

静止无功补偿器对电压稳定影响的局部分叉分析

李珊, 康积涛, 刘伟, 崔军飞

(西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

Local Bifurcation Analysis of Influence of SVC on Voltage Stability

LI Shan, KANG Jitao, LIU Wei, CUI Junfei

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: The dynamic characteristic of static var compensator (SVC) its own greatly influences voltage stability of power system. A dynamic analysis method for voltage stability, which remedies the defect of transfer errors in segmentation method and can provide satisfied calculation accuracy and speed, is proposed. Using the proposed method, the influences of time constant of SVC on voltage stability are analyzed under different instability conditions. Analysis results show that when power system loses stability monotonously, the larger the time constant of SVC, the faster the process of losing stability; when power system falls into oscillation instability, the larger the time constant of SVC, the higher the oscillation amplitude as well. The boundary curve of bifurcation is solved by two-parameter continuation, and it shows that the higher the amplification of SVC, the larger the boundary value of bifurcation.

KEY WORDS: static var compensator; local bifurcation; continuation method; voltage stability; equilibrium solution manifold; time domain simulation

摘要: 静止无功补偿器(static var compensator, SVC)自身动态特性对电压稳定有着重大的影响。提出了一种电压稳定动态分析方法,解决了分割法存在的交接误差问题,并具有满意的计算精度和速度。利用该方法,在不同的失稳模式下,分析了 SVC 间常数对电压稳定的影响。通过分析发现,当系统单调失稳时,时间常数越大,失稳速度越快;当系统振荡失稳时,时间常数越大,振荡幅度越大。利用双参数延拓法,求取了分叉边界曲线,结果表明, SVC 放大倍数越大,分叉边界值也越大。

关键词: 静止无功补偿器; 局部分叉; 延拓法; 电压稳定; 平衡解流形; 时域仿真

0 引言

电力系统本质上是非线性动态系统,电压稳定性态的改变,实质上是一种从稳态走向分叉的过程。分叉理论是对非线性动态系统进行结构稳定性机理分析的有力工具,在电压稳定研究中得到了广

泛的应用^[1-4]。Ian Dobson 在文献[5]中首次给出了鞍结分叉导致电压崩溃的机理解释,并在文献[6]中给出了一种最近鞍结分叉点的计算方法;文献[7]明确指出系统在到达鞍结分叉点之前,可能会因其他类型局部分叉的发生而失稳;文献[8]较为全面和严谨地从理论上研究了局部分叉的应用表现。

时域仿真具有直观、信息丰富等优点,是电力系统动态分析最主要的方法之一^[9-10]。但现有方法存在计算速度慢、机时多、精度不够高等缺点,且编程实现困难。静止无功补偿器(static var compensator, SVC)是柔性交流输电系统(flexible AC transmission systems, FACTS)家族重要成员之一,常被用来改善电能质量和提高系统的稳定性。目前人们已经普遍认识到, SVC 可以增加系统的极限传输能力,延迟鞍结分叉的发生^[11-12],但是对其参数对电压稳定的影响仍缺乏深入细致的研究。

本文将通过将代数方程对时间 t 求导,提出一种求解非线性微分-代数方程组的方法。新方法计算精度高、速度快,且容易编程实现。随后分析 SVC 对平衡解流形及分叉点的影响。并采用不同的局部分叉点,利用新方法研究 SVC 时间常数对电压稳定的影响。最后,利用双参数延拓法,求取分叉边界曲线。

1 电压稳定动态分析方法

从数学上,电力系统的动态特性可由下列微分-代数方程组描述

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y, \mu) \\ 0 = g(x, y, \mu) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为微分状态变量; y 为代数状态变量; μ 为控制参数。

在进行动态电压稳定分析时, 将 μ 处理成常量 μ_0 , 最常用的数值方法主要有分割法和隐式梯形法。前者对微分方程和代数方程分割求解, 不可避免地存在着交接误差问题; 后者每一步都要形成和求解雅克比矩阵, 花费时间多、编程实现复杂, 且只有二阶精度。为了克服以上缺点, 本文采用一种将代数变量微分化的方法。将代数方程组两边对 t 求导可得

$$0 = \frac{\partial g}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{dy}{dt} \quad (2)$$

