

电力系统电压稳定性研究现状及其展望

傅 旭,王锡凡,杜正春

(西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘要: 电压失稳表现为母线电压不可逆转的急剧下降,其灾难性后果是系统崩溃。描述了电压不稳定现象并进行了解释,分析和评述了各种基于静态和动态的电压稳定性研究方法,以及电压稳定的指标计算、预想事故选择和控制措施,总结了各阶段的研究成果。综述了尚未解决的问题,指出了电力系统中电压稳定性分析模型、分析方法和控制措施等方面的研究方向。

关键词: 电力系统; 电压稳定; 稳定控制

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)02-0001-09

0 引言

近年来随着电力系统从发电、输电的一体化体制演变到开放和竞争的环境,电力系统规划和运行的不确定性和不安全因素增加,电压不安全已经成为限制电力传输的主要因素之一。世界上许多国家相继发生由电压稳定问题导致的大面积停电事件^[1],世界各国电力工业界和学术界都极为重视,并进行了大量的研究工作。判断电压稳定的一般准则是:正常运行情况下,对于系统中的每条母线,母线电压幅值随该母线注入无功功率的增加而升高;如果系统中至少有一条母线,其母线电压幅值随该母线注入无功功率的增加而降低,则该系统是电压不稳定的。电压崩溃比电压稳定性要复杂得多,它常常是系统发生一系列事件后导致一些母线电压持续性降低,其中夹杂着电压不稳定和功角不稳定。与电压不稳定有关的电压崩溃发生时,功角稳定并不是问题的焦点。总体而言,某些运行状况下的电力系统,在遭受干扰后的几秒或几分钟内,系统中一些母线电压可能大幅度、持续性降低,从而使得系统完整性遭到破坏,功率不能正常传送给用户。这种灾变称为系统电压不稳定,其灾难性后果则是电压崩溃。

早期研究普遍认为电压稳定问题是一个静态问题,或者认为系统的动态对电压稳定的影响很慢,从而将电压稳定问题转换为平衡点的存在性问题,研究集中在以潮流为工具的静态方法上。随着研究的深入,人们正在逐渐认识电压稳定性的动态本质,从而开始重点研究电压崩溃的动态机理和系统模型的需求,并提出了一些有关电压稳定性的分析方法和防止电压崩溃的对策。但迄今为止,电压稳定研究的完整的理论体系尚未建立,电压稳定仍然是电力系统分析中的一个需要进一步深入研究的热门课题。根据电压稳定问题的特点可将其分成静态电压

稳定和动态电压稳定,动态电压稳定又可进一步分成小干扰电压稳定、暂态电压稳定和长期电压稳定。本文把现有研究成果加以总结,对电压稳定研究的动向作了展望,同时提出作者的一些看法,这对电压稳定的研究有一定帮助。

1 电压不稳定现象及其解释

关于电压失稳的原因,不同的研究人员提出了不同的解释,在大多数的论证(或工业实践)中常用 $P-U$ 曲线解释系统电压失稳原因。比较流行的观点是负荷的动态特性、有载调压变压器(ULTC)以及发电机过励磁限制(OEL)共同作用造成电压失去稳定。发生扰动后,由于发电机的强励以及负荷的电压敏感性造成负荷减少,系统电压能够保持一定水平,但是随着 ULTC 的作用,负荷逐渐恢复,这将导致发电机励磁电流越界,其连锁反应使负荷电压发生不可逆转的下降。以图 1 所示系统^[2]为例对电压失稳加以物理上的解释。图 1(a)中,系统通过 ULTC 对代表一配电系统的母线 3 供电,其负荷特性为

$$P = P_0 \left(\frac{U_3}{U_0} \right)^\alpha, \quad Q = Q_0 \left(\frac{U_3}{U_0} \right)^\beta \quad (1)$$

式中 U_0, P_0, Q_0 分别为参考电压及此电压下负荷有功和无功功率。

如图 1(b)所示,系统扰动前在曲线 1 上的 A 点运行,扰动后经过短暂的功角振荡后,系统暂态是稳定的,此时电压 U_4 下降到 0.96 p.u.,系统 $P-U$ 特性曲线收缩到曲线 2 上,根据负荷暂态特性曲线,系统运行在 A' 点。此时发电机的 OEL 没有动作,电压 U_4 下降不是很大。随后 ULTC 开始减小变比 r ,试图恢复功率,系统运行点由 A' 逐渐向 B 点移动。大约过 70 s,发电机的 OEL 起作用,系统 $P-U$ 特性曲线收缩到曲线 3,系统运行点由 B 跳到 B' 点。为恢复功率, r 继续减小,系统运行点逐渐向 D 点移动,从而 r 的连续调解过程使电压逐渐降低直至失去稳定。图 1(b)中的垂直虚线表示的 ULTC 试图恢复的负荷长期特性。可以看出当负荷需求大于系统所能传输

