

粒子群算法在机组组合中的应用综述

赵欣欣¹, 陈维荣¹, 叶震²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031, 2. 龚嘴水力发电总厂, 四川 乐山 614900)

摘要: 在深入探讨电力系统机组组合问题的数学模型和粒子群算法的基础上, 加以分类总结, 从粒子群算法和粒子群与其他算法结合两个方面, 详细评述了粒子群算法在电力系统机组组合问题中的应用, 并重点介绍了各种方法对约束的处理。

关键词: 负荷分配; 机组组合; 电力系统; 粒子群算法; 优化

Abstract: Based on the in-depth study of unit commitment problem in power system with the mathematical models and the particle swarm optimization (PSO), the classification and the summary are presented. The main research of applying PSO to unit commitment is overall described in detail from two aspects: the application of PSO and the application of PSO combined with other algorithm, and the focuses are the ways to deal with the constraints.

Key words: load dispatch; unit commitment; power system; particle swarm optimization; optimization

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0001-03

0 引言

电力系统机组组合问题是一个大规模混合整数非线性优化问题, 从 20 世纪 40 年代初人们就开始对这一问题的求解进行研究, 目前用于求解机组组合的算法主要有: 优先次序法、混合整数规划、动态规划、拉格朗日松弛法、模拟退火算法、禁忌搜索、系统进化法、遗传算法、蚁群算法和粒子群算法等^[1]。另外, 令各种算法各擅所长的混合算法也逐渐被用于机组组合算法的求解。

粒子群算法是 (particle swarm optimization, PSO) 是 1995 年 Eberhart 博士和 Kennedy 博士提出的, 它源于对鸟群觅食行为的研究, PSO 算法收敛速度快, 参数简单容易控制, 这些优点使它广泛用于电力系统的各种优化问题^[2]。

针对电力系统机组组合问题的求解, 从粒子群算法和粒子群算法与其他算法结合两个方面总结了粒子群算法求解电力系统机组组合问题的方法。

1 电力系统机组组合问题的数学模型

电力系统机组组合问题是在满足系统负荷和系

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (6087004)

统备用要求以及机组运行技术条件约束的情况下, 确定未来一定期间内各机组的开、停机时间并在机组间进行负荷分配, 以使系统在未来计划周期 (通常是 24 h) 内的总费用最小。其目标函数可表达为

$$\min_{u_{it}, P_{it}} F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [u_{it} F_i(P_{it}) + F_{si}(t) u_{it} (1 - u_{i,t-1})]$$

式中, F 为发电总成本; T 为系统调度期间的时段数; N 为系统内的机组数; u_{it} 为机组 i 在时段 t 的状态, $u_{it} = 1$ 表示开机, $u_{it} = 0$ 表示停机; P_{it} 为机组 i 在时段 t 的有功出力; $F_i(P_{it})$ 为机组 i 在时段 t 的运行费用, 多用二次函数表示 $F_i(P_{it}) = a_i P_{it}^2 + b_i P_{it} + c_i$, a_i , b_i 和 c_i 为机组 i 的运行费用参数; $F_{si}(t)$ 为机组 i 在时段 t 的启动费用 $F_{si}(t) = S_{i,j} + S_{i,j} (1 - e^{-T_{i,j}^{off}/\tau_i})$, $S_{i,j}$, $S_{i,j}$ 和 τ_i 为机组 i 的启动费用参数。

约束条件如下。

- ① 系统负荷平衡约束: $\sum_{i=1}^N u_{it} P_{it} = P_{Dt}$, 式中, P_{Dt} 为 t 时段系统的负荷。
- ② 系统旋转备用约束: $\sum_{i=1}^N u_{it} P_{i,max} \geq P_{Dt} + P_{Rt}$, 式中, P_{Rt} 为 t 时段系统所需备用大小。
- ③ 机组出力上下限约束: $P_{i,min} \leq P_{it} \leq P_{i,max}$, 式中, $P_{i,min}$ 和 $P_{i,max}$ 分别为发电机组 i 的最小和最大出力。
- ④ 机组爬坡速率约束: $-R_{DRi} \leq P_{it} - P_{i,t-1} \leq R_{URi}$, 式中, R_{DRi} 为机组 i 爬升率的上限; R_{URi} 为机组 i 爬升率的下限 (不包括机组的启停)。

⑤最小开停机时间约束: $T_{it}^{on} \geq T_{im,in}^{on}, T_{it}^{off} \geq T_{im,in}^{off}$,

