

基于线性和非线性混合预测的改进连续潮流法

李 林 康积涛

(西南交通大学电气工程学院 四川 成都 610031)

摘 要:提出了一种改进的连续潮流法求取电力系统的 PV 曲线。该方法采用线性和非线性的混合预测,解决了常规非线性预测在 PV 曲线下半支的问题,有效地改善了连续潮流法的性能。采用自动变步长提高了程序的效率。该方法应用于 IEEE 39 节点测试系统,取得理想的效果,从而验证了该方法的有效性和快速性。

关键词:电压稳定;连续潮流;PV 曲线;非线性预测

Abstract: An improved continuation power flow method is proposed to trace the PV curve of power systems. This method with linear and nonlinear hybrid predictor solves the conventional nonlinear prediction in the second half of the branch of PV curve, which improves the performance of continuation power flow method effectively. Automatic variable-step size is used to improve the efficiency of the program. The desired results are obtained with the proposed method applied to the IEEE 39 bus test systems, which demonstrates the validity and efficiency of the proposed method.

Key words: voltage stability; continuation power flow; PV curve; nonlinear prediction

中图分类号:TM712 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)01-0009-03

连续潮流法是一种基于负荷的变化和发电机的功率分配而追踪电力系统静态行为的一种有效的工具^[1-4]。在电力系统静态电压稳定分析中,通常利用连续潮流法绘制 PV 曲线来反映负荷点的临界电压和极限功率。连续潮流法是通过引入负荷参数采用预估校正技术,在 PV 曲线的每一点反复迭代,计算出准确的潮流解,它主要由 4 部分组成:参数化、预测、校正和步长控制。参数化是避免在功率极限处潮流方程的雅各比矩阵奇异,文献[4]、[5]指出弧长参数化比局部参数化更具有鲁棒性;预测是为了找到一个潮流解的近似值,为下一步校正时解潮流方程提供一个初始值,预测值与实际值越接近,校正过程的迭代次数就越少。文献[6]通过对潮流方程的变换,摆脱了对负荷参数的依赖,改善了连续潮流法的收敛性,由于其预测环节仍要解线性方程组,降低了计算的效率;文献[7]采用非线性拉格朗日插值法预测,在 PV 曲线功率极限处可以采取较大步长,减少计算时间,但是在 PV 曲线下半支部分其预测解与实际解的接近程度不太理想。

为了提高计算效率,提出了基于线性和非线性混合预测的改进算法。该算法在 PV 曲线上半支和下半支的功率极限附近采用非线性预测,剩下部分采用割线预测。该方法在 IEEE 39 节点系统和其他方法作了比较,体现了其有效性和快速性。

1 连续潮流法说明

1.1 电力系统潮流方程

一般地,在静态输电计算中,极坐标系统下的潮流方程可用式(1)表示为

$$\begin{aligned} P_{Gi0}(1 + \lambda n_{Gi}) - P_{Li0}(1 + \lambda n_{PLi}) - P_i(V, \theta) &= 0 \\ G_{Gi0} - Q_{Li0}(1 + \lambda n_{QLi}) - Q_i(V, \theta) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 λ 表示发电机和负荷的增长参数,即为负荷因子; n_{Gi} 、 n_{PLi} 分别表示发电机和负荷有功、无功增长的方向向量; P_{Gi0} 、 Q_{Gi0} 为节点的发电机出力; P_{Li0} 、 Q_{Li0} 为节点 i 的负荷; $P_i(V, \theta)$ 、 $Q_i(V, \theta)$ 分别表示节点的有功和无功,其具体表达式如下。

$$\begin{aligned} P_i(V, \theta) &= V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i(V, \theta) &= V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, V_i 是节点的电压幅值; θ_{ij} 是节点 i 和节点 j 的电压相角差值; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的网络导纳矩阵的实部和虚部。

1.2 非线性预测

非线性预测方法主要由一个多项式函数逼近 PV 曲线上已知解,当多项式函数确定后,对于一个给定的步长,下一个解则可以利用外推技术来预测。如图 1 所示,通过 3 个潮流实际解 1、2、3,利用非线性预测

