

一种基于 V-I 特性的节点电压稳定快速判断方法

李宝国,鲁宝春,巴金祥

(辽宁工学院信息科学与工程学院,辽宁 锦州 121001)

摘要: 将简单系统基于 V-I 特性的电压稳定判别法成功地应用于复杂系统,推导出了判断负荷节点静态电压稳定性的公式。只需对系统进行两次常规潮流计算,即可根据公式迅速判断系统每一个节点的电压稳定性,同时计算出各个节点的电压稳定裕度。该方法简单、快速,可用于实时在线判断电压稳定性、确定系统的薄弱节点和薄弱区域,为分析控制电压稳定提供指导。系统算例验证了该方法的有效性。

关键词: 电力系统; V-I 特性; 电压稳定

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)11-0001-04

0 引言

电力系统稳定性问题一直是电力工作者研究的重要课题。长期以来,人们建立了一套比较完善的功角稳定性的理论体系。相比之下,电压稳定性的研究进展却相对缓慢。国内外学者对电压稳定问题进行了大量的研究并取得了很大的进展,但在很多方面仍然存在不同的看法,在电压失稳的机理方面,尚未完全取得共识。本文在文献[1,2]研究的基础上,提出了一种在复杂系统中更加实用的快速判断节点静态电压稳定性的新方法,该方法克服了文献[2]中方法的两大缺陷(其一是计算量较大,因而速度较慢;其二是只能判断系统稳定性,不能判断各个节点的稳定性,也不能寻找系统的薄弱节点),本文用该方法来判断系统各个节点的电压稳定性,取得了满意的效果。

1 简单系统的 V-I 静特性与节点静态电压稳定性分析

所谓 V-I 静特性,是指静态时节点电流向量的模值与电压向量模值之间的关系特性。对应的曲线被称为 V-I 静特性曲线,曲线上的点对应着系统的静态平衡点。

为了从机理上研究节点电压稳定,本文从图 1 所示的简单电路入手,研究其电压稳定性的判断方法。

图 1 中 E 为电源电动势; Z 为传输线复阻抗; I 为流过线路的电流向量; S 为负荷的复功率; U 为受

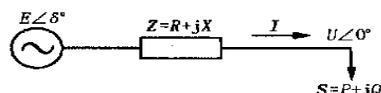


图 1 简单系统图

Fig. 1 Simple power system

端电压向量(参考向量)。由图 1 可得下式:

$$UI = S \tag{1}$$

$$IZ = E - U \tag{2}$$

式(1)即为负荷侧 V-I 静特性,其静特性曲线如图 2 的曲线 1 所示。

将式(2)两端取模得:

$$IZ = \sqrt{(E \cos \delta - U)^2 + (E \sin \delta)^2} \tag{3}$$

式(3)即为供应侧 V-I 静特性,其静特性曲线如图 2 的曲线 2 所示。

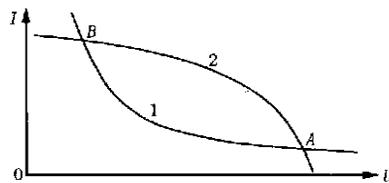


图 2 系统 V-I 特性

Fig. 2 V-I characteristics of power system

图 2 中,两特性曲线有两个交点,下面对交点的稳定性进行分析。

在交点 A 处,如果节点电压受到扰动有所下降,则供应侧电流的增量大于负荷电流的增量,即负荷的需求电流相对减小,使节点电压有所增加;如果节点电压受到扰动有所增加,则供应侧电流的增量小于负荷电流的增量,即负荷的需求电流相对增加,使节点电压有所下降。所以交点 A 是稳定的平衡点。该平衡点的特性是负荷侧特性曲线的斜率大于

基金项目: 辽宁省自然科学基金(001081); 辽宁工学院青年教师基金

供应侧特性曲线的斜率。

在交点 B 处,如果节点电压受到扰动有所下降,则供应侧电流的增量小于负荷电流需求的增量,即负荷的需求电流相对增加,使节点电压进一步下降,导致电压失稳;如果节点电压受到扰动有所增加,则供应侧电流的增量大于负荷电流需求的增量,即负荷的需求电流相对减小,使节点电压进一步增加,导致电压失稳。所以交点 B 是不稳定的平衡点。该平衡点的特性是负荷侧特性曲线的斜率小于供应侧特性曲线的斜率。

由上述分析,可得交点处的电压稳定判据如下(令交点处供应侧特性曲线的斜率为 K_G ,负荷侧特性曲线的斜率为 K_L):

当 $K_L > K_G$ 时,该节点电压是稳定的;

