

电力系统电压稳定性及其研究现状(一)

苏永春¹,程时杰¹,文劲宇¹,刘 邕²

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074;

2. 小浪底建管局水力发电厂,河南 洛阳 471000)

摘要: 分 2 部分综述了电力系统电压稳定性的研究现状。第 1 部分首先介绍了电压稳定的定义和分类情况,然后对迄今为止电压稳定的静态和动态分析方法进行了总结和评述。静态分析方法中,灵敏度法物理概念简单明确,在简单系统中判据严格、准确,但推广到复杂系统后有效性无法保证;潮流多解法间接克服了潮流方程雅可比矩阵在临界点奇异带来的收敛问题,但低电压解的求取比较困难,现已较少采用;奇异值(特征值)分析法中潮流雅可比矩阵的奇异值或特征值变化缓慢且具有高度非线性,发电机无功越限时会导致最小特征值跳变,因而最小奇异值难以对系统电压稳定程度作出客观评价。动态分析方法中,小扰动分析法需要恰当考虑元件动态特性,建立尽可能简化而又能较精确反映系统动态的分析模型;关于分岔及混沌的理论研究一般局限于低维、简单模型系统和周期性小扰动,并引入了很多假设;基于本地测量数据的方法间接考虑了元件的动态特性,但只能用于单个节点或母线上,可作为集中控制方案的补充。

关键词: 电力系统; 电压稳定; 静态; 动态

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)06-0097-05

电力系统电压稳定性的研究在电力系统稳定性研究中是发展较慢的一个分支。20 世纪 40 年代,苏联学者马尔柯维奇等首先注意到电压稳定问题,并提出了电压稳定判据,但到 20 世纪 70 年代末至 80 年代初此问题才开始作为一个专门的课题进行研究,其原因是当时世界上一些大的电网相继发生了以电压崩溃为特征的电网瓦解重大事故^[1-2]。20 世纪 90 年代前电压稳定研究主要集中在静态电压稳定方面,随着研究的深入,人们逐步认识到电压稳定问题的实质是一个动态问题,它与电力系统中许多元件的动态特性有密切的关系。

国家自然科学基金在新设立的重大研究计划《电力系统广域安全防御基础理论及关键技术研究》项目中,包含了有关电力系统电压稳定性的研究内容。与此同时,基于 GPS 和光纤通信的广域测量系统(WAMS)在电力系统中也逐步得到应用,使在电网全局的高度开展电压稳定性的研究成为可能^[3]。

1 电力系统电压稳定的定义及分类

1.1 定义

电力系统的电压稳定性是指在给定的初始运行条件下,遭受扰动后电力系统在所有母线上保持稳定电压的能力^[4-5]。它依赖于电力系统中保持或恢复负荷需求和负荷供给平衡的能力。在发生电压失稳时,可能引起电网中某些母线上的电压下降或升高,从而导致系统中负荷丧失、传输线路跳闸、级联停电及发电机失去同步等。

1.2 分类

目前,文献中可以见到与电压稳定有关的词语主要有静态电压稳定、暂态电压稳定、动态电压稳定、中长期电压稳定等,对它们的含义和范畴,至今还没有一个统一的定义。文献[6]给出了电压稳定性的参考分类方法,它将电压稳定问题分为如下 4 类。

a. 动态稳定:系统用线性微分方程描述,计及元件动态及调节器的动态作用,判别系统在小扰动下的电压稳定性。

b. 静态稳定:对动态系统作进一步简化,负荷用静态电压特性表示,系统用代数方程描述,判断系统在平衡点处的电压稳定性。

c. 暂态稳定:系统用非线性微分方程描述,计及元件动态特性及调节器的动态作用,判别系统在大扰动下的电压稳定性。

d. 电压崩溃:遭受扰动后,系统内无功功率平衡状态遭破坏,依靠调节器和控制器的作用,仍不能使电压恢复,致使局部或整个系统电压急剧下降的物理过程。

CIGRE 38 研究委员会和 IEEE 电力系统动态行为委员会联合组成的工作组在 2004 年 5 月份完成了一份报告^[7],其主要内容在于处理电力系统稳定定义和分类问题,所给出的电压稳定分类如图 1 所示。

