

文章编号:1671-6833(2005)02-0027-05

倍周期分岔和环面分岔对电力系统电压稳定性的影响

高金峰, 张 晓

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 应用非线性动力学分岔分析方法与软件,在对鞍结分岔导致电压失稳进行分析的基础上,针对基于 WALVE 综合负荷模型的典型 3 节点电力系统,进行分岔分析.分析过程表明,同一电力系统当采用不同的发电机模型时,可能发生亚临界 Hopf 分岔或超临界 Hopf 分岔;同时给出了系统走向电压失稳的两种不同方式:连续倍周期分岔经混沌和环面分岔因环面破裂走向电压失稳.采用时域仿真方法,研究了两种方式导致电压失稳的演变过程.

关键词: 电力系统; 电压稳定; Hopf 分岔; 倍周期分岔; 环面分岔

中图分类号: TM 132 文献标识码: A

0 引言

电力系统稳定按其物理本质可分为功角稳定和电压稳定两大类^[1],人们通常将研究的重点放在功角稳定研究上,而对由于电力系统本身的复杂性所产生的电压稳定性问题,由于受相关理论和研究手段的限制,一直还处于理论探讨和研究的起步阶段.随着我国电力系统结构的日趋复杂,大批坑口电站和水电站的建设,将出现一些长距离重负荷的输电网络.因此,在我国尽快深入开展电压稳定性以及失稳机理的研究,对保证电力系统的安全、可靠运行具有重要意义.

由于电力系统的强非线性,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^[2,3]探讨了单机无穷大(OMB)系统在各种负荷模型下的分岔情况;文献^[4]讨论了一个 OMB 系统的分岔情况与负荷的关系;文献^[5~10]研究了计及发电机暂态电势和励磁系统详细模型的系统单参数或双参数分岔情况,展现了电力系统复杂的非线性动力学特性.

本文作者在已有研究的基础上,采用分岔分析方法和变步长四阶龙格-库塔算法,对文中给出的电力系统模型的电压稳定性进行了详细的分析,以期对电压失稳的机理、方式、性质有更深入

的了解,为电压稳定性研究提供参考.

1 系统与负荷模型

采用图 1 所示的 2 机 3 节点电力系统模型.该模型是进行电压稳定动态机理研究常见的一种模型,在文献^[5~10]中已有具体的描述,这里只给出简单的介绍.

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,其示意图见图 1,模型中的主要参数已标在图中,参数数值选取与文献^[7,8]相同.

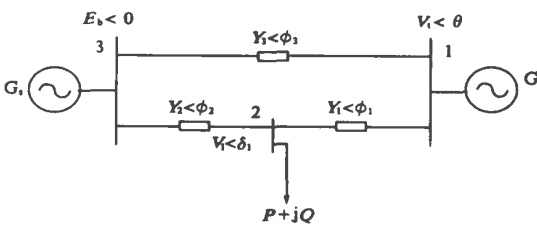


图 1 系统模型

Fig. 1 Sketch map of system model

系统模型如下:

$$T_{d0}'\dot{E}_q' = E_{fd} + (x_d - x_d')I_d - E_q';$$
$$T_{d0}''\dot{E}_q'' = -E_q'' + (x_d' - x_d'')I_d + E_q' + T_{d0}'\dot{E}_q';$$
$$T_{q0}'\dot{E}_d' = -E_d' - (x_d - x_q')I_q;$$
$$T_{q0}''\dot{E}_d'' = -E_d'' - (x_q' - x_q'')I_q + E_d' + T_{q0}'\dot{E}_d';$$
$$2H_m\dot{\omega}_m = -\omega_m + p_m - p_g;$$

收稿日期:2005-02-10;修订日期:2005-03-10

作者简介:高金峰(1963-),男,河南省项城县人,郑州大学教授,博士,主要从事非线性系统理论与控制方面的研究.

