

文章编号: 1001-0920(2006)05-0580-05

最优潮流问题的解耦半光滑牛顿型算法

罗可, 林睦纲, 童小娇

(长沙理工大学 计算机与通信工程学院, 长沙 410076)

摘要: 提出一种求解最优潮流(OPF)问题的新算法——解耦半光滑牛顿型算法。该算法是对作者的投影半光滑Newton算法的改进和提高,它除了保持原算法不必识别不等式约束、对界约束的特殊处理以减少讨论问题的维数等优点外,其显著的特点是结合了电力系统固有的弱耦合性质,构造了求解OPF问题的一类解耦半光滑牛顿算法。解耦算法可达到加快计算速度、提高计算效率的目的。IEEE多个算例的数值实验以及与其他方法的比较均显示了新算法具有良好的计算效果。

关键词: 最优潮流; KKT系统; 非线性互补函数; 半光滑牛顿算法; 分解算法

中图分类号: TM 712 **文献标识码:** A

Decoupled Semismooth Newton Algorithm for Optimal Power Flow Problems

LUO Ke, LIN Mu-gang, TONG Xiao-jiao

(School of Computer and Communication Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China. Correspondent: LUO Ke, Email: luoket@public.cs.hn.cn)

Abstract: A decoupled semismooth Newton algorithm for solving optimal power flow (OPF) is presented. The algorithm is an extension and improvement of previous work for OPF problem by using the projected semismooth Newton method. The proposed algorithm remains the advantages of previous algorithm such as it need not identify the active set of inequality constraints; handle the bounded constraints by a special technology to reduce the dimension of the problem, etc. Moreover, it combines the inherent weak-coupling property of power systems to construct a decoupled algorithm. The decoupled technology can arrive the aims of accelerating the computing speed and improving the computing efficiency. The examples of some standard tested IEEE systems and comparing with other algorithms show that the proposed algorithm has nice computing effect.

Key words: Optimal power flow; KKT system; Nonlinear complementarity function; Semismooth Newton method; Decoupled method

1 引言

自Stott等^[1]将解耦技术引入电力系统潮流计算以来,解耦技术已广泛地应用于电力系统计算,并取得了显著效果。1984年,Sun等^[2]采用牛顿法求解最优潮流(OPF),大大推动了最优潮流的实用化进程,该算法被公认为是求解OPF问题最有效的算法之一。同时Sun等^[2-4]将解耦技术引入牛顿法最优

潮流,进一步提高了计算效率。

在各类OPF的求解方法中,非线性互补函数^[5,6](NCP)方法由于能有效地处理不等式约束而受到人们的关注。基于NCP函数,文献[7]结合内点法提出了求解OPF的一类算法。最近文献[8,9]基于NCP函数又提出了求解OPF和计算可用输电能力的半光滑Newton方法。文献[7~9]中的方法均

收稿日期: 2005-03-15; 修回日期: 2005-06-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474070, 10471036); 湖南省自然科学基金项目(04JJ3031, 05JJ20002); 湖南省科技厅项目(05FJ3074)。

作者简介: 罗可(1961—),男,长沙人,教授,博士,从事数据挖掘、计算机应用等研究; 林睦纲(1972—),男,湖南邵阳人,硕士生,从事计算机应用、电气系统分析等研究。

是建立在优化问题的KKT 系统上, 算法需同时考虑 OPF 问题的所有原始变量和对偶变量. 文献[10]注意到在OPF 中存在大量的界约束, 若把界约束同一般非线性不等式约束分开处理, 并结合NCP 函数方法, 可减少了对偶变量的个数, 达到降维的目的. 因此, 文献[10]导出了KKT 等价的界约束方程的新模型, 并提出了求解该新模型的一类投影牛顿方法, 数值实验也证明了模型和算法的有效性.

解耦算法在电力系统潮流计算和OPF 计算的传统算法中广泛应用, 其中高效的解耦算法给予了新的启示. 基于非线性互补函数方法, 能否设计有效的解耦算法是本文研究的主题. 基于文献[10]中建立的KKT 系统等价的模型, 对其算法进行了改进和提高. 结合电力系统弱耦合性质, 提出了一类解耦半光滑牛顿型新算法. 新算法具有加快计算速度、提高计算效率的优点. 同时在新算法设计中, 为保证解耦计算理论上的收敛性, 采用了文献[11]中的GMRES 校正技术, 即解耦-校正结合的方式. 标准的IEEE 多个算例的数值实验以及与其他算法的比较均表明了本文算法良好的收敛性和计算效果.

