

计及环境约束的机组组合二层规划方案研究

蒲 实, 刘俊勇, 陈 焯, 刘友波, 魏震波, 路志刚

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:就节能减排下的机组组合问题,通过一价格惩罚因子将传统的双目标优化问题转化为环境约束下的单目标优化问题,提出了求解该问题的二层规划方法。该方法基于二进制编码,通过一种改进蚁群算法选取上层机组的最优启停,并用二次规划处理下层负荷的优化分配。最后,通过 6 机系统在 24 小时内的算例仿真验证了该方案的可行性及有效性。

关键词:机组组合;环境约束;蚁群算法;二层规划

Abstract The common bi-objective model of the unit commitment problem considering both economic load dispatching and economic emission dispatching can be converted to a single objective optimization by adding a price penalty factor. A bilevel programming method is proposed to solve this environmental constrained problem. Based on a binary coding technique, the upper level optimization of unit status is handled by an improved ant colony algorithm, while the lower level optimization of load dispatching is handled by quadratic programming. Finally, the simulation results of 6-unit system with a scheduling time horizon of 24 hours demonstrate the feasibility and the effectiveness of the proposed method in solving the environmental constrained unit commitment problem.

Key words: unit commitment; environmental constraint; ant colony optimization; bilevel programming

中图分类号: TM284 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0019-05

在电网供需平衡的变化过程中,常常需要起停机组以达到系统经济运行的要求。传统的机组组合问题就是在得知负荷预测值的情况下确定机组的最优组合方式,以实现整个系统费用的最小化。然而,随着环保问题重要性的日益提高,机组组合中应该增加考虑排污量约束。也就是将发电排污所产生的社会治污成本作为机组组合的第二个目标函数。目前,可以用于多目标优化问题的算法主要包括直接进行多目标求解以及将多目标通过加权转换为单目标求解两大类。对于考虑环境约束的双目标机组组合问题,文献 [1] 采用遗传算法直接得到 Pareto 解集,同时考虑到最后能用到实际系统中的只能是一个最优解,该文献还使用 Min-max 方法、边际收益方法以及加权平均法,从 Pareto 解集中选择一个最优解作为最终结果;而文献 [2] 则使用了一个相对更为实用的双目标加权的方法得到一个单目标优化问题,然后使用混沌遗传算法求解。比较而言,前者虽能得到 Pareto 解集,但其实用性不强,因此,下面将使用双目标加权转换为单目标优化的方法来进行机组组合优化。

由于单目标的机组组合优化问题是一个复杂的非线性混合整数规划问题,很难找出理论上的最优

解,因此国内外很多学者一直在积极研究求解该问题的算法。机组组合通常被视为一个二层规划问题:上层处理机组的起停状态,下层处理机组的出力分配。由于机组出力算法的优劣对机组组合整体求解效果影响较小,目前的研究主要集中在上层问题的求解。当前用于机组组合优化的算法主要有优先表法^[3]、动态规划法^[4,5]、拉格朗日松弛法^[6~8]等确定性方法,以及遗传算法^[9~11]、粒子群算法^[12~14]、免疫算法^[15]、蚁群算法^[16,17]等随机启发式算法。从求解速度上来看,文献 [3~8] 所提出的各种算法能够很快地求解大规模的机组组合问题,但这类算法求得的通常都是初始解附近的某个局部最优解。文献 [9~17] 所提出的各种随机启发式算法则能很好地避免陷入局部最优的问题,虽然这类算法仍不能确保得到真正的全局最优解,但这类算法跳出局部最优的能力能让它们求得远优于传统的确定性算法的解。在这些随机算法中,蚁群算法为近期研究较多的算法之一。已有的研究表明,该算法能较好地求解组合优化问题,为此,这里将使用蚁群算法对加权之后得到的单目标优化问题进行求解。为提高算法性能,还将针对机组组合问题对蚁群算法进行改进,并通过算例仿真来验证本算法的有效性。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (973 项目) (2004CB217905)

1 数学模型

1.1 目标函数

考虑经济性的目标函数:

$$\min C = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [U_{i,t} C_{i,t}(P_{i,t}) + C_{STi,t} + C_{SDi,t}] \quad (1)$$

