

# 基于静态电压稳定的事故筛选和排序算法综述

肖玲, 李华强, 王华伟, 唐国栋

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 由于负荷的快速增长以及市场机制下电力系统运行方式的频繁调整使得电网可能接近稳定极限运行, 这使得电网的电压稳定问题变得越来越严重。如何在事故扰动情况下快速而准确地评估电网的电压稳定性具有重要的意义。阐述了事故筛选和排序的基本概念和评估的指标类型, 对现有的各种事故筛选和排序方法进行了总结与述评, 并指出了此领域研究存在的问题。

**关键词:** 电力系统; 电压稳定; 事故筛选和排序

## A summary of contingency screening and ranking based on static voltage stability

XIAO Ling, LI Hua-qiang, WANG Hua-wei, TANG Guo-dong

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

**Abstract:** The rapid load growth and frequent adjustments of the power system operation mode under the market mechanism make power grids operate near its stability limit, which makes the grid voltage stability problems become more serious. Under some disturbance circumstances, how to quickly and accurately assess the grid voltage stability is of great significance. In this paper, basic conceptions and types of evaluated indexes about contingency screening and ranking is first interpreted, and the kinds of the methods of the existing contingency screening and ranking are summed and commentarized. Also, it is proposed that the research of contingency screening and ranking will exist problems.

**Key words:** power systems; voltage stability; contingency screening and ranking

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)14-0129-06

## 0 引言

目前, 因电压失稳而导致系统崩溃的事故在国内外一些大电网屡有发生, 使得电网大范围地解裂和大面积地停电, 造成巨大地经济损失和社会混乱。为预防电力系统的电压失稳和电压崩溃, 首先, 运行人员需要知道当前电力系统运行点的稳定裕度; 其次是必须预知在各种扰动情况下, 系统的电压稳定裕度会发生怎样的变化。因此, 必须在线快速确定系统在各种运行方式改变时的电压稳定裕度, 便于运行调度人员做出正确的判断, 采取相应的预防校正措施, 减小事故扰动对于电网的电压稳定的影响。

然而, 对于复杂的电力系统来说, 对所有事故进行详细分析费时且并无必要, 通常, 只有有限数量的事故会危害电网安全。但是这些严重事故集会随着系统运行方式的调整而相应变化, 为此引入了事故筛选和排序快速算法。

事故筛选和排序是在线电压稳定评估中重要的模块, 其目的是按照电压稳定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。

本文从事事故筛选和排序的角度出发, 对电压稳定评估指标的分类情况、各自特点及适用范围进行了详细的分析和比较。其次, 针对不同评估指标, 综述了目前主要的静态电压稳定的事故筛选和排序的方法, 阐述了各种方法的优缺点, 并指出了此领域研究存在的问题。

## 1 事故筛选和排序方法的基本概念和评估的指标类型

**事故定义:** 事故由同时或不同时时间间隔发生的一个或者多个事件组成, 每一个事件引起一个或多个电力系统元件的状态发生变化。

电压稳定性的分析可分为离线分析方法(预先选择的事故表)和在线分析方法(在线动态生成事故表), 由于其环境的不同而对各自的要求也不尽相同。离线分析通过离线方式计算可信的事故集并给

出一张根据电压稳定裕度排序的事故列表。离线分析的缺点是：只能考虑有限的运行方式和有限事故集，并且不能预先给出合适的预防校正措施。因此，需要对系统进行在线电压稳定性分析，在有限的时间内对系统当前的电压稳定进行评估，同时预先估计系统承受扰动的能力。在线电压稳定性评估包括：运行点电压稳定性评估，预想事故选择，事故筛选和排序，预防校正措施/策略等。

事故筛选和排序<sup>[1]</sup>指的是利用电力系统实时信息，按照一定算法自动选出那些会危及系统安全运行的预想事故，并按事故的严重程度对它们排序。这样，在下一步的事故分析中，就可以对最严重的事故进行详细分析，从而大大节省时间，加快安全分析的速度。

