

一种求取静态电压稳定裕度的新方法

李盛林¹, 卢勇¹, 卢志强², 杭乃善²

(1. 广西电力职业技术学院, 广西 南宁 530007; 2. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 通过分析简单交流支路的功率负荷能力, 提出了求取静态电压稳定临界点的新算法。在确定临界电压崩溃点的基础上, 通过比较不同的计算裕度指标的方式, 提出采用复功率差值的模来表示静态电压稳定裕度是比较合理的。本文还给出了 IEEE 5节点系统的算例。

关键词: 电力系统; 电压稳定; 裕度指标

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)09-0030-04

0 引言

随着电力系统的发展, 电压稳定和电压崩溃问题引起了电力工作者的广泛关注。为了防止电压失稳和电压崩溃事故, 调度运行人员最为关心的是: 当前电力系统运行状态是不是电压稳定的, 系统离崩溃点还有多远或稳定裕度有多大^[1,2]。如果能够较好地解决这个问题, 那么调度运行人员在全局监控电网安全稳定时就能做出正确的判断, 分层次分区域采取相应的有效措施。

文献 [3] 将裕度指标定义为: 从系统给定运行状态出发, 按照某种模式, 通过负荷增长或传输功率的增长逐步逼近电压崩溃点, 则系统当前运行点到电压崩溃点的距离 (kV、MW 和 /或 Mvar) 可作为判断电压稳定程度的指标, 称之为裕度指标。从上述定义可看出, 决定裕度指标的关键因素主要有三个: 崩溃点的确定、从当前运行点到崩溃点的路径的选取以及模型的选择。

对电压崩溃机理的解释不同, 则定义的崩溃点不同, 所得出的裕度指标也不一样。文献 [4] 认为电压失稳主要是由于负荷动态引起的, 因此将动态负荷的有功功率最大点作为电压崩溃点。文献 [5] 认为电压失稳是由于负荷功率的增长超过了网络传输极限, 因此将负荷最大功率点作为电压崩溃点。文献 [6,7] 则将潮流 Jacobian 矩阵奇异点作为电压崩溃点。现有的基于潮流方程静态安全指标算法以电网向负荷高压母线输送功率的极限状态作为静态电压稳定临界点, 与实际的临界点有一定差别, 结果偏于乐观, 文献 [8] 认为静态电压稳定临界点是任意一个动态负荷从电网吸收的电磁功率达到最大值时的极限运行状态。

在计算裕度指标时, 网络中各负荷节点的功率可按任意方式增长, 以逼近崩溃点。为了简化计算, 通常假设负荷功率以下列三种方式增长^[9]: a) 单负荷节点的有功功率和 (或) 无功功率增加, 其它负荷节点功率保持不变; b) 选定区域的负荷节点的有功功率和 (或) 无功功率增加, 其它负荷节点功率保持不变; c) 全部负荷节点的有功功率和 (或) 无功功率同时增加。负荷的增长方式不同, 裕度指标的计算值也不同。

本文通过分析简单交流支路的功率负荷能力, 得出简单交流电路的稳态运行条件, 并给出识别电网关键节点和薄弱支路的方法, 从而确定了临界电压崩溃运行点。在综合各种计算裕度指标方法的基础上, 提出系统在第一种负荷扰动方式下, 采用复功率差值的模来表示静态电压稳定裕度是合理的。

1 临界电压崩溃运行点的确定

潮流功率方向送端为 S, 受端为 R 的简单交流支路示于图 1 中, 该支路计及线路电阻 r_{SR} 、电抗 x_{SR} (支路两端的接地电容支路并入该支路的两端节点来考虑), 取 S、R 端的电压为 V_S 、 V_R , 支路电流为 I_{SR} , 支路送端输入的功率为 P_{SR} 、 Q_{SR} , 受端输出的功率为 P_{RS} 、 Q_{RS} 。

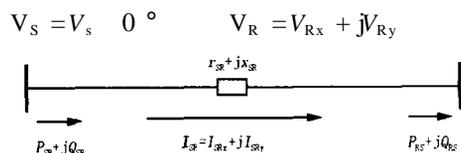


图 1 简单交流电路

Fig 1 A simple AC circuit

根据文献 [10], 取有功圆、无功圆的半径分别为:

$$r_p = \frac{\sqrt{V_s^2 + \frac{b^2 V_s^2}{4g^2}} - \frac{P_{RS}}{g}}{4} \quad (1)$$

$$r_q = \frac{\sqrt{V_s^2 + \frac{g^2 V_s^2}{4b^2}} - \frac{Q_{RS}}{b}}{4} \quad (2)$$

