

# 基于二进制粒子群算法的可中断负荷优化调度

王倩倩 赵彩虹 马成飞 李 振

(南京师范大学 电气与自动化工程学院 江苏 南京 210042)

**[摘要]** 可中断负荷是非常重要的需求侧资源. 本文对于在保证系统安全的前提下进行可中断负荷的优化调度, 基于二进制粒子群优化算法(BPSO)分时段优化调度特性不同的多个可中断负荷, 以满足系统各时段削减容量的需求, 同时满足可中断负荷的运行约束条件, 并使供电公司支付的补偿费用最小以及执行中断的次数最少. 使用加权的处理方法把可中断负荷优化调度的多目标优化问题简化为单一的目标函数. 经实例验证基于 BPSO 的优化算法对可中断负荷的优化调度是有效的.

**[关键词]** 可中断负荷 二进制粒子群算法(BPSO) 优化调度 需求侧管理

**[中图分类号]** TN76 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2011)02-0019-07

## Scheduling of Interruptible Load Based on Binary Particle Swarm Optimization

Wang Qianqian Zhao Caihong Ma Chengfei Li Zhen

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Interruptible Loads (ILs) represent highly valuable demand side resources. With regards to the scheduling of interruptible loads, this paper investigates the use of binary particle swarm optimization (BPSO) to schedule a number of ILs whose operational characteristics are different over 16 hours. The scheduling objective is to achieve the requirement of hourly curtailments while satisfying the operational constraints of the interruptible loads, minimizing the payments and the frequency of interruptions. This multi-objective optimization problem was simplified to a single objective function by weight. Simulation results are presented to validate the method.

**Key words:** interruptible load, binary particle swarm optimization (BPSO), optimization scheduling, demand side management

需求侧管理(Demand Side Management, DSM)是指在行政或者激励措施下,通过提高终端用户的用电效率、优化用电方式,引导用户长期或短期改变用电模式,进而达到节约能源、优化资源配置和保证电网安全的用电管理活动.可中断负荷(Interruptible Load, IL)是一种重要的需求侧资源,是根据供需双方事先签订的合同,在电量需求高峰时段由 IL 实施机构向用户发出请求申请,经用户响应后中断部分负荷的一种负荷管理方式<sup>[1]</sup>.IL 一般适用于大型工业和商业用户,特别是那些可以放宽供电可靠性要求的塑性负荷,这些用户有的安装了分布式电源,有的是短时停电对其供电服务质量影响不大.IL 也适用于居民或小型的商业用户,这些用户可以通过改变自己的用电方式,以竞价的形式主动参与市场竞争并获得相应的经济利益,不再单纯是调度和价格的接受者.IL 作为一种可以快速并积极响应的负荷管理措施,既可以提高需求侧对电网调度的响应,又可以成为调节经济和供求矛盾的杠杆,是迅速解决供求矛盾的有效工具.它不但可以保证电网安全经济运行,同时,由于在电力市场中导入竞争机制,它又可以保证电力价格的稳定性,推动电力市场更趋于公平.文献[2]综合考虑发电机出力 and 裁减负荷两种调节方式,提出了一种计及电压水平的可中断负荷参与阻塞管理的多目标模型,有利于系统电压水平的提高.本文主要针对可中断负荷作为需求侧资源进行优化调度,来维持系统的安全可靠或者提高市场的运行效率.

可中断负荷调度问题是个离散的非凸函数的优化问题.对于此类问题,文献[3]从最优潮流的角度分析、计算可中断调度并考虑中断电价.文献[4]在电力市场环境下使用拉格朗日松弛算法优化电能以及可

收稿日期: 2011-01-23.

