基于拟合方法的N-1静态电压稳定裕度计算

张小兵，吴政球，李连伟，钟 浩，葛建伟

（湖南大学电气与信息工程学院，湖南 长沙 410082）

摘要：提出一种兼顾精度与速度的计算线路N-1故障下静态电压稳定临界点的拟合方法。该方法用左特征向量排队找出较严重故障，再利用泰勒级数求得电压崩溃点处状态变量和负荷裕度对严重故障支路连接参数的1～3阶灵敏度，在此基础上用四参数拟合方法进行逼近，从而快速精确地求解出关键线路故障情况下电压稳定临界点。该方法能快速地对线路故障按严重程度进行排序，并精确得出故障后电压稳定裕度，可用于调度中心作监控估算工具。IEEE30及IEEE57母线系统上的算例验证了该方法。

关键词：静态电压稳定；N-1故障；灵敏度分析；曲线拟合；故障排序

N-1 steady-state voltage margin calculation based on fitting computation method

ZHANG Xiao-bing，WU Zheng-qiu，LI Lian-wei，ZHONG Hao，GE Jian-wei

（College of Electrical & Information Engineering，Hunan University，Changsha 410082，China）

Abstract：This paper proposes a fitting method to calculate the critical point of static voltage under branch outage contingency．Firstly，it ranks the branches using left vector. Secondly，it obtains the 1 to 3 degree derivatives of load parameter and state variables by Taylor's series expansion under base network topology．At last，the load margin could be quickly and exactly calculated by the 4-parameter fitting．As it could rank the contingency branches and get the exact load margin after branch outage，dispatching center can use it as an estimation tool for steady state voltage．IEEE-30 and IEEE-57 bus systems verify this technique．

Key words：static voltage stability；N-1 fault；sensitivity analysis；curve fitting；contingency branches sorting

中图分类号： TM712　　文献标识码：A　　文章编号： 1674-3415(2010)14-0023-05

0 引言

电压稳定性[1-6]是电力系统安全性问题中的一个重要方面。其本质上是一个动态问题，主要由系统网络结构及负荷模型决定。在实际工程应用中，静态安全分析方法以其较快的计算速度和较高的计算精度被广泛采用。

计算出静态约束条件下电压稳定裕度是电压稳定性研究的一个重要课题。目前对故障后负荷裕度的计算，主要是采取逐一断开支路后运用连续法或直接法重新计算系统的临界负荷。连续法[7]计算无须初值，但计算速度慢，当需要对大量支路故障进行分析时非常费时，很难达到在线应用的要求，同时还存在某些极为严重的故障使连续潮流在基态负荷起点就无法收敛。直接法[8-9]虽然计算速度较快，但需要初值，不当的初值往往导致迭代不收敛。寻找一种快速可靠的N-1故障电压稳定临界点计算方法是目前电压稳定研究的难点与重点。

通过研究电压稳定临界点（又称鞍结分岔点，以下简称SNB点)处潮流方程的性质，并参考SNB点处电压稳定裕度对参数灵敏的求解方法，文献[10]提出了一种基于泰勒级数的快速求解故障后 SNB点的方法。运用该方法，一些非薄弱线路的故障用2~3阶导数即可逼近故障后的SNB点，对包括较严重故障在内的绝大多数故障采用5阶逼近可满足要求；而对某些关键线路故障需采用7阶导数逼近。

文献[10]中提出的方法其优点在于求取不同故障各阶导数时，系数矩阵均是同一个矩阵，无需反复形成与分解。但在求取高阶导数时，必须求取左右特征向量的高阶导数，其复杂度和计算量随阶数的提高而增加。本文在文献[10]方法上加以改进，提出了一种新的兼顾速度与精度的计算预想故障后电压崩溃点的方法[11]。该方法首先利用雅可比矩阵零特征值对应的左特征向量快速计算负荷裕度对线路连接系数的一次导数，应用它对线路故障按严重程度进行预排序，筛选出较严重故障[12-13]，然后求

解较严重故障下原系统的静态电压稳定临界点对线路连接参数的1~3阶导数，用本文提出的四参数方法拟合，从而快速精确地求解出线路故障情况下电压稳定临界点。求取不同故障各阶导数时，系数矩阵均是同一个矩阵，无需反复形成与分解[14]。该方法能快速准确地对线路故障按严重程度进行排序。

