

基于二进制微分进化算法和目标函数分解的大规模机组组合求解

朱永利¹, 刘刚^{1,2}, 黄政², 谢伟³

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;

2. 贵州理工学院 电气与信息工程学院, 贵州 贵阳 550003;

3. 国网福建省电力有限公司南平供电公司, 福建 南平 353000)

摘要:为了避免在机组组合求解过程中将机组启停计划和负荷经济调度两者形成内外双层嵌套求解,从而导致计算比较耗时的问题,引入启运机组的总平均燃料成本和系统旋转备用剩余量这2个可调节的子目标,将传统的机组组合模型分解成2个独立的优化目标,构建了一种基于目标函数分解的二阶段可独立求解的机组组合模型。采用一种改进的二进制微分进化算法对第一阶段的机组启停计划目标进行求解,对每个代表机组启停状态的个体编码采用机组最小启停时间约束、旋转备用约束、机组去组合等处理机制,有效保证了每个解的有效性并缩小了算法的搜索空间。根据求解得到的机组启停状态,采用半定规划法求解第二阶段的负荷经济调度目标。采用经典的测试算例验证了所提方法在大规模机组组合求解中的有效性。

关键词:机组组合;经济调度;二进制微分进化算法;目标函数分解;平均燃料成本;半定规划法

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909010

0 引言

电力系统机组组合 UC (Unit Commitment) 的目的是在负荷预测基础上,在满足一系列约束条件的情况下确定火电机组在未来一段时间内(24~168 h)的启停和出力计划,并实现系统运行成本的最小化。通过对 UC 的优化求解可为发电企业带来显著的经济效益,这也是学者不断探索 UC 问题更有效求解方法的主要原因^[1-3]。

目前,UC 问题的求解算法大致可分为 2 类:第 1 类为传统的确定性方法,如优先级列表 PL (Priority List) 法^[4]、拉格朗日松弛 LR (Lagrangian Relaxation) 法^[5]、分支定界 BB (Branch-and-Bound) 法^[6]、动态规划 DP (Dynamic Programming) 法^[7]、量子近似动态规划 QI-ADP (Quantum Inspired-Approximate Dynamic Programming)^[8] 和混合整数线性规划 MILP (Mixed Integer Linear Programming) 法^[9] 等;第 2 类为启发式随机优化方法,如遗传算法 GA (Genetic Algorithm)^[10]、模拟退火算法 SAA (Simulated Annealing

Algorithm)^[11]、进化规划 EP (Evolutionary Programming) 法^[12]、粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法^[13] 和微分进化 DE (Differential Evolution) 算法^[14-15] 等。传统方法的优点是有确定的迭代解析式,收敛速度较快且已有不少成熟的求解器供研究者使用,但其也存在一些缺点,如:DP 法容易陷入维数灾难问题;PL 法由于求解过程过于简单,很难得到较优的结果;BB 法会随着求解维数增加导致其求解时间呈指数级数增长。启发式方法的优点是可不拘于目标函数的形式,对非凸目标函数和非确定性多项式难 (NP-hard) 问题通常能获得较好的效果,但也存在容易早熟、对参数设置较为敏感等问题。另外,尤其当变量维数或循环嵌套较多时,启发式方法也较耗时。例如,在求解 UC 问题时,一些方法需将经济调度子问题嵌套在总目标函数中进行求解,每个代表机组启停状态的编码都会对应着一个经济调度子问题^[16-17],在程序中成倍增加了循环次数,这大幅增加了算法的计算时间。另外,大多数文献只对 100 台及以下规模的 UC 问题进行了研究,对 100 台机组以上规模的研究却很鲜见,在上述算法中仅文献^[8] 对 100 台规模以上的 UC 问题进行了求解。

基于上述分析,本文提出一种基于对 UC 问题目标函数进行分解的求解方法来避免嵌套求解以达到缩短算法求解时间的目的,并尝试对大规模 UC 的求解进行探索。该方法通过引入机组平均燃料成本和旋转备用剩余量这 2 个可调节的惩罚量,将 UC 问题的混合整数优化目标分解成机组启停计划优化目标和经济调度这 2 个独立的目标函数。机组启停计划

收稿日期:2018-12-17;修回日期:2019-09-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677072);贵州省联合基金资助项目(LH[2016]7103);贵州理工学院高层次人才科研启动经费资助项目(XJGC20150401);贵州理工学院学术新苗培养及探索创新项目([2017]5789-22)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677072),the Joint Fund Project of Guizhou Province(LH[2016]7103),the Foundation for High-level Talents of Guizhou Institute of Technology (XJGC20150401) and the Foundation for Academic Cultivation and Innovation of Guizhou Institute of Technology([2017]5789-22)

优化目标采用一种控制参数少、求解快速高效的改进二进制微分进化 BDE(Binary Differential Evolution)算法进行求解。在求解机组启停计划的过程中,根据 UC 问题的特点,先对机组的启停最小时间进行约束,再根据平均燃料成本确定开机顺序并选择起运机组,然后在保证满足旋转备用约束的情况下对机组进行去组合处理,最后对去组合处理后的机组状态进行修复以保证不违反最小启停时间约束,这些操作大幅缩减了算法的搜索空间并保证了了解的可行性。在求解得到机组启停计划后,根据该启停计划采用半定规划 SDP(Semi-Definite Programming)法^[18]求解经济调度的结果,并以经典的电力系统测试算例验证了本文所提方法的有效性。

