

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210545

基于改进 Chord 法的电力系统连续潮流计算新方法

王妍^{1,2}, 高山^{1,2}

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省智能电网技术与装备重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 连续潮流计算是电力系统研究静态电压稳定和传输能力应用的重要工具, 但临界点处的奇异性制约了连续潮流计算的应用和发展。因此, 解决好临界点病态问题是更好应用连续潮流的关键。应用改进 Chord 法处理连续潮流问题中临界点处的计算, 能够快速计算该点处的解, 收敛速度快, 达到二阶收敛。不用扩展原雅可比矩阵, 因此不需要担心原系统中的非奇异点变为系统扩展雅可比矩阵的奇异点问题, 使计算过程更为简单。应用线性化方法预测连续潮流计算方向, 整个计算过程简洁方便。在计算及分析中与扩展潮流计算方法进行比较, 体现了所提 Chord 法简洁、高效的优点。不同工况下, IEEE39 和 IEEE57 节点系统仿真算例结果表明, 所提模型和方法能够快速有效地计算连续潮流和临界点处的奇异解, 有着很好的精确性和鲁棒性。

关键词: 电力系统; 连续潮流; 改进 Chord 法; 奇异点; 稳定性

A new method of power system continuous flow calculation based on an improved Chord method

WANG Yan^{1,2}, GAO Shan^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Key Laboratory of Smart Grid Technology and Equipment of Jiangsu Province (Southeast University), Nanjing 210096, China)

Abstract: Continuous power flow (CPF) calculation is an important tool for power system analysis in studying static voltage stability and system transmission capacity. However, a critical point singularity seriously restricts the application and development of CPF. Therefore, the key to better application of CPF is to solve the problem of the critical point singularity. An improved Chord method is proposed to deal with the calculation of the critical point in the CPF problem. It can quickly calculate the solution at the critical point, and has fast convergence speed, reaching second-order convergence. It does not need to expand the original Jacobian matrix, so it does not need to worry about the problem that the nonsingular points in the original system become the singular points of the extended Jacobian matrix of the system. This makes the calculation process simpler. Applying the linearization method to predict the calculation direction of CPF, the whole calculation process is simple and convenient. Compared with the extended power flow method, the Chord method presented in this paper is simple and efficient. The simulation results of the IEEE 39-bus and IEEE 57-bus systems under different working conditions show that the proposed model and method can quickly and effectively calculate the singular solutions of CPF, and it has a good accuracy and robustness.

This work is supported by the Key Special Fund of Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

Key words: power system; continuous power flow; improved Chord method; singular point; stability

0 引言

电力工业的改革使得现代电力系统稳定运行极

限越来越小, 尤其近年来大力发展的可再生能源并网, 其不确定性和间歇性给电力系统的稳定运行带来较大压力, 而潮流、连续潮流、最优潮流计算无论对电力系统稳定性分析^[1-6], 还是电力系统的规划运行都是非常重要的工具。其中连续潮流技术从 20 世纪 90 年代被提出到现在, 已发展为一种成熟的静态稳定分析工具^[7-11], 但是如何更为便捷准确、

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项资助(2016YFB0900600); 国家电网公司科技项目资助(52094017000W)

高效地求解连续潮流问题仍然是学界关注的焦点, 尤其是需要更好地解决临界点处雅可比矩阵的病态问题。很多计算方法应用在电力系统的多种问题计算中^[12-18], 其中连续潮流是电力系统最为重要的计算问题之一, 其研究的时间较长, 提出连续潮流的求解方法也有很多, 归纳起来一般有两种: 一是间接法; 二是直接法。目前电力系统连续潮流的计算中大多采用的是间接法^[19-22], 计算主要涉及两方面的问题: (1) 负荷参数方向的预测及确定; (2) 临界点(或称为“鼻点”)处的计算。其中计算的难点主要体现在临界点(或称为“鼻点”)的处理和计算, 本文将主要对该问题展开研究。

间接法一般是通过扩展原有计算矩阵, 或增加参数, 从而解决在临界点(或称为“鼻点”)处出现的矩阵病态问题, 然后再求解扩展后的方程。为解决连续潮流计算中出现的雅可比矩阵病态问题, 文献[20]应用延拓方法将矩阵进行延拓, 然后对其求解, 属于间接方法, 未采用直接求法。文献[21]建立了非线性注入功率变化的模型, 提出应用分段线性模型来逼近注入功率, 将该种方法用来解决连续潮流问题, 其计算过程较为复杂。为处理临界点处雅可比矩阵的病态问题, 文献[22]在原系统模型的基础上增加了一个线性方程, 但这还要取决于选定的母线电压大小和负载情况。该方法能够在一定程度上克服临界点处雅可比矩阵奇异, 但同时可能会使得原系统中的非奇异点变为系统扩展后雅可比矩阵的奇异点, 造成非临界点计算失败的情况。

