

求解最优潮流 KKT 系统的一类新模型及算法设计

罗 可, 童小娇

(长沙理工大学 计算机与通信工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 电力工业的市场化改革对最优潮流(optimal power flow, OPF)的计算精度和速度提出了更高的要求. 本文针对 OPF 模型中存在大量的无功约束的特性, 把一般非线性不等式约束和边界约束分开处理, 通过引入一个对角矩阵和非线性互补函数, 建立了与 OPF 问题的 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 系统等价的约束非光滑方程新模型. 进一步, 基于新建立的模型, 提出了一类具有理论上收敛性保证的投影半光滑 Newton 型算法. 相对于传统的解 OPF 的 KKT 系统和非线性互补函数方法, 新方法一方面保持了非线性互补函数法无需识别有效集的优点, 同时又减少了问题的维数, 且投影计算保持了无功约束的可行性. IEEE 多个算例的数值试验显示本文所提出的模型和算法具有较好的计算效果.

关键词: 最优潮流; KKT 系统; 非线性互补函数; 投影 Newton 法

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A

New model and algorithm for solving the KKT system of optimal power flow

LUO Ke, TONG Xiao-jiao

(School of Computer and Communication Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410076, China)

Abstract: The market revolution of the power industry presents higher requirement for the computing precision and speed of optimal power flow — OPF. Considering that there exist plentiful boundary constraints of reactive power in OPF problems, the general inequality constraints and the boundary constraints are treated separately. Then, by introducing a diagonal matrix and the nonlinear complementarity function, the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) system of OPF is transformed equivalently to non-smooth constrained equations. Moreover, based on the new model, a projected semi-smooth Newton algorithm is presented, which has convergent guarantee in theory. Compared with the traditional nonlinear system of KKT system of OPF and the method of nonlinear complementarity function, the new method not only keeps the advantage that it need not identify active set, but also reduces the dimension of the problem. Furthermore, the proposed approach retains the feasible property of boundary constraints for reactive power. Numerical examples of some standard tested IEEE systems show that the new model and algorithm have better effect of computation.

Key words: optimal power flow; KKT system; nonlinear complementarity function; projection Newton method

1 引言(Introduction)

最优潮流(OPF)问题是电力系统分析中最基本且重要的一类问题, 它研究在系统运行安全约束条件下, 如何通过调整系统中可利用的控制手段获得电力系统最优的运行状态. OPF 在数学上可描述为一般非线性约束规划问题

$$\begin{cases} \min_u c(x, u) \\ \text{s. t. } f(x, u) = 0, h(x, u) \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中: x 为状态变量, u 为控制变量; $f(x, u) = 0$ 为系统的平衡方程(或称潮流方程); $h(x, u) \leq 0$ 包括发电机出力约束、支路潮流约束、电压约束等.

自 20 世纪 60 年代 OPF 模型首次提出以来, 最优潮流一直是许多学者关注和研究的热点问题, 数学上各种有效的算法被广泛应用于 OPF 的计算^[1]. 1984 年, D. I. Sun 提出了经典的 Newton 法最优潮流算法^[2], 被公认为是 OPF 算法的一次飞跃, 随后,

收稿日期: 2004-10-26; 收修改稿日期: 2005-07-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60474070, 1071036); 湖南省自然科学基金资助项目(05JJ2002, 04JJ3031); 湖南省科技厅基金资助项目(05FJ3074); 湖南省教育厅基金资助项目(04C133).

该算法得到了进一步的发展^[1,3]. 在 Newton 法的计算过程中, 一个主要的工作是有效集的识别. 非线性互补函数 (nonlinear complementary problem, NCP) 的提出^[4,5] 较好地解决了优化中的不等式约束问题. NCP 函数能等价转换互补关系为非光滑方程, 从而避免了有效集的计算. 因此, 各类解方程的方法能用来求解 KKT 系统, 比如, Newton 型方法. 基于 NCP 函数, 文献[6]结合内点法提出了 OPF 的一类算法. 最近, 文献[7,8]基于 NCP 函数提出了求解 OPF 和计算可用输电能力 (available transfer capability, ATC) 的半光滑 Newton 方法, 数值试验证明了算法的有效性.

