

文章编号:1004-1478(2003)02-0006-05

保留二阶项的连续潮流法

宗秀红¹, 王克文¹, 杨宛辉¹, 谢志棠²

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 香港理工大学 电机系, 香港)

摘要:将保留二阶项的普通潮流算法融入电压稳定性分析的连续潮流计算,构成了保留二阶项的连续潮流计算,并分析讨论了算式的具体特点.节点电压采用直角坐标形式,节点功率的二阶表达接近于完整,每个负荷水平下的二阶状态估计值也相当接近其准确值.由于雅可比矩阵恒定,可充分利用稀疏技术.所得算法对IEEE30节点和IEEE57节点系统进行计算,结果表明:就一次计算而言,保留二阶项法的所需时间为常规一阶法的1/2~2/3,如反复进行连续计算,可大大减少计算量,提高运算速度.

关键词:连续潮流法;临界点;PV曲线;电压稳定性

中图分类号:TM714.2

文献标识码:A

Continuation power flow with the second order terms retained

ZONG Xiu-hong¹, WANG Ke-wen¹, YANG Wan-hui¹, XIE Zhi-tang²

(1. School of Electr. Eng., Zhengzhou Univ., Zhengzhou 450002, China;

2. Dept. of Electr. Eng., Hongkong Polytechnic Univ., Hongkong, China)

Abstract: By using the second order power flow equations in voltage stability analysis, an algorithm of the second order continuation power flow is formulated. Because nodal voltages are used in the rectangular form, nodal power equations can be completely expanded with the second order terms retained. It is possible to fully use the advantage of the second order technique. Based on the investigation for the second order representation, the estimation and correction for the initial point in each load level are effectively established. Therefore, the constant Jacobian matrix and corresponding factor-table technique can be employed, which largely reduces the computational requirement. The presented approach is studied on the IEEE30-bus and IEEE57-bus testing systems. The results indicate that, for one time computation, the needed time for QCPF is about 1/2 ~ 2/3 of that for the constant continuation power flow. When continuous computation is made times without number, the computational requirement will be greatly reduced and the speed will be improved.

Key words: continuation power flow; point of collapse; PV curve; voltage stability

0 引言

在电力系统电压稳定性分析中,表征功率极限和电压临界值的鞍节点,即临界点或崩溃点是个重要指

收稿日期:2002-09-11

基金项目:国家自然科学基金项目(50177028)

作者简介:宗秀红(1978—),女,河南省郑县人,郑州大学硕士研究生,主要从事电力系统稳定分析与控制研究;

王克文(1964—),男,山西省平陆县人,郑州大学副教授,博士,主要从事电力系统稳定分析与控制研究。

标,临界点的求取方法有基于常规潮流方程的直接法以及基于不断增加负荷的连续潮流法。

直接法中,有通过建立优化问题直接求出临界点的^[1],也有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程度的,即潮流多解法(PMLFS)^[2]。而文献[3]则分别描述了基于对临界点处奇异雅可比矩阵进行分解的崩溃点法(PoC method)以及连续潮流法,并在连续潮流法中系统地阐述了自动变步长的确定。

在连续潮流法中,通常引入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,需要补充一维方程。文献[4]是通过选取并固定连续参数值的方法来补充方程,并采用了垂直-水平迭代技术,简单而有效地避开了临界点雅可比矩阵的奇异,从而求得整支PV曲线。在此基础上,文献[3,5]增加了一维潮流解与预估值的正交方程,但在临界点处可能迭代不收敛。鉴于此,文献[6]以弧长公式作为新的一维方程,文献[7]提出了电压定步长下降的控制思想,文献[8]则用类似PV节点的处理给出了更为明确的解释。

在现有连续潮流法的基础上,本文拟介绍二阶连续潮流算法,并讨论迭代算式及预估-校正环节的算式特点。

1 二阶连续潮流

1.1 基本符号和算式

为采用不断增加负荷的连续潮流法,引入负荷参数 λ ($0 \leq \lambda \leq \lambda_{\text{critical}}$)。 $\lambda = 0$ 对应于初始状态, $\lambda = \lambda_{\text{critical}}$ 对应临界状态。假设系统共有 n 个节点,前 m 个为PQ点,最后一个为平衡点,其余为PV点。初始运行条件下的节点注入列向量可构成

$$\mathbf{W}_{S0} = [P_{S10}, Q_{S10}, \dots, P_{Sm0}, Q_{Sm0}, P_{Sm+1,0}, V_{Sm+1,0}^2, \dots, P_{Sn-1,0}, V_{Sn-1,0}^2]^T \quad (1)$$

