

基于互补内点法的多目标静态电压稳定约束无功规划

曲绍杰¹, 王绍然¹, 刘明波², 高玉领³, 姜旭¹

(1. 吉林省电力有限公司, 吉林 长春 130021; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;
3. 山东电力超高压公司, 山东 济南 250021)

摘要: 将基于非线性互补理论的内点法成功应用于求解含有电压稳定约束的无功规划问题。将内点法中的 KKT 条件利用互补松弛条件转化为等式约束, 并用牛顿法求解。选取电压稳定裕度不低于某个允许的最小稳定裕度表示电压稳定约束。引入两组变量和潮流方程, 将电压稳定裕度可以用正常状态和临界状态的负荷功率显式表达。在该模型的基础上, 增加了系统的无功储备为目标之一, 能够增加系统的静态电压稳定裕度。在 IEEE14、118 节点系统中试验表明, 该算法具有良好的计算精度和收敛性。

关键词: 电压稳定; 无功优化; 非线性互补问题; 内点法

Static voltage stability constrained multi-objective reactive power planning based on complementary interior point method

QU Shao-jie¹, WANG Shao-ran¹, LIU Ming-bo², GAO Yu-ling³, JIANG Xu¹

(1. Jilin Electric Power CO.,LTD, Changchun 130021, China;
2. Electric Power College, South China University of Technology, Guanzhou 510640, China;
3. Extrahigh Power Subcompany of SEPCO, Jinan 250021, China)

Abstract: A new interior point method based on the theory of nonlinear complementary is applied successfully to solve the problem of reactive power planning constrained static voltage stability. The KKT conditions in interior point method is transformed into the equation constraint using complementary relaxation conditions and the equation is solved by Newton's method. The voltage stability constraints are expressed in a way which the voltage stability margin is no less than the allowed minimum number. Introducing two sets of variables and flow equations, the voltage stability margin can be explicitly presented by load power in a normal state and the critical state. In the model, reactive power reserve of the system is increased to one of the objectives, which can strengthen the system static and dynamic voltage stability margin. Tests in the IEEE 14 and 118-node system show that the algorithm possesses good accuracy and convergence.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No.50777021).

Key words: voltage stability; reactive power optimization; nonlinear complementary problem; interior point method

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0049-06

0 引言

随着电力系统的发展,长距离,大容量地传输电能,使得电压稳定问题越来越引起重视。研究表明,负荷的增加、发电机或线路故障、系统无功的不足、ULTC 动作以及各种控制和保护之间缺乏协调等,但是负荷缺少足够的无功支持是引起电压不

稳定问题的主要因素。因此,无功的优化分布能够对电力系统的电压稳定起到重要作用。传统的无功规划问题是以系统网损或综合投资费用最小为目标,在满足电压水平合理,满足安全约束的前提下,确定补偿地点及容量。当系统中的稳定裕度足够大的时候,传统的无功优化是合理的。但在当前的电力系统越来越接近其容量极限的情况下,系统运行不断地逼近其极限点,增加了电网的不安全因素。因此,有必要将电压稳定问题与无功规划结合起来研究。迄今,已经有一些学者展开了这方面的研究,

基金项目: 国家自然科学基金项目(50777021); 国家电网公司科技项目(20081360)

取得了大量的有价值的研究成果^[1-6]。文献[7]提出了以发电机的无功储备量作为电力系统的电压稳定裕度量度的新模型,并给出了算例结果,证明了算法的有效性。文献[8]提出了一种基于基因算法的双层规划模型,先以电压稳定性为目标函数求出一个估计解,然后将与电压稳定关系密切的量固定,再以无功优化作为目标求解其他的量,并给出了 IEEE 30 节点系统的结果。文献[9]以电压稳定裕度对各个控制变量的灵敏度为基础建立一个预防控制的线性化模型,能提高电力系统的稳定裕度,但是该方法未考虑运行的经济性。

本文以文献[10-11,14]为基础,借助电压稳定裕度的概念与无功储备量作为电压稳定量度模型,建立了电压稳定裕度约束的无功优化多目标函数模型,并采用了新的基于互补理论的内点法求解,给出了 IEEE 14、118 节点系统算例结果并进行了分析。