文献[6~8]中的算法是建立在求解 OPF 的 KKT 系统上的一类方法, 对于 OPF 的每个约束均需考虑对应的乘子变量 (或称对偶变量). 因此等价的方程系统的变量由 OPF 的原始和对偶变量组成. 注意到在 OPF 中存在大量的无功约束, 若把界约束和一般非线性不等式约束均用 NCP 函数处理, 会因每个约束的对偶变量 (包括界约束的对偶变量) 的引入而导致对应的非线性方程系统的维数过大, 从而增加计算上的困难. 因此, 本文考虑在保持 NCP 函数方法优点的前提下, 如何构造适当的模型减少等价的非线性方程的维数. 具体地, 把非线性不等式约束和界约束分开考虑, 对非线性不等式约束仍用文献[7,8]的 NCP 方法处理成等价的非光滑方程; 通过引入一个对角矩阵, 消去 KKT 系统中关于界约束的互补关系, 从而建立不包含界约束对偶变量的等价带界约束的非光滑方程系统, 新模型的建立发展了文献[7,8]的方法. 进一步, 本文根据文献[9,10]中求解界约束方程组的投影渐近半光滑 Newton 型算法构造了求解新模型的算法, 该算法具有较好的收敛性. 本文用 IEEE-9, 30, 57 和 118 节点算例进行了数值试验, 并与文献[7]中的结果进行了比较, 实验表明本文算法具有更好的计算效果.

2 KKT 系统等价的新模型 (Equivalent Model of the KKT system)

为了把非线性不等式约束与界约束分开考虑, 式(1)可表达为

$$\begin{cases} \min C(x_1, x_2) \\ \text{s.t. } f(x_1, x_2) = 0, h_1(x_1, x_2) \geq 0, l \leq x_2 \leq u. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $C: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 为优化目标函数; 对于 OPF 问题, 可

以为发电成本最小、网损最小等; x_1 和 x_2 分别为与有功和无功相关的变量, 即 $x_1 = (P_g, \theta)^T \in \mathbb{R}^{n_1}$, $x_2 = (Q_g, V)^T \in \mathbb{R}^{n_2}$, 其中 $n = n_1 + n_2$; $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ 为相关于有功与无功的潮流方程; $h_1: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$ 为不等式约束, 包括发电机有功出力约束, 线路电流约束等; $l \leq x_2 \leq u$ 为无功约束, 包括节点电压约束, 发电机的无功出力约束等, P_g, Q_g 为发电机的有功和无功出力, V, θ 为节点电压的幅值和相角.

记问题(2)的 Lagrange 函数为

$$\begin{aligned} L(x_1, x_2, \lambda, \mu_l, \mu_u) = & C(x_1, x_2) - \lambda^T f(x_1, x_2) - \mu_l^T h_1(x_1, x_2) - \\ & \mu_l^T (x_2 - l) - \mu_u^T (u - x_2). \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\lambda \in \mathbb{R}^m, \mu_l \in \mathbb{R}^p, \mu_u \in \mathbb{R}^{n_2}$ 是对应的 Lagrange 乘子向量 (或称对偶变量). 由非线性优化问题的 KKT 条件可知^[11]: 若 $x^* = (x_1^*, x_2^*)$ 是问题(2)的解, 则在约束规范化条件下, 存在 Lagrange 乘子 (λ, μ_l, μ_u) , 使得向量 $(x_1^*, x_2^*, \lambda_1^*, \mu_l^*, \mu_u^*)^T$ 是式(4)的解 (略去 * 号简化表示).

$$\begin{cases} \nabla_1 L = \nabla_1 L(w) = \nabla_1 C(x_1, x_2) - \nabla_1 f \lambda - \nabla_1 h_1 \mu_l = 0, \\ \nabla_2 L = \nabla_2 L(w) - \mu_l + \mu_u = 0, \\ \nabla_2 C(x_1, x_2) - \nabla_2 f \lambda - \nabla_2 h_1 \mu_l - \mu_l + \mu_u = 0, \\ f(x_1, x_2) = 0, \\ h_1(x_1, x_2) \geq 0, \mu_l \geq 0, h_{1i} \mu_{li} = 0, i = 1, \dots, p, \\ l \leq x_2 \leq u, \mu_l \geq 0, \mu_u \geq 0, \\ (x_2 - l)_i \mu_{li} = (u - x_2)_i \mu_{ui} = 0, i = 1, \dots, n_2. \end{cases} \quad (4)$$

此处: $w = (x_1, x_2, \lambda, \mu_l)$, ∇_1, ∇_2 分别表示对 x_1, x_2 的导数. 对于非线性系统(4), 其变量的维数 $(w, \mu_l, \mu_u) \in \mathbb{R}^{n+m+p+2n_2}$.