考虑环保性的目标函数:

$$\min E = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N U_{i,t} E_{i,t}(P_{i,t}) \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, T 为计划周期内的总时段数; N 为机组台数; $U_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的状态, 0表示关机, 1表示开机; $P_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的出力; $C_{i,t}(P_{i,t})$ 和 $E_{i,t}(P_{i,t})$ 分别为机组 i 在时段 t 的运行费用和对应的排污量, $C_{STi,t}$ 和 $C_{SDi,t}$ 分别为机组 i 在时段 t 的启机费用和停机费用, 它们的表达式如下:

$$C_{i,t}(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (3)$$

$$C_{STi,t} = \begin{cases} U_{i,t}(1-U_{i,t-1})C_{STi,cool}, T_{i,t-1}^{off} \geq T_{STi,cool} \\ U_{i,t}(1-U_{i,t-1})C_{STi,hot}, T_{i,t-1}^{off} < T_{STi,cool} \end{cases} \quad (4)$$

$$C_{SDi,t} = U_{i,t-1}(1-U_{i,t})C_{SDi} \quad (5)$$

$$E_{i,t}(P_{i,t}) = \alpha_i P_{i,t}^2 + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i \quad (6)$$

其中, 运行费用和排污量均用机组出力的二次函数模拟, a_i, b_i, c_i 为机组 i 的运行费用参数, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 为机组 i 的排污系数; $C_{STi,cool}$ 和 $C_{STi,hot}$ 分别为机组 i 的冷启动费用和热启动费用; $T_{i,t-1}^{off}$ 为机组 i 在时段 $t-1$ 的已停机时间; $T_{STi,cool}$ 为机组 i 的冷启动时间; C_{SDi} 为机组 i 的固定停机费用。

现引入发电排污的价格惩罚因子 λ (\$/lb), 可得到综合考虑经济性和环保性的目标函数:

$$\min F = C + \lambda E \quad (7)$$

即:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [U_{i,t} F_{i,t}(P_{i,t}) + C_{STi,t} + C_{SDi,t}] \quad (8)$$

这里,

$$F_{i,t}(P_{i,t}) = \mu_i P_{i,t}^2 + \nu_i P_{i,t} + \omega_i \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} \mu_i = a_i + \lambda \alpha_i \\ \nu_i = b_i + \lambda \beta_i \\ \omega_i = c_i + \lambda \gamma_i \end{cases} \quad (10)$$

1.2 约束条件

1) 负荷平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} = P_{D,t} \quad (11)$$

其中, $P_{D,t}$ 为第 t 个时段的负荷需求。这里, 假定有功网损固定, 且已计入负荷。

2) 机组出力上下限约束

$$U_{i,t} P_{i,min} \leq P_{i,t} \leq U_{i,t} P_{i,max} \quad (12)$$

其中, $P_{i,min}$ 和 $P_{i,max}$ 分别为机组 i 的最小出力和最大出力。

3) 旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^N U_{i,t} P_{i,max} \geq P_{D,t} + P_{R,t} \quad (13)$$

其中, $P_{R,t}$ 为第 t 个时段的旋转备用容量。

4) 机组运行爬坡约束

$$\begin{cases} U_{i,t} P_{i,t} - U_{i,t-1} P_{i,t-1} \leq R_{U,i}, U_{i,t} = 1, U_{i,t-1} = 1 \\ U_{i,t-1} P_{i,t-1} - U_{i,t} P_{i,t} \leq R_{D,i} \end{cases} \quad (14)$$

其中, $R_{U,i}, R_{D,i}$ 分别为机组 i 在一个运行时段的最大升、降出力值。

5) 机组启停爬坡约束

$$\begin{cases} U_{i,t} P_{i,t} \leq (1 - U_{i,t-1}) R_{STi}, U_{i,t} = 1, U_{i,t-1} = 0 \\ U_{i,t} P_{i,t} \leq (1 - U_{i,t-1}) R_{SDi}, U_{i,t} = 1, U_{i,t-1} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中, R_{STi}, R_{SDi} 分别为机组 i 在启、停时段的最大升、降出力值。

6) 机组最小开、停机时间约束

$$\begin{cases} (T_{i,t-1}^{on} - T_{i,min}^{on})(U_{i,t-1} - U_{i,t}) \geq 0 \\ (T_{i,t-1}^{off} - T_{i,min}^{off})(U_{i,t} - U_{i,t-1}) \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