2 最优潮流的数学模型及解耦方法

最优潮流问题是指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 是一个典型的非线性规划问题, 其数学模型可描述为

$$\begin{cases} \min C(x_1, x_2), \\ \text{s.t. } f_1(x_1, x_2) = 0, \\ f_2(x_1, x_2) = 0, \\ h_1(x_1, x_2) \leq 0, \\ l \leq x_2 \leq u \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C: R^n \rightarrow R$ 为优化目标函数, 对于OPF 问题, 可以为发电成本最小或网损最小等; x_1 和 x_2 分别为与有功和无功相关的变量, $x_1 = (P_g, \theta)^T \in R^{n_1}, x_2 = (Q_g, V)^T \in R^{n_2}$, 其中 $n = n_1 + n_2; f_1: R^n \rightarrow R^{m_1}, f_2: R^n \rightarrow R^{m_2}$ 为潮流方程; $h_1: R^n \rightarrow R^p$ 为非线性不等式约束, 包括发电机有功出力约束和线路电流约束等; $l \leq x_2 \leq u$ 为无功变量的界约束, 包括节点电压约束, 发电机的无功出力约束等; P_g, Q_g 为发电机有功和无功出力; V, θ 为节点电压的幅值和相角.

最优潮流算法中, 界约束和非线性不等式约束一般都采用同样的处理方式, 如非线性互补方法^[8,9]. OPF 中存在大量的界约束, 如电压约束, 有功和无功约束等, 如何对这些界约束作特殊处理, 以减少计算问题的维数是本文要探讨的问题之一. 文献[10]通过引入非线性互补函数来处理非线性

不等式约束, 引入一个对角阵以去掉OPF 问题的KKT 系统中相关于界约束的对偶变量, 这样OPF 问题(1)的KKT 系统便等价地转化为如下带约束的方程(详细推导见文献[10]):

$$H(w) = \begin{bmatrix} \nabla L(w) \\ D(w) \nabla L(w) \\ f_1(x_1, x_2) \\ \Phi(x_1, x_2, \mu_1) \\ f_2(x_1, x_2) \\ l \quad x_2 \quad u \end{bmatrix} = 0, \quad (2)$$

式中: $w = (x_1, x_2, \lambda_1, \mu_1, \lambda_2)^T, L(w) = C(x_1, x_2) - \lambda_1^T f_1 - \lambda_2^T f_2 - \mu_1^T h_1, \lambda_1, \mu_1, \lambda_2$ 为对偶变量; ∇_1, ∇_2 分别表示对 x_1, x_2 的导数; $\Phi(x_1, x_2, \mu_1)$ 是引入非线性互补函数处理非线性不等式得到的方程; 矩阵 $D(w)$ 是作者引入的对角矩阵

$$(D(w))_{ii} = \begin{cases} (u - x_2)_i, & (\nabla L(w))_i < 0; \\ (x_2 - l)_i, & (\nabla L(w))_i > 0; \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

同时, 可以得到系统(2)的半光滑Newton 计算式^[10]为

$$\begin{bmatrix} \nabla_1^2 L & \nabla_2^2 L & -\nabla_1 f_1 \\ D(w) \nabla_1^2 L & D(w) \nabla_2^2 L + E(w) & -D(w) \nabla_2 f_1 \\ \nabla_1 f_1^T & \nabla_2 f_1^T & 0 \\ \partial \Phi \nabla_1 h_1^T & \partial \Phi \nabla_2 h_1^T & 0 \\ \nabla_1 f_2^T & \nabla_2 f_2^T & 0 \\ -\nabla_1 h_1 & -\nabla_2 f_2 & \\ -D(w) \nabla_2 h_1 & -D(w) \nabla_2 f_2 & \\ 0 & 0 & \\ \partial \Phi & 0 & \\ 0 & 0 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ d\lambda \\ d\mu_1 \\ d\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla L \\ D(w) \nabla L \\ f_1 \\ \Phi \\ f_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

在 w^k 点, 简记上述方程为

$$V_k d_k = -H_k, \quad (5)$$

则通过式(5)可求出半光滑Newton 方向 d_k .

当系统的规模很大时, 若通过求解式(5)这个高维的线性方程组来求得半光滑Newton 方向, 会使计算速度缓慢. 根据解耦最优潮流算法的思想, 可以充分结合电力系统中有功无功的弱耦合特性, 即有功与电压、无功与相角之间具有弱耦合特性, 引入解耦技术, 把高维线性方程组近似等价于两个低维的线性方程组来求解, 从而达到降低方程组的维数.

