

电力系统在线小干扰主导特征模式识别 及强相关机组选择方法

闫常友, 周孝信, 田芳, 严剑峰
(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Online Identification of Dominant Characteristic Modes of Small Signal Disturbance and Selection of Strong Correlative Units

YAN Chang-you, ZHOU Xiao-xin, TIAN Fang, YAN Jian-feng
(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: The source and development of online computation methods of power system small signal stability as well as the common used mathematical model of generators and eigenvalue analysis method are introduced. On this basis, according to eigenroot and damping ratio, the identification procedures of dominant oscillation modes for small signal disturbance analysis and the selection algorithm for strong correlative units under dominant characteristic modes are proposed, and the termination condition of the proposed algorithm is given. The phase characteristics of oscillation modes are analyzed in depth and used in the clustering of strong correlative units. A concept of clustering coefficient of correlation factor and its meaning are put forward. The proposed method is verified by two calculation examples.

KEY WORDS: dominant oscillation mode; clustering coefficient of correlation factor; strong correlative units; small signal stability

摘要: 首先介绍了电力系统在线小干扰计算方法的起源和发展、小干扰分析常用的发电机数学模型和特征值分析方法。在此基础上, 依据特征根和阻尼比等信息, 提出了小干扰分析的主导振荡模式的识别步骤, 以及主导特征模式强相关机组的选择算法, 给出了算法的终止条件; 深入分析了振荡模式的相位特性, 并利用其对强相关机组进行分群研究; 提出了相关因子分群系数的概念及其含义。最后利用2个算例对所提方法进行了验证。

关键词: 主导振荡模式; 相关因子分群系数; 强相关机组; 小干扰稳定

0 引言

目前, 大型电网的互联运行已经很普遍, 但也出现了很多动态问题, 比如, 大系统之间的弱互联

会降低系统间的阻尼, 从而使弱阻尼引起的低频振荡成为威胁系统稳定的关键因素之一^[1-4]。近几年我国发生了多起与小干扰稳定有关的功率振荡事件, 严重影响了电网间的功率输送和安全稳定^[5]。在这种情况下, 小干扰稳定的研究备受关注^[6]。

静态稳定计算小扰动方法的理论基础是俄国科学家李亚普诺夫创立的。用这种方法分析系统的稳定问题首先要列出描写系统动态行为的状态方程, 如果这些方程式是非线性的, 则要将它们线性化, 然后用来分析、判断系统的稳定性^[7]。中国电力科学研究院电网数字仿真技术研究所在离线分析软件的基础上, 一直致力于研究和开发电力系统在线小干扰稳定计算平台, 并取得了一些科研成果, 为在线小干扰稳定计算做了基础性的工作^[8]。

为了抑制小干扰引起的低频振荡, 必须首先知道低频振荡的主导振荡模式。很多科研工作者在小干扰分析以及主导模式识别方面做了很多工作^[9-12]。本文将致力于解决在线小干扰计算的主导特征模式识别以及强相关机组的选择问题, 提出相关因子分群系数等概念, 这些概念意义明确, 形式简单, 适合应用于在线小干扰稳定计算; 并提出一种简便、有效的特征模式强相关机组选择算法。

1 小干扰计算的特征值分析方法

1.1 多机系统线性化模型

如果详细考虑励磁系统、调速器、电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)等自动调节过程的影响, 多机系统的线性化数学模型^[13]为