$$\delta = \omega_b s_m;$$
$$T_A \dot{E}_{fd} = -E_{fd} + K_A(V_{ref} - V_t);$$
$$\dot{\delta}_L = \frac{1}{q_1}(Q - Q_d - Q_0 - q_2 V_L - q_3 V_L^2);$$
$$V_L = \frac{1}{p^2}(P - P_{ld} - P_0 - p_3 V_L) -$$
$$\frac{p_1}{p^2 q_1}(Q - Q_d - Q_0 - q_2 V_L - q_3 V_L^2).$$

系统模型的一般形式可表示为

$$\dot{x} = F(x, \lambda) \tag{1}$$

其中 F 定义了发电机、励磁系统和负荷的动态行为, λ 为系统参数(控制参数)向量. 当发电机采用 6 阶模型时, 式(1)的状态变量为

$$x = [\delta \ s_m \ E_q' \ E_q'' \ E_d' \ E_d'' \ E_{fd} \ \hat{\delta}_L \ V_L]^T.$$

而当发电机为 5 阶模型时, 状态变量为

$$x = [\delta \ s_m \ E_q' \ E_q'' \ E_d' \ E_d'' \ E_{fd} \ \hat{\delta}_L \ V_L]^T.$$

2 仿真结果与电压失稳机理分析

2.1 分岔理论

分岔理论主要研究系统随参数改变引起的解结构和稳定性的定性变化过程. 当动态系统参数变动经过某些临界值时, 系统定性性态(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, 相应临界值对应的点为分岔点^[10,11]. 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, 系统的稳定平衡点和不稳定平衡点重合, 雅克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, 将导致系统电压崩溃. Hopf 分岔发生在系统雅克比矩阵的特征值有一对具有零实部的共轭复数出现时. 随着参数变化, 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变化而最终导致失稳.

2.2 连续倍周期分岔导致电压失稳

图 1 所示系统中, 当发电机采用 6 阶模型, 系统参数 λ 取发电机的原动机功率 P_m 时, 使用 AU-TO^[9] 非线性分岔分析软件做出的节点 2 电压随

原动机功率 P_m 变化的分岔图如图 2 所示, 表 1 给出了图 2 中各分岔点的情况.

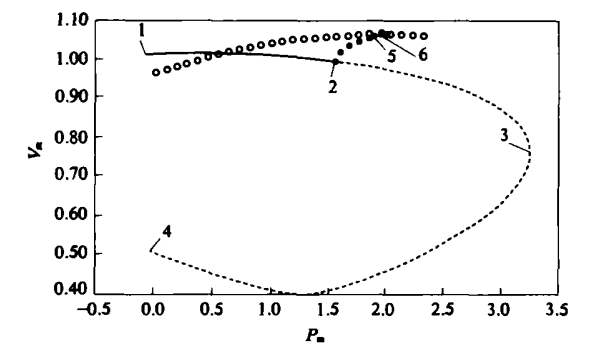


图 2 $\lambda=P_m$ 时系统分岔图
Fig. 2 Bifurcation diagram when $\lambda=P_m$

表 1 $\lambda=P_m$ 时主要分岔点的性质和数值
Tab. 1 Characteristic and P_m value of different bifurcation when $\lambda=P_m$

HB 类型	HB ²	SNB ³	PDB ⁵	PDB ⁶
超临界分岔	1.571	3.257	1.904	1.921

说明: 表格中的数字上标与图中的点分别对应.

图中的实线与虚线分别表示稳定、不稳定平衡点处 V_L 的数值随参数 P_m 变化的情况; 点 1、4 分别是稳定和不稳定平衡点处 V_L 的出发点; 曲线拐点 3 是 SNB 点. 实心圆与空心圆分别表示 V_L 的稳定与不稳定的周期解(在相平面中表现为极限环). 由图 2 和表 1 可以看出, 系统随着参数 P_m 的变化, 在到达 SNB 点以前已经出现了超临界 Hopf 分岔, 从 HB 点出发后, 系统经历稳定的周期振荡, 接着出现倍周期分岔(Period Doubling Bifurcation, 缩写为 PDB)点, 并在 PDB 点(如图 2 中的 5、6)右侧出现混沌现象, 继而出现电压失稳.

