

DOI: 10.7667/PSPC171312

基于改进约束序优化方法的带安全约束的不确定性 机组组合问题研究

杨楠¹, 王璇¹, 周峥², 陈道君³, 黎索亚¹, 李宏圣¹

(1. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 国网湖北省电力公司武汉供电公司, 湖北 武汉 430014; 3. 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007)

摘要: 为快速有效地求解考虑间歇性可再生能源接入的 SCUC 问题, 在现有约束序优化的基础上, 提出了一种适用于不确定性 SCUC 问题求解的改进约束序优化算法。该方法针对序优化的粗糙模型和精确模型分别融入了离散变量识别策略和无效安全约束削减策略。相比于传统求解方法, 提出的改进约束序优化算法在充分发挥传统序优化计算效率方面优势的同时, 进一步增强了算法的紧凑性, 降低了计算冗余度, 有效提升了算法的求解效率。基于 IEEE-118 节点标准算例的仿真验证了所提算法的正确性和有效性。

关键词: 约束序优化; 无效安全约束识别; 离散变量辨识; 考虑安全约束的机组组合; 风力发电

Research on uncertain unit commitment problem with security constraints based on improved constraint ordinal optimization method

YANG Nan¹, WANG Xuan¹, ZHOU Zheng², CHEN Daojun³, LI Suoya¹, LI Hongsheng¹

(1. New Energy Micro-grid Collaborative Innovation Center of Hubei Province (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. Wuhan Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430014, China; 3. State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: For the sake of solving the Security Constrained Unit Commitment (SCUC) problem of intermittent renewable energy access quickly and effectively, an improved ordinal optimization algorithm which can be applied to solve the uncertain SCUC problem is proposed on the basis of existing constrained ordinal optimization. In order to solve the crude model and precise model, discrete variable identification strategy and effective security constraint reduction strategy are respectively adopted. Compared to the traditional method, this modified ordinal optimization algorithm gives full play to the traditional ordinal optimization in computational efficiency while further enhances the compactness and reduces the computation redundancy. The correctness and effectiveness of the proposed algorithm are verified by the IEEE-118 simulation results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607104).

Key words: constrained ordinal optimization; invalid security constraint identification; discrete variable identification; security constrained unit commitment; wind power

0 引言

在风电大规模接入背景下, 计及风电出力不确定性的考虑网络安全约束的机组组合 (Security Constraints Unit Commitment, SCUC) 是制定电力系统日前发电计划的主要依据, 也是日前电力市场决

策的重要基础^[1]。SCUC 在数学上是一个带约束、非线性的大规模混合整数规划问题^[2], 在求解上是一个典型的非确定性多项式 (Non-Deterministic Polynomial, NP) 难题。随着电网规模的不断扩大以及间歇性的可再生能源的大规模接入, 使得 SCUC 问题的求解难度日益增加, 因此, 如何有效快速地求解考虑风电出力不确定性的 SCUC 问题日益成为人们研究的热点。

对于不确定性 SCUC 模型的求解, 目前的主流方法是以 Benders 分解为基础的, 即: 首先利用 Benders 分解法, 把 SCUC 模型解耦为机组组合和网络安全约束校核两个子问题, 然后再利用拉格朗日松弛法^[3]、动态规划法^[4]、分支定界法^[5]及各种智能优化算法^[6-9]对每个子问题进行求解。然而, 由于 Benders 分解法的主要优势在于求解具有复杂约束的确定性优化问题, 而在相应的不确定性优化问题求解方面优势并不明显。近年来, 作为解决复杂优化问题的有效方法之一, 序优化^[10]理论日益引起人们的关注。文献[11]首次将序优化引入不确定性 SCUC 问题求解领域, 从工程实际出发, 放弃求其最优解, 转而寻求 SCUC 问题的足够好解, 成功将求解效率在传统 Benders 分解方法的基础上提升了近 30 倍, 从而证明了序优化理论在不确定性 SCUC 求解领域的显著优势。从现有研究来看, 虽然序优化被证明是一种可以快速求解不确定性 SCUC 问题的有效方法, 但由于传统序优化理论仅从解空间入手, 通过构建粗糙模型降低模型可行域规模, 而忽视了对于模型本身冗余信息的剔除和甄别, 因此, 在求解效率方面, 序优化算法仍有较大的改进和提升空间, 这主要表现在:

1) 利用序优化方法求解 SCUC 模型时, 需首先构建粗糙模型, 筛选出机组启停状态的可行解空间, 但在大规模电力系统中机组数量较多, 如果针对所有机组来筛选启停状态可行解的话, 将会极大地影响粗糙模型的求解效率。而对于实际大电网, 其最大负荷通常达到装机容量的 70% 甚至更高, 这意味着有部分常开常停机组, 可以无需对所有机组进行状态组合^[12], 如果在序优化粗糙模型中, 首先对常开、常停机组进行识别, 将有效提升序优化粗糙模型的求解效率。

2) 网络安全约束校核与计算, 是 SCUC 问题求解过程中计算量最大的部分之一, 文献[11]的序优化精确模型中, 采用的是对所有线路逐一校核的策略, 由于需要校核节点、线路数量会随着电网规模的扩大而急剧增大, 因而, 上述策略将会对序优化的计算效率带来较为严重的影响。文献[13]的研究表明, 在众多网络安全约束之中, 只有极少一部分是起到可行域限制作用的有效约束, 作者还提出一种无效安全约束快速辨识方法, 成功削减了超过 85% 的无效安全约束而不影响模型计算精度。如果在序优化精确模型中, 引入无效安全约束辨识理论, 将有效降低精确模型的冗余度, 提升其计算效率。

