

在线电压稳定分析中快速连续潮流的应用

徐晓春¹, 万秋兰¹, 顾伟¹, 高宗和², 杨胜春², 赖业宁²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 在线电压稳定分析中, 快速连续潮流作为一个重要的分析手段发挥着核心的作用。连续法通过增加一维参数化方程, 消除了功率极限点附近的雅可比矩阵奇异的现象, 能够精确地计算到临界点。在通过对参数化方程比较的基础上, 采用不同的控制参数, 应用负荷型连续潮流、故障型连续潮流、支路型连续潮流, 得到三种不同的 λV 曲线, 分析了它们在线静态电压稳定分析中的应用。通过 IEEE300 节点系统的算例验证了这几种方法的正确性以及在实际应用中的可行性。

关键词: 快速连续潮流; 参数化方程; 控制参数

Application of fast continuation power flow for on-line voltage stability analysis

XU Xiao-chun¹, WAN Qiu-lan¹, GU Wei¹, GAO Zong-he², YANG Sheng-chun², LAI Ye-ning²

(1. School of Electric Power Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. NARI Technology Development Co., Ltd, Nanjing 210003, China)

Abstract: In the on-line voltage stability analysis, the fast continuation power flow is the most important part and plays a great significant role. By an extended equation, the continuation method can pass the 'nose' point and get the whole λV curve without any numerical difficulty of ill-conditioning. In this paper, several different kinds of λV curves are implemented by different control parameters such as the load, generator and branch parameters. Simulation of IEEE 300 bus system validates its feasibility for on-line voltage stability analysis in both the accuracy and the time.

Key words: fast continuation power flow; parameterization equations; control parameter

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)14-0037-05

0 引言

过去数十年中, 世界上一些大电网相继发生了多起大停电事故, 电压不稳定/崩溃成为了现代电网运行所面临的主要风险之一。

与其他稳定问题相比, 长期电压稳定问题可以用静态模型和方法来近似模拟, 大型电力系统在进行在线静态稳定分析尤其是静态电压稳定分析时, 连续潮流作为在线电压稳定的一个重要部分, 常常要模拟系统中某些参数(负荷, 发电机, 线路)改变对整个系统状态的影响及其变化轨迹, 准确地判断系统的临界点, 为电力系统的静态电压稳定分析提供有力的判据。同时连续潮流还能在事故后电压稳定评估中做出重要的贡献^[1]。

本文基于现有的 EMS 和 SCADA 系统, 进行了在线静态电压稳定分析中连续潮流模块的算法研究和开发(图 1)。对主导节点电压法、正交平面法、弧

长法三种不同的参数化方程的求解方法进行了比较, 确认了弧长法求解方法的鲁棒性。同时用程序实现了负荷型连续潮流、故障型连续潮流、支路型连续潮流三种不同功能的连续潮流, 并用 IEEE 300 节点系统作为分析对象, 进行了具体计算。其计算结果可以有效地帮助运行人员实时评估和监视电网的电压状况, 为 EMS 的在线电压稳定分析功能提供了技术支持。

1 连续潮流的数学模型

通常的潮流方程(极坐标形式)可以表示为:

$$f(\theta, V) = 0 \quad (1)$$

其中: θ 表示电压相角, V 表示电压幅值。

在常规潮流的基础上通过某个或某些参数的改变, 增加变量的个数, 得到模拟系统在不同条件下的状态的目的。此时潮流的模型可以表示为:

$$f(\theta, V, \lambda) = 0 \quad (2)$$

其中: θ 表示电压相角, V 表示电压幅值, λ 表示要模拟的参数, 可以为负荷的增长因子, 发电机断线的衰减因子, 线路参数的改变因子。通过改变 λ 的值可以得到不同工况下的系统运行状态, 但是由于随着 λ 的变化, 常规潮流在临界点处不能收敛, 无法得到极限点, 自然也就无法描绘出完整的曲线。

