

# 静态电压崩溃点的实用解法

戴伟华, 熊宁, 李倡洪

(南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330029)

**摘要:** 提出一种基于连续潮流求取电压稳定临界点的新方法, 使其能够在考虑约束的情形下适用于任意形式的负荷增长方式, 大大提高了求解精度。在求解临界点的过程中, 以弱节点电压作为连续变量, 先直接大步长降到临界点附近, 再用小步长追踪临界点, 这样大大减少了求解中间运行点的数量, 使其更快地找到电压崩溃临界点。最后在 IEEE14 节点系统的计算证实了该方法的快速、有效性。

**关键词:** 稳定裕度; 连续潮流; 负荷增长方式; 变步长; 电压稳定临界点

## A practical method of tracing static voltage collapse point

DAI Wei-hua, XIONG Ning, LI Chang-hong

(Information Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** A new method based on continuation power flow is proposed for tracing crisis point of voltage stability, which can deal with all kinds of increasing type of load and meet the demand of constraint of reactive power. Voltage which is regarded as continuous variable drop with large step length in order to approach to crisis point at first, then the crisis point is traced by small step length. In this case, the number of middle point between original point and crisis point is reduced largely and the crisis point is traced more quickly. At last, the validity and the speed of this method is verified by calculation of IEEE 14 bus system.

**Key words:** stability margin; continuation power flow; load increase; various step length; crisis point of voltage stability

中图分类号: TM74

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)05-0025-04

## 0 引言

为给调度人员提供稳定裕度信息, 电压稳定临界点经常被在线计算。如何快速准确地求取对电力系统静态安全稳定研究具有重要意义。

临界点的求取是在满足等式方程和不等式约束情形下, 按某种方式不断增长负荷, 负荷达到最大值的运行点即为电压稳定临界点。但采用常规潮流方法计算, 在功率极限点附近雅可比矩阵接近奇异, 迭代不会收敛。连续潮流法<sup>[1,2]</sup>是通过参数变化并引入一维校对方程, 其机理仍是采用逐步增加负荷的方式逼近电压崩溃点, 它在 PV 曲线鼻形点附近将固定负荷校正转为固定电压校正, 巧妙地解决了潮流雅可比矩阵奇异的难题。但何时由固定负荷校正转为固定电压校正及步长大小的选取需要一定技巧。文献[3]提出改进方法, 把连续参数的选取范围限定在电压中, 无需考虑校正变量的转换和步长选取的问题。但由于连续潮流法无法预估系统

在重负的负荷下接近崩溃, 只有通过慢慢不断增加负荷的方法来接近崩溃点。这样必然增加求解中间运行点的个数, 导致搜索速度缓慢。另外, 在临界点的求取中, 通常都把负荷增长方式归纳为几种形式<sup>[2,4]</sup>, 由于负荷可能按任意方式增长, 这样的简化必然带来不小的误差。

为能在满足约束条件下更快速准确地求取临界点, 本文对连续潮流法求解电压稳定临界点进行了以下三点改进: 1) 在求解过程中, 将节点电压作为给定值, 功率作为待求量, 令弱节点的电压变步长下降, 这样只需求解较少的几个运行点就可到达电压稳定临界点。2) 提出一种更实用、更灵活的处理负荷增长方式的方法, 使其能在满足约束的条件下适用于任意的负荷增长方式。3) 由于在临界点处, 几乎所有无功源(平衡节点除外)的无功输出都会越限, 因此可在初始运行点就将所有的 PV 节点转为 PQ 节点来进行简化, 将崩溃点处的无功约束条件化除。

## 1 改进连续潮流法

假设一个系统节点数为  $n$ , 其中  $PV$  节点有  $r$  个,  $PQ$  节点有  $m$  个, 平衡节点一个。连续潮流的数学模型为:

$$f(\theta, V) - (Y_{G0} - Y_{D0}) + \lambda Y_d = 0 \quad (1)$$

式中等号左边的前面两项对应普通的潮流方程, 其中  $Y_{G0}$  为初始运行点发电机输出的功率;  $Y_{D0}$  为初始运行点负荷功率; 后一项中  $Y_d$  为负荷增长方式向量,  $Y_d$  中各个分量的大小表示对应节点负荷增长的快慢;  $\lambda$  为负荷变化因子, 当  $\lambda=0$  时对应系统的初始状态,  $\lambda=\lambda_{\max}$  时对应系统的电压稳定分岔点。

### 1.1 电压变步长下降法

由经验得知, 在电压崩溃点处, 弱节点的电压值一般在 0.7 pu 下方, 为了能快速地接近电压稳定临界点, 本文以弱节点电压作为连续变量, 进行大步长下降, 直接降到 0.7 pu 处。若在该点处潮流解发散, 表明该点已在鼻型点的下方, 将指定弱节点的电压上调, 直至有解为止。

