交直流系统发电机故障电压稳定评估快速算法

赵周芳，李华强，叶晓峻，张希猛

（四川大学电气信息学院，四川 成都 610065）

摘要：高压直流输电给电力系统电压稳定的研究带来了新的挑战，适合于在线电压稳定评估的快速算法的开发显得尤为重要。针对发电机故障情况下采用线性灵敏度快速算法进行交直流系统电压稳定评估。在直流系统典型控制方式下，应用内点法求取故障前崩溃点处的负荷裕度，在崩溃点处将潮流方程线性化，快速求取除平衡节点发电机以外所有可能发电机故障情况时的负荷裕度。通过对 IEEE30 节点系统进行仿真证明该算法的可行性。

关键词：交直流系统；发电机故障；线性灵敏度；负荷裕度；内点法

Fast algorithm applied to generator outage voltage stability evaluation in AC／DC system

ZHAO Zhou-fang，LI Hua-qiang，YE Xiao-jun，ZHANG Xi-meng

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

Abstract：HVDC brings new challenges in voltage stability analysis．At the same time，the development of fast algorithm which is suitable to be applied into online voltage stability assessment becomes more and more important．This paper proposes fast algorithm which is based on the linear sensitivity method to assess generator outage voltage stability in AC／DC power system．Under typical DC control mode，the prefault maximum loading point is computed using the interior point method，and then the power flow equations are linearized around prefault bifurcation point．Load margin of outages of all possible generators except for the generator at the slack bus are calculated．IEEE30 bus systems are utilized to demonstrate the feasibility of the algorithm．

Key words：AC／DC power system；generator outage；linear sensitivity；load margin；interior point method

中图分类号： TM744 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2010)16-0035-04

0 引言

直流系统的引入改变了系统结构，再加上直流系统控制方式灵活多样，这给系统安全可靠运行提出了新的挑战。其中，如何快速对交直流系统进行电压稳定评估，并过滤出可能引起电压崩溃的关键发电机成为迫待解决的关键问题。

负荷裕度是评估交直流系统电压稳定最常用的指标。目前用于求取交直流系统负荷裕度的方法主要有崩溃点法[1-3]，连续潮流法[3-4]以及非线性规划法[5-6]。非线性规划法由于具有计算速度快，容易计及各种约束条件，并且具有二次收敛性等特点，可广泛用于电力系统的电压稳定评估。

直流系统的引入使系统的运行情况更加复杂，同时也使得电力系统规模日益庞大。电压稳定实时监控系统的应用显得十分必要。其中，很重要的功能之一就是实时对电力系统 N-1 故障进行电压稳定评估以保证系统运行人员能够确保系统的安全稳定运行。但是，现有的精确算法时间上无法满足实时对所有 N-1 故障的计算要求。因此，在评估过程中迫切需要一种快速算法能快速准确地过滤出交直流系统中引起严重故障的故障集。目前针对故障时求取负荷裕度的快速算法有迭代线性潮流法[7]，曲线拟合法[8]，线性灵敏度[9]以及非线性灵敏度方法[10]，其中文献[7-9]均是针对于支路断线故障。并且仅局限于纯交流系统，未见应用于交直流系统的快速算法。

本文提出一种应用于交直流系统发电机故障电压稳定评估的快速算法。首先应用内点法求解故障前系统的负荷裕度值，在此基础上应用线性灵敏度算法对交直流混联系统发电机故障进行负荷裕度的求取。直流系统在典型控制方式下—整流端定电流控制与逆变端定熄弧角控制，对除平衡节点发电机以外的所有可能的发电机故障进行测试，并根据负

基金项目：教育部回国人员科研启动基金

荷裕度值进行排序。通过对 IEEE30 节点系统的仿真证明该算法的可行性。

1 内点法求解交直流系统负荷裕度

1.1 原对偶内点法求负荷裕度的数学模型

无论是对于纯交流系统还是交直流混合系统，负荷裕度的求取均可归结为以下的优化问题：

$$\begin{cases}\min & (-\lambda)\\ \text{st} & \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\lambda)=\lambda \boldsymbol{y}_{\mathrm{d}}+\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})=0\\ & \boldsymbol{G}_{\min}\le \boldsymbol{G}(\boldsymbol{x})\le \boldsymbol{G}_{\max}\end{cases} \tag{1}$$