事故筛选与排序的第一步是确定稳定性评估的指标，其次是找到合适的算法快速获得这类指标，并以此作为事故筛选和排序的依据。对于同样的系统和同样的故障集，采用不同的指标进行评估时，结果会有所不同。

目前常用的电压稳定性指标可以分为两类<sup>[2,3]</sup>。一类是所谓的状态指标，如最小模特征根、最小奇异值和灵敏度指标等。这类指标只取用当前运行状态的信息，计算比较简单，但存在非线性。另一类是所谓的裕度指标，用它计算时涉及到过渡过程的模拟和临界点的求取问题，蕴含的信息量较大。而相对于状态指标而言，裕度指标较直观地表示了系统当前运行点到电压崩溃点距离的量度；系统运行点到电压崩溃点的距离与裕度指标的大小呈线性关系；可以比较方便地计及过渡过程中各种因素如约束条件、发电机有功分配、负荷增长方式等的影响。因此，电压稳定裕度指标分析方法受到了广泛的应用。

## 2 事故筛选和排序方法

由于离线和在线事故筛选在很多方面存在差异，在指标的选择和计算方法的选择上各有侧重。因此，对事故的筛选和排序的算法的总结可以从离线分析和在线分析的角度划分。

### 2.1 离线分析

对电压稳定性进行离线分析最基本的要求是准确，但是速度比较慢。目前用于离线电压稳定性分析的指标很多，如奇异值指标、特征值指标、电压不稳定接近指标（VIPI）、能量函数指标、局部指标等。

奇异值指标<sup>[4, 5]</sup>和特征值指标<sup>[6]</sup>是基于鞍结分岔点处的潮流雅可比矩阵有一个零奇异值和一个零

特征值的特性，来求取雅可比矩阵的最小奇异值和最小特征值，并以此来判断系统所处的运行点与鞍结分岔类型的电压崩溃点的距离。缺点是非线性强，计算量大。

电力系统潮流具有多解特性，其中的一个解对应着系统的“可运行”点<sup>[7]</sup>。潮流解的数目随着运行点与电压崩溃点的接近而减少。最终，在崩溃点处仅仅存在一对解并且相互重合。VIPI 指标就是用这对解来预测对电压崩溃的接近度。缺点是与实际的电力系统的信息不能直接关联。

能量函数指标<sup>[8]</sup>是建立在李雅普诺夫稳定理论基础之上的，它借助李雅普诺夫函数在电压崩溃点处变为零这一特征来判断系统的电压稳定性。这个指标的不理想之处是不容易包括更复杂的系统模型。有时只关心某节点或者局部区域负荷增长对系统稳定的影响。在准确度允许的情况下，文献[9]提出了一种局部指标，其原理是利用等效方法进行局部电压稳定性分析。该算法线性特性好，计算量小，速度快。

文献[10, 11]提出的连续潮流法（CPF）是准确方法，能准确计算出系统的电压崩溃点，并且能综合考虑系统中各种约束条件的调整。它分为两个步骤：预测和校正。此外，文献[12]提出直接求解崩溃点的崩溃点法，能克服常规潮流在接近奇异点收敛问题。文献[13]也提出一种直接求解崩溃点的方法，该方法是在常规潮流方程组（ $n$  阶）的基础上增加到  $n+1$  阶对应于 Jacobian 矩阵零特征值的方程组。该方法要求一个合理的初值，计算简单，但只针对电压崩溃的鞍结分岔类型。而非线性规划法<sup>[14]</sup>能考虑各种约束问题，但是计算耗时，其在在线电压稳定评估的应用尚未有突破性的进展。

对静态电压稳定性进行离线分析，其算法能计及各种约束条件，能精确计算至电压崩溃点，但是其计算量大，不适用于在线电压稳定评估，其计算结果一般用于对在线研究方法的评估。