通讯联系人: 赵彩虹,教授,研究方向: 电力系统自动化及无功优化电力市场. E-mail: zhaocaihong@njnu.edu.cn

中断负荷. 文献 [5] 使用混合整数线性规划来解决经济调度. 文献 [6] 则使用一个两层优化模型, 外层使用迭代动态规划来产生离线规划, 里层使用试探式推理规则来进行在线调度. 文献 [7] 使用基于优先级的启发式方法来确定调度计划. 文献 [8] 的模型使用的是模糊动态规划和基于优先级的启发式推理方法. 文献 [9] 提出了一种与高峰有功调度相结合的购买可中断负荷的优化模型, 采用排队法, 达到系统网损最小. 本文使用二进制粒子群优化算法, 用加权处理方法把可中断负荷优化调度的多目标优化问题简化为单一的目标函数, 经实例验证该方法有效、可行.

# 1 二进制粒子群算法

粒子群( Particle Swarm Optimization , PSO) 算法最早是在 1995 年由 Eberhart 和 Kennedy 共同提出的, 该算法模拟鸟群、鱼群、蜂群等动物群体觅食的行为, 通过个体之间的相互协作使群体达到最优的目的. 此算法基于群体迭代, 群体在解空间中追随最优粒子进行搜索. 在粒子群算法中, 每个个体称为“粒子”, 其实每个粒子代表着一个潜在的解<sup>[10]</sup>.

PSO 初始状态为一群粒子随机分布在解空间内, 然后通过迭代找到最优解. 在每一次迭代中, 粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己, 与此同时也实现粒子间的信息交换. 一个是粒子本身找到的最优解, 称为个体极值  $P_{best}$ ; 另一个是整个群体目前找到的最优解, 称为全局极值  $G_{best}$ . 粒子的速度  $V(v_1, v_2, \dots, v_n)$  和位置  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  决定了粒子的运动情况, 用适应度函数来表示, 即

$$Fitness(P) = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

在每次迭代中, 粒子根据式 (2)、(3) 更新速度和位置:

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 \cdot rand() \cdot (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 \cdot rand() \cdot (p_{gd}^t - x_{id}^t), \quad (2)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1}. \quad (3)$$

其中  $t$  为迭代次数,  $rand()$  为  $[0, 1]$  之间的随机数, 这两个参数用以保持群体的多样性.  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子, 它们使粒子具有自我总结和向群体中优秀个体学习的能力, 从而向自己的历史最优点以及向群体内历史最优点靠近. 粒子群初始位置和速度随机产生, 然后按式 (2)、(3) 进行迭代, 直至满足收敛条件或者到达最大迭代次数停止, 算法流程如图 1 所示.

由于基本粒子群优化算法主要针对连续函数进行搜索运算, 但许多实际工程问题描述为离散的组合优化问题, 为此 Kennedy 和 Eberhart 于 1997 年提出了一种二进制离散粒子群优化算法( BPSO)<sup>[11]</sup>. 在 BPSO 中,  $x_i$  为 0 或 1, 且是由其相应的速度  $v_i$  决定的.  $v_i$  仍然由式 (2) 计算得到, 但必须在  $[v_{min}, v_{max}]$  范围内. 使用神经网络中常用的一种模糊函数 Sigmoid 函数求参数  $s$  进行离散化, 其表达式为:

$$s(v_i^k) = Sigmoid(v_i^k) = \frac{1}{1 + \exp(-v_i^k)}. \quad (4)$$

粒子位置的更新公式修改为:

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} 1, & rand() < s(v_i^{t+1}), \\ 0, & \text{其他}. \end{cases} \quad (5)$$

离散形式的粒子群优化算法的优越性体现在寻优方法的有效性上, 既能提高粒子在搜索空间探索新领域的的能力, 又能保证粒子在某一小的区域里进行彻底搜索的能力, 即有效结合全局寻优和局部寻优能力, 因此速度快, 尤其当问题的维数增加时.

BPSO 可用于解决离散值变量的优化问题, 比如发电机的状态( 在线或者离线)、设备的选址等. 它已被有效应用于网络重构、配电网中发电机和变压器的装设、输电网中测量设备的安装、发电机调度、机组组合等问题. 因此实数编码的 PSO 可以用于解决经济调度问题.