其中, $P_{S10} = P_{G10} - P_{L10}$; $Q_{S10} = Q_{G10} - Q_{L10}$; V_{S10} 对应于PV电压。下标G,L分别代表发电机和负荷。

考虑整体负荷增长时,取列向量

$$\mathbf{b} = [P_{S10}, Q_{S10}, \dots, P_{Sm0}, Q_{Sm0}, P_{Sm+1,0}, 0, \dots, P_{Sn-1,0}, 0] \quad (2)$$

则节点注入功率为

$$\mathbf{W}_S = \mathbf{W}_{S0} + \lambda \mathbf{b} \quad (3)$$

相应的潮流方程可写为

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, \lambda) = \mathbf{W}_S - \mathbf{W}(\mathbf{X}) = \mathbf{W}_{S0} - \mathbf{W}(\mathbf{X}) + \lambda \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ 为节点功率偏差列向量; $\mathbf{W}(\mathbf{X})$ 为节点计算功率列向量; \mathbf{X} 为节点电压列向量。

为得到二阶连续潮流计算的修正方程,将 $\mathbf{F}(\mathbf{X}, \lambda)$ 在 $(\mathbf{X}_0, \lambda_0)$ 点处按泰勒级数展开并保留二阶项

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, \lambda) = \mathbf{F}(\mathbf{X}_0 + \Delta \mathbf{X}, \lambda_0 + \Delta \lambda) = \mathbf{W}_{S0} - \mathbf{W}(\mathbf{X}_0) + \lambda_0 \mathbf{b} + \mathbf{J}_0' \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} + \text{diag}(\Delta \mathbf{X}) \mathbf{H} \Delta \mathbf{X} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{J}_0' = [\mathbf{J}_0 | \mathbf{b}]$ 为雅可比矩阵,其中 \mathbf{J}_0 为不计 λ 时的雅可比矩阵,二阶项中不含 $\Delta \lambda$; \mathbf{H} 为海森阵。

1.2 二阶修正方程

恒功率负荷模型下,⑤~⑦式中的二阶项与 $\mathbf{W}(\mathbf{X})$ 有完全一致的表达式,即 $\mathbf{W}(\Delta \mathbf{X})$ 。由于负荷参数的引入,方程数少于变量数,必须补充一维方程,并满足二阶展开式的完整性。记补充的一维方程为

$$f(\mathbf{X}, \lambda) = 0 \quad (6)$$

其二阶展开式为

$$f(\mathbf{X}, \lambda) = f(\mathbf{X}_0, \lambda_0) + [f_{\mathbf{X}}', f_{\lambda}'] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} + \mathbf{W}_1(\Delta \mathbf{X}, \Delta \lambda) \quad (7)$$

式中, $\mathbf{W}_1(\Delta \mathbf{X}, \Delta \lambda)$ 为二阶项。则由⑤式和⑦式可得二阶修正方程

$$\mathbf{J}_0'' \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}(\mathbf{X}, \lambda) \\ f(\mathbf{X}, \lambda) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{S0} - \mathbf{W}(\mathbf{X}_0) + \lambda_0 \mathbf{b} \\ f(\mathbf{X}_0, \lambda_0) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{W}(\Delta \mathbf{X}) \\ \mathbf{W}_1(\Delta \mathbf{X}, \Delta \lambda) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{J}_0'' = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_0' & \mathbf{b} \\ f_{\mathbf{X}}' & f_{\lambda}' \end{bmatrix}$ 。相应的迭代算式为

$$\begin{bmatrix} \Delta X^{(r+1)} \\ \Delta \lambda^{(r+1)} \end{bmatrix} = J_0^{(r)-1} \left\{ \begin{bmatrix} F(X, \lambda) \\ f(X, \lambda) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} W_{s0} - W(X_0) + \lambda_0 b \\ f(X_0, \lambda_0) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} W(\Delta X^{(r)}) \\ W_1(\Delta X^{(r)}, \Delta \lambda^{(r)}) \end{bmatrix} \right\} \quad (9)$$

迭代过程结束于 $F_m = \max\{|F_i|\} \leq e$ (e 为允许精度). 与一阶潮流修正方程式相比, ⑧式右侧多了一个二阶项. 正是该二阶项的保留, 迭代过程可以取恒定的 $J_0^{(r)}$, 同时使得在连续潮流的初值预估-校正环节中, 预估值相当接近其准确值. 直角坐标形式下, 二阶项所引起的附加计算量相当小.

1.3 初值预估与校正

预估-校正连续潮流法的关键环节. 目前多采用在上一负荷点的基础上沿着切线的方向选取一定步长的方法进行初值预估(如图1中的 B_0 点), 并固定某参数不变对潮流方程进行迭代求解. 通过预估, 计算初始点离下一负荷水平点的准确值较近, 从而减少了校正环节所需的迭代次数.