得到预估解4。最常用的多项式逼近方法是拉格朗日插值法。

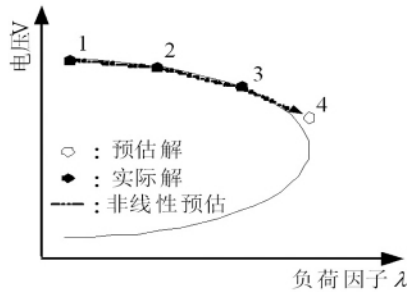


图1 非线性预测示意图

根据已知的实际潮流解,预估解就可以由拉格朗日多项式插值的多项式逼近获得。拉格朗日多项式可以由式(3)给出。

$$P(x) = \sum_{k=0}^n f(x_k) L_k(x) \quad (3)$$

其中 $P(x)$ 为拉格朗日插值多项式; x_k 为已知的潮流解; $L_k(x)$ 为拉格朗日插值系数; n 为多项式的阶数。若已知 $n+1$ 个点,则拉格朗日插值系数表示如下。

$$L_k(x) = \prod_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^n \frac{x - x_m}{x_k - x_m} \quad (4)$$

由于电力系统 PV 曲线近似二次函数,通常预估通过拉格朗日二次插值多项式获得^[7]。

给定一个弧长 s_{j+1} ,由式(3)能求出第 $j+1$ 步的预估值。例如,图1中已知3个潮流解 $(s_1, x(s_1))$ 、 $(s_2, x(s_2))$ 、 $(s_3, x(s_3))$,可以通过拉格朗日二次插值多项式来估计第4个潮流解 $(s_4, \hat{x}(s_4))$ 。取一个适当的步长 Δs ,则

$$s_4 = s_3 + \Delta s \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(s_4) &= \sum_{k=0}^2 L_{j-k}(s) x(s_{j-k}) = \frac{(s_4 - s_2)(s_4 - s_1)}{(s_3 - s_2)(s_3 - s_1)} x(s_3) \\ &+ \frac{(s_4 - s_1)(s_4 - s_3)}{(s_2 - s_1)(s_2 - s_3)} x(s_2) + \frac{(s_4 - s_2)(s_4 - s_3)}{(s_1 - s_2)(s_1 - s_3)} x(s_1) \end{aligned} \quad (6)$$

1.3 已有的非线性预测算法说明

采用拉格朗日非线性方法预测,在 PV 曲线功率极限处可以采用较大的步长加快计算速率,然而研究表明非线性预测对于 PV 曲线的下半支部分并不是有效,因为非线性应用的是弧长与状态变量的关系。如图2所示,可观察到曲线是关于A点对称的,而实际系统中很多节点的电压幅值与 PV 曲线下半支弧长的关系不同于与上半支弧长的关系。

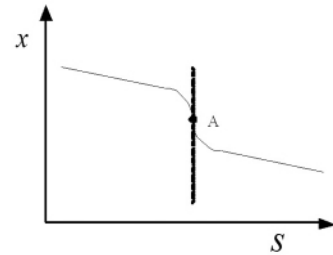


图2 弧长和状态变量的关系图

2 改进的连续潮流法

针对以前方法的不足做了如下改进:把 PV 曲线分为两个区域,如图3所示。区域I为 PV 曲线上半支和下半支的功率极限附近,由于非线性预测具有较好的鲁棒性和非线性,并且弧长与 PV 曲线的上半支有近似二次函数的关系,因此采用二阶拉格朗日插值法预测具有较高的精度和速度。区域II为 PV 曲线剩下部分,利用割线法预估,避免了第2.3中说明的非线性预测的问题。区域I向区域II过渡时,由阈值 β 控制。当在曲线下半支 $|\Delta x / \Delta \lambda| \leq \beta$ 时,区域I向区域II过渡。

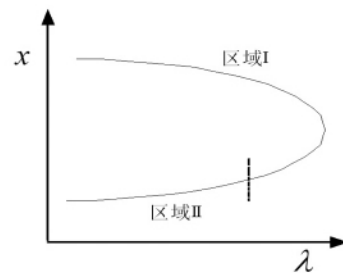


图3 PV 曲线区域图

步长控制是连续潮流法中的一个关键环节,步长过小将造成预估校正步数太多,步长过大将使得校正过程收敛缓慢甚至发散。理想的情况下是,步长应该随着曲线的曲率大小进行自适应调节:潮流解曲线在曲率小的部分,即平坦部分采用较大的步长,在曲率大的部分采用较小的步长。这里利用曲线上紧挨着的两点 (x^j, λ^j) 和 (x^{j-1}, λ^{j-1}) 来控制步长,其表达式为

$$h = a \times e^{(-b \times MAX)} \quad (7)$$

式中 $MAX = \max(|V^j - V^{j-1}|)$,其中 V 为状态变量中 x 节点电压的幅值; a 、 b 是系数。从式(7)中可以看出,曲线在曲率小的部分,电压幅值变化较大,此时步长取值较小;在曲率大的部分,电压幅值变化较小,步长取值较大,这样步长的大小就根据曲线曲率的大小自动变化。