# 2 可中断负荷调度的优化模型

可中断负荷的调度形式和发电机的调度类似, 但比发电机的调度更为复杂. 除了需要用户指明其中断

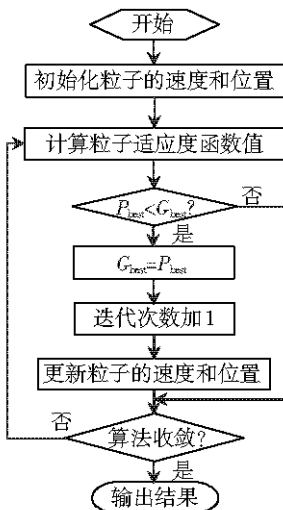


图 1 粒子群算法流程图

Fig.1 Algorithm flow chart of PSO

容量和中断价格外,调度机构必须考虑网络的约束条件以及可中断负荷的可靠性。比如说,有些用户愿意连续中断,而有些用户更愿意间断性的中断负荷,也就是中断后必须在线一定时间才能再次中断;有些用户在某段时间内不允许中断,而有些用户必须连网保持最短的持续时间后才允许再次中断。显然,这个复杂问题是个离散的非凸函数的优化问题。对于此类问题,可以使用粒子群优化算法进行优化调度。

本文使用 BPSO 进行可中断负荷调度,每个粒子  $Sch$  是  $19 \times 16$  的矩阵,行、列分别对应于可中断负荷的编号、时段。如果负荷  $n$  在时段  $t$  内参加中断,则  $Sch(n, t) = 1$ , 否则  $Sch(n, t) = 0$ 。每次迭代的速度是:

$$V(n, t)^{(k+1)} = V(n, t)^{(k)} + \phi \cdot \text{rand}() \cdot (Sch_p(n, t) - Sch(n, t)^{(k)}) + \phi \cdot \text{rand}() \cdot (Sch_g(n, t) - Sch(n, t)^{(k)}) \quad (6)$$

将速度利用 Sigmoid 函数转换成概率,再通过与  $[0, 1]$  之间的随机数比较进行离散化。仿真的初始状态是所有粒子随机分布在解空间,并且满足二项分布  $0, 1$  值的概率分布为  $50\%$  和  $50\%$ 。

调度问题实际上是一个有约束的多目标优化问题,它是在考虑各种安全约束的条件下,达到经济效益最优。本文的目标是中断调度的成本最小且执行次数最少,并应满足每小时所需的中断容量和负荷特性的约束条件(即每个负荷的实际中断时间小于最长停电时间,每个负荷的实际持续在线时间大于最短持续供电时间)。因此目标函数是:

$$\text{Fitness}(P) = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N Sch(n, t) \cdot P_n \cdot \lambda_n + (C_{\text{int}} \cdot 2^0 \cdot FI_2 + C_{\text{int}} \cdot 2^1 \cdot FI_3 + \dots + C_{\text{int}} \cdot 2^{\beta-2} \cdot FI_{\beta}) \quad (7)$$

$$\text{约束条件为: } \sum_{n=1}^N Sch(n, j) \cdot P_n \geq \text{Req}(j), N\_OFF(i) \leq \max\_OFF(i), N\_ON(i) \geq \min\_ON(i).$$

式中  $Sch(n, t)$  表示第  $n$  个可中断负荷在  $t$  时间段内的状态;  $P_n$  为第  $n$  个负荷的容量;  $\lambda_n$  为第  $n$  个负荷单位中断容量的费用;  $C_{\text{int}}$  表示再次中断补偿的权重,设置为  $1000$ ;  $FI_i$  为中断次数大于  $i$  的负荷数量;  $\beta$  为最大中断次数;  $\text{Req}(j)$  表示第  $j$  时间段所需的中断容量;  $\max\_OFF(i)$  为第  $i$  个负荷最长停电时间;  $\min\_ON(i)$  为第  $i$  个负荷最短持续供电时间;  $N\_OFF(i)$  为第  $i$  个负荷实际中断时间;  $N\_ON(i)$  为第  $i$  个负荷实际持续在线时间。

