

考虑励磁顶值与 PSS 的混沌和分岔现象

贾宏杰, 余贻鑫, 王成山

(天津大学电气自动化与能源工程学院, 天津 300072)

摘要: 电力系统中的混沌对传统的稳定分析和安全控制而言, 是一个巨大的挑战。文中研究了发电机励磁顶值和 PSS 回路对电力系统的振荡失稳和混沌现象的影响。研究表明, 当计及励磁顶值极限时, 或在 PSS 参数配置合理情况下, 可能导致系统 Hopf 分岔(HB)现象不出现或 HB 点与鞍-节分岔(SNB)点十分接近。由于在小扰动稳定框架下, HB 出现是混沌产生的前提, HB 不能出现时, 混沌现象也将消失。合理配置 PSS 参数, 可为系统提供正阻尼, 从而能够显著抑制 HB 及混沌现象的产生。文中的研究也是作为找到有效抑制电力系统振荡失稳和混沌现象措施的一种有益尝试。

关键词: 电力系统; 混沌; 非线性; 分岔

中图分类号: TM 712; O 177.91; O 415.5

0 引言

在电力大系统发展的整个过程中, 稳定性(包括电压稳定性和功角稳定性)问题一直是系统安全运行的重要约束, 有关稳定的研究也一直是世界范围内关注的热点。然而由于其复杂性, 至今仍有一些系统失稳的本质(如电压失稳和电压崩溃)尚未完全弄清, 小扰动失稳模式即为其一。小扰动稳定性的失稳模式, 与各种分岔(bifurcation)现象紧密相关, 早期人们主要借助静态模型(如平衡点方程或潮流方程)来研究失稳模式为单调的现象, 即只涉及到系统鞍-节分岔(saddle node bifurcation, 缩写为 SNB)现象; 当考虑系统动态环节后, 系统将可能遇到 Hopf 分岔(Hopf bifurcation, 缩写为 HB)现象, 相应的失稳为振荡型失稳。近年来, 国内外学者针对具有物理上合理参数的示例系统, 研究发现电力系统中存在更为复杂的临界失稳的模式——混沌(chaos), 且一些文献^[1]的分析结果显示, 在电力系统经受特定扰动后, 完全有可能出现混沌现象。混沌是在“完全确定性的模型下产生的不确定性现象”^[2], 很难对其给出完整、准确的定义。在长期的研究中, 人们只是感性认识到混沌系统 Ψ 所存在的一些典型的性质^[2]: ① Ψ 的运动是有界的(也称为奇异吸引子); ② Ψ 的任何轨道都是不稳定的; ③ Ψ 含有不可数无穷多个稠密轨道; ④ Ψ 的周期轨道是稠密的; ⑤ 轨道对初值有敏感依赖性等。由于混沌现象的复杂性, 它的存在, 将对电力系统传统的失稳预防和安全性监控带来巨大的挑战。

本文首先借助一个简单的电力系统, 给出一个典型的混沌吸引子的例子, 从而表明在某些特定的情况下, 电力系统受小扰动后, 完全可能失稳于混沌; 然后主要研究了电力系统励磁顶值和电力系统稳定器(PSS)对混沌现象的影响, 研究结果表明, 它们都对电力系统的振荡失稳、Hopf 分岔和混沌现象有着显著的影响。

1 典型的电力系统混沌现象

下面将首先选用图 1 所示的 2 机 3 节点系统, 给出一个典型混沌现象的示例。

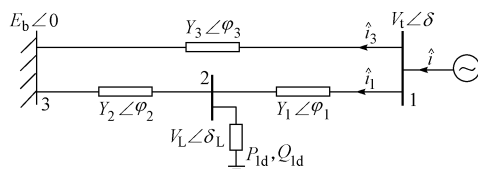


图 1 示例系统

Fig. 1 A simple power system

系统模型如下:

