

离散粒子群与内点法结合的电力系统无功优化

姚煜, 蔡燕春

(广东电网公司广州供电局, 广东 广州 510620)

摘要: 基于离散粒子群优化算法与内点法, 提出了一种新颖的混合策略来求解电力系统无功优化问题: 不考虑无功优化中的离散约束, 采用内点法求解得到初始解; 根据优化变量的不同性质将无功优化问题分解为离散优化和连续优化 2 个子问题, 并采用离散粒子群优化算法和内点法交替求解, 使两者的优化结果互为基础、相互利用, 从而保证了混合策略的整体寻优效率。以 IEEE30 和 IEEE118 节点作为试验系统, 与常规的离散优化算法做比较, 验证了该算法的正确性和有效性。

关键词: 电力系统; 无功优化; 混合整数规划; 内点法; 离散粒子群算法

A hybrid strategy based on DPSO and IPM for optimal reactive power flow

YAO Yu, CAI Yan-chun

(Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China)

Abstract: By integrating a discrete particle swarm algorithm (DPSO) with an interior point method (IPM), a hybrid strategy for the optimal reactive power flow (ORPF) problem is proposed. First, the original ORPF problem is converted to a continuous non-linear programming problem by relaxing the discrete variables, and the initial solution is obtained by the IPM. Then according to the discrete feature of the control variables, the original ORPF problem is decomposed into a continuous optimization sub-problem and a discrete optimization sub-problem, which are solved by IPM and DPSO respectively. By solving the two sub-problems alternately, the optimal solution of the ORPF problem can be obtained. IPM and GA take advantage of each other, so that the efficiency of the hybrid strategy is greatly improved. Furthermore, the numerical example of IEEE 30-bus and IEEE 118-bus system is employed to validate correctness and effectiveness of the proposed algorithm, and the result based on this algorithm is compared with that based on conventional discrimination algorithm.

Key words: power system; optimal reactive power flow; mixed integer programming; interior point method; discrete particle swarm algorithm

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)03-0048-05

0 引言

随着电力市场化的进行, 现今电力系统运行的一个重要任务就是在保证全网电压质量的前提下, 使系统运行更经济。而无功功率的合理分布可以有效地减少网损, 提高电网的运行经济性。传统的无功优化算法如线性规划、非线性规划、动态规划和混合整数规划都不适于处理离散变量, 且由于局部收敛常常达不到全局最优点。近年来, 一些人工智能方法如遗传算法、Tabu 搜索方法、混沌优化方法等^[1-4]在电力系统无功优化中的研究与应用也取得了一定的进展。

针对离散粒子群与非线性内点法方法的特点, 本文提出了一种新的混合策略来求解无功优化问

题。该策略主要分为两部分: 首先不考虑无功优化中的离散约束, 采用内点法求解原问题的初始解; 然后将原无功优化问题分解为连续优化和离散优化两个子问题, 分别采用内点法和离散粒子群算法交替求解, 使两者的优化结果互为基础、相互利用, 从而保证了本文混合策略的整体寻优效率。通过 IEEE 30 和 IEEE118 节点系统的仿真计算, 表明本文混合策略在处理离散无功优化方面具有明显的优势。

1 无功优化的数学模型

电力系统无功优化 (ORPF) 的数学模型可表示为:

$$\begin{cases} \min & f = P_{\text{loss}}(Z) \\ \text{s.t.} & g(Z) = 0 \\ & Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: f 为系统有功网损最小的目标函数; g 为系统潮流约束; $Z = [X, U_C, U_D]$ 为系统变量, 其中, X 为系统状态变量 (负荷节点电压幅值和发电机注入无功功率); U_C 为连续控制变量 (发电机节点电压); U_D 为离散控制变量 (无功补偿装置的无功补偿容量和可调变压器分接头); Z_{\min} 和 Z_{\max} 为系统变量的运行限制约束。由于电力系统无功优化大多是在满足支路潮流不等式约束的情况下进行的, 优化后的支路潮流变化不会很大。如果初始条件比较恶劣, 考虑到支路潮流不等式约束的复杂性, 通常可以把不等式约束作为一个惩罚因子, 放入目标函数中。本文为了简单明了, 不考虑带有惩罚因子的目标函数。

2 非线性内点法^[5-7]

