

影响电力系统主导振荡模式的关键励磁调节器 及其参数的识别

李蓓¹, 李兴源², 胡忠³

(1. 永川供电局, 重庆 402160; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 3. 城区供电局, 重庆 400013)

摘要: 模态级数法是分析非线性动态系统的一个新的有效工具。该方法能从系统的内部结构特性入手, 通过模式间的非线性相关作用来研究系统的动态特性。基于模态级数推导出了相关指标和二阶非线性相关因子公式。通过非线性相互作用指标揭示系统固有模式间的交互作用对系统动态特性的影响; 通过研究状态变量与系统主导振荡模式、复合模式对的非线性相关作用以及控制器参数对非线性相关系数的灵敏度, 来识别对系统动态特性和稳定产生很大影响的关键励磁调节器及其参数。

关键词: 模态级数法; 非线性相关因子; 交互模式; 主导振荡模式; 非线性相关系数; 灵敏度

Identification of the key exciters and its parameters effecting on the critical inertial modes of the power system

LI Bei¹, LI Xing-yuan², HU Zhong³

(1. Yongchuan Electricity Supply Bureau, Chongqing 402160, China; 2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Chengqu Electricity Supply Bureau, Chongqing 400013, China)

Abstract: Modal series is a new and effective tool which is used in analyzing the nonlinear dynamic systems. With a view to internal structural characteristic of systems, this method could be used to analyze nonlinear modal interaction in order to study the dynamic characteristic of systems. This paper firstly gives some indices and expressions of nonlinear participation factor based on modal series. Secondly, the effect of modal interaction on the dynamic characteristic of systems is opened out by the nonlinear-interaction indices. In the end, the key exciter and its parameters are identified by studying the nonlinear interaction of state variables with the critical inertial modes and combination of modes and the sensitivity of controller's parameters to nonlinear interaction coefficients.

This project is supported by National Key Basic Research Special Fund of China(No.2004cbz1790) and National Natural Science Foundation of China(No. 50595412&No.50377017).

Key words: critical inertial modes; nonlinear interaction coefficients; interaction modes; modal series; nonlinear participation factor; sensitivity

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)01-0015-07

0 引言

目前, 我国电网正处于高速发展时期: 随着用电需求的日益上升, 区域间传输的功率不断增长, 互联电力系统越来越运行在接近其传输极限水平; 直流

输电系统及各种新型快速控制设备的投入; 全国性电网互联战略的实施等。这些发展虽然提高了系统运行的可靠性, 给我国带来了巨大的经济效益, 但同时也给现今电网的安全稳定研究工作提出了新的问题: 2003年9月, 在我国的华中-川渝系统和东北-华北系统的互联过程中曾发生过机理不明的超低频振荡现象。仿真研究和实测结果都表明, 这种超低频振荡现象呈现出各种因素间线性和非线性交叠等特征。因此, 有必要开展更深入的非线性系统动

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目(2004Cb217907); 国家自然科学基金资助项目(50595412&50377017)

态行为的研究以及相应控制器的设计研究。

有资料表明^[1], 系统状态方程 Taylor 级数展开式的高次项对电力系统的动态行为有显著影响。模态级数法为分析高次项的影响提供了独特的方法, 它是目前被广泛用于分析非线性系统动态特性的主要理论——向量场正则形理论的新发展, 比其更具优势^[2,3]。该方法以类似于传统的、基于小信号稳定线性模式分析的方式, 从系统的内部结构特性入手, 通过模式间的非线性相关作用来研究系统的动态特性。它可以将目前已经非常成熟的线性系统理论中的一些重要概念, 如: 相关因子、灵敏度等, 拓展到对非线性系统的研究中去。通过相关指标识别出系统的主导振荡模式、分析模式间, 特别是主导振荡模式与其它交互模式间的非线性相互作用程度, 从而为分析系统在受到大扰动后振荡的稳定情况提供有价值的信息。所以特别适用于对互联电网的研究, 它的主要用途有: 在线稳定性分析、分析系统的振荡模式及其交互作用、设计控制器等方面。

