

# 采用启发式策略的动态无功优化混合算法研究

董洁, 赵凤展, 杨仁刚

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 严格考虑控制设备的动作次数限制, 建立一个完整的非线性混合整数动态无功优化模型。结合混合算法, 把离散变量和连续变量分开优化, 分别使用改进后的遗传算法和内点法求解, 以改善算法的收敛性和计算速度。将动态约束分为设备一天内调节次数限制和变压器相邻时段调节次数限制, 提出全局调整策略和局部调整策略来分别处理这两类动态约束, 使离散变量严格满足动作次数限制。启发式策略的应用使算法既能严格保证离散变量的动态约束, 又能充分保留其动作自由, 得到可行的最优解。Ward-hale 6 和 IEEE30 节点系统的仿真结果证明提出算法的有效性。

**关键词:** 启发式策略; 动态无功优化; 混合算法; 内点法; 遗传算法

## Study on dynamic reactive power optimization hybrid algorithm using heuristic strategy

DONG Jie, ZHAO Feng-zhan, YANG Ren-gang

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Considering the action number constraints of action times of control devices, an integrated mixed-integer/nonlinear dynamic reactive-power optimization (DRPO) model is proposed. Combining with the hybrid algorithm, continuous variables and discrete variables are optimized separately, which are solved by ameliorative interior point method and genetic algorithm respectively. These ameliorative optimization algorithms improve the algorithm in convergence performance and calculation rate. Dynamic constraints include the constraints of switching operating times between two adjacent time intervals for transformers with on-load tap changers and the constraints of daily operating times for reactive power control devices, which are disposed by part adjust strategy and whole adjust strategy respectively, thus the discrete variables satisfy the action time constraints strictly. The application of heuristic strategies can not only satisfy action number constraints of discrete variables absolutely, but also approach the feasible best result by keeping action freedom of devices adequately. Test results on Ward-hale 6-bus and IEEE 30-bus systems demonstrate the efficiency of the proposed algorithm.

**Key words:** heuristic strategy; dynamic reactive power optimization; hybrid algorithm; interior point method; genetic algorithm

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0035-06

## 0 引言

动态无功优化除了考虑电压合格率和网损最小之外, 还考虑系统负荷的动态变化和离散控制设备的动作次数约束。相对于静态无功优化, 它不仅变量个数增多很多倍, 还由于动态约束和静态约束的耦合, 使得它的求解变得十分困难。

如何处理动态约束是动态无功优化求解的重点和难点, 目前常见的方法是通过各种手段去除动态约束, 最终将原问题解耦为静态无功优化问题, 例如: 文献[1-2]将一天内负荷曲线分段, 分段数为设

备允许动作次数, 各分段内采用静态无功优化模型求解。文献[3-4]在目标函数中计及代价以避免其调节次数过多, 有效降低了计算复杂度。文献[5-6]提出一种混合整数规划内点法, 对离散变量构造罚函数并直接嵌入内点法中。文献[7]先通过启发式规则确定离散变量的动作序列, 再将问题简化为静态优化模型, 从而可用常规的优化方法求解。

上述算法虽能加快计算速度, 减少动作次数, 但缩小了解的搜索空间, 易于丢失最优解。文献[8-13]提出的混合算法将连续变量和离散变量的优化分开进行。结合混合算法, 本文提出启发式策略对遗传个体的离散变量进行校正, 使其严格满足动态约束。本文算法没有预先设定离散变量的动作方

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAJ04B06)

案, 而是对生成的个体进行校正, 最大限度地保留其动作自由, 在严格限制动作次数的基础上快速寻找问题的可行最优解。

## 1 动态无功优化模型

假设系统全天 24 个时段的负荷保持恒定, 动作次数定义为离散控制变量对应的开关或档位在一天的投切或调节次数, 同时考虑 OLTC 分接头相邻时段的调节档位差限制, 则完整的动态无功优化模型可简化表示如下, 其中,  $t=1, \dots, 24$ 。

