

电力系统静态电压稳定性在线监控(一)

——一种可在线应用的计及负荷静态特性的电压稳定指标

傅 旭,王锡凡
(西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘要: 基于局部量测数据和负荷静态特性,提出了一种可在线应用的节点静态电压稳定指标。首先介绍了 ZIP 负荷模型,然后用戴维南等值电路简化系统,将线路电流表达式整理成实部和虚部,消去负荷有功后代入 ZIP 负荷模型中的无功表达式得二次方程式,用根判别式得到以无功表示的电压稳定指标 VSIQ;同理得以有功表示的电压稳定指标 VSIP;取两者中的较小值作为节点电压稳定指标 VSI。比较各节点 VSI,最小值对应的节点即为系统最薄弱节点。以 IEEE 14 节点和 IEEE 30 节点系统为例,仿真系统在不同负荷特性下 VSI 的变化曲线。结果显示:恒定功率分量所占比例越大则节点 VSI 越小,电压稳定性越差;恒定功率比重相等情况下,恒定电流分量比重越大,节点电压稳定性越差。

关键词: 电压稳定; 节点电压稳定指标; 负荷静态特性

中图分类号: TM 712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)08-0023-04

0 引言

近年来,电压不安全已经成为限制电力传输的主要因素之一。在系统运行过程中,运行人员不但需要知道电压稳定与否,还需要知道电压稳定的程度。为此,需要建立物理意义明确、计算速度快的电压稳定指标。迄今为止,研究人员从不同的角度提出了多种电压稳定指标,总体分成两类:裕度指标和状态指标。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,但涉及临界点的求取,计算量较大,其计算方法有直接法和延拓潮流法^[1-5]两类。为减少裕度指标的计算量,许多文献提出了各种不同的计算稳定极限的实用方法^[6,7]。状态指标包括各类灵敏度指标^[8]、特征值和奇异值指标^[9,10]等。灵敏度指标实际上将功率极限点作为电压稳定的判据;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^[9]或特征值分解^[10]判定系统的电压稳定情况。

尽管许多电压稳定指标已被提出,但将其在线应用依然存在计算速度和效率上的不理想,尤其重要的是目前快速计算节点电压稳定指标的方法中,负荷模型一般都取恒定功率模型^[11],而电压稳定很大程度上受负荷特性的影响^[12-14],计及负荷特性是

十分必要的。例如,对于恒定功率负荷,电压稳定极限对应最大功率传输点;然而对于由恒定功率、恒定电流和恒定阻抗组成的 ZIP 负荷而言,电压失稳可能发生在最大功率传输点以外,即 PV 曲线的下半支。可见,用恒定功率负荷可能导致悲观甚至是错误的结论。针对这种情况,本文提出了一种可在线应用的计及负荷特性的节点静态电压稳定指标。IEEE 14 节点和 IEEE 30 节点的仿真表明本文所提指标可精确反映负荷特性对电压稳定性的影响,具有计算量小、速度快等特点,可用于电力系统运行状态的实时监视。

1 负荷静态特性的考虑

用来衡量节点电压稳定性的指标必须计及负荷特性的影响,而这方面的讨论一直是静态电压稳定研究的薄弱环节。

以 IEEE 14 节点系统为例,当 14 节点负荷模型采用式(1)所示的 ZIP 负荷模型,其他节点采用恒定功率负荷模型,逐渐增加节点 14 的负荷,其临界负荷系数 $k(t)$ 如表 1 所示。

表 1 不同 ZIP 组成时,节点 14 的临界负荷系数
Tab.1 Critical load parameters of bus 14 with different ZIP components

PQ/%	Z/%	I/%	$k(t)/k(t_0)$
100	0	0	5.3
50	25	25	7.3
25	75	0	12.1
0	50	50	∞

$$\begin{aligned} P_k &= k(t) (P_{\text{con}} + \alpha_p U + \beta_p U^2) \\ Q_k &= k(t) (Q_{\text{con}} + \alpha_q U + \beta_q U^2) \end{aligned} \quad (1)$$

