

# 基于延拓法的电力系统动态电压稳定性分析

苏永春<sup>1</sup>, 汪晓明<sup>2</sup>

(1. 江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330006; 2. 江西省超高压公司, 江西 南昌 330006)

**摘要:** 在静态电压稳定性分析中, 常把潮流极限或 PV 曲线的顶点视为电压稳定的临界点, 由于使用这种分析方法时没有计及系统元件的动态特性, 使稳定性分析结果的可信度或多或少受到影响。本文在延拓算法基础上利用小扰动分析法进行动态电压稳定性研究。首先采用带预测-校正步骤的延拓算法追踪系统的平衡解流形, 延拓过程使用局部参数化方法, 预测步骤沿解流形的切线方向进行。由获得的各平衡点出发, 在计及发电机、励磁与调速系统和 SVC 动态的情况下, 利用小扰动分析法分析电力系统的电压稳定性, 系统状态矩阵的形成采用摄动分析方法。算例分析结果表明, 与静态分析法得到的电压稳定极限相比, 使用计及元件动态特性的小扰动分析法所获得的电压稳定极限具有明显的不同。

**关键词:** 电压稳定; 延拓算法; 小扰动分析

## Power system dynamic voltage stability analysis based on the continuation method

SU Yong-chun<sup>1</sup>, WANG Xiao-ming<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China; 2. Jiangxi Superhigh Voltage Electric Power Company, Nanchang 330006, China)

**Abstract:** In static voltage stability analysis, the singular point of the power flow Jacobian or the nose point of PV curve are usually considered as the critical point. As this method does not take the dynamics of the components in the power system into account, the creditability of the results obtained are more or less affected. Based on the continuation algorithm, this paper investigates the dynamic voltage stability using small signal analysis method. First, the equilibrium solution manifold is tracked by a locally parameterized continuation method with a prediction-correction process. The prediction step takes the direction tangent to the solution path. Then, the dynamic stability of each equilibrium point is analyzed using the small disturbance analysis method considering the dynamics of the generators, the excitation system, the speed governor and the SVC. The system state matrix is calculated numerically by applying a small perturbation to each state in turn. Simulation results show remarkable differences in the stability critical point between the small signal perturbation dynamic analysis and the static analysis.

**Key words:** voltage stability; continuation algorithm; small disturbance analysis

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)07-0012-05

## 0 引言

近年来, 电压稳定问题受到更多关注。由于电力需求的不断增长及电网的互连, 受经济和环境的制约, 电力系统的运行越来越接近其极限状态, 电压稳定问题日益突出。过去对电压稳定的研究侧重于静态方面, 提出了许多方法研究电压稳定极限及稳定裕度等问题, 其中比较成熟的方法有灵敏度方法<sup>[1]</sup>、最大功率法<sup>[2]</sup>、特征值分解法<sup>[3,4]</sup>、潮流多解法<sup>[5]</sup>等, 这些静态分析方法由于简单和直观, 因此得到广泛应用。但从本质上看, 电力系统是一个复杂的非线性动态系统, 在数学上对它的完整描述应当采用一组相应的微分-代数方程(DAE), 所有的电压稳定性问题都可以通过分析这组方程得到解决。

但在实际上, 由于完全计及所有电力系统元件动态特性的 DAE 方程组过于复杂, 各种研究电压稳定性的方法都在 DAE 方程组的基础上, 进行了不同程度的简化。静态方法在分析时忽略了电力元件的动态特性, 主要研究潮流方程或经过修改的潮流方程, 它们实质上都是把电力网络的潮流极限作为电压静态稳定的临界点, 区别在于求取临界点的方法及使用极限运行状态的不同特征作为电压崩溃的判据。

静态方法由于忽略了元件动态特性使其结果的准确性受到置疑, 因而计及元件动态特性的动态分析方法逐步得到应用, 主要有小干扰分析法<sup>[6-9]</sup>和分岔分析法。应用小扰动分析法, 文献[6]计及了发电机的动态, 研究了潮流雅克比矩阵奇异点与电压崩

