

电力系统静态电压稳定性在线监控(二) ——一种在线确定负荷裕度的方法

傅 旭,王锡凡

(西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘要: 提出了一种可在线应用的静态电压稳定裕度计算方法。首先基于计及负荷静态特性的节点静态电压稳定指标(VSI),用直线拟合VSI变化曲线,计算系统最大负荷系数,推导出负荷系数裕度指标,然后将此指标和发电机无功越界裕度指标配合使用,从而可以较好地对系统的负荷裕度进行在线估计。IEEE 30节点的仿真表明该方法应用简单、计算速度快,可用于电力系统运行状态的实时监控。

关键词: 负荷裕度; 静态电压稳定; 在线监控

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)09-0025-04

0 引言

目前尽管许多电压稳定指标已被提出^[1~8],但将其在线应用依然不理想,主要存在两个问题:需要不同程度的复杂计算,应用电力系统的在线监控存在一定问题;目前的快速计算节点电压稳定指标的方法中,负荷模型一般都是取恒定功率模型,而电压稳定很大程度上受负荷特性的影响^[9~11],在电压稳定分析中计及负荷特性是十分必要的,用恒定功率负荷可能导致错误的结论。

针对这种情况,本文基于文献[12]所提的计及负荷静态特性的节点静态电压稳定指标,提出了系统负荷裕度的计算方法。IEEE 30节点的仿真表明本文所提方法可以较好地估计系统负荷裕度,具有计算量小、速度快等特点。

1 计及负荷静态特性的电压稳定指标^[12]

文献[12]提出了一种可计及负荷静态特性的节点静态电压稳定指标,简述如下。

负荷的ZIP模型如式(1)所示。

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

式中 $k(t)$ 是一个独立变量,表示系统负荷需求随时间的变化,称为负荷系数。

任意时刻,对电力系统某一节点而言,都可以等值为图1所示的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[13]的方法计算任意节点 k 的戴维南等值参数。

根据图1(b)可以写出如下方程:

$$\begin{aligned} E_{TH} U_k \cos \delta - U_k^2 &= R_{TH} P_{ZIP} + X_{TH} Q_{ZIP} \\ -E_{TH} U_k \sin \delta &= X_{TH} P_{ZIP} - R_{TH} Q_{ZIP} \end{aligned} \quad (2)$$

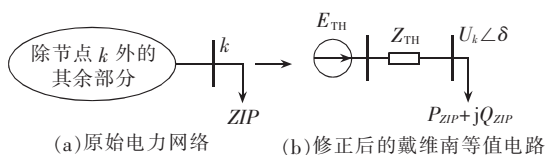


图1 节点 k 的戴维南等值电路

Fig.1 Thevenin equivalent circuit of node k

分别消去 P_{ZIP}, Q_{ZIP} 并将式(1)中的ZIP负荷模型代入,可得保留有功和无功的2个二次方程:

$$\begin{aligned} a_1 U_k^2 + b_1 U_k + c_1 &= 0 \\ a_2 U_k^2 + b_2 U_k + c_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} a_1 &= (X_{TH} + \frac{R_{TH}^2}{X_{TH}}) \beta_p k(t) + 1.0 \\ b_1 &= (X_{TH} + \frac{R_{TH}^2}{X_{TH}}) \alpha_q k(t) - (\frac{R_{TH}}{X_{TH}} \sin \delta + \cos \delta) E_{TH} \\ c_1 &= (X_{TH} + \frac{R_{TH}^2}{X_{TH}}) Q_{con} k(t) \\ a_2 &= (R_{TH} + \frac{X_{TH}^2}{R_{TH}}) \beta_p k(t) + 1.0 \\ b_2 &= (\frac{X_{TH}}{R_{TH}} \sin \delta - \cos \delta) E_{TH} + (R_{TH} + \frac{X_{TH}^2}{R_{TH}}) \alpha_p k(t) \\ c_2 &= (R_{TH} + \frac{X_{TH}^2}{R_{TH}}) P_{con} k(t) \end{aligned} \quad (4)$$

根据二次方程根判别式可得:

$$\begin{aligned} VSIP(k) &= 1 - 4a_1 c_1 / b_1^2 \geq 0 \\ VSIQ(k) &= 1 - 4a_2 c_2 / b_2^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