### 2.2 在线分析

对运行方式不断变化的复杂电力系统而言，在线快速电压稳定评估是非常必要的。由于运行中的系统时刻因为扰动而导致运行点的变动，使得系统中电压薄弱区域、关键的节点和关键的线路随之发生改变，调度运行人员必须及时掌握这种变化，并预先采取防范策略。

对电压稳定性进行在线评估可以采取不同的指标，对指标的计算可以采用不同的算法，其目的都在于快速计算所有可信事故，再通过评估指标按严重程度进行排序，找出影响系统最严重的事故集

合。

### 2.2.1 按照指标分类排序

每一个可信事故对应一个不同的系统网络拓扑结构,同样也对应着在这种拓扑关系下系统存在的电压稳定裕度,而电压稳定裕度的水平可以采用不同的指标进行评估,采取不同的电压稳定裕度指标一方面可能会对排序的结果有所影响,另一方面其计算量也会有所差别。

文献[15]则为了保持原有电压稳定裕度而需切掉的负荷作为故障严重程度指标,进行故障筛选,已成功地应用于实际大系统,排序结果较可靠,速度较快。文献[16]提出一种电压稳定指标即能有效度量系统离崩溃点的距离,并结合通常的静态电压性能指标即能效地度量系统与基态电压的距离进行故障选择,该方法能对所有的事故进行排序,包括造成电压失稳和系统崩溃的事故。有的研究者关注电网的物理或者运行指标,例如,收敛判定法<sup>[17]</sup>,无功支持指标<sup>[1]</sup>等。文献[18]利用节点电压与本地无功支持之间的关系来对各类事故筛选和排序。该算法要选定指标权重,系统不同,则结果也就不同。文献[19, 20]是在假设系统在特定的增长方向上将系统的无功储备作为估计事故后系统电压稳定程度的指标,计算量得到了大大地减少。文献[21]选择SV曲线作为分析对象,考虑到不同母线在系统中所处的位置和重要性的不同,提出了反映整个系统的电压稳定裕度的 $U_i^j$ 影响指标。利用该算法需要计算事故后的崩溃点和潮流,精度较高,但仍然比较耗时。

文献[22]把对雅可比潮流方程进行奇异值分析时得到的二阶信息作为一个指标对事故进行筛选和排序。该算法考虑到事故对发电机的影响,有效地避免了非线性系统的掩蔽效应,误差较小。文献[23~25]提出了按电压/无功安全性指标排队的快速预想事故排队算法,其中文献[24]对严重事故捕获率最高,并且计算速度也最快。除此之外,还有基于非参数回归技术的方法<sup>[26]</sup>、使用中长期电压稳定功能仿真的动态故障筛选方法<sup>[27]</sup>等。

### 2.2.2 基于裕度指标的事故筛选和排序算法

由于裕度指标能更好地量化稳定距离,因而被广泛应用于静态电压稳定分析,在基于静态电压稳定的事故筛选和排序算法中也得到了广泛的应用。文献[2]将裕度指标定义为:从系统给定运行状态出发,按照某种模式,通过负荷或传输功率的增长逐步逼近电压崩溃点。这类指标又可以分为两种:基于VQ曲线的无功裕度指标和基于PV曲线的负荷裕度指标。裕度指标计算的关键是如何确定电压崩溃点。

文献[28]采用迭代过滤算法结合曲线拟合法进行事故筛选和排序,具体步骤是:从事故前运行状态开始,通过连续潮流或者崩溃点法得到事故前的崩溃点及崩溃点处的负荷水平 $\lambda^*$ 。然后从 $\lambda^*$ 逐步减少负荷,进行潮流计算,并记录下潮流无解事故的数目。每一次减少的负荷量根据插值法得到,这一迭代过程一直继续到允许的误差范围内找到最严重的前 $n$ 个事故为止。对筛选出的严重事故集,采用曲线拟合法近似得到其负荷裕度。其计算量的大小取决于系统预想事故的数量以及要筛选得到的严重事故数目。其中曲线拟合法对严重事故的负荷裕度估计存在一定误差。

