

文章编号: 1000-3673 (2001) 01-0001-07

电力系统电压静态稳定性指标述评

周双喜, 姜 勇, 朱凌志

(清华大学电机系, 北京 100084)

REVIEW ON STEADY STATE VOLTAGE STABILITY INDICES OF POWER SYSTEMS

ZHOU Shuang-xi, JIANG Yong, ZHU Ling-zhi

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

ABSTRACT Many steady-state voltage stability indices of power systems are summarized and compared in this paper. According to the demands of steady-state voltage stability analysis the principles and methods of setting up voltage stability indices are proposed.

KEY WORDS power system; voltage stability; steady-state stability indices

摘要: 综述和比较了多种电压静态稳定性指标, 根据电压静态稳定性分析的要求提出了建立电压静态稳定性指标的要求和构造方法。

关键词: 电力系统; 电压稳定性; 静态电压稳定性指标

中图分类号: TM712

文献标识码: A

1 概述

20世纪70年代以来, 因电压失稳而导致系统瓦解的事故在国内外一些大电网中多次发生, 造成长时间大面积的停电和巨大的经济损失。为了防止电压失稳和电压崩溃事故, 调度运行人员最为关心的问题是: 当前电力系统运行状态是不是电压稳定的, 系统离崩溃点还有多远或稳定裕度有多大。因此必须制定一个确定电压稳定程度的指标, 以便调度运行人员做出正确的判断, 采取相应的对策。

由于电压稳定指标是对系统接近电压崩溃程度的一种量度, 因此如何定义一个指标直接取决于对电压崩溃的理解。不同的理解将构造出不同的电压稳定指标。一般认为, 电压稳定性是电力系统在正常情况下或遭受扰动之后系统中所有节点维持可接受的电压的能力; 系统进入电压不稳定的状态是因扰动、负荷需求的增加或系统状态的变化而引起的不断加大和不可控制的电压降落或升高; 引起电压不稳定的主要因素是电力系统没有能力维持无功功率

的动态平衡和系统中缺乏合适的电压支持; 电压不稳定性受负荷特性影响很大。而电压崩溃通常是由以下几种情况引发的: ① 负荷的快速持续增长; ② 局部无功不足; ③ 传输线发生故障或保护误动; ④ OLTC的动态调节; ⑤ 电压控制设备限制器动作等。

目前广泛应用的电压静态稳定性分析指标多数是基于潮流方程的, 是以电力网的极限输送能力作为电压崩溃的临界点, 是系统各负荷节点到达最大功率点, 其数学特征是潮流雅可比矩阵奇异。

本文综述了现有的主要的电压静态稳定性指标^[1~4], 阐述了各个指标的优缺点和适用范围, 提出了建立电压静态稳定性指标的具体要求和办法。

2 电压静态稳定性分析的指标类型和要求

电力系统静态电压稳定性研究应能回答2个问题^[5]: 一是接近程度。当前系统离不稳定还有多远或系统的稳定裕度有多大? 二是机理。当系统发生不稳定时, 主要机理是什么? 电压弱区域、弱节点是哪些? 哪些发电机、哪些支路是关键? 换言之, 指标应能回答: 如果崩溃是由负荷变化引起的, 应能量度系统在崩溃发生前还能承受多大的负荷增长; 如果崩溃由事故引起, 应能评价系统能否经历某事故而不发生崩溃并量度事故的严重性; 如果要采取措施防止电压不稳定性, 则应知道在哪里和采用什么措施最为有效。

现有常用的电压稳定性指标可分为状态指标和裕度指标。两类指标都能给出系统当前运行点离电压崩溃点的距离的某种量度。状态指标只取用当前运行状态的信息, 而裕度指标的计算则涉及过渡过程的模拟和临界点的求取问题。

电压静态稳定性指标是规划设计和调度运行人员的重要技术参数,应当具备以下特性:①准确性。它取决于正确的系统模型和分析方法,以及对电压崩溃机理的准确把握。②线性性。目前很多指标的线性性不好,在系统接近崩溃点时才发生明显的改变,这种指标的预警作用无法给调度运行人员提供足够的时间作出反应。③计算快速性。为了在线快速分析,需要采用快速计算分析的算法和适当简化的模型。④提供多种信息。如能提供当前系统薄弱区域、关键母线、发电机等信息,并直接向调度运行人员提供解决问题的方案。

