

一种基于自适应步长控制与组合参数化的改进连续潮流计算方法

阮冲¹, 刘金婵², 陈宝平¹, 常湧¹, 翟学³

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 华中农业大学 理学院, 湖北 武汉 430070;

3. 湖北省电力勘测设计院有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要:提出了一种可以完全跟踪光伏(PV)曲线斜率变化的自适应变步长算法,并在理论上比较分析了所提变步长法与常规变步长法的灵敏度特性,通过分析发现,所提变步长法具有更优的自适应性,在保证连续潮流计算精度的同时,大幅降低了计算时间。提出了一种组合参数化法,即在PV曲线的不同区域采用不同的参数化法,同时在PV曲线追踪过程中设置参数化切换断点,并以校正不收敛作为组合切换判据。基于IEEE标准节点系统的计算结果验证了所提自适应变步长算法与组合参数化法的有效性与优越性。

关键词:连续潮流;自适应步长控制;步长灵敏度;组合参数化;计算

中图分类号:TM 744

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.029

0 引言

近年来,随着电力系统向大电网、超高压和远距离输电的方向发展,电力调度更加复杂,使其稳定问题愈加严重,电压崩溃事故频繁发生^[1-2]。这些事故都造成了巨大的经济损失和社会影响,使得电压稳定问题愈发值得关注。

连续潮流 CPF(Continuation Power Flow)法是最为常见的电压稳定静态分析法^[3-5],包括4个环节:预测、步长控制、参数化与校正。作为CPF中一个关键的环节,步长控制对曲线追踪具有重要影响^[6-9]。对于任何步长控制算法,本质上,其步长均应随着光伏(PV)曲线的斜率变化而进行自适应调整。现有的研究大多是先构建用于反映PV曲线斜率变化的特征量,进而根据该特征量构造步长算法^[6-8,10],鲜有直接利用曲线斜率作为特征量的研究。文献[6]考虑到PV曲线上相邻2个节点的电压幅值之差可以反映PV曲线斜率变化,进而提出了一种变步长算法。文献[7]提出了一种利用最小节点电压跟踪PV曲线斜率变化进而自适应调整步长的变步长控制算法。上述变步长控制算法均取得了一定的效果,但仍不能在整个PV曲线追踪过程中始终保证灵敏地跟踪PV曲线斜率变化,这影响了步长的自适应性,文献[8]所提变步长法甚至可能出现“步长振荡”的现象。

校正环节的参数化方法是保证CPF计算成功的另一个关键因素^[6-9]。文献[9]提出了超球面参数化 HP(Hyper-spheres Parameterization)方法,即以当前预测点与上一个CPF解之间的线段作为直径构造超球面。该方法属于全局性参数化方法,而全局性参数化方法对于局部特征明显的电压失稳现象

敏感度低于局部性参数化,这种不敏感度会进一步增加临界点发散发生的概率^[11]。文献[11]分析了临界点邻域内全局性参数化与局部性参数化的优劣,指出由于静态电压的局部特征,在临界点邻域,分支曲线采用局部性方法要优于全局性方法。而在非临界点区域,考虑到CPF解曲线的拟二次特性^[12],必然存在某一区域使得全局性参数化优于局部性参数化,下文将对此进行进一步的分析。由上述分析可知,无论是采用全局性参数化还是局部性参数化,都会存在信息丢失的情况^[11]。目前大量的研究工作都聚焦于新参数化方法,鲜有研究涉及组合参数化法以综合各参数化法的优点。

针对上述问题,本文首先提出了一种可以完全跟踪PV曲线斜率变化的自适应变步长算法,并在理论上比较分析了所提变步长法与常规变步长法的灵敏度特性;在此基础上,进一步提出了一种组合参数化法,即在非临界点区域采用局部性参数化或全局性参数化,在临界点区域则采用局部性参数化,并以校正不收敛作为组合切换判据;最后,基于IEEE标准节点系统进行仿真验证。

1 CPF的基本原理

在常规潮流方程中引入一个参数 λ ,称其为负荷因子,得到含参数的潮流方程,如式(1)所示。

$$H(\mathbf{x}, \lambda) = 0 \quad 0 \leq \lambda \leq \lambda_{cr} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为系统状态量,包括节点电压幅值与相位; λ 为系统出力 and 负荷的增长参数, $\lambda=0$ 时表示系统处于基本的负荷水平; λ_{cr} 为临界负荷因子,对应电力系统在临界失稳处的负荷水平。

a. 预测。从基本出力负荷水平所对应的潮流解出发,沿PV曲线的切线方向选择合适的步长,得到下一个潮流解的预测值,具体如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}'^{(i+1)} \\ \lambda'^{(i+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^{(i)} \\ \lambda^{(i)} \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\mathbf{x} \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, σ 为步长。

b. 步长控制。步长过小会使预测校正的计算次数太多,而步长过大会导致校正过程迭代次数太多及预测值超出收敛域^[7-8]。文献[6]提出的步长计算公式如式(3)所示。

$$\sigma_1 = f e^{-h \Delta V_{\max}}, \Delta V_{\max} = \max(|V^{(j)} - V^{(j-1)}|) \quad (3)$$

其中, f, h 为控制步长计算的变系数,且 $h > 0$; $V^{(j)}$ 和 $V^{(j-1)}$ 分别为第 j 次和第 $j-1$ 次预测校正所得的电压幅值。

