

考虑无功约束的电压稳定研究

刘荆飞, 康积涛

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 提出了一种用于考虑无功约束的分析电力系统电压稳定的计算方法, 所提方法是基于能连续获取极限诱导分岔点的连续潮流方法, 建立了其预测、参数化、步长三个策略。在每次迭代中检查无功极限瞬间稳定的条件, 且由于与前一运行点的最小特征值强相关的状态变量不一定最先出现不可控的下降现象, 在文中利用了状态变量的速度信息来指导步长大小, 分别求出各个极限诱导分岔点, 直至获取崩溃点, 在 IEEE 57 系统上的测试结果验证所提方法的有效性和合理性。

关键词: 电力系统; 连续潮流; 极限诱导分岔; 无功; 电压稳定

Voltage stability studies considering reactive constraint

LIU Jing-fei, KANG Ji-tao

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A new continuation power flow considering reactive power constraint is proposed for power system voltage stability analysis. The proposed method is based on continuation power flow method which can get all limit induced bifurcation points in succession to analyze its predictor and parameterization and step control three scheme. The condition of reactive limit immediate stability is checked in each iteration, and because the state variable most strongly related to the minimum eigenvalue in the previous operating point isn't necessary to induce voltage collapse phenomena firstly in next operating point, and utilizing state variable differential information is used to control step size, then limit induced bifurcation point is obtained easily, until the collapse point. The effectiveness and ration of the proposed method is demonstrated through numerical examination in IEEE 57 bus systems.

Key words: power system; continuation power flow; limit-induced bifurcation; reactive power; voltage stability

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)21-0014-04

0 引言

电力系统计划和运行中的许多分析技术都包含了潮流计算这一部分, 这就涉及到设备额定特性和负荷的定义, 为确保在工况和故障条件下有足够电压水平, 需要对无功支持需求进行评估, 这是电压静态稳定分析的一个重要内容。电压稳定已是电力系统运行的一个关键问题。随着负荷需求不断增长及其受经济、环境条件约束, 使电力系统运行状态接近其极限, 电压失稳变得更容易发生。如果潮流方程在某种特定条件下不可解, 可以得出发电机和网络无法提供指定功率, 为了安全地满足负荷需求, 需要对发电机调度和传输系统的功率进行重新分配, 因此, 了解当前系统运行点离电压稳定极限有多远是至关重要的, 需要对遭受给定干扰下系统是否有一个新的安全可行运行点进行分析, 需要模拟给定功率交换方式下的系统运行行为, 为调度员提供诸如有功传输裕度、无功储备、线路过负荷和电压越限等安全信息。

连续潮流方法^[1,2]通过预测、校正、步长控制、参数化四个步骤, 特别是进行参数化和引入一维校正方程, 巧妙地克服了常规潮流计算中潮流方程雅可比矩阵奇异所带来的困难。正是这一特性使连续法在 PV 曲线的求取中得到了广泛应用。

静态电压稳定极限被认为是鞍结分岔和极限诱导分岔^[3], 无功约束使系统传输功率的能力减小^[4], 无功约束成为评估电力系统安全的一个重要分析对象。

文献[5, 6]考虑了无功极限并提出了相关策略, 文献[6]参数化策略只考虑约束变量离其极限值的最小值, 但文献[7]指出与在接近崩溃点时的最小特征值强相关的某一状态变量, 在崩溃点时它不一定再一次强相关于其最小特征值, 此时很有与最小特征值强相关的状态变量是其它的状态变量。本文在文献[5, 6]的基础上提出改进的参数化策略及其算法。

1 含参数潮流模型

电力系统潮流方程

$$P_{Gi0}(1+\lambda k_{PGi}) - P_{Li0}(1+\lambda k_{PLi}) - U_i \sum_{j \in I} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0$$

$$Q_{Gi0} - Q_{Li0}(1+\lambda k_{QLi}) - U_i \sum_{j \in I} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$
(1)

