

连续潮流计算的算法改进研究

刘 权, 谢 东

(铜陵学院 电气工程学院, 安徽 铜陵 244000)

摘要:针对常规的连续潮流计算在求取 $P-V$ 曲线时存在的缺点,提出了一种连续潮流计算的改进算法。该改进算法通过采用单位化处理切线预测向量、以切线预测向量的内积确定预测方向以及变步长控制等措施,提高了连续潮流计算在求取 $P-V$ 曲线时的准确性和计算效率。Matlab 仿真验证了该改进算法的有效性。

关键词:连续潮流计算; $P-V$ 曲线;切线预测向量;步长控制

中图分类号:TM744 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2019)06-0034-05

DOI:10.16160/j.cnki.tsxyxb.2019.06.009

Research on Algorithm Improvement of Continuous Power Flow Calculation

LIU Quan, XIE Dong

(School of Electrical Engineering, Tongling University, Tongling 244000, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of conventional continuous power flow calculation in obtaining $P-V$ curve, this paper proposes an improved algorithm for continuous power flow calculation, which applies some measures including unitization of processing tangent prediction vector, the inner product of tangent prediction vectors used to determine prediction direction and variable step size control. In this way, the accuracy and computational efficiency is improved for the continuous power flow calculation in obtaining the $P-V$ curve. The Matlab simulation results have verified the effectiveness of the improved algorithm.

Key Words: continuous power flow calculation; $P-V$ curve; tangent prediction vector; step size control

0 引言

采用连续潮流计算求得电力系统中有关节点的 $P-V$ 曲线,是分析电力系统中电压稳定性的常用做法^[1]。常规的连续潮流计算,在算到 $P-V$ 曲线的临界点附近时,有可能因为潮流迭代运算不收敛而无法得到潮流方程的解,进而得不到正确的 $P-V$ 曲线。另外,在连续潮流计算过程中,如果其预测算法中的步长控制不合理,不仅会影响计算速度,而且会影响潮流方程

的正确求解,甚至无法求得潮流解。为了提高连续潮流计算的有效性,正确求取电力系统中有关节点的 $P-V$ 曲线,本文拟从预测算法和步长控制两个方面对连续潮流计算进行算法改进。

1 连续潮流计算的原理

连续潮流计算用于求取 $P-V$ 曲线,其过程是以当前运行点为潮流计算的初始点,通过负荷的连续变动,采用预测—校正算法,得到与负荷增量相对应的后续运行点,再根据所求得的

基金项目:铜陵学院大学生创新创业训练项目

作者简介:刘权(1997—),男,安徽宿州人,本科生,主要从事电力系统稳定性分析研究。

这些运行点绘制出电力系统的 $P-V$ 曲线。图 1 为连续潮流计算的求解原理图。图 1 中,从初始运行点 A 开始,根据负荷增长方向,采用切线估算法,得到一个预测值 B,再通过校正运算求得精确值 C;然后继续变动负荷,用同样的算法得到预测值 D 和精确值 E;如此不断循环,再由求得各精确值绘制出电力系统的 $P-V$ 曲线。连续潮流计算包括 4 个环节:参数化、预测、校正、步长选择。

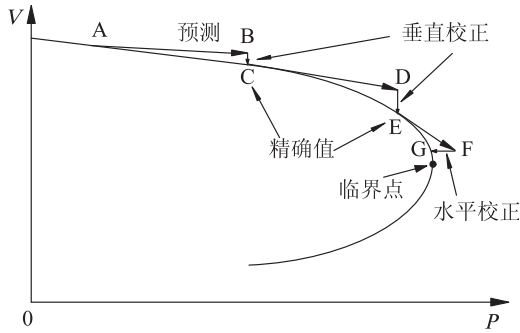


图 1 连续潮流计算的求解原理图

1.1 参数化

参数化是指在潮流计算方程中引入参数 λ ,并随着 λ 变量的引入在潮流计算方程组中增加一个独立方程。 λ 为负荷参数,表示各节点注入功率的变化大小。参数化方法包括局部参数化法、弧长参数化法等,本文采用的是较容易实现的局部参数化法。

1.2 预测

预测的目的是为了提高潮流迭代运算的速度,如果预测值与精确值较为接近,则校正运算会快速求得精确值;而当预测值与精确值有较大偏差时,会增加潮流计算的迭代次数,甚至使得潮流计算不能收敛^[2]。预测方法主要有多项式外推法和切线估算法,本文采用的是切线估算法,其原理如下。

