

计及短路电流约束的机组组合与支路投切联合优化启发式分解算法

徐良德¹, 吴楚钦^{2,3}, 郭挺¹, 刘明波^{2,3}, 胡林麟¹, 林舜江^{2,3}, 陈中豪¹, 李诗颖¹

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510630; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 3. 华南理工大学广东省绿色能源技术重点实验室, 广州 510640)

摘要: 在机组组合优化问题中, 考虑短路电流约束, 并与支路投切问题联合优化, 能够给出安全性和经济性更高的系统运行方案。但由于问题规模庞大, 其求解面临挑战。为此提出一种基于目标级联分析和大规模邻域搜索的启发式分解算法。首先建立计及短路电流约束的机组组合与支路投切联合优化模型, 然后将该模型转化为具有可分结构的混合整数线性规划模型, 再采用目标级联分析法将转化后的模型分解为上层协调主问题、下层整数规划子问题和线性规划子问题, 并在求解下层子问题时引入大规模邻域搜索。最后, 在 IEEE 54 机 118 节点系统和某实际电力系统上的仿真计算表明, 采用所提算法求解问题可以快速收敛得到可行解, 同时不影响解的质量。

关键词: 机组组合; 支路投切; 短路电流约束; 混合整数线性规划; 大规模邻域搜索; 目标级联分析

Heuristic Decomposition Algorithm for Joint Optimization of Unit Commitment and Branch Switching Incorporating Short-Circuit Current Constraints

XU Liangde¹, WU Chuqin^{2,3}, GUO Ting¹, LIU Mingbo^{2,3}, HU Linlin¹, LIN Shunjiang^{2,3},
CHEN Zhonghao¹, LI Shiyang¹

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510630, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In the optimization of unit commitment, it can provide a safer and more economical system operation scheme considering short-circuit current constraints and branch switching. However, its solution faces challenges due to the large scale of the problems. A heuristic decomposition algorithm is proposed based on analytical target cascade and large neighborhood search. First of all, the joint optimization model of unit commitment and branch switching incorporating short-circuit current constraints is established and hence it is transformed into a mixed integer linear programming model with a separable structure. Then, the analytical target cascade method is used to decompose the converted model into upper level coordination master problem, lower level integer programming and linear programming subproblems. Moreover, the large neighborhood search is introduced in solving the lower level subproblems. Finally, the simulations on IEEE 118-bus and 54-unit systems and an actual power system show that the proposed algorithm can quickly converge to feasible solutions, whereas not affecting solution quality.

Key words: unit commitment; branch switching; short-circuit current constraints; mixed integer linear programming; large neighborhood search; analytical target cascade

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077083); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZHKJXM20210047)。

Foundation item: Supported by the Natural Science Foundation of China (52077083); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GZHKJXM20210047).

0 引言

随着电力需求的快速增长,系统装机规模不断扩大,网架结构也在不断加强,导致短路电流问题日益突出^[1-3]。部分地区电网为了限制短路电流水平只能解环运行,但这会降低电网资源的利用率与供电可靠性。从系统运行角度来看,在安排运行方式时,对传统的机组组合问题加以扩展,即同时考虑输电线路的投切和短路电路电流约束是一条有效途径^[4-5]。计及短路电流约束的机组组合与支路投切联合优化问题通常可描述为一个混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)问题。由于计算三相短路电流需要求解节点阻抗矩阵,而其求解难度远比节点导纳矩阵复杂^[6],对于大规模系统来说,问题的求解规模随着变量和约束的增加呈指数型增长,因此如何提高该问题的求解效率是一个亟待解决的难题。

迄今,许多机组组合求解方法被提出,其中常见的有拉格朗日松弛算法、Benders 分解法等^[7]。但是分解算法在大规模问题以及复杂的约束条件下可能会出现收敛困难的情况^[8-9]。文献[10]提出一种求解机组组合(unit commitment, UC)问题的交替方向乘子法将 UC 问题分解为容易求解的两个子问题进行交替求解。有的学者尝试使用启发式算法求解 MILP 问题,主要包括粒子群算法、遗传算法、进化算法、模拟退火算法和人工神经网络算法等^[11]。在求解大规模 MILP 问题时,邻域搜索非常有效,它通常在 MILP 模型中添加切割平面或者通过固定变量取值减少搜索空间,并在剩下的求解空间里寻找更好的解,特别是大规模邻域搜索(large neighborhood search, LNS)在现有的解之上固定一些变量的取值并优化其余变量来构建邻域^[12]。文献[13-14]通过邻域搜索切分可行域,从而保证原 MILP 模型的最优性。此外,邻域搜索可与并行计算相结合进一步提高算法效率。文献[15]通过并行计算在不增加耗时的前提下收集更多求解信息。文献[16]通过交替方向乘子法将混合整数非线性规划问题分解以提高求解速度及求解质量。

针对计及短路电流约束的机组组合与支路投切联合优化问题^[17],通常采用 Benders 分解算法或与约束生成算法来实现对问题的分解以提高求解速度^[18-19],文献[18]采用 Benders 分解法将其进一步

分解为机组组合子问题、短路电流子问题及支路投切子问题,并通过各子问题之间的交互迭代实现对原问题的求解。文献[20]采用 Benders 分解法将原问题分解为主问题和几个子问题,以减少计算负担。但有学者指出采用 Benders 分解收敛缓慢,并寻求启发式方法来加速求解。因此本文提出一种基于目标级联分析和大规模邻域搜索的启发式分解算法(heuristic decomposition algorithm based on analytical target cascade and large neighborhood search, HDA-ATC-LNS),通过复制模型中的整数变量并且令其中一个复制变量为可连续变化,从而将原模型转化为具有可分结构的 MILP 模型,再采用目标级联分析(analytical target cascading, ATC)法将具有可分结构的 MILP 模型分解为上层协调主问题、下层整数规划(integer programming, IP)子问题和线性规划(linear programming, LP)子问题,而且 IP 子问题和 LP 子问题可以并行独立求解。为进一步提高其收敛速度和解的质量,在求解 IP 子问题和 LP 子问题时,分别对两个子问题引入大规模邻域搜索。