$$\dot{\delta} = \omega_B s_m \quad (1)$$

$$2H\dot{s}_m = -ds_m + P_m - P_g \quad (2)$$

$$T_{a0}'\dot{E}_q' = -E_q' + (x_d - x_d')i_d + E_{fd} \quad (3)$$

$$T_{q0}'\dot{E}_d' = -E_d' - (x_q - x_q')i_q \quad (4)$$

$$T_A\dot{E}_{fd} = -E_{fd} + K_A(V_{ref} - V_t) \quad (5)$$

$$\dot{\delta}_L = \frac{1}{q_1}(Q - Q_{ld} - Q_0 - q_2V_L - q_3V_L^2) \quad (6)$$

$$\dot{V}_L = \frac{1}{p_2}(P - P_{ld} - P_0 - p_3V_L) -$$

$$\frac{p_1}{q_1}(Q - Q_{ld} - Q_0 - q_2V_L - q_3V_L^2) \quad (7)$$

式中 各变量的含义与取值参见文献[1]。

方程(1)~方程(7)可用如下的向量微分方程表示:

$$\dot{x} = f(x, \lambda) \quad (8)$$

其中 状态变量 $x = [\delta, s_m, E_d', E_q', E_{fd}, \delta_L, V_L]^T$;
 λ 为分岔变量,本文 λ 取为 Q_{ld} 。

系统参数设定如下: $T_A = 0.05, K_A = 200$, 初始点 $x_0 = [0.761\ 115\ 5, 0, 1.332\ 678, -0.328\ 327\ 0, 4.198\ 358, 0.239\ 607\ 5, 0.779\ 529\ 6]^T$; 并取如下 2 个 Q_{ld} 值(仅相差 10^{-7}): $Q_{ld(1)} = 1.203\ 462\ 0$ (标么值), $Q_{ld(2)} = 1.203\ 462\ 1$ (标么值), 对系统进行仿真, 结果示于图 2 和图 3。

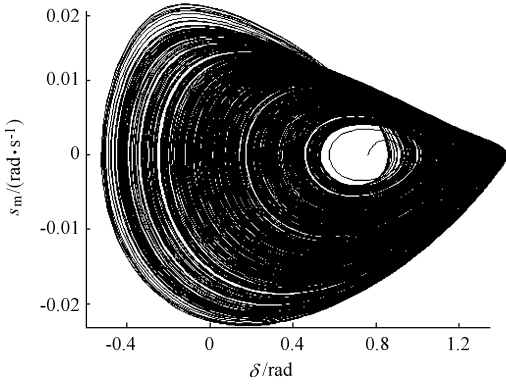


图 2 混沌吸引子的 δ - s_m 相图

Fig. 2 The δ - s_m phase curve of chaotic attractor

从图 2、图 3 不难看出, 图中轨迹满足混沌吸引子的所有特性: 有界性(采用不同精度、不同的数值积分方法, 积分时间超过 20×10^3 s, 均可得到相同的结果, 针对研究需要, 此时间段可认为足够长)、不稳定性(不存在完全相同的轨道窗口)、稠密性(见图 2)和对初值的敏感性(Q_{ld} 相差 10^{-7} , 经过约 25 s, 两轨迹就完全不同, 参见图 3(b) 和图 3(c))。利用 poincaré 截面技术, 绘制系统完整的分岔图, 可进一步证实图 2 和图 3 所给结果确是一个混沌吸引子。这表明电力系统在某些运行情况下, 经小扰动后, 完全可能出现混沌现象。鉴于混沌表现为一种随机振荡, 电力系统运行中绝不允许出现, 因而研究电力系统中各环节与混沌的关系和寻求避免混沌出现的措施势在必行。

2 励磁系统顶值极限对混沌现象的影响

发电机励磁顶值极限是电力系统中重要的非线性环节。文献[3]在研究中发现, 特定的电力系统在未考虑励磁顶值时某些原来失稳的区域, 在考虑励磁顶值后, 将可能出现混沌现象。由于混沌现象只能