图 3 给出了当发电机采用 6 阶模型, P_m 取值 1.56、1.58、1.91 和 1.925 时系统的时域仿真. 图 3(a) 表示当参数 $P_m=1.56$ 时负荷节点 2 处的电压随时间变化的运动轨迹. 图 3(b) 表示当参数 $P_m=1.58 > HB^2$ 时, 系统将有一稳定的极限环出现, 图 3(c) 为此时负荷节点 2 处的电压随时间变化的运动轨迹. 因此, 系统在该分岔参数下发生了超临界 Hopf 分岔现象. 这和使用分岔分析方法所得结果是一致的. 图 3(d) 表示负荷节点 2 处的电压幅值随参数 P_m 变化的情况, 由此图可以看出, 系统由超临界 Hopf 分岔发生电压振荡后随着参数 P_m 的增加, 振幅不断加大, 最终当 $P_m=1.935$ 时, 电压急剧下降, 导致电压失稳. 图 3(e) 表示当参数

$P_m=1.91$ 时,系统电压临近失稳时出现了倍周期分岔现象,一个系统一旦发生了倍周期分岔必导致混沌如图 3(f) ($P_m=1.925$) 所示.

2.3 环面分岔因环面破裂导致电压失稳

图 1 所示系统中,当发电机采用 5 阶模型,系统参数 λ 取为 AVR 控制参考电压 V_{ref} 时,系统的分岔图如图 4 所示,表 2 给出了图 4 中各分岔点

的情况.

表 2 $\lambda=V_{ref}$ 时主要分岔点的性质和数值

Tab. 2 Characteristic and $\lambda=V_{ref}$ value of different bifurcation when $\lambda=V_{ref}$

HB 类型	HB ¹	CFB ²	TR ³
亚临界分岔	0.896	0.951	0.94

说明:表格中的数字上标与图中的点分别对应.

