

# 基于非线性灵敏度与曲线拟合法的负荷裕度快速算法

罗小春, 李华强, 程超, 柳华栋

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 采用非线性灵敏度法对支路事故进行初步排序, 避免了线性灵敏度方法筛选严重事故时可能导致的漏选。然后采用二次曲线拟合的方法, 将非线性灵敏度得到的负荷裕度作为步长得到第二个曲线拟合点进行拟合, 比较精确地得到严重事故集的负荷裕度。该方法在 IEEE30、IEEE57 节点系统中得到了验证。

**关键词:** 事故筛选与排序; 非线性灵敏度; 曲线拟合

## Fast algorithm based on non-linear sensitivity method combining generalized curved fitting method for loading margin

LUO Xiao-chun, LI Hua-qiang, CHENG Chao, LIU Hua-dong

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** A non-linear sensitivity method is described in the beginning of this paper, which is used to rank branch contingencies to avoid leakage of ranking severe contingencies by linear sensitivity method. Secondly, the quadratic curve method is applied to obtain accurate load margins of critical contingencies by using load margin, which is used to be the step calculated through non-linear sensitivity method. The performance of the proposed method has been well tested by the numerical examination in IEEE 30-bus, 57-bus test power system.

**Key words:** contingency screening and ranking; non-linear sensitivity; generalized curve fitting

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1673-3415(2008)15-0050-06

## 0 引言

在电力市场环境下, 出于充分利用电网资源的考虑, 电力系统的实际运行方式越来越接近于稳定极限。如何在事故扰动情况下快速评估其电压稳定性成为一个迫切需要解决的问题。在线电压稳定评估需要快速而准确地估计系统在各种扰动以及计划检修机制下的电压稳定裕度, 便于调度人员采取积极有效的预防校正措施提高其电压稳定裕度, 保证系统运行安全。

目前对于在线电压稳定评估的要求在于能够既迅速又准确地对事故进行筛选和排序, 特别是对于一些严重影响系统安全运行的事故。文献[1,2]对 PV 曲线采用迭代过滤方法结合曲线拟合法进行事故筛选和排序。也有的研究者关注电网的物理或者运行指标, 例如奇异值指标法<sup>[3]</sup>, 收敛判定法<sup>[4]</sup>, 无功支持指标<sup>[5]</sup>以及电气距离<sup>[6]</sup>等, 文献[7~9]采用事故崩溃点处对于网络参数的灵敏度, 快速进行事故

的筛选和排序。文献[10,11]在线性灵敏度的基础上加以改进, 提出非线性灵敏度更适用于非线性较强的系统。

这些方法在一定程度上能够解决对大量事故的快速排序问题, 但是在非线性较强的系统中某些事故对于选定的指标会存在严重的非线性特性, 可能会导致对这些事故的误排序。

因此本文采用非线性灵敏度方法对于大量的事故进行初步筛选后得到严重事故集, 同时得到一组比较准确的负荷裕度预测值。本文采用这个负荷裕度预测值对应的状态变量预测值作为一个  $\lambda-V$  曲线的拟合点, 通过对顶点的计算得到非常精确的负荷裕度值并进行排序。通过对于 IEEE30、IEEE57 节点系统算例验证了本文提出方法的有效性。

## 1 在线电压稳定研究

目前对于在线电压稳定研究来说, 基于精确算法的事故过滤与排序, 例如连续潮流法<sup>[12]</sup>, 崩溃点

法<sup>[13]</sup>, 非线性规划法<sup>[14]</sup>, 其计算时间长, 难以满足在线应用的要求。而基于线性灵敏度<sup>[15, 16]</sup>的快速事故过滤及排序算法又有可能导致对于非线性系统中某些严重事故的误排序, 或者计算的事事故后的负荷裕度精度难以满足要求。

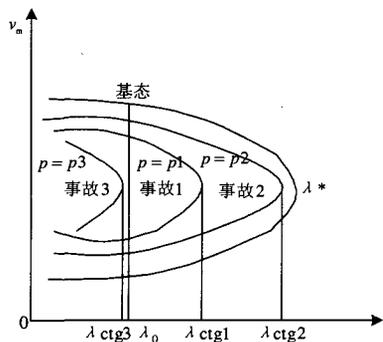


图1 事故情况下的负荷裕度

Fig.1 Loading margin under contingencies

如图1所示, 其中,  $\lambda^*$  为事故前系统崩溃点处的负荷水平,  $\lambda_{ctg1}, \lambda_{ctg2}, \lambda_{ctg3}$  分别为事故 1、2、3 后崩溃点处的负荷水平。对于电力系统而言, 针对每条支路或者发电机的事故而精确进行负荷裕度的计算, 并以此作为排序的方法由于非常费时应该予以避免。调度人员应该重点关注严重的事故集合, 如事故 3 和事故 1; 而对于轻微事故, 如事故 2, 应该采取快速算法予以筛除。