1　电压崩溃点处状态变量和负荷裕度灵敏度计算

1.1 电压崩溃点特征方程

静态电压稳定意义下的SNB点（x^*，λ^*）满足的特征方程可表示为：

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\lambda,\mu)=0 \tag{1}$$

$$\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\cdot \boldsymbol{f}_x(\boldsymbol{x},\lambda,\mu)=0 \tag{2}$$

$$\boldsymbol{f}_x(\boldsymbol{x},\lambda,\mu)\cdot\boldsymbol{u}=0 \tag{3}$$

$$\|\boldsymbol{u}\|\neq 0,\ \|\boldsymbol{v}\|\neq 0 \tag{4}$$

其中：式（1）的方程为潮流基本方程，$\boldsymbol{f}:\boldsymbol{R}^n\times\boldsymbol{R}\times\boldsymbol{R}\rightarrow\boldsymbol{R}^n$；式（2）为潮流雅可比矩阵奇异的临界点特征方程，$\boldsymbol{v}$为雅可比矩阵$\boldsymbol{f}_x$的零特征值所对应的左特征向量；式（3）中$\boldsymbol{u}$为雅可比矩阵$\boldsymbol{f}_x$的零特征值所对应的右特征向量，$\boldsymbol{f}_x:\boldsymbol{R}^n\rightarrow\boldsymbol{R}^n$，$\boldsymbol{v}\in\boldsymbol{R}^n,\boldsymbol{u}\in\boldsymbol{R}^n$；式（4）为规范化方程，确保$\boldsymbol{v}\neq 0$，$\boldsymbol{u}\neq 0$。状态变量$\boldsymbol{x}=(\boldsymbol{\delta},\boldsymbol{V})\in\boldsymbol{R}^n$（文中向量均指列向量），$\lambda\in\boldsymbol{R}$代表总有功负荷水平，$\mu\in\boldsymbol{R}$为系统网络参数（本文中指故障线路的支路导纳系数，$\mu=1$时表示线路正常运行，$\mu=0$时表示线路退出运行）。

1.2 状态变量和负荷裕度的1～3阶导数

当系统参数μ连续变化时，式(1)～(4)定义了一条由SNB点（x^*，λ^*）组成的n+1维空间曲线：

$$\begin{cases} \boldsymbol{R}\rightarrow\boldsymbol{R}^n\times\boldsymbol{R} \\ \mu\mapsto\left(\boldsymbol{x}^*(\mu),\lambda^*(\mu)\right)\end{cases}$$

在临界点处，对支路连接参数μ的偏导数为：

$$\frac{\partial\boldsymbol{f}}{\partial\mu}+\boldsymbol{J}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}\mu}+\frac{\partial\boldsymbol{f}}{\partial\lambda}\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}\mu}=0 \tag{5}$$

利用雅可比矩阵零特征值对应的左特征向量可以快速计算$\dfrac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}\mu}$，用其可以对线路故障按严重程度进行预排序。其公式推导如下。

由于SNB点处潮流雅可比矩阵f_x奇异，且有单一零特征值。由于零特征值对应的左特征向量为$\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}$（行向量），根据式（2），用$\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}$左乘式（5）得：

$$\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\frac{\partial\boldsymbol{f}}{\partial\mu}+\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}\mu}+\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\frac{\partial\boldsymbol{f}}{\partial\lambda}\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}\mu}=0$$

故

$$\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}\mu}=-\frac{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\dfrac{\partial\boldsymbol{f}}{\partial\mu}}{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\dfrac{\partial\boldsymbol{f}}{\partial\lambda}} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\dfrac{\partial\boldsymbol{f}}{\partial\lambda}\neq 0$

网络参数变化以后，用连续潮流得到临界点后其雅可比矩阵还是有一个零特征根，零特征根对网络系统参数的灵敏度应为零。

$$\frac{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{J}}{\mathrm{d}\mu}\boldsymbol{u}}{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u}}=0\text{，}\quad\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{J}}{\mathrm{d}\mu}=\frac{\partial\boldsymbol{J}}{\partial\mu}+\frac{\partial\boldsymbol{J}}{\partial\boldsymbol{x}}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}\mu} \tag{7}$$