1 计及短路电流约束的机组组合与支路投切联合优化 MILP 模型

1.1 目标函数

目标函数由两部分构成,第一部分为发电机组运行总成本,其中包括最小出力成本、增量出力成本及开停机成本;第二部分为支路退出运行数量的惩罚项,表示应尽可能多地投入支路。因此优化目标为最小化发电机运行总成本和最大化支路投入运行数量,即:

$$\min \sum_{t=1}^T \left[\sum_{g=1}^{N_G} (\underline{C}_p^g u_G^{g,t} + C_p^g p_G^{g,t} + C_U^g s_U^{g,t} + C_D^g s_D^{g,t}) - A \sum_{l=1}^{N_L} s_L^{l,t} \right] \quad (1)$$

式中: $\underline{C}_p^g$ 为机组 g 最小出力成本系数; C_p^g 为增量出力成本系数; C_U^g 与 C_D^g 分别为发电机组 g 开停机的成本系数; A 为支路退出运行数目的惩罚系数; $s_L^{l,t}$ 、 $u_G^{g,t}$ 、 $s_U^{g,t}$ 和 $s_D^{g,t}$ 均为 0-1 整数变量,其中 $s_L^{l,t}$ 为支路投切状态变量, $s_L^{l,t} = 0$ 表示支路退出运行, $s_L^{l,t} = 1$ 表示支路投入运行; $u_G^{g,t}$ 为机组 g 开停机状态变量, $u_G^{g,t} = 0$ 表示发电机组处于停机状态, $u_G^{g,t} = 1$ 表示机组处于开机状态; $s_U^{g,t}$ 和 $s_D^{g,t}$ 分别为机组 g 开

停机动作变量, $s_U^{g,t} = 1$ 表示在 t 时刻有开机动作, $s_D^{g,t} = 1$ 表示在 t 时刻有停机动作; $p_G^{g,t}$ 为发电机 g 增量出力; T 为优化总时段数量; N_G 和 N_L 分别为发电机组数量和支路数量。

1.2 约束条件

1) 节点功率平衡方程

每个节点上连接的发电机输出功率与所连支路的流入功率之和应该与该节点上的负荷功率和所连支路的流出功率之和相等, 即:

$$\sum_{g \in S_G^n} (\underline{P}_G^g u_G^{g,t} + p_G^{g,t}) + \sum_{l \in S_{LIN}^n} p_L^{l,t} = \sum_{l \in S_{LOUT}^n} p_L^{l,t} + \sum_{d \in S_D^n} p_D^{d,t}, \quad (2)$$

$$\forall 1 \leq t \leq T, 1 \leq n \leq N_N$$

式中: $\underline{P}_G^g$ 为发电机 g 最小出力; $p_L^{l,t}$ 为支路 l 的传输功率; $p_D^{d,t}$ 为节点 n 上的负荷; s_G^n 和 s_D^n 分别为连接在节点 n 上的发电机组与负荷集合; s_{LIN}^n 和 s_{LOUT}^n 分别为节点 n 所连的流入支路与流出支路集合; N_N 为节点数量。

2) 系统备用容量约束

在每一个时段, 系统旋转备用容量都应该至少大于或等于该时段给定比例的总负荷, 即:

$$\sum_{g=1}^{N_G} r_G^{g,t} \geq R' \sum_{d=1}^{N_D} p_D^{d,t}, \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (3)$$

式中: $r_G^{g,t}$ 为机组旋转备用容量; R' 为负荷预测误差; N_D 为负荷数量。

3) 最小开停机时间约束

发电机在投入运行后, 必须连续运行一段时间, 即满足最小开机时间约束:

$$\sum_{\tau=t-T_U^g+1}^t s_U^{g,\tau} \leq u_G^{g,t}, \quad \forall T_U^g \leq t \leq T, 1 \leq g \leq N_G \quad (4)$$

式中 T_U^g 为发电机 g 最小开机时间。

类似地, 发电机在退入运行后必须连续停运一段时间, 即满足最小停机时间约束:

$$\sum_{\tau=t-T_D^g+1}^t s_D^{g,\tau} \leq 1 - u_G^{g,t}, \quad \forall T_D^g \leq t \leq T, 1 \leq g \leq N_G \quad (5)$$

式中 T_D^g 为发电机 g 最小停机时间。

4) 发电机开停机状态变量与动作变量之间的逻辑关系

发电机开停机状态变量与开停机动作变量之间应该满足:

$$u_G^{g,t} - u_G^{g,t-1} \leq s_U^{g,t} - s_D^{g,t}, \quad 1 \leq t \leq T, 1 \leq g \leq N_G \quad (6)$$

5) 发电机出力上下限约束

当发电机无开机动作时, 即 $s_U^{g,t} = 0$, 机组增量

出力与备用容量之和 ($p_G^{g,t} + r_G^{g,t}$) 不能超出其可调出力范围 ($\bar{P}_G^g - \underline{P}_G^g$); 有开机动作时, 即 $s_U^{g,t} = 1$, 机组增量出力与备用容量之和 ($p_G^{g,t} + r_G^{g,t}$) 不能超出 ($R_{SU}^g - \underline{P}_G^g$)。故机组增量出力与备用容量之和应该满足如下约束:

$$p_G^{g,t} + r_G^{g,t} \leq (\bar{P}_G^g - \underline{P}_G^g) u_G^{g,t} - (\bar{P}_G^g - R_{SU}^g) s_U^{g,t}, \quad (7)$$

$$\forall 1 \leq t \leq T, 1 \leq g \leq N_G$$

式中: $\bar{P}_G^g$ 和 $\underline{P}_G^g$ 分别为发电机 g 的出力上下限; R_{SU}^g 为发电机 g 的开机容量。

当发电机无停机动作时, 即 $s_D^{g,t+1} = 0$, 机组增量出力与备用容量之和 ($p_G^{g,t} + r_G^{g,t}$) 不能超出其可调出力范围 ($\bar{P}_G^g - \underline{P}_G^g$); 有停机动作时, 即 $s_D^{g,t+1} = 1$, 机组增量出力与备用容量之和 ($p_G^{g,t} + r_G^{g,t}$) 不能超出 ($R_{SD}^g - \underline{P}_G^g$)。故机组增量出力与备用容量之和应该满足如下约束:

$$p_G^{g,t} + r_G^{g,t} \leq (\bar{P}_G^g - \underline{P}_G^g) u_G^{g,t} - (\bar{P}_G^g - R_{SD}^g) s_D^{g,t+1}, \quad (8)$$

$$\forall 1 \leq t \leq T, 1 \leq g \leq N_G$$

6) 发电机爬坡/滑坡约束

发电机在相邻时段的爬坡速率必须满足:

$$p_G^{g,t} + r_G^{g,t} - p_G^{g,t-1} \leq R_U^g, \quad 1 \leq t \leq T, 1 \leq g \leq N_G \quad (9)$$