## 2 非线性灵敏度方法介绍

一般潮流扩展方程表述为

$$f(x, \lambda) = y_0 + \lambda y_d - g(x) = 0 \quad (1)$$

其中:  $y_0$  为节点指定注入功率,  $y_d$  为负荷变化方向,  $\lambda$  表示系统的负荷参数,  $g(x)$  为节点功率注入。

设事故前崩溃点处的负荷裕度和状态变量已由连续潮流法等精确算法得出,  $\lambda = \underline{\lambda}$ ,  $x = \underline{x}$ 。基于灵敏度的方法引入故障参数  $p$ ,  $p \in [0, 1]$ ,  $p = 0$ , 表示系统处于故障前;  $p = 1$ , 表示系统处于故障后。这样就将离散的事故转化为对应于  $p$  参数的连续空间。故障参数  $p$  对象的选择可以使用支路导纳<sup>[17]</sup>或者支路视在功率<sup>[18]</sup>。例如, 将支路  $(i, j)$  导纳  $Y_{ij}$  定义为  $(1-p)Y_{ij}$ 。文献[11]通过大量的仿真试验表明, 当  $p$  参数选择恰当时, 事故后的系统负荷裕度对参数  $p$  近似呈现出线性关系。然而文献[10]说明了存在某些非线性较强的系统, 在这

类系统中当事故发生时, 这种线性关系有可能被打破。文献[10]由此提出出了非线性方法, 对由线性灵敏度得到的负荷裕度预测值作了一个修正, 这样能够提高严重故障的负荷裕度精度。因此采用非线性灵敏度法得到的负荷裕度进行排序, 可以得到严重事故集。然后继续在第二阶段采用曲线拟合法进一步修正严重事故集的负荷裕度精度。

### 2.1 线性灵敏度法

对于鞍结分叉形式的崩溃点, 在崩溃点处下式成立

$$f(x, \lambda, p) = y_0 + \lambda y_d - g(x, p) = 0 \quad (2)$$

$$\omega^T f_x(x, \lambda, p) = 0 \quad \|\omega\| \neq 0 \quad (3)$$

$$\text{或者 } f_x(x, \lambda, p)v = 0, \quad \|v\| \neq 0 \quad (4)$$

其中:  $p$  即为故障参数,  $\omega$  为最小特征值对应的左特征向量,  $v$  为最小特征值对应的右特征向量。

将式(2)、(3)、(4)在事故前崩溃点处线性化, 得到

$$H \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = r^{(k)} \quad (5)$$

式(5)中

$$H = \begin{bmatrix} -f_x & -f_\lambda \\ \underline{v}^T \sum_i \omega_i f_{x_i} & 0 \end{bmatrix}$$

$$r^{(k)} = \begin{bmatrix} f_p \\ \underline{\omega}^T f_{xp} \underline{v} \end{bmatrix}$$

其中:  $f_x \in R^{n \times n}$  为系统的雅克比矩阵,  $f_\lambda \in R^{n \times 1}$ , 为对负荷参数的偏导,  $f_p \in R^{n \times 1}$ , 为对事故参数的偏导,  $f_{x_i} \in R^{n \times n}$ ,  $f_{xp} \in R^{n \times n}$ 。  $\omega_i \in R^{1 \times 1}$ ,  $\omega$  为第  $i$  个元素。  $n$  为潮流方程维数。

