

区域电网低频振荡主导模式的检测方法

白 洋¹, 邓集祥²

(1 新疆电力设计院, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2 东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘 要:提出了一种基于实测的功角曲线检测区域间低频振荡模式的新方法, 这种方法能有效检测出互联系统的区域间主导低频振荡模式, 因此可以对扰动下的系统进行有效的分析。大系统算例结果表明, 所提方法能准确的检测识别出系统主导区域间低频振荡模式, 其结果与综合稳定程序 (PSASP) 计算出的结果一致, 从而验证了所提新方法的正确性和有效性。

关键词: 低频振荡; 功角曲线; 主导低频振荡模式

Abstract: Based on the measured power angle curve, a new method of detecting inter-regional low-frequency oscillation (LFO) mode is presented. It can effectively detect inter-regional LFO mode, so the power system with disturbance can be effectively analyzed. The results of large power grids show that the proposed method can accurately identify the dominant mode of inter-regional LFO, they are the same as the result that is calculated by PSASP, thereby the proposed method proved to be correct and effective.

Key words: low-frequency oscillation; power angle curve; dominant low-frequency oscillation modes

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0071-07

0 前 言

为了提高发电和输电的可靠性与经济性, 大电网互联已成为必然的趋势。目前, 中国已经形成了 7 个跨省电网, 这必然使系统的稳定性问题变得更加突出。大区电网的弱连接会严重降低系统间的阻尼, 使区域间低频振荡模式成为影响系统稳定的关键因素^[1~3]。

一个稳定的系统首先应该是在小干扰稳定的, 而小干扰下, 弱阻尼低频振荡模式是影响系统稳定的主要因素^[4], 区域间低频振荡模式有时表现为弱阻尼模式, 当区域间模式即为弱阻尼模式时, 应予以足够的重视。区域间模式往往表现为一个区域的发电机群对另一区域的其他发电机群之间的摇摆, 由于系统阻尼较小, 振荡时间较长, 所以对系统稳定性威胁较大, 若抑制此模式, 就需要找出相关的发电机, 并在其上装设 PSS^[5]。

现阶段计算系统特征根的方法主要是应用 QR 法求出系统的全部特征根, 然后找出弱阻尼模式和相关发电机, 但 QR 法工作量大且丢根严重。PSASP 提供了基于稀疏的系统增广矩阵 J 的特征值算法 (迭代转 Rayleigh 商迭代法), 此法可以求解出所关心的

部分特征值和特征向量, 但需按虚部划分特征值搜索区间, 这样使工作量变大, 效率降低, 也不能解决丢根的问题^[6]。准确有效地找出小干扰下的区域间主导低频振荡模式及其相关发电机成为了电网互联后亟需解决的问题。

系统受扰动后, 发电机的功角曲线中含有丰富的系统动态特征信息^[7], 发电机的功角 δ 反映了发电机转子的相对运动, 是进行发电机稳定分析的重要数据。应用 EMD 分解和连续小波变换的方法可以对系统的主导模式进行鉴别, 可以从功角曲线中提取出振荡的频率、衰减等信息^[8]。不同的故障情况下, 在不同的功角曲线所提取的主导振荡模式也不相同, 因此, 可以在特殊的地点施加扰动, 激发出小干扰下的主导低频振荡模式。此外, 如何激发并检测到主导模式外的其他模式也是有实际意义的问题。

基于实测的功角曲线提出了一种小干扰下区域间主导低频振荡模式及其相关发电机的检测方法, 该方法计算量少、实用、有效, 且适用于任何复杂的电力系统, 分析大区域电网低频振荡时更具优越性。应用本方法, 准确的检测到了 8 机 36 结点系统主导低频振荡模式, 并通过与正则物理理论研究低频振荡模式间的非线性相关作用的结果相比较, 得到了相同的结果, 从而验证了所提新方法的正确性和检测识别大于

