

基于交流电路的临界电压崩溃特性分析

廖青华¹, 杨捷¹, 徐涛²

(1. 河南机电高等专科学校, 河南 新乡 453002; 2 内蒙古工业大学电力学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 针对电力系统电压崩溃问题, 在简单电路的基础上, 用更直观的方法对电压稳定性问题加以分析。分析交流电路的临界电压崩溃运行点, 在求解交流电路的方程组过程中, 采用了几何分析方法。分析得出在不同运行点情况下临界电压崩溃潮流的电流电压特性。通过分析不计电阻的交流电路临界电压崩溃时的负荷特性、电压特性, 指出交流电路的工作域和崩溃域。同时分析指出, 在电力系统的工作域中, 交流电路的功率输送特性必须与负荷的功率特性相容。

关键词: 电力系统; 电压崩溃临界点; 工作域; 崩溃域

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)19-0022-04

0 引言

在电压稳定问题的分析中, 潮流多解法^[1]及潮流雅可比矩阵奇异法^[2], 是从潮流非线性代数方程组的求解方面讨论电压稳定问题; 以非线性控制系统理论为基础的灾变^[3]、混沌^[4]、分岔^[5]及能量函数法^[6]等, 从数学解析的角度讨论电压稳定问题; 动态分析法从微分、差分方程的数值求解角度讨论电压稳定问题。以上各类分析方法的成果互为补充。而突出物理概念的最大功率法^[7], 以电路理论为基础, 致力于求取网络的最大传输功率, 其研究结果也是前几类电压稳定分析方法结论的物理解释, 因而至今仍是电压稳定问题的研究热点之一。

电力系统可用微分代数方程的形式表示^[8], 其中电力网络的代数方程是稳态交流电路的方程组。由于越来越多的涉及自动控制、电力电子技术的大功率负荷出现, 使得现代电力系统的负荷特性多表现为功率形式^[9,10], 电力网络的非线性代数方程就呈现出与阻抗型负荷或电压源型负荷所不同的特性, 例如出现多解、唯一解以及方程无解的情形, 就面临着文献 [11] 中指出的“在数学领域中还没有关于非线性代数方程解的个数的理论, 也没有计算多解的有效算法”数学困难。但代数方程反映的是电力系统动态过程、稳态运行中电力网络的运行点, 大型电力系统的运行域也就是由各简单交流电路的稳态运行特性的交集所构成, 则可利用电路的物理特性分析, 解决潮流方程数学上困难的问题。

本文分析复杂电力系统基本组成单元(简单支路)的功率负荷能力, 得出简单交流电路的稳态运行条件以及临界电压崩溃潮流的电流电压特性。

1 交流电路的临界电压崩溃运行点

电力网络的运行点是交流电路代数方程组的解。

1.1 交流电路的运行点

联结送端 S、受端 R 的支路示于图 1 中, 该支路具有电阻 r_{SR} 、电抗 x_{SR} (将该支路两端的接地支路并入两端节点考虑), 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_{RS} 、 Q_{RS} , 受端输出的功率为 P_{RS} 、 Q_{RS} 。

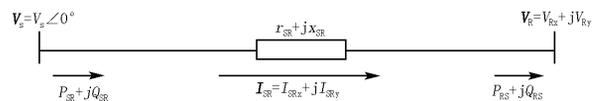


图 1 简单交流电路

Fig 1 A simple alternating current circuit

图 1 电路的支路电压方程为:

$$V_R = V_S - I_{SR} (r_{SR} + jx_{SR})$$

即
$$V_{Rx} = V_S - (I_{SRx} r_{SR} - I_{SRy} x_{SR}) \quad (1)$$

$$V_{Ry} = - (I_{SRx} x_{SR} + I_{SRy} r_{SR}) \quad (2)$$

图 1 电路受端的输出功率为:

$$P_{RS} + jQ_{RS} = V_R I_{SR}$$

即
$$P_{RS} = V_{Rx} I_{SRx} + V_{Ry} I_{SRy} \quad (3)$$

$$Q_{RS} = V_{Ry} I_{SRx} - V_{Rx} I_{SRy} \quad (4)$$

图 1 支路的运行点为式 (1) ~ (4) 方程组的解, 消去其电压分量后, 该方程组又可表示为:

$$P_{RS} = V_S I_{SRx} - (I_{SRx}^2 r_{SR} + I_{SRy}^2 x_{SR}) \quad (5)$$

$$Q_{RS} = - V_S I_{SRy} - (I_{SRx}^2 x_{SR} + I_{SRy}^2 r_{SR}) \quad (6)$$

将式 (5)、(6) 的方程组转化为圆的标准形式为:

$$\begin{cases} \left(I_{SRx} - \frac{V_S}{2r_{SR}} \right)^2 + I_{SRy}^2 = \frac{V_S^2}{4r_{SR}^2} - \frac{P_{RS}}{r_{SR}} & (7) \\ I_{SRx}^2 + \left(I_{SRy} + \frac{V_S}{2x_{SR}} \right)^2 = \frac{V_S^2}{4x_{SR}^2} - \frac{Q_{RS}}{x_{SR}} & (8) \end{cases}$$

以 I_{SRx} 、 I_{SRy} 为变量,式 (7) 表示的圆称为 C_P ,其半径为 R_P ,式 (8) 表示的圆称为 C_Q ,其半径为 R_Q 。两圆的圆心 O_P 、 O_Q 的坐标分别为:

$$O_P: \left(\frac{V_S}{2r_{SR}}, 0 \right), O_Q: \left(0, -\frac{V_S}{2x_{SR}} \right)$$

两圆的半径分别为:

$$R_P = \sqrt{\frac{V_S^2}{4r_{SR}^2} - \frac{P_{RS}}{r_{SR}}} \quad (9)$$

$$R_Q = \sqrt{\frac{V_S^2}{4x_{SR}^2} - \frac{Q_{RS}}{x_{SR}}} \quad (10)$$

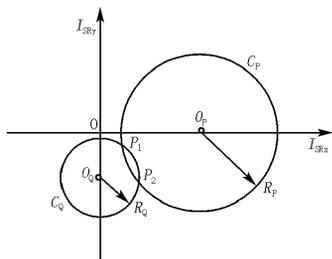


图 2 两圆相交

Fig 2 Two circles are intersectant

显然,式 (7)、(8) 有解的条件为两圆的半径大于或等于零且两圆相交或相切。当两圆相交时,两交点如图 2 中的 P_1 、 P_2 所示,则在同一负荷 P_{RS} 、 Q_{RS} 下,图 1 电路存在两个运行点。

若有功负荷给定、无功负荷 Q_{RS} 逐渐增大,则圆 C_P 、 C_Q 的半径 R_P 、 R_Q 逐渐缩小。当两圆缩小到外切于 P_1 点时,如图 3(a) 所示,方程式 (5)、(6) 有唯一解,则图 1 电路存在唯一运行点 P_1 。

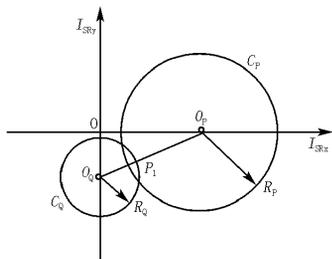


图 3(a) 两圆外切

Fig 3(a) Two circles are tangent outside

若有功负荷给定,无功负荷逐渐减小,则圆 C_P 、 C_Q 的半径 R_P 、 R_Q 逐渐扩大。当圆 C_P 扩大到与圆 C_Q 内切于 P_2 点时,如图 3(b) 所示,方程式 (5)、