文献[7]提出的另一种步长计算公式如式(4)所示。

$$\sigma_2 = k_1 e^{-k_2(1 - |V_{\min}|)} + k_3 \quad (4)$$

其中, $k_1 - k_3$ 为控制步长计算的参量,可根据系统实际情况给定; $V_{\min}$ 为节点电压幅值最小值。

c. 参数化。参数化本质是通过构造一维方程,使其与参数化之前的潮流方程组成扩展潮流方程。常见的参数化方法主要包括^[11]: 物理参数化 PP (Physics Parameterization)、局部参数化 LP (Local Parameterization)、正交参数化以及弧长参数化,前两者属于局部性参数化,后两者属于全局性参数化^[11]。其中,PP 与 LP 的计算公式分别见附录中式(A1)和(A2)。

d. 校正。其本质是以当前预测点为初值,采用牛顿法或拟牛顿法求解参数化后的扩展潮流方程,通过迭代计算,在 $n+1$ 维空间上映射出 CPF 解曲线。

2 自适应步长控制

2.1 自适应步长控制算法

步长控制是保证 CPF 计算成功的关键因素之一。需要制定合理的步长控制策略,即步长应随着 PV 曲线的斜率大小进行自适应调整,在曲线斜率较大时采用较小的步长,在斜率较小时采用较大步长。

PV 曲线的斜率如式(5)所示。

$$\mathbf{K} = d\mathbf{x}/d\lambda \quad (5)$$

根据上述分析,本文提出一种随 PV 曲线斜率大小进行自适应调整的变步长控制策略,即:

$$\sigma = a e^{-b|\mathbf{K}|_{\max} + c} + d \quad (6)$$

其中, a, b, c, d 为控制步长计算的参量,可以根据系统实际情况给定,且 $b > 0$; $|\mathbf{K}|_{\max}$ 为系统所有 PQ 节点的 PV 曲线斜率绝对值的最大值。PV 曲线斜率的绝对值如式(7)所示。

$$|\mathbf{K}| = \left| \frac{d\mathbf{x}}{d\lambda} \right| = \begin{cases} -\frac{d\mathbf{x}}{d\lambda} & \lambda < \lambda_{cr} \\ \frac{d\mathbf{x}}{d\lambda} & \lambda > \lambda_{cr} \end{cases} \quad (7)$$

2.2 步长控制的特征量分析

对比分析式(3)、(4)和(6)可知,其本质均为指数型函数,区别在于所选取的特征量不同,分别为 $\Delta V_{\max}$ 、 $|V|_{\min}$ 、 $|\mathbf{K}|_{\max}$ 。下文的推导分析中,若不作特殊说明,则状态变量 x 特指节点电压幅值。令:

$$\Delta x^{(j)} = |x^{(j)} - x^{(j-1)}| \quad (8)$$

分析 PV 曲线的上半支,考虑到采用变步长法与 PV 曲线的拟二次特性, $\Delta x^{(j)}$ 可能不是严格随着负荷因子的增加而递减,甚至可能会出现递增,换言之,文献[6]的变步长法在负荷因子逐渐增加的过程中,其步长可能出现“振荡”现象,这种特性与参数 f, h 密切相关。如图 1 所示, PV 曲线上存在 A、B、C 3 点,使得:

$$\Delta x^{(C)} < \Delta x^{(A)} < \Delta x^{(B)} \quad (9)$$

其中, x_0 为 x 的稳态值。

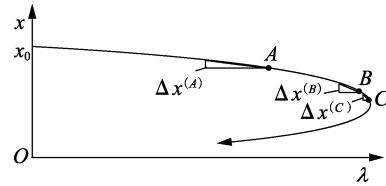


图 1 基于式(3)的变步长法示意图

Fig.1 Schematic diagram of variable step-size method based on Formula (3)

同理分析 PV 曲线的上半支,对于文献[7]的步长控制法和本文所提自适应变步长法,其特征量均是随着负荷因子增加而严格递减的。上述分析同样适用于 PV 曲线的下半支,并可以得到相似的结论。

2.3 步长控制的灵敏度分析

考虑到步长应随着 PV 曲线的斜率大小进行自适应调整,因此性能优异的步长控制算法应能够灵敏地跟踪与反映 PV 曲线斜率的变化。本节进一步量化分析步长对 PV 曲线斜率的灵敏度,式(3)、(4)和(6)中的步长可以写成如下通式:

$$\sigma = m_1 e^{m_2 y + m_3} + m_4 \quad (10)$$

其中, $m_1 - m_4$ 为控制步长计算的变系数; y 为步长控制的特征量。根据式(10),可以推导得到步长对 PV 曲线斜率的灵敏度为:

$$\frac{d\sigma}{dK} = \frac{d\sigma}{d\lambda} \left(\frac{dK}{d\lambda} \right) = M \frac{dy}{d\lambda} \left(\frac{dK}{d\lambda} \right) = M \frac{dy}{dK} \quad (11)$$

$$M = m_1 m_2 e^{m_2 y + m_3} \quad (12)$$

根据式(10)~(12)可知:一方面,对于一个确定的电力系统,给定一个合适的变系数组合后,步长控制算法的特性将完全由特征量 y 的变化律决定;另一方面,由于步长是随着 PV 曲线的斜率变化进行自适应调整,因此本质上对于任何步长控制算法,其特征量均是根据 PV 曲线斜率的变化特性而设计的,该特征量应能够灵敏地跟踪与反映 PV 曲线斜