式中: 参数 λ 为发电机和负荷的增长参数; P_{Gi0} 、 Q_{Gi0} 为节点 i 的发电机出力; P_{Li0} 、 Q_{Li0} 为节点 i 的负荷; k_{PGi} 表示节点处发电机有功的增长系数; k_{PLi} 、 k_{QLi} 表示节点处负荷的增长系数; U_i 、 θ_i 、 U_j 、 θ_j 为节点 i 、 j 各自电压的幅值和相角; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点导纳矩阵第 (i, j) 个元素的实部和虚部。

令 $X = (U, \theta)$, X 为 $n = 2n_{PQ} + n_{PV}$ 维, n_{PQ} 、 n_{PV} 分别对应 PQ、PV 的母线数, 把(1)写成

$$F(X, \lambda) = 0 \quad (2)$$

变量约束方程

$$Q_{Gi\max} \geq Q_{Gi} \geq Q_{Gi\min} \quad (3)$$

式中: Q_{Gi} 、 $Q_{Gi\max}$ 、 $Q_{Gi\min}$ 为发电机 i 的出力、最大出力、最小出力。

改写成:

$$Q_{Gi\max} - Q_{Gi} \geq 0 \quad \lambda > \lambda_{\max} \quad (4)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Gi\min} \geq 0 \quad \lambda < \lambda_{\min} \quad (5)$$

式中: λ_{\max} 、 λ_{\min} 分别称作最大极限诱导分岔点、最小极限诱导分岔点。如果某一 PV 节点发生极限诱导分岔后, 其节点类型要转变成 PQ 节点, 其节点电压不再恒定, 发生约束越限的状态变量的导数就不能连续变化, 对系统稳定产生了极大影响。

把式(4)(5)合写成

$$G(X, \lambda) \geq 0 \quad (6)$$

式中: $G(X, \lambda)$ 中的分量分别是 $g_i^{(k)}(X, \lambda)$, $i=1, \dots, n$, n 表示约束表达式的总数。

这样就建立了要分析的等式约束和不等式约束方程。

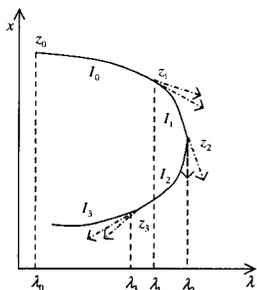


图 1 分叉示意图

Fig.1 Bifurcation schematic diagram

一般, 在 m 个发电机的电力系统中存在许多个极限诱导分岔点, 如图 1 所示, 各个极限诱导分岔点分别用 z_1, z_2, \dots 表示, 被它们分开的区间分别用 I_0, I_1, \dots 表示, 其中 $z_k \in I_k$, $z_k \notin I_{k-1}$, 这样, 一个极限诱导分岔点 $z_k \equiv (X_k, \lambda_k)$ 是下面方程的解:

$$F^{(k)}(X, \lambda) = 0 \quad (7)$$

$$h^{(k)}(X, \lambda) = \min_i g_i^{(k)}(X, \lambda) = 0 \quad (8)$$

式中: (k) 表示区间 I_k , 式(7)是式(1)的简写, 式(8)是一个经筛选出的方程, 其筛选的策略会接下来具体阐述。

选取 $\min g_i^{(k)}(X, \lambda)$ 作为 $h^{(k)}(X, \lambda)$, 但在 I_k 中 $g_i(X, \lambda)$ 最小, 却不一定最先到达极限诱导分岔点, 所以简单地选取 $\min g_i^{(k)}(X, \lambda)$ 作为 $h^{(k)}(X, \lambda)$ 是不合适的, 本文建议 $h^{(k)}(X, \lambda)$ 的选取应结合约束变量的变化率和一组 $g^{(k)}(X, \lambda)$ 较小值综合在一起考虑, 从而得到一个新的集合 H , 从 H 中选择 $g_j(X, \lambda)$ 较小同时约束变量变化速率大的方程作为式(8)。