3 不同电压静态稳定性指标简述

3.1 灵敏度指标

灵敏度指标以潮流方程为基础,利用系统中某些物理量的变化关系,即它们之间的微分关系来研究系统的稳定性^[6,7]。

在电力系统分析中,电力系统模型通常由一些代数方程和微分方程组成:

$$\dot{X} = F(X, Y, P) \quad (1)$$

$$0 = G(X, Y, P) \quad (2)$$

式中:函数 F 描述系统动态部分;函数 G 描述系统静态部分; X 为状态变量; Y 为代数变量; P 为参数矢量

$$X = (W, k, E_d', E_q', E_{fd}', V_R, R_f, \dots)$$

$$Y = (I_d, I_q, V, \theta, \dots)$$

$$P = (P_L, Q_L, K_A, K_E, K_F, K_L, \dots)$$

参数矢量 P 中包含在静态和动态部分所有显式出现的参数。其中, K_A 、 K_E 、 K_F 为励磁调节器参数; K_L 为负荷增量参数; P_L 和 Q_L 分别为有功和无功负荷。在一个平衡点 $(X(P_0), Y(P_0))$, 可得代数变量的参数灵敏度的表达式

$$\frac{\partial Y}{\partial P} = - \left[\frac{\partial G}{\partial Y} \right]^{-1} \left[\frac{\partial G}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P} + \frac{\partial G}{\partial P} \right] \quad (3)$$

和状态变量的参数灵敏度的表达式

$$\frac{\partial X}{\partial P} = A^{-1} \left[\frac{\partial F}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial P} - \frac{\partial F}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P} \right] \quad (4)$$

式中

$$A = \left[\frac{\partial F}{\partial X} - \frac{\partial F}{\partial Y} \left[\frac{\partial G}{\partial Y} \right]^{-1} \frac{\partial G}{\partial X} \right]$$

灵敏度指标也可以按物理意义分为节点(母线)灵敏度、支路灵敏度和发电机灵敏度等指标。灵敏度指标除应用于判断系统的电压稳定性外,还可用于判断薄弱区域(节点)、薄弱支路、关键发电机,以确定无功补偿等控制器的安装位置等。

灵敏度方法是最早应用于静态稳定性分析的指标之一,也是目前很有吸引力的方法之一。原理及实现都比较简单。它不仅给出了电压崩溃的指标,而且提供的信息可以方便地识别系统中各节点的强弱以及所需要采取的对策。但许多灵敏度指标未涉及负荷的静态、动态特性和发电机的无功约束,因此作为电压静态稳定性的判据还存在一定的局限性。

3.2 奇异值和特征值

奇异值和特征值 2 个电压崩溃接近指标具有类似的结果^[8~11]。对于极坐标形式,潮流方程偏差化可得

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{p\theta} & J_{pv} \\ J_{q\theta} & J_{qv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (5)$$

对潮流雅可比矩阵 J 进行奇异值分解可以写成:

$$J = M \Sigma N^T = \sum_{i=1}^n m \sigma_i n^T, \text{ 即式 (5) 变成}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = N E^{-1} M^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 M 和 N 均为 $n \times n$ 正交矩阵,左、右奇异矢量 m 和 n 分别是矩阵 M 和 N 的列矢量, Σ 是奇异值 σ_i ($e_1 \geq e_2 \geq \dots \geq e_n$) 对角矩阵。

对于所有的 $i, \sigma_i \geq 0$ 当矩阵 J 的秩为 r ($r \leq n$) 时,奇异值中有 r 个大于零。

最小奇异值以及最小奇异值关联的左、右奇异矢量包含以下重要信息:①最小奇异值决定静态电压稳定性极限的接近程度。②右奇异矢量中的最大元素指示最灵敏的电压幅值(临界电压);弱节点可以通过右奇异矢量来识别。③左奇异矢量中的最大元素对应于功率注入的最灵敏方向;最危险的负荷和发电量的变化可由左奇异矢量来识别。