当 $K_L < K_G$ 时,该节点电压是不稳定的;

当 $K_L = K_G$ 时,该节点处于电压稳定临界状态。

下面就系统负荷为恒功率特性时,对上述判据进行分析。

由式(1)、(3)可求得平衡点处的斜率如下:

$$K_L = -\frac{S}{U^2} = -\frac{1}{Z_L} \quad (4)$$

$$K_G = -\frac{U^2}{Z^2 S} = -\frac{Z_L}{Z^2} \quad (5)$$

其中: Z_L 为负荷阻抗模; Z 为传输线阻抗模,所以

$$K_L - K_G = \frac{Z_L^2 - Z^2}{Z_L Z^2} \quad (6)$$

很明显,当 $K_L > K_G$ 时, $Z_L > Z$, 节点电压稳定;当 $K_L < K_G$ 时, $Z_L < Z$, 节点电压不稳定;当 $K_L = K_G$ 时, $Z_L = Z$, 节点电压临界稳定。这正好与阻抗模电压稳定性的判断方法相一致。

2 复杂系统的节点静态电压稳定判据

以上分析了简单系统的节点电压稳定性判据,得出了该判据在简单系统中与阻抗模电压稳定性判据等价的结论。下面把该判据推广到复杂系统中去。

假设系统有 n 个节点,其中有 m 个 PQ 节点,则第 i 个 PQ 节点的电流为:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

其中: I_i 为节点 i 的电流向量,以直角坐标表示如下:

$$I_i = I_{xi} + j I_{yi}$$

U_j 为节点 j 的电压向量,以极坐标表示如下:

$$U_j = U_j \angle \theta_j$$

Y_{ij} 为节点导纳矩阵的元素,以直角坐标表示如下:

$$Y_{ij} = G_{ij} + j B_{ij}$$

将式(7)展开成实部、虚部形式,且取 U_i 为参考向量,可得:

$$I_{xi} = \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (8)$$

$$I_{yi} = -\sum_{j=1}^n U_j (B_{ij} \cos \theta_{ij} - G_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (9)$$

其中: $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 。

由式(8)、(9)可得复杂系统第 i 个 PQ 节点的供应侧电流对节点电压的导数 K_{G_i} 为:

$$K_{G_i} = \frac{dI_i}{dU_i} = \frac{\partial I_i}{\partial I_{xi}} \frac{dI_{xi}}{dU_i} + \frac{\partial I_i}{\partial I_{yi}} \frac{dI_{yi}}{dU_i} = \frac{I_{xi}}{I_i} \frac{dI_{xi}}{dU_i} + \frac{I_{yi}}{I_i} \frac{dI_{yi}}{dU_i} \quad (10)$$

其中: $I_i = \sqrt{I_{xi}^2 + I_{yi}^2}$, 而 $\frac{dI_{xi}}{dU_i}$ 和 $\frac{dI_{yi}}{dU_i}$ 可由式(11)、(12)求得:

$$\frac{dI_{xi}}{dU_i} = \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \frac{dU_j}{dU_i} + \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \frac{U_j}{U_i} \quad (11)$$

$$\frac{dI_{yi}}{dU_i} = -\sum_{j=1}^n (B_{ij} \cos \theta_{ij} - G_{ij} \sin \theta_{ij}) \frac{dU_j}{dU_i} - \sum_{j=1}^n (B_{ij} \cos \theta_{ij} - G_{ij} \sin \theta_{ij}) \frac{U_j}{U_i} \quad (12)$$

其中: U_i (或 U_j) 可以取自第 i (或 j) 节点相邻两次潮流计算的电压值之差(相邻两次潮流计算是指:略微改变某 PQ 节点无功功率,相当于在该点线性化)。由于无功功率与电压相角弱相关,所以在这里近似认为节点电压相角为常量。如果 $U_i = 0$, 略微改变第 i 节点的无功功率,重新进行潮流计算。

对于每一个 PQ 节点 i , 均可由式(1)求得负荷侧电流对电压的导数 K_{L_i} 为:

$$K_{L_i} = \frac{dI_i}{dU_i} = -\frac{S_i}{U_i^2} \quad (13)$$

由简单系统的节点电压稳定判别法,可推得复杂系统节点静态电压稳定性判据如下:

当 $K_{L_i} - K_{G_i} > 0$ 时,第 i 节点电压是稳定的;

当 $K_{L_i} - K_{G_i} < 0$ 时,第 i 节点电压是不稳定的;

