

# 电力系统电压稳定性分析综述

赵周芳, 李华强, 张希猛

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 电力系统电压稳定性是电力工程界的研究热点之一。首先介绍了分岔理论在电压稳定性分析中的应用。其次, 给出了电压稳定分析中常用的静态指标, 阐述了各指标的特点。最后, 介绍动态电压分析方法, 并对电压稳定性分析进行展望。

**关键词:** 电压稳定性; 分岔理论; 静态电压稳定性指标; 动态电压稳定性

**Abstract:** The voltage stability of power system is a major focus of research in power engineering. Firstly, the application of bifurcation theory to the analysis of voltage stability is introduced. Secondly, the used steady-state voltage stability indices are presented and their characteristics are described in detail. Finally, the dynamic voltage analysis methods are introduced and an outlook for the voltage stability analysis is given.

**Key words:** voltage stability; bifurcation theory; steady-state voltage stability index; dynamic voltage stability

**中图分类号:** TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0071-04

## 0 引言

19 世纪 70、80 年代法国、瑞典、日本等国家相继发生电压崩溃性事故, 这些以电压崩溃特征的电网瓦解事故每次均带来巨大的经济损失, 同时也引起了社会的极大混乱。电压稳定问题已经成为国际工学界关注的焦点。

电力系统电压稳定性问题经过几十年的发展已经有很大进步, 早期人们简单地将电力系统电压失稳问题看作系统过载引起, 从而将其视为静态问题或者认为系统动态对电压稳定的影响很慢。但是, 电力系统本质上是一个非线性动力学系统, 电压失稳究其本质是系统的动态行为, 涉及到了各种元件的动态特性。因此, 电压稳定问题可分为静态电压稳定性与动态电压稳定性, 两者研究的角度和目的不同。

理论和实践已证明分岔理论是分析研究非线性动态系统结构稳定性的有效工具。电压稳定的改变实质是一种从稳态走向分岔的过程, 其外在表现为电压幅值的振荡失稳或瞬间大幅度跌落。

目前, 对于静态电压稳定性, 学者们提出了各种指标及其方法来评估系统的静态电压稳定性。但是对于动态电压稳定性问题, 由于各种元件动态模型的建立和其相互影响的复杂性及其所导致的求解过程中的“维数灾”问题, 动态电压稳定性还有待进行进

一步的研究。

下面首先阐述了电力系统电压稳定性与分岔理论。其次, 论述了静态电压稳定及相应的指标和计算方法。其后, 对动态电压稳定性的研究方法及研究现状进行了概括。最后, 结论部分给出电压稳定研究目前存在的一些问题, 并对以后的工作做出展望。

## 1 电压稳定性与分岔理论

Kwatny 和 Pasrija 等人首次将分岔理论引入电压稳定性分析中, 在文献 [1] 中他们应用分岔理论研究了电力系统微分一代数模型下的多平衡点稳定性问题, 为之后分岔理论在电压稳定性问题中的应用奠定了基础。

### 1.1 电力系统的静态分岔

在电压稳定的静态分岔分析中, 一般不考虑元件和控制的动态特性, 此时的平衡点方程就是潮流方程。

#### 1.1.1 鞍结分岔

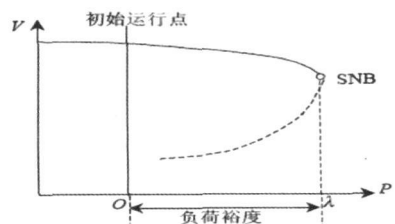


图 1 鞍结分岔

图 1 为鞍结分岔 (Saddle Node Bifurcation, SNB), 随着负荷水平的增加, 系统电压水平开始降低, 系统在 SNB 处发生电压崩溃, 点 SNB 即为鞍结分岔点。曲线的上半部分为稳定区, 下半部分为不稳定区。

### 1.1.2 极限诱导分岔

1992 年 Ian Dobson 在文献 [2] 提到了另一种分岔现象——极限诱导分岔 (Limit Induced Bifurcation, LIB)。如图 2 所示, 点 O 为初始运行点, 随着负荷的增加, 系统的电压水平逐渐降低, 发电机会随之逐渐增加无功出力, 当系统中某台发电机到达无功极限时, 系统会突然发生电压崩溃, 这是因为系统的运行点位于该发电机 PV 曲线下半部的不稳定区而引起了系统的突然电压崩溃。

