

2-15-2024

A Simplification Method of Large-scale Unit Commitment Model Based on Boundary Method

Yanping Xu

China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China, xuyanping@epri.sgcc.com.cn

Mingxin Zhao

China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China

Xiaohui Qin

China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China

Keyou He

School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Special Column: Big Models Enable Energy Internet Planning and Operation is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

A Simplification Method of Large-scale Unit Commitment Model Based on Boundary Method

Abstract

Abstract: As the scale of power grid expands, in the market environment, the variables and constraints in the security-constrained unit commitment (SCUC) model considering power grid security constraints increase significantly and the solvability of the model reduces. When the model scale is too large, even the existing commercial solvers cannot solve it. Aiming at the model rapid solving, from the perspective of reducing the number of model constraints, a linear constraint simplification method based on the boundary method is proposed. The proposed method can effectively reduce the model's size by eliminating the redundant linear constraints. The IEEE-39, WECC 179 and IEEE-118 test cases are utilized to carry out the day-ahead SCUC testing in a market environment. Comparing the solving speed before and after simplification, the proposed method can significantly improve the solving speed of the model.

Keywords

security-constrained unit commitment(SCUC), solvability, boundary method, linear constraints, rapid solving

Authors

Yanping Xu, Mingxin Zhao, Xiaohui Qin, Keyou He, Xiaohan Wu, and Pei Zhang

Recommended Citation

Xu Yanping, Zhao Mingxin, Qin Xiaohui, et al. A Simplification Method of Large-scale Unit Commitment Model Based on Boundary Method[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(2): 296-304.

基于边界法的大型机组组合模型的简化方法

许彦平¹, 赵明欣¹, 秦晓辉¹, 何柯佑², 吴晓涵², 张沛^{2*}

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 随着电网规模的持续扩大, 市场环境下考虑网络安全约束的机组组合(security-constrained unit commitment, SCUC)模型中的变量和约束显著增加, 模型的求解性能变差。当模型规模过大时, 会出现现有的商用求解器无法求解的状况, 造成大规模模型求解困难的问题。为实现大规模机组组合模型的快速求解, 从减少模型约束数量的角度出发, 提出了一种基于边界法的线性约束简化方法。通过边界法剔除模型中冗余的线性约束, 可以有效降低模型规模, 实现模型的快速求解。基于 IEEE-39、WECC 179 和 IEEE-118 算例, 在市场环境下进行日前 SCUC 测试。通过对比简化前后的求解时间, 表明该方法能够显著提高模型的求解速率。

关键词: 安全约束机组组合; 求解性能; 边界法; 线性约束; 快速求解

中图分类号: TP391; TM73 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)02-0296-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-1072

引用格式: 许彦平, 赵明欣, 秦晓辉, 等. 基于边界法的大型机组组合模型的简化方法[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(2): 296-304.

Reference format: Xu Yanping, Zhao Mingxin, Qin Xiaohui, et al. A Simplification Method of Large-scale Unit Commitment Model Based on Boundary Method[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(2): 296-304.

A Simplification Method of Large-scale Unit Commitment Model Based on Boundary Method

Xu Yanping¹, Zhao Mingxin¹, Qin Xiaohui¹, He Keyou², Wu Xiaohan², Zhang Pei^{2*}

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: As the scale of power grid expands, in the market environment, the variables and constraints in the security-constrained unit commitment (SCUC) model considering power grid security constraints increase significantly and the solvability of the model reduces. When the model scale is too large, even the existing commercial solvers cannot solve it. Aiming at the model rapid solving, from the perspective of reducing the number of model constraints, a linear constraint simplification method based on the boundary method is proposed. The proposed method can effectively reduce the model's size by eliminating the redundant linear constraints. The IEEE-39, WECC 179 and IEEE-118 test cases are utilized to carry out the day-ahead SCUC testing in a market environment. Comparing the solving speed before and after simplification, the proposed method can significantly improve the solving speed of the model.

Keywords: security-constrained unit commitment(SCUC); solvability; boundary method; linear constraints; rapid solving

收稿日期: 2023-08-31 修回日期: 2023-10-20

第一作者: 许彦平(1989-), 女, 高工, 硕士, 研究方向为电力系统规划与运行。E-mail: xuyanping@epri.sgcc.com.cn

通讯作者: 张沛(1972-), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统调度运行、电力系统规划和新能源预测与消纳等。