其中, $T_{i,min}^{on}$ 和 $T_{i,min}^{off}$ 分别为机组 i 的最小开机时间和最小停机时间; $T_{i,t-1}^{on}$ 和 $T_{i,t-1}^{off}$ 分别为机组 i 在时段 $t-1$ 的已开机时间和已停机时间, 它们的递推公式如下:

$$T_{i,t}^{on} = (T_{i,t-1}^{on} + 1)U_{i,t} \quad (17)$$

$$T_{i,t}^{off} = (T_{i,t-1}^{off} + 1)(1 - U_{i,t}) \quad (18)$$

2 算法介绍

机组组合问题可以转化为一个二层规划问题, 这里采用蚁群算法优化上层机组的启停状态, 同时用二次规划处理下层负荷的优化分配。

这里采用二进制的编码方法^[18], 即用 0 和 1 表示机组的启停状态, 对 N 台机组、 T 个时段的总共 $2 \times N \times T$ 个状态进行编码, 然后用 m 只蚂蚁挨个依次对编码后的二元状态网络进行遍历, 其过程可用图 1 表示。该过程等同于蚁群每前进一步就选择一个二进制数字并以此来生成一个二进制串的过程。这样,

就可以在文献 [19] 提出的用于连续函数优化的蚁群算法的基础上加以改进后再用于模型的求解。改进后算法的各部分介绍如下。

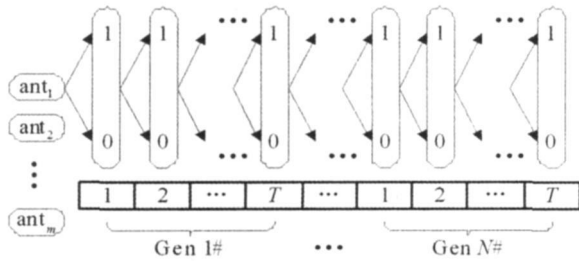


图 1 蚁群遍历机组启停状态的随机二元网络

(1) 信息素存储方式及其初始化。为简化文献 [19] 的算法, 将信息素记录在图 1 所示的每个节点上, 而不是像以往的算法将信息素放在节点之间的连接上。这里还采用了一种带有偏好的信息素初始化方法, 即若将代表关机的节点上的信息素初始化为用户指定的参数 τ_0 , 则可将代表开机的节点上的信息素初始化为 τ_0 的 n 倍, 这样初始化信息素可以让蚁群算法在第一次迭代中尽可能提高获取可行解的比例, 从而提高算法效率。

(2) 转移规则。在蚁群算法执行过程中, 蚂蚁需要不断地根据转移规则选择下一步应该到达的节点。当所有蚂蚁都按照转移规则为每一个时段的每一台机组选择了相应的启停状态, 蚂蚁的一代群体就建立好了。蚂蚁在某次迭代中第 k 次选择启停状态时, 被选中的状态为:

$$S_k = \begin{cases} j = \operatorname{argmax}[\tau_k(j)], & q \leq q_0 \\ 0, 1 \\ \tau_{k(i)=0} & \\ S_{k(\text{rand})}, & q > q_0 \end{cases} \quad (19)$$

其中, $\tau_k(j)$ 表示第 k 次选择的第 j 个待选状态上面残留的信息量; argmax 是一个函数, 它返回使得 $\tau_k(j)$ 最大的 j 的取值; $\operatorname{tabu}(i)$ 为禁忌表的第 i 项, 它反映第 i 台机组的最小启、停机时间限制, 用来记录当前蚂蚁在第 k 次选择时对应的机组 i 还需要多少时段才能改变其状态, 这里, i 和 k 的对应关系为:

$$i = \lceil (k-1) / T_j \rceil + 1 \quad (20)$$

这样, 禁忌表项为 0 的机组就可以让蚂蚁选择一个机组启停状态, 而非 0 的机组则直接保持原状态不变, 该禁忌表需要在蚂蚁选择启停状态过程中动态更新; q_0 为 $[0, 1]$ 区间上的一个常数, 通常取值为 0.8; q 为 $[0, 1]$ 区间上的一个随机数, 在每次使用这个公式时都需要重新生成; $S_{k(\text{rand})}$ 表示根据下面的公式计算

每个编号被选中的概率, 并按此概率随机地生成 S_k 。

$$P_k(j) = \begin{cases} \frac{\tau_k(j)}{\tau_k(0) + \tau_k(1)}, & \operatorname{tabu}(i) = 0 \\ 0, & \operatorname{tabu}(i) \neq 0 \end{cases} \quad (21)$$

