

机组组合算法中起作用整数变量的辨识方法

汪洋, 夏清, 康重庆

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

Identification of the Active Integer Variables in Security Constrained Unit Commitment

WANG Yang, XIA Qing, KANG Chong-qing

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Solving the unit commitment problem with mature optimization algorithms is the general trend now. However, too many integers needed to be branched caused the biggest trouble to obtain the optimal solution in limited time. On the basis of deep research on the feature of security constrained unit commitment (SCUC) and the physical nature of power system, a novel notion of active integer variables was proposed in this paper, and a comprehensive and standardized identification method for the integer variables was proposed soon afterwards, which can take ramping constraints, start up/stop down cost of units and transmission line constraints into consideration. Based on this method, the optimization range is narrowed efficiently through turning the identified inactive integer variables into continuous variables, and the efficiency of calculation is improved greatly, under the premise of optimization precision guarantee. The effectiveness of this method is demonstrated by the theoretical analysis and numerical experiments.

KEY WORDS: security constrained unit commitment (SCUC); active integer variable; standardized identification method

摘要: 应用成熟的数学规划方法求解机组组合问题是当前的发展趋势, 但是整数变量太多使得该问题的求解效率太低。在深入研究机组组合的模型特点以及电力系统的物理本质的基础上, 提出了混合整数规划问题中起作用整数变量的新概念, 据此提出了能够综合考虑系统时段耦合约束、网络安全约束以及机组启停费用的规范化起作用整数变量辨识方法。通过对起作用整数变量进行组合优化计算, 将不起作用整数变量直接转化为连续变量求解, 有效缩小了机组组合的寻优空间, 在不影响机组组合最优解的前提下, 提高了求解

效率, 对大幅度提高机组组合的计算效率和应用水平具有重要的价值。理论分析和算例测试验证了该方法的有效性。

关键词: 安全约束机组组合; 起作用整数变量; 规范化的识别方法

0 引言

安全约束机组组合(security constrained unit commitment, SCUC)是电网短期发电计划的核心环节, 也是电力系统经济调度及安全校核的基础, 对电网短期优化运行具有极其重要的作用。因此, 国内外学者针对SCUC的建模和求解方法展开了广泛而深入的研究, 提出了包括分支定界法^[1]、Benders分解法^[2]、动态规划法^[3]、拉格朗日松弛法^[4-5]、优先顺序法^[6]及遗传算法等多种方法^[7-8]。

随着电力工业的不断发展, 电网运行部门对SCUC计算精度和计算速度的要求越来越高; 同时, 电网互联规模的进一步扩大, 使得该问题变得异常的庞大和复杂, 较难在有限时间内求得最优解。目前, 解决这类问题较为通用的方法是将SCUC问题转化为一个线性的混合整数规划问题(mixed linear integer problem, MILP), 然后研究如何应用各类优化方法或者采用各种启发式策略, 求解该MILP模型, 以损失解的最优性为代价, 力求在尽量短的计算时间内求得尽量优的解^[9]。如何在有限时间内求得尽可能接近最优解的解, 仍然是目前电力系统中需要解决的几大难题之一。

大规模复杂约束机组组合本质上是一个大规模的混合整数规划问题, 其计算量大的主要原因是离散变量众多和网络约束复杂。复杂的网络约束给MILP问题的约束矩阵带来大量的稠密约束条件, 极大地增加了约束优化的复杂性。目前各类机组组

基金项目: 国家自然科学基金项目(50877041); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-07-0484)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50877041); Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-07-0484).

合算法中广泛采用了起作用约束识别方法(identification method for active constraints, IMAC)^[10], 有效降低了大量网络约束条件造成的计算量; 而离散变量数目众多造成 MILP 问题需要大量的分支计算, 是 SCUC 计算量大的最为主要的原因, 至今尚未找到有效的解决方法。