1 UC 数学模型

1.1 目标函数及约束条件

(1) 目标函数。

UC 是在已知系统发电机组相关参数和负荷预测的基础上,以系统的总发电成本最小化为目标,确定机组在一定时段内的启停和出力计划,其目标函数通常由燃料成本和机组启停费用组成,如式(1)所示。

$$F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [f(P_{i,t})u_{i,t} + C_{S,i}u_{i,t}(1-u_{i,t-1}) + C_{D,i}u_{i,t-1}(1-u_{i,t})] \quad (1)$$

其中, T 为时段数,各时段时长为 1 h; N 为机组数; $u_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的运行状态,取值为 1 表示开机,取值为 0 表示停机; $f(P_{i,t})$ 为机组 i 的燃料成本, $P_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的出力; $C_{S,i}$ 和 $C_{D,i}$ 分别为机组 i 的启动成本和停机成本。 $f(P_{i,t})$ 通常由二次函数拟合,如式(2)所示。

$$f(P_{i,t}) = aP_{i,t}^2 + bP_{i,t} + c \quad (2)$$

其中, a 、 b 、 c 为机组的燃料成本系数。停机成本 $C_{D,i}$ 通常为常数,本文中设该成本为 0,而启动成本 $C_{S,i}$ 如式(3)所示。

$$C_{S,i} = \begin{cases} C_{\text{hot},i} & T_{i,\text{off}} \leq X_{i,\text{off}} \leq T_{i,\text{off}} + T_{i,\text{cs}} \\ C_{\text{cold},i} & X_{i,\text{off}} > T_{i,\text{off}} + T_{i,\text{cs}} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $C_{\text{hot},i}$ 、 $C_{\text{cold},i}$ 分别为机组 i 的热启动成本、冷启动成本; $X_{i,\text{off}}$ 为机组 i 的连续停机时间; $T_{i,\text{off}}$ 、 $T_{i,\text{cs}}$ 分别为机组 i 的最小停机时间、冷启动时间。

(2) 约束条件。

功率平衡约束为:

$$P_{D,t} = \sum_{i=1}^N u_{i,t} P_{i,t} \quad (4)$$

旋转备用约束为:

$$\sum_{i=1}^N u_{i,t} P_{i,\text{max}} \geq P_{D,t} + P_{R,t} \quad (5)$$

机组出力约束为:

$$P_{i,\text{min}} \leq P_{i,t} < P_{i,\text{max}} \quad (6)$$

机组最小启停时间约束为:

$$\begin{cases} X_{i,\text{off}} \geq T_{i,\text{off}} \\ X_{i,\text{on}} \geq T_{i,\text{on}} \end{cases} \quad (7)$$

机组出力爬坡约束为:

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq R_{U,i} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \geq R_{D,i} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $P_{D,t}$ 为时段 t 的负荷需求; $P_{R,t}$ 为时段 t 的系统旋转备用需求; $P_{i,\text{max}}$ 、 $P_{i,\text{min}}$ 分别为机组 i 的出力上、下限; $X_{i,\text{on}}$ 、 $T_{i,\text{on}}$ 分别为机组 i 的连续开机时间、最小开机时间; $R_{U,i}$ 、 $R_{D,i}$ 分别为机组 i 在该时段内的最大爬坡速率、最大滑坡速率。

1.2 目标函数分解

UC 的目标函数中同时包含了整数变量和连续变量,这 2 种变量是相互耦合的。许多文献通常是将目标函数形成启停成本和经济调度内外双层嵌套的优化问题进行求解,即在每次迭代中都要求解每个机组状态编码所对应的经济调度子问题。当机组数量较多时,该方法会因有太多的嵌套循环而使得算法非常耗时。为了缩短求解时间,本文考虑将 UC 的目标函数分解成 2 个独立的子目标,前一个子目标用于优化机组的启停计划,后一个子目标则根据前一个子目标得到的机组启停状态进行经济调度,UC 的总运行费用由前一阶段的启停成本和后一阶段的燃料成本组成。然而,大多文献中的结果都表明并不是采用越低的启停成本就能得到越小的燃料成本^[1-2],从而使总运行成本更低,因此直接分解目标函数并不可行。同时笔者也发现,不少研究中都根据满负荷平均燃料成本 FLAC(Full Load Average production Cost)来确定机组的开机顺序^[1,16],说明 UC 的燃料成本和各起运机组的平均燃料成本有很大的关系,若起运机组的平均燃料成本越低,则意味着 UC 问题的燃料成本也越低。另外,如果机组中没有过组合现象(或过组合程度较小),则运行成本也会得到降低。因此本文拟引入机组平均燃料成本和旋转备用剩余量这 2 个惩罚量,将其加入机组启停成本目标中,将式(1)所示目标函数分解成 2 个独立的优化目标。前一阶段的目标为优化机组启停计划,后一阶段的目标是在前一阶段启停计划的基础上求解经济调度的负荷分配结果。

各机组的平均燃料成本为:

$$f_{\text{av},i} = \frac{f(P_i)}{P_i} \Big|_{P_i = \alpha_i P_{i,\text{max}}} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

其中, $f_{\text{av},i}$ 为机组 i 的平均燃料成本; P_i 为机组 i 的出力变量; α_i 为机组 i 最大出力的固定比例,当 $\alpha_i = 1$ 时 $f_{\text{av},i}$ 即为 FLAC,但实验中发现 α_i 按照式(10)取值时,效果会更好。

$$\alpha_i = 0.5(1 + P_{i,\min}/P_{i,\max}) \quad (10)$$

T 个时段内所有开机机组的平均燃料成本之和为:

$$F_{av,T} = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^N u_{i,t} f_{av,i} \quad (11)$$