上述方程中,  $H$  矩阵不依赖于事故, 可以先进行因子分解, 分解后可适用于全部故障的计算, 从而快速求得  $\Delta x$ 、 $\Delta \lambda$ , 极大地提高了计算效率。事故后的负荷裕度和状态变量的预测值可以由下式获得。

$$\bar{\lambda} = \underline{\lambda} + \Delta \lambda$$

$$\bar{x} = \underline{x} + \Delta x$$

其中:  $\bar{\lambda}$  和  $\bar{x}$  为线性灵敏度算法得到的事故下的负荷裕度和状态变量预测值。

由于线性灵敏度值对于某些非线性强的系统精度较低, 所以本文应用非线性灵敏度算法对其进行

修正。

### 2.2 非线性灵敏度法

如式(2)所述, 引入故障参数的扩展潮流方程为

$$f(x, \lambda, p) = y_0 + \lambda y_d - g(x, p) = 0 \quad (6)$$

将由线性灵敏度得到的状态量预测值  $\bar{x}$  代入式(6), 然后, 对式(6)左乘  $\omega^T$  化简后得到修正后的事故后的非线性负荷裕度值。

$$\tilde{\lambda} = \frac{\omega^T (g(\bar{x}, 1) - y_0)}{\omega^T y_d} = F(\bar{x}) \quad (7)$$

### 2.3 一维搜索

为了得到更精确的预测值, 可以采用一维搜索对非线性预测值进一步进行修正, 首先设

$$\tilde{x} = \bar{x} + \mu \Delta x \quad (8)$$

$$\tilde{\lambda} = F(\bar{x} + \mu \Delta x) \quad (9)$$

这里  $\mu$  是一个标量乘子。为得到  $\mu$ , 采用下列优化问题

$$\min_{\mu} \varepsilon(\mu)$$

$$\varepsilon(\mu) = f(\tilde{x}(\mu), \tilde{\lambda}(\mu), 1)^T W f(\tilde{x}(\mu), \tilde{\lambda}(\mu), 1) = \mu^4 a_4 + \mu^3 a_3 + \mu^2 a_2 + \mu a_1 + a_0$$

上式中,  $f(\tilde{x}(\mu), \tilde{\lambda}(\mu), 1)$  为事故后潮流方程残差,  $W$  为权重因子。文献[10]探讨了  $W$  对应于不同的系统的取值以及精度问题。解关于  $\mu$  的四次方程, 得到  $\mu$  值。代入方程(8)、(9)中, 得到事故后在靠近崩溃点处较为精确的负荷裕度及状态变量预测值。

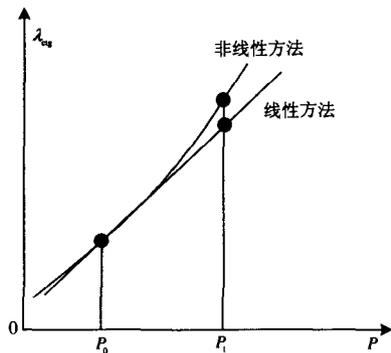


图2 负荷裕度对事故参数的灵敏度

Fig.2 Loading margin as parameter  $p$  varies

## 3 曲线拟合方法介绍

文献[19]指出对于鞍结分叉类型的电压崩溃, 在崩溃点附近  $\lambda-V$  曲线近似为二次曲线, 并且指

出曲线拟合方法的关键在于第二个拟合点必须接近崩溃点, 否则会导致曲线拟合方法得到的负荷裕度误差较大。

### 3.1 拟合关键节点的选取

对于曲线拟合方法中节点的选取, 可以采用连续潮流计算过程中在两个不同的负荷水平  $\lambda_1$  及  $\lambda_2$  时, 对应电压相对下降最大的节点作为拟合节点。为此, 文献[19]首先定义式(10)。

$$\Delta V_i = \frac{(V_i |_{\lambda=\lambda_1} - V_i |_{\lambda=\lambda_2})}{V_i |_{\lambda=\lambda_1}} \quad (10)$$

本文对于两个负荷水平的选取, 采用式(11)

$$\Delta V_i = \frac{(V_i |_{\lambda=\lambda_0} - V_i |_{\lambda=\tilde{\lambda}})}{V_i |_{\lambda=\lambda_0}} \quad (11)$$

式(11)中,  $V_i |_{\lambda=\lambda_0}$  为严重事故在基态负荷水平下的节点电压值。  $V_i |_{\lambda=\tilde{\lambda}}$  为采用非线性灵敏度方法得到的严重事故集在事故后靠近崩溃点处的节点电压预测值。

采用  $\Delta V_i$  作为指标选取电压幅值降落最大的节点。如果  $\Delta V_i$  是集合  $\{\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_n\}$  中最大值, 则选取第  $i$  个节点作为  $\lambda-V$  曲线的曲线拟合关键节点。