极坐标形式的潮流计算方程为:

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0, \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$; P_{Gi} 和 Q_{Gi} 表示第 i 节点发电机的有功出力与无功出力; P_{Li} 和 Q_{Li} 则表示第 i 节点的有功负荷与无功负荷; θ_i 和 V_i 表示第 i 节点的电压相角与电压幅值; G_{ij} 和 B_{ij} 表示系统节点导纳矩阵中第 i 行第 j 列上对应元素实部与虚部的数值。

如果以有功负荷增量作为负荷参数,则潮流计算方程应改写为:

$$\begin{cases} P_{Gi}(1 + \lambda K_{pgi}) - P_{Li}(1 + \lambda K_{pli}) - \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0, \\ Q_{Gi}(1 + \lambda K_{qgi}) - Q_{Li}(1 + \lambda K_{qli}) - \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中, $K_{pgi} \in [0, 1]$; $K_{qgi}, K_{pli}, K_{qli}$ 的变化范围与 K_{pgi} 相同; K_{pgi}, K_{qgi} 分别表示发电机有功、无功的增长系数; K_{pli}, K_{qli} 分别表示负荷有功、无功的增长系数;参数 λ 表示节点的注入功率变化,它反映了负荷变化时发电机的输出功率变化大小。(2) 式可简写为:

$$F(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}, \lambda) = 0. \quad (3)$$

式中, $\mathbf{V}$ 是节点电压幅值向量, $\boldsymbol{\theta}$ 是节点电压相角向量。如果用 $\mathbf{X}$ 表示 $(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta})$, 则(3) 式应写为:

$$F(\mathbf{X}, \lambda) = 0. \quad (4)$$

对(4) 式作微分运算,可得:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{X}} & \frac{\partial F}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{X} \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0. \quad (5)$$

加上负荷参数 λ , (5) 式中变量个数为 $n+1$ 个,但方程的个数只有 n 个,无法得到确定的切向量。为此采用局部参数化法,利用切向量某一分量 x_k 使潮流方程增加一维,此时(5) 式应改写为:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{X}} & \frac{\partial F}{\partial \lambda} \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{X} \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中,行向量 e_k 维数是 $n+1$ 维,这样(6) 式中变量个数与方程个数相同,从而能求得确定的切向量。行向量 e_k 中除了与连续参数所对应的第 k 个元素为 1 外,其他元素均为 0。由(6) 式求得切向量 $[d\mathbf{X} \ d\lambda]^T$ 后,根据给定的步长 σ ,按

(7) 式求得下一个潮流计算的预测值。

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}}^{i+1} \\ \tilde{\lambda}^{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^i \\ \lambda^i \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\mathbf{X} \\ d\lambda \end{bmatrix}. \quad (7)$$

1.3 校正

连续潮流计算的校正过程,就是根据(7)式求得预测值,再以该预测值作为潮流迭代运算的初始值,最终得到潮流的一个精确值。校正运算仍采用 x_k 作为连续参数,则潮流方程应写为:

$$\begin{bmatrix} F(\mathbf{X}, \lambda) \\ x_k - \tilde{x}_k \end{bmatrix} = 0. \quad (8)$$

由(8)式可得校正算法的微分方程为:

$$\begin{bmatrix} F'_x & F'_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F(\mathbf{X}, \lambda) \\ x_k - \tilde{x}_k \end{bmatrix}. \quad (9)$$

求解(9)式得到修正量 $\Delta \mathbf{X}$ (即 $\Delta \mathbf{V}$ 和 $\Delta \theta$), 再按(10)式求得潮流解的精确值:

$$\begin{cases} \mathbf{V}^{i+1} = \mathbf{V}^i - \Delta \mathbf{V}, \\ \theta^{i+1} = \theta^i - \Delta \theta. \end{cases} \quad (10)$$

