

基于最优乘子潮流确定静态电压稳定临界点

胡泽春, 王锡凡

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049)

摘要: 给出了一种基于最优乘子潮流求静态电压稳定临界点的新方法。与连续潮流或直接法求解电压崩溃点不同, 该方法从潮流的可行域外出发, 利用潮流迭代过程中最优乘子的值和最小二乘解提供的信息, 沿注入功率变化的方向逼近电压崩溃点。给出了判别和计算鞍结型和约束诱导型分岔点的方法, 分析了逼近过程中的各种可能情况。对多个算例测试的结果表明: 所提出的方法通过几次迭代即可收敛于静态电压稳定临界点, 计算结果与应用连续潮流和直接法一致。

关键词: 电压稳定; 最优乘子; 潮流可行域; 鞍结型分岔点; 约束诱导型分岔点

中图分类号: TM712

0 引言

由于电力工业的市场化变革和近2年世界范围内多次发生的大停电事故, 使得电压问题受到电力工业界和学术界的高度关注。在静态电压稳定分析中, 求得电压崩溃点即可知系统的负荷裕度、系统的薄弱环节并可给出“最优”控制的方向, 因而有重要的应用价值。

在静态电压稳定分析中主要考虑2种类型的电压崩溃^[1,2]: 鞍结型分岔(SNB)和约束诱导型分岔(LIB)。前者对应于潮流方程雅可比矩阵的奇异点; 后者则是达到某发电节点无功出力硬约束而导致系统稳定平衡点突然消失^[3]。当前求临界电压崩溃点主要有3类方法^[1]: 直接法^[4~6]、连续潮流^[7,8]和基于最优潮流的方法^[9~11]。其中直接法对于约束诱导型电压崩溃无效, 且对初值要求高; 连续潮流可获得完整的P-V和Q-V曲线, 但需要计算多个潮流解且需专门的技术识别电压崩溃的类型^[1]; 基于最优潮流的方法可考虑各种约束, 但发电机出力的增长方式和起作用约束的顺序与连续潮流不同, 因而计算结果与前2种方法有一定差异^[9]。

对于电力系统病态潮流计算, Iwamoto 和 Tamura 提出了最优乘子牛顿算法^[12]。该方法利用直角坐标形式下潮流方程为状态变量的二次函数这一特点, 在迭代中以最优乘子乘以牛顿方向进行修正, 从而避免对电压向量产生过修正或欠修正。文

献[5,13]将这一思想引入直接法求电压崩溃点, 取得了较好的效果。文献[14]将最优乘子潮流应用于潮流解的恢复, 并证明在潮流方程的可行域^[15]外, 最优乘子潮流将收敛于可行域边界的某一点上。文献[16]利用这一性质, 提出了一种求解潮流可行域的混合算法。

本文给出了一种基于最优乘子潮流求静态电压稳定临界点(或崩溃点)的迭代算法。该算法从潮流的可行域外出发, 不断朝电压稳定临界点逼近, 直至达到预定的收敛精度。根据最优乘子潮流迭代过程中最优乘子提供的信息, 本文的方法可识别电压崩溃的类型(SNB或LIB)。最后通过多个系统算例说明了该方法的有效性。

1 求静态电压稳定临界点的模型

使负荷功率和发电出力按预定的方向变化, 以单负荷参数 λ 作为裕度指标, 则在直角坐标下求静态电压崩溃点的模型可表示为:

$$\max \lambda \quad (1)$$

$$\text{s. t. } P_{Gi} - P_{Li} - e_i \sum_{j \in I} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_i \sum_{j \in I} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \quad i \in S_B \quad (2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - f_i \sum_{j \in I} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + e_i \sum_{j \in I} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \quad i \in S_B \quad (3)$$

$$\underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} \quad i \in S_G \quad (4)$$

$$\underline{Q}_{Gi} \leq Q_{Gi} \leq \overline{Q}_{Gi} \quad i \in S_G \quad (5)$$

