

## 基于电压脆弱性的支路事故排序快速算法

刘慧, 李华强, 郑武, 陈静

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 提出一种基于电压脆弱性的支路事故排序快速算法。用线性灵敏度法快速得到各事故后的临界电压, 根据静态能量与注入功率和节点电压的关系引出静态能量裕度的定义, 提出两个可用于事故筛选与排序的电压脆弱性评估指标。其中局部指标计算事故后系统稳定运行时各节点能量裕度, 并取最薄弱节点的值作为系统的能量裕度; 整体指标取事故后系统稳定运行的总能量得到的能量裕度。由这两个指标分别对事故进行筛选与排序, 得到严重事故集。对 IEEE30、IEEE57 母线系统的仿真结果与采用内点法精确计算的排序结果对比验证该思路的有效性。

**关键词:** 电压脆弱性; 能量裕度; 内点法; 线性灵敏度法; 事故排序

### Fast algorithm of branch contingency ranking based on voltage vulnerability

LIU Hui, LI Hua-qiang, ZHENG Wu, CHEN Jing

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

**Abstract:** A fast algorithm of contingency ranking based on voltage vulnerability is proposed. The critical value in post-fault system is fast gotten by linear sensitivity. Then the definition of static energy margin is elicited based on the relations of static energy with power injection and bus voltage, and two indices for evaluating voltage vulnerability in contingency screening and ranking are proposed, one of which is local index, and the other one is whole index. The local index calculates the energy margins of nodes under contingency on stable operation, and takes the value of the weakest node as the energy margin of system. The whole index is the energy margin of total energy under contingency on stable operation. The critical contingencies can be gained after contingency screening and ranking based on the two indices. The effectiveness of the proposed method is demonstrated through comparing with interior point method on IEEE30- and IEEE57-bus system.

**Key words:** voltage vulnerability; energy margin; interior point method; linear sensitivity method; contingency ranking

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0177-05

## 0 引言

从电力系统安全性延伸出来的脆弱性问题近年来得到广泛的研究<sup>[1-7]</sup>。电压脆弱性作为电网脆弱性的一个重要方面, 是指系统在遭受某种扰动之后系统中局部或者全部母线电压呈现容易或者已经逼近临界崩溃点的特性<sup>[8]</sup>。对预想事故进行电压脆弱性的排序, 有助于对严重事故做进一步的分析与研究。

事故排序的第一步是确定电压脆弱性的评估方法和指标。风险理论<sup>[9-10]</sup>、人工神经网络法<sup>[11]</sup>以及能量函数法<sup>[8,12-13]</sup>都已用于研究电压脆弱性问题。其中文献<sup>[8]</sup>以节点势能函数建立两个指标, 探讨了不同无功注入成分对电压脆弱性的影响; 文献<sup>[12-13]</sup>

引入安全因子来分析不同控制行为对电压脆弱性的影响; 这些指标可以考虑一些控制因素对具体系统的电压脆弱性影响, 但是计算比较耗时, 而事故排序的要求是按照电压脆弱性评估的指标快速而准确地在大量可能的预想事故中选择少部分严重的事故, 并按照其严重程度进行排序, 同时不能漏选严重事故集, 因此其算法在准确性和快速性方面必须兼顾。所以, 对预想事故进行电压脆弱性排序的快速算法成为在线电压安全分析的一个重要方面。

本文提出一种基于电压脆弱性的支路事故排序新方法, 根据系统的静态能量函数模型以及静态能量与注入功率和节点电压的关系提出两个评估事故后系统脆弱性的静态能量裕度指标, 由此筛选出严重事故集。新的算法将内点理论、线性灵敏度法与能量函数思想相结合, 对严重事故的捕获率高, 且

