

电压稳定研究述评

余贻鑫

(天津大学电气自动化与能源工程学院 300072 天津)

摘要 对国内、外电压稳定研究的现状做了概述,内容涉及到电压稳定研究的必要性、工业界的需要、模型与仿真、不稳定机理、防范措施和解析工具等,其中特别突出了对于与电压稳定性相关的安全性评估中的计算机方法和实时方面的问题。力求使读者掌握关于电压稳定研究的总体框架,并使一些重要概念清晰化。进而在此基础上指明了一些有待研究的方向,特别是紧密围绕工程需要的研究方向。

关键词 电压稳定 电压崩溃 失稳机理 安全评估

分类号 TM 712

0 引言

客观上只有一种电力系统稳定性或不稳定性。但依系统的特性、网络结构及运行模式的不同,不稳定性可以以多种不同的方式出现。其中两种极端的情况是:①一台同步发电机经由一个电抗接于无穷大母线(纯“功角稳定性”);②一台同步发电机经一个电抗接于“静态”负荷(纯“电压不稳定性”)。然而,电压不稳定性已成为一个独立的研究课题(或者至少已作为一个应加以特殊考虑的专题)。其原因之一是已出现了许多“电压不稳定性”的事例,其中全然没有“角度不稳定”即将来临的迹象。它们开始是局部现象,但是能够发展成为波及到广阔地域的电压崩溃。原因之二是要强调并呼唤人们对在大区域互联系统中维持较好的电压分布的注意,鼓励对包括可控补偿在内的各种电压支撑手段做认真的考虑。

电压稳定问题趋于严重的原因主要有以下3点:①由于环境保护以及经济上的考虑,发、输电设施使用的强度日益接近其极限值;②并联电容无功补偿增加了,这种补偿在电压降低时,向系统供出的无功按电压平方下降;③长期以来人们只注意了功角稳定性的研究,并围绕功角稳定的改善采取了许多措施,而一定程度上忽视了电压稳定性的问题。

在我国电压不稳定和电压崩溃出现的条件同样存在,而且我国电网更薄弱,并联电容器的使用更

甚,再加之城市中家用电器设备的巨增,我国更有可能出现电压不稳定问题。目前国内电压稳定问题“暴露的不突出”,原因之一可能是由于大多数有载调压变压器分接头(LTC)未投入自动和电力部门采用甩负荷的措施,而后一措施应该是防止电压不稳定问题的最后一道防线,不应过早地或过分地使用。将来电力市场化之后,甩负荷的使用将受到更大的限制。因此在我国应加紧电压稳定问题的研究。

IEEE最早给出了电压稳定性、电压崩溃和电压安全性的定义^[1,2]。所谓的电压稳定性是指系统维持电压的能力。当负荷导纳增大时,负荷功率亦随之增大,并且功率和电压都是可控的。所谓的电压崩溃,是指由于电压不稳定所导致的系统内大面积、大幅度的电压下降的过程(电压也可能是由于“角度不稳定”而崩溃的,最初的起因往往仅在事故后的细心分析中才能发现)。所谓的电压安全性是指在出现任何适当而又可信的预想事故或有害的系统变更后,系统维持电压稳定的能力。

IEEE的定义主要是从工程的概念上建立的。后来CIGRE又给出了基于Lyapunov意义下的电压稳定性定义^[3],这套定义使人们更便于应用传统的数学分析手段。此后在文献[4]中又从物理的起因上定义了电压不稳定性,即定义电压不稳定性起源于当所要恢复的电力需求(消费)超出了发、输电系统的能力时负荷的动态尝试;并认为“崩溃”一词表示一种突然的灾难性的转移,它比通常考虑的电压不稳定性演变得更快。这些定义上的差异对于目前的研究工作并未造成太大的影响。

电压不稳定性/电压崩溃的研究必须紧紧地依据工业界的需要开展。工业界需要的是解析工具、规划与运行指南以及预防电压不稳定/崩溃的保护方案^[1]。其中解析工具应具有以下能力:给出精确定量

1999-10-10收稿。

国家重点基础研究专项经费资助项目(G1998020303)。

[编者按]衷心感谢天津大学余贻鑫教授做本期“专题研讨——电压稳定”专栏的特邀主编。本刊将继续关注结合电力系统实际应用的重要研究成果,及时以专栏(或专辑)的形式发表。希望专家、学者,尤其来自第一线的实际运行部门踊跃投稿,积极参与研究和探讨。

的载荷能力裕量和网络中某些割集上的极限传输功率;预测复杂电网中的电压崩溃和识别对电压不稳定敏感的弱节点或弱节点群;决定临界电压水平和预想事故选择;识别影响电压不稳定性/崩溃的关键因素及其灵敏度,提供对系统特性的深入认识,以帮助开发校正性动作。解析工具最终要开发电压不稳定性/崩溃的静态与动态分析软件以及基于 EMS 的电压不稳定性/崩溃的实时控制软件。关于规划与运行指南,是指为防范电压不稳定性/崩溃的发生而制订的下述问题的指南:无功补偿装置应用指南(何时和使用多少串联电容或并联可调电容器);确定无功储备和稳定裕量的指南;保护系统协调的指南;使用发电机自动励磁调节进行无功补偿的指南;系统调度人员应采取动作的指南。鉴于与电压不稳定性/崩溃相关的现象十分复杂,为满足工业界的上述要求,必须对其机理有个较好的理解。关于这些问题,除早期前苏联的研究工作外,近 10 年来在美欧各国已开展了大量的研究,涉及的方方面面很多,本专栏所刊出的 9 篇文章在一定程度上反映了我国这方面研究的现状。本文重点围绕电压不稳定性/崩溃机理和解析工具方面的研究工作进展,分以下 5 个方面,做简要的介绍和分析。