直接法一般就是直接求解构建的非线性方程组, 采用并行、解耦等方法用以处理临界点(或称为“鼻点”)处的矩阵病态问题, 但这些方法需要的计算量较大, 并且程序执行也较为复杂。文献[23]提出一种大规模交直流互联电力系统潮流分区并行算法, 并将其用于交直流互联系统。针对传统解耦方法面对临界点雅可比矩阵病态问题显现的局限性, 文献[24]给出一种参数快速解耦方法用来计算最大负荷点, 其计算过程较为复杂。为解决交直流互联系统中的潮流计算, 文献[25]利用连续潮流模型改进原有计算过程, 通过主从迭代解决潮流分析中的收敛性和稳定性问题。

从以上的分析可以看出, 研究者提出了诸多不同的方法求解连续潮流, 精确性和快速性被普遍认为是潮流计算中最重要的两个问题。其中牛顿迭代算法是一种求解非线性问题的良好解法, 收敛速度快, 能达到二阶收敛, 但不完全适用于连续潮流的主要原因是: 无法求解临界点(或称为“鼻点”)处的解。求解连续潮流的关键点主要是围绕如何快速

有效地解决临界点(或称为“鼻点”)处雅可比矩阵的病态问题展开。

本文的主要工作: 提出一种新方法, 用于解决连续潮流计算中临界点(或称为“鼻点”)处的病态解, 进而给出了求解连续潮流问题的策略。其中 Chord 法是一种专门用于解决非线性方程病态问题的求解方法, 本文提出由改进 Chord 法解决连续潮流中临界点(或称为“鼻点”)处的病态问题, 并结合牛顿迭代算法追踪连续潮流中的分支曲线。该方法思路清晰, 应用简捷。并从理论上分析了该方法的有效性。为体现本文所提方法的优点, 在分析计算中与其他方法做了比较。本文最后用 IEEE39 节点和 IEEE57 节点系统做仿真算例, 在不同工况下的计算结果表明本文所提方法具有良好的精确性和鲁棒性。

1 改进 Chord 法的理论分析

设 y^* 是非线性方程组(1)的解。

$$f(y) = 0 \quad (1)$$

$f'(y^*)$ 是方程组(1)关于点 y^* 的一阶偏导, 是奇异的, 并且 $f'(y^*)$ 有一个有限维零空间。 y_0 为初始迭代点, 则给出如下 Chord 法迭代计算收敛到 y^* 的算式, 有

$$y_{n+1} = y_n - f'(y_0)^{-1} f(y_n), n \geq 0 \quad (2)$$

设 $f'(y^*)$ 有一个 m 维的零空间 N , 闭的值域 R , 用 F_N 表示 R^n 到 N 上的投影算子, 用 F_R 表示 R^n 到 R 上的投影算子。设 B 为 y 的变量空间, 对 $\forall y \in B$, 定义 $\Delta y = y - y^*$ 。

对 $y \in N$, $\forall y \in B$, 有

$$F_N y = EZ = E\Lambda_y Z_0 \quad (3)$$

式中: $Z = (y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(m)})'$; $Z_0 = (y_0^{(1)}, y_0^{(2)}, \dots, y_0^{(m)})'$; E 为空间的基; $\Lambda_y = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_m)$, $a_i = \frac{y^{(i)}}{y_0^{(i)}}$ 。其中表达式 Z 和 Z_0 中的“'”表示向量转置, 上标 (m) 表示 Z 中的第 m 个元素。

定理 1 设 $y_0 \in W(\rho, \theta)$, $\dim N = m(1 \leq m < \infty)$, 假设对所有 $y \in W(\rho, \theta)$ 都有 $F_N y \neq 0$, $\bar{D}(y)$ 是一个在 N 上的非奇异映射, 则当 ρ, θ 足够小时, 由 Chord 法迭代产生的 $\{y_n\}$ 仍然在 $W(\rho, \theta)$, 且当 $y_n \rightarrow y^*(n \rightarrow \infty)$, 并且有

$$\|F_R \Delta y_n\| \leq k \|\Delta y_{n+1}\|^2, k > 0 \quad (4)$$

存在 $M > 0$, 使得

$$\|y_n - y^*\| \leq \frac{M}{n} \quad (5)$$

证明过程详见参考文献[26], 本文将不再赘述。

为加快收敛速度, 改进 Chord 法给出外推公式如式(6)。

$$\bar{y}_{n+1} = (n+1)y_{n+1} - ny_n \quad (6)$$

则存在 $t > 0$, 有

$$\|\bar{y}_{n+1} - y^*\| \leq \frac{t}{n^2} \quad (7)$$

证明过程详见参考文献[26], 本文将不再赘述。

从误差公式(5)可看出 Chord 法虽然能够比较方便地解决病态问题, 但收敛速度较慢, 仅为一阶收敛。为提高收敛速度, 经过式(6)的改进后, 由式(7)则能看出, 改进 Chord 法不仅计算方便, 而且收敛速度快, 达到二阶收敛, 因此本文将采用改进 Chord 法进行奇异点处的计算。与传统牛顿迭代法求解的方法相比, 本文所采用方法计算量减小, 只需计算一次雅可比矩阵, 无需每次迭代都要重新计算, 大大减少了计算量, 并且收敛速度快, 达到二阶收敛, 计算效率明显提高。