扰下主导低频振荡模式的有效性。

1 低频振荡的产生机理

对于单机无穷大系统,发电机采用二阶模型时,转子运动方程为

$$\begin{cases} M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - 1) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_e = \frac{E'U}{X_s} \sin\delta_0$

在工作点处线性化,并忽略 P_m 的变化,则

$$\begin{cases} M \frac{d\Delta\omega}{dt} = -K\Delta\delta - D\Delta\omega \\ \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega \end{cases} \quad (2)$$

$K = \frac{E'U}{X_s} \cos\delta_0$ 为同步力矩系数。求得 (2) 式的特征根为

$$p_{1,2} = \frac{-D \pm \sqrt{D^2 - 4MK}}{2M} = \alpha \pm j\beta \quad (3)$$

由式 (3) 可知,当 X_s 较大时, K 较小,振荡频率比较低,这表明机组间电气距离较大时相应的机组间振荡频率较低^[9]。因此,当两台机组的电气距离较大且容量相差很多时,在这两台发电机的功角曲线上易检测到小干扰下的区域间主导低频振荡模式。

2 小干扰下区域间主导低频振荡模式的检测

在此基础上提出了一种检测小干扰下区域间主导低频振荡模式的方法。

(1) 假设有 A、B 两区域,在 A 区选定一台机组 P_n 小的发电机 A,在 B 区选定一台相对 A 机机组 P_n 大的发电机 B; A、B 两机组的电气距离应尽可能大。

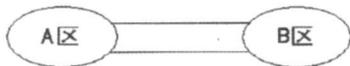


图 1 2 区域系统

(2) 在 A 机附近施加一小扰动 (一般为持续时间 0.01 s 的三相瞬时短路)。

(3) 在功角曲线 δ_{AB} 上检测到的主导模式即为该区域间主导低频振荡模式。

3 算例分析

以电力系统分析软件包中的 8 机系统和四川电网数据为算例。

3.1 8 机系统

3.1.1 模式的检测

8 机系统参数来自文献 [6], 系统拓扑图如图 2。

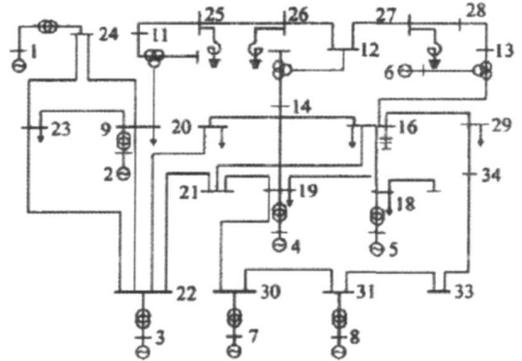


图 2 8 机系统

小干扰下,实部离虚轴最近的模式为主导低频振荡模式,而大干扰下,其中被激励得最强、作用最大的为主导低频振荡模式。采用 QR 法求出 $\min |\alpha_i|$ 对应的模式及其相关发电机。

表 1 系统主导低频振荡模式

模式	频率 / Hz	衰减阻尼比 / %
$-0.05487 \pm j 885.371$	0.777531	1.1231

8 机系统存在 7 对低频振荡模式,结果表明, $\lambda = -0.054870 + j 885.371$ 为系统的主导低频振荡模式,其振荡频率是 0.777531 Hz 衰减阻尼比是 0.0123,阻尼相当弱;从模态图中可以明显看出该模式为小干扰下区域间振荡模式,参与此模式的机组主要有

