

基于非线性预报-校正内点法的 电力系统无功优化研究

徐进东, 丁晓群, 覃振成, 李 晨

(河海大学 电气工程学院, 江苏省 南京市 210098)

A NONLINEAR PREDICTOR-CORRECTOR INTERIOR POINT METHOD FOR REACTIVE POWER OPTIMIZATION IN POWER SYSTEM

XU Jin-dong, DING Xiao-qun, QIN Zhen-cheng, LI Chen

(School of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The predictor-corrector technology is applied to nonlinear primal-dual interior point method and a longer iteration step can be obtained by use of the improved nonlinear predictor-corrector primal-dual interior point method than pure primal-dual interior point method, so the convergence can be speeded up. Using the improved method for power system reactive power optimization a large number of inequality constraints in the objective function can be effectively dealt with. The simulation results from four test systems, i.e., IEEE 14-bus system, IEEE 30-bus system, IEEE 57-bus system and IEEE 118-bus system, show that the improved algorithm possesses fast convergence speed and good robustness.

KEY WORDS: Power system; Reactive power optimization; Predictor-corrector interior point method; Nonlinear primal-dual interior point method

摘要: 在非线性原-对偶内点法的基础上引入了预报-校正技术, 使改进后的非线性预报-校正内点法获得了较纯原-对偶内点法更大的迭代步长, 从而加速了算法的收敛。应用该方法求解电力系统无功优化问题时能有效处理目标函数中的大量不等式约束。IEEE 14 节点、IEEE 30 节点、IEEE 57 节点和 IEEE 118 节点系统的仿真结果表明, 该算法收敛快、鲁棒性好。

关键词: 电力系统; 无功优化; 预报-校正内点法; 非线性原-对偶内点法

1 引言

电力系统无功优化问题在数学上是一个多变量、高维数、多约束、离散和连续变量共存的非凸、非线性规划问题, 可利用逐次线性规划法、逐次二次规划法、非线性规划法、牛顿法等来求解^[1,2]。但

这些方法收敛较慢, 而且对不等式约束的处理都不太理想, 甚至可能出现数值稳定问题。1984年AT&T贝尔实验室的印度数学家 Karmarkar 提出了一种新的内点法, 该算法的速度极快, 引起了优化问题研究领域大批学者的关注。1991年Clements首先将内点法用于求解电力系统状态估计问题, 此后, 内点法在电力系统优化运行中得到了广泛应用。文献[3]将线性内点法应用于大规模电力系统的优化问题, 求解了巴西一个1832节点和北美一个3467节点系统的无功调度问题。文献[4]应用原对偶仿射尺度内点法求解无功优化问题, 该方法属于线性规划法的范畴, 需将目标函数和约束条件线性化。文献[5,6]用二次内点法求解无功优化问题, 保留了目标函数的非线性特性, 但约束条件仍需线性化。由于无功优化问题本身具有强非线性特性, 因此无论其目标函数还是约束条件线性化后必然引起误差。文献[7]比较了应用线性和非线性内点法求解无功优化问题的执行效果, 并指出非线性内点法的优化效果优于线性内点法。因此, 近年来人们都致力于非线性内点法的研究。文献[8]将同伦方法与非线性内点法相结合, 成功求解了几种极端情况下的无功优化问题, 但由于引入了同伦变量, 故算法的计算用时较长, 几乎为内点法的2倍, 而且只在小型系统上验证了方法的有效性。

随着互联电网规模的扩大, 对大型电力系统全局无功优化算法的计算速度和收敛性的要求也越来越高。本文所采用的非线性预报-校正内点法将问题的求解分成预报和校正两个阶段进行, 首先在

预报阶段求出仿射方向,然后在校正阶段对其进行校正从而得到牛顿方向。该算法能获得较大的迭代步长,具有良好的收敛特性和鲁棒性,近年来深受人们的青睐。本文将该算法应用于电力系统的无功优化,仿真结果表明了该算法的有效性和实用性。

2 无功优化的数学模型

电力系统无功优化问题的数学模型可表示为

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ \underline{\mathbf{h}} \leq \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \bar{\mathbf{h}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{x} \in R^N$ 为包括控制变量和状态变量的 N 维列向量; N 为变量数目; 目标函数为全系统网损 $f(\mathbf{x})$ 最小。其中