综上所述, 为快速有效地求解含风电的 SCUC

问题, 本文提出了一种改进的随机约束序优化方法。首先在粗糙模型中融入离散变量识别策略, 并构造基于约束条件的序优化粗糙模型; 然后在精确模型中引入非有效安全约束削减策略, 并构造针对连续变量的序优化精确模型。相比于传统针对 SCUC 模型的约束序优化方法, 本文提出的改进策略有效提升了序优化算法的紧凑性, 降低了计算冗余度, 具有更高的求解效率。基于 IEEE118 节点算例的仿真结果验证了本文所提方法的正确性和有效性。

1 考虑安全约束的不确定性机组组合模型

1.1 模型目标函数及常规约束条件

含风电电力系统的 SCUC 问题通常是指, 考虑风电出力的不确定性, 在保证电力系统运行安全可靠的前提下, 使其总运行成本最小, 其目标函数为

$$\min F_{Gr} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^M [U_{Git} Y_{it}(P_{Git}) + U_{Git}(1 - U_{Git-1}) S_{it}(\tau_i)] \quad (1)$$

式中: F_{Gr} 为系统的总运行成本; 系统中的发电机组个数为 M ; P_{Git} 和 U_{Git} 分别表示第 i 号机组在 t 时段的有功出力 and 启停状态, $U_{Git} = 0$ 表示发电机组处于停机状态, $U_{Git} = 1$ 表示发电机组处于开机状态; $Y_{it}(P_{Git})$ 为发电机组的运行成本; $S_{it}(\tau_i)$ 为发电机的启停成本。

其中, 发电机组的运行成本、启停成本的具体数学表达形式如式(2)、式(3)。

$$Y_{it}(P_{Git}) = \alpha_i + \beta_i P_{Git} + \gamma_i P_{Git}^2 \quad (2)$$

$$S_{it}(\tau_i) = S_{0i} + S_{1i}(1 - e^{-\tau_i/\omega_i}) \quad (3)$$

式中: α_i 、 β_i 、 γ_i 为机组运行成本参数; τ_i 为 i 号机组的停机时间; S_{0i} 、 S_{1i} 、 ω_i 为启停成本参数。

为保证电力系统安全可靠运行, 在含风电电力系统的 SCUC 模型中, 决策变量还需满足以下常规约束条件:

1) 系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^M U_{Git} P_{Git} + P_{Wt} = P_{Lt} + P_{Dt} \quad (4)$$

式中: P_{Dt} 为系统在 t 时段的有功负荷; P_{Lt} 为系统在 t 时段的输电有功网损; P_{Wt} 为风电机组在 t 时段的输出功率。

2) 发电机组出力上下限约束

$$P_{Gimin} \leq P_{Git} \leq P_{Gimax} \quad (5)$$

式中, P_{Gimin} 和 P_{Gimax} 分别为发电机组有功出力下限和上限。

3) 最小启停次数约束

$$\sum_{t=1}^{24} |U_{G_{it}} - U_{G_{it-1}}| \leq n_i \quad (6)$$

式中, n_i 为机组在调度周期内最大允许启停次数。

4) 机组爬坡约束

$$-\Delta P_{Gi}^{\text{down}} \leq P_{G_{it}} - P_{G_{it-1}} \leq \Delta P_{Gi}^{\text{up}} \quad (7)$$

式中, $\Delta P_{Gi}^{\text{down}}$ 和 $\Delta P_{Gi}^{\text{up}}$ 分别为机组每小时有功输出的最大滑坡能力和最大爬坡能力。

5) 网络安全约束

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{P}_t \leq \mathbf{B}_t \quad (8)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{T} \times \mathbf{K}_p \\ -\mathbf{T} \times \mathbf{K}_p \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{B}_t = \begin{pmatrix} P_{L\max} + \mathbf{T} \times \mathbf{K}_D \times \mathbf{D}_t \\ P_{L\max} - \mathbf{T} \times \mathbf{K}_D \times \mathbf{D}_t \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中: \mathbf{T} 为转移因子矩阵; \mathbf{K}_p 、 \mathbf{K}_D 分别为节点-发电机矩阵和节点-负荷矩阵; \mathbf{P}_t 为 t 时刻的节点功率矩阵; \mathbf{D}_t 为 t 时刻的节点负荷矩阵; $P_{L\max}$ 为输电线路 L 上传输容量。

1.2 不确定性因素的描述

目前, 在构建考虑风电接入的不确定性 SCUC 模型的过程中, 有三种方法是被证明有效的, 即: 机会约束^[14-17]、场景法^[18-19]、鲁棒优化^[20-22]。本文采用机会约束方法描述机组组合问题中的风电出力不确定性, 分别构建系统正负旋转备用风险指标。

$$Q_d \leq \lambda \quad (11)$$

$$Q_u \leq \lambda \quad (12)$$

式中: Q_d 、 Q_u 分别为正、负旋转备用风险指数; λ 为旋转备用风险阈值, 系统调度部门可利用年总费用最小法获取可靠性标准后换算而得, 通常取 0~10% 之间。