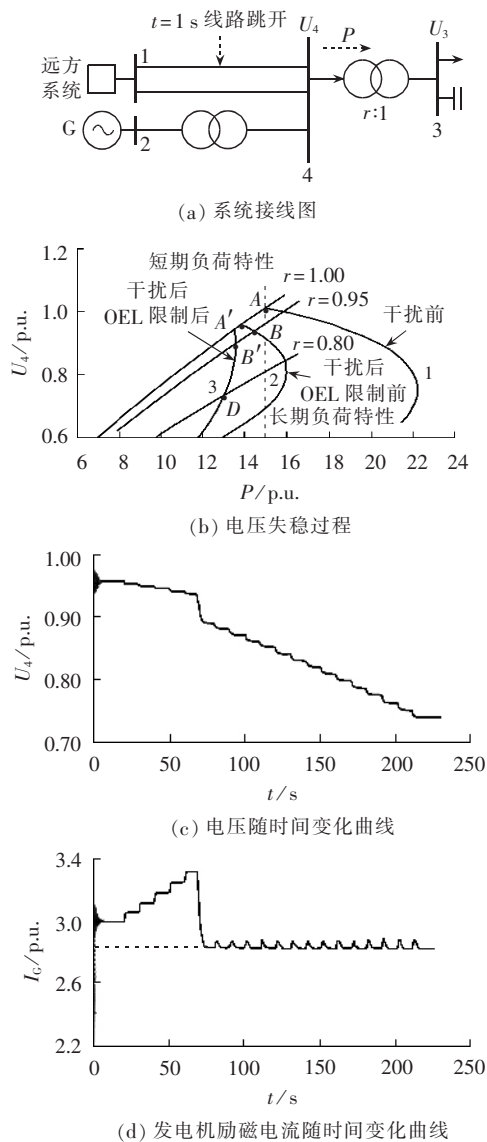


图 1 示例系统及其仿真

Fig.1 Example system and simulation

的最大功率 $P_{\max}$ 时,负荷电压较低,如果试图通过调整 ULTC 变压器的分接头使得较低的负荷电压回到指定范围内的控制将会使本来很低的负荷电压进一步降低,因此这种试图恢复负荷电压的控制将导致系统的电压不稳定。 U_4 随时间变化的曲线如图 1(c) 所示,在 70 s 时的突然降低是 OEL 作用造成的。发电机 G 的励磁电流 I_e 随时间变化曲线如图 1(d) 所示,在 70 s 处 OEL 动作,励磁电流突然下降。简言之,电压不稳定是由于系统试图运行到超过其传输的最大功率造成的。这可能是由于剧烈的负荷增加,更实际的是由于大干扰的发生使得线路的阻抗增加(例如,双回输电线路跳开一回),并且/或者由于电源电压降低到一定程度使得干扰前的负荷需求无法满足。如果负荷(主要是感应电动机和 HVDC)试图在暂态时间恢复其功率,则系统可能失去暂态电压稳定性。

2 电压稳定性研究方法

2.1 早期基于静态的研究方法

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。利用代数方程研究电压的稳定性,大体上可以归纳为最大传输功率法、潮流多值法、潮流雅可比矩阵奇异法和灵敏度分析等,其中延拓潮流(CPFLOW)在求取系统 $P-U$ 曲线中得到了广泛的应用。它使用延拓法跟踪负荷和发电机功率变化情况下电力系统的稳态行为,通过求解增广潮流方程得到穿越雅可比矩阵奇异点(“鼻尖”点)的解曲线,并且不会碰到病态的数值困难。延拓潮流使用预估-校正方案找出随负荷参数变化的潮流解路径,其求解过程如图 2 所示。

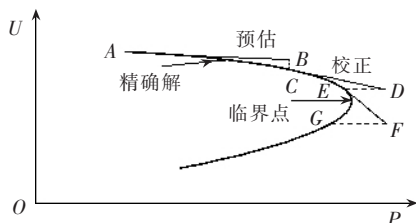


图 2 延拓潮流计算过程示意图

Fig.2 CPFLOW calculating progress

从已知的基本解 A 开始,利用切线预估器估计指定负荷增加模式下的解 B ,然后在固定负荷下使用常规的潮流程序校正估计值,从而得到准确的解 C 。此后,基于新的切线预估器预估负荷进一步增加后的母线电压。如果新估计的负荷 D 超出准确解下的最大负荷,则在固定负荷下的校正将不收敛。这时,在固定电压下实施校正,从而得到准确解 E 。其中,引入的负荷参数对避免潮流雅可比矩阵出现奇异起着主要作用。为反映动态元件在电压稳定中的作用,可将动态元件方程和潮流方程联立求解,从而建立动态潮流模型^[3,4],但动态潮流方法仍基于潮流模型,不能精确反映系统动态特性特别是故障后的动态特性。甚至基于潮流的 $P-U$ 或者 $Q-U$ 曲线的分析结果会出现与实际不符的情况^[5]。

总之,静态方法的优点是将一个复杂的微分方程解的性态研究看成是简单的非线性代数方程实数解的存在性研究;其缺点是不能反映各元件的动态特性,且将电力系统的潮流极限作为小干扰电压稳定的极限点,而这仅是电压稳定的必要条件而非充分条件,因而其结果大多是乐观的。

2.2 基于动态的研究方法

经历了静态研究方法之后,电压的动态属性受到了重视,电力系统是典型的动态系统,和功角稳定性一样,系统的电压稳定性也属于一类动态系统的稳定性问题。理论上,考虑了元件的动态特性更能揭示电压失稳过程的本质。值得注意的是,电压不稳定现象并不总是孤立地发生。功角不稳定和电压

不稳定的发生常常交织在一起,一般情况下其中的一种占据主导地位,但并不易区分。然而,人为地将功角稳定性和电压稳定性区分开,对于充分了解系统不稳定的原因,进而制定系统的运行方式和稳定控制策略是相当重要的。动态分析方法,主要是小干扰分析和时域仿真法得到了广泛的应用,具体可分为小干扰电压稳定性分析、暂态电压稳定性分析和长期电压稳定性分析 3 部分。

2.2.1 小干扰电压稳定分析方法

小干扰电压稳定分析方法基于系统的微分-代数方程为

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \\ 0 &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u})\end{aligned}\quad (2)$$

将式(2)在运行点处线性化,得:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{g}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix}\quad (3)$$

消去代数变量 $\Delta \mathbf{y}$, 可得系统状态方程系数矩阵

$$\mathbf{H}_x = \mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{g}_v^{-1} \mathbf{C}\quad (4)$$

通过研究系统的状态方程系数 $\mathbf{H}_x$ 的特征值可以判断系统的电压稳定性特征:若所有特征值都位于复平面的左半平面,则系统是稳定的;若有一个实特征值或一对共轭特征值位于右半平面则系统不稳定;若特征值位于虚轴上则对应临界状态。小干扰电压稳定分析内容主要包括小干扰稳定性分析方法的研究、小干扰稳定极限的研究、特征值灵敏度的分析和应用 3 个方面。如何简单计算线性化状态方程系数矩阵的全部特征值是小干扰稳定分析的重点。从早期的 QR 算法开始,许多学者不断探索大型系统小干扰稳定分析的新方法,并提出利用计算部分特征值分析大型电力系统小干扰稳定性,如 S 矩阵法^[6]、重新因子化的双迭代法^[7]等。我国学者提出了一种通过比较 2 种雅可比矩阵行列式符号判断系统电压小干扰稳定的方法^[8],它不但具有严格的理论基础,而且不需要特征值计算。

尽管小干扰法的数学原理清晰,但由于电力系统的动态元件非常多,其时间常数可从很短的暂态时间(几秒)过渡到几分钟甚至几十分钟,所以建立整个系统完整的运行点的线性化微分方程系数矩阵是很困难的,建立简化的模型精确反映电压稳定性值得进一步研究。另外,现有的小干扰分析方法中系统动态元件数学模型有很大差别,使得小干扰失稳模式的合理区分成为一个需要注意的问题。