1 电压稳定约束无功规划模型

电压稳定约束无功规划是在传统的无功规划基础上引进电压稳定约束,进而将两者结合考虑的问题。即在保持电力系统有一定的电压稳定水平的基础上,使电力系统运行在网损较小的经济状态,是安全性与经济性的统一。本文采用连续的非线性模型来描述,且重点是研究在补偿地点已经确定的情况下,无功分布对电压稳定的影响。变量采用了正常变量和临界变量。正常状态变量是指在当前的运行条件下的状态,临界状态是指在负荷有一定程度增长,较正常状态有一定的静态电压裕度的情况下的状态,或者说是重负荷状态。那么正常状态表征了电力系统当前的运行点,而临界状态表征了电力系统相对正常状态拥有一定的稳定裕度的状态,把两个状态联立求解,同时对于补偿装置的容量和变压器变比作为共同的变量,那么既保证了当前的无功配置既能满足当前系统要求,又能保证在系统负荷适当增长、有一定的静态电压稳定裕度时的安全运行,这就是计及电压稳定约束的无功规划模型。

电力系统从正常运行状态向临界状态的过渡方式有多种,如:单节点增加负荷的方式、多节点增加负荷的方式和全网增加负荷的方式。采用不同的负荷增长方式会使系统呈现出不同的静态电压稳定裕度。在本文研究中,采用多节点负荷增加的方式,假定有负荷增长的节点负荷视在功率按照以下方式增加,且分别保持各负荷节点的功率因数不变:

$$S_i = S_i^N + \beta_i \left(\sum_{j \in J_L} S_j - \sum_{j \in J_L} S_j^N \right) \quad (1)$$

因此,在临界点处,则有:

$$S_i^L = S_i^N + \beta_i \left(\sum_{j \in J_L} S_j^L - \sum_{j \in J_L} S_j^N \right) = S_i^N + \beta_i (S^L - S^N) \quad (2)$$

其中: J_L 为所有负荷节点的集合; S_i 表示节点 i 处的负荷视在功率; S_i^N 和 S_i^L 则分别表示正常状态时和临界状态时的节点 i 处的负荷视在功率; S^N 为所有节点负荷视在功率之和, β_i 为负荷分配因子,可以取为: $\beta_i = \frac{S_i^N}{S^N}$ 。

1.1 目标函数

一般的传统无功规划选择网损和综合投资最小作为目标函数。由于发电机的无功储备可以作为电力系统电压稳定裕度的一个量度^[7]。因此本文选择两者结合的多目标函数,即:选择系统的有功网损、无功设备的投资和动态电压稳定裕度量度作为多目标函数,即:

$$\min f = f' + f'' \quad (4)$$

式中: $f' = -\sum_{i \in J_G} C_i * S_B * (Q_{Gi \max} - Q_{Gi})$ 表示的是发电机的无功储备量对应于折算后电价。

$$f'' = B \cdot \tau_{\max} \cdot Y \cdot P_{\text{loss}}^N \cdot S_B + \sum_{i=1}^r (c_i \cdot Q_{Ci} \cdot S_B) \quad (5)$$

其中: B 为修正后的有功电价 (元/MWh); τ_{\max} 为全网的年最大负荷利用小时数; Y 为补偿设备的使用年限; P_{loss}^N 为正常状态下系统总的有功损耗 (标么值); r 是待装无功补偿设备的数目; c_i 为第 i 个可能补偿地点补偿设备的经过修正的单位容量的价格 (元/MVar); Q_{Ci} 为待安装的电容器容量 (标么值); S_B 为基准功率 (MVA)。

$$\text{式 (5) 可写为: } f'' = \alpha P_{\text{loss}}^N + \sum_{i=1}^r (c_i \cdot Q_{Ci})$$

式 (4) 可进一步写为:

$$\min f = P_{\text{loss}}^N + \sum_{i=1}^r \left(\frac{c_i}{\alpha} \cdot Q_{Ci} \right) - \sum_{i \in J_G} \frac{C_i}{\alpha} (Q_{Gi \max} - Q_{Gi}) \quad (6)$$

其中, $\alpha = B \cdot \tau_{\max} \cdot Y$

1.2 等式约束

由于在临界点系统仍然维持运行,临界状态时仍需满足系统的潮流方程,因而模型的等式约束包括正常运行状态和临界运行状态时的潮流方程。

对于 n 节点系统,正常运行状态下的潮流方程为:

$$P_{Gi}^N - P_{LDi}^N - V_i^N \sum_{j=1}^n V_j^N (G_{ij}^N \cos \theta_{ij}^N + B_{ij}^N \sin \theta_{ij}^N) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

$$Q_{Gi}^N - Q_{LDi}^N + Q_{Ci} - V_i^N \sum_{j=1}^n V_j^N (G_{ij}^N \sin \theta_{ij}^N - B_{ij}^N \cos \theta_{ij}^N) = 0$$