比内点法对所有事故排序节省大量计算时间。

### 1 静态能量函数的数学模型

能量函数研究的出发点是构造一个函数，电力系统中用于静态电压稳定性的研究有较为成熟的静态能量函数模型<sup>[14-15]</sup>，其中文献[14]探讨了各节点能量值随无功负荷增长的变化趋势，但其模型的建立只考虑了负荷节点的能量函数，而对其他节点未加考虑。本文在文献[14]基础上，同时考虑负荷有功的增长，对节点的注入有功无功运用更合理的表达，并且计算系统中每个节点的能量函数值。

根据线路功率输送关系，可得到多母线系统中各节点功率平衡等式：

$$f_i(\delta, U) = (P_{Gi} - P_{Li}) - U_i \sum_{j=1}^n U_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (1)$$

$$g_i(\delta, U) = (U_i)^{-1} [(Q_{Gi} - Q_{Li}) - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j))] \quad (2)$$

式中： $(P_{Gi}-P_{Li})$ 是节点  $i$  的注入有功； $(Q_{Gi}-Q_{Li})$ 是节点  $i$  的注入无功； $G_{ij}$  是节点  $i, j$  之间的电导； $B_{ij}$  是节点  $i, j$  之间的电纳； $\delta_i, \delta_j$  是节点  $i, j$  的电压相角。

系统各节点的静态能量函数表达式为

$$E_{Li}(X, X^s) = \int_{X^s}^X [f(\delta, U), g(\delta, U)] \cdot \begin{bmatrix} d\delta \\ dU \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式 (1)、(2) 代入式 (3)，可得多母线系统中第  $i$  节点的静态能量函数  $E_{Li}$  的表达式。

$$E_{Li} = \int [f_i, g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} = \int_{(\delta_i^s, U_i^s)}^{(\delta_i, U_i)} [f_i, g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} = (P_{Gi} - P_{Li})(\delta_i - \delta_i^s) - U_i \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} + U_i \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} + \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} + (Q_{Gi} - Q_{Li}) \ln \frac{U_i}{U_i^s} - \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \cdot U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} \quad (4)$$

其中， $(U_i, \delta_i)$  为当前运行情况下各节点电压值，若取临界电压值则  $E_{Li}$  表示节点临界能量函数， $(U_i^s, \delta_i^s)$  为系统基态运行的电压值。

如果考虑并联电容器补偿，则第  $i$  节点的静态能量函数表达式修改为：

$$E_{Lci} = E_{Li} - \sum_{j=1}^n \frac{b_j}{2} [(U_i)^2 - (U_i^s)^2] \quad (5)$$

系统总能量就是系统所有节点能量的迭加。考虑并联电容补偿的系统静态能量为：

$$E_s = \sum_{i=1}^n E_{Li} = \sum_{i=1}^n (P_{Gi} - P_{Li})(\delta_i - \delta_i^s) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_i U_j G_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_i U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} + \sum_{i=1}^n (Q_{Gi} - Q_{Li}) \ln \frac{U_i}{U_i^s} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \cdot U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} - \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2} [(U_i)^2 - (U_i^s)^2] \quad (6)$$

### 2 事故筛选与排序中的能量裕度指标

#### 2.1 节点能量裕度

文献[16]指出，在  $Q-\ln V$  曲线上，以  $Q$ （无功注入水平）、 $\ln V$ （ $V$  为电压幅值）组成的区域表征的是系统能量。而根据上一章能量函数表达式 (4)、(5) 可以看出，功率注入集合  $P, Q$  对能量  $E$  均具有双重影响，一方面通过潮流计算得到节点电压  $U$ ，由  $U$  来间接影响能量  $E$ ；另一方面直接作为能量函数的变量来影响能量  $E$ 。