在电压静态稳定性分析中,若假设 $\Delta P = 0$, 则式(5)变为无功误差方程

$$\Delta Q = (J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}) \Delta V = J_r \Delta V \quad (7)$$

式中 J_r 为线性化潮流降阶雅可比矩阵。还可证明:

$$\det J_r = \frac{\det J}{\det J_{p\theta}} \quad (8)$$

式(8)表明线性化潮流降阶雅可比矩阵 J_r 与雅可比矩阵 J 同奇异。这样利用 J_r 的奇异性就可间接判断 J 的奇异性。 J_r 的最小奇异值是系统如何接近电压崩溃的一个相对量度,也是一个好的静态电压稳定性指标。在崩溃点, J_r 的最小奇异值变为零。

类似于奇异值分解,对降阶潮流雅可比矩阵 J_r

进行特征值分解 J_r 的每个特征值都与一个无功电压运行模式相对应,特征值的模值就是相应运行模式的电压稳定性的相对量度。如果只关心当前运行状态下最易失稳的运行模式,就不必计算 J_r 的所有特征值,只需计算最小特征值即可。

与奇异值类似,与最小特征值相关的右特征矢量的最大元素对应于系统内的关键节点(最灵敏电压),而左特征矢量的最大元素指示功率变化最灵敏的方向。研究表明,随着系统的增大,用特征值和奇异值来分析电压稳定性将更加类似^[9]。而且,当方程维数增加后,矩阵的最小特征值和奇异值都要变小。

特征值和奇异值的一个缺点是线性性不好。例如系统发电机达到无功限制而由 PV 节点转化为 PQ 节点后,特征值有一跳变;在临界点处,奇异值和特征值会有非常陡的快速下降过程,特别是在有多台发电机同时达到限制的时候。

特征值和奇异值的另一个缺点是计算量比较大。现已开发出一些快速算法,对奇异值利用潮流计算的 LU 分解结果,可近似快速计算最小奇异值^[11]。对于特征值,可只计算几个最小特征值^[5, 10]。

3.3 试验函数和二阶指标

(1) 试验函数

试验函数指标是建立在一簇标量函数 t_k 基础上的,它与系统模型无关^[11]。 t_k 定义为

$$t_k = |e^T J J_k^{-1} e| \quad (9)$$

式中 J 对应于系统雅可比矩阵; e_l 为第 l 个单位矢量,即一个除了 l 行中一个元素为 1 外其余都为零的矢量,而

$$J_k = (I - ee^T)J + ee^T \quad (10)$$

式中 I 为单位矩阵。

对于潮流方程,在电压崩溃点, J 阵是奇异的,而矩阵 J_k 是保证不奇异的,只要 l 行和 k 行选择使得它们对应于雅可比矩阵 J 的零特征值有关的零特征矢量 N 和 M 中的非零元素。而且当 $l = k = c$ 时, c 相当于 N 中最大元素或临界元素,于是,试验函数变成了“临界”试验函数:

$$t_c = |e^T J J_c^{-1} e| \quad (11)$$

雅可比矩阵和试验函数簇都是系统变量和参数的函数,即随着参数 λ 变化到达崩溃点,系统状态变量改变,临界试验函数 t_c 显示为负荷裕度 $\Delta\lambda$ 的“二次型”,即

$$t_c = a \Delta\lambda^2 \quad (12)$$

式中 a 为标量常数

$c = 2$ 或 4 , 通常在电压崩溃点,属于关键区域的节点, t_c 指标显示为二次型。而在其它节点,试验函数对参数变化很不灵敏,不显示二次型。

另一方面,在 t_c 形成之后,系统限制直接影响负荷裕度估计。这种急速的变化也可用来估计不同限制对系统最大负荷能力的实际影响,使得校正作用可以在负荷增长过程中较早地作出。

采用试验函数的一个问题是难以确定关键点。

(2) 二阶指标

电压崩溃是强非线性现象,所有一阶性能指标都难以给出接近崩溃点的准确量度量。为此构造一个“二阶”指标^[12],利用二阶指标中的附加信息来克服一阶指标的弱点。例如:

$$f(\lambda) = (b - d\lambda)^{1/c} \quad (13)$$

这类函数具有的特征是其对于参数 λ 变化的比值是线性的,即

$$\frac{f(\lambda)}{df/d\lambda} = \lambda - bc/d \quad (a, b, c > 0) \quad (14)$$