1 模态级数法基础理论

1.1 电力系统状态方程的二阶解析解

电力系统是一个包含了大量线性和非线性元件的大系统, 通常情况下可视为非线性自治系统。因此, 对有 n 台发电机的电力系统, 其数学模型为:

$$\dot{X} = F(X) \quad (1)$$

其中: X 是 N 维状态向量, $F: R^N \rightarrow R^N$ 是一个光滑向量场。

设系统的初始状态为 X_0 , V, U 为左、右特征向量矩阵, 且 $V^T = U^{-1}$ 。对式 (1) 作线性变换 $X = UY$, 则 $Y_0 = U^{-1}X_0$ 。利用模态级数法可以得出系统的二阶近似解析解为^[2-6]:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N u_{ij} \left(y_{j0} - \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h2_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right\}_{(k,l,j) \notin R_2} \right) e^{\lambda_j t} + \left\{ \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} h2_{kl}^j y_{k0} y_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \right\}_{(k,l,j) \in R_2} + \left\{ \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} c_{kl}^j y_{k0} y_{l0} t e^{\lambda_j t} \right\}_{(k,l,j) \in R_2} \quad (2)$$

$$\text{其中: } h2_{kl}^j = \frac{c_{kl}^j}{(\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j)}$$

$$C^j = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^N V_{jp}^T [U^T H^p U] = [c_{kl}^j]$$

u_{ij} 是右特征向量矩阵 U 的第 j 列的第 i 个元素;

H^p 为系统海森矩阵 H 的第 p 个子阵; c_{kl}^j 是矩阵 C 的第 j 个子阵的第 l 列的第 k 个元素; $h2_{kl}^j$ 称为二阶非线性相关系数, 它是研究非线性对系统动态行为的影响的关键参数, 反映了模式 j 与模式对 (k, l) 的非线性相互作用程度。

1.2 二阶非线性相关因子

线性相关因子^[7]是线性模式分析法中一个非常重要的概念。通过对线性相关因子的分析, 可以确定与某个模式强相关的主导状态变量。对于交流系统的主导低频振荡模式而言, 可以通过线性相关因子的计算找出与其强相关的状态变量, 在该状态变量所在的发电机上施加控制将对系统的稳定性有较大影响。

本文通过模态级数法将线性相关因子的概念拓展到非线性系统中, 给出了二阶非线性相关因子的概念^[8]。这使得在研究与系统主导低频振荡模式强相关的状态变量时考虑了系统的非线性特性。二阶非线性相关因子的求解公式如下:

① 单个模式非线性相关因子 $p2_{ij}$

$$P2_{ij} = u_{ij} (v_{ij} - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h2_{kl}^j v_{ik} v_{il}) \quad (3)$$

它代表了第 j 个模式与第 i 个状态变量的二阶非线性相关作用。从该式中可以看出, $P2_{ij}$ 的第一项就是线性相关因子 $p_{ij} = u_{ij} v_{ij}$, 第二项是考虑二阶非线性后, 对线性相关作用的非线性修正。该项可能会增大第 j 个模式与第 i 个状态变量的相关程度, 也可能减小它们之间的相关程度。

② 复合模式非线性相关因子 $p2_{ikl}$

$$P2_{ikl} = v_{ik} v_{il} \left(\sum_{j=1}^N u_{ij} h2_{kl}^j \right) \quad (4)$$

它代表了第 k 个模式与第 l 个模式所组成的复合模式对 (k, l) 与第 i 个状态变量的非线性相关程度, 从其表达式可以看出, 第 i 个状态变量与模式对 (k, l) 的相关性是通过单个模式 j 与模式对 (k, l) 的交互作用产生的。

③ 谐振模式非线性相关因子 $P2_{i,(k,l,j)}$

$$P2_{i,(k,l,j)} = u_{ij} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N c_{kl}^j v_{ik} v_{il} \quad (5)$$

它代表了准二次谐振模式 (k, l, j) 与第 i 个状

态变量的非线性相关程度。

1.3 模态级数的相关指标

1.3.1 非线性相互作用指标

大扰动下, 系统显现出较强的非线性, 模式间的非线性相互作用、模式和状态变量间的非线性相互作用不可忽略, 特别是与系统主导振荡模式相关的非线性相互作用对系统的动态特性和稳定性影响更大。通过模式间非线性相互作用的分析, 能够揭示系统固有模式间的交互作用对整个系统动态行为的影响。本文给出了分析在状态轨迹解中, 非线性作用程度的三个性能指标^[3]:

$$I1_j^i = \frac{\text{sign}(u_{ij}y_{j0} - \varepsilon) \cdot |L_j^i|}{\max(\varepsilon, |u_{ij}y_{j0}|)} \quad i=1, \dots, N \quad (6)$$

$$I2_{kl}^i = \left| \frac{K_{kl}^i}{\text{real}(\lambda_k + \lambda_l)} \right| \quad i=1, \dots, N \quad (7)$$

$$MI_j^i = \left| \frac{M_j^i}{\text{real}(\lambda_j)} \right| \quad i=1, \dots, N \quad (8)$$

