

考虑负荷静态电压特性的重负荷节点静态电压稳定分析

王冰, 游振华, 韩学军, 徐海利

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 首先从理论上论述了负荷静态电压特性对静态电压稳定的影响作用。在功率供求关系紧张状态下, 电压稳定临界区域电压陡降时负荷静态电压特性影响显著, 应计及阻抗负荷和恒电流负荷对静态电压稳定的作用, 使用综合负荷进行计算。同时, 接近分岔点时采用负荷导纳描述负荷功率需求, 使用负荷导纳模型法计算电压稳定极限值及 PV 曲线下半部分的值。对 IEEE30 节点系统进行仿真计算分析, 结果证明了所提出方法的有效性, 同时快速性和精确性得到了保证。

关键词: 电压稳定; 负荷导纳模型; 负荷电压特性; 分岔点; 临界功率

Steady-state voltage stability analysis of heavy load node considering the steady-state load characteristics

WANG Bing, YOU Zhen-hua, HAN Xue-jun, XU Hai-li

(College of Electrical Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin 132012, China)

Abstract: This paper describes the influence of the steady-state load characteristics on the steady-state voltage stability theoretically. While the operating points lie on the critical zone or the steep segment belong to upper half of the p-v curves, the steady-state load characteristics affect significantly. Then while the operating points close to bifurcation point and lie on the lower half of the p-v curves, load needs should be described by load admittance models. The method, adopting admittance model in load bus, can compute voltage stability limit effectively. At last, the approach is illustrated with IEEE30 system. The results show the effectiveness of the method and seal of the very fast computation and accuracy.

Key words: voltage stability; load admittance model; load characteristics; bifurcation point; critical power

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)11-0021-05

0 引言

近十年来, 国外多次发生大电力系统因电压失稳而导致系统崩溃, 造成大面积停电事故^[1~3]。就是在国内, 因为经济的快速增长, 投入系统的设备增长迅猛, 同时电力网络的发展相对滞后, 很多地方的电网都经常运行在极限状态, 可能遭受电压稳定的威胁。

电力系统的电压稳定问题受到人们的广泛关注和重视, 很多学者发表了大量文献, 使研究工作不断深入。普遍认为电力系统的静态稳定极限是研究电压不稳定的重要问题。现在已有许多求解临界点的方法, 包括最大功率、灵敏度分析、潮流多解、矩阵奇异和连续潮流等方法。它们都把系统中某一节点的功率极限作为静态电压稳定极限, 没有考虑负荷的静态电压特性对静态电压稳定性的影响; 然而在电压稳定临界点及其附近区域即当电压发生陡降时, 负荷电压特性对静态电压稳定影响较大。近年来, 已有一些文献重视了这方面的研究。文献[4]

指出就一般情况而言, 系统在鼻形曲线上半支运行时的静态电压稳定性, 主要取决于网络的电压-功率传输特性; 系统在鼻形曲线下半支运行时的静态电压稳定性, 则主要取决于负荷的静态电压特性。文献[5]也推导出计及负荷特性的广义静态电压稳定判据。但两者都只是说在鼻型曲线下半支才要考虑负荷电压特性的影响, 没有在机理上认识到电压的陡降和运行电压的下降是负荷特性对电压稳定产生影响的主因, 同时对于大系统从正常工作点过渡到电压稳定临界区域存在计算复杂及临界点处常规潮流奇异问题。文献[6]在论证关于节点阻抗模值变化基本性质的基础上指出: 运行工作点处于供求关系紧张的 P-V 曲线上半支陡降区段或下半支时, 在表征重负荷节点的物理量中, 宜注重发挥节点负荷阻抗模值 Z_L 的作用, 并在与 P-V 空间对应的 Z_L -V 空间开展分析。文献[7]基于系统电压静态稳定的观点对节点临界状态进行了研究。研究了电距离、功率因数对临界状态的影响。提出用有功功率裕度反映节点承受负荷功率变化能力的弱节点判别式。同时

也指出负荷节点的临界电压值只由网络和负荷的功率因素决定。本文主要在文献[6,7]的基础上,进一步研究负荷电压特性对静态电压稳定性的影响;对系统中重负荷测试节点在供求紧张状态下,用等效导纳表征负荷展开分析。选取 IEEE30 系统进行分析,计算系统静态电压稳定极限,研究负荷电压特性对电压稳定性的影响,仿真结果同其它方法得到的结论进行比较。