尽管 SCUC 在数学上是一个复杂的 MILP 问题, 但具有电力系统自身的特点。对于实际的大规模电网, 其最大负荷通常达到装机容量的 70% 甚至更高, 这意味着将有大量的机组是必开机组, 不需要对所有机组所对应的整数变量进行状态组合。事实上, 大量的机组除检修以外通常处于全时段开机状态或者关机状态, 只有部分机组需要启停, 本文称这部分机组对应的整数变量为起作用整数变量。利用该特点可极大地降低模型中需要分支计算的整数变量, 进而大规模缩小系统的状态组合空间, 有效提高机组组合的计算效率。然而, 如何辨识 SCUC 中这些起作用的整数变量, 在保证最优性前提下有效提高求解速度, 是机组组合问题中的一大难点, 国内外有不少学者就此问题进行了初步的研究。文献[11]结合华东电网实际算例, 利用拉格朗日乘子法求解该大规模机组组合问题时, 考虑到实际系统负荷较高, 大量机组处于持续开机状态, 从而可以大幅缩小优化空间。文献[12]采用动态规划法进行机组组合, 通过简单策略在优先顺序表上截取一定的带宽作为机组组合的优化范围。文献[13]采用传统的优先顺序法进行机组组合, 通过确定必开机组、必停机组和待优化机组以减少计算量。文献[14]将动态规划和优先顺序相结合, 将机组分成 3 类, 即必开、必停和优化机组, 但是仅给出粗略的启发式定优化机组范围的方法。文献[15]在文献[14]的基础上, 采用了基于时段负荷分析的线性筛选模型, 该模型可以根据各个时段负荷的不同, 灵活选择需要组合的机组数目; 但该方法采用一个仅与负荷水平相关的简单数学公式确定各个时段参与优化的机组数, 没有考虑实际约束条件, 应用中可能会得到不可行解。文献[16]在利用分支定界法求解 SCUC 问题时同样应用了机组分类筛选的方法, 通过忽略机组时段耦合特性, 将多时段的 MILP 问题先转化为多个单时段的简化 MILP 问题, 然后通过分析各台机组单时段启停状况, 确定必开、必停和边际优化机组; 由于没有考虑时段耦合问题对最终结果的影响, 同样无法保证得到可行解, 而

且多次的 MILP 计算也会消耗大量的时间。上述算法都没有考虑电力网络约束、启停费用及爬坡等时段耦合约束, 都是基于简单的启发式原则筛选机组。实际电力系统的 SCUC 需要进行全时段整体优化, 要同时考虑大量复杂约束条件, 因此, 必须利用成熟的优化算法, 基于全时段优化的结果确定起作用整数变量的集合。

本文结合电力系统的物理特性和完善的机组组合数学模型, 提出了针对 SCUC 问题的规范化起作用整数变量识别方法(identification method for active integer variables, IMAIV)。该方法基于标准优化模型和成熟的数学优化算法, 综合考虑各类复杂约束条件, 能够快速、准确识别需要分支计算的起作用整数变量集合, 减少了 SCUC 中分支及组合的计算量, 从而提高 SCUC 问题的求解效率。

1 SCUC 的 MILP 模型

1.1 变量定义

为便于后续算法的描述, 本文建模时采用机组线性成本, 并假设机组启停费用为常数, 为历史统计的平均值。模型中变量定义如下:

1) 常数定义。

T 为 1 天内总的时段数; N 为系统中发电机的台数; C_i 为机组 i 的单位发电煤耗; $T_{i,U}$ 为机组 i 的最小开机时间; $T_{i,D}$ 为机组 i 的最小关机时间; $P_{i,max}$ 为机组 i 的出力上限; $P_{i,min}$ 为机组 i 的出力下限; $\Delta P_{i,max,up}$ 为发电机 i 的最大增出力速率; $\Delta P_{i,max,down}$ 为发电机 i 的最大减出力速率; \bar{P}_l 为线路 l 传输功率的极限; $D_{i,t}$ 为电网中节点 i 在 t 时刻的节点负荷预测值; D_t 为时段 t 的系统负荷预测值; G_{l-i} 为机组 i 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子; K_i 为机组 i 的单次启动费用; J_i 为机组 i 的单次停机费用。

2) 整数变量。

$\alpha_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时刻的启停状态变量, 取值为 0 或 1; $t_{i,t,on}$ 为机组 i 在 t 时刻的持续开机时间; $t_{i,t,off}$ 为机组 i 在 t 时刻的持续关机时间; $\eta_{i,t} = \alpha_{i,t} - \alpha_{i,t-1}$ 为机组 i 在 $t-1 \sim t$ 时刻的状态变化量。

3) 连续变量。

$P_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时刻的有功出力; $C_{i,t,U}$ 为机组 i 的启动费用; $C_{i,t,D}$ 为机组 i 在 t 时刻的停机费用。

1.2 优化模型

基于以上变量定义, SCUC 模型优化目标可表示为

$$\min \sum_{i=1}^N [\sum_{t=1}^T (C_i P_{i,t} + C_{i,t,U} + C_{i,t,D})] \quad (1)$$

考虑如下约束条件:

1) 负荷平衡约束。

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} = D_t, \quad i=1,2,\dots,N, \quad t=1,\dots,T \quad (2)$$