弱节点电压为 0.7 pu 的运行点的连续潮流校正公式为:

$$\begin{bmatrix} J & Y_d \\ e_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_s + \lambda Y_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:  $J$  为常规雅可比矩阵;  $Y_d$  为负荷增长方式;  $e_i$  为一  $2n-r-2$  维的行向量, 电压变量变化最大的节点  $i$  对应的分量为 1, 其余全为 0;  $\lambda$  为  $PV$  曲线上前一个点对应的负荷变化因子。由于  $e_i \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + 0 \cdot \Delta\lambda = 0$ , 使得连续变量的变化量  $\Delta V_i = 0$ , 在修正过程  $\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} + \Delta\theta^{(k)}$ ;  $V^{(k+1)} = V^{(k)} + \Delta V^{(k)}$ ;  $\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \Delta\lambda^{(k)}$  中保证了连续变量  $V_i$  不变。

校正时, 负荷增长方式可通过超短期负荷预测得到。计算初值可用上个运行点的状态值, 但令连续变量  $V_i=0.7$ 。由于以弱节点电压作为连续变量, 故即使采用大步长下降一般也不会导致扩展潮流解的发散。

为了确定哪个节点属于弱节点, 在初始运行点处需进行一次以负荷变化因子  $\lambda$  作为连续变量的潮流计算, 在计算结果中选取节点电压变化量最大

的电压作为连续变量。

大步长下降后, 为获得精确的临界点, 仍需以弱节点的电压作为连续变量, 小步长追踪。小步长可采用下面的方法确定。

$$step = k_1 e^{k_2 \Delta\lambda / \Delta V_i} \quad (3)$$

其中:  $k_1$  为在鼻形点附近的精度要求,  $k_2$  为常数, 决定着步长的大小。由于越接近鼻形点, 负荷变化量与弱节点电压变化量的比值越接近 0, 相当于在鼻形点处的步长就是  $k_1$ 。

为使校对方程 (2) 更快的收敛, 可采用线性法或切线法<sup>[5]</sup>对计算初值进行预估。

值得注意的是, 上述分析中没有计及系统中  $PV$  节点的无功功率约束, 使分析得到的静稳结果过于乐观。而且电压稳定极限点与负荷的变化方式有关, 不同的负荷变化方式得到的电压稳定极限点是不同的。因此在计算中准确地描述负荷变化方式极为重要。

### 1.2 负荷增长方式的处理

下面提出一种更实用、更灵活的负荷处理方式, 它能适应各种形式负荷变化及无功约束。

假设当前运行点的负荷为  $Y_{b0}$ , 根据超短期负荷预测得到下一个运行点的负荷将为  $Y_{b1}$ , 则我们可近似认为负荷的增长方式为  $Y_d = Y_{b1} - Y_{b0}$ 。为了计算方便, 我们将  $Y_d$  的有功、无功分开表示。即令

$$Y_d = \begin{bmatrix} Y_{Pd} \\ Y_{Qd} \end{bmatrix}, \text{ 其中 } Y_{Pd} \text{ 为 } Y_d \text{ 的有功分量, } Y_{Qd} \text{ 为 } Y_d \text{ 的无功分量, 都是 } n \text{ 维列向量。将 } Y_d \text{ 单位化, 即得出}$$

负荷的增长方式  $Y_d = \frac{Y_d}{\|Y_d\|}$ , 其中  $Y_d$  是个  $2n$  维单位列向量。

下面分几种情形讨论:

1) 若系统某节点的有功或无功注入保持固定, 即始终不会增长。则我们可在负荷增长方式  $Y_d$  中, 令该节点对应的有功  $Y_{Pd}$  或无功  $Y_{Qd}$  增长分量为 0。

2) 在无约束情形下, 即发电机无功和平衡节点有功无功都充足情形下利用电压变步长下降法求最大功率极限点。由于不考虑发电机节点无功负荷的变化和平衡节点有功、无功负荷的变化,  $Y_{Pd}$  为  $n-1$  维,  $Y_{Qd}$  为  $m$  维。对应的有功平衡方程为  $n-1$  个, 无功平衡方程为  $m$  个。即为常规的潮流方程。

3) 若在计算过程中某  $PV$  节点的无功输出大于该节点发电机的无功上限, 即  $Q_{i^*} > Q_{i\max}$ , 则将其转化为  $PQ$  节点, 节点的注入无功为  $Q_{i\max} + Q_{D0i} +$