式中 R_U^g 为发电机 g 的爬坡率上限。

发电机在相邻时段的滑坡速率必须满足:

$$p_G^{g,t-1} - p_G^{g,t} \leq R_D^g, \quad 1 \leq t \leq T, 1 \leq g \leq N_G \quad (10)$$

式中 R_D^g 为发电机 g 的滑坡率上限。

7) 线路传输功率约束

线路传输功率应该满足:

$$-\bar{P}_L^l \leq p_L^{l,t} \leq \bar{P}_L^l, \quad 1 \leq t \leq T, 1 \leq l \leq N_L \quad (11)$$

式中 $\bar{P}_L^l$ 为线路传输功率上限。采用大 M 法^[18]线性化后, $p_L^{l,t}$ 可表示为:

$$-s_L^{l,t} M \leq X_L^l p_L^{l,t} \leq s_L^{l,t} M, \quad 1 \leq t \leq T, 1 \leq l \leq N_L \quad (12)$$

$$-(1 - s_L^{l,t}) M \leq X_L^l p_L^{l,t} - (\theta_N^{n_{OUT,t}} - \theta_N^{n_{IN,t}}) \leq (1 - s_L^{l,t}) M, \quad 1 \leq t \leq T, 1 \leq l \leq N_L$$

$$(13)$$

式中: $\theta_N^{n_{OUT,t}}$ 和 $\theta_N^{n_{IN,t}}$ 分别为线路首末端的节点相角; X_L^l 为线路电抗; M 为一个足够大的数。

8) 节点所连支路投切约束

节点 n 所连支路不能全部切除, 即不能产生孤立节点, 因此必须满足:

$$\sum_{l \in S_L^n} s_L^{l,t} \geq 1, \quad \forall 1 \leq t \leq T, 1 \leq n \leq N_N \quad (14)$$

式中 s_L^n 为节点 n 所连支路集合。

9) 短路电流约束

当节点 n 发生三相短路时, 该点的短路电流不超过开关遮断容量, 即:

$$\frac{1}{I_{NS}^n} \leq z^{n,n,t}, \forall 1 \leq t \leq T, 1 \leq n \leq N_N \quad (15)$$

式中: I_{NS}^n 为节点 n 的节点开关遮断容量; $z^{n,n,t}$ 为节点 n 的自阻抗。

由于节点导纳矩阵与节点阻抗矩阵之积为单位矩阵, 故经线性化后, 可按照下式求取节点阻抗矩阵:

$$\begin{aligned} -M[s_L^1, s_L^2, \dots, s_L^{N_L}, u_G^1, \dots, u_G^{N_G}]^T [1, \dots, 1]_{1 \times n} &\leq X', \\ \forall 1 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} X' &\leq M[s_L^1, s_L^2, \dots, s_L^{N_L}, u_G^1, \dots, u_G^{N_G}]^T [1, \dots, 1]_{1 \times n}, \\ \forall 1 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} -M(1 - [s_L^1, s_L^2, \dots, s_L^{N_L}, u_G^1, \dots, u_G^{N_G}]^T [1, \dots, 1]_{1 \times n}) \\ \leq X' - AZ', \forall 1 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} X' - AZ' &\leq M(1 - [s_L^1, s_L^2, \dots, s_L^{N_L}, u_G^1, \dots, u_G^{N_G}]^T \\ &[1, \dots, 1]_{1 \times n}), \forall 1 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (19)$$

$$A^T B_{\text{DIAG}} X' = E, \forall 1 \leq t \leq T \quad (20)$$

式中: A 为节点与线路的关联常数矩阵, 其中, 第 l 行表示线路 l 所连的节点, 第 n 列表示节点 n 所连的线路, 1 表示线路从节点接出, -1 则表示接入; B_{DIAG} 为线路电纳和发电机暂态电纳组成的对角阵; X' 为线性化等效矩阵; S'_{DIAG} 为发电机开停机状态变量和支路投切状态变量组成的对角阵; Z' 为节点阻抗矩阵。

1.3 模型简化

原始模型中每一个优化时段都会给出一组支路投切方案, 而在实际电网运行中并不会这样频繁改变支路运行方式。因此根据实际情况对支路的投切方案进行一定的简化, 每日只给出一组线路投切方案, 即这样可以将支路投切状态变量数量大大减少, 能够大大缩小问题规模以及加速求解过程。

2 MILP 模型的启发式分解算法

2.1 将 MILP 模型转化为具有可分结构的形式

计及短路电流约束的机组组合与支路投切联合

优化模型在数学上是一个典型的 MILP 问题, 以模型 P1 表示, 可用如下紧凑形式描述:

$$\min f(x, y) \quad (21)$$

$$\text{s.t. } h(x, y) \geq 0 \quad (22)$$

$$g_1(x) \geq 0 \quad (23)$$

$$g_2(y) \geq 0 \quad (24)$$

$$l \leq y \leq u \quad (25)$$

式中: $f(x, y)$ 为表示目标函数; x 为 0-1 整数变量组成的向量; y 为由连续变量组成的向量; l 和 u 分别为连续变量的上界和下界; 式(23)只包含 0-1 变量, 式(24)只包含连续变量。

将模型 P1 中的 0-1 整数变量 x 复制为两份, 即 x_1 和 x_2 。将 x_1 松弛为取值在 0 到 1 之间的连续变量, 替换式(22)中的 x ; x_2 仍然是 0-1 整数变量, 替换式(23)中的 x 。令 x_1 和 x_2 相等, 则得到的解满足原模型所有约束。由此可以得到模型 P2:

$$\min f(x_1, x_2, y) \quad (26)$$

$$\text{s.t. } h(x_1, y) \geq 0 \quad (27)$$

$$g_1(x_2) \geq 0 \quad (28)$$

$$g_2(y) \geq 0 \quad (29)$$

$$l \leq y \leq u \quad (30)$$

$$x_1 = x_2 \quad (31)$$

$$x_1 \in [0, 1] \quad (32)$$

式(31)表示耦合方程, 其作用是迫使 x_1 和 x_2 相等。

模型 P2 是模型 P1 的等价模型, 除耦合方程(31)外, 这个模型的目标函数和约束条件关于连续变量和整数变量是可分离的。将变量分成两组: (x_1, y) 和 x_2 , 可方便采用目标级联分析法分解成两个规模较小的子问题, 其中一个子问题为线性规划模型, 只包含变量 x_1 和 y , 另一个子问题为整数规划模型。