便于求解的目的 具体地, 划分变量为 $w = (w_1, w_2)$, 其中 $w_1 = (x_1, \lambda_1, \mu_1)^T, w_2 = (x_2, \lambda_2)^T$. 弱耦合性质在数学上表示为某些交叉项的导数值较小, 于是可用零近似地代替, 由此确定 V_k 的近似 \bar{V}_k , 则方程(5) 可用(6) 近似代替:

$$\bar{V}_k d_k = - H_k \quad (6)$$

其中 \bar{V}_k 取为如下形式:

$$\bar{V}_k = \begin{bmatrix} \nabla_{x_1}^T L & 0 \\ 0 & D(w) \nabla_{x_2}^T L + E(w) \\ \nabla_{\lambda_1} f_1^T & 0 \\ \partial \Phi \nabla_{\lambda_1} h_1^T & 0 \\ 0 & \nabla_{x_2} f_2^T \\ -\nabla_{\lambda_1} f_1 & -\nabla_{\lambda_1} h_1 & 0 \\ 0 & 0 & -D(w) \nabla_{x_2} f_2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \partial \Phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7) 的 \bar{V}_k 所对应的系统(6) 可等价表示为以下两个低阶非线性方程组:

$$\begin{bmatrix} \nabla_{x_1}^T L & -\nabla_{\lambda_1} f_1 & -\nabla_{\lambda_1} h_1 \\ \nabla_{\lambda_1} f_1^T & 0 & 0 \\ \partial \Phi \nabla_{\lambda_1} h_1^T & 0 & \partial \Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_1 \\ d\lambda_1 \\ d\mu_1 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_{x_1} L \\ f_1 \\ \Phi \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} D(w) \nabla_{x_2}^T L + E(w) & -D(w) \nabla_{x_2} f_2 \\ \nabla_{x_2} f_2^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_2 \\ d\lambda_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} D(w) \nabla_{x_2} L \\ f_2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

计算式(8) 和(9) 便实现了对系统(4) 或(5) 的解耦计算

进一步, 考虑到系统的弱耦合特性一般表现在解的附近, 当迭代点远离解点时, 并不能保证其弱耦合性质, 即不能保证忽略的 $\nabla_{x_1}^T L$ 和 $D(w) \nabla_{x_2}^T L$ 为小量, 因此, 这种分解计算所得的解可能存在较大的误差 为保证算法的有效性, 需对近似解进行近似条件的检测, 必要时进行校正 本文采用文献[11] 的校正方法, 提出了近似解应满足的条件, 称为近似解条件 且当近似解条件不满足时, 用 GMRES 方法校正式(6) 的解, 并校正计算中用 \bar{V}_k^{-1} 作为 GMRES 法的预条件矩阵

3 解耦半光滑牛顿型算法

方程(2) 是求解 OPF 问题的基础 基于下降算法的建立, 问题(2) 的解对应于如下界约束优化问题的解:

$$\min \psi(w) = \frac{1}{2} H(w)^2,$$

$$\text{s.t. } l \leq x_2 \leq u, \quad (10)$$

式中: $w = (x_1, x_2, \lambda_1, \mu_1, \lambda_2)^T, H(w)$ 由式(2) 定义 系统(2) 和(10) 有密切的对应关系, 若 w^* 是(2) 的解, 则 w^* 是(10) 的解, 且最优值 $\psi(w^*) = 0$; 相反结论也成立 实际计算时, 我们并非解此优化问题, 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

本文运用文献[10, 12, 13] 的类似算法的思想, 并结合解耦技术构造算法 其算法的主要特点是, 搜索方向采用投影梯度方向和投影牛顿方向的优化组合, 由此保证算法的全局收敛和局部超线性收敛性 此外, 为保证约束方程(2) 中 x_2 的可行性, 在处理边界约束时, 用到如下投影计算: 记

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

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

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

且

$$\bar{(x_2^k)}_i = (P_{X_2}(x_2^k))_i = \begin{cases} l_i, & (x_2^k)_i < l_i; \\ x_i, & l_i \leq (x_2^k)_i \leq u_i; \\ u_i, & (x_2^k)_i > u_i; \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n_2$$

解耦半光滑牛顿算法的计算步骤如下:

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

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

Step 2: 若 w^k 是式(5) 的稳定点, 停止计算; 否则计算

$$d_G^k = - \gamma_k \nabla \psi(w^k), \quad (11)$$

其中

$$\gamma_k = \min \left\{ 1, \frac{\eta \mu_k}{\nabla \psi_k} \right\}, \quad (12)$$

Step 3: 用近似分解算法求得 $d_N^k := \Delta_i$ (N 指非精确 Newton 解).