1) 目标函数 (系统全天有功损耗最小)

$$\min F = \sum_{t=1}^{24} f(x_{C_t}, x_{D_t}, x_{S_t}) \quad (1)$$

2) 控制变量约束

各时段连续控制变量的上下限约束

$$\underline{x}_C \leq x_{C_t} \leq \overline{x}_C \quad (2)$$

各时段离散控制变量的约束

$$x_{D_t} = \left\{ \underline{x}_D, \overline{x}_D + \delta_D, \dots, \overline{x}_D - \delta_D, \underline{x}_D \right\} \quad (3)$$

3) 静态约束

有功、无功潮流方程约束

$$g(x_{C_t}, x_{D_t}, x_{S_t}) = 0 \quad (4)$$

状态变量约束

$$\underline{x}_S \leq x_{S_t} \leq \overline{x}_S \quad (5)$$

4) 动态约束

$$|T_{i,t+1} - T_{i,t}| \leq k_i \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^{23} |T_{i,t+1} - T_{i,t}| \leq K_i \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^{23} |C_{l,t+1} - C_{l,t}| \leq M_l \quad (8)$$

式中:  $\underline{\quad}$  和  $\overline{\quad}$  分别表示变量的上下限;  $x_{C_t}$  为  $t$  时段的连续控制变量, 包括发电机电压幅值;  $x_{D_t}$  为  $t$  时段的离散控制变量, 包括并联电容器组的无功补偿容量和 OLTC 分接头变比;  $x_{S_t}$  为  $t$  时段的状态变量, 包括节点电压和发电机的无功注入量;  $T_{i,t}$  为第  $i$  个 OLTC 分接头  $t$  时段的档位值;  $C_{l,t}$  为第  $l$  个电容器组  $t$  时段的投入组数;  $k_i$  为第  $i$  个 OLTC 相邻时段最大调整数;  $K_i$  为第  $i$  个 OLTC 的日允许最大档位调整数;  $M_l$  为第  $l$  个电容器组的日允许最大档位调整数。

## 2 优化算法

### 2.1 遗传算法

遗传算法是一种随机搜索算法, 它以个体为对

象来进行选择、交叉和变异等操作。下面是遗传算法应用于无功优化问题时的几个关键环节。

1) 个体编码。离散优化子问题只含有离散变量, 因此采用分组整数编码方式构成染色体为:

$$H = \{C_1, \dots, C_p | T_1, \dots, T_q\} \quad (9)$$

式中: 下标  $p, q$  分别表示电网中电容器组和 OLTC 的个数;  $C_1, \dots, C_p$  和  $T_1, \dots, T_q$  均为 24 维列向量, 它们分别表示电容器组各时刻电容器投入组数和变压器各时刻档位数。

2) 适应度函数。离散优化子问题没有考虑变量的静态约束, 但考虑到系统实际运行条件, 适应度函数设计为:

$$f = \frac{1}{F + \sum_{i \in N_{PQ}} V_{i,over} + \sum_{i \in N_{PV}} Q_{i,over}} \quad (10)$$

式中:  $F$  为目标函数值;  $V_{i,over}$  为节点  $i$  的电压越限量;  $Q_{i,over}$  为节点  $i$  的无功出力越限量;  $N_{PQ}$  和  $N_{PV}$  分别表示系统中 PQ 节点和 PV 节点的个数。

### 2.2 内点法

设有非线性规划问题:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s.t. } g(x) = 0 \quad (\underline{x} \leq x \leq \overline{x}) \end{aligned} \quad (11)$$

对式 (11), 先引入松弛变量  $u \geq 0, l \geq 0$ , 将不等式约束转化为等式约束, 然后再引入对数障碍函数消去松弛变量的非负性约束, 并引入拉格朗日乘子  $y, z, w$ , 形成增广拉格朗日函数如式 (12):

$$\begin{aligned} L = f(x) - y^T g(x) - z^T [x - \underline{x} - l] + \\ w^T [x - \overline{x} + u] - \mu \sum_{i=1}^n (\ln l_i + \ln u_i) \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $z \geq 0; w \geq 0; \mu$  为障碍因子。