因此：
$$\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\frac{\partial\boldsymbol{J}}{\partial\boldsymbol{x}}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}\mu}\boldsymbol{u}+\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\frac{\partial\boldsymbol{J}}{\partial\mu}\boldsymbol{u}=0 \tag{8}$$

由方程式（5）、（8）组成线性方程组：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{J} & \dfrac{\partial\boldsymbol{f}}{\partial\lambda}\\ \boldsymbol{A} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}\mu}\\ \dfrac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}\mu}\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{f}}{\mathrm{d}\mu}\\ \boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\dfrac{\partial\boldsymbol{J}}{\partial\mu}\boldsymbol{u}\end{bmatrix} \tag{9}$$

式（9）中，$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{xx}\boldsymbol{u}$，$\boldsymbol{f}_{xx}\boldsymbol{u}\in\boldsymbol{R}^{n\times n}$，其第$i$行、第$j$列元素定义为$\sum\limits_{k=1}^{n}(\dfrac{\partial^2\boldsymbol{f}_i}{\partial\boldsymbol{x}_j\partial\boldsymbol{x}_k}\cdot\boldsymbol{u}_k)$。

可证明式（9）的系数矩阵是非奇异矩阵[17]。

对式（9）等式两边同时求导得$\boldsymbol{x}$和λ的2阶导数。可类推出求取$\boldsymbol{x}$和λ的k阶导数公式如下：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{J} & \dfrac{\partial\boldsymbol{f}}{\partial\lambda}\\ \boldsymbol{A} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dfrac{\mathrm{d}^k\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}\mu^k}\\ \dfrac{\mathrm{d}^k\lambda}{\mathrm{d}\mu^k}\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}\dfrac{\mathrm{d}^k\boldsymbol{f}}{\mathrm{d}\mu^k}+\sum\limits_{m=0}^{k-2}C_{k-1}^{m}\dfrac{\partial^{k-1-m}J}{\partial\mu^{k-1-m}}\dfrac{\mathrm{d}^{m+1}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}\mu^{m+1}}\\ \sum\limits_{m=0}^{k-1}C_{k-1}^{m}\dfrac{\mathrm{d}^{k-1-m}\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}}{\mathrm{d}\mu^{k\text{-}1\text{-}m}}\dfrac{\mathrm{d}^m\boldsymbol{DV}}{\mathrm{d}\mu^m}\end{bmatrix} \tag{10}$$

其中：当m=1,2,⋯,k−2时

$$\frac{\mathrm{d}^m\boldsymbol{DV}}{\mathrm{d}\mu^m}=\sum_{s=0}^{k-1}C_m^s\frac{\mathrm{d}^{m-s}\boldsymbol{J}}{\mathrm{d}\mu^{m-s}}\cdot\frac{\mathrm{d}^s\boldsymbol{u}}{\mathrm{d}\mu^s} \tag{11}$$

当m=k−1时

$$\frac{\mathrm{d}^{k\text{-}1}\boldsymbol{DV}}{\mathrm{d}\mu^{k\text{-}1}}=\sum_{s=0}^{k-1}C_{k\text{-}1}^{s}\frac{\mathrm{d}^{k\text{-}1\text{-}s}\boldsymbol{J}}{\mathrm{d}\mu^{k\text{-}1\text{-}s}}\cdot\frac{\mathrm{d}^s\boldsymbol{u}}{\mathrm{d}\mu^s}+(k-1)\boldsymbol{J}\mu\boldsymbol{x}^{k-2}\boldsymbol{u} \tag{12}$$

$$\frac{\mathrm{d}^k\boldsymbol{J}}{\mathrm{d}\mu^k}=\frac{\partial^k\boldsymbol{J}}{\partial\boldsymbol{x}^k}+k\frac{\partial^{k-1}\boldsymbol{J}}{\partial\mu^{k-1}}=\boldsymbol{J}\boldsymbol{x}^k+k\boldsymbol{J}\mu\boldsymbol{x}^{k-1}$$