非线性内点法直接求解连续非线性规划问题的主要优点是计算时间对问题的规模不敏感, 所具有的多项式时间复杂性在计算大规模非线性问题时很有优势。设非线性规划问题

$$\begin{cases} \min & f = f(x) \\ \text{s.t.} & g(x) = 0 \\ & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)所描述的问题, 可先引入松弛变量了 l 和 u , 将目标函数 $f(x)$ 改造为障碍函数, 得到优化问题 B:

$$\begin{aligned} \min & f(x) - \mu \sum_{j=1}^r \log(l_j) - \mu \sum_{j=1}^r \log(u_j) \\ & h(x) = 0 \\ & g(x) + u = \bar{g} \\ & g(x) - l = \underline{g} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: 扰动因子 $\mu > 0$ 。当 l 或 u 靠近边界时, 以上函数趋于无穷大, 因此满足以上障碍目标函数的极小解只能在可行域内找到。这样通过目标函数的变换把含有不等式限制的优化问题变成只含等式限制的优化问题, 因此可以直接用拉各朗日乘子法求解。

优化问题的拉各朗日函数

$$\begin{aligned} L = & f(x) - y^T h(x) - z^T [g(x) - l - \underline{g}] - \\ & w^T [g(x) + u - \bar{g}] - \mu \sum_{j=1}^r \log(l_j) - \mu \sum_{j=1}^r \log(u_j) \end{aligned} \quad (4)$$

该问题极小值存在的必要条件是拉各朗日函数

(4) 对所有变量及乘子的偏导数为0。

用牛顿法解上述KKT条件, 得到线性化的修正方程组为:

$$-\left[\nabla_x^2 f(x) - \nabla_x^2 h(x)y - \nabla_x^2 g(x)(z+w) \right] \Delta x + \nabla_x h(x) \Delta y + \nabla_x g(x) (\Delta z + \Delta w) = L_x$$

$$\nabla_x h(x)^T \Delta x = -L_y$$

$$\nabla_x g(x)^T \Delta x - \Delta l = -L_z \quad (5)$$

$$Z \Delta l + L \Delta Z = -L_l^u$$

$$W \Delta u + U \Delta w = -L_u^u$$

求解方程组(5)得到迭代修正量, 不断的迭代更新, 从而得到近似最优解。

定义对偶间隙:

$$Gap = l^T z - u^T w \quad (6)$$

Fiacco和McCormic证明在一定的条件下, 如果 x^* 是优化问题A的最优解, 那么当 $Gap \rightarrow 0$ 时, 产生的序列 $\{x_i\}$ 能收敛至 x^* 。

3 粒子群优化算法简述

3.1 基本粒子群算法

粒子群优化算法最初是由 Kennedy 和 Eberhart 博士^[8]于 1995 年受人工生命研究结果启发, 在模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群集行为时提出的一种基于群体智能的演化计算技术。假设在 N 维空间中有 m 个粒子组成一个群, 待优化问题的变量数决定了解空间的维数。任何一个粒子被看成是在 N 维空间里的点 $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$, 第 i 个粒子迭代到目前为止最好的位置(即具有最佳适应度)被称为个体最好粒子, 记为 p_{Best_i} , 而在全部粒子迭代到当前为止具有最佳适应度的粒子则被称为全局最好粒子标记为 g_{Best_i} , 粒子位置变化的速度记为 $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in})$ 。各粒子根据式(7)更新自己的速度和位置。

$$\begin{aligned} v_{id}^{k+1} &= w^k v_{id}^k + c_1 v_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 v_2 (p_{id}^k - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} &= x_{id}^k + \sigma v_{id}^k \end{aligned} \quad (7)$$

式中: k 表示第 k 次迭代; c_1, c_2 为学习因子; r_1, r_2 是 $[0, 1]$ 间的随机数; σ 为控制速度权重的约束因子; w_k 为惯性权重。进化过程中按式(2)线性减少^[7]:

$$w^k = w^{\max} - \frac{w^{\max} - w^{\min}}{\text{iter}_{\max}} k \quad (8)$$

式中: iter_{\max} 为最大进化代数; w_{\min} 和 w_{\max} 为 w_k 取

值的范围。使得 PSO 在开始时探索较大的区域, 较快地定位最优解的大致位置, 随着 ω 逐渐减小, 粒子速度减慢, 开始精细的局部搜索(这里 ω 类似于模拟退火中的温度参数)。该方法加快了收敛速度, 提高了 PSO 算法的性能。

