

多时段可中断负荷调度的智能优化算法

刘畅¹, 张少华², 王 峴²

(1. 中国石化股份有限公司济南分公司, 山东 济南 250101; 2. 上海大学自动化系, 上海 200072)

摘要: 考虑多个可中断用户的多时段可中断负荷优化调度问题一般是一个多目标的组合优化问题, 建立了一个多时段多目标可中断负荷优化调度模型, 可考虑中断补偿费用最小化和中断频率最小化等多个优化目标, 并计入不同可中断用户的不同中断特性和时段耦合约束。给出了应用离散二元粒子群优化算法的多时段可中断负荷调度问题求解方法。基于一个含 19 个可中断用户和 16 个时段的可中断负荷调度问题的算例仿真, 通过比较采用离散二元粒子群优化算法和遗传算法的优化结果, 表明离散粒子群算法在收敛解的质量上优于遗传算法。

关键词: 多时段可中断负荷调度; 组合优化问题; 离散二元粒子群优化; 遗传算法

Intelligent optimization algorithms for multi-period dispatch of interruptible loads

LIU Chang¹, ZHANG Shao-hua², WANG Xian²

(1. Jinan Branch, China Petroleum & Chemical Corporation, Jinan 250101, China;

2. Department of Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Interruptible load dispatch problem with multi-period and multi-interruptible-load is usually a multi-objective combinatorial optimization problem. First, a multi-period and multi-objective interruptible load dispatch model is proposed, in which several objectives, such as minimizing the interruption payments and interruption frequency, can be included. The characteristics of different interruptible loads and the time period coupled constraints are also considered. Second, a solution method using discrete binary particle swarm optimization (BPSO) is developed for the multi-period and multi-objective interruptible load dispatch model. Numerical simulation for an interruptible load dispatch problem with 19 interruptible customers and 16 time periods demonstrates the effectiveness of the method. Comparisons between the simulation results produced by the BPSO and the genetic algorithm (GA) show that the BPSO can obtain better solutions than that of the GA.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 70871074).

Key words: multi-period dispatch of interruptible loads; combinatorial optimization problem; discrete binary particle swarm optimization; genetic algorithm

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0105-05

0 引言

可中断负荷管理在维持电力系统安全可靠运行和缓解电力市场价格飞升等方面具有重要作用, 并已得到广泛应用^[1]。在可中断负荷管理实际应用中, 需要考虑多个可中断用户的可中断负荷优化调度问题, 即在一定的优化目标和约束条件下, 如何在多个可中断用户中分配要求的负荷中断容量? 考虑多时段的可中断负荷优化调度问题往往是一个复杂的多目标组合优化问题, 有关该问题求解算法的研究

具有重要的理论和实际应用意义。

现有相关研究大多采用传统的优化算法, 如文献[2-3]采用动态规划方法结合启发式规则来解决可中断负荷优化调度问题, 文献[4]采用类似于解决机组检修规划的基于优先次序的启发式算法。以上研究在原理上无法保证获得可中断负荷优化调度问题的最优解。

本文研究现代智能优化算法在多时段可中断负荷优化调度中的应用问题, 建立的优化调度模型可考虑中断补偿费用最小化和中断频率最小化等多个优化目标, 并可计入可中断用户的不同中断特性, 如中断补偿价格、每次中断的时间限制, 调度

基金项目: 国家自然科学基金项目(70871074)

周期内的总中断时间限制等。采用离散粒子群优化算法^[5-7]和遗传算法^[8]来求解。算例分析着重比较这两种智能优化算法的性能。

1 可中断负荷优化调度问题

可中断负荷优化调度问题，是在一定的优化目标和约束条件下，解决要求的负荷中断量在多个可中断用户中的分配问题。在电力市场环境下，电力公司中断用户负荷时需要给予用户一定的经济补偿，相应的中断补偿价格可通过用户报价的形式获得^[4]。从电力公司的角度来看，一个合理的可中断负荷优化调度目标是在满足需要的负荷中断量的条件下，使得电力公司支付给用户的中断补偿费用最小。在多时段情况下，可中断负荷优化调度还需充分考虑不同用户的负荷中断特性^[9]，如每次中断的最大持续时间限制、两次中断之间的最小时间间隔限制、调度周期内的总中断时间限制等，而且，从用户角度考虑，一个合理的要求在调度周期内中断次数（或频率）越小越好。基于这些考虑，本文给出如下可中断负荷优化调度模型。