(6) 有唯一解,则图 1 电路存在另一个临界电压崩溃运行点 P_2 。

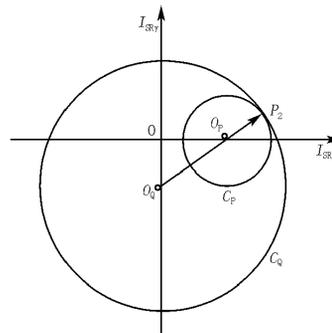


图 3(b) 两圆内切

Fig 3(b) Two circles are tangent inside

若 C_P 、 C_Q 随 Q_{RS} 的增大而继续缩小,两圆无交点,则式 (5)、(6) 无解,即图 1 电路的功率输送特性与负荷功率特性不相容,若负荷仍保持原特性,电路将无法运行,则负荷必将失去原工作特性,落入异常域中,例如异步电动机转子堵转、荧光灯气体放电停止。负荷不能保持原工作特性或者“故障后的平衡点超出系统运行限制范围”^[10] 的现象,文献 [10] 称之为电压崩溃,本文也采用这样的概念。

图 3(a) 的解 P_1 为工作域与崩溃域的分界点,称之为图 1 电路的临界电压崩溃运行点。这是一种允许负荷电流、电压在符合物理规律的定义域内高自由度变化情况下可能的极端运行方式。若附加了负荷功率因数或负荷电压等限制条件,则是条件运行方式问题。限于篇幅,不在本文讨论。

对于给定有功负荷的情况,要使电路的功率输送特性与负荷功率特性相容,无功负荷的允许变化范围是使圆 C_Q 的半径在内切圆和外切圆之间。

1.2 外切圆临界电压崩溃的电流电压特性

取图 3(a) 中三角形 $O_Q O O_P$ 的斜边

$$D = \sqrt{\left(\frac{V_S}{4r_{SR}} \right)^2 + \left(\frac{V_S}{2x_{SR}} \right)^2}$$

图 3(a) 中,从 P_1 点作垂直于 I_{SRx} 轴的垂线,利用相似三角形性质,并计及外切圆临界电压崩溃运行时, $R_P + R_Q = D$,可得图 1 电路临界电压崩溃运行点 P_1 的电流:

$$I_{SRx} = \frac{V_S R_Q}{2r_{SR} D} \quad (11)$$

$$I_{SRy} = -\frac{V_S R_P}{2x_{SR} D} \quad (12)$$

将式 (11)、(12) 代入式 (1)、(2),得受端电压:

$$V_{Rx} = \frac{V_S}{2} \quad (13)$$

$$V_{Ry} = -\frac{V_S}{2} \left(\frac{x_{SR} R_Q}{r_{SR} D} - \frac{r_{SR} R_P}{x_{SR} D} \right) \quad (14)$$

送端功率为：

$$P_{SR} = V_S I_{SRx} = \frac{V_S^2 R_Q}{2 r_{SR} D} \quad (15)$$

$$Q_{SR} = -V_S I_{SRy} = \frac{V_S^2 R_P}{2 x_{SR} D} \quad (16)$$

1.3 内切圆临界电压崩溃的电流电压特性

根据图 3(b)分析并计及内切圆临界电压崩溃运行时, $R_p = D + R_Q$, 可得图 1 电路的临界电压崩溃运行点 P_2 的电流：

$$I_{SRx} = -\frac{V_S R_Q}{2 r_{SR} D} \quad (17)$$

$$I_{SRy} = -\frac{V_S R_P}{2 x_{SR} D} \quad (18)$$

将式 (17)、(18)代入式 (1)、(2), 得受端电压：

$$V_{Rx} = \frac{V_S}{2} \quad (19)$$

$$V_{Ry} = \frac{V_S}{2} \left(\frac{x_{SR} R_Q}{r_{SR} D} + \frac{r_{SR} R_P}{x_{SR} D} \right) \quad (20)$$

送端功率为：

$$P_{SR} = V_S I_{SRx} = -\frac{V_S^2 R_Q}{2 r_{SR} D} \quad (21)$$

$$Q_{SR} = -V_S I_{SRy} = \frac{V_S^2 R_P}{2 x_{SR} D} \quad (22)$$

2 不计电阻的交流电路负荷 PQ 特性

不计电阻的情况是便于物理概念分析的简明情况, 根据式 (1) ~ (6), 当 $r_{SR} = 0$ 时, 式 (5)、(6) 的解为：

$$V_{SRx} = \frac{P_{RS}}{V_S} \quad (23)$$

$$I_{SRy} = -\frac{V_S}{2x_{SR}} \pm \frac{1}{2x_{SR}} \sqrt{V_S^2 - 4x_{SR} Q_{RS} - 4x_{SR}^2 \frac{P_{RS}^2}{V_S^2}} \quad (24)$$