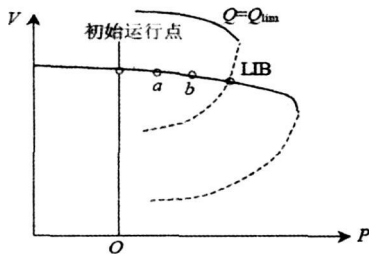


图 2 极限诱导分岔

## 1.2 电力系统的动态分岔

动态分岔研究系统的动态行为, 需要考虑元件及控制的动态属性对电压稳定的影响, 在各种动态分岔中 Hopf 分岔是最基本的、最具代表性的分岔形式, 1983 年瑞典电网发生的电压崩溃事件就与 Hopf 分岔有关 [3]。目前动态分岔的研究范围已拓展到倍周期分岔 [4]、环面分岔 [5]、同宿及异宿分岔现象。

分岔理论在电压稳定性问题的研究中已得到越来越广泛的应用, 其地位日显重要性 [6]。相对而言, 目前的很多研究都是针对静态分岔, 对动态分岔的研究相对较少。

## 2 静态电压稳定性指标

静态电压稳定只与代数方程式有关, 故它比动态研究更有效率。静态电压稳定性指标应能回答如下问题: 当前运行点到崩溃点的接近程度, 即当前运行点到崩溃点还有多大裕度, 哪些支路为关键支路? 哪些发电机是关键发电机? 哪些节点对功率注入最敏感? 发生静态电压失稳时其机理是什么? 发生电压失稳问题时要采用何种措施? 采用哪种措施更有效?

通过静态分析指标运行人员可以得到当前运行点到崩溃点的距离。这里是对静态电压稳定性指标进行总结概括。

### 2.1 负荷裕度指标

负荷裕度指标直观易与理解, 线性度好, 可以较方便的计及过渡过程中各种因素, 因此受到广泛的重视。负荷裕度指标是一个精确指标, 它不依赖于特别的系统模型, 仅需要一个静态模型, 尽管它可以用于动态模型, 却并不依赖动态细节。一旦通过计算求得负荷裕度后, 就可以容易的计算负荷裕度对任何系统参数和控制参数的灵敏度。

### 2.2 灵敏度指标

灵敏度指标以潮流方程为基础, 利用系统中某些量的变化情况来研究系统的电压稳定性, 灵敏度指标物理概念明确, 在潮流计算的基础上只要少量的额外计算便可以得到, 因此在静态电压稳定中得到了广泛的应用。但是, 大部分灵敏度指标并未计及负荷动态的影响, 不能计及系统的非线性以及物理约束的影响, 不能反映当前运行点与临界点的距离 [7]。

### 2.3 最小奇异值 特征值指标

当系统运行到达鞍结分岔负荷极限时, 潮流雅可比矩阵奇异, 且有一个零奇异值和一个零特征值。因此潮流雅可比矩阵的奇异度可以作为电压稳定性指标, 即用潮流雅可比矩阵的最小奇异值 特征值来作为电压稳定性指标, 其缺陷在于对崩溃点的预测度较差。

### 2.4 电压不稳定接近指标 VPI

电压不稳定接近指标 VPI (Voltage Instability Proximity Index) 是在潮流多解 [8] 的基础上提出来的, 通过一对相关邻近潮流解之间的距离来判断电压稳定性。

### 2.5 二阶性能指标

电压崩溃是强非线性现象, 当发电机或传输设备达到极限时, 大部分已提出的指标值将发生快速突变, 不能给出当前运行点与崩溃点的接近程度, 文献 [9, 10] 在保留非线性潮流的基础上提出了二阶指标, 克服一阶指标非线性的缺陷。二阶指标为准线性指标, 主要内容是如何寻找一种具有“二次型”特性的指标函数。

### 2.6 无功裕度指标

在系统发生鞍结分岔的情况下, 通过计算求得最大无功负荷与基态负荷的差得到最大无功裕度。文

献 [11] 通过优化的方法得到最大无功裕度对系统鲁棒性进行全局度量并计及了发电机的无功极限。

### 2.7 $U/U_0$ 指标

$U$  为潮流或状态估计得到的节点电压,  $U_0$  是对同一个系统状态所有负荷为 0 解潮流方程得到的节点电压。每个节点的  $U/U_0$  提供系统电压稳定性指示, 并判断弱节点和预防地点, 但该指标对系统参数呈现高度非线性特性, 不能准确预报电压崩溃的接近程度。