考虑 N 个可中断用户在 T 个时段中的可中断负荷调度问题，假设第 t 个时段（1 h）要求的最小负荷中断量为 $\Delta C(t)$, $t=1,2,\dots,T$ 。第 i 个用户的可中断容量为 $C(i)$ ，中断补偿价格为 $p(i)$ ，每次中断的最大持续时间为 $\max(i)$ ，两次中断的最小时间间隔为 $\min(i)$ ，要求的最大总中断时间为 $Total(i)$, $i=1,2,\dots,N$ 。 $x(i,t)$ 为中断决策变量（0-1 变量）， $x(i,t)=1$ 表示第 t 时段中断第 i 用户容量 $C(i)$ ， $x(i,t)=0$ 表示第 t 时段不中断第 i 用户的负荷。

可中断负荷调度问题的优化目标取为在中断频率尽量低的情况下，总的中断补偿费用最小，即目标函数可表示为：

$$\text{Minimize } f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N x(i,t)C(i)p(i) \quad (1)$$

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N x(i,t) \quad (2)$$

约束条件为：

(a) 第 t 个时段要求的最小中断负荷约束

$$g1(t) = \sum_{i=1}^N x(i,t)C(i) - \Delta C(t) \geq 0, \quad t=1,\dots,T \quad (3)$$

(b) 第 i 个用户每次中断的最大持续时间约束

$$\sum_{m=1}^{\max(i)} x(i,t+m) \leq \text{Max}(i) \quad (4)$$

$$\text{if } x(i,t-1)=0, x(i,t)=1, i=1,\dots,N$$

(c) 第 i 个用户两次中断的最小时间间隔约束

$$|j-k| \geq \min(i)$$

$$\text{if } x(i,j-1)=0, x(i,j)=1 \text{ and} \quad (5)$$

$$x(i,k-1)=0, x(i,k)=1, i=1,\dots,N$$

(d) 第 i 个用户在调度周期内的总中断时间约束

$$\sum_{t=1}^T x(i,t) \leq \text{Total}(i) \quad i=1,\dots,N \quad (6)$$

由式（1）~（6）组成的可中断负荷优化调度模型，是一个含时段耦合约束的多目标组合优化问题。需要指出的是，该模型的目标函数和约束条件还可根据实际使用时的具体要求加以调整或补充，如：在各时段批发价格已知时，电力公司可考虑以获得的负荷中断效益最大为目标；用户也可能有其他中断要求，如不希望在某些特定时段被中断供电，等。不管模型如何调整，本文介绍的方法应同样适用。

2 求解算法

为了解上节给出的可中断负荷调度问题，本文采用两种智能优化算法：粒子群优化算法（PSO）和遗传算法（GA）。与 GA 算法相比，PSO 算法没有选择操作，因而所有候选解（包括劣解）均始终参与搜索，而对于离散的组合优化问题，好的解可能位于劣解的附近，因而 PSO 算法更可能求得最优解。为了解离散的可中断负荷优化调度问题，本节侧重给出基于离散的二元粒子群优化算法的求解方法。

2.1 离散二元粒子群优化算法

在 PSO 算法中，优化问题的候选解是搜索空间中的一个“粒子”，通过随机初始化一群粒子，然后经过迭代找到最优解（最优粒子位置）。在每次迭代中，每个粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己的位置。两个“极值”分别为粒子本身所找到的最优解（个体极值 $Pbest$ ）和整个种群当前所找到的最优解（全局极值 $Gbest$ ）。在离散的二元粒子群优化算法（BPSO）^[5]中，每个粒子根据式（7）来更新自己的速度：

$$v_{id}^{k+1} = w \times v_{id}^k + c_1 \times \text{rand}() (Pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \times \text{rand}() (Gbest_{id}^k - x_{id}^k) \quad (7)$$

其中： k 表示迭代次数； $\text{rand}()$ 为 $[0, 1]$ 间服从均匀分布的随机数； w 为惯性因子； c_1 和 c_2 是非负的学习因子； x_{id}^k 是粒子 i 在第 k 次迭代中第 d 维的当前位置； $Pbest_{id}^k$ 是粒子 i 在第 k 次迭代中第 d 维的

个体极值点的位置; $Gbest_d^k$ 是整个粒子群在第 k 次迭代中第 d 维的全局极值点的位置。

BPSO 算法中粒子的位置由式 (8)、(9) 来确定。

$$\text{if } (rand() < S(v_{id}^k)), \text{ then } x_{id}^{k+1} = 1 \quad (8)$$

$$\text{else } x_{id}^{k+1} = 0$$

其中, $S(\cdot)$ 是一个 Sigmoid 函数。

$$S(v_i) = \frac{1}{1 + \exp(-v_i)} \quad (9)$$

2.2 采用离散 BPSO 算法的可中断负荷调度

可中断负荷调度问题的候选解 $x(i, t)$, $t=1, 2, \dots, T$, $i=1, 2, \dots, N$, 表示为一个粒子, 因而每个粒子的维数为 $N \times T$ 。本文采用罚函数法^[10]来处理多目标优化问题及其约束条件, 从而把可中断负荷调度问题转化为一个无约束单目标优化问题, 再通过离散 BPSO 算法或 GA 算法来求解。