结合两个目标和两类约束条件,把有约束的优化问题转换成无约束的优化问题,形成一个单目标函数,即将负荷费用、中断次数费用、中断不足罚金和违反约束罚金之和构成一个单一的目标函数。

$$\text{Fitness}(P) = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N Sch(n, t) \cdot P_n \cdot \lambda_n + (C_{\text{int}} \cdot 2^0 \cdot FI_2 + C_{\text{int}} \cdot 2^1 \cdot FI_3 + \dots + C_{\text{int}} \cdot 2^{\beta-2} \cdot FI_{\beta}) + P_{\text{ev}} \cdot V + P_{\text{euc}} \cdot UC \quad (8)$$

式中  $P_{\text{ev}}$  为违反负荷约束的单位次数的惩罚权重,  $P_{\text{euc}}$  为单位时间中断容量不足的惩罚权重,  $V$  为违反负荷约束的次数,  $UC$  为中断不足的小时数。

总费用等于各个负荷中断容量与相应中断费用乘积之和,通过规定惩罚措施可以减少中断次数。当已参加过中断的负荷再次中断时,就会产生经济惩罚,罚金  $C_{\text{int}}$  也会随着中断次数的增加而加倍,用这样的约束可以最小化中断次数。

为保持系统的稳定性,应避免中断不足的情况,因此在适应度函数中增加相应的惩罚项  $P_{\text{euc}}$  来约束每次中断时间内中断容量不足的情况,另外考虑到用户负荷的特性约束还需增加惩罚项  $P_{\text{ev}}$  来保证遵守负荷约束条件。显然,对中断不足的惩罚力度应该大于对负荷违反约束的惩罚力度,这也是在确保系统安全稳定的前提下提高经济效益的手段,因此设  $P_{\text{euc}}$  大于  $P_{\text{ev}}$ 。

### 3 算例分析

本文使用 BPSO 来解决可中断负荷调度的问题。此问题文献 [8] 使用的是模糊动态规划 (FDP),目标是在满足每小时所需中断容量以及可中断负荷运行要求的情况下,使中断的费用最小。本文使用相同的中断容量需求和可中断负荷数

表 1 每小时所需的最小中断容量

Table 1 Minimum required curtailments

$t$	所需中断容量 /kW	$t$	所需中断容量 /kW
1	881	9	683
2	0	10	878
3	179	11	500
4	1290	12	629
5	659	13	382
6	878	14	189
7	786	15	425
8	854	16	1166

据. 表 1 给出了系统每小时所需的最小中断容量. 在电量供不应求情况下以保证系统稳定性为前提, 以满足每小时所需的中断容量为目标产生日前调度计划, 使总中断费用最小, 并且负荷执行中断的次数最少. 因为频繁中断会对电网造成冲击, 通过减少中断次数, 可以提高电网的稳定性.

本文使用表 2 的可中断负荷来满足表 1 所列各时段所需中断容量. 表 2 列出了可中断负荷的数据特性, 包括可中断容量、中断费用、最大中断时间以及相邻两次中断间最短的在线时间. 文献 [8] 把最后两列作为最优的在线时间和离线时间, 本文将其作为约束界限.

通过灵敏度分析确定仿真参数  $V_{\max}$ 、 $\varphi$  的值  $V_{\max} = 5.0$ 、 $\varphi = 7.5$  并设  $P_{\text{euc}} = 10^7$ 、 $P_{\text{ev}} = 10^6$ . 种群的粒子个数为 250 个, 迭代次数为 500 次. 运行 5 次仿真模型, 总的运行时间是 890 s, 相当于每次仿真的时间大约为 178 s.

表 3 显示了运用 BPSO 算法产生最优调度的详细结果, 表 4 是对其结果的总结.