下面分析的目标是消去非线性系统(4)的界约束乘子 μ_l, μ_u . 由式(4)中的第二个方程和最后两个方程可得

$$\begin{cases} \text{若 } l_i < x_{2i} < u_i, \text{ 则 } \mu_{li} = \mu_{ui} = 0, \text{ 故 } (\nabla_2 L)_i = 0, \\ \text{若 } x_{2i} = l_i, \text{ 则 } \mu_{ui} = 0, \text{ 故 } (\nabla_2 L)_i \geq 0, \\ \text{若 } x_{2i} = u_i, \text{ 则 } \mu_{li} = 0, \text{ 故 } (\nabla_2 L)_i \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

对 $i = 1, 2, \dots, n_2$, 定义对角阵 D 为

$$(D(w))_{ii} = \begin{cases} (u - x_2)_i, & \text{若 } (\nabla_2 L(w))_i < 0, \\ (x_2 - l)_i, & \text{若 } (\nabla_2 L(w))_i \geq 0. \end{cases} \quad (6)$$

式(6)结合式(5), 可推得式(4)中的第二个等式和

界约束的互补条件等价表达为

$$D(w) \nabla_2 L(w) = 0. \quad (7)$$

类似于文献 [7, 8], 引入非线性互补 Fischer-Burmeister 函数^[4]处理式(4)中非线性不等式约束的互补关系, 即定义

$$\phi(a, b) = a + b - \sqrt{a^2 + b^2}.$$

基于界约束和非线性不等式的如上处理, KKT 系统(4)等价于如下带界约束的非光滑方程组:

$$H(w) = \begin{pmatrix} \nabla_1 L(w) \\ D(w) \nabla_2 L(w) \\ f(x_1, x_2) \\ \Phi(x_1, x_2, \mu_1) \end{pmatrix} = 0, \quad l \leq x_2 \leq u. \quad (8)$$

其中 $\Phi(x_1, x_2, \mu_1) = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p)^T$.

注1 系统(8)为本文所建立的新模型, 其变量的个

$$\begin{pmatrix} \nabla_{11}^2 L & \nabla_{12}^2 L & -\nabla_1 f & -\nabla_1 h_1 \\ D(w) \nabla_{21}^2 L & D(w) \nabla_{22}^2 L + E(w) & -D(w) \nabla_2 f & -D(w) \nabla_2 h_1 \\ \nabla_1 f^T & \nabla^2 f^T & 0 & 0 \\ \partial_1 \Phi \nabla_1 h_1^T & \partial_1 \Phi \nabla_2 h_1^T & 0 & \partial_2 \Phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ d\lambda \\ d\mu_1 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \nabla_1 L \\ D(w) \nabla_2 L \\ f \\ \Phi \end{pmatrix}. \quad (10)$$

其中

$$\partial_1 \Phi(w) = \text{diag}(a_{ii}), \quad \partial_2 \Phi(w) = \text{diag}(b_{ii}),$$

$$i = 1, 2, \dots, p,$$

且

$$a_{ii} = \begin{cases} 1 - \frac{h_{li}}{\sqrt{\mu_{li}^2 + h_{li}^2}}, & \text{若 } \mu_{li}^2 + h_{li}^2 \neq 0, \\ 1 - \alpha_i, & \text{若 } \mu_{li}^2 + h_{li}^2 = 0, \end{cases} \quad i = 1, \dots, p,$$

$$b_{ii} = \begin{cases} 1 - \frac{\mu_{li}}{\sqrt{\mu_{li}^2 + h_{li}^2}}, & \text{若 } \mu_{li}^2 + h_{li}^2 \neq 0, \\ 1 - \beta_i, & \text{若 } \mu_{li}^2 + h_{li}^2 = 0, \end{cases} \quad i = 1, \dots, p.$$

式中 α_i, β_i 满足 $\|(\alpha_i, \beta_i)\| \leq 1 (i=1, \dots, p)$.