溃点的关系; 计及无功补偿设备的动态, 文献[7]研究的 SVC 和 STATCOM 对电压稳定性的影响, 认为它们可以显著改善电力系统的动态电压行为, 有效地扩展系统的传输功率极限。这些文献只是侧重于考虑单个元件的动态特性。随着非线性动力学研究的进展, 分岔理论被引入电力系统<sup>[10,11]</sup>, 但目前这方面的研究一般局限于低维、简单模型的系统。

本文在延拓算法<sup>[12,13]</sup>基础上, 应用小扰动分析法进行动态电压稳定性研究。首先采用带预测-校正步骤的延拓算法追踪系统运行的平衡解流形, 延拓过程使用局部参数化的延拓方法, 预测步骤沿着解流形的切向量方向。从获得各个平衡点出发, 利用小扰动分析法在计及发电机、励磁系统、调速系统和 SVC 动态的情况下, 分析系统的电压稳定性。与通常使用的解析法形成状态矩阵不同, 本文采用摄动分析方法获取系统状态矩阵。最后进行了算例研究, 结果表明: 与忽略电力元件动态特性的静态方法所获得的电压稳定极限点相比, 计及元件动态特性的小扰动分析法所得到的电压崩溃点存在明显差异。文中还分析了各元件数学模型对动态电压稳定性的影响。

### 1 延拓算法

考虑依赖于参数的动力学系统, 用常微分方程表示为:

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

式中:  $X \in R^n$  为状态变量;  $\lambda \in R^1$  为可变参数。令  $Y = (X, \lambda)$ ,  $Y \in R^{n+1}$ , 则系统(1)的平衡点满足方程:

$$F(Y) = 0 \quad (2)$$

在系统参数  $\lambda$  变化的情况下,  $Y$  在  $n+1$  维空间定义了一条一维的广义曲线  $M$ , 称为平衡解曲线或平衡解流形。使用延拓算法可以追踪该流形, 它是用一系列满足精度要求的离散点 ( $Y^1, Y^2, \dots$ ) 来逼近曲线  $M$ 。采用预测-校正策略的延拓算法的主要计算步骤如下:

1) 预测。由当前系统运行的平衡点  $Y^j$  出发, 当系统参数发生变化时, 估计下一个平衡点的值  $\tilde{Y}^{j+1}$ 。沿切向量方向的预测公式为:

$$\tilde{Y}^{j+1} = Y^j + h_j v^j \quad (3)$$

式中:  $h_j$  为本次预测的步长,  $v^j$  为方程(2)在点  $Y^j$  的单位切向量。由式(3)可以得到下一个平衡点  $Y^{j+1}$  的估计值  $\tilde{Y}^{j+1}$ 。

2) 校正。为得到平衡点  $Y^{j+1}$  的准确值, 需要在方程(2)基础上增加一维方程, 使方程数与变量数相等, 从而可以由估计值  $\tilde{Y}^{j+1}$  开始, 通过迭代求出准确解。采用局部参数化延拓方法增加的方程为:

$$Y_i - Y_i^* = 0 \quad i = 1, \dots, n+1 \quad (4)$$

式中,  $Y_i$  为方程(2)的第  $i$  个变量,  $Y_i^*$  为经过预测步骤 1) 得到的预测值  $\tilde{Y}^{j+1}$  的第  $i$  个元素, 即  $Y_i^* = \tilde{Y}_i^{j+1}$ 。

3) 延拓变量选择。在步骤 2) 中延拓变量  $Y_i$  的选择是通过评价切向量  $v^j$  的值来实现的, 即在  $v^j$  中, 将绝对值最大的元素所对应的变量选择为延拓变量, 其实质是该变量在  $v^j$  方向上的变化量最大。

