

含最优乘子的连续潮流算法和奇异值算法的电压静态稳定分析软件开发

陈 谦, 刘俊勇, 吴国梁

(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 介绍了一种适用于大型电力系统的电压静态稳定分析软件的研制及其结构和功能。该软件采用最优乘子和连续潮流相结合的算法以及奇异值算法计算分析系统的电压静态稳定裕度。在算法中采用了节点优化、矩阵稀疏化技术; 考虑了发电机约束; 引入了负荷模型和电压无功控制策略模拟实现系统情况。实例计算表明该软件实用功能强、使用方便、计算速度快、计算结果合理。

关键词: 最优乘子; 连续潮流法; 奇异值算法; 电压静态稳定分析; 软件开发

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)04-0032-04

电压稳定的静态分析方法中比较常用的有灵敏度分析方法、雅可比矩阵奇异值和特征值分析方法、连续潮流法。这些静态分析方法各有优缺点, 互为补充, 其物理本质都是把电力网络输送功率的极限状态作为电压失稳的临界点。本软件采用含有最优乘子的连续潮流算法和奇异值算法实现对电压静态稳定的分析。

1 算法与实现

1.1 最优乘子潮流算法^[1,2]

潮流计算问题用非线性代数方程组表示为

$$f(x)=0 \quad (1)$$

式中 $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, 为待求变量组成的 n 维向量。

构造标量函数为

$$F(x)=[f(x)]^T f(x)=\sum_{i=1}^n f_i^2(x) \quad (2)$$

从而将潮流计算问题归为求解非线性规划问题。要求出目标函数 $F(x)$ 最小值, 关键解决的问题是确定第 K 次迭代的搜索方向 $\Delta X^{(k)}$ 和最优步长因子 $\mu^{(k)}$, 可以把常规牛顿潮流算法每次迭代求出的修正向量 $\Delta X^{(k)}$ 作为搜索方向, 最优步长因子由下式求得:

$$g_0 + g_1 \mu + g_2 \mu^2 + g_3 \mu^3 = 0 \quad (3)$$

$$g_0 = \sum_{i=1}^n (a_i b_i), \quad g_1 = \sum_{i=1}^n (b_i^2 + 2a_i c_i)$$

$$g_2 = 3 \sum_{i=1}^n (b_i c_i), \quad g_3 = 2 \sum_{i=1}^n c_i^2$$

$$a=[a_1, a_2, \dots, a_n]=y^s - y(x^{(0)})$$

$$b=[b_1, b_2, \dots, b_n]=-J(x^{(0)})\Delta x$$

$$c=[c_1, c_2, \dots, c_n]=-y(\Delta x)$$

1.2 连续潮流算法^[3-7]

设初始状态时系统节点净负荷功率(节点负荷

功率-节点发电功率)为

$$Y_s(0)=[P_{10}, Q_{10}, P_{20}, |V_{20}|^2, \dots]^T$$

对于常规的潮流计算, 系统方程可以描述为

$$Y(X)=Y_s(0) \quad (4)$$

式中 X 为系统状态变量, 如电压的实部、虚部。

为了研究负荷缓慢变化时系统状态的变化, 引入一个负荷变化方式向量 Y_d 和变化因子 λ (一个标量)。设 $Y_d=[P, Q, P, Q, \dots]$ 为各节点的负荷净增长方式(发电增长则按负的负荷增长处理), 则任意状态时系统节点净负荷功率为

$$Y_s(\lambda)=Y_s(0)+\lambda Y_d \quad (5)$$

将常规潮流方程(4)与负荷变化方程(5)相结合, 得到:

$$H(X, \lambda)=Y(X)-Y_s(0)-\lambda Y_d \quad (6)$$

由于常规潮流计算中存在雅可比矩阵奇异点, 接近崩溃点时, 会发生收敛困难。因此, 还必须利用步长公式对雅可比矩阵进行改造, 如下式:

$$H(X, \lambda)=0, \quad G(X, \lambda)=0 \quad (7)$$

对应得扩展雅可比矩阵如下式:

$$J_{\text{aug}}=\begin{bmatrix} J(X) & -Y_d \\ G'_x & G'_\lambda \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.3 奇异值算法^[8]

