

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210152

基于辅助优化问题的安全约束机组组合约束削减方法

付聪¹, 王砚平², 刘俊磊¹, 钟雅珊¹, 钱峰¹, 林建熙¹, 刘海琼²

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510699;

2. 杭州沃瑞电力科技有限公司, 浙江 杭州 310027)

摘要: 安全约束机组组合(Security-constrained Unit Commitment, SCUC)问题作为制定发电计划的核心环节, 在电力系统优化调度等方面具有十分重要的意义。针对考虑故障态约束后 SCUC 问题规模庞大、难以求解的情况, 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。首先引入与具体故障态安全约束相关的辅助优化问题, 从而建立判别相应故障态安全约束是否冗余的充分必要条件。然后探究冗余故障态安全约束辨识过程的具体加速方法, 包括松弛辅助优化问题方法, 使用可行性判据进行故障态安全约束预分类方法, 以及多线程并行计算方法。最后, 在 IEEE118 测试系统上对所提方法的正确性和有效性进行了仿真验证。

关键词: 安全约束机组组合(SCUC); 混合整数线性规划(MILP); 故障态安全约束削减; 辅助优化问题

Constraint reduction method for security-constrained unit commitment based on an auxiliary optimization problem

FU Cong¹, WANG Yanping², LIU Junlei¹, ZHONG Yashan¹, QIAN Feng¹, LIN Jianxi¹, LIU Haiqiong²

(1. Power Dispatch Control Center, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510699, China;

2. Hangzhou Worui Electrical Technology Co., Ltd., Hangzhou 310027, China)

Abstract: As the key part of formulating a generation schedule, the Security-Constrained Unit Commitment (SCUC) problem is of vital importance in the optimized operation of a power system. The SCUC problem has a large number of constraints and is thereby difficult to solve. We propose a constraint reduction method based on an auxiliary optimization problem. First, the auxiliary optimization problem related to a specific post-contingency security constraint is introduced, so that a sufficient and necessary condition for identifying redundant constraints can be established. Then, three acceleration methods for the identification process are introduced, including relaxing the auxiliary optimization problem, proposing a feasible criterion for pre-classification of post-contingency security constraints, and introducing multithread parallel computing. Finally, the effectiveness and correctness of the proposed method are verified on the simulation of IEEE118 test system.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902800) and the Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. GDKJXM20190139).

Key words: security-constrained unit commitment (SCUC); mixed-integer linear programming (MILP); reduction of post-contingency security constraints; auxiliary optimization problem

0 引言

安全约束机组组合(Security-constrained Unit Commitment, SCUC)问题作为制定发电计划的核心环节, 在电力系统优化调度^[1-4]等方面具有十分重要

的意义^[5-7]。SCUC 的目标是在满足发电约束、安全约束和系统需求约束的同时, 将发电机组^[8-9]的总体运营成本降至最低。

在过去的几十年中, 已经提出了许多解决 SCUC 问题的技术, 包括优先顺序法^[10]、动态规划^[11]、Benders 分解^[12]、拉格朗日松弛^[13]、混合整数线性规划(Mixed-integer Linear Programming, MILP)^[14-16]和智能优化方法^[17]。在这些方法中, MILP 是使用

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902800); 南方电网公司科技项目资助(GDKJXM20190139)

最广泛的方法，它将 SCUC 建模为 MILP 问题，并使用商用求解器内置的分支定界(Branch and Bound, B&B)算法对其进行求解，从而实现了安全约束机组组合问题建模与求解两部分的解耦。该方法的主要优点是：(1) 它为 SCUC 问题建模提供了很高的灵活性；(2) 相对其余方法而言，它的求解效率更高；(3) 理论上它可以确保 SCUC 问题收敛到最优解^[18]。然而，当 SCUC 问题的规模较大时，MILP 方法可能遇到维数灾问题。在这种情况下，使用 MILP 方法求解 SCUC 问题将需要庞大的计算量与相当长的计算时间，不能满足电力系统实时调度的需要。