$\lambda Y_{di}$ , 其中  $Y_{di}$  为该节点无功对应的负荷增长分量。同时  $Y_{Qd}$  对应该节点处增加一维, 其值等于  $Y_{di}$ 。

### 1.3 约束的化除

由于一般在电压崩溃点附近, 所有无功源 (平衡节点除外) 的无功输出都会越限。若此条件成立, 完全可以在初始运行点就将所有的 PV 节点转为 PQ 节点, 计算时令无功源的输出等于它的输出上限, 这样就无需考虑崩溃点的无功约束问题。若简化条件不成立, 即临界点处某些无功源节点的端电压高于其作为 PV 节点时指定的电压, 把这些节点转回 PV 节点, 重新计算。

### 1.4 求解步骤

1) 将所有的 PV 节点转为 PQ 节点, 根据实际情况调整负荷增长方式  $Y_d$ 。

2) 在初始运行点, 对负荷增加一个步长  $\Delta\lambda$ , 采用连续潮流方法求负荷增长后的运行点。比较  $m$  个 PQ 节点的  $\Delta V_i$  ( $i=1,2,\dots,m$ ), 找出变化最大的节点作为系统的弱节点。

3) 以弱节点电压作为连续变量, 进行大步长下降, 直接降到 0.7 pu。

4) 求解潮流。若解发散, 减小步长, 如将弱节点电压降到 0.75 pu, 直至潮流有解为止。

5) 用公式 (3) 中的小步长法追踪精确的电压崩溃点, 获得临界点。

6) 校验简化条件是否成立。若成立, 结束; 否则把不成立的节点转回 PV 节点, 调整负荷增长方式  $Y_d$ , 转步骤 3)。

## 2 算例

本文以 IEEE14 节点作为算例, 数据见参考文献[6]。该系统只有母线 1、7、8 未接有负荷, PV 节点 2、3、6、8 的电压为 1.045、1.01、1.07、1.09。

假设所有的负荷均按功率因素  $1/\sqrt{1^2+0.5^2}$  同步增长, 则  $\|Y_d\|=3.7081$ ;

$$Y_{Pd} = \frac{[01111100111111]}{\|Y_d\|};$$

$$Y_{Qd} = 0.5 \times \frac{[01111100111111]}{\|Y_d\|}。在初始点处将$$

PV 节点全部转为 PQ 节点, 用文献[3]中的方法和本文的方法分别求解。

### 2.1 文献[3]中的方法

为确定弱节点, 先把负荷变化因子  $\lambda$  作为连续变量, 增加一个步长  $\Delta\lambda = 0.05$ ; 再以弱节点电压为连续变量, 步长恒等于 0.02, 搜索电压稳定临界点。

崩溃点处 PV 节点 2、3、6、8 的电压为 0.9370、0.8394、0.7177、0.8095。均小于指定的电压, 简化条件成立。节点 14 的 PV 曲线见图 1。由图可知, 包括初始点, 共搜索了 25 个运行点找到了崩溃点。

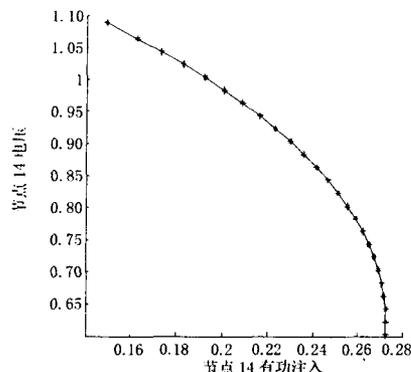


图 1 文献[3]方法的 PV 曲线

Fig.1 PV curve of reference [3]

### 2.2 本文的改进方法

同样先把  $\lambda$  作为连续变量, 然后将弱节点电压直接降到 0.7, 最后用公式 (3) 小步长追踪。当  $k_1=0.01$ ,  $k_2=1.5$  时节点 14 的 PV 曲线见图 2。

由图 2 可知, 只搜索了 7 个运行点就找到了临界点。

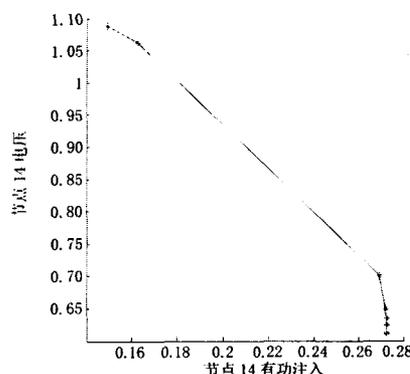


图 2 改进法的 PV 曲线

Fig.2 PV curve of improved method

## 3 结束语

本文对连续潮流法求解电压稳定临界点做了改进, 从 IEEE14 节点的实例计算来看, 该法有以下优点: 1) 通过电压变步长下降法, 快速地找到了电压稳定临界点, 减少了计算中间运行点的个数。2) 对负荷变化方式进行了有效的处理, 使该法在满足无功约束的条件下适用于任意形式的负荷增长方式, 提高了计算精度。3) 通过在初始运

