

直接计算静态电压稳定裕度的改进崩溃点法

陈 昌,姜 彤,万凯遥,冯卓诚

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:针对传统直接法的收敛性容易受初始值影响以及传统崩溃点法(POC)无法计算极限诱导分岔(LIB)点的问题,提出一种改进POC。改进后的算法根据电力系统的特点修改迭代过程和特征向量范数设置方法,使其对初始值的敏感度降低。基于改进方法的特殊收敛性,提出一种计算LIB点的方法。IEEE 14节点系统和IEEE 118节点系统算例结果验证了所提方法的有效性。

关键词:稳态电压;崩溃点;极限诱导分岔;收敛性;电压裕度

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008007

0 引言

随着经济高速发展,社会对电力的需求日益增长^[1]。因此,电力系统的运行点越来越接近电压稳定极限点。此外,分布式能源的发展给电力系统带来了大量的不稳定功率波动^[2]。这些功率波动降低了电网的整体稳定性^[3]。一旦负荷超出系统稳定裕度,将会导致电力系统电压崩溃^[4],造成大面积停电。因此,实现现代电力系统的电压稳定是非常重要的。

动力系统分岔理论在很大程度上解释了电压崩溃产生的原因和形成机理^[5]。分岔理论中,鞍结分岔SNB(Saddle Node Bifurcation)点是系统平衡解消失的位置。若系统负荷功率增加,且未在运行点抵达SNB点之前采取任何措施,致使系统平衡点消失,此时部分区域的电压将呈现难以挽回的持续下降趋势,造成电力系统电压崩溃。另外电力系统在实际运行过程中存在一些物理限制,比如发电机的无功输出限制。当系统负荷功率增加,越限的发电机节点将无法起到调节电压的作用,这也是产生电压崩溃现象的重要原因。这一类分岔点称为极限诱导分岔LIB(Limited Induced Bifurcation)点。

在静态电压稳定性分析中,最常用的方法是连续潮流CPF(Continuous Power Flow)^[6]。CPF的收敛性有很好的鲁棒性,但与直接法^[7]相比,其计算量相对较大。通过跟踪整个平衡流形,CPF能计算SNB点和越限参数引起的LIB点。文献[8]采用二阶灵敏度法校正负荷增长步长,进而追踪LIB点。但依靠步长控制,CPF计算的大部分算点都是除SNB点和LIB点之外的非关键点。此外,如果不采用二分法、步长缩减法等方法,沿负荷增长方向检测到的关键点并不准确^[9],而且这些方法还会进一步增加计算量。

直接法^[7,9-13]避免了额外点的计算,且直接到达

SNB点,此外,它还是静态电压稳定计算(SSVSB)的数学基础,SSVSB的确定有助于新能源^[14-15]的并网。最经典的直接法是崩溃点法POC(Point Of Collapse method)^[10],其可以通过增加一组表示雅可比矩阵奇异性的边界条件来直接计算SNB点。但POC不能计算LIB点,且其存在收敛性问题,初始值的设定对其收敛性有很大影响^[16],这2个不利因素限制了它在静态电压稳定性分析中的应用。目前,大多数文献集中于对矩阵降维^[7,11]和初始值估计方法的研究,这些方法在一定程度上加快了计算速度,提高了收敛能力,但仍存在收敛和LIB点计算问题。

静态电压稳定裕度还有其他类似的算法。文献[17]使用一维边界条件代替POC中的多重边界条件,但该条件用作测试函数,其SNB点的计算采用与CPF具有相同性质的连续法。文献[13]引入一种新型P/Q节点,并将其连接到负载最大的节点上,从而直接计算SNB点,但该方法存在收敛性问题,且其改变了系数矩阵的稀疏结构,可能影响计算效率。文献[12]提出边界导数直接法BDDM(Boundary Derivative Direct Method),在很大程度上解决了收敛性问题。然而上述方法都无法计算LIB点,文献[18]提出一种直接计算负荷增长方向上LIB点的方法,为直接计算LIB点提供了一种思路,但该方法不能计算SNB点。