$$(i=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

临界运行状态下的潮流方程为:

$$P_{Gi}^L - P_{LDi}^L - V_i^L \sum_{j=1}^n V_j^L (G_{ij}^L \cos \theta_{ij}^L + B_{ij}^L \sin \theta_{ij}^L) = 0 \quad (9)$$

$$(i=1,2,\dots,n)$$

$$Q_{Gi}^L - Q_{LDi}^L + Q_{Ci} - V_i^L \sum_{j=1}^n V_j^L (G_{ij}^L \sin \theta_{ij}^L - B_{ij}^L \cos \theta_{ij}^L) = 0 \quad (10)$$

$$(i=1,2,\dots,n)$$

式中: P_{Gi}^N 、 Q_{Gi}^N 分别表示节点 i 的发电机有功无功出力; P_{LDi}^N 为正常状态下节点 i 的负荷; V_i^N 、 θ_i 分别为节点 i 的电压幅值和相角; 右上标 N 表示正常状态, L 表示临界状态。

1.3 公用变量的上下限不等式约束

$$Q_{Ci \min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci \max} \quad i \in J_Q \quad (11)$$

$$T_{Ki \min} \leq T_{Ki} \leq T_{Ki \max} \quad i \in J_L \quad (12)$$

式中: Q_{Ci} 为 i 节点的无功补偿出力; T_i 为第 i 台变压器变比; 右下标 min、max 分别表示最小和最大值。

1.4 正常运行状态下的不等式约束

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi}^N \leq Q_{Gi \max} \quad i \in J_G \quad (13)$$

$$P_{\text{slackmin}} \leq P_{\text{slack}}^N \leq P_{\text{slackmax}} \quad (14)$$

$$V_{i \min} \leq V_i^N \leq V_{i \max} \quad i=1,2,\dots,n \quad (15)$$

其中, slack 为平衡节点编号。

1.5 临界运行状态下的不等式约束

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi}^L \leq Q_{Gi \max} \quad i \in J_G \quad (16)$$

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi}^L \leq P_{Gi \max} \quad i \in J_G \quad (17)$$

1.6 电压稳定裕度约束

由式(2)和电压稳定裕度的定义可得, 在临界状态下各负荷的视在功率应满足如下约束条件关系:

$$S_i^L \geq S_i^N + \frac{M_{\text{vsm}}^{\text{spec}}}{1 - M_{\text{vsm}}^{\text{spec}}} \beta_i S^N \quad i \in J_L \quad (18)$$

2 算法推导

由上述推导的计及电压稳定约束的无功规划模型

$$\min f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3) \quad (19)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3) = 0 \quad (20)$$

$$\mathbf{x}_{1 \min} \leq \mathbf{x}_1 \leq \mathbf{x}_{1 \max} \quad (21)$$

$$\mathbf{x}_2 \geq \mathbf{x}_{2 \min} \quad (22)$$

引入松弛变量, 将不等式约束转变成等式约束, 引入对数壁垒函数消去松弛变量的非负性, 并对等式约束引入拉格朗日乘子, 得到拉格朗日函数, 根据 Karush-Kuhn-Tucker 最优性条件可得 KKT 方程,

用牛顿法求解得:

$$\begin{bmatrix} \bar{w}_{11} & w_{12} & w_{13} & -\nabla \mathbf{g}_{x_1}^T \\ w_{21} & \bar{w}_{22} & w_{23} & -\nabla \mathbf{g}_{x_2}^T \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & -\nabla \mathbf{g}_{x_3}^T \\ -\nabla \mathbf{g}_{x_1} & -\nabla \mathbf{g}_{x_2} & -\nabla \mathbf{g}_{x_3} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_1 \\ \Delta \mathbf{x}_2 \\ \Delta \mathbf{x}_3 \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \\ -\mathbf{L}_{x_3,0} \\ -\mathbf{L}_{y,0} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式(23)中的系数矩阵为对称结构, 依次求解修正方程式(23), 可得到原变量和对偶变量的修正方向 $\Delta \mathbf{x}_1$, $\Delta \mathbf{x}_2$, $\Delta \mathbf{x}_3$, $\Delta \mathbf{y}$, $\Delta \mathbf{s}_u$, $\Delta \mathbf{s}_l$, $\Delta \mathbf{s}_w$, $\Delta \mathbf{y}_u$, $\Delta \mathbf{y}_l$, $\Delta \mathbf{y}_w$ 。具体的推导过程见文献[15]。

