

基于差分进化算法的动态环境经济电力系统调度优化

孙成富 周海岩 张亚红

(淮阴工学院计算机工程学院 淮安 223003)

摘要 电力系统动态环境经济调度优化隶属于非线性优化问题范畴,并具有多目标、高维、多约束条件等特点。经典的数学规划方法无法处理此类复杂问题。为此,提出了新的方法来解决这个问题。首先,通过代价惩罚因子将双目标优化问题转化为单目标优化问题。然后,设计启发式搜索策略来解决调度问题中的爬坡约束、动态电力平衡约束。采用启发式策略修正解决方案,能够提高群体的多样性,拓展搜索空间。基于优先列表的启发式策略能够使能耗低的火力发电机拥有更高的优先级进行更多的电力输出,以得到更优的调度解决方案。最后,改进差分进化算法,以加快搜索的速度并提高解决方案的质量。

关键词 差分进化算法,动态电力系统,调度优化,启发式策略,多目标

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

Dynamic Environment Economic Dispatch Based on Differential Evolution Algorithm

SUN Cheng-fu ZHOU Hai-yan ZHANG Ya-hong

(Faculty of Computer Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China)

Abstract Dynamic environment economic dispatch is of non-linear optimization problems. It represents the characteristics of multi-objective, high dimensions and constraints. So the traditional methods are no longer fit to solving these optimization problems. A price penalty factor approach was utilized here to convert the bi-objective problems into single objective ones. In order to handle constraints effectively, heuristic rules were proposed to handle ramp rate constraints, and heuristic strategies based on priority list are employed to handle active power balance constraints. The heuristic strategies also can increase the variety of the individual and extend the search scope. The thermal unit with the lower average full-load cost will have the higher priority to dispatch more generation power in the heuristic strategies based on priority list, so that the even better scheduling solutions can be obtained. At last, the differential evolution algorithm was improved to enhance the search ability and improve the solution quality.

Keywords Differential evolution algorithm, Dynamic power systems, Scheduling optimization, Heuristic strategy, Multi-objective

1 引言

电力工业是国民经济的基础产业,对国民经济发展和社会进步起着重要的促进作用。目前,我国的发电装机容量占世界领先地位。如果能够使电力系统的运行达到最优化,将会带来巨大的经济效益。动态环境经济调度(Dynamic Environment/Economic Dispatch, DEED),是电力系统调度优化的重要组成部分。其主要目标就是一段时间内在保证发电机污染物排放量不超标的前提下,得到电力系统经济调度的最优解决方案。在实际的电力系统优化中,往往需要进行一段时间内的最优经济调度。

为了取得更好的经济效益,研究人员应用优化算法进行电力的调度优化,以给出更优的调度方案,进而实现节能发电调度^[1]。赵波等设计了多目标粒子群算法,并将其应用于多目标的负荷经济分配^[2]。在优化的过程中,其综合考虑了燃

料消耗量、污染物排放量以及最小化系统线路损耗,并且所设计的多目标粒子群算法能够得到分布均匀的非劣最优前端。毛弋等在保证供电安全可靠的条件,利用模糊理论中的最大隶属度原理建立兼顾电网运行经济效益和节约能源的双目标优化模型,以实现火电系统的有功负荷经济分配^[3]。冯士刚等将强度 Pareto 进化算法与并行遗传算法相结合来解决火电站多目标负荷调度优化问题,并验证了其可行性和有效性^[4]。Wang 等提出了改进的粒子群算法并将其应用于解决多目标的负荷经济分配问题^[5]。Cai 等提出基于混沌粒子群的多目标优化算法,并将其应用于解决电力系统的环境经济调度问题^[6]。Abido 提出新的粒子群多目标优化算法,并将其成功地应用于多目标负荷经济调度^[7]。在该新的多目标优化算法中,为了能够应用粒子群算法解决多目标优化,Abido 对粒子群算法的全局最优个体和个体的历史最优解进行了重新定义。Wang 等提出改进的多目标粒子群算法,以解决多地区

到稿日期:2012-02-29 返修日期:2012-06-10 本文受 2011 年淮安市科技支撑计划(工业)项目(HAG2011044, HAG2011045)资助。