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in i} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

式中 n 为系统节点数目; $j \in i$ 表示节点 j 与节点 i 之间有线路相连; V_i 、 V_j 分别为节点 i 、 j 的电压幅值; G_{ij} 为节点 i 、 j 之间的电导; θ_{ij} 为节点 i 、 j 的电压相角差, 即 $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 。 $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ 为等式约束, 即潮流平衡方程

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中 P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点 i 处的发电机有功和无功出力, 若该节点未接发电机则其值为零; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 的有功和无功负荷, 若该节点处无负荷则其值为零; Q_{Ci} 为节点 i 处的无功补偿装置的无功输出, 若该节点处没有无功补偿装置则其值为零; B_{ij} 为节点 i 、 j 之间的电纳。不等式约束 $\underline{\mathbf{h}} \leq \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \bar{\mathbf{h}}$ 为

$$\begin{cases} \underline{Q}_{Ci} \leq Q_{Ci} \leq \bar{Q}_{Ci} & (i=1, 2, \dots, n_c) \\ \underline{Q}_{Gi} \leq Q_{Gi} \leq \bar{Q}_{Gi} & (i=1, 2, \dots, n_g) \\ \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i & (i=1, 2, \dots, n) \\ \underline{T}_{ij} \leq T_{ij} \leq \bar{T}_{ij} & (i, j \in S_T) \end{cases} \quad (4)$$

式中 \underline{Q}_{Ci} 、 \bar{Q}_{Ci} (\underline{Q}_{Gi} 、 \bar{Q}_{Gi}) 分别为无功补偿装置(发电机)的无功出力下、上限; n_c 、 n_g 分别为无功补偿装置和发电机的数目; \underline{V}_i 、 \bar{V}_i 分别为节点 i 的电压幅值下、上限; T_{ij} 为节点 i 、 j 之间的变压器变比, \underline{T}_{ij} 、 \bar{T}_{ij} 分别为其下、上限; S_T 为含变压器的线路集合。

本文的主要目的是突出优化算法, 因此对离散变量未做像文献[9]那样的特殊处理, 而是仍将离散变量当作连续变量处理。

3 原-对偶内点法

引入松弛变量 $\mathbf{l} > \mathbf{0}$, $\mathbf{u} > \mathbf{0}$, $\mathbf{l} \in R^r$, $\mathbf{u} \in R^r$, r 为全部不等式约束的个数, 将式(1)中的不等式约束转化为等式约束, 并将目标函数改造为障碍函数, 可得

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}) - \mu \left(\sum_{j=1}^r \ln l_j + \sum_{j=1}^r \ln u_j \right) \\ \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{u} - \bar{\mathbf{h}} = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{l} - \underline{\mathbf{h}} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 μ 为扰动因子(或称障碍参数)。显然, 式(5)是只含等式约束的优化问题, 可以直接用拉格朗日乘子法求解, 其拉格朗日函数为

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{l}, \mathbf{u}, \mathbf{w}, \mu) = f(\mathbf{x}) - \mu \left(\sum_{j=1}^r \ln l_j + \sum_{j=1}^r \ln u_j \right) - \mathbf{y}^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{z}^T [\mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{l} - \underline{\mathbf{h}}] - \mathbf{w}^T [\mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{u} - \bar{\mathbf{h}}] \quad (6)$$

式中 $\mathbf{y} \in R^m$, m 为式(1)中等式约束的个数; $\mathbf{z} \in R^r$, $\mathbf{w} \in R^r$, \mathbf{y} 、 \mathbf{z} 、 \mathbf{w} 为拉格朗日乘子, 亦称对偶变量, 且 $\mathbf{z} > \mathbf{0}$, $\mathbf{w} < \mathbf{0}$ 。由 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 一阶必要条件可知

$$\begin{cases} L_l = -\mu L^{-1} \mathbf{e} + \mathbf{z} \Rightarrow L_l^\mu = \mathbf{LZ} \mathbf{e} - \mu \mathbf{e} = \mathbf{0} \\ L_z = \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{l} - \underline{\mathbf{h}} = \mathbf{0} \\ L_u = -\mu U^{-1} \mathbf{e} - \mathbf{w} \Rightarrow L_u^\mu = \mathbf{UW} \mathbf{e} + \mu \mathbf{e} = \mathbf{0} \\ L_w = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{u} - \bar{\mathbf{h}} = \mathbf{0} \\ L_x = \nabla_x f(\mathbf{x}) - \nabla_x \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{y} - \nabla_x \mathbf{h}(\mathbf{x}) (\mathbf{z} + \mathbf{w}) = \mathbf{0} \\ L_y = \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (7)$$