2　四参数拟合方法

2.1 用泰勒展开式求取 N-1 状态下的 SNB 点

故障后系统的负荷裕度用 $\lambda(\mu)$ 表示。系统故障前，线路处于联通状态，其支路导纳系数 $\mu_0=1$，$\lambda(1)$ 表示故障前系统负荷裕度；系统故障后故障线路三相断路，其支路导纳系数 $\mu_1=0$，$\lambda(0)$ 表示故障后系统负荷裕度。将 $\lambda(\mu)$ 在 $\mu_0=1$ 处展开成泰勒级数有：

$$\lambda(\mu)=\lambda(\mu_0)+\lambda'(\mu_0)(\mu-\mu_0)+\lambda''(\mu_0)(\mu-\mu_0)^2/2!+\lambda'''(\mu_0)(\mu-\mu_0)^3/3!+\cdots+\lambda^{(n)}(\mu_0)(\mu-\mu_0)^n/n!+\cdots \tag{13}$$

2.2 负荷裕度的 1～3 阶导数基础上的四参数拟合

设 $\lambda=\dfrac{p_1+p_2\mu}{p_0+\mu}\times\dfrac{1}{p_3+\mu}$，则可推导出

$$\lambda(p_0+\mu)(p_3+\mu)=p_1+p_2\mu$$

将式（13）代入得：

$$p_1+p_2\mu-\lambda(\mu)p_0p_3-\lambda(\mu)\mu(p_0+p_3)=\lambda(\mu)\mu^2$$

当 μ=1 时有：

$$p_1+p_2-\lambda(1)p_0p_3-\lambda(1)(p_0+p_3)=\lambda(1) \tag{14}$$

同理，当 μ=0.95，μ=0.9，μ=0.85 时有：

$$p_1+0.95p_2-\lambda(0.95)p_0p_3-0.95\lambda(0.95)\cdot(p_0+p_3)=0.95^2\lambda(0.95) \tag{15}$$

$$p_1+0.9p_2-\lambda(0.9)p_0p_3-0.9\lambda(0.9)\cdot(p_0+p_3)=0.9^2\lambda(0.9) \tag{16}$$

$$p_1+0.85p_2-\lambda(0.85)p_0p_3-0.85\lambda(0.85)\cdot(p_0+p_3)=0.85^2\lambda(0.85) \tag{17}$$

式中 $\lambda(0.95)$，$\lambda(0.9)$，$\lambda(0.85)$ 由式(13)求得，精确到 3 阶。

联立式(13)～(16)可解得 p_1，p_2，p_0p_3，p_0+p_3，又由 μ=0 时，$\lambda_{\mu=0}=\dfrac{p_1}{p_0p_3}$ 可求得故障后负荷裕度 $\lambda_{\mu=0}$。

同理可得出状态变量 $\boldsymbol{x}$ 对支路连接参数的高阶导数，只需在上述公式中将 λ 换成 $\boldsymbol{x}$ 即可。在求得正常状态下 $\boldsymbol{x}$ 和 λ 对支路连接参数 μ 的 1~3 阶导数的基础上，只需付出较小的计算代价便可用按拟合得到故障后负荷裕度及电压得到 $\boldsymbol{x}$ 和 λ 对功率的相应阶导数，经系统算例证明，在对支路连接参数求灵敏度转换为曲线拟合方法后，λ 逼近真值的速度更快，精度更高。

3　系统算例分析

3.1 IEEE30 系统

以 IEEE30 系统为例，用连续潮流法，λ/μ 灵敏度方法和拟合方法分别对该系统进行了试算，表 1 中 2 列给出了系统中可断线路发生三相断路故障后采用 1～3 阶导数逼近时所求得的故障后 λ，3 列给出了系统中可断线路发生三相断路故障后采用拟合方法时所求得的故障后 λ。将它们与用连续潮流得到的 λ^* 精确解（第 4 列）进行比较，可以看出，

表 1 IEEE30 节点系统 N-1 故障时的 λ/μ 逼近法，拟合逼近与连续潮流法结果对比

Tab.1 Result comparison between λ/μ approximation, imitate approximation and continuation power flow when three-phase tripping on IEEE 30 bus system

