

电压稳定分析的二阶概率连续潮流法

宗秀红¹, 王克文¹, 张建芬¹, 董泰福²

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南电力试验研究所, 河南 郑州 450052)

摘要: 将概率潮流与二阶连续潮流(QCPF)相结合,在QCPF计算中考虑负荷变化的彼此相关性。节点电压取直角坐标形式,确定了二阶概率连续潮流(PCPF)的相关算式。在正态分布的 ± 4 个标准差下,由求得的各点电压的分布特性,确定出PV曲线的分布范围。所得算法在IEEE57节点的标准算例上进行了分析。

关键词: 电压稳定; 概率潮流; 连续潮流法; 临界点; PV曲线

中图分类号: TM714.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)08-0001-04

1 引言

在电力系统电压稳定性的静态法分析中,主要关心的是表征功率极限和电压临界值的鞍节点,即临界点或崩溃点,临界点的求取方法有基于常规潮流方程的直接法^[1-3],以及基于不断增加负荷的连续潮流法^[3-10]。文献[3,4]对连续潮流法进行了系统而详细的阐述。

在使用直接法^[1-3]时,可通过建立优化问题直接求出临界点^[1],也可根据潮流方程解的个数变化以及多解之间的距离来判断系统接近极限运行状态的程度,即潮流多解法(PMLFS)^[2]。

在连续潮流法中,通常引入一负荷参数并采用预估校正技术来克服临界点处雅可比矩阵的奇异^[3-9]。由于负荷参数的引入,有必要补充一维方程,针对这一点,文献[3-10]分别采用了不同的方法进行潮流方程的扩展。其中文献[10]采用直角坐标形式的节点电压,并在潮流方程展开式中保留二阶项,形成一种保留二阶项的连续潮流算法(QCPF)。

这些潮流算法都是基于确定的系统运行方式和恒定的网络参数。考虑多种系统运行方式及负荷变化相关性的影响,可以利用概率理论,即概率潮流计算^[11,12]。概率潮流能够在节点注入功率运行曲线的基础上,利用协方差计及负荷变化的彼此相关性,得到待求量分布的数字特征及条件概率。

本文将QCPF算法引入到概率环境下,确定了相关算式,尝试在QCPF中考虑负荷变化的彼此相关性,通过概率理论将多系统运行方式的计算融合在一次计算之中。所得PV曲线不再是简单的单一

曲线,而是计及负荷波动相关性的PV曲线的分布范围,更接近实际。

2 二阶预估与校正

预估校正是连续潮流法的关键环节,如图1所示,一阶初值预估多是在上一负荷点的基础上沿着切线的方向选取一定步长进行初值预估,即从图1的A点出发得到 B_0 点。在此基础上,文献[10]采用二阶预估校正技术,从A点出发得到 B_0 点。显然,预估点 B_0 比 B_0 更接近准确值。然后采用局部参数连续化方法^[4],并结合二阶潮流技术,迭代求解潮流方程,从而实现对预估值的校正。

由算式分析得出^[10],二阶预估环节与校正环节具有相似的表达式,可由同一过程实现。

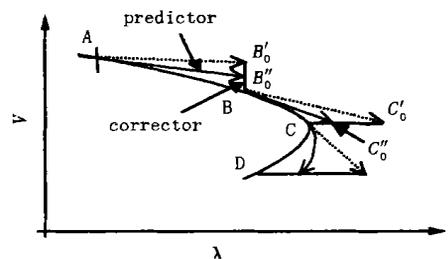


图1 二阶预估校正示意图

Fig. 1 Estimation correction of QCPF

3 二阶概率连续潮流

3.1 概率潮流算式

对一 n 节点的电力系统,节点电压采用直角坐标形式 $X = [V_1, V_2, \dots, V_{2N}]^T$,则节点注入向量 W 为

$$W = W(X) = W(V_i V_j) \quad (i = 1, 2, \dots, 2N; j = 1, 2, \dots, 2N) \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50177028)。

相应的概率潮流算式为^[12]

$$\begin{cases} \bar{W} = J_X \bar{X} & (2a) \\ C_X = J_X^{-1} C_W (J_X^{-1})^T & (2b) \end{cases}$$

式中： \bar{W} 和 \bar{X} 分别为节点注入和节点电压均值的偏差； C_W 和 C_X 分别为节点注入和节点电压的协方差矩阵； J_X 为雅可比矩阵。