结合电力系统的特性对数学方法进行改进可提高算法性能,如PQ分解法密切结合电力系统的固有特点,提高了计算速度^[19]。本文用一种基于电力系统特性的范数规范方法来规范特征向量,提出一种新的特征向量迭代方法,特征向量不会在迭代过程中被校正,而是通过前一次迭代过程中产生的状态变量的解来进行计算,并验证了改进算法有较好的收敛性。此外,在改进POC的基础上,本文提出一种LIB点的计算方法,通过IEEE 14节点系统和IEEE 118节点系统中的实例验证了该方法的有效性。

1 改进直接法

1.1 经典 POC

POC 是直接计算 SNB 点的最常用的方法,其根据系统在 SNB 点处雅可比矩阵存在零特征向量的特点,增补多维边界条件形成扩展系统,进而求解 SNB 点。经典 POC 是由 Moore 和 Spence^[20]提出的,被命名为 Moore-Spence 方程(MSE)^[21],可以由式(1)表示。

$$\begin{cases} G(\mathbf{x}, \lambda) = 0 \\ G_{\mathbf{x}} \mathbf{v} = 0 \\ \mathbf{v} \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为电力系统状态变量,包括节点的电压幅值和相角; λ 为不可控变量,表示系统中负荷的变化参数或者发电机节点的有功功率输出; $G_{\mathbf{x}}$ 表示 $G(\mathbf{x}, \lambda)$ 对向量 $\mathbf{x}$ 求偏导; $\mathbf{v}$ 为特征向量。式(1)中第一式为潮流方程;第二式为潮流雅可比矩阵奇异性条件方程;第三式确保特征向量为非零向量。

MSE 的线性化系数矩阵在 SNB 点附近被证明是非奇异的,下述定理给出了关于式(1)中方程组的一个充分必要条件。

MSE 定理^[11]: 当且仅当 $(\mathbf{x}, \lambda)$ 为式(1)的解时, $(\mathbf{x}, \lambda)$ 为式(2)的 SNB 点。

$$G(\mathbf{x}, \lambda) = 0 \quad (2)$$

通常采用规范化方程来确保式(1)中第三式特征向量不为 0,如采用无穷范数为 1。

$$\|\mathbf{v}\|_{\infty} = 1 \quad (3)$$

POC 本质上采用牛顿法求解式(1),其迭代方程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} G \\ G_{\mathbf{x}} \mathbf{v} \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G_{\mathbf{x}} & G_{\lambda} & 0 \\ G_{\mathbf{x}\mathbf{x}} \mathbf{v} & G_{\mathbf{x}\lambda} \mathbf{v} & G_{\mathbf{x}} \\ 0 & 0 & \mathbf{e}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \lambda \\ \Delta \mathbf{v} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $G_{\mathbf{x}\mathbf{x}}$ 表示 $G(\mathbf{x}, \lambda)$ 先对向量 $\mathbf{x}$ 求偏导再对变量 λ 求偏导,其他类似; $\mathbf{e}$ 为列向量,其取值根据范数规范方法选定; $\Delta \mathbf{x}$ 、 $\Delta \lambda$ 、 $\Delta \mathbf{v}$ 分别为电力系统状态变量、负荷变化参数、特征向量的修正量。

显然,求解式(4)的初始值的选择不仅需要考虑基本电力系统中的电压向量,还需要考虑引入的特征向量。特征向量初始值选取不当易导致算法发散。

默认情况下,特征向量中的所有元素都可以设置为 1 进行初始化。当 $\mathbf{v}$ 的所有元素都是 1 时,式(4)中的 $\mathbf{e}^T$ 有无穷多的选择。因此,在第一次迭代中,通常经典 POC 将 $\mathbf{e}^T$ 的最后一个元素设置为 1^[9]。确定 POC 特征向量初值的方法还有切线法、逆幂法^[10]、二阶法^[7]等。然而,系统的初始位置仍应足够靠近 SNB 点,以保证收敛。

