面向启发式调整策略和粒子群优化的机组组合问题

袁晓辉[1] 苏安俊[1] 聂浩[1] 曹波[2] 杨波[2]
（1. 华中科技大学水电与数字化工程学院 武汉 430074 2. 华中电网有限公司 武汉 430077）

摘要 提出一种启发式调整策略和粒子群优化相结合的新方法求解电力系统中的机组组合（UC）问题。算法将 UC 问题分解为具有整型变量和连续变量的两个优化子问题，采用离散粒子群优化和等微增率相结合的双层嵌套方法对外层机组启、停状态变量和内层机组功率经济分配子问题进行交替迭代优化求解。同时构造了关机调整和替换调整两个启发式搜索策略对优化结果进行进一步局部微调以提高算法解决 UC 问题的全局寻优能力和计算效率，从而有效改善解的质量。以 10～100 台机组组成的 5 个测试系统为算例，通过与其他算法结果进行比较分析，验证了该方法的可行性和有效性。仿真结果表明该方法解决大规模机组组合问题具有求解精度高和收敛速度快的优势。

关键词： 粒子群优化 机组组合 负荷经济分配 启发式调整策略
中图分类号： TM715

Unit Commitment Problem Based on PSO With Heuristic-Adjusted Strategies

Yuan Xiaohui[1] *Su Anjun*[1] *Nie Hao*[1] *Cao Bo*[2] *Yang Bo*[2]
（1. Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074 China 2. Central China Grid Company Limited Wuhan 430077 China）

Abstract This paper proposes a new approach combining of particle swarm optimization (PSO) and heuristic-adjusted strategies to solve unit commitment (UC) problem in power system. The UC problem is decomposed into two embedded optimization sub-problems: one the unit on/off status schedule problem with integer variables that could be solved by the discrete binary particle swarm optimization method and the other load economic dispatch problem with continuous variables that could be solved by the equal Lambda-iteration method. At the same time, shutdown-adjusted and replacement-adjusted strategies are performed on the optimal results to raise solution quality, which could be effectively enhanced the algorithm's global optimization performance and computational efficiency. The feasibility and effectiveness of the proposed method are demonstrated for five test systems with the number of generating units in the range of 10 to 100, and the computational results are compared with those previously reported in literature. Simulation results show that the proposed method has advantages for solving UC problem with high precision and quickly convergence speed.

Keywords： Particle swarm optimization, unit commitment, load economic dispatch, heuristic-adjusted strategies

国家自然科学基金资助项目（ 50779020，50539140）。
收稿日期 2008-09-28 改稿日期 2009-05-13

1 引言

随着电力系统规模的日益扩大，电力系统的经济运行越来越重要，机组组合（Unit Commitment，UC）便是其中一个重要的问题[1]。国内外学者提出应用动态规划（DP）、混合整数规划（MIP）和拉格朗日松弛（LR）等方法解决 UC 问题[2-4]。已有研究表明对大规模 UC 问题，这些方法都存在不同程度的缺点，诸如 DP 存在“维数灾”难点；MIP 法计算时间随机组规模增加呈指数增长；LR 法存在对偶间隙和收敛稳定性问题。随着人工智能技术的发展，智能优化方法也相继被应用于 UC 问题的求解[5-8]。尽管智能优化方法解决 UC 问题具有对目标函数无连续可微限制以及操作简单等优点，但因其潜在的随机性无法保证每次计算都能找到全局最优解，寻优过程中存在“早熟”现象，且计算量较大、所需时间较长；同时，智能优化方法本质上属无约束优化算法，如何处理 UC 问题的约束也将影响算法的效率。已有研究中大多采用罚函数法处理 UC 问题的约束，但选取合理的惩罚因子较困难。

近年来，粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization，PSO）的出现为 UC 问题的解决提供了新思路[9-10]。PSO 在解决 UC 问题时面临如何处理约束条件以及找到全局优化解的困难。为此，本文提出适合处理机组开、停 0-1 状态变量的离散 PSO（DPSO）来解决 UC 问题。DPSO 求解中针对 UC 问题的特点，采用启发式规则处理约束以保证解的可行性，从而克服采用罚函数处理约束时罚因子选取的难题；为进一步提高 DPSO 求解 UC 问题的精度，构建了关机和替换调整两个策略对 DPSO 算法优化的结果进行局部微调，从而使解的质量得以提高和改善。最后，通过算例及同其他方法计算结果的对比分析，验证了本文算法的正确性和有效性。