式中, T_{it}^{on} 为机组 i 在时段 t 的连续运行时间; T_{it}^{off} 为机组 i 在时段 t 的连续停运时间; $T_{im,in}^{on}$ 为机组 i 启动后必须保持运行状态的最短时间; $T_{im,in}^{off}$ 为机组 i 停机后必须保持停运状态的最短时间。

此外很多专家学者对机组组合问题进行了深入研究,提出了包含考虑系统安全稳定性、市场环境下,含分布式发电电力系统,水火电混合系统及含风电的电力系统机组组合的数学模型,这里不作详细叙述。

2 粒子群算法

假设在 M 维搜索空间(解空间)里,有 s 个粒子组成的粒子群。

其中第 i 个粒子位置可表示为 M 维向量: $x_i(n) = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iM})$, j 表示变量 x_i 的第 j 维分量; 粒子飞行速度为 $v_i(n) = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ij}, \dots, v_{iM})$, 该粒子所经历的个体最佳位置(个体极值)可表示为 $p_i(n) = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ij}, \dots, p_{iM})$, 在整个粒子群中,所有粒子经过的最佳位置(全局极值)为 $g_i(n) = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{ij}, \dots, g_{iM})$, 当第 i 个粒子从 $n-1$ 代迭代到 n 代时,采用下式进行速度位置: $v_i(n) = \omega v_i(n-1) + k_{rand} [p_i(n-1) - x_i(n-1)] + k_{rand} [g_i(n-1) - x_i(n-1)]$, $x_i(n) = v_i(n) + x_i(n-1)$, 式中 ω 为惯性权值; k_{rand} 为在 $[0, 1]$ 范围内变化的随机数; n 为迭代次数; 粒子数 $i=1, 2, \dots, s$ 。迭代中止条件一般选为达到最大迭代次数或粒子群目前搜索到的最优位置满足预先设定的最小适应度值。

近年来,人们对粒子群算法作出了许多的改进,力求克服其容易陷入局部最优的缺点,以达到更好的搜索效果。

3 粒子群算法在电力系统机组组合中的应用

粒子群算法本身是一种无约束的优化,但电力系统机组组合问题是一个高维数多约束的优化问题,把粒子群算法应用到约束优化问题的求解中,其关键在于如何处理好约束,即解得可行性。基于 PSO 算法的约束优化可以用罚函数法或设定特定的进化操作或修正约束因子。

粒子群算法用于求解电力系统机组组合的方法主要分为两类:一是直接用粒子群算法或改进的粒子

群算法进行求解,另一类是将粒子群算法和其他算法结合,综合利用各种算法的长处进行求解。

3.1 粒子群算法求解机组组合问题

由于电力系统机组组合问题涉及到连续变量(发电机组出力)和离散变量(发电机启停状态)的优化,在用粒子群算法求解的时候通常将机组启停状态或机组出力作为控制变量,一般有以下两种思路:一种是将连续变量和离散变量作为整体同时优化;另一种是将机组组合问题看作机组启停优化和机组输出功率优化两个子问题分层进行优化。对于各种约束的处理,许多学者也使用了巧妙的方法。同时,考虑到粒子群算法自身容易陷入局部最优的缺点,在求解过程中一般也对粒子群算法做了或多或少的改进。

文献[3]通过在算法迭代过程中对松弛后的 $0, 1$ 变量与机组有功出力变量并行地进行优化,避免了由于决策变量过多造成的维数灾难题;引入变动阈值,解决了在寻优过程中粒子的值出现振荡时可能会丢失机组有效启停状态的问题;在粒子群优化算法中引入启发式变异技术,有效地处理了机组启、停时间的约束并提高了粒子群优化算法的全局收敛能力。文献[4]对机组组合问题的 $0, 1$ 变量进行松弛,相对于文献[3]增加了变量把开停机时间表示为开停机状态的函数,粒子群算法的状态变量为有功出力、开停机状态、开停机时间。采用罚函数方法对约束条件进行处理,最终将机组组合问题转化为无约束问题,然后采用改进的粒子群算法求解。文献[5]采用改进离散二进制粒子群算法和标准粒子群算法相结合的双层嵌套方法,分别对外层机组的启、停状态变量和内层功率经济分配进行交替迭代优化求解。同时在算法中引入基于机组优先顺序的变异技术和修补策略,能有效地对出力机组的最短启、停时间约束,并提高算法的全局寻优能力和计算效率。文献[6]采用固定阈值处理表示机组运行状态的 $0, 1$ 整型变量,从而可直接应用粒子群算法求解机组组合问题,避免求解各时段中的经济负荷分配子问题;在粒子群算法迭代过程中应用变异操作更新进化速度缓慢的粒子,增强了算法的搜索能力;算法收敛后,采用基于优先列表的贪婪搜索机制做进一步寻优。文献[7]仅将机组的启停状态用 $0, 1$ 编码,在产生粒子时考虑最小开停机时间约束,以保证只在可行解空间内寻优,借鉴优先顺序法确定优化窗口(需要优化的那一部分机组)同时引入启发式规则来保证负荷及旋转备用约