2) 机组出力上、下限约束。

$$\alpha_{i,t} P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq \alpha_{i,t} P_{i,\max}, \quad i=1,2,\dots,N, \quad t=1,\dots,T \quad (3)$$

3) 网络热稳极限约束。

$$\bar{P}_{l,\min} \leq \sum_{i=1}^N G_{l-i} P_{i,t} - \sum_{i=1}^K G_{l-i} D_{i,t} \leq \bar{P}_{l,\max} \quad (4)$$

式中: $i=1,2,\dots,N$; $t=1,\dots,T$; $l=1,\dots,L$ 。

4) 机组最小启停时间约束。

$$\begin{cases} (t_{i,t,\text{on}} - T_{i,U})(\alpha_{i,t-1} - \alpha_{i,t}) \geq 0 \\ (t_{i,t,\text{off}} - T_{i,D})(\alpha_{i,t} - \alpha_{i,t-1}) \geq 0 \end{cases}, \quad i=1,2,\dots,N, \quad t=2,\dots,T \quad (5)$$

5) 机组爬坡约束。令 $\eta_{i,t} = \alpha_{i,t} - \alpha_{i,t-1}$, 则此时的爬坡出力上、下限约束可以表示为

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta P_{i,\max,\text{up}} \alpha_{i,t-1} + \eta P_{i,\min} + P_{i,\max} (1 - \alpha_{i,t}) \quad (6)$$

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq \Delta P_{i,\max,\text{down}} \alpha_{i,t} - \eta P_{i,\min} + P_{i,\max} (1 - \alpha_{i,t-1}) \quad (7)$$

式中: $i=1,2,\dots,N$; $t=2,\dots,T$ 。

6) 机组启停费用约束。其中开机费用约束^[17]为

$$\begin{cases} C_{i,t,U} \geq K_i (\alpha_{i,t} - \alpha_{i,t-1}), \quad i=1,2,\dots,N, \quad t=2,\dots,T \\ C_{i,t,U} \geq 0, \quad i=1,2,\dots,N, \quad t=2,\dots,T \end{cases} \quad (8)$$

停机费用约束为

$$\begin{cases} C_{i,t,D} \geq J_i (\alpha_{i,t-1} - \alpha_{i,t}), \quad i=1,2,\dots,N, \quad t=2,\dots,T \\ C_{i,t,D} \geq 0, \quad i=1,2,\dots,N, \quad t=2,\dots,T \end{cases} \quad (9)$$

本文将基于该 MILP 模型, 建立 IMAIV 识别方法中的松弛经济调度模型。

2 起作用整数变量的辨识方法

如前所述, 现有的起作用整数变量的筛选方法不考虑网络以及机组时段耦合约束条件^[18-20], 可能使筛选结果损失最优性甚至不可行, 不具备通用性。为此, 本文基于 SCUC 的 MILP 模型, 建立了松弛的 SCED 模型(slacked SCED, S-SCED), 然后基于该 S-SCED 模型的计算结果确定最小待组合的起作用整数变量全集。

基于上述机组组合模型式(1)~(9), 松弛整数变量, 并除去各种离散变量约束, 可得到如下 S-SCED 模型:

1) 优化目标。

$$\min \sum_{i=1}^N [\sum_{t=1}^T (C_i P_{i,t})] \quad (10)$$

2) 负荷平衡约束。

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

3) 机组出力上、下限约束。

$$0 \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (12)$$

即将机组出力的下限松弛。

4) 机组爬坡约束。

$$\Delta P_{i,\max,\text{down}} \leq P_{i,t+1} - P_{i,t} \leq \Delta P_{i,\max,\text{up}} \quad (13)$$

5) 网络热稳极限约束。

$$\bar{P}_{l,\min} \leq \sum_{i=1}^N G_{l-i} P_{i,t} - \sum_{i=1}^K G_{l-i} D_{i,t} \leq \bar{P}_{l,\max} \quad (14)$$

以上 i, t 的取值与 SCUC 模型中对应约束条件的取值相同。基于该优化模型的求解结果, 可利用如下分类方法, 将各机组对应启停整数变量分为 3 类:

1) 取 1 整数变量集合 R 。即必开机组对应的整数变量 α_R , 其判断准则为机组 i 各个时段的出力均不小于该机组该时段的实际出力下限 $P_{i,\min}$, 即 $P_{i,t} \geq P_{i,\min}, \forall t=1,\dots,T$, 则机组 i 为必开机组, 其对应整数变量 $\alpha_{i,t} \in R$ 。