取两者中的较小值作为节点 k 的电压稳定指标:

$$VSI(k) = \min(VSIP(k), VSIQ(k)) \quad (6)$$

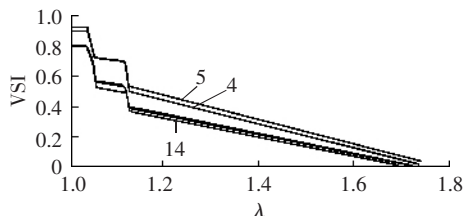
所有节点的VSI指标中的最小值可作为系统的电压稳定指标:

$$VSI = \min(VSI(k)) \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

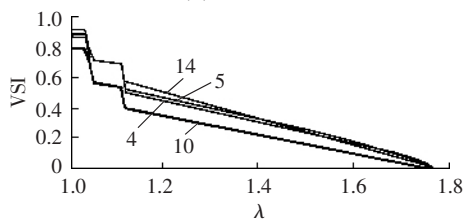
2 系统负荷裕度指标(VSM)的计算

2.1 根据节点 VSI 指标确定的负荷裕度 LS

以 IEEE 14 节点系统为例,各节点的 VSI 指标变化曲线如图 2 所示($\lambda = k(t)/k(t_0)$,下同)。



(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

图 2 IEEE 14 系统的 VSI 变化曲线

Fig.2 VSIs of IEEE 14-bus system

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的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。当将节点 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的增加,其负荷特性“变好”,所以其电压稳定指标有所提高,从而也可看出此指标对负荷特性很敏感,可反映负荷特性的影响。图 2 中,当负荷系数 $k(t)$ 增加到基荷的负荷系数 $k(t_0)$ 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。

由图 2 可见,随着负荷系数的增加,VSI 逐渐降低到 0。在每两次突变之间 VSI 呈现出很好的线性特性。根据此特性本文提出了利用直线拟合图 2 中的曲线,步骤如下。

a. 确定系统最薄弱节点 p 。

$$p = \min(VSI(j)) \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

式中 N 为系统的负荷节点数目。

b. 对节点 p 的 VSI 指标进行直线拟合。

根据 t_1, t_2 两个采样点,由直线两点式公式得:

$$VSI(p) = ak(t_i) + b \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

由式(9)可解出系数 a, b 。

c. 计算负荷裕度指标 LS。

令式(9)的左端为 0,则可计算出系统的最大负荷系数 k_{cri} 为

$$k_{cri} = -b/a \quad (10)$$

从而可确定负荷裕度为

$$LS = k_{cri} - k(t_2) \quad (11)$$

2.2 发电机无功越界的负荷裕度 GS

从图 2 可以看出由于发电机无功越限的影响,VSI 指标出现突变现象,故对发电机的无功越限进行估计十分必要。本文采用如下方法计算发电机达到其无功极限的负荷裕度。

a. 已知 k_1 时的发电机 g ($g = 1, 2, \dots, G$) 无功为 $Q_{g(k_1)}$, k_2 时的发电机 g 无功为 $Q_{g(k_2)}$,由此可得出发电机 g 无功变化率为

$$v(g) = (Q_{g(k_2)} - Q_{g(k_1)}) / (k_2 - k_1) \quad (12)$$

b. 估计发电机 g 达到无功极限的负荷系数裕度为

$$k_{PV-PQ(g)} = (Q_{\max(g)} - Q_{g(k_2)}) / v(g) \quad (13)$$

式中 $Q_{\max(g)}$ 为发电机 g 的无功极限。

c. 取所有发电机的 $k_{PV-PQ(g)}$ 的最小值作为系统下一个 PV 节点转换为 PQ 节点时的负荷系数裕度:

$$GS = \min(k_{PV-PQ(g)}) \quad g = 1, 2, \dots, G \quad (14)$$

式中 G 为系统中的发电机数目。

2.3 系统负荷裕度指标 VSM

将 LS 和 GS 指标配合使用,可以对系统的负荷裕度指标 VSM 进行在线评估,步骤如下。

a. 若 $LS > LS_{cri}$,此时取 $VSM = LS$ 。这是基于:当 $LS > LS_{cri}$ 时,认为系统具有足够的负荷裕度,发电机无功越界不会导致系统失去静态电压稳定。 LS_{cri} 是预先设定的一个门槛值,其值可由系统的具体要求确定。

b. 当 $0 \leq LS \leq LS_{cri}$ 时,需要检查发电机的无功越限指标,因为当 LS 处于这个区间时,系统的裕度已经不是足够大,发电机的无功越限可能导致系统突然失去静态电压稳定性。本文按照如下方法确定系统负荷裕度:若 $GS \geq LS_{cri}$,则 $VSM = LS$;反之,若 $0 \leq GS \leq LS_{cri}$,则取 $VSM = GS$ 。

c. 若所有发电机都转换为 PQ 节点,取 $VSM = LS$,因为此后系统的 LS 指标不会突变, LS 指标呈现出很好的线性特性。

计算出系统负荷裕度指标 VSM 后,需要进一步判断系统的稳定情况,当系统的 VSM 指标低于临界值 VSM_{cri} 时,则可以认为系统处于不安全状态,此时需要采取预防等控制。具体程序流程如图 3 所示。