$$\begin{cases} p\delta = \Delta\omega \\ \mathbf{M}p\Delta\omega = \Delta\mathbf{P}_m - (\mathbf{K}_1\Delta\delta + \mathbf{K}_2\Delta\mathbf{E}'_q) - \mathbf{D}\Delta\omega \\ \mathbf{T}'_{d0}p\Delta\mathbf{E}'_q = \Delta\mathbf{E}_f - (\mathbf{K}_4\Delta\delta + \mathbf{K}_3\Delta\mathbf{E}'_q) \\ \Delta\mathbf{E}_f = \mathbf{G}_E(p)[-(\mathbf{K}_5\Delta\delta + \mathbf{K}_6\Delta\mathbf{E}'_q) + \Delta\mathbf{U}_{PSS}] \\ \Delta\mathbf{P}_m = -\mathbf{G}_{GOV}(p)\Delta\omega \\ \Delta\mathbf{U}_{PSS} = \mathbf{G}_{PSS}(p)[\mathbf{K}_p(\mathbf{K}_1\Delta\delta + \mathbf{K}_2\Delta\mathbf{E}'_q) + \mathbf{K}_\omega\Delta\omega] \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{K}_1 \sim \mathbf{K}_6$ 为反映网络结构、元件参数、运行工况和负荷特征的系数矩阵； $\mathbf{K}_1 \sim \mathbf{K}_6$ 均为满阵，反映了机组间的耦合； \mathbf{M} 是发电机惯性时间常数； δ 是转子角； ω 为转子角速度； \mathbf{P}_m 是机械功率； \mathbf{E}'_q 是q轴瞬变电动势； \mathbf{T}'_{d0} 是d轴短路暂态时间常数； $\Delta\mathbf{E}_f$ 是定子励磁电动势； \mathbf{G}_E 是励磁系统传递函数； $\Delta\mathbf{U}_{PSS}$ 是PSS输出； \mathbf{G}_{GOV} 原动机调速器传递函数； \mathbf{K}_p 和 \mathbf{K}_ω 是PSS调解器系数。根据这个模型的线性化微分方程组表达式，可以建立全系统的线性化微分方程，建立标准的全系统状态方程模型。

若将全系统变量排列为

$$\Delta\mathbf{X} = (\Delta\delta^T, \Delta\omega^T, \Delta\mathbf{E}'_q{}^T, \Delta\mathbf{X}_E^T, \Delta\mathbf{X}_{GOV}^T, \Delta\mathbf{X}_{PSS}^T)^T \quad (2)$$

就得到了全系统的状态方程

$$\Delta\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{X}$$

在PSASP综合程序软件包中的小干扰稳定计算程序还可考虑其他动态元件(例如：直流、静止无功补偿、FACTS等)的状态变量和非状态变量。所建立的全系统状态方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\mathbf{X}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{X} \\ \Delta\mathbf{Z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $\Delta\mathbf{Z}$ 为状态变量； \mathbf{J} 为系统的增广矩阵。

1.2 状态方程的特征值和特征向量

对于状态方程(3)，相应的系统特征方程式为

$$|\lambda\mathbf{I} - \mathbf{J}| = 0 \quad (4)$$

式中 \mathbf{I} 为单位矩阵。求解该特征方程，就得到特征方程的一系列特征值 λ_i ， $i=1, \dots, n$ 。对于每一个特征根 λ_i ，其右特征向量和左特征向量分别具有不同的意义。对于每一个模式，右特征向量的元素 ϕ_{ki} 是对应的状态变量 x_k 的测量，左特征向量的元素 ψ_{ik} 说明了右特征向量元素 ϕ_{ki} 在这个模式中的权重。元素 ϕ_{ki} 和 ψ_{ik} 的乘积说明了状态变量 Δx_k 在该模式中的相对参与程度^[14]。

1.3 低频振荡的机电回路相关比

小干扰计算的目的是研究因系统阻尼不足而引起的持续低频功率振荡。对于状态方程解出的大量特征根，若要从中选出与一部分变量强相关的

根，就要用到强相关比(机电回路相关比)的概念。比如小干扰稳定计算就要选出与 $\Delta\delta$ 、 $\Delta\omega$ 强相关的模式(机电振荡模式)，这才是低频振荡对应的根，而不能仅依赖频率范围来判断。

对于振荡模式 λ_i ，机电回路相关比定义^[13]为

$$\rho_i = \left| \frac{\sum_{x_k \in (\Delta\omega, \Delta\delta)} p_{ki}}{\sum_{x_k \notin (\Delta\omega, \Delta\delta)} p_{ki}} \right| \quad (5)$$