1 简单系统数学模型及静态电压稳定分析

基于静态电压稳定性的机理,在研究节点静态电压稳定性时只考虑所研究节点负荷的变化。

基于以上研究目的,在电力系统中从测试负荷节点向系统看进去,系统可以戴维南定理等效为一个两节点系统如图 1 示。

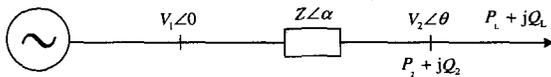


图 1 两节点系统
Fig.1 Two-bus system

根据节点功率平衡原理,对节点 2 静态条件下系统的数学模型为:

$$P_2 = [V_1 V_2 Y \cos(\theta + \alpha) - V_2^2 \cos \alpha] \quad (1)$$

$$Q_2 = [V_1 V_2 Y \sin(\theta + \alpha) - V_2^2 \sin \alpha] \quad (2)$$

$$\Delta P = P_L - P_2 = 0 \quad (3)$$

$$\Delta Q = Q_L - Q_2 = 0 \quad (4)$$

$$P_L = P_L(V_2), Q_L = Q_L(V_2) \quad (5)$$

式中: P_2 、 Q_2 为网络注入节点 2 的功率,即网络注入受端母线的功率; P_L 、 Q_L 为节点 2 负荷消耗的功率; Y 为网络传输等值导纳。

节点 2 极坐标下的潮流修正方程式为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = -J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{P\theta} - J_{P\theta} & S_{PV} - J_{PV} \\ S_{Q\theta} - J_{Q\theta} & S_{QV} - J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$J_{P\theta} = \frac{\partial P_2}{\partial \theta} = V_1 V_2 Y \sin(\theta + \alpha)$$

$$J_{PV} = \frac{\partial P_2}{\partial V_2} = V_1 Y \cos(\theta + \alpha) - 2V_2 Y \cos \alpha$$

$$J_{QV} = \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = V_1 V_2 Y \cos(\theta + \alpha)$$

$$J_{Q\theta} = \frac{\partial Q_2}{\partial \theta} = V_1 Y \sin(\theta + \alpha) - 2V_2 Y \sin \alpha$$

式中: $J_{P\theta}$ 、 J_{PV} 、 J_{QV} 、 $J_{Q\theta}$ 为负荷为恒定功率特性,即常规潮流雅可比矩阵元素,由网络参数和系统运

行条件决定; $S_{P\theta}$ 、 $S_{Q\theta}$ 、 S_{QV} 、 S_{PV} 分别为负荷功率对其母线电压相角和幅值的灵敏度系数,由负荷本身的功率-电压特性决定,一般负荷功率同电压幅值强相关而同电压相角弱相关,进而假设 $J_{P\theta}$ 和 $J_{Q\theta}$ 为零, J_{PV} 和 J_{QV} 只由负荷静态电压特性决定。式 (6) 为考虑了负荷静态电压特性的潮流修正方程,相应的潮流雅可比矩阵称为广义潮流雅可比矩阵,考虑恒定功率负荷的常规潮流雅可比矩阵只是它的一个特例。对于现实系统中的一般静态负荷 (ZIP 负荷),使用广义潮流雅可比矩阵计算显然更加准确更符合工程实际。很多区域电力系统越来越接近其极限状态运行,准确快速的计算得到电压稳定运行极限值对于电力系统运行、控制具有很重要的意义。

文献[5]得出负荷具有一般静态特性时的静态电压稳定性判据,它计及负荷电压静态特性的影响更具有普遍意义。但是利用该判据计算电压稳定临界值时,因临界值对应于广义潮流雅可比矩阵奇异,所以不可避免地要克服在分岔点的奇异问题。对于该问题也提出了很多方法如连续潮流法、负荷导纳模型法等。计算简单快速是电压稳定分析的重要问题。在电压稳定临界点及其附近区域,计及静态电压特性的影响,并采用负荷导纳模型法进行计算,因为它只是对常规潮流计算进行简单的修正所以计算简单性和快速性能得到保证。

2 重负荷节点分析

在电力系统中,有功功率裕度 K_G 最小的重负荷节点的运行状况表征了整个系统的电压稳定情况。在正常运行条件下,节点的注入功率同负荷需求功率及相应投入设备容量基本上保持一致;但在供求紧张状态下注入功率可能明显小于负荷需求功率及相应投入设备容量,因为此时系统能输送的功率基本上已趋于最大值,根本不可能随用户投入设备容量的增加而增加,只能保持在一定功率值。在负荷节点方面,节点注入功率显然不如节点负荷导纳更具有代表性更能反映用户投入设备容量和功率需求。