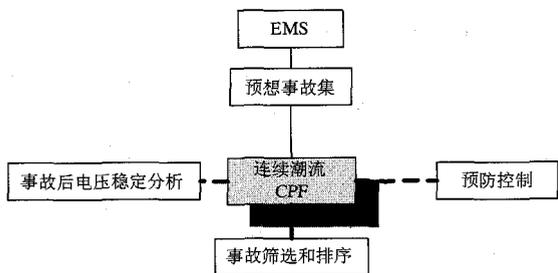


图1 在线电压稳定分析中连续潮流

Fig. 1 Continuation power flow in the on-line voltage stability analysis

连续法通过增加了一维方程, 即参数化方程, 使潮流在拐点处不奇异, 并能成功越过拐点, 计算出曲线的下半支。为此, 连续法潮流方程为:

$$\begin{cases} f(\theta, V, \lambda) = 0 \\ G(\theta, V, \lambda) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: $G(\theta, V, \lambda) = 0$ 为附加的一维方程, 对于式(3)的求解, 可以通过预测, 校正^[2-5]的求解方法, 能以较少的迭代次数求得曲线上的点, 保证其求解效率。

本文通过在比较不同的参数化方法的基础上对几种不同功能的连续潮流进行了比较, 并论述了它们在电力系统中的应用。

2 不同参数化方程的连续法

通过改变增加的一维参数化方程, 可以得到不同的参数化方法, 这里比较三种实用以及主流的参数化方法。

2.1 主导节点电压法

主导节点法^[6]衍生于局部参数化法, 局部参数化法在选择连续参数的时候选择的是所有状态变量切向量中模值最大的向量, 从而要考虑到局部参数的转换和校正方向的调整, 而主导节点法仅要考虑状态变量中的电压分量, 选择其切向量的最大模值作为连续参数, 在校正步中可以使用单纯的水平校正, 简化了程序。其预测-校正示意图如图2。

2.2 正交平面法

正交平面法^[7,8]是在预测步之后, 在校正中改变预测步的校正方向, 用与预测向量垂直的平面方程

作为参数化方程。

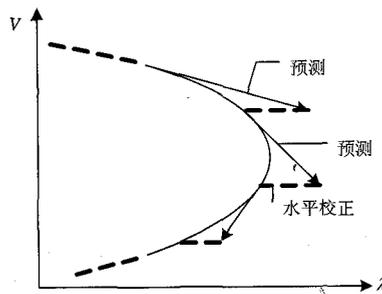


图2 主导节点电压法的水平校正示意图

Fig. 2 Principle of the pilot bus voltage correction method

垂直平面方程, 即参数化方程:

$$\Delta\lambda[\lambda_n - (\lambda_0 + \Delta\lambda)] + \sum_{i=1}^n \Delta x[x_{ni} - (x_{0i} + \Delta x_i)] = 0 \quad (4)$$

其中: 下标 0 表示前一次迭代校正的点。 $\Delta\lambda$, Δx 分别为预测步的切向量。预测-校正示意图如图3。

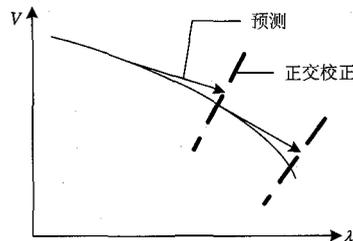


图3 正交平面法的正交校正示意图

Fig. 3 Principle of the orthogonal plane correction method

2.3 弧长法

弧长法^[9]通过在原始潮流方程的基础上增加一维弧长方程, 从而达到在奇异点不发散。其参数化方程:

$$\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 + (\lambda - \lambda_0)^2 = \Delta s^2 \quad (5)$$

其中: s 表示弧长。通过使用弧长法, 可以有效地自动控制步长, 从而在选择合适的弧长的情况下在整个曲线上有解。其预测-校正如图4。

由上分析三种附加方程, 从表面上看都能比较好地求解一般的曲线方程, 但是在实际应用中, 其中一些方法又有一定的局限性。如图5(a)对于主导节点法的水平校正, 当曲线遇到第二次拐点时如果一味水平校正就无法收敛; 如图5(b)对于正交校正, 在极限点处如果步长太大, 也无法收敛。