4) 步长控制。根据步骤 2) 中迭代次数来决定下一次预测步骤中的步长  $h_{j+1}$ 。

延拓算法求解过程如图 1 所示, 其主要优点是算法具有很好的收敛性, 不受潮流雅克比矩阵奇异的影响。从系统初始运行点开始, 不断重复步骤 1)~4), 最终可以得到系统完整的平衡解流形  $M$ 。

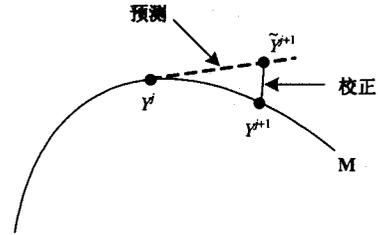


图 1 延拓算法预测-校正过程示意图

Fig.1 Predictor-corrector scheme in continuation method

### 2 动态电压稳定性的小扰动分析法

高阶电力系统的动态特性可以用依赖于参数的微分-代数方程(5)和(6)描述。

$$\dot{X} = f(X, Y, p) \quad (5)$$

$$0 = g(X, Y, p) \quad (6)$$

式中:  $f$  代表系统元件, 如发电机、励磁控制器、负荷和其它控制系统的动态特性;  $g$  为系统的潮流方程;  $X$  为系统的状态变量, 如发电机电势 ( $E', E'_q, E''_q$ )、转子变量 ( $\omega, \delta$ )、励磁电压  $E_{fd}$  等;  $Y$  为除状态变量以外的变量, 如母线电压的大小和相位等;  $p$  为系统参数如负荷功率等。

对每一组确定的参数值  $p$ , 系统的平衡点  $X^*$  是如下方程(7)的解:

$$\begin{cases} f(X^*, Y, p) = 0 \\ g(X^*, Y, p) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

系统在该平衡点的稳定性由(5)式和(6)式在平衡点的展开式决定:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad J = \begin{bmatrix} f_x & f_y \\ g_x & g_y \end{bmatrix} \quad (8)$$

假定  $g_y$  可逆, (8)式可演化为:

$$\dot{\Delta X} = A \Delta X \quad (9)$$

$$A = f_x - f_y g_y^{-1} g_x \quad (10)$$

从而, 可以根据网络方程和各个动态元件的动态方程按式(10)由解析法得到系统的相关状态矩阵, 解析法的优点是概念清楚、直观和易于理解, 但其缺点是状态矩阵  $A$  的形成和计算非常繁琐, 尤其是当系统结构发生变化或系统规模增加时, 矩阵  $A$  几乎要重新生成。下面给出一种求取状态矩阵  $A$  的数值计算方法。

在平衡点处对第  $i$  个状态变量  $x_i$  施加扰动  $\Delta x_i$ , 即  $x_i = x_0 + \Delta x_i$ , 其他状态变量保持不变, 在式(9)中有  $\Delta X = (0, \dots, \Delta x_i, 0, \dots)$ , 则式(9)变为:

$$\dot{\Delta X} = \Delta x_i a_i \quad (11)$$

式中  $a_i$  为  $A$  的第  $i$  个列向量,  $\Delta x_i$  为一标量, 注意到  $\dot{\Delta X} = \dot{X}$  及式(5), 因而有式(12)成立:

$$a_i = f(X_0 + \Delta X, Y, p) / \Delta x_i \quad (12)$$

式中,  $X_0$  为平衡点。依次对每个状态变量施加扰动, 据式(12)可求出  $A$  的每个列向量, 从而得到整个状态矩阵。在应用式(12)时要注意的, 应先根据式(6)求出在施加扰动后代数变量  $Y$  的新值。扰动的大小取  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  为宜, 扰动过大可能会超出系统的线性化收敛域, 过小则计算精度会被数值计算的舍入误差所淹没。与解析法求取  $A$  不同, 在以上应用数值方法形成状态矩阵的过程中无需进行求导运算, 因而简化了计算过程, 同时有利于系统的扩展, 当系统规模增加时, 计算过程变动不大, 适合采用计算机编程实现。