3 算例分析

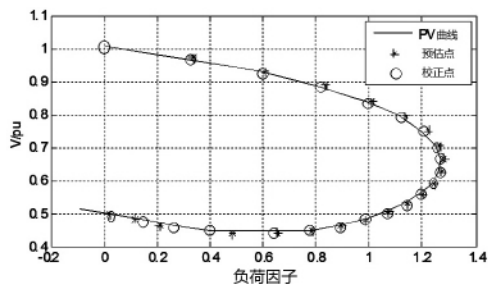
用 IEEE 39 节点测试系统对改进的连续潮流法进行了效率评估。所有仿真没有考虑发电机无功限制,所有的负荷和发电机的有功和无功按同一比例增长,负荷为恒功率模型,并且保持功率因数不变。

为了方便,把方法定义如下。

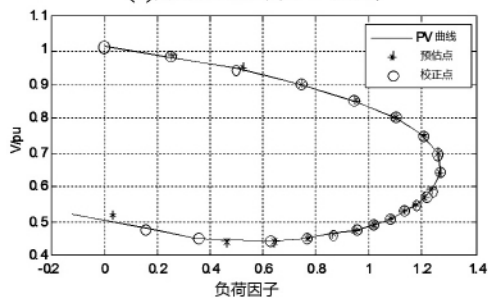
方法 A: 切线法;

方法 B: 非线性法;

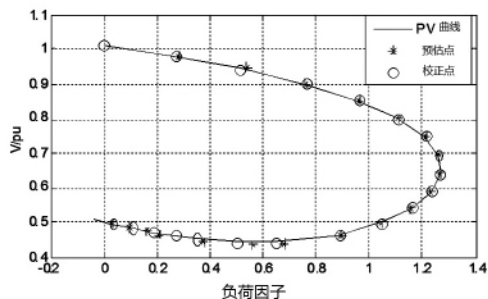
方法 C: 改进方法,步长控制采用式(7),在区域 I 中采用非线性拉格朗日插值法时,式中 a, b 分别取 0.5 和 2.5;在区域 II 中采用割线法时,式中 a, b 分别取 0.4 和 3;区域 I 向区域 II 过渡时的阈值 β 取 1.12。



(a)方法 A 绘制 PV 曲线



(b)方法 B 绘制 PV 曲线



(c)方法 C 绘制 PV 曲线

图 4 IEEE 39 节点母线 12 的 PV 曲线图

图 4 显示了 IEEE 39 节点系统在节点 31 的 PV 曲线,图中 (a)、(b)、(c) 分别表示用方法 A、B、C 绘制的 PV 曲线。从图中可以观察到,在 PV 曲线的功

率极限处 C 方法和 D 方法所得的预估点与相应的校正点非常接近,说明利用非线性预测曲线曲率大的部分具有很好的鲁棒性。

表 1 比较了 A、B、C 3 种方法 CPU 的计算时间,其中 R_A, R_B 分别表示了其他方法相对于 A、B 方法 CPU 计算时间的比率。从表中可以看出方法 C 相对于方法 A、B 分别减少了 CPU 时间的 35.7%、6.5%。图 5 显示了绘制曲线每步所需要的迭代次数,从图中可以看出 A、B、C 3 种方法绘制曲线的步数分别为 22、21、20 步;采用了非线性预测法的 B、C 方法在曲线极限功率处的迭代次数最多达 3 次,在曲线的下半支仍采用 B 方法导致迭代次数增加,达到了 5 次,这就是由于曲线在下半支的弧长与状态变量的关系不同于上半支弧长与状态变量的关系。

表 1 IEEE 39 节点系统 CPU 时间比较

方法	CPU 时间/s	R_A	R_B
A	1.066	1.000	1.470
B	0.725	0.680	1.000
C	0.685	0.643	0.945

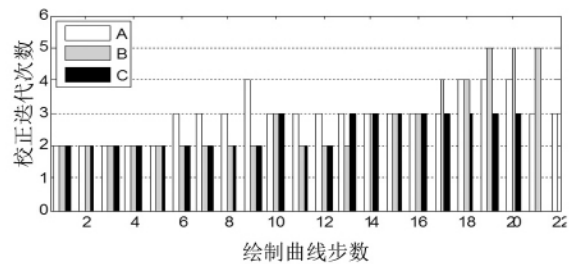


图 5 绘制曲线步数和校正迭代次数关系图

4 结论

对求解 PV 曲线的连续潮流法进行了改进。通过线性和非线性的混合预测,解决了常规非线性预测在 PV 曲线下半支的问题,有效地改善了连续潮流法的性能。采用自动变步长提高了程序的效率。通过 IEEE 39 节点测试系统的算例分析,表明了该方法的正确性和有效性。