不断重复上述连续潮流计算的预测和校正过程,即可求得完整的 $P-V$ 曲线。

1.4 步长选择

选取合适步长 σ 是求取 $P-V$ 曲线的一个关键步骤。若选取的步长过小,虽然计算精度较高,但求取的步数过多,会消耗大量运算时间;若选取的步长过大,则在 $P-V$ 曲线的临界点附近,预测值与实际运行点偏离太远,使得校正过程中潮流迭代运算次数过多,甚至迭代过程无法收敛。合适的步长选取策略应该是 σ 能随着 $P-V$ 曲线的曲率自行调整,即在 $P-V$ 曲线的平缓部分 σ 应选取较大值,而在 $P-V$ 曲线的弯曲部分 σ 应选取较小值。

2 连续潮流计算的算法改进

2.1 预测算法的改进

预测算法应遵循两个原则,第一个原则是近似性原则,即预测过程中预测值与其对应的精确值应充分接近。图 2 为预测算法近似性的示意图。由图 2 可知,第 i 次的预测值比第 $i+1$ 次的预测值近似性要好。对于采用局部参数化的切线预测算法来说,潮流计算越接近 $P-V$ 曲

线的临界点,切线预测向量的模值越大,这是因为对于接近临界点的潮流解,各潮流计算的状态量 $(\mathbf{V}, \theta)$ 的变化增大,导致参数传递所产生的误差随之变大,切线预测向量的模值也就越大。如果切线预测向量的模值超出一定范围,预测算法不再满足近似性原则,会导致校正运算不收敛,使得潮流计算失败^[3]。

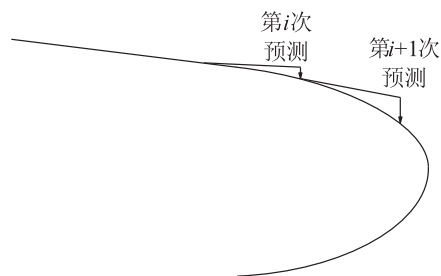


图 2 预测算法近似性的示意图

为使预测算法满足近似性原则,可对预测向量进行单位化处理,即在 $P-V$ 曲线较弯曲部分,让切线预测向量的模值为单位量,其示意图如图 3 所示。图 3 中 A 点是某次潮流计算未采用单位化处理时的预测值,而 B 点是潮流计算经过单位化处理时的预测值,显然单位化处理有利于保证预测算法的近似性。

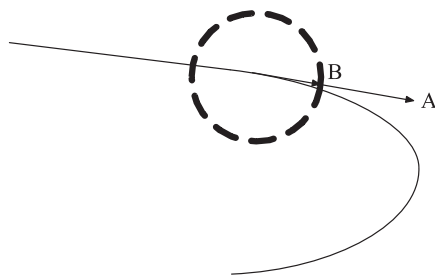


图 3 预测向量的单位化示意图

预测算法应遵循的第二个原则是方向性原则,即切线预测向量的方向必须正确。连续潮流计算的误差会导致预测向量的方向出现错误,从而无法得到正确的 $P-V$ 曲线。图 4 为预测算法方向性的示意图。在图 4 中,如果经过第 i 次的预测—校正运算分别得到预测值 A 点和精确值 B 点,当第 $i+1$ 次预测运算的预测向量方向正确时,所求得的预测值应为 C 点,它与精确值 E 点很接近,从而能够正确完成后续的校正运算;而当第 $i+1$ 次预测运算的预测向量方向不

正确时, 所求得的预测值则变为 D 点, 它离精确值 E 点很远, 使得后续的校正运算无法正确完成, 最终得不到正确的 $P-V$ 曲线^[4]。

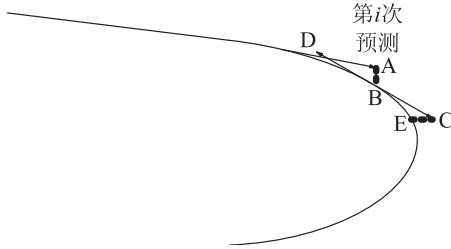


图 4 预测算法方向性的示意图

为满足预测算法的方向性要求, 可用相邻两步切线预测向量的内积来确定连续潮流解的方向, 即内积运算为正时方向与上一步相同, 内积运算为负则方向与上一步相反。若 $(d\mathbf{X}^i, d\lambda^i)$ 表示第 i 步连续潮流计算求得的切线预测向量, $(d\mathbf{X}^{i-1}, d\lambda^{i-1})$ 则表示上一步连续潮流计算求得的切线预测向量, 当这两步切线预测向量的内积运算结果大于 0 时, 预测算法的公式为:

$$(\tilde{\mathbf{X}}^{i+1}, \tilde{\lambda}^{i+1}) = (\mathbf{X}^i, \lambda^i) + \sigma \frac{(d\mathbf{X}^i, d\lambda^i)}{\|(d\mathbf{X}^i, d\lambda^i)\|}; \quad (11)$$