式(2a)为均值计算的修正方程,由节点注入计算节点电压;式(2b)为方差计算方程,由 C_W 计算 C_X 。式(2a)构成内循环迭代,式(2b)构成外循环。

由于在确定 \bar{W} 时计及了 C_X 的影响,而 C_X 的计算又依赖于 \bar{X} 的值。所以内外循环的使用计及了均值与方差的相互影响。

3.2 二阶概率连续潮流算式的确定

由连续潮流算法知,必须引入一负荷参数。

$$0 \text{ critical} \quad (3)$$

式中： $=0$ 对应于基本状态， $= \text{critical}$ 对应临界状态。

设 b 为负荷增长方式,并且有 $b = \bar{W}_0$,则相应负荷水平下给定的节点注入量的期望为

$$\bar{W}_S = \bar{W}_0 + b = (1 +) \bar{W}_0 \quad (4)$$

系统潮流方程可描述为

$$F(X,) = \bar{W}_S - W(X) = \bar{W}_0 - W(X) + b = 0 \quad (5)$$

式中： $F(X,)$ 为节点注入偏差列向量,即PQ节点的 \bar{P}_i 、 \bar{Q}_i 以及PV节点的 \bar{P}_i 、 \bar{V}_i^2 ； $W(X)$ 为节点向网络注入的功率列向量。

将 $F(X,)$ 在 $(X_0,)$ 点处按泰勒级数展开并保留二阶项得

$$F(X,) = F(X_0 + X,) = \bar{W}_0 - W(X_0) + b + J_{X_0} \begin{bmatrix} \bar{X} \\ - \end{bmatrix} + \bar{W}(X) \quad (6a)$$

式中： $J_{X_0} = [J_{X_0} | b]$ 为雅可比矩阵， J_{X_0} 为不计 $-$ 时的雅可比矩阵。注意到二阶项中不含 $-$ 。

由于负荷参数的引入,设补充的一维方程为

$$f(X,) = 0 \quad (6b)$$

并满足二阶展开式的完整性

$$\bar{f}(X,) = \bar{f}(X_0,) + [f_X, f] \begin{bmatrix} \bar{X} \\ - \end{bmatrix} + \bar{W}_1(X,) \quad (6c)$$

式中： $[f_X, f]$ 为 $\bar{f}(X,)$ 在 $(X_0,)$ 处的一阶灵敏度向量； $\bar{W}_1(X,)$ 为二阶项。

由式(6a)和式(6c)可得PCPF法的修正方程式

$$J_{X_0} \begin{bmatrix} \bar{X} \\ - \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{F}(X,) \\ \bar{f}(X,) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{W}_0 - \bar{W}(X_0) + b \\ \bar{f}(X_0,) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{W}(X) \\ \bar{W}_1(X,) \end{bmatrix} \quad (7)$$

简写为

$$\bar{W} = J_{X_0} \begin{bmatrix} \bar{X} \\ - \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{式中: } J_{X_0} = \begin{bmatrix} J_{X_0} | b \\ f_X | f \end{bmatrix}$$

相应的迭代算式为

$$\begin{bmatrix} \bar{X}^{(r+1)} \\ -^{(r+1)} \end{bmatrix} = (J_{X_0}^{-1}) \cdot \left\{ \begin{bmatrix} \bar{F}(X,) \\ \bar{f}(X,) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{W}_0 - \bar{W}(X_0) + b \\ \bar{f}(X_0,) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{W}(X^{(r)}) \\ \bar{W}_1(X^{(r)},) \end{bmatrix} \right\} \quad (9)$$

迭代过程结束于

$$F_m = \max | F_i | \quad (10)$$

式中： F_m 为允许精度。

则相应的PCPF法的校正算式可表示为

$$\begin{cases} \bar{W} = J_{X_0} \begin{bmatrix} \bar{X} \\ - \end{bmatrix} & (11a) \\ C_X = (J_{X_0}^{-1})^T C_W (J_{X_0}^{-1}) & (11b) \end{cases}$$

式中： $C_W = (1 +)^2 C_{W_0}$ 。

3.3 分布范围的确定

使用概率连续潮流计算,可得每一负荷水平下节点电压的统计分布特征。以某一负荷水平下的 V_i 为例,设有均值 \bar{V}_i 及标准差 δ_i ,则 V_i 以十分接近1的概率分布在以均值 \bar{V}_i 为中心的 $\pm(3 \sim 4)$ 个标准差的范围内,如图2所示,其中P. d. f为概率密度函数。