率的变化。

由上述分析可知, $d\sigma/dK$ 主要由特征量跟踪 PV 曲线斜率变化的灵敏度决定, 即主要由 dy/dK 决定。进一步分析特征量对曲线斜率的灵敏度 dy/dK (简称灵敏度), 考虑到 PV 曲线的拟二次特性, 文献[12]采用牛顿插值法将 PV 曲线拟合二次型曲线, 并且取得了较好的结果, 其拟合曲线如式(13)所示。

$$\lambda = \alpha x^2 + \beta x + \gamma \quad (13)$$

由于稳态运行点 $(0, x_0)$ 与临界点 (λ_{cr}, x_{cr}) 均在 PV 曲线上, 具体见附录中式(A3)和(A4), 因此可得:

$$\alpha = -\frac{\lambda_{cr}}{(x_0 - x_{cr})^2}, \quad \beta = \frac{2\lambda_{cr}}{x_{cr}^{-1}x_0^2 + x_{cr} - 2x_0} \quad (14)$$

根据式(13), 进一步可得:

$$\frac{dx}{d\lambda} = \frac{1}{2\alpha x + \beta}, \quad \frac{d^2x}{d\lambda^2} = -\frac{2\alpha}{2\alpha x + \beta} \left(\frac{dx}{d\lambda} \right)^2 \quad (15)$$

以电力系统中电压最薄弱的节点为研究对象, 则对于文献[6]的变步长法、文献[7]的变步长法以及本文所提自适应变步长法, 分别可得:

$$\frac{dy_1}{d\lambda} = \frac{d[-\max(|\Delta x^{(j)}|)]}{d\lambda} = \left(\frac{dx^{(j)}}{d\lambda} - \frac{dx^{(j-1)}}{d\lambda} \right) \Big|_{\text{weakest}} \quad (16)$$

$$\frac{dy_2}{d\lambda} = \frac{d|x_{\min}|}{d\lambda} = \frac{dx_{\min}}{d\lambda} = \frac{dx}{d\lambda} \Big|_{\text{weakest}} \quad (17)$$

$$\frac{dy_3}{d\lambda} = \frac{d(-|K|_{\max})}{d\lambda} = \pm \frac{d^2x}{d\lambda^2} \Big|_{\text{weakest}} \quad (18)$$

其中, weakest 表示电力系统中电压最薄弱的节点。式(16)~(18)均是对最薄弱节点的 PV 曲线求取 $dy/d\lambda$ 。下面的推导中将省略 weakest。式(16)~(18)的中间过程见附录中式(A5)~(A7)。

根据式(11)、(16), 对于文献[6]的变步长法, 其特征量对曲线斜率的灵敏度为:

$$\frac{dy_1}{dK} = \frac{dy_1}{d\lambda} \left(\frac{dK}{d\lambda} \right) = \left(\frac{dx^{(j)}}{d\lambda} - \frac{dx^{(j-1)}}{d\lambda} \right) \left(\frac{d^2x}{d\lambda^2} \right) \quad (19)$$

将式(14)、(15)代入式(19), 则可进一步得到:

$$\frac{dy_1}{dK} = 2\lambda_{cr} \frac{(x^{(j)} - x_{cr})^2 (x^{(j-1)} - x^{(j)})}{(x_0 - x_{cr})^2 (x^{(j-1)} - x_{cr})} \quad (20)$$

同样地, 对于文献[6]的变步长法与所提自适应变步长法, 其特征量对曲线斜率的灵敏度分别为:

$$\frac{dy_2}{dK} = \frac{dy_2}{d\lambda} \left(\frac{dK}{d\lambda} \right) = \frac{dx}{d\lambda} \left(\frac{d^2x}{d\lambda^2} \right) = 2\lambda_{cr} \frac{(x - x_{cr})^2}{(x_0 - x_{cr})^2} \quad (21)$$

$$\frac{dy_3}{dK} = \frac{dy_3}{d\lambda} \left(\frac{dK}{d\lambda} \right) = \frac{d^2x}{d\lambda^2} \left(\frac{d^2x}{d\lambda^2} \right) = 1 \quad (22)$$

并且, 有下式成立:

$$\left| \frac{dy_1}{dK} \right| = \left| 2\lambda_{cr} \frac{(x^{(j)} - x_{cr})^2 (x^{(j-1)} - x^{(j)})}{(x_0 - x_{cr})^2 (x^{(j-1)} - x_{cr})} \right| \ll 2\lambda_{cr} \quad (23)$$

$$\lim_{\lambda \rightarrow \lambda_{cr}} \frac{dy_1}{dK} = \lim_{x^{(j)} \rightarrow x_{cr}} 2\lambda_{cr} \frac{(x^{(j)} - x_{cr})^2 (x^{(j-1)} - x^{(j)})}{(x_0 - x_{cr})^2 (x^{(j-1)} - x_{cr})} = 0 \quad (24)$$

2.4 不同步长控制法的灵敏度比较分析

下面进一步分析式(20)和式(21)的特征量灵敏度大小关系。对于最薄弱节点 PV 曲线上的同一个精确解, 根据式(20)、(21), 可得:

$$|k_{21}| = \left| \frac{dy_2}{dK} \left(\frac{dy_1}{dK} \right) \right| = \left| \frac{dy_2}{d\lambda} \left(\frac{dy_1}{d\lambda} \right) \right| = \left| \frac{x^{(j-1)} - x_{cr}}{x^{(j-1)} - x^{(j)}} \right| > 1 \quad (25)$$