束的满足并进一步提高算法的精度。文献 [8] 采用二维实数矩阵对发电机组的出力进行编码, 将引入经典控制理论中的反馈机制和闭环控制概念并充分考虑粒子在每一步迭代中的自身特性和信息的闭环粒子群算法用于求解电力系统机组组合问题。根据机组出力状态来确定启停状态, 并借鉴优先顺序法的思想, 将平均成本微增率降低且启动成本较高的机组赋予较高的优先级。文献 [9] 采用整数序列对机组的运行状态进行编码, 正数表示运行时间, 负数表示停运时间, 有效减少了粒子群算法求解机组组合问题所需要的控制变量并且仅在变量初始化的时候就能限制其开停机时间, 从而轻松实现了对最大最小开停机时间的约束, 并用参数自适应的粒子群算法求解。文献 [10] 提出一种二进制和实数编码混合的 HPSO 算法。用 UC 问题解决机组组合问题, RCPSO 解决负荷分配问题, 两种算法同时优化。文献 [11] 提出了考虑发电机出力的机组组合数学模型, 模型将可靠性需求和旋转备用约束在优化过程中合并, 并对机组组合这个混合整数规划问题用含有二进制粒子群和连续变量粒子群的混合粒子群算法求解。文献 [12] 提出了迭代最佳的思想, 并将其引入到粒子群算法中, 提出了迭代粒子群算法 (IPSO)。用提出的算法求解概率备用的机组组合, 对一个含有 48 台机组的电力系统进行仿真, 该方法能根据电力系统的停电成本来自动决定开机数目和旋转备用水平, 用该算法求解概率备用机组组合问题符合有效、经济和安全的要求。

3.2 粒子群算法和其他算法结合求解机组组合问题

将粒子群算法和其他算法结合用于机组组合问题, 较常见的是将机组组合问题, 分成机组启停状态优化和机组出力优化两个子问题来求解, 将粒子群算法和其他算法结合可以使各种算法各擅所长, 以达到更好的优化效果。

文献 [13] 将离散二进制粒子群算法结合优先顺序法进行机组启停状态的优化, 并采用启发式变异进行旋转备用约束和最大最小运行、停运时间约束的处理。采用修正灰色区域的方法减小开停机费用, 最后用 equal lambda - iteration 方法进行负荷分配并计算运行费用和开停机费用。算法耗时较短并且随机组数量增加较少。文献 [14] 将机组组合解编码为机组操作序列, 降低了蚁群算法搜索的难度, 使其空间复杂度由指数型降为线性型, 使采用蚁群算法求解更大规模的机组组合问题成为可能。采用协同粒子群算

法求解多时段负荷的经济分配问题时, 用一个粒子群处理一个时段的优化问题, 通过共享粒子群间的惩罚项解决了机组爬升率的约束问题。文献 [15] 采用二进制粒子群优化方法解决机组状态组合问题, 用遗传算法结合启发式技术解决经济分配问题, 在算法中, 将机组的最小开停机时间作为搜索机组开停机的最小单元, 这样就大大的降低了搜索时间。文献 [16] 对机组启停状态优化和负荷经济分配问题, 分别用改进的离散粒子群算法 (DPSO) 与基于等微增率原理的经典拉格朗日乘子法的组合来解决机组启停优化问题, 即先采用改进的 DPSO 优化算法给出调度周期机组的状态组合, 然后根据等微增率原理利用拉格朗日乘子法求解负荷经济分配。对于机组启停优化中的约束条件, 机组爬坡速率利用 K-T 最优性条件处理, 对于最小开停机时间约束引入一个启发式的拟变异机制对优化搜索过程进行干预。文献 [17] 提出了一种粒子群算法与拉格朗日松弛法相结合的机组组合算法。用拉格朗日松弛方法将优化问题在各个机组之间解耦, 对于单台机组的采用动态规划法进行优化, 用粒子群算法优化拉格朗日乘子的取值。

