

利用联络线功率相对相位判定低频振荡模式

武诚, 徐政, 张静

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

Low Frequency Oscillation Mode Determination Based on Relative Phases of the Tie-line Active Powers

WU Cheng, XU Zheng, ZHANG Jing

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: This paper proposed a new algorithm to perform the online determination of the low frequency oscillation modes in large interconnected power system. First, the generator's active power and its speed deviation were represented in the form of generalized phasor and the relationship between their phase angles was deduced. Then a simple system was constructed to illustrate the correlations between the power oscillation flows in the tie lines and the low frequency oscillation modes. Theoretical analysis indicates that different oscillation modes correspond to different phase angle combinations, and vice versa. The small signal stability of the SE Australian power system was analyzed by PSS/E. The analysis reveals that both of the operating point and the degree of detail in modeling has essentially no effect on the corresponding relationship between oscillation modes and phase angle combinations. Finally the procedure to use the algorithm in practical power system was given, and it was applied to the Eastern China power grid. Results indicate that the algorithm proposed by this paper is able to determine the low frequency oscillation modes online and is helpful for the monitoring of low frequency oscillation.

KEY WORDS: power oscillation flow; tie line; low frequency oscillation mode; relative phase; operating point; modeling deepness; Eastern China power grid

摘要: 提出一种在线判定大规模电力系统低频振荡模式的新方法。将发电机的有功功率与转速表示为广义相量的形式, 推导了两者相位之间的关系, 通过一个简单算例阐明了联络线功率振荡增量的相对相位与振荡模式之间的关系, 指出不同的振荡模式对应着不同的相位组合, 从而可以通过考察相位组合来判定振荡模式。利用 PSS/E 分析澳大利亚东南部

电力系统的小信号稳定性, 验证了相位组合与模式之间的对应关系不随工况与模型详细程度而变化。给出了在实际系统中使用本方法的步骤, 并对华东电网进行了验算。结果表明, 所提出的方法能够在线判定低频振荡模式, 对大规模电力系统低频振荡的监测是有价值的。

关键词: 功率振荡增量; 联络线; 低频振荡模式; 相对相位; 工况; 模型详细程度; 华东电网

0 引言

世界电力工业的发展趋势是将区域电网互联形成大规模电力系统, 这样可以实现大范围的资源优化配置、减少备用容量、产生错峰效应、故障情况下紧急功率支援等, 然而, 电网互联也会带来一些问题, 低频振荡就是其中之一。低频振荡限制了联络线输送的功率, 并可能导致系统在故障后由于阻尼不足而振荡失步。迄今为止, 我国的电力系统已经发生过多次低频振荡^[1-3]。

抑制低频振荡的首选措施是在发电机组上安装整定良好的电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)^[4], 以及利用HVDC和各种FACTS设备的附加阻尼功能^[5-7]; 而实际运行中发生低频振荡时, 一般采取送端少发电、受端多发电来减小联络线上传输的功率, 从而平息振荡。无论采用何种措施, 都应该确定当前振荡模式下的强相关机组。通常, 大规模电力系统存在多个振荡模式, 不同模式对应的强相关机组不同。离线计算时, 可以通过比较各发电机的参与因子确定强相关机组。实际运行中可以有2种方法, 一是通过广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)找出功率振荡剧烈的机组, 然而, 目前我国各大区域电网中, PMU的总数比较少, 一般仅安装在枢纽变电站及部分重要

基金项目: 国家“十一五”重点科技攻关项目(2006BAA02A17)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China(2006BAA02A17).

电厂中^[8-11]，通过WAMS确定全部强相关机组有一定困难。另一种就是首先确定振荡的模式，然后对照离线计算的结果判定强相关机组，不过此方法也存在着不足。目前，对低频振荡的在线检测通常只辨识阻尼、频率^[12-13]。即使是同一个模式，在不同的工况下，阻尼、频率也不相同，甚至可能变化很大。通过这 2 个量不能可靠确定振荡模式。

本文提出了通过考察联络线的功率振荡增量^[14]的相对相位以确定振荡模式的方法。通过对两算例的研究，阐明了该方法的原理，分析了工况、模型详细程度等因素对结果的影响，最后针对华东电网应用并验证了本文提出的方法。