当 $K_{L_i} - K_{G_i} = 0$ 时,第 i 节点处于电压稳定的临界状态。

同时,可以用 K_{L_i} 与 K_{G_i} 之差值作为节点 i 的电压稳定裕度指标,其值越大,其稳定性越强,其差值最小的节点即为系统的电压薄弱节点,其差值最大的节点即为电压稳定性最强的节点。如果系统的每个负荷节点电压都是稳定的,则该系统电压是稳定的;如果任意某一节点电压是不稳定的,则该系统电压是不稳定的。故各个节点 K_L 与 K_G 的差值的最小者,可作为整个系统的电压稳定裕度指标。

综上所述,归纳复杂系统的节点静态电压稳定性判断步骤如下:

- 1) 在给定状态下,对系统进行潮流计算,求得各个节点的电压幅值和相角;
- 2) 由潮流计算结果,按式(8)、(9)计算各个负荷节点电流的实部、虚部和模值;
- 3) 利用式(13)计算各个负荷节点的 K_L 值;
- 4) 略微改变某个(或某些) PQ 节点的无功负荷(相当于在运行点线性化),对系统重新进行潮流计算,求得各个节点的电压幅值;
- 5) 根据 1) 和 4) 所得两次潮流计算结果,求各个节点的两次潮流电压值之差。如果某节点的电压差值为零,则略微改变该节点无功功率,返回第 4) 步;
- 6) 将 1)、2)、5) 计算结果代入式(11)、(12)、(10),分别求得各个负荷节点的 K_G 值;
- 7) 根据 3) 和 6) 所得结果,分别求得各个负荷节点的 K_L 与 K_G 的差值;
- 8) 根据 7) 所得结果即可判断各个负荷节点的电压稳定性,将其差值作为该节点的电压稳定裕度,差值的最小者即为该系统的电压稳定裕度。

3 系统算例

以 IEEE300 节点系统为例,通过与阻抗模电压稳定判据的比较来验证该方法的正确性。表 1 为该系统在原始负荷下,利用极坐标牛顿潮流法,各节点电压以 1-0(幅值为 1,相角为 0)启动时,本文的方法与阻抗模法的比较。其中 Z_L 为负荷的阻抗模, Z 为从该节点看进去系统的戴维南等值阻抗模。表 2 为第 27 节点电压以 0-0 启动时的运行结果与阻抗模法的比较。表 3 为该系第 27 节点负荷连续增长至接近临界状态(有功和无功负荷同时增长到 4.169 19 倍)时,节点电压以 1-0 启动时的运行结果与阻抗模法的比较。

表 1 原始负荷下 1-0 启动时各节点电压稳定性

Tab. 1 Load nodes stability under normal condition as each node starts by 1-0

节点号	电压值	$K_L - K_G$	Z_L / Z	稳定性
27	0.975 03	3.253 52	11.640 15	稳定
155	1.018 39	14.506 28	16.740 66	稳定
180	0.979 50	18.597 13	33.534 42	稳定
192	0.938 12	3.206 54	2.735 63	稳定
235	1.009 51	119.241 50	188.472 00	稳定
247	0.969 11	16.207 83	29.883 60	稳定

表 2 原始负荷下第 27 节点 0-0 启动时各节点电压稳定性

Tab. 2 Load nodes stability under normal condition as the 27th node starts by 0-0

节点号	电压值	$K_L - K_G$	Z_L / Z	稳定性
27	0.083 55	-96.457 60	0.081 64	不稳定
155	1.018 41	14.491 17	16.741 75	稳定
180	0.979 36	18.603 04	33.524 04	稳定
192	0.938 12	3.201 15	2.735 39	稳定
235	1.009 51	119.246 90	188.608 10	稳定
247	0.969 10	16.209 65	29.882 29	稳定

表 3 临界状态下 1-0 启动时,各节点电压稳定性

Tab. 3 Load nodes stability under critical condition as each node starts by 1-0

节点号	电压值	$K_L - K_G$	Z_L / Z	稳定性
27	0.584 61	0.005 32	1.002 35	稳定
155	1.018 41	14.488 46	16.743 42	稳定
180	0.979 34	17.603 72	33.512 74	稳定
192	0.938 12	3.193 81	2.735 91	稳定
235	1.009 51	119.287 30	189.798 90	稳定
247	0.969 09	16.209 69	29.881 43	稳定

由表 1 至表 3 的结果可以看出,在各种不同的运行方式下,该方法与阻抗模法所得结论是一致的:

- 1) 由表 1 和表 3 看出,两裕度指标的最大值同时出现在第 235 号节点,说明第 235 号节点电压稳定性最强;两裕度指标的最小值同时出现在第 192 号节点,说明该节点电压稳定性最弱。
- 2) 由表 1 和表 3 还可看出,各个节点的 $K_L - K_G$ 均大于 0, Z_L / Z 均大于 1,说明各个节点电压都是稳定的,整个系统电压也是稳定的。
- 3) 从表 2 可以看出,当第 27 节点的电压以 0-0 启动时,该节点的 $K_L - K_G$ 小于 0, Z_L / Z 也小于 1,说明该节点电压是不稳定的(事实上,此时运行于该节点 P-V 曲线的下半支)。整个系统电压也是不稳定的。
- 4) 计算结果也表明,两种方法判断节点电压稳

定性的裕度指标有相同的变化规律。

利用该方法计算系统所有节点的电压稳定性只需进行两次潮流计算,即可同时求得系统各个节点的电压稳定性,且第2次潮流计算可以应用第1次的潮流结果来启动,从而进一步缩短潮流计算时间。利用本文方法判断 IEEE300 节点系统所有负荷节点的电压稳定性所需要的时间是 144 ms(利用赛扬 1.7 GHz 微处理器);利用阻抗模法判定节点稳定性时需要分别求取各个节点的阻抗模,在 IEEE300 节点系统中,每判断一个节点的电压稳定性就需要 218 ms,且计算时间还要随着需要判断节点数量的增加而成倍增长。可见本文方法比阻抗模法具有明显的快速性,且该方法与阻抗模法所得结论是一致的。

利用其他系统的计算,也得到了类似的结果,限于篇幅,就不再一一列举。

4 结论

阻抗模法是一种较成熟的电压稳定性判断方法,它既可以判断各个节点电压稳定性,同时又能给出各节点的稳定裕度。但该方法需要求取各个节点的静态等值阻抗,非常费时。

本文提出的复杂系统负荷节点静态电压稳定性判别方法极其简单,只需对系统进行相邻两次潮流计算,即可根据公式迅速判断各节点的电压稳定性,计算出各节点的电压稳定裕度。算例验证了该方法是正确有效的。

参考文献:

[1] 李宝国,等(LI Bao-guo, et al). 基于 V-I 特性的电压稳

定性研究(Studies Voltage Stability Based on V-I Characteristic) [J]. 辽宁工学院学报(Journal of Liaoning Institute of Technology), 2001, 12: 1-3.

[2] 李宝国,等(LI Bao-guo, et al). 一种判断静态电压稳定性的新方法(A New Method of Judging Static Voltage Stability) [J]. 长春工程学院学报(Journal of Changchun Institute of Technology), 2001, 12: 20-22.

[3] 孙晓钟,段献忠,何仰赞(SUN Xiao-zhong, DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan). 负荷节点电压稳定性就地安全指标研究(Local Voltage Stability Security Index Research on Load Nodes in Power Systems) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(9): 61-64.

[4] 李宝国,鲁宝春,等(LI Bao-guo, LU Bao-chun, et al). 负荷比对静态电压稳定性的影响(Load Type Components Influence Steady-state Voltage Stability) [J]. 继电器(Relay), 2002, 30(6): 10-12.

[5] 王漪(WANG Yi). 节点电压稳定 Z-V 空间解析(博士学位论文)(Node Z-V Space Analysis in Node Voltage Stability, Doctoral Dissertation) [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学(Harbin: Harbin Institute of Technology), 1999.

[6] Khoi V. Use of Local Measurements to Estimate Voltage stability Margin [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1029-1035.

收稿日期: 2003-09-05; 修回日期: 2003-10-09

作者简介:

李宝国(1966-),男,硕士,副教授,研究方向为电力系统电压稳定与控制;

鲁宝春(1964-),男,博士后,教授,研究方向为电力系统电压稳定与控制;

巴金祥(1966-),男,硕士,副教授,研究方向为电力系统电压稳定与微机保护。

A practical method to judge static voltage stability of load nodes based on V-I characteristic

LI Bao-guo, LU Bao-chun, BA Jin-xiang

(Liaoning Institute of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: A voltage-stability discrimination method based on V-I characteristic in simple system is applied successfully to the complex one. In the following, a formula to judge the static-voltage stability of load nodes is deduced. After twice calculations to power flow, the static voltage stability and voltage-stability indexes of every node can be judged and obtained respectively with the new formula. This simple and convenient method is suitable for on-line real-time analysis of voltage stability, and weak load node and load region searching in complex system. Calculation cases verify its effectiveness.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Liaoning Province(No. 001081) and Fund for Excellent Teachers of Liaoning Institute of Technology.

Key words: power system; V-I characteristic; voltage stability