行点将 PV 转化为 PQ 节点, 化除了约束, 使计算速度大大加快。

### 参考文献

- [1] 陈浩河. 电力系统电压稳定分岔点快速算法研究 (硕士学位论文) [D]. 广州: 华南理工大学, 2000.  
CHEN Hao-he. Research of Voltage Stability on Electric Power System, Thesis [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2000.
- [2] 周双喜. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003. 171-176.  
ZHOU Shuang-xi. Voltage Stability and Controlling of Electric Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003. 171-176.
- [3] 江伟, 王成山. 电力系统输电能力研究中 PV 曲线的求取 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 9-12.  
JIANG Wei, WANG Cheng-shan. The Acquisition of PV Curve in the Study of Transmission Capability of Electric Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 9-12.
- [4] 朱振青, 杨晓广. 电力系统电压稳定性分析的实用算法 [J]. 电网技术, 1998, 22(4): 15-18.

ZHU Zhen-qing, YANG Xiao-guang. The Practice Algorithm of Voltage Stability Analysis in Electric Power System [J]. Power System Technology, 1998, 22(4): 15-18.

- [5] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压稳定性分析的改进连续潮流法 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(14): 13-16.  
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. Improved Continuation Power Flow of Voltage Stability Analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 13-16.
- [6] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. 309-310.  
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Advanced Electric Grid [M]. Beijing: Qinghua University Press, 1996.

收稿日期: 2006-01-18; 修回日期: 2006-12-25

### 作者简介:

- 戴伟华 (1969-), 男, 副教授, 研究方向为电力电子; E-mail: dwh690318@126.com  
熊宁 (1975-), 男, 在读研究生, 研究方向为电力系统稳定与经济运行;  
李倡洪 (1962-), 男, 讲师, 研究方向为电力电子。

(上接第 15 页 continued from page 15)

自身的工频及谐波电压、电流等均为干扰信息, 所以具有干扰信号特强、信噪比极低的特点。为了便于从强干扰环境下取出有用信息, 本文在分析的基础上, 提出了注入信号选取的原则和方法, 导出了信号检测和处理的办法。实验室模拟实验和现场测试的结果证明了本文所述方法的正确性。

### 参考文献

- [1] 刘立群, 韩轲. 注入式定子接地保护新方案及应用 [J]. 湖南电力, 1996, (6): 3-8.  
LIU Li-qun, HAN Yun. A New Generator Stator Grounding Fault Protection Scheme Based on Signal Injection Principle [J]. Hunan Electric Power, 1996, (6): 3-8.
- [2] 毕大强, 王祥珩, 余高旺, 等. 高准确度外加 20Hz 电源定子接地保护的研制 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 75-78.  
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, YU Gao-wang, et al. Generator Stator Grounding Fault Protection Based on Accurate 20Hz Injection Signal [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 75-78.
- [3] 桑在中, 潘贞存, 李磊, 等. 小电流接地系统单相接地故障选线测距和定位的新技术 [J]. 电网技术, 1997, 21(10): 50-55.  
SANG Zai-hong, PAN Zhen-cun, LI Lei, et al. New Method for Fault Line Detection and Fault Point Location in Non-effective Grounding Systems [J]. Power

System Technology, 1997, 21(10): 50-55.

- [4] 曾祥君, 尹项根, 于永源, 等. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 29-32.  
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, YU Yong-yuan, et al. New Methods for Control and Protection Relay in a Compensated Medium Voltage Distribution Network Based on Injecting Variable Frequency Current [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 29-32.
- [5] 李煜. 小议电力电缆在线检测的几种方法 [J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 73-78.  
LI Yu. Discussion About Some Methods Used for On-line Monitoring of Electric Power Cables [J]. High Voltage Technology, 2004, 30(4): 73-78.
- [6] 李冬辉, 徐津津. 一种新的直流系统环网接地故障检测方法 [J]. 电网技术, 2006, 30(2): 57-60.  
LI Dong-hui, XU Jin-jin. A New Method to Detect Grounding Fault of Looped Network in DC Power System [J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 57-60.

收稿日期: 2006-09-01

### 作者简介:

- 潘贞存 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为电力系统继电保护和安全自动控制; E-mail: zcpan@sdu.edu.cn  
丛伟 (1978-), 男, 博士, 讲师, 研究领域为电力系统继电保护和安全自动控制;  
丁磊 (1980-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。