时段 t 系统的旋转备用剩余量 $R_{S,t}$ 为:

$$R_{S,t} = \sum_{i=1}^N u_{i,t} P_{i,\max} - P_{D,t} - P_{R,t} \quad (12)$$

前一阶段机组启停计划的优化目标为:

$$\begin{cases} \min F_1 = \lambda_1 \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N C_{S,i} u_{i,t} (1 - u_{i,t-1}) + \\ \lambda_2 F_{av,T} + \lambda_3 \sum_{i=1}^T R_{S,t} \\ \text{s.t. 式 (5)、(7)} \end{cases} \quad (13)$$

其中, λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为调节参数, 用于调节各部分目标值的权重, 可根据系统参数的实际情况通过实验确定, 且应使各部分子目标的适应度值处于相近的数量级, 这样算法才能同时优化各部分的目标。通过 BDE 算法求解该目标函数, 得到各机组的启停状态, 然后根据确定的机组启停状态求解后一阶段机组的经济调度。

后一阶段的经济调度优化目标为:

$$\begin{cases} \min F_2 = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N f(P_{i,t}) u_{i,t} \Big|_{u_{i,t}=u_*} \\ \text{s.t. 式 (4)、(6)、(8)} \end{cases} \quad (14)$$

其中, u_* 为前一阶段的优化结果。这样 UC 的目标函数就被拆分成了 2 个独立的优化目标, 其中机组启停计划优化目标 F_1 中只含有整数变量, 而经济调度优化目标 F_2 中只含有实数变量。

2 改进 BDE 算法

DE 算法是由 Storn 提出的一种智能优化算法^[19], 其采用实数编码且算法的进化仅由变异、交叉和选择等几个简单操作实现, 简单、易用, 在实数优化问题中已有较多的应用并且获得了较好的效果^[20-21]。BDE 算法与实数 DE 算法有着相同的操作, 但因 BDE 算法中的个体是 0、1 编码, 因此需要对其变异操作进行改进。BDE 算法的流程如下。

2.1 初始化

BDE 算法的初始化是根据种群大小、机组数量和时段数等参数产生 1 组代表机组启停状态的二进制编码个体, 每个个体由如下矩阵表示:

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1,1} & \cdots & u_{1,t} & \cdots & u_{1,T} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ u_{i,1} & \cdots & u_{i,t} & \cdots & u_{i,T} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ u_{N,1} & \cdots & u_{N,t} & \cdots & u_{N,T} \end{bmatrix}_{N \times T} \quad (15)$$

其中, U 的第 i 行元素为机组 i 在 T 个时段的启停状态, 而第 t 列元素为各机组在时段 t 的启停情况。

2.2 变异操作

DE 算法中的变异个体由在种群中随机选择的几个个体通过差分操作产生, 其中最常用的变异算子为 DE / rand / 1 和 DE / best / 1, 可分别表示为^[20]:

$$V_j^G = U_{r_1}^G + F_b (U_{r_2}^G - U_{r_3}^G) \quad j=1, 2, \dots, N_p \quad (16)$$

$$V_j^G = U_b^G + F_b (U_{r_1}^G - U_{r_2}^G) \quad j=1, 2, \dots, N_p \quad (17)$$

其中, V_j^G 为第 G 代的变异个体; G 为当前迭代次数; U_b^G 为当前迭代中的最优个体; r_1, r_2, r_3 为区间 $[1, N_p]$ 内不重复的随机整数; N_p 为种群规模; F_b 为变异算子。

在本文的 BDE 算法中, 由于个体是二进制编码, 式(16)或式(17)所示的实数变异操作已不适用。本文借鉴式(17), 由式(17)中的当前最佳个体和随机选择的 2 个父个体按表 1 所示规则产生变异个体。表 1 中, $U_{b,k}^G, U_{r_1,k}^G, U_{r_2,k}^G$ 为各参与变异个体的第 k 个元素; $V_{j,k}^G$ 为第 j 变异个体的第 k 个元素; r 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数。

表 1 二进制变异规则

$U_{b,k}^G$	$U_{r_1,k}^G$	$U_{r_2,k}^G$	$V_{j,k}^G$
0	0	0	0
0	0	1	当 $r < F_b$ 时, 取值为 1; 否则取值为 0
0	1	0	当 $r < F_b$ 时, 取值为 1; 否则取值为 0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	当 $r < F_b$ 时, 取值为 0; 否则取值为 1
1	1	0	当 $r < F_b$ 时, 取值为 0; 否则取值为 1
1	1	1	1

变异算子 F_b (或称变异概率) 是 DE 算法的一个重要参数, 其控制着个体变异的程度, 为了克服 DE 算法的早熟现象, 本文采用一种自适应的变异算子, 如式(18)所示。

$$F_b = F_{b0} 2^{\exp\left(1 - \frac{G_{\max}}{G_{\max} + 1 - G}\right)} \quad (18)$$

其中, F_{b0} 为迭代终止算子, 取值范围为 $[0.1, 0.6]$ ^[22], 初始时 $F_b = 2F_{b0}$, 到后期逐渐接近 F_{b0} ; G_{\max} 为最大迭代次数。

2.3 交叉操作

变异操作完成后, BDE 算法根据一定的概率在父个体和变异个体间进行交叉操作产生试验个体, 具体操作如下:

$$Z_{j,k}^G = \begin{cases} U_{j,k}^G & r \leq C_R \\ V_{j,k}^G & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

其中, $Z_{j,k}^G$ 为第 G 代产生的第 j 个试验个体的第 k 个元素; C_R 为交叉概率。

2.4 选择操作

选择操作中通过贪婪法从试验个体和父个体中选择新一代个体,实现优胜劣汰,具体操作如式(20)所示。

$$U_j^{G+1} = \begin{cases} Z_j^G & F_1(Z_j^G) \leq F_1(U_j^G) \\ U_j^G & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