其中, $P_k(j)$ 表示蚂蚁第 k 次选择时第 j 号结点被选中的概率。

(3) 信息素更新。在蚂蚁选择一个节点之后, 使用如下的信息素局部更新规则:

$$\tau_k(j) \leftarrow (1 - \rho) \tau_k(j) + \rho \tau_0 \quad (22)$$

其中, ρ 为 $[0, 1]$ 区间上的参数。

而当所有蚂蚁完成选择并评价出最好的蚂蚁之后, 对当前全局最优蚂蚁路径上的信息素按照下式进行全局更新:

$$\tau_k(j) \leftarrow (1 - \alpha) \tau_k(j) + \alpha / f_{\text{best}} \quad (23)$$

其中, α 为 $[0, 1]$ 区间上的参数; f_{best} 为最优蚂蚁的适应值。

蚁群算法的执行过程就是在转移规则与信息素更新之间不断循环直至满足算法终止条件为止。算法终止条件可用最大迭代次数和最大停滞次数来设置。

在蚁群算法的执行过程中, 需要评价每只蚂蚁的优劣程度, 也即蚂蚁适应值的好坏, 由于目标函数的启停部分由上层的机组组合的解直接确定, 而运行部分仅为机组出力的二次函数, 所以该过程可通过使用二次规划的方法来针对每只蚂蚁所代表的机组启停状态进行负荷的最优分配来完成。对于不满足负荷平衡约束和旋转备用约束的机组组合, 可在其适应值函数上加上相应的惩罚项。

3 算例分析

为验证提出的机组组合数学模型及求解方法, 这里对 6 机系统在一天 24 个小时的运行情况进行优化。系统原始数据参见表 1、表 2 和表 3。各时段旋转备用容量取对应时段负荷需求的 7%。另, 蚁群算法中的蚂蚁数为 20, 迭代次数为 300, $\tau_0 = 5 \times 10^{-7}$, $n = 3$, $q_0 = 0.8$, $\rho = 0.2$, $\alpha = 0.2$ 。

表 4 列出了应用本方法在不同的价格惩罚因子下优化得到的发电费用和排污量。其中, λ 为 0 时, 即单独考虑发电费用的情况, 这时的总费用为 88 536 元, 总排放为 2 954 kg; λ 为 $+\infty$ (趋于无穷) 时, 即单独考虑环境排放的情况, 这时的总费用为 101 277

表 1 机组参数

i	1	2	3	4	5	6
$P_{i\max}/\text{MW}$	200	80	50	35	30	40
$P_{i\min}/\text{MW}$	50	20	15	10	10	12
R_{U_i}/MW	50	20	13	9	8	10
R_{D_i}/MW	50	20	13	9	8	10
$R_{S_{ti}}/\text{MW}$	105	45	30	20	20	25
$R_{S_{di}}/\text{MW}$	100	40	25	18	15	20
$a_i \times 10^3$	3.75	17.5	62.5	8.34	25.0	25.0
b_i	2.00	1.70	1.00	3.25	3.00	3.00
c_i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
α_i	0.0126	0.0200	0.0270	0.0291	0.0290	0.0271
$\beta_i \times 10^3$	-900.0	-100.0	-10.00	-5.000	-4.000	-5.500
γ_i	22.983	25.313	25.505	24.900	24.700	25.300
$C_{STi\text{ cool}}/\$$	176	187	113	267	180	113
$C_{STi\text{ hot}}/\$$	70	74	50	110	72	40
$C_{S_{di}}/\$$	50	60	30	85	52	30
$T_{STi\text{ cool}}/\text{Hr}$	2	1	1	1	1	1
$T_{i\min}^{\text{on}}/\text{Hr}$	1	2	1	1	2	1
$T_{i\min}^{\text{off}}/\text{Hr}$	1	2	1	2	1	1

表 2 时段负荷需求

t	P_{D_t}/MW	t	P_{D_t}/MW	t	P_{D_t}/MW
1	166.0	9	192.0	17	246.0
2	196.0	10	161.0	18	241.0
3	229.0	11	147.0	19	236.0
4	267.0	12	160.0	20	225.0
5	283.4	13	170.0	21	204.0
6	272.0	14	185.0	22	182.0
7	246.0	15	208.0	23	161.0
8	213.0	16	232.0	24	131.0