根据库恩-塔克最优条件, 令函数  $L$  对变量  $x, y, l, u, z, w$  的偏导数为零, 得到一个非线性方程组。求解方程组得到迭代方向  $(\Delta x, \Delta y, \Delta l, \Delta u, \Delta z, \Delta w)$ , 根据迭代方向更新向量  $(x, y, l, u, z, w)$ 。根据新的变量向量继续迭代, 直至满足收敛判据, 得到最优解。

### 2.3 优化算法的改进

1) 传统遗传算法具有收敛性差, 易早熟的缺点, 本文采用文献[14]提出的混沌遗传算法, 通过混沌移民操作维个体的多样性, 避免陷入局部最优解, 确保算法的全局收敛性, 加快计算速度。

2) 动态无功优化问题的变量矩阵维数很大, 由于各时段的电网结构和参数相同, 本文采用文献[15]提出的采用虚拟节点技术的预测-校正内点法, 使初

步优化和连续控制变量优化子问题为全二次模型,简化矩阵计算,加快计算速度。

### 3 动态无功优化的混合算法

动态无功优化问题的控制变量包括连续变量和离散变量,约束条件包括静态约束和动态约束,其中静态约束是关于连续变量的约束,动态约束是关于离散变量的约束。将原问题分为只包含离散控制变量、动态约束的离散优化子问题和只包含连续控制变量、静态约束的连续优化子问题。内点法具有易于求解连续优化问题但难以处理离散变量及其约束的特点,而遗传算法具有易于处理离散变量及其复杂约束但对连续变量的精确寻优速度较慢的特点,因此采用内点法和遗传算法来分别求解这两个子问题。

本文采用交替迭代的混合策略:首先忽略离散变量的离散约束和动态约束,将原问题转化为24个静态无功优化问题,采用内点法求解得到初始解;然后交替求解离散优化子问题和连续优化子问题,直至满足相邻两次迭代的最优解基本相同的终止条件。混合算法的流程图如图1所示。

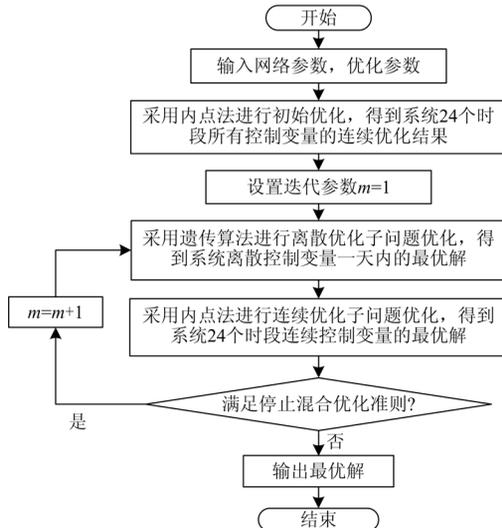


图1 混合算法流程图

Fig.1 Flow chart of hybrid algorithm

#### 1) 离散优化子问题的实现

在使用遗传算法求解离散优化子问题时,当混合迭代次数  $m=1$  时,连续变量值取初始解,将离散变量的搜索范围缩小到初始解的上下2档范围内,在缩小范围内随机产生初始群体;当  $m>1$  时,连续变量值取第  $m-1$  次迭代中连续优化后的最优解,初始群体取第  $m-1$  次迭代中离散优化后的最终群体,在新的连续变量值的条件下对其继续进化。本文采