2 机组组合问题的数学模型

2.1 目标函数

UC 问题是在满足各种约束的前提下，在调度期内合理确定各计算时段所有可用机组的最优开、停机状态及相应出力大小，使系统总运行费用最小。UC 问题是一大规模混合整数非线性约束优化问题，其中包含表示机组开、停状态的 0、1 决策变量和出力连续变量。其目标函数可表示为

$$\min F=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\left[f_i(P_i^t)+ST_i^t(1-u_i^{t-1})\right]u_i^t \tag{1}$$

式中，$f_i(P_i^t)$ 为机组 i 在 t 时段的发电费用，通常取 $f_i(P_i^t)=a_i+b_iP_i^t+c_i(P_i^t)^2$；$ST_i^t$ 为机组 i 在 t 时段启动费用；u_i^t 为机组 i 在时段 t 的开、停状态，1 表示开机，0 表示停机；N 为可用机组数；T 为总计算时段；P_i^t 为机组 i 在时段 t 的出力。

2.2 约束条件

（1）系统负荷平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N}P_i^tu_i^t=P_{\mathrm{D}}^t \tag{2}$$

式中，P_{D}^t 表示 t 时段的系统负荷。

（2）系统备用

$$\sum_{i=1}^{N}u_i^tP_{i\max}\geqslant P_{\mathrm{D}}^t+R^t \tag{3}$$

式中，R^t 表示 t 时段系统所需的备用容量。

（3）机组出力上下限约束

$$u_i^tP_{i\min}\leqslant P_i^t\leqslant u_i^tP_{i\max} \tag{4}$$

式中，$P_{i\min}$、$P_{i\max}$ 分别表示机组 i 的最小、最大出力。

（4）最短开机时间和停机时间约束

$$\begin{cases}(X_{i,t-1}^{\mathrm{on}}-T_i^{\mathrm{on}})(u_i^{t-1}-u_i^t)\geqslant 0\\(X_{i,t-1}^{\mathrm{off}}-T_i^{\mathrm{off}})(u_i^t-u_i^{t-1})\geqslant 0\end{cases} \tag{5}$$

式中，$X_{i,t-1}^{\mathrm{on}}$、$X_{i,t-1}^{\mathrm{off}}$ 分别表示机组 i 到 t–1 时段为止的持续开机和持续停机时间；T_i^{on}、T_i^{off} 分别表示机组 i 容许的最短开机和停机时间。

3 基于调整策略和 DPSO 算法的机组组合问题求解

UC 问题包括确定调度期内机组在各计算时段的开、停机状态以及系统总负荷在运行机组间的经济分配两个子问题。优化变量中既有表示机组开、停状态的 0、1 整型变量，又有表示机组出力大小的连

续变量，这是一个典型混合整数非线性约束优化问题。本文针对此问题的特点，首先利用离散粒子群优化算法（DPSO）的快速寻优能力确定机组开、停状态；然后采用等微增率法求解机组运行状态既定条件下的负荷经济分配子问题；最后为克服 DPSO 算法寻优过程中可能陷入局部极值区的缺陷，构造了关机调整和替换调整两个启发式局部调整策略对 DPSO 的结果进行进一步局部修正，以改进算法的求解精度，最终求得机组的最优开、停机状态及其发电出力。

3.1　求解机组开、停机状态的 DPSO 方法

机组的 u_i^t 只能取 0 或 1，因此应用 PSO 求解 UC 问题时，须采用离散 PSO 方法（DPSO）[11]，即粒子个体的位置值只能取 0 或 1。应用 DPSO 确定 u_i^t 的迭代过程为

$$\begin{cases} V_i(t+1)=\omega V_i(t)+c_1\cdot \mathrm{rand1}(0,1)\cdot(p_i(t)-pu_i(t))+ \\ \qquad c_2\cdot \mathrm{rand2}(0,1)\cdot(p_{\mathrm{g}}(t)-pu_i(t)) \\ s(V_i(t+1))=\dfrac{1}{1+\mathrm{e}^{-V_i(t+1)}} \\ pu_i(t+1)=S(V_i(t+1))=\begin{cases}1 & \mathrm{rand}(0,1)<s(V_i(t+1)) \\ 0 & \text{其他}\end{cases} \end{cases} \tag{6}$$