总是线性的,于是可以提出如下指标

$$l = - \frac{1}{l_0} \frac{f(\lambda)}{df/d\lambda} \quad (15)$$

这里 l_0 是在起始负荷点处式 (14) 的值。把指标 l 适当规格化,则在崩溃点 $l = 0$ 这个指标在遇到发电机容量或其他限制时, $f(\lambda)$ 的变化会被 $df/d\lambda$ 的高值所抵消,使指标的线性性大为改善。

如何寻找一种具有“二次型”特性的指标函数,已报导的有试验函数 $t_{c\max}$ (J^{-1} 的最大奇异值) 等。

3.4 电压稳定性接近指标

(1) 基于一般潮流解的电压稳定性指标 L

文 [13] 根据 2 节点系统推导结果,定义了一个电压稳定性评估的指标 L :

$$L = \left| 1 + \frac{V_1}{V_0} \right| = \left| \frac{S_1}{Y_{11} \cdot V_1^2} \right| \quad (16)$$

式中 $V_0 = \frac{Y_L}{Y_L + Y_Q} V_2$

V_1 和 V_2 为 π 形等效线路两端的节点电压 (V_1 为负荷节点电压, V_2 为发电机节点电压); Y_L 为线路串联导纳; Y_Q 为线路并联导纳; S_1 为负荷节点的注入功率; L 值的范围为 $0 \leq L \leq 1$, 在临界点 $L = 1$ 。

当用于多节点系统时,该方法把节点划分为 2 组,即发电机节点的集合 T 和全部负荷节点的集合 L 。其中发电机节点为 PV 节点的电压幅值恒定。这

样定义 L 指标为:

$$L = \max_{j \in L} L_j = \max_{j \in L} \left[1 - \sum_{j \in G} (F_{ji} V_i / W_j) \right] \quad (17)$$

F_{ji} 为负荷参与因子。以 L_i 中最大值 L 对 1 的接近程度表示潮流发散的程度。 L 是表征实际状态和稳定极限之间距离的量化指标。局部指标 L_j 表明哪些节点易发生电压崩溃。

该方法提出较早,在电力系统中应用也比较广。 L 指标结构简单,可应用于多节点系统内局部区域负荷增长。对于负荷一致增长的不稳定计算有足够的精确度,可用于在线分析。但是也存在一些缺点,例如它不能提供任何有关支路和发电机参与情况的信息,且仅限于传统潮流模型,而且在计算 L 指标时,不知如何应用发电机达到无功限制的情况。

(2) 基于潮流解对的邻近电压崩溃指标 V IPI

潮流方程通常呈现多个解对,解对的数目随运行点接近崩溃点减少,在崩溃点附近仅为 1 对解,最后在崩溃点 2 个解变为 1 个解。电压稳定性接近指标 (V IPI) 是利用这种解对来预报电压不稳定的接近程度的^[14]。这种指标依据直角坐标的潮流方程:

$$y_s = y(x) = (Ax)x + Bx + C$$

式中 x 为电压矢量; y_s 表示节点注入矢量; $y(x)$ 为 x 的二次函数。

设 x_1 和 x_2 分别为高电压(可运行)解和低电压解,则可定义 2 个矢量 $a = (x_1 + x_2) / 2$, $b = (x_1 - x_2) / 2$ 。在崩溃点, $x_1 = x_2$, 即 $b = 0$ 。

$$V IPI = \theta = \cos^{-1} \frac{|y(a)^T y_s|}{|y(a)| |y_s|} \quad (18)$$

它的数学解释是通过将电压空间映射到节点矢量空间, $y(a)$ 为节点注入空间上的奇异矢量。V IPI 指标就是 y_s 和 $y(a)$ 之间的夹角 θ 。 θ 值指示 y_s 如何接近 $y(a)$ 。在崩溃点 $\theta = 0$ 。