在非线性原对偶内点法中, 最大潮流偏差和补偿间隙 (gap) 的变化反映了优化过程中满足等式和不等式约束的情况。

3 互补理论

3.1 基本概念

非线性互补理论通常是描述这样一个问题: 如果 $x \geq 0, f(x) \geq 0, x^T * f(x) = 0$, 式 $f(x)$ 是 x 的函数, 则可以通过构造一个非线性互补函数 $\varphi(x, f(x)) = 0$, 使其等价于 $x \geq 0, f(x) \geq 0, x^T * f(x) = 0$ 。

自然地将上式的 $x \geq 0, f(x) \geq 0, x^T * f(x) = 0$ 转化为非线性方程组求解, 这样就避免了不等式的约束问题。

本文引入常见的非线性函数为 Fischer-Burmeister 函数 (即 FB 函数), 定义如下:

$$\varphi(a, b) = a + b - \sqrt{a^2 + b^2}, \quad \text{其等价于 } a \geq 0, b \geq 0, a * b = 0。$$

该函数具有如下性质, $\varphi(a, b)$ 在任何点满足 Lipschitz 连续。除点 $(a, b) = (0, 0)$ 外, $\varphi(a, b)$ 在其他点光滑 (可微)。 $\varphi^2(a, b)$ 连续可微, 对于半强半光滑函数, 采用牛顿解法具有二次收敛性。

引入扰动因子, 将半光滑方程变为光滑方程

$$a \geq 0, b \geq 0, ab = \mu \Leftrightarrow \varphi(a, b) = a + b - \sqrt{a^2 + b^2 + 2\mu} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial \varphi(a, b)}{\partial a} = 1 - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + 2\mu}}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial \varphi(a, b)}{\partial b} = 1 - \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + 2\mu}} \quad (26)$$

$\varphi^2(a, b)$ 在 $\mu > 0$ 时具有全局的 Lipschitz 连续性, 文献[17]还说明了对于任意的 $\xi > 0$, 如果 $\|\varphi(a, b)\|_\infty \leq \xi$, 那么有:

$$-\xi \leq a, -\xi \leq b, \frac{|ab - \mu|}{|a| + |b| + \sqrt{\mu}} \leq \xi \quad (27)$$

在内点法的 KKT 方程中, 将互补松弛条件转化为非线性互补函数:

$$\mathbf{L}_{s_1} = \mathbf{S}_1 \mathbf{Y}_1 \mathbf{e}_1 - \mu \mathbf{e}_1 = 0$$

即

$$S_1 Y_1 e_1 = \mu e_1 \Leftrightarrow \varphi(s_l, y_l) = s_l + y_l - \sqrt{s_l^2 + y_l^2 + 2\mu} = 0 \quad (28)$$

$$L_{s_w} = S_w Y_w e_2 - \mu e_2 = 0 \Leftrightarrow \quad (29)$$

$$\varphi(s_w, y_w) = s_w + y_w - \sqrt{s_w^2 + y_w^2 + 2\mu} = 0$$

对于 $L_{y_u} = S_u Y_u e_1 + \mu e_1 = 0$ 由于此处选取 $y_u < 0$ ，所以其互补函数为 $\varphi(s_u, y_u) = s_u - y_u - \sqrt{s_u^2 + y_u^2 + 2\mu} = 0$

将上述等价非线性互补方程代替 KKT 方程中的对应方程，然后用牛顿法求解其迭代方向，得到的方程组的结构与式 (23) 相同。

3.2 效益函数

为了求出在迭代方向上的步长，通常采用效益函数来表征原目标函数在迭代方向上的下降程度。

一般地，效益函数取为 $\psi_\mu(y) = \frac{1}{2} \varphi_\mu(y)^T \varphi_\mu(y)$ ， $\varphi_\mu(y)$ 是一阶 KKT 方程。很多文献都说明了效益函数减少，能使原目标函数明显下降，并且在最优点处，两者的解一样。本文采用的效益函数

$$\varphi_\mu(y) = (L_{s_1}, L_{s_w}, L_{s_u})^T \quad (30)$$

求解 $\varphi_\mu(y) = 0$ 相当于求解无约束优化问题 $\min \psi_\mu(y)$ 。

本文采用非单调的线性搜索方法 Armijo 搜索方法，相比于线性搜索方法在实际计算中更为有效。即求取最小正整数 m_k 满足式：

$$\psi_\mu(y^k + \alpha^{m_k} \Delta y) \alpha^{m_k} \leq \max_{j=k-l+1} \psi_\mu(y^j) - \sigma \alpha^{m_k} \psi_\mu(y^k), \quad \text{其中}$$