E-mail: peizhang166@qq.com

0 引言

考虑安全约束的机组组合作为实现电力资源优化配置的关键,其在电力现货市场、运行调度中有着广泛的应用^[1]。合理的机组组合方案对于实现电力经济、高效、稳定地供应具有重要意义。目前,解决安全约束的机组组合(security-constrained unit commitment, SCUC)问题较为常用的方法是将SCUC建模为混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP)问题,并通过商业求解器进行求解。商业求解器多用分支定界法进行求解,该方法收敛效率高,并能保证最终找到全局最优解。然而,随着电力系统规模的扩大,模型中的变量和约束数量会大幅增加,且为了保证电力系统网络安全稳定运行,需要在模型中考虑大量网络安全约束,这就导致大规模SCUC模型求解时间过长甚至无法求解。因此,迫切需要削减模型规模以提高商业求解器求解大规模SCUC模型的速度。

国内外对如何通过削减SCUC模型规模来减少求解时间的问题开展了广泛的研究,研究可分为整数变量削减和约束削减两大类。机组组合问题含有大量离散决策变量,给求解过程带来了大量的计算。因此,通过对模型中整数变量进行缩减,可以有效减少模型离散变量数量,进而达到关注系统的大规模特征,并提高模型求解效率的目的。一些研究者将同类发电机形成发电集群,用整型变量替换这个集群中的所有二进制变量,可以降低单个机组在机组开机方式中的二进制变量 $\{0,1\}$ 的数量,提高计算速度^[2-5]。文献[5]使用现有的连续启动和关闭变量的和来使每个集群只有一个整数单位机组组合变量,从而减小问题的规模。文献[6]采用目标标度集合方法先探测可能为0的整数变量,然后将确定取0的整数变量固定为0,以此来削减整数变量的规模。文献[7]采用数据驱动的方法对整数变量进行削减,先根据历史数据确定大量机组的开/关状态,再对削减后的模型进行求解,加快模型求解速度。

上述文献实现了对SCUC模型中整数变量的

削减,但模型仍为MILP问题,求解难度依旧很高。部分学者将MILP问题转化为线性规划(linear programming, LP)问题进行求解,进一步降低模型求解难度,提升模型求解速度^[8-10]。文献[8-9]利用紧凸松弛将运行过程中二进制 $\{0,1\}$ 变量转换成连续变量,再嵌入类似机组出力限值与爬坡约束等约束来收紧松弛。文献[10]基于单机组凸包理论将单机组凸包扩展到多机系统,建立考虑安全约束的大规模机组组合问题双重凸包模型,将MILP问题近似转化为LP问题。一些研究者通过忽略UC问题中的机组状态变量及相关约束,即仅考虑经济调度而使模型由MILP问题转化为LP问题,来减少SCUC模型的求解时间。然而,这些简化可能导致求解获得的解不是最优解^[3]。

上述对于削减模型规模的方法研究都是从减少模型整数变量数量的角度开展的,还有许多研究从减少网络安全约束数量的角度开展的^[11-15]。这2类方法之间互不冲突,可以结合起来以达到更好的求解加速效果。文献[11]通过推导故障态潮流的上界,消除冗余的故障态安全约束,来削减网络安全约束,但该方法只适用于削减基于直流法潮流方程的故障态网络安全约束,且简化后的故障态集合仍然包含很多冗余的故障态安全约束。文献[12]提出了一种基于辅助优化问题的故障态安全约束削减方法,但该方法是通过一系列充分不必要条件实现的,并不能识别SCUC问题中全部的冗余约束。文献[13]结合UC模型的经济学和物理特性,提出了一种冗余网络安全约束识别方法,该方法能够识别出许多CPLEX预分割过程无法识别的非活跃约束,显著提高了计算效率。然而,以上约束削减方法都无法消除所有的冗余网络安全约束,使得简化后的模型中仍存在很多不起作用的网络安全约束,应进一步探索更为有效的约束削减方法。

为了提高大型机组组合模型的求解速率,本文提出一种基于边界法的线性约束简化方法。首先,根据约束中变量系数的正负性将变量划分为2个集合,然后,根据集合分别计算每个约束的上

下界，最后，判断约束上下界是否在约束两侧限值之内，若在两侧限值之内，则该约束为冗余约束，将该约束剔除；否则，保留该约束。所提方法能够通过识别有界变量线性规划问题的冗余约束，简化模型约束，对涉及线性约束的各种求解问题都能有效降低模型规模，在保证获取最优解的同时，大大提高求解速度。

1 SCUC 模型介绍

本文在市场环境下，采用分段报价机制，构建日前 SCUC 模型。

电能量市场的单边竞价模式遵循“发电侧报量报价、用户侧报量不报价”的原则。参与市场的发电机组在日前电能量市场中申报量价信息，发电机组的报价如图 1 所示。其中， $P_{i,j,t}^{\max}$ 表示 t 时段内发电机组 i 在区间 j 的出力限值； $C_{i,j,t}$ 表示 t 时段内发电机组 i 在区间 j 的报价成本。发电机组的报价按以下方式进行：若发电机 i 在 t 时段内的出力小于第一区间的限值 $P_{i,1,t}^{\max}$ ，则发电机 i 在 t 时段内的报价成本为 $C_{i,1,t}$ ；若发电机 i 在 t 时段内的出力小于第一区间与第二区间限值之和 $P_{i,1,t}^{\max} + P_{i,2,t}^{\max}$ ，则发电机 i 在 t 时段内发电机组出力大于 $P_{i,1,t}^{\max}$ 小于 $P_{i,2,t}^{\max}$ 的部分报价成本为 $C_{i,2,t}$ ，以此类推。参与批发市场的用户、售电公司根据负荷预测结果申报运行日的用电需求，不申报价格。