支路		负荷裕度		
		λ/μ 灵敏度3阶逼近	拟合方法逼近	连续潮流
2	4	0.460 6	0.458 8	0.457 8
2	5	0.205 2	0.133 9	0.140 0
3	4	0.425 6	0.375 3	0.240 0
2	6	0.397 5	0.395 3	0.394 2
4	6	0.463 3	0.437 2	0.399 9
5	7	0.538 5	0.537 8	0.538 0
6	8	0.532 0	0.525 1	0.498 7
6	9	0.491 2	0.479 4	0.466 2
6	10	0.508 2	0.507 6	0.507 4
12	14	0.538 0	0.536 4	0.534 9
12	15	0.516 2	0.509 5	0.500 6
12	16	0.538 6	0.536 5	0.533 4
14	15	0.546 0	0.545 9	0.545 8
16	17	0.544 4	0.543 7	0.542 4
15	18	0.540 6	0.538 6	0.534 5
18	19	0.545 8	0.545 4	0.543 9
19	20	0.543 7	0.541 8	0.528 8
10	20	0.532 8	0.527 4	0.513 6
10	17	0.544 8	0.543 7	0.538 3
10	21	0.529 2	0.525 3	0.520 2
10	22	0.540 9	0.540 8	0.540 6
21	22	0.546 7	0.546 7	0.546 6
15	23	0.539 2	0.536 4	0.530 6
22	24	0.537 4	0.534 2	0.528 6
23	24	0.544 2	0.543 6	0.542 5
24	25	0.546 4	0.546 2	0.546 2
25	27	0.541 1	0.538 1	0.528 9
27	29	0.524 0	0.513 8	0.488 9
27	30	0.502 1	0.480 2	0.454 7
28	27	0.416 3	0.320 5	0.262 9
29	30	0.537 9	0.535 1	0.529 5
8	28	0.540 8	0.540 8	0.540 8
6	28	0.527 5	0.521 5	0.509 8

λ/μ 灵敏度方法和拟合方法在逼近故障后 λ 真实值方面都不存在问题，但拟合方法较 λ/μ 灵敏度方法在逼近速度上更具优势。采用拟合方法在较严重故障下原系统的静态电压稳定临界点对线路连接参数的 1~3 阶 λ/μ 灵敏度方法加以少量的数值计算即可得到较为精确的值，其结果与连续潮流计算值相当接近。文献[16]采用基于泰勒级数的计算方法逼近电压崩溃点，在此试算 3 阶导数逼近与拟合方法和连续潮流法进行比较，由于泰勒级数高阶部分的截除对结果的影响，导致某些支路采用 3 阶逼近的差异比拟合方法或连续潮流法要大。该方法运算量少，精确度较高，实现了速度与精度兼顾，完全可应用于在线电压安全稳定分析。

3.2 IEEE57 系统

表 2 IEEE57 节点系统 N-1 故障时的 λ/μ 逼近法、拟合逼近法与连续潮流法结果对比

Tab.2 Result comparison between λ/μ approximation, imitate approximation and continuation power flow when three-phase tripping on IEEE 57 bus system

支路		负荷裕度		
		λ/μ 灵敏度 3 阶逼近	拟合方法逼近	连续潮流
5	4	0.621 89	0.621 656	0.621 507
6	4	0.620 026	0.619 644	0.619 383
7	6	0.617 056	0.616 250	0.615 607
8	6	0.605 129	0.604 400	0.603 972
10	9	0.622 698	0.622 664	0.622 792
11	9	0.623 207	0.622 906	0.622 552
12	9	0.615 257	0.615 229	0.615 214
13	9	0.624 685	0.624 709	0.624 72
14	13	0.625 594	0.625 533	0.625 471
15	13	0.599 48	0.598 596	0.598 05
15	3	0.605 615	0.601 993	0.607 957
6	5	0.627 689	0.628 295	0.629 406
12	10	0.601 724	0.598 237	0.594 615
13	11	0.619 247	0.618 116	0.616 782
13	12	0.593 342	0.588 667	0.583 386
17	12	0.574 999	0.569 598	0.565 151
19	18	0.617 452	0.615 240	0.612 689
20	19	0.624 58	0.623 709	0.621 99
21	20	0.626 371	0.626 316	0.626 442
22	21	0.626 863	0.626 832	0.626 442
39	37	0.626 724	0.626 581	0.622 27
40	36	0.627 084	0.627 209	0.628 485
11	41	0.609 233	0.608 344	0.607 702
43	41	0.605 68	0.601 285	0.595 467
49	48	0.624 712	0.624 558	0.624 44
50	49	0.626 619	0.626 314	0.625 704
51	50	0.612 571	0.610 143	0.607 668
13	49	0.569 478	0.564 832	0.562 511
54	53	0.620 805	0.618 628	0.613 856
40	56	0.628 561	0.628 596	0.628 484
41	56	0.614 631	0.614 204	0.614 112
42	56	0.625 225	0.624 826	0.624 242
39	57	0.623 273	0.622 809	0.622 27
56	57	0.624 486	0.623 332	0.620 947
49	38	0.618 113	0.617 741	0.617 512