式中：$\lambda\in R^1$ 为反应负荷水平的参数；$\boldsymbol{y}_{\mathrm{d}}\in R^m$ 为负荷的增长模式；$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\lambda)=[f_1(x),\cdots,f_m(x)]^{\mathrm{T}}$ 为扩展潮流方程；$x\in R^n$ 为状态变量；$\boldsymbol{h}(x)$ 为常规潮流方程；$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{x})$ 为系统约束条件。

1.2 直流输电系统的引入

直流系统的引入给负荷裕度计算带来的难点在于随着负荷水平的增加，换流站交流侧母线电压不断下降，因此应用内点法计算故障前系统负荷裕度的过程中需要不断考虑直流系统变量是否越限、换流变压器变比是否需要调节。

设与直流系统相关联的交流端标号为 t ，该节点上的功率方程为：

$$\begin{cases}P_{\mathrm{t.G}}-P_{\mathrm{t}.l}-P_{\mathrm{t}.i}-P_{\mathrm{t.d}}=0\\ Q_{\mathrm{t.G}}+Q_{\mathrm{t.C}}-Q_{\mathrm{t}.l}-Q_{\mathrm{t}.i}-Q_{\mathrm{t.d}}=0\end{cases} \tag{2}$$

式中：$P_{\mathrm{t.G}}$、$Q_{\mathrm{t.G}}$ 为换流站节点发电机有功功率、无功功率；$P_{\mathrm{t}.l}$、$Q_{\mathrm{t}.l}$ 为换流站交流端负荷；$P_{\mathrm{t}.i}$、$Q_{\mathrm{t}.i}$ 为换流站交流母线注入的有功功率、无功功率；$Q_{\mathrm{t.C}}$ 为无功补偿提供的无功功率；$P_{\mathrm{t.d}}$、$Q_{\mathrm{t.d}}$ 为注入换流站的有功功率、无功功率，其中 $P_{\mathrm{t.d}}$ 对整流端为正，相当于负荷，对逆变端为负，相当于注入功率，$Q_{\mathrm{t.d}}$ 在整流端和逆变端均为正，吸收无功功率。

由于增加了直流输电线路，换流站节点将增加换流器的转换方程[2, 4]如下：

$$\begin{cases}V_{\mathrm{d}i}=K_1a_iV_{\mathrm{t}i}\cos\theta_i-K_2X_{\mathrm{c}i}I_{\mathrm{d}i}\\ P_{\mathrm{d}i}=V_{\mathrm{d}i}I_{\mathrm{d}i}\qquad i=1,2,\cdots,N_{\mathrm{dc}}\\ Q_{\mathrm{d}i}=I_{\mathrm{d}i}\cdot\sqrt{K_3^2a_i^2V_{\mathrm{t}i}^2-V_{\mathrm{d}i}^2}\,\mathrm{sign}\end{cases} \tag{3}$$

其中：$K_1=3\sqrt{2}/\pi$；$K_2=3/\pi\,\mathrm{sign}$；$K_3=0.995\times3\sqrt{2}/\pi$；$N_{\mathrm{dc}}$ 为换流器个数；$V_{\mathrm{d}i}$ 为直流电压；$I_{\mathrm{d}i}$ 为直流电流；a_i 为换流变压器变比；$X_{\mathrm{c}i}$ 为换相电抗；$\cos\theta_i$ 为控制角的余弦；$V_{\mathrm{t}i}$ 为与第 i 个换流器相联的交流网络节点的电压幅值；sign 为符号，对于整流器为正，逆变器为负。

换流站节点由于引入了 $P_{\mathrm{t.d}}$、$Q_{\mathrm{t.d}}$，因此其Jacabi矩阵以及Hessian矩阵中与换流站节点相关联项与纯交流系统将有所差异。

本文采用直角坐标系进行问题求解，直角坐标系下的Jacobi矩阵为：

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}H+HH' & N+NN'\\ M+MM' & L+LL'\end{bmatrix} \tag{4}$$

其中，HH'、NN'、MM'、LL' 为交直流系统的耦合项。

$$\begin{cases}HH'=\dfrac{\partial P_{\mathrm{t.d}}}{\partial e} & NN'=\dfrac{\partial P_{\mathrm{t.d}}}{\partial f}\\ MM'=\dfrac{\partial Q_{\mathrm{t.d}}}{\partial e} & LL'=\dfrac{\partial Q_{\mathrm{t.d}}}{\partial f}\end{cases} \tag{5}$$