系统在实际运行过程中, 要求系统提供的旋转备用需满足常规机组的备用需求。则式(11)、式(12)可变为

$$Q_d(R_{Gp}) = \int_{-\infty}^{\bar{P}_w + R_{Lp} - R_{Gp}} q(P_w) dP_w \leq \lambda \quad (13)$$

式中: \bar{P}_w 为风电的平均出力; $q(P_w)$ 为风功率的概率密度函数; R_{Gp} 为系统可以提供的正旋转备用; R_{Lp} 为系统不考虑不确定性电源接入时的正旋转备用需求。

$$Q_u(R_{Gn}) = \int_{\bar{P}_w + R_{Gn} - R_{Ln}}^{+\infty} q(P_w) dP_w \leq \lambda \quad (14)$$

式中: R_{Gn} 为系统可以提供的负旋转备用; R_{Ln} 为系统不考虑不确定性电源接入时的负旋转备用需求。

对于式(11)~式(14)的详细推导过程以及关于机会约束方法描述风电出力不确定性的有效性证明, 作者在文献[23]中已有详细介绍, 在此不再赘述。

2 基于改进约束序优化的 SCUC 模型求解

2.1 改进约束序优化算法总体框架

序优化(Ordinal Optimization, OO)与传统优化方法的区别在于: 将寻优过程中对于解的绝对优劣程度的评估转变为相对优劣程度评估, 即“序比较”; 放弃寻求精确的全局最优解, 转而寻求满足工程需要的“足够好”解, 即“目标软化”。

由于 SCUC 模型本身是决策变量相对独立的混合整数规划问题, 所以, 利用序优化在求解 SCUC 模型时, 是针对模型的离散决策变量 $U_{G_{it}}$ 和连续决策变量 $P_{G_{it}}$, 分别构造序优化粗糙模型和精确模型, 在进行序比较的同时实现混合整数决策变量的解耦。而本文在现有序优化算法的基础上, 做了如下改进:

1) 在粗糙模型中加入离散变量识别环节, 首先对离散变量空间中的常开常停机组进行识别, 然后再利用粗糙模型对剩下的机组进行筛选, 从而达到削减粗糙模型计算维度、提升其求解效率的目的。

2) 在精确模型中加入非有效安全约束识别环节, 对精确模型中的网络安全约束进行辨识, 剔除无效安全约束, 削减精确模型需要校核的网络安全约束数量, 降低其求解复杂度。

本文提出的改进序优化算法的总体思路如图 1 所示。

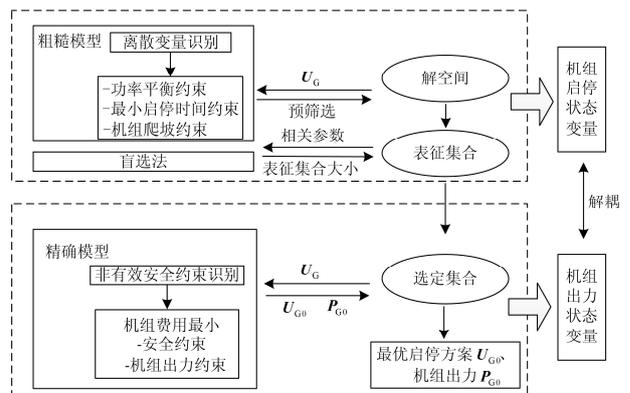


图 1 算法总体思路框图

Fig. 1 Block diagram of algorithm

由图 1 可知, 本文所提算法包括三个主要步骤:

1) 首先构造针对机组启停状态的优化辨识模型, 对离散变量空间中的常开常停机组进行识别, 剔除常开常停机组形成机组启停状态解空间。然后构造粗糙模型对机组启停状态解空间进行预筛选, 依照均匀分布抽取 N 个可行解构成表征集合 Ω , N 的个数与解空间的大小密切相关。研究表明^[24], 在解空间小于 10^8 时, N 的个数一般选 1 000。

2) 利用特定的挑选规则从表征集合中进一步挑选出 s 个解作为选定集合 S , 集合 S 需保证以至少 $\alpha\%$ 的概率包含 k 个足够好解。本文采用盲选法^[25]确定选定集合 S , 其数学模型为

$$P(|G \cap S| \geq k) = \sum_{j=k}^{\min(g,s)} \sum_{i=0}^{s-j} \frac{C_g^j C_{N-g}^{s-i-j}}{C_N^{s-i}} C_s^i q^{s-i} (1-q)^i \geq \eta \quad (15)$$

式中: $P(\cdot)$ 为对准概率; g 为足够好解集 G 中解的个数; s 为选定集合 S 中解的个数; k 表示选定集合中至少有 k 个真实足够好解; η 表示选定集合 S 中包含 k 个足够好解的概率, 通常 η 取 0.95; q 为解空间中真实观察到可行解的概率。

3) 首先构建非有效安全约束削减模型, 并推导无效安全约束辨识的充分不必要条件, 剔除无效安全约束。然后以机组运行总成本最小为目标函数, 考虑与机组出力相关的约束条件, 构建针对连续变量 $P_{G_{it}}$ 的精确模型。针对选定集合 S 中的每一个机组启停状态, 求解与之对应的机组出力和运行成本, 并对选定集合进行进一步排序, 求取最优解。