由此, 得到应用改进 Chord 法计算奇异解的计算流程, 如图 1 所示。

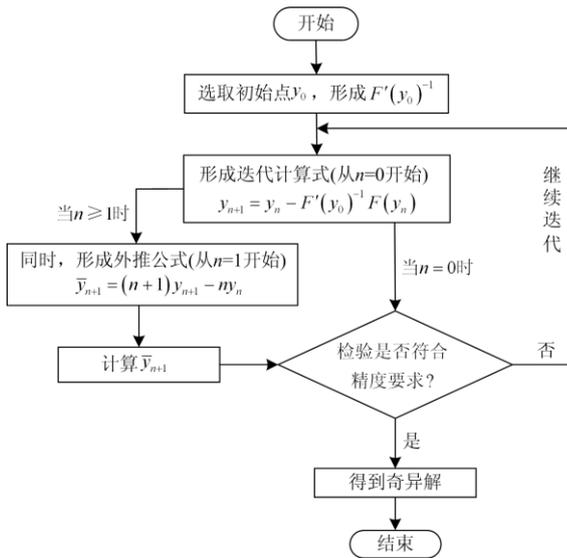


图 1 改进 Chord 法计算奇异解流程图

Fig. 1 Flow chart of calculating singular point with improved Chord method

2 连续潮流计算分析

2.1 计算方向预测

连续计算的方向预测即根据当前运行点选择合适参量的变化方向, 为下一次迭代计算做好准备;

其主要目的就是给出下一次迭代的估计值, 从而使收敛更快达到解点。连续计算潮流的数学模型表示为

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

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

$$(i = 1, 2, \dots, l)$$

式中: P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点 i 的发电机有功和无功出力; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 的负荷功率; P_{Gi}^0 、 Q_{Gi}^0 、 P_{Li}^0 、 Q_{Li}^0 分别为其对应于参数 λ 的单位增长功率; V_i 为节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i, j 间的相角差; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点导纳矩阵第 (i, j) 个元素的实部、虚部; l 为系统节点数。

为下文书写方便, 式(8)用式(9)表示。

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

式中: x 为待求的未知变量; λ 为负荷增长参数。

计算方向预测的主要原理表述如下。

1) 从当前的已知解 x_n 出发, 以一个切线预报来估计下一个负荷增长方向上的解, 即解方程(10)。

$$f_x dx = 0 \quad (10)$$

式中, f_x 为已知解 x_n 处的雅可比矩阵。计算得到 dx 。

2) 选取步长为 λ , 则下一步解的预测值 \tilde{x}_{n+1} 为

$$\tilde{x}_{n+1} = x_n + \lambda dx \quad (11)$$

得到继续计算的预测值后, 然后应用牛顿迭代计算得到精确解, 如此再回到以上步骤 1), 重复计算直至达到临界点。从以上表述能够看出, 本文所提方法计算方向的预测相较于传统计算方法^[27-28], 无需进行矩阵扩展和额外增加参数, 思路较为清晰。

2.2 算法比较分析和临界点的确定

连续潮流计算过程中, 在临界点处存在潮流方程雅可比矩阵奇异的问题, 本文提出用改进 Chord 法计算连续潮流问题, 采用直接计算的方法, 无需进行矩阵扩展, 计算过程非常简捷。以往的连续潮流计算研究中, 大多采用的是间接方法, 如矩阵延拓、增加参量等, 该方法也能解决连续潮流, 但同时可能会带来另一个问题, 非临界点处的矩阵发散问题, 这是由扩展后的矩阵奇异造成的(此处奇异与临界点处奇异不同), 本文所提方法从机理上避免了该情况的发生。

在达到临界点之前, 应用传统牛顿迭代进行潮

流求解, 牛顿法具有二阶收敛速度, 计算效率高; 鉴于临界点附近, 牛顿迭代法计算可能会出现发散, 本文在达到临界点附近时, 则应用本文所提改进 Chord 法进行临界点处的求解。判定到达临界点与否的方法较多^[29-31], 本文所采用方法阐述如下。