高效求解大规模 SCUC 问题的关键在于削减其规模。文献[19-21]表明，安全约束机组组合问题中大量的故障态安全约束是冗余且无效的，不会对 SCUC 问题的最优解产生影响。因此，可以通过辨识、删除这些冗余约束，将 SCUC 问题的规模进行大幅度削减，从而缩短 SCUC 问题的求解时间，以实现 SCUC 问题的快速求解。文献[19]基于一系列小规模 MILP 问题的解析解给出了辨识冗余安全约束的充分不必要条件，但是它所研究的 SCUC 模型忽略了故障态安全约束，不够全面。文献[20]提出通过简化故障态集合来削减故障态安全约束，但是经过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，其作用较为有限。文献[21]提出了一种基于迭代过程约束削减方法，它逐渐将未满足的约束条件添加到 SCUC 模型中，并进行迭代求解。但是，该方法在某些情况下需要进行多次迭代，反而会延长求解时间。

基于上述讨论，本文提出了一种基于辅助优化问题的安全约束机组组合约束削减方法。首先引入与具体故障态安全约束相关的辅助优化问题，从而建立判别相应故障态安全约束是否冗余的充分必要条件。之后探究冗余故障态安全约束辨识过程的具体加速方法，包括松弛辅助优化问题方法，使用可行性判据进行故障态安全约束预分类方法，以及多线程并行计算方法。最后，在 IEEE118 测试系统上进行仿真，验证了所提方法的正确性和有效性。

1 SCUC 问题模型

为便于表述基于辅助优化问题的约束削减方法，本文首先以文献[22-25]作为参考，给出 SCUC 问题的一个 MILP 模型。

1.1 目标函数

SCUC 问题通常以发电费用最小为目标，有

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I a_i p_{i,t}^2 + b_i p_{i,t} + c_i u_{i,t} \quad (1)$$

式中： i 和 t 分别表示机组和时段序号； I 和 T 分别表示机组数目和时段数； a_i 、 b_i 、 c_i 分别为机组 i 二次费用曲线的系数，它们是仅与机组有关的常数； $p_{i,t}$ 是机组 i 在时段 t 的出力； $u_{i,t}$ 为代表机组状态的 0-1 整数变量(0 为关机状态，1 为开机状态)。

由于该目标函数不会影响约束削减过程，其混合整数线性化表达不再赘述，具体可参考文献[22]。

1.2 SCUC 问题约束

SCUC 问题包括：功率平衡约束、机组出力约束、最小启停时间约束、机组出力爬坡约束、基态安全约束以及故障态安全约束。

1) 功率平衡约束

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

式中， D_t 为时段 t 系统的总负荷。

2) 机组出力约束

$$P_i^{\min} u_{i,t} \leq p_{i,t} \leq P_i^{\max} u_{i,t}, \quad i=1,2,\dots,I, t=1,2,\dots,T \quad (3)$$

式中， P_i^{\max} 和 P_i^{\min} 分别是机组 i 的最大、最小出力。

3) 最小启停时间约束

参照文献[23-24]，最小开机时间约束如下：

$$\sum_{t=1}^{O_i} (1 - u_{i,t}) = 0, \quad i=1,2,\dots,I \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sum_{n=t}^{t+U_i^T-1} u_{i,n} \geq U_i^T (u_{i,t} - u_{i,t-1}) \\ i=1,2,\dots,I, t=O_i+1,\dots,T-U_i^T+1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sum_{n=t}^T [u_{i,n} - (u_{i,t} - u_{i,t-1})] \geq 0 \\ i=1,2,\dots,I, t=T-U_i^T+2,\dots,T \end{cases} \quad (6)$$

式中： $O_i = \min\{T, (U_i^T - U_i^0)u_{i,0}\}$ 表示机组 i 从 0 时段起必须持续开机的小时数，它由上个调度周期结束时机组状态决定； U_i^T 为机组 i 的最小开机时间； U_i^0 是 0 时段以前，机组 i 已经持续开机的时段数。