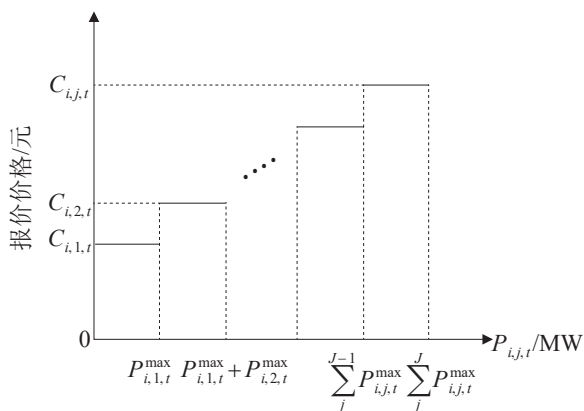


图 1 发电机报价曲线
Fig. 1 Curve of generator quotation

1.1 目标函数

模型考虑水电、火电、风电和光伏 4 种类型机组，目标函数包括以上 4 种类型机组的发电成本，目标为发电成本最小化。

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J [C_{i,j,t}(P_{i,j,t}) \cdot S_{i,t}] + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (C_{i,t}^U \cdot U_{i,t}) + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (C_{i,t}^M \cdot D_{i,t}) \right\} \quad (1)$$

式中： $C_{i,j,t}(P_{i,j,t})$ 为时段 t 机组 i 在区间 j 的报价成本，是与机组申报的各段出力区间和对应能量价格有关的多段线性函数； $S_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的运行状态； $C_{i,t}^U$ 、 $C_{i,t}^M$ 分别为机组 i 在时段 t 的启动费用、关机费用； $U_{i,t}$ 、 $D_{i,t}$ 分别为机组 i 在时段 t 的启动状态、关闭状态。

1.2 约束条件

模型约束条件包括系统电力平衡、机组状态、机组最小开机时间、机组最小停机时间、机组出力上下限、机组爬坡、网络安全约束。

(1) 系统电力平衡约束

为保障系统的发、用电平衡，需要加入系统的功率平衡约束：

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

式中： $P_{i,t}$ 为时段 t 机组 i 的出力； N 为机组数量； L_t 为时段 t 系统总负荷。

(2) 机组状态约束

对于存在状态、启停变量的火电机组，需要加入机组状态约束：

$$S_{i,t} - S_{i,t-1} = U_{i,t} - D_{i,t} \quad (3)$$

$$U_{i,t} + D_{i,t} \leq 1 \quad (4)$$

(3) 机组最小开机时间约束

由于火电机组自身的惯性，实现开机后一定时间后才能实现再关机，需要加入机组最小开机时间约束：

$$(\alpha_i - 1)U_{i,t} \leq S_{i,t+1} + S_{i,t+2} + \dots + S_{i,t+\alpha_i-1} \quad (5)$$

式中： α_i 为机组 i 的最小在线运行时间。

(4) 机组最小停机时间约束

由于火电机组自身的惯性, 物理上无法实现关机后短时间内再开机, 需要加入机组最小停机时间约束:

$$(\beta_i - 1)D_{i,t} + S_{i,t+1} + S_{i,t+2} + \dots + S_{i,t+\beta_i-1} \leq (\beta_i - 1) \quad (6)$$

式中: β_i 为机组 i 的最小停机时间。

(5) 机组出力上下限约束

机组的出力应该处于其最大/最小技术出力范围之内:

$$P_{\min,i} \cdot S_{i,t} \leq P_{i,t} \leq P_{\max,i} \cdot S_{i,t} \quad (7)$$

式中: $P_{\min,i}$ 为机组 i 最小出力; $P_{\max,i}$ 为机组 i 最大出力。

(6) 机组爬坡约束

机组上爬坡或下爬坡时, 均应满足爬坡速率要求:

$$R_{i,t}^D \cdot S_{i,t} \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq R_{i,t}^U \cdot S_{i,t} \quad (8)$$

式中: $R_{i,t}^U$ 、 $R_{i,t}^D$ 分别为机组 i 在时段 t 的向上、向下爬坡限值。

(7) 网络安全约束

本文的网络安全约束考虑无故障和 N-1 2 种情况, 分别为线路热极限约束和 N-1 静态安全潮流约束。

1) 热极限约束

线路无故障情况下, 由于线路材料的物理限制, 线路的功率输送量应小于线路极限值:

$$-P_{\text{limit}} \leq \sum_{i=1}^N F_{l-i} (P_{i,t} - L_{i,t}) \leq P_{\text{limit}} \quad (9)$$