文献[29]提出了另一种筛选方法:采用最优乘子法对扩展潮流方程进行求解,利用事故后系统的负荷裕度小于系统所要求的负荷裕度进行事故筛选和排序。该算法简单、通用、计算量大大减少。文献[30]基于节点电压降落和有功网损上升的综合指标来进行事故筛选,在得到系统最严重的前 $N$ 个预想故障后,采用改进连续潮流法计算准确的有功裕度指标并进行排序。该方法与文献[1]算法相比计算量小,精度高。

文献[1,31]根据PV曲线的二次曲线特征,分别提出了计算3个点和2个点的曲线拟合方法(GCF),用以快速求取各种事故下的近似电压崩溃点。实际的PV曲线并非是严格的抛物线,只是在鼻尖点处才为抛物线,因此该算法的精确性严重依赖于第二点在实际PV曲线上的位置<sup>[28,32]</sup>。文献[32]提出改进的曲线拟合法,选择后面两个拟合点时候尽量靠近鼻尖点,即第二个点为潮流从不收敛转入收敛的点,第三个点在第二个点基础上减少1%作为第三个拟合点,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,存在误排序的可能。文献[33]将灵敏度估算出的稳定裕度作为计算曲线的第二个拟合点的步长,在一定程度上满足了事故筛选和排序对精度的要求,该方法对于轻微故障,计算结果误差较小,但是计算量比原始曲线拟合方法大。

基于在鞍结型分岔点的系统负荷参数对任意控制变量的灵敏度分析<sup>[34~36]</sup>近来得到了广泛的应用,文献[37]提出了估计事故后系统负荷裕度的线性灵敏度方法,它是利用负荷裕度对支路导纳参数的灵敏度来预测支路断路后负荷裕度的变化幅度,该方法是目前速度较快的一种评估方法,但精度不高。文献[38]在文献[37]的基础上提出了通过间接求取负荷参数对支路传输功率的灵敏度方法来估计支路事故后系统的负荷裕度,提高了估计的精度。文

献[39]研究了如何通过线性优化方法提高线性灵敏度法的估计精度。但文献[38, 39]在提高简单灵敏度法估计精度的同时都相应地增加了计算量。而文献[40]针对简单灵敏度法中负荷裕度对线路参数的灵敏度线性度差采用改进的灵敏度方法即在事故前系统的鞍结分岔点引入置换定理, 然后计算出负荷参数对支路传输容量的灵敏度, 评估了事故后的负荷裕度, 计算量小, 精度高。文献[41]提出了只需求解一个左端系数阵为扩展潮流雅可比矩阵的线性方程组求灵敏度的新方法, 无需对鞍结分岔点处潮流雅可比矩阵零特征值对应的左特征向量的迭代求解, 该方法简单实用, 计算量小。文献[42]通过大量的仿真试验表明, 当文献[36]中事故参数选择恰当时, 事故后的系统负荷裕度对事故参数近似呈现出线性关系, 并指出问题的关键在于找到那些合适的事事故参数。文献[36,42]提出了对事故参数对象的选择可以使用支路导纳或者支路视在功率。

文献[43]基于右矢量提出了分两阶段对事故进行筛选和排序, 仿真结果表明该方法速度快、精度高。

文献[44]提出的针对支路型事故筛选和排序的快速算法不同于以往的任何事故筛选方法。该方法分4个阶段:①依据正常运行状态下的潮流解从所有预想事故中筛选出严重事故;②通过分析线路被置换后系统雅可比矩阵的最小奇异值, 从所筛选出的事故中再次筛选出更严重的事故;③在指定的负荷水平下解潮流方程, 从第二次筛选出的事故中再次筛选出最严重的事故;④对每个最严重的事故进行1次潮流计算并排序。随着整个筛选过程的进行计算量减少, 精度高。