4 结 语

粒子群算法作为一种新兴的群智能算法, 在各个领域得到了广泛的应用, 从粒子群算法以及粒子群算法与其他算法结合的算法两个方面, 对粒子群算法在电力系统机组组合问题中的应用进行了总结, 其中重点说明了各种使用方法对约束的处理。

参考文献

- [1] 陈皓勇, 王锡凡. 机组组合问题的优化方法综述 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(4): 51-56.
- [2] 袁晓辉等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 2005, 28(19): 14-19.
- [3] 胡家声, 郭创新, 曹一家. 一种适用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.
- [4] 赵波, 曹一家. 电力系统机组组合问题的改进粒子群优化算法 [J]. 电网技术, 2004, 28(21): 6-10.
- [5] 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.

(下转第 37 页)

龙华变电站、110 kV 西郊变电站等进行试验后,各方面保护功能完善,试验过程安全,各项试验操作都满足试验需求,只需要不到 10 kVA 的电源容量,与采用大功率试验变压器相比,还大大减少了试验运输等费用,试验效率也得到了极大的提高。

随着串联谐振耐压试验技术的不断发展,充分利用串联谐振试验装置具有的操作简单、损耗低、重量轻、维护简单、对电源需求低、保护完善等优点,逐步开展大容量设备的耐压试验势在必行。串联谐振耐压试验技术已经非常的成熟,对于容性试品的耐压试验,原有笨重的大功率变压器耐压试验设备必将被轻型的串联谐振耐压试验设备所替代,可在工程中大量采用。

参考文献

[1] 张豫仁. 高电压实验技术 [M]. 北京: 清华大学出版社,

1982.

[2] GB/T 16927. 1 - 1997, 高电压试验技术第一部分: 一般试验要求 [S].

[3] 国家技术监督局. 电气装置安装工程电气设备交接试验标准 [M]. 中国计划出版社, 2006.

[4] DL/T 474. 4 - 2006, 现场绝缘试验实施导则 交流耐压试验 [S].

[5] 西南电业管理局试验研究所. 高电压设备试验方法 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1993.

[6] DL/T 555 - 1994, 气体绝缘金属封闭电器现场耐压试验导则 [S].

[7] 中华人民共和国能源部. 电业安全工作规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1991.

作者简介:

黄建康 (1976—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统自动化及高压试验。

(收稿日期: 2009-10-14)

(上接第 3 页)

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

[7] 刘涌, 侯志俭, 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.

[8] 韩恺, 赵均, 钱积新. 电力系统机组组合问题的闭环粒子群算法 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (1): 36-40.

[9] V. S Pappal I Erlich A New Approach for Solving the Unit Commitment Problem by Adaptive Particle Swarm Optimization [J]. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE 20-24 July 2008: 1-6.

[10] 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 PWRs 2006, 21 (1): 411-418.

[11] Lingfeng Wang Chanan Singh. Unit commitment considering generator outages through a mixed-integer particle swarm optimization algorithm [J]. Applied Soft Computing 2009, 9: 947-953.

[12] Tsung-Ying Lee Chun-Lung Chen. Unit commitment

with probabilistic reserve: An IPSO approach [J]. Energy conversion and management 2007, 48: 486-493.

[13] Xiaohui Yuan Hao Nie Anjun Su Liang Wang Yanbin Yuan. An improved binary particle swarm optimization for unit commitment problem [J]. Expert System with Applications 2009, (36): 8049-8055.

[14] 陈焯, 赵国波, 刘俊勇等. 用于机组组合优化的蚁群粒子群混合算法 [J]. 电网技术, 2008, 32 (6): 52-56.

[15] 蒋秀洁, 吴永华, 杨敏. 基于 PSO-GA 算法的电力系统机组组合研究 [J]. 继电器, 2006, 34 (5): 34-38.

[16] 娄素华, 余欣梅, 熊信良, 等. 电力系统机组启停优化问题的改进 DPSO 算法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (8): 30-35.

[17] P. Sriyanyong Y. H. Song. Unit Commitment Using Particle Swarm Optimization Combined with Lagrange Relaxation [J]. Brunel Inst of Power Syst, Brunel Univ, Uxbridge UK; Power Engineering Society General Meeting 2005. IEEE 12-16 June 2005, 3: 2752-2759.

作者简介:

赵辛欣 (1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行。

(收稿日期: 2009-09-18)