在电压稳定分析课题中,节点导纳分析法已经得到很多应用。文献[8]用负荷阻抗模值和戴维南阻抗模值的差值表征电压稳定裕度;文献[9]使用阻抗模值借助本地量测估计电压稳定极限;文献[10]借助阻抗模值分析紧急无功补偿的误区。文献[7]使用负荷导纳模型法求解负荷中心的临界最大功率和临界电压。对重负荷节点进行导纳分析,尤其在功率供求紧张状态下对电压稳定问题的定性、定量分析

能得到很好的效果。

3 测试系统

IEEE30 节点系统如图 2, 具体数据见文献[11]。根据文献[12]选取有功功率裕度 K_G 作为电压稳定指标, 指示系统接近稳定极限程度。首先要得到系统中重负荷节点, 由文献[12]使用特征值分析法得到 23、24、26、29、30 为系统的几个重负荷节点, 主要针对这几个节点进行导纳解析。

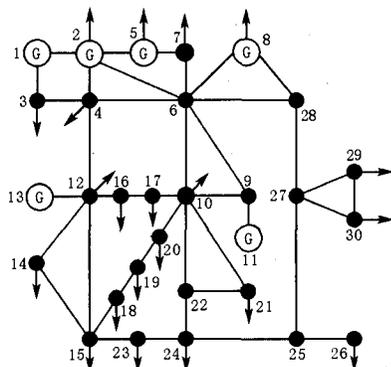


图 2 IEEE30 系统

Fig.2 IEEE30 system

负荷增长方式选取为: 所研究的一个负荷节点的有功功率和无功功率按比例同时增加, 其它负荷节点的有功和无功功率不变。供求紧张状态下重负荷节点的负荷组成: 由恒定功率负荷并联恒定阻抗负荷表征综合负荷。考虑到我国/发达国家工业负荷、民用负荷及商业负荷的实际需要可以选取 70%/30% 恒定功率负荷并联 30%/70% 恒定阻抗负荷表征重负荷节点的负荷需求。

3.1 具体计算步骤

1) 采用全部恒定功率负荷用常规潮流计算系统初值, 以恒定功率因数为方向逐渐增大负荷逼近电压稳定临界区域; 开始时, 可以采用较大步长以减少计算, 接近临界区域时尽量采用小步长以减少计算误差。

2) 在临界点及其附近区域内即在供求紧张状态时, 用综合负荷表征重负荷节点的负荷需求。采用很小步长逐渐增加负荷逼近电压稳定分岔点。

3) 在接近分岔点时, 为了克服迭代发散, 采用负荷导纳模型法进行计算。

3.2 计算结果 (70% 恒定功率并联 30% 恒定阻抗)

母线节点 23, 如表 1~表 3 所示。

表 1 第一步数据

Tab.1 The data of the first step

P	0.032	0.232	0.432	0.572	0.61
Q	0.016	0.116	0.216	0.286	0.305
V	1.026	0.975	0.875	0.7375	0.6673

表 2 第二步数据

Tab.2 The data of the second step

P	0.42	0.424	0.4284	0.4686	0.478	0.4828
Q	0.21	0.212	0.2142	0.2343	0.239	0.2414
G	0.387	0.391	0.3948	0.4316	0.44	0.4447
B	0.193	0.195	0.1969	0.2158	0.22	0.2224
V	0.682	0.676	0.669	0.614	0.60	0.5973

表 3 第三步数据

Tab.3 The data of the first step

G	1.72	1.75	1.806	1.816	1.8342	1.900
B	0.86	0.875	0.903	0.908	0.9171	0.950
V	0.5961	0.5908	0.5811	0.5794	0.5763	0.5654
P	0.6112	0.6108	0.61	0.6096	0.6091	0.6074

母线节点 26, 如表 4~6 所示。

表 4 第一步数据

Tab.4 The data of the first step

P	0.035	0.1350	0.235	0.255	0.2650
Q	0.023	0.0888	0.1546	0.1678	0.1743
V	0.9989	0.8945	0.7284	0.6656	0.6327

表 5 第二步数据

Tab.5 The data of the first step

P	0.185	0.1925	0.1964	0.200	0.204	0.208
Q	0.122	0.1266	0.1292	0.132	0.134	0.137
G	0.194	0.2020	0.206	0.210	0.214	0.219
B	0.127	0.1329	0.1356	0.138	0.141	0.144
V	0.6327	0.6122	0.6051	0.592	0.582	0.576