式中： p_{ki} 代表相关因子， $p_{ki} = \phi_{ki}\psi_{ik}$ ； ϕ_{ki} 代表模式 λ_i 中状态量 Δx_k 的测量， ψ_{ik} 表明了 ϕ_{ki} 在这个模式中的权重； k 代表状态向量 $\Delta\mathbf{X}$ 中元素的下标。

对于特征值 λ_i ，只有满足式(6)时，才认为是机电模式。

$$\begin{cases} \rho_i > 1 \\ \lambda_i = \alpha \pm j\Omega, \Omega \in 0.2 \sim 2.5\text{Hz} \end{cases} \quad (6)$$

2 小干扰主导特征模式的识别

系统主导振荡模式的识别步骤包括：

1) 在众多的振荡模式中，首先对机电回路相关比进行筛选，如果机电回路相关比大于1，就认为这个振荡模式是机电振荡模式；如果机电回路相关比小于1，则认为其他振荡形式在这个振荡模式中占主要地位。

2) 对步骤1)筛选的集合，按频率范围[0.1, 2.5]Hz筛选，不在这个范围内的模式认为无效，不予考虑。若频率在[0.1, 0.7]Hz范围内，就认为是区域间振荡形式；若频率在[0.7, 2.5]Hz范围内，就认为是就地机组振荡形式。不同范围的特征值存储在不同的内存区，为后面查找相关机组提供方便。

3) 对所有的特征根，判断特征根的实部，如果有任一特征根的实部大于0，就认为系统不稳定，属于增幅振荡形式，给出相应的提示信息，系统需要进行详细的改善和治理；如果全部特征根的实部都小于0，就认为系统是稳定的，属于减幅振荡形式，给出相应的提示信息。

4) 针对步骤3)得到的2个模式集合，对振荡模式的阻尼比进行筛选及分段处理：①若阻尼比 $\xi > 0.1$ ，就认为该振荡模式具有足够的阻尼，不再查找强相关机组；②若 $0.05 < \xi < 0.1$ ，说明该振荡模式没有足够的阻尼，需要考虑；③若 $0 < \xi < 0.05$ ，说明该振荡模式阻尼不足且比较严重，需要详细考虑；④若 $\xi < 0.0$ ，说明该模式是增幅振荡模式。

总之，阻尼比在 $[-\infty, 0.05]$ 范围内^[15-16]，认为该模式下系统阻尼不足，需加以考虑；阻尼比大于0.1

就认为具有足够的阻尼，该振荡模式会很快衰减。

5) 经过上述对机电回路相关比、振荡频率、阻尼比等一系列的筛选，会找到系统的主导振荡模式，也就可以计算主导振荡频率及相应的阻尼比。

6) 强相关机组群的查找。对于某一个振荡模式 λ_i ，其最简单的相关因子(相关机组)分群公式采用如下形式：

$$C = (p_{k,i} - p_{k+1,i}) / p_{k,i} < K_e \quad (7)$$

式中： C 是相关因子分群系数； k 是特征向量的状态量(机组)的下标，表示 p_{ki} 和状态量 Δx_k 相关联； K_e 是相关因子分群系数的临界值； p_{ki} 是对应某一特征值 λ_i 的相关因子。

对于每一个就地振荡模式，把所有的相关机组按相关因子从大到小进行排序，利用相关因子分群系数把相关机组分为强相关机组群和非强相关机组群。将强相关机组群存储到相应的内存区。对于区域振荡模式，目的是只选出各振荡机群的核心振荡机组，存储到相应内存区。

7) 振荡模式的相位特性。利用步骤 6) 得到的数据集，对每一个就地振荡模式计算出所有强相关机组的相位。将步骤 6) 得到的强相关机组群按相位排序，如果相邻机组的相位差较大(比如：阈值设置为 30° 或者 45°)，就可以按相位对机组分群，从而可以判断振荡发生在哪几台机组(群)之间。