### 2.2.3 其他事故筛选和排序算法

除了基于指标分类排序的事故筛选和排序算法外, 还有其他的事事故筛选和排序算法, 例如专家系统<sup>[45, 46]</sup>法则是结合了基本规则库(包括网络结构规则和安全分析规则)来进行事故的选择, 这种方法的核心在于规则库的合理构建, 然而在实际系统中规则库很难做到完善;人工神经网络<sup>[47, 48]</sup>法则是基于人工神经网络(ANN)和快速傅里叶变换技术的事事故快速筛选方法, 这种方法目前只是一种初步探讨, 训练速度、算法等离实际应用还有一定距离。

比较上述方法, 近些年来, 人们大都是从两方面来进行研究和改进, 即评估指标的类型和不同算法的运用, 从而使排队、筛选在速度及正确性方面符合实际的要求。

### 2.2.4 事故筛选和排序算法存在的问题

至今为止, 被开发出来事故筛选和排序的方

法, 全部是针对鞍结分岔。但是, 系统中存在另一种分岔现象, 即极限诱导分岔, 它是在系统中随着负荷的增长, 当某些发电机到达无功极限时所引发的电压崩溃现象<sup>[49]</sup>。目前, 针对此种分岔类型的快速事故筛选和排序的评估方法, 国际上还未见报道。同时, 已有的大部分的方法是针对支路型故障, 涉及到发电机故障的很少, 只有文献[39]涉及到了这个问题, 但是文献[39]也是对发电机作了近似的处理即在事故前将所有发电机都设为PQ节点。因此, 对于那些在事故前是PV节点发电机的系统而言, 利用此方法就存在很大的误差。如何结合实际的电力系统解决发电机的事事故筛选和排序还有待于进一步的研究。此外, 目前对于交直流系统的事事故筛选和排序算法也鲜有研究, 如何考虑直流系统各种控制方式变化情况下对事故筛选和排序算法的影响, 也会给今后的此领域研究带来挑战。

## 3 结论

本文从在线分析和离线分析应用两个方面论述了不同指标的各种事故筛选和排序算法, 并对其优缺点进行了评价。随着系统的快速发展, 系统规模的扩大及交直流互联系统的复杂性, 系统急需进行快速在线电压稳定评估以使运行人员掌握系统所面临的事故后运行状况, 以采取必要的预防控制措施来避免电压稳定问题的发生。因此, 在线算法的进一步改进和开发是摆在研究人员面前的一个非常有必要而且也是非常重要的一个问题。

## 参考文献

- [1] Ejebe G C, Irisarri G D, Mokhtari S, et al. Methods for Contingency Screening and Ranking for Voltage Stability Analysis of Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 350-356.
- [2] 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): 52-60. BAO Li-xin, ZHANG Bu-han, DUAN Xian-zhong, et al. A Summary of the State of the Art of Voltage Stability Margin Indices[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8): 52-60.
- [3] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 论电力系统电压稳定几种实用判据和安全指标[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(9): 36-41. DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, CHEN De-shu. On some Practical Criteria and Security Indices for Voltage Stability in Electric Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(9): 36-41.
- [4] 冯志鸿, 等. 多机电力系统电压静态稳定性分析——奇异值分解法[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(3).