V IPI 指标对于运行条件变化的响应非常灵敏。但由于它是 2 个节点注入矢量的角度差,是用“度”来量度的,因此这个信息不能直接和电力系统中任何实际变量相关联。

3.5 裕度指标

由系统给定运行状态出发,按照某种模式,通过负荷增长或传输功率的增长逐步逼近电压崩溃点,则系统当前运行点到电压崩溃点的距离(以 MVA 或 MW 表示的负荷增加量)可作为电压稳定性程度的指标,称之为负荷裕度指标或裕度指标^[15-17]。负荷裕度是最基本的、被广泛接受的电压崩溃指标。

如果系统负荷选择成变化的参数,可以画出系统的 PV 曲线。在这种情况下,电压崩溃的负荷裕度是当前运行点和 PV 曲线鼻端之间的负荷变化。

研究区域之间传输能力时,负荷裕度是测定 2 个区域间传输的功率增加量。

负荷裕度作为电压崩溃指标的优点是:① 直观、简单,容易被人们接受和理解;② 运行点到电压崩溃点的距离与裕度指标的大小呈现线性关系;③ 负荷裕度仅仅要求静态电力系统模型,而当具有动态系统模型时它也可以用;④ 负荷裕度是一个准确的指标,它可以全面考虑电力系统的非线性和各种限制;⑤ 一旦负荷裕度被计算出来,就很容易和快速地计算出它对于电力系统参数或控制的灵敏度;⑥ 可计及不同负荷增长方式。

负荷裕度作为电压崩溃指标的缺点是:① 负荷裕度需要对远离目前运行点的运行点进行计算,计算花费大;② 负荷裕度要求假定负荷增长的方式,不同的负荷增长方式得到的裕度可能不尽相同,而且有时这个信息是不容易获得的。为了简化计算,常假设负荷功率的增长方式有:单负荷节点的功率增加,其它负荷节点的功率保持不变;选定区域的负荷节点的功率增加,其它负荷节点功率保持不变;全部负荷节点的功率同时增加等。

裕度指标计算的关键在于确定崩溃点。确定崩溃点的方法有很多,概括起来可分为以下 3 种:① 直接法^[20,23];② 连续潮流法(延拓法)^[15,17,18];③ 近似计算方法^[26]。

3.6 局部指标

有时只关心某节点或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,可利用等效方法进行局部电压稳定性分析,以获得较快的速度。

(1) 局部负荷裕度^[4,21]

假定其它节点负荷维持不变,当节点 i 功率因数不变,负荷不断增加时,从起始负荷(以 MW 表示的 P_{oi})到 PV 曲线鼻端(以 P_{max} 表示)的距离即负荷裕度,表示为

$$P_{Lmgi} = \frac{P_{maxi} - P_{oi}}{P_{maxi}} \quad (19)$$

负荷裕度 P_{Lmgi} 的值在 1 和 0(在崩溃点)之间。式(19)可以用于计算每个负荷节点的电压稳定裕度。若要对整个电力系统进行评价,则指标 P_{Lmgi} 应当对所有节点进行计算,即需要计算如系统负荷节点总数那么多的 P_{Lmgi} ,因而很费时。

(2) 负荷节点电压稳定性就地安全指标

该指标利用简化的两节点系统的潮流方程的有解条件判断电压安全性。图 1 为等效系统,可构成下述 3 种电压稳定性指标^[27, 28]。

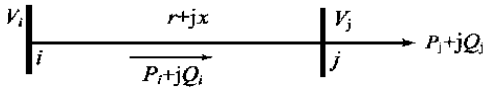


图 1 两节点系统
Fig. 1 A power system of two buses

(1) 线路稳定因子

线路稳定因子称之为 LQPN 方法,各指标为:

$$LPP = 4(r/V_i^2)(P_j + rQ^2/V_i^2) \quad (20)$$

$$LQP = 4(x/V_i^2)(Q_j + xP_i^2/V_i^2) \quad (21)$$

$$LPN = 4(r/V_j^2)(-P_i + rQ_j^2/V_j^2) \quad (22)$$

$$LQN = 4(x/V_j^2)(-Q_j + xP_i^2/V_j^2) \quad (23)$$

以上各指标值越大,表示越不稳定。在崩溃点,指标值趋于 1

该指标原理简单,但是其推导存在数学上的问题,如式中 P_k 、 Q_k 作为未知量,当 P_k 、 Q_k 变化时, V_k 、 P_k 、 Q_k 也会发生变化,不能当作常量。该指标的线性较差。