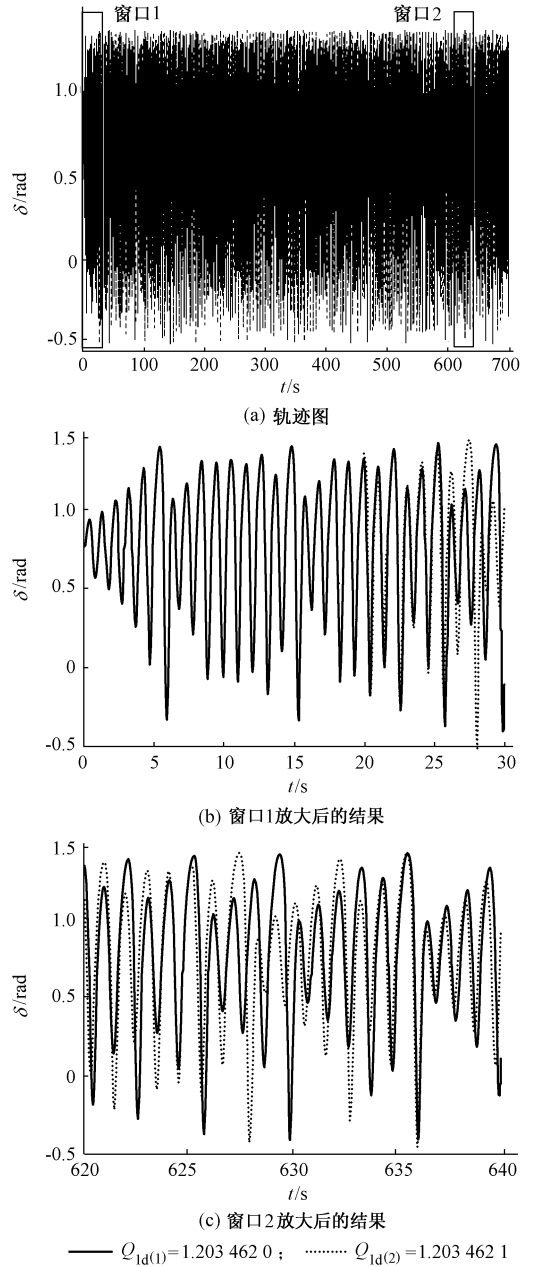


图 3 混沌吸引子的 δ - t 轨迹图

Fig. 3 The δ - t curves of the chaotic attractor

存在于非线性系统中^[2], 系统中存在的任何非线性环节都必然会对混沌现象产生影响。而在以往很多文献的研究中, 并未考虑这些非线性环节的影响, 且已有的许多混沌示例对应的励磁电压取值往往偏高。为此, 本节将详细研究励磁顶值极限对混沌现象的影响。

图 1 中的发电机, 选用图 4 所示的带有顶值极限的快速励磁系统, 并取下限 $E_{\min} = 0$, 改变上限 $E_{\max}$, 研究其对混沌现象的影响, 相应的图示结果见图 5, 数据结果见表 1。

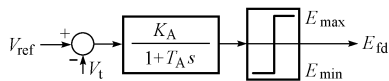
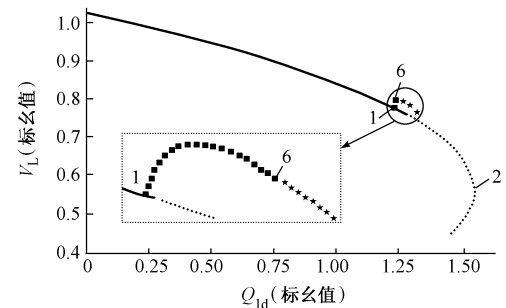
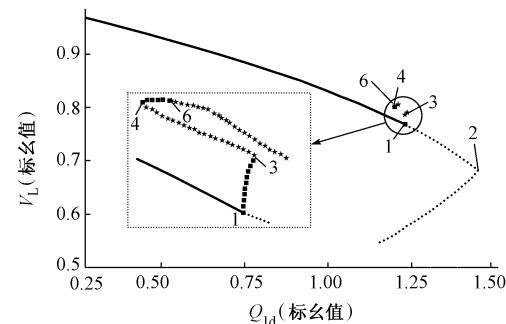