- FENG Zhi-hong, et al. Analysis of Steady-state Voltage Stability in Multimachine Power System by Singular Value Decomposition Method[J]. Proceedings of the CSEE, 1992, 12(3).
- [5] Hong V H, Pan C T, Lin W W. Fast Calculation of a Voltage Stability Index of Power System[J]. IEEE Trans on PWRS, 1997, 12(4): 1555-1560.
- [6] Lof P A, Andersson G, Hill D J. Voltage Stability Indices for Stressed Power System[J]. IEEE Trans on PWRS, 1993, 8(1): 326-335.
- [7] Tamura Y, Mori H, Iwamoto S. Relationship Between Voltage Instability and Multiple Load Pole Solutions in Electric Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(5): 1115-1125.
- [8] Overbye T J, De Marco C L. Voltage Security Enhancement Using Energy Based Sensitivities[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(3).
- [9] Nagao T, Tanaka K, Takenaka K. Development of Static and Simulation Programs for Voltage Stability Studies of Bulk Power System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1).
- [10] Ajjarapu V, Christy C. The Continuation Power Flow: A Tool for Steady-state Voltage Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1).
- [11] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压稳定分析的改进连续潮流法[J]. 电力系统自动化, 1997, 23(14):13-16.  
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. An Improved Continuation Power Flow Method for Voltage Stability Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 23(14):13-16.
- [12] Chiang H D, Jean-Jumeau Rene. A More Efficient Formulation for Computation of the Maximum Loading Points in Electric Power System[J]. IEEE Trans on PWRS, 1995, 10(1) : 635-646.
- [13] Canizares Claudio A, A Ivarado Fernando L. Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems[J]. IEEE Trans on PWRS, 1993, 8(1): 1-8.
- [14] Van Cutsem T. A Method to Compute Reactive Power Margins with Respect to Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on PWRS, 1991, 6(1): 145-156.
- [15] Feng Z, Xu W. Fast Computation of Post Contingency System Margins for Voltage Stability Assessments of Large Scale Power Systems[J]. IEEE Proc Gener, Transm, and Distrib, 2000, 147(2):76-80.
- [16] Jasmon G B, Lee L H C C. New Contingency Ranking Technique Incorporating a Voltage Stability Criterion[J]. IEEE Proc Gener, Transm and Distrib, 1993, 140(2):87-90.
- [17] Sundhararajan Srin, Pahwa Anil, Starrett Shelli, et al. Convergence Measures for Contingency Screening in Continuation Power Flow[A]. in: Transmission and Distribution Conference and Exposition[C]. 2003.69-174.
- [18] Liu Hang, Anjan Bose, Vaithianathan Venkatasubramanian. A Fast Voltage Security Assessment Method Using Adaptive Bounding[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 1137-1141.
- [19] Custem T V, Moisse C, Mailhot R. Determination of Secure Operating Limits with Respect to Voltage Collapse [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 327-335.
- [20] Capitanesky F, Custem T V. Evaluation of Reactive Power Reserves with Respect to Contingencies[A]. in: The Bulk Power System Dynamics and Control V[C]. Onomichi: 2001.26-31.
- [21] de Moura R D, Prada R B. Contingency Screening and Ranking Method for Voltage Stability Assessment[J]. IEE Proc Gener, Transm and Distrib, 2005, 152(6).
- [22] Berizzi A, Zeng Y G, Marannino P, et al. A Second Order Method for Contingency Severity Assessment with Respect to Voltage Collapse[J]. IEEE Trans Power Systems, 2000, 15: 81-87.
- [23] Ekwue A O. On the Ranking of Contingencies for on-line Application[J]. Electric Power Systems Research, 1990, 19(2) : 207-212.
- [24] Singh S N, Srivastava S C. Improved Voltage and Reactive Power Distribution Factors for Outage Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1085-1093.
- [25] Meliopoulos A P S, Cheng C. A Hybrid Contingency Ranking Method[A]. in: Proceedings of the 10th Power Systems Computation Conference[C]. Graz(Austria): 1990.605-612.
- [26] Wehenkel L. Contingency Severity Assessment for Voltage Ssecurity Using Non-parametric Regression Techniques[J]. IEEE Trans on PWRS, 1996, 11(1): 101-111.
