

发电机模型对分岔理论研究动态电压稳定性的影响分析

高金峰¹, 张晓¹, A. P. Hu²

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Auckland, Private Bag 92019, New Zealand)

摘要: 以一种典型电力系统结构为对象,应用非线性动力学理论中的分岔分析方法与通用分岔分析软件 Auto97,探讨了发电机数学模型对分岔分析方法研究动态电压稳定性的影响问题。使用分岔分析软件,得到了5种发电机模型下电力系统的电压随原动机功率发生分岔的分析结果。在给出的电力系统结构与负荷模型下,采用不同的发电机模型,电力系统的电压随原动机功率的改变,均发生一系列在定量与定性上均不相同的分岔过程,但使电力系统产生动态电压不稳定的首要原因—即在到达 SNB点以前均先出现 HB点却是相同的。

关键词: 发电机模型; 电力系统; 电压稳定; 鞍结分岔; Hopf分岔

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)17-0020-05

0 引言

随着电力系统向大机组、大电网、高电压和远距离输电发展,以及世界上一些大电网相继发生多起以电压崩溃为特征的电网瓦解事故,电力系统的电压稳定性问题越来越受到广泛关注。

由于电力系统的强非线性特性,电压稳定以及失稳机理的研究必然要求非线性分析方法的介入。作为分析非线性系统结构稳定性的基本方法之一的分岔理论,近年来在电力系统电压稳定问题研究中得到了广泛应用。文献[1,2]探讨了单机无穷大(OM B)系统在各种负荷模型下的分岔情况;文献[3]讨论了一个 OM B系统的分岔情况与负荷的关系;文献[4~7,10]研究了计及发电机暂态电势和励磁系统详细模型的系统分岔情况。文献[11~14]也应用分岔理论给出了电力系统的一些分岔分析结果。这些研究均展现出了电力系统的复杂非线性动力学特性。

目前所有的基于分岔理论研究电力系统动态电压稳定性机理的分析过程与结果,都是使用特定的系统结构、发电机模型以及负荷特性,通过计算机模拟获得的。作为一种以结构稳定性理论(对参数敏感)为基础、通过计算机模拟研究动态电压稳定性的方法,在系统结构、负荷特性一定的前提下,采用不同的发电机模型必定会对分析结果产生影响。本文在已有研究的基础上,借助一个典型的电力系统结构及负荷特性,采用不同的发电机模型,对电力系统的动态行为进行了研究。目的是要考察发电机模型对分析结果的定量、定性影响,以便得到分岔分析

方法以及分岔分析软件 Auto97^[9]研究电力系统电压稳定性的适用性和有效性,找出发电机模型对分析结果定量、定性影响的规律,为电压失稳的机理、性质研究以及研究工具的选择提供参考。

1 分岔理论与 Auto97分析软件

分岔理论主要研究确定性系统随参数改变可能引起的解结构和稳定性的变化过程。当系统参数变动经过某些临界值时,系统的定性性态或解结构(如平衡状态、周期运动的数目和稳定性等)会发生突然变化,这种变化称为分岔,变化的参数称为分岔参数,相应临界值对应的点为分岔点^[10]。

电力系统中常见的分岔现象有鞍结分岔(SNB)和 Hopf分岔(HB)。在鞍结分岔点,随分岔参数的变化,系统的稳定平衡点与不稳定平衡点重合,雅可比矩阵出现一零特征值。在电压稳定分析中,当分岔参数取为负荷功率,观察对象为节点电压时,鞍结分岔点对应于 P-V(或 Q-V)曲线的拐点,即通常认为的网络可传输的最大传输功率。运行于鞍结分岔点邻域的系统,如果分岔参数(负荷功率)进一步增加,系统平衡点消失,对应于系统出现电压崩溃。Hopf分岔发生在系统雅可比矩阵的特征值有一对具有零实部的共轭复根出现时。随着分岔参数的变化,如果从稳定的平衡点分岔出一个稳定的极限环和一个不稳定的平衡点,则称为超临界 Hopf分岔;如果从不稳定的平衡点分岔出一个稳定的平衡点和一个不稳定的极限环,则称为亚临界 Hopf分岔。在电压稳定分析中,Hopf分岔的出现,将导致系统出现振荡,进而系统维持周期振荡或振幅不断加大最