对于具体节点  $i$  来说，节点能量值如图 1 所示，当系统处于稳态运行时，节点有功无功注入为  $P_{si}, Q_{si}$ ，此时电压处于稳定水平  $U_{si}$ ，能量值为稳态能量  $E_{si}$ ；当系统负荷增加，电压不断下降，当电压下降到临界值  $U_{cri}$  时，能量到达极限值  $E_{cri}$ 。因此节点具有的能量裕度可表达为

$$E_{mi} = |E_{si} - E_{cri}| \quad (7)$$

式中： $E_{mi}$  为系统稳态时的节点能量裕度； $E_{si}$  为节点稳态能量值； $E_{cri}$  为节点临界能量值。

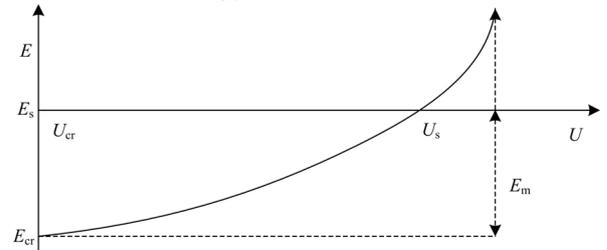


图 1 能量与电压的对应关系

Fig.1 Relationship between energy and voltage

节点能量裕度指标可以评估节点的脆弱度,  $E_{mi}$  越大, 表示稳定运行点离崩溃点越远, 节点脆弱度越小; 反之,  $E_{mi}$  越小, 则节点越脆弱。

尽管这里是由单个节点来分析能量裕度与电压脆弱度的关系, 但是其节点的能量值都是应用式(5)中多母线系统模型来计算的, 计及了节点之间的相互影响, 考虑了电力系统的整体性, 因此这里的能量裕度指标可以应用到整个系统的脆弱度评估中。

## 2.2 系统能量裕度

事故排序指标必须是针对系统的一个整体性指标, 本文从能量角度提出两个衡量系统电压脆弱度的指标。一是以各事故下最脆弱节点的能量裕度作为事故后的系统能量裕度, 本文定义为局部指标  $E_{lm}$ , 即

$$E_{lm} = \min E_{mi} = \min |E_{si} - E_{cri}| \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

式中,  $E_{mi}$ ,  $E_{si}$ ,  $E_{cri}$  的意义与式(7)相同。

二是直接计算事故后整个系统稳态运行时的能量裕度, 本文定义为整体指标  $E_{wm}$ , 即

$$E_{wm} = |E_s - E_{cr}| \quad (9)$$

式中:  $E_s$  为稳态运行时系统的总能量;  $E_{cr}$  为系统总临界能量值。

对不同事故后的系统而言, 只需计算稳态运行时的能量裕度, 然后对事故后系统的电压脆弱性进行排序, 裕度值越小, 事故后系统电压越脆弱, 事故越严重。

由能量函数的表达式(5)、(6)可以看出, 选取基态作为稳定运行点后, 基态时节点与系统的能量值均为 0, 那么局部指标与整体指标可以表示为:

$$E_{lm} = \min |E_{cri}| \quad (10)$$

$$E_{wm} = |E_{cr}| \quad (11)$$

不管运用哪个指标来计算系统的能量裕度, 首先要得到事故后的临界电压, 计算事故后临界电压的速度和精度将对能量裕度指标的计算速度和精度具有决定性的影响, 因此计算临界电压是实现能量裕度指标对事故筛选与排序的关键一环。原始-对偶内点法可以精确计算系统的临界电压, 但是对所有预想事故都用内点法精确计算临界电压将会耗费大量时间, 本文对  $N-1$  事故后的临界电压计算将采用线性灵敏度法。

## 3 线性灵敏度法计算事故后临界电压

对于鞍结分岔类型的电压崩溃方式, 在崩溃点处, 存在下列方程组:

$$\begin{cases} f(x, \lambda, p) = 0 \\ f_x(x, \lambda, p)v = 0 \\ v^T v - 1 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $p$  为事故参数,  $p=0$  与  $p=1$  时函数  $f(x, \lambda, p)$  分别表示事故前后的潮流方程;  $\lambda$  表示负荷水平;  $w$ ,  $v$  分别是函数  $f(x, \lambda, p)$  对应于变量  $x$  的雅可比矩阵零特征值的左特征向量和右特征向量。