(2) 利用电压实部的安全指标

该指标由直角坐标形式的潮流方程推出:

$$A_{VRP} = (-g)^2 - 4g(P_j - bd + gd^2) \quad (24)$$

$$A_{VRQ} = (-b)^2 - 4b(-Q_j + gd + bd^2) \quad (25)$$

式中

$$g = \frac{r}{r^2 + x^2} \quad b = \frac{-x}{r^2 + x^2}$$

$$d = \frac{bP_j + gQ_j}{b^2 + g^2}$$

在崩溃点该指标趋于零。

(3) 利用电压幅值的安全指标

该指标由图 1 负荷节点电压幅值的有解条件得出:

$$A_{VM} = [2(P_j r + Q_j x) - V_i^2] - 4[(P_j r + Q_j x)^2 + (P_j x - Q_j r)^2] \quad (26)$$

该指标在崩溃点处为零,线性特性好,计算量小,速度快

3.7 能量函数指标

能量函数指标 (TEF) 是建立在李雅普诺夫稳定理论基础之上的。把它作为电压稳定性指标,是由于这个标量函数在某些模型假设条件下被证明是直接和鼻形曲线包围的区域有关的。

对于一个平衡点,能量函数表示为^[22]

$$\begin{aligned} \text{TEF} = & -\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n B_{kj} V_k^0 V_j^0 \cos(\theta_k^0 - \theta_j^0) - \\ & -\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n B_{kj} V_k^1 V_j^1 \cos(\theta_k^1 - \theta_j^1) - \\ & \sum_{k=1}^n P_k(p_0)(\theta_k^1 - \theta_k^0) - \sum_{k=1}^n \int_{V_k^0}^{V_k^1} \frac{Q_k(v, p_0)}{v} dv + \\ & \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n G_{kj} V_k^0 V_j^0 (\theta_k^1 - \theta_k^0) \cos(\theta_k^0 - \theta_j^0) + \\ & \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n G_{kj} V_j^0 (V_k^1 - V_k^0) \sin(\theta_k^0 - \theta_j^0) \end{aligned} \quad (27)$$

式中 $y_{kj} = G_{kj} + jB_{kj}$ 为节点导纳矩阵中第 kj 个元素; $P_k(p)$ 和 $Q_k(p)$ 分别为在节点 k 注入的有功和无功功率; $V_k^0 \angle \theta_k^0$ 和 $V_j^0 \angle \theta_j^0$ 为节点 k 和 j 在平衡点 (Z_0 , p_0) 时的节点电压矢量; $V_k^1 \angle \theta_k^1$ 和 $V_j^1 \angle \theta_j^1$ 表示对同一参数值 p_0 在另一平衡点 Z_1 时的电压矢量,它与“最接近”的不稳定平衡点有关。

TEF 的表达式提供 2 个平衡点之间的“能量距离”的量度。当系统达到崩溃点时,2 个解 Z_0 和 Z_1 合成 1 个解,即 $Z_0 = Z_1$ 在崩溃点,TEF 值变为零。这个特性可用作系统接近电压崩溃合适的预报。

能量函数指标的一个不理想之处是不容易包括更复杂的系统模型,而且第二个平衡点 Z_1 的计算很不容易,特别对于重负荷系统。

3.8 V/V_0 指标

V/V_0 指标的定义和计算都很简单。其中 V 为由潮流或状态估计研究得到的节点电压值, V_0 指的是对同一系统状态但所有负荷设为零时解潮流获得的节点电压。在每一节点得到的比值 V/V_0 提供一个系统电压稳定性的指示,可用来立即发现弱的节点(区域)和有效实施预防的地点。它虽不能用作接近崩溃程度的准确预报,但当和实际系统经验结合运用时,仍是对付电压不稳定的一个有效工具。

3.9 其他指标

还有一些其他电压稳定性指标,如无功裕度指标^[24]、不变子空间指标^[7]等,限于篇幅,不再列写。

4 电压稳定性指标的构造方法及其比较

电压稳定性指标的构造可以选用物理量,也可选用非物理量。归纳起来主要有:① 直接用非物理量来表示,如最小奇异值, V_{IP1} 指标;② 物理量,如裕度指标;③ 两物理量的比值,但不必求出临界值,如灵敏度指标;④ 两物理量的比值,但需要求出临界