通过移项变换, 可以得到一个全微分方程的方程组

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y, \mu_0) \\ \frac{dy}{dt} = -\left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial x} f(x, y, \mu_0) \end{cases} \quad (3)$$

为了说明新算法的有效性, 下面结合算例对分割法、隐式梯形法以及新方法进行对比分析。

设系统模型为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = 2x - y \\ 0 = x - y \end{cases}$$

取初值: $x_0=y_0=1.0000$; 时间步长 $h=0.05$ s。分割法和新方法中, 微分方程组采用 4 阶龙格-库塔法求解。不同方法的数值计算结果如表 1 所示。可以看出, 分割法交接误差严重, 且有不断增大趋势; 新方法具有很高的精度, 计算结果比隐式梯形法好得多。由于新方法求解过程不存在迭代计算过程, 其计算速度必然快于分割法和隐式梯形法。

表 1 不同方法计算结果

Tab. 1 The results of different methods

时间 t/s	x			
	分割法	梯形法	新方法	精确解
0.00	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
0.50	1.669 5	1.648 9	1.648 7	1.648 7
1.00	2.787 1	2.718 8	2.718 3	2.718 3
1.50	4.652 9	4.483 1	4.481 7	4.481 7
2.00	7.767 7	7.392 1	7.389 1	7.389 1
2.50	12.967 8	12.188 8	12.183 1	12.183 1
3.00	21.649 2	20.098 1	20.085 6	20.085 6
最大误差/%	1.563 6	0.012 5	0.000 0	—

用新方法进行电压稳定动态分析时, 计算步骤归纳如下:

1) 利用单参数延拓法追踪电力系统的平衡解流形, 并搜索局部分叉点。

2) 根据研究目的, 确定一个待分析的运行点(如

鞍结分叉点、霍普夫分叉点、奇异诱导分叉)。

3) 设系统在 $t=t_0$ 时刻受扰, 利用新方法进行时域仿真分析, 以便观察系统状态变量随时间的变化情形。

2 局部分叉基本概念

对于含参数的系统, 当参数变动并经过某些临界值时, 系统的定性性质(如平衡点个数、解的周期轨道等)会发生突然变化, 这种变化称为分岔^[13]。根据所考虑的系统动态特性的范围, 可以将分岔分为局部和全局分岔 2 大类。局部分叉研究的动态行为只限于某一平衡点附近的领域内, 鞍结分叉、霍普夫分叉以及奇异诱导分叉是电力系统中最常见的 3 种局部分叉。

系统的平衡点由式(4)给出, 所有的平衡点构成平衡解流形。

$$\begin{cases} 0 = f(x, y, \mu) \\ 0 = g(x, y, \mu) \end{cases} \quad (4)$$

在平衡点邻域内, 将式(1)线性化可得

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & f_y \\ g_x & g_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (5)$$

若 g_y 非奇异, 由上式代换出描述系统动力学特性的微分方程组为

$$\Delta \dot{x} = [f_x - f_y g_y^{-1} g_x] \Delta x = A \Delta x \quad (6)$$

1) 鞍结分叉(saddle node bifurcation, SNB)。

在一个鞍结分叉中, 由于一个接近的不稳定平衡点, 使得一个稳定平衡点的吸引域收缩, 当 2 个平衡点结合并消失时, 稳定性也消失。实际中发生的大多数电压崩溃现象都与鞍结分叉相关^[14]。文献[11]证明了在 g_y 非奇异时, 系统微分动力学和微分-代数方程形式下的向量场具有相同的鞍结分叉点。

2) 霍普夫分叉(Hopf bifurcation, HB)。随着参数的变化, 当有一对共轭负特征值穿越虚轴时, 便会发生霍普夫分叉。在一个霍普夫分叉中, 一个平衡点和一个极限环相互作用, 使得这个平衡点的稳定性消失^[9]。依据这个相互作用的特性, 有 2 类霍普夫分叉: 超临界霍普夫分叉和亚临界霍普夫分叉。霍普夫分叉的发生会导致系统振荡失稳。

3) 奇异诱导分叉(singularity induced bifurcation, SIB)。当控制参数的变化使 g_y 奇异时, 动态系统雅克比矩阵 A 不再有数学定义, 它的一个特征值改变符号, 从复平面的一端无穷大变化到另一端无穷大, 系统失去小信号稳定性, 表现为单调失稳。这