式 (23)、(24) 说明, 不计电阻的交流电路, 只要受端无功负荷 Q_{RS} 能与电路的功率输送特性相容, 其输送的有功负荷 P_{RS} 不受电气特性的限制。

2.1 临界电压崩溃的 PQ 特性

对于输送给定的刚性有功负荷 P_{RS} 情况, 当式 (24) 中 Q_{RS} 取最大值

$$Q_{RS} = \frac{V_S^2}{4x_{SR}} - \frac{P_{RS}^2 x_{SR}}{V_S^2} \quad (25)$$

时, 式 (24) 有唯一解, 即图 1 电路临界电压崩溃状

态时的电流分量为：

$$I_{SRx} = \frac{P_{RS}}{V_S} \quad (26)$$

$$I_{SRy} = -\frac{V_S}{2x_{SR}} \quad (27)$$

根据式 (1) ~ (4), 相应的电压分别为：

$$V_{Rx} = \frac{V_S}{2} \quad (28)$$

$$V_{Ry} = -\frac{P_{RS}}{V_S} x_{SR} \quad (29)$$

$$V_R = \sqrt{\frac{V_S^2}{N^4} + \frac{P_{RS}^2 x_{SR}^2}{V_S^2}} \quad (30)$$

令 $Q_{RS}^* = Q_{RS} \frac{x_{SR}}{V_S^2}$, $P_{RS}^* = P_{RS} \frac{x_{SR}}{V_S^2}$, $V_R^* = \frac{V_R}{V_S}$, 即以电路末端短路时的短路功率为基准功率, 以始端电压为基准电压, 式 (30)、(25) 可用标么值表示为：

$$V_R^* = \sqrt{\frac{1}{N^4} + P_{RS}^{*2}} \quad (31)$$

$$Q_{RS}^* = \frac{1}{4} - P_{RS}^{*2} \quad (32)$$

将临界电压崩溃的条件式 (31)、(32) 绘于图 4 中。

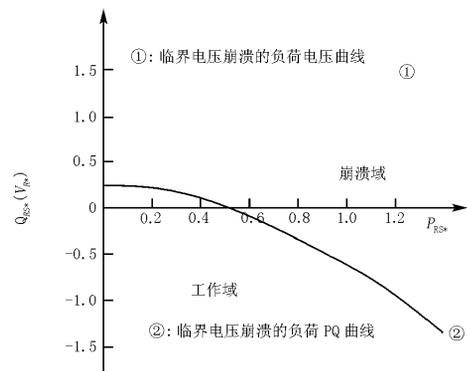


图 4 临界电压崩溃的负荷 PQ 曲线

Fig 4 Load PQ curve of critical voltage collapse

2.2 特性分析

由图 4 可以观察到：

临界电压崩溃的电压特性。若输送的有功负荷 $P_{RS}^* = 0$, 其临界崩溃的 $Q_{RS}^* = 0.25$, $V_R^* = 0.5$ 。随输送的有功负荷加大, 临界崩溃电压升高。而工作域内存在运行点的电压可以小于 0.5。所以负荷端电压值的高低不是直接判断电压崩溃的依据。

感性无功负荷特性。若输送的有功负荷 $P_{RS}^* = 0.5$, 其临界崩溃的 $Q_{RS}^* = 0$, $V_R^* = 0.707$ 。若负荷端为感性无功负荷, 则该电路在有功负荷不

很大、电压水平较低的情况下发生电压崩溃。

容性无功负荷特性。若输送 $P_{RS^*} = 1.0$ 的重有功负荷,其临界崩溃的 $Q_{RS^*} = -0.75$, $V_R^* = 1.1118$ 。若负荷端为容性无功负荷,则该电路在有功负荷较大、电压水平较高的情况下发生电压崩溃。