由表 1 可见, 负荷静态特性对电压稳定有重要的影响, 其中恒定阻抗和恒定电流分量越大, 临界负荷系数越大。这种现象可以用系统 PV 曲线和负荷特性曲线的交点存在性来解释。当负荷逐渐增大时, 对于恒定功率负荷而言, 系统在鼻点(最大功率点)达到临界状态(鞍点分歧), 而对于存在恒定阻抗或恒定电流分量的负荷模型而言, 电压失稳(负荷特性曲线和系统 PV 曲线相切)并不是发生在鼻点, 而是越过最大功率点后, 发生在比最大功率小的某点(PV 曲线下半支), 其极端情况是如果负荷仅为恒定阻抗, 则系统 PV 曲线和负荷特性曲线始终存在交点, 不存在失去静态电压稳定问题。

因此本文采用 ZIP 负荷静态模型建立电压稳定指标。

2 计及负荷静态特性的电压稳定指标

2.1 戴维南等值电路

任意时刻, 对电力系统某一节点而言, 都可以等值为一电压源经过等值阻抗向所研究节点供电的戴维南等值电路。本文采用文献[11]的方法计算任意节点 k 的戴维南等值参数, 简叙如下。

图 1 为节点 k 的戴维南等值电路。

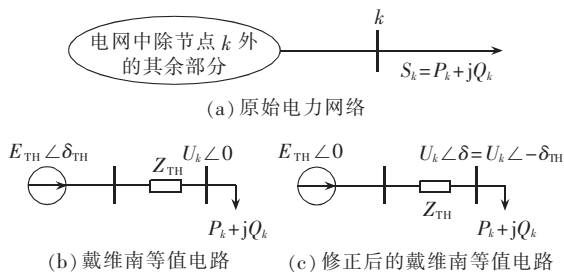


图 1 节点 k 的戴维南等值电路

Fig.1 The Thevenin equivalent circuits of bus k

如图 1(a)所示, 设节点 k 的负荷为 $P_k + jQ_k$, 则根据戴维南等值定理, 可将其等效为图 1(b)所示的等值电路。根据电路的欧姆定律, 节点 k 的电压可表示为

$$\begin{aligned} U_k &= E_{\text{TH}} - Z_{\text{TH}} I_{\text{L}(k)} \\ I_{\text{L}(k)} &= \hat{S}_k / \hat{U}_k \end{aligned} \quad (2)$$

可得:

$$U_k + j0 = E_r + jE_x - (R + jX) \left(\frac{P_k}{U_k} - j \frac{Q_k}{U_k} \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} U_k E_r + 0 \cdot E_x - P_k R_{\text{TH}} - Q_k X_{\text{TH}} &= U_k^2 \\ 0 \cdot E_r + U_k E_x + Q_k R_{\text{TH}} - P_k X_{\text{TH}} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

上式含有 4 个未知参数, 所以还需要一个运行点: $S_{k2} = P_{k2} + jQ_{k2}$ 。列出类似方程, 联立得到:

$$\begin{bmatrix} U_{k1} & 0 & -P_{k1} & -Q_{k1} \\ 0 & U_{k1} & Q_{k1} & -P_{k1} \\ U_{k2} & 0 & -P_{k2} & -Q_{k2} \\ 0 & U_{k2} & Q_{k2} & -P_{k2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_x \\ R_{\text{TH}} \\ X_{\text{TH}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{k1}^2 \\ 0 \\ U_{k2}^2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可以快速简单地计算出所研究节点的戴维南等值参数, 如图 1(b)所示, 进一步以戴维南等值电压源的角度为参考, 可得最终的等值电路如图 1(c)所示。

2.2 计及 ZIP 负荷特性的节点电压稳定指标

图 1(c)中, 线路电流可以表示为

$$I_{\text{L}} = \frac{E_{\text{TH}} \angle 0 - U_k \angle \delta}{R_{\text{TH}} + jX_{\text{TH}}} = \frac{P_k - jQ_k}{U_k \angle -\delta} \quad (6)$$

整理式(6), 并分成实部和虚部, 得:

$$\begin{aligned} E_{\text{TH}} U_k \cos \delta - U_k^2 &= R_{\text{TH}} P_k + X_{\text{TH}} Q_k \\ -E_{\text{TH}} U_k \sin \delta &= X_{\text{TH}} P_k - R_{\text{TH}} Q_k \end{aligned} \quad (7)$$

消去式(7)的 P_k 得二次方程:

$$U_k^2 - \left(\frac{R_{\text{TH}}}{X_{\text{TH}}} \sin \delta + \cos \delta \right) E_{\text{TH}} U_k + \left(X_{\text{TH}} + \frac{R_{\text{TH}}^2}{X_{\text{TH}}} \right) Q_k = 0 \quad (8)$$