2.2.2 暂态电压稳定性分析方法

电力系统暂态电压稳定性是指系统经受大扰动后,各负荷节点维持正常电压水平的能力。当系统受到大扰动后,只有功角、电压和频率都稳定,才能认为系统是暂态稳定的。与功角稳定性相比,暂态电压稳定性要复杂得多,要详细模拟大量分布在配电系统中负荷的动态行为是不可能的,并且功角稳定性和暂态电压稳定性总是交织在一起,更为复杂的是暂态电压稳定问题和暂态电压跌落问题是互相

联系的不同概念,这使得建立理论上严格的暂态电压稳定性判据十分困难。目前的暂态电压稳定判据大多数是归纳性判据^[9],理论依据较少,且规则较多,不便实际应用。从目前的仿真结果看出,系统失去暂态电压稳定性时,电压一般是单调下降的,很少出现振荡失稳形式^[10]。毫无疑问,用时域仿真法进行电压暂态稳定分析是最为精确的方法;可获得各种量随时间变化曲线;可适应各种元件模型以及保护装置模型;可适应各种元件的非线性以及离散操作。但时域仿真积分速度慢,特别是计算稳定极限时,分析量非常大。为了更精确地分析系统暂态特性,所用的模型和参数需要进行有效性评估^[11]。

总体而言,如果可以提高计算速度,充分利用输出的大量信息,时域仿真法是十分理想的方法,其重点是负荷的合理建模以及判别方法。

2.2.3 长期电压稳定性分析方法

长期动态仿真无疑是研究长期电压不稳定机理、崩溃过程以及检验其他电压稳定分析方法正确性的有效手段。为把暂态稳定程序扩展到几分钟甚至更长时间的框架下使用,需要增加的关键性模型有 ULTCs, OLEs, 以及负荷恢复、电压和频率的二次调整、锅炉等。短期动态过程大约持续几秒而长期动态过程大约持续几分钟,在这 2 个不同的时间过程中,起主导作用的元件是各不相同的。如短期过程中发电机及其相应的励磁调节系统和调速系统、静止无功补偿器(SVCs)、高压直流输电系统(HVDCs)、感应电动机负荷等将对系统的电压稳定性起主要作用,而长期过程中 ULTCs, OELs 以及可操作并联电容器、负荷恢复、电压和频率的二次控制、自动发电控制(AGC)等将对系统的电压稳定性起主要作用,因此必须对这些不同时刻起主导作用的元件加以详细描述,而对次要元件用简化模型描述。准稳态分析方法(QSS)^[12]在静态分析方法和动态分析方法之间进行了折衷,根据长期电压失稳具有慢动态的特性,把微分方程用其平衡点处的方程代替,通过求解系统的一系列暂态平衡点描述系统中长期运动轨迹,图 3 给出了 QSS 的计算过程。

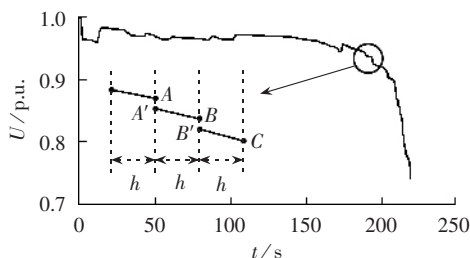


图 3 QSS 计算过程

Fig.3 QSS evolution

由图 3 可见,在 QSS 的仿真过程中,忽略了短期的动态过程,其中从 A-A', B-B' 的转换是由于 ULTC, OLEs 等离散元件的动态造成的。A', B' 等点是更新了 ULTC, OLEs 等离散元件的状态后用牛顿法求解的系统电压等代数变量数值。

尽管 QSS 方法在安全分析和实时应用上有较好的精度和速度,但有 2 点需要特别注意:首先,对于某些严重事故,QSS 会忽略暂态电压失稳问题;其次,QSS 无法给出长期电压不稳定所导致的最终以暂态形式表现出来的电压崩溃现象。

3 电压稳定控制措施研究

在线电压稳定控制的 3 个关键模块是电压稳定指标计算、预想事故选择以及控制措施。物理意义明确、计算速度快、精度高的电压稳定指标可以为运行人员提供系统电压稳定裕量,明确系统电压稳定程度;而预想事故自动选择的目的是根据所选择的某一电压稳定指标对大量的预想事故进行过滤,从而确定对系统电压稳定性有严重影响事故,达到减少计算量的目的;控制措施则针对所选择的严重事故进行详细分析并确定相应的控制策略。

3.1 电压稳定指标计算

知道电压稳定与否不是最终目的,在系统运行过程中,运行人员还需要知道电压稳定的程度。迄今为止,不同的研究人员从不同的角度提出了多种电压稳定指标,总体上分成 2 类。

3.1.1 裕度指标

裕度指标线性好,物理意义明确,可方便计及过渡过程中各种因素。但是裕度指标涉及到临界点的求取,计算量较大。

裕度指标计算方法有直接法和延拓潮流法 2 类。其中直接法通过解非线性方程组^[13,14]或优化问题^[15~17]获得崩溃点参数 λ^* ,从而得到 $\Delta\lambda=\lambda^*-\lambda_0$ 为系统的稳定裕度指标。需要注意的是直接法只能给出系统由分歧导致的电压崩溃点,其指标不能反映系统中不同设备到达极限时对电压的影响。而延拓潮流法通过解路径不但可以获得系统电压崩溃点还可通过关键母线在负荷增加过程中的电压变化曲线获得更多的信息。

为减少直接法的计算量,可采用局部裕度分析系统的稳定性。其基本思想是将整个系统等值为只保留所研究节点的戴维南等值电路,根据这一简单系统确定系统各个节点的裕度,其中裕量最低的节点为薄弱节点。许多文献提出了各种不同的计算稳定极限的实用方法^[19~23]。如通过多项式拟合研究节点的 $U-I$ 关系,从而根据 $U-I$ 平面上 U 轴和 I 轴所围的最大面积表示系统的运行极限^[19]。通过戴维南等值电路构建所研究节点的电压稳定边界(VSB),从而获得此节点的有功、无功、视在功率裕度^[20]。许多求取戴维南等值参数的方法已被提出^[21~23]。