同样以 IEEE57 系统为例，用连续潮流法，λ/μ 灵敏度方法和拟合方法分别对该系统进行了试算，选出非薄弱线路，较严重故障，关键线路故障若干。表 2 中各列排列同表 1。从表 2 中可得出与表 1 相同结论：λ/μ 灵敏度方法和拟合方法都能逼近故障后 λ 真实值，拟合方法较 λ/μ 灵敏度方法在逼近速度上更具优势。

3.3 速度分析比较

程序计算总时间：$t = t_0 + k_1 t_1 + k_2 t_2 + k_3 t_3$，其中：$t_0$，$t_1$，$t_2$，$t_3$ 分别为事故前崩溃点计算及系数矩阵分解时间，左特征向量排队时间，计算 3 阶灵敏度时间，拟合计算时间。k_1，k_2，k_3 分别为所有的事故支路数，较严重的事故支路数，关键线路数。计算时间对比如表 3 所示。

表 3 IEEE30 节点系统 N-1 故障时的负荷裕度计算时间对比

Tab.3 Time comparison of execution time when three-phase tripping on IEEE30 bus system

系统	事故前崩溃点计算 T_0 / s	对于单一线路事故		
		左特征向量排队 / s	3 阶灵敏度逼近 / s	拟合方法逼近 / s
IEEE30	0.221 0	0.014	0.085	0.002
IEEE57	0.384 7	0.025	0.153	0.004

从表 1、表 2 及表 3 中可以看出，在采用新的算法以后，在增加计算时间不多的情况下可以快速精确地排序并逼近严重事故集的负荷裕度精度。

4 结论

高阶 λ/μ 灵敏度方法和拟合方法都可以逼近 λ 真实值，它们逼近的结果都已经极其接近连续潮流计算值，但拟合方法在逼近速度上较 λ/μ 灵敏度方法更具优势。该方法继承了 λ/μ 方法的特性，即对不同线路故障计算故障后的电压崩溃点无需进行反复迭代，不需进行雅可比矩阵的重复计算与三角分解，其计算速度远比连续潮流法快。同时该方法又避免了繁琐的特征向量较高阶导数的求取，加速了对准确值的逼近。本文方法所具有的高效性与精确性使其适合大型电力系统在线计算应用。

参考文献

[1] Van Cutsem T，Voumas C. Voltage stability of electric power systems[M]. Norwell，MA：Kluwer，1998.

[2] Taylor C W. Power system voltage stability[M]. New York：McGraw—Hill，1994.

[3] GIGRE Task Force 38. 02. 11GIGRE techical brochure：indices predicting voltage collapse including dynamic phenomenon[J]. Electra，1995，159：135-147.