满足式(7)和(8)的 z_k 是一个可行点, 其可能是稳定、临界和不稳定中的一种, 临界极限诱导分岔点的条件是: 在 z_k 右边没有可行域, 分以下两种情形讨论:

情形 1: 在 z_k 的右边(有 $\lambda_k < \lambda$), I_k 的可行域不存在

对方程(7)和(8)线性化后, 得:

$$[F_z^{(k)}]_{z_k} \cdot \delta z = 0 \quad (9)$$

$$\delta h^{(k)} = [h_z^{(k)}]_{z_k} \cdot \delta z > 0 \quad (10)$$

式中: $[F_z^{(k)}]_{z_k}$ 表示在 z_k 处的潮流方程雅可比矩阵。下标 z 表示微分。从式(9)得到切向量, $\delta z = (\delta x, \delta \lambda)$ 和 $\delta \lambda > 0$, 代入式(10)后检查 δh 的符号, 若 $\delta \lambda = 0$, 则意味着 z_k 是鞍结分岔点; 若 $\delta h > 0$ 就意味着还没达到极限; 若 $\delta h < 0$ 就意味着达到极限, 这时情形 1 出现了。

情形 2: 在 z_k 的右边, I_{k-1} 的可行域不存在

对方程(7)和(8)线性化后, 得:

$$[F_z^{(k-1)}]_{z_k} \cdot \delta \bar{z} = 0 \quad (11)$$

$$\delta \bar{h}^{(k)} = [\bar{h}_z^{(k)}]_{z_k} \cdot \delta \bar{z} > 0 \quad (12)$$

式中: \bar{h} 表示在 $k-1$ 区间靠近 z_k 处有效的约束。值得注意的是, \bar{h} 和式(10)的 h 在 z_k 附近会互相转

换, 从式(11)得到的切向量 $\delta \bar{z} = (\delta \bar{x}, \delta \bar{\lambda})$ 并使 $\delta \bar{\lambda} > 0$ 。若 $\delta \bar{\lambda} = 0$, 则意味着 z_k 是鞍结分岔点; 把 $\delta \bar{z}$ 代入式(10)后检查 $\delta \bar{h}$ 的符号, 若 $\delta \bar{h} > 0$ 就意味着还没达到极限; 若 $\delta \bar{h} < 0$ 就意味着达到极限, 这时情形 2 出现了。表 1 总结了上面的讨论。

表1 约束转换点类型

Tab.1 Types of constraints exchange points

	δh	$\delta \bar{h}$
稳定极限诱导分岔点	+	
临界极限诱导分岔点	-	-
不稳定极限诱导分岔点	-	+

2 预测

在区间 I_k 上有 $z_k \equiv (X_k, \lambda_k)$, z_k 可以不是极限诱导分岔点, 预测和精确的极限诱导分岔点分别为 $\bar{z}_{k+1} \equiv (\bar{X}_{k+1}, \bar{\lambda}_{k+1})$ 和 $z_{k+1} \equiv (X_{k+1}, \lambda_{k+1})$, 这里使用切向量预测下一个解, 即

$$z_{k+1} = z_k + \sigma \cdot \delta z, \sigma \in R^1 \quad (13)$$

选作式(8)的 $g_i^{(k)}(X, \lambda)$ 可以相应用下式预测:

$$g_i^{(k+1)}(\bar{X}, \bar{\lambda}) = g_i^{(k)}(X_k, \lambda_k) + (\partial g_i / \partial z) \cdot \sigma \cdot \delta z \quad (14)$$

令式(14)左边等于 0, 则:

$$\sigma = g_i^{(k)}(X_k, \lambda_k) / [(\partial g_i / \partial z) \cdot \delta z] \quad (15)$$