式中，pu_i（t）表示第 i 个粒子第 t 次迭代的位置；V_i（t）表示第 i 个粒子第 t 次迭代的速度；w 为惯性权重；c_1 和 c_2 为加速度常数；rand1（0,1）和 rand2（0,1）表示（0,1）之间的均匀分布随机数；p_i（t）表示粒子 i 迭代至 t 次时的最优值；p_{g}（t）表示整个粒子群体迭代至 t 次时的最优值。

利用 DPSO 确定机组运行状态 $pu_i(t)$时，必须考虑系统备用和机组最小开、停机时间约束，否则可能因 DPSO 的随机性致使解不可行。为满足机组最小开、停机时间约束，粒子在 DPSO 算法迭代过程中，首先判断机组连续运行（或关机）的时段总数是否小于最小开机（或关机）时间？如果小于，限制机组维持原有的开机（或停机）状态，即由下式决定机组的运行状态 $pu_i(t)$。

$$pu_i(t)=\begin{cases}1 & 0<X_{i,t}^{\mathrm{on}}<T_i^{\mathrm{on}} \\ 0 & 0<X_{i,t}^{\mathrm{off}}<T_i^{\mathrm{off}} \\ S(V_i(t+1)) & \text{其他}\end{cases} \tag{7}$$

对系统备用约束，在每个时段都对其加以检验。如果某个时段违反此约束，则按下述方法进行机组运行状态的调整：

（1）t=0。

（2）对所有处于关机状态的机组，按每台机组最大出力下的平均运行费用值从小到大的次序进行排序，形成集合 FD（α_i）。

（3）从集合 FD（α_i）中取出第一台机组 i，判断是否满足开机条件？如果满足，将机组 i 开机。

（4）将机组 i 从集合 FD（α_i）中删除。继续判断是否满足备用约束？若满足，转至（5）；否则，转至（3）；如果集合 FD（α_i）为空，则转至（5）。

（5）t=t+1；如果 t＜T，转至（2）；否则，调整过程结束。

3.2　启发式局部调整策略

由于 UC 问题受系统备用和最短开、停机时间约束限制，仅仅依靠 DPSO 算法得到的结果并非很理想。因此，本文构建了关机调整和替换调整两个局部启发式策略，对 DPSO 算法的优化结果做进一步的调整和修正。

3.2.1　关机调整策略

由于备用约束只有最小限制，没有最大限制，因此利用 DPSO 确定机组运行状态时，可能导致过多机组运行，从而使得备用容量过多，这样可能增加了系统的总运行费用，所以应将多余备用降低至最少。为此，只需对所有时段满足关机条件的多余备用机组实施关机操作即可，本文称此过程为关机调整。

关机调整策略的具体实施步骤如下：

（1）取 t=0。

（2）将所有处于开机状态的机组按容量值从小到大的次序进行排序，组成集合 FC（α_i）。

（3）从集合 FC（α_i）中取出第一台机组 m，判断将机组 m 关机后，所有处于开机状态的机组是否满足备用约束。若不满足，转（5）。

（4）判断机组 m 是否满足关机条件。若满足，将其关机。

（5）将机组 m 从集合 FC（α_i）中删除，判断集合 FC（α_i）是否为空。若为空，转（6）；否则，转（3）。

（6）t=t+1；若 t＜T，转至（2）；否则，结束调整过程。

3.2.2　替换调整策略

通常大容量机组的平均单位出力费用较低，小容量机组的平均单位出力费用较高，一台大容量机组承担的负荷需要几台小机组才能承担。同时大容

量机组最小关机时间较长， DPSO 优化得到机组运行状态中可能存在容量较大的机组处于关机状态、较多小容量机组处于开机状态，这样可能使总运行费用较高。此时，应调整机组开停机状态，让大容量机组优先投入运行以降低系统总运行费用。即在满足约束的前提下，用每个计算时段处于停机状态的大容量机组试着去替代已经开机的小容量机组，若调整后系统的总运行费用小于原先的总费用，则对原先机组的开停机状态和出力进行更新；否则，维持原先的计算结果，此过程称为替换调整。