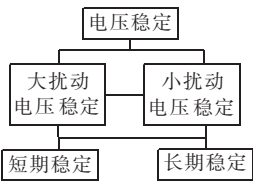


图 1 电压稳定分类

Fig.1 Classification of voltage stability

根据扰动的性质,该报告将电压稳定分成 2 类。

a. 大扰动电压稳定指系统在遭受大的扰动,如

系统短路、切机、线路故障后,保持电压稳定的能力。它由系统和负荷特性以及两者间连续和不连续控制及保护的相互作用所决定。判断大扰动电压稳定性,需要在一段时间内考虑电力系统的非线性响应特性,研究的时间从几秒至几十分钟。

b. 小干扰电压稳定指系统在遭受小的扰动如系统负荷增加后保持电压稳定的能力。它受负荷特性以及给定时间内的连续和不连续控制作用的影响。分析这类电压稳定时,进行适当的假设,系统方程能被线性化,因而可以通过灵敏度计算确定影响电压稳定的因素。但是,线性化无法计及诸如 OLTC (死区、不连续性、延时)的非线性影响,因此,应当使用线性和非线性相结合的分析方法进行补充。

根据研究的时间范围进行的分类有2种情况。

a. 短期电压稳定包含快速动作元件如感应电动机、电子控制负荷、HVDC 变流器的动态过程。所关心的时间只有几秒,通过求解相应的微分方程进行研究,此时负荷的动态模型通常很重要。与功角稳定不同,靠近负荷的短路对系统的电压稳定性影响大。

b. 长期电压稳定涉及慢动作设备如变压器分接头、温控负荷、发电机电流限制器。所需的研究时间从几分钟到更长的时间。

1.3 定义与分类评述

关于电压稳定定义的理解一般没有太大的偏差。但电压稳定的分类在学术界却存在较大的分歧。在北美的有关文献中,动态电压稳定的概念等同于小干扰电压稳定,指存在自动控制的情况下(特别是发电机励磁控制)的电压稳定性,以此与经典的没有励磁控制的稳态稳定相区别;在欧洲的有关文献中,动态电压稳定常被用来指暂态电压稳定。由于存在这些分歧,文献[7]中明确提出弃用“动态电压稳定”和“暂态电压稳定”词语。结合我国的实际情况,作者以为后一个词语可以继续使用,因为“暂态电压稳定”在现有的文献中具有大扰动和短期限的确切语义。其实电压稳定分类的不统一也从一个侧面反应了电压稳定研究尚未走向成熟。

2 电力系统电压稳定研究现状

电力系统电压稳定的研究主要在以下几个方面[8]:分析当前系统运行点与电压失稳点的距离或电压稳定裕度的大小;分析可能引发系统电压失稳的薄弱节点或薄弱区域;研究防止系统电压失稳的控制策略;对于大干扰电压稳定进行故障选择和筛选,研究影响电压稳定的故障极限切除时间;当需要切负荷时,快速计算为保持电压稳定所应切除的负荷量以及负荷的极限切除时间。

下面介绍一些电力系统电压稳定的研究方法。

2.1 静态电压稳定分析方法

2.1.1 灵敏度方法^[9-10]

灵敏度方法将灵敏度系数定义为系统状态变量对控制变量的导数,比较常用的状态变量灵敏度有

dU_L/dP_L 、 dU_L/dQ_L 、 dU_L/dU_g 等,这里, U_L 、 P_L 、 Q_L 、 U_g 分别为负荷节点电压幅值、有功负荷、无功负荷、发电机电节点电压幅值。当灵敏度系数变大时,系统趋向于不稳;如灵敏度系数趋于无穷大时,系统发生电压崩溃。对于不同的研究对象,可采用不同的状态变量,如需要监视电压,则可以采用电压灵敏度系数判据。在使用灵敏度法时,一般将控制变量取为负荷的变化量,电压崩溃点通常定义为负荷的极限点。灵敏度法常用来判断系统的电压稳定性、确定系统的薄弱母线及确定无功补偿装置的安装位置等。

