系统采用的是全国联网后的系统,由华北、东北、华中、川渝和山东电网组成,

表 1 元件模型对振荡模式的影响

模 式	经典二阶		3阶无励磁		直流励磁		快速励磁		退调压器		感应电机负荷	
	$\zeta/\%$	f/Hz	$\zeta/\%$	f/Hz	$\zeta/\%$	f/Hz	$\zeta/\%$	f/Hz	$\zeta/\%$	f/Hz	$\zeta/\%$	f/Hz
1	4.5	0.536	9.0	0.537	9.4	0.538	12.1	0.513	9.0	0.537	11.5	0.517
2	2.3	0.994	6.6	0.995	6.6	0.995	27.2	0.990	6.6	0.995	6.7	0.995
3	2.4	1.028	6.7	1.028	6.7	1.029	29.0	1.022	6.7	1.029	6.8	1.028

总计 892 台发电机, 系统阶数达两万阶。因为大规模电力系统区域间振荡模式的特性是参与振荡机群繁多(数百台), 涉及多个的区域性电网, 相关因子大小接近且多处于同一数量级, 所以即使外围电网经过适当降阶化简, 大区域间振荡模式仍然不易求解。下面采用所提出的方法。

第一步, 先不考虑振荡模式的阻尼水平, 所有发电机用经典二阶模型模拟, 利用 PSASP 小干扰计算特征值, 该方法寻找区域间振荡模式快速、简单, 但衰减阻尼比不准确且容易出现负阻尼。表 2 列出了区域间低频振荡模式, 模态见图 3。

表 2 采用经典二阶模型时区域间振荡模式

模式	实部	虚部	频率	阻尼	机电回路相关比
1	0.011459	1.143080	0.181927	-1.0024	65.1091
2	0.000146	2.244858	0.357280	-0.0065	167.8740
3	0.004420	2.580488	0.410697	-0.1713	467.5360
4	0.000009	3.286303	0.523031	-0.0003	166.8090

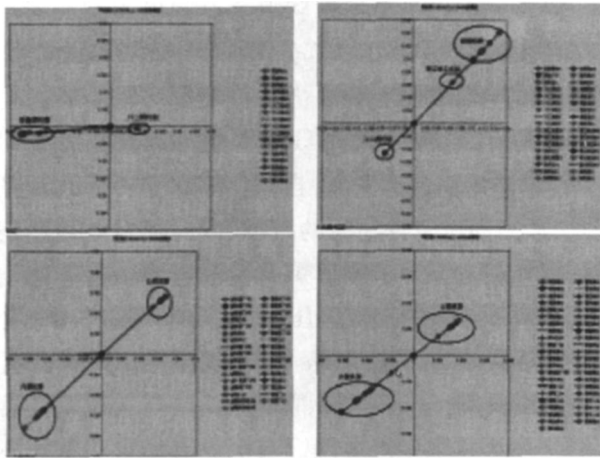


图 3 区域间振荡模式模态图

由图 3 看出, 模式 1 为川二滩 6 台机组相对晋、鲁、蒙机群振荡, 振荡方位相反; 模式 2 为川二滩 6 台机组相对鄂三峡左机组及湖南机群逆反振荡; 模式 3 为山东机群相对内蒙机群振荡; 模式 4 为山西机群相对内蒙机群振荡。这些模式振型明显, 皆为一个区域多台机组相对另一区域多台发电机振荡, 两个分群中参与机组众多、参与性相当, 应该是主导系统稳定性的大区域间低频振荡模式。

第二步, 发电机采用详细模型, 在各个模式强相关的发电机出口变压器高压侧短路用来激发这些区域间振荡模式, 在相对振荡的机群中找容量一大一小的一对机组, 输出其相对功角曲线。然后运用 Prony 拟合和 EMD 分解一小波变换检测曲线包含的主要模式, 其中模式 1 和 2 曲线拟和结果见图 4 验证这些模式频率和阻尼于表 3 中。

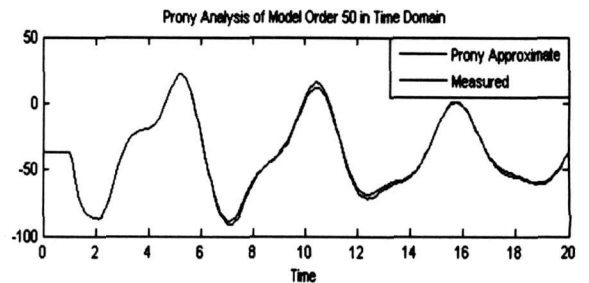


图 4 川二滩 01 号晋武电 G1 功角曲线

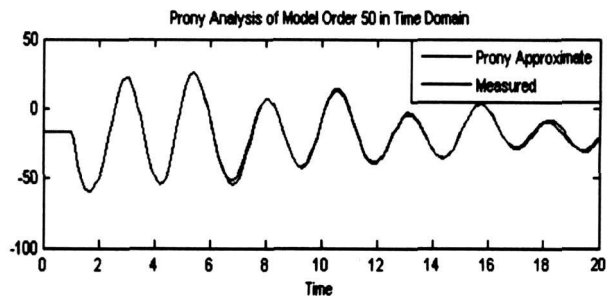


图 5 川二滩 01 号一湘潭 B03 功角曲线

表 3  $\delta$  曲线检测所得主要振荡模式

模式	幅值	虚部	频率	阻尼	能量级
1	63.08	-0.046	0.182	0.041	90620
2	23.09	-0.243	0.351	0.109	2815
3	10.99	-0.0712	0.397	0.0285	2013
4	1.67	-0.1502	0.545	0.0439	23.62