类似地，最小停机时间约束为

$$\sum_{t=1}^{L_i} u_{i,t} = 0 \quad i=1,2,\dots,I \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sum_{n=t}^{t+D_i^T-1} (1 - u_{i,n}) \geq D_i^T (u_{i,t-1} - u_{i,t}) \\ i=1,2,\dots,I, t=L_i+1,\dots,T-D_i^T+1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sum_{n=t}^T [1 - u_{i,n} - (u_{i,t-1} - u_{i,t})] \geq 0 \\ i=1,2,\dots,I, t=T-D_i^T+2,\dots,T \end{cases} \quad (9)$$

式中: $L_i = \min\{T, (D_i^T - S_i^0)(1 - u_{i,0})\}$ 为机组 i 从 0 时段起必须持续关机的小时数; D_i^T 为机组 i 的最小关机时间; S_i^0 为 0 时段前机组 i 已持续关机的时段数。

4) 机组出力爬坡约束

$$\begin{aligned} -R_i^U &\leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq R_i^D \\ i &= 1, 2, \dots, I, t = 1, 2, \dots, T \end{aligned} \quad (10)$$

式中, R_i^U 和 R_i^D 分别为机组 i 出力上升和下降的限制。

5) 基态安全约束

$$\begin{aligned} |f_{n,t}^0| &= |-b_n(\theta_{\alpha,t} - \theta_{\beta,t})| \leq F_n^{\max} \\ n &\in S_B, t = 1, 2, \dots, T \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $f_{n,t}^0$ 为基态下支路 n 的有功潮流(有功功率流); F_n^{\max} 为支路 n 的长期允许载流量; b_n 为支路 n 电纳; S_B 是支路集合; $\theta_{\alpha,t}$ 和 $\theta_{\beta,t}$ 分别为 t 时段支路 n 所连接节点 α 和 β 的电压相角, 它们满足直流法潮流方程。

$$B\theta_t = K_P P_t - K_D D_t, t = 1, 2, \dots, T \quad (12)$$

式中: B 为节点电纳矩阵; K_P 为节点机组关联矩阵; K_D 为节点负荷关联矩阵; θ_t 、 P_t 、 D_t 分别为 t 时段的节点电压相角向量、机组有功出力向量、负荷向量。

6) 故障态安全约束

通过支路开断分布因子 (Line Outage Distribution Factor, LODF) 可将故障态安全约束表示为^[25]

$$\begin{aligned} |f_{n,t}^k| &= \left| f_{n,t}^0 + \sum_{m \in S_F^k} L_{m,n}^k f_{m,t}^0 \right| \leq E_n^{\max} \\ k &\in C, n \in S_B, t = 1, 2, \dots, T \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $f_{n,t}^k$ 为故障态 k 下、支路 n 的故障态潮流; E_n^{\max} 为支路 n 的短期允许载流量; S_F^k 和 S_B^k 分别为故障态 k 下, 开断支路与未开断支路的集合; $L_{m,n}^k$ 为故障态 k 下, 开断支路 m 对非开断支路 n 的线路开断分布因子; C 为故障集合, 包括支路和母线的 $N-1$ 故障。

2 冗余故障态安全约束辨识

文献[20-21]表明, SCUC 问题中近 90% 的约束为故障态安全约束, 并且其中绝大部分是冗余的。因此, 本节将针对这些故障态安全约束, 基于对应的辅助优化问题, 给出辨识冗余故障态安全约束的充分必要条件, 从而削减 SCUC 问题的规模。

首先给出冗余约束和非冗余约束的定义。冗余约束的定义为: 对于一个优化问题, 如果从它的约束集合中移除一条约束后, 该优化问题的可行域没有改变, 则所移除的约束为冗余约束。与之相对地, 非冗余约束的定义为: 对于一个优化问题, 如果从它的约束集合中移除一条约束后, 该优化问题的可行域发生了改变, 则所移除的约束为非冗余约束。

根据冗余约束的定义, 一个约束是否是冗余约束, 取决于它是否限制了其所属优化问题的可行域。以图 1 为例, 约束 5、6、7、8、9、10 为冗余约束, 1、2、3、4 为非冗余约束。