式中: S_B 为所有节点的集合; I 是与 i 相连的节点集合, $i \in S_B$; S_G 为有功电源的集合; e_i 与 f_i 分别表示节点 i 电压的实部和虚部; G_{ij} 和 B_{ij} 为节点 i, j 间的

收稿日期: 2005-07-23; 修回日期: 2005-11-02。

国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2004CB217905); 中华电力教育基金会许继奖教金资助项目。

电导、电纳; $(P_{Gi}, Q_{Gi}), (P_{Li}, Q_{Li})$ 为节点 i 的发电出力 and 负荷。式(4)和式(5)为发电机节点的出力约束; 式(2)和式(3)为参数化的潮流方程。

负荷和发电出力的增长方向已知, 可表示为:

$$P_{Li} = P_{Li0} + \lambda b_{Pi} \quad (6)$$

$$Q_{Li} = Q_{Li0} + \lambda b_{Qi} \quad (7)$$

$$P_{Gi} = P_{Gi0} + \lambda b_{Gi} \quad (8)$$

式中: P_{Li0}, Q_{Li0} 和 P_{Gi0} 表示节点 i 在基准状态下的功率; b_{Pi}, b_{Qi} 和 b_{Gi} 为负荷和发电出力的增长方向。

求解以上模型得到最大负荷参数 λ 与求静态电压崩溃点是一致的^[10], 在不引起混淆的情况下, 下文将不加区分。本文的模型没有考虑无功补偿设备和有载调压变压器抽头的动作。

2 基于最优乘子潮流求解的基本思想

对式(1)~式(8)给出的模型, 基于最优乘子潮流求解此问题。首先给出一个较大的 λ 初值(满足负荷水平处于潮流的可行域外即可), 以带最优乘子的牛顿法计算潮流, 得到一个最小二乘解(此时等式约束式(2)和式(3)不满足); 根据此解和最优乘子提供的信息, 不断按预定负荷变化方向朝电压崩溃点逼近, 直至达到预设精度。图1给出了该方法的简单示意, 其中, λ_0 为初始值, $\lambda_{critical}$ 为满足模型式(1)~式(8)的解, $\lambda_0 > \lambda_{critical}$ 。

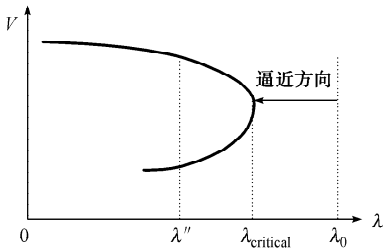


图1 从潮流可行域外逼近电压崩溃点

Fig.1 Scheme of approaching voltage collapse point

将带参数的潮流方程式(2)、式(3)和式(6)~式(8)统一表示为:

$$f(x, \lambda) = f(x) - S = 0 \quad (9)$$

$$S = S_0 + \lambda b \quad (10)$$

式中: S_0 为基准负荷水平下的节点注入功率向量; b 为表示节点注入功率(负荷和发电有功出力之和)变化方向向量。

在向 $\lambda_{critical}$ 逼近的过程中, 每次计算潮流时 λ 已知, 因而式(9)表示的潮流方程与一般潮流方程并无差别, 完全可以应用带最优乘子的牛顿法求解。需要注意的是, 对每个给定 λ , 各发电机的有功出力即确定。如果某个发电机的有功出力越限, 则将其出力置为最大值, 超出限值的出力按预设的规则由其

他发电节点承担, 不等式约束式(4)自动满足。这里要求在初值 λ_0 处, 总负荷小于总的有功发电容量。由图1, 若 λ 由0增加至 λ'' 处, 系统已无发电容量来平衡负荷的增长, 虽然系统已达到最大负载能力点, 但系统不发生静态电压稳定问题。本文以下部分不再讨论这种情况。

最优乘子潮流利用直角坐标下功率方程为二次函数的特性, 在潮流第 k 次迭代求出状态变量的修正量 $\Delta x^{(k)}$ 后, 以一个标量乘子 μ 乘以 $\Delta x^{(k)}$ 去修正 $x^{(k)}$ 。 μ 根据以下目标函数求得:

$$\min F(\mu) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2n} f_i^2(x^{(k)} + \mu \Delta x^{(k)}) \quad (11)$$