2.2 基于目标级联分析和大规模邻域搜索的启发式分解算法

对于模型 P2, 在问题规模小时可通过求解器直接求解得出优化结果。但问题规模变大时, 求解速度较慢, 因此采用目标级联分析法将大规模问题分为上层协调器与两个下层子问题进行迭代计算, 具体描述如下。

首先需要构建一个上层协调器, 将线性规划问题与整数规划问题的变量 x_1 和 x_2 在上层协调器中复

制一遍,用 $\hat{x}_1$ 与 $\hat{x}_2$ 代表上层协调器复制的变量,并且需要满足:

$$\hat{x}_1 = \hat{x}_2 \quad (33)$$

可以将上层协调器理解成为一个虚拟区域,起到的是一个纯粹的协调作用,目的是迫使整数问题计算出的整数变量 x_2 与连续问题中取值在0到1之间的连续变量 x_1 ,尽量接近上层协调器算出的变量值,从而间接地使得各子问题算出的变量值彼此接近,最后相等。

在引入了上层协调器后,耦合约束(33)实际上等价于:

$$x_2 = \hat{x}_2 \quad (34)$$

$$x_1 = \hat{x}_1 \quad (35)$$

目标级联分析算法的基本求解步骤是:LP子问题与IP子问题分别独立求解,并将其上传给上层协调器;据此信息上层协调器求解上层协调优化问题,并将向各个下层子问题下发结果,由此实现上下层交替迭代求解。通过在上层协调器、下层LP子问题与IP子问题中引入罚函数的方法,使得LP子问题与IP子问题的变量值与上层结果不断逼近,从而间接地使得LP子问题与IP子问题所求的变量值相等。

1) 下层LP子问题和IP子问题

利用增广拉格朗日函数将耦合约束(23)松弛到目标函数中,则LP子问题的模型紧凑形式可写成:

$$\begin{cases} \min f(x_1, y) + (\lambda_1^k)^T (\hat{x}_1^k - x_1) + \sum_{s \in \Omega_1} \beta_{1,s}^k |\hat{x}_{1,s}^k - x_{1,s}| \\ \text{s.t. 式(27), 式(29), 式(30), 式(32)} \end{cases} \quad (36)$$

式中: $\hat{x}_1^k$ 为第 k 次迭代上层协调器发送到子问题的连续变量 x_1 向量; $\hat{x}_{1,s}^k$ 为 $\hat{x}_1^k$ 的第 s 个分量; x_1 为LP子问题中取值在0~1之间的连续变量向量; $x_{1,s}$ 为 x_1 的第 s 个分量; λ_1^k 为与第 k 次迭代时耦合约束(35)的拉格朗日乘子; $\beta_{1,s}^k$ 为其对应绝对值罚函数的罚因子; Ω_1 为LP子问题中取值在0~1之间的连续变量索引集合。在增广拉格朗日函数中引入绝对值项后,能够降低拉格朗日乘子的振荡,减少算法收敛的迭代次数。

类似于LP子问题,也可以利用增广拉格朗日函数将耦合约束式(34)松弛到目标函数中,得到IP子问题的模型紧凑形式:

$$\begin{cases} \min f(x_2) + (\lambda_2^k)^T (\hat{x}_2^k - x_2) + \sum_{s \in \Omega_2} \beta_{2,s}^k |\hat{x}_{2,s}^k - x_{2,s}| \\ \text{s.t. 式(28)} \end{cases} \quad (37)$$

式中: $\hat{x}_2^k$ 为第 k 次迭代上层协调器发送到子问题的整数变量 x_2 向量; $\hat{x}_{2,s}^k$ 为 $\hat{x}_2^k$ 的第 s 个分量; x_2 为IP子问题中的整数变量; $x_{2,s}$ 为 x_2 的第 s 个分量; λ_2^k 为第 k 次迭代时耦合约束(34)的拉格朗日乘子; $\beta_{2,s}^k$ 为其对应绝对值罚函数的罚因子; Ω_2 为IP子问题中的整数变量索引集合。

2) 引入大规模邻域搜索后的下层LP子问题和IP子问题

以上为传统ATC的下层问题紧凑形式。在引入大规模邻域搜索后,ATC变形为HDA-ATC-LNS,其包含并行求解和重组两个环节,并以重组环节的结果上传到上层协调器。

在并行求解环节,两个下层子问题分别生成若干个近似子问题,LP子问题模型P3的紧凑形式如下:

$$\begin{cases} \min f(x_1, y) + \sum_{s \in \Omega_b} [\lambda_{1,s}^k (\hat{x}_{1,s}^k - x_{1,s}) + \beta_{1,s}^k |\hat{x}_{1,s}^k - x_{1,s}|] \\ \text{s.t. 式(27), 式(29), 式(30), 式(32)} \end{cases} \quad (38)$$

式中 Ω_b 为LP子问题中取值在0到1之间的连续变量的部分索引集合,每个子问题的 Ω_b 不同。

同理,IP子问题P4的紧凑形式可以表示为:

$$\begin{cases} \min f(x_2) + \sum_{s \in \Omega_c} [\lambda_{2,s}^k (\hat{x}_{2,s}^k - x_{2,s}) + \beta_{2,s}^k |\hat{x}_{2,s}^k - x_{2,s}|] \\ \text{s.t. 式(28)} \end{cases} \quad (39)$$

式中: Ω_c 为IP子问题中的整数变量的部分索引集合,每个子问题的 Ω_c 不同。

引入重组环节的目的在于利用并行求解环节的信息再进行一次邻域搜索,以寻找更好的解,且能保证解的质量不会差于并行求解环节的解。在重组环节,LP子问题将在并行求解环节中在所有LP子问题中取值相同的变量固定,代入重组问题P5,求解剩余的变量。P5的紧凑形式可以表示为:

$$\begin{cases} \min f(x_1, y) + (\lambda_1^k)^T (\hat{x}_1^k - x_1) + \sum_{s \in \Omega_1} \beta_{1,s}^k |\hat{x}_{1,s}^k - x_{1,s}| \\ \text{s.t. } x_1, s = xk1, s, \forall s \in \Omega B \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{cases} \text{s.t. 式(27), 式(29), 式(30), 式(32)} \end{cases} \quad (41)$$

