

基于内点法与改进遗传法的无功规划优化混合算法

刘沛津, 谷立臣, 韩行

(西安建筑科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 建立了利用调节发电机端电压、可带载调压变压器分接头与静止电容器组的补偿容量来获得系统年综合费用最小的无功规划优化数学模型。将此问题分成连续优化和离散优化两个子问题, 采用非线性内点法和改进遗传算法交替求解的混合算法。在迭代的阶段, 分别对内点法和改进遗传算法进行收敛条件改进, 使两者的优化结果互为基础、相互利用, 保证了混合算法的整体寻优效率。118节点系统的无功优化计算表明, 所提算法可有效提高单一算法的收敛性能和运算速度。

关键词: 无功规划优化; 内点法; 改进遗传算法; 收敛条件改进

Reactive power planning based on IPM and improved GA hybrid method

LIU Pei-jin, GU Li-chen, HAN Xing

(School of Mech and Elec, Xi'an Univ of Arch & Tech, Xi'an 710055, China)

Abstract: The mathematic model of the optimal reactive power planning which takes the minimum annual cost is established based on adjusting the generator voltage, the on-load tap-changer (OLTC) ratio and the compensation capacity of the static capacitor. The original problem is decomposed into a continuous optimization sub-problem and a discrete optimization sub-problem, which are solved by nonlinear interior point method (IPM) and improved genetic algorithm (GA) alternately called hybrid method. In different phases, the convergence conditions of IPM and GA are dynamically adjusted according to the characteristic of individuals. IPM and GA take advantage of each other, so that the efficiency of the hybrid method is greatly improved. Numerical simulations on the IEEE 118 test system illustrate that the proposed hybrid method is effective in convergence and calculation speed.

Key words: optimization of reactive power planning; IPM; improved GA; improvement of convergence

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)17-0056-04

0 引言

电力系统无功规划优化问题是现代电网规划和系统运行所面临的重要研究课题。其研究主要包含两个子问题: ①以有功损耗最小、系统运行最经济为目标的运行子问题; ②以系统中安装无功设备而产生的费用决策形成的投资子问题。数学上可用带约束条件的非线性混合整数规划问题来描述, 无功规划优化是一个复杂的非线性、非连续性约束优化问题。

对于优化问题, 国内外学者展开了大量的研究工作, 并取得了很多进展^[1-4]。以非线性内点法^[5]为代表的确定性优化方法具有寻优速度快、鲁棒性强的突出优点, 适宜求解连续可微的函数优化问题, 但难以处理离散变量; 以遗传算法及其各种改进算法^[6,7]为代表的随机优化方法通过对优化变量的随机组合来获取全局最优解, 适宜求解各种离散优化问题, 但遗传算法寻优速度慢, 在一定条件下容易

陷入局部最优值。

针对具有离散变量和连续变量共存的高维大规模无功优化问题, 本文取内点法和改进遗传算法的优点, 采用二者交替求解的混合算法来求取最优解。IEEE118的仿真计算结果表明本文混合算法在计算速度和优化效果方面都具有明显的优势。

1 无功规划优化的数学模型

1.1 目标函数

本文无功优化规划模型中, 无功规划期内系统总费用包括: 安装无功补偿设备投资费用和运行费用, 目标是寻求总费用最小的方案。本文考虑年综合费用最小, 包括考虑带加权系数的年电能损耗费用和补偿设备费用。调整加权系数, 即可考虑不同情况下的年综合费用问题。为了全面分析年综合费用, 本文中, 加权系数取为 $k_1 = k_2 = 1$ 。

$$\min F = k_1 W(X) + k_2 C(X) \quad (1)$$

式中: $W(X)$ 为年电能损耗费用; $C(X)$ 为补偿设备的

费用; x 为系统变量, 包括运行变量和状态变量。年电能损耗费用为

$$W = KP\tau \quad (2)$$

式中: K 为系统电价; p 为规划方式下的有功网损; τ 为最大负荷利用小时数。

1.2 约束条件

无功优化的约束条件包括等式约束和不等式约束。

等式约束条件: 根据网络运行规律, 网络中各个节点的有功和无功功率应该满足功率平衡约束, 即式 (3) 和 (4) 所表示的有功功率和无功功率等式约束:

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} K_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} K_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} + N_{Ci} \Delta Q_{Ci} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} K_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} K_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