2) 取 0 整数变量集合 D 。即必停机组对应的整数变量 α_D , 其判断准则为机组 i 各个时段的出力均小于该机组该时段的出力下限的 δ 倍, 即 $P_{i,t} < \delta P_{i,\min}, \forall t=1,\dots,T$, 则机组 i 为必停机组, 其对应整数变量 $\alpha_{i,t} \in D$ 。为保证得到全集, 通常将 δ 取得较小, 如选 $\delta=0.05$ 。

3) 待组合起作用整数变量集合 S 。即启停机组对应的整数变量 α_S , 其判断准则为机组 i 至少存在 1 个时段的出力不小于 $\delta P_{i,\min}$, 并且存在 1 个时段出力小于机组出力下限, 即 $P_{i,t_1} \geq \alpha P_{i,\min}$ 且 $P_{i,t_2} < P_{i,\min}, \exists t_1, t_2 \in \{t | 1, \dots, T\}$, 即 $R+D$ 的补集, 此时该机组对应变量 $\alpha_{i,t} \in S$ 。

综上所述, 算法的计算流程如图 1 所示。

该分类策略的优点是: 首先考虑系统时段间耦合以及网络约束, 因此得到的结果更贴近 MILP 的实际出力结果; 其次, 要求 S-SCED 模型中所有时段都满足升降出力约束的要求比原始 MILP 模型更为苛刻^[21-22], 在负荷突升、突降时会拉动更多的机组启停参与调峰, 保证不损失最优性; 此外, 本文使用了非常严格的必开和必停判断依据, 进一步保证 IMAIV 识别得到的起作用整数变量集合为全集。

此外, IMAIV 中的 S-SCED 环节采用松弛线性

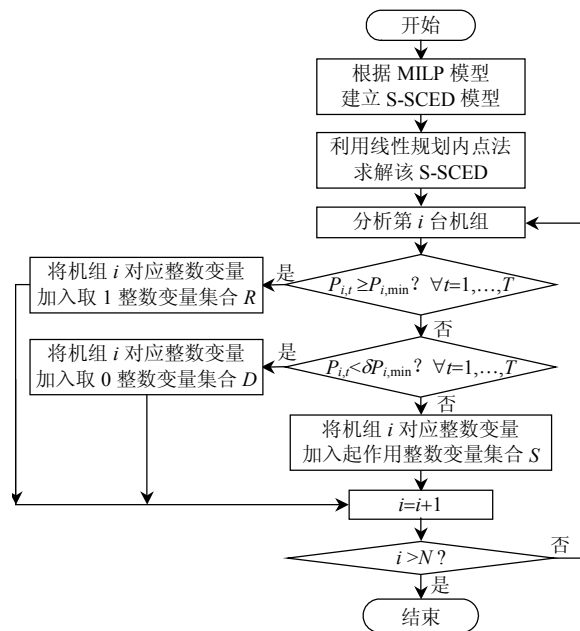


图 1 IMAIV 总体流程
Fig. 1 Flowchart of IMAIV

规划迭代流程(如图 2 所示),在识别起作用整数变量的同时可有效识别起作用的网络约束条件。设该流程识别得到的阻塞线路集合为 L ,由于 S-SCED 的整体潮流状况和机组组合最终结果的潮流状况已相当接近,因此可直接将 L 作为后续 MILP 问题的初始阻塞线路集,这将有效减少因需要多次 MILP 计算识别越限线路的计算量。

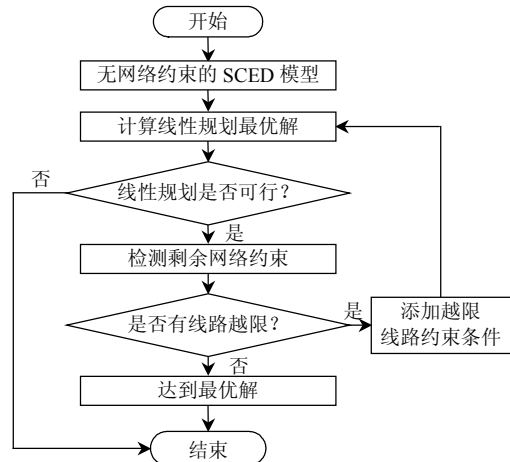


图 2 S-SCED 环节求解流程
Fig. 2 Flowchart of S-SCED

3 算例与分析

3.1 IEEE30 节点算例

本文算法采用 C 语言编程实现,在主频 2.0 GHz 的 Pentium PC 机上运行。采用开源的 GLPK 工具包作为优化软件包,对 IEEE30 节点算例和我国某省网实际数据算例进行了试算。