由 PV 曲线特性可知, 初始阶段负荷增长较快, 而接近临界点时电压的变化则相对较快. 为快速获得 PV 曲线, 本文采用文献[4]中的垂直-水平迭代法, 即选取切点方向上最大分量对应的变量为连续参数, 并通过固定连续参数值的方法迭代求解. 连续参数的确定详见文献[4].

1.3.1 二阶初值预估 以垂直迭代为例, 二阶预估-校正示意图如图2所示, 在基本运行状态 A 求出后, 对下一负荷水平进行二阶预估校正. 首先, 对④式求全微分有

$$[F_X F_\lambda] \begin{bmatrix} dX \\ d\lambda \end{bmatrix} = J_0' \begin{bmatrix} dX \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

其中, F_X, F_λ 为相应的一阶导数矩阵. 该式的方程数少于变量数, 因此可通过固定 $d\lambda = \pm 1$ 来确定切线方向 t' . PV 曲线上半支取 $d\lambda = 1$, 下半支取 $d\lambda = -1$, 然后, 对该切线进行标准化得 $t = [dX, d\lambda] = \frac{t'}{\max\{|t_i'|\}}$, 然后, 按照自动变步长的方法确定下一负荷水平

$$\lambda = \lambda_0 + \sigma \cdot d\lambda \quad (11)$$

其中, σ 为步长(步长的确定详见文献[3]). 负荷水平确定后, 初值预估的具体实现依据⑨式进行. 此时⑨式中 $\lambda = \lambda_0 + \sigma \cdot d\lambda$ 已知, 相当于增加了一维方程

$$f(X, \lambda) = \lambda - (\lambda_0 + \sigma \cdot d\lambda) = 0 \quad (12)$$

设 (X_0, λ_0) 为 PV 曲线上 A 点的准确值, 则有

$$W_{s0} - W(X_0) + \lambda_0 b = 0 \quad f(X_0, \lambda_0) = 0$$

又 $(\Delta X^{(0)}, \Delta \lambda^{(0)}) = 0$, 则⑨式中的二阶项为 0. 所以对⑨式的一次迭代求解相当于求 A 点的切线, 这与⑩式的切线求解一致, 且有 $\begin{bmatrix} \Delta X_0^{(1)} \\ \Delta \lambda_0^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma \cdot dX \\ \sigma \cdot d\lambda \end{bmatrix}$, 迭代后有 $\begin{bmatrix} X_0' \\ \lambda_0' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_0^{(1)} \\ \Delta \lambda_0^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma \cdot dX \\ \sigma \cdot d\lambda \end{bmatrix}$. 其中, (X_0', λ_0') 即图2中的 B_0' 点, 相当于图1中切线方向的预测点 B_0 .

考虑二阶项的影响, 即 $\begin{bmatrix} \Delta X^{(1)} \\ \Delta \lambda^{(1)} \end{bmatrix} = J_0^{(1)-1} \left[\begin{bmatrix} W(\Delta X_0^{(1)}) \\ W_1(\Delta X_0^{(1)}, \Delta \lambda_0^{(1)}) \end{bmatrix} \right]$, 从而有二阶预估值 $\begin{bmatrix} X_0'' \\ \lambda_0'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X^{(1)} \\ \Delta \lambda^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X^{(1)} \\ \Delta \lambda^{(1)} \end{bmatrix}$. 其中, (X_0'', λ_0'') 即图2中的 B_0'' 点. 由以上计算可知, 考虑二阶项的影响与相当于切线方向上预估值的求解只是对⑨式的分解, 故可将二者结合起来. 在补充方程⑫的基础上, 令 $(\Delta X^{(0)}, \Delta \lambda^{(0)}) = (\sigma dX, \sigma d\lambda)$, 直接对⑨式迭代求解出 $(\Delta X^{(1)}, \Delta \lambda^{(1)})$, 进行二阶预估.