将式(1) ZIP 负荷模型中的 Q_k 代入, 得:

$$\begin{aligned} 0 &= U_k^2 - \left(\frac{R_{\text{TH}}}{X_{\text{TH}}} \sin \delta + \cos \delta \right) E_{\text{TH}} U_k + \\ &\quad \left(X_{\text{TH}} + \frac{R_{\text{TH}}^2}{X_{\text{TH}}} \right) k(t) (Q_{\text{con}} + \alpha_q U + \beta_q U^2) \end{aligned} \quad (9)$$

展开得:

$$a U_k^2 + b U_k + c = 0 \quad (10)$$

$$a = \left(X_{\text{TH}} + \frac{R_{\text{TH}}^2}{X_{\text{TH}}} \right) \beta_q k(t) + 1.0$$

$$b = \left(X_{\text{TH}} + \frac{R_{\text{TH}}^2}{X_{\text{TH}}} \right) \alpha_q k(t) - \left(\frac{R_{\text{TH}}}{X_{\text{TH}}} \sin \delta + \cos \delta \right) E_{\text{TH}} \quad (11)$$

$$c = \left(X_{\text{TH}} + \frac{R_{\text{TH}}^2}{X_{\text{TH}}} \right) Q_{\text{con}} k(t)$$

此二次方程如果有解, 则其根判别式

$$\Delta = 4ac - b^2 \leq 0 \Rightarrow 4ac / b^2 \leq 1 \quad (12)$$

据此得到节点 k 以无功表示的电压稳定指标为

$$\text{VSIQ}(k) = 1 - 4ac / b^2 \geq 0 \quad (13)$$

类似的, 可以通过式(7)消去无功 Q_k , 得到以有功表示的二次方程:

$$U_k^2 + \left(\frac{X_{\text{TH}}}{R_{\text{TH}}} \sin \delta - \cos \delta \right) E_{\text{TH}} U_k + \left(R_{\text{TH}} + \frac{X_{\text{TH}}^2}{R_{\text{TH}}} \right) P_k = 0 \quad (14)$$

将式(1)所示 ZIP 负荷模型中的 P_k 代入, 得到电压稳定指标为

$$\text{VSIP}(k) = 1 - 4ac / b^2 \geq 0 \quad (15)$$

$$a = \left(R_{\text{TH}} + \frac{X_{\text{TH}}^2}{R_{\text{TH}}} \right) \beta_p k(t) + 1.0$$

$$b = \left(\frac{X_{\text{TH}}}{R_{\text{TH}}} \sin \delta - \cos \delta \right) E_{\text{TH}} + \left(R_{\text{TH}} + \frac{X_{\text{TH}}^2}{R_{\text{TH}}} \right) \alpha_p k(t) \quad (16)$$

$$c = \left(R_{\text{TH}} + \frac{X_{\text{TH}}^2}{R_{\text{TH}}} \right) P_{\text{con}} k(t)$$

取两者中的较小值作为节点 k 的电压稳定指

标,如式(17)所示。其数值越接近于 0,节点 k 越临近电压失稳。

$$VSI(k)=\min(VSIP(k),VSIQ(k)) \tag{17}$$

比较各节点的 $VSI(k)$ 指标,其中最小值所对应的节点即是系统的最薄弱节点。通过这个指标,不但可以找出系统的最薄弱节点,而且可以定性地分析是节点吸收有功功率过大还是无功功率过大造成此节点电压稳定水平较低。具体而言,如果 $VSIP(k)$ 数值较低,则可认为此节点的有功负荷过大造成此节点电压稳定性水平较低。反之,如果 $VSIQ(k)$ 数值较低,则可认为此节点无功负荷过大造成此节点电压稳定性水平较低。

由式(11)(16),当 ZIP 负荷模型中不含恒定功率分量即 $Q_{con}=0,P_{con}=0$ 时,式(11)(16)中的 $c=0$,则 $VSI(k) \equiv 1.0$,节点 k 不存在电压失稳问题。这和实际情况相符,因为对只由恒定阻抗和/或恒定电流组成的负荷而言,负荷特性曲线与系统的 PV 曲线恒存在交点。