1 电压稳定性的模型及其简化

1.1 耦合系统模型的形式

当出现扰动、负荷增大或系统变更使电压急剧下降或向下漂移,并且运行人员和自动系统的控制已无法制止这种电压衰落时,系统就会进入电压不稳定状态,这种电压的衰落可能只需用几秒钟,也可能长达 10 min 到 20 min,甚至更长。如果电压不停地衰落下去,静态的角度不稳定性或电压崩溃就会发生。其动态十分复杂^[2]。

在文献[4]中,用如下的微分-代数、连续-离散时间方程组来描述电压稳定问题:

$$\dot{x} = f_1(x, y, z_c, z_d) \quad (1)$$

$$0 = g(x, y, z_c, z_d) \quad (2)$$

$$\dot{z}_c = f_2(x, y, z_c, z_d) \quad (3)$$

$$z_d(k+1) = h_d(x, y, z_c, z_d(k)) \quad (4)$$

其中 x 为描述短期(快)动态的状态向量; y 为母线电压向量; z_c 和 z_d 分别是连续的和离散的长期(慢)状态向量; g 是描述网络的平滑函数; f_1 和 f_2 也是平滑函数;假设差分方程中的时间步长为 $\Delta T, t_k = k\Delta T, k=0, 1, 2, \dots$ 。

为避免离散变量给数值积分与解析带来的困难,离散变量可以近似连续化,用微分方程取代式(1),从而得到微分-代数方程(DAE)的表达式^[5,6]。

1.2 模型与长、短期动态解耦的方法学

为了理解电压稳定性的机理和寻求较快的分析方法,利用短期现象(如与同步发电机及其自动电压调节器(AVR)和调速器(GOV)、感应电动机、高压直流元件和静止无功补偿(SVC)等相关的现象)与长期现象(如与变压器分接头调节、发电机的励磁极限和定子电流极限、集成负荷的恢复特性等相关的现象)之间存在的时间上的可分性是有益的。在研究长期现象时,对快子系统可用伪静态(QSS)来近似定义^[4],即认为快子系统无限快,以致于可用平衡点方程来替代。反之在研究短期动态时,可以近似地认为慢变量在快暂态期间是常数。这样就大大地简化了 2 个子系统的分析,且与直观推理相一致。

1.3 平衡点方程的意义与潮流方程的局限性

在实践中,在如下 2 种情况下需要使用耦合系统模型的表达式(1)~式(4)或其解耦的平衡点方程:①在使用长期动态的 QSS 近似时,短期动态需要用它的平衡点方程来代替;②在研究从一个稳定运行状态(由于诸如日负荷曲线的变化或平缓的发电机调度)到另一个稳定运行状态的很慢的转移时,系统的全部动态(包括长期动态在内)用它的平衡点来模拟。此时的平衡点方程可以写为一般形式:

$$\varphi(u, p) = 0 \quad (5)$$

式中 u 为状态向量; p 为参数向量; φ 的最简单的形式是潮流方程,此时 u 为母线的电压向量, p 为节点注入向量。

潮流方程是把电力系统看做一个网络来描述其稳态运行点的。潮流程序用来确定系统的运行点(包括动态仿真的初始条件)以及评估预想事故对支路电流和母线电压的影响,已成为电力系统分析中广泛应用的软件。电力部门已经广泛地采用潮流方程来研究基于静态方程的电压稳定性问题,但这种应用是有局限性的,因其包含着如下近似:①负荷被处理为恒功率,而实际的负荷是与电压有关的。②发电机被指定为恒电压或恒无功,而恒电压仅对有积分型 AVR 调节的发电机才合适,对装有低增益的比例型 AVR 或励磁机已饱和的发电机是不合适的。后一种情况下应适当计及发电机的压降。在发电机励磁电流极限和发电机电枢电流极限下,无功是随电压变化的,此时采用依从于电压的无功注入更合理。更为重要的是在潮流计算中所用的无功极限应依据发电机特性随有功功率而修正。③除松弛母线外,所有发电机均指定为恒有功,此时发电水平的任何变化均由松弛母线来补偿是不合理的,因为事实上这种变化是由一定数量的发电机通过调速器和负荷频率控制来承担的。文献[7]中讨论了不是由准确的平衡点方程,而是由潮流方程的雅可比矩阵所导

出的稳定性结果中所包含的近似性。

1.4 负荷模型

负荷的非线性性质和动态性质对电压稳定性的分析结果有着重大的影响^[8]。负荷的静态非线性性质通常用电压的指数模型或多项式(如 ZIP)模型来描述;而其动态性质的描述,对于短期电压稳定问题可采用计及感应电动机特性的综合模型^[9];对于长期电压稳定问题,可以采用综合负荷恢复模型^[10]。对于一个实际的电力系统,如何获得其具体参数是一个关键的问题,因为电压稳定的分析结果对这些参数较为灵敏。