P-V 曲线有上、下分支, 通过判定 $\frac{\partial \lambda}{\partial x}$ 符号的变化来确定是否位于 P-V 曲线的上半支, 依此判定是否已经到达临界点。在不断变换负荷参数的过程中, 如果连续两次充分接近的解满足:

$$\left. \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right|_{(x_n, \lambda_n)} \left. \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right|_{(x_{n+1}, \lambda_{n+1})} < 0 \quad (12)$$

则表示临界点在这两次负荷参数变化之间。式(12)的计算中, 负荷参数 λ 和 x 之间很难建立显式表达式, 因式(12)在文中的主要目的是判断符号正负性, 不需要精确数值结果; 故, 本文应用简化方法进行计算, 采用一阶微量来进行近似计算负荷参数 λ 对 x 的导数。

由式(12)则判定已越过了连续潮流的临界点, 临界点即在 x_n 与 x_{n+1} 之间。

2.3 节点类型的转换

连续潮流计算会涉及多种节点类型, 有 PQ、PV、V θ 节点等^[32]。负荷的连续变化可能会导致电力系统的诸多设备达到输出极限, 如发电机无功越限等; 因此, 需要对该种情况进行节点类型的转换处理, 具体措施如下所述。

1) 对 PV 节点, 若节点无功越限, 则 PV 节点转换为 PQ 节点。

2) 对 PQ 节点, 若节点电压低于最小限值且无功功率计算量不越限, 则 PQ 节点转换为 PV 节点; 若节点电压高于最大值且无功功率计算量不越限, 则 PQ 节点转换为 PV 节点。

3) 其他类型不做转换。

2.4 应用改进 Chord 法的连续潮流计算

应用本文所提方法求解电力系统的连续潮流如图 2 所示。

3 数值计算分析

本文以 Matlab 为仿真工具分别对 IEEE39 节点和 IEEE57 节点测试系统进行仿真计算, 其实验运行环境是 Windows10(64 bits)操作系统, 硬件配置是 Intel core i5 1.7 GHz 双核 CPU, 内存为 6 GB。

1) 算例分析 1

本部分采用新英格兰 10 机 39 节点 IEEE39 节点系统进行计算验证, 节点 32 为平衡节点, 发电机

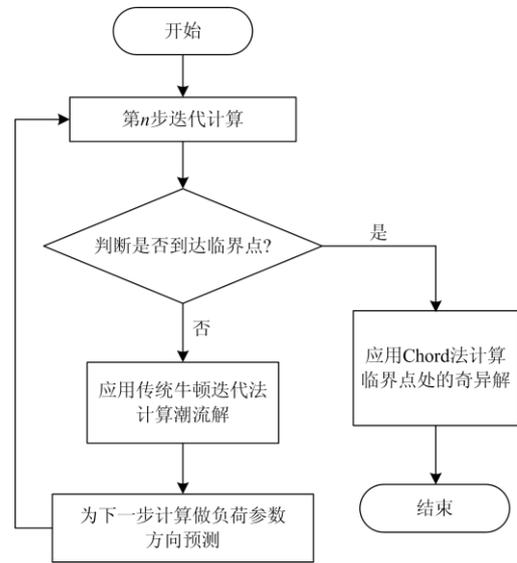


图 2 连续潮流计算流程图

Fig. 2 Flow chart of calculating continuation power flow

节点分别为 PV 节点, 其余为 PQ 节点, 功率基准值为 100 MVA, 节点系统简图如图 3 所示。

为了验证分析本文所提方法计算连续潮流的精确性和鲁棒性, 本文将负荷参数分两种工况进行计算, 计算精度设置为 10^{-4} 。

(1) 局部参数化方法

负荷参数的增长方式: 图 3 中红色虚线之内节点负荷功率增加, 其余节点负荷功率不变。应用文中所提 Chord 法计算临界点处的奇异解如表 1 所示, 并用扩展潮流方程计算方法作为比较^[33]。

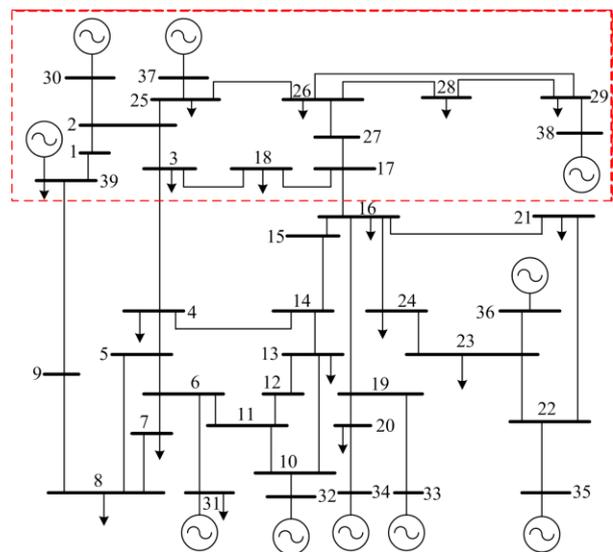


图 3 IEEE39 节点系统图

Fig. 3 IEEE 39-bus system

表 1 用改进 Chord 法计算节点 3、28 临界点处潮流结果
Table 1 Power flow of bus 3 and 28 at singular point
with improved Chord method