用启发式策略对遗传个体进行校正,使其满足动态约束,具体方法见第4节。

#### 2) 连续优化子问题的实现

由于连续优化子问题不考虑动态约束,可以采用内点法对未来一天24h各个时段分别进行静态无功优化,离散变量值取本次混合迭代中离散优化子问题的最优解。

## 4 启发式策略

原始个体(指遗传算法求解过程中随机产生,交叉和变异后的个体)的离散控制变量可能不满足动态约束,需要把这些不可行个体校正为可行个体,才能在此基础上继续寻找可行最优解。动态约束条件包括式(6)~(8)。式(7)、式(8)的形式一模一样,可将它们归为一类处理。若原始个体的该类型约束超限,即设备的日动作次数超限,则须对设备一天内的动作情况进行综合调整,采用全局调整策略校正(全局校正)。若原始个体对式(6)超限,即OLTC的相邻时段档位差超限,则须对设备在相邻时段内进行局部调整,采用局部调整策略校正(局部校正)。

#### 1) 全局调整策略

计算原始个体中各离散控制设备  $D_i$  一天内的调节次数  $N_{D_i}$ :

$$N_{D_i} = \sum_{t=1}^{23} |C_{D_i(t+1)} - C_{D_i(t)}| \quad (13)$$

式中,  $C_{D_i(t)}$  表示  $D_i$  在  $t$  时刻的编码值。

电力系统运行时无功控制设备调节的基本规则为:在负荷骤升骤降和负荷处于峰谷状态的时段,控制设备的调节概率较大;在负荷变化较平缓或负荷接近平均水平的时段,控制设备的调节概率较小。因此,可以根据系统中负荷的变化程度和负荷水平计算控制设备各时段调节概率  $\eta_t$ 。

设  $Q_t$  为控制设备  $D_i$  在时段  $t$  的无功负荷,  $Q_a$  为一天内的平均无功负荷,  $Q_a$  为:

$$Q_a = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} Q_t \quad (14)$$

计算该设备各时段的调节概率  $\eta_t$ , 其中  $t=(2, \dots, 24)$ , 不用考虑  $t=1$  时刻的调节概率。

$$\eta_t = \frac{1}{2} \left( \frac{|Q_t - Q_{t-1}|}{\sum_{s=2}^{24} |Q_s - Q_{s-1}|} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{|Q_t - Q_a|}{\sum_{s=2}^{24} |Q_s - Q_a|} \right) \quad (15)$$

等式右侧第一项表示该时段无功负荷变化的剧烈程度,第二项表示该时段无功负荷与平均无功负

荷的距离。

计算控制设备  $D_i$  各时段的实际调节概率  $\eta'_t$ ：

$$\eta'_t = \frac{|C_{D_i(t)} - C_{D_i(t-1)}|}{\sum_{s=2}^{24} |C_{D_i(s)} - C_{D_i(s-1)}|} \quad (16)$$

通过计算得到离散控制设备  $D_i$  各时段的调节概率  $\eta_t$  和实际调节概率  $\eta'_t$ ，选择  $\eta_t$  与  $\eta'_t$  ( $t=2, \dots, 24$ ) 差距最大的时段，将该时段  $D_i$  的动作幅度减少 1 档。检查  $D_i$  的日动作次数  $N_{D_i}$ ，如果仍然越限，则再次计算  $D_i$  调整后各时段的实际调节概率  $\eta'_t$ ，选择  $\eta_t$  与  $\eta'_t$  差距最大的时段修正，如此往复，直到其满足一天内的动作次数限制。

### 2) 局部调整策略

局部调整策略的基本思路为：首先检查原始个体中 OLTC 设备相邻时段档位差是否越限，若越限，则调整该设备相邻时段的档位值，使相邻时段档位差在约束范围内。以可调变压器  $l$  为例，局部校正过程如下：从  $t=1$  开始到  $t=23$  结束，逐个检验相邻时段  $t+1$  和  $t$  的档位差是否满足式 (6)，若遇到某相邻时段不满足，则调整  $l$  在该相邻时段的分接头位置。由于检查和调整是从时段 1 开始顺序往下进行的，即  $t$  及其之前时段的档位已经满足相邻调节次数约束，若改动  $T_{l,t}$ ，则不能保证相邻时段  $t-1$  和  $t$  依然满足式 (6)，所以不能调节  $T_{l,t}$  的值，只能调节时刻  $t+1$  的值  $T_{l,t+1}$ ：