种变化形成了一个分叉，称为奇异诱导分叉。本质上，奇异诱导分叉是约束流形和绝境曲面相交时发生的一种特殊类型的分叉。从技术上讲，绝境曲面上的点不是平衡点，因为在此时系统不能定义。

3 实例模型

实例电力系统模型选自文献[11]，负荷由一远方无穷大电源和一台邻近等值发电机供电，系统接线如图 1 所示。

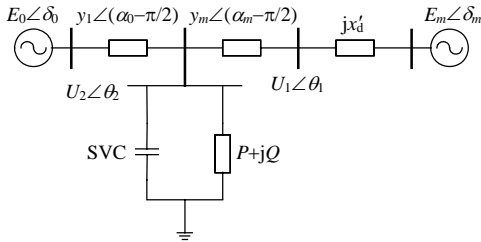


图 1 实例系统

Fig. 1 Example system

负荷选用一般的综合负荷动态模型^[15]，这个模型的动态特性可以描述为

$$\begin{cases} T_p \dot{z}_p = -z_p + P_0(U/U_0)^{\alpha_s} - P_0(U/U_0)^{\alpha_t} \\ T_q \dot{z}_q = -z_q + Q_0(U/U_0)^{\beta_s} - Q_0(U/U_0)^{\beta_t} \end{cases} \quad (7)$$

式中：\$P_0\$、\$Q_0\$ 为系统受扰前初值电压下负荷有功、无功功率；\$\alpha_s\$、\$\beta_s\$ 为有功、无功稳态电压系数；\$\alpha_t\$、\$\beta_t\$ 为有功、无功暂态电压系数；\$z_p\$、\$z_q\$ 为负荷有功、无功恢复功率；\$T_p\$、\$T_q\$ 为有功、无功负荷恢复时间常数；\$U_0\$ 为基准电压。

由于发电机的转子运动特性不是影响电压稳定的主要因素，因此，在电压稳定分析中，一般可对发电机的转子特性作一定的简化，发电机都是用 4 阶模型(双轴模型)^[9]描述

$$\begin{cases} \dot{\delta}_m = \omega - \omega_s \\ M \dot{\omega} = T_m + u_1 E_d' \cos(\theta_1 - \delta_m) / x_d' + u_1 E_q' \sin(\theta_1 - \delta_m) / x_d' - D_m (\omega - \omega_s) \\ T_{d0}' \dot{E}_d' = [(x_d - x_d') u_1 \cos(\theta_1 - \delta_m) - x_d E'] / x_d' + E_{fd} \\ T_{q0}' \dot{E}_q' = -(x_q - x_q') u_1 \sin(\theta_1 - \delta_m) / x_d' - x_q E_d' / x_d' \end{cases} \quad (8)$$

式中：\$E_d'\$、\$E_q'\$ 为发电机 \$d\$、\$q\$ 轴暂态电势；\$x_d\$、\$x_q\$ 为发电机 \$d\$、\$q\$ 轴电抗；\$x_d'\$、\$x_q'\$ 为发电机 \$d\$、\$q\$ 轴暂态电抗；\$T_{d0}'\$、\$T_{q0}'\$ 为发电机 \$d\$、\$q\$ 轴暂态时间常数；\$M\$ 为发电机惯性时间常数；\$D\$ 为发电机阻尼系数；\$T\$ 为发电机输入转矩。

励磁系统在电力系统稳定研究中占据着重要的地位，3 阶模型较详细地表达了其动态，数学表达式^[9]为

$$\begin{cases} T_E \dot{E}_{fd} = -K_E E_{fd} - S_E E_{fd} + U_R \\ T_A \dot{U}_R = -U_R + K_A R_F - K_A K_F E_{fd} / T_F + K_A (u_{ref} - u_1) \\ T_F \dot{R}_F = -R_F + K_F E_{fd} / T_F \end{cases} \quad (9)$$

式中：\$E_{fd}\$ 为励磁系统输出电压；\$U_R\$ 为励磁调节器输出电压；\$u_i\$、\$u_{ref}\$ 为发电机端电压与设定值；\$T_E\$ 为励磁系统时间常数；\$K_E\$ 为与自励磁场有关的常数；\$S_E\$ 为励磁系统饱和效应系数；\$T_A\$、\$K_A\$ 为励磁调节器时间常数与放大倍数；\$T_F\$、\$K_F\$ 为励磁调节器稳定回路时间常数与放大倍数。