结合我国北京地区 2005 年 9 月 9 日的 96 点标幺负荷曲线以及 IEEE 30 标准算例的原始节点负荷,得到系统 24 点负荷数据,机组容量及所在节点与 IEEE 30 标准算例相同。此外,算例中有针对性地缩小了部分线路的正反向有功传输容量,以提高网络阻塞程度,更好测试算法的性能。基于上述基本参数,利用 IMAIV 方法得到的机组分类如表 1 所示。

表 1 机组分类
Tab. 1 Classification of units

必开机组	启停机组	必停机组
1	2, 3, 4, 6	5

起作用变量个数由原有的 144 变为 96 个。因此,在不考虑定界剪枝的情况下,实际的分支计算量由原来的 2^{144} 变为 2^{96} ,计算量可减少为原先的 $1/(2.814 \times 10^{14})$ 。经测试,两者的计算结果及时间对比如表 2 所示。

表 2 SCUC 计算结果对比
Tab. 2 Comparison of SCUC results

模型	发电成本/\$	计算时间/s
全体 SCUC	1 186 147.953 9	103.031
基于 IMAIV 的 SCUC	1 186 147.954 2	27.719

由表 2 可见,基于 IMAIV 的 SCUC 模型计算效率远高于直接进行全体 SCUC 的计算效率,最优值之间的差距基本可认为由精度取舍误差所致。由 2 种模型得到的机组组合结果完全相同,如表 3 所示。

表 3 机组组合结果
Tab. 3 Results of SCUC

时段	机组						时段	机组					
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
1	1	1	0	0	0	0	13	1	1	1	1	0	1
2	1	1	0	0	0	0	14	1	1	1	1	0	1
3	1	1	0	0	0	0	15	1	1	1	1	0	1
4	1	1	0	0	0	0	16	1	1	1	1	0	1
5	1	1	0	0	0	0	17	1	1	1	1	0	1
6	1	1	0	0	0	0	18	1	1	1	1	0	1
7	1	1	0	0	0	0	19	1	1	1	1	0	1
8	1	1	0	0	0	0	20	1	1	1	1	0	1
9	1	1	1	1	0	0	21	1	1	1	1	0	1
10	1	1	1	1	0	1	22	1	1	1	1	0	0
11	1	1	1	1	0	1	23	1	1	1	1	0	0
12	1	1	1	1	0	1	24	1	1	1	0	0	0

注：“0”表示退出；“1”表示投入。

为进一步研究本文所提方法的有效性,本文将上述 IEEE30 节点算例由 24 点扩充至 96 点。此时,如果不考虑定界剪枝,需要分支的变量由原先的 2^{576} 变成 2^{384} ,分支计算量减小为原有的 $1/(6.277 \times 10^{57})$ 。对比计算可知,基于 IMAIV 的 SCUC 用 755.515 s 计算可得最优解为 1 810 796.153 186 \$,而

直接计算 SCUC, 经过 1 h 的计算时间, 只能得到最优间隙为 0.3% 的可行解(优化间隙是指分支定界中上界和下界之间的距离, 反映了解的优化程度)。由此, 进一步验证了本文所提 IMAIV 方法的有效性。

3.2 某省网 SCUC 测试及其摄动分析

某省网规模如下: 节点数 390, 线路数 761, 机组数 168。对于这类中等规模电网, 如果不作 IMAIV 分析, 需要分支的变量数达到 4032 个, 计算量很大, 在有限时间内即便能得到可行解, 优化性能通常也无法保证。

应用 IMAIV 算法对该省网 SCUC 模型进行识别, 得到实际需要启停的机组数为 27 台, 对应起作用整数变量数为 648, 极大地缩小了组合优化空间。基于该省网 SCUC 算例, 对比直接 SCUC 计算结果和基于 IMAIV 筛选起作用变量后的 SCUC 计算结果, 如表 4 所示。

表 4 完全 SCUC 计算和基于 IMAIV 的 SCUC 结果对比
Tab. 4 Comparison between the result of direct SCUC and SCUC based on IMAIV

模型	计算时间/s	最优发电成本/元	优化间隙/%
完全 SCUC	3 604.031	761 231 970.1	2.5
基于 IMAIV 的 SCUC	101.25	753 464 382.8	0.001 7