其中，e、f 分别为换流站交流母线电压的实部与虚部。

同理，可以推得Hession矩阵中交直流系统耦合项。

$$\boldsymbol{H}'=\begin{bmatrix}\partial^2P_{\mathrm{t.d}}/\partial e_i\partial e_j & \partial^2P_{\mathrm{t.d}}/\partial e_i\partial f_j\\ \partial^2P_{\mathrm{t.d}}/\partial f_i\partial e_j & \partial^2P_{\mathrm{t.d}}/\partial f_i\partial f_j\\ \partial^2Q_{\mathrm{t.d}}/\partial e_i\partial e_j & \partial^2Q_{\mathrm{t.d}}/\partial e_i\partial f_j\\ \partial^2Q_{\mathrm{t.d}}/\partial f_i\partial e_j & \partial^2Q_{\mathrm{t.d}}/\partial f_i\partial f_j\end{bmatrix} \tag{6}$$

1.3 交直流系统故障前负荷裕度的计算

对式（1）引入松弛变量，将不等式约束转化为等式约束：

$$\begin{cases}\min & (-\lambda)\\ \text{st} & \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\lambda)=\lambda \boldsymbol{y}_{\mathrm{d}}+\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})=0\\ & \boldsymbol{G}(\boldsymbol{x})+\boldsymbol{u}-\boldsymbol{G}_{\max}=0\\ & \boldsymbol{G}(\boldsymbol{x})-\boldsymbol{l}-\boldsymbol{G}_{\min}=0\end{cases} \tag{7}$$

式中，（$\boldsymbol{l}$，$\boldsymbol{u}$）$\in\boldsymbol{R}^r$ 为松弛变量。

利用拉格朗日方法将带约束的优化问题转化成无约束的优化问题即拉格朗日函数为：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{L}=(-\lambda)-\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}[\lambda\boldsymbol{y}_{\mathrm{d}}+\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})]-\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{G}(\boldsymbol{x})-\boldsymbol{l}-\boldsymbol{G}_{\min}]-\\ \boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{G}(\boldsymbol{x})+\boldsymbol{u}-\boldsymbol{G}_{\max}]-\overline{\boldsymbol{z}}^{\mathrm{T}}l-\overline{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}u\end{aligned} \tag{8}$$

其中：$(\boldsymbol{z},\overline{\boldsymbol{z}},\boldsymbol{w},\overline{\boldsymbol{w}})\in\boldsymbol{R}^r$，$\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{R}^m$ 为拉格朗日乘数。

由 KKT 条件得到一组非线性方程，最后利用

牛顿法来求解非线性方程即得到交直流系统故障前的负荷裕度。

2　故障发电机预处理

发电机发生开断故障时的潮流方程：

$$f(x,\lambda,p)=y_0(p)+\lambda y_d(p)-g(x)=0 \qquad (9)$$

式中：p 为故障参数，p=0 表示故障前的情况，p=1 表示故障后的情况；x 为节点电压；$y_0(p)$ 为特定的节点功率注入量；$y_d(p)$ 为负荷增长方向；$g(x)$ 为节点注入功率。

发电机节点包含 PV 与 PQ 两种类型节点。PV 节点发电机通过自动电压调节器以维持其端电压不变，而 PQ 节点发电机，其有功功率及无功功率均维持恒定。当发电机发生故障时其有功输出以及无功输出均变为零，转变为 PQ 节点。故障发电机有功功率缺额通过其他发电机增发有功功率加以平衡。

PV 节点发电机发生故障时，发电机节点将由 PV 节点转变为 PQ 节点，这将引起式（9）发生变化，由于本文欲应用线性灵敏度算法，故必须对故障发电机进行预处理，所有的发电机节点无功功率以一定的增长量增长。预处理过程如下：

（1）计算故障前负荷裕度 $\underline{\lambda}$，状态变量 $\underline{x}$ 以及临界点 PV 节点发电机的无功输出；

（2）对所有的发电机节点均按 PQ 节点处理。基态的无功功率输出通过式（10）计算：

$$Q_{gi}=\underline{Q_{gi}}/(1+\underline{\lambda}) \qquad (10)$$

（3）计算雅可比矩阵及雅可比矩阵最小奇异值对应的左、右特征向量 $\underline{\omega}$，$\underline{\upsilon}$。

以上的预处理过程只进行一次，并且是针对系统发生鞍结分岔的情况。$\underline{\lambda}$，$\underline{x}$，$\underline{\omega}$，$\underline{\upsilon}$ 对于所有故障都均作为恒定值处理。