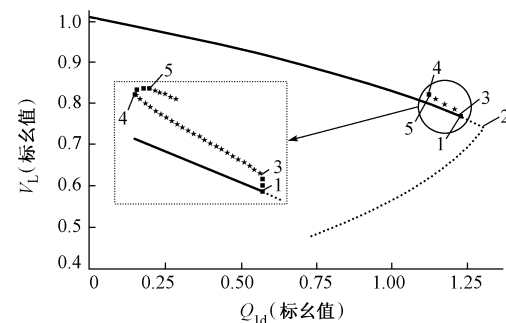
图 4 考虑励磁电压顶值极限后励磁系统模型
Fig. 4 Power system excitation with hard-limit section



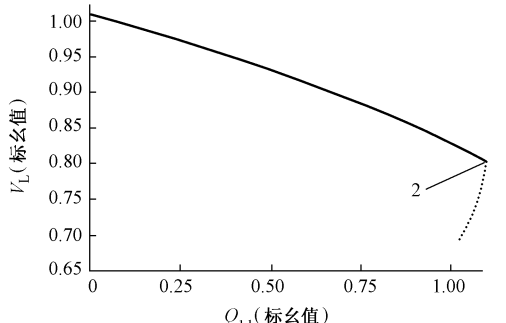
(a) $E_{\max} = \infty$ 时的系统分岔图



(b) $E_{\max} = 5.0$ 时的系统分岔图



(c) $E_{\max} = 4.5$ 时的系统分岔图



(d) $E_{\max} = 4.0$ 时的系统分岔图

1 为 Hopf 分岔点; 2 为鞍-节分岔点; 3 为第 1 次环面折叠分岔点;
4 为第 2 次环面折叠分岔点; 5 为第 3 次环面折叠分岔点; 6 为倍周期分岔点。

图 5 不同 $E_{\max}$ 值下的系统分岔图
Fig. 5 Bifurcation diagram with different $E_{\max}$

表 1 主要分岔点的性质和负荷值
Table 1 Characteristic and power load of different bifurcation

$E_{\max}$ (标么值)	Q_{id} (标么值)					
	Hopf 分岔点	鞍-节 分岔点	第 1 次 环面折叠 分岔点	第 2 次 环面折叠 分岔点	第 3 次 环面折叠 分岔点	倍周期 分岔点
∞	1.228 8	1.552 8				1.274 0
5.0	1.228 8	1.446 2	1.232 1	1.186 1		1.193 5
4.5	1.228 8	1.304 9	1.229 1	1.124 1	1.161 4	
4.0		1.101 8				

由表 1 和图 5 可知:在不考虑励磁顶值极限时,从 Hopf 分岔点出发,稳定的周期轨道经倍周期分岔(period doubling bifurcation, 缩写为 PDB)点(图 5(a)中的 6)后,系统在倍周期分岔点(图 5(a)中的 6)右端出现混沌现象。当 $E_{\max}$ 取值较高时(见图 5(b)),从 HB 出发后,系统将经历 2 次环面折叠分岔(cyclic fold bifurcation, 缩写为 CFB),接着出现倍周期分岔点,并在倍周期分岔点(图 5(b)中的 6)右侧出现混沌现象,此过程与系统未考虑励磁顶值时的分岔规律相仿。但由于励磁顶值的影响,系统出现了 2 次 CFB,且第 1 次 CFB 的发生与励磁电压达到顶值极限直接对应。而当励磁顶值极限变小后,情况就完全不同,当 $E_{\max} = 4.5$,系统在经历了 2 次连续的 CFB 后,并未再出现 PDB,而是再经过 1 次 CFB,稳定的周期轨道直接变为不稳定轨道,系统不再出现混沌现象。当励磁顶值变得更小时,系统中的 Hopf 分岔也将不再出现,系统的稳定运行点直接经由 1 次鞍-节分岔后变为不稳定运行点,系统失稳于单调方式。由于在小扰动稳定场景下,HB 存在是混沌现象出现的前提,HB 的消失,表明混沌现象将不再出现。