BPSO 是一种仿生的算法, 优点是运行过程简单, 也易结合复杂性高的目标函数和约束条件, 且通过约束条件中惩罚函数的权重设置来满足不同需要. 对于一些复杂的优化问题可以忽略某些非硬性约束来达到解决主要问题的目的.

对优化结果进行比较如表 5 所示, 未优化的情况是指不考虑两个约束条件下的调度结果, 可见 BPSO 优化方法产生的实际中断容量和每小时所需的中断容量接近, 因此 BPSO 方法可行. 且超额中断总量比 FDP 方法少, 可见 BPSO 优于 FDP 方法.

表 3 基于 BPSO 优化的可中断负荷调度

Table 3 Curtailment schedule with BPSO

可中断负荷		时段															
编号	容量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	320	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	200	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
3	80	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	84	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
5	100	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1
6	160	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	100	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1
8	60	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1
9	200	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
10	40	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
11	40	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
12	72	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
13	140	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
14	80	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1
15	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
16	180	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
17	180	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
18	160	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
19	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
实际中断容量		900	000	200	1 320	672	884	792	860	700	880	540	640	404	200	432	1 176
所需中断容量		881	0	179	1 291	659	878	786	854	683	878	500	629	382	189	425	1 166
剩余中断容量		19	0	21	9	13	6	6	6	17	2	40	11	22	11	7	10

本文的可中断负荷优化调度是长时间( 16 h)、多负荷( 19 个) 的优化问题, 因此解空间由  $2^{16 \times 19}$ , 即  $3.26 \times 10^{91}$  个值组成, 250 个粒子在此空间进行搜索. 其中大多数粒子没有很好的适应度值, 如果在解空间随机地搜索可能造成调度容量不足、违反负荷约束条件或者频繁中断等现象. 迭代 500 次保证粒子的最大搜索次数是 125 000 次. 随着迭代次数增加该适应度函数值的变化规律如图 2 所示.

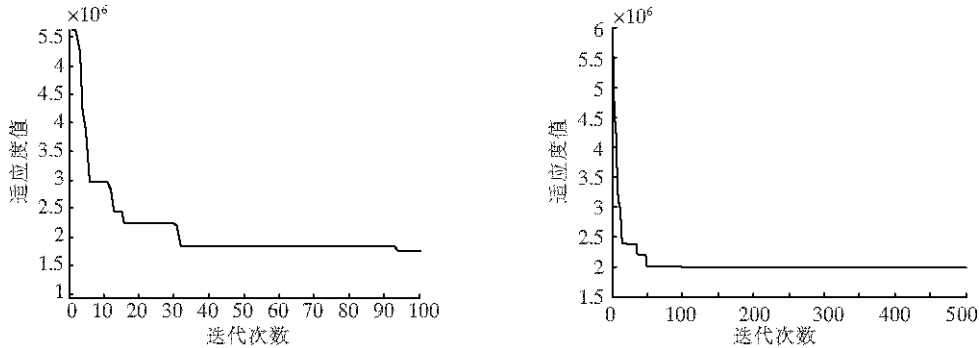


图 2 随着迭代次数的递增适应度函数值的变化

Fig.2 The improvement of fitness with increasing iterations

表 5 优化前后的比较

Table 5 Result using FDP and BPSO

时间/h	每小时所需的 中断容量/kW	未优化/kW		FDP/kW		BPSO/kW	
		实际中断量	超额中断量	实际中断量	超额中断量	实际中断量	超额中断量
1	900	1 040	114	900	0	900	0
2	0	956	956	0	0	0	0
3	200	1 376	1 176	200	0	200	0
4	1 300	1 404	104	1 300	0	1 320	20
5	670	992	322	678	8	672	2
6	880	1 112	232	890	10	884	4
7	790	680	- 110	794	4	792	2
8	860	1 036	276	860	0	860	0
9	700	1 052	352	704	4	700	0
10	880	952	72	1 007	27	880	0
11	540	932	392	549	9	540	0
12	640	1 576	936	641	1	640	0
13	400	752	352	400	0	404	4
14	200	812	612	200	0	200	0
15	430	320	- 110	430	0	432	2
16	1 170	984	- 186	1 170	0	1 176	6