式中: F_{l-i} 为节点 i 对线路 l 的发电机输出功率转移因子; $P_{i,t}$ 为第 t 时段节点 i 上的发电机注入功率; $L_{i,t}$ 为第 t 时段节点 i 上的负荷注入功率, 取正值。

在电力系统分析中, 转移因子^[16]被定义为发电机增加单位有功出力所引起的支路有功潮流变化量。按直流潮流计算, 发电节点对支路的转移因子为

$$F_{l-i} = \frac{\Delta P_l}{\Delta P_{Gi}} = \frac{X_{mi} - X_{ni}}{x_l} \quad (10)$$

式中: F_{l-i} 为发电机节点 i 对支路 l 的转移因子; ΔP_{Gi} 为发电机节点 i 有功出力变化量; ΔP_l 为支路 l

有功潮流变化量; m 和 n 分别为支路 l 的首末节点编号; X_{mi} 和 X_{ni} 分别为电抗矩阵第 m 行 i 列、第 n 行 i 列元素值; x_l 为支路 l 的电抗值。

2) N-1 静态安全潮流约束

正常运行方式下的电力系统中任一线路因故障断开, 电力系统应能保持稳定运行和正常供电, 其余线路的功率传输不会超越线路限值:

$$\sum_{i=1}^N O_{mn,i,l} (P_{i,t} - L_{i,t}) \leq P_{\text{limit}} \quad (11)$$

式中: $O_{mn,i,l}$ 为故障转移分布因子, 表示当线路 l 故障退出运行时, 节点 i 注入功率变化时线路 mn 的潮流值的变化率。其计算公式为^[17]

$$O_{mn,i,l} = F_{mn-i} + I_{mn,l} F_{l-i} \quad (12)$$

式中: $I_{mn,l}$ 为支路开断分布系数, 是由故障线路 l 引起的 mn 线路的潮流变化。

文献[18]给出了 I 的详细推导过程:

$$I_{mn,l} = \frac{F_{mn-p} - F_{mn-q}}{1 - (F_{l-p} - F_{l-q})} \quad (13)$$

式中: p 、 q 为故障线路 l 的起始节点编号。

1.3 模型规模与算例规模的关系

算例规模定义为仿真时段数为 N_{Seg} , 线路数量为 N_{Lines} , 火、水、风、光机组数量为 N_{Coal} 、 N_{Hydro} 、 N_{Wind} 、 N_{Solar} , 机组 i 报价段数为 $T_{\text{Seg},i}$ 。模型的具体规模如表 1 所示。其中, 等式约束包含系统功率平衡约束和火电机组状态约束中的式(3); 不等式约束包含火电机组的出力上下限约束、爬坡约束、最小开关机时间约束和状态约束中的式(4), 水电机组、风电机组和光伏机组的出力上下限约束。随着网架规模的增大, 模型中变量和约束数量也愈加庞大, 给模型优化求解带来困难。

表 1 模型规模
Table 1 Model scale

连续变量数量	$\sum_{i \in \text{Gen}} (T_{\text{Seg},i}) N_{\text{Seg}}$
整数变量数量	$3N_{\text{Coal}} N_{\text{Seg}}$
等式约束数量	$(N_{\text{Coal}} + 1) N_{\text{Seg}}$
不等式约束数量 (不含网络安全约束)	$(5N_{\text{Coal}} + N_{\text{Hydro}} + N_{\text{Wind}} + N_{\text{Solar}}) N_{\text{Seg}}$

2 基于边界法的线性约束简化方法

2.1 边界法描述

本文从减少模型线性约束数量的角度出发，基于边界法剔除模型中的冗余线性约束，从而提高求解效率。

边界法是一种识别有界变量线性规划问题冗余约束的方法^[9]。计算每个约束可能达到的最大、最小值，然后与约束两侧限值进行比较，从而确定其是否为冗余约束。从安全域的角度，剔除的约束即为运行点不可能触碰到的边界条件。

图 2 为二维断面下线性约束构成的可行域空间示意图，其中，红色边界即为可行域的边界。图中可行域空间由 L3、L4、L5、L6、L7 等线性约束和 PG1、PG2 的机组上下限构成，其余约束 (L1、L2、L8、L9) 即为冗余约束。其中，冗余约束是指在约束集合中可以被其他约束所推导出来的约束。冗余约束不会对问题的可行性或者最优性造成影响。但如果在问题求解时保留这些冗余约束，会增加计算负担并且导致求解时间变长。因此，基于边界法剔除冗余约束可以有效提高优化模型的求解速度。