3.2 离散粒子群优化算法

Clerc 提出了一种针对离散变量优化问题的离散粒子群优化 (DPSO) 算法^[9]。DPSO 算法中, 粒子也是通过追踪两个极值粒子进行迭代寻优的。然而, 离散变量优化问题的搜索空间和可行解均为离散值构成的集合, 针对 DPSO 算法, 由于篇幅问题, 本文仅给出其基本公式详细请参考文献^[10], 如下:

DPSO 算法基本公式如下:

$$v^{k+1} = c_1 * v^k \oplus c_2 * (p_{\text{Best}} - x^k) \oplus c_3 * (g_{\text{Best}} - x^k) \quad (9)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k \times v^{k+1} \quad (10)$$

上述定义的运算算子可以满足 DPSO 算法公式的需要。由于 DPSO 算法在结构上与 PSO 算法具有统一性, 可知 DPSO 算法与 PSO 算法具有一致的迭代寻优原理。

4 混合型 PSO 算法在无功优化中的应用

MPSO 求解无功优化步骤:

针对内点法和离散粒子群算法的特点, 本文提出了一种有效的混合策略: 先忽略离散约束, 将 ORPF 转化为一个连续非线性规划问题, 采用内点法直接求解; 在此初始解的基础上, 根据变量的性质, 将 ORPF 分解为连续优化和离散优化 2 个子问题, 分别采用内点法和离散粒子群法交替求解, 直到获得满意的优化结果。在连续优化子问题中, 以离散优化结果为基础, 假定电容器、电抗器的无功补偿容量和有载调压变压器分接头不变, 控制变量为发电机端电压, 该子问题相当于离散控制变量为常数, 相应不含其上、下限和离散约束。在离散优化子问题中, 以连续优化结果为基础, 假定发电机端电压不变, 控制变量为电容器、电抗器的无功补偿容量和有载调压变压器分接头, 该子问题又相当于连续控制变量为常数, 相应不含其上、下限约束。

新型混合策略的具体步骤可以表述如下:

MPSO 算法求解无功优化问题, 可按以下步骤进行:

a) 输入原始数据, 获取系统节点信息和支路信息, 获取控制变量的个数及各自的取值范围, 获取粒子群的群体规模 m 等参数。

b) 当迭代次数 $k = 0$ 时, 在可行域内随机生成 m 个粒子的位置 x_i , 每个粒子有 $N_t + N_c$ 维。其中, 变压器变比和电容器容量排在前 $N_t + N_c$ 维, 组成的集合生成初始的离散解值集, 同时在一定范围内生成每个粒子相对应的初始速度 v_i 。

c) 将上一步结果作为内点法的初始条件调整发电机的出力, 进一步对全网无功进行优化。

d) 计算各粒子的适应度值, 将离散的整数值换算成实际的数值, 然后一起代入潮流计算公式(2)和目标函数式(1)计算获得 $F(x_i)$ 值。

e) 令所有粒子适应度值 $F(x_i)$ 中的最小值为 F_{\min} , $F_{\min} < g_{\text{Best}}$, 即本代群体最优解小于上代群体最优解, 则 $g_{\text{Best}} = F_{\min}$, 否则 g_{Best} 不变。

f) 终止条件判断——迭代终止条件根据具体问题一般选为最大迭代次数或粒子群迄今为止搜索到的最优位置满足预定最小适应阈值。判断是否达到终止条件, 若是, 则输出计算结果, 否则 $k = k + 1$, 转步骤 d。

5 系统算例

本文采用 IEEE30 节点系统和 IEEE118 节点系统作为试验系统。为便于比较分析, 我们采用三种优化方法: (1) 本文所介绍的混合策略算法; (2) 把离散变量进行连续化处理并用非线性原对偶内点法求解的算法; (3) 在方法二所求得的优化结果基础上, 将离散变量的优化值就近归整, 再进行潮流计算。运用 Matlab7.0 进行编程计算的结果如下:

1) IEEE30节点系统

该节点系统包括6台发电机、4台有载调压变压器、4个无功补偿点, 节点和支路数据参见文献^[12]。优化结果如表1、表2。

表1 30节点系统优化后的离散变量值

Tab.1 Discrete variables of IEEE 30-bus system after optimization

| 离散量 | 方法一 | 方法二 | 方法三 |
|--------|----------|---------|---------|
| T6-9 | 1.030 0 | 0.981 2 | 0.980 0 |
| T6-10 | 1.010 0 | 0.950 0 | 0.950 0 |
| T4-12 | 1.030 0 | 1.044 7 | 1.040 0 |
| T27-28 | 0.970 0 | 0.965 6 | 0.970 0 |
| QC6 | 0.240 0 | 0.055 3 | 0.060 0 |
| QC17 | 0.060 0 | 0.074 2 | 0.060 0 |
| QC18 | 0.000 0 | 0.062 6 | 0.060 0 |
| QC27 | -0.060 0 | 0.042 1 | 0.060 0 |