孙成富(1979—),男,博士,主要研究方向为智能计算、电力系统调度优化, E-mail: ajason509@163.com; 周海岩(1957—),男,教授, CCF 高级会员,主要研究方向为数据挖掘、知识发现; 张亚红(1966—),男,副教授,主要研究方向为调度优化。

的环境和经济负荷调度优化^[8]。在该改进的多目标优化算法中,局部搜索被用来提高算法的搜索能力。为了保证电力系统的安全,不同地区之间的传输线路的约束也被考虑,并且为了确保不同地区满足各自的预留约束,预留共享机制被提出。文献[9]首先指出随机模型更适合于研究电力系统调度,并且首次提出热能和电能混合系统调度的随机模型,最后通过改进的粒子群算法解决了包含多目标的热能和电能混合系统的调度优化。

多目标优化方法能够有效解决低维的优化问题,但是不能够有效解决高维的优化问题。本文将采用新的方法来解决动态环境经济电力系统调度这一高维的优化问题,以给出更优的电力系统调度方案。

2 动态环境经济电力系统调度优化数学模型

动态环境经济调度是多目标的优化问题。主要的目标函数和所要满足的约束条件形式化如下。

2.1 电力系统经济调度

火力发电机 i 的燃料消耗量可以表示为:

$$f_i^v(P_i) = a_i + b_i * P_i + c_i * P_i^2 + |e_i * \sin\{f_i * (P_i^{\min} - P_i)\}| \quad (1)$$

式中, a_i, b_i, c_i, e_i, f_i 是火力发电机 i 的经济调度参数; $P_i^{\min}$ 是火力发电机 i 最小的有功输出功率; P_i 表示火力发电机 i 在时刻 t 的有功输出功率。

对于给定的一个电力系统,其经济调度可以表示为一段时间 T 内所有处于工作状态的 N_i 个火力发电机总燃料消耗量的最小化。可表示为:

$$F = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_i} [f_i^v(P_i)] \quad (2)$$

式中, F 为总的燃料消耗量, T 为针对特定调度问题的时间跨度, N_i 为针对特定调度问题处于运行状态的火力发电机的数量, $f_i^v(P_i)$ 表示火力发电机 i 在时刻 t 的燃料消耗量。

2.2 电力系统的最小化污染物排放调度

电力部门不仅要保证采用尽可能少的燃料消耗量来提供充足和安全的电力,还要尽可能减少环境污染。在上面的电力系统经济调度中,环境污染并没有被考虑。但是火力发电站一直是环境污染的主要来源。每个火力发电机的污染物排放量可以由一个二次函数和一个指数函数组成^[7],如式(3)所示:

$$e_i^v(P_i) = \alpha_i + \beta_i * P_i + \gamma_i * P_i^2 + \eta_i * \exp(\delta_i * P_i) \quad (3)$$

式中, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \eta_i, \delta_i$ 为火力发电机 i 污染物排放因子, $e_i^v(P_i)$ 表示火力发电机 i 在时刻 t 的污染物排放量。

对于一个给定的动态电力系统,其环境调度问题可以被描述为在满足一系列约束条件的前提下同时运行的 N_i 火力发电机在时间跨度 T 内总的污染物排放量达到最小,如式(4)所示:

$$E = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_i} [e_i^v(P_i)] \quad (4)$$

式中, E 为总的污染物排放量, T 为针对特定调度问题的时间跨度, N_i 为针对特定调度问题处于运行状态的火力发电机的数量, $e_i^v(P_i)$ 表示火力发电机 i 在时刻 t 的污染物排放量。

2.3 需要满足的约束条件

在优化以上两个目标的过程中,必须同时满足以下的约

束条件:

(1) 动态电力平衡约束 (Active Power Balance Constraint)

在调度期间的每一时间段内,发电站电力总输出必须与总的电力需求和电力损耗之和保持平衡,如式(5)所示:

$$\sum_{i=1}^{N_i} P_{it} - P_{Dt} - P_{Lt} = 0 \quad (5)$$

式中, P_{Dt} 表示时刻 t 的电力需求; P_{Lt} 表示时刻 t 总的电力损耗,可由式(6)计算得到。

$$P_{Lt} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} P_{it} B_{ij} P_{jt} \quad (6)$$

式中, P_{it} 表示第 i 火力发电机在时刻 t 的电力输出; P_{jt} 表示第 j 火力发电机在时刻 t 的电力输出; B_{ij} 表示系数矩阵 B 的第 i 行第 j 列。