一方面, 由式(23)、(24)可知, 在整个负荷因子的变化过程中, 对于文献[6]的变步长法, 其特征量灵敏度始终较小, 并且在 PV 曲线趋近于临界点时, 特征量灵敏度趋近于 0; 另一方面, 由式(25)可知, 在整个负荷因子的变化过程中, 相比于文献[6]的变步长法, 文献[7]的变步长法的特征量灵敏度更高。综上分析可以判断, 文献[7]的变步长法优于文献[6]的变步长法, 这与上述的定性分析一致。

下面进一步分析式(21)和式(22)的特征量灵敏度大小关系。根据式(21)、(22), 可得:

$$k_{32} = \frac{dy_3}{dK} \left(\frac{dy_2}{dK} \right) = \begin{cases} \frac{1}{2\lambda_{cr}} \left(\frac{x_0 - x_{cr}}{x - x_{cr}} \right)^2 & \lambda \leq \lambda_{cr} \\ -\frac{1}{2\lambda_{cr}} \left(\frac{x_0 - x_{cr}}{x - x_{cr}} \right)^2 & \lambda > \lambda_{cr} \end{cases} \quad (26)$$

可以推导出, $|k_{32}|$ 的取值范围为:

$$|k_{32}| = \left| \frac{dy_3}{d\lambda} \left(\frac{dy_2}{d\lambda} \right) \right| \in [k_0, \infty) \quad (27)$$

$$k_0 = \frac{d^2x}{d\lambda^2} \left(\frac{dx}{d\lambda} \Big|_{x=x_0} \right) = \frac{1}{2\lambda_{cr}} \quad (28)$$

令 $|k_{32}| = 1$, 并将其代入式(27), 可得:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{1}{\sqrt{2\lambda_{cr}}} x_0 + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2\lambda_{cr}}} \right) x_{cr} \\ x_2 = -\frac{1}{\sqrt{2\lambda_{cr}}} x_0 + \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2\lambda_{cr}}} \right) x_{cr} \end{cases} \quad (29)$$

进一步推导得到:

$$x_2 < x_1 \leq x_0 \Rightarrow \frac{1}{2\lambda_{cr}} \leq 1 \Rightarrow k_0 \leq 1 \quad (30)$$

根据上述分析可知, 在 λ 逐渐增大又逐渐减小的过程中, 可得以下结论: 当 $0 \rightarrow \lambda_1$ 时, 有 $x_0 \rightarrow x_1$, 进一步推得 $|k_{32}| \leq 1$; 当 $\lambda_1 \rightarrow \lambda_{cr}$ 时, 有 $x_1 \rightarrow x_{cr}$, 进一步推得 $|k_{32}| > 1$; 当 $\lambda_{cr} \rightarrow \lambda_2$ 时, 有 $x_{cr} \rightarrow x_2$, 进一步推得 $|k_{32}| > 1$; 当 $\lambda_2 \rightarrow \lambda_3$ 时, 有 $x_2 \rightarrow 0$, 进一步推得 $|k_{32}| \leq$

1。其中, λ_3 为电力系统的节点电压崩溃至 0 时所对应的负荷因子。

上述结论可以用图 2 进行表示,根据式(29)可知,在 $B_1(\lambda_1, x_1)$ 与 $B_2(\lambda_2, x_2)$ 处,有 $|k_{32}|=1$ 。取 B_1 的邻域 Ψ_1 与 B_2 的邻域 Ψ_2 ,分别由图 2 中的虚线圆形区域表示,并且在 B_1 的邻域 Ψ_1 与 B_2 的邻域 Ψ_2 中满足条件 $|k_{32}| \approx 1$ 。记 x 轴与直线 l_1 之间的区域、直线 l_1 与直线 l_2 之间的区域、直线 l_2 与直线 l_3 之间的区域分别为 Ω_1 、 Ω_2 、 Ω_3 。

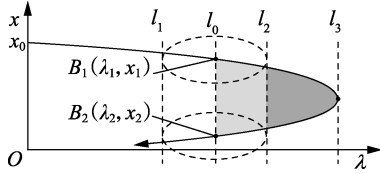


图 2 根据灵敏度划分的 PV 曲线区域

Fig.2 Regional division of PV curve based on sensitivity

一方面,对于所提变步长法,根据式(22)可知,其特征量灵敏度恒等于 1,说明其特征量能完全地跟踪 PV 曲线的斜率变化,具有非常灵敏的自适应性。另一方面,对于文献[7]的变步长法,在 Ω_1 中,其特征量灵敏度绝对值远大于 1,说明该区域内步长将快速下降;在 Ω_2 中,其特征量灵敏度绝对值约等于 1,说明该区域内步长将能有效地跟踪 PV 曲线斜率的变化;而在 Ω_3 中,其特征量灵敏度绝对值远小于 1,且越接近临界点,灵敏度绝对值将越来越小,越来越趋近于 0,这说明该区域内步长将平缓下降。

考虑到性能优异的步长控制算法,在 PV 曲线的平缓部分,即在图 2 中的 Ω_1 ,需要保持较大的步长,并且步长不宜下降过快。而在 PV 曲线快速变化的部分,步长应随之快速下降,并且临界点邻域有较小的步长。综合分析可知,本文所提自适应变步长法优于文献[7]的变步长法。