不等式约束条件: 如式 (5) 和 (6) 所示, 包括控制变量和状态变量的约束。即所有控制变量和状态变量满足上下限的约束。其中, 控制变量包括: 可调发电机机端电压 V_G ; 各无功补偿组数 N_C ; 有载调压变压器的调节档位 T ; 状态变量则是在控制变量确定后随之改变的量, 包括负荷的节点电压 V_L 和发电机无功 Q_G 。

$$\begin{cases} V_{Gi \min} < V_{Gi} < V_{Gi \max} \\ N_{Ci \min} < N_{Ci} < N_{Ci \max} \\ T_{i \min} < T_i < T_{i \max} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} Q_{Gi \min} < Q_{Gi} < Q_{Gi \max} \\ V_{Li \min} < V_{Li} < V_{Li \max} \end{cases} \quad (6)$$

2 算法原理

2.1 非线性内点法与改进遗传算法基本原理

以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其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规划问题时很有优势, 通常可获得较好的收敛效果。设有非线性规划问题

$$\begin{cases} \min & f = f(x) \\ \text{st} & h(x) = 0 \\ & g \leq g(x) \leq \bar{g} \end{cases} \quad (7)$$

引入松弛变量 $l = [l_1, \dots, l_r]^T$, $u = [u_1, \dots, u_r]^T$ 将不等式约束转化为等式约束; 把目标函数改造为障碍函数, 使得该函数在可行域内应近似于原目标

函数 $f(x)$, 而在边界时变得很大; 再直接用拉格朗日乘子法来求解形成的增广拉格朗日函数:

$$L = f(x) - y^T h(x) - z^T [g(x) - l - g] - w^T [g(x) + u - \bar{g}] - \mu \sum_{i=1}^r \log(l_i) - \mu \sum_{i=1}^r \log(u_i) \quad (8)$$

式中: y , z , w 均为拉格朗日乘子, 一般修正系数

$\mu = \sigma \frac{l^T z - u^T w}{2 \cdot r}$, σ 取为 0.1。该问题极小值存在的必要条件是拉格朗日函数对所有变量及乘子的偏导数为 0。

由于一般遗传算法在迭代搜索的过程中易出现退化现象和陷入局部收敛的问题, 因此, 本文采用改进遗传方法以改善一般遗传算法的收敛性能。采用分类选择和定向变异的遗传策略, 宏观上以随机性为本, 而微观上以定向寻优准则的模型为基础, 即在每一代中都提取出若干具有“发展前途”的样本, 在其附近沿着有利于群体发展的方向寻找新的最优解, 实质上就是在全局范围内分别同时寻找各个局部极值, 从而加快收敛和提高准确性^[8]。

2.2 基于混合算法的电力系统无功规划优化

针对具有离散变量和连续变量共存的高维大规模无功优化问题, 本文采用内点法和改进遗传算法交替求解的混合算法。

2.2.1 混合算法思路及计算步骤

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变量和离散变量优化两个子问题, 分别采用内点法和改进遗传算法交替求解。同时, 分别对改进遗传算法的搜索范围和收敛条件以及内点法的收敛条件进行适当限定, 并使两者的优化结果互为基础、相互利用, 以保证整体寻优效率。以内点法求解关于发电机端电压的连续变量优化子问题中, 以离散优化结果为基础, 并固定电容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。

在离散优化子问题中, 以连续优化结果为基础, 固定发电机端电压不变, 控制变量为电容器的无功补偿容量和有载调压变压器分接头档位。

基于混合算法电力系统无功规划优化的计算步骤如下:

1) 采用非线性内点法进行优化计算, 得到初始解, 即发电机端电压 $V_{Gi}^{(0)}$, 无功补偿装置组数 $N_{Ci}^{(0)}$ 和变压器分接头档位 $T_i^{(0)}$;

2) 令 $V_{Gi} = V_{Gi}^{(0)}$;

- 3) 迭代次数 $K = 1$;
- 4) 保持 V_{Gi} 不变, 采用改进遗传算法求解离散优化子问题, 得到 $N_{Ci}^{(K)}, T_i^{(K)}$;
- 5) 令 $N_{Ci} = N_{Ci}^{(K)}, T_i = T_i^{(K)}$;
- 6) 保持 N_{Ci}, T_i 不变, 采用非线性内点法求解连续优化子问题, 得到 $V_{Gi}^{(K)}$;
- 7) 检验是否满足收敛条件, 即最优解 $V_{Gi}^{(K)}, N_{Ci}^{(K)}, T_i^{(K)}$ 保持不变的代数是否达到设定值;
- 8) 若满足步骤7)的收敛条件, 计算结束, 否则令 $V_{Gi} = V_{Gi}^{(K)}$;
- 9) $K = K + 1$, 转向步骤4)。