2.4 提高准确度的方法

在系统负荷水平增加过程中,当发电机无功越限时,潮流方程的结构发生变化,导致系统 PV 曲线出现不连续或者连续但不光滑的现象。由于本文方法本质上是基于系统当前状态得出的负荷裕度指标,无法精确考虑发电机无功越限的影响,这使得在负荷水平较低时预测结果偏于乐观。实际上基于当

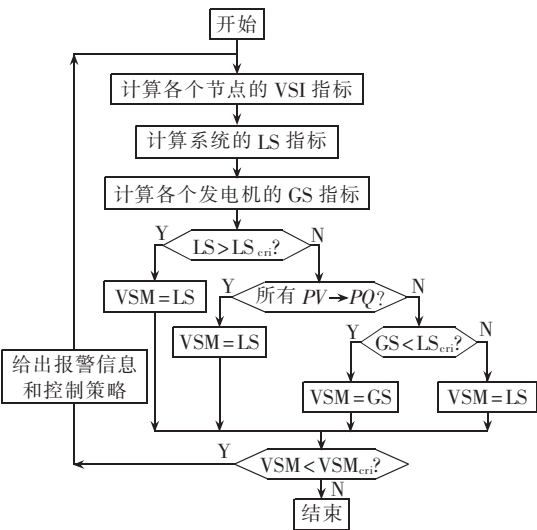


图 3 程序流程

Fig.3 Flowchart of computation procedure

前系统状态的各种负荷裕度指标普遍存在类似问题。为减少估算误差,在实际应用中可采用文献[14]的二分法提高准确度。具体如下:

- a. 由本文方法预测一个负荷裕度指标后,在预测的负荷水平下计算潮流,若收敛则取此指标作为负荷裕度,停止计算;
- b. 若不收敛则如图 4 所示,利用二分搜索法逐次降低负荷水平直到得到一个收敛的潮流解;
- c. 在收敛的潮流解处再次用本文方法预测负荷裕度指标。

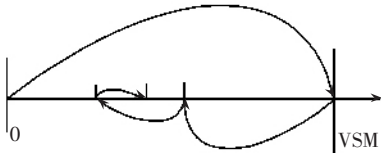


图 4 二分法示意图
Fig.4 Binary search

需要指出的是,文献[14]是连续利用二分法直到满足收敛判据,而本文只是利用二分法快速找到一个收敛的潮流解,然后再次利用本文方法计算负荷裕度指标。

通过上述方法可提高预测的负荷裕度指标的精度,但是这也意味着计算时间将有所增加。在实际应用中应该对计算精度和速度取一个合理的折衷。

3 仿真分析

本节采用 IEEE 30 节点系统作仿真算例,验证了所提方法的有效性。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,当潮流不收敛时,认为此时达到静态电压稳定极限。

图 5 为 IEEE 30 节点系统电压稳定指标变化曲线。图 5(a)给出了 IEEE 30 节点系统各个节点 VSI

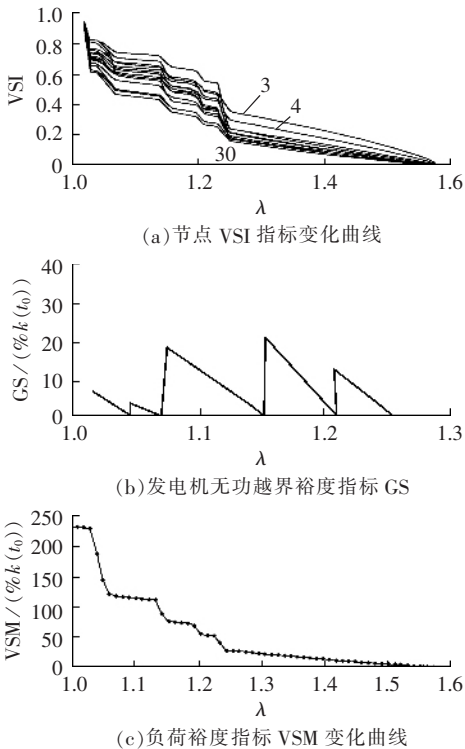


图 5 IEEE 30 系统的电压稳定指标变化曲线

Fig.5 Voltage stability index of IEEE 30-bus system

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。在负荷系数分别为 1.04,1.06,1.15,1.21,1.25 基荷时,由于发电机达到无功极限,VSI 指标出现了几次突然的降低。与此相对应,图 5(b)给出了发电机负荷裕度 GS 的变化曲线,每次 GS 指标为 0,都意味着一台发电机达到无功极限。