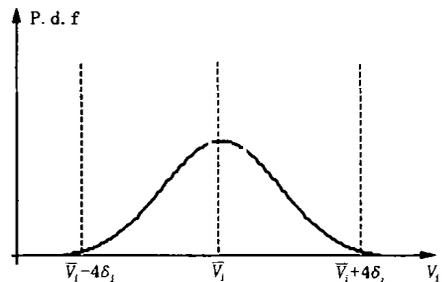


图2 正态概率分布示意图

Fig.2 Normal probabilistic distribution

由 PCPF 的校正算式,采用二阶预估校正技术和垂直水平迭代法^[10],可确定出 PV 曲线上每一点的分布范围,从而构成 PV 曲线的带状分布范围,如第 5 节中的图 4。

4 实现步骤及稀疏技术

(1) 初始化:用常规的概率潮流法^[12]计算初始运行点。

(2) 确定步长 Δ 和连续参数^[10],如果连续参数是 Δ ,否则转(4)。

(3) 进行 \bar{V}_k 为定值的垂直迭代,转(2)。

(4) 进行 \bar{V}_k 为定值的水平迭代,并判断 $V_{m+1} - V_m$ 的大小,下标 m 为负荷水平。如果 $V_{m+1} - V_m < 0$,则已越过临界点,输出结果;如果 $V_{m+1} - V_m > 0$,转(2)。

如果需 PV 曲线下半支,达到临界点后继续计算即可。

随着潮流计算技术的成熟,常规潮流及概率潮流计算中已有明确的稀疏处理方式,如对节点导纳阵 Y 、雅可比矩阵 J 的处理。本文中除了这些最基本的稀疏处理技术外,主要是对恒定 J 的因子表处理。与 PQ 分解中的方法类似,通过一次高斯消去计算形成 J 的因子表。然后在求解式(11)时,直接利用因子表的简单前回代。

5 算例分析

以 IEEE57 节点系统为例,利用文献[13]所列的标准日运行曲线来构成有功和无功的样本曲线。因为原始的无功曲线相对于有功曲线较为平坦,这里假设 $Q_{i,t} = (1 + 2 \times P_{i,t})/3$,其中 $P_{i,t}$ 和 $Q_{i,t}$ 分别是节点 i 对应的标准日运行曲线的第 t 个时间段的有功和无功。节点注入量和 PV 节点电压的均值和方差可以通过它们的样本曲线获得。

在该算例中,各个负荷节点和发电机节点均采用不同的日负荷曲线。取 $\epsilon = 10^{-7}$,其中 ϵ 为节点功率偏差的精度要求。考虑负荷电压特性 $P_{Li} = P_{L,i0} (V_i/V_{i0})^a$, $Q_{Li} = Q_{L,i0} (V_i/V_{i0})^b$, $a = 1.38$, $b = 3.22$ ^[14]。则整体负荷增长时节点 31 的 PV 曲线计算结果示于表 1 和图 3。

图 4 为 IEEE57 节点系统采用 QCPF 法时,节点 31 的 PV 曲线图。计算结果为整体负荷增长时, $\lambda = 0.8721$ 时达到 PV 曲线的拐点。

由表 1 和图 3 可以看出,整体负荷增长时,IEEE57 节点系统的负荷增长率为 $\lambda = 0.5021$ 时达到

PV 曲线的拐点;之后,负荷开始下降,电压继续降低,即 PV 曲线的下半支。在正态分布的假设下,对任一负荷水平均考虑 ± 4 个标准差,可以计算出每一负荷水平下的电压分布范围,从而构成 PV 曲线的分布范围。

与 QCPF 法相比,PCPF 法计算的临界点更为保守。这与理论计算相符。

表 1 IEEE57 节点系统 PV 曲线数据

Tab. 1 PV curve data of the IEEE 57-bus system

	\bar{V}_{31}	V_{31max}	V_{31min}
0	0.9547	1.0492	0.8602
0.1652	0.9115	1.0446	0.7785
0.3217	0.8614	1.0408	0.6819
0.4680	0.7930	1.0349	0.5511
0.4841	0.7806	1.0333	0.5280
0.4972	0.7681	1.0318	0.5044
0.5064	0.7554	1.0304	0.4805
0.5111	0.7427	1.0290	0.4563
0.5099	0.7298	1.0278	0.4318
0.5021	0.7169	1.0272	0.4067
0.4849	0.7041	1.0271	0.3810