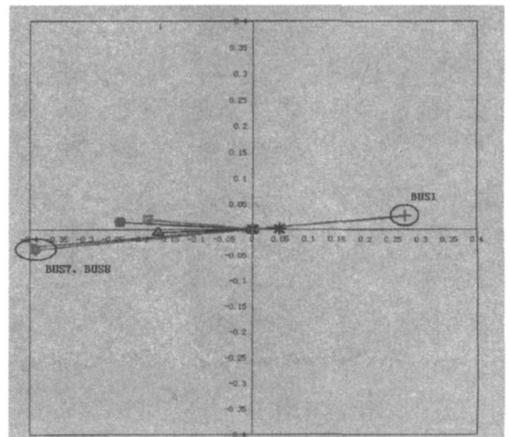


图 3 特征值 $-0.054870 \pm j 885.371$ 的模态图

1、8、7号发电机, 1区(1号机)相对3区(7、8号机)振荡, 振荡角度为 180° 。

从图 2 可以看出, G1 相对于 G7、G8 的电气距离较大, 在综合稳定程序中, 电气距离为标么值。

其中 G1、G8 间 $X_{\Sigma 18} = 1.4804$ 为最大; G1、G7 间 $X_{\Sigma 17} = 1.4803$; G1、G4 间 $X_{\Sigma 14} = 1.2433$ 。

表 2 8 机系统各机容量

发电机	G1	G4	G7	G8
P_n	1500	220	250	340
所属区域	1	2	3	3

由表 2 可知, P_n 远大于 P_{n4} 、 P_{n7} 、 P_{n8} , P_{n1} 比 P_{n8} 大 1160, 为 P_{n8} 的 4.4 倍。

在 G8 出口变压器高压侧施加持续时间为 0.01 s 的小扰动, 得到功角曲线 δ_{18} 。

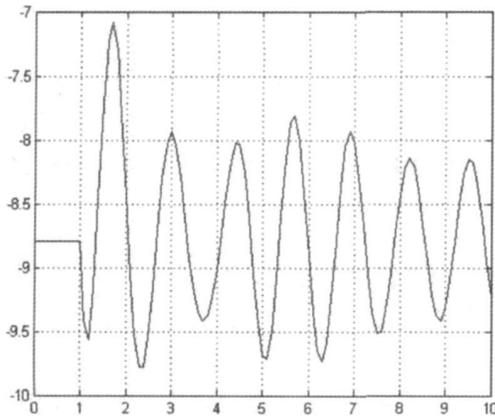


图 4 功角曲线 δ_{18}

对功角曲线 δ_{18} 的分析结果如表 3。

表 3 δ_{18} 的分析结果

模式	衰减阻尼比 /%	频率 /Hz	小波能量系数
1	1.2573	0.7725	2.8265
2	0.9574	0.9837	0.856315

可见, 频率为 0.7725 Hz 的模式对应的能量最大, 该模式在功角曲线中占主要成分, 主导 1 号机相对 8 号机的功角振荡特性。

从前面的分析可知, $f=0.7725$ Hz 的模式为小干扰下区域间主导低频振荡模式, 与在功角曲线 δ_{18} 上检测到的主振模式相同。这说明在特定的扰动下, 可以通过特殊机组间的功角曲线检测到小干扰下区域间主导低频振荡模式。

G1、G7 间电气距离也较大, 在 G7 出口变压器高压侧施加持续时间为 0.01 s 的小扰动。

对功角曲线 δ_{17} 分析, 可知频率为 0.7764 Hz 的模式对应的能量最大, 该模式在功角曲线 δ_{17} 中占主要成分, 因此, 在功角曲线 δ_{17} 中也可检测到。