除了临界点初值的选取较为困难以外,对系统

限制处理的不便性也是导致 POC 的应用没有连续法广泛的原因。目前,POC 主要与 CPF 结合使用,应用在静态电压稳定域精确或拟合计算的数学基础方面。

1.2 改进 POC

POC 的主要问题在于 2 个方面:一是算法的收敛性问题,设置的初始点应该接近 SNB 点,否则算法很容易发散,导致得不到正确的结果;二是 POC 无法计算 LIB 点,导致计算的结果未考虑系统的约束限制,与实际不符。本节讨论一种改进的 POC,通过改进措施来降低初始值对算法收敛性的影响。为了减小初始值对 POC 收敛性的影响,一种可行的方法是使该方法和 CPF 具有相似的特征,即经过每次迭代步骤后,得到的解都应逼近平衡流形。如果每次迭代的解都接近解曲线,则无论初始点离终点有多远,算法所得到的解都可以通过迭代步骤向 SNB 点移动。另外,为了保证算法的收敛速度,所应用的修改不应影响原始算法的二阶收敛性。根据这些原则,本文提出了 2 项改进措施。

首先,右特征向量中的每个元素体现了负载相对于系统状态变量的灵敏度^[16]。一般情况下,当系统负载增加导致系统状态发生变化时,与节点电压幅度相比,每个节点的相角将表现出相对较大的变化。根据以上电力系统的特点,为了避免每次迭代中变量的值出现过大变化,将式(3)修改为:

$$\|\mathbf{v}_u\|_{\infty} = 1 \quad (5)$$

其中, $\mathbf{v}_u$ 对应于电压幅度的向量元素,与 $\mathbf{v}_{\theta}$ 对应于电压相角的向量元素相区别。

其次,当采用切线法计算初始特征向量时,第一次迭代将通过相应 PV 曲线的切线方向搜索 SNB 点。如果下一次迭代由式(4)执行,第二次迭代的解将逼近 SNB 点领域。这意味着迭代过程中解的数值变化很大,当初始点离目的点不够近时,很容易导致发散,通常经典 POC 在每次迭代过程中根据式(4)来修正特征向量。通过分析 POC 的迭代过程以及大量 POC 的计算测试,根据特征向量能够引导系统状态变量搜索方向的特性,本文提出在每个迭代步骤中重新计算特征向量的改进措施。

在每次迭代后,利用上次迭代得到的状态变量,用切线法重新计算特征向量进行下一次迭代。这种改进可以解释为使改进 POC 的迭代过程持续保持切线方向搜索 SNB 点。

在切线法中,特征向量可以通过以下方法计算:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{\text{tar}} \\ \lambda' \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G_{\mathbf{x}} & G_{\lambda} \\ \mathbf{e}^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{v}_{\text{tar}}$ 为所求特征向量的初值; λ' 为 λ 对某一特定变量的导数,这个特定变量由 $\mathbf{e}^T$ 指定,此处 $\mathbf{e}$ 为一个

只有1个元素是1、其他元素是0的向量。在 $\mathbf{v}_{\text{tar}}$ 的第一次计算中, $\mathbf{e}$ 中非零元素的位置可以随机指定,在用一个确定的范数规则,如式(3)或式(5),对式(6)的解进行范数规范后, $\mathbf{v}_{\text{tar}}$ 以及 λ' 的值将是唯一的。

1.3 算法步骤

改进算法的步骤如下。

步骤1 输入初始状态变量。

步骤2 定义负载增量方向。

步骤3 用式(6)计算特征向量,用式(5)对特征向量进行范数规范。

步骤4 形成并计算式(4),对 $\mathbf{x}$ 进行修正。

步骤5 如果迭代次数大于5并且 $\max(\mathbf{x})$ 大于 M ,则输出“迭代过程发散”,并结束程序。其中, M 为判断程序发散的阈值,通常根据经验进行设置,本文将其设置为100即可满足要求。

步骤6 检查 $\Delta\mathbf{x}$ 是否满足精度要求。如果不满足,则转到步骤3;否则,输出结果并结束计算。

算法流程图如附录中图A1所示。本文采用文献[11]中的降维方法 DRM (Dimension-Reduced Method),每次迭代中分解式(4)和式(6)中的系数矩阵,利用式(6)的系数矩阵求解式(4)。通过这种方式,所提算法的整个计算量是 DRM 与求解式(6)的计算量之和。由于式(6)系数矩阵的因式分解是在 DRM 中求解式(4)时计算的,因此额外的计算量较少。

