

# 基于扩展潮流模型的电力系统电压稳定分析

马平, 蔡兴国

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨市 150001)

## Power System Voltage Stability Analysis Using Expanded Power Flow Models

MA Ping, CAI Xing-guo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

**ABSTRACT:** An improved approach to trace the system PV curve and identify voltage collapse type is proposed for voltage stability analysis. The expanded power flow model is applied and its solution is found by the continuation method. Unlike the conventional indirect method, it can directly implement the generator field and armature current limits accurately, thereby assuring power flow convergence and voltage collapse point identification during tracing the PV curve when generator limits constraints are considered. The critical limit constraint equation is introduced in the corrective stage of the continuation method as the additional equation to solve the limit induced bifurcation point accurately. The proposed approach is illustrated with the New-England 39-bus system and the IEEE118-bus system. The results show that the model and approach are effective and rational.

**KEY WORDS:** power system; voltage stability analysis; bifurcations; continuation method; expanded power flow models

**摘要:** 提出一种追踪系统PV曲线并判断其电压崩溃类型的改进算法。它采用扩展潮流模型,应用连续潮流方法。给出新的发电机电流极限约束的直接处理算法,解决了计及发电机电流约束时,潮流难于收敛和不易精确求出电压崩溃点的问题;对不易精确求得的极限诱导分岔点,通过在连续潮流法的校正步骤中将关键的极限约束方程作为附加方程来快速而精确地求解。New-England 39节点系统和IEEE118节点系统算例表明该模型和算法的有效性和合理性。

**关键词:** 电力系统; 电压稳定分析; 分岔; 连续潮流法; 扩展潮流模型

## 0 引言

近年来,在电力系统的运行与规划中,利用静态分岔点的特性进行电压稳定性分析与控制的算法

越来越多。例如:应用在静态分岔点处任意控制参数对系统负荷稳定裕度的灵敏度分析<sup>[1]</sup>,文献[2-5]提出了各自的估计事故后系统电压稳定边界的方法;文[6-9]探讨了防止电压失稳的预防控制或校正控制的灵敏度算法。以上各种基于分岔点的灵敏度分析算法的可靠性与求得的静态分岔点的精度关系很大。

求电压静态分岔点的各种算法,如连续潮流方法<sup>[10-12]</sup>、内点法<sup>[13-14]</sup>和线性规划法<sup>[15]</sup>等已被广泛研究。这些算法主要分析了采用传统潮流模型时鞍结分岔引起的电压崩溃问题。扩展潮流模型因具有传统潮流模型的计算高效性和时域仿真方法准确性的双重优点而引起了学术界的关注。文献[12-13]基于扩展潮流模型对鞍结型分岔引起的电压崩溃现象进行了分析。约束诱导型分岔是系统中某个状态变量到达极限而引起的立即电压崩溃现象,在实际运行条件中,发电机的无功限制是引起这一现象的主要原因<sup>[12-13,16]</sup>。在传统潮流模型中,文[12-13]应用改进的连续潮流法和改进的约束优化法分析了极限诱导分岔引起的电压崩溃现象。在扩展潮流模型下,发生的极限诱导分岔问题却鲜有研究。

本文提出一个基于扩展潮流模型的改进连续潮流法来分析系统的电压崩溃现象——鞍结分岔(SNB)和极限诱导分岔(LIB)。在追踪系统的PV曲线时,给出一种直接处理发电机定子电流和转子电流约束的方法和确定系统极限诱导分岔点的快速方法。通过New-England 39节点系统和IEEE118节点系统算例,证明了该方法的有效性和可行性。

## 1 系统模型

对于有 $m$ 台发电机, $n$ 个节点的电力系统,通常用如下微分、代数方程组表示其运行状态:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \lambda, \mathbf{U}) \\ 0 = G(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \lambda, \mathbf{U}) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $F$ 描述了同步发电机的动态特性； $G$ 为传统的潮流方程； $\mathbf{X}$ 为系统状态变量向量； $\mathbf{Y}$ 为代数变量向量； $\mathbf{U}$ 为控制变量向量； $\lambda$ 为表征负荷水平的参数。为简化计算，假设系统中每台发电机都安装有同种类型的调速系统、原动机系统和励磁控制系统，如图 1 和图 2 所示<sup>[10]</sup>。