(2) 发电机有功功率输出约束 (Generation Limits Constraints)

$$P_i^{\min} \leq P_{it} \leq P_i^{\max} \quad (7)$$

式中, $P_i^{\min}$ 和 $P_i^{\max}$ 为火力发电机 i 的最小和最大的有功输出功率。

(3) 火力发电机爬坡约束 (Generating Unit Ramp Rate Limits)

大多数电力系统调度优化的研究都假定火力发电机的有功功率输出能够即时调节。尽管这一假定能够大大地简化待研究的调度优化问题,但是它并不能真实地反映实际操作中火力发电机的有功功率输出。事实上,所有运行中的火力发电机的有功功率输出变化范围都受到发电机爬坡约束的限制。文献[11]给出了火力发电机的爬坡约束。

$$P_{it} - P_{i(t-1)} \leq UR_i \quad (8)$$

$$P_{i(t-1)} - P_{it} \leq DR_i \quad (9)$$

式中, $i \in \{1, 2, \dots, N_i\}$, $t \in \{1, 2, \dots, T\}$; UR_i 表示火力发电机 i 瞬间上调的约束值,其单位为 MW/h; DR_i 表示火力发电机 i 瞬间下调的约束值,其单位为 MW/h。

3 预备工作

3.1 双目标优化问题转换为单目标优化问题

动态环境经济电力系统的调度问题是一个双目标优化问题,它需要同时进行电力系统的经济调度和环境调度。目前已有成熟的多目标优化算法来解决双目标优化问题,但是那些算法都是针对低维的多目标优化问题提出的。对于高维的多目标优化问题,那些算法不但效率低,而且往往得不到满意的解决方案。动态环境经济电力系统的调度不但是高维双目标优化问题,而且有多个约束条件需要解决。采用多目标优化算法很难得到满意的解决方案,因此需要将该双目标优化问题转化为单目标优化问题。本文将根据电力系统调度优化的特点,将动态环境经济电力系统的调度问题转化为单目标优化问题。

$$TC = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_i} [f_i^v(P_{it}) + h_t * e_i^v(P_{it})] \quad (10)$$

式中, TC 表示动态环境经济电力系统调度问题中总操作代价,而 h_t 表示时间段 t 内的代价惩罚因子。

3.2 解决约束条件的启发式策略

差分进化算法的进化操作算子所得到的电力系统动态调

度的解决方案并不一定满足上述的约束条件,因此需要使用启发式策略对解决方案做进一步的修正,使其满足约束条件。具体的启发式策略如下。

(1) 解决发电机的有功功率输出和爬坡约束

在电力系统动态调度优化的过程中,发电机 i 在时间段 t 的有功功率输出 P_{it} 并不一定能够满足式(7)所给出的发电机有功功率输出约束和式(8)与式(9)所给出的发电机爬坡约束。为了满足上述的约束条件,可以通过启发式策略对得到的调度方案进行修正。该启发式策略的具体操作步骤如下:

步骤 1 初始化火力发电编号 i , 使 $i=1$ 。

步骤 2 如果时间段编号 $t=1$, 那么 $\text{ramp_range}_i^{\min} = P_i^{\min}$ 且 $\text{ramp_range}_i^{\max} = P_i^{\max}$; 否则 $\text{ramp_range}_i^{\min} = \max(P_{i(t-1)} - DR_i, P_i^{\min})$ 且 $\text{ramp_range}_i^{\max} = \min(P_{i(t-1)} + UR_i, P_i^{\max})$ 。

步骤 3 通过优化算法具体操作所得到的发电机 i 在时间段 t 的有功功率输出 P_{it} , 如果不能够满足发电机的有功功率输出和爬坡约束, 那么可以通过式(11)进行修正。

$$P_{it} = \begin{cases} \text{ramp_range}_i^{\min}, & \text{if } P_{it} < \text{ramp_range}_i^{\min} \\ P_{it}, & \text{if } \text{ramp_range}_i^{\min} \leq P_{it} \leq \text{ramp_range}_i^{\max} \\ \text{ramp_range}_i^{\max}, & \text{if } P_{it} > \text{ramp_range}_i^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