设 $A \in R^{m \times n}$, 则存在单位正交矩阵 U 和 V , 且

$$V^T A U = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中 $D=\text{diag}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r)$, 则称 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r$ 为 A 的奇异值, 称 U 的列向量为 A 的右奇异向量, V 的列向量为 A 的左奇异向量。

奇异值算法是将潮流方程的雅可比矩阵进行奇异值分解, 其中最小奇异值 $\delta_{\min}$ 是衡量系统电压静稳裕度的状态指标。当系统运行工作点向电压静稳临界点趋近时, $\delta_{\min}$ 趋向零值; 当系统运行工作点到达极限工作点, 即 $\delta_{\min}=0$ 时, 表示临界稳定, 对应的雅可比矩阵奇异; 而最小奇异值对应的奇异向量则反映

了系统各节点参与失稳的模式。研究给定系统运行点电压静态稳定裕度的问题就可转化为研究确定相应的雅可比矩阵 J_r 接近奇异的程度问题。在潮流计算收敛后利用奇异值法求得的最小奇异值,可评价系统电压稳定性。

1.4 实现措施

1.4.1 引入节点优化和矩阵稀疏化技术^[9]

建立导纳矩阵首先对系统各节点进行编号,节点编号的不同造成导纳矩阵消去或分解注入元数量不同。注入元的多少会影响计算量的大小,为了提高计算速度减少注入元的个数,采用节点半动态优化法,对连接支路少的节点先编号,连接支路多的节点后编号实现对节点的优化。

大型电力系统的导纳矩阵非常稀疏,其非零元素个数只占总数的1%,牛顿-拉夫逊潮流法的求解过程是通过雅可比矩阵的反复迭代完成的,而雅可比矩阵的稀疏性和导纳矩阵保持一致。如果不采用稀疏化技术,除占用大量的内存外还会造成计算效率低下,本软件采用按行形成和按行消去的方法存储经过三角变化后的雅可比矩阵使数据容量大大降低、排除了对零元素的运算,提高了计算的效率。

1.4.2 引入电压无功控制和发电机约束

在实际的电力系统中,存在着大量的电压控制设备和无功调节设备,它们对于维持电压稳定和无功平衡具有重要作用。采用连续潮流法计算系统稳定极限,随着负荷逐渐增大,一方面,节点电压会逐渐降低,当越过整定值时,会触发电压调节设备动作来恢复电压;另一方面无功负荷的增大,光靠发电机提供的无功不能满足负荷区域的无功平衡,而且最好能够实现无功的就地平衡,于是触发无功补偿设备来就地平衡无功。由于电压和无功有着密切的联系,所以本软件以电容器、电感器(低压母线上)的投切和有载调压变压器分接头的动作作为电压无功控制设备,模拟其对系统电压稳定的影响。

负荷增大时,光靠平衡节点平衡增加的负荷是不现实的,于是设定同比例增大发电机的有功出力,但实际系统中发电机的有功出力是有限的,不能无止境的增加;另一方面无功负荷需求的增大,作 PQ 运行的发电机不能提供更多的无功,于是转为作 PQ 运行。本软件考虑了发电机的有功极限和无功极限,当有越限的情况发生立即对它作出调整。计算流程见图1。

a. 修正1:采用VQC方法^[10]确定有载调压变压器变比的调节量和电容器、电感器的投切量。

$$\Delta Y'_{ii} = -y_{ic}^{(0)} - y_{il}^{(0)} + y_{ic}^{(1)} + y_{il}^{(1)} \quad (9)$$

$$\Delta Y'_{ii} = \Delta Y'_{jj} = -y_{ijT}^{(0)} + y_{ijT}^{(1)} \quad (10)$$

$$\Delta Y'_{ij} = \Delta Y'_{ji} = y_{ijT}^{(0)} - y_{ijT}^{(1)} \quad (11)$$

式中 $y_{ic}^{(0)}, y_{ic}^{(1)}, y_{il}^{(0)}, y_{il}^{(1)}, y_{ijT}^{(0)}, y_{ijT}^{(1)}$ 分别代表相应节点/变压器支路调整前后的导纳; $\Delta Y'_{ii}$ 为电容