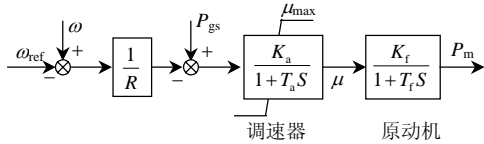


图 1 简化的调速器和原动机系统

Fig. 1 The simplified speed governor and prime mover

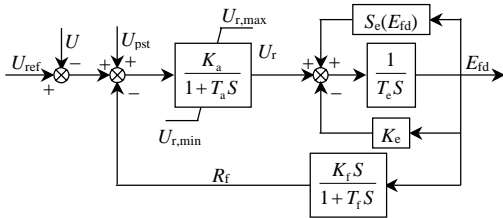


图 2 简化的励磁系统

Fig. 2 The simplified excitation system

对于给定的控制变量向量  $\mathbf{U}$ ，随着负荷参数  $\lambda$  的变化，系统将稳定于一系列的平衡点。这些平衡点是方程组(2)的解。

$$\begin{cases} 0 = F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \lambda, \mathbf{U}) \\ 0 = G(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \lambda, \mathbf{U}) \end{cases} \quad (2)$$

称方程组(2)为扩展潮流方程。该方程的潮流解能更准确地反映系统的实际运行状态。

在式(2)中，采用文[11]的双轴同步发电机 4 阶模型<sup>[17]</sup>和文[10]的励磁系统、原动机和调速器模型。为简化计算，应用解析降阶方法，消去变量( $E_{qi}$ ,  $E_{di}$ ,  $E_{fdi}$ ,  $U_{ri}$ ,  $R_{fi}$ ,  $P_{mi}$ ,  $\mu_i$ )，保留功角(即发电机 $G_i$ 转子 $q$ 轴相对参考轴的角位移)变量  $\delta_i$ ，和发电机的转子角速度变量  $\omega_i$ (稳态时所有发电机的转子角速度相同)。式(2)可简化为

$$\begin{cases} 0 = P_{gsi} - \frac{1}{R_i}(\omega_r - \omega_{ref}) - P_{gi} - D_i \omega_r & i = 1, 2, \dots, m \\ 0 = P_{gi} - P_{li} - U_i \cdot \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & i = 1, 2, \dots, n \\ 0 = Q_{gi} - Q_{li} - U_i \cdot \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

其中：

$$P_{gi} = \frac{U_i K_{ai}}{X_{di} K_{ei}} (U_{refi} - U_i) \sin(\delta_i - \theta_i) + \frac{U_i^2}{2} \sin 2(\delta_i - \theta_i) \left( \frac{1}{X_{qi}} - \frac{1}{X_{di}} \right) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$Q_{gi} = \frac{U_i K_{ai}}{X_{di} K_{ei}} (U_{refi} - U_i) \cos(\delta_i - \theta_i) - \left( \frac{1}{X_{di}} + \frac{1}{X_{qi}} \right) \cdot \frac{U_i^2}{2} + \frac{U_i^2}{2} \cos 2(\delta_i - \theta_i) \left( \frac{1}{X_{qi}} - \frac{1}{X_{di}} \right) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$P_{gi} = Q_{gi} = 0 \quad i = m + 1, m + 2, \dots, n \quad (6)$$

指定节点 $m$ 的电压相位  $\theta_m$  为 0，它作为计算各节点电压相位和发电机功角的参考值，简化后的方程组共有  $m+2n$  个方程， $m+2n$  个变量，可联立求解。另外，在对方程组(2)简化的计算中，得到了发电机在到达电流极限前，端电压和励磁系统AVR输出电压  $U_i$  间的关系式： $U_{ri} = K_{ai}(U_{refi} - U_i)$ 。