[4] 周双喜，朱凌志，郭锡玖，等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京：中国电力出版社，2003.
ZHOU Shuang-xi，ZHU Ling-zhi，GUO Xi-jiu, et al. Power system voltage stability and control[M]. Beijing：China Electric Power Press，2003.
[5] 包黎昕，张步涵，段献忠，等. 电压稳定裕度指标分析方法综述[J]. 电力系统自动化，1999，23（8）：52-55.
BAO Li-xin，ZHANG Bu-han，DUAN Xian-zhong，et al. A summary of the art of voltage stability margin indices[J]. Automation of Electric Power Systems，1999，23（8）：52-55.
[6] Venkataramana Ajjarapu，Colin Christy. The continuation power flow：a tool for steady state voltage stability analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems，1992，7（1）：416-423.
[7] 赵晋泉，江晓东，张伯明. 一种用于静态稳定分析的故障参数化连续潮流模型[J]. 电力系统自动化，2004，28（14）：45-49.
ZHAO Jin-quan，JIANG Xiao-dong，ZHANG Bo-ming. A new contingency parameter continuation power flow model for steady stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems，2004，28（14）：45-49.
[8] 曾江，韩桢祥. 电压稳定临界点的直接计算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版，1997，37（S1）：91-94.
[9] 吴浩，方鸽飞. 电压稳定临界点的实用直接法[J]. 电力系统自动化，1999，11（5-6）：18-24.
WU Hao，FANG Ge-fei. A practical direct method for voltage collapse point[J]. Automation of Electric Power Systems，1999，11（5-6）：18-24.
[10] 赵柯宇，吴政球，刘杨华. N-1 故障静态电压稳定极限的快速计算[J]. 电网技术，2008, 32(17): 62-67.
ZHAO Ke-yu，WU Zheng-qiu，LIU Yang-hua. Rapid calculation of static voltage stability on the power system under N-1 topology[J]. Power System Technology，2008,32(17): 62-67.
[11] Alvarado F L，Jung T H. Direct detection of voltage collapse conditions[R]. Proceedings Bulk Power System Voltage Phenomena-Voltage Stability and Security，EPRI EL-6183，Project 2473- 21Proceedings.1989：23-38.
[12] 邱晓燕，李兴源，林伟. 在线电压稳定性评估中事故筛选和排序方法的研究[J]. 中国电机工程学报，2004，24（9）：50-55.
QIU Xiao-yan，LI Xing-yuan，LIN Wei. Methods for contingency screening and ranking for on-line voltage stability assessment[J]. Proceedings of the CSEE，2004，24（9）：50-55.
[13] Flueck A J，Gonella R，Dondeti J R. A new power sensitivity method of ranking branch outage contingencies for voltage collapse[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002，17（2）：265-270.
[14] 江伟，王成山，余贻鑫，等. 电压稳定裕度对参数灵敏度求解的新方法[J]. 中国电机工程学报，2006，26（2）：13-18.
JIANG Wei，WANG Cheng-shan，YU Yi-xin，et al. A new method to compute the sensitivity of loading margin to voltage collapse with respect to parameters[J]. Proceedings of the CSEE，2006，26（2）：13-18.

收稿日期：2009-08-08；　修回日期：2009-09-21

作者简介：
张小兵（1984-），男，硕士研究生，研究方向为电力系统稳定性分析；E-mail：zhangxiaobing4401@163.com
吴政球(1963-)，男，教授，博士生导师，主要从事电力系统分析、电力市场与分布式发电的研究；
李连伟（1984-），男，硕士研究生，研究方向为电力系统稳定性分析。

（上接第 15 页　continued from page 15）

[4] Bjorgan R, Liu C, Lawarree J. Financial risk management in a competitive electricity market[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, (14): 1285-1291.
[5] Ardrews C.Evaluting risk management strategies in resource planning making[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, (10): 420-426.
[6] Song H. Optimal strategies for electric energy contract decision making, doctoral dissertation[D]. Seattle: Univ of Washington, 2000.
[7] Oren S S. Integrating real and financial options in demand-side electricity contracts[J]. Decision Support System, 2001(30): 279-288.
[8] Michael Denton, Adrian Palmer, Ralph Masiello, et al. Managing market risk in energy[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 494-502.
[9] Dahlgren Robert, Liu Chen-Ching, Lawarree Jacq-ues. Risk assessment in energy trading[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 503-511.
[10] Jorion P. Value at risk: the benchmark for controlling market risk[M]. New York: Mc Graw-Hill, 2005.
[11] Morgan J P. Risk metrics-technical document[M]. Fourth edition. New York: Morgan Guaranty Trust Company, 1996.

收稿日期：2009-09-01；　修回日期：2009-12-06

作者简介：
李　明（1977-），女，讲师，硕士，主要从事电力市场方向的研究；E-mail：kemaoli@163.com
张　强（1978-），女，副教授，硕士，主要从事电力市场方向的研究；
司　杨（1982-），男，讲师，硕士，主要从事信号检测与处理方向的研究。