迭代次数	U_3	U_{28}	\bar{U}_3	\bar{U}_{28}
1	0.825 5	0.815 0	—	—
2	0.821 1	0.810 6	0.816 7	0.806 2
5	0.816 4	0.807 7	0.808 0	0.794 8
8	0.812 6	0.806 8	0.801 3	0.771 4
10	0.805 5	0.802 0	0.796 9	0.740 8
15	0.792 5	0.792 3	0.790 6	0.703 5

由表 1 计算结果看出, 节点 3、节点 28 在临界点处负荷参数和电压的准确解分别为 (1.917, 0.7906)、(1.917, 0.7035), Chord 法在计算临界点处的奇异解收敛速度快, 计算耗时 0.4 s; 扩展潮流方程计算方法解得节点 3、节点 28 临界点处负荷参数和电压的准确解分别为 (1.917, 0.79)、(1.917, 0.7041), 该方法计算耗时 0.5 s。两种方法计算结果相近。应用本文所提方法在不同节点的连续潮流 P-V 曲线如图 4 所示。通过图 4 的仿真计算表明, 负荷倍数增长到 1.917 到达临界点。

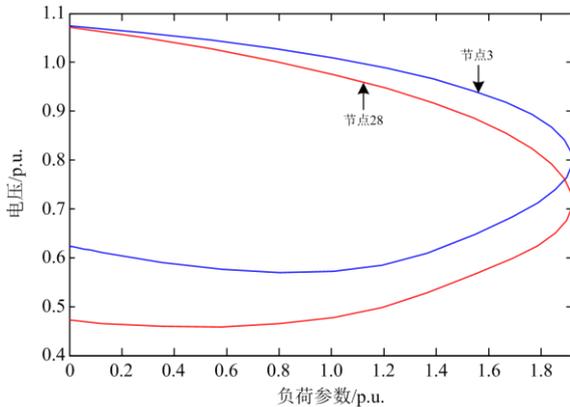


图 4 节点 3 和节点 28 的负荷电压曲线
Fig. 4 P-V curves at bus 3 and bus 28

(2) 全局参数化方法

负荷参数的增长方式: 图 3 系统中所有节点负荷功率均同时增加。应用文中所提 Chord 法计算临界点处的奇异解如表 2 所示, 并用扩展潮流方程计算方法作为比较^[33]。

由表 2 计算结果看出, 节点 4、节点 23 在临界点处负荷参数和电压的准确解分别为 (1.751, 0.7442)、(1.751, 0.889), 改进 Chord 法在计算临界点处的奇异解收敛速度快, 计算耗时 0.4 s; 扩展潮流方程计算方法解得节点 4、节点 23 临界点处负荷参数和电压的准确解分别为 (1.751, 0.7437)、(1.751, 0.8871), 该方法计算耗时 0.5 s。

表 2 用改进 Chord 法计算节点 4、23 临界点处潮流结果
Table 2 Power flow of bus 4 and 23 at singular point
with improved Chord method

迭代次数	U_4	\bar{U}_4	U_{23}	\bar{U}_{23}
1	0.779 7	—	0.927 7	—
2	0.778 9	0.778 1	0.926 7	0.925 7
5	0.771 2	0.762 8	0.920 4	0.917 5
8	0.767 4	0.756 1	0.909 5	0.904 1
10	0.760 3	0.741 7	0.909 7	0.903 5
15	0.751 6	0.744 2	0.897 7	0.889 0