Step 3 1: 解方程(8) 和(9) 得近似牛顿方向, 记为 \bar{d}_k .

Step 3 2: 设 $\Delta_0 := \bar{d}_k, i := 0$, 取 t_k 为满足 $0 < t_k \leq \bar{t}$ 的序列

Step 3 3: 若条件

$$H_k + V_k \Delta_i \leq t_k H_k \quad (13)$$

成立, 停止内循环并转 Step 3 5; 否则以 \bar{V}_k^{-1} 为预条件阵, 用一次 GMRES 法解式(5) 得解为 Δ_{i+1} .

Step 3 4: 设 $i := i + 1$, 返 Step 3 3

Step 3 5: $d_N^k := \Delta_i$.

Step 4: 设 m_k 是满足下式的最小非负整数:

$$\begin{aligned} & \Psi(w^k + \bar{d}(\rho^m)) \\ & \Psi(w^k) + \sigma \nabla \Psi(w^k)^T \bar{d}_G^k(\rho^m), \end{aligned} \quad (14)$$

其中对任意 $\lambda \in [0, 1]$,

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

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

$t_k^*(\lambda)$ 是下列简单问题的最优解:

$$\begin{aligned} \min_{\lambda \in [0,1]} & \frac{1}{2} H(w^k) + V_k[\lambda \bar{d}_G^k(\lambda) + \\ & (1 - \lambda) \bar{d}_N^k(\lambda)]^2. \end{aligned} \quad (17)$$

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

Step 5: 设 $k := k + 1$, 返 Step 1.

注 1 上述算法中 Step 3 是用分解方法计算满足一定条件的近似解, 并在近似条件不满足时作校正计算, 其中(13)为近似解的检测条件; Step 4 是计算优化组合搜索方向.

注 2 算法中条件(13)相当于解非线性方程的非精确 Newton 型算法的条件.

因此, 类似于文献[12, 13]中的收敛性分析, 可以证明, 上述算法的收敛性定理如下:

定理 1 设 $\{w^k\}$ 是由上述解耦半光滑牛顿算法产生的序列, w^* 是它的任一聚点, 则聚点 w^* 是问题(10)的一个稳定点. 进一步, 如果 w^* 是系统(2)的一个解点, 且系统(2)满足 BD 正则的条件, 则在 w^0 充分靠近 w^* 时, w^k 超线性收敛到 w^* .

4 算例分析

4.1 实验说明

利用 Matlab 语言编程实现本文的算法, 测试电力系统中标准的 IEEE - 9, 30, 57, 118 系统. 计算环境为: Pentium IV 1.6G MHz, 224 M bytes RAM, Microsoft Windows 2000 Professional Operating System.

OPF 问题的目标函数取为发电成本最小, 即

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

式中发电机成本函数为二次函数

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为

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

算法的停止标准 ϵ 定义为

$$\epsilon = |H(w_k) - H(w_0)|.$$

此外, OPF 的实际计算经验表明^[2, 14], 在 Hessian 矩阵的对角元素中加入小的罚项能够显著改善 Hessian 矩阵的病态. 我们在数值实验中也使

用了这一技巧, 以保证 Hessian 矩阵的正定性.

4.2 解耦半光滑牛顿法

本文提出的解耦半光滑牛顿法测试结果见表 1.

表 1 解耦半光滑牛顿法的计算结果

测试系统	收敛判据	变量	总成本	迭代次数	计算时间	GMRES 次数
IEEE-9	0.00006	66	5296.686	8	0.24	4
IEEE-30	0.00006	226	574.636	12	3.04	8
IEEE-57	0.00004	416	3176.541	13	8.14	9
IEEE-118	0.00008	1060	11134.45	27	45.34	4

文献[9]也采用了分解技术, 为了比较, 将文献[9]中分解计算的结果列于表 2.

表 2 文献[9]中分解算法的计算结果

测试系统	收敛判据	变量	迭代次数	计算时间	GMRES 次数
IEEE-9	0.00006	90	17	0.92	9
IEEE-30	0.00006	298	20	3.22	13
IEEE-57	0.00004	544	12	4.33	9
IEEE-118	0.00008	1404	35	50.80	2

比较表 1 和表 2 可以看出, 从变量个数, 计算的迭代次数和计算时间上, 本文的解耦半光滑牛顿法具有更好的计算效果, 显示了新模型和算法的有效性.