SVC 采用一阶模型，其动态特性描述为

$$T_{svc} \dot{B} = -B + K_{svc} (U_1' - U_{ref}) \quad (10)$$

式中：\$T_{svc}\$ 为 SVC 时间常数；\$K_{svc}\$ 为 SVC 放大倍数；\$B\$ 为 SVC 输出电纳；\$U_1'\$ 为节点电压；\$U_{ref}\$ 为参考电压。

各个参数为归算后的标么值，各参数取值如表 2 所示。

表 2 系统参数

Tab. 2 System parameters

\$y_0\$/pu	\$a_0\$/°	\$y_m\$/pu	\$\alpha_m\$/°	\$\alpha_s\$
20.00	-5.00	5.00	-5.00	0.00
\$\alpha_t\$	\$\beta_s\$	\$\beta_t\$	\$T_p\$	\$T_q\$
1.00	1.00	2.00	1.00	1.00
\$T_m\$/pu	\$D_m\$/pu	\$M\$/pu	\$x_d\$/pu	\$x_q\$/pu
1.00	0.05	0.07	0.90	0.85
\$x_d'\$ /pu	\$x_q'\$ /pu	\$T_{d0}'\$/pu	\$T_{q0}'\$/pu	\$E_0\$/pu
0.10	0.10	8.00	0.25	1.00
\$K_A\$	\$T_A\$	\$K_E\$	\$S_E\$	\$T_E\$
25.00	0.20	1.00	0.00	0.35
\$K_F\$	\$T_F\$	\$U_{ref}\$/pu	\$K_{svc}\$	\$T_{svc}\$
0.05	0.35	1.00	5.00	0.20

4 仿真分析

4.1 SVC 对平衡解流形及分叉点的影响

利用单参数延拓法^[16]追踪系统平衡解流形，并搜索分叉点，数值分析结果见图 2 和表 3。不难看出，投入 SVC 在一定程度上有助于提高系统带负荷能力，提高负荷侧电压水平，这有利于电力系统电压稳定性。但是，各个局部分叉点的临界电压也会随之增大，在实际工作中这是一个需要注意的问题。

4.2 时间常数 \$T_{svc}\$ 对电压稳定的影响

系统参数取得同前，分析点分别取鞍结分叉点 SNB1、奇异诱导分叉点 SIB2 和霍普夫分叉点 HB3。设系统受到扰动为负荷的突然增加，增加量 \$\Delta P=0.01\$。利用本文所提的动态分析方法，对应于

不同时间常数的仿真结果如图 3—5 所示。可以看出，在此实例系统中，鞍结分叉和奇异诱导分叉的

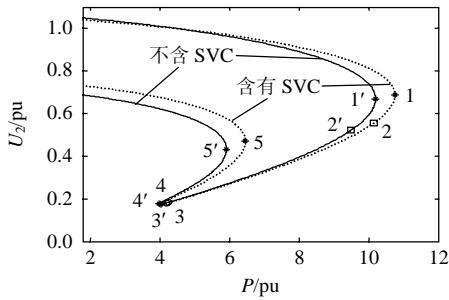


图 2 平衡解流形与分叉点
Fig. 2 Equilibrium solution manifold and bifurcation points

表 3 分叉点计算值

Tab. 3 Bifurcation points values

分叉点	1、1'	2、2'	3、3'	4、4'	5、5'
类型	SNB	SIB	HB	SNB	SNB
无 SVC	Q/pu 2.163 5 U/pu 0.669 2	2.016 1 0.522 4	0.889 5 0.180 4	0.854 0 0.174 8	1.253 9 0.431 8
有 SVC	Q/pu 2.283 2 U/pu 0.686 8	2.151 8 0.554 7	0.901 6 0.181 7	0.852 4 0.175 2	1.369 6 0.469 4

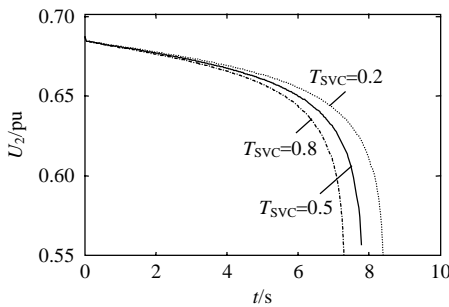


图 3 电压仿真曲线(SNB1)
Fig. 3 Simulation curve of Voltage(SNB1)