电压崩溃特性。交流电路具有随输送的有功负荷增大,临界电压崩溃的无功负荷相应减小的固有特性。若受端负荷特性是有功增大、无功也增大,特别是电压降低时无功负荷相应增大,则电路易引发电压崩溃。一旦出现 $Q_{RS^*} + P_{RS^*}^2 > 1/4$ 的负荷功率,则将引发电压崩溃,应切除该不利负荷。

最大有功负荷输送特性。从电压崩溃的角度看,只要负荷端能提供足够的容性无功(例如馈电支路的无功补偿)或提供受端所需要的电压(例如输电支路的有载调压),则电路的有功负荷输送能力可大幅度提高。此时,传输的有功负荷不受电气特性限制,仅受输电线路的效率或热稳定的限制。

3 结论

若电路的功率输送特性与负荷功率特性不相容,则负荷必将失去原工作特性,落入崩溃域中。在电力系统的稳态运行、暂态过程中,系统各电路的功率输送特性均要与负荷功率特性相容,否则可引发电压崩溃。这种系统不能正常工作的形式不同于静态稳定中按 $\frac{\partial Q}{\partial V} > 0$ 的控制方式、在 $\frac{\partial Q}{\partial V} = 0$ 或 $\frac{\partial Q}{\partial V} < 0$ 的运行点出现控制失效或适得其反的形式,也不同于暂态稳定(功角稳定)中系统的控制不能保持系统同步的形式。

电压崩溃反映为潮流方程无解,潮流方程无解是由于按工作域的负荷特性作崩溃域的潮流计算,这正是引起潮流计算不收敛的重要原因。

若负荷端表现出其输入端电压降低,而相应的有功、无功负荷未必减少,甚至反而增大的不利负荷的特性,电力系统就应以规避电压崩溃为目标,主动配置进行综合负荷特性调节的无功补偿。

简单交流电路的临界电压崩溃特性分析,不仅便于电压崩溃的物理解释,而且是构成复杂电力系统临界电压崩溃分析与计算的基础。

参考文献:

- [1] Tamura Y. Relationship Between Voltage Instability and Multiple Load Flow Solutions in Electric Power Systems [J]. IEEE Trans on PAS, 1983, 102(5): 1115-1123

- [2] Venikov V A, Stroeve V A, Idelchick V I, et al Estimation of Electric Power System Steady-state Stability in Load Flow Calculation [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1975, 94: 1034-1041.
- [3] Chiang H D. On Voltage Collapse in Electric Power Systems [J]. IEEE Trans on PWRs, 1990, 5(2): 601-611.
- [4] 贾宏杰,余贻鑫,李彭,等. 电力系统混沌现象与不同失稳模式之间的关系 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 1-4
- JIA Hong-jie, YU Yi-xin, LI Peng, et al Relationships of Power System Chaos and Instability Models [J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(2): 1-4
- [5] 王庆红,周双喜. 电力系统微分代数模型奇异诱导分岔分析 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 18-22
- WANG Qing-hong, ZHOU Shuang-xi Singularity Induced Bifurcation in Power System Differential Algebraic Model [J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(7): 18-22
- [6] Overbye T J. Use of Energy Methods for On-Line Assessment of Power System Voltage Security [J]. IEEE Trans on PWRs, 1993, 8(2): 452-457.
- [7] Ajarapu V, Christy C. The Continuation Power Flow: a Tool for Stability State Voltage Stability Analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 7(1): 416-423.
- [8] FENG Zhi-hong, Ajarapu V. Identification of Voltage Collapse Through Direct Equilibrium Tracing [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 342-348
- [9] Kurdur P. Power System Stability and Control (影印版) [M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
- Kurdur P. Power System Stability and Control (Process Plate) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [10] Taylor C W. Power System Voltage Stability (影印版) [M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
- Taylor C W. Power System Voltage Stability (Process Plate) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [11] 徐泰山,薛禹胜,韩祯祥. 关于电力系统电压稳定性分析方法的综述 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(5): 62-67.
- XU Tai-shan, XUE Yu-sheng, HAN Zhen-xiang A Survey on Voltage Stability Analysis Methods [M]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(5): 62-67.
- [12] 杭乃善,廖青华,李如琦,等. 电力系统临界电压崩溃潮流的柔性节点算法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 57-61.
- HANG Nai-shan, LIAO Qing-hua, LI Ru-qi, et al A Flexible Node Algorithm for Critical Voltage Collapse Power Flow in Power System [J]. Proceedings of CSEE, 2005, 25(17): 57-61.