上述算例表明, 基于本文所提起作用整数变量识别方法的 SCUC 在远少于直接 SCUC 计算的时间内, 得到远优于直接计算的最优解。

为进一步验证 IMAIV 算法不损失 SCUC 计算结果的最优性, 本文基于该省网算例进行了摄动分析。在该省网实际负荷算例的基础上, 将系统节点负荷整体提高 10%, 应用 IMAIV 法识别时, 部分正常负荷下的必停机组因负荷升高成为边际机组, 设其集合为 ΔS^+ , 对应正常负荷下可能被误判为必停的启停机组; 将负荷整体减小 10%, 使得部分正常负荷下的必开机组成为边际机组, 设其集合为 ΔS^- , 对应正常负荷下可能被误判为必开的机组。此时, 扩展启停机组集合 $S' = S + \Delta S^- + \Delta S^+$ 中启停机组数由 27 台增至 37 台。对比基于 S' 和 S 的计算结果, 如表 5 所示。

表 5 基于原始起作用约束集合的 SCUC 与基于扩展起作用约束集合 SCUC 的结果对比
Tab. 5 Comparison between the result of SCUC based on normal IMAIV set and extended IMAIV set

IMAIV	最优发电成本/元
于集合 S	753 464 195.068 582
基于集合 S'	753 464 195.056 827

由表 5 可见, 两者的优化结果相差在 10^{-8} , 可以认为没有差别。因此, 本文所提识别方法具有较好的稳定性, 不会损失 SCUC 问题的最优性。

4 机组启停费用对 IMAIV 的影响分析

为进一步提高 IMAIV 方法的精确性和完备性, 还应在 S-SCED 及分类策略中考虑机组启停费用对 MILP 结果的影响。为此, 本文提出考虑启停费用的修正发电成本 \hat{C} 。

以第 i 台启停机组为例, 基于 S-SCED 的初次计算结果, 根据一定的判断方法可得其启动次数为 N_{up} , 停机次数为 N_{down} , 机组除正常出力成本以外的额外启停成本为

$$C_{up_down} = N_{up}K_i + N_{down}J_i \quad (15)$$

设机组在 S-SCED 中的出力为 $P_{i,t}$, $i=1, \dots, T$, 此时在保证价格量纲一致的情况下, 将启停总成本均摊到机组单位出力, 即得修正发电成本

$$\hat{C}_i = (C_{up_down} + \sum_{t=1}^T C_i P_{i,t}) / \sum_{t=1}^T P_{i,t} \quad (16)$$

此时以修正发电成本 \hat{C} 再次进行 S-SCED 的优化计算, 就能在确定启停机组集合时, 综合考虑机组的发电变动成本和启停成本。考虑机组启停费用的 IMAIV 流程如图 3 所示。

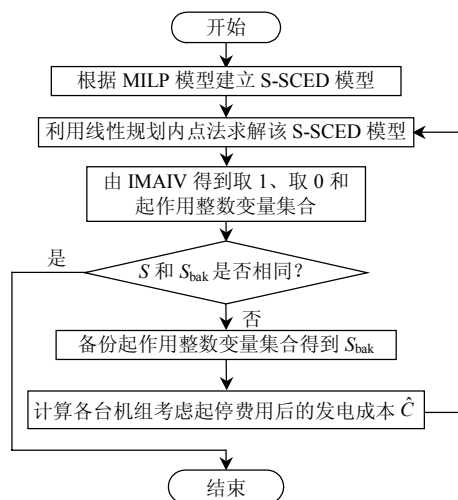


图 3 考虑启停费用的 IMAIV 流程

Fig. 3 Flowchart of IMAIV considering start/stop cost

图 3 中启动次数 N_{up} 和停机次数 N_{down} 可以通过分析机组出力曲线的上升沿和下降沿得到。如果以一个较小的数 $\varepsilon > 0$ (通常取 $\varepsilon = 0.1$) 作为停机过 0 的判断标准, 而以 $\varepsilon = \lambda P_{i,\min} > 0$ (通常取 $\lambda = 1$) 作为开机出力的限值。则有:

$$1) P_{i,t} < \varepsilon \text{ 且 } P_{i,t+1} \geq \gamma, \text{ 记为 1 次上升沿, } N_{up} = N_{up} + 1;$$

2) $P_{i,t} > \gamma$ 且 $P_{i,t+1} < \varepsilon$, 记为 1 次下降沿, $N_{\text{down}} = N_{\text{down}} + 1$ 。

每轮迭代修改 \hat{C} 后重新计算 S-SCED, 直到连续 2 次计算得到的起作用整数变量集合完全相同时中止计算, 此时即可得到考虑机组启停费用的待组合起作用整数变量集合。

以 IEEE30 节点为例, 重新进行考虑启停费用的 IMAIV 计算, 计算中开机费用和停机费用与实时燃料价格有关, 一般和机组容量成正比关系, 因此本文中开机费用以 $K_i = P_{i,\max} k / 80, 10^4$ \$ 计算; 停机费用以 $J_i = P_{i,\max} k / 160, 10^4$ \$ 计算, 根据历史统计, $k \in [0.2, 1] 10^3$ \$/MW。