2.2 粗糙模型的构建

1) 离散变量识别模型

通过粗糙模型进行预筛选, 缩小可行域空间, 从而降低精确模型的计算量, 是序优化保证其求解效率和精度的关键。因而, 粗糙模型的求解效率对于序优化算法而言极为重要, 只有其能以较快的速度最大限度地缩小可行域, 预筛选过程才有意义。

考虑到日前调度的时间尺度较短, 因而在这样一个较短的时段内, 受负荷水平和系统装机规模的影响, 总是会有一些机组处于常开、常停的状态, 因而, 如果能够在粗糙模型筛选之前, 提前识别出常开常停机组, 可以有效地降低机组组合解空间的维度, 从而提升计算效率。

本文首先构造了一个识别常开常停机组的二次优化模型。该模型假设系统中的机组全部开启, 然后考虑和发电机出力有关的主要约束, 以运行费用最小为优化目标, 其数学模型为

$$\begin{cases} \min F_{Gt} = \sum_{i=1}^{24} \sum_{i=1}^M Y_{it}(P_{G_{it}}) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^M P_{G_{it}} + P_{Wt} = P_{Dt} + R \\ A \cdot P_t \leq B_t \\ 0 \leq P_{G_{it}} \leq P_{G_{i\max}} \\ -\Delta P_{Gi}^{\text{down}} \leq P_{G_{it}} - P_{G_{it-1}} \leq \Delta P_{Gi}^{\text{up}} \end{cases} \quad (16)$$

根据模型求解的结果, 对于所有 $t=1, 2, 3, \dots, T$, 如果 $P_{G_{it}}$ 都满足 $P_{G_{it}} > P_{G_{i\min}}$, 则第 i 号机组为常开机组; 如果 $P_{G_{it}}$ 都满足 $P_{G_{it}} < \delta P_{G_{i\min}}$, 则第 i 号机组为常停机组, 其中 δ 为识别参数, 在此取 0.05。

利用该模型可以有效识别常开常停的发电机组, 其主要原因是:

(1) 该模型的设计事实上是融入了电力市场对于发电权机会均等、自由竞争的思想, 即一开始给所有机组开机的机会, 然后以运行成本为目标进行优化计算, 如果发电机组出力在整个调度周期内都处于比极低的水平, 表明机组在当前负荷水平下无法通过竞争获得发电份额, 因而可以认为是常停机组。相反, 如果在整个调度周期内, 机组出力都高于其最小技术出力, 则可以认为在竞争中该机组始终可以获得较大发电权, 因而可认为是常开机组。

(2) 该优化模型虽然属于带约束二次规划模型, 求解比较复杂, 但其只需要求解一次, 就可以有效地降低解空间的维度, 因而从总体来看, 在序优化粗糙模型中加入该模型可以提升其整体计算效率。

2) 基于约束条件的序优化粗糙模型构建

为了实现模型求解过程中, 离散变量和连续变量的解耦, 本文根据与启停状态相关的约束条件构建粗糙模型, 筛选出机组启停解空间。主要包括: 功率平衡约束、机组爬坡约束、最小启停次数约束, 其具体数学描述如式(17)。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^M U_{G_{it}} P_{G_{i\max}} + P_{Wt} \geq P_{Dt} + R_{Dp} \\ \sum_{i=1}^M U_{G_{it}} P_{G_{i\min}} + P_{Wt} \leq P_{Dt} - R_{Dn} \\ \sum_{i=1}^M [U_{G_{it}} \Delta P_{Gi}^{\text{up}} + P_{G_{i\min}} (U_{G_{it}} - U_{G_{it-1}})] \geq |P_{Dt} - P_{Dt-1}| \\ \sum_{i=1}^M [U_{G_{it}} \Delta P_{Gi}^{\text{down}} + P_{G_{i\min}} (U_{G_{it}} - U_{G_{it-1}})] \geq |P_{Dt} - P_{Dt-1}| \\ \sum_{i=1}^{24} |U_{G_{it}} - U_{G_{it-1}}| \leq N_i \end{cases} \quad (17)$$

3) 粗糙模型的求解

本文粗糙模型的求解思路是：首先利用离散变量辨识模型确定常开、常停、待优化发电机组，然后利用基于约束条件的粗糙模型对待优化机组进行预筛选，形成解空间。其具体流程如图 2 所示。