式中: $f_i(\cdot)$ 表示方程组(9)中的第 i 个方程; $2n$ 为方程的个数。

一般认为, 如果潮流无解, 则随迭代的进行 μ 值越来越小直至达到0, 而目标函数不再下降, 维持在一个正值上。此时状态变量的值 x^* 可以认为是潮流方程的最小二乘解, 对应的雅可比矩阵 $J(x^*)$ 奇异^[14]。若在迭代过程中考虑无功约束式(5), 则可能出现某个或某几个节点反复发生 PV/PQ 类型转换的情况, 最优乘子的值振荡而不趋于0。此时系统的负荷水平位于电压崩溃点附近, 电压崩溃的类型为约束诱导型。

若不考虑牛顿-拉夫逊法本身的局限和计算机计算时舍入误差的影响, 最优乘子潮流不收敛时, μ 提供的信息对应于电压崩溃的2种类型: 鞍结型(μ 趋于0)和约束诱导型(μ 振荡), 本文称这2种情况为“鞍结型无解”和“约束诱导型无解”。

3 基于最优乘子潮流的迭代算法

3.1 鞍结型无解

节点净注入功率向量 S 组成一个空间, 定义 Σ 为介于潮流有解和无解区域之间的边界。由于此时潮流不收敛, 所得最小二乘解 x^* 具备以下性质^[14]: ① $f(x^*)$ 处于 Σ 上, 对应的雅可比矩阵 $J(x^*)$ 奇异; ② $J(x^*)$ 的零特征值对应的左特征向量 ω^* 与 Σ 在 $f(x^*)$ 处垂直(正交)。

$J(x^*)$ 已知, 用反幂法迭代几次可求得 ω^* (令 ω^* 的欧氏范数为1)。注入功率变化方向向量 b 与 Σ 的交点是待求的电压崩溃点, 定义为 $S^{critical}$ 。对于一个有多个负荷节点的电力系统, Σ 为一高维曲面, 其形状复杂。通常讨论 Σ 的凹凸性一般指其局部特征, 本文亦如此。

3.1.1 Σ 为“超平面”

定义 S^m 为 Σ 在 x^* 处的切平面上距当前功率向量 S^0 欧氏距离最近的点, 定义 S^a 为切平面与 b 的交点(见图2), $S^{critical}$ 与 S^a 重合。根据三角关系, 不难求得 θ_1 和 θ_2 的值。

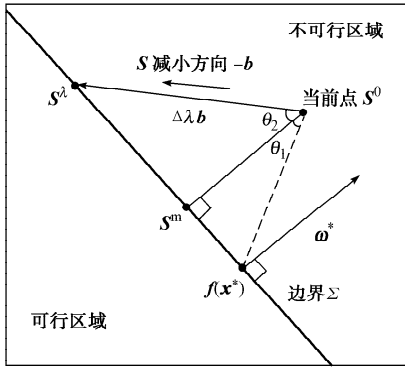


图2 利用特征向量减小负荷参数

Fig. 2 Decreasing load parameters using the eigenvector

定义 $\Delta\lambda$ 为 S^0 与 S^λ 间负荷参数的差值,则可通过下式求得 S^λ (S^{critical}):

$$S^\lambda = S^0 - \Delta\lambda b \quad (12)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\|S^0 - f(x^*)\|_2 \cos \theta_1}{\|b\|_2 \cos \theta_2} \quad (13)$$

Σ 一般不是超平面,可采用迭代的方法逼近 $\lambda_{\text{critical}}$ 直至满足预设的精度。假设当前迭代到第 k 次,式(13)的值为 $\Delta\lambda^{(k)}$ 。以下讨论各种可能的情况并给出对 λ 的修正式。

3.1.2 Σ 为“凸曲面”

若 Σ 为“凸曲面”,负荷参数减小 $\Delta\lambda^{(k)}$ 之后, S^λ 仍处于潮流的不可行区域。以此点为新起点,继续迭代。对 λ 的修正式为:

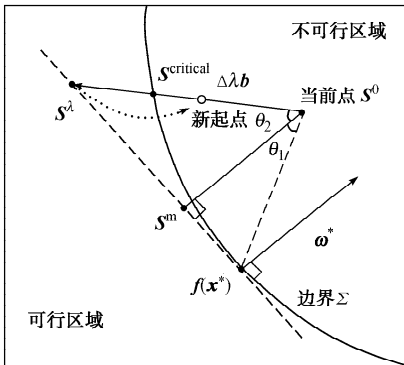
$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} - \Delta\lambda^{(k+1)} \quad (14)$$

式中: $\Delta\lambda^{(k+1)}$ 为第 $k+1$ 次迭代的修正量。

3.1.3 Σ 为“凹曲面”

若 Σ 为如图3所示的“凹曲面”,负荷参数减小 $\Delta\lambda^{(k)}$ 之后, S^λ 已处于潮流的可行区域。但若 $\Delta\lambda^{(k)}$ 大于预设精度,则根据下式修正 λ 继续迭代:

$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \frac{\Delta\lambda^{(k)}}{2} \quad (15)$$

图3 Σ 为凹曲面的迭代示意Fig. 3 Iteration illustration when Σ is concave

在图3中, θ_1 和 θ_2 均小于 90° , 还可能出现以下3种“特殊”情况,如图4所示。不难看出,几种“特殊”情况均是 Σ 出现“凹坑”引起的。

1) $\theta_1 = 90^\circ$ 。根据对 x^m 的定义, θ_1 的取值区间为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。当 S^m 与 S^0 重合时, θ_1 为 90° 。此时以式(13)求得的 $\Delta\lambda$ 为0,可能导致算法过早收敛。此时以式(14)修正,以下式计算 λ 的修正量:

$$\Delta\lambda = \frac{\|S^0 - f(x^*)\|_2}{\|b\|_2} \quad (16)$$

2) $\theta_2 = 90^\circ, \theta_1 \neq 90^\circ$ 。此时式(13)求得的 $\Delta\lambda$ 为无穷大,以式(16)计算 λ 的修正量,以式(14)修正。

3) $\theta_2 > 90^\circ, \theta_1 \neq 90^\circ$ 。仍用式(13)求 λ 的修正量。

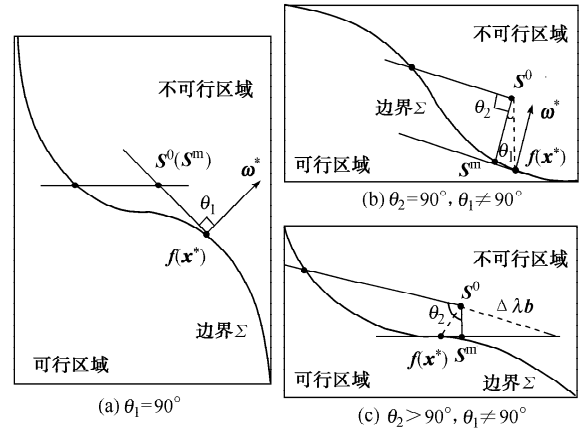


图4 3种特殊情况

Fig. 4 Three special cases

至此,对最优乘子潮流“鞍结型无解”,本文给出了每种可能情况下 λ 的修正式。

3.2 约束诱导型无解

以 λ -V 曲线来分析约束诱导型电压崩溃,如图5所示。在负荷参数达到 $\lambda_{\text{critical}}$ 时,由于节点 i 的无功出力约束发生约束诱导型电压崩溃。如果将此节点设为 PQ 节点,无功出力等于最大值,则系统在 $\lambda_{\text{critical}}$ 处崩溃。如果在迭代时仅有1个节点反复发生 PV/PQ 类型转换,则此节点的无功出力约束就是导致系统发生电压崩溃的起作用约束,当前的负荷参数 λ_k 满足: $\lambda_{\text{critical}} < \lambda_k < \lambda_{\text{critical}}'$ 。