在 w^k 点, 通过式(10)可求搜索方向. 简记式(10)为

$$V_k d_k = -H_k. \quad (11)$$

3 投影半光滑 Newton 型算法 (Projected Semismooth Newton Algorithm)

不难分析系统(8)的解对应于如下界约束优化问题的解:

$$\begin{cases} \min \psi(w) = \frac{1}{2} \|H(w)\|^2 \\ \text{s. t. } l \leq x_2 \leq u. \end{cases} \quad (12)$$

其中: 式(8)和式(12)的对应关系为若 w^* 是式(8)的解, 则 w^* 是式(12)的解, 且最优值 $\psi(w^*) = 0$; 相反结论也成立. 但在实际计算时, 本文并非解此

数为 $w = (x_1, x_2, \lambda, \mu_1) \in \mathbb{R}^{n+m+p}$. 比较系统(4)和文献 [7, 8] 的模型, 新模型变量的个数减少了 $2n_2$, 这正是本文所建立模型的优点.

注2 $D(w)$ 的不可微点正是 $\nabla_2 L(w) = 0$ 的点, 则不可微性被 $\nabla_2 L(w)$ 磨光, 即 $D(w) \nabla_2 L(w)$ 是光滑的. 另外 $\Phi(w)$ 是半光滑的^[4]. 因此系统(8)为约束半光滑方程组.

应用半光滑 Newton 法^[11] 求解式(8), 且用投影计算保证 x_2 的可行性. 直接计算 $D(w) \nabla_2 L(w)$ 的导数为

$$\begin{aligned} (D(w) \nabla_2 L(w))' &= \\ D(w) (\nabla_{21}^2 L(w), \nabla_{22}^2 L(w))' + (0, E(w)). \end{aligned} \quad (9)$$

此处 $E(w)$ 是一对角阵, 元素为

$$(E(w))_{ii} = |(\nabla_2 L(w))_i|, \quad i = 1, 2, \dots, n_2.$$

系统(8)的半光滑 Newton 计算式为

优化问题, 只是用 $\psi(w)$ 作为迭代计算中下降性的检测函数, 通常称为效益函数.

用文献 [9, 10] 中的算法求解界约束非光滑方程(8). 该算法的特点是: 用投影梯度和投影 Newton 方向构造一个组合搜索方向, 使算法不仅具有全局收敛性 (由投影梯度方向控制), 同时具有快速的局部超线性收敛性 (投影 Newton 方向控制); 此外, 在 OPF 的计算中, 无功界约束的超限对计算的性能有较大的影响, 用投影计算保证无功界约束的可行性. 记

$$Y = \mathbb{R}^{n_1} \times X_2 \times \mathbb{R}^{m_1} \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^{m_2}.$$

其中 $X_2 = \{x_2 \in \mathbb{R}^{n_2} \mid l \leq x_2 \leq u\}$. 在 w^k 点, 其投影计算为

$$\bar{w} = P_Y(w^k) = (x_1^k, \bar{x}_2^k, \lambda_1^k, \mu_1^k, \lambda_2^k).$$

其中

$$\bar{x}_2^k = (P_{X_2}(x_2^k))_i = \begin{cases} l_i, & \text{若 } x_i < l_i, \\ x_i, & \text{若 } l_i \leq x_i \leq u_i, \\ u_i, & \text{若 } x_i > u_i, \end{cases}$$

$$i = 1, \dots, n_2.$$

投影半光滑 Newton 型算法如下:

Step 0 选取常数 $\rho, \sigma, \eta \in (0, 1)$ 和初始点 w^0 , 使得 $x_2^0 \in X_2 = \{x_2 \mid l \leq x_2 \leq u\}$. 设 $k := 0$.

Step 1 取 $V_k \in \partial H(w^k)$, 并计算 $\nabla \psi(w^k) = V_k^T H(w^k)$.

Step 2 若 w^k 是式(12)的稳定点,停止计算;否则计算梯度方向

$$d_G^k = -\gamma_k \nabla \psi(w^k). \quad (13)$$

其中 $\gamma_k = \min\left\{1, \frac{\eta \psi_k}{\|\nabla \psi_k\|^2}\right\}$.

Step 3 由式(11)计算 Newton 方向 d_N^k .