求出系统状态矩阵  $A$  后, 即可对其进行特征值分析并判断系统的稳定性。这种分析属于 Lyapunov 意义下的严格稳定性分析, 它包含了发电机、励磁和调节系统、SVC 及负荷的动态特性。当所有的特征根为负或具有负实部时, 系统稳定; 存在 0 特征值或实部为 0 的虚根时系统属临界稳定; 出现正的特征值或实部为正的共轭复根时系统失稳。

### 3 算例分析

研究系统的结构如图 2, 系统有 4 台发电机, 母线 7 装设有动态无功补偿设备 SVC, 节点 4、11 为集中负荷母线。

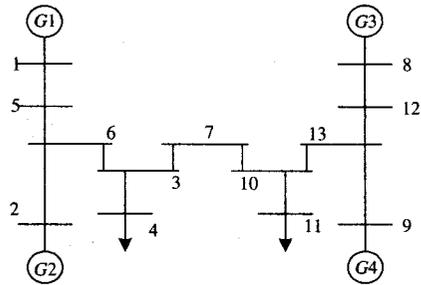


图 2 4 机 13 节点系统结构图

Fig.2 Structure of a 4-generator 13-bus power system

首先应用延拓算法按第 1 节描述的步骤求系统的平衡解流形, 负荷的增长方式为各节点负荷按相同比例增长, 功率因数保持不变, 增长的有功负荷在各台发电机间按原有比例分配, 绘出母线 10 的 PV 曲线如图 3 所示, 图 3 的横坐标为负荷增长率, 由此可方便地转换为实际的功率值。在图 3 中, 虚线 1 对应于不考虑发电机无功限制的情况, 可见, 曲线连续而且非常光滑, 此时静态电压稳定极限功率的大小取决于网络的最大传输能力。对发电机设定 75% 额定容量的无功功率限制后, PV 曲线变化为 2 所示的实线, 可以看出, 电压稳定极限功率显著降低, 并且曲线也变得不再光滑, 出现了两次明显的转折, 其中上半支的转折点 A 对应于发电机 4 达到其无功出力的最大限值, 下半支的转折点 B 对应于发电机 3 达到其无功出力的最大极限。在静态电压稳定分析中, PV 曲线的顶点通常被认为电压崩溃点, 由此可见发电机无功出力特性对系统的静态电压稳定性有很大的影响。

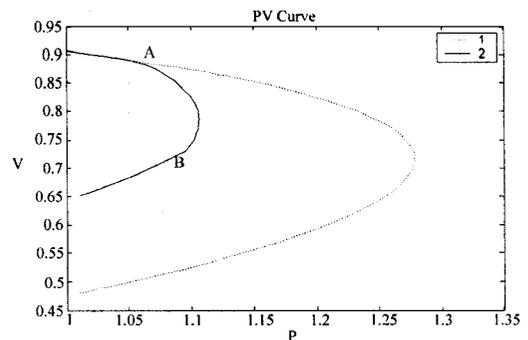


图 3 节点 10 的 PV 曲线图

Fig.3 PV curve at bus 10

以延拓算法获得的平衡解流形为基础, 考虑各个电气元件的动态特性, 应用小扰动分析法分析各

平衡点的稳定性。本文所考虑的元件动态模型为:

1) 发电机考虑为较详细的电磁模型, 为六阶模型, 状态变量为转子角度  $\delta$ 、转速  $\omega$ 、 $q$  轴和  $d$  轴暂态和次暂态电势  $E'_q, E'_d, E''_q, E''_d$ ;

2) 励磁系统为经典三阶模型, 状态变量为电压调节器输出电压  $V_R$ 、励磁电势  $E_{fd}$  及励磁负反馈电压  $V_F$ ;

3) 原动机及调速系统为三阶模型, 状态变量为机械功率  $P_m$ 、汽门开度  $\mu$  和调速器软反馈  $x_m$ ;