1 联络线功率振荡增量的相位与模式的对应关系

发电机的转子运动方程可以写为

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0(\omega - 1) \quad (1)$$

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D\omega \quad (2)$$

若机械功率 P_m 保持不变，且忽略阻尼系数 D ，对式(2)线性化得

$$T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = -\Delta P_e \quad (3)$$

由文献[15]可知，在某个机电振荡模式($\lambda_k = \sigma_k + j\omega_k$)下，式(3)可以写为广义相量的形式，即

$$\Delta \tilde{P}_e = -T_J(\sigma_k + j\omega_k)\Delta \tilde{\omega} \quad (4)$$

式中： $\Delta \tilde{P}_e$ 为功率振荡增量； $\Delta \tilde{\omega}$ 为转速增量。2台不同发电机 m 、 n 的电功率做比较时，有

$$\frac{\Delta \tilde{P}_{e,m}}{\Delta \tilde{P}_{e,n}} = \frac{-T_{J,m}(\sigma_k + j\omega_k)\Delta \tilde{\omega}_m}{-T_{J,n}(\sigma_k + j\omega_k)\Delta \tilde{\omega}_n} = \frac{T_{J,m}\Delta \tilde{\omega}_m}{T_{J,n}\Delta \tilde{\omega}_n} \quad (5)$$

根据文献[15]，转速增量的比值等于右特征向量中转速对应项的比值。若 2 台发电机是同调的(转速项同相)，它们的转速增量也是同相的；若 2 台发电机是逆反的(转速项反相)，它们的转速增量也是反相的，而惯性时间常数 T_J 是一个正实数，它对相位没有影响，因此发电机之间的功率振荡增量是同相还是反相取决于它们转速项的相位。

低频振荡分析中，2 条或多条区域联络线功率振荡增量的相位的相对关系(以下简称联络线功率的相对相位)，可以用图 1 所示的一个简单的 3 机系统来说明。

考虑自母线 1 注入线路 1-2 的功率 P_{12} ，以及自母线 2 注入线路 2-3 的功率 P_{23} 。当忽略所有线路的

电阻时，有

$$P_{23} = P_{12} + P_{G2} \quad (6)$$

线性化并改写为广义相量的形式，得

$$\Delta \tilde{P}_{23} = \Delta \tilde{P}_{12} + \Delta \tilde{P}_{G2} \quad (7)$$

另外

$$\Delta \tilde{P}_{G1} = \Delta \tilde{P}_{12} \quad (8)$$

$$\Delta \tilde{P}_{G3} = -\Delta \tilde{P}_{23} \quad (9)$$

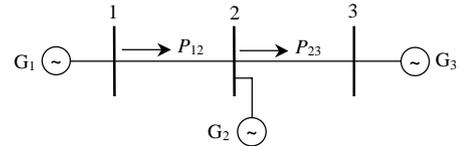


图 1 3 机示例系统

Fig. 1 A simple three-machine system

若该系统存在 G_1 、 G_2 相对于 G_3 的模式，由式(5)可知，在功率上体现为 $\Delta \tilde{P}_{G1}$ 、 $\Delta \tilde{P}_{G2}$ 同相，而与 $\Delta \tilde{P}_{G3}$ 反相。再结合式(7)、(8)，可知 $\Delta \tilde{P}_{12}$ 与 $\Delta \tilde{P}_{23}$ 同相。

类似地，若存在 $G1$ 、 $G3$ 相对于 $G2$ 的模式，在功率上体现为 $\Delta \tilde{P}_{G1}$ 、 $\Delta \tilde{P}_{G3}$ 同相，而与 $\Delta \tilde{P}_{G2}$ 反相。再结合式(8)、(9)，可知 $\Delta \tilde{P}_{12}$ 与 $\Delta \tilde{P}_{23}$ 反相。

因此，对于同一个系统，不同模式下联络线功率的相对相位是不同的；反之，通过观察若干条联络线功率的相对相位，可以判定振荡属于哪一个模式，下文中对华东电网的分析将证实这一点。通常，可以选定某条联络线作为参考，则 m 条联络线上总共可能出现的相位组合有 2^{m-1} 种。若系统存在着 n 个区域间模式，则仅当 $2^{m-1} \geq n$ 时，才有可能利用相位信息唯一判定振荡模式。