$$l = \min\{5, k\} \quad \sigma = 0.1, \quad \alpha = 0.95。$$

3.3 算法实现

应用上述算法求解计及电压稳定的无功规划问题，其完整的计算步骤如下：

(1) 初始化：输入系统参数及不等式约束上下限值；输入原变量、对偶变量初始值，并保证 $s_u, s_1, s_w, y_1, y_w \geq 0$ ， $y_u \leq 0$ ；给定合适的加速因子 $\beta \in (5 \sim 100)$ ；置迭代次数 $k = 0$ ，最大迭代次数 $K = 100$ ；置收敛精度 $\varepsilon_1 = 10^{-6}$ ，和 $\varepsilon_2 = 10^{-3}$ 。

(2) 计算补偿间隙：

$$gap = \sum_{i=1}^{m_1} (y_{li} s_{li} - y_{wi} s_{wi}) + \sum_{i=1}^{m_2} (y_{wi} s_{wi}), \quad \text{若 } gap < \varepsilon_1 \text{ 且最大潮流偏差} < \varepsilon_2,$$

则输出最优解，结束计算。否则继续。

(3) 计算壁垒参数： $\mu = gap / (2m_1 + m_2) \beta$ 。

(4) 计算修正方向 $\Delta x, \Delta y$

(5) 由非单调方法求解其搜索步长，即求 $step = \alpha^{m_k}$ 。

(6) 修正原变量和对偶变量：

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ s_1 \\ s_u \\ s_w \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ s_1 \\ s_u \\ s_w \end{bmatrix}^{(k)} + step \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \Delta s_1 \\ \Delta s_u \\ \Delta s_w \end{bmatrix}^{(k)} \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} y \\ y_1 \\ y_u \\ y_w \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} y \\ y_1 \\ y_u \\ y_w \end{bmatrix}^{(k)} + step \begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_u \\ \Delta y_w \end{bmatrix}^{(k)} \quad (32)$$

置 $k = k + 1$ ，转到步骤 (2)。

4 算例结果

为了验证本文给出的计及电压稳定约束的无功规划模型及算法的有效性，对 IEEE 14 和 118 节点系统分别进行了计算。三个系统的参数均采用标幺值表示，基准功率都为 100 MVA，内点法的收敛精度为补偿间隙 $gap < 10^{-6}$ 且最大潮流偏差 $< 10^{-3}$ ，加速因子 $\beta = 10$ 。本章所用的优化计算程序用 C 语言编写，在 Visual C++6.0 环境编译。所用计算机为 PentiumIV 2.0G，内存 256 M。

对于式 (6) 的 α 和 C_i 取值情况如下：

$$C_i = 0.23 \times 10^5 (\text{元/MVar}), \quad B = 0.6 \times 10^3 (\text{元/MWh}),$$

$$\tau_{\max} = 3600 (\text{h/年}), \quad Y = 10 (\text{年}), \quad \text{由此得出}$$

$$\alpha = B \cdot \tau_{\max} \cdot Y = 0.216 \times 10^8 (\text{元/MW}).$$

为便于比较各系统的综合费用，对每个系统均选择两种方案进行比较，如表 1 所示。

表 1 试验系统的基本数据

Tab.1 Basic data of test systems

系统名称	节点数	支路数	可调变 压器数	无功补偿 设备数	发电 机数	负荷 数
IEEE14 节点 系统	14	20	3	4	2	10
IEEE118 节 点系统	118	179	8	10	36	72

4.1 14 节点系统

在 IEEE14 节点系统中，在节点 3, 9, 11, 13 安装并联电容器，发电机 1 为平衡机。可调变压器的变比和各节点正常状态电压幅值的变化范围为 0.95-1.05、0.9-1.1。

设定负荷节点 3, 4, 10, 11, 12, 13 的负荷增长的结果。在给定的稳定裕度为 0.2 时，系统中的电容器发出的无功量总和为 0.763，此时，既满足了系统在具有一定裕度条件下，又能经济运行。且系统在临界状态时电压均低于正常状态，说明了在负