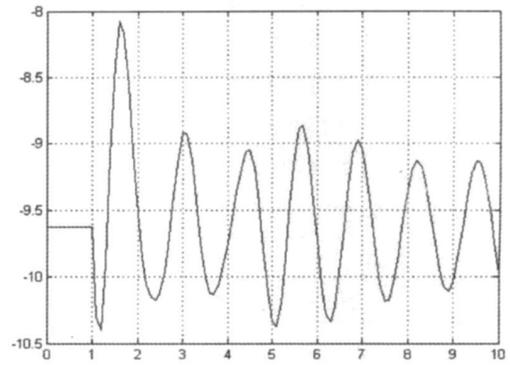


图 5 功角曲线

表 4 δ_{17} 的分析结果

模式	衰减阻尼比 /%	频率 /Hz	小波能量系数
1	1.5843	0.7764	1.13
2	1.1925	1.186	0.6281

用同样的方法对 4 号机施加扰动, 可在功角曲线 δ_{14} 中激发出该小干扰下区域间主导低频振荡模式。

3.1.2 算例结果再分析

前面分析可知, 与 $f=0.777531$ Hz 的模式相关的发电机为 1、8、7 号机。在 1 号机出口变压器高压侧施加小扰动时, 可以在功角曲线 δ_{14} 、 δ_{16} 、 δ_{17} 、 δ_{18} 上检测到于区间模式 0.777531 Hz 非常接近的低频振荡模式, 而且该模式在这些曲线中均占主要成分; 在 δ_{13} 、 δ_{15} 上也可检测到 $f=0.777531$ Hz 的模式, 但该模式在这两条曲线上不是主导模式; 在 δ_{12} 上检测不到这个区间模式。所以, 1 号机与其他大多数 (约 86%) 发电机的功角曲线上都能检测到 $f=0.777531$ Hz 的模式, 可判断 1 号机是该模式下的强相关发电机。

可以得出结论, 在某扰动下, 若机组 A 号与其他大多数机组的功角曲线上都能检测到模式, 则机组 A 号是某一模式的强相关发电机。需要说明的是, 大量算例表明, 在小系统中, 其他大多数的发电机为 80% 以上的发电机; 在百台机组的大系统中, 其他大多数的发电机为 65% 以上的发电机。

功角曲线 δ_{18} 、 δ_{28} 、 δ_{38} 、 δ_{48} 、 δ_{58} 、 δ_{68} 、 δ_{78} 上都能检测到 $f=0.777531$ Hz 的模式, 所以 8 号机是该模式的强相关发电机; 同样的方法也可以判断 7 号机也是该区间模式的强相关发电机。

在 8 号机附近施加扰动时, 在另一区域中与 1 号机电气距离最近的 4 号机 ($X_{\Sigma} = 0.2371$) 功角曲线 δ_{18} 上可以检测到模式 6, 它在 δ_{18} 中的能量系数最大; 在 7 号机附近施加扰动时, 在 δ_{18} 上可以检测到模式

3; 在 6 号机附近施加扰动时, 在 δ_{6_6} 上可以检测到模式 1; 在 5 号机附近施加扰动时, 在 δ_{8_8} 上可以检测到模式 5; 在 4 号机附近施加扰动时, 在 δ_{8_8} 上也可以检测到模式 5; 在 3 号机附近施加扰动时, 在 δ_{8_4} 上可以检测到模式 2; 在 2 号机附近施加扰动时, 在 δ_{2_4} 上可以检测到模式 4; 在 1 号机附近施加扰动时, 在 δ_{4_4} 上可以检测到模式 7。

表 5 8 机系统模式表

序号	模式	频率 /Hz	衰减阻尼比 /%
1	$-5.781522 \pm j14.485227$	2.305396	37.0696
2	$-0.792395 \pm j11.473279$	1.826029	6.89
3	$-0.911462 \pm j10.348605$	1.647032	8.7736
4	$-0.617969 \pm j7.859373$	1.250858	7.8386
5	$-0.673874 \pm j7.157278$	1.139116	9.3738
6	$-0.268055 \pm j6.158588$	0.98017	4.3484
7	$-0.054870 \pm j4.885371$	0.777531	1.1231

因此, 对系统施加特殊的扰动, 可以激发出系统的全部模式。

3.2 四川电网

大规模电力系统中, 尤其在长条形结构的弱互联电网中, 低频振荡问题尤为严重。

四川电网南北比较狭长, 有 145 台本地机组, 大多数为水电机组, 最南端的二滩机组与最北端的黑河塘距离在 1 000 km 以上。

2001 年 8 月至今, 四川二滩水电站的 6 台 550 MW 机组向川渝和华中电网送电的运行中多次发生低频振荡现象。研究表明, 这是在一定条件下, 重负荷、长距离输电造成的, 二滩向川渝和华中输电需经过 1 100 多公里的 3 回 500 kV 输电通道 [10]。