3 组合参数化法

3.1 参数化的性能分析

参数化的本质是根据当前预测点或当前预测点与上一个 CPF 解来构造超曲面,使其与 CPF 解曲线相交。性能良好的参数化对 CPF 的计算鲁棒性与快速性的提高有着重要的意义。由于校正常用的牛顿法或拟牛顿法均表现出初值敏感的特性^[13],当预测点远离 CPF 解曲线时,就会发生校正迭代不收敛现象^[9]。因此可以将预测点与 CPF 精确解的距离大小作为参数化方法优劣的评判标准,其距离越近,校正就能越快收敛。

图 3 为各参数化方法的示意图,图中线段 AA_1 、 AA_2 、 AA_3 、 AA_4 与 AA_5 分别对应方法 PP、LP、正交参数化、弧长参数化与 HP。分析图 3 可知,在图 3 的

区域内,对于全局性参数化,其预测点与 CPF 精确解的距离小于局部性参数化,说明该子区域下采用全局性参数化方法,其校正迭代收敛速度将快于局部性参数化。

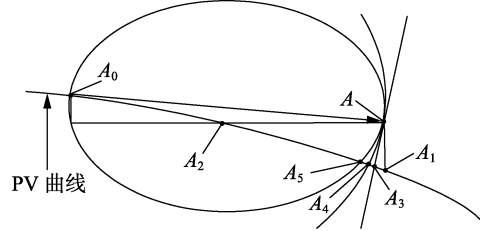


图 3 不同参数化方法的比较

Fig.3 Comparison of different parameterization methods

各种参数化方法在 CPF 解曲线的不同区域表现出的优良各有所不同。下面以最常见的 PP 与 LP 为例进行分析。一方面,对于 PP,其新增的第 $n+1$ 维为确定的单位矢量,而对于 LP,其新增的第 $n+1$ 维为可变的单位矢量,故对于第 $n+1$ 维空间的利用率,LP 高于 PP。另一方面,在非临界点区域,当 AA_2 的模大于 AA_1 的模时,基于 PP 的校正迭代收敛速度快于 LP;当 AA_2 的模小于 AA_1 的模时,则反之。因此,如引言所述,以校正迭代收敛快慢为评价指标,在 $AA_1 < AA_2$ 的区域,PP 优于 LP;在 $AA_1 > AA_2$ 的区域,LP 则优于 PP。

在临界点邻域,PP 对步长的灵敏度高于 LP。图 4 为临界点邻域的 PP 与 LP 的几何分析,当 CPF 解曲线进入临界点邻域,若此时步长选取不当,则会造成 PP 所构造的超平面与 CPF 解曲线无交点导致校正迭代发散,而 LP 则可避免此类病态现象出现。

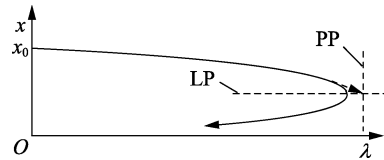


图 4 临界点邻域的不同参数化方法比较

Fig.4 Comparison among different parameterization methods in critical point neighborhood

考虑到不同的参数化方法在不同的 CPF 解曲线区域表现出不同的特性。为了充分挖掘、利用与互补各参数化方法的信息,本文提出一种组合参数化方法,在 CPF 解曲线的不同区域采用不同的参数化方法,并以校正不收敛作为组合切换判据,以兼顾 CPF 的计算鲁棒性与快速性。

3.2 组合参数化的切换策略

在相同的步长控制策略下,制定如下的参数化组合策略:

$$F: P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow \dots \rightarrow P_N \quad (31)$$

其中, P_i 表示组合参数化的第 i 个参数化方法; N 为参数化组合策略中的参数化方法个数。在上述参数

化组合策略下,组合参数化需要切换的次数为 $N-1$ 。

在组合参数化中,以“校正不收敛”作为组合切换的判据,即:

$$|J_{ik}| < \varepsilon \quad i=1,2,\dots,N-1 \quad (32)$$

其中, J_{ik} 为第 i 个参数化方法第 k 次校正对应的扩展潮流雅可比矩阵; ε 为一个很小的正数。

在上述的组合参数化切换策略下,校正迭代的总次数可以写成如下的切换断点的表达式:

$$\sum_{i=1}^{N_p} n_i = F(\mathbf{u}), \quad \mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_{N-1}]^T \quad (33)$$

其中, n_i 为第 i 次校正过程中的迭代次数; N_p 为预测总次数; u_k 为第 k 个切换断点对应的当前预测次数。当第 u_k 次预测之后,紧接着的第 u_k 次校正不收敛时,需要进行参数化方法的切换。

根据上述分析可知,对于任意系统,只要其 CPF 解曲线具有拟二次特性,则组合参数化的切换顺序具有确定性,即在临界点邻域,宜采用局部性参数化,考虑到 PP 方法在临界点邻域发散的可能性较大,因此在临界点邻域,宜采用 LP 方法;而在非临界点区域,可采用局部性参数化,可也采用全局性参数化,或两者组合。另一方面,考虑到校正不收敛一般是发生在临界点邻域,因此组合参数化的个数宜取为 2。

4 算例分析

4.1 验证所提变步长法的优越性

采用 4 种步长算法对 IEEE 10 机 39 节点连续潮流进行计算。算法 1 为固定小步长法,取定步长为 0.005;算法 2 为文献[6]的变步长法;算法 3 为文献[7]的变步长法;算法 4 为本文所提自适应变步长控制法。其计算结果如表 1 和图 5、6 所示,其中临界预测次数表示达到 CPF 曲线临界点前的预测次数,电压幅值为标么值,后同。