式中 \mathbf{e} 为各元素均为 1 的 r 维列向量; $\mathbf{L} = \text{diag}(l_1, l_2, \dots, l_r)$; $\mathbf{U} = \text{diag}(u_1, u_2, \dots, u_r)$; $\mathbf{Z} = \text{diag}(z_1, z_2, \dots, z_r)$; $\mathbf{W} = \text{diag}(w_1, w_2, \dots, w_r)$ 。将式(7)中的各等式展成泰勒级数得到

$$\begin{cases} \mathbf{L} \Delta \mathbf{z} + \mathbf{Z} \Delta \mathbf{l} = -\mathbf{LZ} \mathbf{e} + \mu \mathbf{e} \\ \nabla_x^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) \Delta \mathbf{x} - \Delta \mathbf{l} = -[\mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{l} - \underline{\mathbf{h}}] \\ \mathbf{U} \Delta \mathbf{w} + \mathbf{W} \Delta \mathbf{u} = -\mathbf{UW} \mathbf{e} - \mu \mathbf{e} \\ \nabla_x^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) \Delta \mathbf{x} + \Delta \mathbf{u} = -[\mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{u} - \bar{\mathbf{h}}] \\ [-\nabla_x^2 f(\mathbf{x}) + \nabla_x^2 \mathbf{h}(\mathbf{x}) (\mathbf{z} + \mathbf{w}) + \nabla_x^2 \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{y}] \Delta \mathbf{x} + \nabla_x \mathbf{h}(\mathbf{x}) (\Delta \mathbf{z} + \Delta \mathbf{w}) + \nabla_x \mathbf{g}(\mathbf{x}) \Delta \mathbf{y} = \\ \nabla_x f(\mathbf{x}) - \nabla_x \mathbf{h}(\mathbf{x}) (\mathbf{z} + \mathbf{w}) + \nabla_x \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{y} \\ \nabla_x^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) \Delta \mathbf{x} = -\mathbf{g}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} L & Z & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -I & 0 & 0 & \nabla_x^T h(x) & 0 \\ 0 & 0 & U & W & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & \nabla_x^T h(x) & 0 \\ \nabla_x h(x) & 0 & \nabla_x h(x) & 0 & H & \nabla_x g(x) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla_x^T g(x) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta l \\ \Delta w \\ \Delta u \\ \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -LZe + \mu e, -(h(x) - l - \underline{h}), -UWe - \mu e, \\ -(h(x) + u - \bar{h}), L_x, -g(x) \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

式(9)即为非线性内点法的修正方程, 其中:

$$H = -\nabla_x^2 f(x) + \nabla_x^2 h(x)(z + w) + \nabla_x^2 g(x)y \quad (10)$$

$$L_x = \nabla_x f(x) - \nabla_x g(x)y - \nabla_x h(x)(z + w) \quad (11)$$

记 $\lambda = (z, l, w, u, x, y)^T$, $\nabla_\lambda^2 L$ 、 $\Delta \lambda$ 分别为式(9)左边的第 1、第 2 项, d_0 为式(9)右边的向量, 则式(9)可重新写为

$$\nabla_\lambda^2 L \times \Delta \lambda = d_0 \quad (12)$$

用阻尼牛顿法解以上线性方程组, 由式(12)解出 $\Delta \lambda$, 然后更新原、对偶变量:

$$\begin{cases} x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_p \Delta x, & y^{(k+1)} = y^{(k)} + \alpha_d \Delta y \\ l^{(k+1)} = l^{(k)} + \alpha_p \Delta l, & z^{(k+1)} = z^{(k)} + \alpha_d \Delta z \\ u^{(k+1)} = u^{(k)} + \alpha_p \Delta u, & w^{(k+1)} = w^{(k)} + \alpha_d \Delta w \end{cases} \quad (13)$$