式中 $\bar{x}_{1,s}^k$ 选取第 k 次迭代的并行求解环节中第一个

LP子问题的解。

同理, IP子问题将在并行求解环节中在所有IP子问题中取值相同的变量固定, 代入重组问题P6, 求解剩余的变量。P6的紧凑形式可以表示为:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}_2) + (\boldsymbol{\lambda}_2^k)^T (\hat{\mathbf{x}}_2^k - \mathbf{x}_2) + \sum_{s \in \Omega_2} \beta_{2,s}^k |\hat{x}_{2,s}^k - x_{2,s}| \\ \text{s.t. } x_{2,s} = \bar{x}_{2,s}^k, \forall s \in \Omega_C \\ g_1(\mathbf{x}_2) \geq 0 \end{cases} \quad (42)$$

$$\quad (43)$$

$$\quad (44)$$

式中 $\bar{x}_{2,s}^k$ 选取第 k 次迭代的并行求解环节中第一个IP基本子问题的解。

3) 上层协调主问题

构造上层协调主问题是ATC能够具有良好收敛性的关键, 也是ATC与交替方向乘子法等其他优化方法的区别之处。上层协调主问题的作用是对上层协调器求出的变量值和下层LP与IP子问题求出的变量值进行协调, 可写成如下的紧凑形式:

$$\min (\boldsymbol{\lambda}_1^k)^T (\hat{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{x}_1^k) + \sum_{s \in \Omega_1} \beta_{1,s}^k |\hat{x}_{1,s}^k - x_{1,s}| + \quad (45)$$

$$(\boldsymbol{\lambda}_2^k)^T (\hat{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{x}_2^k) + \sum_{s \in \Omega_2} \beta_{2,s}^k |\hat{x}_{2,s}^k - x_{2,s}| \quad (46)$$

$$\text{s.t. } \hat{\mathbf{x}}_1 = \hat{\mathbf{x}}_2$$

式中: x_1^k 为第 k 次迭代重组问题上传到上层协调器的连续变量取值; x_2^k 为第 k 次迭代重组问题上传到上层协调器的整数变量取值。

4) 拉格朗日乘子和罚因子的更新策略

在求解上层协调主问题和下层优化子问题时, 拉格朗日乘子 λ_1 和 λ_2 、罚因子 β_1 和 β_2 都是已知量, 每次迭代均更新一次。为了表达清楚, 这里用变量形式来说明拉格朗日乘子和罚因子的更新策略, 描述如下:

$$\lambda_1^k = \lambda_1^{k-1} + 2\beta_1^k \beta_1^k (\hat{x}_1^k - x_1^k) \quad (47)$$

$$\lambda_2^k = \lambda_1^{k-1} + 2\beta_2^k \beta_2^k (\hat{x}_2^k - x_2^k) \quad (48)$$

$$\beta_1^k = \alpha \beta_1^{k-1} \quad (49)$$

$$\beta_2^k = \alpha \beta_2^{k-1} \quad (50)$$

式中 α 为调节步长的参数。

5) 算法求解步骤

算法的求解步骤如下:

步骤1: 输入初始解 $\bar{\mathbf{x}}$; 令 $\hat{\mathbf{x}}_1^0 = \hat{\mathbf{x}}_2^0 = \bar{\mathbf{x}}$, $k=1$ 。

步骤2: 随机令 Ω_B 和 Ω_C 包含所有变量中比例为 ρ 的整数变量的索引, 分别生成P3和P4的 n 个子问题。

步骤3(并行求解环节): 并行求解P3、P4共计 $2n$ 个子问题。

步骤4(重组环节): 若连续变量在所有并行LP子问题中取值相同, 则将其索引包含于 Ω_B ; 若整数变量在所有并行IP子问题中取值相同, 则将其索引包含于 Ω_C ; 分别求解P5与P6, 将结果上传至上层协调器。

步骤5: 求解上层协调器问题, 并向各区域下发算出的所需变量值 $\hat{\mathbf{x}}_1^k$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_2^k$ 。

步骤6: 判断收敛性: 若式(50)与(51)满足, 则认为程序收敛。否则, 按式(47)–(50)更新拉格朗日乘子与罚函数, 回到步骤2。

$$\|\hat{\mathbf{x}}_1^k - \mathbf{x}_1^k\|_\infty \leq \varepsilon \quad (51)$$

$$\|\hat{\mathbf{x}}_2^k - \mathbf{x}_2^k\|_\infty \leq \varepsilon \quad (52)$$

综上, HDA-ATC-LNS 的求解流程可用图 1 描述。

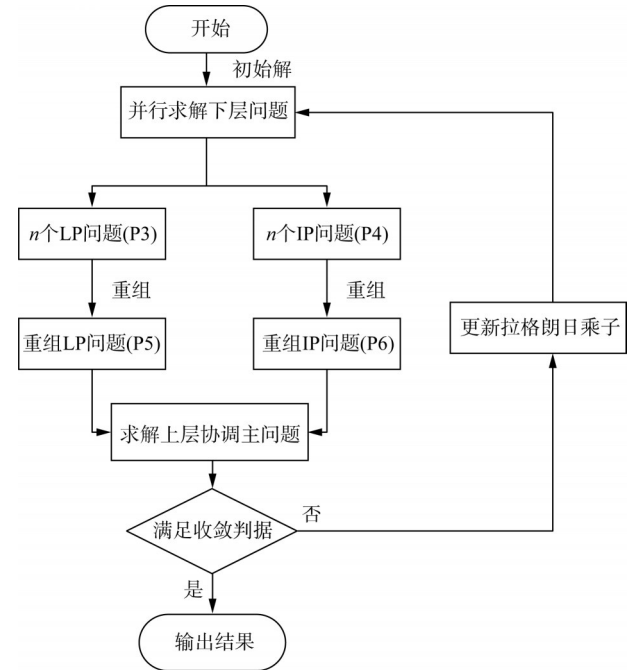


图 1 基于目标级联分析和大规模邻域搜索的启发式分解算法流程

Fig. 1 Flow chart of HDA-ATC-LNS

3 算例分析

本文以 IEEE 54 机 118 节点系统^[21]和某实际电力系统作为测试系统验证算法的有效性, 展示其加速求解的效果。该算法在 GAMS 框架^[22]下进行编