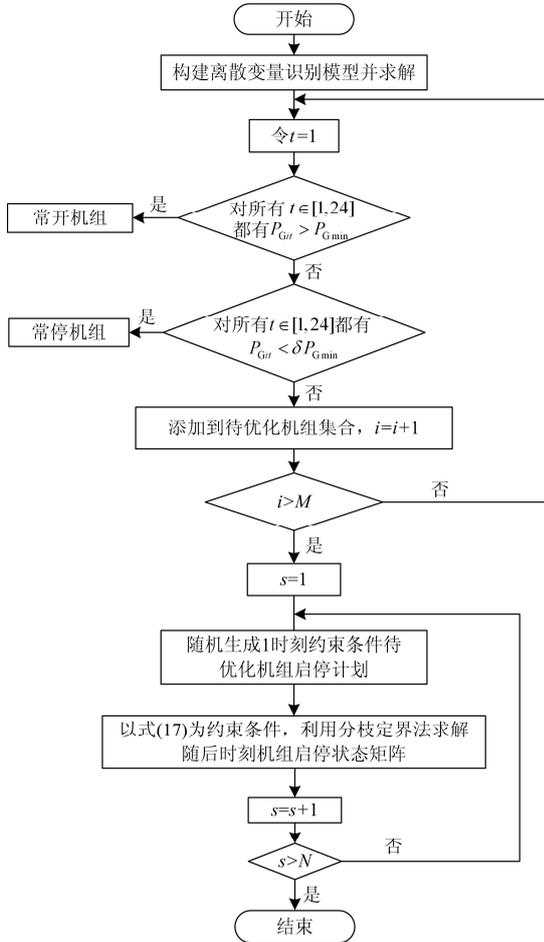


图 2 粗糙模型构建流程图

Fig. 2 Flow chart of rough model construction

2.3 精确模型的构建

1) 非有效安全约束削减

现代电力系统规模巨大、节点众多，所以在 SCUC 问题求解过程中，潮流方程求解和网络安全约束校核是最耗时的部分之一。研究表明^[13]，在所有的网络安全约束中，只有一小部分约束条件是制约可行域形成的有效约束，其原理如图 3 所示。如果可以快速辨识约束条件中的非有效约束，将会极大提升模型的紧凑性，降低其求解难度。

本文将非有效安全约束定义为：若某条约束去掉后，该模型中的可行域与去掉前的相同，则该约束为非有效约束。根据定义，进一步提出非有效安全约束辨识的充分必要条件为：非有效约束与可

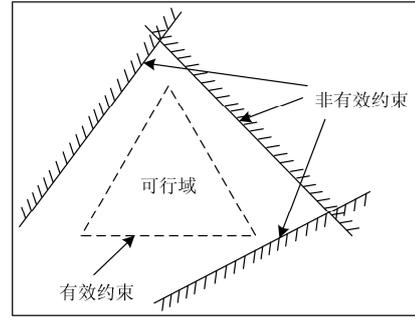


图 3 非有效约束定义

Fig. 3 Definition of uncertain inactive constraint

行域不存在交集或者交集仅为单纯形体的一个顶点。根据上述充要条件，构造剔除安全约束条件 $A^{(j)}(P_{G1t}, P_{G2t}, \dots, P_{GMt})^T \leq B_t^{(j)}$ 之后的可行域优化模型为

$$\begin{cases} Z_1 = \max \sum_{i=1}^M a_{ji} P_{Git} \\ \text{s.t.} & -\Delta P_{Gi}^{\text{down}} \leq P_{Git} - P_{Gi,t-1} \leq \Delta P_{Gi}^{\text{up}} \\ & A^{-\{j\}}(P_{G1t}, P_{G2t}, \dots, P_{GMt})^T \leq B_t^{-\{j\}} \\ & P_{Gi\min} \leq P_{Git} \leq P_{Gi\max} \\ & \sum_{i=1}^M P_{Git} + P_{Wt} = P_{Dt} + R \end{cases} \quad (18)$$

式中： a_{ji} 表示矩阵 A 中的第 j 行 i 列的元素； $A^{-\{j\}}$ 、 $B_t^{-\{j\}}$ 分别表示矩阵 A 、 B 去除第 j 行元素后的矩阵。

由非有效安全约束辨识充要条件可知，当 $Z_1 \leq B_{j,t}$ 时，约束 $A^{(j)}(P_{G1t}, P_{G2t}, \dots, P_{GMt})^T \leq B_t^{(j)}$ 为非有效约束。

利用式(18)虽然可以精确地辨识非有效安全约束，但是由于需要求解一个带约束的优化模型，计算比较复杂。因此可以对式(18)的约束条件进行松弛，构建辨识非有效安全约束的充分非必要条件：

$$\begin{cases} Z_2 = \max \sum_{i=1}^M a_{ji} P_{Git} \\ \text{s.t.} & 0 \leq P_{Git} \leq P_{Gi\max} \\ & \sum_{i=1}^M P_{Git} + P_{Wt} = P_{Dt} + R \end{cases} \quad (19)$$

因为 $Z_1 \leq Z_2$ ，所以可认为当 $Z_2 \leq B_{j,t}$ 时，约束 $A^{(j)}(P_{G1t}, P_{G2t}, \dots, P_{GMt})^T \leq B_t^{(j)}$ 为非有效约束。

为进一步简化计算，对式(19)进行解析性求解^[13]，从而提出可以避免求解优化模型，直接利用已知参数辨识非有效安全约束的充分非必要条件为

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{k-1} P_{Gm \max} \leq P_{Dr} + R - P_{Wt} \leq \sum_{m=1}^k P_{Gm \max} \\ \sum_{m=1}^{k-1} (a_{j,i_m} - a_{j,i_k}) P_{Gm \max} + a_{j,i_k} (P_{Dr} + R - P_{Wt}) \leq B_{j,t} \end{cases} \quad (20)$$