由此可以看出, 弧长法相对有更好的鲁棒性, 不收敛的概率较小, 能较好地处理各种情况下的 λV 曲线, 并在求解中自动控制步长, 提高了求

解效率,故在以下的参数化法中采用弧长法。

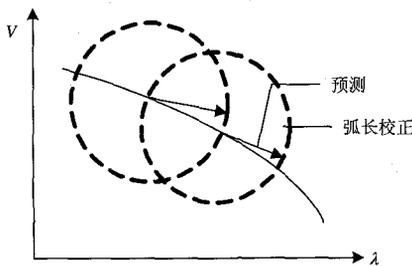


图4 弧长法的弧长校正示意图

Fig.4 Principle of the arc-length correction method

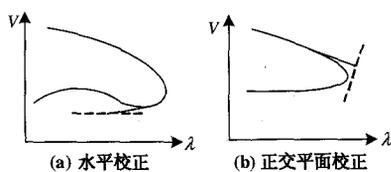


图5 两种参数化方程遇到的特殊情况

Fig.5 Two specific situations

3 三种连续潮流模型及其应用

3.1 负荷型连续潮流

负荷型连续潮流通过增加负荷参数,模拟系统电压随着负荷变化时的变化情况,得到反映系统负荷裕度的 λV 曲线,为在线负荷裕度分析的量化提供了很高精度的保证。同时可根据负荷型连续潮流不同节点的 λV 曲线,识别出系统中的电压薄弱点,为预防控制环节提供了信息。其模型:

$$0 = P_{Gi0}(1 + \lambda K_{PGi}) - P_{L0}(1 + \lambda K_{PLi}) - \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (6)$$

$$0 = Q_{Gi} - Q_{L0}(1 + \lambda K_{QLi}) - \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (7)$$

其中: $i = 1, \dots, n$

3.2 故障型连续潮流

故障型连续潮流^[10],主要模拟系统中发电机节点或负荷节点开断时对系统电压的影响,其单个模型如式(8), (9)所示:

单个发电机:

$$0 = P_{Gi}(1 - \lambda) - P_{Li} - \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (8)$$

单个负荷:

$$0 = P_{Gi} - P_{Li}(1 - \lambda) - \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (9)$$

当参数 λ 等于0时,潮流方程是该发电机或负荷未开断时的潮流方程。当参数 λ 等于1时,潮流方程是发电机或负荷开断后的潮流方程。判别所模拟事故是否为失稳事故的判据主要由 λ 确定,当 $\lambda < 1$ 时,事故为失稳事故,当 $\lambda \geq 1$ 时为安全事故。 $0 < \lambda < 1$ 表示事故裕度指标,越小稳定性越差,对于 $\lambda \geq 1$ 表示在线路开断的情况下系统仍不失稳,故为一个安全事故。

3.3 支路型连续潮流

支路型连续潮流^[11]是模拟单条支路参数变化的连续潮流模型,将参数从负荷空间转移到支路参数空间。

数学模型如下:

若线路 i-m 发生事故, i 侧潮流模型方程:

$$0 = P_{Gi} - P_{Lio} - \sum_{j \in I, j \neq m} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i V_m (G_{im}(1 - \lambda) \cos \theta_{im} + B_{im}(1 - \lambda) \sin \theta_{im}) - V_i^2 G_{i \text{inew}} \quad (10)$$

$$0 = P_{Gi} - P_{Lio} - \sum_{j \in I, j \neq m} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i V_m (G_{im}(1 - \lambda) \sin \theta_{im} - B_{im}(1 - \lambda) \cos \theta_{im}) - V_i^2 B_{i \text{inew}} \quad (11)$$

式中: $G_{i \text{inew}} = G_{ii}' + \lambda G_{im}$ $B_{i \text{inew}} = B_{ii}' + \lambda(B_{im} - b_{imo})$
 G_{ii}' B_{ii}' 分别为支路 i-m 未发生事故时系统导纳矩阵的自导和自纳。

同理 m 处的参数化潮流方程也具有上面的形式。

支路型连续潮流失稳判断标准和故障型类似,判别所模拟支路事故是否为失稳事故的判据主要由 λ 确定,当 $\lambda < 1$ 时,事故为失稳事故,当 $\lambda \geq 1$ 时为安全事故。 $0 < \lambda < 1$ 表示事故裕度指标,越小稳定性越差,对于 $\lambda \geq 1$ 表示在线路开断的情况下系统仍不失稳,故为一个安全支路事故。

4 算例

以 IEEE300 节点系统作为算例,进行了负荷型连续潮流,故障型连续潮流,支路型连续潮流模块的编制和运算。系统参数化方程为弧长方程,程序由 C++ 编制。

硬件环境: CPU(PD 925),内存(1G)

软件环境: DEV C++

(1)负荷型连续潮流:

系统负荷增长方式为全系统增长方式, 发电机有功随着负荷同比例增加, 考虑系统中发电机的无功越限(260#,263#发生了节点类型转换, 其中 260#发电机无功上限为 200 MW, 263#无功上限为 500 MW)。IEEE300 系统 171, 204, 5#节点的 λV 曲线如图 6。