该两圆圆心之间的距离为

$$D = \frac{gV_s}{b} \quad (3)$$

图 1 电路有解的条件为两圆的半径大于等于零且两圆相交或相切^[10]。将两圆相交的情况作于图 2 中,将两圆相切的情况作于图 3 中。从式 (1)和式 (2)及图 2 和图 3 可以看出,要使两功率圆外切,可采取分别增加负荷的有功功率、无功功率的方法,也可以采取同时增加负荷的有功功率和无功功率的方法。其外切点 P_1 称为交流电路工作域与崩溃域的分界点,即图 1 电路的临界电压崩溃运行点。

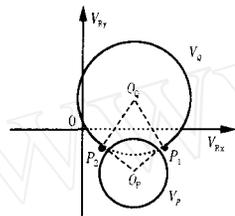


图 2 两圆相交

Fig 2 Two crossing circulars

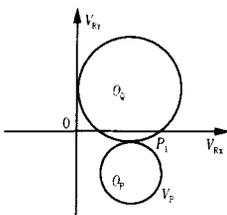


图 3 两圆相切

Fig 3 Two tangent circulars

根据外切圆的负荷临界电压崩溃的条件,须有

$$r_p = 0 \quad (4)$$

$$r_q = 0 \quad (5)$$

$$r_p + r_q = D \quad (6)$$

如此可在潮流计算的每次迭代中,按式 (4)~(6)的条件检验每条支路。若出现不满足该条件的支路,则该支路已经电压崩溃,系统的潮流方程无解。为使负荷功率在工作域的边界值内,该支路应进行无功补偿或减少该支路受端的有功功率。

2 裕度指标的计算

从裕度指标的定义我们可以看出静态电压稳定

裕度指标可以用电压 (kV)、有功 (MW) 及无功 (Mvar) 来表示。通常表示系统静态电压稳定储备系数有两种方式^[11],一是有功裕度表示:

$$K_p = \frac{P_{\max} - P_0}{P_0} (\times 100\%) \quad (7)$$

另一是以电压裕度表示:

$$K_u = \frac{U_0 - U_{cr}}{U_0} (\times 100\%) \quad (8)$$

按裕度指标的定义,如果用无功来表示的话,其公式为:

$$K_q = \frac{Q_{\max} - Q_0}{Q_0} (\times 100\%) \quad (9)$$

表面上看,以电压裕度表示出节点电压的稳定程度似乎合理,其实不然。文献 [12] 从理论上讨论了静态电压稳定的各种安全指标,指出电压裕度指标不适合于作为电压稳定的安全指标,因为可以从物理意义上做如下解释:临界状态时,临界电压只是个状态变量,它是受临界功率控制的,也即临界功率对电压的稳定起关键作用。

文献 [13] 认为,电网中各节点稳定运行电压临界值与供电点有功功率、无功功率的大小有关。电网中某一节点电压临界值,是该节点视在功率的函数。于是,文献 [14] 提出一种求取静态电压稳定裕度的方法: $S = S_m - S_0$ 。该方法以视在功率的模值来计算电压稳定裕度,其结果有很大程度的误差,因为负荷的视在功率是个向量。为此,本文以复功率差值的模来表示从系统运行点到电压临界崩溃点的裕度指标,其公式为:

$$K_s = \left| \frac{S_{\max} - S_0}{S_0} \right| \times 100\% \quad (10)$$

从以上计算裕度的公式来看,都是采取不同的方法求取临界点以及抓住极限运行状态的不同特征作为电压崩溃的判据。从静态角度看,负荷功率极限和电压失稳临界值二者是统一的。

3 算例及分析

IEEE 5 节点系统接线图如图 4 所示,负荷增长方式为:只增加节点 5 的有功功率和/或无功功率,其他节点的功率保持不变。

假设负荷扰动前系统运行点为 1, $P_1 + jQ_1 = 1.6 + j0.8$,按式 (1)和 (2)分别增加负荷的有功功率或无功功率使得两功率圆外切,此时得到三个不同的电压崩溃临界点。