其中: $\varepsilon=0.1$, $M_j^i = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} h2_{kl}^j y_{k0} y_{l0}$,

$$L_j^i = u_{ij} y_{j0} - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} h2_{kl}^j y_{k0} y_{l0}$$

$$M_j^i = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N u_{ij} c_{kl}^j y_{k0} y_{l0}$$

指标 $I1_j^i$ 反映了非线性对线性模式的激励作用大小, 接近 1 时表明非线性没有明显改变线性模式; 指标 $I2_{kl}^i$ 反映了时间响应中交互模式作用大小; 指标 MI_j^i 反映了时间响应中二次谐振模式作用大小。

1.3.2 识别主导振荡模式指标

强非线性系统中, 对系统稳定性的影响是由主导振荡模式和其它模式间的非线性相互作用来实现的。一定系统中, 扰动的地点、类型以及持续时间的不同, 各振荡模式被激励的程度也会不同, 其中被激励得最强、显现出的非线性相互作用最大的即是主导振荡模式^[9,10]。通过对系统响应的一阶解和二阶解的比较, 我们定义了识别在模式间非线性相关作用中起主导作用的模式的指标, 如下:

$$I(j) = \left| \frac{\max_{k,l} u_{ij} h2_{kl}^j y_{k0} y_{l0}}{\text{real}(\lambda_j)} + 2e^{-1} \frac{\max_{k,l} u_{ij} c_{kl}^j y_{k0} y_{l0}}{\text{real}(\lambda_j)} + \frac{\max_{k,l} u_{ij} h2_{kl}^j y_{k0} y_{l0}}{\text{real}(\lambda_k + \lambda_l)} \right|$$

该表达式基于以下假设条件成立, 即: 在二次交互模式中

存在模式对 (s, t) 与模式 j 的非线性交互作用最强, 以至于模式 j 与其它模式对的非线性交互作用可以忽略掉, 即 $h2_{st}^j y_{s0} y_{t0} = \max_{k,l} h2_{kl}^j y_{k0} y_{l0}$ 。

对应 $I(j)$ 的模最大时, 表明第 j 个是系统的主导振荡模式。

1.4 系统参数对非线性相关系数的灵敏度

非线性相关系数 $h2_{k,l}^j$ 反映了模态间的非线性相关作用程度, 通过计算系统参数对非线性相关系数的灵敏度来分析系统参数对模式间非线性相关作用的影响, 从而可以得到系统参数变化时模式 j 与模式对 (k, l) 之间非线性相互作用的变化情况以及它们所造成的系统非线性的变化情况, 指导控制器参数的整定。其计算公式如下^[11,12]:

$$\frac{\partial h2_{kl}^j}{\partial a} = \frac{\frac{\partial c_{kl}^j}{\partial a} (\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j) - c_{kl}^j \left(\frac{\partial \lambda_k}{\partial a} + \frac{\partial \lambda_l}{\partial a} - \frac{\partial \lambda_j}{\partial a} \right)}{(\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j)^2} \quad (9)$$

由于该微分公式非常复杂性, 直接计算相当困难, 所以本文采用了文献[10]提出的数值微商算法, 为了兼顾截断误差和舍入误差, 增量 Δa 近似取为 0.0001, 此时的截断误差为 $O(10^{-8})$ 阶, 舍入误差是 $O(10^{-10})$ 阶。计算公式如下。

$$\frac{\partial h2_{kl}^j}{\partial a} = \frac{h2_{kl+}^j - h2_{kl-}^j}{2\Delta a} \quad (10)$$

该灵敏度为一复数, 其模值反映了系统参数对模式组 (j, k, l) 的非线性相关作用的影响大小; 其相位能指导系统参数整定的方向。

2 仿真算例

2.1 系统描述

本文考虑如图 1 所示的三机交流系统。发电机采用三阶模型, 计及阻尼绕组作用; 励磁调节器采用静止励磁系统, 用一阶惯性环节表示如图 2, 机械功率恒定, 采用线性交流网络和恒阻抗负荷。系统参数和负荷情况见附录。