荷加重的情况下, 系统的电压情况将恶化, 对系统的安全运行带来不利的方面。表 2 给出了 14 节点的电压情况, 在正常状态下节点 7, 8 电压最低, 表中 s 表示为视在功率。IEEE 14 节点的补偿间隙和潮流偏差的变化如图 1。在迭代刚开始时, 由于不等式约束条件并未满足, 初始点不满足潮流方程, 补偿间隙和最大潮流偏差均较大。经过几次迭代后, 补偿间隙和最大潮流偏差都迅速下降。这个过程实质上是一个不等式约束起决定作用的过程。起作用的不等式约束基本确定下来后, 两者都可以迅速收敛。优化方法最大潮流偏差和补偿间隙几乎同时趋于零, 说明差不多同时满足等式约束和不等式约束条件, 即补偿间隙和潮流偏差几乎是同步下降, 具有趋势的一致性。

表 2 14 节点系统发电机有功出力、无功出力、负荷的视在功率总和、并联电容器容量、可调变压器变比的最优值、迭代次数及最优电压值

Tab.2 Active power and reactive power of generators, total apparent power of loads, capacity of capacitor banks, ratio of adjustable transformers, number of iterations after optimization and bus voltage in 14-bus system

变量	正常		变 量	正常	
	工作点	临界 工作点		正常	临界
P_{G1}	2.329 59	3.303 44	V_1	1.05	1.017 8
P_{G2}	0.4	0.422 546	V_2	1.032 45	0.939 441
Q_{G1}	-0.131 167	1.143 38	V_3	1.005 67	0.859 946
Q_{G2}	0.3	0.256 994	V_4	1.008 67	0.874 675
s	2.505 1	3.337 48	V_5	1.011 63	0.885 657
Q_{G3}	0.313 216		V_6	1.05	0.874 66
Q_{C9}	0.210 374		V_7	0.997 068	0.864 61
Q_{C11}	0.082 061 8		V_8	0.997 068	0.864 61
Q_{C13}	0.162 005		V_9	1.042 06	0.851 103
T_{5-6}	0.967 619		V_{10}	1.038 08	0.841 894
T_{4-7}	1.011 64		V_{11}	1.047 39	0.857 224
T_{4-9}	1.029 03		V_{12}	1.042 42	0.854 637
网损	0.139 587		V_{13}	1.043 4	0.855 022
迭代 次数	13		V_{14}	1.024 2	0.829 969

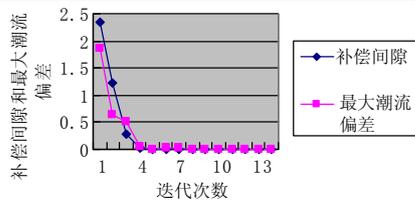


图 1 14 节点系统潮流偏差和补偿间隙的变化过程

Fig.1 Maximum power flow mismatch and the complementary gap change process of 14-bus system

4.2 118 节点系统

设定 118 节点系统的所有负荷节点都按照本文的增长方式增长, 在节点 19、20、21、33、34、35、36、37、43、76 处安装无功补偿装置, 同时以发电机 1 为平衡机。计算结果如表 3 和图 2。118 节点系统在迭代 6 次之后基本收敛, 说明了快速的收敛性。系统在临界状态时电压均低于正常状态, 说明了在负荷加重的情况下, 系统的电压情况将恶化, 对系统的安全运行带来不利的方面, 说明了使得系统保持在一定稳定裕度条件下运行的必要性, 以应对系统负荷或者其他因素导致的稳定性降低的情况。本文模型有效地表达了系统负荷增加时系统电压的变化情况, 即系统突然增加稳定裕度内的负荷量, 系

表 3 118 节点系统发电机有功出力、无功出力、负荷的视在功率总和、并联电容器容量、可调变压器变比的最优值及迭代次数

变量	正常		变 量	正常	
	正常	临界		正常	临界
$\sum_{i=1}^m P_{Gi}$	37.880 7	47.113 1	V_1	1.000 85	0.816 798
$\sum_{i=1}^m Q_{Gi}$	9.453 8	16.188 2	V_2	1.014 34	0.837 467
S 总负荷视在	26.578 3	35.668	V_3	1.013 16	0.836 071
Q_{C19}	0.645 065		V_4	1.047 18	0.893 25
Q_{C20}	0.020 772 5		V_{10}	1.075 1	0.999 97
Q_{C21}	0.148 407		V_{26}	1.1	0.981 369
Q_{C33}	0.139 249		V_{27}	1.011 08	0.853 449
Q_{C34}	0.014 534 8		V_{28}	1.000 41	0.836 222
Q_{C35}	0.094 516 3		V_{29}	0.997 832	0.832 155
Q_{C36}	0.049 758 8		V_{30}	1.042 09	0.909 315
Q_{C37}	0.9		V_{60}	1.042 34	0.988 669
Q_{C43}	0.055 842 1		V_{61}	1.044 6	0.995 123
Q_{C76}	0.526 739		V_{70}	1.013 03	0.912 47
T_{5-8}	1.057 8		V_{71}	1.017 33	0.918 29
T_{17-30}	1.021 19		V_{80}	1.063 35	0.983 499
T_{25-26}	1.015 31		V_{81}	1.025 01	0.961 347
T_{37-38}	0.989 533		V_{90}	1.053 04	0.992 814
T_{59-63}	1.062 85		V_{91}	1.053 33	0.986 741
T_{61-64}	1.016 32		V_{101}	1.036 49	0.960 615
T_{65-66}	1.038 9		V_{102}	1.044 01	0.963 532
T_{80-81}	1.095 59		V_{103}	1.036 3	0.982 474
迭代次数	61		V_{104}	1.017 75	0.966 427