上述结论也可以推广到实际的电力系统。此时，图 1 中每台发电机都代表了一组同调的机群，发电机之间的振荡代表了不同区域的机组之间的振荡，而线路则代表了区域间的联络线。

2 工况及模型详细程度的影响

通过对一个算例进行分析来验证前文得到的结论，并考察工况、模型详细程度等因素对结果的影响。该算例是澳大利亚东南部电力系统的精简，由阿德莱德大学提出。图 2 给出了该系统的示意图，联络线两端的母线也一起画出，并采用原潮流数据中的编号。

由图 2 可见，这是一个长条状的电力系统，容易发生区域间的低频振荡。该算例包括 6 种工况，本文选取了其中 3 个，分别称作工况 1、2、3。

首先，将所有发电机用经典模型表示，负荷全部转换为恒阻抗。PSS/E 分析显示，不论在何种工况

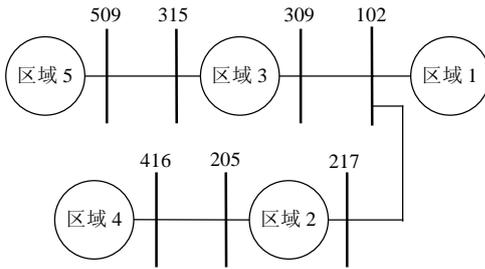


图2 澳大利亚东南部电力系统示意图

Fig. 2 Schematics of the SE Australian power system

下,系统均存在3个区域间模式a、b、c,表现为:

1) 模式a.区域2、5的机组同相,相对于区域3机组的振荡。其中在工况3的情况下,区域5的参与程度较低。

2) 模式b.区域4、5的机组同相,相对于区域2机组的振荡。

3) 模式c.区域3、5的机组同相,相对于区域4机组的振荡。其中在工况2的情况下,区域5的参与程度较低。

考察联络线315-509、102-309及205-416,并将102-309功率的相位作为基准。计算3种工况下,各联络线功率的相对相位,列于表1中。

表1 发电机采用经典模型时联络线功率的相对相位
Tab. 1 Phase of the active power in the tie-lines when generators are represented by classic model

工况	模式	联络线功率的相对相位/(°)		
		315-509	102-309	205-416
1	a	180	0	0
	b	0	0	0
	c	0	0	180
2	a	180	0	0
	b	0	0	0
	c	0	0	180
3	a	180	0	0
	b	0	0	0
	c	0	0	180

由表1可见,在一定的工况下,不同的模式对应的联络线功率的相对相位是不同的,这验证了前文所提出的观点;另一方面,每种模式下联络线功率的相对相位,不随工况的改变而改变。

然后,将发电机改用详细模型表示,考虑励磁系统,但不包括原动机-调速器以及PSS,负荷全部转换为恒阻抗。PSS/E分析显示区域间模式与经典模型时相同,仍旧考察315-509、102-309及205-416这三条联络线,结果列于表2中。

此时,联络线功率的相对相位不再是严格的0°或180°,但是从定性的角度来说,表2所得的结果与表1是相符合的。

表2 发电机采用详细模型时联络线功率的相对相位
Tab. 2 Phase of the active power in the tie-lines when generators are represented by detailed model

工况	模式	频率/Hz	联络线功率的相对相位/(°)		
			315-509	102-309	205-416
1	a	0.73	-167.4	0	7.4
	b	0.57	20.1	0	2.7
	c	0.44	8.4	0	179.2
2	a	0.63	-160.4	0	1.8
	b	0.49	0.7	0	-28.3
	c	0.34	-3.9	0	177.4
3	a	0.75	177.3	0	5.1
	b	0.56	21.6	0	19.3
	c	0.41	1.9	0	175.2

另外,从表2可知,同一个模式当工况不同时,其振荡频率也不相同,若仅通过频率信息判定振荡模式,可能导致错误的结果。假定,某一次各联络线上均检测到了0.47 Hz的低频振荡。考虑到存在各种干扰与噪声,在线辨识有一定的误差,这个模式可能是工况1下的模式c,也可能是工况2下的模式b。若振荡模式不能确定,就没有办法采取针对性的措施,而通过辨识联络线功率的相对相位,不仅可以唯一确定模式,而且对辨识的精度要求不高,只需要定性的结果就可以作出判断。