## 2 电压稳定性分析的改进算法

### 2.1 发电机约束条件的处理算法

用连续潮流求系统  $PV$  曲线并确定其电压崩溃点时，如何处理发电机的约束条件是求解的关键。

其中发电机有功功率和转子电流约束可通过图 1 和图 2 所示控制系统直接完成。有功约束通过调速器来完成，一旦调速器的输出达到最大  $\mu_{i,max}$ ，发电机将不能再分摊系统负荷的增量且调速器的输出保持  $\mu_{i,max}$  不变，即式(3)中的  $P_{gsi} - \frac{1}{R_i}(\omega_r - \omega_{ref})$  用  $\mu_{i,max}$  代替。转子电流的约束用AVR输出  $U_{ri}$  来表达，如果忽略励磁系统的饱和作用，在稳态时AVR的输出电压  $U_{ri}$  正比于发电机的转子电流。因此，转子电流达到最大值时，等价于AVR的输出电压  $U_{ri}$  达到最大值  $U_{ri,max}$  并保持不变，即式(4)~(5)中的  $K_{ai}(U_{refi} - U_i)$  用  $U_{ri,max}$  替代。

在电压稳定分析中，定子电流的约束，传统方法是通过潮流迭代中不断调整 AVR 的输出电压来近似实现。如文[10]通过式  $Q_{gi,max} = (U_i^2 I_{ai,max}^2 - P_{gi}^2)^{1/2}$  计算发电机相对于最大定子电流的最大允许无功出力，与最大定子电流相关的AVR的最大输出电压  $U_{ria,max}$  能根据式(5)算出，此时式(4)~(5)中的  $K_{ai}(U_{refi} - U_i)$  用  $U_{ria,max}$  替代。文[11]在预先设定的误差内，给出一个减少因子  $\alpha$  ( $\alpha = I_{ai}/I_{ai,max} < 1$ )，采用迭代的办法将  $U_{ri}$  按  $\alpha$  倍减少，直到定子电流达到极限值。

传统的定子电流约束处理方式虽然可以保证在潮流计算中定子电流不越限,但却很难完整地描绘出PV曲线和精确地求出崩溃点,如图3所示。点 $a$ 为初始运行点,随着负荷的增加系统到达 $b$ 点,此时发电机 $G_i$ 到达定子电流极限。式(4)~(5)中的 $K_{ai}(U_{refi}-U_i)$ 用 $U_{ria,max}$ 替代,潮流方程发生了改变。原系统PV曲线的追踪将在 $U_{ri}=U_{ria,max}$ 所对应的PV曲线上进行,如曲线1。如果在曲线1上又检测到发电机 $G_i$ 定子电流越限,则原系统PV曲线的追踪转移到另一条 $U_{ria,max}$ 更小的曲线(如曲线2)上。每一个 $U_{ri}=U_{ria,max}$ 所对应的潮流方程都有一条PV曲线,这些曲线形成了一个PV曲线族。曲线族中每一条曲线的上半支上都有一点,该点处发电机 $G_i$ 的定子电流等于极限值,这些点形成的曲线就是 $I_{ai}=I_{ai,max}$ 所代表的PV曲线。在连续潮流法中,以上PV曲线追踪方式存在以下困难:①当有发电机到达定子电流极限后,已知潮流解和下一个潮流解有时在不同的曲线上,如曲线1和曲线2,这使得潮流在接近崩溃点时不易收敛,且可能发生新解( $d$ 点)的负荷参数小于已知解( $c$ 点)的负荷参数的情形,使求出的PV曲线不再光滑;②即使求出了最大负荷参数所对应的 $g$ 点,而 $g$ 点所在曲线3所对应的潮流雅克比矩阵非奇异,也难于判断该点就是鞍结分岔点,也无法利用在分岔点处雅克比矩阵奇异的特性做基于灵敏度的电压稳定分析。