系统的 VSM 指标变化曲线如图 5(c)所示。由于本文方法计算负荷裕度 LS 时,采用的节点静态电压稳定指标的变化曲线是基于文献[12]所提的可以考虑 ZIP 负荷静态特性的指标,故其实际上考虑了负荷静态特性的影响。从图 5(c)可看出,当不再出现 PV-PQ 的母线类型转换后,此指标的估计值非常准确,呈现出很好的线性特性和准确性。例如在负荷水平为 1.3 基荷时,VSM 的估计值为 26.84% 基荷,而实际值为 27.05% 基荷。

表 1 给出了在不同的负荷水平下本文方法预测的负荷裕度(第 2 列)和误差(第 4 列)。误差的计算公式如下:

$$e = (VSM_{pre} - VSM_{true}) / VSM_{true} \tag{15}$$

式中 VSM_{pre} 为预测的负荷裕度指标; VSM_{true} 为负荷裕度的真实值。

从表 1 可看出在负荷水平较低时,本文方法估计的负荷裕度偏于乐观,误差较大,但是此时系统距离临界负荷还较远,故影响并不大。随着负荷系数

表 1 负荷裕度指标对比
Tab.1 Comparison of loading margin

负荷水平 /(%基荷)	VSM/(%基荷)		估计误差 /%	耗时 /ms
	预测值	真实值		
100	231.46	57.05	305.70	1.593
120	55.43	37.05	32.20	1.508
125	29.46	32.05	-7.90	1.425
130	26.84	27.05	-0.77	1.486
135	21.40	22.05	-2.90	1.520
140	16.55	17.05	-2.90	1.516
150	7.01	7.05	-0.50	1.487

$k(t)$ 的增加,VSM 指标准确度显著增加,接近真实值。

表 2 给出了在负荷水平低于 125 % 时,使用本文 2.4 节提高精度的计算方法后的负荷裕度指标的误差对比,如表 2 的第 2,3 列所示。表 2 第 4 列给出了为提高计算准确度而需要进行的图 4 所示的二分搜索次数。

表 2 采用二分法计算结果
Tab.2 Results using binary search

负荷水平 /(%基荷)	与真实值误差/%		二分搜 索次数	耗时 /ms
	用二分法	不用二分法		
100	-0.87	305.70	3	3.451
120	-0.67	32.20	1	2.260

表 1 和表 2 的最后一列给出在主频 2.0 GHz 的 Pentium PC 机上运行时,本文方法的计算时间。从表 2 可看出当负荷水平较低(<125 %)时,为提高计算准确度使计算时间有所增加。

需要指出的是,文中方法在确定戴维南等值参数时假设缺少实时信息从而进行了 2 次潮流计算,以便获得 2 个运行点的潮流解,这是主要的耗时。如果已有 2 个历史采样点的信息,那么可以省去这 2 次潮流计算,从而本文方法的计算时间将会大幅度减少。

4 结论

a. 将发电机无功越界裕度指标 GS 和节点负荷裕度指标 LS 配合使用,提出了系统负荷裕度指标 VSM 的计算方法。

b. 本文方法计算的负荷裕度 LS 是基于文献 [12]所提的可以考虑 ZIP 负荷静态特性的指标,实际上考虑了负荷静态特性的影响;

c. 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,可用于电力系统的临界负荷能力的在线监视,为系统静态电压稳定预防控制提供参考。

参考文献:

[1] 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.
[2] AJJARAPU 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] 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.
[7] 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.
[8] GAO B,MORSION G K. Voltage stability evaluation using modal analysis [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,1992,7(4):1529-1542.
[9] PAL M K. Voltage stability conditions considering load characteristics [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,1992,7(1):243-249.
[10] XU W,MANSOUR Y. Voltage stability analysis using generic dynamic load models[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,1994,9(1):479-493.
[11] OVERBYE T J. Effects of load modeling on analysis of power system voltage stability[J]. **J. Int. Elect. Power Energy Syst.**,1994,16(5):329-338.
[12] 傅 旭,王锡凡. 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[J]. **电力自动化设备**,2005,25(8):23-26,31.
FU Xu,WANG Xi-fan. On-line voltage stability monitoring for electric power system. Part 1:On-line voltage stability index considering load static characteristics[J]. **Electric Power Automation Equipment**,2005,25(8):23-26,31.
[13] VU K,BEGOVIC' M M,NOVOSEL D,et al. Use of local measurements to estimate voltage-stability margin[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,1999,14(8):1029-1035.
[14] van CUTSEM T,MOISSE C,MAILHOT R. Determination of secure operating limits with respect to voltage collapse[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,1999,14(1):327-335.

(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,从事电力系统分析和安全控制方面的研究工作(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,从事电力系统分析及电力市场方面的研究工作。