改进后的算法并未修改 POC 的基本原理,只是根据电力系统的特性对该方法进行了调整。因此, MSE 理论也可以应用于本文提出的改进算法,如不存在奇异性问题的定理。另外,本文依据的方程是电力系统代数方程的一般形式,因此,电力系统中的任何稳态数学模型都可以在该算法中实现。

本文提出的算法仅对特征向量,即其迭代过程进行修改,计算量和存储量主要集中在雅可比矩阵及其求逆,与传统直接法相差不大。

2 LIB 的计算方法

电力系统中存在大量的约束限制,当系统运行过程抵达这些约束条件时,系统的代数方程将发生突变,平衡解曲线将出现偏折。根据不同的偏折类型可以将偏折点分为约束诱导静态分岔 LISB (Limit Induced Static Bifurcation) 点以及约束诱导动态分岔 LIDB (Limit Induced Dynamic Bifurcation) 点两大类:当越限的发电机无法调节系统电压,系统作用的平衡点由于系统状态的变化而直接消失,导致电力系统电压崩溃的产生,这一类分岔点称为 LISB 点;当发电机节点越限后,电力系统还存在平衡点,但电压随着负荷的增加以更快的速度下降,这一类分岔点称为 LIDB 点。两者的区别在于偏

折后系统是否存在稳定运行点。

根据改进的 POC 的特点,本文提出一种计算 LIB 点,即 LISB 点和 LIDB 点^[22]的计算方案。

由于改进的 POC 每次迭代点都逼近系统平衡流形,因此可以近似认为每次迭代点 $[\Delta\mathbf{x} \ \Delta\lambda]^{\text{T}(n)}$ 为系统的近似解,第 n 次迭代时有:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \mathbf{G}_x \mathbf{v} \\ 0 \end{bmatrix}^{(n)} = - \begin{bmatrix} \mathbf{G}_x & \mathbf{G}_\lambda & 0 \\ \mathbf{G}_{xx} \mathbf{v} & \mathbf{G}_{x\lambda} \mathbf{v} & \mathbf{G}_x \\ 0 & 0 & \mathbf{e}^{\text{T}} \end{bmatrix}^{(n)} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x} \\ \Delta\lambda \\ \Delta\mathbf{v} \end{bmatrix}^{(n+1)} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \lambda \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \lambda \end{bmatrix}^{(n)} + \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x} \\ \Delta\lambda \end{bmatrix}^{(n)} \quad (8)$$

则:

$$\Delta\mathbf{d} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x} \\ \Delta\lambda \end{bmatrix}^{(n)} \quad (9)$$

可以近似认为是系统平衡流形上2个平衡点之间的割线方向。因此,发电机输出的无功功率从系统状态 n 到状态 $n+1$ 的增量可以根据式(10)计算。

$$\Delta Q_{\text{Gen}} = \mathbf{G}_{Qx}(\mathbf{x}, \lambda) \Delta\mathbf{x} \quad (10)$$

其中, ΔQ_{Gen} 为发电机节点的无功增量; $\mathbf{G}_{Qx}(\mathbf{x}, \lambda)$ 为发电机无功功率相对于状态变量的雅可比矩阵。

若存在发电机节点的无功功率不在其无功功率限制范围内,即不满足式(11),则可以认为沿该割线方向该次迭代过程中会发生发电机无功越限的情况,根据越限发电机节点无功变化量与稳定裕度的比值判断最先发生越限的发电机节点,如式(12)所示。

$$Q_{\min}^m \leq Q_{\text{Gen}}^m(\mathbf{x}, \lambda) + \Delta Q_{\text{Gen}}^m \leq Q_{\max}^m \quad (11)$$

$$\left| \frac{\Delta Q_{\text{Gen}}^L}{Q_{\text{Gen}}^L(\mathbf{x}, \lambda) - Q_{\lim}^L} \right| = \max_{s \in S} \left(\left| \frac{\Delta Q_{\text{Gen}}^s}{Q_{\text{Gen}}^s(\mathbf{x}, \lambda) - Q_{\lim}^s} \right| \right) \quad (12)$$