式中 k 表示迭代次数; α_p 、 α_d 分别为原变量和对偶变量的迭代步长:

$$\begin{cases} \alpha_p = \gamma \min \left\{ \min \left\{ \left| \frac{-l_i}{\Delta l_i} \right|_{\Delta l_i < 0}, \left| \frac{-u_i}{\Delta u_i} \right|_{\Delta u_i < 0} \right\}, 1 \right\} \\ \alpha_d = \gamma \min \left\{ \min \left\{ \left| \frac{-z_i}{\Delta z_i} \right|_{\Delta z_i < 0}, \left| \frac{-w_i}{\Delta w_i} \right|_{\Delta w_i > 0} \right\}, 1 \right\} \end{cases} \quad (14)$$

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

式中 γ 为安全因子, 通常取 $\gamma = 0.9995$ 以保证 $(l, u, z, -w)^T > 0$ 。

原-对偶内点法以互补间隙

$$\rho = l^T z - u^T w \quad (15)$$

作为收敛判据 (例如 $\rho \leq 10^{-6}$ 时则认为算法已收敛), 若不满足收敛条件则修正障碍参数

$$\mu = \sigma \rho / 2r \quad (16)$$

式中 σ 为中心参数, 一般取 $\sigma = 0.1$ 。然后进入下一次迭代, 直到算法收敛。

4 预报-校正内点法

预报-校正内点法的思想是由 Kojima、Mizuno 和 Yoshise 于 1989 年提出的, 后来 Mehrotra 对该方法做了大量研究并在 1992 年取得成功。与原-对偶内点法相比该算法在每次迭代中只增加了一次前

代回代计算, 但可以明显减少收敛次数, 优化速度明显提高。1994 年 Wu 等^[10]首次将该方法应用于求解电力系统最优潮流问题。预报-校正内点法获得成功应用的关键是: 将增加了高阶信息的牛顿系统分两步来计算, 第一步是预报, 得到仿射方向; 第二步是校正, 得到校正方向, 从而使牛顿方向可以高阶近似逼近中心路径。两步计算用的是同一个系数矩阵, 只需进行一次因子化, 与常规内点法相比只在每步迭代增加了一次前代回代计算。预报-校正内点法与纯原-对偶内点法不同首先体现在将式(7)展成泰勒级数时保留了 L_l 和 L_u 的高阶项, 即式(8)的第 1、3 个方程分别变为

$$L \Delta z + Z \Delta l = -LZe + \mu e - \Delta L \Delta Ze \quad (17)$$

$$U \Delta w + W \Delta u = -UWe - \mu e - \Delta U \Delta We \quad (18)$$

于是修正方程式(9)变为

$$\begin{bmatrix} L & Z & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -I & 0 & 0 & \nabla_x^T h(x) & 0 \\ 0 & 0 & U & W & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & \nabla_x^T h(x) & 0 \\ \nabla_x h(x) & 0 & \nabla_x h(x) & 0 & H & \nabla_x g(x) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla_x^T g(x) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta l \\ \Delta w \\ \Delta u \\ \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -LZe \\ -(h(x) - l - \underline{h}) \\ -UWe \\ -(h(x) + u - \bar{h}) \\ L_x \\ -g(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu e - \Delta L \Delta Ze \\ 0 \\ -\mu e - \Delta U \Delta We \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

记 d_{af} 、 d_{co} 分别为式(19)等号右边的第 1、第 2 项, 则式(19)可表示为

$$\nabla_\lambda^2 L \times \Delta \lambda = d_{af} + d_{co} \quad (20)$$

在预报阶段先由线性方程

$$\nabla_\lambda^2 L \times \Delta \lambda_{af} = d_{af} \quad (21)$$

解出仿射方向 $\Delta \lambda_{af}$, 计算仿射迭代步长 α_{af}

$$\alpha_{af} = \min \{ \alpha_p, \alpha_d \} \quad (22)$$

式中 α_p 、 α_d 由式(14)确定。然后计算仿射补偿间隙

$$\rho_{af} = (l + \alpha_{af} \Delta l_{af})^T (z + \alpha_{af} \Delta z_{af}) - (u + \alpha_{af} \Delta u_{af})^T (w + \alpha_{af} \Delta w_{af}) \quad (23)$$