2 不稳定性机制和防范的措施

2.1 电压不稳定性机制的分类

电力系统稳定运行的前提是必须存在一个平衡点,而且最重要的一类电压不稳定性场景正是对应于系统参数变化导致平衡点不再存在的情况。由于负荷需求平滑缓慢地增加而使负荷特性改变直至不再存在与网络相应曲线的交点,固然是其中的一种场景,但事实上,更为重要的场景对应于大扰动,如发电和/或输电设备的停运,这种大扰动使网络特性急剧变动,扰动后网络的特性(如 $P-V$ 曲线)不再同未改变的负荷的相应特性相交,失去了平衡点,而导致电压崩溃。所以要研究由于大的结构和系统参数的突然变化所引起的不稳定机制。

当采用前述的长、短期解耦的方法时,文献[4]把电压不稳定性机制按以下3个方面分类。

a. 短期电压不稳定性(又称暂态电压崩溃)。与之相关的3个主要的机制是 ST1:短期动态扰动平衡点的失去;ST2:缺乏把系统拉回到事故后短期动态的稳定平衡点的能力;ST3:扰动后平衡点的振荡不稳定性。

b. 长期电压不稳定性:假设在初始扰动之后系统已经从短期中得救,且短期动态以一种稳定的方式对长期动态的变量做出反应,即可以使用长期动态的 QSS 近似,此时的动态可能以如下的方式变得不稳定,LT1:通过失去长期动态平衡点;LT2:通过缺乏把系统拉回到长期稳定平衡点的能力;LT3:通过缓慢增幅的电压振荡。

不稳机制 ST3 和 LT3 长期被认为未在实际系统中观测到,但是在文献[11,12]中分别给出了实际发生的这种不稳定场景。

c. 由长期动态造成的短期不稳定性。它也可以划分为3种情况,S-LT1:由长期动态造成的短期平衡点丢失;S-LT2:由长期动态造成的短期动态的吸引域收缩而致使系统在受到随机参数变化或小的离散转移后,缺乏拉回到短期稳定的平衡点的能力;

S-LT3:由于长期动态而造成的短期动态的振荡不稳定性。

2.2 防止电压不稳定性的措施

对应于不同的失稳机制有不同的防止电压不稳定性的措施。

a. 当电力系统趋向于短期电压不稳定时(大型的感应电动机负荷和/或 HVDC 从一个弱的电力系统供电时),靠近负荷中心的无功支撑是基本的。无功支撑应该能够在所考虑到的最坏的情况下使系统恢复到稳定平衡点,如它应该足够快以使感应电动机不致减速到达事故后的不稳定平衡点。最普遍的快速无功支撑工具是发电机、同步调相机和 SVC。它们在扰动之前应具有足够的储备,但应注意发电机和同步调相机所提供的过励磁和过电流能力有时间限制,它们仅能把短期电压问题转移为长期电压问题。在这些防范措施中,当然还有快速清除事故和精心策划的快速甩负荷^[13]。

b. 防止长期电压不稳定性的措施的目标中特别重要的包括:足够快的恢复长期平衡点(以便它及时吸引系统的动态)和避免由长期动态过程造成的短期不稳定性。可采取的措施包括无功补偿的投切、发电再调度和减负荷。后者可以直接甩掉负荷或间接地进行紧急 LTC 控制(如 LTC 的锁定可以停止负荷的恢复^[2,5])。对于多层输配电系统中的 LTC 应协调地进行控制。当发电机存在无功储备时,可以通过二次电压控制来提升发电机的端电压^[14]。

3 载荷能力、灵敏度、分岔分析与非线性动态分析

3.1 载荷能力极限

假设负荷平滑地上升,以致负荷特性(如 $P-V$ 曲线)变为与网络特性(如 $P-V$ 曲线)相切,则该相切点定义了系统载荷能力极限。当负荷增长到超过这个载荷极限时就会失去平衡点,系统不再能够运行。当负荷为恒功率时,负荷与网络 $P-V$ 曲线相切的点具有最大传输功率,但一般情况下两者不同,因为最大载荷能力还依赖于负荷特性^[15]。文献[16]给出了利用重负荷节点的无功负荷电纳模型求取最大传输功率的算法。

3.2 灵敏度分析

设电力系统运行于满足式(5)的给定的 (p, u) 点,并有作为 u (也可能还作为 p) 的函数的某个感兴趣的标量 η 。若参数 p 发生某种变化,则系统一般仍将运行于满足式(5)的某个另外的点,但 η 变化了。于是严格的灵敏度定义如下:

$$S_{\eta p_i} = \lim_{\Delta p_i \rightarrow 0} \frac{\Delta \eta}{\Delta p_i} \quad (6)$$

已经证明,在载荷能力极限处(该点处雅可比矩阵 φ_u 奇异),式(6)定义的全部灵敏度均趋于无穷^[4]。文献[17]对电力系统电压稳定灵敏度分析方法做了全面的综述,归纳了常见的灵敏度判据。应该注意的是,已广泛使用的一些灵敏度,如 $dV_L/dP_L, dQ_G/dQ_L, \dots$, 仅在恒功率负荷下才是式(6)定义的灵敏度;当负荷对电压灵敏时,它们并不是式(6)所定义的,即在它们趋于无穷大的点处 φ_u 并不奇异。