对于每一个区域振荡模式，步骤 6) 找到的强相关机组就应该是各振荡机组群的核心振荡机组。计算出所有相关机组的相位。利用核心机组的相位，对机组群进行分群。就可以得到该模式的多个振荡机群。对于每一个得到的机群，再按相关因子排序，利用相关因子分群系数分群，就可以很容易地得到各机群中强参与该模式的机组。需要说明的是：相关因子分群系数的提出有助于积累经验，为今后强相关机组的分群提供统计数据和依据。

3 主导特征模式强相关机组的选择算法

本算法既适用于在线平台小干扰稳定计算，也适用于离线小干扰稳定计算分析，相关因子分群系数的大小决定了能否成功地搜索到强相关机组(群)。为了确保搜索到合适的强相关机组(群)，提出并设计了下面的选择算法。

1) 算法的流程。

算法流程见图 1。其中

$$\begin{cases} K_{e0} = \alpha \\ \Delta K_e = (1 - K_{e0}) / n \\ K_{ch} = K_{e0} + \Delta K_e h \end{cases} \quad (8)$$

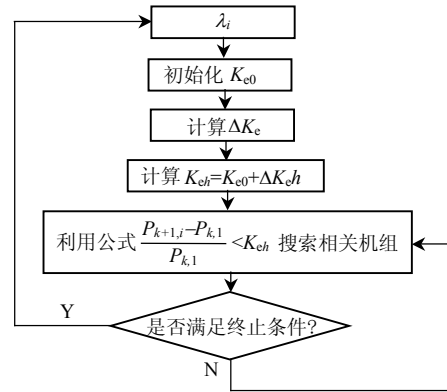


图 1 强相关机组选择算法流程

Fig. 1 Flow chart of the algorithm for selection of close-participating generators

式中： λ_i 代表系统状态方程的特征值； K_e 、 ΔK_e 是相关因子分群系数的临界值及其增量； α 是 K_e 的初值，取值范围为 $[0,1]$ ； n 是整数，取值范围为 $[1,10]$ ，根据情况选定； h 是整数，取值范围为 $[1,n]$ ，根据具体情况选定。

2) 算法的终止条件。

必要条件：对于每一个振荡模式，强相关机组个数需要大于或等于 2。

充分条件：

① 搜索至该模式的相关机组列表末尾。

② 无论是就地振荡模式还是区域振荡模式，当 $K_e < 0.9$ 时：如果选择的机组个数太多，当状态量的相关因子小于该模式的极大相关因子 0.1 倍时就终止；相邻机组的相位差绝对值至少 2 次大于给定阈值(比如 45°)，次数可以根据需要人工设置(默认为 3)，满足需要就终止。

③ 对于就地振荡模式，当 $K_e \geq 0.9$ 循环终止。

④ 对于区域振荡模式，当 $K_e \geq 0.9$ 时，如果选择的机组个数太多则直接终止；在选择机组的过程中，相邻机组的相位差绝对值至少 2 次大于给定阈值(比如 45°)，次数可以根据需要人工设置(默认为 3)，满足需要就终止。

以上充分条件只要满足其一，搜索即可终止。

3) 算法的描述。

本算法既适用于单个特征值的强相关机组的选择，也适用于多个特征值或者整个系统全部特征值的强相关机组的选择。

系统每个特征值的右特征向量的每个元素都代表一个状态变量的活动或者测量，为了搜索到与特征模式强相关的机组，需要按相关因子对所有的状态变量排序，利用相关因子分群系数，对

所有的状态变量(对应所有的机组)进行识别,识别出与特征模式强相关的机组。算法具体流程如下:

相关因子分群系数的临界值以 K_{ch} 表示, $K_{ch} \in [K_{c0}, 1]$ 。首先初始化相关因子分群系数临界值 K_c 的初始值 K_{c0} , 计算相关因子分群系数临界值 K_c 的增长值 ΔK_c , 计算相关因子分群系数临界值 K_{ch} , 利用这个临界值对相关机组分群, 如果不满足搜索终止条件, 就修改 K_{ch} 的值, 继续向前搜索, 直到满足搜索的终止条件。然后开始下一个模式的强相关机组的选择。

4 算例

4.1 概述

仿真计算使用的软件是 PSASP 综合稳定程序软件包的小干扰计算程序。PSASP 综合计算程序的发电机模型共有 7 种。0 型是 E' 电势恒定的经典模型, 1 型是 E'_q 电势恒定的模型, 2 型是 E'_q 电势变化的模型, 3 型是 E'_q 、 E''_q 、 E''_d 变化的模型, 4 型是 E'' 电势恒定的模型, 5 型是 E'_q 、 E'_d 电势变化的模型, 6 型是 E'_q 、 E'_d 、 E''_q 、 E''_d 变化的模型。其中 6 型模型考虑了阻尼绕组的暂态和次暂态过程, 5 型模型考虑了阻尼绕组的暂态过程。

表 2 用选择算法自动选择的特征向量元素(强相关机组)

Tab. 2 The generators selected from the CEPRI 36-bus system (strong correlative units)

特征值编号	发电机编号	状态量实部	状态量虚部	频率/Hz	相关因子	状态量幅值	状态量相角/(°)
40	26	-0.263 150	0.019 540	0.980 167	0.233 928	0.263 874	175.753 342
	30	0.265 010	0.000 030		0.136 672	0.265 010	0.000 000
	29	0.260 810	0.012 190		0.089 622	0.261 095	2.676 003
	28	-0.124 82	-0.033 97		0.046 119	0.129 36	195.224 442
45	24	0.271 190	0.026 950	0.777 529	0.234 523	0.272 526	5.675 244
	30	-0.397 420	-0.033 920		0.107 372	0.398 865	184.878 403
	29	-0.390 010	-0.039 540		0.071 266	0.392 009	185.788 986
	26	-0.188 480	0.019 240		0.042 736	0.189 459	174.171 448
	28	-0.237 690	0.013 820		0.031 289	0.238 091	176.672 394
	27	-0.169 240	-0.006 030		0.008 404	0.169 347	182.040 573
	25	0.047 930	0.000 950		0.001 816	0.047 939	1.135 487

4.3 66 机系统算例

网络数据采用国内某省网的 2010 年规划数据, 负荷水平为基本方式。这个算例是为了验证强相关机组的选择算法, 不考虑系统稳定性的强弱。系统只有交流数据, 潮流计算采用全方式计算, 暂稳计算采用无故障方式, 小干扰稳定计算方法采用 QR 算法。表 3 列出了全部振荡模式, 其中含有 5 个等幅振荡模式, 1 个增幅振荡模式。模式 394、420、424、431 的阻尼比相对较大, 其余的振荡模式的阻尼比相对较小。模式 501 是区域振荡模式。表 4 列出了选择算法选择出的部分发生功角振荡和增幅

本文采用 2 个算例来验证主导特征值识别和强相关机组选择算法的实用性。

4.2 CEPRI 36 节点算例

潮流计算采用纯交流系统计算方式, BUS33、BUS34 之间的直流线按交流线处理; 暂态稳定计算采用交流系统无故障计算方式; 小干扰稳定的计算方法采用 QR 算法, 计算的原始结果不再列出。

利用基于上述算法开发的软件对小干扰计算结果进行处理, 见表 1、2。从表 2 可以看出, 经过对特征向量元素的搜索, 选择算法发现只有模式 40、45 发生了明显的就地振荡, 参与振荡的机组主要是 26、29、30、28、24 共 5 台机, 其中 26、28 两台机和 24、29、30 三台发电机之间发生了振荡, 摆开功角大约 170° 。而模式 45 也发生了明显的振荡, 参与振荡的机组主要是 24、30、29、26、28、27 共 6 台机。其中 24 号机和 30、29、26、28、27 共 5 台机之间发生了功角振荡。经过对原始数据的人工观察, 确是如此。