表 6 第三步数据

Tab.6 The data of the first step

G	0.80	0.82	0.838	0.8469	0.8554	0.900	0.950
B	0.526	0.539	0.5513	0.5572	0.5627	0.5921	0.625
V	0.574	0.567	0.5611	0.5581	0.5554	0.5412	0.5261
P	0.2635	0.2638	0.26383	0.2638	0.2639	0.2636	0.2629

其余各节点具体数据略。

3.3 数据分析比较

为了表明负荷静态电压特性对电压稳定极限的影响作用; 在临界点及其附近区域不计及静态负荷特性影响采用负荷导纳模型法计算各个测试负荷节点电压稳定极限值同上文得到的电压稳定极限值进

行比较。

选取负荷节点 23、26、30 进行比较, 比较结果如图 3 所示。同时考虑综合负荷中成分比例不同对电压稳定极限的影响作用, 本文根据实际情况考虑我国(70%恒定阻抗并联 30%恒定功率)和发达国家(30%恒定阻抗并联 70%恒定功率)两种类型综合负荷, 比较结果见图 4。

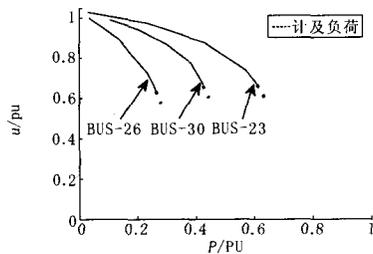


图 3 电压稳定极限比较

Fig.3 Comparing of voltage stability limits

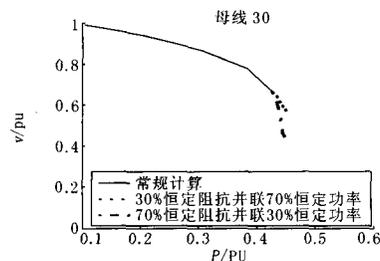


图 4 不同比例综合负荷对电压稳定极限影响

Fig.4 The effect of different ratios' comprehensive loads to voltage stability limit

由图 3 可以看出对于负荷节点在临界点及其附近区域计及静态负荷电压特性时电压稳定极限值都有不同程度的提高, 也就是由常规计算得到的结果一般是趋于保守的。同时从图 4 可以发现在综合负荷中恒定阻抗比例越高得到的电压稳定极限值基本上不变, 但临界电压下降了。

最后把 K_G 作为电压稳定指标表征各重负荷节点接近稳定极限程度。对负荷节点 23、24、26、29、30 稳定程度排序, 如表 7 所示。

表 7 各节点稳定程度排序

Tab.7 Steady state of each node

母线	23	24	26	29	30
P_{CR}	0.641	0.63	0.281	0.3696	0.4437
V_{CR}	0.597	0.602	0.576	0.6028	0.6016
K_G	95%	86%	87.5%	93.5%	76.1%
Rank	5	2	3	4	1

排序结果同其他文献比较可知计及负荷静态特性各个测试节点的稳定程度排序基本不变。负荷节

点 30 是最弱母线, 在供求紧张状态下最容易失稳; 而节点 23 是这几个测试节点中最稳定节点。在监测系统时, 应对最弱母线 30 给以更多重视, 在控制电压稳定时应对节点 30 投入更多的补偿和控制手段。

4 结论

本文在分析系统中重负荷节点供求紧张状态特性基础上, 指出节点负荷在临界点及附近区域电压下降较大时应计及静态负荷电压特性的影响, 把恒功率负荷转化为等效的综合负荷逐步逼近分岔点; 在很接近分岔点时, 用负荷节点投入设备容量表征负荷功率需求, 采用负荷导纳模型法克服常规计算的奇异性得到更符合工程实际和精确的电压稳定极限值, 得到的值一般都有不同程度的提高。

以 IEEE30 系统进行仿真计算, 仿真结果同其他文献方法得到的结果比较表明所提出计算方法的有效性, 同时负荷导纳模型法只是对常规潮流进行简单的修正, 所以计算的快速性和精确性得到很好保证。