步骤 4 如果 $i \leq N_s$, 那么 $i=i+1$ 并跳转到步骤 2。

步骤 5 启发式修正过程结束。

(2) 解决动态电力平衡约束

为了能够得到满足动态电力平衡约束条件的调度解决方案, 本文提出基于优先列表(Priority List)的启发式策略来解决动态电力平衡约束条件。根据每个火力发电机的运行参数, 本文基于每个火力发电机在最大电力输出时的平均操作代价定义优先列表。其中平均操作代价既要考虑燃料消耗也要考虑污染物的排放量。当以最大电力输出时, 火力发电机 i 在时间段 t 的平均操作代价 z_{it} 可表示为:

$$z_{it} = \frac{f_{it}^v(P_i^{\max}) + h_{it} * e_{it}^v(P_i^{\max})}{P_i^{\max}} \quad (12)$$

式中, h_{it} 为时间段 t 的代价惩罚因子。

在时间段 t , 所有的火力发电机依照平均操作代价 z_{it} 升序排列。这样时间段 t 的优先列表就可以根据上面的序列得到。在该优先列表中, 平均操作代价 z_{it} 越小的火力发电机能够拥有更高的优先级进行更多的电力输出。解决动态电力平衡约束的启发式策略如下:

步骤 1 在时间段 t , 根据式(12)计算每个火力发电机的平均操作代价 z_{it} , 并将 z_{it} 的值按照升序排列以得到时间段 t 的优先列表 $PL(t)$ 。

步骤 2 设置时间段的初值 $t=1$ 。

步骤 3 设置时间段 t 的临时优先列表 $\text{temp_PL}(t) = PL(t)$ 。

步骤 4 在时间段 t , 动态电力平衡约束的违反量为 ΔP^t , 并且 $\Delta P^t = \sum_{i=1}^{N_s} P_{it} - (P_{Lt} + P_{Dt})$ 。

步骤 5 如果 $\Delta P^t = 0$, 转向步骤 14; 如果 $\Delta P^t < 0$, 转向步骤 10。

步骤 6 初始化计数变量 m 为 1。

步骤 7 在时间段 t , 将临时优先列表 $\text{temp_PL}(t)$ 中拥有最大平均操作代价 z_{it} 的火力发电机的下标值赋给变量 k , 并设置 $P_k = \text{ramp_range}_k^{\min}$ 。然后从临时优先列表 $\text{temp_PL}(t)$ 中删除该下标值。

步骤 8 计算时间段 t 所有火力发电机的电力输出的总和 P_{sum}^t 。如果 $P_{sum}^t < P_{Lt} + P_{Dt}$, 那么根据图 1 设置 P_k 并跳转至步骤 14; 否则设置 $P_k = \text{ramp_range}_k^{\min}$ 。

步骤 1	除了变量 k 所代表的火力发电机, 指定其他 $(N_s - 1)$ 火力发电机的有功输出功率。
步骤 2	根据电力系统有功功率平衡约束, 有功输出功率 P_{kt} 为: $P_{kt} = P_{Lt} + P_{Dt} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{N_s} P_{it}$ 式中, $t \in \{1, 2, 3, \dots, T\}$
步骤 3	电力系统电路损耗的计算式(6)可修改为: $P_{LA} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{N_s} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{N_s} P_{it} * B_{ij} * P_{jt} + 2 * P_{kt} * (\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{N_s} B_{ki} * P_{it}) + B_{kk} * P_{kt}^2$ 式中, $t \in \{1, 2, 3, \dots, T\}$
步骤 4	对式(5)展开并重新整理, 可以得到: $B_{kk} * P_{kt}^2 + (2 * \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{N_s} (B_{ki} * P_{it}) - 1) * P_{kt} + (P_{Dt} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{N_s} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{N_s} P_{it} * B_{ij} * P_{jt} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{N_s} P_{it}) = 0$
步骤 5	通过求解步骤 4 中的一元二次方程, 可能得到有功输出功率 P_{kt} 的准确值。

图 1 确定有功输出功率 P_k

步骤 9 $m=m+1$ 。如果 $m \leq N_s$, 那么跳转到步骤 7; 否则跳转到步骤 14。

步骤 10 初始化计数变量 m 为 1。

步骤 11 在时间段 t , 将临时优先列表 $\text{temp_PL}(t)$ 中拥有最小平均操作代价 z_{it} 的火力发电机的下标值赋给变量 k , 并设置 $P_k = \text{ramp_range}_k^{\max}$ 。然后从临时优先列表 $\text{temp_PL}(t)$ 中删除该下标值。