表 1 CEPRI 36 节点系统的主导特征模式

Tab. 1 The dominant modes of CEPRI 36-bus system

模式序号	特征根	频率/Hz	阻尼比
40	-0.268 055±j 6.158 588	0.980 167	0.043 484
45	-0.054 870±j 4.885 371	0.777 529	0.011 231

振荡的模式以及相应的强相关机组。通过和原始数据的对照, 说明了算法的有效性。

5 结论

本文提出的相关因子分群系数概念意义明确, 适用于在线、离线小干扰稳定计算研究领域。通过算例证明: 小干扰主导特征模式的识别步骤是有效的, 主导特征模式的强相关机组的选择方法是正确的, 尤其是对于真正的大系统和大算例, 可以从大量的相关机组中选出强相关的机组, 方便、实用、有效; 相位特性的研究可以对每一个主导特征模式的强相关机组分群, 这还需要进行深入细致的研究。

表 3 某省网 66 节点系统的主导特征模式
Tab. 3 The dominant modes in some 66-bus system

序号	特征根	阻尼比	序号	特征根	阻尼比
244	-0.193 337±j14.194 656	0.013 619	410	0±j8.2722	0.000 000
384	-0.000 435±j 8.585 286	0.000 051	412	0±j8.227	0.000 000
386	-0.019 448±j 8.552 640	0.002 274	418	0.022 487±j 7.775 584	-0.002 892
394	-0.329 512±j8.246 350	0.039 927	420	-0.306 8±j 7.754	0.039 537
396	0±j8.298	0.000 000	422	-0.0259±j7.378	0.003 519
398	0±j8.3948	0.000 000	424	-0.269±j7.564	0.035 585
402	-0.060 365±j 8.102 424	0.007 450	426	-0.197 269 9±j 7.085 203	0.027 832
404	-0.003 767±j 8.025 969	0.000 469	428	0±j7.797	0.000 000
406	-0.001 679±j 8.047 261	0.000 209	431	-0.21590 6±j 6.531394	0.033 039
408	-0.009 464±j 7.946 776	0.001 191	501	-0.003 69±j4.1515	0.000 889

表 4 66 节点系统算例用选择算法自动选择的特征向量元素(强相关机组)
Tab. 4 The generators selected from the 66-bus system (strong correlative units)