3　基于线性灵敏度的故障筛选排序

3.1 鞍结分岔条件以及直流输电线路的处理

鞍结分岔的条件如下：

$$f(x,\lambda,p)=0 \qquad (11)$$

$$\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_x=0,\|\boldsymbol{\omega}\|\neq 0 \qquad (12)$$

$$\text{或 } \boldsymbol{f}_x\boldsymbol{\upsilon}=0,\|\boldsymbol{\upsilon}\|\neq 0 \qquad (13)$$

其中：$\boldsymbol{\omega}$ 和 $\boldsymbol{\upsilon}$ 为雅克比矩阵 $\boldsymbol{f}_x$ 零奇异值对应的左、右特征向量。

为保证算法的快速性，在故障前鞍结分岔点处采用文献[4]的方法将直流输电线路等效成挂在换流站节点恒定的有功以及无功负荷，从而获得一个纯交流系统。

3.2 线性灵敏度方法

将式（11）~（13）在故障前鞍结分岔点：$\lambda=\underline{\lambda}$，$x=\underline{x}$，$p=0$ 进行线性化，故障后，结合 $\Delta p=1$ 有：

$$\boldsymbol{H}\begin{bmatrix}\Delta x\\ \Delta\lambda\end{bmatrix}=r^{(k)} \qquad (14)$$

式中：

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}-f_x & -f_\lambda\\ \underline{\upsilon}^{\mathrm{T}}\sum_i \underline{\omega}_i f_{xx} & 0\end{bmatrix},\quad f_{xx}\in R^{n\times n};$$

$r^{(k)}=\begin{bmatrix}f_p\\ \underline{\omega}^{\mathrm{T}}f_{xp}\underline{\upsilon}\end{bmatrix}$，$f_{xp}\in R^{n\times n}$；上标 k 表示故障类型；$\omega_i\in R^{1\times 1}$ 为 ω 的第 i 个元素；n 为潮流方程的维数。

式（14）中，$\boldsymbol{H}$ 矩阵为常矩阵，不依赖于故障类型。而 $r^{(k)}$ 与故障 k 相关联。式（14）的维数为 n+1 维。故障后的状态变量 $\hat{x}$ 以及负荷裕度 $\hat{\lambda}$ 通过求解式（14）为：

$$\hat{x}=\underline{x}+\Delta x \qquad (15)$$

$$\hat{\lambda}=\underline{\lambda}+\Delta\lambda \qquad (16)$$

消去式（14）中的Δx，即有：

$$\Delta\lambda=-\frac{\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}f_p}{\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}f_\lambda} \qquad (17)$$

之前对故障发电机进行了第 2 节的预处理，使得在应用线性灵敏度计算负荷裕度过程中 $\boldsymbol{H}$ 矩阵为常矩阵，仅需对 $\boldsymbol{H}$ 矩阵进行一次 LU 分解，保证了该算法的快速性。

4　评估过程

交直流系统发电机故障电压稳定评估快速算法的具体步骤如下：

(1) 对初始潮流进行计算，应用内点法求解故障前的负荷裕度值，并考虑直流系统变量是否越限；

(2) 依据式（10），对 PV 节点发电机无功功率输出进行预处理；

(3) 用线性灵敏度算法进行发电机故障后负荷裕度的计算，并与精确计算得到的负荷裕度进行比较。

5　算例仿真

本文以 IEEE30 标准测试系统为仿真平台，考虑实际研究需要，将 IEEE30 节点系统中节点 6 与 7

之间的交流线路用图 1 所示的两端直流输电系统进行替换。直流系统运行在典型控制方式下，即整流侧定电流（0.5 p.u）控制与逆变侧定熄弧角（18°）控制。设换流站变压器变比范围为±15%，每档分接头调节量为 1.5%，系统部分直流参数见表 1。

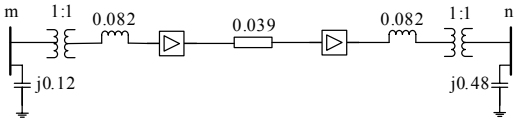

图 1 直流线路

Fig.1 DC line

表 1 系统部分直流参数

Tab.1 Some parameters of DC system

换流器类型	参数		
	$\theta_{\min}$	$\theta_{\max}$	I_d / p.u
整流器	5°	40°	0.5
逆变器	18°	20°	−0.5