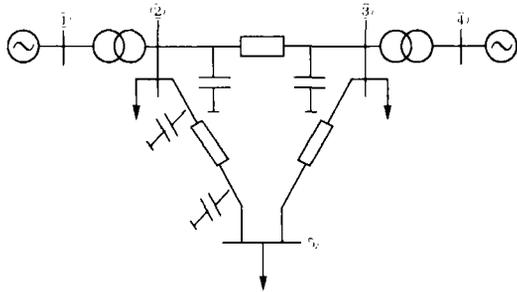


图 4 实验系统

Fig 4 Tested system

1) 保持节点 5 负荷的有功功率恒定, 逐渐增加负荷的无功功率得临界电压崩溃运行点 2, $P_2 + jQ_2 = 1.6 + j1.3024$, 根据式 (7) ~ (10) 计算出的裕度指标如表 1 所示。

表 1 从运行点 1 到运行 2 的裕度指标

Tab 1 Margin index of voltage from operating point 1 to point 2

指标类型	K_p	K_u	K_q	K_s
裕度系数	0	30.3%	62.8%	28.1%

2) 保持节点 5 负荷的无功功率恒定, 逐渐增加负荷的有功功率得临界电压崩溃运行点 3, $P_3 + jQ_3 = 2.3517 + j0.8$, 根据式 (7) ~ (10) 计算出的裕度指标如表 2 所示。

表 2 从运行点 1 到运行 3 的裕度指标

Tab 2 Margin index of voltage from operating point 1 to point 3

指标类型	K_p	K_u	K_q	K_s
裕度系数	47%	24.5%	0	42%

3) 按功率因数同时增大节点 5 负荷的有功和无功功率, 得临界电压崩溃运行点 4, $P_4 + jQ_4 = 2.0524 + j1.0262$, 根据式 (7) ~ (10) 计算出的裕度指标如表 3 所示。

表 3 从运行点 1 到运行 4 的裕度指标

Tab 3 Margin index of voltage from operating point 1 to point 4

指标类型	K_p	K_u	K_q	K_s
裕度系数	28.3%	26.9%	28.3%	28.3%

结果分析表明, 当系统按某种负荷增长方式从给定运行状态逐渐逼近电压崩溃点时, 根据裕度指标定义, 虽然可以用电压 (kV)、有功 (MW) 及无功 (Mvar) 来表示系统稳定程度的大小, 但从本例的计算数据来看, 这三种裕度指标表示方法均不太合适。原因一, 临界电压非独立变量, 其值大小受供电点负荷有功功率和无功功率的控制; 原因二, 当系统从运行点 1 到运行点 2 时, 有功裕度为零, 而当系统

从运行点 1 到运行点 3 时, 无功裕度又为零。只有用复功率表示的裕度指标, 不管选取什么路径, 其值均不为零, 且比较接近 K_u 值。因此, 采用视在功率的复数形式来表示电压稳定裕度是比较客观的。

4 结论

本文通过分析简单交流电路的负荷功率能力, 给出确定临界电压崩溃点的方法, 在此基础上, 提出了计算电力系统静态电压稳定裕度的新方法。该方法克服了采用电压、有功及无功作为裕度指标的缺陷, 为建立静态电压稳定指标提供了较好的理论和实践依据。

参考文献:

- [1] 包黎昕, 张步涵, 段献忠, 等. 电压稳定裕度指标分析方法综述 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (8): 52-56
BAO Li-xin, ZHANG Bu-han, DUAN Xian-zhong, et al. A Summary of the State of the Art of Voltage Stability Margin Indices [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (8): 52-56
- [2] 周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标述评 [J]. 电网技术, 2001, 25 (1): 1-7.
ZHOU Shuang-xi, JIANG Yong, ZHU Ling-zhi. Review on Steady State Voltage Stability Indices of Power Systems [J]. Power System Technology, 2001, 25 (1): 1-7.
- [3] GIGRE Task Force 38.02.11 GIGRE Technical Brochure: Indices Predicting Voltage Collapse Including Dynamic Phenomenon [J]. Electra, 1995, 159: 135-147.
- [4] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 计及负荷特性的电压稳定安全指标快速计算 [J]. 中国电机工程学报, 1995, 15 (3): 166-171.
DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, CHEN De-shu. Fast Algorithm of Voltage Stability Steady Index Including Load Characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15 (3): 166-172
- [5] Semlyen A, Gao B, Janischewskyj W. Calculation of the Extreme Loading Condition of a Power System for the Assessment of Voltage Stability [J]. IEEE Trans on PWRs, 1991, 6 (1): 307-315.
- [6] Canizares CA, Aivarado FL. Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems [J]. IEEE Trans on PWRs, 1993, 8 (1): 1-8
- [7] Ajarapu V, Battula S. Effect of Load Modeling on Steady State Voltage Stability [J]. Electric Machines and Power Systems, 1995, 23 (5): 501-514.
- [8] 周双喜, 杨宁, 冯治鸿. 大型电力系统 PV 曲线的求取 [J]. 电网技术, 1996, 20 (8): 4-8