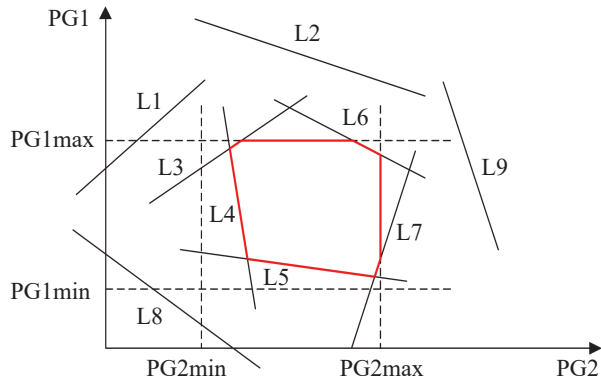


图 2 二维断面下的可行域空间
Fig. 2 Feasible region space under two-dimensional section

以热极限约束为例，判断 SCUC 模型中网络安全约束 $-P_{\text{limit}} \leq \sum_{i=1}^N F_{l-i}(P_{i,t} - L_{i,t}) \leq P_{\text{limit}}$ 是否为冗

余约束的步骤如下。

(1) 根据约束中变量系数 F_{l-i} 的正负性，将变量 $P_{i,t}$ 序号 i 划分为 2 个集合：

$$R_i = \{i | F_{l-i} > 0\} \quad (14)$$

$$Q_i = \{i | F_{l-i} \leq 0\} \quad (15)$$

(2) 计算每一个约束的上下界：

$$U = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{i \in R_i} F_{l-i}(P_{\text{max},i} - L_{i,t}) + \sum_{i \in Q_i} F_{l-i}(P_{\text{min},i} - L_{i,t}) \right) \quad (16)$$

$$D = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{i \in R_i} F_{l-i}(P_{\text{min},i} - L_{i,t}) + \sum_{i \in Q_i} F_{l-i}(P_{\text{max},i} - L_{i,t}) \right) \quad (17)$$

(3) 判断 U 、 D 是否同时满足 $U < P_{\text{limit}}$ 、 $D > -P_{\text{limit}}$ 。若约束满足上述不等式，则约束 $-P_{\text{limit}} \leq \sum_{i=1}^N F_{l-i}(P_{i,t} - L_{i,t}) \leq P_{\text{limit}}$ 为冗余约束，该约束被剔除；否则，保留该约束。

2.2 网络约束简化

网络约束由于其数量多与稠密性高的特点，成为影响 SCUC 模型优化求解的重要因素。同时，作为多变量线性约束，网络约束与线性规划问题中的线性约束具有相同的特性。因此，使用边界法简化网络约束对提高模型优化求解速度具有重要意义。图 3 为 N-0 情况下热极限约束的简化流程图。

3 算例分析

本文分别以 IEEE-39 节点系统和 WECC 179 节点系统为例，在市场环境下，以单边报价的形式构建日前 SCUC 模型。然后，利用 COPT 求解器进行求解，并对边界法提高模型求解效率的有效性进行验证。仿真运行时的电脑配置为搭载 Windows 系统的便携式笔记本电脑，处理器为 AMD Ryzen 7 5800H，内存为 16 GB，显卡为 NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop GPU，硬盘为 1 TB 的固态硬盘。