3.1.2 状态指标

状态指标指标利用当时的系统状态信息,计算简单,但线性程度不好,物理意义不够明确,只能给出系统当时的相对稳定程度。这类指标包括各类灵敏度指标、特征值和奇异值指标、负荷状态空间中潮

流多解间距离指标等。灵敏度指标实际上将功率极限点作为电压稳定的判据^[24];奇异值指标和特征值指标的分析结果相似,将微分代数方程在平衡点处线性化,通过对系数矩阵的奇异值分解^[25]或特征值分解^[26]判定系统的电压稳定情况。目前,各学者从不同的角度提出了多种指标。如根据潮流解随负荷增加而逐渐减少,接近极限处只有一对解,崩溃点处 2 个解重合的性质,以角度表示电压稳定性指标^[27]。文献[28]利用广域测量技术在线监视系统的电压稳定性,通过实时戴维南等值分析各个节点的电压稳定性,同时采用更接近于实际情况的 ZIP 负荷模型进行电压稳定指标计算,并且为了预计发电机无功到达极限的情况定义了 $PU-PQ$ 转换时间度量。基于临近电压稳定极限线路的视在功率损耗急剧增大的事实监视系统电压情况,并据此设定继电器的整定值防止电压崩溃^[29]。文献[30]利用 k 时刻系统状态,预估系统 $k+1$ 到 $k+4$ 时刻状态,对每个超前预计状态计算潮流,若存在潮流解,则没有电压崩溃问题;否则通过外推技术计算电压崩溃点。基于随着负荷增加雅可比矩阵的对角元素在不断减小的事实,文献[31]提出利用当前的雅可比矩阵对角元的值与空载时相应对角元的比值作为电压稳定指标。文献[32]通过对收缩雅可比矩阵行列式的数值和符号定义了 2 种电压稳定指标。利用支路功率传输的二次方程的根判别式 $\Delta=b^2-4ac$ 分析系统线路功率传输是否达到稳定极限^[33],当其 $b^2/4ac$ 数值接近于 1.0 时,表示此支路接近其功率传输极限。

3.2 预想事故选择

预想事故自动选择是在线电压稳定评估的一个重要组成部分^[34,35],通过对预想事故的某一指标排序,可以大大减少分析计算量。许多文献提出了不同的预想事故自动选择方案^[35~43]。如根据 $P-U$ 曲线的二次曲线特征,采用广义的曲线拟合技术,利用 2 个运行点估计预想事故后的负荷裕度^[38,39],并据此进行事故排序。与文献[38]相比,文献[39]修正了文献[38]的曲线拟合技术,取事故前最接近 $P-U$ 曲线鼻点的 2 个拟合点进行曲线拟合,从而提高了拟合的精确度。文献[40]将停运的线路作为参数引进潮流方程,通过计算事故前鞍点对停运线路的灵敏度估计事故后的稳定裕度,并据此对停运线路排序。文献[41]通过计算故障对系统最小奇异值的影响对事故的严重程度排序,并用函数拟合方法推导出具有物理意义的指标。Liu Han 等根据电压崩溃大部分是局部现象,提出利用节点电压和临近的可支持无功之间的关系,用电气距离自适应地确定某一事故的电压控制区域^[42]。据此概念在此受扰域内通过局部潮流计算由最低电压、规格化的无功发出量、电气距离和负荷消耗的无功合成的电压指标。文献[43]通过比较事故后平衡点的切向量 dU/dP 的大小,对事故严重性排序。文献[44]将电压失稳问题分

为电压失控导致的不稳定和阻塞导致的电压不稳定 2 类,提出了电压控制区域和无功储备的概念。但由于需要对每条母线计算 $Q-U$ 曲线,存在效率低的问题。根据无功和电压之间的关系,许多基于无功量度的指标也被提出^[45~48]。文献[47]为克服 $P-U$ 母线向 $P-Q$ 母线转变的计算复杂性,提出了一个无功支持指标(RSI),首先计算出事故前系统的最大负荷,然后计算为保持此最大负荷而需要事故后额外注入的 PU 节点无功量,据此度量事故的严重性。为提高此方法的计算效率,可将继电保护中故障计算常用的补偿法应用到预想事故的选择中^[48],从而利用补偿电流模拟停运线路的影响,提高计算效率。

3.3 电压稳定的预防控制和紧急控制

尽管电力系统的复杂性、非线性和非自治性对控制手段提出严峻的挑战,但各种先进的通信控制技术和柔性交流输电装置(FACTS)的出现也为电压控制提供了强有力的手段^[49,50]。稳定控制决策就是在保持系统稳定的前提下,寻找控制代价最小的优化问题。用最优控制理论研究防止电压失稳的最佳控制规律的系统化算法无疑是理想的工具。

预防控制是在扰动并未发生时就作用,从而将系统的工作点向稳定域内部移动,一般是利用稳定裕度对控制参数的灵敏度和优化技术确定最优的措施,如发电机出力调整和负荷削减等。文献[51]通过事故后的 QSS 仿真和二分式搜索快速确定预想事故的稳定裕量,对稳定裕度不够的情况通过在最优潮流技术中引入线性电压安全约束调整系统扰动前发电机出力水平和负荷水平,使系统在发生预想的扰动后依然处于稳定域内并保持一定的稳定裕度。文献[52]提出了一个预防校正控制策略,对预想事故判断是否存在平衡点,当无平衡点时,采用紧急切负荷控制,当存在平衡点但系统稳定裕度不够时,通过最优潮流寻找最有效的预防控制手段。

尽管通过预防控制可以使系统在某些预想事故情况下仍然保持稳定,但一方面,从经济和现实角度出发,由于预防控制措施一直实施而不论扰动是否真的发生或者何时发生,从而影响到正常运行情况的经济指标;另一方面,对于严重故障,单靠预防控制有时难以确保电压稳定性,这时需采用紧急控制措施,如切负荷等。切负荷控制要求具有快速的决策能力、满意的控制精度和较好的适应能力,常采用的试凑法由于需要大量的暂态稳定性计算,难以取得最佳的控制效果。近年来,国内外学者对为保持系统暂态稳定性的切负荷控制算法进行了大量的研究工作^[53~56],但基本上都是基于各种直接法,根据暂态能量裕度的灵敏度计算切负荷控制量。即使承认直接法的理论基础和计算精度,文献中的算法也都是针对功角稳定性的。当系统失去大量电源或负荷侧遭受大的扰动时,系统在功角保持稳定的情况下有可能早已失去暂态电压稳定。