2.2.2 混合算法收敛条件的改进

为了提高算法的整体寻优效率, 本文对非线性内点法与改进遗传算法在具体的实际运算过程中对不同迭代情况下的收敛条件进行了改进。

本算法对电力系统无功规划优化进行计算时: 当 $k=1$ 时, 以步骤1)的连续优化解为基础, 通过该解中离散变量的随机归档, 形成一个初始个体引入初始种群, 其余个体随机产生, 并将离散变量的搜索范围缩小到该连续解的上下四档范围内(即向上两档, 向下两档)进行遗传迭代^[9], 收敛条件为可

行判据(即满足无功优化问题的所有约束要求)。当 $k>1$ 时, 由于前面的迭代计算已经获得了一个较优的可行解, 此时离散优化的目的在于提高可行解的全局最优性, 因此, 初始种群中仅保留1个当前的最优解, 其余个体随机产生, 离散变量的搜索范围恢复为原始上、下限, 收敛判据为最优个体保留代数满足收敛设定条件。

3 算例及分析

如图1所示, 以IEEE118节点系统为例进行无功规划优化计算, 分别比较了上述混合算法与单一的内点法和改进遗传算法的全局收敛性能和运算速度。

发电机节点的电压范围为1.0~1.05, 其余节点的电压范围为1.0~1.1, 可调变压器变比的范围为0.9~1.1, 年综合费用计算所需参数按表1给定取值。

表1 年综合费用计算所需参数

Tab.1 Parameters of the minimum annual cost calculation

电价 /(元 kWh)	电容器设备与安装费 /(元 kVar)	年最大负荷利用小时数 /h
0.5	120	2000

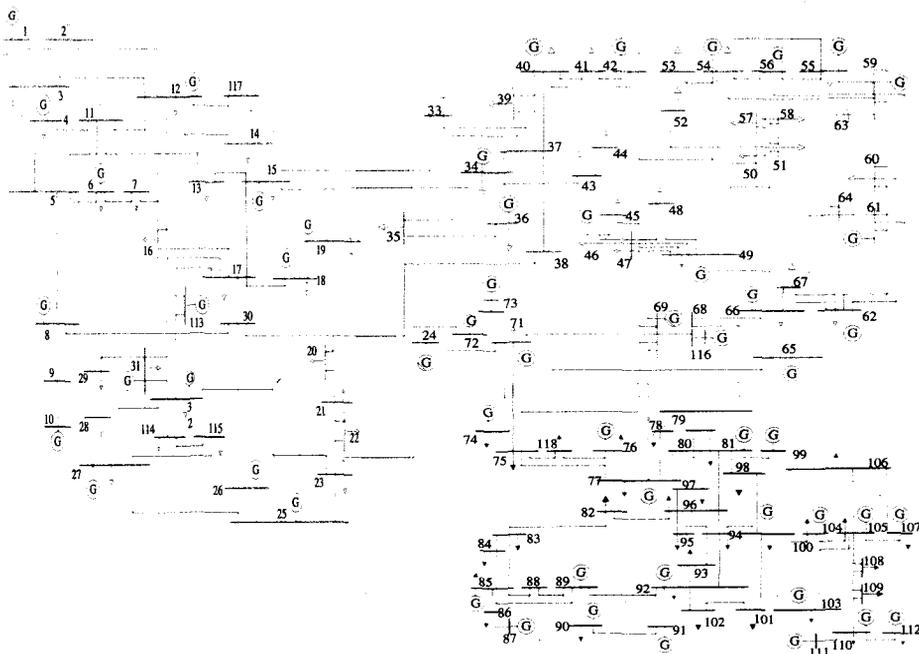


图1 IEEE118节点系统图

Fig.1 The 118 nodes system of IEEE

优化前, 年网损为13124.35万元。为验证本文混合算法的全局收敛性能和运算速度, 对IEEE118节点系统进行优化, 改进遗传算法采用的种群规模

为100, 收敛条件是最大迭代次数50和最优个体保留10代, 本文混合算法的收敛条件是最大迭代次数20次和最优个体保留5代。

3.1 混合算法和非线性内点法的比较

本文方法和内点法对比计算, 计算结果如表 2 所示。

表 2 计算结果

Tab.2 Calculation results

算法	年综合费用 /万元	年网损费 /万元	年补偿费 用/万元	运算速度 /s	迭代 次数
内点法	14203.42	10923.42	3280	14.827	12
混合算法	14092.57	11032.57	3060	30.612	10