Step 4 确定组合搜索方向和下迭代点. 设 m_k 是满足下式的最小非负整数,

$$\psi(w^k + \bar{d}(\rho^m)) \leq \psi(w^k) + \sigma \nabla \psi(w^k)^T \bar{d}_G^k(\rho^m). \quad (14)$$

$$t(\lambda) = \begin{cases} 0, \\ -\frac{[H(w) + V\bar{d}_N(\lambda)]^T V[\bar{d}_G(\lambda) - \bar{d}_N(\lambda)]}{\|V[\bar{d}_G(\lambda) - \bar{d}_N(\lambda)]\|^2}, \end{cases} \text{ 否则.}$$

记 $\lambda_k = \rho^{m_k}$ 及 $w^{k+1} = w^k + \bar{d}^k(\lambda_k)$.

Step 5 设 $k := k + 1$ 返 Step 1.

如上算法为 Newton 型迭代法. 由于采用了优化组合方向的构造及投影技术,使得对约束方程系统(8)的计算类似于无约束方程的 Newton 法,因而分享了 Newton 法的优点,如每步计算的主要计算量是线性方程组的求解,且算法有快速的收敛速度.

注 3 上述算法为数值迭代方法,其停止标准为(12)的稳定点,这是解约束非线性方程所通用的标准. 在实际计算中,稳定点一般为方程系统的解点. 但对稳定点与解点非一致的情况,得到的是弱收敛结论,这是约束方程系统复杂于无约束方程系统的关键点.

注 4 类似于文献[9, 10]中的收敛性分析,本文有如下算法的全局与局部收敛性.

定理 1 设 $\{w^k\}$ 是由上述投影半光滑 Newton 型算法产生的序列, w^* 是它的任一聚点,则聚点 w^* 是问题(12)的一个稳定点. 进一步,如果 w^* 是方程系统(8)的一个解点,且系统(8)满足 BD 正则的条件(BD 正则性见文献[10]),则当初始点 w^0 充分靠近 w^* 时, w^k 超线性收敛到 w^* .

注 5 本文算法的全局与局部收敛性指的是迭代计算中初始点的取值范围. 若任意选取初始点均可保证算法的收敛性,称为全局收敛;若要求初始点比较靠近解点,则称为局部收敛.

4 数值试验(Numerical tests)

用 MATLAB 语言编写程序对本文提出的算法测试电力系统中标准的 IEEE-9, 30, 57, 118 节点. 计算环境为: Pentium IV 1.6G MHz, 224Mbytes RAM, Microsoft Windows 2000 Professional operating system. 测试系统统计信息见表 1.

其中对任 $\lambda \in [0, 1]$,

$$\bar{d}^k(\lambda) = t_k^*(\lambda) \bar{d}_G^k(\lambda) + [1 - t_k^*(\lambda)] \bar{d}_N^k(\lambda), \quad (15)$$

$$\begin{cases} \bar{d}_G^k(\lambda) = P_Y[w + \lambda d_G^k] - w^k, \\ \bar{d}_N^k(\lambda) = P_Y[w + \lambda d_N^k] - w^k. \end{cases} \quad (16)$$

$t_k^*(\lambda)$ 是搜索方向的最优值,计算方法见文献[9, 10]:

$$t^*(\lambda) = \max\{0, \min\{1, t(\lambda)\}\}. \quad (17)$$

其中

如果 $\|V[\bar{d}_G(\lambda) - \bar{d}_N(\lambda)]\| = 0$,

表 1 测试系统统计信息

Table 1 Statistic information for the tested system

测试系统	节点	发电机	线路	等式	不等式
IEEE-9	9	3	9	18	48
IEEE-30	30	6	41	60	166
IEEE-57	57	7	80	114	302
IEEE-118	118	54	186	236	824

OPF 问题的目标函数取为发电成本最小,即

$$C(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^{N_G} C_{pi}(P_{gi}). \quad (18)$$

式(18)中,发电机成本函数为二次函数,即 $C_{pi}(P_{gi}) = A_i P_{gi}^2 + B_i P_{gi} + C_i$.

系统参数取自 IEEE 标准算例. Lagrange 乘子的初始值均取为 0.01. 算法中用到参数选择如下:

$$\rho = 0.5, \sigma = 0.1, \eta = 0.01, \gamma = 0.001.$$

算法的停止标准为 $\varepsilon = \frac{\|H(w_k)\|}{\|H(w_0)\|} = 0.00001$. 另外,

经验表明^[2,3]在 OPF 的计算中,在 Hessian 矩阵的对角元素加入小的罚项能够显著改善 Hessian 矩阵的病态. 在数值试验中也使用了这一技巧以保证 Hessian 阵的正定性. 罚项记为 γ . 本文提出的投影 Newton 算法的测试结果如表 2 所示.