1.3.2 二阶校正算式 PV 曲线初始阶段 λ 被选作连续参数, 故校正中仍以⑫式为补充方程. 由于是二阶迭代, 故仍可用 A 点的雅可比矩阵, 只需让初始的校正量 $(\Delta X^{(0)}, \Delta \lambda^{(0)})$ 等于预估中的附加量 $(\Delta X^{(1)}, \Delta \lambda^{(1)})$ 即可, 然后对⑨式进行迭代求解直至收敛为止. 设求得的结果为 $(\Delta X_0^{(r+1)}, \Delta \lambda_0^{(r+1)})$, 则对预测点 B_0'' 的校正值为

$$\begin{bmatrix} \Delta X^{(r+1)} \\ \Delta \lambda^{(r+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_0^{(r+1)} \\ \Delta \lambda_0^{(r+1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X^{(0)} \\ \Delta \lambda^{(0)} \end{bmatrix}, \text{ 由此可得 } B \text{ 点的准确值 } \begin{bmatrix} X^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0' \\ \lambda_0' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X^{(r+1)} \\ \Delta \lambda^{(r+1)} \end{bmatrix}.$$

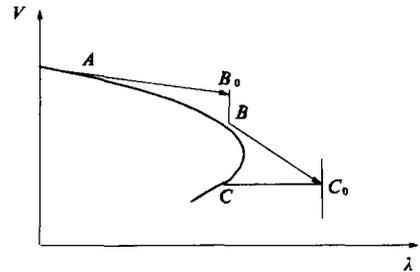


图1 预估-校正示意图

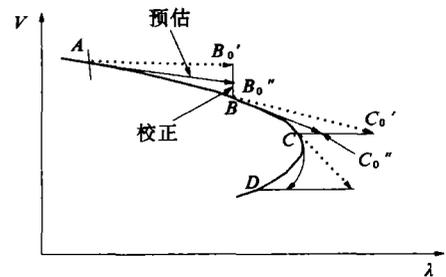


图2 二阶预估-校正示意图

1.3.3 改进 预估中的迭代算式与校正中的迭代算式完全一致,且校正中的初始校正量与预估中的附加值也一致.又由于采用的是二阶迭代,雅可比矩阵完全相同,因此可将二者结合起来,把预估过程融入校正过程.在补充方程②式的基础上,以 $A(X_0, \lambda_0)$ 为初始点,并以切线方向上一定步长的切向量 $\sigma t = (\sigma \cdot dX, \sigma \cdot d\lambda)$ 为初始的校正量

$$(\Delta X^{(0)}, \Delta \lambda^{(0)}), \text{对②式迭代求解出} (\Delta X^{(r+1)}, \Delta \lambda^{(r+1)}), \text{得准确值} \begin{bmatrix} X^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X^{(r+1)} \\ \Delta \lambda^{(r+1)} \end{bmatrix}.$$

1.3.4 水平迭代 水平迭代中,除了所选的连续参数和补充方程与垂直迭代不同外,其他与垂直迭代完全相似.由于直角坐标的采用,水平迭代中状态变量 e_k 选作连续参数更为方便.但为使概念上更直观,在选取连续参数后,将对应的节点 k 由 PQ 节点转换成类 PV 节点^[8],同时将雅可比矩阵中节点 k 的无功潮流方程 $\Delta Q_k(X, \lambda) = (1 + \lambda) Q_{sk0} - Q_k(X, \lambda)$ 作为补充方程,并将原来的无功潮流方程替换为电压平衡方程,即 $\Delta V_k^2 = V_k^2 - e_k^2 - f_k^2$,式中的 V_k 对应于垂直迭代中的①式.水平迭代中可表示为 $V_k = V_{k0} + \sigma \cdot dV \approx V_{k0} + \sigma \cdot dX_{2k}$,如此处理可保证扩展后的雅可比矩阵非奇异^[8].PV 曲线的上半支,电压下降负荷增加, $\Delta \lambda > 0$; 而 PV 曲线下半支,电压下降负荷也下降, $\Delta \lambda < 0$. 由此可知,可通过 $\Delta \lambda$ 的正负来判断是否到达临界点.

1.4 实现步骤

1)初始化:用常规的二阶牛顿法^[9]计算初始运行点. 2)确定步长 σ 和连续参数,如果连续参数是 λ 转式②,否则转式③. 3)进行 λ 为定值的垂直迭代,转式①. 4)进行 V_k 为定值的水平迭代,并判断 $\Delta \lambda = \lambda_{kt+1} - \lambda_{kt}$ 的大小(下标 kt 为负荷水平):如果 $\Delta \lambda < 0$,则已越过临界点,输出结果;如果 $\Delta \lambda \geq 0$,转式①. 如果需 PV 曲线下半支,在达到临界点后继续计算.

2 算例分析

在考虑整体负荷增长和单个负荷有功无功同时增长的负荷增长方式的基础上,利用上述所得算法对 IEEE30 节点和 IEEE57 节点系统进行了计算.

1)以 IEEE57 节点系统为例,取 $e = 10^{-7}$,整体负荷增长的计算结果示于表 1 和表 2.