接下来, 本文将根据冗余约束的定义, 为故障态安全约束建立相应的辅助优化问题, 给出辨识冗余故障态安全约束的充分必要条件。

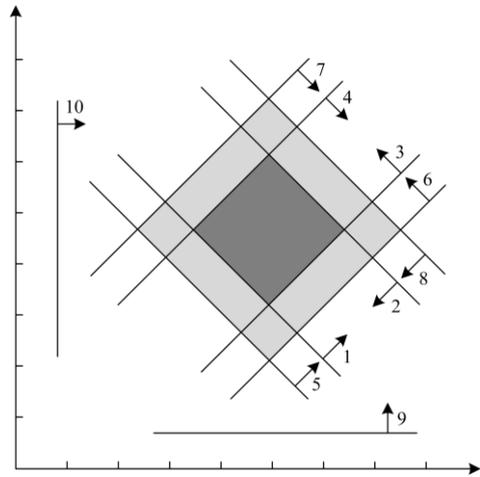


图 1 冗余约束与非冗余约束示例图

Fig. 1 Illustration of redundant and active constraints

考虑时段 t 支路 n 的故障态安全约束:

$$|f_{n,t}^k| = \left| f_{n,t}^0 + \sum_{m \in S_F^k} L_{m,n}^k f_{m,t}^0 \right| \leq E_n^{\max} \quad (14)$$

去掉绝对值, 它等价于故障态潮流的上下限约束:

$$f_{n,t}^0 + \sum_{m \in S_F^k} L_{m,n}^k f_{m,t}^0 \leq E_n^{\max} \quad (15)$$

$$f_{n,t}^0 + \sum_{m \in S_F^k} L_{m,n}^k f_{m,t}^0 \geq -E_n^{\max} \quad (16)$$

对于这两个不等式约束, 本文分别建立两个辅助优化问题 1(a) 和 1(b), 以判别其是否冗余。首先, 给出不等式约束(15)所对应的辅助优化问题 1(a), 其中 $s_{n,t}^1$ 为新引入的松弛变量。

辅助优化问题 1(a):

$$\min s_{n,t}^1 \quad (17)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} f_{n,t}^0 + \sum_{m \in S_F^k} L_{m,n}^k f_{m,t}^0 + s_{n,t}^1 = E_n^{\max} \\ s_{n,t}^1 \geq 0 \\ \text{第1节SCUC问题的其余约束式(2)一式(13)} \end{cases} \quad (18)$$

不等式约束冗余的充分必要条件：辅助优化问题 1(a)的最优目标函数值大于零，即 $s_{n,t}^1 > 0$ 。

首先说明充分性：当辅助优化问题 1(a)的最优目标函数值大于零，即 $s_{n,t}^1 > 0$ 时，说明原 SCUC 问题不存在使不等式取到等于号的可行解。这意味着不等式不是原 SCUC 问题可行域的边界，即原 SCUC 问题的可行域不受不等式的限制，当移除它后，SCUC 问题的可行域不会改变。因此，当 $s_{n,t}^1 > 0$ 时，对应的不等式约束是冗余约束。

其必要性说明如下：根据冗余约束的定义，当原不等式冗余时，原 SCUC 问题的可行域内必然不存在一个可行解使不等式取到等于号。这意味着辅助优化问题 1(a)同样不存在使目标函数为 0 的可行解。因此，此时上述辅助优化问题的最优目标函数值必然大于零，即 $s_{n,t}^1 > 0$ 。

类似地，对于不等式，可以引入松弛变量 $s_{n,t}^2$ ，建立相应的辅助优化问题 1(b)。

辅助优化问题 1(b)：

$$\begin{aligned} & \min s_{n,t}^2 & (19) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} f_{n,t}^0 + \sum_{m \in S_F^k} L_{m,n}^k f_{m,t}^0 - s_{n,t}^2 = -E_n^{\max} \\ s_{n,t}^2 \geq 0 \\ \text{第1节SCUC问题的其余约束式(2)一式(13)} \end{cases} & (20) \end{aligned}$$