由表 1 可知,相比于固定小步长法,变步长法的计算耗时显著减少。由图 5(b)可知,在追踪 CPF 曲线的过程中,变步长算法 2 的步长出现了“振荡”现象,这与前述的理论分析一致。综上可知,所提步长控制算法在 CPF 计算精度与速度均优于变步长算法 2 与变步长算法 3。

由表 1 可知,步长算法 4 最优,步长算法 3 次之,进一步比较分析 2 种步长算法在不同系统规模下的计算速度,以系统的节点数表征系统规模。定义耗时比,如式(34)所示。

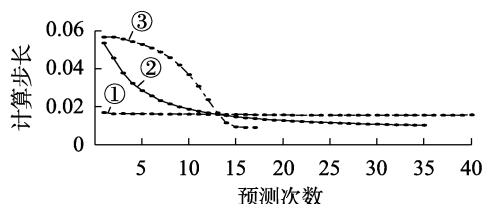
$$\tau = t_1/t_2 \quad (34)$$

其中, t_1 与 t_2 分别为步长算法 3 与步长算法 4 的计算耗时。不同系统规模下的耗时比与负荷裕度计算结果如表 2 所示。

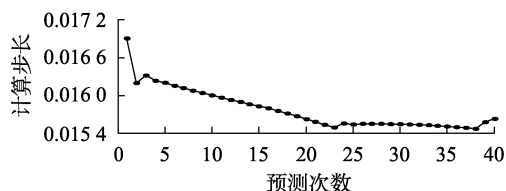
表 1 各算法的计算结果比较

Table 1 Calculation results comparison under different methods

算法	临界预测次数	计算耗时/s	临界负荷因子
1	125	0.359 5	1.214 4
2	40	0.226 3	1.215 6
3	35	0.146 2	1.214 9
4	17	0.080 7	1.214 5



① 算法 2, ② 算法 3, ③ 算法 4
(a) 3 种变步长算法的计算步长



(b) 步长算法 2 的计算步长变化放大图

图 5 算法控制示意图

Fig.5 Control schematic diagram of algorithms

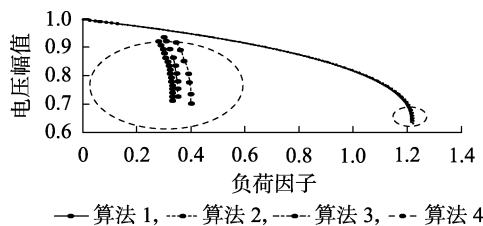


图 6 不同算法下节点 7 的 V-λ 曲线

Fig.6 V-λ curve of Bus 7 under different algorithms

表 2 不同系统规模下的耗时比与负荷裕度

Table 2 Calculation time ratios and load margins under different system scales

系统节点数	τ	算法 3 负荷裕度/MW	算法 4 负荷裕度/MW
14	1.199 7	306.265 4	306.260 3
30	1.360 7	195.823 6	195.810 6
39	1.811 6	121.489 3	121.455 2
118	4.688 2	218.719 5	218.719 5

由表 2 可知,耗时比随着系统规模的增大而增大,并且算法 4 的计算精度不低于算法 3。

4.2 验证所提参数化方法的有效性

为了验证所提组合参数化方法的有效性,设置组合参数化方式为 PP-LP,采用固定步长法,分别取定步长 σ 值为 0.005、0.010、0.025、0.050、0.100。采用所提组合参数化法追踪 CPF 解曲线,得到的计算结果如表 3 与图 7 所示。其中,图 7 为 IEEE 10 机 39 节点系统临界电压最低的节点的 CPF 曲线。

以 $\sigma=0.005$ 的 CPF 计算结果作为衡量计算精度的参考值,根据表 3 与图 7 可知,本文所提的组合

表 3 不同步长下的 CPF 计算结果比较

Table 3 Comparison of CPF calculation results among different fixed step-size values

σ	u_k	预测次数	计算耗时/s	临界负荷因子
0.005	114	121	0.312 5	1.214 455
0.010	56	62	0.235 8	1.216 016
0.025	21	24	0.103 6	1.220 112
0.050	11	13	0.077 8	1.227 982
0.100	5	7	0.058 4	1.245 563

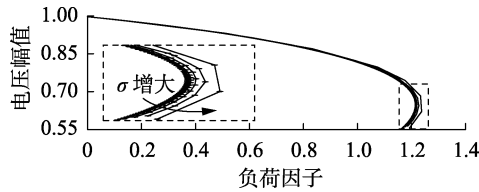


图 7 不同步长下节点 7 的 V-λ 曲线

Fig.7 V-λ curve of Bus 7 under different fixed step-sizes

参数化方法在保证较高计算精度下,能够以较大定步长进行预测,有效地提高了 CPF 的计算速度,进而验证了本文所提方法的有效性。

4.3 不同参数化方法的比较分析

根据 3.2 节的分析可知,参数化的组合方式包括 2 种,即 PP-LP 与 HP-LP。基于 IEEE 39 节点系统,分别采用上述 2 种组合参数化方法来追踪 CPF 解曲线。同时采用所提的自适应变步长法(算法 4),并将其步长参数分为以下 3 种情况: $a_1 = 0.054$ 1, $b_1 = 0.91$, $c_1 = 0.01$, $d_1 = 0.009$; $a_2 = 0.052$ 1, $b_2 = 1.12$, $c_2 = -0.12$, $d_2 = 0.016$; $a_3 = 0.047$ 8, $b_3 = 1.65$, $c_3 = -0.21$, $d_3 = 0.025$ 。相应的计算步长如图 8 所示。进一步分析各参数化策略在校正过程中的迭代速度,其结果如表 4 所示。