为减小 λ 以使潮流刚好有解,把节点 i 当特殊的 PQ 节点处理,强制其电压等于设定值 V_{Gi}^{spec} ,只需在原来的潮流方程的基础上增加以下方程:

$$V_{Gi} - V_{Gi}^{\text{spec}} = 0 \quad (17)$$

扩展后的潮流方程仍可用二阶泰勒级数展开,所以最优乘子潮流仍然适用。此时 λ 为待求量,初值取 λ_k ,只需要1次潮流计算即可得崩溃点处的负荷参数 $\lambda_{\text{critical}}$ 。

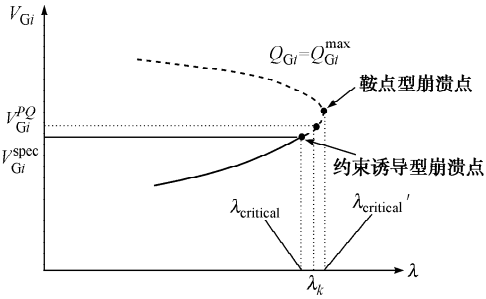


图 5 约束诱导型电压崩溃示意图
Fig. 5 Illustration of limit-induced bifurcation

在由负荷参数的初值 λ_0 “逼近” $\lambda_{critical}$ 的过程中，当 λ 的值大于图 5 中的 $\lambda_{critical}'$ 时，没有反复发生 PV/PQ 类型转换的节点，则 3.1 节所述的方法先起作用，先减小 λ 直至满足 $\lambda_{critical} < \lambda_k < \lambda_{critical}'$ 。

当有多个节点的类型反复转换时，其机理与单节点反复转换类似。记录这些节点，每次选 1 个节点 i ，按上述方法计算潮流。潮流收敛后，根据最终的雅可比矩阵计算灵敏度，若满足以下条件：

$$\begin{cases} \frac{d\lambda}{dV_{Gi}} > 0 \\ \frac{d\lambda}{dQ_{Gi}} > 0 \end{cases} \quad (18)$$

则节点 i 即为引起约束诱导型电压崩溃的节点^[17]，可停止计算。

综上所述，整个求解的流程如图 6 所示。图中的 λ_{last} 用以保存上次迭代时 λ 的值； λ_{max} 是为 λ 预设的最大值，防止初值 λ_0 过小，第 1 次计算就收敛； λ_{min} 和 μ_{min} 分别是对 λ 和 μ 的精度要求。

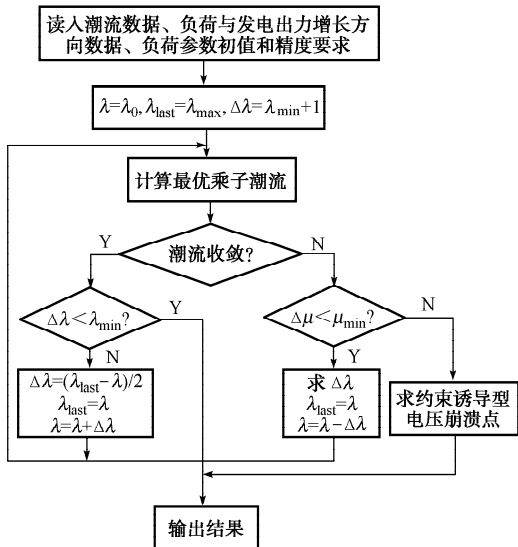


图 6 计算流程
Fig. 6 Flow chart of the proposed method

4 收敛性和计算量分析

上述方法的收敛速度与 Σ 的特性、负荷增长方向 $\mathbf{b}$ 和最小二乘解 $\mathbf{x}^*$ 的位置等因素有关，其中 Σ 的特性影响最大。 Σ 越接近于“超平面”，收敛速度越快。当 Σ 为“凸曲面”时，每次迭代后 λ 都向 $\lambda_{critical}$ 逼近；当 Σ 为“凹曲面”，通过式(15)的修正，下一个处于潮流可行域外的 λ 将更接近 $\lambda_{critical}$ 。