2.1.2 潮流多解法^[11]

电力系统的潮流方程是一组二阶非线性方程,因而可能存在多个潮流解,对于一个 n 节点系统,系统的潮流最多可能有 2^{n-1} 个解,并且这些解都是成对出现的,其中一个为高电压解是稳定解,一个为低电压解是不稳定解。随着系统负荷水平的加重,潮流方程解的个数成对减少,接近静态电压稳定极限时,只存在2个解。在到达稳定极限后,这对潮流解融合成1个解。该方法将潮流方程解的存在性与静态电压稳定性联系起来,通过研究潮流方程解的情况判断系统的电压稳定性。

2.1.3 最大功率法^[12]

最大功率法将电力网络向负荷母线输送功率的极限运行状态作为静态电压稳定的极限运行状态,可以采用有功功率最大或无功功率最大值作为判据。实际上,这类方法就是基于 $P-U$ 或 $Q-U$ 曲线定义电压稳定的方法,最大功率对应于曲线的顶点。

2.1.4 奇异值分解(特征值分析)法^[13-14]

电压稳定临界点,从物理上是系统到达最大功率传输点,而从数学角度上就是系统潮流方程雅可比矩阵奇异的点。当系统的负荷接近其极限状态时,潮流雅可比矩阵接近奇异,因此,最小奇异值映射出雅可比矩阵奇异程度,可以把潮流雅可比矩阵的最小奇异值作为电压稳定的指标,用来反映当前工作状态接近临界工作状态的程度。

2.1.5 方法评述

静态电压稳定主要评估电力系统在稳态时,尤其是在当前运行状态下的电压稳定情况。该类分析方法经历了较长时期的研究,取得了较满意的结果。灵敏度法是用于电压稳定性研究中最早的一类方法,与其他方法相比,其物理概念简单明确。在简单系统中,灵敏度判据是严格、准确的,但推广到复杂系统后,有效性无法保证。目前,经过改进的灵敏度方法在优化系统无功配置等方面还有一些应用^[9-10]。潮流多解法在电压稳定研究初期被以日本学者为主体的研究人员提出,潮流方程的多解性研究得出了很多有意义的结论,为计算电力系统的极限运行状态提供了一条途径,间接克服了潮流方程的雅可比矩阵在临界点奇异而带来的收敛问题,但低电压解的求取一直是一个比较困难的问题,潮流多解法在

近年来的电压稳定研究中已经较少采用。特征值分析法和奇异值分析法关系密切,随着系统运行状态的变化,电压最容易失去稳定的模式可能改变,所以在进行系统电压稳定性分析时,必须计算出一定数目的最小特征值及特征向量。实际上,潮流雅可比矩阵的奇异值或特征值变化较为缓慢,而且具有高度的非线性,发电机无功越限时会导致最小特征值跳变,因而最小奇异值不是一种很好的电压稳定指标,难以用它对系统电压稳定程度作出客观评价。

上述几种方法是静态电压稳定分析中较多采用的方法,都是基于潮流方程或经过修改的潮流方程,在当前运行点处线性化后进行计算分析,本质上都把电力网络的潮流极限作为电压静态稳定的临界点,而不同之处在于所采用的求取临界点的方法以及使用极限运行状态下的不同特征作为电压崩溃的判据。另外一些学者研究静态电压稳定采用其他一些分析方法,文献[15-17]使用安全域方法,认为保证静态电压稳定性的临界点所形成的安全域(CVSR)的边界可用一个超平面近似描述,通过最小二乘法拟合获得了超平面形式的安全域边界之后,用注入功率或割集功率线性组合的数值大小判断稳定性。但该方法的依据是经过大量仿真和初步的理论分析所验证的事实,其理论基础有待进一步证明。文献[18]把电压稳定临界点的计算转化为一个非线性优化问题,用内点法确定系统负荷增量的最大值,当系统的规模增大时,该方法的计算时间过长。Affonso等人采用模态分析技术^[19-21]解决最优潮流问题,在正常运行时根据模式参与因子重新分配有功和无功,使无功储备及电压稳定裕度都得到提高,在紧急情况下使切负荷量最小。为避免潮流雅可比矩阵奇异引起的收敛性问题,Alvarado^[22]使用连续法(延拓法)进行分析,该方法虽然计算缓慢,但能得到有关稳定性的一些其他信息如识别薄弱位置等。