由表 4 与图 8 可知,在步长参数(a_1, b_1, c_1, d_1)与(a_2, b_2, c_2, d_2)下,由于 HP 能在临界点邻域使校正收敛,因此组合参数化法 HP-LP 与 HP 等价,即 HP-LP 未进行组合参数化的切换。而当步长参数为(a_3, b_3, c_3, d_3)时,HP 未能保证临界点邻域校正收敛,即校正失败,因此当 CPF 曲线进入临界点邻域时,若步长不合适,HP 仍可能会出现校正不收敛。对于 PP,其在临界点邻域极易发生校正不收敛。所提组合参数化策略能够极大地减小校正不收敛的发生,并且组合参数化方法中,HP-LP 最优。

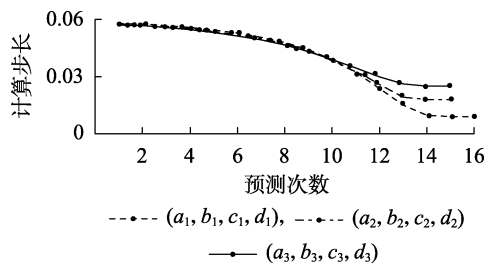


图 8 不同参数下的计算步长

Fig.8 Calculation step-size under different parameters

表 4 各参数化方法在校正过程中的计算结果比较

Table 4 Calculative results of different parameterization methods in correction process

步长参数	参数化方法	u_k	计算耗时/s
(a_1, b_1, c_1, d_1)	PP	不收敛	—
	LP	—	0.091 5
	HP	—	0.082 3
	PP-LP	14	0.085 4
	HP-LP	16	0.082 3
(a_2, b_2, c_2, d_2)	PP	不收敛	—
	LP	—	0.079 1
	HP	—	0.071 8
	PP-LP	13	0.074 5
	HP-LP	15	0.071 8
(a_3, b_3, c_3, d_3)	PP	不收敛	—
	LP	—	0.072 6
	HP	不收敛	—
	PP-LP	12	0.067 2
	HP-LP	13	0.061 3

进一步地,分析 HP、LP 与 HP-LP 组合参数化方法的计算精度。考虑到步长比较小在整个计算过程中与实际情况比较接近,因此以固定小步长的 CPF 计算结果作为衡量计算精度的参考值,假设固定小步长 $\sigma = 0.005$ 。分别得到基于 LP、HP 与 HP-LP 组合参数化方法下的临界预测次数与临界负荷因子,其结果如表 5 所示。

表 5 各参数化方法的计算结果比较

Table 5 Calculative results of different parameterization methods

步长控制策略	参数化策略	临界预测次数	临界负荷因子
$\sigma = 0.005$	LP	125	1.214 449
变步长算法 4 (a_1, b_1, c_1, d_1)	LP	16	1.214 454
	HP	16	1.214 453
	HP-LP	16	1.214 453

结合表 4 和表 5 可知,所提的组合参数化策略能够保证 CPF 计算具有良好的计算鲁棒性与快速性。

5 结论

本文基于 CPF 对静态电压稳定性问题进行研究。提出了一种可以完全跟踪 PV 曲线斜率变化的自适应变步长算法,在此基础上,提出了一种组合参数化法,基于 IEEE 标准节点系统进行仿真验证,可以得到以下结论:

a. 对于所提的自适应变步长算法,其步长能完全根据 PV 曲线斜率变化进行自适应调整,在保证计算精度的同时,大幅降低了计算时间,并具有良好的计算鲁棒性;

b. 对于所提的组合参数化方法,通过组合不同参数化方法的优点,能有效地提高 CPF 的计算速度及其在临界点领域的鲁棒性;

c. 通过对步长控制进行改进以及对参数化方法进行组合,使得改进后的 CPF 较好地兼顾了 CPF 的

计算鲁棒性与快速性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 汤涌. 电力系统电压稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 4-15.
- [2] 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, 37(10): 57-62.
YANG Shan, TONG Xiangqian. Continuous power flow calculation for active distribution network with consideration of current limitation of distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 57-62.
- [3] 刘焕志, 李扬, 陈霄. 基于连续潮流的输电网可用输电能力计算[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12): 5-9.
LIU Huanzhi, LI Yang, CHEN Xiao. Available transfer capability calculation based on continual power flow for transmission network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 5-9.
- [4] LIU C, BOSE A, HAN M, et al. Improved continuation power flow method for AC/DC power system[C]//Electrical Power & Energy Conference. Winnipeg, Canada; IEEE, 2011: 192-198.
- [5] 李增国, 王锐, 邢卫荣. 基于连续潮流和模态分析的电压稳定分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(9): 81-84.
LI Zengguo, WANG Rui, XING Weirong. Voltage stability analysis based on continuation power flow and modal analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 81-84.
- [6] 李林. 基于连续潮流的电力系统电压稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
LI Lin. Research on voltage stability of power system based on continuous power flow[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [7] PHICHASAWAT S, SONG Y H, TAYLOR G A. Congestion management considering voltage security constraints[C]//Proceedings of International Conference on Power System Technology. Kunming, China; IEEE, 2002: 1819-1823.
- [8] 董晓明, 梁军, 韩学山, 等. 连续潮流参数选择及步长控制的分析与改进[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 49-55.
DONG Xiaoming, LIANG Jun, HAN Xueshan, et al. Analysis and improvement on parameter selection strategy and step size controlling in continuation power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 49-55.
- [9] 彭寒梅, 曹一家, 黄小庆, 等. 无平衡节点孤岛运行微电网的连续潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2057-2067.
PENG Hanmei, CAO Yijiao, HUANG Xiaoqing, et al. Continuous power flow for islanding microgrid without balance nodes[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2057-2067.
- [10] 王成山, 魏伟. 一种改进的步长控制连续性潮流计算方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 58-64.
WANG Chengshan, WEI Wei. An improved continuation method with controlled step size[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 58-64.
- [11] 赵晋泉, 张伯明. 改进连续潮流计算鲁棒性的策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 7-11.
ZHAO Jinquan, ZHANG Boming. A study on the strategy for improving robustness of continuation power flow computation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 7-11.
- [12] 伍利, 古婷婷, 姚李孝. 基于改进连续潮流法的静态电压稳定分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 99-103.
WU Li, GU Tingting, YAO Lixiao. Static voltage stability analysis based on improved continuation power flow[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 99-103.
- [13] 孙秋野, 陈会敏, 杨家农, 等. 牛顿类潮流计算方法的收敛性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2196-2200.
SUN Qiuye, CHEN Huimin, YANG Jianong, et al. Analysis on convergence of Newton-like power flow algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2196-2200.