终导致系统振荡失稳。

为解决应用分岔理论对非线性系统进行分岔分析时,定量搜索分岔点、判断分岔点及确定分岔点处新分支方向等数值分析难题,加拿大康考迪亚大学的 Doedel等人,于1980年在美国加利福尼亚理工学院 Keller编写的用于解决常微分方程边界值问题的程序的基础上,开发了分岔分析软件包 AUTO^[2],后来经过 AUTO86版、AUTO94版的不断升级和改进,目前使用比较广泛的版本是 AUTO97。分岔分析软件 Auto97的算法主要采用延拓算法,延拓所用的初值由牛顿法给出,计算分岔点时则采用直接法。

2 系统与负荷模型

文中采用一个简单而典型的 2机 3节点电力系统模型。该模型在多篇文献 [4~7, 10]中已有具体的描述,只给出简单的介绍。模型由 1个无穷大母线、1台发电机、1条负荷母线和 1条联络线组成,如图 1所示。主要参数已在图中标出。参数数值选取与文献 [6, 7]相同。

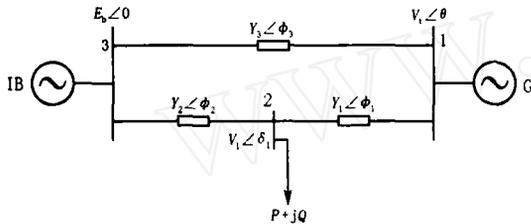


图 1 系统模型示意图

Fig 1 Sketch map of system model

2.1 发电机模型

在计及发电机转子 d轴励磁绕组 f及阻尼绕组 D的次暂态和暂态电磁过程、q轴阻尼绕组 Q和 g的次暂态及暂态电磁过程时,发电机转子绕组的电磁暂态过程可采用定子绕组电动势变化来描述^[8],其方程式为:

$$\begin{cases} T_{d0} \frac{dE_q}{dt} = E_{fd} + (x_d - x_d') I_d - E_q \\ T_{d0}' \frac{dE_q}{dt} = -E_q + (x_d - x_d') I_d + E_q + T_{d0} \frac{dE_q}{dt} \\ T_{q0} \frac{dE_d}{dt} = -E_d - (x_q - x_q') I_q \\ T_{q0}' \frac{dE_d}{dt} = -E_d - (x_q - x_q') I_q + E_d + T_{q0} \frac{dE_d}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

转子的运动方程式为:

$$\begin{cases} 2H \frac{d\delta_m}{dt} = -d\delta_m + P_m - P_g \\ \frac{d}{dt} = \omega_B \delta_m \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_d 、 E_q 、 E_d' 和 E_q' 分别为发电机 d轴和 q轴的暂态电势、次暂态电势; E_{fd} 为励磁电压; x_d 、 x_d' 、 x_q 、 x_q' 和 x_q'' 分别为发电机 d轴和 q轴的同步电抗、暂态电抗、次暂态电抗; T_{d0} 、 T_{d0}' 、 T_{d0}'' 和 T_{q0} 分别为时间常数; P_m 和 P_g 分别为发电机的原动机功率和电磁功率; δ 为发电机电势相量与同步转轴之间的夹角; ω_B 为系统角频率, δ_m 为发电机滑差 ($\delta_m = (\omega - \omega_B) / \omega_B$); H 为惯性常数; d 为阻尼系数。