对误差 $E\%$ 定义如式（18）：

$$E\% = \frac{P\big|_{\text{estimate}} - P\big|_{\text{exact}}}{P\big|_{\text{exact}}} \times 100 \qquad (18)$$

式中：$P\big|_{\text{exact}}$ 为崩溃点处功率的精确值；$P\big|_{\text{estimate}} = P + \Delta P$ 为崩溃点处功率的估计值；$\Delta P = \lambda P_0$，P_0 为对应于λ=0 运行点的基态负荷。表 2 给出测试系统除平衡节点发电机以外所有可能发电机故障情况时的负荷裕度。精确算法与文中所提方法的计算时间见表 3。

表 2 IEEE30 节点系统的负荷裕度

Tab.2 Voltage stability load margins of IEEE30 bus system

序号	发电机编号	精确算法	文中方法	误差 / %
1	5	0.390 5	0.424 0	2.41
2	8	0.593 5	0.529 3	−4.03
3	2	0.594 1	0.596 8	0.17
4	13	0.604 5	0.559 4	−2.81
5	11	0.608 0	0.564 1	−2.73

表 3 负荷裕度计算时间比较

Tab.3 Comparison of the computation time of load margins

	内点法计算时间 / s	文中方法计算时间 / s
IEEE30 节点系统	1.297 0	0.037 4

从表 2、表 3 可以看出本文提出的方法是可行的。从表 2 可以看出本文方法所得负荷裕度值与精确值的最大误差不超过 5%，可以满足工程实际需要。通过表 3 精确算法与线性灵敏度算法计算时间比较，文章所提方法满足快速性的要求。

6 结论

（1）本文在计及直流系统控制变量约束的情况下，将线性灵敏度算法应用于对交直流系统发电机故障情况的电压稳定评估，线性灵敏度算法解决了在线对发电机故障情况下的系统稳定性评估的问题。

（2）本文在应用线性灵敏度求发电机故障情况下的负荷裕度之前，对所有的发电机节点进行了预处理，与此同时本文在此对直流输电线路亦进行等效处理，保证了算法的快速性。

综上，本文所提出的快速算法在目前交直流系统稳定性问题日益突出的背景下具有现实意义。

参考文献

[1] Canizares C A，Alvarado F L，Demarco C L. Point of collapse method applied to AC/DC power systems [J]. IEEE Trans on Power Systems，1992，7（2）：673-683.

[2] 胡林献，陈学允. 崩溃点法交直流联合系统电压稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，1997，17（6）：395-398.
HU Lin-xian，CHEN Xue-yun. Point of collapse method applied to voltage stability analysis of AC/DC system[J]. Proceedings of the CSEE，1997，17（6）：395-398.

[3] 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）：1-8.

[4] 顾成华，胡林献. 连续潮流法交直流联合系统静态电压稳定性研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2003.
GU Cheng-hua，HU Lin-xian. Continuation power flow method applied to voltage stability analysis of AC / DC power system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology，2003.

[5] 王秀婕，李华强，李波. 基于内点法的交直流系统电压稳定性评估[J]. 电力系统及其自动化学报，2007，19（6）：72-77.
WANG Xiu-jie，LI Hua-qiang，LI Bo. Voltage stability assessment for AC / DC power systems based on interior point method[J]. Proceedings of CSU-EPSA，2007，19（6）：72-77.

[6] 王秀婕，李华强，李波，等. 基于连续潮流法及内点法的交直流负荷裕度算法[J]. 继电器，2006，34（22）：22-26.
WANG Xiu-jie，LI Hua-qiang，LI Bo, et al. An algorithm for volatge stability assessment of AC / DC power system based on continuation method and interior point theroy[J]. Relay，2006，34（22）：22-26.

[7] Peterson N M，Tinney W F. Iterative linear AC power flow solution for fast approximate outage studies [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems，1972，91（5）：2048-2056.

（下转第 43 页 continued on page 43）

电网技术，1998，22（11）：39-41.
NIU Hui，GUO Zhi-zhong. Power flow algorithm based on current influx model[J]. Power System Technology，1998，22（11）：39-41.

[3] Garcia P A N，Pereira Jose Luiz R. Three-phase power flow calculations using the current injection method[J]. IEEE Trans on Power Systems，2000，15（2）：508-514.