程, 采用 GUROBI 求解器求解 MILP、LP 问题和 IP 问题, 求解器的优化间隙设置为 0.5%, 优化时段为 24 h。为了减少 LNS 环节里随机生成的变量子集的影响, 对算例进行了 3 次重复计算, 取 3 次计算时间的平均值作为最终求解时间。LP 子问题和 IP 子问题的个数均取 3, 即并行求解 6 个子问题。算法步骤 2 中的比例 ρ 取 0.8。在使用算法时通过松弛模型 P1 中所有 0~1 变量获得松弛线性规划问题, 并移除短路电流约束进行求解得到初始解。获取初始解的时间也计入算法求解的总时间。

3.1 IEEE 54 机 118 节点系统

该系统的网架拓扑如图 2 所示, 系统线路参数、节点负荷及电压限值取自 MATPOWER 中的文件 case118. m^[19]。设所有发电机组容量为 100 MVA, 最小开机时间为 4 h, 最小停机时间为 2 h, 暂态电抗标幺值为 0.25。负荷曲线如图 3 所示。拉格朗日乘子初值设为 1, 罚因子初值设为 10, 该系统中节点遮断容量标幺值取 20, 线性化常数 ATC 算法的收敛裕度 $\varepsilon = 10^{-4}$ 。用本文优化算法的计算时长取每一次迭代用时最长的一次, 在并行 LNS 步骤的求解时间选取为并行 LP 子问题与 IP 子问题的最大求解时间。

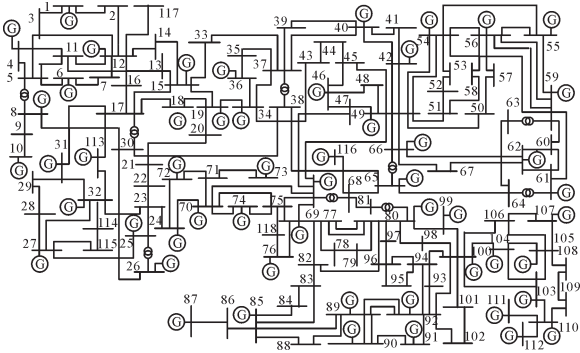


图2 54机118节点系统拓扑

Fig. 2 Topology of 54-unit and 118-bus system

本文所提出的模型与常见的机组组合模型相比, 除了加入了线路投切参与优化之外, 还加入了短路电流约束。对于大规模系统来说, 加入短路电流约束的问题求解难度剧增, 将原模型命名为模型一, 移除短路电流约束后的模型命名为模型二, 两个模型的求解结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 模型二的求解速度明显快于模型一的求解速度, 并且短路电流约束的加入使得某些

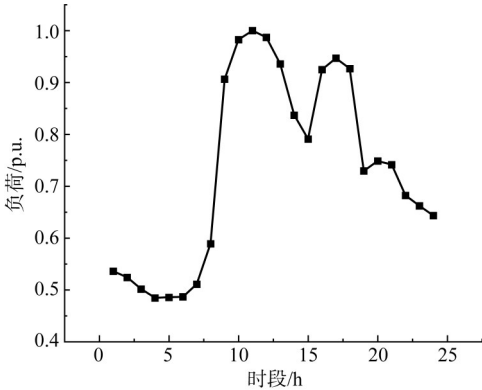


图3 54机118节点系统负荷曲线

Fig. 3 Load curve of 54-unit and 118-bus system

表 1 两个模型的求解结果对比

Tab. 1 Comparison of solution results between two models

求解模型	开断支路数	发电成本/p. u.	求解时间/s
模型一	1	2 950. 8	508. 09
模型二	0	2 941	82

支路断开。

采用三种方法求解计及短路电流约束的机组组合与支路投切联合优化问题, 它们分别是: 直接采用 GUROBI 求解 (direct use of GUROBI, DU-GUROBI), 采用 ATC 算法进行求解以及采用 HDA-ATC-LNS 算法进行求解, 求解结果如表 2 所示, 机组投入的情况如图 4 所示。

表 2 在 54 机 118 节点系统中不同求解方法对比

Tab. 2 Comparison of different solution methods in 54-unit and 118-bus system

求解方法	迭代次数	发电成本/p. u.	求解时间/s	开断支路数
DU-GUROBI		2 950. 8	508. 09	1
ATC	9	3 270. 68	51. 26	1
HDA-LNS-ATC	13	2 952. 93	68. 09	1

在该算例中, ATC 经过 9 次迭代收敛, HDA-ATC-LNS 经过 13 次迭代收敛。从表 2 可以看出, ATC 和 HDA-ATC-LNS 都可以快速收敛得到可行解, 在寻找可行解速度上都显著超过 DU-GUROBI, 但很明显 ATC 可行解的最优性较差, 需要在可行解基础上进一步寻优提高其最优性。而 HDA-ATC-LNS 能够在比 DU-GUROBI 更短的时间内获得质量较好的近似最优解, 相比 ATC 可省略后续寻优环节。

3 种求解结果的开断支路数相同, 不同之处在于

采用ATC求解的结果中投入机组数相比另外两个结果差别较大，这是导致发电成本偏高的主要原因。

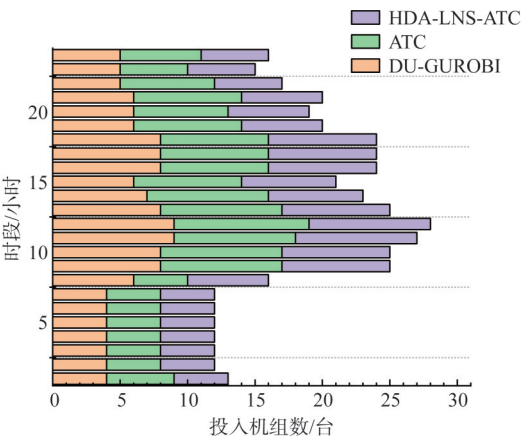


图4 54机118节点系统机组启停结果
Fig. 4 On/off status of units in 54-unit and 118-bus system

3.2 某实际电力系统

为进一步验证本文所提算法在求解计及短路电流约束的机组组合与支路投切大规模MILP联合优化问题的可行性与有效性，在某实际电力系统中进行测试分析，该系统包括53台机组、727个节点和861条支路，设所有发电机组最小开机时间为4 h，最小停机时间为2 h，发电机组容量以及暂态电抗标么值如表3所示，负荷曲线如图5所示。该实际系统220 kV及以上部分的拓扑如图6所示。拉格朗日乘子初值设为1，罚因子初值设为100，ATC算法的收敛裕度 $\varepsilon = 10^{-8}$ 。采用3种方法求解该问题，各方法目标值和求解时间如表4所示。机组投入的情况如图7所示。