针对以上情况,提出一种新的发电机定子电流约束的直接处理算法。当发电机 $G_i$ 到达定子电流极限后,其定子电流输出保持 $I_{ai,max}$ 不变。表示发电机 $G_i$ 向系统输入有功、无功功率的式(4)、(5)能分别用 $P_{gi}=U_i I_{ai,max} \cos \varphi_i$ 和 $Q_{gi}=U_i I_{ai,max} \sin \varphi_i$ 来替代。在新的潮流方程中,待求变量 $\delta_i$ 不存在了,增加了表示该发电机机端电压和电流夹角的新变量 $\varphi_i$ 。如图3所示,本文提出的方法当发电机的定子电流到达极限后,PV曲线的追踪过程将直接在曲线 $I_{ai}=$

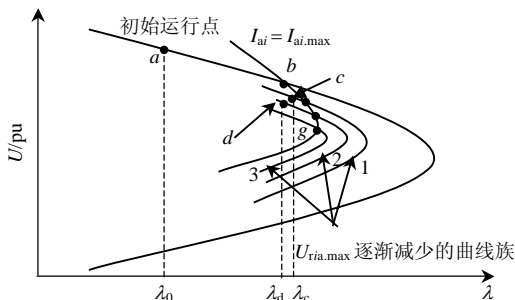


图3 定子电流到达极限后AVR输出对PV曲线的影响  
Fig. 3 The system PV curve with the AVR response after a generator hitting its armature current limit

$I_{ai,max}$ 上进行,这能保证精确快速地描绘出PV曲线并求出崩溃点。

## 2.2 分岔点的识别

通常,识别图3中所示鞍结型分岔点 $g$ 的条件为潮流雅克比矩阵奇异。极限诱导分岔是系统中一个状态变量到达极限而引起的。如图4所示,由初始运行点 $a$ 开始,当负荷增加时,运行点到达 $b$ 点,发生极限诱导分岔。此时某一状态变量 $\beta$ 到达极限,改变了潮流方程,如发电机到达各种极限约束。在 $b$ 点,潮流方程变化前后潮流的解虽然不变,但潮流方程的雅克比矩阵却发生了变化,变化后潮流方程的雅克比矩阵有一个正的特征值,即 $b$ 点位于 $\beta$ 恒等于其极限值所描绘出的PV曲线的下半支。整条PV曲线追踪过程则是由 $ab$ 段到 $bc$ 段,而后改变追踪方向为 $cbd$ 段,在 $d$ 点发生鞍结分岔,雅克比矩阵奇异。

从上述PV曲线的追踪过程可以看出:与鞍结型分岔点不同,极限诱导型分岔点无法仅根据潮流雅克比矩阵的特性来识别。本文用以下方法识别极限诱导分岔点。

(1) 判断 $\beta$ 到达极限是否引起极限诱导分岔。曲线追踪过程如图4所示。从初始运行点开始,若 $\beta$ 到达极限前后,PV曲线追踪由上半支转到下半支;且 $\beta$ 到达极限时的系统负荷 $\lambda_1$ 小于系统的最大可解负荷 $\lambda_2$ ,则说明 $\beta$ 到达极限引起了极限诱导分岔。

(2) 确定极限诱导分岔点。对 $\beta$ 的极限约束可表示为 $\beta = g(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \lambda) \leq \beta_{max}$ ,如发电机转子电流约束 $U_{ri} = K_{ai}(U_{refi} - U_i) \leq U_{ri,max}$ 。仅仅在 $\beta$ 刚刚到达极限处等式关系成立。在连续潮流的校正步骤中,将式 $\beta = g(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \lambda) = \beta_{max}$ 作为“需要增加的一个方程”,能方便地求出极限诱导分岔点。