对于最小化中断次数的优化目标式 (2), 定义一个罚函数 f_2 : (1) 任何用户第一次被中断时罚函数值为 0; (2) 第二次中断罚函数为 100; (3) 为了最小化中断频率, 每次中断后该用户的罚函数值均加倍。则 f_2 可表示为

$$f_2 = 100 \times \sum_{j=2}^J 2^{j-2} NC(j) \quad (10)$$

其中: $NC(j)$ 表示中断 j 次的用户数; J 表示所有用户中被中断最多的次数。

对于式 (3)、(4)、(5)、(6) 的约束条件, 也采用目标惩罚的方法来处理, 可得到如式 (11) 单目标无约束优化问题:

$$\text{Minimize } f_0 = f_1 + f_2 + K_1 \sum_{t=1}^T g1(t) + K_2 \cdot NV \quad (11)$$

其中: f_0 为离散 BPSO 算法或 GA 算法的适应函数; NV 为不满足约束条件式 (4)、(5) 和 (6) 的个数; K_1, K_2 为惩罚系数, 本文取 $K_1=10^6, K_2=10^5$ 。

3 算例分析

考虑 19 个可中断用户在白天 16 个小时时段 (8:00~23:00) 中的可中断负荷调度问题, 每个时段要求的最小负荷中断量 $\Delta C(t)$ 如表 1 所示。每个用户的可中断容量 $C(i)$, 中断补偿价格 $p(i)$, 每次中断的最大持续时间 $\max(i)$, 两次中断的最小时间间隔 $\min(i)$, 总中断时间 $Total(i)$, 如表 2 所示。需要说明的是, 以上有关可中断用户特性的基础数据主要参考了文献[3]中的算例数据, 并略做了调整。尽管不是实际数据, 但应该在合理范围之

表 1 要求的最小负荷中断量

Tab.1 The required minimum hourly curtailment

| t | $\Delta C(t) / \text{kW}$ | t | $\Delta C(t) / \text{kW}$ |
|-----|---------------------------|-----|---------------------------|
| 1 | 110 | 9 | 600 |
| 2 | 230 | 10 | 610 |
| 3 | 450 | 11 | 660 |
| 4 | 680 | 12 | 700 |
| 5 | 770 | 13 | 570 |
| 6 | 800 | 14 | 410 |
| 7 | 750 | 15 | 230 |
| 8 | 640 | 16 | 130 |

表 2 可中断用户特性

Tab.2 Interruptible load characteristics

| i | $C(i) / \text{kW}$ | $\max(i) / \text{h}$ | $\min(i) / \text{h}$ | $Total(i) / \text{h}$ | $p(i) / \text{元} / \text{kWh}$ |
|-----|--------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 1 | 320 | 4 | 2 | 8 | 2.38 |
| 2 | 200 | 4 | 2 | 8 | 2.57 |
| 3 | 80 | 4 | 2 | 8 | 1.69 |
| 4 | 84 | 4 | 2 | 8 | 1.69 |
| 5 | 100 | 4 | 2 | 8 | 1.92 |
| 6 | 160 | 4 | 2 | 8 | 2.36 |
| 7 | 100 | 3 | 1 | 6 | 1.92 |
| 8 | 60 | 3 | 1 | 6 | 1.69 |
| 9 | 200 | 3 | 1 | 6 | 2.57 |
| 10 | 40 | 4 | 1 | 8 | 1.69 |
| 11 | 40 | 3 | 1 | 8 | 1.69 |
| 12 | 72 | 3 | 3 | 6 | 1.69 |
| 13 | 140 | 4 | 3 | 8 | 2.14 |
| 14 | 80 | 3 | 3 | 6 | 1.69 |
| 15 | 40 | 3 | 3 | 6 | 2.57 |
| 16 | 180 | 3 | 3 | 6 | 2.57 |
| 17 | 180 | 4 | 2 | 8 | 2.57 |
| 18 | 160 | 4 | 2 | 8 | 2.36 |
| 19 | 60 | 4 | 2 | 8 | 1.69 |