文献[18]在研究可行域时假设潮流可行域是一个凸锥体， Σ 为“凸曲面”。虽然可找到 Σ 为“凹曲面”的例子，但大量计算试验表明， Σ 在大多情况下（或 Σ 的大部分）呈凸性。为求出对负荷参数的修正量 $\Delta\lambda$ ，主要计算量在于求雅可比矩阵 $\mathbf{J}(\mathbf{x}^*)$ 零特征值对应的左特征向量 ω^* 。用反幂法求 ω^* 的计算量在于对 $\mathbf{J}(\mathbf{x}^*)$ 的转置矩阵做一次因子化并进行几次前代/回代计算。

当迭代过程中最优乘子潮流计算出现“约束诱导型无解”时，通过几次扩展潮流计算即可求得电压崩溃点。计算潮流的次数不大于反复发生 PV/PQ 类型转换的节点数（一般只有 1 个或数个）。

5 算例分析

本文的方法对多个 IEEE 测试系统和某实际系统进行了测试。由于 IEEE 测试系统潮流数据中没有发电机有功限额数值，测试时不考虑发电机有功出力的限制。负荷和发电出力按基准值成比例增长（基准条件下发电出力为负的节点有功出力不变），当负荷参数的修正量 $\Delta\lambda$ 小于 0.000 1 时终止，以 T 表示迭代过程中解最优乘子潮流的总次数。所有结果都与 UWPFlow^[19]的连续潮流和直接法的结果进行校对。连续潮流的迭代次数是指从基准状态增加负荷至电压崩溃点的迭代步数。

5.1 鞍结型电压崩溃测试

选择 IEEE 30 和 IEEE 57 节点系统进行测试，电压崩溃类型为鞍结型，测试结果如表 1 所示。

表 1 IEEE 30 和 IEEE 57 节点测试结果
Table 1 Test results of IEEE 30 and IEEE 57 systems

方法	IEEE 30			IEEE 57		
	λ_0	$\lambda_{critical}$	T	λ_0	$\lambda_{critical}$	T
本文方法	10 000	0.550 059 1	8	10 000	0.641 133 8	10
	15	0.550 059 1	5	15	0.641 133 8	6
	10	0.550 059 1	5	10	0.641 133 8	5
	5	0.550 059 1	5	5	0.641 133 8	6
	2	0.550 059 1	4	2	0.641 133 8	6
	1	0.550 059 1	4	1	0.641 133 8	5
连续潮流	0.547 900		15	0.632 160		24
直接法	0.550 059			0.641 134		

可以看出,本文方法的结果与初始值无关,所得结果与直接法的结果几乎相同。本文方法比连续潮流计算迭代的次数少,所得结果更精确。图 7 示意了计算 IEEE 57 节点系统电压崩溃点的收敛过程。除 λ 初值取 2 且在第 2 次迭代时以式(15)计算修正量外,其他情况均以式(14)修正。这表明在与计算相关的部分,可行域边界基本呈“凸”形。

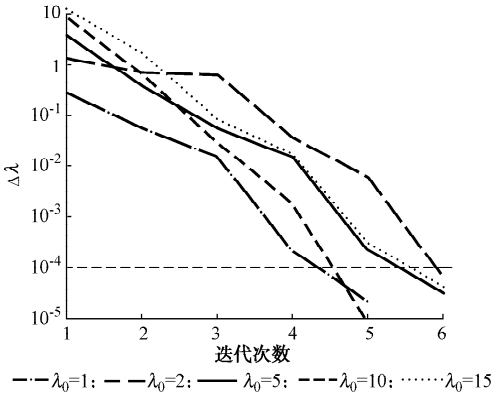


图 7 对 IEEE 57 节点系统测试的收敛过程
Fig. 7 Converging process of IEEE 57-bus system

5.2 约束诱导型电压崩溃测试

测试系统为 IEEE 118 节点系统,由于节点 10 的无功出力约束,电压崩溃类型为约束诱导型。测试结果如表 2 所示。

表 2 IEEE 118 节点系统测试结果
Table 2 Test results of IEEE 118-bus system

方法	λ_0	$\lambda_{critical}$	T
本文方法	15	1.129 183	9
	9	1.129 183	9
	3	1.129 183	8
	1.5	1.129 183	7
	1.25	1.129 183	6
连续潮流		1.129 2	大于 50