表 2 投影 Newton 算法的计算结果

Table 2 Computing results of the projected Newton algorithm

测试系统	收敛判据	变量	总成本	迭代次数	计算时间/s
IEEE-9	0.000001	66	5296.686	7	0.22
IEEE-30	0.000009	226	574.607	13	1.59
IEEE-57	0.000001	416	3176.541	15	4.36
IEEE-118	0.00009	1060	11133.181	22	23.38

同时与文献[7]的算法进行比较,其计算结果如表3所示.

表3 文献[7]算法的计算结果

Table 3 Computing results of reference[7]

测试系统	收敛判据	变量	总成本	迭代次数	计算时间/s
IEEE-9	0.000001	90	5296.686	21	0.84
IEEE-30	0.000009	298	575.009	17	2.36
IEEE-57	0.000001	544	3176.541	12	3.34
IEEE-118	0.00009	1404	11133.120	32	37.83

说明 表2和表3中的“变量”表示KKT系统等价的非线性方程组的维数.

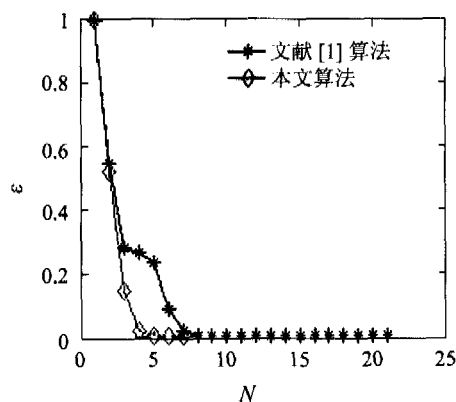
同时列出文献[7]中计算的由美国 Cornell 大学开发的 MATPOWER 程序的 MATPOWER 的数值试验结果,见表4(OPF 计算调用了 MATLAB 优化工具箱的线性规划(LP)和连续二次规划(SQP)算法).

本文的投影渐近 Newton 算法的迭代过程和文献[7]算法的迭代过程的比较见图1. 图中:横坐标“N”为迭代次数,纵坐标 ε 为收敛判据值,或称计算精度;IEEE-9-BUS, IEEE-30-BUS, IEEE-57-BUS, IEEE-118-BUS 为测试系统记号,表示标准的电力系统中“9节点,30节点,57节点,118节点”的电网系统.从表1~4和图1可见本文提出的算法明显减少了变量的维数,迭代过程中没有振荡现象,且迭代次数和计算时间有一定的改善.

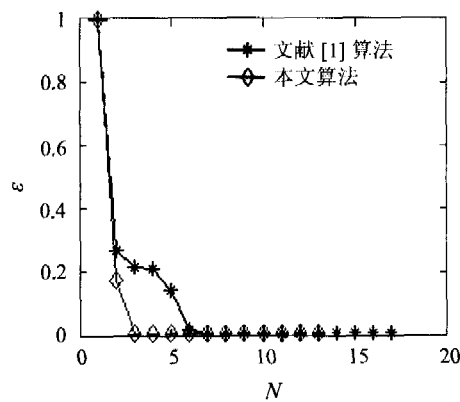
表4 MATPOWER 的 OPF 计算结果

Table 4 Computing results of OPF by Matpower

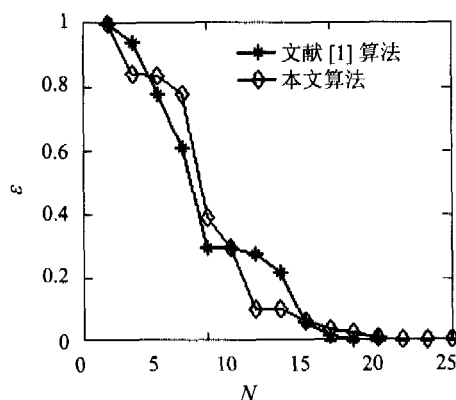
测试系统	总成本	迭代次数	计算时间/s
IEEE-9	5296.69	14	0.53
IEEE-30	576.829	24	3.56
IEEE-57	3175.81	16	7.06
IEEE-118	-	-	-