2) 精确模型的构建

序优化精确模型需要实现对选定集合的精确排序, 同时保证所有解均能满足模型的约束条件。因此, 在对无效安全约束进行辨识和削减的基础上, 本文以 SCUC 模型目标函数和与连续变量 $P_{G_{it}}$ 相关的约束条件为基础, 构造序优化精确模型。其数学描述如式(21)所示。

$$\begin{cases} \min F_{Gt} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^M Y_{it}(P_{G_{it}}) \\ \text{s.t} \\ A \cdot P_t \leq B_t \\ P_{G_{i \min}} \leq P_{G_{it}} \leq P_{G_{i \max}} \\ \sum_{i=1}^M U_{G_{it}} P_{G_{it}} + P_{Wt} = P_{Dr} \end{cases} \quad (21)$$

3 算例仿真

本文以修改的 IEEE-118 节点电力系统为例, 对模型进行仿真验证。该系统包含 54 台火电机组, 3 个风力发电场, 91 个负荷点, 其中风电场分别位于节点 14, 54, 95 上, 其额定功率分别为 100 MW、200 MW、250 MW, 有功出力曲线如图 4 所示。系统中常规机组正旋转备用需求为系统最大负荷的 8%, 负旋转备用需求为系统最小负荷的 2%, 旋转备用风险指标为 0.01。电网的网络结构、发电机及负荷等参数见文献[4]。相关计算均在英特尔酷睿 i3-3240 处理器 3.40 GHz、4 GB 内存计算机上完成, 采用 Matlab 8.0 和 Cplex 12.5 对算例进行编程求解。

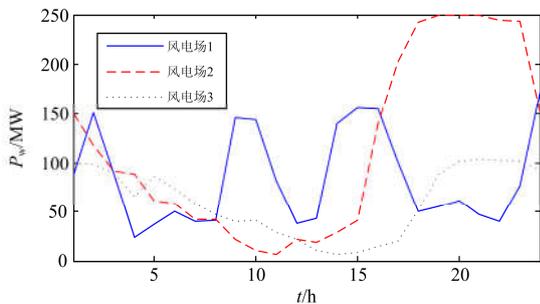


图 4 风电场出力曲线图

Fig. 4 Wind farm output curve

利用机会约束方法求取的系统及各风电场所需的旋转备用结果如表 1 所示。

表 1 各风电场的旋转备用
Table 1 Spinning reserve of each wind farm

					MW
备用	风电场 1	风电场 2	风电场 3	系统所需旋转备用	总备用需求
正旋转备用	10	19	24	480	533
负旋转备用	10	19	24	44	97

1) 序优化粗糙模型的正确性和有效性验证

为验证离散变量识别模型的正确性, 利用该模型对发电机组的启停状态进行辨识, 并将其结果与传统基于 Benders 分解法求得的最终机组启停结果进行对比, 其结果如表 2 所示。

表 2 离散变量辨识结果对比
Table 2 Comparison result of discrete variable identification

	机组编号	
	离散变量识别模型	Benders 分解
常开机组	11,27,39	4,5,10,11,20,27,29,35,36,39,40,43,45
常停机组	1,2,3,6,8,9,13,15,17,18,31,32,33,38,41,42,46,49,50,52	1-3,6-9,12-19,22-24,26,31-33,38,41,42,44,46-52

由对比结果可知, 在 20 个常开机组中, 本文的离散变量识别模型识别出了 3 个, 识别率为 15%, 而在 31 个常停机组中, 本文模型识别出了 20 个, 识别率为 64.5%, 整个识别过程中没有出现识别错误的情况。

由上述结果对比可知, 本文提出的离散变量识别模型对于常停机组的识别率较高, 同时也具有较高的识别精度, 将其纳入到序优化粗糙模型中可以有效地降低粗糙模型的计算维度, 提升其求解效率。

为了保证识别精度, 本文的离散变量识别模型对于常开机组的识别条件设置较为苛刻, 从而使本文对于常开机组的识别率保持在较低水平。而在后续的计算过程中, 序优化精确模型还会对常开机组进行进一步的优化计算, 因而, 前期识别模型中对于常开机组的识别率较低也不会影响整个算法的求解精度。

由表 3 可知, 在序优化粗糙模型中加入离散变量识别策略后, 粗糙模型的求解时间提升了近 40 s, 可见, 虽然求解离散变量识别模型需要耗时 2.89 s, 但由于其降低了粗糙模型的整体维度, 所以就整体而言, 改进后的序优化粗糙模型的计算效率得到了提升。

表 3 粗糙模型性能表

Table 3 Rough model performance

	识别模型时间/s	总时间/s
改进前	—	153.18
改进后	2.89	113.33

2) 序优化精确模型的正确性和有效性验证

为验证本文所提非有效安全约束削减策略的有效性, 利用式(20)的充分非必要条件对无效安全约束进行削减, 每个时段削减后剩余的安全约束结果如图 5 所示。

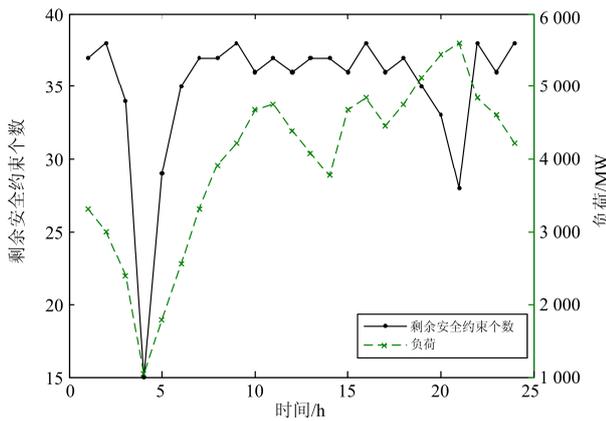


图 5 安全约束削减结果图

Fig. 5 Safety constraints cut result chart

由图 5 可见, IEEE-118 系统中每时段有 372 个安全约束, 24 个时段共有 8 928 个安全约束条件, 通过非有效安全约束削减模型, 24 个时段共削减 8 090 个无效安全约束, 削减比例达到 90%以上。上述结果表明, 现有 SCUC 模型的安全约束中存在较大的冗余信息, 而本文的无效安全约束削减策略可以有效剔除上述冗余信息。