与之前相同，不等式约束冗余的充分必要条件：辅助优化问题 1(b)的最优目标函数值大于零，即 $s_{n,t}^2 > 0$ 。

基于上述充分必要条件，实际应用中可以为每一条故障态安全约束建立辅助优化问题 1(a)和 1(b)，然后根据其最优解是否大于零分别对不等式约束和，即对故障态潮流的上下限约束进行过滤，从而达到削减 SCUC 问题规模的目的。

3 辨识过程加速方法

第 2 节中给出了辨识冗余故障态安全约束的充分必要条件，在此基础上可以削减 SCUC 问题中的冗余故障态安全约束。但是，由于第 2 节中给出的辅助优化问题包含了原 SCUC 问题所有约束，且含有机组状态这类二进制变量，因此该辅助优化问题是一个与原 SCUC 问题规模相近的 MILP 问题。考虑到在冗余故障态安全约束辨识过程中，对每条故

障态安全约束都要求解这样的辅助优化问题，整体的冗余约束辨识过程将花费相当多的时间，不具备实际应用价值。针对于此，本节将提出一些方法来加速冗余故障态安全约束的辨识过程。

3.1 松弛辅助优化问题

如上所述，辅助优化问题 1(a)、1(b)是一个与原 SCUC 问题规模相近的 MILP 问题。为了加速它的求解过程，本节将尝试缩小其规模，并删除其包含的二进制变量，从而将上述的辅助优化问题转化为一个更简单的小规模线性规划(Linear Programming, LP)问题，它可以通过单纯形法^[26]进行快速求解。

因为二进制变量机组状态 $u_{i,t}$ 的取值只会影响机组出力，所以只需要考察机组状态 $u_{i,t}$ 取 0 或 1 时对应的机组出力范围，并依此对机组出力约束进行松弛，即可消除机组状态 $u_{i,t}$ 这一二进制变量。对于如下所示的机组出力约束而言，它本来将机组出力 $p_{i,t}$ 限制在 $\{0\} \cup [P_i^{\min}, P_i^{\max}]$ 范围内。

$$P_i^{\min} u_{i,t} \leq p_{i,t} \leq P_i^{\max} u_{i,t} \quad (21)$$

可将其松弛为

$$0 \leq p_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (22)$$

则松弛后机组出力 $p_{i,t}$ 的取值变为 $[0, P_i^{\max}]$ 。

然后，机组状态变量 $u_{i,t}$ 就可从问题中删除，从而将原辅助优化问题松弛为一个 LP 问题。

另一方面，由于不同时段间约束关联不大，并且同时段下故障态安全约束间也没有关联，因此可以进一步松弛辅助优化问题，删除其他时段的约束，以及当前时段的其余故障态安全约束。经过上述松弛后，原辅助优化问题 1(a)转换为如下形式。

辅助优化问题 2(a)：

$$\min s_{n,t}^1 \quad (23)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \text{(a)} f_{n,t}^0 + \sum_{m \in S_F^k} L_{m,n}^k f_{m,t}^0 + s_{n,t}^1 = E_n^{\max} \\ \text{(b)} s_{n,t}^1 \geq 0 \\ \text{(c)} \sum_{i=1}^I p_{i,t} = D_t \\ \text{(d)} 0 \leq p_{i,t} \leq P_i^{\max}, i=1,2,\dots,I \\ \text{(e)} |f_{n,t}^0| = |-b_n(\theta_{\alpha,t} - \theta_{\beta,t})| \leq F_n^{\max}, j \in S_B \\ \text{(f)} \mathbf{B}\theta_t = \mathbf{K}_P \mathbf{P}_t - \mathbf{K}_D \mathbf{D}_t \end{cases} \quad (24)$$

辅助优化问题 1(b)转换为如下形式。

辅助优化问题 2(b)：

$$\min s_{n,t}^2 \quad (25)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} f_{n,t}^0 + \sum_{m \in S_F^k} L_{m,n}^k f_{m,t}^0 - s_{n,t}^2 = -E_n^{\max} \\ s_{n,t}^2 \geq 0 \\ \text{约束式(24)中(c)-(f)} \end{cases} \quad (26)$$