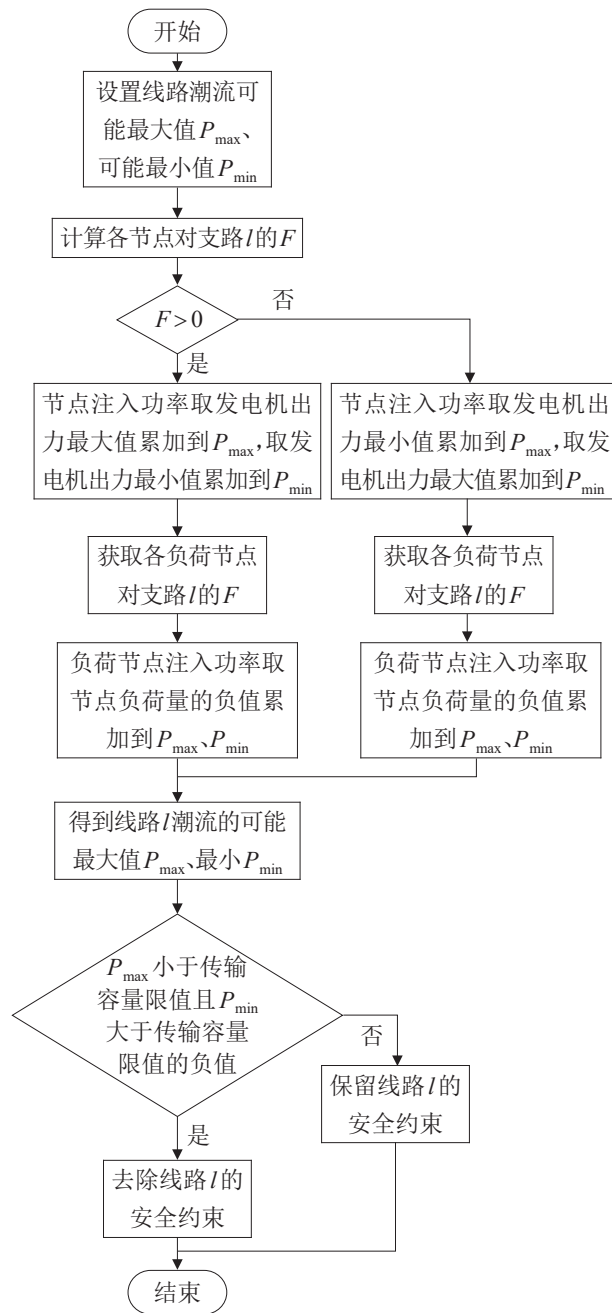


图3 简化热极限约束流程

Fig. 3 Flow chart of simplified thermal limit constraint

表2为IEEE-39节点系统和WECC 179节点系统的系统规模。表3为不同节点系统未简化时模型的初始规模,其中,连续变量数量、整数变量数量、等式约束数量和不等式约束数量可根据表1~2推导得到,网络安全约束数量通过程序统计得到,约束总量会在模型构建完毕后由程序输出显示。

表2 系统机组、线路信息

Table 2 System information of unit and line

规模	case39	case179
火电机组	7	21
水电机组	1	1
风电机组	1	3
光伏机组	1	4
线路	46	263

表3 系统规模

Table 3 System scale

规模	case39	case179
连续变量	3 840	8 760
整数变量	504	1 512
等式约束	192	528
不等式约束 (不含网络安全约束)	912	2 712
网络安全约束数量	38 136	693 360
约束总量	43 584	706 872

根据表3可知,在简化前2个系统中约束的数量庞大,且随着模型规模的增加,约束的数量剧增。如果不对模型进行简化,难以实现对机组组合模型进行快速求解。

3.1 简化前后模型规模对比

表4为边界法简化线性约束前后的模型网络安全约束数量对比。表5为边界法简化线性约束前后的模型约束总数量对比。由于简化前后的连续变量、整数变量、等式约束和不等式约束(不含网络安全约束)必不可少,且不能被其他约束推导出来。所以,这些变量未被简化,其数量保持不变,因此,不在表格中列出进行对比。需要注意的是,由于部分线路并没有给出潮流限制,因此,这些线路没有约束。

表4 模型简化前后网络安全约束数量对比

Table 4 Number of network security-constraints before and after model simplification

算例	简化前	简化后
case39	38 136	18 459
case179	693 360	392 046

表 5 模型简化前后约束总数量对比
Table 5 Number of constraints before and after model simplification

算例	简化前	简化后
case39	43 584	23 907
case179	706 872	395 286

根据表 4~5 可知，简化后的网络安全约束数量明显减少，表明本文方法显著降低了机组组合模型的规模。对于 WECC 179 节点系统，简化后的网络安全约束数量也显著减少，表明本文方法可以有效降低机组组合模型的规模。

图 4 为 IEEE-39 节点系统 bus38 和 bus39 处发电机的可行域空间和热极限约束示意图。图 5 为 WECC 179 节点系统 bus4 和 bus6 处发电机的可行域空间和热极限约束示意图。图 4~5 中，黑色虚线所围区域即为两发电机可行域；红色的边界约束为线性非冗余约束；蓝色的边界约束为线性冗余约束，此类约束与模型最优值的求解无关，反而会增大模型规模，影响模型的求解效率。

根据图 4~5 可知，简化后的线性约束明显减少，有利于降低模型规模，进而提高算法的求解速度。

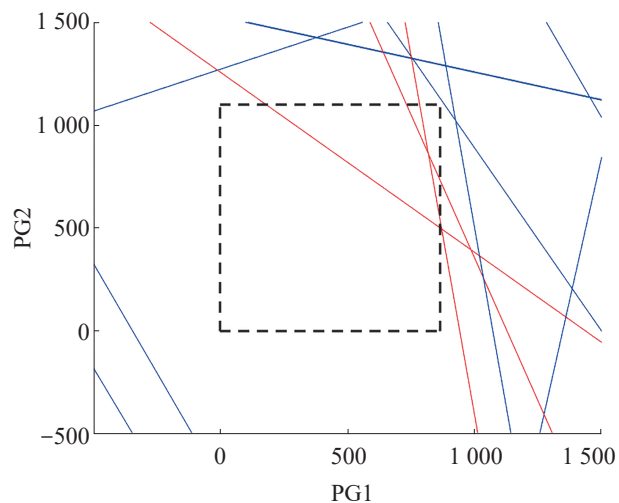


图 4 IEEE-39 节点系统机组可行域空间与约束
Fig. 4 Unit feasible region space and security-constraints of IEEE-39