从每个时段来看, 剩余安全约束条件的个数最高 38 个, 最少 15 个, 且其变化趋势与负荷变化呈现出一定的相关性。其原因是: 负荷越重, 系统的整体安全裕度会随之下落, 从而需要校核更多的线路, 即会有更多的有效安全约束; 反之, 如果负荷较轻, 则有效安全约束也会随之减少。

为了验证在序优化精确模型中引入无效安全约束削减策略的有效性, 分别利用引入无效安全约束削减策略的序优化精确模型(改进后)和传统序优化精确模型(改进前)对选定集合 S 中的每一个启停方案进行求解, 其运行时间如表 4 所示, 需要指出的是, 该仿真是在本文提出的改进序优化粗糙模型的基础上进行的。

由表 4 可知, 本文的非有效安全约束削减策略可以快速识别非有效安全约束条件, 整个计算过程

仅耗时 0.09 s, 而引入非有效安全约束削减后的序优化精确模型的求解效率得到大幅度提升, 计算时间降低了近 42.43 s。由此可知, 在序优化精确模型中加入非有效安全约束削减策略, 可以有效提升精确模型的计算效率。

表 4 精确模型性能表

Table 4 Accurate model performance

	识别模型时间/s	总时间/s
改进前	—	203.89
改进后	0.09	161.46

3) 整体算法的正确性和有效性验证

为验证本文所提求解方法的正确性和有效性, 利用本文提出的改进约束序优化算法求解本文的 SCUC 模型, 最优解的费用及其常规机组启停状态如表 5 所示。

表 5 启停方案

Table 5 Start-stop scheme

总费用=1,461,876.48\$	
机组	时间(1~24 h)
10	11111111111111111111111111111111
14	00000000000000001111111111
16	1111111111111111111111110000
19	1111111111111111111111110000
21	1111111111111111111111110000
23	1111111111111111111111110000
25	1111111111111111111111110000
47	0000000011111111111111111111
1-3,6,8,9,13,15,17, 18,22,24,26,31-33,36,38,39, 41,42,46,49,50-52	0000000000000000000000000000
4,5,7,11,12,20,27-30,34-35, 37,40,43-45,48,53-54	111111111111111111111111111111

为对比本文提出的求解方法的有效性和正确性, 本文还同时采用以下两种方法对 SCUC 问题进行求解。

方法一: 文献[11]的序优化算法。

方法二: 基于 Benders 分解的混合整数规划。

三种方法的计算结果和计算时间如表 6 所示。

表 6 各算法性能表

Table 6 Performance table of each algorithm

	CPU 运行时间/s	总费用/\$
方法一	338.64	1,460,620.21
方法二	2 857.00	1,467,256.55
本文	274.79	1,461,876.48

由表 6 可知, 序优化方法无论是在计算效率还是求解精度方面, 相较于 *benders* 分解方法, 都具有比较明显的优势。而本文提出的改进约束序优化算法, 相比文献[11]的方法, 其求解的总费用成本略有增加, 但是在计算效率方面, 其提升了近 18.85%。

本文提出的改进序优化算法的计算效率得到提升的主要原因是: 在序优化粗糙模型中引入了离散变量辨识策略, 降低了序优化粗糙模型的求解维度; 在序优化精确模型中引入了非有效安全约束削减策略, 剔除了精确模型中的非有效安全约束。由于上述改进从整体上提升了算法的紧凑性, 从而进一步提升了算法的求解效率。

4 结论

为快速有效地求解考虑风电接入的不确定性 SCUC 问题, 本文在传统约束序优化理论的基础上, 引入离散变量识别和非有效安全约束削减策略, 提出了一种改进的随机约束序优化方法。基于标准算例的仿真结果表明:

1) 虽然离散变量辨识模型的求解需要一定的时间, 但由于其可以降低序优化粗糙模型解空间的维度, 所以就整体而言, 引入离散变量辨识策略可以提升序优化粗糙模型的计算效率。

2) 非有效安全约束削减策略可以在较短的时间内辨识超过 90% 的非有效安全约束, 将其引入序优化精确模型, 可以有效降低精确模型的计算冗余度, 提升计算效率。

3) 由于本文的改进策略提升了序优化算法的紧凑性, 因而本文提出的改进随机约束序优化算法在求解效率方面相比于传统序优化算法有了较大提升, 相比于其他算法, 无论是计算精度和效率都具有明显优势。