对比表 2、表 3 可知: 在经典二阶模型下所求得系统的区域间振荡模式确实存在, 小干扰计算所得模式与功角曲线检测结果相比, 频率相当吻合, 但全网数据、发电机均采用详细模型时功角曲线检测模式的阻尼大于经典二阶模型的结果。

文中所得模式 1 的频率、参与振荡机组分群与振荡相位、阻尼均与文献 [7] 殊途同归, 从而验证了该方法的有效性, 且阻尼更加贴近实际电网真实阻尼,

(下转第 82 页)

扰乱了供用电秩序。为防窃电,供电企业采取了加强人力检查,电能表中增设防窃电措施等各种技术手段,这在一定程度上杜绝了一些窃电,但苦于缺乏第一时间的窃电依据,造成窃电行为时有发生。通过本方案,可以第一时间掌握用户的窃电数据,并通过历史数据比对,可以有效地分析出一些难以发现的窃电行为和计量故障。

### 2.3.3 预付费

当前,中国各电力公司客户拖欠电费、违章用电现象比较严重,已引起有关部门的高度重视。如何采用科学的管理方法和手段来解决目前存在的问题,有效降低电力公司的经营风险,保护企业合法利益,为电力事业可持续发展创造有利条件,是摆在面前迫切需要解决的问题。通过本方案的实施,可以及时分析出居民用户的实时用电费用,根据大用户的各种表计分析计算出大用户的实时用电费用,从而实现预付费功能。

## 3 结束语

利用 GPRS、CDMA 以及 ZigBee 技术等现代通信

技术,组建 10 kV 配电网络及低压台区电网的无线数据通信平台,实现用电需求侧的全面监测。相关电网数据通过该无线网络平台实时传输,为电力系统各种实时应用奠定基础,从而提高供电企业的现代化管理水平。

## 参考文献

- [1] ZigBee WEB. ZigBee Protocol Specification. <http://www.zigbee.org> 2006.
- [2] 李晋. 防窃电技术 [M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [3] 王士政. 电网调度自动化与配网自动化技术 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [4] 钟章队. GPRS 通用分组无线电业务 [M]. 北京:人民邮电出版社, 2001.
- [5] 窦中兆,等. CDMA 无线通信原理 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [6] 国家电力公司著. 国家电力公司电力网电能损耗管理规定 [M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [7] IEEE WEB. IEEE 802.15.4 Specification. <http://www.ieee.org> 2006.

(收稿日期: 2010-01-10)

(上接第 23 页)

大于文献 [7] 中的结果 0.029, 原因是此方法是在全网原数据、发电机模型未经任何简化时求得, 仿真模型更精细, 更能充分显示系统的动态本质。

## 4 结论

大规模区域互联电网低频振荡分析, 最重要、最困难的工作是区域间主导低频振荡模式的求解问题。四机两区域算例研究表明, 低频振荡模式由系统的固有结构特性和运行方式决定, 发电机模型的详细与简单不改变振荡模式的频率, 励磁系统模型和负荷特性对阻尼影响较大, 并且因其移相作用可能引起区域间模式个别机组的振荡相位少许改变, 但本地模式模态基本不变。因此, 大规模电力系统低频振荡分析可采用文中思路, 先在经典二阶模型、负荷恒阻抗模型下得到区域间低频振荡模式的频率、强相关机组、模态等基本特征信息。然后, 采用详细模型, 在强相关机组的暂态稳定功角曲线上实施检测, 获得合理真实阻尼以及时域特性。大区联网后全国系统低频振荡分析验证了该方法的有效性和准确性。

## 参考文献

- [1] 周双喜, 苏小林. 电力系统小干扰稳定性研究的新进展 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(2): 1-8.
- [2] 邓集祥, 涂进, 陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别 [J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36-41.
- [3] 白洋, 邓集祥. 区域电网低频振荡模式的检测方法 [J]. 四川电力技术, 2009, 32(5): 71-74.
- [4] 董航, 刘涤尘, 邹江峰. 基于 prony 算法的电力系统低频振荡分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 97-100.
- [5] 邓集祥, 欧小高, 姚天亮. 基于小波能量系数的主导低频振荡模式的检测 [J]. 电工技术学报, 2009, (8): 141-146.
- [6] P. Kundur. Power system stability and control [M]. McGraw-Hill. New York, 1994.
- [7] 邓集祥, 贺建明, 姚天亮, 等. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(17): 78-83.

### 作者简介:

姚天亮 (1979-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统运行分析与稳定控制。

(收稿日期: 2010-02-10)