### 3.2 拟合曲线求取

选定关键节点后, 负荷裕度与选取的关键节点的电压关系式近似描述为

$$\hat{\lambda} = \alpha + \beta V_i + \gamma V_i^2$$

这里,  $\hat{\lambda}$  为拟合曲线对应的负荷参数,  $V_i$  为式(6)选取的关键节点电压,  $\alpha, \beta, \gamma$  为  $\lambda-V$  拟合曲线的待定系数。

如图3所示,  $\lambda_{ctg1}^*$  为事故1后的负荷水平预测值, 在对应于关键节点的  $\lambda-V$  曲线上取两个点后, 得到式(12)

$$\begin{cases} \hat{\lambda}_1 = \alpha + \beta V_{i,1} + \gamma V_{i,1}^2 \\ \hat{\lambda}_2 = \alpha + \beta V_{i,2} + \gamma V_{i,2}^2 \\ 1 = \beta \frac{\partial V}{\partial \lambda} |_{i,2} + 2\gamma V_{i,2} \frac{\partial V}{\partial \lambda} |_{i,2} \end{cases} \quad (12)$$

解方程组(12)由此得到  $\lambda-V$  曲线的顶点, 得到

$$\hat{\lambda}_{v \max} = \alpha - \frac{\beta^2}{4\gamma}$$

文献[1]通过迭代过滤筛选和曲线拟合法,对事故进行排序。通过选取 $\lambda-V$ 曲线上的三个稳定平衡点,其中,第1点( $x^{(1)}, \lambda^{(1)}$ )为事故后的稳定平衡点,第3点为事故后从事前崩溃点处负荷水平按照比例减负荷至潮流有解的点,在第3点基础上减少一定比例负荷确定第2点。以此三个点进行二次曲线的拟合。最后得到对应事故后 $\lambda-V$ 曲线的顶点。缺点是在初始的迭代过滤过程中计算量大,并且存在误排序的可能。

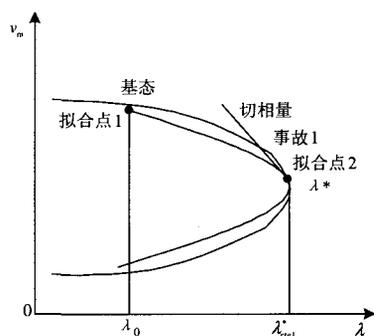


图3 负荷裕度的曲线拟合法

Fig.3 Generalized curved fitting method for loading margin

文献[8]采用线性灵敏度结合二次曲线拟合的方法进行事故筛选和排序,但是由于对于某些非线性强的系统,线性灵敏度得到的负荷裕度误差较大,会导致误排序。并且其误差不能有效控制在一个合适的范围内,将其作为步长应用于二次曲线拟合也会导致严重事故的负荷裕度计算误差较大。

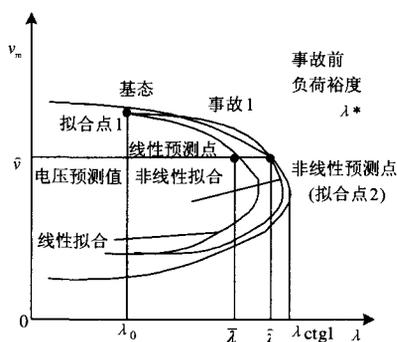


图4 事故情况下的负荷裕度

Fig.4 Loading margin under contingencies

而本文采用的灵敏度方法,特别是非线性灵敏度方法取得的事故后的负荷裕度和状态变量预测值充分靠近崩溃点。因此可以将基于非线性方法得到的较为精确的负荷裕度以及状态变量预测值作为曲线拟合的第二个点。使用这个点和第二点对参数 $\lambda$ 的导数以及事故后基态的平衡点进行二次曲线拟

合,然后通过计算顶点可以更为精确地获得严重事故后对应的负荷裕度。如图4所示。

## 4 新的算法

新的算法分为三步,1)采用非线性灵敏度法对于严重事故进行判定和初步排序;2)选取事故后基态至接近崩溃点处的电压相对下降最大的节点作为曲线拟合节点;3)采用二次曲线拟合修正严重事故集的负荷裕度并对严重事故集合重新进行排序。