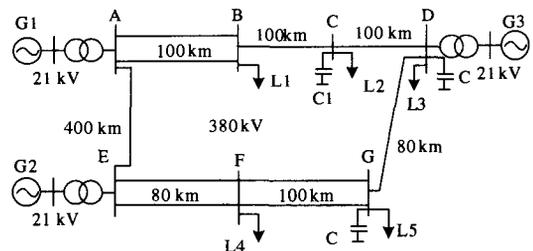


图 1 三机交流系统模型

Fig. 1 Three-machine power system model

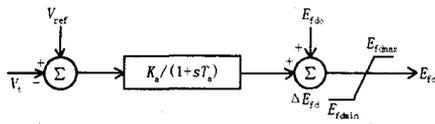


图2 快速励磁调节器的模型

Fig.2 Fast excitation regulator model

2.2 数学模型

本文中第*i*台发电机的数学模型为:

$$\begin{cases} U_{di} = x_{qi} I_{qi} \\ U_{qi} = E_{qi}' - x_{di}' I_{di} \\ M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei} - D_i(\omega_i - 1) \quad (i=1, \dots, n) \\ \dot{\delta}_i = \omega_0(\omega_i - 1) \\ T_{di0}' \dot{E}_{qi}' = E_{fdi} - E_{qi}' \\ T_{ai}' \dot{E}_{fdi} = -E_{fdi} + K_{ai}(V_{ref} - V_{ti}) \end{cases} \quad (11)$$

其中:

$$\begin{aligned} E_{qi}' &= E_{qi} + (x_{di} - x_{di}') I_{di} \\ P_{ei} &= [E_{qi}' + (X_{qi} - X_{di}') I_{di}] I_{qi} \\ V_{ti} &= \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2} \\ I_{ti} &= \sqrt{I_{di}^2 + I_{qi}^2} \end{aligned}$$

式中: δ_i 为转子角; ω_i 为角速度; $\omega_0 = 314 \text{ rad/s}$; E_{qi}' 、 E_{fdi}' 分别为发电机的空载电势和暂态电动势; E_{fdi} 为励磁电动势; P_{mi} 为机械功率; P_{ei} 为电磁功率; V_{ti} 、 I_{ti} 分别为发电机端电压、电流; M_i 、 T_{di0}' 分别为发电机的惯性时间常数和 d 轴开路暂态时间常数; D_i 为阻尼系数; T_{ai}' 、 K_{ai} 分别为励磁系统的时间常数和等值放大倍数; x_d 、 x_q 、 x_d' 分别为发电机的 d、q 轴同步电抗及 d 轴暂态电抗。系统的状

态变量为 $[\delta_i, \omega_i, E_{qi}', E_{fdi}']$, 中间变量为 $[E_{qi}, P_{ei}, V_{di}, V_{qi}, I_{qi}, I_{qi}]$, 联立以上各式, 再结合系统的网络方程可以消去中间变量, 最终得到仅含状态变量的系统微分方程。

为了便于应用模态级数法计算, 网络方程和机端电压方程在进行坐标变换时采用了不同于常规的做法, 即: 将 (x, y) 公共坐标系下的系统导纳矩阵变换为各机 d、q 坐标系下的导纳矩阵。然后, 再与机端电压方程联立求解。

2.3 仿真分析

选取 1 号发电机为参考机, 系统的状态变量为 $[\delta_{21}, \delta_{31}, E_{q1}', E_{q2}', E_{q3}', \omega_1, \omega_2, \omega_3, E_{fd1}, E_{fd2}, E_{fd3}] = [x_i]$, $i=1, \dots, 11$ 。此时, 系统状态方程为 11 阶非线性微分方程组。设定仿真故障为母线 E 处发生三相短路, 经过 0.15 s 后切除故障。

利用 netomac 软件仿真得到状态变量的初始值 X_0 , 再利用 matlab 软件编程计算得到系统的特征根、相应的左、右特征向量及海森矩阵。系统有 11 个特征值。其中 3 对共轭复数对和 5 个负实特征值, 没有不稳定模式。表 1 列出了系统的全部特征值及振荡模式的类型。

2.3.1 仿真结果比较

分别将运用模态级数法和基于线性模型得到的发电机功角 δ_{21} 、 δ_{31} 轨迹曲线, 与利用 netomac 仿真软件得到的基于详细模型的时域仿真结果相比较, 如图 3 所示。

从仿真结果可知, 基于模态级数法所得的功角轨迹曲线较基于线性模型所得的结果更接近时域仿真结果。这是因为模态级数法考虑了系统状态轨迹中的非线性的缘故。

表 1 三机交流系统特征值和振荡模式

Tab.1 Eigenvalues and oscillation modes of the three-machine power system

	特征值	模式	频率	阻尼比
λ_1	-21.0275	—	—	—
λ_2	-17.2198	—	—	—
λ_3, λ_4	-10.1566 ± 4.7180i	控制模式	—	—
λ_5, λ_6	-0.4303 ± 6.8324i	局部振荡模式 (发电机 1 与发电机 2)	1.087 4	0.062 9
λ_7, λ_8	-0.4442 ± 6.3711i	局部振荡模式 (发电机 1 与发电机 3)	1.014 5	0.069 6
λ_9	-3.3565	—	—	—
λ_{10}	-0.2636	—	—	—
λ_{11}	-0.7367	—	—	—