其中, m 为发电机节点; $Q_{\text{Gen}}^m(\mathbf{x}, \lambda)$ 为节点 m 发电机无功出力; ΔQ_{Gen}^m 为节点 m 发电机的无功增量; $Q_{\max}^m$ 、 $Q_{\min}^m$ 分别为节点 m 发电机无功出力的最大值和最小值; S 为式(11)中发电机发生无功越限的节点集合; $Q_{\lim}^s$ 依据发生越限的情况取无功上限值 $Q_{\max}^s$ 或者下限值 $Q_{\min}^s$; L 为最先发生无功越限的发电机节点。

发电机发生无功越限后不再具有调节电压的能力,发电机节点转化成负荷节点,在后续计算中,将该发电机节点视为 PQ 节点。用牛顿法直接计算节点 L 发电机无功输出达到极限时产生的 LIB 点。求解 LIB 点的方程可以表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{G}(\mathbf{x}, \lambda) = 0 \\ Q_{\lim}^L - Q_{\text{Gen}}^L(\mathbf{x}, \lambda) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中,第一式为电力系统潮流方程,第二式为越限发电机节点无功出力限制方程。

初始值由式(14)计算,该式产生的初始值接近 LIB 点真实解。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \lambda \end{bmatrix}_{\text{init}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \lambda \end{bmatrix}^{(n)} + \frac{|Q_{\text{lim}}^L - Q_{\text{Gen}}^L(\mathbf{x}, \lambda)|}{|\Delta Q_{\text{Gen}}^L|} \Delta \mathbf{d} \quad (14)$$

应当注意,在式(13)的迭代求解过程中,PV-PQ节点转换按照文献[23]中的逻辑进行。如果在本次迭代中没有发现发电机达到限制,则转到下一次迭代,直到满足精度要求或者式(6)中 λ' 的计算结果改变符号, λ' 改变符号意味着达到LISB点。

3 案例分析

3.1 IEEE 14 节点系统

本节将在 IEEE 14 节点系统中通过和现有 POC 进行比较,以验证改进 POC 收敛性的改善。本文不考虑系统的无功功率限制。

IEEE 14 节点系统包括 2 个区域和 14 个节点,其中包括 4 个发电机节点。系统稳态数据可参阅文献[24]。本文考虑系统中有功功率增长的 9 种不同情况:情况 1—8 中,PQ 节点(即节点 4、5、9—14)负载的有功功率在每种情况下分别增加;情况 9 中,所有 PQ 节点的有功功率按照原负荷比例同时增加。为了验证所提改进 POC 具有更好的收敛性,本文采用 4 种不同特征向量初值设置方法的 POC 和改进 POC 计算系统中的这 9 种情况。

状态变量的初始值设置为系统的给定稳态状态。此外,为了验证每种情况的正确性,采用 CPF 跟踪负荷增加过程的整个平衡流形。表 1 给出了每种算法得到的迭代次数 N 和 SNB 点,“—”表示算法在这种情况下是不收敛的。由表中可见,改进 POC 在所有情况下都收敛到极限点,而其他算法可能导致不收敛。当特征向量采用默认值时,所有情况均不

表 1 IEEE 14 节点系统不同算法收敛结果

Table 1 Convergence results of different methods for IEEE 14-bus system						
案例	指标	改进法	切线法	二阶法	逆幂法	默认值
1	N	9	7	6	—	—
	SNB 点	7.034 1	7.034 1	7.034 1	—	—
2	N	9	8	6	—	—
	SNB 点	6.747 8	6.747 8	6.747 8	—	—
3	N	10	—	6	—	—
	SNB 点	3.592 1	—	3.592 1	—	—
4	N	9	8	6	—	—
	SNB 点	2.619 4	2.619 4	2.619 4	—	—
5	N	8	7	6	—	—
	SNB 点	2.586 1	2.586 1	2.586 1	—	—
6	N	7	6	7	—	—
	SNB 点	2.111 9	2.111 9	2.111 9	—	—
7	N	10	7	—	10	—
	SNB 点	3.192 1	3.192 1	—	3.192 1	—
8	N	8	7	6	—	—
	SNB 点	1.665 8	1.665 8	1.665 8	—	—
9	N	8	7	6	8	—
	SNB 点	0.185 6	0.185 6	0.185 6	0.185 6	—