- ZHOU Shuang-xi, YANG Ning, FENG Zhi-hong Seeking PV Curves in Bulk Power System [J]. Power System Technology, 1996, 20(8): 4-8
- [9] 张尧,宋文南. 节点电压稳定临界状态和弱节点的确定 [J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(6): 40-45.
- ZHANG Yao, SONG Wen-nan Determination of the Critical State of Voltage Stability in Load Buses and the Weakest Bus of the Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(6): 40-45.
- [10] 段献忠,何仰赞,陈德树. 论电力系统电压稳定几种实用判据和安全指标 [J]. 电力系统自动化, 1994, 18(9): 36-41.
- DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, CHEN De-shu On Some Practical Criteria and Security Indices for Voltage Stability in Electric Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(9): 36-41.
- [11] 吴伯强. 负荷对电力系统电压稳定性的影响 [J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2002, 14(1): 52-54.
- WU Bo-qiang Influence of Load on Voltage Stability in Power System [J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy & Hydropower College, 2002, 14(1): 52-54.
- [12] 李劲波,郭银华. 一种静态电压稳定指标求解方法 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1994, 27(5): 526-530.
- LI Jin-bo, GUO Yin-hua An Algorithm for Determining Index of Static Voltage Stability [J]. Journal of Wuhan University of Hydropower & Electrical Engineering, 1994, 27(5): 526-530.

收稿日期: 2005-09-26; 修回日期: 2005-12-03

作者简介:

李盛林 (1967-),男,工学硕士,研究方向为电力系统安全与控制;

卢勇 (1970-),男,工学硕士,研究方向为电力系统分析与计算;

卢志强 (1968-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与计算。E-mail: lu8757@tom.com

A new method for calculating stationary voltage stability margin

LI Sheng-lin¹, LU Yong¹, LU Zhi-qiang², HANG Nai-shan²

(1. Guangxi Electric Power Vocation Technical College, Nanning 530007, China;

2. Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The new calculating method of stationary voltage stability critical node is put forward by analyzing the ability of the load power of simple alternative circuit branch. Based on the collapsing node of the critical voltage, the suggestion that the stable margin of stationary voltage is proved reasonable by comparing with the different indications of calculated margin. Case of IEEE 5 node algorithm system is proposed as well.

Key words: power system; voltage stability; margin index

(上接第 29 页 continued from page 29)

宣映霞 (1974 -),女,工程师,从事负荷预测研究;

李义 (1966 -),男,高级工程师,从事电力系统新型继电保护研究。

A new electromagnetic transient simulation approach accounting for impulsive corona and frequency-dependence line parameters

SHU Hong-chun^{1,2}, XUAN Ying-xia³, LI Yi⁴, SIDa-jun², YU Ji-lai²

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Kunming Power Supply Bureau, Kunming 650051, China;

4. Huadian Zhenxiong Power Generation Company, Zhenxiong 657200, China)

Abstract: On the basis of analyzing V-Q characteristic of impule corona, the influence of corona is considered by splitting the line into some short lines and inserting equivalent capacity of corona at both terminals of those short lines. As a result, both impulse corona and frequency-dependence line parameters are included in electromagnetic transient simulation. Lots of simulations show the results including corona are quite different from the results that ignoring corona. The influence of impulsive corona should be considered when lightning strike on line is studied.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50347026, 50467002), Yunnan R&D Technologies Programme (No. 2000B2-02, 2003GG10), and Basic Research Project of Yunnan Province (No. 2002E0025M, 2004E0020M).

Key words: impulse corona; electromagnetic transient; transmission line