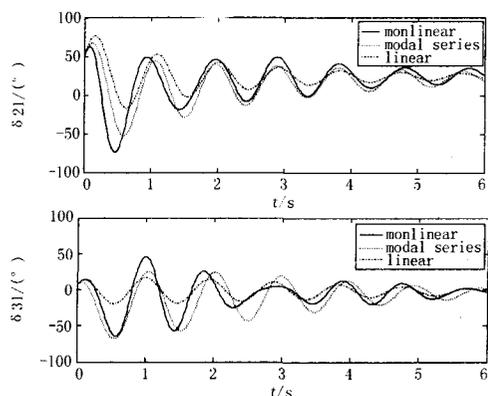


图3 线性模型、模态级数及时域仿真分析结果

Fig.3 The results of linear model, modal series and time domain simulation analyzing

2.3.2 振荡模式非线性相关性分析

在此以低频振荡模式7为例, 利用本文第二部

分介绍的相关公式, 分别计算出其线性相关因子和非线性相关因子, 如表2所示, i 表示状态变量的序号。

从表2可知, 与振荡模式7线性最强相关的状态变量是 δ_{31} , 即振荡模式7与第三台发电机线性强相关。考虑二阶非线性修正项后, 与振荡模式7非线性最强相关的状态变量变为 ω_3 , 振荡模式7还是与第三台发电机强相关, 这说明, 在考虑系统非线性后, 与振荡模式7最强相关的状态变量可能发生变化, 但其仍然与发电机的机电回路紧密相关。由此可知, 在强非线性下低频振荡仍然是影响系统动态特性的重要因素。与线性相关因子相同, 对共轭特征根 λ_i 和 λ_{i+1} , 非线性相关因子 $p2_{ij}$ 和 $p2_{ij+1}$ 是共轭的。同理也可以对振荡模式5进行分析, 如表3所示。

表2 低频振荡模式7的相关因子

Tab.2 Participation factor of oscillation mode 7

x_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
$ p_{i7} $	0.1004	0.4368	0.0004	0.0071	0.0021	0.0389	0.1379	0.3543	0.0001	0.0013	0.0007
$ p2_{i7} $	0.0974	0.4466	0.0004	0.0096	0.0135	0.5728	0.9994	6.3678	0.0001	0.0013	0.0007

表3 低频振荡模式5的相关因子

Tab.3 Participation factor of oscillation mode 5

x_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
$ p_{i5} $	0.4407	0.0958	0.0005	0.0112	0.0004	0.2499	0.2516	0.0295	0.0001	0.0015	0.0001
$ p2_{i5} $	0.4496	0.0945	0.0006	0.0104	0.0101	0.1917	0.8579	0.2395	0.0001	0.0015	0.0001

2.3.3 识别主导振荡模式

利用本文第二部分介绍的识别系统主导振荡模式的公式, 可以得出: $I(3) = 0.0001$, $I(5) = 1.1364$, $I(7) = 0.5755$, 从而可以确定在模式间的非线性相互作用中低频振荡模式5起主导作用, 即为主导振荡模式。

2.3.4 模式间交互作用分析

由前面的特征值分析可知, 该三机交流系统有11个特征值。在非线形系统响应中, 除了存在这11个单个模式外, 还存在着由这些模式两两组合产生的二阶非线性交互模式, 如 $\lambda_{i,j} = \lambda_i + \lambda_j$, 而且这些交互模式也会对单个模式的幅值产生非线性修正, 这种修正可能为正, 也可能为负。我们利用指标 $I2_{kl}^i$ 和 $I1_j^i$ 来比较它们的影响, 以状态变量 δ_{21} 为例, 分析系统非线性对该功角轨迹的影响, 计算结

果如表4和表5所示。另外通过计算, 指标 MI_j^i 为零矩阵, 这说明本系统中没有发生二次谐振情况。表5中*表示相互作用极小。

从表4可以看出, 系统的非线性作用明显增强了低频振荡模式5的激励水平, 没有明显改变低频振荡模式7的激励水平, 削弱了控制模式的激励水平。这也进一步证明了模式5确实是系统的主导振荡模式。