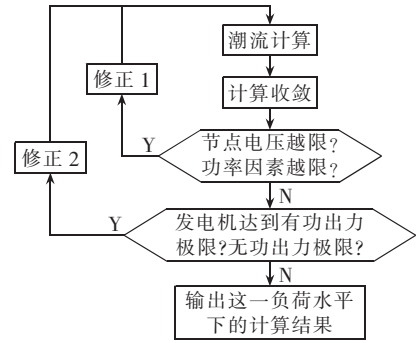


图1 潮流计算中引入电压无功控制和发电机约束

Fig.1 Add voltage and reactive power control and generator constrain to flow calculation

器、电抗器对导纳矩阵的对角元素修正量; $\Delta Y'_{ii}$ 和 $\Delta Y'_{ij}$ 分别为变压器支路对导纳矩阵对角和非对角元素修正量。

b. 修正2:一旦 $P_{iG} = P_{iGmax}$, 则有功增量分配系数 $k_{iG} = 0, k_{jG} = k_{jG}^{(0)} / (1 - k_{iG}), j \neq i, j \in M, M$ 为所选择的具有可调度出力的发电机集合。一旦 $Q_{iG} = Q_{iGmax}$, 则相应的潮流方程由

$$\Delta V_i^2 = V_{is}^2 - (e_i^2 + f_i^2) \quad (12)$$

变化为

$$\Delta Q_i = (Q_{iL} + \lambda k_{iQL}) + Q_{iG} - Q_i \quad (13)$$

并且相应的雅可比矩阵元素也作出调整。

1.4.3 引入负荷模型

实际系统运行中,系统频率相对稳定,节点电压的变化有时比较大,尤其是网络结构发生变化或发电机开断时更是如此。所以,把负荷看作常数值并不合理。更合理的表达方法是把负荷写成电压的函数,即在潮流计算中应该考虑负荷的电压静态特性。

令 P_{Di}^0 和 Q_{Di}^0, U_{is} 是正常运行情况下负荷节点 i 的有功负荷、无功负荷和节点电压,当实际运行中节点 i 的电压偏离 U_{is} 时,一种较精确的表示方法是将 P_{Di} 和 Q_{Di} 写成节点电压的二次函数,这样常规潮流模型中的负荷功率 P_{Di} 和 Q_{Di} 将不再是常数,而是电压偏移的函数:

$$P_{Di} = [a_{Pi}(e_i^2 + f_i^2) + b_{Pi}\sqrt{e_i^2 + f_i^2} + c_{Pi}] \quad (14)$$

$$Q_{Di} = [a_{Qi}(e_i^2 + f_i^2) + b_{Qi}\sqrt{e_i^2 + f_i^2} + c_{Qi}] \quad (15)$$

式中各项系数满足:

$$a_{Pi} + b_{Pi} + c_{Pi} = 1, \quad a_{Qi} + b_{Qi} + c_{Qi} = 1$$

则根据方程(6)得直角坐标下的雅可比矩阵上的元素修正为

$$\frac{\partial H_P}{\partial e_i} = (P_{Di}^S + \lambda k_{DPi}) \left(2a_{Pi}e_i + \frac{b_{Pi}e_i}{\sqrt{e_i^2 + f_i^2}} \right) - \frac{\partial P_i}{\partial e_i} \quad (16)$$

$$\frac{\partial H_P}{\partial f_i} = (P_{Di}^S + \lambda k_{DPi}) \left(2a_{Pi}f_i + \frac{b_{Pi}f_i}{\sqrt{e_i^2 + f_i^2}} \right) - \frac{\partial P_i}{\partial f_i} \quad (17)$$

$$\frac{\partial H_Q}{\partial e_i} = (Q_{Di}^S + \lambda k_{DQi}) \left(2a_{Qi}e_i + \frac{b_{Qi}e_i}{\sqrt{e_i^2 + f_i^2}} \right) - \frac{\partial Q_i}{\partial e_i} \quad (18)$$

$$\frac{\partial H_Q}{\partial f_i} = (Q_{Di}^S + \lambda k_{DQi}) \left(2a_{Qi}f_i + \frac{b_{Qi}f_i}{\sqrt{e_i^2 + f_i^2}} \right) - \frac{\partial Q_i}{\partial f_i} \quad (19)$$