3 PSS 对混沌现象的影响

为简单起见,忽略 PSS 的高频信号隔离环节^[4],简化模型如图 6 所示,参数取值见表 2。

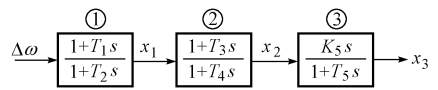


图 6 电力系统电压稳定器模型
Fig. 6 Power system stabilizer model

表 2 PSS 参数取值
Table 2 Some parameters of the PSS

T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
0.10	0.05	0.10	0.05	3.00

PSS 回路增益 $\eta = K_5/T_5$ 主要取决于 K_5 ,取不同的 PSS 增益,研究其对系统稳定和混沌现象的影

响,相应的计算结果示于图 7 和表 3。

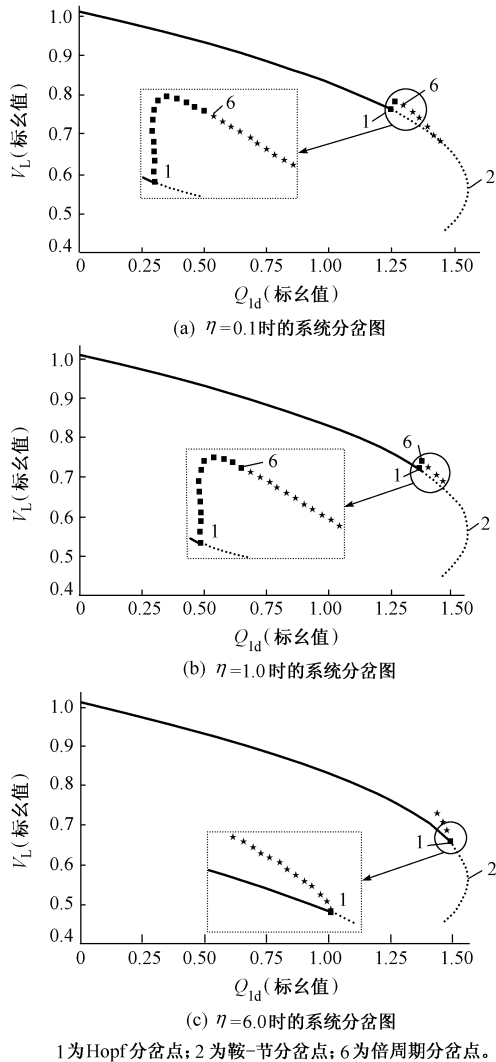


图 7 不同 η 值的系统分岔图

Fig. 7 Bifurcation diagram with different η

表 3 PSS 不同增益下,系统 HB 点和 SNB 点处的负荷值

Table 3 Load of the HB and SNB point under different PSS gains

η	Q_{ld} (标么值)		Hopf 分岔点与鞍-节分岔点的差值
	Hopf 分岔点	鞍-节分岔点	
0	1.228 8	1.552 8	0.324 0
0.1	1.246 5	1.552 8	0.306 3
1.0	1.358 2	1.552 8	0.194 6
6.0	1.480 1	1.552 8	0.072 7

PSS 在正常运行情况下,当输入信号为 $\Delta\omega$ 时,其回路与励磁系统配合后,将为发电机提供一个与 $\Delta\omega$ 近似成正比的转矩^[4](正阻尼转矩),从而可抑制系统振荡失稳的出现,在小扰动稳定性场景中,它有助于阻止电力系统中 HB 的发生。因 HB 的出现是电力系统混沌现象出现的前提,阻止 HB 的产生,即

等价于阻止混沌现象的出现,下面的计算结果可以验证这一结论。

当 PSS 增益较小时(如 $\eta=0.1$ 或 1.0),其分岔图与没有 PSS 时形状完全相似,即稳定周期轨道经 PDB 点后变为不稳定轨道,并出现混沌吸引子,只是羽状曲线的顶端随 K_s 的增大不断向左端移动,稳定周期轨道不断缩短。在 $\eta\approx 2.1$ 时,稳定周期轨道将完全消失,余下的不稳定周期轨道将向左倾斜,如图 7(c)所示,此时系统不再出现混沌现象。在 K_s 不断增大过程中,系统的 HB 点不断向 SNB 点靠近,表明由 HB 约束的系统稳定区域不断扩大,如 $\eta=6.0$ 的稳定域比 $\eta=0$ 的稳定域增大了近 $1/4$ 。有理由认为,在 PSS 参数合理配置时,HB 点可能与 SNB 点非常接近。