2.2 动态电压稳定分析方法

2.2.1 小扰动分析法

小扰动分析是电力系统稳定性分析的一般方法,同样适用于电压稳定分析。它实际上是一种李雅普诺夫意义下的渐近稳定,可以计及与电压稳定问题有关的各元件的动态,其实质在于将所考虑动态元件的微分方程在运行点处线性化,通过分析状态方程特征矩阵的特征根判断系统的稳定性和各元件的作用。许多文献在电压稳定研究中考虑了发电机及励磁系统、OLTC、无功补偿设备及负荷的动态。计及发电机的动态,Vournas^[23]认为电压稳定和发电机暂态电势相联系,提出了多机系统暂态模型下的电压稳定指标和电压可控性指标,并讨论发电机励磁系统对电压稳定的作用;考虑 OLTC 的影响,Zhu^[24]研究了 OLTC 及其动作步长、死区、动作延迟等特性对网络最大输送功率的影响,指出 OLTC 动作一方面可以提高最大网络输送功率,有提高电压稳定的正作用,另一方面恢复负荷功率导致网络负载加重,产生不利于电压稳定的负作用;Noroozian^[25]研究了动

态无功补偿设备 SVC 和 STATCOM 对电压稳定的影响,认为它们可以显著改善电力系统的动态电压行为,有效扩展系统的传输功率极限;文献[26]对电压稳定与负荷动态的关系进行了分析,强调了负荷动态在电压稳定问题中的重要作用,指出建立恰当的负荷模型是电压稳定分析走向成熟的关键。

2.2.2 非线性动力系统的分岔理论分析方法

高阶电力系统的动态特性可以用依赖于参数的如下微分代数方程描述^[27-28]。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{p}), \quad 0 = \mathbf{g}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{p}) \quad (1)$$

式中 $\mathbf{f}$ 代表系统,如发电机、励磁器、负荷和控制系统的动态特性; $\mathbf{g}$ 为系统的潮流方程; $\mathbf{X}$ 为系统的状态变量,如发电机电势(E' 、 E'_q 、 E''_q)、转子变量(ω 、 δ)、励磁调节器变量 E_{fd} 等; $\mathbf{Y}$ 为除状态变量外的其他变量,如母线电压大小和相度;参数 $\mathbf{p}$ 为系统参数(描述系统拓扑,如电感、电容、变比等)和操作参数(如负荷功率、发电量等)。对每组确定参数值 $\mathbf{p}$,系统平衡点 $\mathbf{X}^*$ 是式(2)的解。

$$\mathbf{f}(\mathbf{X}^*, \mathbf{Y}, \mathbf{p}) = 0, \quad \mathbf{g}(\mathbf{X}^*, \mathbf{Y}, \mathbf{p}) = 0 \quad (2)$$

系统在该平衡点的稳定性由式(1)在平衡点的展开式决定:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于系统的结构性稳定,有如下3种分岔点。

a. 鞍结分岔 SNB:在该分岔点上,2个平衡点重合然后消失,此时雅可比矩阵有一个为0的特征值。

b. Hopf 分岔:该分岔点上,雅可比矩阵的一对共轭复特征值穿过虚轴。

c. 奇异诱导分岔 SIB:在该分岔点上, $\mathbf{g}_y$ 奇异。

Bompard^[29]从实际的电压崩溃事故是非振荡形式的失稳这一现象出发,认为 SNB 分岔与潮流方程雅可比矩阵奇异相吻合,电压失稳由 SNB 分岔引发,与 Hopf 分岔无关。Lee^[30]研究表明,电力系统存在混沌不变集,指出 Hopf 分岔可能导致电压崩溃。Schattler^[31]的研究认为这3个分岔点的并集是系统的可行域边界,当平衡点穿过该边界时,系统将会失去稳定。除了上面的3种分岔外,Tan^[32]还研究了亚临界分岔 UHB、超临界分岔 SHB、循环折叠分岔 CFB 和倍周期分岔 PDB,指出通过一系列的PDB会最终导致混沌。