从上面得到与集合 H 相对应的一组 σ , 通过 $\bar{\sigma} = \min_{\sigma_i > 0} \{\sigma_i\}$ 作为预测的步长, 从而有

$$\bar{z}_{k+1} = z_k + \bar{\sigma} \cdot \delta z \quad (16)$$

由于局部参数化和全局参数化求取的切向量各元素比例相同, 所以这里先采用全局参数化, 无须像文献[8, 9]预先设置负荷参数 t 为 1, 然后可以采用局部参数化或一直采用全局参数化。

3 计算步骤

考虑到连续潮流比常规潮流复杂, 速度更慢, 所以本文采用常规潮流计算和连续潮流法的混合方法, 其整个步骤具体如下。

步骤1: 进行常规潮流计算, 若计算无法收敛时转向步骤2, 若 $\|G\|_{\infty} < \epsilon$ 转向步骤3。

步骤2: 利用连续潮流方法计算式(1)的潮流解; 若 $\delta \lambda = 0$, 则鞍结分岔点找到, 程序结束; 在计算过程中, 检查 $\|G\|_{\infty}$ 的大小, 若 $\|G\|_{\infty} < \epsilon$ 转向步骤3。

步骤3: 计算式(9)的 δz , 若 $\delta \lambda = 0$, 则此点是鞍结分岔点, 程序结束; 若 $\delta \lambda \neq 0$, 使 $\|\delta z\| = 1$ 并 $\delta \lambda > 0$, 按照本文所提出的选取原则选取 h , 然后计算出式(10)的 δh , 若 $\delta h > 0$, 此点为稳定的极限诱导分岔点, 转向步骤4; 若 $\delta h < 0$, 转向步骤5。

步骤4: 通过式(15)计算出步长, 若 $\bar{\sigma} < 0$, 则转向步骤6; 若 $\bar{\sigma} \geq 0$, 再求取式(16)的预测值, 进而计算式(7)、(8), 得到潮流解, 若收敛, 转向步骤3; 若不收敛, 则转向步骤6。

步骤5: 分别计算出式(11)、(12)的 $\delta \bar{x}$ 和 $\delta \bar{\lambda}$, 若 $\delta \bar{h} < 0$, 则此点是临界极限诱导分岔点; 若 $\delta \bar{\lambda} = 0$, 则此点是崩溃点, 程序结束; 若 $\delta \bar{h} > 0$, 则此点是不稳定的极限诱导分岔点, 则转向步骤6。

步骤6: 如果临界极限诱导分岔点不存在, 则可利用其它方法比如直接法^[10]求取鞍结分岔点。

其中, 选取合适的 h 属于参数化过程, 计算式(9)、(11)、(16)都属于预测过程。

4 算例

用Matlab7.0编写实现本文所提的方法, 测试系统是IEEE-57标准测试系统, 此系统有7台发电机, 其中有一台发电机作为平衡节点, 在仿真的过程中, $\lambda = 1$ 表示此电力系统负荷水平的基态, 所有负荷的有功按同一比例增长, 其功率因数保持恒定, 六台发电机按一定比例分担负荷所增长的一部分功率量, 在平衡节点的发电机就分担剩下的功率增长量, 比如线路损耗等功率量。先不考虑无功约束的情形与考虑无功约束的情形进行对比和分析, 图中只取了远离发电机的负荷节点31和节点32进行分析, 计算结果如图2所示, 节点电压幅值和功率值采用的都是标幺值, 功率基准值为100 MVA。

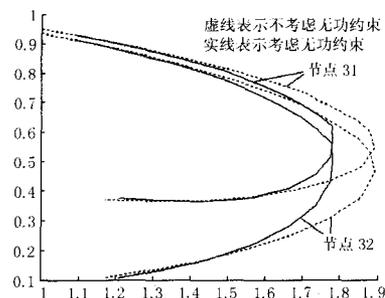


图2 两种情形的对比

Fig.2 Comparison of two results under different conditions

从图2中可以看出, 节点31和32在不考虑无功

约束的情形时能容许的最大负荷水平是1.891 58, 而它们在考虑无功约束的情形时能容许的最大负荷水平是1.78103, 比前一种情形的结果小了, 从而可以得出: 在不考虑无功约束的情形下得到的结果是比较乐观的。