应用本文所提方法在不同节点的连续潮流 P-V 曲线如图 5 所示。通过图 5 的仿真计算表明, 负荷倍数增长到 1.751 到达临界点。

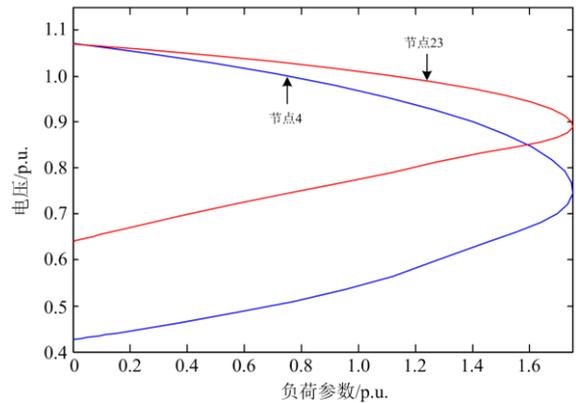


图 5 节点 4 和节点 23 的 P-V 曲线
Fig. 5 P-V curves at bus 4 and bus 23

2) 算例分析 2

本部分采用 IEEE57 节点系统^[34]进行连续潮流计算, 负荷参数设计为: 所有负荷连续增加, 均为静态负荷, 功率因数保持不变。计算过程中采用自适应调节步长, 计算开始时适当增大步长, 取步长为 0.1, 以提高计算速度; 在接近临界点时, 适当减小步长至 0.001, 计算精度设置为 10^{-4} 。

应用文中所提改进 Chord 法计算临界点处的奇异解如表 3 所示, 并用扩展潮流方程计算方法作为比较。

由表 3 计算结果看出, 应用改进 Chord 法计算节点 20、节点 43 在临界点处负荷参数和电压的准确解分别为 (2.769 9, 0.693 34)、(2.769 9, 0.929 69), 改进 Chord 法在计算临界点处的解耗时 0.5 s; 扩展潮流方程计算方法耗时 0.6 s, 其节点 20、节点 43 的计算结果分别为 (2.769 9, 0.692 4)、(2.769 9, 0.930 1)。改进 Chord 法在临界点处计算奇异解的收敛速度快, 计算结果非常精确。

表 3 用改进 Chord 法计算节点 20、43 临界点处潮流结果

Table 3 Power flow of bus 20 and 43 at singular point with improved Chord method				
迭代次数	U_{20}	U_{43}	\bar{U}_{20}	\bar{U}_{43}
1	0.720 1	0.942 5	—	—
2	0.718 9	0.940 7	0.717 7	0.938 9
5	0.717 2	0.939 1	0.702 8	0.934 5
8	0.707 4	0.937 5	0.698 9	0.931 2
10	0.704 1	0.936 7	0.700 1	0.930 1
15	0.700 2	0.935 0	0.693 5	0.929 5
18	0.689 8	0.934 1	0.693 34	0.929 69

应用本文所提方法在不同节点的连续潮流 P-V 曲线如图 6 所示。通过图 6 的仿真计算表明, 负荷倍数增长到 2.769 9 到达临界点。

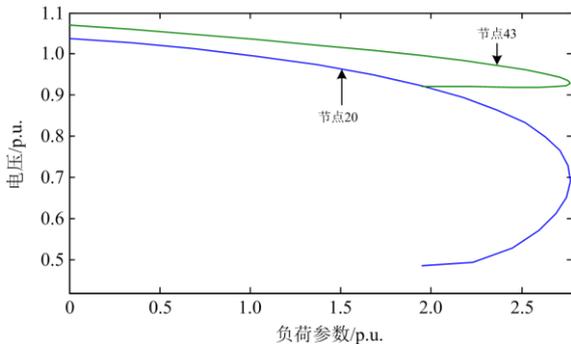


图 6 节点 20 和节点 43 的 P-V 曲线

Fig. 6 P-V curves at bus 20 and bus 43

在仿真计算中就改进 Chord 算法与扩展潮流方程计算方法进行了比较, 通过算例计算结果表明, 本文提出的 Chord 法计算所需时间更少, 并且传统的扩展潮流计算方法还需要构造较为复杂的增广矩阵, 应用较为复杂, 而本文 Chord 法可以直接计算连续潮流临界点(或称“鼻点”)处的值, 体现了本文所提方法具有更好的应用便捷性和更高的计算效率。鉴于 Chord 法计算速度快、逻辑简单、程序易用性等多方面因素, 认为在大型电力系统求解高维方程组时引入 Chord 算法非常有必要。

4 结论

本文提出了新的解决连续潮流问题方法, 重点研究了用改进 Chord 法计算临界点处雅可比矩阵奇异的求解问题。所得到的主要结论如下:

1) 本文所提方法只需应用原有潮流计算的简单解方程, 无需对原有电力系统潮流方程进行扩展, 并不增加额外参数, 逻辑思路清晰直观, 易于编程实现, 收敛速度快, 能够更方便在线应用, 并能成

为电力系统稳定分析的有效工具。

2) 应用 IEEE39 和 IEEE57 节点不同算例的计算结果表明, 本文所提方法能够准确高效地得到连续潮流解, 收敛速度快, 计算效率高, 应用简捷, 尤其是求取临界点处的奇异解, 具有较好的准确性和鲁棒性。