从表5可以看出, 在状态变量 δ_{21} 的轨迹解中, 模式对(5,6)的作用是主要的, 其次依次是模式对(7,8)、(5,5)、(6,6)、(5,10)、(6,10)、(7,10)、(8,10)。这些模式对的交互作用反映了系统的非线性特性, 使非线性系统响应不同于线性模态仿真结果。另外, 从该表也可以看出, 对于此时的系统而言, 低频振荡模式间的相互作用是影响系统非线

性动态特性的主要因素。

表 4 非线性对线性模式的激励程度指标 $I1_j^{(1)}$

Tab.4 Effect index of the nonlinearity on linear modes in the time response

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$I1_j^{(1)}$	0.0002	0.0578	0.2187	0.2187	3.3668	3.3668	1.3946	1.3946	0.8820	1.1302	2.3626

表 5 二次交互模式作用指标 $I2_{kl}^{(2)}$

Tab.5 Effect index of interaction modes in the time response

$k \backslash l$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
3			*	*	*	*	*	*	*	*	*
4				*	*	*	*	*	*	*	*
5					0.0167	0.0441	*	*	*	0.0154	*
6						0.0167	*	*	*	0.0154	*
7							*	0.0216	*	0.0119	*
8								*	*	0.0119	*
9									*	*	*
10										*	*
11											*

2.3.5 识别关键励磁调节器

根据前面的结论可知，模式 5 是系统的主导振荡模式，于是从 $\{h2_{kl}^{(5)} y_{k0} y_{l0}\}$ 中可以得到 $\max_{k,l} \{h2_{kl}^{(5)} y_{k0} y_{l0}\}$ 及其对应的模式对 (k, l) 。经计算，当 $k=10, l=10$ 时，其绝对值最大为 0.3657。这表明主导振荡模式 5 和复合模式 $(10, 10)$ 非线性强相关。计算模式 10 对应的线性相关因子可知：模式 10 与状态变量 E_{q3} 非线性强相关。这说明：由于主导振荡模式 5 与模式 10 之间的强非线性交互作用将使 2 号发电机和 3 号发电机之间也产生强非线性相互作用，这使得在当前故障下，3 号机也受到较大的扰动。

表 6 复合模式非线性相关因子

Tab.6 Nonlinear participation factor of interaction modes

$i, (k, l)$	$ p2_{ikl} $
9, (10, 10)	7.5626e-009
10, (10, 10)	4.3106e-004
11, (10, 10)	1.3259e-007

利用复合模式非线性相关因子 $p2_{ikl}$ 可以得到各状态变量与模式对 $(10, 10)$ 的相关性大小，在本论文中主要针对励磁系统的状态变量而言，计算结

果如表 6 所示。

从表 6 可以看出与模式对 $(10, 10)$ 非线性强相关的状态变量是第 10 个状态变量，它对应第二台发电机的励磁系统，这表明第二台发电机的励磁系统通过模式对 $(10, 10)$ 与系统主导振荡模式有较强非线性相互作用，于是第二台发电机的励磁调节器是对该系统动态特性和稳定性影响较大的关键励磁调节器。这与前面的分析结果是一致的。

2.3.6 调节器参数对非线性相关系数的灵敏度

从上面的分析可知：振荡模式 5 为系统的主导振荡模式，与其非线性强相关的复合模式是 $(10, 10)$ 。于是我们可以利用公式 (11) 计算各台励磁调节器的参数对非线性相关系数 $h2_{10,10}^5$ 的灵敏度。在此给出励磁调节器的增益系数 k_{ai} 对非线性相关系数 $h2_{10,10}^5$ 的灵敏度，如表 7 所示。

从表 7 可以看出，2 号发电机的励磁调节器的增益系数对 $h2_{10,10}^5$ 的灵敏度最大，这也进一步证实了前面的分析结论：在当前给定情况下，2 号发电机的励磁调节器是对此时系统动态特性和稳定性影响较大的关键励磁调节器。

经计算 $h2_{10,10}^5$ 为 $-0.0313+0.0010i$ ，从表 7 可知，灵敏度 $\partial h2_{10,10}^5 / \partial k_{a2}$ 的符号与之相同，所以减

小励磁调节器的增益可以减小系统的非线性, 利用 netomac 仿真软件, 分别将各励磁调节器的增益调至 15, 2 号发电机的功角 δ_{21} 的轨迹曲线如图 4 所示, 从该图中我们可以看到改变 2 号发电机的励磁调节器增益对 δ_{21} 的影响最大。

从图 4 可以看出, 改变参数 k_{a2} 时对发电机功角 δ_{21} 的影响较大, 而调节参数 k_{a1} 或 k_{a3} 对 δ_{21} 的影响很小。