2.2.3 使用本地测量数据的电压稳定分析方法

前面所讨论的方法都属于集中控制的方法,需要获得系统中所有节点的数据。由于任何集中控制的方法都会遇到数据传输的可靠性问题,近年来,一些使用局部直接测量量进行电压稳定分析的方法得到重视。文献[33]只利用单个节点的本地测量数据(母线电压和负荷电流)进行电压稳定分析,它把与该节点相连的外部系统作戴维南等效,由多次测量得到的本地数据通过曲线拟合求出戴维南等效阻抗值 Z_{Thev} ,通过比较节点负荷的阻抗值 Z_{app} 与戴维南等效阻抗值 Z_{Thev} 的大小判断节点电压稳定性。如

图2所示,当负荷阻抗逐渐减小(表明负荷逐渐增大)而进入戴维南等效阻抗圆内时电压失稳。

同样利用本地测量数据,文献[34]通过比较节点电压与戴维南等效电源电压的大小判别电压稳定性。当考虑恒

功率负荷时,发生电压崩溃的条件为:节点电压在戴维南等效电压方向上的投影为电源等效电压的一半。考虑ZIP模型表示的负荷时,发生电压失稳的条件为: $P-U$ 曲线与负荷曲线相切;文献[35]利用本地测量的 $U-I$ 曲线特性判别电压稳定性。使用最小二乘法结合当前以及最近的测量数据取得 $U-I$ 特性曲线,然后通过曲线求得负荷最大视在功率(U 和 I 的数值乘积),相对应的点即为电压崩溃点。

2.2.4 方法评述

电压稳定问题本质上是一个动态问题,系统中的发电机及其励磁控制系统、OLTC、无功补偿设备等元件和负荷的动态特性对电压稳定都有重要影响。因而只有计及了这些因素的动态电压稳定分析才能准确反映系统的电压稳定状况。采用小扰动分析法进行研究时,由于电压稳定问题考虑的时间范围很大,从几秒至几十分钟,几乎涉及所有电力系统中机电和动力设备的动态,这给完全意义上的小扰动分析造成了困难。在实际应用中,研究人员总是根据所考虑问题的侧重点而采取一些简化^[23-26],因此针对小扰动分析法的特点,如何恰当地考虑元件动态特性,建立尽可能简化又能较精确反映系统动态的分析模型值得继续深入研究。由于电力系统从属于非线性动力系统,随着非线性科学理论研究的进展,研究人员逐步把能分析非线性作用的新方法引入电压稳定研究中,如中心流形理论、分岔理论和混沌理论等,其中使用最多的是分岔理论^[27-32]。目前,关于分岔及混沌的理论研究仍是非线性科学中的热点,该理论在电力系统中的应用更是处于探索阶段。当前的研究一般局限于低维、简单模型系统和周期性小扰动,并引入了很多假设。分岔理论在电压稳定中的进一步应用有待更多研究人员的努力和非线性动力理论的新突破。Begovic等人^[33-35]所采用的基于本地测量数据进行电压稳定分析的方法,间接考虑了元件的动态特性,同时这些方法足够简单因而可以在数字保护中使用。不过它们的使用范围有限,只能用于单个节点或母线上,实际应用中可作为集中控制方案的补充。

2.3 复杂系统暂态电压稳定分析方法

由于电力系统的规模很大,在同时考虑系统各个元件的动态特性时,会使系统求解方程的阶次过高,导致用解析法分析困难。因而对于复杂系统,时域仿真法是主要的研究手段。时域仿真法的缺点是求解时间太长,同时由计算结果难以揭示物理现象