作者简介:



阮 冲

阮 冲(1995—), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要研究方向为智能配电网、电力系统稳定与控制(E-mail: 578623016@qq.com);

刘金婵(1994—), 女, 河南省商丘人, 硕士研究生, 主要研究方向为数学算法与数据处理(E-mail: 576415483@qq.com);

陈宝平(1992—), 男, 河福建泉州人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制及次同步振荡(E-mail: 309875997@qq.com);

常 湧(1959—), 男, 湖北武汉人, 教授级高级工程师, 主要研究方向为配电网自动化、电力系统接地保护、电力系统稳定(E-mail: ychang@whu.edu.cn)。

An improved continuation power flow method based on adaptive controlled step-size and combination of parameterization

RUAN Chong¹, LIU Jinchan², CHEN Baoping¹, CHANG Yong¹, ZHAI Xue³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. College of Science, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

3. Hubei Electric Engineering Corporation Limited, Wuhan 430040, China)

Abstract: An adaptive controlled step-size method that can trace the slope of PV(PhotoVoltaic) curve completely is proposed. The step-size sensitivity of the proposed method and the conventional step-size methods is analyzed theoretically, on this basis, it is proved that the proposed method has better adaptability, and it can not only ensure the calculation accuracy of CPF(Continuation Power Flow), but also greatly reduce the calculation time. Then, a combination of parameterization method is proposed, in which different parameterization methods are used in different regions of the PV curve. At the same time, the switching breakpoints of the combination of parameterization method are set during the tracking process of the PV curve, and the correction of divergence is used as the combination switching criterion. Based on the calculation results of IEEE standard test system, the validity and superiority of the proposed adaptive controlled step-size method and the combination of parameterization method are verified.

Key words: continuation power flow; adaptive controlled step-size; step-size sensitivity; combination of parameterization; calculation

附录

物理参数化，新增的一维方程如下式所示，式中 λ' 是由预测-校正过程中得到一个估计值。

$$\lambda - \lambda' = 0 \quad (\text{A1})$$

局部参数化，其新增的一维方程是将某个状态变量的值固定，式中 x'_k 为预测值的第 k 维分量。

$$x_k - x'_k = 0 \quad (\text{A2})$$

二次型曲线的极值点，亦即 PV 曲线的临界点为 $(\lambda_{\text{cr}}, x_{\text{cr}})$ ，其值由下式给定。

$$x_{\text{cr}} = -\frac{\beta}{2\alpha} \quad (\text{A3})$$

同时，由于稳态运行点 $(0, x_0)$ 与临界点 $(\lambda_{\text{cr}}, x_{\text{cr}})$ 均通过 PV 曲线，因此可得下列等式。

$$\begin{cases} 0 = \alpha x_0^2 + \beta x_0 + \gamma \\ \lambda_{\text{cr}} = \alpha x_{\text{cr}}^2 + \beta x_{\text{cr}} + \gamma \end{cases} \quad (\text{A4})$$

则对于式(3)的变步长法、式(4)的变步长法以及所提的自适应变步长法，分别可得：

$$\frac{dy_1}{d\lambda} = \frac{dx^{(j)}}{d\lambda} - \frac{dx^{(j-1)}}{d\lambda} \Big|_{\Delta x^{(j)} = \max(|\Delta x^{(j)}|)} \quad (\text{A5})$$

$$\frac{dy_2}{d\lambda} = \frac{d|x_{\min}|}{d\lambda} = \frac{dx_{\min}}{d\lambda} = \frac{dx}{d\lambda} \Big|_{x=V_{\min}} \quad (\text{A6})$$

$$\frac{dy_3}{d\lambda} = \frac{d(-|K|_{\max})}{d\lambda} = \begin{cases} \frac{d^2x}{d\lambda^2} \Big|_{|K|=|K|_{\max}}, \lambda < \lambda_{\text{cr}} \\ -\frac{d^2x}{d\lambda^2} \Big|_{|K|=|K|_{\max}}, \lambda > \lambda_{\text{cr}} \end{cases} \quad (\text{A7})$$