步骤 12 计算时间段 t 所有火力发电机的电力输出的总和 P_{sum}^t 。如果 $P_{sum}^t > P_{Lt} + P_{Dt}$, 那么根据图 1 设置 P_k 并跳转到步骤 14; 否则设置 $P_k = \text{ramp_range}_k^{\max}$ 。

步骤 13 $m=m+1$ 。如果 $m \leq N_s$, 那么跳转到步骤 11。

步骤 14 $t=t+1$ 。如果 $t \leq T$, 那么跳转到步骤 3。

步骤 15 启发式的修正过程结束。

4 基于差分进化算法求解动态电力系统调度优化问题

针对动态电力系统调度优化这种高维优化问题, 采用启发式策略对差分进化算法得到的解决方案进行修正, 能够极大地提高群体的多样性, 拓展搜索空间, 并对问题的求解精度有着较大的影响, 因而能够得到更优的调度解决方案。其求解的具体过程如下:

步骤 1 输入动态电力系统参数和不等式约束的上、下限值, 设置差分进化算法中的相关参数和最大迭代次数;

步骤2 初始化群体,群体中每个个体都是动态电力系统调度优化问题的一个解决方案,并且每个个体都是由一组决策变量组成。这组决策变量表示在调度期间各时间段中火力发电机的电力输出值。因此每个个体可以由矩阵表示。群体中第 k 个个体 $P_k(k=1,2,\dots,N_p)$ 可由式(13)表示。

$$P_k = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{21} & \cdots & P_{N_s1} \\ P_{12} & P_{22} & \cdots & P_{N_s2} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ P_{1T} & P_{2T} & \cdots & P_{N_sT} \end{bmatrix} \quad (13)$$

在初始化过程中, P_{it} (其中 $i \in [1, N_s], t \in [1, T]$)可由式(14)求得。

$$P_{it} = P_{it}^{\min} + r_s * (P_{it}^{\max} - P_{it}^{\min}) \quad (14)$$

式中, r_s 为均匀分布于 $[0,1]$ 之间的随机数。

应用上面的启发式策略修正每个个体,使其满足动态电力系统的约束条件,并根据式(10)评估每个个体的适应值。

步骤3 设置迭代次数 $G=1$ 。

步骤4 设置个体下标 $i=1$ 。

步骤5 针对个体 P_i^G ,从群体中随机选择3个互不相同的个体 P_k^G, P_l^G 和 P_m^G ,并使用差分进化算法的变异操作生成变异个体。

步骤6 针对个体 P_i^G ,使用差分进化算法的交叉操作产生临时测试个体 u_i^G 。

步骤7 应用上面的启发式策略修正临时测试个体 u_i^G ,使其满足动态电力系统的各种约束条件,最后评估 u_i^G 的适应值。

步骤8 拥有更好适应值的解决方案将被选中进入下一

次迭代。

步骤9 $i=i+1$,如果 i 的取值没有达到群体中个体的数目,则转向步骤5。

步骤10 $G=G+1$,如果迭代次数 G 没有达到设置的最大迭代次数,则跳转到步骤4。

步骤11 输出群体中最优的解决方案。

5 仿真实验

本文将差分进化算法应用于解决动态电力系统的调度优化,并且在优化的过程中同时考虑经济调度和环境调度。最后,将差分进化算法得到的动态电力系统调度的最优解决方案与文献[11]中的最优解决方案进行比较。

5.1 测试系统

该动态电力系统由10个火力发电机组组成。在仿真实验中,调度区间设置为24小时,并以每1小时作为一个时间段。文献[11]给出该动态电力系统中10个火力发电机的各项参数。

5.2 实验结果

本实验硬件环境为Intel Core 2 Duo 2.20 GHz的CPU,内存为2GB RAM;软件环境为Windows XP操作系统和MATLAB 7.1开发环境。为了与文献[11]进行公平的比较,本文在优化过程中将群体大小 N_p 设定为20,最大的迭代次数 $G_{\max}$ 设定为100,并且将差分进化算法的两个参数分别设为经典值,其中缩放因子 F 设定为0.44,交叉因子 CR 设定为0.85。