内。在实际应用时, 需根据具体的基础数据来进行优化计算。基础数据的改变不会影响有关算法性能的主要结果。

采用离散的二元粒子群优化算法 (BPSO) 与遗传算法 (GA) 进行求解, 其中, BPSO 算法中粒子种群数为 50, 迭代次数为 1 250; GA 算法种群数为 50, 迭代次数为 2 000, 采用锦标赛法进行选择操作, 多点均匀交叉变异, 交叉率为 0.7, 变异率为 0.01。结果如表 3 和表 4 所示。

由表 3 可知, BPSO 算法得到了具有更小中断补偿费用的解, 两个算法得到了相同的中断次数。

表 3 BPSO 算法和 GA 算法的最优解

Tab.3 Best solution produced by BPSO and GA

| | 适应值 | 中断补偿费用 / 元 | 中断次数 |
|------|--------|------------|------|
| BPSO | 20 397 | 19 297 | 31 |
| GA | 22 210 | 20 710 | 31 |

表 4 BPSO 算法和 GA 算法的调度解

Tab.4 Best schedule produced by BPSO and GA

| t | 被中断的用户 | |
|----|---------------------|-----------------------|
| | BPSO | GA |
| 1 | 6 | 9 |
| 2 | 4,18 | 10, 14,16,19 |
| 3 | 4, 13,17,19 | 1, 10,14,19 |
| 4 | 1, 7, 13,14,19 | 1, 4, 10, 13, 18 |
| 5 | 1, 3, 5, 13, 14, 19 | 1, 2, 4, 11, 13 |
| 6 | 1, 3, 5, 14, 16, 19 | 2, 3, 4, 9, 13, 17 |
| 7 | 2, 3, 5, 9, 16 | 3, 4, 5, 7, 9, 10, 16 |
| 8 | 2, 5, 16, 18 | 1, 5, 9,14 |
| 9 | 2, 8, 17,18 | 1, 5, 10, 14, 19 |
| 10 | 2, 3, 6, 17 | 1, 9, 10, 18 |
| 11 | 1, 3, 6, 10, 12 | 1, 6, 10, 18 |
| 12 | 1, 3, 5, 7, 10,12 | 2,5, 6, 16, 19 |
| 13 | 2, 5, 13, 16 | 2, 5, 7, 8, 13 |
| 14 | 2, 11, 13, 15 | 2,5,13 |
| 15 | 4, 18 | 13,17 |
| 16 | 4,14 | 4,14 |

由表 4 可知, GA 算法的调度解中并没有涉及到用户 15, 而 BPSO 算法的调度解中则对每个用户进行了中断。

图 1 给出了由 BPSO 和 GA 算法得到的可中断负荷调度结果, 其中阴影部分为要求的最小负荷中断量。可以看出, 在第 2, 6, 10 时段, GA 算法调度的中断量明显高于 BPSO 算法, 从而导致相对较高的中断补偿费用。

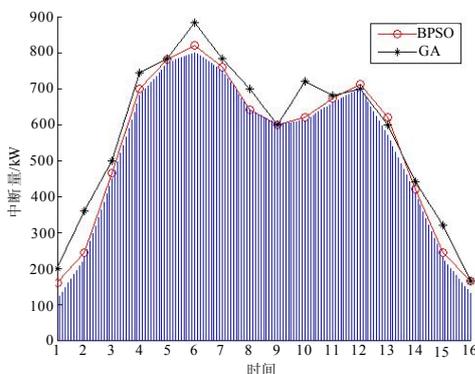


图 1 BPSO 算法和 GA 算法的调度结果

Fig.1 Schedule of BPSO and GA

表 5 给出了 BPSO 算法和 GA 算法的平均性能比较。与 GA 算法相比, 虽然 BPSO 算法的计算时间稍长, 但其具有较好的收敛成功率, 适应函数平均值也优于 GA 算法。

表 5 BPSO 算法和 GA 算法的平均性能

Tab.5 Average performance of BPSO and GA

| | 适应函数平均值 | 可行解个数 | 平均计算时间 / s |
|------|---------|-------|------------|
| BPSO | 21 072 | 29 | 32.6 |
| GA | 23 823 | 21 | 30.5 |