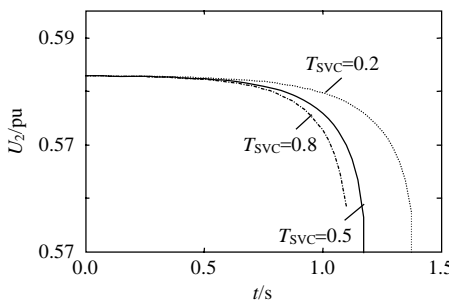


图 4 电压仿真曲线(SIB2)
Fig. 4 Simulation curve of Voltage (SIB2)

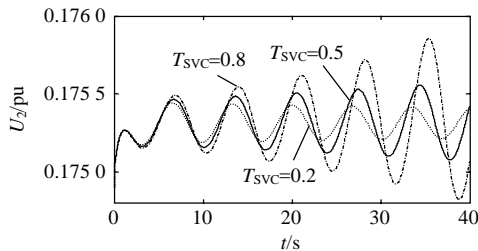


图 5 电压仿真曲线(HB3)
Fig. 5 Simulation curve of Voltage (HB3)

发生会导致该系统单调失稳。奇异诱导分叉发生时系统的崩溃速度远远大于鞍结分叉发生时系统的崩溃速度，且时间常数越大，失稳速度越快。霍普夫分叉会导致系统振荡失稳，且时间常数越大，振荡失稳幅度越大。从这个角度来看，SVC 时间常数越小，越有利于电压稳定。

4.3 放大倍数对电压稳定的影响

分别以含 SVC 系统中的 3 个鞍结分叉点、一个奇异诱导分叉点以及一个霍普夫分叉点为起算点，采用放大倍数 K_{SVC} 和有功功率 P 为控制参数，利用双参数延拓法^[17-18]，求得的分叉边界曲线如图 6 所示。分析图 6 可知，随着 SVC 放大倍数 K_{SVC} 的增大，分叉边界值不断增大。也就是说，在一定的范围内， K_{SVC} 取值越大，越有利于系统的电压稳定。

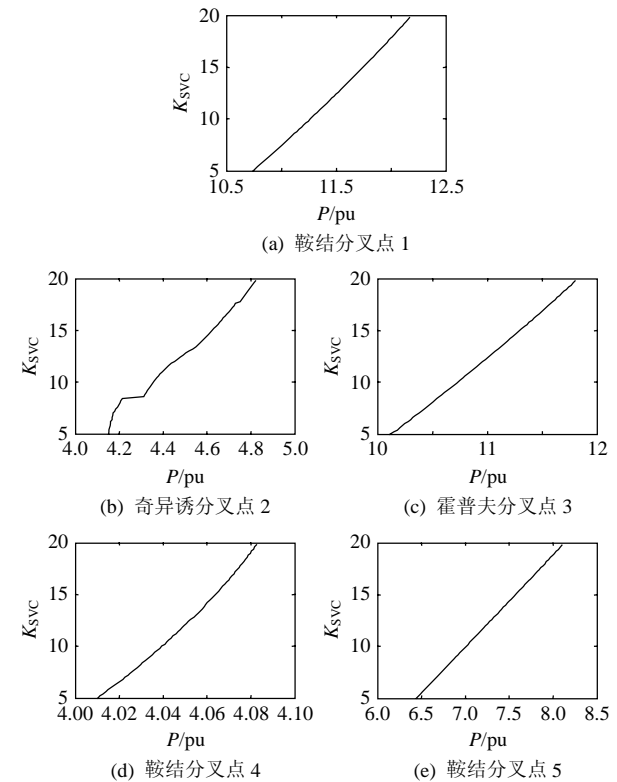


图 6 双参数分叉边界曲线
Fig. 6 Two-parameter bifurcation boundary curve

5 结语

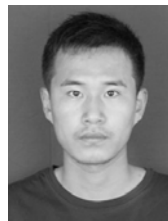
本文提出的将代数变量微分化的方法，经过转化的方程组只含微分方程。该方法从一开始就避免了交接误差的存在，具有很好的精度，并且，该方法在计算中不必进行迭代计算，因此计算速度更快。