## 5 计算步骤

(1)应用崩溃点法计算故障前系统的静态分岔点。

(2)根据在分岔点的负荷裕度对于事故参数 $p$ 的灵敏度,采用非线性灵敏度方法获得全部事故的负荷裕度。

(3)使用非线性灵敏度方法得到的负荷裕度预测值进行初步排序,筛选出严重事故集。

(4)对于严重事故集,利用非线性方法得到事故后的比较精确的系统状态变量预测值以及在该预测点对于参数 $\lambda$ 的导数。

(5)计算严重事故集在基态情况下的潮流,得到另外一个事故解(若无解并且负荷裕度非线性预测值为负,则作为失稳故障)。

(6)使用上述两组潮流解,采用同一事故情况下的电压下降率最大的节点作为关键节点,用作该事故进行 $\lambda-V$ 曲线拟合的节点。

(7)对严重事故集进行 $\lambda-V$ 曲线拟合得到准确度提高的事故后负荷裕度值并重新对严重事故集进行排序。

## 6 算例分析及图表

算例采用IEEE30、IEEE57节点系统。仿真结果表明,采用非线性灵敏度方法进行事故筛选和排序,然后对严重事故集中每个事故采用曲线拟合的方法能够提高负荷裕度的精度,其结果要明显优于采用线性灵敏度的方法。特别是对于最严重的支路事故其精度明显提高。仿真结果见表1。从仿真结果中可以看出单纯采用曲线拟合的方法或单纯采用线性灵敏度方法对于一般支路事故其误差较大。因此必须预先采用非线性灵敏度进行初步排序,然后以非线性灵敏度方法得到的负荷裕度预测值为基础再采用曲线拟合方法提高其负荷裕度计算精度,这样既能保证计算速度的要求,又能提高严重事故集的负荷裕度的精度。

表 1 中,

$$\text{误差} = \frac{(\tilde{\lambda} - \lambda_{\text{poc}})}{\lambda_{\text{poc}}} \times 100 \quad (13)$$

式 (13) 中,  $\lambda_{\text{poc}}$  为崩溃点法计算得到的事故后负荷裕度准确值,  $\tilde{\lambda}$  为各种近似算法的负荷裕度估计值。整个程序计算时间包括  $T_0 + K_1 T_1 + K_2 T_2$ , 其中  $T_0$  为事故前崩溃点计算以及  $H$  矩阵的分解。  $T_1$  为

非线性灵敏度对于单一支路故障的计算时间。  $T_2$  为曲线拟合对于单一故障计算时间。  $K_1$  为所有事故支路数,  $K_2$  为筛选出的严重事故集的数目。 Matlab 程序采用 Intel(R) Celeron(R) M 处理器 (CPU: 1.50GHz) 进行计算。从表 1 及表 2 看出, 在采用新的算法之后, 在增加计算时间不多的情况下可以有效降低误排序的可能并提高严重事故集的负荷裕度精度。

表 1 支路事故的负荷裕度估计值 (IEEE57 系统)

Tab.1 Eestimated loading margin for branch outage contingencies for IEEE 57-bus system

线路	崩溃点法	精确排序	曲线拟合法	误差 / (%)	线性	线性误差 / (%)	非线性灵敏度结合曲线拟合方法		
							非线性&曲线拟合	排序	误差 / (%)
15	0.5235	1	0.5313	1.49	0.5433	3.7822	0.5187	1	-0.9176
8	0.5708	2	0.5739	0.54	0.5894	3.2586	0.5800	3	1.6115
16	0.5805	3	0.5879	1.27	0.5895	1.5504	0.5793	2	-0.194101
2	0.5888	4	0.5870	-0.31	0.5965	1.3077	0.5887	4	-0.00906
17	0.5894	5	0.6136	4.11	0.6002	1.8324	0.5916	5	0.3826
1	0.5933	6	0.5869	-1.08	0.6037	1.7529	0.5962	6	0.4831
42	0.5939	7	0.6032	1.57	0.6051	1.8858	0.5990	8	0.8622
58	0.5958	8	0.6012	0.91	0.6027	1.1581	0.5966	7	-0.1244

表 2 支路事故的负荷裕度估计值 (IEEE30 系统)

Tab.2 Eestimated loading margin for branch outage contingencies for IEEE 30-bus system