- [27] Cutsem T V, Moisse C, Mailhot R. Derermination of Secure Operating Llimits with Respect to Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on PWRS, 1999, 14(1): 327-335.
- [28] JIA Zhi-hong, Jeyasurya B. Contingency Ranking for On-line Voltage Stability Assessment.[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3):1093-1097.
- [29] 马平, 蔡兴国. 电压稳定的事故筛选和排序及二分法求 PV 曲线的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(11) :1767-1770.  
MA Ping, CAI Xing-guo. Study on Contingency Filtering and Binary Method Tracing PV Curves to Voltage Stability[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(11): 1767-1770.
- [30] 郝晓强, 丁晓群, 侯学勇. 一种用于在线电压稳定分析的事故筛选和排序新方法[J]. 中国电力, 2008, 41(5) : 56-58.  
HAO Xiao-qiang, DING Xiao-qun, HOU Xue-yong. A New Method of Ccontingency Screening and Rranking for On-line Voltage Stability Analysis[J]. Electric Power, 2008, 41(5): 56-58.
- [31] 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.
- [32] 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. Method for Contingency Screening and Ranking for On-line Voltage Stability Assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 50-55.
- [33] 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, CHIANG Hsiao-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.
- [34] 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.
- [35] 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, CHIANG Hsiao-dong, ZHANG Bo-ming. A Sensitivity Method for Branch Type Insecure Contingency[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 69-73.
- [36] Flueck A J, Dondeti J 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): 223-227.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 马平, 蔡兴国. 估计支路型事故后系统电压稳定边界的灵敏度算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 18-22.  
MA Ping, CAI Xing-guo. Sensitivity Method of Voltage Stability Margin Evaluation for Branch Outage Contingencies[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 18-22.
- [41] 江伟, 王成山, 余贻鑫. 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. 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.
- [42] Scott Greene Ian Dobson. Voltage Collapse Margin Sensitivity Methods Applied to the Power System of Southwest England[R]. Electrical & Computer Engineering Department University of Wisconsin-Madison.
- [43] Srivastava A K, Flueck A J. A Novel and Fast Two-stage Right Eigenvector Based Branch Outage Contingency Ranking[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 12(16): 3062-3067.
- [44] 马平, 蔡兴国. 电压稳定分析中支路型故障筛选和排序算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 44-48.  
MA Ping, CAI Xing-guo. A New Method of Screening and Ranking Branch Outage Contingencies for Voltage Stability Assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 44-48.
- [45] 张波. 专家系统用于电力系统预想事故筛选[J]. 山东工业大学学报, 1997, 27(3):286-290.  
ZHANG Bo. An Expert System for Power System Contingency Screening[J]. Journal of Shandong University of Technology, 1997, 27(3): 286-290.
- [46] 孙斌. 专家系统在静态安全分析中应用的研究[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(3): 38-43.  
SUN Bin. The Application of Expert System to Static Security Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(3): 38-43.
- [47] 崔岚. ANN及FFT技术用于电力系统预想事故分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(1): 28-31.  
CUI Lan. Application of ANN FFT Techniques to Contingency Analysis[J]. Proceedings of the EPSA, 2000, 12(1): 28-31.
- [48] 崔岚. 一种基于ANN技术的预想事故自动选择方法[J]. 山东工业大学学报, 1999, 29(4): 323-327.  
CUI Lan. A New Contingency Ranking Approach Using ANN Techniques[J]. Journal of Shandong University of Technology, 1999, 29(4): 323-327.
- [49] 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 Hua-qiang, LIU Ya-mei, Yorino N. Voltage Stability Assessment for Saddle Node Bifurcation and Limit Induced Bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 56-60.

收稿日期: 2008-09-03; 修回日期: 2008-10-26

作者简介:

肖玲(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为系统分析、电压稳定、优化问题等; E-mail: 93339868@qq.com

李华强(1965-), 男, 博士, 教授, 从事电压稳定及优化问题研究;

王华伟(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题。