进一步, 将本文解耦半光滑牛顿法的迭代过程(曲线)与文献[10]的非解耦算法的计算过程(曲线)加以比较, 如图 1 所示.

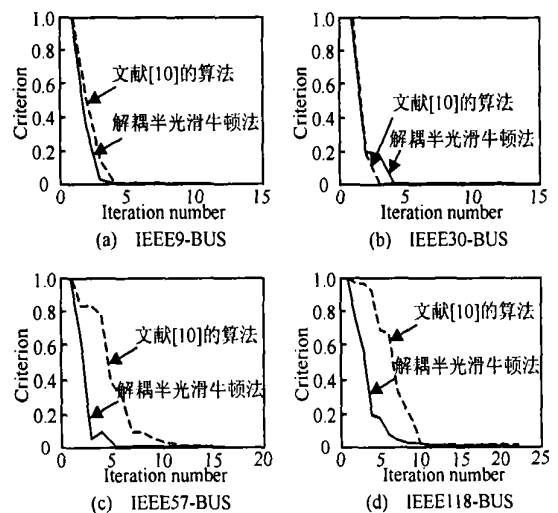


图 1 迭代过程的比较

由图可见, 在迭代初期, 本文解耦算法的计算效果比文献[10]并无优势, 但在靠近解的部分, 计算效果较好. 这是因为电力系统的弱耦合特性一般在

解点附近显示,当迭代点远离解点时,解耦近似解可能不满足近似的条件,需进行校正计算,从而影响了迭代的计算速度和计算时间.显然,本文解耦方法对高维问题的计算具有潜在的优势.

5 结 语

本文建立了求解OPF问题的新模型,该模型具有降低问题的维数,且无需识别不等式约束的有效集的优点.基于新模型并结合电力系统的弱耦合特性,提出了解耦半光滑牛顿型算法,该算法具有理论上的收敛性保证.通过对IEEE 9, 30, 57和118节点的电力测试系统进行了数值实验,并与文献[9, 10]的计算效果进行了比较,充分显示了本文算法具有更好的计算性能和应用前景.

参考文献(References)

- [1] Stott B, Alsac O. Fast Decoupled Load Flow [J]. *IEEE Trans on PAS*, 1974, 93(3): 859-869.
- [2] Sun D I, Ashley B, Brewer B, et al. Optimal Power Flow by Newton Approach [J]. *IEEE Trans on PAS*, 1984, 103(10): 2864-2880.
- [3] Sasaki H, et al. Development of Optimal Power Flow and Application to Dynamic Economic Load Dispatch [A]. *IFAC PS&PPC* [C]. Seoul, 1989, 8: 581-586.
- [4] Liu Wen-Hsiung, Paralexopoulos D, Tinney W F. Discrete Shunt Controls in a Newton Optimal Power Flow [J]. *IEEE Trans on PWRS*, 1992, 7(4): 1509-1518.
- [5] Fisher A. An NCP-function and Its Use for the Solution of Complementarity Problems [A]. *Recent Advances in Nonsmooth Optimization* [C]. Singapore: World Scientific, 1995: 88-105.
- [6] Facchinei F, Pang J S. *Finite-dimensional Variational Inequalities and Complementarity Problems* [M]. New York, Berlin: Springer, 2003.
- [7] Torres GL, Quintana V H. Optimal Power Flow by a Nonlinear Complementarity Method [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2000, 15(3): 1028-1033.
- [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 Y P, Tong X J, Ni Y X, 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] 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 Y P, Tong X J, Wu F L, et al. Study on Semismooth Newton Optimal Power Flow Algorithm Based on Nonlinear Complementarity Problem Function [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(9): 130-135.)
- [10] 罗可, 林睦纲, 童小娇. 最优潮流的投影渐近半光滑NEWTON算法[A]. 2005中国控制与决策学术年会论文集[C]. 哈尔滨, 2005: 775-779.
(Luo K, Lin M G, Tong X J. Gradual Projection Semismooth Newton Optimal Power Flow Algorithm [A]. *Proc of the 2005 Chinese Control and Decision Conf* [C]. Harbin, 2005: 775-779.)
- [11] Conejo A J, Nogales F J, Prieto F J. A Decomposition Procedure Based on Approximate Newton Direction [J]. *Mathematical Programming*, 2002, 93(3): 495-515.
- [12] Tong X J, 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.
- [13] Qi L, Tong X J, Li D H. An Active-set Projected Trust Region Algorithm for Box Constrained Nonsmooth Equations [J]. *J of Optimization Theory and Applications*, 2004, 123(1): 601-625.
- [14] 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.