3.3 鞍-节分岔(SNB)分析

分岔分析方法已被许多文章广泛地用于电压稳定问题的分析。当系统的平衡点方程用式(5)给出时(它可以是耦合的、短期的、长期的,也可以是简化的或未简化的方程组),载荷能力极限通常是它的一个分岔点,这些点满足雅可比矩阵 $\varphi_u = \partial \varphi / \partial u$ 奇异的必要条件:

$$\det \varphi_u = 0 \quad (7)$$

式(7)是个平滑的标量函数。已经证明^[4]:①短期动态的鞍-节点分岔(SNB)的必要条件是未简化的短期雅可比矩阵奇异,同短期动态在平衡点处的载荷能力极限相重合(所谓 SNB 是指 φ_u 的一个实特征值由负变正而出现的分岔,又称折叠(fold)分岔);②长期动态的 SNB 的必要条件是未简化的长期雅可比矩阵奇异,长期载荷极限通常在长期动态的 SNB 处,长期子系统的动态的 SNB 的必要条件与耦合系统的一致;③当长期动态演变时(特别是在一个长期动态的不稳定性发生之后),会诱发短期子系统的 SNB,并在该点处产生突然的崩溃,在临近 SNB 之前短期动态变慢,所以精确的分析还是要求使用耦合方程。

3.4 SNB 特征向量中含有的信息

状态雅可比矩阵的特征值和特征向量确定了接近平衡点时系统的响应。当在 SNB 处实特征值变为零时,平衡点就不存在了,相应的特征向量包含着关于分岔性质、系统响应和控制措施的有效性等的有价值的信息。右特征向量表明在状态空间中由于 SNB 而导致系统演变时其状态所沿的方向。而左特征向量表明哪个状态对零特征值有着显著的影响,亦即为控制分岔,对哪些状态控制更为有效。例如,对短期过程,零特征值的右特征向量指示由于分岔会造成哪台发电机的功角或哪台电动机的转差增大,亦即哪些电机可能失步或哪台电动机会滞转^[2,4,18]。而对长期过程,左特征向量指明哪些可调变压器的分接头应该闭锁或反之,以便抑制电压的不稳定性^[4]。

3.5 奇异值及奇异值解耦

由多变量反馈系统理论可知,矩阵的最小奇异值 $\sigma_{\min}(\cdot)$ 是最坏情况下的灵敏度系数,所以可用

做电压失稳的裕度指标^[19]。而奇异值解耦(SVD)是矩阵趋于奇异的临近性测度,故在电压稳定性的计算中,SVD 已被建议在研究载荷能力极限处雅可比矩阵奇异时用做特征值分析的一种方法^[4]。

3.6 鞍-节分岔界面 B_{SN} 及其切平面近似

从数学角度看,描绘载荷能力极限的是 n_p 维参数 p 的空间中的 $n_p - 1$ 维流形,称之为载荷能力界面或分岔界面。从系统安全运行的角度看,相对于目前运行点或预期的运行点的载荷能力界面是最有意义的。在正常运行条件下,它提供的是安全裕度;而在由重大的停运所引发的紧急条件下,它能给出为恢复到一个运行点所需的校正性动作的一般方向。既然通常是用有功或无功描述运行点,因此一种特别有用的空间是发电与负荷的有功和无功功率空间,简称为注入功率空间,相应的域也称为注入功率空间中的电压安全域。已建议用法向量来刻画鞍-节分岔界面的正切超平面近似,用它来指导电压稳定性的评估和控制^[4]。

3.7 Hopf 分岔及奇异诱导分岔的研究

一般地说,使 $\det \varphi_u = 0$ 的点为分岔点,除 SNB 外,还有 Hopf 分岔点和其他的一些分岔点。Hopf 分岔是指 φ_u 的一对复特征值的实部由负变正时的分岔,其对应的失稳模式是周期性的振荡发散失稳,前述的 ST3,LT3 均属于此类。特征值分析中见到的这类失稳现象所占的比重远多于现实电力系统中所发现的电压失稳中这类失稳所占的比重。由于 Hopf 分岔所决定的分岔界面时常较鞍-节分岔所决定的分岔界面(其内部称为可行域)大幅度地收缩,使载荷能力极限明显地下降,故急需弄清出现上述差异的原因^[20]。一种可能的解释是各种非线性因素的作用。除鞍-节分岔和 Hopf 分岔外,还发现了奇异诱导分岔。电压稳定所决定的可行域 F 的边界 ∂F 通常是由 3 个分岔空间组成,即众所周知的鞍-节分岔 B_{SN} 和 Hopf 分岔 B_H , 以及一个所谓的奇异诱导分岔 B_{SI} ,更详细地表示为^[2,6]:

$$\partial F = \overline{\partial F \cap B_{SN}} \cup \overline{\partial F \cap B_H} \cup \overline{\partial F \cap B_{SI}}$$

在奇异诱导分岔处,一个特征值沿平衡点的解轨线改变它的稳定性状态,并向无穷大发散,而其他的特征值保持有界且远离虚轴。上式中符号 $\overline{\partial F \cap B_{SN}}$ 表示 ∂F 与 B_{SN} 的交的闭包。这里的 ∂F 才是较严格意义下的载荷能力界面。关于这些复杂分岔的研究还有待深入。