表 3 机组初始开停机状态

机组编号	1	2	3	4	5	6
已开机时间 /Hr	0	0	2	3	0	2
已停机时间 /Hr	1	3	0	0	2	0

元,总排放为 2 443 kg。可以看出,随着惩罚系数的增加,也即对发电排污惩罚力度的加大,其发电排污量按递减规律变化;相反地,发电费用则会不断增加,这是由于经济性目标和环保性目标之间的相互竞争造成的。在实际方案的制定中,可根据社会认可的平均治污成本来确定价格惩罚系数的取值,从而求得确定目标下的机组优化出力,以期达到包括环保效益在内的社会利益的最大化;也可以根据对费用和排放的具体要求采用不同的惩罚系数来进行折衷选择。在没有得到治污成本标杆值或决策者偏好信息的情况下,不妨取 $\lambda=0.25$,这时优化得到的总费用为 89 733 元,总排放为 2 776 kg 对应的机组出力情况如表 5 所示,结合单独考虑发电费用的表 6 和单独考

虑环境排放的表 7 可以看出:在负荷较低的时段,开启的机组数都相对较少,能够达到减少机组运行的基本费用(即合并后的费用函数的常数项 ω_i)的目的。随着负荷的增加,机组的出力也随之增加,直到某一时刻,仅靠提升机组出力来满足负荷平衡会带来较大的费用增量时,一些已关停的机组会逐渐启动并投入运行,而当负荷降低到一定程度时,这些机组又会再次退出运行以降低基本费用。比较而言,由于第 5 台机组的煤耗特性、排污特性和启停机性能均较差,所以不论是在以上哪种方式下,该机组的优化结果都是全停。另外,由于第 4 台机的启停机费用明显高于其它机组,所以在必须要考虑启停机费用的表 5 和表 6 中,该机组没有任何启停操作,一直保持着初始的开机状态,从而避免了不必要的开停机损耗。就 3 种情况下的优化结果而言,按照单独考虑机组能耗的方式,发电费用固然最低,但此时的污染物排量却是最高的;当单独采用环境排放作为优化的目标函数时,虽然满足了环保约束,但其经济性却大大降低;而显然,同时考虑经济性和环保性的机组组合优化的决策结果,达到了创造最大社会利益的目的。

表 4 指定惩罚系数下发电费用与排污量的优化结果比较

价格惩罚因子 λ	发电费用 (¥)	污染排放 (kg)
0	88 536	2 954
0.25	89 733	2 776
0.5	91 334	2 723
1	91 833	2 635
2	92 195	2 517
4	93 132	2 489
+inf	101 277	2 443

为了验证信息素初始化方法对算法性能的影响,这里对机组开、停机节点上的信息素初始值比例 n 选取不同的取值,分别运行算法 10 次。为便于比较,又不失一般性,不妨都取 $\lambda=1$ 的情况。这样, n 在不同取值下进行 100 次迭代后得到的目标函数的最优值和平均值便可列表统计,具体统计结果见表 8。从表中可以看出,当参数 n 取值在 3 附近时,优化效果最好,其多次计算的平均结果以及多次计算中的最优结果都要优于其余取值。这是因为该参数主要影响算法初始解的分布,而且还会进一步影响到最初多次迭代的解的分布。若该值过高,会导致开机的机组和时段增多,这显然会导致不必要的煤耗费用和污染物排放;相反,若该值过低,则生成可行解的概率将降低,算法优化的效率便随之下降。因此,选取适当的信息