(下转第 37 页 continued on page 37)

- [4] Skeie T, Johannessen S, Brunner C. Ethernet in Substation Automation [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2002, 22 (3): 43-51.
- [5] IEC 61850 Communication Networks and System in Substations[Z]. 2002
- [6] 韩小涛, 聂一雄, 尹项根. 基于 OPNET的变电站二次回路通信系统仿真研究 [J]. 电网技术, 2005, 29 (6): 67-77.
HAN Xiao-tao, NIE Yi-xiong, YIN Xiang-gen Research on Substation Secondary Circuit Communication System Using OPNET Simulator [J]. Power System Technology, 2005, 29 (6): 67-77.
- [7] Electrical Power Research Institute (EPRI). UCA2.0 Standard Document, Part II [Z].
- [8] Haude J A. Pilot Project for Testing the Standard Drafts for Open Communication in Substations - first Experiences With the Future Standard IEC61850 [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 5 (2): 79-90

收稿日期: 2006-03-09; 修回日期: 2006-04-04

作者简介:

高会生 (1963 -), 男, 教授, 硕士生导师, 华北电力大学, 电子与通信工程系, 研究方向为电力系统通信及网络管理系统;

靳玮玮 (1981 -), 女, 在读硕士研究生, 研究方向为通信与信息系统; E-mail: ncepu_jww@yahoo.com.

Research on end-to-end delay for substation communication based on OPNET simulator

GAO Hui-sheng, JIN Wei-wei

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Firstly, the simulation software OPNET is introduced. On the basis of deeply studying the structure of the communication network and characteristics of data flow in the substation, the data communication simulation model between protection and supervision units in interval layer and supervision equipments along with engineer stations in station level is built up by using OPNET, then the end-to-end delay of protection and supervision signal in the substation is studied particularly. The main factors that influence the end-to-end delay is deduced, and it is proved that protocols of higher layer have important influence on the real-time communication, then it presents that considering the influence of protocols of higher layer the communication end-to-end delay is still less than 4ms.

Key words: substation automation; network communication; OPNET; network simulation; end-to-end delay

(上接第 25 页 continued from page 25)

收稿日期: 2005-10-10; 修回日期: 2006-01-16

作者简介:

廖青华 (1978 -), 女, 硕士, 研究方向为电力系统分析

与计算; E-mail: lqh2004nn@163.com

杨捷 (1976 -), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为电力系统规划与保护;

徐涛 (1968 -), 男, 硕士, 研究方向为电力系统分析与计算。

Characteristic analysis for critical voltage collapse based on alternating current circuit

LIAO Qing-hua¹, YANG Jie¹, XU Tao²

(1. Henan Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang 453002, China;

2. School of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: To solve the problem of voltage collapse in power system, this paper analyzes voltage stability problem by more visualized method based on a single circuit model and the critical voltage collapse running point of alternating current circuit. The geometric analysis method is employed to solve equations set of alternating current circuit. The current-voltage characteristic of the critical voltage collapse power flow of different running point is obtained. By analyzing the load characteristic and voltage characteristic of the alternating current circuit with zero resistance, it divides the running zone and the collapse zone of alternating current circuit. Research shows that within the running zone of power system, the power transmitting characteristic of alternating current circuit must be consistent with the load power characteristic.

Key words: power system; critical point of voltage collapse; running zone; collapse zone