收敛;二阶法给出特征向量和电压向量的初始值,因此该算法的初始值更接近 SNB 点,有助于减少迭代次数,但在情况 7 下该算法仍是发散的;对于逆幂法,初始值不够接近 SNB 点,该算法收敛性较差,在某些情况下得不到最终解;切线法在大多情况下都能用较少的迭代次数满足收敛精度的要求,得到收敛结果,但在情况 3 下该算法是发散的。

图 1 给出了情况 9 下不同算法的收敛过程(图中纵轴为标么值)。如图中所示,与分析结果一致,改进 POC 的收敛路径接近于由 CPF 计算的 PV 曲线。

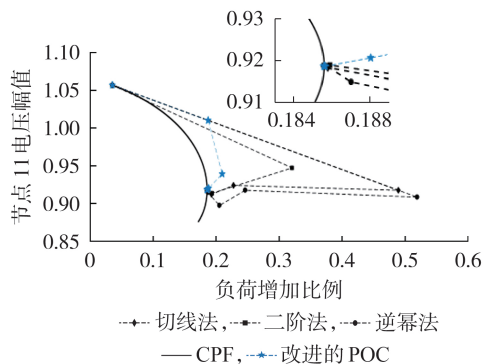


图 1 情况 9 下 IEEE 14 节点系统结果

Fig.1 Results of IEEE 14-bus system under Case 9

3.2 IEEE 118 节点系统

由于 IEEE 14 节点系统数据量较小,表 1 中各算法计算时间均在 0.1 s 左右。为更好地体现各算法在计算速度上的差异,采用 IEEE 118 节点系统比较表 1 中各算法的计算速度,且暂不考虑发电机无功功率限制。该系统包含 3 个区域、186 条线路^[25],使区域 1 内的所有负荷节点有功功率根据其原始状态按比例增加,运行结果如表 2 所示,运行时间取 10 次运行时间的平均值。

表 2 IEEE 118 节点系统运行结果

Table 2 Operation results of IEEE 118-bus system			
算法	运行时间 / s	迭代次数	SNB 点
改进 POC	0.754 592	9	0.431 8
切线法	—	—	—
二阶法	0.588 443	6	0.431 8
逆幂法	—	—	—
CPF	3.307 221	—	0.431 8
默认值	—	—	—

由表 2 可知,改进 POC 与二阶法收敛,SNB 点与 CPF 计算结果一致,由于迭代次数较多,改进 POC 运行时间略长于二阶法。

上述算例表明,虽然本文所提算法在每次迭代过程中需要重新计算特征向量,略微降低了计算速度,但是较其他算法具有更好的收敛性。对于传统直接法由于特征向量初始值设置不当导致不收敛的情况,所提算法具有更高的适用性。

在同样的情况下,考虑发电机节点的无功功率限制,计算结果如图2(图中横轴与纵轴均为标么值)和表3(表中 $P_{117\max}$ 为节点117的极限功率, $U_{117\text{SNB}}$ 为节点117的崩溃点电压,均为标么值)所示。

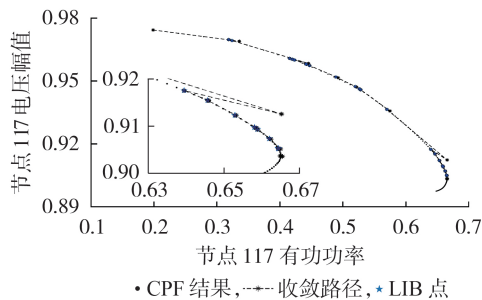


图2 情况9下IEEE 118节点系统结果

Fig.2 Results of IEEE 118-bus system under Case 9

表3 情况9下LISB和SNB点结果

Table 3 Results of LISB and SNB points under Case 9

产生LISB的发电机节点(按顺序)	$P_{117\max}$	$U_{117\text{SNB}}$
12, 70, 74, 34, 15, 1, 65, 36, 19, 18, 6, 49, 76, 73, 8, 32, 77, 72, 46, 56, 66	0.665 1	0.903 5