文献[21]利用分岔理论研究了发电机和并联电容器对电压小扰动稳定性的影响,其中论及到了 SNB, Hopf 分岔和奇异诱导分岔所决定的传输功率极限。

3.8 非线性动态分析

灵敏度分析和分岔分析都是在假设负荷或系统的参数缓慢平滑变化的情况下进行研究的,但除了这种扰动外,系统还会经受如下2类扰动:

a. 在负荷或子系统参数平滑扰动的情况下,系统中还会发生随机的扰动。鉴于前者是慢时标(slow time scale)的变化,而后者是快时标(fast time scale)的变化,所以可假设目前的运行点对动态模型定义了一个固定的平衡点,所感兴趣的负荷变化是快时标的,它激发了一个动态,并使状态暂时离开了平衡点。在这种情况下,最坏情况下所允许的快时标负荷变化 $\Delta L(t)$ 的确定,事实上是寻找能把系统状态从平衡点的吸引域驱动出去的最小控制问题,即能量/最优控制问题。文献[2]指出,灵敏度分析、分岔分析和能量/最优控制的测度,这3种方法预测完全相同的载荷能力极限。然而当负荷未达到失去小扰动稳定性水平时,使用不同方法所得出的对电压崩溃的临近性却可能相差很大。

b. 负荷或系统结构参数发生了大的变化,这时又可分为短期动态和长期动态。短期动态与暂态功角稳定属于同一时标,其模型也基本相同,仅是在暂态电压稳定研究中,失稳时的在控不稳定平衡点(controlling UEP)处于低电压处,因而也提出了建立统一能量函数法框架的问题,并且在文献[22]中研究了电力系统暂态稳定期间电压崩溃的能量函数法和势能界面法(PEBS法)。但controlling UEP的确定和暂态能量函数法(TEF)的形式仍需深入研究。长期动态情况下保护动作、变压器分接头切换、发电机励磁极限和发电机定子电流极限、负荷的动态均会起作用,其时间为1 min~5 min。文献[5]已使用收缩域的概念对这一情况给出了关于电压崩溃机理的一些解释,透彻地说明了对变压器分接头的控制原则。

4 电压安全性评估中的计算机方法

Dy Liacco早在70年代就给出了检验安全性的一个构想,尽管该构想还存在着诸多的不足^[23],但是它至今仍被广泛地使用。在该构想中电力系统被看做是处于两组约束下运行的:负荷约束和运行约束。负荷约束的要求是所有的负荷都必须被满足;运行约束则给出了网络运行参数的上限和下限。同时,在该构想中把系统想象成3种状态:正常状态、紧急状态和恢复状态。正常状态指负荷约束和运行约束均被满足的状态;紧急状态指对运行约束有重大破坏的状态;恢复状态指负荷约束被破坏的状态。安全控制的总目标是保持系统在正常状态。无论是实时阶段,还是运行阶段,均可以把它区分为3个层次进

行评估,它们是安全监视、安全分析和安全裕度的决定。安全性分析是相对于一组称之为下一个预想事故集合的随机事件而定义的,这是一个可能发生的扰动的集合。如果一个系统处于正常状态,则称系统是安全的。依据校验方法的不同又可分为静态安全性评估和动态安全性评估。电压稳定应属于动态电压安全性评估的一个方面,但后者还应包含正常电压水平约束和暂态电压衰落的约束。这方面的研究还有待深入,以期得到实用性的结果。文献[24]给出了暂态电压跌落的可接受(TVDA)门槛值的二元表定量评估法。当然预想事故的形式很重要,不可能对全部可能的事故进行校验,因而要通过预想事故选择,来选择适度而又可信的事故计入预想事故集。

4.1 预想事故的选择

对于长期电压稳定分析,相关的事故是输电或发电设施的停运。在常见的框架下,导致这种停运的事件序列并不重要,可是,对于短期电压稳定性,除停运外,还必须研究系统对于短路事故的响应。一种众所周知的准则是 $N-1$ 安全性准则。依据该准则,系统必须能够承受任何一条输电线或发电机的停运,而不能进入紧急状态,也可能还要求预想事故之后没有一台发电机运行于其无功极限。多重预想事故也可能进入安全准则,但通常它们必须相关于共同的起因。预想事故的快速选择办法应是一个广泛关注的课题^[13,25]。

4.2 安全裕量

安全裕量依从于系统受压的定义,它对应于系统运行人员能够观察或控制的系统参数的大偏移。这种压力可用参数空间上的一个“方向”来刻画,表现为母线对负荷增加的参与形式和/或发电再调度。这些裕量在输电开放访问(open transmission access)环境下特别需要。此时运行人员想要知道,在保证系统不至于变得不安全的前提下,还能增加多大的负荷或输送功率。安全裕量是一个对如下两者之一的临近性测度:①预想事故后的载荷能力极限又称载荷能力裕度;②安全运行极限又称安全运行裕量。一般,为了计算预想事故后的载荷能力,我们应用一种给定的预想事故,然后在一个特定的方向上给系统增加压力;而为了达到安全运行极限,需对系统加载直到它还能承受这个给定的预想事故。安全运行裕量的概念包含了3种形式的信息,它们是系统的加载方向、当系统被加载时运行人员/控制器的动作和事故后的控制。

4.3 载荷能力极限的计算方法

从计算机方法的角度看,核心问题是如何对每一种预想事故进行安全性分析和计算系统的载荷能力极限。

4.3.1 预想事故后的潮流(长期平衡点的计算)