表1给出了调度过程中不同时间段式(10)中 h_t 的不同取值。

表1 不同时间段 h_t 的取值

时间	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
h_t	3.6914	3.6914	3.6914	4.1162	4.1162	8.0606	8.0606	8.0606	10.3942	11.3477	13.6710	13.6710
时间	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
h_t	11.3477	10.3942	8.0606	4.1162	4.1162	8.0606	8.0606	11.3477	10.3942	8.0606	4.1162	3.6914

在表2中,方案1表示应用代价惩罚因子将双目标优化问题转化为单目标优化问题,而方案2表示直接将两个目标函数相加使其变为单目标优化问题,方案3表示以最小化燃料消耗量为目标的单目标优化问题。从表2的结果可以看

出,方案1能够得到更加折中的优化结果,而方案2的结果与以最小化燃料消耗量为目标的单目标优化问题的结果相差不大。主要原因就是没有代价惩罚因子在两个目标之间进行权衡,并且两个目标函数值不是同一个数量级。

表2 不同方案下燃料消耗量和污染物排放量的比较

		最好值	最差值	平均值	标准差
方案1	燃料消耗量(\$)	2494095.1483	2514107.5729	2500383.7645	5182.1968
	污染物排放量(lb)	303388.8374	309245.3939	306549.5606	1417.3802
方案2	燃料消耗量(\$)	2471032.0885	2477216.2725	2474081.6954	689.1799
	污染物排放量(lb)	324831.2763	336544.3911	331015.4920	3004.8839
方案3	燃料消耗量(\$)	2469857.2230	2476807.1984	2473474.5663	2006.3217
	污染物排放量(lb)	337850.0264	350945.9265	343748.1535	3250.1048

差分进化算法所得到的动态电力系统最优调度解决方案如表3所列。表3的最后一列给出了 $\sum_{i=1}^{10} P_{it} - P_{L_t}$ 的计算值。从表3的最后一列可以看出,所得到的调度解决方案满足动态电力系统的电力平衡约束。通过分析10个火力发电机在不同时间段的有功功率输出,可以看出该调度解决方案同时满足有功功率输出约束和爬坡约束。因此得到的动态电力系统最优调度解决方案满足上述的所有约束条件。

本文所给出的最优调度解决方案的燃料消耗量和其对应

的污染物排放量分别为\$2495003.0680和306600.5398 lb。而文献[11]所得到的调度解决方案给出的最好的燃料消耗量及其对应的污染物排放量分别为\$2.5226 $\times 10^6$ 和3.0994 $\times 10^5$ lb。与文献[11]相比,当进行动态电力系统的经济和环境调度时,差分进化算法得到的最优调度解决方案在1小时内能够分别节约\$1149.85的燃料消耗和降低139.14lb的污染物排放量。

(下转第253页)

tion[J]. Journal of Information Sciences, 2011, 181(6): 1171-1186

[9] Wang Qing, Song Ren-wang. Research on Transformation-Domain Digital Audio Blind Watermarking Combining Chaotic Encryption and Arnold Transformation[J]. SCI-TECH Information development and Economy, 2010, 20(17): 127-129

[10] 卢辉斌, 孙艳. 基于新的超混沌系统的图像加密方案[J]. 计算机科学, 2011, 38(6): 149-151

[11] Pevny T, Bas P, Fridrich J. Steganalysis by subtractive pixel adjacency matrix[J]. IEEE Transaction on Information Forensics and Security, 2010, 5(2): 215-224

[12] Monga V, Kivanc Mihcak M. Robust and secure image hashing via non-negative matrix factorization[J]. IEEE Trans on Information Forensics and Security, 2007, 2(3): 376-390

[13] 张健, 任洪娥, 陈宇. 基于均匀置乱的图像位置置乱衡量方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(11): 22-25

(上接第 211 页)