除了解空间的范围大之外, 适应度函数是非凸函数. 适应度函数的复杂性表明解空间中相邻两点的适应度值可能会有很大差异. 一个粒子的函数值的变化可能导致超出负荷约束条件或中断容量不足等严重情况发生. 因此, 除粒子的初始状态在最优位置或者迭代过程中刚好搜索到最优解之外, 250 个粒子很难找到绝对最优解. 然而, 如果算法得到的近似最优解和绝对最优值之间的误差不大, 就可以将其作为问题的解. 而且, 这样比在更大范围寻找绝对最优值节约时间和成本.

图 3 对每小时所需中断容量和 BPSO 算法得到的最优中断容量进行了比较, 可见实际中断容量接近但稍大于于所

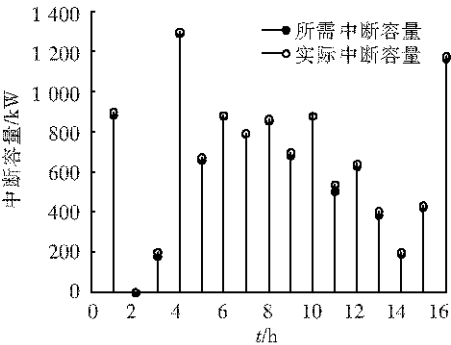


图 3 BPSO 产生的结果

Fig.3 Results for curtailment using BPSO

需的中断容量. 可以验证 ,BPSO 得到的调度结果并不是绝对的最优调度 ,例如 ,在第 3 小时负荷 3 不中断 ,负荷 15 中断获得经济效益更好. 但是 ,下面几点内容可以证明此次调度的适应度接近最优值:

- (1) 满足每小时所需的中断容量;
- (2) 满足所有负荷的约束条件;
- (3) 中断的剩余容量小于最小可中断负荷容量;
- (4) 所有负荷最多中断两次 ,这样可以减少多次中断的费用;
- (5) 所有负荷最少中断一次 ,保证中断调度均匀分布在每个负荷上.

在竞争的电力市场中 ,参与者希望在一个透明、公正的环境中进行决策. 而实际上 ,调度问题很难找到一个绝对最优方案 ,只能得到几个相对最优解 ,参与者根据这些结果会有不同的决策. PSO 的有效性体现在其粒子的动态性 ,防止陷入局部最优解 ,能够解决包括公平约束在内的复杂的目标函数 ,可应用于具有竞争性的电力市场. 虽然本算法只能得到近似最优解 ,但是仍可以多次运行该模型或者多次迭代来选择相对最优的调度结果. 表 6 对迭代 500 次和迭代 50 000 次的结果进行比较.

表 7 列出了在有、无中断次数约束这两种情况下的优化结果. 可见两个目标有所不同 ,因为最小化中断次数可导致费用的增加. 从表 7 可知 ,对于某些负荷来说 ,有约束比无约束的中断次数反而增多 ,这是因为公式(6)的目标是使整个系统的中断费用最小 ,而不是使个别负荷得到的经济补偿最大. 因此可以使某些负荷多次中断来代替另外一些负荷的中断 ,来达到系统总的中断次数最少、中断费用最小.

4 结论

使用粒子群算法的二进制形式进行可中断负荷的有效调度 ,在满足每小时所需中断容量的前提下尽量降低中断费用. 经实例仿真证明了该算法的有效性. BPSO 方法可以用来解决多目标的优化问题 ,即在满足几个约束条件的情况下最小化两个目标函数 ,同时通过引入相应的惩罚项 ,把约束条件结合到目标函数中 ,形成一个单一的目标函数来简化问题. 经 BPSO 算法得到的可中断负荷调度结果接近最优解 ,能满足日前市场调度的需要.