将上式在事故前崩溃点处线性化, 得到

$$H \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = r^{(k)} \quad (13)$$

$$\text{式中: } H = \begin{bmatrix} -f_x & -f_\lambda \\ v^T \sum_i w_i f_{xxi} & 0 \end{bmatrix};$$

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

其中:  $f_{xxi} = R^{n \times n}$ ,  $f_{xp} = R^{n \times n}$ ,  $n$  是潮流方程的维数;  $w_i = R^{1 \times 1}$  是  $w$  的第  $i$  个元素。

上述方程中, 矩阵  $H$  是一个定值方阵, 和支路事故无关, 可以先进行因子分解, 分解后可适用于全部事故的计算, 式(13)中只有  $r^{(k)}$  与事故  $k$  有关, 而事故前的临界电压  $x$  和负荷裕度可由内点法直接计算得到。这样就能够快速计算在支路事故参数变化情况下的事故后临界电压如下:

$$\bar{x} = \underline{x} + \Delta x \quad (14)$$

这样得到的事故后临界电压代入公式(10)、(11), 可以快速得到系统能量裕度指标, 然后按照能量裕度的大小对所有预想事故排序, 选取一定比例的事故形成严重事故集。

## 4 计算步骤

(1) 采用内点法计算事故前系统崩溃点电压与负荷裕度;

(2) 运用线性灵敏度法由事故前的崩溃点电压与负荷裕度快速计算事故后临界电压;

(3) 用上一步得到的临界电压由式(5)计算事故后节点的临界能量值, 式(6)计算系统临界能量值。

(4) 由公式(10)、(11)分别计算评估系统电压脆弱性的能量局部指标与整体指标, 并按两种指标分别进行事故排序, 筛选出严重事故集。

### 5 算例仿真

本节通过对 IEEE30 和 IEEE57 母线系统模型的仿真来验证本文方法的性能。IEEE30 系统除 4 条变压器支路外有 37 条线路, IEEE57 系统除条变压器支路外有 63 条线路。本文对事故的编号就是系统中线路的编号。

图 2 是 30 母线系统所有支路事故下的局部指标情况, 其值为各事故下最脆弱节点的能量裕度。与后面的整体指标一样, 对计算结果已做归一化处理。从图中可以看出, 事故 1、事故 2、事故 6、事故 33 为最严重的几个事故。

图 3 就是 30 母线系统所有支路事故下的整体指标情况。从图中可以看出, 事故 1、事故 2、事故 6、事故 4 为最严重的几个事故。

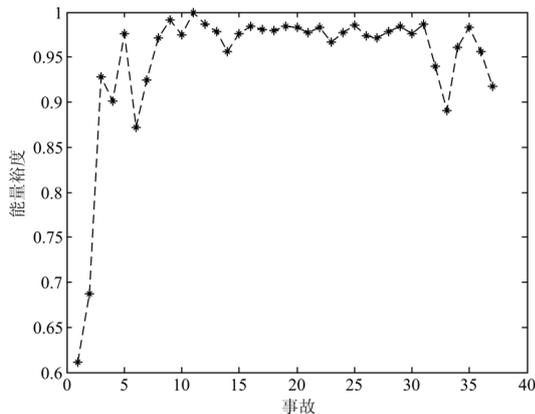


图 2 IEEE30 系统各事故下能量裕度局部指标  
Fig.2 Local indices of energy margins under each contingency in IEEE30 system