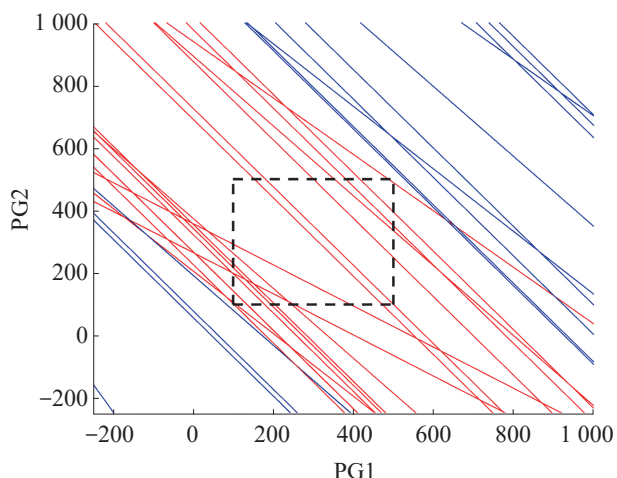


图 5 WECC179 节点系统机组可行域空间与约束示意图
Fig. 5 Unit feasible region space and security-constraints of WECC179

3.2 简化前后模型构建及求解时间对比

对于 IEEE-39 和 WECC 179 系统，其机组组合模型的构建及求解时间如表 6 所示。根据表 6 可知，基于边界法的约束简化方法，使得 SCUC 模型求解效率分别提高了 57.78%、81.96%。在模型构建过程中使用边界法进行约束简化，模型构建时间变长，但总时间仍缩短，分别缩短了 5.03%、35.24%。上述结果表明：基于边界法简化模型线性约束的方法可以提高模型的求解效率，减少求解总时间。此外，本文方法在大系统(WECC 179 节点系统)中求解总时间减少的幅度更大，说明本文方法在大模型中的应用效果更佳，更有利于将其拓展到复杂电网中。需要指出的是，本文方法对具有线性约束的各类优化问题的求解，都具有简化冗余线性约束的作用，不仅仅局限于本文仿真模型的求解。

表 6 模型构建及求解时间对比
Table 6 Comparison of modeling and solution time s

算例	模型构建	求解	总时间
case39	简化前	6.059	9.659
	简化后	7.653	9.173
case179	简化前	262.565	463.791
	简化后	264.060	300.370

3.3 简化前后的目标函数值对比

为了验证本文提算法获得的简化模型的正确性, 分别对简化前后的2个系统的目标函数值进行对比, 结果如表7所示。

表7 目标函数对比
Table 7 Comparison of objective function

算例	简化前/元	简化后/元	误差率/%
case39	8 509 315.03	8 514 250.43	0.058
case179	60 296 179.82	60 340 196.03	0.073

根据表7可知, 简化后2个系统的目标函数值均与简化前存在一定程度的误差, 但是误差率却很小。简化前后模型结果的差异在可接受范围内。此外, 结合简化前后的求解时间可知, 本文算法在保证获得较高精度的计算结果的前提下, 实现求解效率的大幅提高, 从而验证了本文算法的正确性。

3.4 不同方法简化结果对比

为了验证本文方法的性能, 以IEEE-118节点系统为例, 对本文方法与文献[13]提出的基于辅助优化问题的故障态安全约束削减方法(方法2)进行比较, 2种方法的比较结果如表8所示。

表8 不同方法简化结果对比
Table 8 Comparison of simplified results by different methods

方法	约束削减 比例/%	约束削减 时间/s	优化求解 时间/s	总时间/s
简化前	—	—	938.249	938.249
本文	91.71	49.656	8.258	57.914
方法2	96.05	96.434	12.770	109.204

表8结果表明: 本文方法和方法2都能够在较短的时间内实现对冗余约束的削减, 具有较好的简化效率。与本文方法相比, 方法2可以削减更多冗余约束, 但由于辨识冗余约束的方法比本文方法复杂, 简化过程较慢, 因此, 本文方法对求解总时间具有更好的缩减效果, 验证了本文方法的有效性。

4 结论

本文从简化约束角度出发, 提出了基于边界法的线性约束简化方法。通过剔除模型中冗余的线性约束, 提高了大模型条件下机组组合模型的求解速率。采用IEEE-39、WECC 179和IEEE-118节点算例, 在日前市场SCUC模型的求解中验证了本文方法的有效性和正确性。本文方法显著降低了模型求解时间, 有利于UC模型在电力现货市场、运行调度等方面的应用。