式中 i 为节点号; λ 为总负荷增量; k_{Dpi}, k_{Dqi} 分别为有功负荷增量分配因子和无功负荷增量分配因子; e_i, f_i 为电压的实部与虚部; $\partial P_i / \partial e_i, \partial P_i / \partial f_i, \partial Q_i / \partial e_i, \partial Q_i / \partial f_i$ 为雅可比矩阵修正前对应的量。

1.4.4 最优乘子、连续潮流和奇异值相结合

连续潮流法可以计算出每个负荷增量水平下的潮流信息,如果计算完一个负荷增量水平就马上进行奇异值分析来判断雅可比矩阵是否达到奇异,将会花去大量的时间。在连续潮流中引入最优乘子,由于最优乘子 μ 有个特点:如果常规潮流有解,经过几次迭代,目标函数 $F(x)$ 将下降为 0,最优乘子 μ 的值为 1.0 左右;如果常规潮流无解,目标函数 $F(x)$ 将不为 0,最优乘子 μ 的值逐渐减小,最后趋于 0。 μ 趋于 0 是常规潮流无解的一个标志,这说明了雅可比矩阵正趋向于奇异。利用这个特点,每次计算完一个负荷增量水平就求出最优乘子 μ ,如果 μ 大于设定的判断值 ε ,继续下一个负荷增量水平的求解;如果 μ 小于 ε ,使用奇异值算法求出这时的最小奇异值,即在电压崩溃点附近才进行奇异值分析,减少计算量,节省计算时间。

2 软件介绍

2.1 数据处理模块

数据处理模块是为潮流计算提供数据接口。包括对电网拓扑结构的处理,选取电网运行方式、基本运行下发电机和负荷数据,并且生成数据库,以方便对数据进行查询、修改、增删。

2.2 参数选择模块

参数选择模块是对潮流计算选择各种电压调节装置、无功调节装置、各种潮流约束,以方便调度人员能够根据具体情况选择相应的潮流参数来和当时的情况相吻合。参数选择有 4 项。

- a. 发电机约束条件:发电机最大有功出力 and 最大无功出力约束。
- b. 收敛性设定:计算精度,最大迭代次数。
- c. 负荷静态特性:负荷静态模型参数设置。
- d. 调压和无功补偿设备:是否考虑有载调压变压器变比调压,是否考虑电容器组和电感器组的投切,调整的电压上下限。

2.3 运算模块

运算模块功能是进行潮流计算,计算出系统各节点电压变化情况和线路潮流变化情况。该模块包含电压稳定分析的 3 种算法,即最优乘子潮流法、连续潮流法和奇异值分析法。

3 种算法在前面已有叙述,下面介绍对于连续潮流法很重要的增长模式的设定。该软件对于负荷的增长模式从负荷增长的 3 个方面设置。发电机出力增长模式从 2 个方面设置。不同的方面对应不同的参数表,便于调度人员根据具体情况设置不同的参数值。每个方面都是独立的,可以自由组合,以

尽可能的模拟实际系统中的负荷增长趋势和发电机调度方式。负荷增长模式有 3 个方面。

a. 负荷增量分配方式。把系统总的负荷增量分配到所选择负荷节点上,包括按节点初始负荷大小分配负荷增量和按节点负荷分配因子分配负荷增量。选择前者则初始潮流下节点上的负荷量大则分配到该节点上的负荷增量就大,反之则小。

b. 负荷增长范围。包括按选定负荷节点增长、按选定负荷区域增长和按全网负荷增长。

c. 负荷增量类型。包括有功负荷和无功负荷按功率因数增长、仅有有功负荷增长和仅无功负荷增长。

当系统负荷增长时,仅由平衡节点提供额外发电功率是不现实的,一般同时需要增大系统中可以调节机组的有功功率以平衡需求。为此,考虑发电机出力增长方式对于电压静态稳定分析具有实际意义。该软件的发电机增长模式设置和负荷增长模式设置类似,不同之处在于不考虑增量类型,因为发电机只能调节有功出力并且应该和负荷增量保持一致。