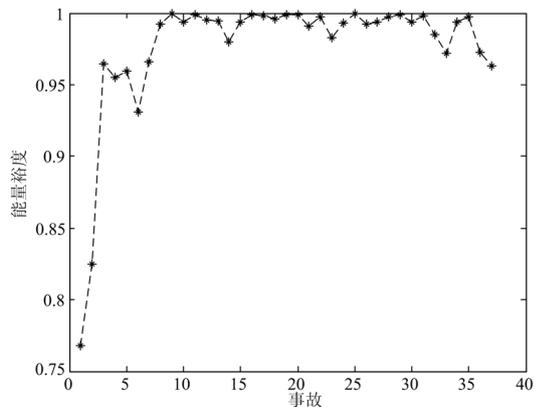


图 3 IEEE30 系统各事故下能量裕度整体指标  
Fig.3 Whole indices of energy margins under each contingency in IEEE30 system

为了进一步验证本文算法的有效性, 将内点法计算负荷裕度的事故排序结果与利用两个指标得到

的排序结果相比较, 如表 1 与表 2 所示。从表中可以看出, 由负荷裕度筛选的前 10 个严重事故, 在本文的局部指标或整体指标的排序上也是位于前列, 两个指标相互印证, 均没有漏选严重事故。

表 3 给出了快速算法比精确算法时间上的优越性, 由于该优越性主要体现在对单一事故下临界电压与能量裕度的计算上, 且能量裕度的两个指标计算时间几乎相同。表 3 只列出对于单一支路事故本文算法计算能量裕度指标与精确算法计算负荷裕度指标的时间对比。从表中可以看出, 能量裕度指标在单一事故下已经比精确算法节省较多时间, 而随着系统的扩大, 这种时间上的优势将会更加突出。

表 1 IEEE30 母线系统事故筛选与排序结果

Tab.1 Result of contingency screening and ranking for IEEE-30 bus system

事故线路	内点法		本文算法			
	负荷裕度	排序	局部指标	排序	整体指标	排序
5 (2-5)	0.525 0	1	0.928 3	8	0.959 6	5
1 (1-2)	0.550 6	2	0.610 9	1	0.767 6	1
2 (1-3)	0.555 9	3	0.687 3	2	0.824 9	2
6 (2-6)	0.580 0	4	0.872 5	3	0.931 0	3
3 (2-4)	0.612 1	5	0.939 2	9	0.964 3	7
4 (3-4)	0.632 7	6	0.901 1	5	0.955 3	4
7 (4-6)	0.639 0	7	0.924 3	7	0.966 2	8
37 (9-10)	0.641 0	8	0.918 1	6	0.963 0	6
33 (27-30)	0.659 7	9	0.891 0	4	0.971 8	9
14 (12-15)	0.660 5	10	0.956 0	10	0.979 9	11

表 2 IEEE57 母线系统事故筛选与排序结果

Tab.2 Result of contingency screening and ranking for IEEE-57 bus system

事故线路	内点法		本文算法			
	负荷裕度	排序	局部指标	排序	整体指标	排序
15 (1-15)	0.788 3	1	0.790 1	1	0.892 4	1
8 (8-9)	0.809 7	2	0.857 8	3	0.957 6	7
16 (1-16)	0.812 9	3	0.841 0	2	0.941 5	2
2 (2-3)	0.815 6	4	0.882 8	5	0.952 7	4
17 (1-17)	0.817 2	5	0.858 6	4	0.945 5	3
1 (1-2)	0.818 5	6	0.914 5	7	0.959 5	9
42 (37-38)	0.819 6	7	0.910 0	6	0.957 4	6
58 (44-45)	0.820 4	8	0.925 8	12	0.965 5	11
35 (25-30)	0.820 4	9	0.919 8	8	0.953 3	5
32 (26-27)	0.824 1	10	0.923 1	10	0.959 0	8

表3 对于单一支路事故两种指标计算时间比较

Tab.3 Cabculated time contrast of the two indexes in single branch contingency

	S	
	负荷裕度指标	能量裕度指标
IEEE30 系统	0.251 4	0.031
IEEE57 系统	0.341 0	0.062

值得一提的是, 在对能量函数指标计算的程序中, 考虑了负荷的变化, 并将发电机有功无功容量作为控制变量同节点电压一起参与迭代, 从而保证所计算的指标已经考虑系统的一些约束条件, 具有实际的意义。