其中, U_j^{G+1} 为生成的新一代个体; Z_j^G 、 U_j^G 分别为第 j 个试验个体和父个体; $F_1(\cdot)$ 为目标函数值。

3 模型求解流程

3.1 机组状态约束处理机制

当采用 BDE 算法求解机组启停计划时,每个个体代表各机组在各时段的启停标志,但这些个体是随机生成的二进制编码,很可能并不满足机组启停的最小时间约束和旋转备用约束。因此需要对不满足最小启停时间约束和旋转备用约束的编码进行处理。

(1) 机组启停时间约束处理。

机组启停时间约束包含最小开机时间约束和最小停机时间约束。对机组 i 的最小启停时间约束的处理操作为:对机组 i 在各时段的状态进行检查,如果其在时段 t 的状态为 0 且在时段 $t-1$ 的状态为 1,则判断该机组在时段 $t-1$ 的连续运行时间 $X_{i,on}$ 是否大于等于最小开机时间 $T_{i,on}$,如果 $X_{i,on} \geq T_{i,on}$,则说明机组 i 在时段 t 可以关机,否则将机组 i 在时段 t 的状态置为 1 且相应的 $X_{i,on}$ 加 1;如果机组 i 在时段 t 的状态为 1 且在时段 $t-1$ 的状态为 0,则判断该机组在时段 $t-1$ 的连续停运时间 $X_{i,off}$ 是否大于等于最小停运时间 $T_{i,off}$,如果 $X_{i,off} \geq T_{i,off}$,则说明机组 i 在时段 t 可以停机,否则将机组 i 在时段 t 的状态置为 0 且相应的 $X_{i,off}$ 加 1。

(2) 旋转备用约束处理。

旋转备用是系统能安全运行的保障,其约束如式(5)所示,即时段 t 系统的旋转备用量(由该时段所有开机机组的出力上限之和减去该时段的负荷需求)要大于等于该时段的旋转备用需求。本文根据式(9)所示的机组平均燃料成本(由小到大)确定开机顺序,平均燃料成本低的机组会被优先开机。具体的处理步骤为:计算每个时段的系统旋转备用量,如果该时段的旋转备用量小于旋转备用需求,则从未开机的机组中按开机顺序选择相应的机组开机,直到满足旋转备用约束条件为止。

(3) 机组去组合处理。

在完成机组的最小启停时间约束处理后,在某些时段可能会产生过量的旋转备用,这将导致运行成本的增加,因此需要去除多余的开机机组。同样地,去组合机组的顺序也是根据机组平均燃料成本来确定的,不过是按照平均燃料成本从大到小的顺

序,平均燃料成本高的机组会被优先去除。时段 t 的机组去组合步骤为:根据式(12)计算时段 t 的旋转备用剩余量 $R_{s,t}$,如果 $R_{s,t} > 0$,则该时段可能有过组合现象存在,首先判断该机组被停机后能否满足旋转备用需求,若不能满足旋转备用需求,则说明不需要去组合处理,否则将已开机的机组按平均燃料成本从大到小进行排序,并检查排在首位的机组能否停机,即如果该机组在时段 $t-1$ 的状态为 0 或者在时段 $t-1$ 的状态为 1 且其连续开机时间已大于等于最小开机时间,则可将该机组在时段 t 的状态置 0 做停机处理,否则需考虑排在其后的一台机组。重复上述操作,直到不能再去除任何机组。

(4) 机组状态修复。

在对机组进行去组合处理时,只是对机组 i 在时段 t 的停机条件进行了检查,但停机后可能会造成该机组在时段 $t+1$ 违反最小停机时间约束,因此需要对机组的状态进行修复。修复方法为:检查机组 i 在各时段的状态,如果该机组在时段 t 的状态为 1 且在时段 $t-1$ 的状态为 0,则判断该机组在时段 $t-1$ 的 $X_{i,off}$ 是否大于等于最小停运时间 $T_{i,off}$,如果 $X_{i,off} \geq T_{i,off}$,则不做处理,否则将在时段 t 之前状态连续为 0 的机组状态置为 1。

3.2 UC 问题的求解流程

本文 UC 的求解流程可归纳如下:

- (1) 读取系统的参数;
- (2) 设置 BDE 算法的参数,并初始化种群;
- (3) 根据 3.1 节对初始种群进行约束处理;
- (4) 根据式(13)计算目标函数适应值,并记录当前的最佳个体和最佳适应值;
- (5) 根据表 1 的变异操作规则产生变异个体,根据式(19)所示的交叉操作产生新的试验个体并对新个体进行约束处理;
- (6) 根据式(20)进行选择操作,产生下一代种群;
- (7) 判断是否到达最大迭代次数,如果是则转步骤(8),否则转步骤(4);
- (8) 根据上述步骤得出的最佳机组启停状态,采用 SDP 法求解式(14)所示的经济调度问题;
- (9) 输出启停状态、机组出力计划和运行成本等结果。

4 算例分析

本文用 IEEE 经典测试算例来验证所提模型和求解算法的有效性,系统参数见文献[10],该测试系统中的旋转备用需求取负荷需求的 10%,但并未考虑机组的爬坡约束。另外,为了测试本文所提模型和算法在大规模 UC 问题中的求解效果,除了对大多文献中所采用的 10~100 台机组规模进行求解外,