并计算仿射障碍参数

$$\mu_{af} = \frac{\rho_{af}}{2r} \min \{ (\frac{\rho_{af}}{\rho})^2, 0.2 \} \quad (24)$$

式中 ρ 由式(15)求得, 于是得到式(20)的 d_{co} , 即

$$d_{co} = [\mu_{af} e - \Delta L_{af} \Delta Z_{af} e, 0, -\mu_{af} e - \Delta U_{af} \Delta W_{af} e, 0, 0, 0]^T \quad (25)$$

再解线性方程

$$\nabla_{\lambda}^2 L \times \Delta \lambda_{co} = d_{co} \quad (26)$$

得到校正方向 $\Delta \lambda_{co}$ 。于是得到总的牛顿方向为

$$\Delta \lambda = \Delta \lambda_{af} + \Delta \lambda_{co} \quad (27)$$

最后,按式(13)对原变量和对偶变量进行更新。值得指出的是,在预报阶段得到 $\Delta \lambda_{af}$ 和 μ_{af} 后,可以不解式(26)、(27)而直接将 $\Delta \lambda_{af}$ 和 μ_{af} 代入式(19)从而一次性得到 $\Delta \lambda$ 。

综上所述,预报-校正内点法的步骤为:①初始化:给 x 、 l 、 u 、 z 、 w 、 y 、 μ 赋初值;②求解修正方程式(19):分预报和校正两个阶段;③按式(13)更新原、对偶变量;④收敛判断:由式(15)重新计算补偿间隙 ρ ,若满足 $\rho \leq 10^{-6}$ 则结束迭代,否则置 $\mu^{(k+1)} = \mu_{af}$ 并转步骤②进行下一次迭代。

5 算例仿真

本文仿真用的 4 个算例系统数据均取自文献[10],如表 1 所示。初值选取原则为: $x^{(0)}$ 取对应变量的上、下限均值, $l^{(0)} = h(x^{(0)}) - \underline{h}$, $u^{(0)} = \bar{h} - h(x^{(0)})$, $y_i^{(0)} = 1$, $z_i^{(0)} = 0.8/l_i^{(0)}$, $w_i^{(0)} = 0.8/u_i^{(0)}$, $\mu^{(0)} = 0.01$;收敛判据为 $\rho \leq 10^{-6}$ 。所有测试系统均用 2 种方法进行仿真,P-IPM(Pure Interior Point Method)表示纯原-对偶内点法,PC-IPM(Predictor-Corrector Interior Point Method)表示预报-校正内点法。程序用 Matlab 语言编写,在 P4 2.4GHz、256M 内存的 PC 机上运行,计算结果如表 2 所示。

表 1 测试系统数据

Tab.1 Parameters of test power systems

| 系统 | 节点数目 | 发电机数目 | 线路数目 | 变压器数目 | 电容器数目 |
|----------|------|-------|------|-------|-------|
| IEEE 14 | 14 | 5 | 20 | 3 | 1 |
| IEEE 30 | 30 | 6 | 41 | 4 | 2 |
| IEEE 57 | 57 | 7 | 78 | 15 | 3 |
| IEEE 118 | 118 | 54 | 179 | 9 | 15 |

表 2 仿真结果

Tab.2 Results of simulation

| 系统 | 系统网损/pu | | 网损下降 | P-IPM | | PC-IPM | |
|----------|---------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|
| | 优化前 | 优化后 | | 迭代次数 | 用时/s | 迭代次数 | 用时/s |
| IEEE 14 | 0.1341 | 0.1102 | 17.82% | 11 | 0.078 | 9 | 0.062 |
| IEEE 30 | 0.0533 | 0.0397 | 25.52% | 11 | 0.109 | 9 | 0.093 |
| IEEE 57 | 0.2784 | 0.2191 | 21.30% | 14 | 0.328 | 11 | 0.250 |
| IEEE 118 | 1.2122 | 1.0236 | 15.56% | 17 | 1.953 | 12 | 1.407 |