线路	崩溃点法	精确排序	曲线拟合法	误差 / (%)	线性	线性误差 / (%)	非线性灵敏度结合曲线拟合方法		
							非线性&曲线拟合	排序	误差 / (%)
1	0.3528	1	0.3203	-9.21	0.4077	15.5602	0.3551	1	0.6567
2	0.4134	2	0.4128	-0.15	0.4337	4.9122	0.4050	2	-2.0319
5	0.4143	3	0.4110	-0.80	0.4542	9.6353	0.4224	3	1.9436
6	0.4669	4	0.4667	-0.04	0.4759	1.9190	0.4615	4	-0.15106
4	0.4934	5	0.4932	-0.04	0.5090	3.1670	0.4988	6	1.1029
3	0.4937	6	0.4932	-0.10	0.4995	1.1830	0.4909	5	-0.5591
7	0.5036	7	0.5191	3.08	0.5139	2.0461	0.5067	7	0.6252
37	0.5103	8	0.5089	-0.27	0.5186	1.6275	0.5134	8	0.6022

表 3 负荷裕度计算时间比较

Tab.3 Comparison of the execution time s

	事故前崩溃点计算 $T_0$	对于单一线路事故 $\beta$		
		线性灵敏度	非线性灵敏度 $T_1$	非线性拟合 $T_2$
57 节点系统	0.3430	0.032	0.048	0.063
30 节点系统	0.2500	0.018	0.027	0.058

## 7 结论

本文先通过非线性灵敏度方法筛选出严重事故

集, 然后将非线性灵敏度方法得到的一个负荷裕度预测值作为关键节点的  $\lambda-V$  曲线的拟合点, 对严重事故集的负荷裕度予以修正, 解决了其他方法对于严重事故集可能导致的误排序问题, 并提高了严重事故集的负荷裕度精度。通过 IEEE30、IEEE57 节点系统对本算法进行了验证。证明了本算法能够解决对于严重事故的快速而精确的排序问题。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] JIA Zhi-hong, Jeyasurya B. Contingency Ranking for On-line Voltage Stability Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000,11(3).
- [3] Canizares C A, de Souza C A Z, Quintana V H. Comparison of Performance Indices for Detection for Detection of Proximity to Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on PWRs, 1996,15(3).
- [4] Sundhararajan S, Pahwa A, Starrett S, et al. Convergence Measures for Contingency Screening in Continuation Power Flow[J]. IEEE, 2003.
- [5] Vaahedi E, Fuchs C, Xu W, et al. Voltage Stability Contingency Screening and Ranking[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997,14(1).
- [6] LIU Hang, Bose Anjan, Venkatasubramanian Vaithianathan. A Fast Voltage Security Assessment Method Using Adaptive Bounding[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000,15(3).
- [7] 赵晋泉, 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 Jin-quan, JIANG Xiao-dong, ZHANG Bo-ming. A Sensitivity Method for Prevention of Branch Type Insecure Contingency[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 69-73.
- [8] 赵晋泉, 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 Jin-quan, JIANG Xiao-dong, ZHANG Bo-ming. A Contingency Screening and Ranking Method for Power System Static Stability Analysis[J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 62-67.
- [9] 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 Parameterization Continuation Power Flow Model for Steady Stability Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 28(14): 45-49.
- [10] Yorino N, Li H O, 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).
- [11] Scott G, Ian D, Alvarado F L. Sensitivity of the Loading to Voltage Collapse with Respect to Arbitrary Parameters[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997,12(11).
- [12] Ajjarapu V, Christy C. The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992,17(1).
- [13] Canizares C A, Alvarado F L. Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993,8(1).
- [14] 郭瑞鹏, 韩祯祥, 王勤. 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 Rui-peng, HAN Zhen-xiang, WANG Qin. Nonlinear Programming Model & Algorithm for Point of Collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 14-17.
- [15] Flueck 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.
- [16] Flueck A J, Chiang Hsiao-Dong, Wang Chen-Shan. A Novel Method of Look-Ahead Contingency Ranking for Saddle-Node Bifurcation[J]. IEEE, 1997.
- [17] Flueck A J, Dondeti Jayabharath R. A New Continuation Power Flow Tool for Investigating the Nonlinear Effects of Transmission Branch Parameter Variations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000,15(1).
- [18] Flueck A J, Dondeti Jayabharath R. A New Power Sensitivity Method of Ranking Branch Outage Contingencies for Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002,17(2).
- [19] Chiang H D, Wang C S, Flueck A J. Look-ahead Voltage and Load Margin Contingency Selection Functions for Large-scale Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 173-180.

收稿日期: 2007-11-16; 修回日期: 2008-01-01

作者简介:

罗小春(1974-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题; E-mail: luoxiaochun@china.com.cn

李华强(1965-), 男, 博士, 教授, 从事电压稳定及优化问题研究;

程超(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题。