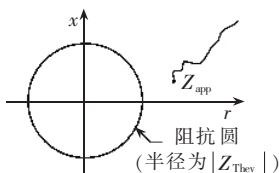


图2 比较阻抗值判断电压稳定示意图

Fig.2 Judgments of voltage stability by impedance comparison

的本质。如何在复杂系统中进行暂态电压稳定性的实时、快速判断是一个值得关注的研究方向。

参考文献:

- [1] AJJARAPU V, LEE B. Bibliography on voltage stability [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(1): 115-125.
- [2] KOSTEREV D M, TAYLOR C W, MITTELSADT W A. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [3] TAYLOR C W. The future in online security assessment and wide area stability control [C]// IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. [S.l.]: IEEE, 2000: 78-83.
- [4] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [5] TAYLOR C W. Power system voltage stability [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [6] 谈定中. 电力系统电压稳定的一种实用计算分析方法——线性系统特征值分析方法简介 [J]. 电网技术, 1996, 20(6): 61-62.
TAN Ding-zhong. A practical calculation method of power system voltage stability [J]. Power System Technology, 1996, 20(6): 61-62.
- [7] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE / CIGRE joint task force on stability terms and definitions [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1387-1401.
- [8] CUTSEM T V. Voltage instability: phenomenon, countermeasures and analysis methods [C]// Proceedings of IEEE. [S.l.]: IEEE, 2000: 208-227.
- [9] TADA Y, OKAMOTO H, TANABE R, et al. Two novel screening methods to decide network configurations to maintain voltage stability using sensitivity analysis [C]// Proceedings of IEEE International Conference on PICA. [S.l.]: IEEE, 1999: 79-85.
- [10] CRAIG A A, TAPAN S K. Determination of power system coherent bus groups by novel sensitivity-based method for voltage stability assessment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1157-1164.
- [11] SOBIERAJSKI M. Steady state voltage stability in the vicinity of two close multiple load flow solutions [C]// Proceedings of IEEE / NTUA Joint International Power Conference. Athens, Greece: IEEE, 1993: 547-552.
- [12] HAQUE M H. Determination of steady state voltage stability limit using $P-Q$ curves [J]. IEEE Power Eng Rev, 2002, 22(4): 71-72.
- [13] YOUNG H H, CHING T P, LIN W W. Fast calculation of a voltage stability index of power systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(4): 1555-1560.
- [14] BERIZZI A, FINAZZI P, DOSI D, et al. First and second order methods for voltage collapse assessment and security enhancement [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 543-551.
- [15] 余贻鑫. 安全域的方法学及实用性结果 [J]. 天津大学学报, 2003, 36(5): 525-528.
YU Yi-xin. Methodology of security region and practical results [J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(5): 525-528.
- [16] ZENG Y, YU Y X. A practical direct method for determining dynamic security regions of electrical power systems [C]// Proceedings of International Conference on Power System Technology. Kunming, China: IEEE, 2002: 1270-1274.
- [17] CHEN Y P, LIU Q S, YAO G H. On-line dynamic security assessment and transient stability control using dynamic security regions method [C]// Proceedings of International Conference on Power System Technology. Kunming, China: IEEE, 2002: 656-660.