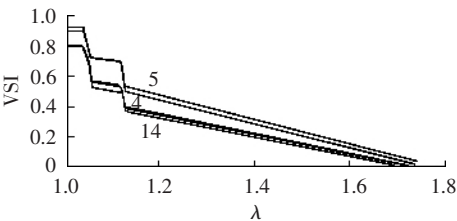
3 仿真分析

本节采用 IEEE 14 节点和 IEEE 30 节点系统作为仿真算例,验证了本文所提指标的有效性。潮流计算中,所有节点的负荷系数 $k(t)$ 按照其基荷下负荷系数 $k(t_0)$ 的 1% 统一增加,当 PV 节点无功越界时,将 PV 节点转换为 PQ 节点,并设该节点无功为此节点的最大无功值,直到潮流不收敛,并认为此时达到静态电压稳定极限。

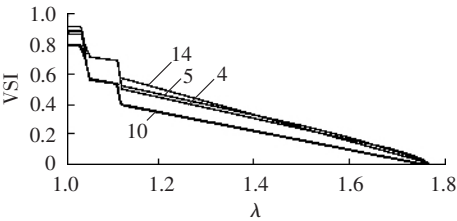
3.1 IEEE 14 节点系统

IEEE 14 节点系统有 4 个 PV 节点和 9 个 PQ 节点,269.2 MV·A 负荷。图 2 为系统在不同负荷特性下的 VSI 变化曲线($\lambda=k(t)/k(t_0)$,下同)。

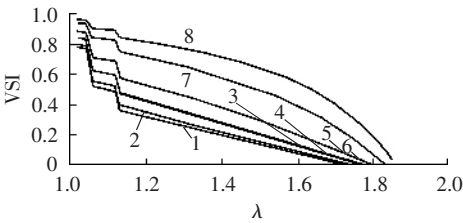
其中,图 2(a)给出了 IEEE 14 节点系统中所有节点都为恒定功率模型时各节点电压稳定指标随负荷系数 $k(t)$ 的变化。可以看出,节点 14 的指标最低,为系统最薄弱节点。



(a)恒定功率模型



(b)50% 恒定功率、25% 恒定阻抗、25% 恒定电流的 ZIP 模型



(c)不同 ZIP 组成

图 2 IEEE14 节点系统不同负荷特性下的 VSI 变化曲线

Fig.2 Variations of VSI on different load static characters of IEEE 14-bus system

将节点 14 改为由 50 % 恒定功率、25 % 恒定阻抗和 25 % 恒定电流组成的 ZIP 负荷时,各节点指标如图 2(b)所示。可以看出,节点 14 的电压稳定指标有所提高,节点 10 成为最薄弱节点。这是符合实际情况的,由于节点 14 的恒定阻抗和恒定电流分量增加,其负荷特性“变好”,所以其电压稳定指标有所提高,从而也可看出本文指标对负荷特性很敏感,可反映负荷特性的影响。图 2(b)中,当负荷系数 $k(t)$ 增加到基荷负荷系数 $k(t_0)$ 的 105 % 和 110 % 时,所有节点的指标突然降低,这是由于 PV 节点 2 和 3 转为 PQ 节点造成的。

为进一步考察本文所提指标可精确反映负荷特性对电压稳定性的影响,图 2(c)给出了不同的 ZIP 组成时,节点 14 的电压稳定指标变化曲线。各曲线对应的 ZIP 组成见表 2。

表 2 不同的 ZIP 组成
Tab.2 Different ZIP components

曲线编号	PQ/%	Z/%	I/%	$k(t)/\%$
1	100	0	0	173
2	90	0	10	175
3	70	0	30	177
4	70	30	0	179
5	50	25	25	180
6	50	50	0	181
7	25	50	25	183
8	15	85	0	185

从图 2(c)中可以清楚看出不同的 ZIP 组成对节点电压稳定性的影响。可以得出:恒定功率所占的比重越大节点电压稳定指标越小,从而电压稳定性越差;在恒定功率比重相等的情况下,恒定电流分量所占比重越大,节点电压稳定性越差。

3.2 IEEE 30 节点系统

图 3 是 IEEE 30 节点系统在不同负荷特性下的 VSI 变化曲线。

图 3(a)是系统所有节点都是恒定功率负荷特性时,IEEE 30 节点系统的各个节点 VSI 指标变化曲线。从中可以看出节点 30 的 VSI 指标最低,是系统的最薄弱节点,节点 3 的 VSI 指标最高,是最不容易发生电压失稳的节点。由于发电机达到无功极限故 VSI 指标出现了几次突然的降低。