本文还以100台机组规模的参数为基础,将求解规模扩展至1000台机组,相应的负荷需求也成倍增长。本文的测试硬件平台为Core i5 2.5 GHz CPU、8 GB内存的笔记本,软件平台为Windows 7+MATLAB 2012a。首先采用BDE算法优化目标 F_1 ,得出机组的启停状态和启停费用,然后根据确定的机组状态通过YALMIP工具箱调用sedumi SDP求解器求解经济调度问题,得到出力计划和燃料费用。BDE算法的参数设置如下: $G_{\max}=200$, $F_{b0}=0.5$, $C_R=0.7$,最优种群规模 N_p 通过下文的实验确定。

4.1 种群规模和启停计划优化目标调节参数的确定

在机组启停计划目标 F_1 中,各部分子目标都有一个调节参数,即 $\lambda_1-\lambda_3$,这些调节参数决定着各部分子目标在总目标适应度中的权重,对优化结果有很大的影响。下面以10机参数为例,通过对不同组合的调节参数所对应的优化结果,观察各调节参数对UC求解结果的影响(在 $N_p=40$ 的条件下进行)。表2给出了4种调节参数组合下机组启停成本、燃料成本和总发电成本的结果(测试结果取5次独立计算中的最优的1组)。

表2 4种调节参数组合下的优化结果

Table 2 Optimization results under four combinations of adjustment parameters

组合	λ_1	λ_2	λ_3	启动成本/\$	燃料成本/\$	总发电成本/\$
1	1	0	0	3180	580958.58	584138.58
2	0	1	0	4350	559952.02	564302.02
3	0	0	1	4650	560217.51	564867.51
4	1	1.5	0.5	4090	559847.69	563937.69

表2中,参数组合1下的情形相当于只是以启动成本最小化为目标进行优化,此时得到的能满足约束条件的机组最小启动成本为\$3180,但相应的燃料成本高达\$580958.58,由此可看出并不是采用越低的启动成本就能得到越小的总发电成本。当分别以开机机组的总平均燃料成本和总旋转备用剩余量为优化目标(分别对应参数组合2和参数组合3的优化情形)时,启动成本有所增加,但燃料成本却下降不少,反而使得总发电成本得到降低。通过测试可知,当取 $\lambda_1=1$ 、 $\lambda_2=1.5$ 、 $\lambda_3=0.5$ (即参数组合4)时,能够取得较好的优化结果,此时10台机组的最小总成本为\$563937.69,其中启动成本为\$4090。因此本文测试中取 $\lambda_1=1$ 、 $\lambda_2=1.5$ 、 $\lambda_3=0.5$ 。

另外,在随机性优化算法中,种群规模对求解结果有着很大的影响,当种群规模较小时,虽可缩短计算时间,但寻优能力会受到种群多样性的限制,很难找到最优解;而当种群规模过大时,虽增强了算法全局解的寻优能力,但计算会相对耗时。因此,需要在

种群多样性和计算时间方面进行折中。在上文所确定的调节参数组合下,利用本文所提模型对20、60、和100台机组在不同种群规模下的UC进行求解以分析种群规模对求解结果的影响,优化结果如表3所示(表中结果为10次独立计算的优化结果)。

表3 种群规模对优化结果的影响

Table 3 Effects of population size on optimization results

机组规模/台	N_p	F_1 /\$				平均耗时/s
		最优值	最劣值	平均值	标准差	
20	10	1123836	1124748	1124339	164	12
	20	1123783	1124541	1124154	327	21
	40	1123297	1124461	1123407	314	31
	80	1123297	1124340	1123398	332	56
60	10	3364197	3366397	3365066	863	32
	20	3363704	3366022	3364717	851	49
	40	3362040	3363907	3363505	667	75
	80	3362040	3363885	3363458	829	146
100	10	5607313	5609472	5608225	882	64
	20	5604534	5606541	5605827	908	85
	40	2601942	2605204	2604070	852	130
	80	2601942	2604910	2603998	843	238

可以看出,随着种群规模的增加,各机组规模下的平均运行成本均得到了降低,其中相较于 $N_p=40$ 的情形, $N_p=80$ 时的成本也有所下降,但幅度已不太明显,且 $N_p=40$ 时的标准偏差要更小。因此,根据测试结果,当机组规模不超过100台时,本文折中地选取种群规模为40,但为了尽可能增加种群的多样性,在100台机组以上规模的测试中,种群规模选取为80。

4.2 求解结果比较与分析

除了表3中的3种机组规模,本节对10~1000台机组中其他机组规模下的UC问题进行求解,各机组规模下的启动成本、燃料成本、总发电成本和计算时间如表4所示,其中10~100台机组规模取10次运行中的最优结果,200~1000台机组规模取5次运行中的最优结果。

表4 不同机组规模下的优化结果

Table 4 Optimization results under different unit sizes

机组规模/台	启动成本/\$	燃料成本/\$	总发电成本/\$	计算时间/s
10	4090	559847.69	563937.69	17
20	8400	1114897.43	1123297.43	31
40	16940	2226017.10	2242957.10	51
60	25980	3336059.93	3362039.93	75
80	34940	4448161.75	4483101.75	94
100	43420	5558521.89	5601941.89	130
200	90370	11118756.24	11209126.24	476
400	185150	22236672.96	22421822.96	840
600	278580	33347603.81	33626183.81	1238
800	373560	44466775.32	44840335.32	1543
1000	469100	55588724.25	56057824.25	1995

图1给出了本文所提模型求解时间和机组规模

的关系情形。从图中可以看出,在同样的迭代次数和种群规模下,本文所提模型的计算时间基本上与机组数量呈线性关系。附录中的表 A1 给出了 10 机测试系统的 UC 优化结果,其中出力为 0 意味着机组在该时段为停运状态。可以看出,机组的最小启停时间、旋转备用等约束条件是严格满足的,说明本文所提约束条件处理机制能有效保证机组启停求解的可行性。