3) 鉴于 Chord 法收敛速度快、逻辑简单、易于实现的特点, 认为可以应用在电力系统相关高维方程组奇异解的求取。

在今后的研究过程中, 作者将 Chord 法的连续潮流算法应用到大规模可再生能源并网的连续潮流计算问题中, 并将适时用于分析电力系统稳定裕度问题。

参考文献

- [1] 许丹, 丁强, 林星宇, 等. 基于离散傅里叶变换矩阵的概率最优潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 9-16.
XU Dan, DING Qiang, LIN Xingyu, et al. Probabilistic optimal power flow calculation method based on a discrete Fourier transformation matrix[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 9-16.
- [2] 张福民, 魏永磊, 李占凯, 等. 基于改进交叉熵算法的概率最优潮流计算[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 79-84.
ZHANG Fumin, WEI Yonglei, LI Zhankai, et al. Probabilistic optimal power flow calculation based on improved cross-entropy algorithm[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 79-84.
- [3] 邓红雷, 张莉彬, 唐崇旺, 等. 一种含分布式电源的配电网三相潮流混合计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 10-17.
DENG Honglei, ZHANG Libin, TANG Chongwang, et al. A hybrid calculation method of three-phase power flow with distributed generation resource on a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 10-17.
- [4] 金国彬, 石超, 李国庆, 等. 基于网络矩阵的交直流混合配电网潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 52-61.
JIN Guobin, SHI Chao, LI Guoqing, et al. Power flow calculation of an AC-DC hybrid distribution network based on network matrix[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 52-61.
- [5] 陈思宇, 柴庆宣, 李延松, 等. 综合能源系统潮流及最优潮流计算模型与方法综述[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 1-12, 20.
CHEN Siyu, CHAI Qingxuan, LI Yansong, et al. Models and methods of power flow and optimal power flow

- calculation for integrated energy system: a review[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(7): 1-12, 20.
- [6] 王灿, 孙建军, 余攀, 等. 基于前推回代法的多供区互联配电网潮流计算[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(11): 95-101.
WANG Can, SUN Jianjun, YU Pan, et al. Power flow calculation of interconnected distribution network with multiple supply areas based on back/forward sweep method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(11): 95-101.
- [7] 段贵钟, 秦文萍, 逯瑞鹏, 等. 考虑风电接入与负荷不确定性的静态电压稳定性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(12): 108-114.
DUAN Guizhong, QIN Wenping, LU Ruipeng, et al. Static voltage stability analysis considering the wind power and uncertainty of load[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(12): 108-114.
- [8] 赵晋泉, 张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2005, 29(11): 91-97.
ZHAO Jinquan, ZHANG Boming. 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.
- [9] MA Zhaoxing, CHEN Hao, CHAI Yanli. Analysis of voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 2-9.
- [10] DONG Xiaoming, WANG Chengfu, YUN Zhihao, et al. Calculation of optimal load margin based on improved continuation power flow model[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 94(1): 225-233.
- [11] 初壮, 孙陶然, 雷振伍, 等. 考虑带泵类负载感应电动机影响的静态电压稳定性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(1): 51-58.
CHU Zhuang, SUN Taoran, LEI Zhenwu, et al. Static voltage stability analysis considering the influence of pump loads induction motor[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(1): 51-58.
- [12] 陈昊, 张建忠, 许超, 等. 基于多重离群点平滑转换自回归模型的短期风电功率预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(1): 73-79.
CHEN Hao, ZHANG Jianzhong, XU Chao, et al. Short-term wind power forecast based on MOSTAR model[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(1): 73-79.
- [13] 陈昊, 高山, 王玉荣, 等. 基于广义自回归条件异方差偏度峰度模型的风电功率预测方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(12): 3456-3461.
CHEN Hao, GAO Shan, WANG Yurong, et al. Wind power forecasting method based on generalized autoregressive conditional heteroskedasticity with skewness and kurtosis model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(12): 3456-3461.
- [14] 李杭, 王晗, 侯恺. 考虑多种能源耦合运行方式的综合能源潮流计算方法[J]. *分布式能源*, 2020, 5(4): 8-17.
LI Hang, WANG Han, HOU Kai. A multi-energy flow calculation method considering multiple energy coupling operation modes[J]. *Distribution Energy*, 2020, 5(4): 8-17.
- [15] 侯恺, 林主成, 贾宏杰, 等. 可靠性与经济性协调的城市配电网联络线优化规划方法[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(12): 1293-1302.
HOU Kai, LIN Zhucheng, JIA Hongjie, et al. Optimal planning of urban distribution network tie-line with coordination of reliability and economics[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2019, 52(12): 1293-1302.
- [16] 金吉良, 李小腾, 梁航, 等. 基于改进连续潮流法的电压稳定极限计算方法[J]. *智慧电力*, 2021, 49(3): 46-50.
JIN Jiliang, LI Xiaoteng, LIANG Hang, et al. Calculation method of voltage stability limit based on improved continuous power flow method[J]. *Smart Power*, 2021, 49(3): 46-50.
- [17] 马瑞, 刘振磊, 贺平平, 等. 考虑源荷频率特性的含风电交直流系统概率连续潮流方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(6): 27-36.
MA Rui, LIU Zhenlei, HE Pingping, et al. Probabilistic continuous power flow method for AC/DC systems with wind power considering frequency characteristics of source and load[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(6): 27-36.
- [18] 李佳伦, 薛安成. 基于停运连续潮流和双向潮流追踪的潮流解恢复控制方法[J]. *智慧电力*, 2020, 48(8): 70-75.
LI Jialun, XUE Ancheng. Power flow solvability recovery control method based on outage-continuation power flow and bi-directional power flow tracing[J]. *Smart Power*, 2020, 48(8): 70-75.
- [19] 王振浩, 由作宇, 黄亚磊, 等. 基于连续潮流法的含双端 VSC-HVDC 交直流系统负荷裕度分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(6): 9-15.
WANG Zhenhao, YOU Zuoyu, HUANG Yalei, et al. Load margin analysis of hybrid AC/DC system with two terminal VSC-HVDC using continuous power flow