2.2 励磁系统

发电机的励磁系统采用可控硅快速励磁的电压自动调节系统,其模型为:

$$T_A E_{fd} = -E_{fd} + K_A (V_{ref} - V_t) \quad (3)$$

2.3 负荷模型

负荷节点采用描述大扰动下感应电动机动态行为的 W alve综合负荷模型。其模型为:

$$P_s = P_{ld} \quad (4)$$

$$Q_s = Q_{ld} \quad (5)$$

$$P_d = P_0 + p_1 V_L + p_2 \dot{V}_L + p_3 V_L \quad (6)$$

$$Q_d = Q_0 + q_1 V_L + q_2 \dot{V}_L + q_3 V_L^2 \quad (7)$$

其中: $P_d + jQ_d$ 为动态感应电动机负荷; $P_0 + jQ_0$ 为感应电动机的恒功率部分; $p_1, p_2, p_3, q_1, q_2, q_3$ 为负荷系数; $P_s + jQ_s$ 为与感应电动机并联的静态恒功率负荷。总负荷为 $P + jQ$:

$$P = P_s + P_d = P_{ld} + P_0 + p_1 V_L + p_2 \dot{V}_L + p_3 V_L \quad (8)$$

$$Q = Q_s + Q_d = Q_{ld} + Q_0 + q_1 V_L + q_2 \dot{V}_L + q_3 V_L^2 \quad (9)$$

2.4 系统综合模型

将系统各元件模型与网络方程联立后,可得到描述系统的综合模型,一般形式为:

$$\dot{x} = F(x, u) \quad (10)$$

其中: F 定义了发电机、励磁系统和负荷的动态行为。为系统参数(控制参数)向量, $x = [\delta_m, E_q, E_d, E_d', E_q', V_L, \dot{V}_L]^T$ (发电机采用 6阶模型时)代表状态变量。

3 发电机模型对分析结果的影响

3.1 不同发电机模型下的分析结果

以式(1)为基础,本文使用 5种发电机模型对系统的分岔行为进行了分析。具体使用的 5种发电机模型的参数如表 1中所示。

针对式(10)形式的典型3节点系统,在电路结构与参数都保持不变的情况下,采用表1给出的5种发电机模型,得到了系统的动态电压稳定性结果。

图2分别给出了一组系统在相同结构、负荷及励磁,5种不同发电机模型情况下的节点电压随发电机的原动机功率变化时的分岔图。

图中的实线与虚线分别表示稳定、不稳定平衡

点处 V_1 的数值随参数 P_m 变化的情况。图中的点1、4分别是稳定和 unstable 平衡点的出发点;曲线拐点3是SNB点。实心圆与空心圆分别对应着出现Hopf分岔的稳定与不稳定周期解。

表2是对图2中分岔曲线上关键点的具体描述。

表1 发电机模型及处理

Tab 1 Generator models employed in this paper

发电机模型	发电机阶数	考虑电势	近似处理
模型	6阶	E_q, E_d, E_q, E_d	
模型	5阶	E_q, E_d, E_q	不考虑阻尼绕组g,故可近似认为 $x_d = x_q$
模型	4阶	E_q, E_d	不考虑转子d、q轴阻尼绕组D、Q的次暂态电磁过程,故可近似认为 $x_d = x_d, x_q = x_q$
模型	3阶	E_q	只考虑转子d轴励磁绕组暂态电磁过程,以 E_q 变化表示,故可近似认为 $x_d = x_d, x_q = x_q = x_q$
模型	2阶	E_q 恒定	在模型的基础上,不考虑励磁电压变化和转子阻尼绕组的作用,故可认为 E_q 恒定,并近似有 $x_d = x_d = x_d = x_q = x_q = x_q$