4 结论

a. 电力系统的非线性环节,如励磁系统的顶值极限等,对混沌现象的影响很大,研究中应予以考虑。

b. 当计及励磁系统的顶值极限时,可能导致 HB 点不出现或与 SNB 点距离非常近,这可能是为什么在仿真研究中经常能够捕捉到 HB,而在实际电力系统故障录波中很少发现的一个原因。由于在小扰动稳定框架下,HB 的出现是混沌出现的前提,HB 不能出现时,混沌现象也将消失。即或 HB 不消失,励磁系统顶值同样影响混沌现象的出现。

c. 配置合理的 PSS,可为电力系统提供正阻尼作用,能够抑制 HB 及混沌现象的发生。同时在 PSS 参数配置合理情况下,HB 点与 SNB 点可能非常接近,以至于在系统出现事故时,很难将两者加以区分,这可能也是为什么在忽略非线性环节的仿真研究中经常能够捕捉到 HB,而在实际电力系统故障录波中很少发现的另一个原因。

参考文献

1 Rajesh K G, Padiyar K R. Bifurcation Analysis of a Three Node Power System with Detailed Models. Electrical Power and Energy Systems, 1999, 21(5): 375 ~392

2 Thompson J M T, Stewart H B. Nonlinear Dynamic and Chaos. Great Britain: John Wiley & Sons Ltd, 1986

3 Ji W, Venkatasubramanian V. Hard-Limit Induced Chaos in a Fundamental Power System Model. Electrical Power and Energy Systems, 1996, 18(5): 279~295

- 3 Crainic E D, Horisberger H P, Do X D, et al. Power Network Observability: The Assessment of the Measurement System Strength. IEEE Trans on PWRs, 1990, 5(4): 1267~1276
- 4 李碧君, 薛禹胜, 顾锦汶, 等 (Li Bijun, Xue Yusheng, Gu Jinwen, et al). 电力系统状态估计问题的研究现状和展望 (Status Quo and Prospect of Power System State Estimation). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(11)
- 5 广东省电力局中心调度所, 国家电力公司电力自动化研究院 (Guangdong Electric Power Dispatching Center, Nanjing Automation Research Institute). 广东省网 EMS 工程出厂验收大纲 (FAT of EMS for Guangdong Power System). 1999
- 6 广东省电力局中心调度所, 国家电力公司电力自动化研究院 (Guangdong Electric Power Dispatching Center, Nanjing Automation Research Institute). 广东省网 EMS 工程现场验收大纲 (SAT of EMS for Guangdong Power System). 2000

叶 周, 男, 工程师, 从事调度自动化系统的研究与开发工作。

卢建刚, 男, 工程师, 从事调度自动化系统的应用与开发工作。

顾 全, 男, 工程师, 从事调度自动化系统的研究与开发工作。

A PRACTICAL OBSERVABILITY ANALYSIS ALGORITHM FOR STATE ESTIMATION IN EMS OF GUANGDONG POWER SYSTEM

Ye Zhou¹, Lu Jiangang², Gu Quan¹, Bu Lili²

(1. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

(2. Guangdong Electric Power Dispatching Center, Guangdong 510600, China)

Abstract: Based on the theory of observability analysis of Jacobian matrix calculation in fast decoupled state estimation, a new algorithm for observability analysis in state estimation in EMS for Guangdong Power System is presented in this paper. The algorithm uses the logic method to simulate the process of eliminating elements of Jacobian matrix in state estimation, and transforms the node injection measurements into the measurements of branches, thus the determination whether the whole system is observable can be quickly and exactly made. The pseudo measurements are added to unobservable parts to make the whole system observable. The practical application in Guangdong Power System shows the algorithm is feasible and effective.

Keywords: state estimation; fast decoupled algorithm; observability analysis