### 2.8 局部指标

局部负荷指标假定在其他节点负荷维持不变的情况下, 某节点以一定的功率因素增加负荷, 从起始点到 PV 曲线鼻端的相对距离; 负荷节点电压稳定性就地安全指标利用简化系统的潮流方程解的条件判断电压安全性。由于安全控制采用的是就地量, 因此需要利用最新的快速的数据采集和处理技术才能实现, 如文献 [12], 基于支路等值电路推导得到的静态电压稳定指标, 并利用 GPS (Global Position System) 的向量测量单元测得当地数据, 判断节点的稳定性, 用于大型输电网的静态电压在线检测。

有关电压稳定性的指标有很多, 每个指标都有其各自的特点及应用范围, 很难明确地说哪一种指标好。需要针对各个实际的系统找出一种合适的电压稳定指标<sup>[13]</sup>。上述提出的各种指标均适用于鞍结分岔, 针对极限诱导分岔的指标相对较少, 仅有负荷裕度指标, 其计算方法也仅有连续潮流法<sup>[14~17]</sup>以及优化方法<sup>[18]</sup>。

## 3 动态电压稳定性分析

动态电压稳定性分析根据系统的 DDAE (Difference-Differential-Algebraic Equation) 方程, 计及了元件的动态特性, 如时域仿真法, 在考虑系统的非线性元件动态特性的前提下, 采用数值积分的方法得到电压及其他量随时间变化的曲线。

### 3.1 暂态电压稳定性分析

电力系统暂态稳定研究的主要解决问题是: 快速准确地判断系统在受到大扰动以后能否保持暂态电压稳定。时域仿真是分析电力系统暂态电压稳定性和校验其它分析方法正确性的关键手段, 但是其计算量巨大。文献 [19~21] 以简单系统为例, 讨论了电力系统暂态电压稳定性的基本概念仿真, 研究了电压

崩溃发生时的基本特征, 并研究了快速判断电力系统暂态电压稳定性的方法。文献 [22] 基于等面积定则, 提出暂态电压稳定裕度指标, 在该指标的基础上求解故障临界切除时间以及给定故障切除时间相应的极限动态负荷。文献 [23] 在电压稳定域二阶逼近理论的基础上提出了暂态电压稳定判据, 通过简单系统仿真实例证明该失稳判据所具有的速度快、准确度高、易于计算机实现以及工程实用性高的特点, 但该判据仅给出定性分析, 不能给出电压稳定裕度。针对这一问题, 文献 [24] 运用电压稳定域二阶逼近理论提出暂态电压稳定域度指标, 但该方法仅适用于简单系统, 至于大规模系统的需要进一步加以研究。在实际的电力系统中暂态电压失稳将伴随着暂态功角失稳, 如何将两者纳入统一时间框架进行分析还需更深入的研究。采用基于动态元件建模的方式<sup>[21, 22, 25]</sup>, 通过仿真模拟电压崩溃发生以及发展过程, 计算量较大, 机时耗费较高, 距离实时在线评估还有很大一步距离。随着中国“西电东送, 区域联网”能源发展战略的实施, 采用交直流输电已成为必然趋势, 文献 [26, 27] 对暂态电压稳定的影响因素、分析方法、稳定判据等进行了介绍, 研究了实际系统暂态电压稳定的一些现象以及采取何种措施更有利于保持交直流混联系统暂态电压稳定性。

### 3.2 中长期电压稳定性分析

中长期电压稳定研究的理论依据为准稳态分析以及多时标仿真, 目前对中长期电压稳定的研究主要集中在计算效率和准确度等方面。文献 [28] 提出 EXSTAB 程序 (Extended Time-Scale Stability Analysis Program) 模拟中长期扰动, 文献 [29] 中 Van Cutsem 提出用准稳态平衡方程代替暂态过程, 即准稳态近似。文献 [30] 结合二分搜索技术和准稳态模拟分析求取稳定运行极限, 可以满足实时应用的要求。文献 [31] 对准稳态仿真基本原理的基础上提出了适用于不同系统的 QSS (Quasi-steady simulation) 仿真方法, 指出该仿真方法在在线和离线应用方面均有很好的应用前景。文献 [31, 33, 34] 均是基于准稳态分析方法的对中长期电压稳定动态元件的建模以及快速仿真算法所进行的研究, 文献 [35] 对中长期电压崩溃过程事故特征以及崩溃机理进行了分析, 文献 [34] 提出以有载调压变压器变比为参数的连续潮流法, 并对连续潮流法的步长控制加以改进, 以得到更快的运算速度。