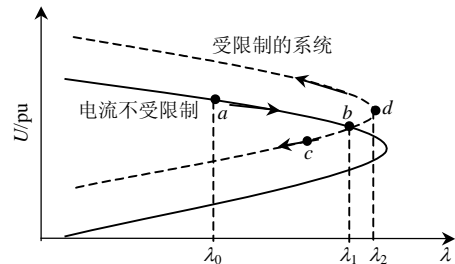


图4 极限诱导分岔  
Fig. 4 Limit induced bifurcation diagram

## 3 算例及分析

### 3.1 New-England 39节点系统

#### 3.1.1 鞍结分岔点的识别

以New-England 39节点系统和IEEE118节点

系统为例，对本文提出的方法进行了验证。假定发电机按初始出力的比例分摊系统的负荷增量，各负荷节点的功率按相同的比例增加，负荷功率变化前后各节点负荷的功率因数保持不变，负荷采用恒功率模型。考虑每台发电机有功功率、定子电流和转子电流限制。设基本负荷时，负荷参数 $\lambda=1$ 。

New-England 39 节点系统共有 10 台发电机，46 条支路，基本负荷为 6 097.3 MW。表 1 给出采用本文提出的算法和传统算法追踪 PV 曲线上半支部分潮流解的情况。

表 1 新英格兰 39 节点系统发生鞍结分岔的潮流解  
Tab. 1 The power flow solutions including the saddle node bifurcation point for New-England 39-bus system

所用方法	负荷水平 $\lambda$	越限发电机号		节点 28 电压幅值/pu	迭代次数	最小奇异值 $\delta_{min}$	分岔类型
		转子电流	定子电流				
本文的方法	1.196 8	2	/	0.998 0	6	0.273 2	/
	1.197 0	2	6	0.997 9	3	0.269 7	/
	1.200 0	1、2	6	0.997 1	5	0.257 0	/
	1.211 8	1、2	6	0.993 0	3	0.194 5	/
	1.212 7	1、2	6	0.991 9	9	0.002 9	SNB
	1.196 8	2	/	0.998 0	6	0.273 2	/
	1.197 0	2	6	0.997 9	12	0.271 5	/
	1.200 0	1、2	6	0.996 6	23	0.262 6	/
	1.202 1	1、2	6	0.994 6	21	0.254 4	/
	1.201 8	1、2	6	0.994 3	27	0.253 9	/
1.201 9	1、2	6	0.994 2	27	0.253 2	/	
文 [10] 的方法	1.196 8	2	/	0.998 0	6	0.273 2	/
	1.197 0	2	6	0.997 7	4	0.270 9	/
	1.200 0	1、2	6	0.996 4	5	0.262 1	/
	1.201 7	1、2	6	0.995 5	4	0.257 7	/
	1.201 1	1、2	6	0.994 2	7	0.254 0	/
	1.201 4	1、2	6	0.994 2	1	0.253 6	/
	1.200 1	1、2	6	0.993 9	6	0.253 7	/

从表 1 数据可以看出：采用本文的方法可以快速而完整地描绘出系统的 PV 曲线，曲线上最大负荷点 $\lambda=1.2127$ ，系统的最小奇异值 $\delta_{min}=0.0029$ ，该点可视为是在一定误差允许范围内的鞍结分岔点。采用文 [10] 和文 [11] 的方法在最小迭代步长为 $d\lambda=0.00005$  时，搜索出的系统最大负荷参数值分别是 $\lambda=1.2021$  和 $\lambda=1.2017$ ，它们与用本文方法得到的最大负荷参数值 $\lambda=1.2127$  相比误差很小，在工程上是完全允许的，但通过潮流雅可比矩阵的特征分析可知，他们对应的最小奇异值分别是 $\delta_{min}=0.2544$  和 $\delta_{min}=0.2577$ 。这表明传统方法搜索出的最大负荷点不能被近似看作是 PV 曲线上的鞍结分岔点。