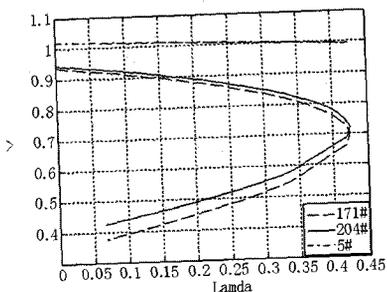


图 6 负荷型连续潮流的 λV 曲线
Fig.6 λV curves in the load mode

得到完整 PV 曲线系统的运行时间为 1.137 s, 根据图 6 可以得到系统的负荷裕度, 即临界点处的负荷裕度与当前负荷裕度之差 $1 + \lambda_c = 1.4208$ (λ_c 为临界点处的值)。同时还可以看出各节点电压随负荷增长的变化情况。

(2)故障型连续潮流

模拟开断 200, 170, 263#发电机, 对系统的电压情况进行观察。

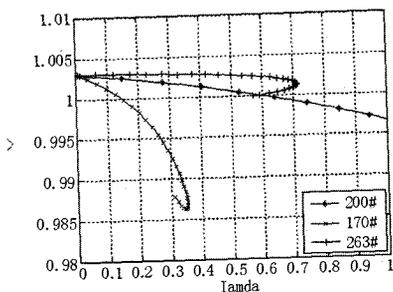


图 7 171#节点故障型连续潮流的 λV 曲线
Fig.7 λV curves of node 171# in the contingency mode

对于此系统进行一次计算的平均时间是 1.23 s。根据图 7, 200#节点上的发电机开断由于 $\lambda > 1$, 这是一个稳定的故障, 而 170, 263#发电机开断由于 $\lambda < 1$ 是失稳故障, 同时 $\lambda_{170} < \lambda_{263}$, 故 170#发电机断开的稳定性较差。

(3)支路型连续潮流

对系统线路中 257-43 线路和 178-189 线路进行断线模拟。

对于图 8(a)情况由于在拐点处以及在下半支的计算点比较多, 运行的时间为 2.32 s。对于图 8(b)情况, 计算完整的曲线时间为 1.212 s。开断 257-43

线路, 由图 8(a)可以看出 $\lambda_c < 1$, 因此这是一个失稳的开断线路故障, 而 8(b)对应于 $\lambda_c > 1$ 是一个稳定的断线故障, 其开断不会造成系统电压稳定问题。

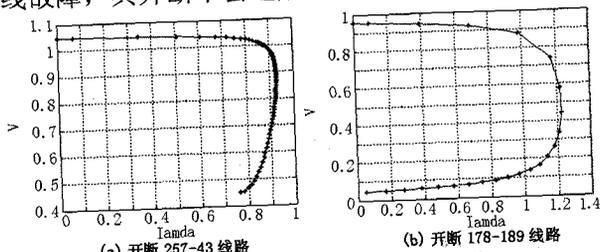


图 8 支路型连续潮流的 λV 曲线

Fig.8 λV curves in the branch mode

5 结论

连续法基于潮流方程, 在附加一维参数化方程后, 通过改变潮流方程中需要调节的参数, 可以得到不同条件下的不同类型的 λV 曲线。在连续法中, 参数化方法是一个很重要的因素, 通过比较可以看出弧长法有更好的适应性和鲁棒性。

负荷型连续潮流、故障型连续潮流、支路型连续潮流三种不同类型的连续潮流的实现, 可以看出连续潮流法能够很好地描绘出 λV 曲线的临界点, 为精确确定系统的最大负荷点以及判断系统的失稳与否和当前运行点离失稳点的裕度提供了有力的支持。

参考文献

- [1] 赵晋泉, 张伯明. 连续潮流及其在电力系统稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11):91-97. ZHAO Jin-quan, ZHANG Bo-ming. Summarization of Continuation Power Flow and Its Applications in Static Stability Analysis of Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11):91-97.
- [2] Christy C A. The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1):416-423.
- [3] Canizares C A, Alvarado F L. Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1):1-8.
- [4] 周双喜, 冯治鸿, 杨宁. 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, FENG Zhi-hong, YANG Ning. Seeking PV Curves in Bulk Power System[J]. Power System Technology, 1996, 20(8):4-8.
- [5] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压稳定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. An Improved Continuation Power Flow Method for Voltage Stability

- Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999,23(14):13-16.
- [6] 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(1):9-12.
JIANG Wei, WANG Cheng-shan. PV Curve Tracing in Power System Transfer Capability Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1):9-12.
- [7] Kenji Iba, Hiroshi Suzuki, et al. Calculation of Critical Loading Condition with Nose Curve Using Homotopy Continuation Method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2):584-591.
- [8] 祝达康, 程浩忠. 求取电力系统 PV 曲线的改进连续潮流法[J]. 电网技术, 1999, 23(4):91-97.
ZHU Da-kang, CHENG Hao-zhong, A Modified Continuation Power Flow Method for Computing PV Curve of Power System[J]. Power System Technology, 1999,23(4):91-97.
- [9] Chiang H D, Flueck A J, Shan K S, et al. CPFLOW: a Practical Tool for Tracing Power System Steady-state Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2):623-634.
- [10] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种用于静态稳定分析的故障参数化连续潮流模型[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14):45-49.
ZHAO Jin-quan, JIANG Xiao-dong, ZHANG Bo-ming. A New Contingency Parameterization Continuation Power Flow Model for Steady Stability Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14):45-49.
- [11] Flueck A J, Dondeti J R. A New Continuation Power Flow Tool for Investigating the Nonlinear Effects of Transmission Branch Parameter Variations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1):223-227.

收稿日期: 2007-10-24; 修回日期: 2008-02-22

作者简介:

徐晓春(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统电压稳定; E-mail:xuxiaochun2659@163.com

万秋兰(1950-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统稳定分析、电力系统仿真和电力市场等方面的研究;

顾伟(1981-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统稳定控制、电力电子技术、电能质量等。

(上接第 36 页 continued from page 36)

- ZHENG Min, HUANG Hua-lin, Lü Peng, et al. General Analysis and Management Software for Transient Data From Protective Relaying and Fault Recorder[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 75-77.
- [8] 陈佳胜, 曾克娥, 孙扬声, 等. 大型发变组故障录波装置分析软件的研制[J]. 电网技术, 2002, 26(5): 76-79.
CHEN Jia-sheng, ZENG Ke-e, SUN Yang-sheng, et al. Development of Analysis Software of Fault Recorder for High Power Generator Transformerbank[J]. Power System Technology, 2002, 26(5): 76-79.
- [9] 骆健, 丁雨林, 王汉林, 等. 一种新型故障录波系统的实现[J]. 电网技术, 2003, 27(3): 78-82.
LUO Jian, DING Wang-lin, WANG Han-lin, et al. Implementation of a New Kind of Fault Recording System[J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 78-82.
- [10] 周亚玲, 张举, 焦彦军, 等. 基于故障录波信息的故障诊断系统[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 42-45.
ZHOU Ya-ling, ZHANG Ju, JIAO Yan-jun, et al. Implementation of Intelligent Fault Diagnosis System Based on Fault Recorder Information[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 42-45.
- [11] 何赞峰, 赵冬梅, 高曙, 等. 一种基于故障录波信息的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2002, 26(5): 39-43.
HE Zan-feng, ZHAO Dong-mei, GAO Shu, et al. A Power System Fault Diagnosis Method Based on Recorder Fault Data[J]. Power System Technology, 2002, 26(5): 39-43.
- [12] 吴彦皎, 王澎, 孙刚. 分析继电保护不正确动作的主要步骤和方法[J]. 电网技术, 2004, 28(20):80-82.
WU Yan-jiao, WANG Peng, SUN Gang. Main Procedures and Method to Analyze Mal-operation of Protective Relaying[J]. Power System Technology, 2004, 28(20):80-82.
- [13] 王钢, 丁茂生, 李晓华, 等. 数字继电保护装置可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7):47-52.
WANG Gang, DING Mao-sheng, LI Xiao-hua, et al. Reliability Analysis of Digital Protection[J]. Proceedings of the CESS, 2004, 24(7):47-52.
- [14] 贺家李, 郭征, 杨晓军, 等. 继电保护的可靠性与动态性能仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(9):18-22.
HE Jia-li, GUO Zheng, YANG Xiao-jun, et al. Reliability and Dynamic Performance Simulation of Protective Relays[J]. Power System Technology, 2004, 28(9):18-22.
- [15] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

收稿日期: 2008-04-24; 修回日期: 2008-06-05

作者简介:

倪承波(1966-), 男, 高级工程师, 长期从事电网调度管理和电网管理工作, 主要研究领域是电力系统控制、保护及电力信息技术。E-mail:nicb@slof.com