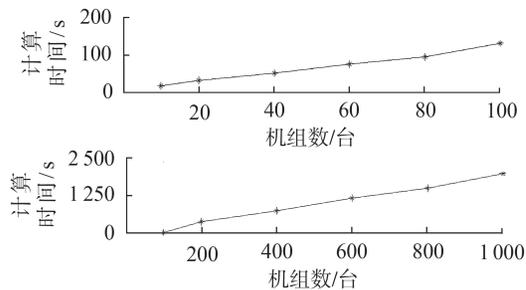


图 1 模型求解时间与机组规模的关系

Fig.1 Relationship between computing time of proposed model and unit size

为了验证本文所提求解方法的优劣,将本文所提方法在各测试机组规模下得到的求解结果(总发电成本与计算时间)与 EPL^[4]、ELR^[5]、MILP^[9]、QI-ADP^[8]、GA^[10]、EP^[12]、BADE^[14]和 QBPSO^[13]这 8 种求解方法的求解结果进行比较。表 5 为 10 机和 100 机在不同求解方法下的结果比较(更多机组规模的详细比较见附录中的表 A2、A3)。

表 5 不同方法下 10 机和 100 机的求解结果对比
Table 5 Comparison of solution results of 10- and 100-unit under different methods

机组规模 / 台	求解方法	总发电成本 / \$	计算时间 / s
10	EPL	563 977	1
	ELR	563 977	4
	MILP	563 938	1
	QI-ADP	563 977	12
	GA	565 825	221
	EP	564 551	100
	BADE	563 938	—
	QBPSO	563 977	18
	本文方法	563 938	17
100	EPL	5 608 440	65
	ELR	5 605 678	345
	MILP	5 597 770	6 341
	QI-ADP	5 605 622	138
	GA	5 627 437	15 733
	EP	5 623 885	6 120
	BADE	5 602 324	—
	QBPSO	5 602 486	833
	本文方法	5 601 942	130

由表 5 和附录中表 A2 可知,本文方法在求解 10 机、20 机、200 机、800 机和 1 000 机规模的 UC 问题中都得到了最小的发电成本,且其他测试机组规模下

的结果也非常接近其他方法的最小发电成本。需要指出的是,虽然 MILP 法在所测试的算例中均得到了最低的成本,但该方法采用分段线性函数去逼近模型中的二次燃料成本函数,当机组规模较大时可能会有精度的损失。另外,笔者还发现有些文献给出的结果有一定的问题,如文献[2]中 10 机的求解成本为 \$ 554 514,但其给出的启停计划中有机组违反了最小启停时间约束,该解并不是可行解;文献[14]中给出的 10 机启停计划经过验证并不能得到 \$ 563 938 的成本。对于计算时间,由于各种方法的计算环境不同,所以计算时间不具备直接的可比性。单从计算耗时来看,EPL 法的求解时间最少,但其优化成本要差一些。若从计算时间与机组规模的关系来看,本文方法的计算时间和 QI-ADP 法的计算时间都基本上与机组数量呈线性关系,而 MILP、GA、EP 和 QBPSO 等方法的计算时间与机组数量不呈线性关系,且机组数量较大时会变得非常耗时。上述对比结果说明了本文所提对目标函数进行分解的 UC 分阶段求解模型是有效的,并且本文所提 BDE 算法在相同的迭代次数和种群规模下,均可实现对各机组规模的 UC 问题进行有效求解,当机组数量增加时,也无需增加种群数和迭代次数。

上述各机组规模的测试中均未考虑机组出力的爬坡约束条件,当考虑机组爬坡约束后,机组的出力会受到一定的限制,机组的出力不可能直接从 0 上升到最大值,也不可能由最大值直接下降到 0。本文以各机组最大出力的 25% 作为该机组的上、下爬坡速率。表 6 给出了考虑爬坡约束时 10~100 机的总发电成本。从表中可以看出,当考虑爬坡约束条件后,总发电成本增加不少。

表 6 考虑爬坡约束时的优化结果
Table 6 Optimization results when considering ramp constraint

机组规模 / 台	总发电成本 / \$	机组规模 / 台	总发电成本 / \$
10	565 064	60	3 375 625
20	1 126 709	80	4 503 958
40	2 251 175	100	5 624 827

5 结论

本文根据 UC 问题中总成本的构成特点和约束条件的特点,在 UC 的启停费用目标中附加了启运机组的总平均燃料成本和系统旋转备用剩余量 2 个可调节量,将传统的同时包含整数和实数的 UC 混合整数优化目标分解成机组启停计划和负荷经济分配 2 个可独立求解的优化目标,因为避免了嵌套求解,大幅缩短了算法的求解时间。所采用的改进 BDE 算法能够对机组启停计划目标进行有效的求解,且根据求解得到的机组启停状态能够用 SDP 法求解得到