图 2 给出了 BPSO 和 GA 算法的收敛曲线, 可看出, GA 算法会陷入局部最优解, 而 BPSO 算法的收敛解优于 GA 算法。

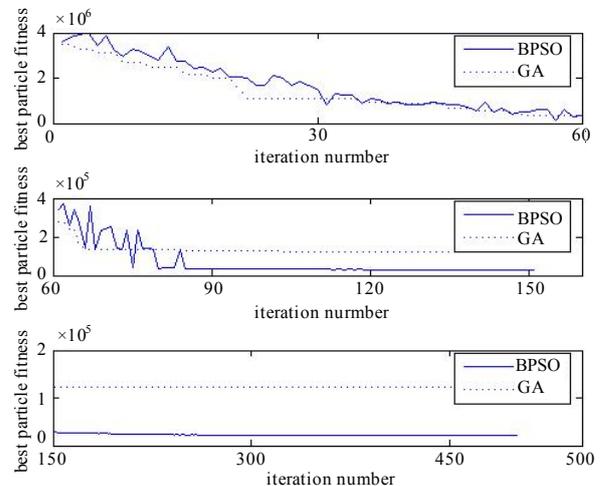


图 2 BPSO 算法和 GA 算法的收敛曲线

Fig.2 Convergences of BPSO and GA

4 结论

本文探讨了智能优化算法在多时段可中断负荷调度问题中的应用, 建立的优化模型可考虑中断补偿费用最小化和中断频率最小化等多个优化目标, 并可计入不同可中断用户的不同中断特性。给出的算例分析着重比较了基于离散二元粒子群优化算法和遗传算法的结果, 表明离散粒子群算法可获得优于遗传算法的解, 因而在多时段可中断负荷调度中具有较好的应用前景。

在本文研究中, 有关用户的可中断负荷量、中断补偿价格等信息假设是已知的。在实际情况下, 电力公司通常很难获得真实合理的用户信息, 从而会影响优化调度结果的有效性。对于这类问题, 一方面可采用机制设计理论, 通过设计激励性合同来合理引导用户披露真实信息^[11-12]。另一方面, 可引入竞争机制, 建立一个可中断负荷竞争市场, 通过

投标竞价可在一定程度上缓解可中断用户虚报信息带来的不理想结果, 当然, 当参与竞争的可中断用户数量不够多时, 也会存在用户的策略性报价问题和市场力问题。如何解决这些问题, 还需要下一步深入研究。

参考文献

- [1] Tuan L A, Bhattacharya K. Competitive framework for procurement of interruptible load services[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (2): 889-897.
- [2] Huang K Y. Demand subscription services—an iterative dynamic programming for the substation suffering from capacity shortage[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (2): 947-953.
- [3] Huang K Y, Chin H C, Huang Y C. A model reference adaptive control strategy for interruptible load management[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19 (1): 683-689.
- [4] 王建学, 王锡凡, 王秀丽. 电力市场可中断负荷合同模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 11-16. WANG Jian-xue, WANG Xi-fan, WANG Xiu-li. Study on model of interruptible load contract in power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (9): 11-16.
- [5] Kennedy J, Eberhart R. A discrete binary version of the particle swarm optimization[C]. //Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 1997: 4104-4108.
- [6] Galing Zwe-lee. Discrete particle swarm optimization algorithm for unit commitment[C]. //Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto (Canada): 2003: 418-424.
- [7] 刘涌, 候志俭, 蒋传文. 求解机组组合问题的改进离散粒子群算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (4): 35-39. LIU Yong, HOU Zhi-jian, JIANG Chuan-wen. Unit commitment via an enhanced binary particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (4): 35-39.
- [8] Kazarlis S A, Bakirtzis A G, Petridis V. A genetic algorithm solution to the unit commitment problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (1): 83-92.
- [9] 王建学, 王锡凡, 张显, 等. 电力市场和过渡期电力系统可中断负荷管理—可中断负荷运营[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (6): 1-5. WANG Jian-xue, WANG Xi-fan, ZHANG Xian, et al. Interruptible load management in power market and interim system—operation of interruptible load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (6): 1-5.
- [10] Coello C A. Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(11-12): 1245-1287.
- [11] 张少华, 方勇, 李渝曾. 电力市场中的激励机制设计[J]. 电网技术, 2003, 27 (1): 52-56. ZHANG Shao-hua, FANG Yong, LI Yu-zeng. Incentive mechanism design in electricity markets[J]. Power Systems Technology, 2003, 27 (1): 52-56.
- [12] 方勇, 张少华, 李渝曾. 一种激励相容的电力市场可中断负荷管理合同模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (14): 23-26. FANG Yong, ZHANG Shao-hua, LI Yu-zeng. An incentive compatible contract for interruptible load management in electricity markets[J]. Automation of Electrical Power Systems, 2003, 27 (14): 23-26.

收稿日期: 2009-12-15; 修回日期: 2010-05-30

作者简介:

刘畅 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析和智能计算; E-mail: liuchang1101@163.com

张少华 (1966-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力市场风险管理、博弈分析等研究。E-mail: eeshzhan@126.com