在该算例中，ATC经过26次迭代收敛，HDA-

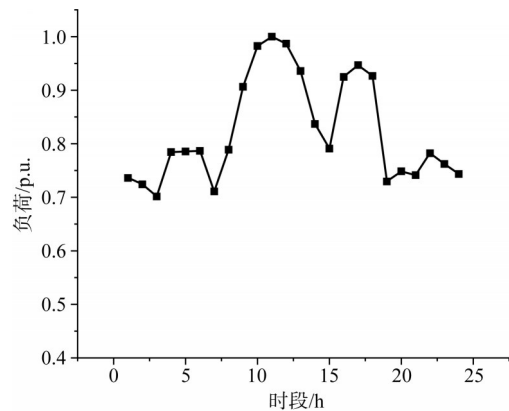


图5 实际系统负荷曲线
Fig. 5 Load curve of a real system

表3 实际系统发电机组容量与暂态电抗
Tab. 3 Capacity and transient reactance of generators in a real system

机组编号	容量/MVA	暂态电抗/p. u.
1—3	100	0.079
4	499	0.072
5	259	0.103
6—7	498	0.054
8—9	396	0.072
10—11	176	0.119
12—13	159	0.189
14—15	75	0.347
16—17	459	0.058
18—19	247	0.105
20—23	388	0.073
24—25	388	0.064
26—29	356	0.055
30—32	62.5	0.4
33—34	100	0.099
35—37	100	0.085
38	100	0.071
39—53	100	0.000 001

表4 在实际系统中不同求解方法对比
Tab. 4 Comparison of different solution methods in a real system

求解方法	迭代次数	发电成本/元	求解时间	开断支路数
DU-GUROBI		689 820	1 h34 min29 s	1
ATC	26	753 445	19 min26 s	1
HDA-LNS-ATC	29	688 626	35 min8 s	1

ATC-LNS 经过 29 次迭代收敛。从表 4 可以看出，在问题规模进一步扩大时，ATC 和 HDA-ATC-LNS 依然可以快速收敛得到可行解，在寻找可行解速度上都显著超过 DU-GUROBI，但很明显 ATC 可行解的最优性较差，需要在可行解基础上进一步寻优提高最优性。而 HDA-ATC-LNS 能够在比 DU-GUROBI 更短的时间内获得质量更好的解，在求解速度以及求解质量上都超过 DU-GUROBI，并且相比 ATC 可省略后续的寻优环节。

与图 4 类似，图 7 中 HDA-ATC-LNS 求解结果中机组投入情况基本与 DU-GUROBI 相同，而 ATC 的求解结果发电成本较高的主要原因在于存在多个时段的投入机组数偏多。

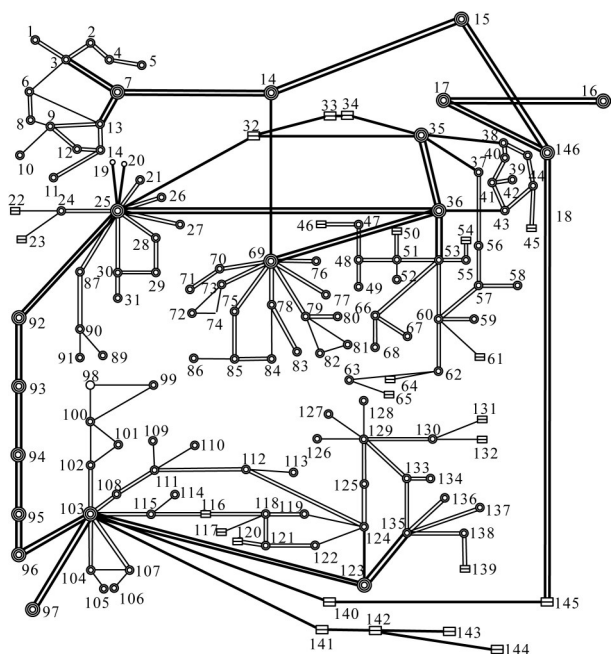


图6 实际系统部分拓扑

Fig. 6 Partial topology of a real system

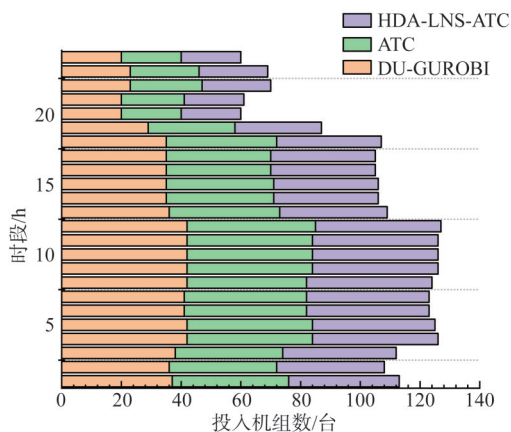


图7 实际系统机组启停结果

Fig. 7 On/off status of units in a real system

图8给出了HDA-ATC-LNS迭代收敛曲线,从中可以看出,由于两个下层子问题的约束不同,收敛残差不会一直下降,而是需要多次迭代才可以得到同时满足两个子问题约束的较优可行解,变化趋势是波动的而非单调下降,从图中可知,算法在第29次迭代后收敛。

4 结论

本文提出了一种基于目标级联分析和大规模邻域搜索的启发式分解算法,用于加速求解计及短路电流约束的机组组合与支路投切大规模MILP联合

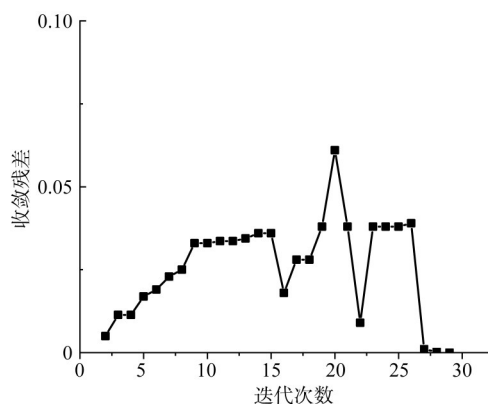


图8 HDA-ATC-LNS迭代过程

Fig. 8 Iteration process of HDA-ATC-LNS

优化问题,得出以下结论。

1)本文通过复制模型中的整数变量并且令其中一个复制变量可连续变化,将原模型转化为具有可分结构的混合整数线性规划模型,采用目标级联分析法,建立一个虚拟区域,将原问题分解为上层协调主问题、下层整数规划子问题与线性规划子问题,两个下层子问题可并行独立求解,并在下层子问题的求解上引入大规模邻域搜索。通过仿真验证,采用所提算法求解问题可以快速收敛得到可行解,在寻找可行解速度上均显著超过DU-GUROBI。