而当这两步切线预测向量的内积运算结果小于 0 时, 预测算法的公式为:

$$(\tilde{\mathbf{X}}^{i+1}, \tilde{\lambda}^{i+1}) = (\mathbf{X}^i, \lambda^i) - \sigma \frac{(d\mathbf{X}^i, d\lambda^i)}{\|(d\mathbf{X}^i, d\lambda^i)\|}。 \quad (12)$$

预测算法经过上述改进后, 其近似性和方向性要求均能得到满足, 从而确保通过连续潮流计算正确绘制出 $P-V$ 曲线。

2.2 步长控制的算法改进

在常规的连续潮流计算中, (11) 式和 (12) 式中的步长 σ 大小不变, 影响了潮流计算的速度。为了进一步提高连续潮流计算的运算效率, 节省计算时间, 本文提出一种变步长的改进算法。连续潮流计算校正过程的迭代运算次数, 可作为运算效率的衡量指标。所以本文根据校正运算的迭代次数, 按 (13) 式对步长加以控制。

$$\begin{cases} \text{当 } N_i < N_{\min} \text{ 时, } \sigma_{i+1} = 2\sigma_i; \\ \text{当 } N_{\min} < N_i < N_{\max} \text{ 时, } \sigma_{i+1} = 0.6\sigma_i; \\ \text{当 } N_i > N_{\max} \text{ 时, } \sigma_{i+1} = 0.5\sigma_i, \text{ 返回重算至收敛。} \end{cases} \quad (13)$$

式中, σ_{i+1} 为第 $i+1$ 次预测运算采用的步长; σ_i 为第 i 次预测运算采用的步长; N_i 为第 i

次校正运算过程的迭代次数; $N_{\min}, N_{\max}$ 分别为设定的迭代收敛次数的下限值和上限值。本文中 $N_{\min}$ 和 $N_{\max}$ 分别设定为 20 和 50, 初始步长 σ_0 设定为 0.06。采用 (13) 式进行步长控制的算法改进后, 步长能够随着迭代运算次数的变化按要求自动进行调整, 与原来步长固定为 0.05 相比^[5], 提高了连续潮流计算的效率。

3 算例分析

以图 5 所示的 WSCC-9 节点电力系统为例, 通过 Matlab 仿真来验证本文提出的连续潮流计算改进算法的有效性。图 5 中, 节点 9 是平衡节点, 节点 7 和节点 8 为 PV 节点, 其余均为 PQ 节点, 电力系统中有关线路的参数见表 1。

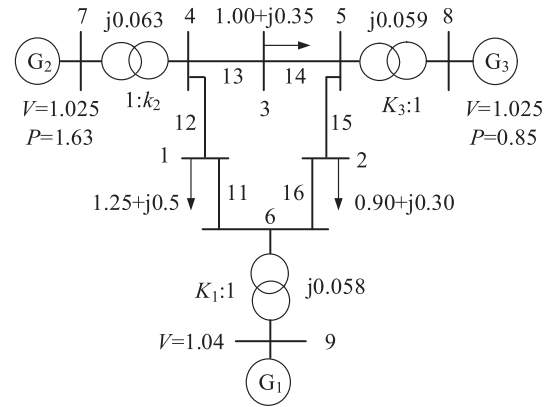


图 5 WSCC-9 节点电力系统

表 1 WSCC-9 节点电力系统线路参数

线路 / 编号	r	x	$b/2$
$l_1/11$	0.010	0.085	0.088
$l_2/12$	0.032	0.161	0.153
$l_3/14$	0.009	0.027	0.075
$l_4/14$	0.012	0.101	0.105
$l_5/15$	0.039	0.170	0.179
$l_6/16$	0.017	0.092	0.079