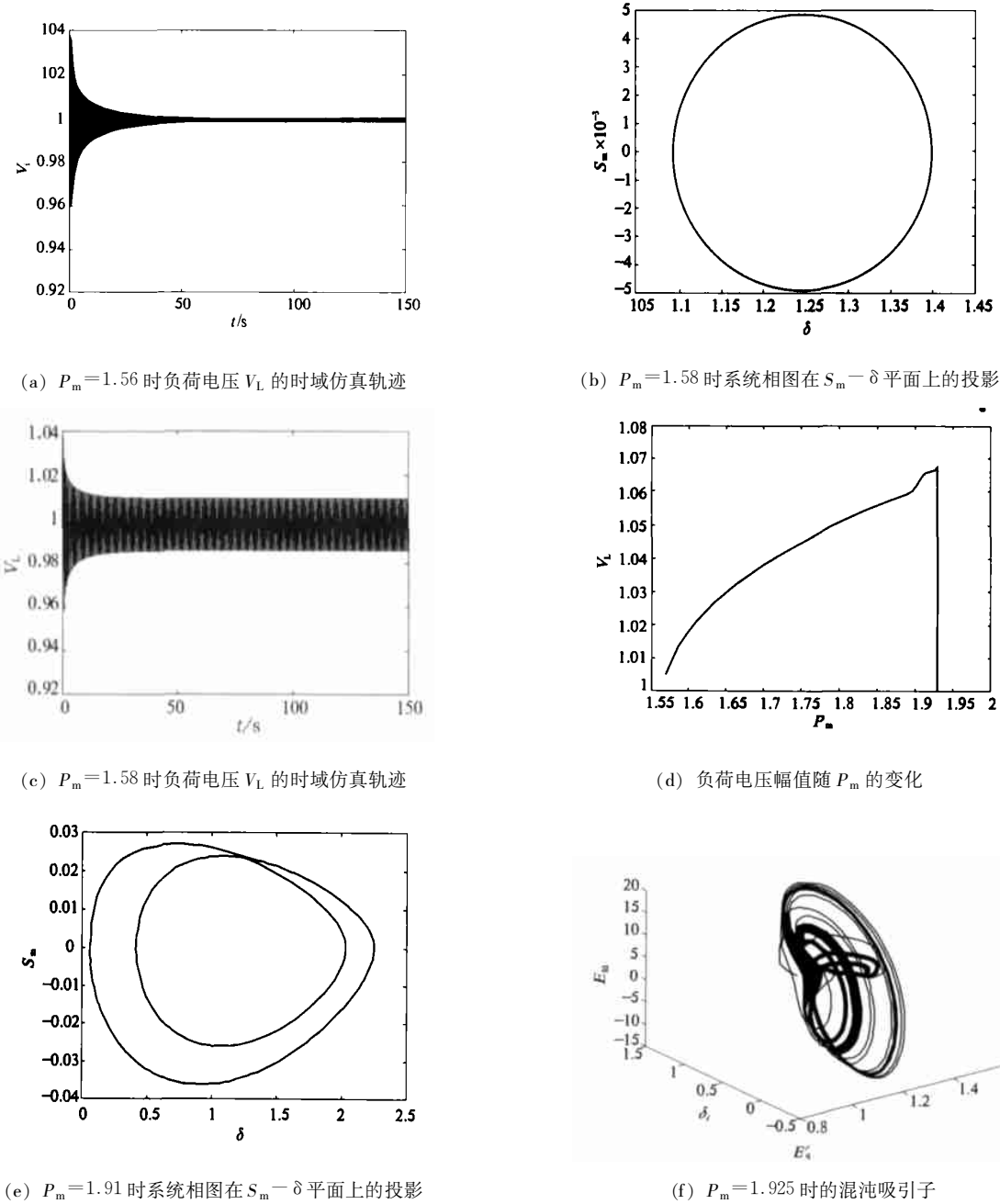


图 3 $\lambda=P_m$ 系统时域仿真结果

Fig. 3 Time domain simulation result when $\lambda=P_m$

由图 4 和表 2 可以看出,系统随着控制参数 V_{ref} 的减小出现亚临界 Hopf 分岔,产生不稳定的周期振荡,接着经历一次环面折叠分岔(Cyclic

Fold Bifurcation, 缩写为 CFB), 如图 4 中的 2, 继而出现环面分岔(Torus Bifurcation, 缩写为 TB) 点, 并在 TR 点, 如图 4 中的 3, 左侧出现电压失稳.

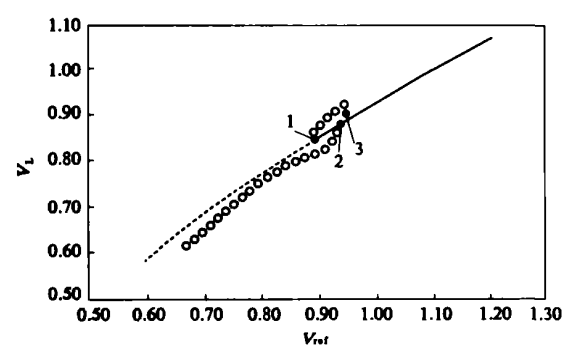
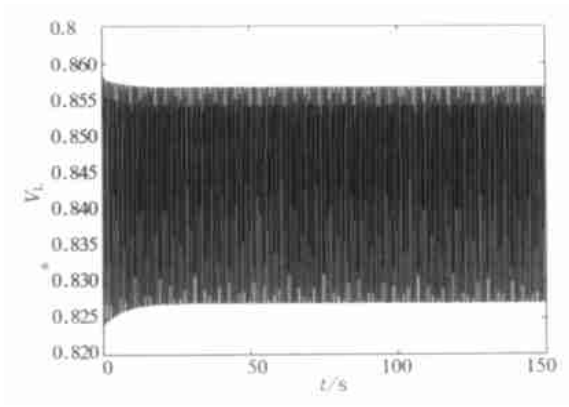


