

求取电力系统 PV 曲线的改进连续潮流法

祝达康 程浩忠

上海交通大学电气工程系, 200030 上海

AN IMPROVED CONTINUATION METHOD IN TRACING PV CURVES OF POWER SYSTEMS

Zhu Dakang Cheng Haozhong

Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University
Shanghai, 200030 China

ABSTRACT In this paper, an improved continuation method is presented to trace the PV curve of power systems. By using an augment equation, this algorithm can pass the "nose" point and get the whole PV curve without encountering the numerical difficulty of ill-conditioning. The predictor-corrector technique makes its computation fast. It is also presented a method of getting an optimum control direction when the system is near voltage collapse by using the characteristics of left eigenvector.

KEY WORDS power system; voltage stability; PV curve; continuation method

摘要 阐述了用改进的连续潮流法求取电力系统的 PV 曲线。该方法通过增加一维潮流方程,消除了功率极限点附近的雅可比矩阵奇异的现象,获得精确的电压稳定极限和整支 PV 曲线。算法中考虑了系统的多项限制,并采用了预估校正技术,运算更加快捷精确,同时利用系统左特征矢量的性质获得系统临近崩溃时的最优控制方向,使该方法不但具有理论意义而且有实际应用价值。

关键词 电力系统 电压稳定 PV 曲线 连续潮流法

1 引言

在电压稳定的研究中, PV 曲线的准确求取可以获得系统电压稳定的功率极限值和电压临界值,因此具有重要意义。PV 曲线通常通过不断增加负荷的连续潮流法求取。该方法的难点主要在于在接近极限点(鞍结分岔点)的时候,雅可比矩阵奇异,造成潮流不收敛。国内外学者为此作了大量研究工作。

解决此类病态问题的传统数学方法是通过一组 $2N+1$ 维的增广矩阵直接求取极限点。该方法虽然理论简单,但运算量大且对初值要求过于苛刻。近年来,求取 PV 曲线的方法主要集中在参数变换和改

变收敛方向两个方面。参数变换主要通过对原潮流方程进行不同的恒等变换而改变系统极限点附近的雅可比矩阵的结构,转移鞍结分岔点,在不改变方程维数的情况下改进了极限点附近潮流的收敛性^[1,2,3]。参数变换法的缺陷在于它只能转移系统的鞍结分岔点而不能消除,同时在该点的转移方向上也无法控制,有时甚至会将分岔点转移到 PV 曲线的上半支,使潮流计算无法接近极限点。基于非线性数学的延拓法,在国内学者^[4]通过改变潮流收敛方向而使雅可比矩阵不再奇异的方法的基础上,本文提出一种改进方法,通过增加一维潮流方程,有效地消除了鞍结分岔点附近雅可比矩阵奇异的现象,可获得精确的电压稳定极限和比较完整的 PV 曲线。

2 算法说明

系统的潮流方程可用式(1)表示。式中 λ 为负荷增长率, b 为负荷增长方式。

$$f(x) - \lambda \cdot b = 0 \quad (1)$$

连续潮流法是假设系统处于准静态的状态下,随负荷的缓慢增加,不断求解潮流方程,从而描绘出系统的 PV 曲线。常规潮流总是沿着 PV 曲线从一个解向下一个解迭代收敛。在极限点附近,系统方程各变量的一阶偏导趋近于零,雅可比矩阵变得奇异。因此,只要合理地改变潮流方程的收敛方向,雅可比矩阵就可以不再奇异。为防止潮流迭代一次之后回到原常规方法的收敛方向上,不但要合理地进行预估而且必须增加一维潮流方程,使潮流从 $N+1$ 维空间向精确解收敛。该方法在数学上称为延拓法。文献[4]以式(2)为增广的潮流方程:

本文课题获国家自然科学基金和上海市青年启明星计划的资助。

$$\begin{cases} f(x, \lambda) = f(x) - \lambda \cdot b = 0 \\ \Delta \lambda [\lambda_n - (\lambda_0 + \Delta \lambda)] + \sum_{i=1}^n \Delta x_i [x_{ni} - (x_0 + \Delta x_i)] = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中增加的一维方程是潮流解与预估值的正交方程,如图1所示。 $\Delta \lambda$ 和 Δx_i 是每次潮流迭代前的预估,在迭代时是常量^[4]。该方法率先提出了利用改变收敛方向的方法解决极限点附近潮流不收敛的问题,但在实现上会有一些问题。首先,从图1中可以发现接近极限点后,预估值的正交平面可能与PV曲线无法相交(图中下标s和b分别表示小步长和大步长),此时式(2)无解,在步长稍大时该现象比较明显。其次,由于增广的雅可比矩阵增加的一维完全是常数矢量,所以新方程组只是在 $N+1$ 维空间中以不同的系统流形切面(N 维超平面)向极限点逼近,并没能充分利用增加的一维空间。从这方面讲,该方法在极限点附近有可能迭代不收敛。此外,由于文献[4]的变步长方法依赖于常规雅可比矩阵形成的方程组,在其接近奇异时解方程的误差会造成预估点不准确,对其收敛性也有影响。