3 华东电网算例分析

通过辨识联络线功率的相对相位来确定振荡模式的方法,应用于实际时,可以依照下列步骤进行:

1) 发电机用经典模型表示,负荷都转换为恒阻抗。计算区域间振荡模式,并计算每一个模式对应的相位组合。

2) 当系统发生低频振荡时,利用Prony或(estimation of signal parameters via rotational invariance techniques, ESPRIT)方法对多条联络线上的功率信号同时进行辨识,将每一种振荡模式提取出来。每一种振荡模式对应一个相位组合,再逐一与离线计算的结果相对照,如果符合就认为发生了此种模式的振荡;如果不符合就认为此模式是虚假的(Prony方法定阶不当就会导致虚假模式)。

以华东电网2020年规划数据为例,说明上述方法。首先进行步骤1)的计算。PSS/E分析表明,华东电网存在3个区域间模式,表现为:1)安徽对江苏;2)浙江对江苏、福建;3)福建对江苏、安徽。

考察安徽-江苏、安徽-浙江、江苏-浙江、浙江-福建共计6条区域间联络线,结果列于表3中。

**表 3 华东电网发电机采用经典模型时
联络线功率的相对相位**
**Tab. 3 Phase of the active power in the tie-lines
when generators in East China power grid are
represented by classic model**

模式	联络线功率的相对相位/(°)					
	安徽- 江苏 1	安徽- 江苏 2	安徽- 浙江 1	安徽- 浙江 2	江苏- 浙江	浙江- 福建
1)	0	0	0	0	180	180
2)	180	180	0	0	0	180
3)	180	180	0	0	0	0

然后，将发电机用详细模型表示并计及励磁系统，分别以安徽淮北二厂、浙江燃机、福建后石机组为扰动施加地点，将其励磁系统的参考电压提高 10%，0.1 s 后恢复原值，辨识时域仿真得到的结果，列于表 4 中。

将表 4 与表 3 对照，初步判定这 3 次扰动分别激发了安徽对江苏，浙江对江苏、福建，福建对江苏、安徽的振荡模式。为了进一步验证，又按照发电机采用经典模型时计算出的参与因子的顺序，辨识了位于相关省份的若干台机组有功功率的相位，列于表 5 中。

表 4 分别扰动 3 台发电机时联络线功率的相对相位
**Tab. 4 Phase of the active power in the tie-lines
when three generators are disturbed**

扰动施 加地点	联络线功率的相对相位/(°)					
	安徽- 江苏 1	安徽- 江苏 2	安徽- 浙江 1	安徽- 浙江 2	江苏- 浙江	浙江- 福建
安徽淮北二厂	0	4.2	8.1	13.7	-173.0	-171.4
浙江燃机	-171.7	-166.9	-5.9	-3.3	0	-167.5
福建后石	179.3	-179.5	2.1	19.5	2.2	0

表 5 相关机组的有功功率的相位

Tab. 5 Phase of the active power of generators concerned

扰动施 加地点	机组有功功率的相位/(°)					
	淮北二厂 (安徽)	平圩 (安徽)	淮南坑 口 1(安徽)	田湾 (江苏)	隋北燃 机(江苏)	陈家港 (江苏)
安徽 淮北二厂	0	0.8	0.8	168.1	175.2	167.5
浙江 燃机	浙江燃 机(浙江)	鹰龙山 (浙江)	余庆 (浙江)	田湾 (江苏)	隋北燃 机(江苏)	后石 (福建)
	8.4	6.0	0	-176.6	-171.9	-170.2
福建 后石	后石 (福建)	惠安核电 (福建)	莆田燃 机(福建)	田湾 (江苏)	隋北燃 机(江苏)	陈家港 (江苏)
	0	3.6	9.9	-171.6	-177.6	-171.6

由表 5 的数据可见，这 3 个模式确实是安徽对江苏，浙江对江苏、福建以及福建对江苏、安徽，从而，通过辨识联络线功率的相对相位来确定振荡模式的方法是合理的。

4 结论

本文提出了通过考察联络线的功率振荡增量

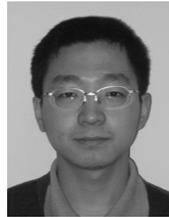
的相对相位以确定振荡模式的方法。对两算例的研究表明，不同的模式下，联络线功率的相位有着不同的组合；无论是工况还是模型的详细程度，对于结果都没有大的影响。以华东电网为例，给出了本方法的应用步骤，指出可以通过将时域辨识结果与事先计算好的结果相对照，以确定振荡模式。