在UC模型中, 由于网络约束包含众多属于稠密约束的变量, 而此类约束是优化求解的一大难题。当系统规模较大时, 若不进行约束的削减, 现有的商用求解器可能无法进行求解或求解的时间代价无法承受。本文方法对此类约束具有一定的简化作用, 有利于求解器的求解。本文方法可以与其他变量削减及约束削减方法相结合, 获得更好的模型规模削减效果。虽然本文仿真只针对机组组合问题, 但提出的方法在经济调度问题中仍然适用。同时, 在最优潮流、自动发电控制等非线性优化求解问题中, 本文所提方法同样能够起到削减模型规模, 提高求解效率的作用。

参考文献:

- [1] 李云达. 考虑备用共享的含风电区域电力市场日前出清模型研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2021.
Li Yunda. Research on the Day-ahead Clearing Model of Regional Electricity Market Including Wind Power Generation Considering Reserve Sharing[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021.
- [2] Palmintier B S, Webster M D. Heterogeneous Unit Clustering for Efficient Operational Flexibility Modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1089-1098.
- [3] Palmintier B S, Webster M D. Impact of Operational Flexibility on Electricity Generation Planning with Renewable and Carbon Targets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 672-684.
- [4] Palmintier B, Webster M. Impact of Unit Commitment Constraints on Generation Expansion Planning with Renewables[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-7.

- [5] Palmintier B S, Webster M D. Heterogeneous Unit Clustering for Efficient Operational Flexibility Modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1089-1098.
- [6] 代江, 田年杰, 姜有泉, 等. 考虑梯级耦合的水火电检修计划与机组组合协同优化[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 83-91.
Dai Jiang, Tian Nianjie, Jiang Youquan, et al. Collaborative Maintenance Scheduling and Unit Commitment for Hydropower and Thermal Power Systems Considering Cascade Hydropower Coupling[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 83-91.
- [7] Zhou Yuzhou, Zhai Qiaozhu, Wu Lei, et al. A Data-driven Variable Reduction Approach for Transmission-constrained Unit Commitment of Large-scale Systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(1): 254-266.
- [8] Hua Bowen, Baldick R, Wang Jianhui. Representing Operational Flexibility in Generation Expansion Planning Through Convex Relaxation of Unit Commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 2272-2281.
- [9] Hua Bowen, Baldick R. A Convex Primal Formulation for Convex Hull Pricing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3814-3823.
- [10] 曲明, 丁涛, 李立, 等. 从NP-Hard到多项式时间算法的大规模机组组合近似线性规划: 双重凸包模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3261-3275, 中插13.
Qu Ming, Ding Tao, Li Li, et al. An Approximate Linear Program from an NP-hard to a Polynomial Time Complexity for a Large-scale Unit Commitment: Dual Convex Hull Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3261-3275, 中插13.
- [11] 王砚平, 鲍威, 李赢, 等. 考虑N-1故障的安全约束机组组合模型及约束削减方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 167-175.
Wang Yanping, Bao Wei, Li Ying, et al. Model and Constraint-reduction Method for Security-constrained Unit Commitment Considering N-1 Contingency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 167-175.
- [12] 付聪, 王砚平, 刘俊磊, 等. 基于辅助优化问题的安全约束机组组合约束削减方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 9-17.
Fu Cong, Wang Yanping, Liu Junlei, et al. Constraint Reduction Method for Security-constrained Unit Commitment Based on an Auxiliary Optimization Problem[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 9-17.
- [13] Ma Ziming, Zhong Haiwang, Cheng Tong, et al. Redundant and Nonbinding Transmission Constraints Identification Method Combining Physical and Economic Insights of Unit Commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3487-3495.
- [14] Salvador Pineda, Juan Miguel Morales, Asunción Jiménez-Cordero. Data-driven Screening of Network Constraints for Unit Commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3695-3705.
- [15] Álinson S Xavier, Qiu Feng, Shabbir Ahmed. Learning to Solve Large-scale Security-constrained Unit Commitment Problems[J]. INFORMS Journal on Computing, 2020, 33(2): 739-756.
- [16] 黄泽荣, 彭建春, 肖文娴, 等. 关于GSDF与GGDF的合理性与最优性[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 7-10, 40.
Huang Zerong, Peng Jianchun, Xiao Wenxian, et al. On the Rationality and Optimality of GSDF and GGDF[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 7-10, 40.
- [17] Zhu Jizhong. Optimization of Power System Operation[M]. Hoboken: Wiley, 2008.
- [18] Diego A Tejada-Arango, Pedro Sánchez-Martín, Andres Ramos. Security Constrained Unit Commitment Using Line Outage Distribution Factors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 329-337.
- [19] Paulraj S, Sumathi P. A Comparative Study of Redundant Constraints Identification Methods in Linear Programming Problems[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2010, 2010: 723402.