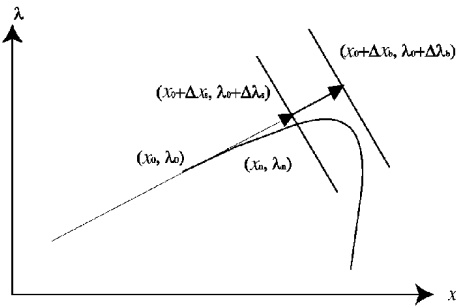


图1 延拓法示意图

Fig. 1 Illustration of the continuation method

考虑以上几点,以弧长公式重新形成第 $N+1$ 维方程,并构造增广潮流方程:

$$\begin{cases} f(x, \lambda) = 0 \\ \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 + (\lambda - \lambda_0)^2 = \Delta s^2 \end{cases} \quad (3)$$

也可以根据各节点的重要性不同分配权重,形成伪弧长公式并将其作为第 $N+1$ 维方程:

$$\sum_{i=1}^n k_i (x_i - x_0)^2 + k_{n+1} (\lambda - \lambda_0)^2 = \Delta s^2 \quad (4)$$

式中 x_0 和 λ_0 分别为PV曲线中上一个潮流解的电压值和负荷增长率; k_i 为对各参量分配的权重。

新方程组对应的雅可比矩阵分别如下:

$$J_{new} = \begin{bmatrix} J(X) & b \\ 2X - 2X_0 & \lambda - \lambda_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$J_{new} = \begin{bmatrix} J(X) & b \\ 2k_s (X - X_0) & 2k_{N+1} (\lambda - \lambda_0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $J(X)$ 为原来的雅可比矩阵。

有严格的数学理论证明^[5],新的雅可比矩阵充分利用了增广的第 $N+1$ 维空间,在功率极限点(简单奇点)处不再奇异。利用新的潮流方程组可以求出整支PV曲线,而不会遇到潮流发散的问题。

由于采用了弧长或伪弧长公式作为负荷增长率 λ 的控制方程,使该方法对于 λ 的变化采取了自动变步长的方法。在负荷较低时,电压变化率 ΔX 较小,相应的负荷增长率 $\Delta \lambda$ 就比较大;而当接近于功率极限点时电压变化率突然增大,对应的负荷增长率变小,曲线上的点就比较密。方程中弧长 Δs 的确定对程序有一定影响:若 Δs 取得较大,则PV曲线在极限点附近不够光滑,极限点也有一定误差(但相对其他方法误差仍然不大);弧长太大有可能导致方程无解;若取得太小,虽然曲线光滑,极限点也很精确,但运算量很大。程序中在每步潮流运算之后求取常规雅可比矩阵的奇异值,以确定当前点离极限点的距离。以较大的弧长开始迅速通过低负荷PV曲线较平坦的部分,当常规雅可比矩阵的最小奇异值小于一定值之后,减小弧长的值使求得的曲线细密精确。由于奇异值分析对系统电压稳定的分析控制也有重要意义^[6],所以相对而言弧长控制在程序中非常容易。

为加快程序运行速度,引入了预估校正技术^[7]。先通过插值法对下一个潮流值进行预估,再由潮流方程进行求解校正,使得运算速度大大加快,一般2到4次迭代就可以得到精确结果($X \approx 10^{-5}$)。

3 崩溃点处的系统控制

由系统的奇异值分析可以知道,在系统的鞍结分岔点,雅可比矩阵 $D_x f(x^*, \lambda^*)$ 有一个单独的零特征值,其对应有一个左特征矢量 w^T 满足:

$$w^T \cdot D_x f(x^*, \lambda^*) = 0 \quad (7)$$

这里 $D_x f(x^*, \lambda^*)$ 有 $N-1$ 个有负实部的非负特征根,它们对应的右特征矢量 v^T 在状态空间通过

鞍结分岔点 x^* 张成 $N-1$ 维超平面 $TW^s(x^*)$ 该平面是系统稳定流形 $W^s(x^*)$ 在鞍结分岔点 x^* 的切平面。

由特征矢量的定义可以知道:

$$w^T \cdot v = w^T \cdot (\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_N}) = 0 \tag{8}$$