表2 $= P_m$ 时主要分岔点的性质和数值

Tab 2 Characteristic and P_m value of different bifurcation when $= P_m$

发电机模型	Hopf分岔类型	P_m (标么值)			
模型	超临界分岔	HB ² 1. 571	SNB ³ 3. 257	PDB ⁵ 1. 904	PDB ⁶ 1. 921
模型	亚临界分岔	HB ² 1. 667	SNB ³ 3. 257	CFB ⁵ 1. 287	PDB ⁶ 1. 289
模型	超临界分岔	HB ² 1. 473	SNB ³ 3. 257	PDB ⁵ 1. 772	PDB ⁶ 1. 793
模型	亚临界分岔	HB ² 1. 579	SNB ³ 3. 255	CFB ⁵ 1. 016	PDB ⁶ 1. 022 PDB ⁷ 1. 024
模型	亚临界分岔	HB ² 1. 701	SNB ³ 2. 391	PDB ⁵ 1. 160	PDB ⁶ 1. 162

注:每一个表格中的数字上标与图中的点分别对应

3.2 分析结果的共性与差异

由图2可知,在本系统中,无论采用何种发电机模型,随着参数 P_m 的变化,在到达SNB点以前均先出现HB点,这是分析结果所具有的共性;但所得结果的差异是明显的,首先是随 P_m 的变化出现HB点的 P_m 值不同,再就是不同的发电机模型,随 P_m 的变化依次出现不同的分岔序列或非线性现象。

当计及q轴g绕组暂态时,即发电机采用4阶或6阶模型时(如图2(c)和2(e)),所得的分岔分析结果有相似性:系统在到达SNB前先出现超临界Hopf分岔;从HB点出发后,系统经历稳定的周期振荡,接着出现PDB点,并在PDB点(如图2(c)和2(e)中的5、6)右侧出现混沌现象,继而出现电压失稳。其中采用4阶模型分析时得到的结论与文献

[6]详细的单参数分岔分析结论相同。

当不计及q轴g绕组暂态时,即发电机采用3阶或5阶模型时(如图2(b)和2(d)),所得的分岔分析结果具有相似性:系统在到达SNB前先出现亚临界Hopf分岔,系统经历不稳定的周期振荡;接着经历1次CFB(如图2(b)和2(d)中的5),出现PDB点(如图2(b)和2(d)中的6),并在其右侧出现混沌现象,继而出现电压失稳。其中采用5阶模型分析时得到的结论与文献[7]详细的分岔分析结论相同。

当发电机采用2阶发电机模型时(如图2(a)),系统在到达SNB前先出现亚临界Hopf分岔,继而出现PDB,经由混沌现象导致电压失稳。这与文献[4,5]的单参数分岔分析结论相同。