- method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 9-15.
- [20] NETO A B, ALVES D A. Singularities analysis of the Jacobian matrix modified in the continuation power flow: mathematical modeling[J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(12): 4750-4756.
- [21] LI S, CHIANG H. Continuation power flow with nonlinear power injection variations: a piecewise linear approximation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1637-1643.
- [22] JU Yuntao, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Continuation power flow based on a novel local geometric parameterisation approach[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(5): 811-818.
- [23] 薛振宇, 房大中, 杨金刚, 等. 大规模交直流互联电力系统潮流分区并行算法[J]. 天津大学学报, 2011, 44(8): 683-689.
- XUE Zhenyu, FANG Dazhong, YANG Jingang, et al. Parallel method of load flow analysis for large-scale AC/DC interconnected power system[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(8): 683-689.
- [24] ALVES D A, DA SILVA L C P, CASTRO C A, et al. Continuation fast decoupled power flow with secant predictor[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 1078-1085.
- [25] 罗刚, 石东源, 陈金富. 基于参数化潮流模型的可用输电能力改进算法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 19-25.
- LUO Gang, SHI Dongyuan, CHEN Jinfu. Improved available transmission capability algorithm based on parameterized power flow model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 19-25.
- [26] PAN Zhuangyuan, MA Zhaoxing, CUI Yunan. Chord method at singular points[J]. Far East Journal of Mathematical Sciences, 2008, 30(1): 175-184.
- [27] 王刚, 张雪敏, 梅生伟. 基于近似连续潮流的在线电压稳定分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 6-10.
- WANG Gang, ZHANG Xuemin, MEI Shengwei. On-line voltage stability analysis based on approximation continuation power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 6-10.
- [28] AJJARAPU V, CHRISTY C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 415-423.
- [29] 马兆兴, 万秋兰, 丁涛, 等. 基于极限诱导分岔的电压稳定分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 94-98.
- MA Zhaoxing, WAN Qiulan, DING Tao, et al. Voltage stability analysis based on limit induced bifurcation[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 94-98.
- [30] 庞磊, 韩蓓, 汪可友, 等. 考虑参数空间潮流可行域的交流混合微电网下垂系数选取[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 77-84.
- PANG Lei, HAN Bei, WANG Keyou, et al. Selection of droop coefficients for AC/DC hybrid microgrid considering feasibility region of power flow in parameter space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 77-84.
- [31] 赵瑞, 苑画舫, 杨俊炜, 等. 一种关于静态电压稳定极限的工程改进计算方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(4): 181-186.
- ZHAO Rui, YUAN Huafang, YANG Junwei, et al. An improved engineering calculation method of static voltage stability limit[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 181-186.
- [32] 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, JIANG Xiaodong, ZHANG Boming. Study on PV-PQ bus type switching logic in power flow computation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 54-59.
- [33] XU P, WANG X, AJJARAPU V. Continuation power flow with adaptive step size control via convergence monitor[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(7): 673-679.
- [34] 王家融, 艾欣, 王坤宇, 等. 基于增广雅可比矩阵的交流解耦潮流新算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1382-1389.
- WANG Jiarong, AI Xin, WANG Kunyu, et al. A novel AC-DC decoupled power flow calculation method based on the augmented Jacobian matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1382-1389.

收稿日期: 2021-05-09; 修回日期: 2021-09-29

作者简介:

王妍(1998—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 3602759125@qq.com

高山(1973—), 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、电网规划、分布式发电协调控制、智能调度、主动配电网。E-mail: shangao@seu.edu.cn

(编辑 周金梅)