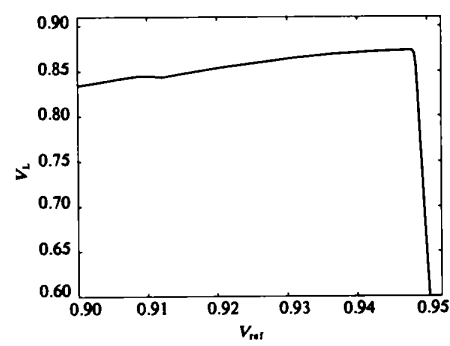
图 4 $\lambda=V_{\text{ref}}$ 时系统分岔图

Fig 4 Bifurcation diagram when $\lambda=V_{\text{ref}}$

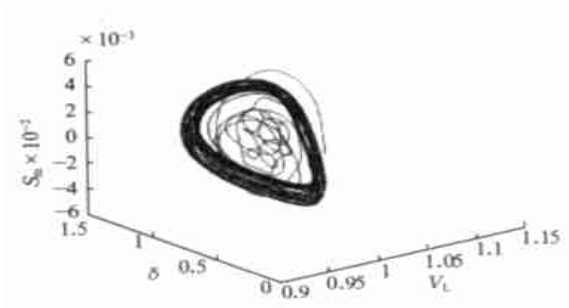
图 5 给出了当发电机采用 5 阶模型时, V_{ref} 取值 0.90、0.92、0.94 和 0.95 时系统的时域仿真. 图 5(a) 表示当参数 $V_{\text{ref}}=0.90>\text{HB}^1$ 时负荷节点 2 处的电压随时间变化的运动轨迹. 由于该分岔是亚临界的, 因此无法捕捉到稳定的极限环曲线. 图 5(b) 表示负荷节点 2 处的电压幅值随参数 V_{ref} 的变化情况. 由此可以看出, 系统由亚临界 H_{bpf} 分岔发生电压振荡后, 随着参数 V_{ref} 的增加, 振幅逐渐变大, 最终当 $V_{\text{ref}}=0.95$ 时, 电压急剧下降, 导致失稳如图 5(f) 所示. 同时, 数值分析表明, 在电压临界失稳前, 系统出现了环面分岔, 如图 5(c)、



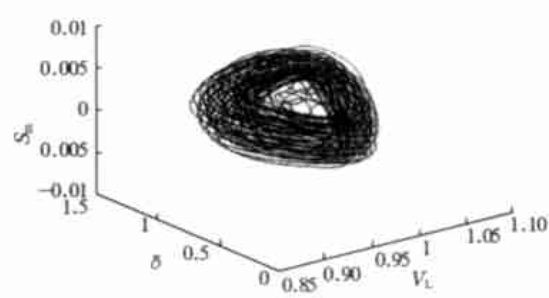
(a) $V_{\text{ref}}=0.90$ 时负荷电压 $\lambda=V_L$ 的时域仿真轨迹



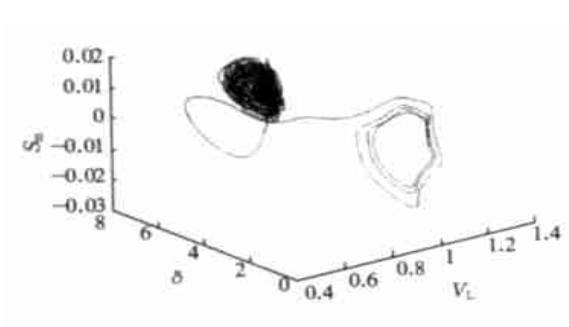
(b) 负荷电压幅值随 $\lambda=V_{\text{ref}}$ 的变化