素初始化方案可以有效提高算法的优化性能。

表 5 $\lambda=0.25$ 时的机组优化出力

时段	机组出力 (MW)					
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6
1	96.82	31.91	15.26	10.00	0	12.00
2	118.16	38.46	17.39	10.00	0	12.00
3	138.71	44.76	19.43	14.10	0	12.00
4	157.65	50.57	21.32	22.47	0	14.98
5	165.59	53.00	22.11	25.98	0	16.70
6	160.07	51.31	21.56	23.54	0	15.51
7	147.49	47.45	20.31	17.98	0	12.77
8	130.05	42.10	18.57	10.28	0	12.00
9	115.31	37.58	17.10	10.00	0	12.00
10	101.80	33.44	15.76	10.00	0	0
11	91.67	30.33	15.00	10.00	0	0
12	101.09	33.22	15.69	10.00	0	0
13	108.20	35.40	16.39	10.00	0	0
14	118.87	38.67	17.46	10.00	0	0
15	133.84	43.27	18.95	11.95	0	0
16	146.82	47.25	20.24	17.69	0	0
17	147.49	47.45	20.31	17.98	0	12.77
18	145.07	46.71	20.07	16.91	0	12.25
19	148.99	47.91	20.46	18.64	0	0
20	143.03	46.09	19.87	16.01	0	0
21	131.67	42.60	18.73	10.99	0	0
22	116.73	38.02	17.25	10.00	0	0
23	101.80	33.44	15.76	10.00	0	0
24	70.24	23.76	15.00	10.00	0	12.00

表 6 单独考虑发电费用的机组优化出力

时段	机组出力 (MW)					
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6
1	99.18	29.82	15.00	10.00	0	12.00
2	123.54	35.04	15.41	10.00	0	12.00
3	149.44	40.59	16.97	10.00	0	12.00
4	179.26	46.98	18.76	10.00	0	12.00
5	191.29	49.56	19.48	11.07	0	12.00
6	183.18	47.83	18.99	10.00	0	12.00
7	162.78	43.45	17.77	10.00	0	12.00
8	146.30	39.92	16.78	10.00	0	0
9	129.82	36.39	15.79	10.00	0	0
10	104.94	31.06	15.00	10.00	0	0
11	93.41	28.59	15.00	10.00	0	0
12	104.12	30.88	15.00	10.00	0	0
13	112.35	32.65	15.00	10.00	0	0
14	124.33	35.21	15.46	10.00	0	0
15	132.96	37.06	15.98	10.00	0	12.00
16	151.79	41.10	17.11	10.00	0	12.00
17	172.20	45.47	18.33	10.00	0	0
18	168.27	44.63	18.10	10.00	0	0
19	164.35	43.79	17.86	10.00	0	0
20	155.72	41.94	17.34	10.00	0	0
21	139.24	38.41	16.35	10.00	0	0
22	121.97	34.71	15.32	10.00	0	0
23	104.94	31.06	15.00	10.00	0	0
24	80.24	25.76	15.00	10.00	0	0

表 7 单独考虑环境排放的机组优化出力

时段	机组出力 (MW)					
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6
1	97.61	41.50	0	26.89	0	0
2	97.98	41.73	29.24	27.05	0	0
3	101.14	43.72	30.72	28.42	0	25.00
4	112.21	50.69	35.88	33.21	0	35.00
5	117.65	54.12	38.42	35.00	0	38.20
6	113.66	51.61	36.56	33.84	0	36.34
7	106.18	46.89	33.07	27.00	0	32.86
8	96.81	40.99	28.70	18.00	0	28.51
9	97.14	41.20	25.00	0	0	28.66
10	98.77	42.23	0	0	0	20.00
11	102.45	44.55	0	0	0	0
12	93.71	39.04	27.25	0	0	0
13	98.48	42.04	29.48	0	0	0
14	105.64	46.55	32.81	0	0	0
15	104.68	45.95	32.37	0	0	25.00
16	103.44	45.17	31.79	20.00	0	31.59
17	105.40	46.40	32.70	29.00	0	32.50
18	103.31	45.08	31.73	29.35	0	31.53
19	101.64	44.03	30.95	28.63	0	30.75
20	99.64	42.77	25.00	27.76	0	29.82
21	102.45	44.55	0	27.00	0	30.00
22	100.61	43.39	0	18.00	0	20.00
23	95.71	40.29	25.00	0	0	0
24	92.64	38.36	0	0	0	0

(下转第 84 页)

4 结 论

前面运用一种基于二进制编码的改进蚁群算法求解电力系统的机组优化组合问题,既兼顾了发电侧的负荷经济调度、环保要求,又综合考虑了机组的启停损耗、运行爬坡率和启停爬坡率的影响。算法采用了一种带有偏好的信息素初始化方法,从而既增加了获取可行解的概率,又减少了不必要的煤耗费用和污染物排放。在上层的机组组合部分,通过一动态更新的禁忌表来限制机组的开停机时间,同时用罚函数法对负荷平衡约束和旋转备用约束进行预处理,能有效引导算法获得较好的解和优化自身效率。仿真算例表明,该方法得到的结果是与罚因子的大小相适应的,能够满足实际系统对经济性和环保性的具体要求,是解决机组组合问题的有效方案。在此基础上,今后将进一步研究减少不可行解的产生及算法的停滞次数;计入有功网损和电网安全约束的机组组合方案;水电、风电等清洁能源的引入对调度的影响等。

器。在理想情况下,当牵引变电所两臂负荷的电流大小相等,两臂(端口)电压等量垂直时,牵引负荷通过牵引变电所注入系统的负序电流为零。

参考文献

[1] 李群湛. 电气化铁道并联综合补偿及其应用 [M]. 北京:中国铁道出版社, 1993.