文献[57~59]提出的最优切负荷控制算法中考虑了暂态电压稳定性要求,用差分化方法处理优化

模型中的微分-代数方程组,利用广义梯度法求解该问题。其模型描述如下:

a. 目标函数为

$$\begin{aligned} \min [C_1(u) + C_2(\hat{y})] \\ C_1(u) = \alpha_1 \sum_{i=1}^{n_{\text{sh}}} [\beta_i (P_{\text{Lold}i} - P_{\text{Lnew}i})^{K_i}] \\ C_2(\hat{y}) = \alpha_2 \frac{\sum_{i=n_{\text{tsh}}}^{n_T} \sum_{j=1}^n [(U_{i,j} - U_j)/U_{i,j}]^2}{(n_T - n_{\text{tsh}})n} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 n_{sh} 为可以切负荷的节点数; n_{tsh} 为故障切除后的积分步数; n_T 为 $(0, T)$ 时间段内的总积分步数; n 为系统节点数; $C_1(u)$, $C_2(\hat{y})$ 分别为切负荷量和暂态过程中的电压质量目标函数; α_1, α_2 分别为 $C_1(u)$, $C_2(\hat{y})$ 的权重。

b. 约束条件为

$$\begin{aligned} f(U_s, P_{\text{GS}}, u) &= 0 \\ h(U_s, \delta_s) &= 0 \\ r_i(P_{\text{GS}i}, u) &= 0 \quad i=1, \dots, m \\ \hat{H}(\hat{y}, u) &= 0 \\ P_i(y_i, \delta_s) &\leq 0 \quad i=n_{\text{tsh}}, \dots, n_T \\ U_{i,j}^m &\leq U_{i,j} \leq U_{i,j}^M \\ 0 &\leq u_j \leq P_{\text{Lold}j} \quad j=1, \dots, n_{\text{tsh}} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 u 为控制量(切负荷量); δ_s 为切负荷后的稳态电机角度; $\hat{y}$ 为离散化后的系统变量(包括状态变量和代数变量); $U_{i,j}^m$ 和 $U_{i,j}^M$ 为每个积分步各个节点的电压上下界; $P_{\text{Lold}j}$ 为各个可切负荷节点的原始负荷量; $f(U_s, P_{\text{GS}}, u)$ 为切负荷后的稳态潮流约束; $h(U_s, \delta_s)$ 为切负荷后的发电机稳态运行点; $r_i(P_{\text{GS}}, u)$ 为由于切负荷的发电机的原动机调速约束; $\hat{H}(\hat{y}, u)$ 为离散化后的动态等式约束; $P_i(y_i, \delta_s)$ 为反映功角稳定性的不等式约束。

通过引入“罚函数”将不等式约束转化为等式约束,然后将其加入到目标函数中,得:

$$\begin{aligned} L = C_1(u) + C_2(\hat{y}) + C_3(\hat{y}, \delta_s) + C_4(\hat{y}) + \\ \lambda^T f(U_s, P_{\text{GS}}, u) + \mu^T h(U_s, \delta_s) + \\ \gamma^T \hat{H}(\hat{y}, u) + \xi^T T(P_{\text{GS}}, u) \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\lambda, \gamma, \mu, \xi$ 为拉格朗日乘子向量; $C_3(\hat{y}, \delta_s)$ 和 $C_4(\hat{y})$ 为反映不等式约束的“罚函数”。

$$\begin{aligned} C_3(\hat{y}, \delta_s) &= (\alpha_3)^k \sum_{i=n_{\text{tsh}}}^{n_T} s[P_i(\hat{y}, \delta_s)] \\ s(P_i) &= \begin{cases} 0 & P_i \leq 0 \\ (P_i)^{K_p} & P_i > 0 \end{cases} \\ (\alpha_3)^k &\rightarrow \infty \quad (\text{当 } k \rightarrow \infty) \end{aligned} \quad (10)$$

$$C_4(\hat{y}) = (\alpha_4)^k \frac{\sum_{i=n_{\text{tsh}}}^{n_T} \sum_{j=1}^n [(U_{i,j} - \bar{U}_{\text{lim}}/\sigma_{i,j})]^2}{(n_T - n_{\text{tsh}})^n}$$

$$\bar{U}_{\text{lim}} = \begin{cases} U_{i,j}^M & U_{i,j} > U_{i,j}^M \\ U_{i,j}^m & U_{i,j} < U_{i,j}^m \\ U_{i,j} & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$\sigma_{i,j} = \begin{cases} U_{i,j} & U_{i,j} < U_{i,j}^m \\ 1 & \text{其他} \end{cases}$$

α_4 和 α_3 类似,都为权系数。此方法由于要求在状态轨迹的每一个离散区间选取不同的状态变量和控制变量作为独立变量,而电力系统是阶数很高的非线性系统,优化所需计算量很大,且不易收敛,如何解决此问题需要进一步研究。内点算法由于其速度上的优势,已被成功用于紧急控制的优化问题中^[60,61]。

鉴于大多数提高电压安全的控制手段都是基于优化技术而没有考虑各种控制手段在时间上如何协调,提出通过协调控制提高电压安全性^[62],其基本思想是通过按照一定的时间序列采取各种控制手段阻止电压崩溃的发生,从而将优化问题分解成为在各个时间子序列上的优化问题。模型描述如下:

a. 目标函数为

$$J(p) = \sum_{i=1}^N C_i(u_i, p_i), \quad p_i \in R^m, \quad u_i \in R^m \quad (12)$$

b. 约束条件中控制量约束为

$$p_i^{\text{low}} \leq p_i \leq p_i^{\text{upper}} \quad t=1, 2, \dots, N \quad (13)$$

稳定限值为

$$S_{\text{margin}}(p_t) - S_{\text{margin}}(p_t - 1) > \varepsilon \quad (14)$$

式中 $t=1, 2, \dots, N$ 表示不同的控制阶段; $C_i(u_i, p_i)$ 为每个时间段所选择的目标函数; u_i, p_i 为时刻 t 的状态变量和可以采用的控制手段; $S_{\text{margin}}(p_i)$ 为控制 p_i 施加后稳定裕度。