4) 发电机 3 装设 PSS, 考虑三阶模型, 状态变量为复位环节变量  $y_1$ 、相位补偿环节变量  $y_2$  和  $y_3$ ;

5) SVC 为一阶模型, 状态变量为电纳  $B_{CV}$ 。

上述各元件动态方程的详细公式这里不再列出, 有兴趣的读者可以参考文献[14]。系统状态方程具有如式(9)所示的形式, 系统的状态变量为:

$$\Delta X = (\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta E'_q, \Delta E'_d, \Delta E''_q, \Delta E''_d, \Delta V_R, \Delta E_{fd}, \Delta V_F,$$

$\Delta P_m, \Delta\mu, \Delta x_m, \Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3, \Delta B_{CV})$ 。通过计算相关状态矩阵  $A$  的特征值, 并跟踪其主导特征值的变化, 结果见表 1。

表 1 系统主导特征值变化表

Tab.1 Variation of the dominant system eigenvalues

负荷	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$
1.0	-0.0127	-0.1690+3.4863j	-0.2224+0.1036j	-0.3358+0.646j
1.0136	-0.0125	-0.1590+3.4863j	-0.2241+0.1032j	-0.3377+0.6490j
1.0267	-0.0124	-0.1488+3.4551j	-0.2258+0.1028j	-0.3397+0.6517j
1.0396	-0.0123	-0.1385+3.4232j	-0.2274+0.1023j	-0.3418+0.6544j
1.0521	-0.0122	-0.1278+3.3908j	-0.2290+0.1018j	-0.3440+0.6570j
1.0632	-0.0120	-0.1160+3.3563j	-0.2310+0.1012j	-0.3461+0.6595j
1.0719	-0.0119	-0.1235+3.2885j	-0.2541+0.1074j	-0.3449+0.6654j
1.0798	-0.0117	-0.1104+3.2460j	-0.2582+0.1060j	-0.3470+0.6677j
1.0869	-0.0116	-0.0970+3.2028j	-0.2625+0.1043j	-0.3492+0.6700j
1.0932	-0.0114	-0.0834+3.1586j	-0.2671+0.1023j	-0.3514+0.6722j
1.0984	-0.0113	-0.0696+3.1136j	-0.2720+0.0999j	-0.3535+0.6741j
1.1024	-0.0111	-0.0554+3.0675j	-0.2774+0.0970j	-0.3557+0.6759j
1.1051	-0.0109	-0.0409+3.0203j	-0.2832+0.0934j	-0.3579+0.6774j
1.1062	-0.0108	-0.0260+2.9716j	-0.2897+0.0888j	-0.3599+0.6785j
1.1052	-0.0106	-0.0106+2.9213j	-0.2970+0.0828j	-0.3618+0.6791j
1.1017	-0.0104	0.0054+2.8687j	-0.3055+0.0745j	-0.3635+0.6790j

由表 1 中可见, 负荷增长至  $p=1.1017$ p.u. 时, 特征值  $\lambda_2$  变为  $0.0054+2.8687j$ , 其实部由负变成正, 表明系统此时将失去稳定。图 4 给出特征值  $\lambda_2$  的实部随负荷增长变化的情况。

由图 4 可以看出, 特征值  $\lambda_2$  实部的变化情况总体比较平缓, 曲线在  $p=1.0632$ p.u. 时发生了转折, 此时对应于发电机 4 到达无功出力极限的情况。同时还可以看到, 当负荷增长至最大值, 即到达 PV

曲线的顶点时, 特征值  $\lambda_2$  的实部并未穿越虚轴, 表明系统还未失去稳定, 当负荷增长至顶点并开始下降至  $p=1.1017$ p.u. 时, 特征值  $\lambda_2$  的实部才穿越虚轴, 系统此时将失去稳定。这表明, 由于考虑了元件的动态特性, 系统可以在 PV 曲线下半支的部分区域稳定运行, 如图 5 所示, 图 5 是图 3 中 PV 曲线 2 的局部放大图。在图中 C 点处  $p=1.1038$ p.u., 特征值  $\lambda_2$  的实部值为  $-0.0027$ , 因此该点是稳定平衡点; 在 D 点处  $p=1.1028$ p.u., 特征值  $\lambda_2$  的实部为  $0.0014$ , 该点为不稳定平衡点。C 点以上区域为稳定运行区, D 点以下为失稳区。