替换调整策略的具体实施步骤如下：

（1）以 DPSO 的计算结果作为调整的初始状态 。

（2）取 t=0。

（3）对 t 时段所有处于关机状态机组按容量由大到小进行排序，形成集合 SD（α_i）；对所有处于开机状态的机组按容量由小到大进行排序，形成集合 SC（β_i）。

（4）从集合 SD（α_i）中取出第一台机组 m，判断机组 m 是否满足开机条件？如果满足，继续（5）；否则，转至（10）。

（5）从集合 SC（β_i）中取出第一台机组 j，判断机组 j 是否满足关机条件？如果满足，继续（6）；否则，转至（9）。

（6）用机组 m 替代机组 j，判断是否满足备用约束条件？如满足，继续（7）；否则，转至（11）。

（7）将机组 m 开机，然后对所有新开机的时段应用关机调整策略 。

（8）计算机组状态改变后系统的总运行费用。若比原来的总运行费用小，则更新机组状态；否则，恢复机组原来的状态 。

（9）将机组 j 从集合 SC（β_i）中删除，判断集合 SC（β_i）是否为空？若为空，继续（11）；否则，转至（5）。

（10）将机组 m 从集合 SD（α_i）中删除，判断集合 SD（α_i）是否为空？若为空，继续（11）；否则，转至（4）。

（11）取下一时段 t=t+1。如果 t＜T，转（3）；否则，结束调整过程。

4 应用算例

为验证本文算法的有效性，采用 Visual C++ 6.0 编制了相应的程序，在 P-IV CPU-2.0GHz 的 PC 机上运行。分别以 10 台、20 台、40 台、80 台和 100 台机组组成的系统为算例，对算法的性能进行检验。计算周期取 1d，将全天分为 24 个时段，1h 作为一个计算时段。限于篇幅，机组的有关参数和系统负荷数据详见文献 [5]。计算中采用的有关参数取值为：粒子群体规模取 20，最大迭代次数取 100， c_1 取 1.2，c_2 取 2.8。应用本文算法连续进行 20 次计算，并对 20 次计算结果进行统计分析，从中选取最好结果作为最终优化解。

表 1 给出了采用局部调整策略前后 20 次计算结果的最优值、最差值和平均值的比较。

表 1 采用调整策略前后系统总费用比较

Tab.1 Comparison of total costs using adjusted-strategies

（单位：$）

机组	不采用调整策略			采用调整策略		
台数	最优值	最差值	平均值	最优值	最差值	平均值
10	567 940	575 348	570 322	564 087	566 921	564 836
20	1 147 103	1 172 399	1 156 559	1 123 957	1 126 958	1 125 143
40	2 328 274	2 365 259	2 347 316	2 246 447	2 250 806	2 248 664
80	4 716 027	4 761 532	4 738 262	4 491 517	4 496 657	4 493 745
100	5 921 034	5 956 541	5 934 023	5 611 348	5 618 755	5 614 802

从表 1 可知：粒子群优化过程中如果不采用局部调整策略，计算结果精度不够理想，尤其是随着机组台数的增加，解的精度问题较突出；采用调整策略后取得了较好的效果，使得求解精度大为提高，弥补了粒子群优化算法求解 UC 问题精度不够高的缺点，突显了采用局部调整策略的高效性。

为进一步验证本文算法的性能，表 2 和表 3 分别给出了文献中采用拉格朗日松弛法（LR）[10]、遗传算法（GA）[6]、进化规划（EP）[7]、LR 和 GA 组合法（LRGA）[5]以及混合 PSO 和 LR 法（PSOLR）[10]对同一问题求解结果和计算时间与本文算法的比较。由表 2 可知，本文算法的求解精度高于其他方法。尤其是随着机组台数的增加，求解精度并没有降低，因而本文算法适用于大规模 UC 问题的求解，这体现出本文算法的有效性。

表 2 各种方法计算最优结果比较

Tab.2 Comparison of optimal results for various methods

机组	总费用/$					
台数	LR	GA	EP	LRGA	PSOLR	本文算法
10	565 825	565 825	564 551	564 800	565 869	564 087
20	1 130 660	1 126 243	1 125 494	1 122 622	1 128 072	1 123 957