为考虑负荷的动态特性和控制措施的离散特性,文献[63,64]提出通过启发式树搜索确定最优的控制手段。文献[65]详细研究了控制手段动作时间与系统电压稳定性的关系,指出不但要考虑控制量的大小还要考虑控制措施的施加时间。文献[66]具体介绍了法国国家控制中心(GAMME)的电压安全评估软件的框架,介绍了其平台和结构特点。为提高负荷模拟的精度,文献[67]提出了一种广域保护方案,发生扰动后,利用GPS测得各个关键节点实时数据,在线估计负荷参数,从而提高预测精度。但它只能提供成为事实的轨迹,研究更快、更高级的分析技术仍然是十分紧迫的。

总之,电压稳定问题不是一个孤立的技术问题,是涉及到电力系统中各个地区、各个层次、各个方面的相互联系的问题,对于电力系统的不同电压失稳方式要有不同的措施。

4 电压稳定性分析展望和研究动向

4.1 电压稳定性分析模型

在电压稳定分析中,关注的是各母线电压的变化情况,故可对一些对电压影响较小的物理量的变化规律作某些近似假设,从而在模型的复杂性和合理性之间取得合理折衷。

目前,电压稳定分析的很多方法尚未经历模型从复杂到简单的提炼过程,基于简单模型的分析结果往往值得商榷。一种理性的思路是:首先研究单个复杂、准确的元件模型对电压变化规律的影响,然

后研究多个复杂、准确的元件模型对电压变化规律的综合影响,从中抓住主要矛盾,简化模型,达到分析的简单性和复杂性的合理折衷。

负荷动态建模研究是电力系统电压稳定研究的核心与基础性课题,是电压稳定分析中的重点和难点。负荷的组成不同对电压稳定性的影响也不同,所以不同地区的负荷模型应该具有不同的特性,而不能千篇一律地用统一的模型描述。是否将电压稳定研究的网络扩展到存在大量无功控制装置的配电网,从而能够详细考虑 ULTC、补偿电容等无功控制装置的作用,使负荷建模更加简单和准确是需要进一步研究的问题;在功角稳定中忽略了电力网络和发电机定子的电磁暂态过程,使得定子电压方程和电力网络方程变为代数方程,但在电压稳定性分析中,电力网络的准稳态模型是否仍然适用也是一个需要明确回答的问题。

4.2 电压稳定性分析方法

所有基于静态的研究方法本质上都是利用潮流及其改进形式作为研究工具,未涉及系统动态,因而所得“极限”通常只是“功率极限”而非“电压稳定极限”,其合理性需要接受基于动态的研究方法的检验。但静态方法在获得系统极限运行状态、指导调度方面起到重要作用,也是动态分析方法的基础,在一段时间内将依旧存在且广泛应用。其关键问题是如何把握静态分析方法的应用范围和适用条件,如何衡量误差范围。此外,系统电压静态稳定和功角静态稳定的鉴别方法仍然是一个需要研究的课题。

小干扰电压稳定分析方法具有严格的理论基础,开发计算速度快,对各种控制系统有良好适应性的特征分析方法是其关键所在。在分析过程中,应该设法降低系数矩阵的阶数,识别保留对电压稳定影响贡献大的元件,正确确定需要加以详细描述的元素模型。

毫无疑问,时域仿真法是检验一切分析方法的准绳,探讨新的快速时域仿真方法,如采用并行计算技术,加快计算速度,力求达到暂态电压稳定的实时仿真是需要研究的课题。此外,对模型参数要进行实际系统测定,力求用可信参数进行暂态电压稳定分析,并且对仿真的输出结果进行分析,以便给出稳定裕度、稳定极限。同时,应该探讨时域仿真法和模式识别、人工智能等理论相结合的方法。

4.3 电压稳定控制措施

为了达到实时电压稳定监视的目的,急需开发一种有实际物理意义并且适合在线应用的电压稳定指标。这种指标应该基于动态模型并且具有良好的线性。虽然裕度指标已经在实际系统中得到初步应用,但裕度指标的计算速度和过渡过程还需要加以提高和精确模拟,否则将会导致错误的结果。从目前研究看,尽管许多电压稳定指标已被提出,但由于各种指标都采用了不同程度的简化,其准确性与合

理性需要通过动态方法进行验证。此外,就笔者所了解,目前大多数指标都是确定性指标,随着系统的不断增大,有必要开发反映系统电压稳定程度的概率性指标。

为了更有效地对电力系统进行控制,要充分利用先进的通信手段和控制理论开发有效的电压失稳预防性控制措施和紧急控制措施。要充分利用GPS测得的数据,对电压稳定特别是长期电压稳定有可靠的预测,重点是开发广域的系统保护策略和闭环控制以便使系统的运行状况更好。在多机复杂系统中,功角稳定和电压稳定互相影响和关联,不能将本来就有关联的问题人为的加以分割,高质量的稳定控制决策需要能够识别潜在的失稳模式,找出最安全的调度方向,并对预防措施和紧急控制加以协调。现有紧急控制多为离散性控制,其控制措施对稳定的影响不一定与控制量成正比,有时候还可能有负作用,特别是当多重事故发生时,这些控制手段之间的不配合本身就是导致系统瓦解的原因之一。如何将各种控制措施良好的配合适用,如何减少控制策略中由于系统非线性、复杂性、离散性和结果难于实际实施等方面的影响,如何建立控制手段优先级等是应进一步研究的课题。

5 结语

目前,电压稳定性分析的模型和方法多种多样,研究人员从不同的角度研究电力系统的电压稳定问题。从目前的电压稳定性的研究工作看,虽然取得了很大的进展,但仍不能认为其理论体系已经成熟,还有许多遗留和将遇到的问题需要解决。

本文对众多的研究成果加以总结,对电压不稳定现象、电压稳定性分析方法及其控制手段等分别进行了分析、评述,同时提出了作者的一些看法。随着大量的学者介入电压稳定性研究,电压稳定性问题的概念形成、数学模型的建立、失稳机理的正确解释以及控制措施的提出是指日可待的。

参考文献:

- [1] TAYLOR C W. Power system voltage stability [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [2] CUTSEM T V, VOURNAS C. Voltage stability of electric power systems [M]. Norwell, MA: Kluwer, 1998.
- [3] 朱凌志,周双喜. 电压稳定分析的潮流算法研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(5): 1-4.
ZHU Ling-zhi, ZHOU Shuang-xi. Study on power flow arithmetic for voltage stability analysis [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(5): 1-4.
- [4] 张元鹏,周双喜,王利峰. 静态电压稳定分析中动态元件模型及其实现[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 66-70.
ZHANG Yuan-peng, ZHOU Shuang-xi, WANG Li-feng. The model of dynamic components and its realization of study on static voltage stability analysis [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000, 20(3): 66-70.
- [5] CHOWDHURY B H, TAYLOR C W. Voltage stability analysis: V-Q power flow simulation versus dynamic simulation [J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 2000, 15(4): 1354-1359.
- [6] NAGAO U N. A new eigen-analysis method of steady-state stability studies for large power systems: S matrix method [J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1988, 3(2): 424-429.
- [7] CAMPAGNOLO J M, MARTINS N, FALCAO D M. Refactored bi-iteration: A high performance eigensolution method for large power system matrices [J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1996, 11(3): 1228-1235.
- [8] 吴涛,王伟胜,王建全,等. 用计及机组动态时的潮流雅克比矩阵计算电压稳定极限[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(4): 13-17.
WU Tao, WANG Wei-sheng, WANG Jian-quan, et al. Calculation of voltage stability margin by load flow Jacobian matrices and taking account of generator unit dynamics [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1997, 21(4): 13-17.
- [9] 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.
XU Tai-shan, XUE Yu-sheng, HAN Zhen-xiang. Modeling requirement and fast judgment of transient voltage stability [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1995, 19(12): 11-15.
- [10] 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.
DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, CHEN De-shu. The basic concept and simulation analysis of the transient voltage stability in electric power system [J]. *Journal of Huazhong University of Sci. & Tec.*, 1995, 23(4): 21-24.
- [11] 贺仁睦. 电网动态实时监控及管理系统的构想[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(5): 1-4.
HE Ren-mu. Power system dynamics monitoring and management system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26(5): 1-4.
- [12] VANCUTSEM T, JACQUEMART Y, MARQUET J N, et al. A comprehensive analysis of mid-term voltage stability [J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1995, 10(3): 1173-1182.
- [13] CANIZARES C A, ALVARADO F L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems [J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1993, 8(1): 1-8.
- [14] AJJARAPU V. Identification of steady state voltage stability in power systems [J]. *Int. J. of Electric Power & Energy Systems*, 1991, (11): 43-46.
- [15] CUTSEM T V. A method to compute reactive power margins with respect to voltage collapse [J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1991, 6(1): 145-156.
- [16] LU J, LIU C W, THORP J S. New methods for computing a saddle-node bifurcation point for voltage stability analysis [J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1995, 10(2): 978-989.
- [17] PARKER C J, MORRISON I F, SUTANTO D. Application of an optimization method for determining the reactive margin from voltage collapse in reactive power planning [J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1996, 11(3): 1473-1481.

- [18] IRISARRI G D, WANG X, TONG J, *et al.* Maximum loadability of power systems using interior point non-linear optimization method [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1997, 12(1): 162–172.
- [19] HAQUE M H. Use of $V-I$ characteristic as a tool to assess the static voltage stability limit of a power system [J]. **IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.**, 2004, 151, (1): 1–7.
- [20] HAQUE M H. Novel method of assessing voltage stability of a power system using stability boundary in $P-Q$ plane [J]. **Electric Power Systems Research**, 2003, 64 (2): 35–40.
- [21] HAQUE M H. On-line monitoring of maximum permissible loading of a power system within the voltage stability limits [J]. **IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.**, 2003, 150(1): 107–112.
- [22] JULIAN D E, SCHULZ R P, VU K T, *et al.* Quantifying proximity to voltage collapse using the voltage instability predictor (VIP) [A]. **Proc. IEEE PES Summer Meeting [C]**. Seattle WA; IEEE, 2000. 931–936.
- [23] WARLAND L, HOLEN A T. Estimation of distance to voltage collapse: Testing an algorithm based on local measurements [A]. **Proc. 14th Power Systems Computation Conf. (PSCC) [C]**. Seville, Spain; IEEE, 2002. 1–7.
- [24] 袁 骏, 段献忠, 何仰赞. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述 [J]. **电网技术**, 1997, 9(21): 21–25.
YUAN Jun, DUAN Xian-zhong, HE yang-zan. Summarization of the sensitivity analysis method of voltage stability in power systems [J]. **Power System Technology**, 1997, 9(21): 21–25.
- [25] LF A, SMED T, ANDERSON G, *et al.* Fast calculation of a voltage stability index [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1992, 7(1): 54–64.
- [26] GAO B, MORSION G K. Voltage stability evaluation using modal analysis [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1992, 7(4): 1529–1542.
- [27] YORINO N, HARADA S, CHENG H. A method to approximate a closest loadability limit using multiple load flow solutions [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1997, 12(1): 424–429.
- [28] MILOSEVIC B, BEGOVIC 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.
- [29] VERBIC G, GUBINA F. Fast voltage-collapse line-protection algorithm based on local phasors [J]. **IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.**, 2003, 150(4): 482–486.
- [30] ANTONIO C, de SOUZA Z, JULIO C, *et al.* On-line voltage stability monitoring [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 2000, 15(4): 1300–1305.
- [31] SINHA A K, HAZARIKA D. A comparative study of voltage stability indices in a power system [J]. **Electrical Power and Energy Systems**, 2000, 22(8): 589–596.
- [32] PRADA R B, PALOMINO E G C. Voltage stability assessment for real-time operation [J]. **IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.**, 2002, 14(2): 175–181.
- [33] QUINTELA A S, CASTRO C A. Improved branch-based voltage stability proximity indices Part I: Theoretical background [A]. **Proceedings of 2002 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering [C]**. Halifax, Nova Scotia, Canada; IEEE, 2002. 109–114.
- [34] JAIN T, SRIVASTAVA L, SING S N. Fast voltage contingency screening using radial basis function neural network [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 2003, 18 (4): 1359–1366.
- [35] SRIVASTAVA L, SING S N, SHARMA J. A hybrid neural network model for fast voltage contingency screening and ranking [J]. **Elect. Power Energy Syst.**, 2000, 22(1): 35–42.
- [36] 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.
- [37] GREENE S, DOBSON I, AVLARADO F L. Contingency ranking for voltage collapse via sensitivities from a single nose curve [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1999, 14(1): 232–240.
- [38] EJEBE G C, IRISARRI G D. Methods for contingency screening and ranking for voltage stability analysis of power systems [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1996, 11(1): 350–356.
- [39] JIA Zhong-hong, JEYASURYA B. Contingency ranking for on-line voltage stability assessment [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 2000, 15(3): 1093–1097.
- [40] FLUECK A J, GONELLA 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.
- [41] BERIZZIM A, ZENG Yong-gang. A second order method for contingency severity assessment with respect to voltage collapse [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 2000, 15(1): 81–87.
- [42] LIU Hang, BOSE A, NKATASUBRAMANIAN V. A fast voltage security assessment method using adaptive bounding [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 2000, 15(3): 1137–1141.
- [43] de SOUZAA A C Z, da SILVAA A P A, JARDIM B J L A, *et al.* A new contingency analysis approach for voltage collapse assessment [J]. **Electrical Power and Energy Systems**, 2003, 25(10): 781–785.
- [44] SCHLUETER R A. A voltage stability security assessment method [A]. **IEEE PES Summer Meeting [C]**. Berlin; IEEE, 1997. 1423–1438.
- [45] BEGOVIC M M, PHADKE A G. Control of voltage stability using sensitivity analysis [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1992, 7(1): 114–123.
- [46] WANG Yuan-ning, XU Wilsun. An investigation on the reactive power support service needs of power producers [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 2004, 19(1): 586–593.
- [47] VAAHEDI E, FUCHS C, XU W, *et al.* Voltage stability contingency ranking and screening [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1999, 14(1): 256–265.
- [48] BIJWEA P R, KOTHARI D P, KELAPURE S M. An efficient approach for contingency ranking based on voltage stability [J]. **Electrical Power and Energy Systems**, 2004, 26(2): 143–149.