特征值编号	发电机编号	状态量实部	状态量虚部	频率/Hz	相关因子	状态量幅值	状态量相角/(°)
384	826	-0.998 820	-0.036 720	1.366 387	0.305 490	0.999 495	182.105 438
	878	1.000 000	0.000 000		0.301 918	1.000 000	0.000 000
	827	0.406 410	0.012 700		0.049 150	0.406 608	1.789 868
	877	-0.359 680	0.001 430		0.038 014	0.359 683	179.772 202
	1 087	-0.010 510	0.003 020		0.020 244	0.010 935	163.968 231
	1 086	0.002 360	0.001 790		0.005 557	0.002 962	142.820 572
396	1 031	-1.000 000	0.000 000	1.320 788	0.250 000	1.000 000	180.000 000
	1 032	1.000 000	0.000 000		0.250 000	1.000 000	0.000 000
398	704	1	0.0	1.336 0	0.25	1.00	0.0
	703	-1	0.0		0.25	1.00	180.00
406	877	1.000 000	0.000 000	1.280 758	0.257 285	1.000 000	0.000 000
	827	-0.837 480	0.064 060		0.181 691	0.839 926	175.625 885
	878	0.365 51	-0.002 37		0.048 469	0.365 518	359.628 479
⋮							
410	449	-1.000 000	0.000 000	1.316 557	0.249 855	1.000 000	180.000 000
	448	1.000 000	0.000 000		0.249 855	1.000 000	0.000 000
412	1 120	1.000 000	0.000 000	1.309 385	0.250 000	1.000 000	0.000 000
	1 119	-1.000 000	0.000 000		0.250 000	1.000 000	180.000 000
418	1 120	-0.085 010	-0.0049 70	1.237 520	0.158 819	0.085 155	183.345 917
	1 119	-0.085 010	-0.0049 70		0.158 819	0.085 155	183.345 917
	1 101	0.018 520	-0.0067 30		0.042 069	0.019 705	340.029 297
	704	-0.036 44	-0.002 26		0.046 479	0.036 51	183.548 935
	703	-0.036 44	-0.002 26		0.046 479	0.036 51	183.548 935
	1 087	-0.000 55	-0.000 06		0.039 992	0.000 553	180.000
⋮							
431	1 087	-0.004 04	0.001 87	1.039 501	0.223 034	0.004 452	155.161 91
	447	0.031 01	-0.007 42		0.103 681	0.031 885	-13.456 6
	1 086	-0.000 80	0.001 76		0.085 259	0.001 933	114.443 9
501	1 110	1.000 000	0.000 000	0.660 738	0.694 701	1.000 000	0.000 000
	1 087	-0.000 990	-0.002 940		0.014 181	0.003 102	251.389 893
	1 086	-0.001 670	-0.000 120		0.003 877	0.001 674	184.110 001
	1 095	-0.007 330	-0.004 180		0.000 274	0.008 438	209.694 382
	447	-0.006 770	-0.004 450		0.000 262	0.008 102	213.317 413
	601	-0.006 730	-0.003 320		0.000 242	0.007 504	206.257 767
	600	-0.006 730	-0.003 320		0.000 242	0.007 504	206.257 767
	1 094	-0.006 810	-0.004 120		0.000 234	0.007 959	211.173 660
	1 101	-0.006 330	-0.003 070		0.000 198	0.007 035	205.873 047
	1 100	-0.006 070	-0.002 660		0.000 174	0.006 627	203.664 047
	1 099	-0.006 070	-0.002 650		0.000 171	0.006 623	203.584 824
	1 098	-0.006 070	-0.002 650		0.000 171	0.006 623	203.584 824
	1 114	-0.000 420	0.002 600		0.000 152	0.002 634	99.176 132

在线小干扰计算分析及其主导特征模式识别以及强相关机组的选择面临的最大问题是在线数据如何与离线数据进行整合。对于稳态条件或者小扰动情况,离线数据和在线数据的最基本差距是:1)网络结构不同。离线数据一般是未来的运行方式;在线数据是现在的即时运行方式,尤其是对于输电网络,在线数据的信息异常宝贵。2)潮流计算结果的电压水平不同。离线数据中,电网的母线电压水平肯定与在线数据有差距,电网电压水平的高低也是衡量电网的稳定性和传输性能的重要表现形式。3)离线数据中,潮流计算结果的变压器损耗、无功补偿投切容量能否与在线数据相符合,这些因素都会影响电网的功率因数,电网的功率因数既是输电效率的体现,也能体现系统的稳定性。这些条件都会对电力系统的小干扰计算结果产生影响。

最后,本文认为针对单个省网或区域网进行小干扰计算比针对特大规模电网具有更大的现实意义。因为网络矩阵越大,由于各方面的原因,计算结果会更加不准确。小干扰对电网带来的影响应该是局部的,即使一个小干扰信号可能会引发大的电网事故,但这已经超出了小干扰分析的研究范围。