可见 w^T 垂直于 $W^s(x^*)$ 在鞍结分岔点的切平面 $TW^s(x^*)$, 它是该点的法矢量。因此, 在系统接近电压崩溃时在 w^T 的方向上系统离稳定边界最近, 在此方向上的稳定裕度也最小。而按 w^T 的反方向, 控制系统可以使系统以最快的速度远离崩溃点, 达到最优控制的目的。

4 实现方法和步骤

(1)初始化

用常规潮流程序求取正常潮流及其附近的 2 到 3 个点

(2)连续法解潮流

- 1)预估 根据前几次的潮流结果用插值法对潮流进行预估
- 2)校正 用改进的潮流方程对预估值进行求解校正
- 3)分析 对求得的系统进行奇异值分析, 在接近功率极限点时减小弧长值 Δs , 并求取最优控制方向。

(3)如果 λ 或 x_i 小于零, 则程序结束; 反之, 则返回到步骤 (2)

5 负荷增长方式

负荷增长方式不同, 系统的 PV 曲线和功率极限点也不同。考虑到系统运行人员总是对负荷增长的趋势有所了解, 所以程序采用单参数化的负荷增长方式: 各节点的有功、无功负荷相对独立, 但负荷增长的各节点之间或同一节点的有功、无功负荷之间采用同一比例增长, 其余的节点负荷不变。负荷增量由各发电机出力大小按比例分配

6 实例计算

本文对 IEEE14 节点和 IEEE57 节点进行计算,

并按文献 [1] 的方法编制参数变换法的程序进行计算, 并作对比。

(1) IEEE 14 节点系统

该系统算例中, 负荷增长方式采用节点 4 有功、无功负荷等比例同时增加。PV 节点在无功越限后转变为 PQ 节点, $X_{\text{max}} = 10^{-5}$ 。所得 PV 曲线如图 2。

表 1 列出了此时减负荷的最佳比例。表中各值均为标么值, 负号表示负荷的转移方向 (增负荷)。从表 1 可以发现, 除无功裕度较大的 2 号节点承担了较多的无功负荷转移外, 大部分节点需要卸去无功负荷, 即使承担无功负荷转移的节点, 其无功负荷增长也很小, 而大部分节点均可承担有功负荷的转移。这说明在临界点控制无功比控制有功更有利于使系统远离电压崩溃点。此外, 从表 1 还可以发现, 6 号节点是弱节点, 需要卸大量负荷。

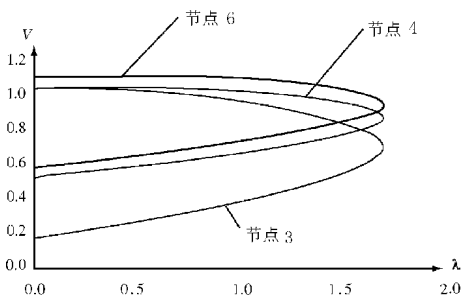


图 2 IEEE14 系统的 PV 曲线图
Fig. 2 The PV curve of IEEE 14 system

表 1 临界点最优控制方向表
Tab. 1 The optimal control direction at the critical point

节点号	有功	无功	节点号	有功	无功
2	- 0.1145	- 0.0529	9	0.0052	- 0.0120
3	0.0802	- 0.0007	10	- 0.0190	0.0137
4	0.0020	0.0673	11	- 0.0081	0.0086
5	- 0.0181	0.0176	12	- 0.0068	0.0149
6	0.0955	0.6468	13	- 0.0253	0.0347
7	- 0.0007	- 0.0007	14	- 0.0246	0.0304
8	- 0.0969	- 0.0007			

表 2 列出了在不同的负荷增长率下采用预估校正技术前后潮流迭代次数的变化。从中可以发现, 不采用预估校正技术时潮流迭代次数明显增加, 而且在接近极限点时潮流无法收敛。程序运算中不采用预估校正技术时, 为避免式 (5) 的最后一列全部为零, 潮流迭代的初始值取前次潮流解附近处于预估方向上的点。

表 2 潮流迭代次数的比较

Tab. 2 The comparison of the iteration numbers

负荷增长率 λ	未采用预估校正技术 时的潮流迭代次数	采用预估校正技术时 的潮流迭代次数
0.4896	8	3
0.7764	7	3
1.0525	7	4
1.3114	7	4
1.5447	8	4
1.7144	不收敛	4