参考文献

- [1] 马韬韬, 郭创新, 曹一家, 等. 电网智能调度自动化系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 7-11.
MA Taotao, GUO Chuangxin, CAO Yijia, et al. Current status and development trend of intelligent dispatching automation system of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 7-11.
- [2] WU L, MOHAMMAD S, LI T. Stochastic security-constrained unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 800-811.
- [3] 瞿寒冰, 朱英刚, 尹茂林, 等. 计及风电并网的机组组合方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 95-98.
- QU Hanbing, ZHU Yinggang, YIN Maolin, et al. Study on the unit commitment considering wind power paralleling in the power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 95-98.
- [4] CHEN Z, WU L, MOHAMMAD S. Effective load carrying capability evaluation of renewable energy via stochastic long-term hourly based SCUC[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 188-197.
- [5] HUSSIN S M, HASSAN M Y. Coordination of short-term maintenance scheduling with hourly security-constrained unit commitment[C] // Proceedings of the 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), March 24-25, 2014, Langkawi, Malaysia: 73-78.
- [6] 方必武, 王波, 刘涤尘, 等. 基于搜索+调整的两阶段萤火虫算法求解机组组合问题[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 17-23.
FANG Biwu, WANG Bo, LIU Dichen, et al. A two-stage firefly algorithm based on search + adjustment for solving unit commitment problem[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 17-23.
- [7] LEE G Z, LIN G N. Unit commitment with security assessment using chaotic PSO algorithm[J]. Journal of Circuits Systems and Computers, 2012, 20(7): 1357-1376.
- [8] 李亮亮, 范振亚, 王希若, 等. 基于碳交易的含碳捕集电厂与风电接入的电力系统低碳经济调度[J]. 陕西电力, 2017, 45(5): 48-54.
LI Liangliang, FAN Zhenya, WANG Xiruo, et al. Low carbon economic dispatching for power grid integrated carbon capture power plants with wind power system based on carbon trading[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(5): 48-54.
- [9] 杨天, 王京波, 宋少帅, 等. 考虑风速相关性的电力系统动态经济调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 189-197.
YANG Tian, WANG Jingbo, SONG Shaoshuai, et al. Dynamic economic dispatch of power system considering the correlation of the wind speed[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 189-197.
- [10] 贾庆山. 增强序优化理论研究及应用[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [11] WU H Y, MOHAMMAD S. Stochastic SCUC solution with variable wind energy using constrained ordinal optimization[J]. IEEE Transactions on Sustainable

- Energy, 2014, 5(2): 379-388.
- [12] 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.
- [13] ZHAI Q, GUAN X, CHENG J, et al. Fast identification of inactive security constraints in SCUC problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4): 1946-1954.
- [14] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-016-0017-x.
- [15] WANG Qianfan, GUAN Yongpei, WANG Jianhui. A chance-constrained two-stage stochastic program for unit commitment with uncertain wind power output[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 206-215.
- [16] 刘文学, 梁军, 负志皓, 等. 考虑节能减排的多目标模糊机会约束动态经济调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 62-70.
LIU Wenxue, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. Multi-objective fuzzy chance constrained dynamic economic dispatch considering energy saving and emission reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 62-70.
- [17] 彭曙蓉, 翟云峰, 郝伟伟, 等. 考虑电动汽车的微网动态经济调度[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 12-17.
PENG Shurong, ZHAI Yunfeng, HAO Weiwei, et al. Microgrid dynamic economic dispatch considering electric vehicles[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(4): 12-17.
- [18] 杨家然, 王兴成, 隋林涛, 等. 采用混合智能算法的含风电电力系统多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 21-27.
YANG Jiaran, WANG Xingcheng, SUI Lintao, et al. Multi-objective optimal scheduling of wind integrated power systems with hybrid intelligent algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 21-27.
- [19] WU Lei, MOHAMMAD S, LI Tao. Stochastic security-constrained unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 800-811.
- [20] HU B Q, WU L, MUHAMMAD M. On the robust solution to SCUC with load and wind uncertainty correlations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2952-2964.
- [21] HU B Q, WU L. Robust SCUC considering continuous/discrete uncertainties and quick-start units: a two-stage robust optimization with mixed-integer recourse[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1407-1419.
- [22] 黎静华, 文劲宇, 潘毅, 等. 面向新能源并网的电力系统鲁棒调度模式[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 47-54.
LI Jinghua, WEN Jinyu, PAN Yi, et al. Robust dispatching mode of electrical power system to cope with renewable energy power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 47-54.
- [23] 杨楠, 王波, 刘涤尘, 等. 考虑柔性负荷调峰的大规模风电随机优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 231-238.
YANG Nan, WANG Bo, LIU Dichen, et al. Large-scale wind power stochastic optimization scheduling method considering flexible load peaking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 231-238.
- [24] HO Y C, LARSON M E. Ordinal optimization approach to rare event probability problems[J]. Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, 1995, 5(2-3): 281-301.
- [25] HO Y C, SERENIVAS R S, VKAILI P. Ordinal optimization of DEDS[J]. Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, 1992, 2(2): 61-88.

收稿日期: 2017-09-01; 修回日期: 2017-11-09

作者简介:

杨楠(1987—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制、电力系统规划、电力系统的机组组合、主动配电网; E-mail: ynyyayy@ctgu.edu.cn

王璇(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析、电力系统运行与控制。E-mail: 1798388329@qq.com

(编辑 张爱琴)