按照本文所提步骤编写程序计算各个极限诱导分岔点, 计算结果如表2, SLIB表示稳定极限诱导分岔点。

表2 IEEE-57系统计算结果

Tab.2 Test result of IEEE-57 system

顺序	负荷水平 λ	节点号	约束	迭代次 数	类型
1	1.0460	9	大于上限	2	SLIB
2	1.3748	6	大于上限	2	SLIB
3	1.4365	3	大于上限	2	SLIB
4	1.4761	2	大于上限	2	SLIB
5	1.7467	8	大于上限	2	SLIB
6

由于节点9和节点6的无功上下限分别表示为 $[0.09, -0.03]$ 和 $[0.25, -0.08]$, 可见节点9的约束范围比节点6相应的约束范围要小, 从上表也可以看出节点9要比节点6先超出约束范围, 其它与此类似, 节点3的无功约束范围为 $[0.6, -0.1]$, 可以得到同样的结论。

5 结论

随着系统负荷有功的加重, 原先有充足无功量来保持发电机端电压恒定会陆续越限, 本文提出了新的连续潮流方法能连续地计算出极限诱导分岔点, 文中的仿真结果表明所提的新的参数化策略、步长策略、预测策略是极为有效的, 计算速度快且准确。所获取的极限诱导分岔信息对计算电压稳定指标和预测发电机在什么时候哪条母线越限是极为有用的。在文中还采用混合计算并建议先采用全局方法求取切向量然后再用局部方法求取切向量。

参考文献

- [1] Ajarupu V, Christy C. The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
- [2] Chiang H D, Flueck A J, Shah 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.

- [3] Canizares C A, Mithulananthan N, Berizzi A, et al. On the Linear Profile of Indices for the Predication of Saddle-node and Limit-induced Bifurcation Points in Power Systems[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2003, 50(12): 588-595.
- [4] 程浩忠, 吴浩. 电力系统无功与电压稳定性[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
CHENG Hao-zhong, WU Hao. Reactive Power and Voltage Stability[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [5] Yorino N, Koeda K, LI Hua-qiang, et al. A New Continuation Power Flow Based on Q-Limit Points[A]. In: The 47th IEEE International Midwest Symposium on Circuits Systems[C].
- [6] Yorino N, LI Hua-qiang, Sasaki H. A Predictor/ Corrector Scheme for Obtaining Q-Limit Point for Power Flow Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 130-137.
- [7] de Souza A C Z, Lima Lops B I, Guedes R B L, et al. Saddle-node Index as Bounding Value for Hopf Bifurcation Detection[J]. IEEE Pro-Gener, Transm, and Distrib, 2005, 152(5): 737-742.
- [8] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Power System Voltage Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [9] 张尧, 张建设, 袁世强. 求取静态电压稳定极限的改进连续潮流法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(2): 21-25.
ZHANG Yao, ZHANG Jian-she, YUAN Shi-qiang. Improved Continuation Power Flow Algorithm for Obtaining the Limit of Static Voltage Stability[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(2): 21-25.
- [10] Canizares C A, Alvarado F L. Point of Collapse and Continuation Method for Large AC/DC Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 8(1): 1-8.

收稿日期: 2007-05-31; 修回日期: 2007-07-05

作者简介:

刘荆飞(1976-), 男, 硕士研究生, 研究方向是电力系统无功和电压稳定性; E-mail: l_j_fei@tom.com

康积涛(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事电力调度自动化系统, 电力系统无功优化计算、电压稳定性和工业监控组态软件的研究工作。