2.4 结果分析模块

结果分析模块用图形和表格形式显示计算结果数据并且进行分析。这些数据包括各个负荷水平下的潮流数据、最大负荷增量、系统最小奇异值和奇异向量值数据、电容器和电感器投切变化量数据、有载调压变压器分接头调整的数据、负荷节点电压变化数据、负荷节点有功与无功变化数据、发电机有功出力变化与无功达到最大数据。所有的数据都放入数据库以便查用。由于大系统的结果数据很多,为便于分析,在结论分析界面上设置了一些选项供调度人员有选择性的显示数据,以提高分析效率。

3 算例分析

通过对实际系统进行电压静态稳定分析说明结果分析模块的内容。计算网络选用 2003 年度川渝电网 500kV, 220kV 网络。网络正常方式为 500kV, 220kV 网络全结线,电磁环网运行。计算用运行方式选择冬季枯水期大方式;负荷增长模式选择四川地区所有负荷节点按初始负荷大小比例增长,负荷功率因数保持不变;发电机出力增长模式选择四川地区所有未达到最大出力的发电机节点,按初始出力大小比例增长,增长总量与负荷保持一致。

经过计算,得到各个负荷水平下的潮流数据、最大负荷增量数据等。选择电压变化最大的 3 个负荷节点的 PU 曲线,如图 2 所示。

从图中可以看出系统最大负荷增量为 1 095 MW,电压变化最大的 3 个负荷节点为 a (大面铺 1), b (古城 1), c (新二村 1)。

选择结果数据分类选择区中的电容器容量变化和电感器投入容量变化,就能够得到所有的电容器和电感器初始投入容量和最终投入容量对比表。表 1 只列出了有变化的电容器节点。

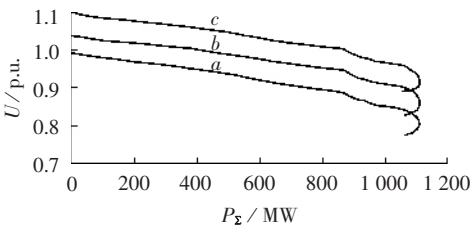


图 2 电压变化最大 3 个负荷节点 PU 曲线
Fig.2 The PU curves of 3 biggest voltage shift load buses

表 1 电容器投入容量变化表

Tab.1 Shift of capacitor capacity p.u.

电容器节点名	初始值(导纳)	最终值(导纳)
长寿 3	0	0.400
杨桥 9	0.214	0.285
新二村 9	0.701	0.801
石羊 9	0.560	0.640
广惠 9	0.060	0.180
凉水井 9	0.120	0.240
林庄 9	0.504	0.576
太和 9	0.375	0.525
蓉东 9	0.450	0.525
什邡 9	0.288	0.384
五里堆 9	0.481	0.641

选择结果数据分类选择区中的最小奇异值分析,就能够得到最大负荷增量水平下的最小奇异值和最薄弱 20 个负荷节点对应的奇异向量值,如表 2 所示。

表 2 最小奇异值和最薄弱 20 个负荷节点奇异向量值

Tab.2 The minimum singular value and singular vector of 20 weakest load buses

节点名	奇异向量值	节点名	奇异向量值
袁家坝 1	0.073 21	孟家 1	0.053 93
永兴 1	0.056 69	大康 1	0.053 75
新二村 1	0.056 66	新市 1	0.053 64
大面铺 1	0.056 51	江油 2	0.052 49
五里堆 1	0.056 23	丰谷 1	0.050 79
安县 1	0.055 89	太和 1	0.050 44
天明 1	0.055 43	万安 1	0.049 43
古城 1	0.054 78	彭州 1	0.049 42
新广兴 2	0.054 61	白石岩 1	0.049 41
什邡 1	0.053 93	清白江 1	0.048 07

注:最小奇异值为 0.004 053。

从表 2 中看到系统的最小奇异值为 0.004 053,接近于理论值 0,即潮流雅可比矩阵接近奇异,连续潮流运算到了系统的稳定极限。表 2 中的奇异向量值反映了无功对各负荷节点电压影响的程度,负荷节点按奇异向量值的大小从上到下排列,比较各节点奇异向量值大小可以找出系统的薄弱环节。从表中可以看出大面铺 1、新二村 1、古城 1 的奇异向量值较大,通过和潮流计算的结果进行对比印证了潮流计算的结果。而且,分析得到的薄弱环节和实际运行系统的薄弱环节是相吻合的。