2)相比于只采用目标级联分析法求解问题,大规模邻域搜索的引入能够进一步提高解的最优性,保证解的质量。通过仿真验证,嵌入大规模邻域搜索的目标级联分析法能够在比DU-GUROBI更短的时间内获得质量较好的近似最优解,应用于某实际电力系统时,采用本文所提出算法求解问题所得到解的最优性也能超过DU-GUROBI。

参考文献

- [1] 李少岩,任乙沛,顾雪平,等.基于短路电流约束显式线性建模的输电网结构优化[J].电工技术学报,2020,35(15):3292-3302.
LI Shaoyan, REN Yipei, GU Xueping, et al. Optimization of transmission network structure based on explicit linear modeling of short circuit current constraints [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(15):3292-3302.
- [2] 张赢,袁晓东,曹春诚,等.短路电流对二次设备电磁干扰分析及抗干扰措施[J].高压电器,2024,60(1):182-189.
ZHANG Ying, YUAN Xiaodong, CAO Chuncheng, et al. Analysis on electromagnetic interference of short circuit current to secondary equipment and research on anti-interference measures [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1):182-189.

- [3] 段绍辉, 宗伟, 周灵杰, 等. 输电线路短路电流对埋地管道电位抬升及抑制方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3): 89-94.
DUAN Shaohui, ZONG Wei, ZHOU Lingjie, et al. Research of the short-circuit current of transmission line on potential rise of buried pipeline and its suppression method [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 89-94.
- [4] 黄磊, 鲍颜红, 杨君军, 等. 满足安全稳定要求的限制短路电流在线辅助决策方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(1): 69-75.
HUANG Lei, BAO Yanhong, YANG Junjun, et al. On-line decision-making method for limiting short-circuit current to meet the requirements of safety and stability [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(1): 69-75.
- [5] 杨燕, 金楚, 程鑫, 等. 基于大湾区外环的柔性直流互联方案[J]. 南方电网技术, 2021, 15(3): 15-21.
YANG Yan, JIN Chu, CHENG Xin, et al. Flexible DC interconnection scheme based on the outer ring of Guangdong Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(3): 15-21.
- [6] 刘单, 林子, 邵尉哲, 等. 一种快速求取节点阻抗矩阵的方法[J]. 南昌大学学报(工科版), 2015, 37(4): 400-404.
LIU Dan, LIN Zi, SHAO Weizhe, et al. A method for fast solving bus impedance matrixes [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2015, 37(4): 400-404.
- [7] 陈子瑞, 刘明波, 曾贵华, 等. 应用于加速安全约束机组组合问题的K最邻近算法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(11): 48-57, 78.
CHEN Zirui, LIU Mingbo, ZENG Guihua, et al. K-nearest neighbor algorithm applied to accelerate security constrained unit commitment problem [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(11): 48-57, 78.
- [8] 汪峰, 朱艺颖, 白晓民. 基于遗传算法的机组组合研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 36-41.
WANG Feng, ZHU Yiyang, BAI Xiaomin. Study of GA-based unit commitment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 36-41.
- [9] MA Z, ZHONG H, XIA Q, et al. A unit commitment algorithm with relaxation-based neighborhood search and improved relaxation inducement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3800-3809.
- [10] 张幼毅. 求解机组组合问题的分解方法研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [11] ALMAKHLAFI M. The generator maintenance scheduling problem: benchmarks, local search and metaheuristics [D]. U. K.: Ahmad Almakhlafi School of Computer Science, 2016.
- [12] PISINGER D, ROPKE S. Handbook of metaheuristics [M]. Berlin: Springer, 2019: 99-127.
- [13] NAIR V, BARTUNOV S, GIMENO F, et al. Solving mixed integer programs using neural networks [J]. arXiv, 2021(1): 13349.
- [14] DING Jianya, ZHANG Chao, SHEN Lei, et al. Accelerating primal solution findings for mixed integer programs based on solution prediction [J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2020, 34(2): 1452-1459.
- [15] GAO Qian, YANG Zhifang, LI Wenyuan, et al. Online learning of stable integer variables in unit commitment using internal information [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2947-2950.
- [16] 程颖, 刘明波, 陈鸿琳, 等. 交流潮流约束机组组合的交替方向乘子法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 143-148.
CHENG Ying, LIU Mingbo, CHEN Honglin, et al. Alternating direction method of multipliers for AC power flow constrained unit commitments [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 143-148.
- [17] MORALES-ESPAÑA G, LATORRE J M, RAMOS A. Tight and compact MILP formulation for the thermal unit commitment problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4897-4908.
- [18] 覃岭, 林济铿, 戴赛, 等. 计及短路电流约束的机组组合问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6049-6058.
QIN Ling, LIN Jikeng, DAI Sai, et al. Short circuit constrained unit commitment [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6049-6058.
- [19] RAMESH A V, LI Xingpeng, HEDMAN K W. An accelerated-decomposition approach for security-constrained unit commitment with corrective network reconfiguration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 887-900.
- [20] AN Yu, ZENG Bo. Exploring the modeling capacity of two-stage robust optimization: variants of robust unit commitment model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 109-122.
- [21] MATPOWER-Free, open-source electric power system simulation and optimization tools for MATLAB and Octave: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower>.
- [22] GAMS mathematical programming solvers [R/OL] www.gams.com.

收稿日期: 2023-12-22; 网络首发日期: 2024-05-17

作者简介:

徐良德(1989), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电网规划
xld1130@126.com;

吴楚钦(2001), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统调度与控制, 202321014571@mail.scut.edu.cn;

刘明波(1964), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力系统调度与电力市场, epmbliu@scut.edu.cn。