区域负荷同时增长和全网负荷同时增长的 PV 曲线分别见图 3(节点 10至节点 14负荷同时增长时节点 10的 PV 曲线)和图 4(全网负荷同时增长时节点 2 的 PV 曲线)

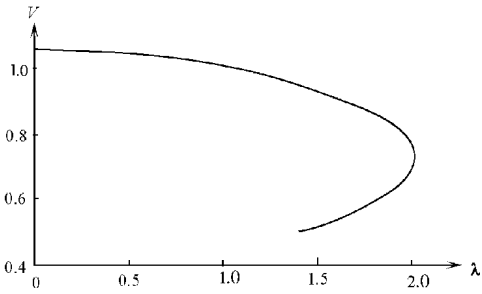


图 3 区域负荷增长时的 PV 曲线图

Fig. 3 The PV curve when the load of certain area increases

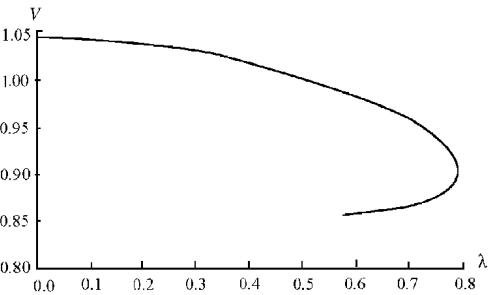


图 4 全网负荷增长时的 PV 曲线图

Fig. 4 The PV curve when the load of the whole network increases

(2) IEEE 5 节点系统

用文献 [1]的参数变换法进行 PV 曲线的计算时该系统在多种负荷增长方式下尚未达到功率极限点便已发散。而采用改进的连续潮流法则均取得满意的结果。以节点 3 的有功单独增长为例,图 5 为文献 [1]的参数变换法,节点 3 的有功增长到原先的 4.000186 倍 ($\lambda = 4.00019$) 时潮流就发散了;图 6 为改进的连续潮流法,当 $\lambda = 6.2580$ 时,系统达到临界点,此时节点 3 的电压幅值的标幺值为 0.5557

实际运算中还发现,多个节点负荷同时增长时,采用文献 [1]方法对雅可比矩阵稀疏性的破坏相当严重;当全网负荷同时增长时,雅可比矩阵甚至没有一个零元素,运算速度大大降低。而运用改进的连续

潮流法则可以避免这些缺点

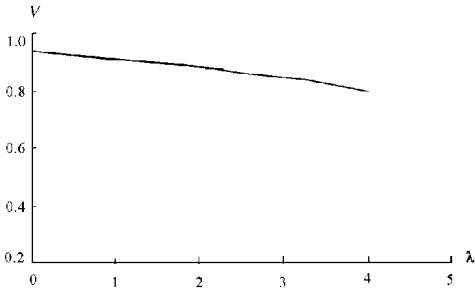


图 5 参数变换法的 PV 曲线图

Fig. 5 The PV curve calculated by the method of parameterization

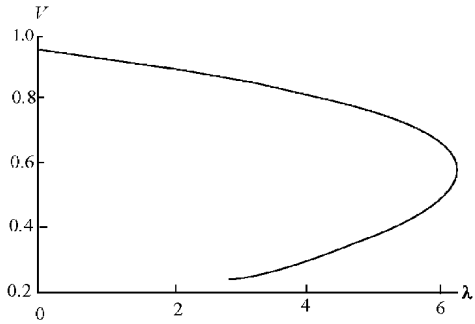


图 6 改进连续潮流法的 PV 曲线图

Fig. 6 The PV curve calculated by the improved continuation method

7 结论

改进的连续潮流法有很大的理论价值和实际意义,它具有以下的优点:

(1)以严格的数学理论为基础,充分利用了延拓法增加的一维空间,成功地解决了功率极限点附近潮流发散问题。可以精确地求得整支 PV 曲线和功率电压的临界值。

(2)运用预估校正技术,加快了程序的运行速度并增强了程序的收敛性

(3)利用系统左特征矢量的性质求取系统邻近崩溃的最优控制方向,有一定的实际意义

(4)考虑了多种系统限制,更接近于实际应用。

8 参考文献

- 1 Jean-Jumeau R, Chiang Hsiao-Dong. Parameterizations of the load-flow equations for eliminating ill-conditioning load flow solutions. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3)
- 2 Chiang Hsiao-Dong, Jean-Jumeau R. A more efficient formulation for computation of the maximum loading points in electric power systems. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2)
- 3 朱振青,杨晓广,周阁 *et al.* 电力系统电压稳定性分析的实用算法. 电网技术, 1998, 22(4)
- 4 周双喜,冯治鸿,杨宁. 大型电力系统 PV 曲线的求取. 电网技术, 1996, 20(8)