4 结论

电压静态稳定分析软件是为电网调度人员提供

在各种运行方式下,确定电网各个节点电压和电网稳定裕度及辅助决策分析的工具。它具有以下特点:

- a. 人机界面友好、操作灵活方便,具有与 Windows 风格完全一样的界面,与主流操作系统完全兼容;
- b. 可以直接在软件界面上显示潮流计算结果的全部数据和信息;
- c. 该软件的实用性强,充分考虑到了实际电力系统中的各种约束条件和负荷变化趋势,仿真度较高,与实际系统的情况相吻合。

参考文献:

[1] 余一平,刘俊勇.基于最优乘子的 PV 曲线求取方法[J].电力系统自动化,2002,26(4):14-17.
YU Yi-ping,LIU Jun-yong. Tracing PV curves of power systems in optimal multiple factor [J]. **Automation of Electric Power Systems**,2002,26(4):14-17.

[2] IWAMOTO S,TAMURA Y. A load flow calculation method for ill-conditioned power systems [J]. **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems**,1981,100(4):1736-1743.

[3] AJJARAPU V,CHRISTY C. The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,1992,7(1):416-423.

[4] IBA K,SUZUKI H,EGAWA M,et al. Calculation of critical loading condition with nose curve using homotopy continuation method[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,1991,6(2):584-593.

[5] 祝达康,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.
ZHU Da-kang,CHENG Hao-zhong. An improved continuation method in tracing PV curves of power system[J]. **Power Systems Technology**,1999,23(4):37-40.

[6] 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(1):9-12,44.
JIANG Wei,WANG Cheng-shan. PV curve tracing in power system transfer capability analysis[J]. **Automation of Electric Power Systems**,2001,25(1):9-12,44.

[7] 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):14-16.
GUO Rui-peng,HAN Zhen-xiang. An improved continuation power flow method for voltage stability analysis[J]. **Automation of Electric Power Systems**,1999,23(14):14-16.

[8] 冯治鸿,刘取.多机电力系统电压静态稳定性分析——奇异值分解法[J].中国电机工程学报,1992,12(3):10-19.
FENG Zhi-hong,LIU Qu. Analysis of steady-state voltage stability in multimachine power system by singular value decomposition method [J]. **Proceedings of the CSEE**,1992,12(3):10-19.

[9] 刘爱国,胡华寅.应用稀疏矩阵技术的潮流计算[J].南昌大学学报(工科版),1998,20(2):19-23.
LIU Ai-guo,HU Hua-yin. A sparse matrix techniques applied to power flow algorithm [J]. **Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)**,1998,20(2):19-23.

(上接第 35 页 continued from page 35)

[10] 庄侃沁, 李兴源. 变电站电压无功控制策略和实现方式[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 47-50.

ZHUANG Kan-qin, LI Xing-yuan. Strategies and implementation modes of voltage and reactive power control for substations[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2001, 25(15): 47-50.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

陈 谦(1979-), 男, 四川广元人, 硕士研究生, 主要从事电力系统电压稳定性研究(E-mail: chainly@163.com);

刘俊勇(1963-), 男, 四川成都人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电力系统灵活交流输电、电力市场及电压稳定性方面的研究(E-mail: liu5656@mail.china.com);

吴国梁(1975-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事电力系统电压稳定性研究(E-mail: wuguoliang028@126.com)。

Development of power system voltage stability analysis software using continuation method and singular value decomposition method

CHEN Qian, LIU Jun-yong, WU Guo-liang
(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The structure and functions of voltage static stability analysis software for large power system is presented. Together with the singular value decomposition algorithm, it combines the optimal multiplier and continuation method to calculate stability margin of power system. The optimized node and sparse matrix techniques are used in the method and the generator constrain is considered. The load model and the voltage and reactive power control strategy are introduced to simulate the real conditions of power system. Calculation example shows it practical, convenient, fast and accurate.

Key words: optimal multiplier; continuation method; singular value decomposition; voltage stability analysis; software development