统不会发生电压崩溃的情况。正常状态和临界状态的无功补偿使用同一值，有效地耦合了正常状态和临界状态，能够较好地均衡网损及电压稳定性，即在增加系统的无功补偿的同时，系统的稳定性也在增加，但已经不处于网损最小的优化状态，稳定性的增大是以网损增加为代价的。

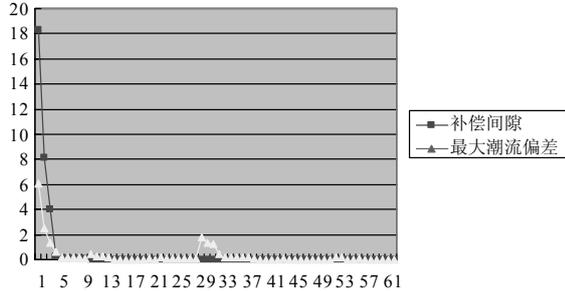


图2 118节点系统潮流偏差和补偿间隙的变化过程

Fig.2 Maximum power flow mismatch and the complementary gap change process of 30-bus system

本文算法在系统规模扩大时，收敛性有所下降，仍在可接受范围内。118系统中，35节点的电压在正常状态和临界状态都为电压最低点，说明该节点是电压稳定的重要节点，需严格监视该节点的运行电压。图2看出，迭代初期，最大潮流偏差和补偿间隙都较大，说明等式约束和不等式约束条件均未满足，经过几次迭代，两者皆较快地趋于零，这也验证了内点法较强的处理等式和不等式约束的能力。

5 结论

在无功规划中考虑电压稳定约束是有重要意义的，无功与电压的紧密联系是研究本问题的关键。本文中将电压稳定裕度加入到传统的无功规划之中，并加入无功储备作为动态无功的度量，采用两组状态变量，进而可以直接得到电压稳定裕度的显示表达式，并将无功储备作为目标之一，能够提高系统的电压稳定裕度。基于互补理论的内点法较好地解决了不等式约束问题，具有良好的收敛性。

从本文算例中可以得出如下结论：

1) 将非线性互补函数加入到内点法中，使互补松弛条件转化为等式，有效地解决了不等式条件。并用从算例看，采用非单调的线性搜索方法 Armijo 搜索方法，相比于线性搜索方法在实际计算中更为有效。