$$T_{l,t+1} = T_{l,t} \pm k_l \quad (17)$$

## 5 算例分析

在 Matlab 7.0 平台上采用本文提出的算法对算例系统进行仿真，系统的日负荷曲线如图 2 所示，曲线上的负荷值以初始状态各点的负荷值为基准，表示为基准值的倍数。假设系统有功功率日负荷曲线和无功功率日负荷曲线相同，且各节点负荷一天中以相同的负荷率波动。假设电容器组和 OLTC 分接头的日最大调节次数为 9 次，OLTC 分接头的相邻时段最大调节次数为 3 次。

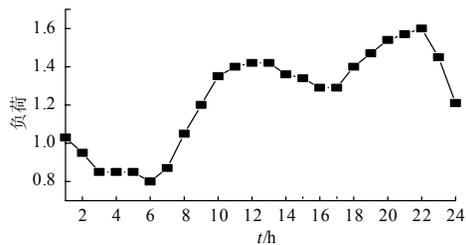


图2 系统日负荷曲线

Fig.2 Daily load curves of system

### 5.1 Ward-hale 6 节点系统

以 Ward-hale 6 节点系统<sup>[16]</sup>为例，发电机节点 2、6（记作 G2 和 G6），其中 G6 定为平衡节点，G2 的电压上下限分别为 1.15 和 1.1（标么值）；OLTC 支路 1-4、3-5（记作 T1-4 和 T3-5）的变比调节范围均为  $(1.0 \pm 8) \times 1.25\%$ ；节点 3、4（记作 Q3 和 Q4）分别接有  $10 \times 0.5$  Mvar 和  $11 \times 0.5$  Mvar 的可投切电容器组。优化前系统在负荷轻和负荷重时均容易出现节点电压越限，日网损为 328.8 MWh。优化后系统的节点电压和发电机无功出力均未越限，日网损为 285.4 MWh，比优化前减少 13.2%。系统无功控制设备的最优控制方案见表 1，表中节点电压为标么值。

表 1 优化结果

Tab.1 Results of optimization

时段	G6	G2	T3-5	T1-4	Q3	Q4
1	1.05	1.125 8	7	8	4	5
2	1.05	1.123 8	7	8	4	5
3	1.05	1.121 3	7	8	4	5
4	1.05	1.121 3	7	8	4	5
5	1.05	1.121 3	7	8	5	6
6	1.05	1.120 1	7	8	6	7
7	1.05	1.121 8	7	8	7	8
8	1.05	1.126 3	8	8	7	8
9	1.05	1.130 2	11	10	7	8
10	1.05	1.133 8	11	11	7	8
11	1.05	1.135 1	11	11	7	7
12	1.05	1.135 5	11	11	7	7
13	1.05	1.135 5	11	11	6	7
14	1.05	1.134 2	11	11	6	7
15	1.05	1.135 5	11	11	6	7
16	1.05	1.132 3	11	10	7	9
17	1.05	1.132 3	11	10	8	9
18	1.05	1.135 1	11	11	8	9
19	1.05	1.136 8	12	12	8	9
20	1.05	1.138 5	13	12	7	8
21	1.05	1.139 3	13	12	6	7
22	1.05	1.140 4	13	12	4	5
23	1.05	1.136 3	12	12	4	5
24	1.05	1.130 3	10	10	4	5
离散控制设备日动作次数			9	8	8	8

由表 1 可见，G2 一天内的机端电压均在其调节范围内；T1-4、T3-5、Q3、Q4 的日调节次数均在其限制范围内；T1-4 和 T3-5 的相邻时段最大调节次数分别为 2 和 3，均在其限制范围内。

综上所述,优化后系统的运行状态得到改善且控制设备满足所有动态约束条件,证明本文提出的启发式策略确实能够严格限制离散控制设备的日调节次数和 OLTC 的相邻时段调节档位差。