3.1.2 极限诱导分岔点的识别

将发电机的转子电流和定子电流限制增加 1%，追踪 PV 曲线，部分潮流解列于表 2 中。应用

本文方法识别出系统因发电机 $G_3$ 到达最大定子电流极限发生了极限诱导分岔(如图 4 中的 b 点)，此时 $\lambda=1.2266$ 、 $\delta_{min}=0.1912$ 。而后改变潮流追踪方向，识别出鞍结分岔点，此时 $\lambda=1.2333$ 、 $\delta_{min}=0.0003$ (如图 4 中 d 的点)。而文 [10] 和文 [11] 的方法在最小迭代步长为 $d\lambda=0.00005$  时，搜索出的最大负荷参数分别是 $\lambda=1.2261$  和 $\lambda=1.2264$ ，均小于本文方法求出的极限诱导分岔点对应的负荷参数值。这表明传统方法在负荷参数值还小于极限诱导分岔点对应的负荷参数值时，潮流就已经不收敛了，所以识别不出极限诱导分岔点。另外传统方法求出的最大负荷点所对应的最小奇异值分别是 $\delta_{min}=0.2003$  和 $\delta_{min}=0.1963$ ，这表明传统方法也搜索不到 PV 曲线上的鞍结分岔点。

表 2 新英格兰 39 节点系统发生极限诱导分岔的潮流解  
Tab. 2 The power flow solutions including the limit induced bifurcation for New-England 39-bus system

所用方法	负荷水平 $\lambda$	越限发电机号		节点 28 电压幅值/pu	迭代次数	最小奇异值 $\lambda_{min}$	分岔类型
		转子电流	定子电流				
本文的方法	1.226 5	1、2	6	0.991 3	9	0.191 4	/
	1.226 6	1、2	3、6	0.991 3	4	0.191 2	LIB
	1.219 4	1、2	3、6	0.990 4	15	0.257 2	/
	1.228 8	1、2	3、6	0.992 0	5	0.197 9	/
	1.233 3	1、2	3、6	0.996 5	5	0.000 3	SNB
文 [10] 的方法	1.223 4	1.2	/	0.992 4	10	0.214 4	/
	1.226 1	1、2	6	0.991 2	21	0.200 3	/
	1.224 5	1、2	3、6	0.991 0	20	0.074 3	/
	1.219 1	1、2	3、6	0.990 5	21	0.049 5	/
	1.208 5	1、2	3、6	0.990 3	22	0.001 4	/
	1.202 2	1、2	3、6	0.990 1	21	0.035 7	/
文 [11] 的方法	1.226 4	1、2	6	0.991 3	9	0.196 3	/
	1.224 7	1、2	3、6	0.991 5	8	0.073 1	/
	1.225 1	1、2	3、6	0.991 0	5	0.066 0	/
	1.222 8	1、2	3、6	0.990 8	8	0.058 1	/
	1.221 1	1、2	3、6	0.990 6	8	0.048 4	/
	1.219 2	1、2	3、6	0.990 4	8	0.036 1	/

从表 1、2 的数据还可看出：传统方法在搜索出最大负荷参数 $\lambda$  后求出的潮流解形成的 PV 曲线不再光滑，且不再具有 PV 曲线上半支潮流解应有的特性(在 PV 曲线的上半支，随着节点 28 电压幅值的降低， $\lambda$  应单调递增； $\delta_{min}$  应单调递减)。所以传统约束处理算法识别不出分岔点，更无法形成完整的 PV 曲线。

3.2 IEEE118 节点系统

IEEE118 节点系统共有 54 台发电机，179 条支路，基本负荷为 4 480 MW。采用本文方法计算结果是：当系统负荷参数 $\lambda=1.4786$  时，系统发生鞍结分

岔。提高系统的定子电流限制和转子电流限制各10%，当发电机 $G_4$ 到达定子电流限制时引起极限诱导分岔，此时负荷参数 $\lambda=1.5264$ 。而传统方法则不能准确地求出系统分岔点。

以上2算例PV曲线的追踪过程也表明：当系统发电机到达定子电流极限后，采用文[10]算法，潮流的迭代次数明显增加；而文[11]算法的性能则由减少因子 $\alpha$ 的大小决定，本文设 $\alpha=0.995$ 。