[2] 林海雪. 电压电流频率和电能质量国家标准应用手册 [S]. 北京:中国电力出版社, 2001.

[3] 刘光晔,周有庆,姚建刚. 新型平衡变压器的平衡条件及等值电路研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4):

84—88.

[4] 张丽艳,李群湛,余丹. 阻抗匹配平衡牵引变压器负序分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(6): 80—83.

[5] 简克良. 电力系统分析 [M]. 成都:西南交通大学出版社, 1992.

作者简介:

黄 军 (1983—),男,四川内江人,硕士研究生,研究方向为供电系统仿真与优化。

(收稿日期: 2008—12—15)

(上接第 23 页)

表 8 不同信息素初始化方案下的算法性能比较

n	1	2	3	4	5	8
最优值 /\$	19 115 19 002 19 036 19 100 19 001 19 337					
平均值 /\$	19 452 19 376 19 324 19 374 19 382 19 446					

参考文献

[1] Zio E, Barakli P, Pedroni N. Optimal power system generation scheduling by multi-objective genetic algorithms with preferences [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(2): 432—444.

[2] 王欣,秦斌,阳春华,等. 基于混沌遗传混合优化算法的短期负荷环境和经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 128—133.

[3] Senjyu T, Shimabukuro K, Uezato K, et al. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 882—888.

[4] Snyder W L, Powell H D, Rayburn J C. Dynamic programming approach to unit commitment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2): 339—348.

[5] Hobbs W J, Hemon G, Wamer S, et al. An enhanced dynamic programming approach for unit commitment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(3): 1201—1205.

[6] Ongsakul W, Petcharak N. Transmission and ramp constrained unit commitment using enhanced adaptive Lagrangian relaxation [C]. Proceedings of IEEE Power Tech Russia, 2005, 1—8.

[7] 杨朋朋,韩学山. 基于改进拉格朗日乘子修正方法的逆序排序机组组合 [J]. 电网技术, 2006, 30(5): 40—45.

[8] 张利,赵建国,韩学山. 考虑网络安全约束的机组组合新算法 [J]. 电网技术, 2006, 30(21): 50—55.

[9] Damousis I G, Bakirtzis A G, Dokopoulos P S. A solution to the unit commitment problem using integer-coded genetic

algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1165—1172.

[10] 杨俊杰,周建中,喻菁,等. 一种求解大规模机组组合问题的混合智能遗传算法 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 47—50.

[11] 孙力勇,张焰,蒋传文. 基于矩阵实数编码遗传算法求解大规模机组组合问题 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 82—87.

[12] Ting T O, Rao M V C, Loo C K. A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 411—418.

[13] 胡家声,郭创新,曹一家. 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 24—28.

[14] 张力勇,张焰,蒋传文. 求解机组组合问题的嵌入贪婪搜索机制的改进粒子群优化算法 [J]. 电网技术, 2006, 30(13): 44—48.

[15] 李鹏飞,都洪基,郭亮,等. 基于免疫算法的火电厂机组优化组合 [J]. 继电器, 2007, 35(S1): 365—368.

[16] Simon S P, Padhy N P, Anand R S. An ant colony system approach for unit commitment problem [J]. Electrical Power and Energy System, 2006(28): 315—323.

[17] 王琨,刘青松. 蚁群算法在电力系统机组优化组合中的应用研究 [J]. 电力学报, 2005, 20(2): 112—115.

[18] 熊伟清,魏平. 二进制蚁群进化算法 [J]. 自动化学报, 2007, 33(3): 259—264.

[19] 陈焯. 用于连续函数优化的蚁群算法 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(6): 117—120.

作者简介:

蒲 实 (1982—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统优化运行。

(收稿日期: 2009—01—12)