值,如试验函数;⑤通过潮流方程的有解条件构造,如 L 指标、就地安全性指标等。

模型的复杂程度往往影响指标的准确性,但越是复杂的模型,计算工作量也越大。在模型选用上也有多种做法,主要有:①将复杂电力系统作为一个整体考虑,即求出整个系统的稳定指标,如系统奇异值方法;②系统保持不变,只求部分系统的稳定指标,如局部指标;③系统保持不变,将各节点的稳定裕度进行比较,其中裕度最小的节点代表整个系统的裕度,如节点奇异值方法;④系统保持不变,将简单系

统得出的判据用于复杂系统,如 L 指标;⑤将复杂系统简化为简单系统,然后按简单系统得出的判据进行比较,如就地安全性指标。

从以上各项指标的构造来看,都是采取不同的方法求取临界点以及抓住极限运行状态的不同特征作为电压崩溃的判据。从静态的角度看,雅可比矩阵的奇异、负荷功率极限、电压失稳临界值三者是统一的。

上述电压稳定性指标的构造方法和主要特点归纳列于表1

表1 电压稳定性指标比较表
Tab. 1 Comparison of voltage stability indices

构造方法	指标	计算速度	应用模型	指标线性性	预报准确性	适用范围	说明与评价
非物理量	奇异值/特征值	中等	任何	非线性	不准确	系统全局指标	在临近崩溃时急速下降
物理量	负荷裕度	慢	任何	线性	很准确	系统全局指标	提供大量有用信息,代价高
	局部负荷裕度	中等	潮流	准线性	较准确	系统局部指标	基于潮流,某些条件下代价高
两物理量的比值,不需求临界值	灵敏度	快速,适于在线应用	任何	非线性	不准确	系统全局指标	高度非线性
	ISPS指标	较快	任何			系统全局指标	是灵敏度与特征子空间的结合
两物理量的比值,需求临界值	试验函数	慢	任何	二次型	较准确	系统全局指标	需事先判断关键节点
	二阶性能指标	较快	潮流	准线性	较准确	系统全局指标	需事先判断关键节点
潮流方程的有解条件	L 指标	快	限传统潮流	非线性	不准确	简单系统指标应用于全局	快速,但是无法考虑无功限制
	就地安全性指标	快速	潮流	线性	较准确	简化系统指标	主要用于判断弱区域、弱节点
	降阶雅可比矩阵	中等	潮流	非线性	不准确	简化系统指标	对大系统提高计算速度较多
利用多潮流解的性质	能量函数指标	中等	潮流	二次型	较准确	系统全局指标	难以用于复杂系统模型
	V IPI指标	较快	潮流	准线性	较准确	系统全局指标	无法提供其他信息

5 结语

从国外一些大的电力系统事故的分析来看,发电电压崩溃的一个主要原因就是没有适合于本系统的电压稳定性指标,无法预计负荷增长或事故发生后可能导致的电压不稳定崩溃的程度和范围,难以拟定预防和校正的具体措施。因此,建立一个实用的、能够准确评价当前系统状况和事故后果的电压稳定性指标系统是十分必要的。

电压稳定性指标有很多类型,他们各有特点,很难说哪一个指标是最好的。规划设计阶段、正常运行和控制校正阶段的指标要求应有所不同。对于一具体的电力系统,可能有的指标比较适用,而有的可能不合适。因此需要针对各个实际电力系统研究开发一套适用的电压稳定性指标。

参考文献:

[1] IEEE System Dynamic Performance Subcommittee of the Power System Engineering Committee of the PES. Voltage stability of

power systems: concepts, analytical tools, and industry experience[R]. Technical Report 90TH0358-2-PWR, IEEE, 1990.

[2] Taylor C.W. Power system voltage stability[M]. New York McGraw-Hill 1994.

[3] IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publication. Voltage stability assessment, procedure and guides [R]. 1998.

[4] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York McGraw-Hill 1994.