图2给出了改进POC的收敛路径和CPF的计算点。显然,CPF需要计算负载增加方向上的所有运行点,而改进POC只需计算每个LISB点,并最终在系统的边界处结束,由图中可见其终点为SNB点。但有些情况下计算终点可能是LISB点,如果出现这种分岔, λ' 的符号将发生变化,程序将在LISB点处停止。表3给出了迭代过程中达到的限制,本文所提算法与CPF计算结果一致。

4 结论

本文提出一种改进直接法,相较于传统直接法,其收敛性受初值影响更小,并且给出了一种计算LIB点的方法。改进算法充分利用了电力系统电压幅值相较于电压相角变化较小的特点,以及特征向量的值对搜索方向有引导作用的特性,减少了算法对初始值的依赖,而且收敛路径接近平衡流形。所提LIB点计算方法解决了直接法无法检测LIB点的问题。以IEEE 14节点系统和IEEE 118节点系统为例,验证了所提算法的有效性和计算LIB点的可行性。本文所提算法属于直接法,采用牛顿法求解,因此,仍存在牛顿类算法的初值及参数选择问题。本文是利用直接法检测SNB点和LIB点的有效尝试,为电力系统静态电压稳定性的快速分析提供了方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] LIN X, DAVID A K, YU C W. Reactive power optimisation with voltage stability consideration in power market systems [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribu-

tion, 2003, 150(3):305.

- [2] JÓNSDÓTTIR G M, MILANO F. Data-based continuous wind speed models with arbitrary probability distribution and autocorrelation[J]. Renewable Energy, 2019, 143:368-376.
- [3] MELE F M, ZARATE-MINANO R, MILANO F. Modeling load stochastic jumps for power systems dynamic analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6):5087-5090.
- [4] EREMIYA M, SHAHIDEHPOUR M. Handbook of electrical power system dynamics[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013:798-813.
- [5] DOBSON I, VAN CUTSEM T, VOURNAS C, et al. Voltage stability assessment: concepts, practices and tools[M]. New York, NY, USA: IEEE Publication SP101PSS, 2002:236-245.
- [6] MATARUCCO R R, BONINI N A, ALVES D A. Assessment of branch outage contingencies using the continuation method [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 55:74-81.
- [7] 江伟, 王成山, 余贻鑫, 等. 直接计算静态电压稳定临界点的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10):1-6.
- JIANG Wei, WANG Chengshan, YU Yixin, et al. A new method for direct calculating the critical point of static voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10):1-6.
- [8] 钟浩, 姚丹. 电压稳定极限诱导分岔点快速追踪方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12):65-69.
- ZHONG Hao, YAO Dan. Quick tracking of limit-induced bifurcation point of voltage stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12):65-69.
- [9] WU H, YU C W. An algorithm for point of collapse method to compute voltage stability limit [C]//2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Hong Kong, China: IEEE, 2004:102-107.
- [10] CANIZARES C A, ALVARADO F L, DEMARCO C L, et al. Point of collapse methods applied to AC/DC power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(2):673-683.
- [11] YAN Z, LIU Y, WU F, et al. Method for direct calculation of quadratic turning points[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(1):83.
- [12] JIANG T, WAN K Y, FENG Z C. Boundary-derivative direct method for computing saddle node bifurcation points in voltage stability analysis[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 112:199-208.
- [13] 万凯遥, 姜彤. 增补P/Q节点直接计算电压崩溃点的潮流方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12):3507-3515.
- WAN Kaiyao, JIANG Tong. A direct calculation method of voltage collapse points by supplement of a new type of P/Q bus [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12):3507-3515.
- [14] QIU Y W, WU H, ZHOU Y Z, et al. Global parametric polynomial approximation of static voltage stability region boundaries [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3):2362-2371.
- [15] QIU Y, WU H, SONG Y, et al. Global approximation of static voltage stability region boundaries considering generator reactive power limits[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5):5682-5691.
- [16] CANIZARES C A, ALVARADO F L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1):1-8.
- [17] CHIANG H D, JEAN-JUMEAU R. A more efficient formulation for computation of the maximum loading points in electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2):635-646.
- [18] HISKENS I A, CHAKRABARTI B B. Direct calculation of