总体上,同一个实际的电力系统,当采用不同的发电机模型进行描述时,使用同一种理论与分析工具,确实得到了完全不同的分析结果。

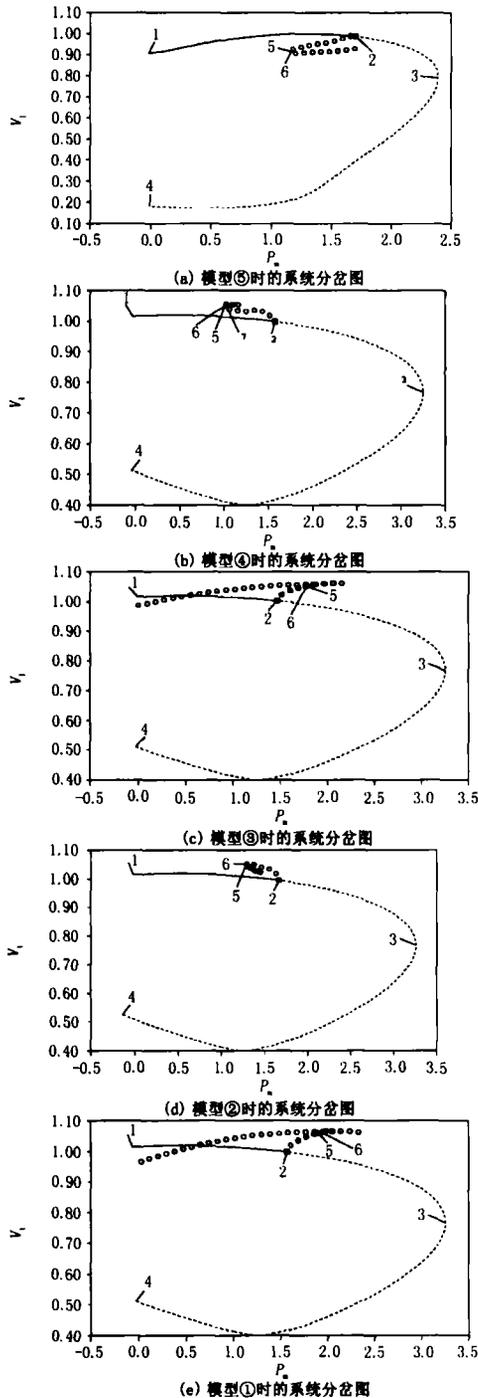


图2 P_m 时不同发电机模型下的系统分岔图

Fig 2 Bifurcation diagram with different generator models when P_m

3.3 发电机模型对研究动态电压稳定性影响的分析

无论是分岔理论,或者是分岔分析软件,都是以

确定的系统方程为分析对象。当系统方程改变时,系统的分岔结果定量上必定会发生改变,但系统的定性性质则可能发生改变或保持不变。

就使用分岔理论研究电力系统的电压稳定性的机理而言,发电机模型的不同,就是改变了系统方程,所得定量结果一定会发生某种程度的改变。所发生的定量改变已被前面的结果所证实。

如若不同的发电机模型使得分析结果虽然有定量上的变化,但都有大致相同的定性特征,这说明系统的电压稳定性并没有随着发电机模型的改变而改变。使用分岔理论或分岔分析软件来研究电力系统的电压稳定性,对发电机模型而言,定性上具有鲁棒性。

从本文给出的结果来看,尽管各种模型下的定量结果有差异,但使电力系统发生动态电压不稳定的首要原因——即在到达 SNB 点以前均先出现 HB 点却是相同的。这一点在定性上揭示出影响本文电力系统电压稳定性的原因——发生 Hopf 分岔,并没有因为使用不同的发电机模型而改变。这也就是说,使用分岔理论分析电力系统的电压稳定性时,可以使用任一种发电机模型而不影响定性分析结果。

4 结论

以典型的 2 机 3 节点电力系统模型为对象,使用非线性分岔理论与通用分岔分析软件 AUTO97,研究了 5 种发电机模型下电力系统的节点电压随发电机原动机功率 P_m 变化的分岔情况。本文的研究结果表明:在同一个电力系统结构下,采用不同的发电机模型使得分析结果不仅有定量上的变化,而且还有分岔过程定性结果细节上的变化。这说明电力系统的电压稳定性随着所选择的发电机模型的改变而改变。这也提示人们应该注意,在使用分岔理论分析电力系统的电压稳定性时,应该考虑发电机模型的选择问题。但总体上看,无论采用哪一种发电机模型,都给出了影响电力系统电压稳定性的原因都是首先出现 Hopf 分岔的相同结果,可以得到使用分岔理论或分岔分析软件研究电力系统的电压稳定性,对发电机模型而言,定性上具有鲁棒性的结论。

参考文献:

- [1] Pal M A, Sauer P W, Lesieutre B C. Static and Dynamic Nonlinear Loads and Structural Stability in Power Systems [J]. IEEE Trans, 1995, 83 (11): 1562-1572
- [2] 彭志炜,胡国根,韩帧祥.应用分叉理论研究负荷特性