较低的燃料成本,从而使得UC的总发电成本也较低。在求解过程中,采用了机组最小启停时间约束、系统旋转备用约束、机组去组合和机组状态修复等处理机制,有效地保障了机组启停状态编码的有效性,并缩减了BDE算法的搜索空间。从仿真效果来看,本文所提模型和求解方法得到了较好的结果,能够有效求解大规模UC问题。在下一阶段的研究中,笔者将在此基础上进一步考虑含风电、水电等清洁能源的UC问题的建模及求解。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] YU X,ZHANG X Q. Unit commitment using Lagrangian relaxation and particle swarm optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2014,61:510-522.
- [2] SARAVANAN B,KUMAR C,KOTHARI D P. A solution to unit commitment problem using fire works algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2016,77: 221-227.
- [3] ALEMANY J,KASPRZYK L,MAGNAGO F. Effects of binary variables in mixed integer linear programming based unit commitment in large-scale electricity markets[J]. Electric Power Systems Research,2018,160:429-438.
- [4] SENJYU T,SHIMABUKURO K,UEZATO K,et al. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2003,18(2):882-888.
- [5] ONGSAKUL W,PETCHARAKS N. Unit commitment by enhanced adaptive Lagrangian relaxation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2004,19(1):620-628.
- [6] COHEN A,YOSHIMURA M. A branch-and-bound algorithm for unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1983,102(2):444-451.
- [7] VAN DEN BOSCH P J,HONDERD G. A solution of the unit commitment problem via decomposition and dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1985,104(7):1684-1690.
- [8] 覃华,韦化. 大规模机组组合问题的量子近似动态规划[J]. 中国电机工程学报,2015,35(19):4918-4929.
QIN Hua,WEI Hua. A quantum-inspired approximate dynamic programming algorithm for large-scale unit commitment problems[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(19):4918-4929.
- [9] VIANA A,PEDROSO J P. A new MILP-based approach for unit commitment in power production planning [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2013,44 (1):997-1005.
- [10] KAZARLIS S A,BAKIRTZIS A G,PETRIDIS V. A genetic algorithm solution to the unit commitment problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1996,11(1):83-92.
- [11] MANTAWY A H,ABDEL-MAGID Y L,SELIM S Z. A simulated annealing algorithm for unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1998,13(1):197-204.
- [12] JUSTE K A,KITA H,TANAKA E,et al. An evolutionary programming solution to the unit commitment problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1999,14(4):1452-1459.
- [13] JEONG Y W,PARK J B,JANG S H,et al. A new quantum-inspired binary PSO:application to unit commitment problems for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010,25(3):1486-1495.
- [14] 夏澍,张建华,刘自发,等. 基于二进制自适应微分进化算法的机组组合问题[J]. 电网技术,2010,34(4):110-114.
XIA Shu,ZHANG Jianhua,LIU Zifa,et al. A binary adaptive differential evolution algorithm for unit commitment[J]. Power System Technology,2010,34(4):110-114.
- [15] DATTA D,DUTTA S. A binary-real-coded differential evolution for unit commitment problem[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2012,42(1):517-524.
- [16] 陈海良,郭瑞鹏. 基于改进离散粒子群算法的电力系统机组组合问题[J]. 电网技术,2011,35(12):94-99.
CHEN Hailiang,GUO Ruipeng. Unit commitment based on improved discrete particle swarm optimization[J]. Power System Technology,2011,35(12):94-99.
- [17] 李整,谭文,秦金磊. 一种用于机组组合问题的改进双重粒子群算法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):189-195.
LI Zheng,TAN Wen,QIN Jinlei. An improved dual particle swarm optimization algorithm for unit commitment problem [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):189-195.
- [18] MHANNA S N,JABR R A. Application of semidefinite programming relaxation and selective pruning to the unit commitment problem[J]. Electric Power Systems Research,2012,90: 85-92.
- [19] STORN R. On the usage of differential evolution for function optimization[C]//Proceedings of North American Fuzzy Information Processing. Berkeley,CA,USA:IEEE,1997:519-523.
- [20] JENA C,BASU M,PANIGRAHI C K. Improved differential evolution for combined heat and power economic dispatch [J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems,2016,17(2):151-163.
- [21] ZHANG C J,WU Y,GAO L,et al. A new constraint handling method for differential evolution solving non-convex economic dispatch problems with valve loading effect [C]// 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation(CEC). Vancouver,BC,Canada:IEEE,2016:1070-1076.
- [22] 刘刚,朱永利,蒋伟. 基于混合DE-PSO多目标算法的动态环境经济调度[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):1-7.
LIU Gang,ZHU Yongli,JIANG Wei. Dynamic economic emission dispatch based on hybrid DE-PSO multi-objective algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(8): 1-7.

作者简介:



朱永利

朱永利(1963—),男,河北保定人,教授,博士,主要研究方向为输变电设备在线监测、智能分析以及智能电网(E-mail: yonglipw@163.com);

刘刚(1985—),男,贵州贵阳人,博士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行(E-mail: sino-phos@163.com);

黄政(1981—),男,贵州贵阳人,教授,博士,研究方向为微电网控制以及能量管理(E-mail: huangz888@163.com)。

(下转第173页 continued on page 173)

tive power planning methodology considering static and transient voltage stability for AC-DC hybrid system[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(11):3078-3086.

[20] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004:320-322.

作者简介:

邱 威(1988—),男,江西都昌人,高级工程师,博士,



邱 威

研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail: qiu-wei@sgcc.com.cn);

贺静波(1983—),男,湖南湘乡人,高级工程师,博士,研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail:he-jingbo@sgcc.com.cn);

于 钊(1979—),男,陕西咸阳人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail:yu-zhao@sgcc.com.cn)。

Transient voltage stability analysis of Hunan Power Grid with infeed UHVDC

QIU Wei¹, HE Jingbo¹, YU Zhao¹, XU Xialing², YANG Dan³, LIU Na⁴

(1. National Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China;

2. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China;

3. State Grid Hunan Electric Power Company Limited, Changsha 410007, China;

4. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: With the increasing growth of long distance trans-regional HVDC transmission system, the transient voltage stability problem of receiving-end system is becoming increasingly outstanding. The transient voltage stability of load center in Hunan Power Grid after the operation of ± 800 kV Qilian-Shaoshan UHVDC project is researched. Firstly, a transient voltage stability index is constructed, and its effectiveness is verified by Hunan Power Grid. Secondly, from the perspective of operation demand of actual power grid, a practical operation control method is proposed to ensure the transient voltage stability of receiving-end system, which is employed to develop the operation control strategy of Hunan Power Grid. Lastly, the major factors affecting the UHVDC power receiving capability of Hunan Power Grid are analyzed.