## 5.2 IEEE30 节点系统

分别采用本文和文献[11]的混合算法,对 IEEE 30 节点系统<sup>[17]</sup>一天负荷进行动态无功优化仿真,两种优化算法的优化结果对比见表 2。

表 2 优化算法结果对比

Tab.2 Comparison of optimal results		
参数	本文算法	文献[11]算法
优化前日网损/MWh	212.723	212.723
优化后日网损/MWh	188.927	198.684
迭代次数	10	14
计算时间/s	742	1 482

结果分析如下:

1) 本文算法的日网损和迭代次数较文献[11]算法的要低一些,但差距不是特别大。这是因为:两种算法均采用相同的交替迭代混合策略,混合算法的收敛性相差不大;本文算法采用改进后的遗传算法和内点法,改善两个子问题的优化结果,从而改善了混合算法的收敛性和目标值;本文算法在遗传算法中采用启发式策略来限制离散变量的动作次数,能最大程度地保留离散变量的动作自由,从而能在更大范围内寻找到最优解。

2) 本文算法的计算时间几乎是文献[11]算法的一半,这是由于改进后的遗传算法有很好的收敛性和计算速度,特别是内点法的改进大大降低了复杂矩阵的计算时间。

仿真结果证明本文算法在严格保证离散控制设备的动作次数限制的同时,能尽量地减少目标网损,优化算法的计算性能。

## 6 结论

混合算法充分利用了遗传算法和内点法分别在处理离散变量和连续变量问题中的优势,将离散变量和连续变量优化分开进行,有利于动态约束的解决。结合混合算法,本文提出采用启发式策略对遗传个体的离散变量进行校正,使个体能在满足动态约束的可行方向上,在尽量大的解空间内寻找到原问题的最优解。同时,本文还采用改进后的遗传算法和内点法求解子问题,改善了混合算法的收敛性和计算速度。

Ward-hale 6 和 IEEE30 节点系统的计算结果表明,本文算法既能严格保证动态次数限制,又能得

到很好的无功优化结果,同时还能大大改善算法的收敛性和计算速度。

## 参考文献

- [1] 别朝红,周婷,王锡凡. 电力系统多时段无功优化研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (6): 698-702. BIE Zhao-hong, ZHOU Ting, WANG Xi-fan. Studies on reactive power optimization based on transition-optimized control strategy[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42 (6): 698-702.
- [2] DENG Y M, REN X J, ZHAO C C, et al. A heuristic and algorithmic combined approach for reactive power optimization with time-varying load demand in distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17 (4): 1068-1072.
- [3] 张勇军,任震. 电力系统动态无功优化的调节代价[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (2): 34-38. ZHANG Yong-jun, REN Zhen. Readjusting cost of dynamic optimal reactive power dispatch of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (2): 34-38.
- [4] 周任军,段献忠,周晖. 计及调控成本和次数的配电网无功优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 23-29. ZHOU Ren-jun, DUAN Xian-zhong, ZHOU Hui. A strategy of reactive power optimization for distribution system considering control action cost and times[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (9): 23-29.
- [5] 刘明波,朱春明,钱康龄,等. 计及控制设备动作次数约束的动态无功优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (3): 34-40. LIU Ming-bo, ZHU Chun-ming, QIAN Kang-ling, et al. Dynamic reactive-power optimization algorithm incorporating action number constraints of control devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (3): 34-40.
- [6] 赖永生,刘明波. 电力系统动态无功优化问题的快速解耦算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 32-39. LAI Yong-sheng, LIU Ming-bo. Fast decomposition algorithm for solution of dynamic reactive power optimization problem in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (7): 32-39.
- [7] 任晓娟,邓佑满,赵长城,等. 高中压配电网动态无功优化算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (1): 31-36. REN Xiao-juan, DENG You-man, ZHAO Chang-cheng, et al. Study on the algorithm for dynamic reactive power optimization of distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (1): 31-36.
- [8] Soto J R O, Domellas C R R, Falcao D M. Optimal reactive power dispatch using a hybrid formulation: genetic algorithms and interior point[C]. // Proceedings