以 $k = 200$ \$/MW 为例, 可得机组分类结果与表 1 相同, 从而可根据第 1 节内容确定起作用整数变量, 构造模型。相应 SCUC 对比计算结果如表 6 所示。

表 6 考虑启停费用后完全 SCUC 与基于 IMAIV 的 SCUC 的结果对比
Tab. 6 Comparison between the result of direct SCUC and SCUC based on IMAIV considering start/stop cost

模型	发电成本/\$	计算时间/s
完全 SCUC	1 189 431.532 0	104.34
基于 IMAIV 的 SCUC	1 189 431.532 2	1.14

由表 6 可知, IMAIV 在保证不损失最优性的前提下, 可有效提高 SCUC 的求解效率。相应机组组合结果如表 7 所示。

由表 7 可见, 加入启停费用后, 启停机组集合不变, 但是启停次数比不加启停费用减少了。对比表 7 和表 3 的结果可知, 加入启停费用后, 机组为减少启停成本而减少了启停, 能不启停的时段都保持运行, 因此, 启停次数减少了。具体情况如表 8 所示。

表 7 考虑启停费用的机组组合结果
Tab. 7 Results of SCUC considering start/stop cost

时段	机 组						时段	机 组					
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	0	0	0	13	1	1	1	1	0	1
2	1	1	1	0	0	0	14	1	1	1	1	0	1
3	1	1	1	0	0	0	15	1	1	1	1	0	1
4	1	1	1	0	0	0	16	1	1	1	1	0	1
5	1	1	1	0	0	0	17	1	1	1	1	0	1
6	1	1	1	0	0	0	18	1	1	1	1	0	1
7	1	1	1	0	0	0	19	1	1	1	1	0	1
8	1	1	1	0	0	0	20	1	1	1	1	0	1
9	1	1	1	0	0	0	21	1	1	1	1	0	1
10	1	1	1	1	0	0	22	1	1	1	1	0	1
11	1	1	1	1	0	1	23	1	1	1	1	0	1
12	1	1	1	1	0	1	24	1	1	1	1	0	1

表 8 考虑启停费用后机组启停的变化
Tab. 8 Change of the unit commitment status after considering start/stop cost

减少次数	机 组						总计
	1	2	3	4	5	6	
启动	0	0	1	0	0	0	1
停机	0	0	1	1	0	1	3
总计	0	0	2	1	0	1	4

与不考虑启停费用相比, 发电成本上升, 但基于 IMAIV 的 SCUC 的计算时间缩短了。这主要是因为启停次数减少, 有效减少了 MILP 的分支计算。本文以 100 \$/MW 为步长, 对 k 在 $[0, 1] 10^3$ \$/MW 区间进行抽样测试。基于 IMAIV 的 SCUC 和完全 SCUC 的计算时间如图 4 所示, 可知计算时间随启停费用的增加呈下降趋势。

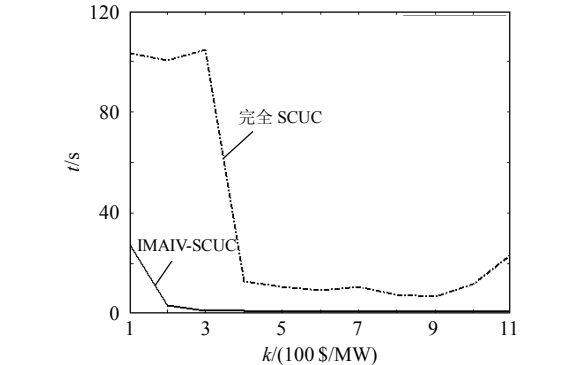


图 4 不同启停费用下计算时间的差别
Fig. 4 Different calculating time with different start/stop cost

5 结论

如何减少需要分支的整数变量的数目, 在不影响模型优化性能的前提下缩小 MILP 问题的寻优空间是提高 SCUC 求解效率的关键。本文针对大规模复杂约束 SCUC 中离散变量多, 分支计算量大, 计算时间长特点, 提出了能够综合考虑系统时段耦合约束、网络安全约束以及机组启停费用的规范化起作用变量筛选方法, 在保证 SCUC 求得最优解的前提下, 有效减少了需要进行分支定界的离散变量, 缩小了 SCUC 问题的优化空间, 提高了 SCUC 问题的求解效率, 采用本文所提方法得到的机组分类筛选的结果稳定, 筛选方法简单易实现, 具有较高的实用价值。此外, 由于所提算法的目标是识别待分支变量, 不针对特定的 SCUC 求解方法, 因此具有一定的适应性, 可用于提高其他 SCUC 算法的求解效率。