可以看出,不考虑发电机达到无功极限时,此指

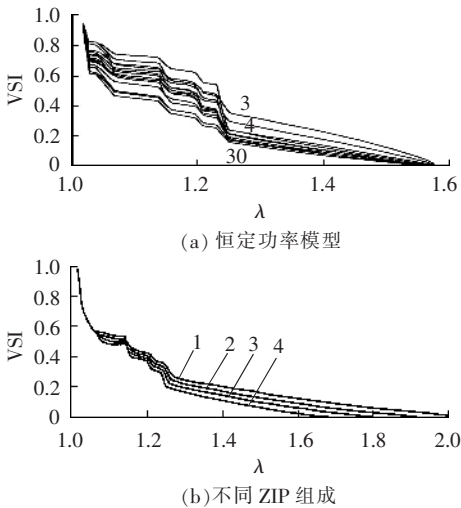


图 3 IEEE 30 节点系统不同负荷特性下的 VSI 变化曲线

Fig.3 Variations of VSI on different load static characters of IEEE 30-bus system

标具有很好的线性特性。如何克服发电机达到无功极限时造成的非线性是有待进一步研究的内容。

图 3(b)是节点 30 在不同静态负荷特性下 VSI 指标的变化曲线。各曲线对应的 ZIP 组成见表 3。

表 3 不同的 ZIP 组成
Tab.3 Different ZIP components

编号	PQ/%	Z/%	I/%	k(t)/%
1	60	40	0	207
2	60	20	20	194
3	60	0	40	183
4	80	20	0	169

从图 3(b)中可以得出与图 2(c)类似的规律:在负荷系数 $k(t)$ 逐渐增大的过程中,负荷模型中恒定功率分量对电压稳定影响最大,随着恒定功率分量所占比例的增大,节点 30 的电压稳定指标顺序降低;而当恒定功率分量所占比例相同的情况下,电压高次项所占比例越大,电压稳定指标越高。可见电压的高次方分量有利于节点电压的稳定性。

4 结论

本文提出的节点电压稳定指标及分析方法简单,计算速度快,可反映不同负荷静态特性对电压稳定性的影响,具有实用价值。IEEE 14 节点和 IEEE 30 节点的数值仿真分析表明,所提方法可以很好地反映系统的静态电压稳定水平,可用于电力系统的静态电压稳定性的在线监视。如何克服发电机达到无功极限时造成的非线性是本文将要进一步研究的内容。

参考文献:

[1] NIZARES C A C,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.

[2] AJJARPU V. Identification of steady state voltage stability in power systems[J]. *Int. J. of Electric Power & Energy Systems*,1991,(11):43-46.

[3] van CUTSEM T.A method to compute reactive power margins with respect to voltage collapse[J]. *IEEE Trans. on Power Systems*,1991,6(1):145-156.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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*,1997,21(9):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*,1997,21(9):21-25.

[9] 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.

[10] GAO B,MORSION G K. Voltage stability evaluation using modal analysis[J]. *IEEE Trans. on Power Systems*,1992,7(4):1529-1542.

[11] 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.

[12] PAL M K. Voltage stability conditions considering load characteristics[J]. *IEEE Trans. on Power Systems*,1992,7(2):243-249.

[13] OVERBYE T J. Effects of load modeling on analysis of power system voltage stability[J]. *Int. Elect. Power Energy Syst.*,1994,16(5):329-338.

[14] 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.

(责任编辑:李育燕)

(下转第 31 页 continued on page 31)

On-line voltage stability monitoring for electric power system
Part 1: On-line voltage stability index considering
load static characteristics

FU Xu, WANG Xi-fan

(Department of Electric Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the load static characteristics and local measurements, a new index for on-line static voltage stability analysis is proposed. The *ZIP* load model is introduced and the equivalent line current is divided into real and imaginary parts based on Thevenin equivalent circuit. After eliminating the active power and substituting the reactive power of *ZIP* load for the imaginary part, a quadratic is obtained, which is processed by the root discriminant to deduce a voltage stability index *VSIQ*. Similarly, eliminating the reactive power, *VSIP* is derived. The smaller of *VSIQ* and *VSIP* becomes the bus voltage stability index *VSI* and the bus with the smallest *VSI* is the weakest one of system. The proposed index is tested on IEEE 14-bus and IEEE 30-bus systems, and the simulative results indicate that, the more the percentage of constant power is, the smaller the *VSI* will be. When the percentage of constant power is identical, the more the percentage of constant current is, the smaller the *VSI* will be.

This project is supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China (2004CB217905).

Key words: voltage stability; bus voltage stability index; load static characteristics