表 6 迭代 500 次和迭代 50 000 次结果比较  
Table 6 Comparison between iterating 500 and 50 000

项目	适应度函数	
	迭代 50 000 次	迭代 500 次
平均值	937 757. 42	937 797. 41
标准偏差	73 618. 29	73 658. 29
变异系数 /%	7. 85	7. 84
最小值	927 139. 60	927 439. 60
最大值	5 633 144. 40	5 951 289. 60
仿真时间	18 032. 19	178. 32

表 7 中断次数约束的效果  
Table 7 Comparison between constraints and non-constraint

负荷编号	中断次数		变化量
	无中断次数约束	有中断次数约束	
1	4	4	0
2	9	7	-2
3	7	3	-4
4	6	3	-3
5	4	6	2
6	7	4	-3
7	8	7	-1
8	7	7	0
9	10	4	-6
10	4	6	2
11	9	6	-3
12	5	4	-1
13	7	5	-2
14	3	6	3
15	4	1	-3
16	6	3	-3
17	4	5	1
18	8	4	-4
19	7	2	-5
总计	119	87	-32

[参考文献 ](References)

[1] 薛禹胜 ,罗运虎 ,李碧君 ,等. 关于可中断负荷参与系统备用的评述[J]. 电力系统自动化 ,2007 ,31( 10) :1-6.  
Xue Yusheng , Luo Yunhu , Li Bijun , et al. A review of interruptible load participating in system reserve [J]. Automation of Electric Power Systems , 2007 , 31( 10) : 1-6. ( in Chinese)

[2] 何禹清 ,彭建春 ,毛丽林. 计及电压水平的多目标可中断负荷阻塞管理[J]. 电网技术 ,2010 ,34( 1) :122-128.  
He Yuqing , Peng Jianchun , Mao Lilin. A multi-objective congestion management method participating with interruptible load and taking account of voltage level [J]. Power System Technology , 2010 , 34( 1) : 122-128. ( in Chinese)

[3] Majumdar S , Chattopadhyay D , Parikh J. Interruptible load management using optimal power flow analysis [J]. IEEE Trans Power Syst , 1996 , 11( 2) : 715-720.

- [4] Bai J , Gooi H B , Xia L M , et al. A probabilistic reserve market incorporating interruptible load [J]. IEEE Trans Power Syst , 2006 21( 3) : 1079-1087.
- [5] Xia L M , Gooi H B , Bai J. Probabilistic spinning reserves with interruptible loads [C]// Proc IEEE Power Eng Soc General Meeting. USA: Denver , 2004: 146-152.
- [6] Huang K Y. Demand subscription services—An iterative dynamic programming for the substation suffering from capacity shortage [J]. IEEE Trans Power Syst , 2003 ,18( 2) : 947-953.
- [7] Wang Jianxue , Wang Xifan , Ding Xiaoying. The forward contract model of interruptible load in power market [C]// IEEE PES Transmission and Distribution Conference. China: Dalian , 2005.
- [8] Huang K Y , Chin H C , Huang Y C. A model reference adaptive control strategy for interruptible load management [J]. IEEE Trans Power Syst , 2004 ,19( 1) : 683-689.
- [9] 于娜,芙蓉薇. 电力市场高峰时段可中断负荷优化购买模型 [J]. 电力系统及其自动化学报 , 2010 22( 4) : 89-93.  
Yu Na , Fu Rongwei. Optimization model of interruptible load dispatch during the peak load time period in the eariler power market [J]. Proceeding of the CSU-EPSA , 2010 22( 4) : 89-93. ( in Chinese)
- [10] Kennedy J , Eberhart R. Particle swarm optimization [C]// Proc of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Australia: IEEE Service Center , 1995: 1 942-1 948.
- [11] Kennedy J , Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm [C]// Proc of International Conference on System , Man and Cybernetic. Orlando: IEEE Press , 1997: 4 104-4 108.

[责任编辑: 严海琳]