- [18] 韦化,丁晓莺. 基于现代内点理论的电压稳定临界点算法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(3):27-31.
WEI Hua,DING Xiao - ying. An algorithm for determining voltage stability critical point based on interior point theory [J]. Proceedings of CSEE,2002,22(3):27-31.
- [19] AFFONSO C M,SILVA L C,LIMA F G,et al. MW and Mvar management on supply and demand side for meeting voltage stability margin criteria[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004,19(3):1538-1545.
- [20] GAO B,MORISON G K,KUNDUR P. Voltage stability evaluation using modal analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992,7(4):1529-1542.
- [21] MENEZES T V,SILVA L C,COSTA V F. Dynamic VAR sources scheduling for improving voltage stability margin[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(2):969-971.
- [22] CANIZARES C A,ALVARADO F L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC system[J]. IEEE Trans on Power Systems,1993,8(1):1-8.
- [23] VOURNAS C D. Voltage stability and controllability indices for multimachine power system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995,10(3):1183-1194.
- [24] ZHU T X,TSO S K,LO K L. An investigation into the OLTC effects on voltage collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000,15(2):515-521.
- [25] NOROOZIAN M,TAYLOR C W. Benefits of SVC and STATCOM for electric utility application[C]// Proceedings of IEEE PES Transm and Distrib Conference and Exposition. [S.l.]: IEEE,2003:1143-1150.
- [26] 包黎昕. 电压稳定动态分析及预防电压崩溃的措施[D]. 武汉:华中科技大学,2000.
BAO Li-xin. Dynamic analysis of voltage stability and counter-measures of voltage collapse[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2000.
- [27] HUANG G M,ZHAO L,SONG X F. A new bifurcation analysis for power system dynamic voltage stability studies[C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. [S.l.]:IEEE,2002:882-887.
- [28] CHEN H H,ZHANG Y,WU Z G,et al. A fast algorithm for the bifurcation of voltage stability[C]// Proceedings of International Conference on APSCOM. [S.l.]:IEEE,2000:194-197.
- [29] BOMPARD E,CARPANETO E,CHICCO G,et al. A dynamic interpretation of the loadflow Jacobian singularity for voltage stability analysis[J]. Electric Power & Energy System,1996,18(6):385.
- [30] LEE B,AJJARAPU V. Period-doubling route to chaos in an electrical power systems[J]. IEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,1993,140(6):490-496.
- [31] VENKATASUBRAMANIAN V,SCHATTNER H,ZABORSKY J. Local bifurcations and feasibility regions in differential-algebraic systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control,1995,40(12):1992-2013.
- [32] TAN C W,VARGHESE M,VARAIYA P,et al. Bifurcation, chaos,and voltage collapse in power systems[C]// Proceedings of the IEEE. [S.l.]:IEEE,1995:1484-1496.
- [33] VU K,BEGOVIĆ M M,NOVOSEL D,et al. Use of local measurements to estimate voltage - stability margin[J]. IEEE Trans on Power Systems,1999,14(3):1029-1035.
- [34] BORKA M,BEGOVIĆ M. Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(1):121-127.
- [35] HAQUE M H. Use of V-I characteristic as a tool to assess the static voltage stability limit of a power system[J]. IEE Proceedings - Generation,Transmission and Distribution,2004,151(1):1-7.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

苏永春(1973-),男,河南信阳人,博士研究生,研究方向为电力系统电压稳定性(E-mail:ychunsu@163.com);

程时杰(1945-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制、人工智能在电力系统中的应用等;

文劲宇(1970-),男,湖南常德人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、人工智能在电力系统中的应用等。

Power system voltage stability and its present investigation (I)

SU Yong - chun¹,CHENG Shi - jie¹,WEN Jin - yu¹,LIU Qi²

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Water Power Station of Xiaolangdi Construction and Administration Bureau, Luoyang 471000, China)

Abstract: This is the first part of summary of voltage stability investigation in power systems. In this part, the definition and classification of voltage stability are first introduced and then static and dynamic analysis methods are reviewed. In static analysis methods, the sensitivity method has clear physical conception and it is strict and precise in simple systems, but the validity could not be ensured in large systems. The multiple load flow solution method has good convergence characteristics even at the singular point of the Jacobian matrix, but now it is seldom used because of difficulties in the low voltage solution calculation. In the eigenvalue analysis method, the eigenvalue of the Jacobian matrix varies slowly with strong nonlinearity, moreover, the minimum eigenvalue will jump when the generator reactive power output exceeds the limitation, so it can't evaluate the system voltage stability reasonably. In dynamic analysis methods, the small disturbance analysis method requires the proper consideration of the component dynamic characteristic and the appropriate analysis model, which is simple as possible and precise at the same time. The application of the bifurcation and chaos theory analysis is limited to the periodic small disturbance and the low-dimension system with the simple model under many assumptions. The locally-measured-data-based analysis method indirectly considers the dynamic of system components, but it can only be used in the single bus. It can be complement of the concentrate control scheme.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50595410).

Key words: power system; voltage stability; static; dynamic