Key words: UHVDC; transient voltage stability; Hunan Power Grid; operation control strategy

(上接第 156 页 continued from page 156)

Large-scale unit commitment solution based on binary differential evolution algorithm and objective function decomposition

ZHU YongLi¹, LIU Gang^{1,2}, HUANG Zheng², XIE Wei³

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China;

3. Nanping Power Supply Company of State Grid Fujian Power Co., Ltd., Nanping 353000, China)

Abstract: In order to avoid the problem of time-consuming caused by the internal and external two-level nested solution of unit start-stop schedule and load economic dispatch in the solving process of UC (Unit Commitment), two adjustable sub-objectives, namely the total average fuel cost of start unit and the system's spare spinning reserve capacity, are introduced to decompose the traditional UC model into two independent optimization objectives, then a two-stage UC model based on the objective function decomposition is proposed, in which the sub-stage model can be solved independently. An improved BDE (Binary Differential Evolution) algorithm is used to solve the unit start-stop schedule objective in the first stage. The handling mechanisms such as the minimum unit start-stop time constraint, the spinning reserve capacity constraint, the unit de-commitment, and so on, are applied to each individual coding that represents the start-stop status of unit, which can effectively guarantee the validity of each solution and reduce the search space of the algorithm. According to the solved start-stop status of unit, the semi-definite programming method is used to solve the load economic dispatch objective in the second stage. The effectiveness of the proposed method in solving the large-scale UC is verified by a classical test example.

Key words: unit commitment; economic dispatch; binary differential evolution algorithm; objective function decomposition; average fuel cost; semi-definite programming method

附录

表 A1 10 机系统的 UC 优化结果
Table A1 UC optimization results of 10-unit system

时段	机组出力/MW										总出力/ MW	启动 成本/\$	燃料成本/\$	系统备用/ MW
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6	机组 7	机组 8	机组 9	机组 10				
1	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0	700	0	13683.13	210
2	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0	750	0	14554.50	160
3	455	370	0	0	25	0	0	0	0	0	850	900	16809.45	222
4	455	455	0	0	40	0	0	0	0	0	950	0	18597.67	122
5	455	390	0	130	25	0	0	0	0	0	1000	560	20020.02	202
6	455	360	130	130	25	0	0	0	0	0	1100	1100	22387.04	232
7	455	410	130	130	25	0	0	0	0	0	1150	0	23261.98	182
8	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1200	0	24150.34	132
9	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0	1300	860	27251.06	197
10	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0	1400	60	30057.55	152
11	455	455	130	130	162	73	25	10	10	0	1450	60	31916.06	157
12	455	455	130	130	162	80	25	43	10	10	1500	60	33890.16	162
13	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0	1400	0	30057.55	152
14	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0	1300	0	27251.06	197
15	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1200	0	24150.34	132
16	455	310	130	130	25	0	0	0	0	0	1050	0	21513.66	282
17	455	260	130	130	25	0	0	0	0	0	1000	0	20641.82	332
18	455	360	130	130	25	0	0	0	0	0	1100	0	22387.04	232
19	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1200	0	24150.34	132
20	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0	1400	490	30057.55	152
21	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0	1300	0	27251.06	197
22	455	455	0	0	145	20	25	0	0	0	1100	0	22735.52	137
23	455	425	0	0	0	20	0	0	0	0	900	0	17645.36	90
24	455	345	0	0	0	0	0	0	0	0	800	0	15427.42	110
合计											4090	559847.69	—	

表 A2 各种优化方法的总成本对比
Table A2 Comparison of total costs among different optimal methods

机组规模/台	总成本/\$									本文方法
	EPL	ELR	MILP	QI-ADP	GA	EP	BADE	QBPSO		
10	563977	563977	563938	563977	565825	564551	563938	563977	563938	
20	1124369	1123297	1123297	1124056	1126243	1125494	1123297	1123297	1123297	
40	2246508	2244237	2242575	2243721	2251911	2249093	2244740	2242957	2242957	
60	3366210	3363491	3359955	3362485	3376625	3371611	3362256	3361980	3362040	
80	4489322	4485633	—	4484974	4504933	4498479	4484136	4482085	4483102	
100	5608440	5605678	5597770	5605622	5627437	5623885	5602324	5602486	5601942	
200	—	—	—	11215894	—	—	—	—	11209126	
800	—	—	—	44845179	—	—	—	—	44840335	
1000	—	—	—	56058368	—	—	—	—	56057824	

表 A3 各种优化方法的计算时间对比
Table A3 Comparison of computing time among different optimal methods

机组规模/台	计算时间/s									本文方法
	EPL	ELR	MILP	QI-ADP	GA	EP	BADE	QBPSO		
10	1	4	1	12	221	100	—	18	17	
20	3	16	16	22	733	340	—	50	31	
40	12	52	960	47	2697	1176	—	158	51	
60	23	113	271	75	5840	2267	—	328	75	
80	44	209	—	99	10036	3584	—	554	94	
100	65	345	6341	138	15733	6120	—	833	130	
200	—	—	—	287	—	—	—	—	476	
800	—	—	—	1208	—	—	—	—	1543	
1000	—	—	—	1743	—	—	—	—	1995	