由表 2 可见,2 种算法的优化结果一样,但预报-校正内点法的迭代次数显然比纯原-对偶内点法少。预报-校正内点法在求解修正方程式(21)和(26)时其系数矩阵相同,因而每次迭代只需进行一

次系数矩阵因子化,在预报和校正阶段各进行一次前代回代计算,与纯原-对偶内点法相比,在每次迭代时预报-校正内点法多了一次前代回代计算,但正是这一计算使得迭代步长明显增大,从而减少了总的迭代次数。

图 1 显示了 2 种算法应用于 IEEE 118 节点测试系统时的收敛特性,每次迭代的步长如图 2 所示。无论图 1 还是图 2 都显示了预报-校正内点法的优越性,由图 2 可见,预报-校正内点法在第 5 次迭代时其步长已很大(达到最大值 0.9995),而纯原-对偶内点法前 10 次的迭代步长一直较小,这正是预报-校正内点法收敛快的原因。

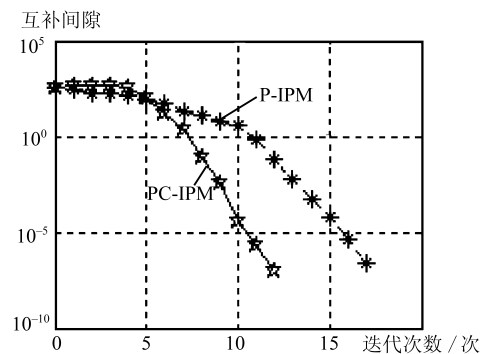


图 1 2 种算法应用于 IEEE 118 节点系统时的收敛特性
Fig.1 Convergence of two algorithms applied to IEEE 118-bus system

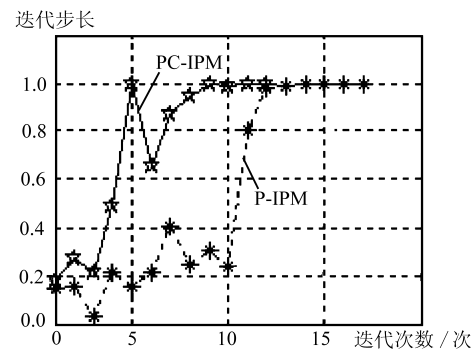


图 2 2 种算法应用于 IEEE 118 节点系统时的迭代步长
Fig. 2 Iteration step of two algorithms applied to IEEE 118-bus system

文献[10,11]在应用预报-校正内点法进行电力系统优化计算时,将不等式约束分别写成函数不等式约束和变量不等式约束,因而出现了较多的原、对偶变量,编程时比较繁琐。本文将这两者合成一个不等式约束,使算法看起来较清晰。此外,文献[10]设置了补偿间隙、最大 KKT 系统(即式(7))残差、目标函数增量 3 个收敛判据,而文献[11]设置了原可行性、对偶可行性、约束可行性(bound feasibility)和对偶间隙 4 个收敛判据。但事实上,

只要补偿间隙设置得合理,其它判据如潮流残差等就能自然满足,因此本文只设置补偿间隙 $\rho \leq 10^{-6}$ 作为唯一收敛判据,表3列出了当 ρ 收敛时4个仿真系统潮流方程的最大残差和目标函数增量的收敛情况。从表中可以看出,当 $\rho \leq 10^{-6}$ 时最大潮流残差也已收敛,虽然目标函数增量(即该次迭代后目标函数值与上次迭代后目标函数值之差)比补偿间隙大,但在工程上这个精度已足够。所以,算法中只设置 $\rho \leq 10^{-6}$ 为收敛判据是合理的,这样便于编程、减少计算量。