本文方法与连续潮流的结果一致,但迭代的次数比连续潮流少得多。在程序实现中,当某一(或某些)节点连续 3 次由 PV 转为 PQ 再由 PQ 还原为 PV 类型时即认为出现了“反复”转换。对于表中列出的几个初值,在接近崩溃点时,4, 8, 10, 12 和 113 号节点的类型反复转换。因此,为识别引起约束诱导型电压崩溃的节点,用本文方法计算了 4 次附加等式(17)的最优乘子潮流(表 2 中 T 的值计入了这 4 次计算)。由于多个节点无功出力的约束,使得连续潮流经过多次潮流计算才达到电压崩溃点。

5.3 实际系统测试

该系统有 682 个节点,取一种典型运行方式进行计算,测试结果如表 3 所示。

表 3 实际系统测试结果
Table 3 Test results of a real system

方法	λ_0	$\lambda_{critical}$	T	计算时间/s	耗时倍数
本文方法	15	0.197 613	5	2.150	2.30
	10	0.197 613	5	1.609	1.72
	5	0.197 560	4	1.359	1.82
	2	0.197 560	5	1.516	1.62
	1	0.197 560	5	1.313	1.40
	0.5	0.197 560	3	0.765	1.36
连续潮流		0.193 370	9		
直接法		0.197 561			

基于最优乘子潮流的算法只需计算几次即可获得高精度的解。比较几个测试系统的结果可看出,本文方法的迭代次数并不随系统规模的增大而增大。在测试平台上计算一次基准状态的潮流耗时约为 0.187 s,表 3 还列出了本文方法的计算时间和每次迭代耗时相对于一次潮流计算时间的比值。若初值 λ_0 选为 0.5,则计算耗时不到 1 s;当初值小于 10 时,每次迭代的耗时小于基准潮流耗时的 2 倍。

对所有测试系统,将初值 λ_0 设为崩溃点处 $\lambda_{critical}$ 的 10 倍以上,本文方法也可以获得很好的结果,迭代次数只是略有增加。程序中收敛精度取 0.000 1,但对于不同初值所得的许多结果在小数点后 6 位甚至 7 位都是相同的。

6 结语

在给出求静态电压稳定临界点的基本模型后,本文引入了一种基于最优乘子潮流迭代求解此问题的新方法。与常用的连续潮流或直接法不同,该方法是从潮流的可行域外沿注入功率变化的方向逼近电压崩溃点。本文给出了各种情况下对负荷参数的修正式。根据最优乘子提供的信息,该方法可识别 SNB 和 LIB。对多个系统的测试结果表明,本文的方法经几次迭代即可收敛且对初值不敏感。该方法基于基本的潮流程序,易于实现,可作为求静态电压稳定临界点的一种备选方法。

参考文献

[1] 赵晋泉,江晓东,张伯明.一种静态电压稳定临界点的识别和计算方法.电力系统自动化,2004,28(23):28—32.
ZHAO Jin-quan, CHIANG H D, ZHANG Bo-ming. Approach for Identification and Computation of Static Voltages Stability Critical Point. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 28—32.
[2] 贾宏杰,李鹏.关于《一种静态电压稳定临界点的识别和计算方法》讨论.电力系统自动化,2004,28(23):32—34.
JIA Hong-jie, LI Peng. Discussion on “Approach for Identification and Computation of Static Voltages Stability Critical Point”. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 32—34.
[3] DOBSON I, LU L. Voltage Collapse Precipitated by the