估计预想事故对长期电压稳定性的影响的最简单的方法是计算预想事故后的长期平衡点。当使用潮流方程作为长期平衡点的模型时,上述平衡点的计算简称预想事故后潮流,它已用于从规划到实时的各个阶段。这个方法除在模型方面存在上述不足之处外,还存在如下难以使用的缺点:①由于数值方法而造成的不收敛,这种不收敛同物理上的电压稳定性无关。在为获得一个可行的运行点而需要大量控制进行调整的系统中尤其如此;②在真正不稳定的情况下,得不到关于问题性质、场所和可能的预防性校正的任何信息;③它不能明显地考虑离散的装置,这些装置的最终状态依从于系统在时间上的演变;④在一些情况下预想事故后平衡点的存在不能保证系统有稳定的行为,典型的例子是 LT2 不稳定机制。在预想事故分析中,特别是对电压的稳定性脆弱的系统进行预想事故分析时,发散成了主要的问题。为处理用牛顿法不可解情况下的潮流,为计算载荷能力已提出了连续型方法^[4],连续型方法只研究系统在一定方向上受载时失去平衡点的情况,它是在式(5)中取

$$p = p_0 + \mu\alpha \quad (8)$$

其中 μ 为标量。

于是式(5)可以改写为

$$\varphi(u, \mu) = 0 \quad (9)$$

载荷能力相应于上式有解时 μ 的最大值 μ^* 。该法被用来计算从基本情况到载荷能力极限的解轨线,解轨线折叠的点为极限点,即 SNB 点。

连续型方法通常采用预测-校正格式,在 SNB 点处校正格式可能失效,文献[4]介绍了处理这种失效的局部参数化的方法,该法简单而且对于大多数电压稳定计算是充分的。有几种可能的预测方法,如用解轨线的切线和割线。为获得校正点,除上述局部参数化方法外也已建议了一些其他方法,例如利用解轨线与垂直于切向量的超平面的交点^[26]。为了加速计算已建议了步长控制的方法,特别是对于解轨线的低曲率部分。

文献[27]进一步研究了割线预测和利用解轨线与垂直于切向量的超平面的交点进行校正的方法(称之为准弧长校正法)。

文献[28]提出了一种新的电力系统 SNB 点的计算方法。该法中使用了二次型曲线来近似描述 SNB 点附近的潮流解轨线,使计算效率大大提高。

4.3.2 最优化方法

如上所述载荷能力极限对应于式(9)有解的最大 μ 值,故可以把载荷能力极限的确定表达为如下最优化问题的解:

$$\begin{cases} \max \mu & (10) \\ \text{s. t. } \varphi(u, \mu) = 0 & (11) \end{cases}$$

因为最优化方法直接计算载荷能力极限,所以称为直接法,它不需要决定基本情况到极限点的解轨线。文献[29]建立了电压崩溃点的非线性规划模型,并用预测校正原对偶内点法求解,该法能够计及各种不等式约束,具有较强的鲁棒性。同连续型方法相比,最优化方法的计算效率更高。但另一方面,连续型方法,由于可以获得显见的解轨线,或可把沿解轨线的控制动作产生的影响结合进来,而更有吸引力。式(10)、式(11)中所描述的是单自由度,也可以通过增加描述控制的自由度来计及具有可调整的控制动作对载荷能力极限的影响。此外,在应用中,也可以采用其他目标函数,如可作为最优潮流的解而得到载荷能力极限。

在计算载荷能力极限时,是假设从一个可行的基本情况开始,系统加载直到失去平衡点,即直到成为不可解。其对偶问题则是决定从一个可行点开始时,为恢复可解性所需的最小控制动作^[30]。使用分岔界面上的法向量可以提供这种控制的指南。另一种直接法是解最小化问题,其目标函数是全部控制动作的数量,约束条件是系统方程(5)和关于控制状态变量的不等式。文献[31]建议了提高系统电压稳定裕度多目标最优控制模型,在实用化方向上又前进了一步。

4.3.3 多时标(multiple time scales)仿真法

该法是用数值仿真方法求解描述耦合系统的、含有连续变量和离散变量的微分-代数方程组。

多时标仿真方法有如下优点:①较高的模拟精度;②可发现在静态方法中发现不了的不稳定机制;③可对导致电压不稳定或崩溃的过程做出清晰的解释,并可以获得校正性动作的信息。另一方面,时域仿真法在计算时间和数据收集上的消耗比较大。尽管如此,对耦合系统进行详细的仿真,常为修正或校验传统的计算中所用的模型提供机会。

从数值积分的角度看,耦合系统模型属于刚性模型^[23],积分过程中需变步长控制,且需采用稳定性较好的数值积分法,如基于牛顿法的隐式积分法。

4.3.4 QSS 长期仿真

如前所述,该法是在研究长期动态时把方程(1)用其平衡点方程来代替。QSS 法在静态方法的计算高效性和时域方法的优点之间提供了一个有意义的折中。该法在大多数情况下是十分精确的,但处理短期不稳定和仿真 S-LT 场景的最终崩溃还是离不开多时标仿真的。文献[32]针对 QSS 仿真研究了发电机模型中非线性环节的计及方法和仿真中步长的控制问题,并取得很有意义的成果。开发一套 QSS 仿真软件包是一项很有实用价值的工作。

4.3.5 特征值与特征向量计算

如前所述,当由于(在载荷能力极限计算中)参数的平滑增大或(在预想事故估计和决定安全运行极限中)大扰动而造成系统不稳定时,最感兴趣的是确定分岔界面和识别对防止和校正不稳定性最合适的控制动作,这可以从特征值和特征向量的分析中得到。因而在电压稳定的研究中,人们也关注特征值计算方法的研究。