表2 30节点系统的优化结果

Tab.2 Optimal calculation results of IEEE 30-bus system

| 方法 | 方法一 | 方法二 | 方法三 |
|----|---------|---------|---------|
| 网损 | 0.050 5 | 0.045 8 | 0.045 9 |

由表2可知, 连续优化法计算得到的网损为0.045 8, 是理想值, 比本文算法要小, 且各变量也在约束范围之内, 但是在实际调度运行中是无法操作的; 简单归整法使网损变为0.045 9, 但是导致某些节电电压越限, 如: 27节点的电压计算值为1.100 7, 超出了节点电压的上限, 这是不可行的; 本文算法的网损为0.050 5, 与连续优化法接近, 而且离散变量的值能较好地满足离散分级变化的要求, 同时各变量均在约束范围之内。因此, 本文所提出的方法在解决电力系统离散无功优化问题方面还是比较有效的。

2) IEEE118节点系统

该节点系统包括36台发电机、10个无功补偿节点和8台可调变压器, 表3和表4列出了运用各种算法优化后的离散变量值和网络损耗值。限于篇幅, 连续变量值略写。

表3 118节点系统优化后的离散变量值

Tab.3 Discrete variables of IEEE 118-bus system after optimization

| 离散量 | 方法一 | 方法二 | 方法三 |
|--------|---------|---------|---------|
| T5-8 | 1.000 0 | 1.005 8 | 1.000 0 |
| T17-30 | 1.000 0 | 1.011 5 | 1.000 0 |
| T25-26 | 1.000 0 | 1.014 6 | 1.025 0 |
| T37-38 | 1.000 0 | 0.995 4 | 1.000 0 |
| T59-63 | 1.025 0 | 1.010 5 | 1.000 0 |
| T61-64 | 1.000 0 | 0.998 7 | 1.000 0 |
| T65-66 | 1.050 0 | 1.038 1 | 1.050 0 |
| T80-81 | 1.075 0 | 1.094 9 | 1.100 0 |
| QC19 | 0.350 0 | 0.378 7 | 0.400 0 |
| QC20 | 0.050 0 | 0.020 3 | 0.000 0 |
| QC21 | 0.100 0 | 0.123 9 | 0.100 0 |
| QC33 | 0.100 0 | 0.092 8 | 0.100 0 |
| QC34 | 0.000 0 | 0.004 0 | 0.000 0 |
| QC35 | 0.100 0 | 0.092 4 | 0.100 0 |
| QC36 | 0.050 0 | 0.048 4 | 0.050 0 |
| QC37 | 0.650 0 | 0.674 3 | 0.650 0 |
| QC43 | 0.050 0 | 0.055 3 | 0.050 0 |
| QC76 | 0.650 0 | 0.670 1 | 0.650 0 |

表4 118节点系统的优化结果

Tab.4 Optimal calculation results of IEEE 118-bus system

| 方法 | 方法一 | 方法二 | 方法三 |
|----|---------|---------|---------|
| 网损 | 1.168 8 | 1.167 3 | 1.158 3 |

由表3、表4知, 对IEEE118节点系统运用方法一和方法二优化后, 网络损耗值接近, 且所有的节点电压、发电机和无功补偿装置的无功出力均在约束范围内, 但是方法一满足离散分级变化的要求, 更加符合实际情况。方法三求得的网损最小, 但有12个节点的电压和6个发电机的无功出力超出上下限范围, 显然是不可行解。可见, 本文提出的无功优化混合策略较传统的无功优化算法能更合理有效地处理混合整数无功优化问题。

6 结论

在优化计算中离散粒子群算法易于处理离散变量, 而内点法在求解大规模非线性连续优化问题时, 具有收敛速度快的突出优点。本文提出的混合策略充分利用了这两种算法的优势, 采用离散粒子群算法处理离散变量, 采用内点法处理连续变量, 使二者互为基础, 相互利用, 从而大幅度提高了混合策略的寻优效率。IEEE30 和 IEEE118 节点系统计算结果表明, 本文混合策略实用性强, 性能稳定, 能有效地求解无功优化这一类大规模混合整数非线性规划问题。