[5] CIGRE Task Force 38.02.11 CIGRE Technical Brochure. Indices predicting voltage collapse including dynamic phenomena [J]. Electra. 1995(159): 135-147.

[6] 袁骏,段献忠,何仰赞,等. 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] Lee B, Ajarapu V. Invariant subspace parametric sensitivity (ISPS) of structure-preserving power system models[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1996, 11(2).

[8] Benizi A, Bresesti P, Marannino P, et al. System-area operating margin assessment and security enhancement against voltage collapse[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1996, 11(3).

[9] Lof P A, Smed T, Anderson G, et al. Fast calculation of a voltage stability index [J]. IEEE Transactions on PWRs, 1992, 7(1).

- [10] 冯治鸿,刘取,周双喜,等.多机电系统电压静态稳定性的特征结构分析法[J].清华大学学报,1991,31(4).
- [11] Canizares C A, de Souza A C Z, Quintana V H. Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1996, 11(3).
- [12] Bernizzi A, Finazzi P, Dosi D, *et al.* First and second order methods for voltage collapse assessment and security enhancement[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1998, 13(2).
- [13] Kessel P, Glavitsch H. Estimating the voltage stability of a power system[J]. IEEE Transactions of Power Delivery, 1986, 3(3).
- [14] Tamura T, Sakamoto K, Tayama Y. Current issues in the analysis of voltage instability phenomena[C]. Proc Bulk Power System Voltage Phenomena-Voltage Stability and Security, EL-6183, EPRI, January 1989.
- [15] Iba K, Suzuki H, Egawa M, *et al.* Calculation of critical loading condition with nose curve using homotopy continuation method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2).
- [16] 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(4).
- [17] Iba K, Suzuki H, Egawa M, *et al.* Calculation of critical loading condition with nose curve using homotopy continuation method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2).
- [18] Ajarapu V, Christy C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis[J]. IEEE Trans PWRs, 1992, 7(1).
- [19] Chiang H D, Flueck A J, Shah K S, *et al.* CPFLOW: A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to bad and generation variations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2).
- [20] Canizares C A, Alvarado F L. Point of collapse and continuation methods for large ac/dc systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1).
- [21] Nagao T, Tanaka K, Takenaka K. Development of static and simulation programs for voltage stability studies of bulk power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1).
- [22] Overbye T J, DeMarco C L. Voltage security enhancement using energy based sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3).
- [23] Dobson I, Lu Liming. New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1993, 8(3).
- [24] CIGRE WG 39.02 (Control Center Performance). Possibilities and expectations for improved man machine interface in power system control[R]. Proc CIGRE, paper 35/39-03, 1992.
- [25] 程浩忠.电力系统电压崩溃临界状态的近似算法[J].电力系统自动化,1996(5).
- [26] 朱振青,杨晓广,周阁,等.电力系统电压稳定性分析的实用算法[J].电网技术,1998(4).
- [27] Mohamed A, Jasmon G B. A new clustering technique for power system voltage stability analysis[J]. Electric Machines and Power Systems, 1995, 23(4).
- [28] 孙晓钟,段献忠,何仰赞.负荷节点电压稳定性就地安全指标研究[J].电力系统自动化,1998(9).
-
- 收稿日期: 2000-03-27; 改回日期: 2000-06-30
- 作者简介:
- 周双喜(1941-),教授,博士生导师,从事电力系统分析与控制方面的研究;
- 姜勇(1974-),硕士研究生,从事电力系统电压稳定性方面的研究;
- 朱凌志(1975-),博士研究生,从事电力系统电压稳定性方面的研究
- (编辑 陈定保)

《中国电机工程学报》和《电网技术》荣获 《CAJ-CD规范》执行优秀奖

由电网技术杂志社编辑出版的《电网技术》杂志和《中国电机工程学报》认真执行《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范》(国家新闻出版署1999.1颁布),在中国学术期刊(光盘版)编辑委员会和《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范》执行评优活动组织委员会联合举办的首届《CAJ-CD规范》执行评优活动中,主要规

范数据达到标准要求,双双荣获《CAJ-CD规范》执行优秀奖。

参加此次评比的期刊有190多种,获此《CAJ-CD规范》执行优秀奖的有79种,占参评期刊总数的40%,占科技期刊总数的16%。