[4] 杭乃善，姚元玺，窦婷婷，等. 基于直角坐标注入电流形式的多平衡节点潮流算法研究[J]. 继电器，2005，33（4）：9-11.
HANG Nai-shan，YAO Yuan-xi，DOU Ting-ting， et al. An algorithm of multi-balance bus based on rectangular coordinate current influx[J]. Power System Protection and Control，2005，33（4）：9-11.

[5] 丁洪发，段献忠. 不换位输电线路产生的不对称问题及解决方法[J]. 电网技术，2004，28（19）：24-28.
DING Hong-fa，DUAN Xian-zhong. Unbalance issue caused by un-transposed transmission lines and its solution[J]. Power System Technology，2004，28（19）：24-28.

[6] DL/T-5092 110-500 kV架空送电线路设计技术规程[S]. 北京：中国电力出版社，1999.
DL/T-5092 the design regulations for 110-500 kV overhead line[S]. Beijing：China Electric Power Press，1999.

[7] 刘振波. 输电线路工频参数理论计算软件的研制[D]. 北京：华北电力大学，2004.
LIU Zhen-bo. Manufacture of a software used in the academic calculation of the parameter of the transmission line[D]. Beijing： North China Electric Power University，2004.

[8] 陈国庆，张志劲，孙才新，等. 500 kV同塔双回线路导线排列方式对电气特性的影响.重庆大学学报，2003，26（6）：60-62.
CHEN Guo-qing，ZHANG Zhi-jin，SUN Cai-xin，et al. Influence of arrangement manner of lead to the electric characteristic for 500 kV double circuit transmission line[J]. Journal of Chongqing University，2003，26（6）：60-62.

[9] 张要强，张天光，王予平，等. 1000 kV同塔双回输电线路电气不平衡度及换位问题研究[J]. 电网技术，2009，33（1）：8-13.
ZHANG Yao-qiang， ZHANG Tian-guang， WANG Yu-ping，et al. Research on electric unbalance degree and conductor transposition of 1000 kV double-circuit transmission line on the same tower[J]. Power System Technology，2009，33（1）：8-13.

[10] 胡丹晖，蔡汉生，涂彩琪，等. 500 kV同杆并架双回线路电气特性研究[J]. 高电压技术，2005，31（4）：21-23.
HU Dan-hui，CAI Han-sheng，TU Cai-qi，et al. Study on the electrical characteristic of 500 kV common-tower double-transmission line[J]. High Voltage Engineering，2005，31（4）：21-23.

[11] 戴雨剑. 基于EMTP的高压输电线路换位研究[J]. 电网技术，2006，30（增刊）：133-135.
DAI Yu-jian. Discussion on transposition of the overhead transmission line based on EMTP[J]. Power System Technology，2006，30（S）：133-135.

[12] 邹林，林福昌，龙兆芝. 输电线路不平衡度影响因素分析[J]. 电网技术，2008，32（增刊）：283-286.
ZOU Lin，LIN Fu-chang，LONG Zhao-zhi. Influence factors analysis of unbalance parameter for overhead lines[J]. Power System Technology，2008，32（S）：283-286.

收稿日期：2009-09-06；　修回日期：2009-11-11

作者简介：

陶　凯(1982-)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统优化、运行与控制；E-mail：taokai2000@tom.com

刘明波(1964-)，男，教授，博士生导师，主要研究方向为电力系统优化、运行与控制。

（上接第 38 页　continued from page 38）

[8] 罗小春，李华强，程超，等. 基于非线性灵敏度与曲线拟合法的负荷裕度快速算法[J]. 电力系统保护与控制，2008，36（15）：50-55.
LUO Xiao-chun，LI Hua-qiang，CHENG Chao，et al. Fast algorithm based on non-linear sensitivity method combining generalized curved fitting method for loading margin[J]. Power System Protection and Control，2008，36（15）：50-55.

[9] 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.

[10] Yorino N，Li H Q，Harada S. A method of voltage stability evaluation for branch and generator outage contingencies[J]. IEEE Trans on Power Systems，2004，19（1）：252-259.

收稿日期：2009-09-21；　修回日期：2009-12-24

作者简介：

赵周芳（1983-），女，硕士，研究方向为电压稳定及其优化问题；E-mail：zhaozhoufang@163.com

李华强（1965-），男，博士，教授，长期从事电压稳定及优化问题研究；

叶晓峻（1982-），男，硕士，研究方向为电压稳定评估。