表 7 k_{ai} 对 $h_{10,10}^5$ 的灵敏度

Tab.7 The Sensitivity of k_{ai} to $h_{10,10}^5$

k_{ai}	$\partial h_{10,10}^5 / \partial k_{ai}$	$ \partial h_{10,10}^5 / \partial k_{ai} $
k_{a1}	2.5656e-005+7.4572e-007i	2.5667e-005
k_{a2}	-0.0136 + 0.0108i	0.0173
k_{a3}	-5.6574e-004-2.7666e-004i	6.2976e-004

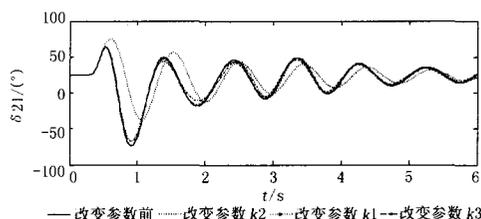


图 4 分别改变各励磁调节器增益时 δ_{21} 的轨迹曲线

Fig.4 Curve of δ_{21} by changing the k_a of each exciter respectively

3 总结

模态级数法为交流系统的非线性动态特性和稳定性的研究提供了新的思路。利用该方法可以得到包含了系统内部结构非线性特征信息的系统状态轨迹的二阶解析表达式。从该表达式可以看出, 系统的非线性特性主要反映在系统固有模式间的非线性交互作用以及状态变量与模式、复合模式间的非线性相关作用上。

本文通过对此表达式的研究, 提出了用于分析非线性系统动态特性的相关指标及公式, 给出了识别系统关键励磁控制器及关键控制器参数的思路, 并通过一简单算例证明了所提指标及思路的有效性。

附录:

发电机: $S_{G1}=6000$ MVA, $S_{G2}=S_{G3}=1200$ MVA,
 $M_2=M_3=7$ s $M_1=12$ s, $D_1=7$, $D_2=D_3=6$,
 $X_d'=0.34$, $X_d=2.15$ $X_q=1.97$

网络参数: $X_{Tran}=0.14$ pu, $R_{Line}=0.02$ Ω /km,

$X_{Line}=0.25$ Ω /km $C_{Line}=14.4$ nF/km

负荷: $S_{L1}=385+j150$ MVA, $S_{L2}=S_{L4}=190+j62$ MVA,

$S_{L3}=1900+j624$ MVA, $S_{L5}=950+j312$ MVA

并联补偿: $S_{C1}=60$ Mvar, $S_{C2}=400$ MVar

$S_{C3}=300$ MVar

励磁调节器参数初值: $k_{ai} = 40$, $T_{ai} = 0.05$ s

系统标幺值的基准: $U_N = 380$ kV, $S_N = 1200$ MVA

参考文献

- [1] Martinez I, Messina A R, Barocio E. Perturbation Analysis of Power Systems: Effects of Second- and Third-order Nonlinear Terms on System Dynamic Behavior[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 7(1): 159-167.
- [2] Pariz N, Shanechi H M. Explaining and Validating Stressed Power Systems Behavior Using Modal Series[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 778-785.
- [3] Shanechi H M, Pariz N, Vaahedi E. General Nonlinear Modal Representation of Large Scale Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, (3): 1103-1109.
- [4] LIU Hong-chao, LI Xing-yuan, ZHENG Yun-hai. Stability Analysis for HVDC/AC Power Systems Based on Modal Series Method[A]. In: IEEE-PES/CSEE International Conf on Power System Technology[C]. 2004: Singapore.
- [5] 郑云海, 李兴源. 基于模态级数法的交直流系统的非线性模式交互作用分析[J]. 电工电能新技术, 2005, 24(3): 45-48.
ZHENG Yun-hai, LI Xing-yuan. The Analysis of Nonlinear Modal Interaction for HVDC/AC Power Systems Based on Modal Series Method[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2005, 3(24): 45-48.
- [6] 郑云海, 李兴源, 刘红超. 带功率调制的交直流系统非线性模态分析[J]. 2006, 18(1): 1-4.
ZHENG Yun-hai, LI Xing-yuan, LIU Hong-chao, Nonlinear Modal Analysis for HVDC/AC Power System with Power Modulation[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities, 2006, 18(1): 1-4.
- [7] 倪以信, 张宝霖, 陈寿孙. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
NI Yi-xin, ZHANG Bao-lin, CHEN Shou-sun. Theory and Analysis of Dynamic Power System[M]. Beijing: Qinghua University Press, 2002.
- [8] Starrett S K, Fouad A A. Nonlinear Measures of Mode-Machine Participation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 389-394.