中长期电压稳定以及暂态电压稳定研究已有较大进步,但是针对暂态电压稳定以及中长期电压稳定的建模还存在着很多问题,在电压失稳事故过程的仿真研究中,很难将暂态电压失稳过程和中长期电压失稳过程在事故特征和时间框架上割裂开来。因此研究电压失稳过程,需要对故障扰动的全过程进行仿真,而不是仅采用暂态过程仿真,否则可能使结果偏于乐观<sup>[31]</sup>。此外,如何建立适用于电压稳定分析的动态负荷模型<sup>[35]</sup>有大量的工作要做。

## 4 结论及展望

电压稳定性研究已取得一些进步,但是还有一些问题有待解决。

第一,电压稳定性问题的实时安全监视和电压崩溃的在线预防措施,通过预想故障对故障后运行状态的稳定性进行判别,以供运行人员采取必要的预防控制措施,快速而且准确度高的解析方法有待进一步加以研究。

第二,目前对动态分岔理论的研究尚不深入,有待进一步的研究。

第三,电压崩溃与电力系统的模型有很大关系,对电力系统非线性元件进行动态建模需要进一步的研究。

## 参考文献

- [1] Harry G. Kwamny, Ann K. Pasrija, Leon Y. Bahar. Static Bifurcations in Electric Power Network; Loss of Steady-state Stability and Voltage Collapse [J]. IEEE Trans On Circuits and Systems 1986, 10(33): 981-991.
- [2] Ian Dobson, Liming Liu. Voltage Collapse Precipitated by the Immediate Change in Stability When Generator Reactive Power Limits Are Encountered [J]. IEEE Trans on Circuits and System, 1992, 39(9): 762-766.
- [3] E. H. Abed, C. Alexander, H. Wang, A. M. A. Hamdan, H. C. Lee. Dynamic Bifurcations in a Power System Model Exhibiting Voltage Collapse [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos 1993, 3(5): 1169-1176.
- [4] 张强, 王宝华, 杨成梧. 电力系统的倍周期分岔 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11): 6-9.
- [5] 贾宏杰, 余贻鑫, 李鹏. 电力系统环面分岔与混沌现象 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 6-10.
- [6] 郭志炜, 胡国根, 韩祯祥. 基于分叉理论的电力系统电压稳定性分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [7] 袁骏, 段献忠, 何仰赞, 石东源. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述 [J]. 电网技术, 1997, 21(9): 7-10.
- [8] Yasuo Tanura, Koji Sakamoto, Yukihiko Tayama. Voltage Instability Proximity Index (VIPI) Based On Multiple Load Flow Solutions in Ill-conditioned Power Systems [J]. Proceedings of the 27th Conference on Decision and Control, 1988, 2114-2119.
- [9] A. Berizzi, P. Finazzi, D. Dosi, P. Marannino, S. Corsi. First and Second order methods for voltage collapse assessment and security enhancement [J]. IEEE Trans On Power System, 1998, 13(2): 543-551.
- [10] Alberto Berizzi, Yong-Gang Zeng, Paolo Marannino, Alessandro Vaccarini, Pierangelo Scapellini. IEEE Trans on Power Systems 2000, 15(1): 81-87.
- [11] T. Van Cutsem. A Method to Compute Reactive Margins with Respect to Voltage Collapse [J]. IEEE Power Engineering Review, 1991, 51.
- [12] C. Liu, K. T. Vu. Analysis of tap-changer dynamics and construction of voltage stability regions [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems [J]. 1989, 36(4): 575-590.
- [13] 周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统电压稳定性指标述评 [J]. 电网技术, 2000, 25(1): 1-7.
- [14] Naoto Yorino, Hua-Qiang Li, Hiroshi Sasaki. A Predictor/Corrector Scheme for Obtaining Q-Limit Points for Power Flow Studies [J]. IEEE Trans on Power System, 2005, 20(1): 130-137.
- [15] 马冠雄, 刘明波, 王奇. 一种识别静态电压稳定分岔点的混合方法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 17-20.
- [16] 王奇, 刘明波. 一种识别极限诱导分岔点的改进连续潮流算法 [J]. 华南理工大学学报, 2008, 36(2): 133-138.
- [17] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种静态电压稳定临界点的识别和计算方法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 28-32.
- [18] 李华强, 刘亚梅, N. Yorino. 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.
- [19] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 电力系统暂态电压稳定的基本概念和仿真分析 [J]. 华中理工大学学报, 1995, 23(4): 21-24.
- [20] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 电力系统暂态电压稳定性的快速判断 [J]. 华中理工大学学报, 1996, 24卷增刊(II): 46-49.