参考文献

[1] Okumura k., Terai k., Kishima A., Solution of Ill - conditioned Load Flow Equation by Homotopy Continuation method [J]. Circuits and Systems, IEEE International Symopisum ,1991(5): 2897 - 2899.

[2] Ajarapu V., Christy C. The Continuation Power Flow: a

(下转第 38 页)

针对该问题发生的时间为2008年5月12日,并且该压降发生突变的前后,正好发生在5月12日14:28地震前后,因此,推测地震引起该超差现象。初步推断:地震导致TV二次回路中的某接点或线路松动、接触不良或受损,引起TV二次回路压降突然增大,超出规定范围。因此,首先对被监测TV二次回路的各个接点及线路进行排查,同时进行加固处理;经过对该TV二次回路所有接点进行加固处理后,被监测TV二次回路压降回复正常值,即,与发生突变前一致。经过上述现场排查,得出该故障情况的结论是:地震导致TV二次回路中的接点松动、接触不良或受损。现场处理后,线路回复正常。

4.2 应用实例2

截取了电能计量在线监测系统在110 kV龙台变电站在2008年5月12日13:26至2008年5月13日06:27的运行数据,如表2所示。该监测数据显示“5.12”地震期间,电能表12305553运行稳定、误差良好。

5 结 语

通过电能计量在线监测系统的实践应用,改善了目前存在对电能计量装置的检测手段落后、单一、整个二次回路的监测和故障检测困难、提高电能计量准确性及电量追补的科学性等问题;减少了电能计量外勤工作人员的大量现场校验工作,提高了工作效率;减少了变电站运行设备的停电检测时间;实现了电能

计量装置管理无纸化,提高了计量装置运行状况监测和维护管理水平,进一步保证电能计量装置的安全性、准确性、可靠性。

不过目前该电能计量在线监测系统在实际应用还存在不足,如系统单台设备监测容量偏小,可扩展(如可监测30条线路),以实现单台监测设备对厂站内的所有计量装置进行监测,提高系统适用性。目前,系统母线TV切换功能为手动切换,需人为辅助操作,该功能还有改进空间,应能实现系统自动识别、切换,达到真正的自动切换目的。

同时,随着智能电网的建设,网络化、数字化、智能化将是针对智能电网智能量测系统的计量装置的电能计量在线监测系统的发展趋势。

参考文献

- [1] DL/T 448-2000 电能计量装置技术管理规程 [S].
- [2] SD 109-1983 电能计量装置检验规程 [S].
- [3] 白洋. 电能计量装置远程校验监测系统 [J]. 电测与仪表, 2005, 42(7): 30-32.
- [4] 鹿凯华, 赵斌. 关口电能计量装置误差的实时监测 [J]. 山东电力高等专科学校学报, 2008(4): 50-52.
- [5] 卢树峰. 关口电能计量装置的现状分析与思考 [J]. 电测与仪表, 2005, 42(8): 21-23, 8.
- [6] 罗志坤, 滕马胜, 万全. 高压电能计量装置远程校验与监测系统及其应用 [J]. 电子测量技术, 2007, 30(2): 172-175.

(收稿日期:2011-10-20)

(上接第11页)

- Tool for Steady State Voltage Stability Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
- [3] 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.
 - [4] H. D. Chiang, A. J. Flueck, K. S. Shah, N. Balu. CP-FLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-state Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 623-634
 - [5] S. H. Li, H. D. Chiang. Nonlinear Predictors and Hybrid

Corrector for Fast Continuation Power Flow [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2008, 2(3): 341-345.

- [6] 蔡伟程, 代静. 对求取电力系统PV曲线的连续潮流法的改进 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 82-85.
- [7] Mori H., Yamada S.. Continuation Power Flow with the Nonlinear Predictor of the Lagrange's Polynomial Interpolation Formula [J]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, IEEE/PES, 2: 1133-1138.

(收稿日期:2011-09-30)