图 5 中 1, 2, 3 节点为负荷节点, 在各负荷节点按相同的比例因子增加负荷时, 可得各负荷节点的 $P-V$ 曲线, 如图 6 所示。由图 6 可知, 本文提出的改进算法改善了潮流预测过程的近似性, 从而在临界点附近不存在迭代运算不收敛的问题, 可以求得完整的 $P-V$ 曲线。图 5 中由于节点 1 距离电源最远, 且所带的负荷最重, 所以节点 1 的电压随负荷增加下降速度应最快, 这与图 6 显示的结果相符, 从而验证了该改进算法

的正确性。另外,在仿真过程中,使用常规连续潮流算法求取 $P-V$ 曲线的平均用时为 1.672 s,而使用本改进算法求取 $P-V$ 曲线的平均用时为 0.365 s,可见改进算法的潮流计算速度有明显提高。

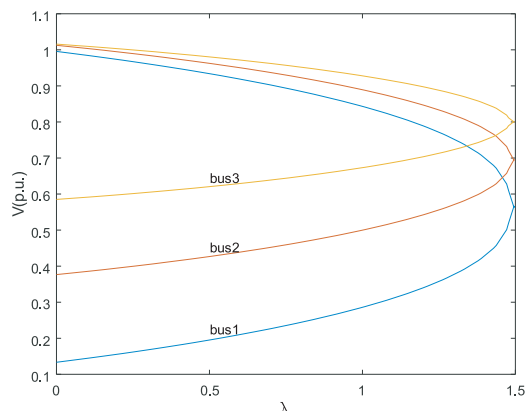


图 6 各负荷节点的 $P-V$ 曲线

4 结论

为提高连续潮流计算求取电力系统中节点 $P-V$ 曲线的正确性和计算效率,本文对连续潮流计算进行了算法改进:在预测算法的改进中,通过对切线预测向量单位化处理和根据相邻两步切线预测向量内积来确定连续潮流解的方向,使得连续潮流计算的算法能满足近似性与方向性原则,从而确保可以绘制出正确的 $P-V$

曲线;在步长控制的算法改进中,通过采用步长随迭代次数变化自动调整的变步长算法,提高了连续潮流计算的运算速度。以 WSCC-9 节点系统为算例,通过 Matlab 仿真对本文提出的改进算法的有效性进行了验证,仿真结果也表明,此改进算法能有效绘制出所求取的 $P-V$ 曲线,同时,计算效率也比常规的连续潮流计算的算法有了明显提高。

参考文献:

- [1] 吴俊勇. 电力系统分析[M]. 北京:清华大学出版社,2014:41-42.
- [2] 范翔,严正,赵文恺,等. 提高电力系统潮流计算收敛性方法的比较分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2015,27(11):57-63.
- [3] 许强,李鹏. 一种求取 PV 曲线的快速分解潮流法的改进[J]. 华北水利水电学院学报,2013,34(1):100-102.
- [4] 吴成业,刘光晔,罗经纬. 基于泰勒级数的 PV 曲线求取及参变量选择分析[J]. 电网技术,2017,41(4):1225-1229.
- [5] 杨杉同,向前. 考虑分布式电源限流作用的主动配电网连续潮流计算[J]. 电力自动化设备,2017,45(10):57-62.

(责任编辑:李秀荣)

(上接第 18 页)

- [9] 黄鹏程,江剑宇,杨波. 双目立体视觉的研究现状及进展[J]. 光学仪器,2018,40(4):81-86.
- [10] ZHANG Z. A Flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2000,22(11):1330-1334.
- [11] 郭倩,张福杨,孙农亮. 融合多特征表示和超像素优化的双目立体匹配[J/OL]. 计算机工程与应用,2019:1-12(2019-01-25). <http://c. old. wanfangdata. com. cn/Periodical-jsjgcyyy. aspx>.

- [12] 高雅昆,刘涛,李海滨,等. 基于像素类别的 PatchMatch 立体匹配算法[J]. 光学学报,2019,39(7):1-18.
- [13] 郁怀波,胡越黎,徐杰. 基于多特征融合与树形结构代价聚合的立体匹配算法[J]. 上海大学学报(自然科学版),2019,25(1):66-74.
- [14] 马瑞浩,朱枫,吴清潇,等. 基于图像分割的稠密立体匹配算法[J]. 光学学报,2019,39(3):240-248.
- [15] 徐政超. 模式匹配 BM 算法改进探讨[J]. 科技与创新,2017(6):59-61.

(责任编辑:李秀荣)