参考文献

[1] Frangioni A, Gentile C, Lacalandra F. Tighter approximated MILP

- formulations for unit commitment problems[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2009, 24(1): 105-113.
- [2] Baptistella L F B, Geromel J C. Decomposition approach to problem of unit commitment schedule for hydrothermal systems[J]. IEE Proceedings, 1980, 127(6): 1324-1331.
- [3] Li C, Johnson R B, Svoboda A J. A new unit commitment method[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1997, 12(1): 113-119.
- [4] 杨明, 杨毅刚. 用大系统分解与协调理论研究电力系统的最优机组组合[J]. 中国电机工程学报, 1989, 9(3): 51-58.
Yang Ming, Yang Yigang. Using large scale system decomposition and coordination theory to research optimal unit commitment of large electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1989, 9(3): 51-58(in Chinese).
- [5] Zhai Qiaozhu, Guan Xiaohong, Cui Jian. Unit commitment with identical units successive subproblem solving method based on Lagrangian relaxation[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 17(4): 1250-1257.
- [6] Fan J Y, Zhang L, McDonald J D. Enhanced techniques on sequential unit commitment with interchange transactions[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1996, 11(1): 1131-1138.
- [7] 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.
Sun Liyong, Zhang Yan, Jiang Chuanwen. A solution to the unit commitment problem based on matrix real-coded genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 82-87(in Chinese).
- [8] 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.
Hu Jiasheng, Guo Chuangxin, Cao Yijia. A hybrid particle swarm optimization method for unit commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 24-28(in Chinese).
- [9] Fu Y, Shahidehpour M. Fast SCUC for large-scale power systems [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22(4): 2144-2151.
- [10] 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.
Zhang Li, Zhao Jianguo, Han Xueshan. A new unit commitment algorithm considering network security constraints[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 50-55(in Chinese).
- [11] 高宗和, 耿建, 张显, 等. 大规模系统月度机组组合和安全校核算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(23): 28-30.
Gao Zonghe, Geng Jian, Zhang Xian, et al. Monthly unit commitment and security assessment algorithm for large-scale power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(23): 28-30(in Chinese).
- [12] 白晓民, 于尔铿. 用动态规划法进行电力系统机组组合最优化[J]. 中国电机工程学报, 1984, 4(1): 11-19.
Bai Xiaomin, Yu Erkeng. Optimization for unit commitment of electric power system by dynamic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 1984, 4(1): 11-19(in Chinese).
- [13] Srinivasan D, Chzela J. A priority list-based evolutionary algorithm to solve large scale unit commitment problem[C]. International Conference on Power System Technology, Singapore, 2004.
- [14] Pang C K, Chen H C. Optimal short-term thermal unit commitment [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(4): 1336-1346.
- [15] Ouyang Z, Shahidehpour S M. An intelligent dynamic programming for unit commitment application[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 17(3): 1233-1239.
- [16] 李文沅. 电力系统安全经济运行: 模型与方法[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989: 159-161.
Li Wenyuan. Safe and economical operation of power system: modelling and methods[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1989: 159-161(in Chinese).
- [17] Carrión M, Arroyo J M. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2006, 21(3): 1371-1378.
- [18] Yong Fu, Shahidehpour M. Fast SCUC for large-scale power systems [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22(4): 2144-2151.
- [19] 韦化, 黎静华. 求解机组组合问题的领域搜索法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 33-40.
Wei Hua, Li Jinghua. Unit commitment via local search point method [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 33-40(in Chinese).
- [20] 黎静华, 韦化. 基于内点法的机组组合模型[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 28-34.
Li Jinghua, Wei Hua. A unit commitment model based on interior point method[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 28-34(in Chinese).
- [21] Hosseini S H, Khodaei A, Aminifar F. A novel straightforward unit commitment method for large-scale power systems[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22(4): 2134-2143.
- [22] Tao Li, Shahidehpour M. Dynamic ramping in unit commitment [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22(3): 1379-1381.



汪洋

收稿日期: 2009-08-30。

作者简介:

汪洋(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为机组组合、经济调度、负荷预测等, wangyang02@tsinghua.edu.cn;

夏清(1957—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE高级会员, 研究方向为电力经济、电力规划、发电计划、负荷预测等;

康重庆(1969—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE高级会员, 研究方向为电力市场、电力系统规划、电力经济与信息等。

(责任编辑 马晓华)