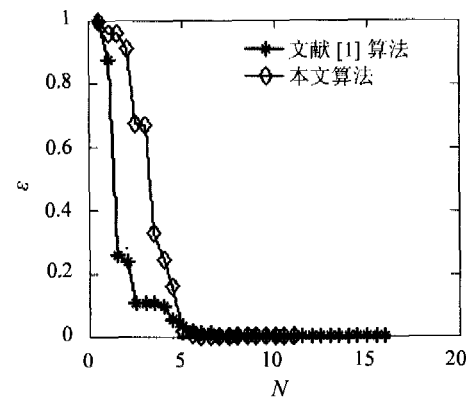
(a) IEEE-9-BUS



(b) IEEE-30-BUS



(c) IEEE-57-BUS



(d) IEEE-118-BUS

图1 迭代过程比较

Fig. 1 Comparison of iterations

5 结论(Conclusion)

本文根据电力系统的特点,把无功约束与一般非线性不等式约束分开来考虑,建立了 OPF 的 KKT 系统等价的新模型,该模型为一约束非光滑方

程系统;根据新模型作者提出了一类投影半光滑 Newton 型算法. 本文方法的主要特点是减少了求解问题的维数,提高了计算效率. IEEE 多个算例的数值实验表明本文的模型和算法有很好的计算性

能. 此外, 电力系统具有弱耦合特性, 如何结合这种弱耦合性质设计合适的解耦算法, 是作者进一步的研究工作.

参考文献(References):

- [1] El-Hawary M E. Optimal power flow: solution techniques, requirement and challenges [C]// *IEEE Tutorial Course*. Piscataway: IEEE Service Center, 1996.
- [2] SUN D I, ASHLEY B, BREWER B, et al. Optimal power flow by Newton approach [J]. *IEEE Trans on Power System*, 1984, 103(10): 2864 - 2880.
- [3] YAN Z, XIANG N D, ZHANG B M, et al. A hybrid decoupled approach to optimal power flow [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1996, 11(2): 947 - 954.
- [4] FISHER A. An NCP-function and its use for the solution of complementarity problems [C]// *Recent Advances in Nonsmooth Optimization*. Singapore: World Scientific, 1995: 88 - 105.
- [5] FACCHINEI F, PANG J S. *Finite-Dimensional Variational Inequalities and Complementarity Problems* [M]. New York: Springer, 2003.
- [6] TORRES G L, QUINTANA V H. Optimal power flow by a nonlinear complementarity method [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2000, 15(3): 1028 - 1033.
- [7] 张永平, 童小娇, 吴复立, 等. 基于非线性互补问题函数的半光滑 Newton 最优潮流算法 [J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(9): 130 - 135.
(ZHANG Yongping, TONG Xiaojiao, WU Fuli, et al. Study on semismooth optimal power flow algorithm based on nonlinear complementarity problem function [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(9): 130 - 135.)
- [8] 张永平, 童小娇, 倪以信, 等. 基于半光滑牛顿法的可用输电能力新算法 [J]. *电力系统自动化*, 2004, 28(7): 35 - 38.
(ZHANG Yongping, TONG Xiaojiao, NI Yixin, et al. A novel method for calculating available transfer capability using semismooth newton method [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(7): 35 - 38.)
- [9] TONG X, QI L. On the convergence of a trust-region method for solving constrained nonlinear equations with degenerate solutions [J]. *J of Optimization Theory and Applications*, 2004, 123(1): 187 - 211.
- [10] QI L, TONG X, Li D. An active-set projected trust region algorithm for box constrained nonsmooth equations [J]. *J of Optimization Theory and Applications*, 2004, 120(3): 601 - 625.
- [11] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
(YUAN Yaxiang, SUN Wenyu. *Optimization Theory and Methods* [M]. Beijing: Science Press, 1997.)

作者简介

罗 可 (1961—), 男, 副院长, 教授, 博士, 研究方向为数据挖掘、计算机应用, E-mail: luoket@public.cs.hn.cn;

童小娇 (1962—), 女, 副院长, 教授, 博士, 研究方向为优化理论与算法, 电力系统分析, E-mail: tongxj@csust.edu.cn.