(下转第 42 页 continued on page 42)

- [1] 王雁凌, 张粒子, 杨以涵. 边际电价结算和发电方报价价格结算竞价机制的经济分析[J]. 电网技术, 2004, 28(11):14-18.
WANG Yan-ling, ZHANG Li-zi, YANG Yi-han. An Economic Analysis of Competition Mechanisms for System-margin-pricing and Pay-as-bid[J]. Power System Technology, 2004, 28 (11) :14-19.
- [2] Son Y S, Baldick R, Leek H, et al. Short Term Electricity Market Auction Game Analysis; Uniform and Pay-as-bid Pricing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4):1990-1998.
- [3] Ren Y, Galiana F D. Pay-as-bid Versus Marginal Pricing Part I: Strategic Generator Offers[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4):1771-1776.
- [4] 孙志明, 黄民翔, 迟峰. 基于实验经济学的电力市场竞争模式研究[J]. 华北电力, 2004, 32(10): 7-10.
- [5] Miller J H. The Co Evolution of Automata in the Repeated Prisoner's Dilemma[J]. Journal of Economic Behavior and Organization, 1996, 29(3): 87-112.
- [6] Luna F, Stefansson B. Economic Simulations in Swarm[M]. Social Sciences Documentation Publishing House, 2004.4-5.
- [7] Koesrindartoto D, SUN Jun-jie, Tesfatsion L. An Agent-based Computational Laboratory for Testing the Economic Reliability of Wholesale Power Market Designs[A]. In:IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. San Francisco(United States):2005. 931-936.
- [8] Papageorgiou G. Modeling of Electricity Markets Using Software Agents[D]. Manchester: Manchester Institute of Science and Technology, 2002.
- [9] Bagnall A J, Smith G D. A Multi-agent Model of the UK Market in Electricity Generation[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2005, 9(5): 522-536.
- [10] 周庆, 陈剑. 基于Swarm的供应链多主体聚集模型及其仿真[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(6):1308-1313.
ZHOU Qing, CHEN Jian. Swarm-based Aggregation Model and Simulation of Multi-agent in Supply Chain [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(6):1308-1313.
- [11] 魏一鸣, 张林鹏, 范英. 基于 Swarm 的洪水灾害演化模拟研究[J]. 管理科学学报, 2002, 5(6):39-46.
WEI Yi-ming, ZHANG Lin-peng, FAN Ying. Swarm Based Study on Complexity in Flood Disaster [J]. Journal of Management Sciences in China, 2002, 5(6):39-46.
- [12] 罗批, 司光亚, 胡晓峰. Swarm 及其平台下构建特定民意模型的探讨[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1):5-7.
LUO Pi, SI Guang-ya, HU Xiao-feng. Swarm & Discussion of the Method of Constructing the Special Public Opinion Model[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(1): 5-7.
- [13] Chen H, Wong K P. Analyzing Oligopolistic Electricity Market Using Coevolutionary Computation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1):1-10.

收稿日期: 2007-05-08; 修回日期: 2007-08-06

作者简介:

刘 贞(1973-), 男, 博士研究生, 主要从事博弈论与经济学仿真及其在电力市场中的应用研究;

E-mail: cqsureness@tom.com

任玉琬(1944-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、电力经济方面的研究;

曹 端(1965-), 男, 工程师, 主要从事电力技术经济研究。

(上接第 21 页 continued from page 21)

- [9] Thapar J, Vittal V, Kliemann W, et al. Application of the Normal Form of Vector Fields to Predict Interarea Separation in Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997: 844-850.
- [10] 邓集祥, 赵丽丽. 励磁调节器对模态非线性相关作用的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(1):69-74.
DENG Ji-xiang, ZHAO Li-li. Study on Effect of Excitation Regulator on Nonlinear Modal Interaction[J]. Power System Technology, 2005, 29(1):69-74.
- [11] Jang G, Vittal V. Effect of Nonlinear Modal Interaction on Control Performance: Use of Normal Forms Technique In Control Design Part I: General Theory and Procedure[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 401-407.
- [12] 邓集祥, 赵丽丽. 大干扰下主导低频振荡模式作用的再研究[J]. 东北电力学报, 2004, 24(6):1-5.
DENG Ji-xiang, ZHAO Li-li. Study Once More on Effect of Critical Low Frequency Oscillation Modes in Large Disturbance Stability[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2004, 24(6):1-5.

收稿日期: 2006-10-23; 修回日期: 2007-02-16

作者简介:

李 蓓(1980-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: libei_9080@163.com

李兴源(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析、稳定和控制在高压直流输电的研究。