- reactive power limit points[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1996, 18(2): 121-129.
- [19] 刘阳涵. 快速PQ分解法潮流计算方法研究[D]. 南昌:南昌大学, 2016.
- LIU Yanghan. Research on the power flow calculation of rapid PQ decomposition[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.
- [20] 杨小煜, 周孝信, 李立新, 等. 潮流方程鞍结分岔点计算的块消去算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 83-88.
- YANG Xiaoyu, ZHOU Xiaoxin, LI Lixin, et al. Block elimination algorithms for the saddle-node bifurcation point of power flow equations[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 83-88.
- [21] GOVAERTS W J F. Numerical methods for bifurcations of dynamical equilibria[M]. Philadelphia, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000: 66.
- [22] AVALOS R J, CANIZARES C A, MILANO F, et al. Equivalency of continuation and optimization methods to determine saddle-node and limit-induced bifurcations in power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2009, 56(1): 210-223.
- [23] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 潮流计算中PV-PQ节点转换逻辑的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 54-59.
- ZHAO Jinquan, CHIANG Hsiao-dong, ZHANG Boming. Study on PV-PQ bus type switching logic in power flow computation [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 54-59.
- [24] MILANO F. Loads[M] // Power system modelling and scripting. Berlin, Germany: Springer, 2010: 313-324.
- [25] University of Washington College of Engineering. Power systems test case archive[DB/OL]. (1999-08-01)[2018-09-01]. <http://labs.ece.uw.edu/pstca/>.

作者简介:



陈 昌

陈 昌(1996—),男,浙江温州人,博士研究生,主要研究方向为综合能源系统的优化控制(**E-mail**: chandler_chen@163.com);

姜 彤(1970—),男,北京人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制、大规模电力储能(**E-mail**: Jiangtong@ncepu.edu.cn);

万凯遥(1992—),男,江西南昌人,博士研究生,主要研究方向为电力系统分析和控制(**E-mail**: wankaiyao009@163.com);

冯卓诚(1995—),男,北京人,博士研究生,主要研究方向为电力系统电压稳定域的分析与计算(**E-mail**: fzcrml@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Improved point of collapse method for direct calculation of static voltage stability margin

CHEN Chang, JIANG Tong, WAN Kaiyao, FENG Zhuocheng

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at the problems that the convergence of the traditional direct method is easily affected by the initial value and the traditional POC(Point Of Collapse method) cannot calculate the LIB(Limited Induced Bifurcation) points, an improved POC is proposed, which modifies the iterative process and the setting method of eigenvector norm according to the characteristics of power system, so that its sensitivity to the initial value is reduced. Based on the special convergence of the improved method, a method is proposed to calculate the LIB points. The case results of IEEE 14- and 118-bus systems verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: steady-state voltage; point of collapse; limited induced bifurcation; convergence; voltage margin

附录：

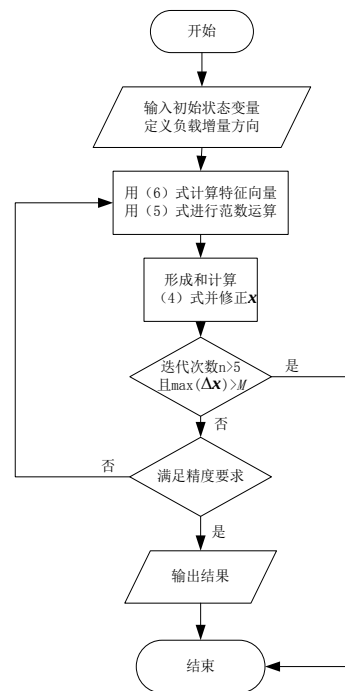


图 A1 算法流程图
Fig.A1 Flowchart of algorithm