参考文献

- [1] 邓集祥,涂进,陈武晖. 大干扰下主导振荡模式的鉴别[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36-41.
Deng Jixiang, Tu Jin, Chen Wuhui. Identification of critical low frequency oscillation mode in large disturbance[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 36-41(in Chinese).
- [2] 朱方,汤涌,张东霞,等. 我国交流互联电网动态稳定性问题的研究及解决策略[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 1-5.
Zhu Fang, Tang Yong, Zhang Dongxia, et al. Study on dynamic stability problems of AC interconnected area power grid in China and their solutions[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 1-5(in Chinese).
- [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.
Yu Yixin, Li Peng. The impact of weak interconnection of bulk powers to damping and dynamic stability of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11(in Chinese).
- [4] 熊俊杰,邢卫荣,万秋兰. Prony 算法的低频振荡主导模式识别[J]. 东南大学学报, 2008, 38(1): 64-68.
Xiong Junjie, Xing Weirong, Wan Qiulan. Identification of control modes in low frequency oscillation analysis by Prony method[J]. Journal of Southeast University, 2008, 38(1): 64-68(in Chinese).
- [5] 张旭,沈沉,梅生伟,等. 小干扰稳定特征向量和相关因子的分布式算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 7-11.
Zhang Xu, Shen Chen, Mei Shengwei, et al. Distributed algorithm for eigenvector and participation factor of small signal stability in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 7-11(in Chinese).
- [6] Mandal R, Mitra P. Application of eigenvalue analysis for improvement of small signal stability of a multi-machine system[J]. Journal-EL, 2006, 87(6): 13-18.
- [7] 周孝信,李汉香,吴中习. 电力系统计算[J]. 北京:水利电力出版社, 1988: 75-76.
- [8] 李芳,郭剑,吴中习,等. 基于PC机群的电力系统小干扰稳定分布式并行算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 7-13.
Li Fang, Guo Jian, Wu Zhongxi, et al. Distributed parallel computing algorithms for power system small signal stability based on PC clusters[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 7-13(in Chinese).
- [9] 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(in Chinese).
- [10] 樊爱军,雷宪章,刘红超,等. 研究大规模互联电网区域间振荡的特征值分析方法[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 35-39.
Fan Aijun, Lei Xianzhang, Liu Hongchao, et al. Eigenvalue analysis methods for interarea oscillations in large-scale interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 35-39(in Chinese).
- [11] 肖晋宇,谢小荣,韩英铎. 利用有限时间扰动后的响应辨识电力系统的主导特征值[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 1-5.
Xiao Jinyu, Xie Xiaorong, Han Yingduo. Online identification of power system dominant eigen values based on zero-input responses following limited-time disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 1-5(in Chinese).
- [12] 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): 60-63.
Deng Jixiang, Hua Yao, Han Xuefei. Study on effect of low frequency oscillation modes in large disturbance stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 60-63(in Chinese).
- [13] 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: 248.
- [14] PRABHA KUNDUR. 电力系统稳定与控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2002: 477.
- [15] 李扬楠,刘文颖,潘炜,等. 西北750kV电网动态稳定特性分析和控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 63-68.
Li Yangnan, Liu Wenyong, Pan Wei. Analysis of dynamic stability characteristics of 750 kV North West China Power Grid and research on its control strategy[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 63-68(in Chinese).
- [16] 赵义述,杨树新,牛新生,等. 2005年冬季华北—华中联网运行中的低频振荡计算分析[J]. 山东电力技术, 2006(2): 3-6.
Zhao Yishu, Yang Shuxin, Niu Xinsheng, et al. Low-frequency oscillatory analysis of the interconnected power system of Huabei and Huazhong in the winter operating arrangement in 2005[J]. Shandong Dianli Jishu, 2006(2): 3-6(in Chinese).



闫常友

收稿日期: 2009-02-25.

作者简介:

闫常友(1974—),男,博士,主要研究方向为同步电网安全性评价, E-mail: yanchy@epri.ac.cn;

周孝信(1940—),男,中国科学院院士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统分析与控制、电力系统仿真以及 FACTS 技术;

田芳(1973—),女,博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统分析、控制与仿真;

严剑峰(1977—),男,博士,主要研究方向为电力系统暂态仿真以及动态安全评估。

(责任编辑 李兰欣)