表 1 IEEE57 节点系统 PV 曲线数据

λ	V_{16}	V_{25}	V_{31}	λ	V_{16}	V_{25}	V_{31}
0.0000	1.0134	0.9814	0.9337	0.8714	0.9941	0.6411	0.4937
0.3916	1.0063	0.8907	0.8190	0.8721	0.9940	0.6174	0.4606
0.7404	0.9980	0.7639	0.6568	0.8637	0.9941	0.5935	0.4266
0.7728	0.9971	0.7456	0.6330	0.8463	0.9945	0.5711	0.3937
0.8018	0.9963	0.7265	0.6080	0.8231	0.9951	0.5520	0.3644
0.8269	0.9955	0.7066	0.5819	0.7975	0.9958	0.5364	0.3396
0.8475	0.9949	0.6858	0.5542	0.7690	0.9965	0.5229	0.3170
0.8627	0.9944	0.6640	0.5249				

表 2 迭代次数比较

编号	(A)一阶连续潮流		(B)二阶连续潮流			编号	(A)一阶连续潮流		(B)二阶连续潮流		
	负荷增长率	迭代次数	负荷增长率	内迭代次数	外迭代次数		负荷增长率	迭代次数	负荷增长率	内迭代次数	外迭代次数
1	0	5	0	9	2	9	0.8665	3	0.8714	5	1
2	0.3	11	0.3916	7	1	10	0.8721	3	0.8721	5	1
3	0.6	4	0.7404	9	2	11	0.8500	3	0.8637	5	1
4	0.6593	3	0.7728	5	1	12	0.8370	3	0.8463	5	1
5	0.7080	3	0.8018	5	1	13	0.8201	3	0.8231	5	1
6	0.7558	3	0.8269	5	1	14	0.8012	3	0.7975	5	1
7	0.8015	3	0.8475	5	1	15	0.7845	3	0.7690	5	1
8	0.8415	3	0.8627	5	1						

由表1可以看出,当整体负荷增长时,IEEE57节点系统的负荷增长率 $\lambda = 0.8721$ 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。

表2中的(A),(B)列给出了恒功率负荷模型下的常规一阶连续潮流法与保留二阶项法的迭代次数比较.由表中数据可知,每一负荷水平下,二阶法均需较多的迭代次数.然而,在1.4G CPU速度的微机上,对该算例进行一次高斯消去约需1ms;而在保留二阶项法中,形成 J 的因子表约需1ms,前回代10次左右需1ms.所以,就表中所列计算,(A)列约需90ms,(B)列约需50ms.总体来说,保留二阶项法的所需时间为常规一阶法的1/2~2/3.尽管就一次计算而言,节约的时间有限,但在反复进行连续计算时(例如电压稳定控制中),二阶法的优越性更为明显。

2)IEEE57节点系统节点12的有功和无功同时增加,以及IEEE30节点系统整体负荷增加的PV曲线图分别如图3和图4所示.除了整体负荷增加时更先达到临界点外,所得结论与前类似。

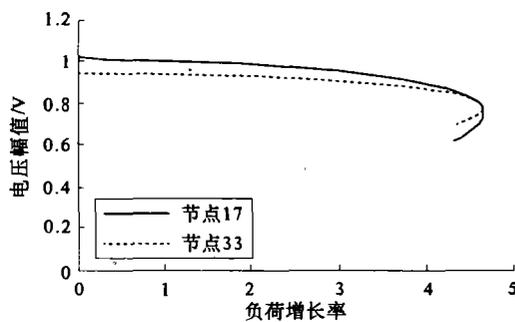


图3 IEEE57节点系统PV曲线图

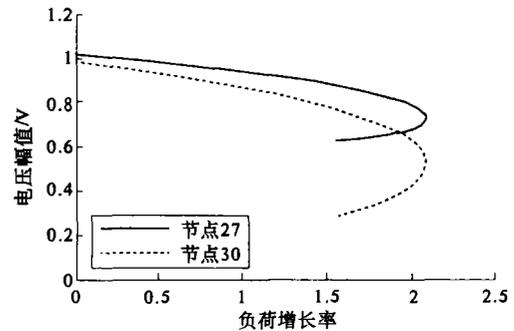


图4 IEEE30节点系统PV曲线图

3 结论

本文介绍了一种保留二阶项的连续潮流法.在分析了二阶算式的基础上,将初值预估与校正环节有机地结合在一起.节点电压采用直角坐标表示形式,保证了潮流方程二阶展开式的完整性.同时在每一负荷水平的求解中雅可比矩阵恒定,可充分利用稀疏技术,大大减少了计算量,加快了运算速度。

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, Monn 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, IEEE. 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.