应当指出，在满足最小数目的前提下，本文任意选择了待研究的联络线，这样会带来一些问题。例如，由表 3 可见，若浙江至福建的联络线的相位辨识不准，则可能混淆浙江对江苏、福建模式和福建对江苏、安徽模式。是否存在更好的组合方案以及如何确定，将是下一步需要研究的问题。

参考文献

- [1] 吴彤, 涂光瑜, 康健. 湖北鄂西电网低频振荡抑制及 PSS 试验研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(4): 1-4, 45.
Wu Tong, Tu Guangyu, Kang Jian. Low-frequency oscillation suppression in power network of west Hubei and PSS test [J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(4): 1-4, 45(in Chinese).
- [2] 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).
- [3] 史洪德, 范维维. 二滩水电站 PSS 对抑制系统低频振荡的作用[J]. 水力发电, 2000(5): 20-23.
Shi Hongde, Fan Weiwei. The inhibition function of PSS on the low frequency system oscillation in Ertan Hydro Station[J]. Water Power, 2000(5): 20-23(in Chinese).
- [4] 朱方, 赵红光, 刘增煌, 等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1-7.
Zhu Fang, Zhao Hongguang, Liu Zenghuang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 1-7(in Chinese).
- [5] 黄莹, 徐政. 基于同步相量测量单元的直流附加控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 7-12.
Huang Ying, Xu Zheng. HVDC supplementary controller based on synchronized phasor measurement units[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 7-12(in Chinese).
- [6] 郑超, 周孝信. 基于电压源换流器的高压直流输电小信号动态建模及其阻尼控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 7-12.
Zheng Chao, Zhou Xiaoxin. Small signal dynamic modeling and damping controller designing for VSC based HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 7-12(in Chinese).
- [7] 陆超, 谢小荣, 童陆园, 等. 使用直接神经动态规划方法的 SVC 附加阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 8-12.
Lu Chao, Xie Xiaorong, Tong Luyuan, et al. SVC supplementary damping control using direct neural dynamic programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 8-12(in Chinese).
- [8] 李丹, 韩福坤, 郭子明, 等. 华北电网广域实时动态监测系统[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 52-56.
Li Dan, Han Fukun, Guo Ziming, et al. Wide-area real time dynamic

- security monitoring system of North China Power Grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 52-56(in Chinese).
- [9] 徐兴伟, 穆刚, 王文, 等. 东北电网广域动态测量系统[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 70-73.
Xu Xingwei, Mu Gang, Wang Wen, et al. Wide area dynamic measuring system of northeast power grid[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 70-73(in Chinese).
- [10] 王兆家, 岑宗浩, 陈汉中. 华东电网多功能功角实时监测系统的开发及应用[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 73-77.
Wang Zhaojia, Cen Zonghao, Chen Hanzhong. Development of multi-function realtime power angle monitoring system for East China Power Grid and its application[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 73-77(in Chinese).
- [11] 钟波, 于峥. 广域电网相量测量系统在西北电网的开发及应用[J]. 中国电力, 2005, 38(12): 37-41.
Zhong Bo, Yu Zheng. Development of multi-function real time phase angle monitoring system and its application in Northwest China Power Grid[J]. Electric Power, 2005, 38(12): 37-41(in Chinese).
- [12] 张静, 徐政, 王峰, 等. TLS-ESPRIT 算法在低频振荡分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 84-88.
Zhang Jing, Xu Zheng, Wang Feng, et al. TLS-ESPRIT based method for low frequency oscillation analysis in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 84-88(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] Zhou E Z. Power oscillation flow study of electric power systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1995, 17(2): 143-150.
- [15] 王青. 互联电力系统低频振荡机理与特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
Wang Qing. Study on mechanism and characteristics of low frequency oscillation in interconnected power systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007(in Chinese).



武诚

收稿日期: 2008-08-07。

作者简介:

武诚(1982—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定, wuc@zju.edu.cn;

徐政(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量, hvdc@zju.edu.cn;

张静(1980—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定分析、新型直流输电、信号处理, eejzhang@yahoo.com。

(责任编辑 刘浩芳)