(下转第 85 页)

全运行指标可视化显示方法,如配网可靠性评估可视化等,从数理统计与数据挖掘等角度为调度员提供更多决策支持。③加入配网的经济性分析模块,对泸州电网运行效益进行可视化展示,同时生动展示网损、检修等信息。

## 5 结束语

泸州电网实时可视化分析与预警系统极大地提升了泸州电网调度监视控制的装备水平。不仅有利于电网安全生产运行,同时也作为泸州电业局的一面窗口,使不同层次人员能够很快对泸州电网整体情况有相当清晰的感性认识。更重要的是,系统在很大程度上减轻了调度员的劳动强度,提高了调度效率与准确性。将调度员从枯燥、海量数据和日益繁重的监视任务中解脱出来,使其专注思考电网运行的深层次问题,大大加强了对泸州电网的调度运行控制能力。

## 参考文献

[1] 陈玮,罗毅,涂光瑜,等. 动态监视下电力系统状态的可视化[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 68—71.

[2] OVERBYE T J WEBER J D. Visualization of power sys-

tem data[C]. Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences Hawaii USA: IEEE, 2000: 1228—1234.

[3] 刘俊勇,陈金海,沈晓东,等. 电网在线可视化预警调度系统[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 1—5.

[4] 陈佳,孙宏斌,汤磊,等. 电力系统控制中心三维可视化技术及其实时应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 20—24.

[5] 胡之武,邱家驹,王康元. 电力系统节点运行数据等高线可视化实现方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 55—59.

[6] 袁泉,王康元,张洁,等. 基于 SVG 的公共信息交互平台[J]. 继电器, 2005, 33(12): 66—68.

[7] 张慎明,刘国定. IEC61970 标准系列简介[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(14): 1—6.

[8] 吴政球,潘立强,陈辉华,等. 基于灵敏度分析的机组电价决策及其算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 60—64.

### 作者简介:

高 剑 (1975—), 男, 1998 年毕业于重庆大学, 工程师, 从事技术管理工作;

余兴祥 (1980—), 男, 硕士研究生, 从事调度运行工作;

刘友波 (1982—), 男, 四川大学在读博士研究生。

(收稿日期: 2009—08—18)

(上接第 74 页)

[21] 段献忠,何仰赞,陈德树. 仿真计算中暂态电压稳定性的判断[J]. 华中理工大学学报, 1995, 23(4): 25—28.

[22] 徐泰山,薛禹胜,韩祯祥. 感应电动机暂态电压失稳的定量分析[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(6): 21—24.

[23] 叶俭,梅生伟,薛安成. 基于稳定域边界二阶逼近的暂态电压稳定分析[J]. 现代电力, 2005, 22(4): 1—5.

[24] Yihong Wang, Chen Shen, Shengwei Mei, Ancheng Xue. Analysis of Transient Voltage Stability via Quadratic Approximation Method [R]. International Conference on Power System Technology, 2006, 1—6.

[25] 徐泰山,薛禹胜,韩祯祥. 暂态电压稳定的模型要求和快速判断[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(12): 11—15.

[26] 汪娟娟,张尧,夏成军,等. 交直流电力系统暂态电压稳定性综述[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 30—34.

[27] 莫琦,张尧,武志刚,等. 交直流互联系统暂态电压稳定问题仿真分析[J]. 电力系统自动化学报, 2006, 18(6): 87—90.

[28] A. Kurita, H. Okubo, D. B. Klapfer. Multiple time-scale Power System Dynamic Simulation. IEEE Trans on Power System, 1993, 8(1): 216—223.

[29] Van Cutsem, T. Vourmas, C. D. Voltage Stability Analysis in Transient and Mid-term Time Scales. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 10: 146—154.

[30] Van Cutsem, C. Moisse. Determination of Secure Operating Limits with Respect to Voltage Collapse. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 325—327.

[31] 马世英,印永华,汤涌,等. 短期和中长期电压稳定仿真及评价[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 14—20.

[32] 安宁,周双喜,朱凌志. 中长期电压稳定准稳态时域轨迹追踪方法[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 40—45.

[33] 顾群,徐泰山,陈怡,等. 中期电压稳定的建模和快速仿真[J]. 电力系统自动化, 1993, 23(21): 52—55.

[34] 徐泰山,鲍颜红,薛禹胜,等. 中期电压稳定的快速仿真算法研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(3): 9—11.

[35] 段献忠,包黎昕. 电力系统电压稳定分析和动态负荷建模[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(19): 25—28.

### 作者简介:

赵周芳 (1983—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压稳定。

李华强 (1965—), 男, 博士, 教授, 从事电压稳定及优化问题研究。

(收稿日期: 2009—06—23)