- of Power Tech, Port, Portugal: 2001, 3: 5-8.
- [9] Zheng Jiang, Bin Liu, Dai Liankui. A hybrid genetic algorithm integrated with sequential linear programming[C]. //Proceedings of Machine Learning and Cybernetics. Xi'an, China: 2003, 2: 1030-1033.
- [10] 姚煜, 蔡燕春. 离散粒子群与内点法结合的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 48-52.  
YAO Yu, CAI Yan-chun. A hybrid strategy based on DPSO and IPM for optimal reactive power flow[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 48-52.
- [11] 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 optimal reactive power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (15): 67-72.
- [12] 刘沛津, 谷立臣, 韩行. 基于内点法与改进遗传法的无功规划优化混合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 56-59.  
LIU Pei-jin, GU Li-chen, HAN Xing. Reactive power planning based on IPM and improved GA hybrid method[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(17): 56-59.
- [13] 李秀卿, 孙守刚, 姜世金, 等. 基于混合优化微分进化算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 26-29.  
LI Xiu-qing, SUN Shou-gang, JIANG Shi-jin, et al. A hybrid optimization based on DE for optimal reactive power flow[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 26-29.
- [14] 刘宝英, 杨仁刚, 李慧, 等. 基于混沌遗传算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18 (5): 49-52.  
LIU Bao-ying, YANG Ren-gang, LI Hui, et al. Reactive power optimization based on chaos genetic algorithm in electric power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18 (5): 49-52.
- [15] Yan Wei, Yu Juan, Yu D C, et al. A new optimal reactive power flow model in rectangular form and its solution by predictor corrector primal dual interior point method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21 (1): 61-67.
- [16] 李文沅. 电力系统安全经济运行——模型与方法[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.  
LI Wen-yuan. Safety economical power system-model and method[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1989.
- [17] Wu Q H, Cao Y J, Wen J Y. Optimal reactive power dispatch using an adaptive genetic algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1998, 20 (8): 563-569.

收稿日期: 2010-03-07; 修回日期: 2010-04-12

作者简介:

董洁(1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化技术及应用; E-mail: dongjie198546@126.com

赵凤展(1971-), 女, 副研究员, 博士, 研究方向为电力系统分析与控制、配电自动化;

杨仁刚(1953-), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制、配电自动化。

(上接第 34 页 continued from page 34)

- [10] 姚玉斌, 王丹, 吴志良, 等. 方程求解法网络拓扑分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 79-83  
YAO Yu-bin, WANG Dan, WU Zhi-liang, et al. Network topology analysis by solving equations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 79-83.
- [11] 崔岩. 邻接矩阵染色法及其在电力系统网络拓扑分析中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(16): 52-56.  
CUI Yan. Matrix coloring method and its application in network topology analysis of power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(16): 52-56.
- [12] 周琰, 周步祥, 邢义. 基于邻接矩阵的图形化网络拓扑分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 49-52, 56.  
ZHOU Yan, ZHOU Bu-xiang, XING Yi. Graphical power network topology analysis based on adjacency matrix[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 49-52, 56.
- [13] 周云成, 付立思, 许童羽, 等. 基于 GIS 的 10 kV 配电网络电气连通性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 83-88.  
ZHOU Yun-cheng, FU Li-si, XU Tong-yu, et al. Electric connectivity analyzing for 10 kV distribution network based on GIS[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 83-88.
- [14] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2007.

收稿日期: 2010-08-18; 修回日期: 2010-10-31

作者简介:

姚玉斌(1965-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析和控制; E-mail: yaoyubin@dlnmu.edu.cn

宣俭(1973-), 男, 本科, 主要从事电力系统继电保护工作;

于娜(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析和控制。