- Immediate Change in Stability When Generator Reactive Power Limits are Encountered. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1992, 39(9): 762—766.
- [4] DOBSON I, LU L, HU Y. A Direct Method for Computing a Closest Saddle Node Bifurcation in the Load Power Parameter Space of an Electric Power System. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Vol 5. Singapore: 1991. 3019—3022.
- [5] 程浩忠. 一种计算静态电压崩溃裕度的简化实用方法. 电力系统自动化, 1998, 22(11): 5—9.
- CHENG Hao-zhong. A Simplified and Practical Method for Calculating Static Voltage Collapse Margins. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11): 5—9.
- [6] CANIZARES C A, ALVARADO F L. Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 1—8.
- [7] AJJARAPU V, CHRISTY C. The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 416—423.
- [8] 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. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 623—634.
- [9] IRISARRI G D, WANG X, TONG J et al. Maximum Loadability of Power Systems Using Interior Point Nonlinear Optimization Method. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 162—172.
- [10] 郭瑞鹏, 韩祯祥, 王勤. 电压崩溃临界点的非线性规划模型及算法. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 14—17.
- GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang, WANG Qin. Nonlinear Programming Model and Algorithm for Point of Collapse. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 14—17.
- [11] 韦化, 丁晓莺. 基于现代内点理论的电压稳定临界点算法. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 27—31.
- WEI Hua, DING Xiao-ying. An Algorithm for Determining Voltage Stability Critical Point Based on Interior Point Theory. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 27—31.
- [12] IWAMOTO S, TAMURA Y. A Load Flow Calculation Method for Ill-conditioned Power Systems. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100 (4): 1736—1743.
- [13] 程浩忠. 利用最优乘子和潮流非线性方程确定静态电压稳定临界状态. 电网技术, 1996, 20(1): 20—23.
- CHENG Hao-zhong. Computation of the Critical State of Static-state Voltage Stability via the Application of Optimal Multiple Factor and Load Flow Equations Retaining Second Order Nonlinearity. Power System Technology, 1996, 20(1): 20—23.
- [14] OVERBYE T J. A Power Flow Measure for Unsolvable Cases. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 1359—1365.
- [15] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制. 北京: 中国电力出版社, 2003. 67—74.
- ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu et al. Power System Voltage Stability and Its Control. Beijing: China Electric Power Press, 2003. 67—74.
- [16] 余贻鑫, 李鹏, 贾宏杰. 基于混合法的潮流可行域边界计算. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 18—25.
- YU Yi-xin, LI Peng, JIA Hong-jie. Computing the Boundary of the Power Flow Feasible Region Based on the Hybrid Method. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 18—25.
- [17] KATAOKA Y, SHINODA Y. Voltage Stability Limit of Electric Power Systems with Generator Reactive Power Constraints Considered. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 951—962.
- [18] JARJIS J, GALIANA F D. Quantitative Analysis of Steady State Stability in Power Networks. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(1): 318—326.
- [19] CANIXARES C A, FAUR Z T, ALVARADO F L. UWPFLOW. <http://thunderbox.uwaterloo.ca/~claudio/software/pflow.html>.

胡泽春(1979—), 男, 博士研究生, 从事电力系统无功优化、静态安全分析及电力市场方面的研究工作。E-mail: zechhu@263.net

王锡凡(1936—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析、规划、电力市场及新型输电方面的研究和教学工作。E-mail: xfwang@mail.xjtu.edu.cn

Determination of Static Voltage Collapse Critical Point Based on Load Flow Method with Optimal Multiplier

HU Ze-chun, WANG Xi-fan

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new method for determination of static voltage collapse critical point based on Newton-Raphson load flow method with optimal multiplier is proposed in this paper. Different from continuation load flow and direct methods, this method starts from the infeasible region of load flow equations. It then approaches the desired critical point along the changing direction of injected power flow by making use of value of the optimal multiplier and the least square solution of load flow equations. All possible situations during the approaching process are analyzed and reactive power limits of generators are considered. The unified approach for identifying and calculating saddle node point and limit-induced bifurcation point is given. Convergence characteristic and computation complexity are analyzed. Tests in several systems show that the proposed method can converge at critical point after several iterations. The results are consistent with continuation load flow and direct methods.

This work is jointly supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217905) and Xuji Foundation of Chinese Electricity Education Foundation.

Key words: voltage stability; optimal multiplier; load flow feasible region; saddle node bifurcation point; limit-induced bifurcation point