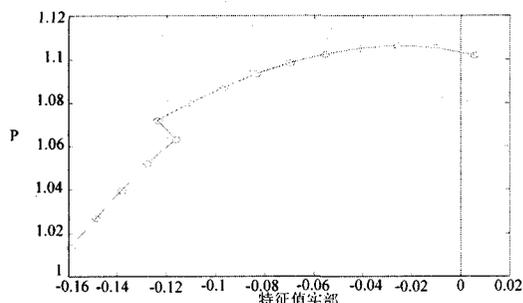


图 4 特征值  $\lambda_2$  实部随负荷增长的变化

Fig.4 Variation of the real part of eigenvalue  $\lambda_2$

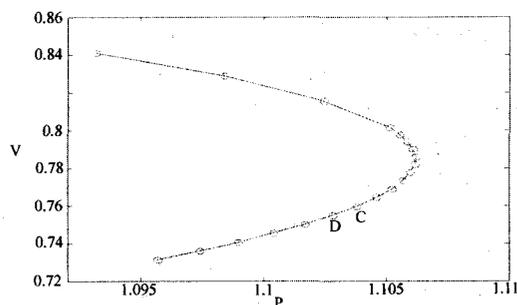


图 5 PV 曲线 2 局部放大图

Fig.5 Partially enlarged PV curve 2

进一步研究不同发电机数学模型 (对应于不同程度地考虑发电机的动态特性)、励磁系统和 PSS、负荷模型对动态电压稳定性的影响, 结果如下:

1) 发电机模型的影响。发电机模型采用四阶机电模型, 得到的动态稳定极限对应 PV 曲线上半支,  $p_{stab}=1.0719$  p. u.。表明用该模型确定的电压稳定分析结果偏于保守。

2) 励磁系统及 PSS 的影响。励磁模型改用简单励磁系统模型, 对于不同的电压调节器增益, 动态稳定分析结果如表 2 所示, 可以看出, 随励磁系统增益的增加, 动态稳定区相应增大。取消 3#发电机 PSS 作用后的分析显示, 系统的动态稳定区相应地缩小。这说明励磁系统及 PSS 对动态电压稳定分

析结果有较大的影响。

表 2 励磁系统影响

Tab.2 Contribution of excitation system

励磁系统稳态增益	稳定极限功率	备注
100	1.0798	PV 曲线上半支
200	1.1017	下半支
300	1.0108	下半支

3) 负荷静态模型的影响。负荷模型中的恒阻抗分量并入节点自导纳, 这里不予考虑, 改变负荷模型中恒功率分量与恒电流分量的比重, 动态分析结果如表 3 所示, 由表 3 可见, 负荷的静态特性对动态分析结果的影响很小。

表 3 负荷静态模型的影响

Tab.3 Contribution of steady state load model

负荷模型(I+P)	稳定极限功率	备注
30%+70%	1.1017	PV 曲线下半支
50%+50%	1.1052	下半支
70%+30%	1.1062	PV 曲线顶点

## 4 结论

在静态电压稳定分析中, 常把潮流极限或 PV 曲线的顶点视为电压稳定的临界点, 由于没有考虑系统元件的动态特性, 使静态分析结果的可信度降低。在延拓算法基础上, 本文应用小扰动分析法进行动态电压稳定性研究。首先采用带预测-校正步骤的延拓算法追踪系统运行的平衡解流形, 延拓过程使用局部参数化方法, 预测步骤沿着解流形的切线方向。从获得的各个平衡点出发, 在计及发电机、励磁系统、调速系统和 SVC 动态的情况下, 利用小扰动分析法分析系统的电压稳定性, 系统相关状态矩阵的形成采用摄动分析方法。算例分析表明, 由忽略元件动态特性的静态方法得到的电压稳定极限点与计及元件动态的小扰动分析法得到电压失稳点存在明显差异。