既然大部分失稳是 SNB 失稳模态,且此时只有一个特征值穿过原点,所以已建议在各运行点处计算状态矩阵中占主导地位的实特征值。此时只需计算一个或几个特征值,对于这种情况,逆迭代法是众所周知的,它从一个估计值 $\hat{\lambda}$ 计算特征值 λ 和相应的特征向量。该方法很简单,但当 $\hat{\lambda}$ 与所搜索的 λ 靠近得不够时,计算上会有困难,此时可以采用联立迭代法^[4]。

文献[33]采用求解高阶稀疏对称矩阵特征对的 Lanozas 法求取特征值,证明了其效率和精度优于逆迭代法,并把所求的 SN 点处的左特征向量用于临近电压崩溃点处最优控制方向的选择上。文献[34]则把一种新方法^[35]成功地用于寻求平衡点解轨线上鞍-节分岔点和 Hopf 分岔点。

4.3.6 电压稳定裕度的灵敏度计算

文献[36]通过对 DAE 模型进行动态仿真分析表明,电压稳定裕度(如传输功率极限)对参数(如励磁增益、调速器的设定、调速器的频率调整、励磁参考电压、并联电容、线路阻抗、甩负荷的大小等),呈明显的线性关系,并且可以在运行点处方便地计算出这些灵敏度,从而为电力系统调度提供了有力的工具。应该结合实际多区域电力系统间的传输功率极限进一步考验。

5 实时方面的问题

5.1 实时安全性评估的方法

在受到稳定局限的系统中,安全评估的传统方法是,离线建立安全极限,供运行人员在线使用。这种极限的确定要求进行大量的仿真和对系统有很丰富经验和知识的专家的评价。为此必须把大量的离线研究的信息收集在一组相对简单的操作规则中,典型的例子是采用关键参数边界集的形式或是显示安全运行区域的域的简单图形^[2]。用于此目的的变量应该是运行人员能够监视或能够控制的量。主要的困难是电力系统运行中不仅会涉及大量的网络图形、大量的预想事故和大量的运行条件,而且二次系统的参数也不确定。这可能导致我们采用比较保守的极限。因而需要研究在线实时的解决方法,此时不确定性相对较少。在文献中已建议了许多电压稳定性指标,其目的是估计系统距离不稳定还有多远,它

们中大部分是打算用于实时环境中。这些指标可以分为两大类,一类是基于目前状态的指标,它包括简单的电压降、灵敏度、特征值和特征向量;另一类则是大偏差指标,如安全性裕度。前者计算简单,但后者更有实用意义。计及不确定性因素时,概率的安全性评估^[23]有发展的余地,其困难是计算量大。

5.2 自学习方法

在开展实时电压安全性评估的同时,近年来研究工作也已朝着应用自学习方法来获得精细的稳定性指示器和安全运行规则的方向努力,该法包括:①离线地建立关于应分析场景的大型数据库;②离线地使用自学习方法分析所获得的数据库,以便在属性和裕量分类中间抽取复杂的关系,这些信息可以决策树、人工神经网络等的形式来表示^[37];③在线使用。这些方法的成功依赖于所建立的离线数据库的代表性,故制作时应特别细心。文献[38]用误差反向传播模型的人工神经网络成功地模拟静态电压临界点附近的过渡过程。

6 结语

电压不稳定性/崩溃问题的研究有着十分重大的社会经济意义,与其相关的现象十分复杂。电压稳定性的研究同其他工程问题的研究一样,应该紧密结合工业界的需要,这些需要包括:①电压不稳定性/崩溃的模型与仿真方法的研究;②对电压不稳定性/崩溃现象和机理的研究;③解析工具的研究与系统软件的开发;④防止电压不稳定性/崩溃措施、规划与运行指南和在线实时安全性评估等。在这些方面已取得许多成果,但距离指导工程实际问题还有相当的距离。期望在这些方面出现更多报道重要新结果、新现象的文章。

参考文献

- 1 Mansour Y. Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools and Industry Experience. IEEE Power Systems Engineering Committee, 1991
- 2 余贻鑫,王成山. 电力系统稳定性的理论与方法. 北京: 科学出版社, 1999
- 3 Taylor C W. Power Systems Voltage Stability, EPRI Power System Engineering Series. McGraw Hill, 1994
- 4 Custem T V, Vournas C. Voltage Stability of Electric Power Systems. Kluwer Academic Publishers, 1998
- 5 Vu K T, Liu C C. Shrinking Stability Regions and Voltage Collapse in Power System. IEEE Transactions on Circuits Systems, 1992, 39(4): 271~289
- 6 Venkatasubramanian V, Bhattler B, Zaborszky J. A Taxonomy of the Dynamics of a Large Power Systems with Emphasis on Its Voltage Stability. In: Fink L H Ed. Proceedings: Bulk Power System Voltage Phenomena——Voltage Stability and Security. EPRI