- 对电力系统电压稳定性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 408-411.
- PENG Zhi-wei, HU Guo-gen, HAN Zhen-xiang Analysis for Effects of the Load Characteristics on the Power System Voltage Based on Bifurcation Theory [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 408-411.
- [3] 金敏杰, 高金峰. 一种典型电力系统模型的电压稳定分岔分析 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(21): 45-50.
- J N M in-jie, GAO Jin-feng Bifurcation Analysis for Voltage Stability of a Typical Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(21): 45-50.
- [4] Abed E H, Wang H O, Alexander J C, et al Dynamic Bifurcations in a Power System Model Exhibiting Voltage Collapse [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1993, 3(5): 1169-1176.
- [5] Varaiya P, Wu F W, Tan C W. Bifurcation, Chaos, and Voltage Collapse in Power Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(11): 1484-1495.
- [6] Rajesh K G, Padiyar K R. Bifurcation of a Three Node Power System with Detailed Models [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1999, 21(5): 375-393.
- [7] Lem A P, Caizares A C. Multi-parameter Bifurcation Analysis of Power Systems [A]. North American Power Symposium (NAPS). Cleveland (Ohio): 1998.
- [8] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 清华大学出版社, 2002.
- NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin Theory and Analysis of Dynamic Power System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [9] Doedel E J, Fairgrieve T F, Sanstede B, et al AUTO97: (User's Manual) Continuation and Bifurcation Software for Ordinary Differential Equations [Z]. 1997.
- [10] 刘韶峰, 高金峰, 李鹏. 基于 W alve 负荷模型的励磁系统多参数分岔分析 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 62-66.
- LI U Shao-feng, GAO Jin-feng, LI Peng Multi-parameter Bifurcation Analysis of Excitation System with the W alve Aggregated Load Model [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 62-66.
- [11] 贾宏杰, 余贻鑫, 王成山. 电力系统混沌现象及相关研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 26-30.
- JIA Hong-jie, YU Yi-xin, WANG Cheng-shan Chaos Phenomena in Power System and Its Studies [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 26-30.
- [12] 王庆红, 周双喜. 电力系统微分代数模型奇异诱导分岔分析 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 18-22.
- WANG Qing-hong, ZHOU Shuang-xi Singularity Bifurcation in Power System Differential Algebraic Model [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 18-22.
- [13] 王庆红, 周双喜. 电力系统奇异摄动模型霍普夫分岔分析 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 1-6.
- WANG Qing-hong, ZHOU Shuang-xi Hopf Bifurcation Analysis of Power System Singularly Perturbed Ordinary Differential Model [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 1-6.
- [14] 彭志炜, 胡国根, 韩帧祥. 有载调压变压器调整对电力系统电压稳定性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 408-412.
- PENG Zhi-wei, HU Guo-gen, HAN Zhen-xiang The Power System Voltage Stability Affected by On-load Tap Changer [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 408-412.

收稿日期: 2006-04-01

作者简介:

高金峰 (1963 -), 男, 博士, 教授, 研究方向为非线性系统分析与控制等; E-mail: infrastructure@163.com

张晓 (1981 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制;

A. P. Hu (1965 -), 男, 博士, 高级讲师, 研究方向为电力系统稳定与控制, 非接触感应能量传输及功率电子学等。

Influences of generator models on the dynamic voltage stability based on bifurcation theory

GAO Jin-feng¹, ZHANG Xiao¹, A. P. Hu²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Auckland, Private Bag 92019, New Zealand)

Abstract: Based on a typical power system topology, the influences of generator model selections on the voltage stability analysis are presented in this paper. Dynamic nonlinear bifurcation theory and software package AUTO97 are used in the study. Five types of generator models are considered and their corresponding voltage bifurcation results are obtained by varying the input power to the generator. Detailed numerical simulation results show that even under the same power system circuit and load conditions, the power system voltage undergoes different bifurcation phenomena in both the characteristics and magnitudes. However, all the bifurcation diagrams show that Hopf bifurcation point appears before the SNB (Saddle-node Bifurcation) point, which reveals the principal reason for voltage instability of the power system.

Key words: generator models; power system; voltage stability; saddle-node bifurcation; Hopf bifurcation