表3 补偿间隙、潮流方程最大残差和目标函数增量的收敛情况

Tab.3 Convergence of compensating gaps, maximal residual errors of load flow equations and increments of objective functions

| 系统 | 补偿间隙 ρ | 潮流方程最大残差 | 目标函数增量 |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| IEEE 14 | 4.8121×10^{-7} | 5.2698×10^{-7} | 2.4466×10^{-5} |
| IEEE 30 | 2.2548×10^{-7} | 2.8429×10^{-7} | 3.8378×10^{-5} |
| IEEE 57 | 5.0741×10^{-8} | 2.4418×10^{-9} | 2.5566×10^{-6} |
| IEEE 118 | 3.0134×10^{-7} | 5.1244×10^{-8} | 6.3724×10^{-5} |

本文选取初值点的方法与文献[10,11]也有所不同。文献[10]完全采用 Mehrotra 最初提出的方法,该方法要求目标函数一阶偏导数的 1-范数(见该文献式(24)和式(25))并做较多的判断,虽然文献[11]对该方法做了一些改进,但还需先做一系列的判断,见文献[11]中的式(19)~(23)。大量仿真计算表明,本文选取初值的方法简单、有效,限于篇幅这里不再详述。

6 结语

非线性预报-校正内点法是数学优化领域的一种优秀算法,算法本身不难理解,编程也比较容易。本文详细推导了原-对偶内点法和预报-校正内点法,并将预报-校正内点法应用于电力系统无功优化,取得了良好的优化效果。由4个IEEE测试系统的仿真结果可见,内点法可以有效求解电力系统无功优化问题,与原-对偶内点法相比,预报-校正内点法在收敛次数和迭代收敛时间上具有明显的优势,最后对收敛判据进行了讨论,所有结果表明该算法应用于电力系统无功优化是有效、可行的。

参考文献

[1] Momoh J A, El-Hawary M E, Adapa R. A review of selected optimal power flow literature to 1993, Part I: nonlinear and quadratic programming approaches[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999,

14(1): 96-104.

- [2] Momoh J A, El-Hawary M E, Adapa R. A review of selected optimal power flow literature to 1993, Part II: Newton, linear programming and interior point methods[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 105-111.
- [3] Granville S. Optimal reactive dispatch through interior point methods[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 136-146.
- [4] 刘明波, 陈学军. 基于原对偶仿射尺度内点法的电力系统无功优化算法[J]. 电网技术, 1998, 22(3): 24-28.
- Liu Mingbo, Chen Xuejun. Primal-dual affine scaling interior point method based reactive power optimization in power systems[J]. Power System Technology, 1998, 22(3): 24-28.
- [5] 张元明, 王晓东, 李乃湖. 基于原对偶内点法的电压无功功率优化[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 42-45.
- Zhang Yuanming, Wang Xiaodong, Li Naihu. Voltage/reactive power optimization based on primal-dual interior point method[J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 42-45.
- [6] 李乃湖, 丁恰, 王晓东. 基于原-对偶内点法的电压无功实时优化控制算法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(5): 20-23, 60.
- Li Naihu, Ding Qia, Wang Xiaodong. Primal-dual interior point method based real-time voltage/reactive power control algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(5): 20-23, 60.
- [7] 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.
- Liu Mingbo, Cheng Ying, Lin Shenghong. Comparative studies of interior-point linear and nonlinear programming algorithms for reactive power optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(1): 22-26.
- [8] 刘明波, 李健, 吴捷. 求解无功优化的非线性同伦内点法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 1-7.
- Liu Mingbo, Li Jian, Wu Jie. Nonlinear homogeneous interior-point method for reactive-power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 1-7.
- [9] Liu M B, Tso S K, Cheng Y. An extended nonlinear primal-dual interior-point algorithm for reactive-power optimization of large-scale power systems with discrete control variables[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 982-991.
- [10] Wu Y C, Debs A S, Marsten R E. A direct nonlinear predictor-corrector primal-dual interior point algorithm for optimal power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 876-883.
- [11] Yan X H, Quintana V H. An efficient predictor-corrector interior point algorithm for security-constrained economic dispatch[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 803-809.
- [12] 吴际舜, 侯志俭. 电力系统潮流计算的计算机方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.

收稿日期: 2004-11-17。

作者简介:

徐进东(1980-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制;

丁晓群(1964-), 男, 教授, 主要从事人工智能在电力系统中的应用、电气设备故障诊断以及配电自动化领域的教学和科研工作;

覃振成(1972-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与优化运行。