SVC 在一定程度上有利于提高系统极限传输能力，有利于提高系统负荷侧电压。但同时也会提高系统临界失稳电压。不同失稳模式下的暂态仿真

表明, SVC 时间常数越大, 单调失稳时的速度越快, 振荡失稳时的振幅越大。通过双参数分叉分析发现, SVC 放大倍数越大, 系统分叉边界值也越大。即小的 SVC 时间常数或者大的放大倍数, 有助于电压稳定。

参考文献

- [1] 魏军强. 非线性分岔理论及其在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊 1): 37-39.
Wei Junqiang. Nonlinear bifurcation theory and its application in power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(S1): 37-39(in Chinese).
- [2] 马幼捷, 张继东, 周雪松. 基于分岔理论的含风电场电力系统静态电压稳定问题研究[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 74-79.
Ma Youjie, Zhang Jidong, Zhou Xuesong. Study on steady state voltage stability of power system containing wind farm based on bifurcation theory[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 74-79(in Chinese).
- [3] 李勇, 张勇军, 刘巍, 等. 电压稳定极限点的快速判定及其灵敏度算法[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 47-51.
Li Yong, Zhang Yongjun, Liu Wei, et al. Fast determination of voltage stability critical point and its sensitivity algorithm[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 47-51(in Chinese).
- [4] 徐珊珊, 汤放奇, 周任军, 等. 不同风电系统动态电压稳定的分岔分析[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 67-70.
Xu Shanshan, Tang Fangqi, Zhou Renjun, et al. Bifurcation analysis on dynamic voltage stability of power grid connected with different wind power systems[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 67-70(in Chinese).
- [5] Ian D, Chiang H D. Towards a theory of voltage collapse in electric power systems[J]. System and Control Letters, 1989(13): 253-262.
- [6] Dobson I, Lu L. New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse[J]. IEEE Trans on PWRs, 1992, 8(3): 240-243.
- [7] Chin-woo T, Matthew V. Bifurcation, chaos, and voltage collapse in power systems[J]. Proceeding of the IEEE, 1995, 33(11): 1484-1496.
- [8] Harry G K, Robert F F. Local bifurcations in power systems: theory, computation, and application[J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(11): 1456-1483.
- [9] 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: 50-51.
- [10] 马世英, 印永华, 汤涌, 等. 短期和中长期电压稳定仿真及评价[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 14-20.
Ma Shiying, Yin Yonghua, Tang Yong, et al. Simulation and evaluation for short term and mid/long term voltage stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 14-20(in Chinese).
- [11] 彭志伟, 胡国根, 韩帧祥. 基于分叉理论的电力系统电压稳定研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 81-82.
- [12] Gu Wei, Milano F, Jiang Ping. Hopf bifurcation induced by SVC controllers: a didactic example[J]. Electric Power System Research, 2007(77): 234-240.
- [13] 陆启韶. 分叉与奇异性[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1995: 3-17.
- [14] Sauer P W, Pai M A. Power system steady-state stability and the load-flow Jacobians[J]. IEEE Trans on Power System, 1990, 5(4): 1374-1383.
- [15] Venkatasubramanian V, Schaettler H, Zaborszky J. Voltage dynamics: study of a generator with voltage control, transmission, and matched MW load[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(11): 1717-1733.
- [16] 杜晓明, 赵冬梅. 改进连续潮流法追踪 PV 曲线[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊 1): 278-281.
Du Xiaoming, Zhao Dongmei. An improved continuation power flow tracing PV curve[J]. Power System Technology, 2006, 30(S1): 278-281(in Chinese).
- [17] Guoyun C, Hill D J, Hui R. Continuation of local bifurcations for power system differential algebraic equation stability model[J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib, 2005, 152(4): 575-580.
- [18] 曹国云, 赵亮. 动态电压稳定模型中二维参数分岔边界的计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 24-27.
Cao Guoyun, Zhao Liang. Calculation of the two-dimensional bifurcation boundary in dynamic voltage stability model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 24-27(in Chinese).



李珊

收稿日期: 2011-03-02。

作者简介:

李珊(1985), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究, E-mail: lishan19851220@163.com;

康积涛(1962), 男, 教授, 博士, 主要从事电力调度自动化系统, 电力系统无功优化计算、电压稳定性和工业监控组态软件的研究工作。

(责任编辑 褚晓杰)