(下转第 48 页 continued on pgae 48)

成所需的正、负及零序网络。包括主干网络放射分支网和零序网络查寻及其节点导纳矩阵。

4.4 网络变换化简模块

该模块将已有网络进行消元变换,化简为仅保留电源节点与短路节点的等效网络

4.5 短路电流计算曲线查询模块

有限容量电源提供的短路电流,通常用短路电流计算曲线查得。本软件将短路电流计算曲线数字化后预先存于计算机内,采用电抗和时间双向非线性插值法求取任意时刻的短路参数

5 功能简介

本软件能计算下列各类故障电流:

- (1) 0.4~500kV 电网给定任意时刻的短路电流、短路容量、短路冲击电流及短路电流分布;
- (2) 单相、两相及两相接地短路电流;
- (3) 短路非周期分量电流;
- (4) 大型同步及异步电动机的反馈电流;
- (5) 矿井电网 127~1200V 的三相及两相短路电流;
- (6) 中性点不接地电网的单相接地电容电流。

6 算例比较

将图 4 所示某电厂系统^[3]作为例题计算 220kV 母线(9 节点)的三相、两相及单相短路电流。本软件的算法与现有全网矩阵算法对比,如表 1 所示。

表 1 算法比较

项 目	主干网法	全网矩阵法	两种方法的比较
节点导纳矩阵阶数	18	43	1: 2.4
矩阵元素占内存量 /B	739×4	3698×4	1: 5
主网方程数	36	86	1: 2.4
同机环境下运行时间 /s	20	84	1: 4.2
人工准备数据时间 /h	约 0.5	约 5(用阻抗输入)	1: 10

由表 1 可见,本文算法的优点显而易见。上述图

(上接第 40 页 continued from page 40)

5 雷晋干,马亚南.分枝问题的逼近理论与数值方法.武汉:武汉大学出版社,1989

6 Dobson I, Liu Liming. Computing an optimum direction in control space to avoid saddle node bifurcation and voltage collapse in electric power systems. IEEE Trans on Automatic Control, 1992, 37(10)

7 Chiang Hsiao-Dong, Flueck A J, Shah K S et al. CPFLOW: a practical tool for tracing power system steady-state stationary

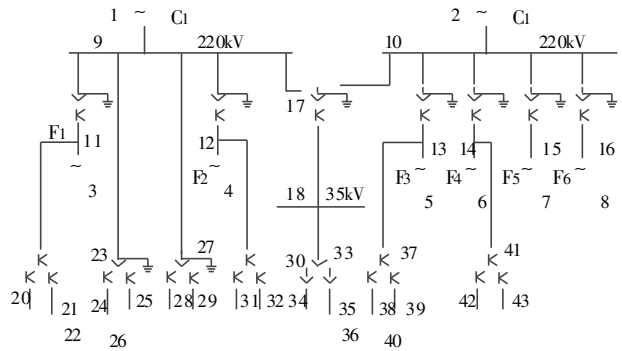


图 4 短路电流计算结线图
Fig. 4 Connection graph of short circuit calculation

例中,所有 6.3kV 系统负荷支路均未列入,否则全网节点数将会更多,而主干网依旧,对比结果的数值也更大

7 结语

本文介绍的多功能短路电流计算软件全面考虑了地区电网及大量厂矿电网的特点和实际需要,数学模型概念清晰、自动化程度较高,对放射式分支路较多的电网能显著节省机时和内存,具有实用意义。

该软件用 Quick Basic 与 C 语言编制,已在众多设计院、供电局、厂矿与学校得到应用,受到用户的欢迎,并已由华中理工大学出版社出版发行。

8 参考文献

1 冯林桥.工矿企业开式电网计算机算法数学模型及程序实现.湘潭矿业学院学报,1993,(9): 52~54

2 冯林桥.短路电流计算的节点导纳矩阵算法.电力技术,1989,(11): 20~24

3 西北电力设计院.电力工程电气设计手册.北京:水利电力出版社,1989

收稿日期: 1998-06-25;改回日期: 1999-02-08

冯林桥 副教授,从事电力系统状态分析及其微机应用方面的教学与科研,发表论文、著作、软件 20 余篇。

袁重光 工程师

许文玉 副教授

behavior due to load and generation variations. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2)

收稿日期: 1998-10-15;改回日期: 1999-01-26

祝达康 硕士研究生

程浩忠 博士,教授,博士生导师,系主任,研究方向为电力系统电压稳定、规划、谐波等。