二滩 01 号 ($P_n = 550$ MW) 在攀枝花地区, 黑河塘 81 ($P_n = 80$ MW) 在川西北地区; 两机组距离很远。

Prony 方法可以直接求出各振荡模式的幅值、频率、与衰减因子; 基于 Prony 方法计算模式的能量系数易于实现, 适合在工程实际中应用 [10]。

1 s 时在黑河塘 81 出口变压器附近施加小扰动, 1.01 s 故障消失, 得到相应功角曲线。

在黑河塘 81~二滩 01 号机功角曲线上用 Prony 分析法检测出曲线中的主要振荡模式见表 6。

表 6 黑河塘 81~二滩 01 号机功角曲线分析结果

模式	幅值	阻尼	振荡频率 /Hz	能量系数
1	140.95	-5.218	1.104	8300.84
2	0.39	-0.394	0.811	0.51

从表 6 可以看出, 黑河塘 81~二滩 01 号机功角曲线的主导模式频率为 1.104 Hz

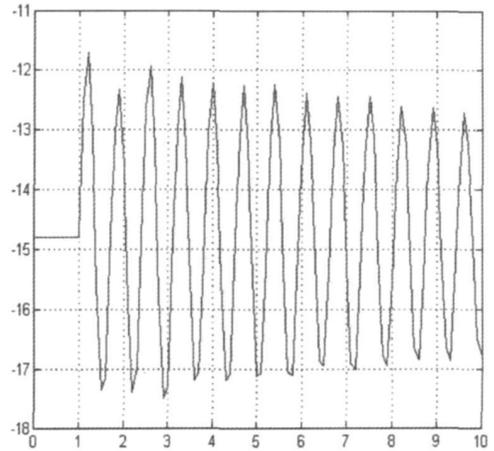


图 6 黑河塘 81~二滩 01 号机功角曲线

在文献 [11] 中, 四川本地小区域间主导低频振荡模式是 $\lambda = -0.0713 \pm j6.927$, 振荡频率是 1.102 Hz 而且阻尼很弱。

由图 7 可知, 振荡是川西水电 (冷竹关、小关子) 相对川西北水电 (自一里) 机群的振荡。其中, 川小沟头 8、川小关子、川冷竹关相对川自一里、川水牛家振荡方向基本成 180° 。

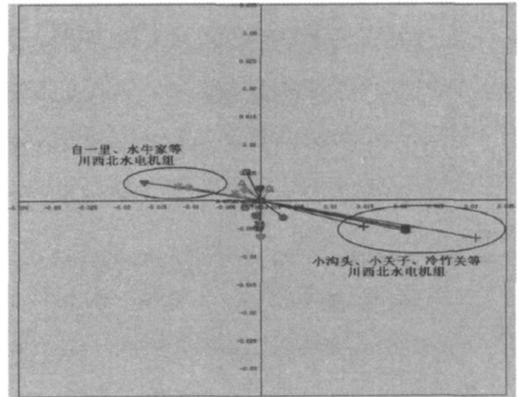


图 7 特征值 $-0.0713 \pm j6.927$ 的模态图

与这个模式相关性最强的是: 川小沟头, 然后依次是川小关子、川冷竹关、川自一里。

表 7 模式的特征向量表

特征值: $-0.0713 \pm j6.927$			
母线名	实部	虚部	相关因子
川小沟头 8	0.008933	-0.010573	0.094875
川小关子 81	0.004909	-0.004379	0.041826
川小关子 82	0.004909	-0.004379	0.041826
川冷竹关 02 号	-0.008909	-0.010573	0.038751
川冷竹关 03 号	-0.008909	-0.010573	0.038751
川冷竹关 01 号	-0.008909	-0.010573	0.038751
川自一里 01 号	-0.005422	0.001886	0.023766
川自一里 02 号	-0.005422	0.001886	0.023766