EL-6183, 1989. 9~44

- 7 Sauer P W, Pai M A. Power System Steady-State Stability and the Load Flow Jacobian. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4): 1374~1383
- 8 余贻鑫,李国庆,戴宏伟. 电力系统电压稳定性的基本理论与方法(五). 电力系统自动化,1996,20(10):61~65
- 9 李欣然,贺仁睦,周文. 一种具有全电压范围适应性的综合负荷模型. 中国电机工程学报,1999,19(5):71~75
- 10 Makarov Y V, Maslennikov V A, Hill D J. Revealing Loads Having the Biggest Influence on Power System Small Disturbance Stability. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 2018~2023
- 11 Morison K, Yirga S. System Disturbance Stability Studies for WSCC. In: EPRI Final Report TR-108256. 1997. 2~11
- 12 Vournas C D, Cutsem T V. Voltage Oscillations with Cascaded Load Restoration. In: IEEE/KTH Stockholm Power Tech Proceedings (Power Systems). 1995. 173~178
- 13 徐泰山,牟宏,邱夕兆,等. 山东电网暂态低电压切负荷紧急控制的量化分析. 电力系统自动化,1999,23(21)
- 14 范磊. 提高电力系统电压稳定性的二次电压控制:[博士学位论文]. 南京:东南大学,1999
- 15 余贻鑫,贾宏杰,严雪飞,等. 可准确跟踪鞍节分岔的改进局部电压稳定指标 L_1 . 电网技术, 1999, 23(5):19~23
- 16 张尧,宋文南,贺家李. 临界电压稳定极限的潮流和静稳极限算法. 中国电机工程学报,1994,14(6):17~23
- 17 袁骏,段献忠,何仰赞,等. 电力系统稳定灵敏度分析方法综述. 电网技术,1997,21(9):7~10
- 18 Vournas C D, Manos G A. Modeling of Stalling Motors During Voltage Stability Studied. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(3): 775~781
- 19 戴宏伟. 电力系统小扰动鲁棒性分析的模型和方法:[博士学位论文]. 天津:天津大学,1997
- 20 Vournas C D, Pai M A, Sauer P W. The Effect of Automatic Voltage Regulation on the Bifurcation Evolution in Power Systems. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1683~1688
- 21 贾宏杰,余贻鑫,韩赢. 发电机和并联补偿对电压小扰动稳定性的影响. 电力系统自动化,1999,23(21)
- 22 Praprost K L, Laparo K A. An Energy Function Method for Determining Voltage Collapse During a Power System Transient. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1994, 41(10): 635~651
- 23 余贻鑫,陈礼义. 电力系统安全性与稳定性. 北京:科学出版社,1989
- 24 薛禹胜,徐泰山,刘兵,等. 暂态电压稳定性及电压跌落可接受性. 电力系统自动化, 1999,23(14):4~8
- 25 李国庆. 基于连续型方法的大型互联电力系统区域间输电能力的研究:[博士学位论文]. 天津:天津大学,1998
- 26 Iba R, Suzuki H, Egawa M, et al. Calculation of Critical Loading Condition with Nose Curve Using Homotopy Method. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 584~593
- 27 曹国云,陈陈. 间接法计算非线性电压稳定模型的平衡点分岔值. 电力系统自动化,1999,23(21)
- 28 王成山,江伟,江晓东. 一种新的电力系统鞍型分岔点计算方法. 中国电机工程学报,1999,19(8):20~24
- 29 郭瑞鹏,韩祯祥,王勤. 电压崩溃临界点的非线性规划模型及算法. 中国电机工程学报,1999,19(4):14~17
- 30 Overbye T J. Computation of a Practical Method to Restore Power Flow Solvability. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 280~287
- 31 康忠健,陈学允. 电网静态电压稳定控制数学模型的研究. 电力系统自动化,1999,23(21)
- 32 顾群,徐泰山,陈怡,等. 中期电压稳定的建模与快速仿真. 电力系统自动化,1999,23(21)
- 33 程浩忠,祝达康,张焰. 邻近电压崩溃点处的系统最优控制方向. 电力系统自动化,1999,23(21)
- 34 胡国根,彭志炜. 研究电力系统电压动态稳定性的一种新方法(上)——分析方法. 电力系统自动化,1999, 23(21)
- 35 武际可,苏先槌. 弹性系统的稳定性. 北京:科学出版社, 1994. 177~178
- 36 Long B, Ajarapu V. The Sparse Formulation of ISPS and Its Application to Voltage Stability Margin Sensitivity and Estimation. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 994~951
- 37 林济铿,余贻鑫. 基于混合决策树——人工神经网络的电力系统动态安全性评估. 中国电机工程学报,1996, 16(6):378~383
- 38 李妍,程时杰. 电压稳定极限附近神经网络模拟及静态稳定裕度判定. 电力系统自动化,1999,23(21)

余贻鑫,男,1936年生,教授,博士生导师,主要从事电力系统安全性与稳定性方面的研究工作。

REVIEW ON VOLTAGE STABILITY STUDIES

Yu Yixin (Tianjin University, 300072, Tianjin, China)

Abstract A brief summarization on voltage stability studies both in China and in the world is given in this paper. The main topics mentioned here are about modeling and simulation, mechanisms, preventive measures, analytical tools of voltage instability/collapse and especially on computer methods in voltage security assessment. It gives an overall framework of voltage stability studies and tries to clear some important concepts. Based on this framework some aspects of voltage stability study to which people should pay much attention, are indicated with emphasis on the studies related to industry needs. This work is supported by National Key Basic Research Special Fund (No. G1998020303).

Keywords voltage stability voltage collapse voltage instability mechanisms voltage security assessment