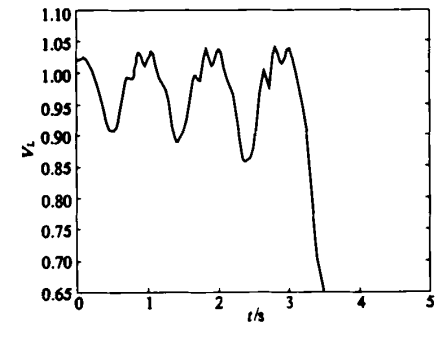
(c) $V_{\text{ref}}=0.92$ 时的不变环面



(d) $V_{\text{ref}}=0.94$ 时的不变环面



(e) $V_{\text{ref}}=0.95$ 时环面破裂



(f) $V_{\text{ref}}=0.95$ 时负荷电压 V_L 的时域仿真轨迹

图 5 $\lambda=V_{\text{ref}}$ 时系统时域仿真结果

Fig. 5 Time domain simulation result when $\lambda=V_{\text{ref}}$

(d)、(e)所示,最终由于环面的破裂导致电压失稳(如图5(f)).这些也印证了分岔分析的正确性.图5(c)表示 $V_{ref}=0.92$ 时,系统产生的不变环面,随着 V_{ref} 的增加,环面逐渐被填充同时负荷电压 V_L 的振幅不断变大,如图5(d)所示,此时 $V_{ref}=0.94$,当 V_{ref} 增加到0.95时,环面破裂,如图5(e)所示,导致电压失稳.

3 结论

本文作者在文献[7,8]的基础上,把发电机模型扩展到六阶,应用分岔分析方法和变步长的四阶龙格-库塔算法对一种典型的电力系统模型的电压稳定性进行了详细的分析.研究表明,同一电力系统当采用不同的发电机模型时,可能发生亚临界Hopf分岔或超临界Hopf分岔;同时给出了导致电压失稳的两种方式:连续倍周期分岔经混沌导致电压失稳和环面分岔因环面破裂导致电压失稳,并利用时域仿真的方法,完整地给出了电力系统在这两种方式下导致电压失稳的演变过程.

参考文献:

[1] 余贻鑫,王成山.电力系统稳定性的理论与方法[M].北京:科学出版社,1999.
[2] PAL M A, SAUER P W, LESIEUTRE B C. Static and dynamic nonlinear loads and structural stability in power sys-

tems[J]. IEEE Trans, 1995, 83(11): 1562~1572.
[3] 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.
[4] 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
[5] ABED E H, WANG HO, 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.
[6] 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.
[7] RAJESH K G, PADAYAR K R. Bifurcation of a three node power system with detailed models[J]. Electrical Power and Energy Systems, 1999, 21(5): 375~393.
[8] LERM A P, CANIZARES A C. Multi-parameter bifurcation analysis of power systems[R]. Cleveland: North American power Symposium(NAPS), 1998.
[9] 刘韶峰,高金峰,李鹏.基于WALVE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): 58~62.
[10] 肖焱,郭永基,唐云,等.典型电力系统模型的双参数分岔分析[J].电力系统自动化,2000,24(6): 1~6.
[11] 陆启韶.分岔与奇异性[M].上海:上海科技教育出版社,1995.

Influences of Period Doubling Bifurcation and Torus Bifurcation on the Voltage Stability of a Typical Power System

GAO Jin-feng, ZHANG Xiao

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract : Based on the simple analysis of monotonic decrease of voltage caused by saddle node bifurcation, this paper studies the voltage stability of a typical power system with the WALVE aggregated load model using the bifurcation analysis method and software of nonlinear dynamics. The results show if the generator model employed in the same power system is different, the system will undergo supercritical Hopf bifurcation or subcritical Hopf bifurcation and there are two modes which will result in voltage instability of the power system. They are period doubling bifurcation leading to chaos and torus bifurcation leading to torus cracking. Using time domain simulation, the evolution leading to voltage instability of two modes is deeply studied.

Key words : power system; voltage stability; Hopf bifurcation; period doubling bifurcation; torus bifurcation