(下转第 82 页)

⑤ 接地电阻测试应在接地模块吸湿 72 h 后进行;

⑥ 实测接地电阻不合格时,可采取增加接地模块的方法,在已敷设好的接地装置上补接接地模块直至合格为止。

4 总 结

综上所述,接地模块作为近年来出现的一种特殊结构的长效物理降阻剂,对于位于山区或城市规划区等复杂地形和缺水地区的塔位,接地模块的使用可有效降低接地工频电阻,同时具有耐腐蚀、无污染、运输

和施工简单、使用寿命长的鲜明特点。

参考文献

- [1] 东北电力设计院编. 电力工程高压架空送电线路设计手册 (第二版) [S]. 1999.
- [2] DL/T 621—1997, 交流电气装置的接地 [S].
- [3] DL/T 5092—1999, 110~500kV 架空送电线路设计技术规程 [S].

作者简介:

徐宏宇 (1972—), 工程师, 从事高压送电线路设计。

(收稿日期: 2009—03—05)

(上接第 74 页)

检测川小沟头 8 与其他所有发电机的功角曲线, 78% 的功角曲线都能检测到频率为 1.104 Hz 的模式, 川小沟头 8 只与 32 台发电机的功角曲线上检测不到这个模式。

其他相关性强的发电机, 如川小关子、川冷竹关、川自一里与其他所有发电机的功角曲线, 也有 65% 以上的能检测到这个模式。

川水牛家 ($P_n = 35 \text{ MW}$) 出口变压器附近施加小扰动时, 在它与二滩 01 ($P_n = 550 \text{ MW}$) 的功角曲线上也能检测到 1.104 Hz 的模式, 且能量最大。

应用的方法检测小干扰下的主导低频振荡模式可以得到与文献 [10] 一致的结果, 从而验证了所提方法在研究主导低频振荡模式对系统动态特性和稳定性问题上的正确性。

4 结 论

(1) 提出了一种新的检测小干扰下区域间主导低频振荡模式及其相关发电机方法, 所提方法可有效用于电力系统仿真曲线研究主导低频振荡模式中, 也可用于实际的功角曲线。所提出的方法, 无需对全网进行计算, 只获取系统的功角振荡波形, 算例结果表明, 所提方法有着较高的准确性, 且计算量小, 为实际系统的检测提供了有效途径。

(2) 对中国电力科学院 8 机 36 节点系统进行研究, 发现并不是在所有功角曲线都能, 而且任一条功角振荡曲线也不能检测到所有模式; 在特定故障下, 可以在特定的功角曲线上检测到小干扰下区域间主导低频振荡模, 此模式外, 还存在其它模式, 这些模式在系统振荡中虽然未能起主导作用, 但可以在某些条件下被

强烈激发出来, 也可以在特定的振荡曲线上检测到这些模式。

参考文献

- [1] 吴敬儒, 徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景 [J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1—4.
- [2] 郑宝森, 郭日彩. 中国互联电网的发展 [J]. 电网技术, 2003, 27(2): 1—3.
- [3] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱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.
- [4] 邓集祥, 华瑶, 韩雪飞. 大干扰稳定中低频振荡模式的作用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 60—64.
- [5] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国, 等. 电力系统低频振荡机理的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 21—25.
- [6] 中国电力科学研究院, 《电力系统分析综合程序》(PSASP6.24) 用户手册 [Z].
- [7] 穆钢, 王宇庭, 安军, 等. 根据受扰轨迹识别电力系统主要振荡模式的信号能量法 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 7—11.
- [8] 邓集祥, 欧小高, 姚天亮. 基于小波能量系数的电力系统主导低频振荡模式的检测 [J]. 电工技术学报. (已录用)
- [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.
- [10] 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.
- [11] 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:

白 洋 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析;

邓集祥 (1947—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009—06—10)