## 4 结论

本文提出了一种追踪系统PV曲线和计算其电压稳定崩溃点的改进连续潮流法。该方法的主要特点是：①它采用可准确描述系统运行状态的扩展潮流模型；②提出一种新的直接处理发电机定子电流约束的方法，比之间接处理算法，其计算量大大减少且能方便地描绘出完整的PV曲线；③在连续潮流法的校正步骤中将引起极限诱导分岔的约束方程作为附加方程，可简便地确定PV曲线上极限诱导分岔点。两个算例表明，所提方法可精确地考虑发电机的各种极限运行状态，能方便而准确地描绘出系统的PV曲线，并识别出系统的电压崩溃方式，计算结果更加接近于系统的实际运行情况。这对系统运行人员具有非常重要的指导意义。

## 参考文献

- [1] Greene S, Dobson I, Alvarado F L. Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1997, 12(1): 262-272.
- [2] Greene S, Dobson I, Alvarado F L. Contingency ranking for voltage collapse via sensitivity from a single nose curve[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1999, 14(1): 232-240.
- [3] 赵普泉, 江晓东, 张伯明. 一种用于电力系统静态稳定性分析的故障筛选与排序方法[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 62-67.  
Zhao Jinquan, Jiang Xiaodong, Zhang Boming. A contingency screening and ranking method for power system static stability analysis[J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 62-67(in Chinese).
- [4] Fluck A J, Gonella R, Dondeti J R. A new power sensitivity method of ranking branch outage contingencies for voltage collapse[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 17(2): 265-270.
- [5] Yorino N, Li H Q, Harada S, et al. A method of voltage stability evaluation for branch and generator outage contingencies[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2004, 19(1): 252-259.
- [6] 赵普泉, 江晓东, 张伯明. 一种用于预防支路型失稳故障的灵敏度方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 69-73.  
Zhao Jinquan, Jiang Xiaodong, Zhang Boming. A sensitivity method for prevention of branch type insecure contingency[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 69-73(in Chinese).
- [7] Feng Zhihong, Ajarapu V, Maratukulam D J. A comprehensive approach for preventive and corrective to mitigate voltage collapse[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 791-797.
- [8] Ajarapu V, Feng Zhihong. A novel approach for voltage collapse analysis and control[J]. IEEE, 1998, 15(2): 791-797.
- [9] 赵普泉, 江晓东, 张伯明. 用于静态稳定预防控制的新灵敏度分析法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 27-33.  
Zhao Jinquan, Jiang Xiaodong, Zhang Boming. A new sensitivity method for static stability preventive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 27-33(in Chinese).
- [10] Feng Z, Ajarapu V, Long B. Identification of voltage collapse through direct equilibrium tracing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 342-348.
- [11] 王庆红, 周双喜, 胡国根. 基于扩展潮流模型的电力系统电压稳定性分析[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 25-29.  
Wang Qinghong, Zhou Shuangxi, Hu Guogen. Power system voltage stability analysis using expended power flow models[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 25-29(in Chinese).
- [12] Yorino N, Li Huaqiang, Sasaki H. A predictor/corrector scheme for obtaining q-limit points for power flow studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 130-137.
- [13] 李华强, 刘亚梅, Yorino N. 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 56-60.  
Li Huaqiang, Liu Yamei, Yorino N. Voltage stability assessment for saddle node bifurcation and limit induced bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 56-60(in Chinese).
- [14] 韦化, 丁晓莺. 基于现代内点理论的电压稳定临界点算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 27-31.  
Weihua, Ding Xiaoying. An algorithm for determining voltage stability critical point based on interior point theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 27-31(in Chinese).
- [15] 郭瑞鹏, 韩祯祥, 王琴. 电压崩溃临界点的非线性规划模型及算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 14-17.  
Guo Ruipeng, Han Zhenxiang, Wang Qin. Nonlinear programming model & algorithm for point of collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 14-17(in Chinese).
- [16] Ian Dobson, Liming Lu. Voltage collapse precipitated by the immediate change in stability when generator reactive power limits are encountered[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1992, 39(9): 762-766.
- [17] Sauer B W, Pai M A. Power system steady-state stability and the load flow Jacobian[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 15(4): 1374-1383.

收稿日期: 2007-04-25.

作者简介:

马平(1973—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制的研究, mapping@hit.edu.cn;

蔡兴国(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统IT、电力市场。

(编辑 谷子)