40	2 258 503	2 251 911	2 249 093	2 242 178	2 251 116	2 246 447
80	4 526 022	4 504 933	4 498 479	4 501 844	4 496 717	4 491 517
100	5 657 277	5 627 437	5 623 885	5 613 127	5 623 607	5 611 348

算法的执行时间与硬件条件密切相关，但文献未给出算法计算时间的硬件环境，因此文献给出不同算法的计算时间可能因硬件条件差异使结果缺乏直接比较性。然而，由表 3 可知：本文算法计算时间明显小于文献算法，且机组规模从 10 到 100 台变化时，计算时间增幅较小；同时本文算法随机组台数增加，计算时间近似线性增长，而其他算法计算时间随着机组规模的增加几乎呈指数增长，这说明本文算法计算效率高、收敛速度快，适合求解大规模 UC 问题。

表 3　不同机组台数情况下的计算时间比较

Tab.3　Comparison of computational times for various test systems

（单位：s）

机组台数	方法					
	LR	GA	EP	LRGA	PSOLR	本文算法
10	257	221	100	518	42	1.2
20	514	733	340	1147	91	2.3
40	1066	2697	1176	2165	213	4.8
80	2122	10 036	3584	3383	543	9.9
100	2978	15 733	6120	4045	730	12.1

5　结论

本文将电力系统中机组组合这一复杂的大规模 NP 难问题分解为具有 0-1 整型变量与连续变量的内外两层优化子问题。针对机组组合问题的具体特点，对外层优化子问题采用 DPSO 方法求解，内层子问题采用等微增率方法求解，通过内外两层的交替迭代更新求得问题的优化解。为进一步改善解的质量，构造了关机调整和替换调整两个启发式策略，从而提高了算法解决机组组合问题的全局寻优能力和计算效率。算例结果表明该方法在求解精度和收敛速度两方面都得到明显改善，进而验证了本文算法的高效性。同时为大规模机组组合问题的解决提供了一种新的思路。

参考文献

[1]　袁晓辉，袁艳斌，张勇传.电力系统中机组组合的现代智能优化方法综述 [J].　电力自动化设备，2003, 23(2): 73-78.

Yuan Xiaohui, Yuan Yanbin, Zhang Yongchuan. A survey of modern intelligence optimization methods for unit commitment in electric power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(2): 73-78.

[2]　王成文，韩勇，谭忠富，等. 一种求解机组组合优化问题的降维半解析动态规划方法 [J]. 电工技术学报，2006, 21(5): 110-116.

Wang Chenwen, Han Yong, Tan Zhongfu, et al. Dimension-reduced semi-analytical dynamic programming approach for solving unit commitment problem[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(5): 110-116.

[3]　Samer T, John B. Using integer programming to refine Lagrangian-based unit commitment solutions[J]. IEEE Trans. on Power Syst. , 2000, 15(1): 151-156.

[4]　Dieu V, Ongsakul W. Enhanced augmented Lagrangian hopfield network for unit commitment[J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., 2006, 153(6): 624-632.

[5]　Cheng C, Liu C. Unit commitment by Lagrangian relaxation and genetic algorithms[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(2): 707-714.

[6]　Kazarlis S, Bakirtzis A, Petridis V. A genetic algorithm solution to the unit commitment problem[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1996, 11(1): 83-92.

[7]　Juste K, Kita H, Tanaka E. An evolutionary programming solution to the unit commitment problem[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1999, 14(4): 1452-1459.

[8]　Zhuang F, Galiana F. Unit commitment by an enhanced simulated annealing algorithm[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2006, 21(1): 68-76.

[9]　袁晓辉，王乘，袁艳斌，等. 一种求解机组组合问题的新型改进粒子群方法 [J]. 电力系统自动化，2005, 29(1): 34-38.

Yuan Xiaohui, Wang Cheng, Yuan Yanbin, et al. A new enhanced particle swarm optimization method for unit commitment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 34-38.

[10]　Balci H, Valenzuela J. Scheduling electric power generations using particle swarm optimization

combined with the Lagrangian relaxation method[J]. Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., 2004, 14(3): 411-421.

[11] Kennedy J, Eberhart R. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]. Proceedings of the Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1997: 4104-4108.

作者简介:袁晓辉　男，1971 年生，博士，教授，研究方向为智能计算及其在电力系统中的应用。 苏安俊　男，1985 年生，硕士研究生，研究方向为智能优化方法及其应用研究。