## 6 结论

本文提出一种基于电压脆弱性的支路事故排序快速算法, 提出评估事故后系统脆弱性的能量裕度局部指标与整体指标。通过 IEEE30、IEEE57 母线系统对本文算法进行了验证, 证明该算法在提高事故排序快速性的同时并没有漏选严重事故, 从而为解决对于严重事故快速而精确的排序问题提供了新的思路。

## 参考文献

- [1] MAO An-jia, YU jia-xi, GUO Zhi-zhong. Electric power grid structural vulnerability assessment[C]. //Power Engineering Society General Meeting. Monrrela (Canada): 2006.
- [2] Kang Lin, Holbert K E. PRA for vulnerability assessment of power system infrastructure security[C]. //Proceedings of the 37th Annual North American. Illinois(USA): 2005.
- [3] Pepyne D L, Panayiotou C G, Cassandras C G. Vulnerability assessment and allocation of protection resources in power systems[C]. //Proceeding of American Control Conference. Texas(USA): 2001.
- [4] El-Sharkawi M A. Vulnerability assessment and control of power system[C]. //IEEE/PES Asia Pacific Transmission and Distribution Conference and Exhibition. 2002.
- [5] Jung Juhwan, Liu Chen-Ching. Multi-agent system technologies and all application for power system vulnerability[C]. //IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2003.
- [6] Mingoo Kim, El-Sharkawi, Robert J. Vulnerability indices for power systems[C]. //Proceedings of the 13th International Conference. South Korea: 2005.
- [7] 卢锦玲, 姬群星, 朱永利. 基于能量函数法的电网脆弱性评估[J]. 电网技术, 2008, 32 (7) : 30-33.  
LU Jin-ling, JI Qun-xing, ZHU Yong-li. Power grid vulnerability assessment based on energy function[J]. Power System Technology, 2008, 32 (7) : 30-33.

- [8] 刘群英, 刘俊勇, 刘起方. 节点势能架构下的电压脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (25) : 30-37.  
LIU Qun-ying, LIU Jun-yong, LIU Qi-fang. Voltage vulnerability assessment in the node potential energy framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (25) : 30-37.
- [9] Hua W, James D M, Vittal V. Risk based voltage security assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (4) : 1247-1254.
- [10] 陈为化, 江全元, 曹一家. 基于风险理论和模糊推理的电压脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (24) : 20-25.  
CHEN Wei-hua, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia. Voltage vulnerability assessment based on risk theory and fuzzy reasoning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (24) : 20-25.
- [11] Qin Zhou, Davidson Jennifer, Fouad A A. Application of artificial neural networks in power system security and vulnerability assessment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 9 (1) : 525-532.
- [12] Demarco C L, Overbye T J. An energy based security measure for assessing vulnerability to voltage collapse[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5 (2) : 419-427.
- [13] Overbye T J, Demarco C L. Voltage security enhancement using energy based sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3): 1196-1202.
- [14] 刘群英, 刘俊勇, 刘起方. 运用启发式能量函数观点的无功裕度估算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 29-36.  
LIU Qun-ying, LIU Jun-yong, LIU Qi-fang. Reactive power margin estimation by the view of the heuristic energy function[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (4) : 29-36.
- [15] 牟宏, 陈怡. 用于电力系统电压稳定研究的能量函数法[J]. 电力系统自动化, 1994, 18 (5) : 36-41.  
MU Hong, CHENG Yi. The energy function method used for power system voltage stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18 (5) : 36-41.
- [16] Overbye T J, Dobson I, DeMarco C L. Q-V curve interpretations of energymeasures for voltage security[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9 (1) : 331-340.

收稿日期: 2009-12-01; 修回日期: 2010-01-11

作者简介:

刘慧(1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题; E-mail: njauliuhui@163.com

李华强(1965-), 男, 博士, 教授, 从事电压稳定及优化问题研究;

郑武(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题。