- [49] LI Xiao-lu,BAO Li-xin,DUAN Xian-zhong,*et al.* Effects of FACTS controllers on small signal voltage stability [A]. **IEEE PES Winter Meeting**[C]. Singapore:IEEE, 2000. 2793–2799.
- [50] NUQUI R F,ARUN G P R P. Fast on-line voltage security monitoring using synchronized phasor measurements and decision trees[A]. **Power Engineering Society Winter Meeting**[C]. Columbus,USA:IEEE,2001. 1347–1352.
- [51] CAPITANESCU F,van CUTSEM T. Preventive control of voltage security margins: A multicontingency sensitivity-based approach[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 2002, 17(2):358–364.
- [52] FENG Z,AJJARAPU V,MARATUKULAM D J. A comprehensive approach for preventive and corrective control to mitigate voltage collapse[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 2000, 15(2):791–797.
- [53] HU J X,FU S T,CHEN J L,*et al.* Determination of emergency tripping generator/load by PEBS method with linearized sensitivity coefficient[A]. **International Conference of Electric Engineering**[C]. Taejon,Korea:IEEE, 1995.19–21.
- [54] TONG Jian-zhong,CHIANG H D. A sensitivity-based BCU method for fast derivation of stability in electric power system[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,1993,8(4): 1418–1428.
- [55] FENG Zhi-hong,AJJARAPU V K,MARATUKULAM D J. A practical minimum load shedding strategy to mitigate voltage collapse [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1998, 13(4):1285–1291.
- [56] TUAN T Q,FANDINO J. Emergency load shedding to avoid risk of voltage instability using indicators [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,1994,9(1):341–351.
- [57] de TUGLIE E,DICORATO M,la SCALA M,*et al.* A corrective control for angle and voltage stability enhancement on the transient time-scale [J].**IEEE Trans. on Power Systems**,2000, 15(4):1345–1353.
- [58] la SCALA M,TROVATO M,ANTONELLI C. On-line dynamic preventive control:An algorithm for transient security dispatch [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1998, 13(2):601–610.
- [59] de TUGLIE E,la SCALA M,SCARPELLINI P. Real-time preventive actions for the enhancement of voltage-degraded trajections [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1999, 14(2):561–568.
- [60] GRANVILLE S,MELLO J C O,MELO A C G. Application of interior point methods to power flow unsolvability[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,1996, 11 (2):1096–1104.
- [61] WANG X,EJEBE G S,TONG J,*et al.* Preventive/corrective control for voltage stability using direct interior-point method [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1998, 13(3):878–883.
- [62] WU Qiang,POPOVIC D H,HILL D J. Voltage security enhancement via coordinated control[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,2001, 16(1):127–135.
- [63] LARSSON M,KARLSSON D. Coordinated system protection scheme against voltage collapse using heuristic search and predictive control[J].**IEEE Trans. on Power Systems**,2003, 18(3):1001–1006.
- [64] LARSSON M,HILL D J,OLSSON G. Emergency voltage control using search and predictive control [J]. **Int. J. Power Energy Sys.**,2002,24(2):121–130.
- [65] VARGAS L S,CANIZARES C A. Time dependence of controls to avoid voltage collapse [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,2000, 15(4):1367–1375.
- [66] NATIVEL G,JACQUEMART Y,SERMANSON V,*et al.* Integrated framework for voltage security assessment[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,2000, 15 (4):1417–1422.
- [67] REHTANZ C,BERTSCH J. Wide area measurement and protection system for emergency voltage stability control [A]. **Power Engineering Society Winter Meeting**[C]. New York:IEEE,2002. 842–847.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

傅旭(1976–),男,辽宁锦州人,博士研究生,从事电力系统电压稳定分析及继电保护方面的研究工作 (E-mail: fuxu@mailst.xjtu.edu.cn);

王锡凡(1936–),男,河北安平人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统分析及电力市场方面的研究工作;

杜正春(1963–),男,陕西西安人,副教授,博士,主要从事电力系统运行与控制方面的研究工作。

Survey of power system voltage stability study

FU Xu,WANG Xi-fan,DU Zheng-chun

(Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

Abstract: Voltage instability manifests itself in a dramatic drop of transmission system voltages, which may lead to system disruption. The voltage instability phenomena is described and explained. Approaches to voltage stability study based on static and dynamic means are analyzed and reviewed, as well as the index calculation, forecasting accident selection and control measures. The achievements of all study stages are concluded. Considering the problems not solved, the research direction for analysis model, analysis method and control measures are pointed out.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(59937150).

Key words: power system; voltage stability; stability control