参考文献

- [1] 张勇军, 任震, 李邦峰. 电力系统无功优化调度研究综述[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 50-56.
ZHANG Yong-jun, REN Zhen, LI Bang-feng. Survey on Optimal Reactive Power Dispatch of Power Systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 50-56.
- [2] 马晋韬, Lai L L, 杨以涵. 遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(5): 347-353.
MA Jin-tao, Lai L L, YANG Yi-han. Application of Genetic Algorithm in Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(5): 347-353.
- [3] 王洪章, 熊信良, 吴耀武. 基于改进 Tabu 搜索算法的电力系统无功优[J]. 电网技术, 2002, 26(1): 15-18.
WANG Hong-zhang, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu. Power System Reactive Power optimization Based on Modified Tabu Search Algorithm[J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 15-18.
- [4] 赵涛, 雄信银, 吴耀武. 基于混沌优化算法的电力系统无功优化[J]. 继电器, 2003, 31(3): 20-25.
ZHAO Tao, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu. Reactive Power Optimization of Power System Based on Chaos Optimization Algorithm[J]. Relay, 2003, 31(3): 20-25.

[5] 程莹, 刘明波. 含离散控制变量的大规模电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 54-60.
CHENG Ying, LIU Ming-bo. Reactive-Power Optimization of Large-scale Power Systems with Discrete Control Variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 54-60.

[6] 韦化, 李滨, 杭乃善, 等. 大规模水-火电力系统最优潮流的现代内点算法实现[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 13-18.
WEI Hua, LI Bin, HANG Nai-shan, et al. An Implementation of Interior Point Algorithm for Large-scale Hydro-thermal Optimal Power Flow Problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 13-18.

[7] LIU Ming-bo, Tao S K. 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.

[8] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[A]. in: IEEE International Conference on Neural Network[C]. Perth(Australia): 1995.

[9] Maurice Clerc. Discrete Particle Swarm Optimization [EB/OL]. <http://www.Mauriceclerc.net>. 2001.

[10] 胡家声, 郭创新, 等. 离散粒子群优化算法在输电网络扩展规划中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 31-37.
HU Jia-sheng, GUO Chuang-xin, et al. Application of Discrete Particle Swarm Optimization Network Expansion Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 31-37.

收稿日期: 2008-08-10; 修回日期: 2009-10-08

作者简介:

姚煜(1985-), 男, 工学硕士, 从事电力系统运行生产工作; E-mail: maths0@yahoo.com.cn

蔡燕春(1984-), 男, 工学硕士, 从事电力系统运行生产工作。

(上接第 33 页 continued from page 33)

[8] Mitchell M A, Pecas Lopes J A, Fidalgo J N, et al. Using a Neural Network to Predict the Dynamic Frequency Response of a Power System to an Under-frequency Load Shedding Scenario[A]. in: Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2000.

[9] 韩英铎, 闵勇, 洪绍斌. 复杂扩展式电力系统低频减载方案设计[J]. 电力系统自动化, 1992, 16(1): 34-39.
HAN Ying-duo, MIN Yong, HONG Shao-bin. The Design of Under Frequency Load Shedding Scheme in Large Scale Multi-machine Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 1992, 16(1): 34-39.

[10] 闵勇. 复杂扩展式电力系统中功率-频率动态过程的分析及低频减载装置整定[D]. 北京: 清华大学, 1990.
MIN Yong. Analysis of Power-Frequency Dynamics and Designation of Underfrequency Load Shedding Scheme in Large Scale Multi-machine Power Systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 1990.

[11] 东北电力管理局调度局. 电力系统运行操作与计算[M].

北京: 水利电力出版社, 1977.

[12] Anderson P M, Mirheydar M. A Low-Order System Frequency Response Model[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.

[13] 时伯年, 黄志刚, 韩英铎. 并联电容投切对孤立系统低频减载设计的影响[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 41-44.
SHI Bo-nian, HUANG Zhi-gang, HAN Ying-duo. Effect of Shunt Capacitor Switching on UFLS Designing for Isolated System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 41-44.

收稿日期: 2009-03-06; 修回日期: 2009-05-30

作者简介:

王君(1983-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统频率稳定控制方面的研究; E-mail: wangjun0863@163.com

王晓茹(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护与安全稳定控制, 变电站自动化技术方面的研究;

谢大鹏(1980-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统频率稳定控制方面的研究。