## 参考文献

- [1] Craig A A, Tapan S K. Determination of Power System Coherent Bus Groups by Novel Sensitivity-based Method for Voltage Stability Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1157-1166.
- [2] Haque M H. Determination of Steady-state Voltage Stability Limit using P-Q Curves[J]. IEEE Power Eng Rev, 2002, 22(4): 71-72.
- [3] 原蔚鹏, 张尧. 多馈入直流线路的交直流混合电网静态电压稳定性研究[J]. 中国电力, 2006, 17(7): 35-39. YUAN Wei-peng, ZHANG Rao. Methods of the Static Voltage Stability in Multi-infeed AC/DC System[J]. Electric Power, 2006, 17(7): 35-39.
- [4] Young H H, Ching T P, Lin W W. Fast Calculation of a Voltage Stability Index of Power Systems[J]. IEEE Trans

- on Power Systems, 1997, 12(4): 1555-1560.
- [5] Sobierajski M. Steady State Voltage Stability in the Vicinity of two Close Multiple Load Flow Solutions[A]. In: Proc of IEEE/NTUA Joint International Power Conference[C]. Athens: 1993.
- [6] Zhang Y P, Liu Z Q, Huang W, et al. Research on the Relationship of the Singular Point for Load Flow Jacobian Matrix and the Critical Point of Voltage collapse[J]. IEEE PES General Meeting, 2005, 6(12):1826-1830.
- [7] Noroozian M, Taylor C W. Benefits of SVC and STATCOM for Electric Utility Application[A]. In:Proc of IEEE PES Transm and Distrib Conference and Exposition[C]. 2003.
- [8] 顾伟, 蒋平, 唐国庆. 提高电力系统小扰动稳定性的最优分岔控制策略[J]. 电力自动化设备, 2007, 23(10): 29-33. GU Wei, JIANG Ping, TANG Guo-qing. Optimal Bifurcation Control to Improve Small-signal Stability of Power Systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 23(10): 29-33.
- [9] 包黎昕, 段献忠, 陈峰, 等. SVC 和 TCSC 提高电压稳定性作用的动态分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 21-25. BAO Li-xin, DUAN Xian-zhong, CHEN Feng, et al. Dynamical Analysis of the Effect of SVC and TCSC on Voltage Stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(13): 21-25.
- [10] Tan C W, Varghese M, Varaiya P, et al. Bifurcation, Chaos, and Voltage Collapse in Power Systems[J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83 (11): 1484-1496
- [11] 刘荆飞, 康积涛. 考虑无功约束的电压稳定研究[J]. 继电器, 2007, 35(21):14-17. LIU Jing-fei, KANG Ji-tao. Voltage Stability Studies Considering Reactive Constraint[J]. Relay, 2007, 35(21):14-17.
- [12] Ajjarapu V, Christy C. The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 1(7): 416-423.
- [13] 程浩忠, 曾嵘, 张焰. 简单电力系统的局部分岔数值计算分析[J]. 电网技术, 1999, 23(11): 25-27. CHENG Hao-zhong, ZENG Rong, ZHANG Yan. Numerical Computation and Analysis of Local Bifurcation in a Simple Power System[J]. Power System Technology, 1999, 23(11):25-27.
- [14] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York:McGraw-Hill Inc, 1994.

收稿日期: 2008-05-28; 修回日期: 2008-06-24

作者简介:

苏永春(1973-), 男, 博士, 从事电力系统稳定性相关的课题研究; E-mail:suyongchun@126.com

汪晓明(1978-), 男, 硕士, 从事超高压运行、检修及相关科研工作。