从表 2 中可以看出, 当所有节点电压满足约束时, 两种方法得到的年综合费用差别不大。虽然内点法的运算速度比本文混合算法快, 但由于其优化结果中得到的无功补偿组数和变压器分接头档位均为连续量, 因此须对其进行四舍五入归整, 归整后通过潮流计算发现部分节点电压越界。虽然内点法的运算速度比本文方法快, 但不能保证系统运行的电压质量, 同时离散变量归整后使年运行损耗费增大, 破坏了解的最优性。

3.2 混合算法和改进遗传算法的比较

当所有节点电压满足约束时, 改进遗传算法和本文混合算法进行比较的计算结果如表 3 所示。

表 3 计算结果

Tab.3 Calculation results

算法	年综合 费用 /万元	年网损 费用 /万元	年补偿费用 /万元	运算 速度 /s	迭代 次数
改进遗传法	15735.24	12715.24	3020	181.273	40
混合算法	14092.57	11032.57	3060	30.612	10

从表 3 中可看出, 在所有节点电压满足约束的情况下, 由本文混合算法得到的综合费用优于改进遗传算法, 运算速度也比改进遗传算法快。

从以上算例分析的优化结果中可以看出, 本文混合算法的收敛性能和运算速度都比单一改进遗传算法好, 且本文混合算法的全局寻优能力优于内点法, 在兼顾速度的同时, 可以真正处理连续和离散变量共存时的目标函数优化。故本文混合算法更适用于研究电力系统无功规划优化问题。

4 结论

本文在充分利用系统中现有无功调节手段的基础上, 综合考虑多种约束条件的限制, 建立了符合电力系统实际的更准确的系统无功规划优化数学模型。在算法方面: 将无功规划优化问题分解为连续优化和离散优化两个子问题, 将非线性内点法和改进遗传算法结合起来, 实现了混合优化算法。IEEE118 节点系统计算结果表明该算法具有更好的运算速度和全局收敛性能。将本文方法用于实际系统, 可以根据优化结果制定无功优化调度计划, 为规

划后不同年度各种运行方式下的无功调度提供了依据。

参考文献

- [1] 蒋志平, 唐国庆. 电力系统无功规划优化的变尺度混沌优化算法[J]. 继电器, 2007, 35 (2): 33-39. JIANG Zhi-ping, TANG Guo-qing. Mutative Scale Chaos Optimization Algorithm for VAR Planning of Power System[J]. Relay, 2007, 35 (2): 33-39.
- [2] Hobson E. Active and Reactive Power Security Control Using Successive Linear Programming[J]. IEEE, 1982, 101(1): 644 - 654.
- [3] Liu C W, Jwo W S, Liu C C, Hsiao Y T. A Fast Global Optimization Approach to VAR Planning for the Large Scale Electric Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 437-443.
- [4] Kenji Iba. Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 685 - 692.
- [5] Granville S. Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 136-146.
- [6] Mantovani J R S, Modesto S A G, Garcia A V. Var planning Using Genetic Algorithm and Linear Programming[J]. IEEE Proc on Gener, Transm, and Distrib, 2001, 148(3): 257-262.
- [7] 张粒子, 舒隽, 林宪枢, 等. 基于遗传算法的电力系统无功规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (6): 6-8. ZHANG Li-zi, SHU Jun, LIN Xian-shu, et al. Reactive Power Planning Based on Genetic Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 6-8.
- [8] 石刚, 井元伟, 徐皓冬, 等. 利用改进的遗传算法解决全局寻优问题[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(增刊): 2330-2332. SHI Gang, JING Yuan-wei, XU Kai-dong, et al. Using an Improved Genetic Algorithm to Solve Global Optimization Problem[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(S): 2330-2332.
- [9] 刘方, 颜伟, Yu D C. 基于遗传算法和内点法的无功优化混合策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (15): 67-72. LIU Fang, YAN Wei, Yu D C. A Hybrid Strategy Based on GA and IPM for OP Reactive Power Flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 67-72.

收稿日期: 2008-07-21; 修回日期: 2008-07-31

作者简介:

刘沛津 (1971-), 女, 博士研究生, 从事电气自动化理论论研究。E-mail: liuxpj@sina.com