参考文献

- [1] 赵希正. 强化电网安全保障可靠供电—美加“8.14”停电事件给我们的启示[J]. 电网技术, 2003, 27(10).
ZHAO Xi-zhang. Strengthen Power System Security to Ensure Reliable Delivery [J]. Power System Technology, 2003, 27(10).
- [2] 刘鹏, 吴刚. 世界范围内两起典型电压崩溃事故分析[J]. 电网技术 2003, 27(5).
LIU Peng, WU Gang. Analysis of Two Typical Voltage Collapse Incidents Worldwide [J]. Power System Technology, 2003, 27(5).
- [3] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术, 2003, 27(9).
HU Xue-hao. Rethinking and Enlightenment of Large Scope Blackout in Interconnected North America Power Grid [J]. Power System Technology, 2003, 27(9).
- [4] 李欣然, 等. 负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定星光以实用判据[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (4).
LI Xin-ran, et al. Effect of Load Characteristics on Power Systems Stead-state Voltage Stability and the Practical Criterion of Voltage Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19 (4).
- [5] 于永进, 栾兆文. 考虑负荷特性的静态电压稳定判据[J]. 浙江电力, 2005, (3).
YU Yong-jin, LUAN Zhao-wen. Voltage Stability Criterion with Regard to Load Characteristics[J]. Zhejiang Electric Power, 2005, (3).

- [6] 柳焯. 电压稳定问题中重负荷节点的阻抗解析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (4).
LIU Zhuo. The Impedance Analysis of Heavy Load Node in Voltage Stability Studies[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (4).
- [7] 张尧, 宋文南. 节点电压稳定临界状态和弱节点确定[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13 (6).
ZHANG Yao, SONG Wen-nan. Determination of the Critical State of Voltage Stability in Load Buses and the Weakest Bus of Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13 (6).
- [8] 葛维春. 电力系统电压稳定性与电压崩溃的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1992.
GE Weichun. The Studies of Voltage Stability and Collapse for Power System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1992.
- [9] Vu K, Begovic M M, Novsel D, et al. Use of Local Measurement to Estimate Voltage Stability Margin[A]. In: PICA[C]. Columbus:1997.
- [10] 柳焯. 弱节点紧急无功补偿模式[A]. 97 全国电力系统自动化学术研究会论文集[C]. 1997.
LIU Zhuo. Urgent Reactive-load Compensation Models on Weak Buses[A]. In: Power System Automatic Academic Seminar Symposium[C]. 1997.
- [11] 吴际舜, 侯志俭, 等. 电力系统潮流计算的计算方法 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2002.
WU Ji-shun, HOU Zhi-jian, et al. The Algorithms of Load Flow Solution for Power System[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2002.
- [12] 周双喜, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
ZHOU Shuang-xi, et al. Power System Voltage Stability and Control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.

收稿日期: 2006-08-11; 修回日期: 2007-04-04

作者简介:

王冰 (1968-), 男, 讲师, 主要研究方向为电力系统自动化及计算机技术;

游振华 (1978-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统电压稳定及其自动化控制; E-mail: yzh-301@163.com

韩学军 (1953-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统自动化及其计算机控制等。

(上接第 15 页 continued from page 15)

重载型潮流算法, 这种方法有以下特点:

- 1) 线路和变压器支路重载为一个反映支路自身参数的对称电路模型。
- 2) 功率和电流的计算式直接调用支路自导纳和变比来处理。
- 3) 可以对未知的变压器变比进行计算。
- 4) 收敛性能与牛顿-拉夫逊算法相同, 但收敛速度比牛顿-拉夫逊算法要快。

通过对牛顿-拉夫逊潮流算法的改进, 并进行了比较测试, 在收敛程度接近的前提下, 本文提出的方法收敛速度有较大的提高。

参考文献

- [1] 陈衍. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
CHEN Yan. Power System Stability Analysis[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.

- [2] 顾全, 陆杏全. 电力系统实用状态估计中两个问题的处理[J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (1): 26-29.

GU Quan, LU Xing-quan. Estimation of Transformer Tap Setting And Zero-Impedance Branches Power Flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(1): 26-29.

- [3] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

YU Er-keng. Power System State Estimation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.

收稿日期: 2006-11-09; 修回日期: 2007-03-16

作者简介:

彭世康 (1972-), 男, 硕士生, 软件设计师, 研究方向为电力系统高级分析、电力系统 MIS、电力系统实时监控; E-mail: Pengshikang@xjgc.com

黄伟 (1962-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统规划和可靠性。