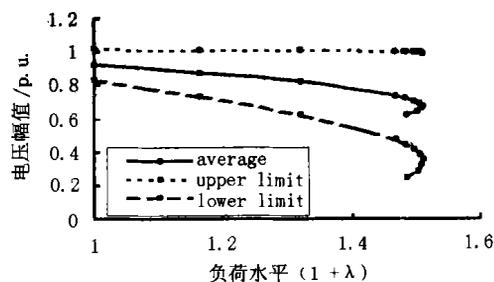


图 3 由 PCPF 计算的节点 31 的 PV 曲线

Fig. 3 PV curve of bus 31 obtained by PCPF

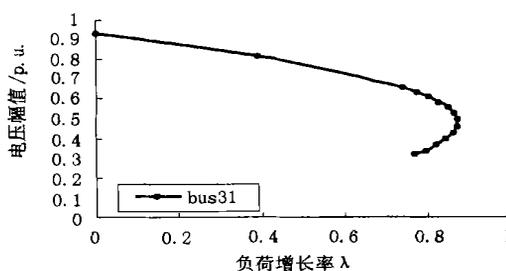


图 4 由 QCPF 计算的节点 31 的 PV 曲线

Fig. 4 PV curve of bus 31 obtained by QCPF

6 结论

将概率潮流算法与 QCPF 法结合起来,构成了 PCPF 算法。与 QCPF 法相比,PCPF 考虑了更多的不确定因素,如负荷变化等。在正态分布的假设下,考虑 ± 4 个标准差,可求得任一负荷水平下节点电压的分布范围,从而求得 PV 曲线的分布范围。此外,由 PCPF 所求得稳定极限比 QCPF 法保守。

参考文献:

- [1] Obadina, Berg G J. Determination of Voltage Stability Limit in Multimachine Power Systems [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1988, 3(4):1545-1554.
- [2] Nam H K, Kim D J and Moon C J. Calculation of a Pair of Multiple Load Flow Solutions and Voltage Collapse Point for On-line Assessment of Power System Voltage Stability [J]. Trans. of Korean Institute of Electrical Engineers, 1994, 43(8):1226-1238.
- [3] Claudio A Canizares, Fernando L Alvarado. Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1):1-8.
- [4] Venkataramana Ajarapu, Colin Christy. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 17(1):416-423.
- [5] 周双喜,冯治鸿,杨宁. 大型电力系统 PV 曲线的求取 [J]. 电网技术, 1996, 20(8):4-8.
- [6] 祝大康,程浩忠. 求取电力系统 PV 曲线的改进连续潮流法 [J]. 电网技术, 1999, 23(4):37-40.
- [7] 江伟,王成山. 电力系统输电能力研究中 PV 曲线的求取 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(2):9-12.
- [8] 郭瑞鹏,韩祯祥. 电压稳定分析的改进连续潮流法 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(14):13-16.
- [9] 宋文南,李树鸿,张尧. 电力系统潮流计算 [M]. 天津:天津大学出版社,1990:101-128.
- [10] 宗秀红,王克文,杨宛辉,等. 保留二阶项的连续潮流算法. 郑州轻工业学院院报,2003,18(2):6-10.
- [11] Dopazo J F, Kitiu O A, Sasson A M, Stochastic Load Flows [J]. IEEE Trans Power Apparatus and Systems, 1975, 94(2):299-304.
- [12] Wang K W, Tse C T, Tsang K M. Algorithm for Power System Dynamic Stability Studies Taking Account of the Variation of Load Power [J]. Electric Power Systems Research, 1998, 46(8):221-227.
- [13] 杨秀台. 电力网线损的理论计算和分析 [M]. 北京:水利电力出版社,1985.
- [14] Chung C Y, Wang K W, Cheung C K, Tse C T, David A K. Machine and load modeling in large scale power industries. Proceedes of Dynamic Modeling Control Applications for industry workshop [J]. IEEE industry applications society, Vancouver, Canada, April, 1998, (4):7-15.

收稿日期: 2003-01-08; 修回日期: 2003-03-03

作者简介:

宗秀红(1978-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定性分析与控制;

王克文(1964-),男,博士,研究方向为电力系统稳定性分析与控制;

张建芬(1978-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定性分析与控制。

Approach of quadratic probabilistic continuous power flow in voltage stabiling analysis

ZONG Xiur-hong¹, WANG Ke-wen¹, ZHANG Jiam-fen¹, DONG Tai-fu²

(1. School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Combination of the probabilistic power flow and the quadratic continuous power flow(QCPF) approaches makes it possible to consider the dependencies of load variations in the QCPF calculation. With nodal voltages used in the rectangular form, equations for the proposed quadratic probabilistic continuation power flow(PCPF) were derived. Under the accepted limits of $\pm 4\sigma$ (standard deviation) for the Normal distribution, the distribution ranges of PV -curves were determined from the computed statistic characteristics of nodal voltages. This provides a static probabilistic voltage stability analysis. The presented approach was studied on the IEEE 57 bus testing system.

Key words: voltage stability; probabilistic power flow; continuous power flow; critical point; PV curve