2) 该算法求解本文中的模型有良好的收敛性和精确性。在14、118节点系统中，算法的收敛性比较好，一般在迭代6次左右时就已经具有较高精度了，收敛速度快。

3) 多目标的无功优化的确有效地减少了网损，并提高系统的无功储备，有利于提高系统的电压稳定性。且根据系统要求，稳定性易于表达。

参考文献

- [1] Venkatesh B, Sadasivam G, Khan M A. A new optimal reactive power scheduling method for loss minimization and voltage stability margin maximization using successive multi-objective fuzzy LP technique[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (2) : 844-851.
- [2] Vaahedi E, Tamby J, Mansour Y, et al. Large scale voltage stability constrained optimal Var planning and voltage stability applications using existing OPF/optimal var planning tools[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14 (1) : 65-74.
- [3] Rosehart W D, Canizares C A, Quintana V H. Optimal power flow incorporating voltage collapse constraints[C]. //Proceeding of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Edmonton, Alberta(Canada): 1999, 2: 820-825.
- [4] 王勤, 方鹤飞. 考虑电压稳定性的电力系统多目标无功优化[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (3) : 31-34.
- [5] Rosehart W D, Canizares C A, Quintana V H. Effect of detailed power system models in traditional and voltage-stability-constrained optimal power-flow problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (1) : 27-35.
- [6] Rosehart W D, Canizares C A, Quintana V H. Multiobjective optimal power flows to evaluate voltage security costs in power networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (2) : 578-587.
- [7] Feng Dong, Badrul H Chowdhury, Mariesa L Crow, et al. Improving voltage stability by reactive power reserve management[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (1) : 338-345.
- [8] Zhong-Ping Wan, Heng Fan, Shu-Fen Wang, et al. A bilevel programming model for the reactive power optimization[C]. // The 7th International Power Engineering Conference, IPEC. 2005.
- [9] 赵晋泉, 江晓东, 李华, 张伯明. 一种基于连续线性规划的静态稳定预防控制方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (14) : 17-22.
- [10] Obadina O O, Berg G J. Var planning for power system security[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4 (2) : 677-686.
- [11] Chattopadhyay D, Chakrabarti B B. Reactive power planning incorporating voltage stability[J]. Int J of Electrical Power & Energy System, 2002, 24: 185-200.
- [12] Chattopadhyay D, Chakrabarti B B. Voltage stability constrained VAR planning: model simplification using statistical approximation[J]. Int J of Electrical Power and Systems, 2001, 23: 349-358.

- GE Ju, ZHANG Li-zi. Pareto optimality model of reserve market including interruptible load as participants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (9): 34-37.
- [5] 薛禹胜, 罗运虎, 李碧君, 等. 关于可中断负荷参与系统备用的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (10): 1-6.
XUE Yu-sheng, LUO Yun-hu, LI Bi-jun, et al. A review of interruptible load participating in system reserve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (10): 1-6.
- [6] 罗运虎, 薛禹胜, Gerard LED WICH, 等. 低电价与高赔偿 2 种可中断负荷的协调[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (11): 17-21.
LUO Yun-hu, XUE Yu-sheng, Gerard LED WICH, et al. Coordination of low price interruptible load and high compensation interruptible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (11): 17-21.
- [7] 罗运虎, 薛禹胜, Dong Z, 等. 发电容量充裕性的混合优化[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (12): 30-35.
LUO Yun-hu, XUE Yu-sheng, Dong Z, et al. Hybrid optimization of generation capacity adequacy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (12): 30-35.
- [8] 郭金, 江伟, 谭忠富. 风险条件下供电公司最优购电问题研究[J]. 电网技术, 2004, 29 (11): 18-22.
- GUO Jin, JIANG Wei, TAN Zhong-fu. Research on optimized power purchasing of power suppliers under risk condition[J]. Power System Technology, 2004, 28 (11): 18-22.
- [9] 曾次玲, 张步涵, 谢陪元, 等. 基于风险管理在开放的能量市场和备用市场间优化分配发电容量[J]. 电网技术, 2004, 28 (13): 71-74.
ZENG Ci-ling, ZHANG Bu-han, XIE Pei-yuan, et al. Risk management based optimal allocation of generation capacity between open access energy market and reserve market[J]. Power System Technology, 2004, 28 (13): 71-74.

收稿日期: 2009-11-26; 修回日期: 2010-01-12

作者简介:

常向伟 (1981-), 男, 博士研究生, 从事电力市场方向研究; E-mail: solcol2003@126.com

张有兵 (1971-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为分布式发电和可中断负荷, 电能质量分析与控制, 配电网自动化和通信技术;

曹一家 (1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化与控制、信息技术在电力系统中的应用、分布式智能系统理论等。

(上接第 54 页 continued from page 54)

- [13] Wan Zhong-ping, Fan Heng, Wang Shu-fen, et al. A bilevel programming model for the reactive power optimization[C]. //Power Engineering Conference, 2005. IPEC 2005.
- [14] 刘明波, 杨勇. 计及静态电压稳定约束的无功优化规划[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (5): 21-25.
- [15] 刘明波, 程莹, 林声宏. 求解无功优化的内点线性和内点非线性规划方法比较[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (1): 22-26.
- [16] WANG Xian, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua. Oligopolistic equilibrium analysis for electricity markets: a nonlinear complementarity approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 19(3): 1348-1354.
- [17] Geraldo Leite Torres, Victor Hugo Quintana. Optimal power flow by a nonlinear complementarity method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3): 1028-1033.

收稿日期: 2010-03-12; 修回日期: 2010-05-18

作者简介:

曲绍杰 (1982-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统无功优化和电压稳定性分析; E-mail: qushaojie123@163.com

王绍然 (1974-), 男, 高级工程师, 主要从事电网调度运行及管理工作;

刘明波 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制。E-mail: epmbliu@scut.edu.cn