表 3 差分进化算法得到的最优解决方案

时间	P _{1t}	P _{2t}	P _{3t}	P _{4t}	P _{5t}	P _{6t}	P _{7t}	P _{8t}	P _{9t}	P _{10t}	P _{11t}	$\sum_{i=1}^{10} P_{it} - P_{1t}$
1	150.00	135.00	73.00	60.00	173.50	160.00	130.00	119.99	44.23	10.00	19.72	1036
2	150.00	135.00	73.00	81.04	174.39	160.00	130.00	120.00	71.61	37.50	22.53	1110
3	150.00	135.30	114.03	130.50	211.77	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	28.61	1258
4	150.00	146.88	176.22	180.50	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	35.61	1406
5	150.00	192.75	191.93	197.13	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	39.80	1480
6	169.59	233.34	246.61	239.23	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	48.77	1628
7	150.00	257.15	287.09	273.28	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	53.53	1702
8	183.38	244.19	335.84	283.18	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	58.59	1776
9	249.47	317.09	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	70.56	1924
10	307.38	366.16	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	79.54	2022
11	369.75	396.11	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	87.86	2106
12	397.97	416.49	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	92.46	2150
13	351.54	379.91	337.03	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	84.47	2072
14	284.10	306.32	318.08	298.32	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	70.83	1924
15	213.40	242.68	299.17	291.51	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	58.76	1776
16	150.00	162.68	252.85	244.13	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	43.66	1554
17	150.00	135.99	194.98	250.51	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	54.90	39.39	1480
18	181.48	204.94	252.83	249.36	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	48.60	1628
19	227.74	267.65	257.47	294.32	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	59.17	1776
20	287.80	340.00	331.91	299.26	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	74.97	1972
21	276.11	310.95	319.71	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	70.78	1924
22	196.11	231.40	239.90	250.79	227.11	160.00	129.80	120.00	79.88	41.97	48.97	1628
23	150.00	151.40	167.43	201.46	196.60	160.00	130.00	112.04	50.57	44.38	31.87	1332
24	150.00	135.00	87.61	154.77	174.62	160.00	129.50	109.71	62.92	45.18	25.31	1184
燃料消耗量 (\$)							2495003.0680					
污染物排放量 (lb)							306600.5398					
总的网络损耗 (MW)							1294.3545					

结束语 本文提出基于差分进化算法和启发式策略的新方法,并将其应用于解决电力系统动态环境经济调度问题。动态环境经济调度问题是双目标优化问题,虽然研究人员已经提出很多双目标优化算法,但是对于高维的双目标优化问题那些算法不但效率低,而且往往得不到满意的解决方案。本文中,首先,采用代价惩罚因子将该双目标优化问题转化成单目标优化问题,该方法大大降低了问题的复杂性;然后,在优化的过程中通过启发式策略修正差分进化算法得到的解决方案,使其满足有功功率输出约束和爬坡约束;同时采用基于优先列表的启发式策略解决动态电力平衡约束条件。仿真实验结果显示,提出的新方法能够有效地解决电力系统动态环境经济调度问题。

参 考 文 献

[1] 荣芬,朱耀明,姚良忠,等. 节能发电调度研究综述[J]. 水电能源科学, 2011, 29(2): 178-181

[2] Zhao B, Cao Y J. Multiple objective particle swarm optimization technique for economic load dispatch[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2005, 6A(5): 420-427

[3] 毛弋, 刘文春, 张鹏飞. 利用模糊算法对电力市场下纯火电系统多目标综合经济负荷进行分配[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(6): 22-25

[4] 冯士刚, 艾芊. 火电站多目标负荷调度及其算法的研究[J]. 动力

工程, 2008, 28(3): 404-407

[5] Wang L F, Singh C. Environment/economic power dispatch using a fuzzified multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(12): 1654-1664

[6] Cai J J, Ma X Q, Li Q, et al. A multi-objective chaotic particle swarm optimization for environmental/economic dispatch[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(5): 1318-1325

[7] Abido M A. Multiobjective particle swarm optimization for environmental/economic dispatch problem[J]. Electric Power System Research, 2009, 79(7): 1105-1113

[8] Wang L F, Singh C N. Reserve-constrained multiarea environmental/economic dispatch based on particle swarm optimization with local search[J]. Engineering Application of Artificial intelligence, 2009, 22(2): 298-307

[9] Wang L F, Singh C N. Stochastic economic emission load dispatch through a modified particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(8): 1466-1476

[10] Palanichamy C, Sundar B N. Analytical solution for combined economic and emissions dispatch[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 1129-1137

[11] Basu M. Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorted genetic algorithm-II[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2008, 30(2): 140-149