可以看出, 松弛后的辅助优化问题是更容易求解的小规模线性规划(LP)问题。

根据松弛后的辅助优化问题 2(a)和 2(b), 可以给出判断不等式约束和, 即故障态潮流的上下限约束为冗余的一个充分不必要条件: 其对应的辅助优化问题 2(a)和 2(b)中, 松弛变量 $s_{n,t}^1$ 和 $s_{n,t}^2$ 大于 0。

上述条件为充分非必要的原因在于, 辅助优化问题 2(a)和 2(b)是原辅助优化问题 1(a)和 1(b)的松弛。因此辅助优化问题 2(a)和 2(b)的可行域是原辅助优化问题 1(a)和 1(b)和原 SCUC 问题可行域的一个超集。如图 2 所示, 当辅助优化问题 2(a)和 2(b)的可行域不受故障态安全约束 1 限制时, 原辅助优化问题 1(a)和 1(b)和原 SCUC 问题的可行域必然也不受故障态安全约束 1 的限制, 因此上述条件是充分的; 而当辅助优化问题 2(a)和 2(b)的可行域受到故障态安全约束 2 限制时, 原辅助优化问题 1(a)和 1(b)和原 SCUC 问题的可行域并不一定受该故障态安全约束 2 的限制, 因此该条件是不必要的。

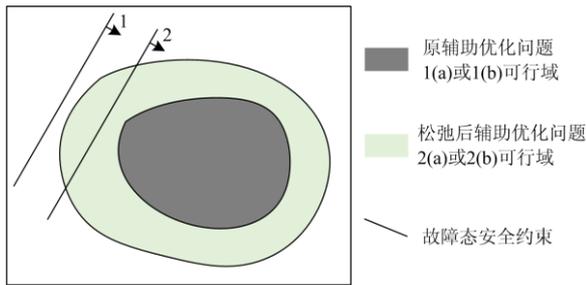


图 2 松弛问题判据充分性和必要性的说明

Fig. 2 Sufficiency and necessity of the criterion of relaxing problems

3.2 可行性判据

本节将通过消除辅助优化问题 2(a)和 2(b)中的松弛变量, 给出辅助优化问题一个更为简单的等价表达, 从而将原来的冗余故障态安全约束判据: 辅助优化问题最优解是否为零, 转化为判断辅助优化问题是否可行。

考虑以下 LP 问题。

辅助优化问题 3(a):

目标函数: 无

$$\text{s.t.} \begin{cases} f_{n,t}^0 + \sum_{m \in S_F^k} L_{m,n}^k f_{m,t}^0 \geq E_n^{\max} \\ \text{约束式(24)中(c)-(f)} \end{cases} \quad (27)$$

其可行性可以通过两阶段法^[26-27]进行判别, 第一阶段优化结束后, 人工变量不为 0 则无解。在此基础上, 还可以在仅考虑式(24)中(c)-(f)的情况下求最优解, 然后在最优解基础上继续迭代, 并判断辅助优化问题 3(a)是否有可行解, 从而获得更高的计算效率。

可以发现, 当辅助优化问题 2(a)的目标函数值 $s_{n,t}^1$ 为 0 时, 对应的最优解是此优化问题的一个可行解, 此时以下约束取等号。

$$f_{n,t}^0 + \sum_{m \in S_F^k} L_{m,n}^k f_{m,t}^0 \geq E_n^{\max} \quad (28)$$

而当松弛后辅助优化问题的目标函数值 $s_{n,t}^1$ 大于 0 时, 说明式(34)必然成立。

$$f_{n,t}^0 + \sum_{m \in S_F^k} L_{m,n}^k f_{m,t}^0 < E_n^{\max} \quad (29)$$

而这与约束矛盾, 因此, 此时该优化问题无解。同样地, 辅助优化问题 2(b)对应以下 LP 问题。辅助优化问题 3(b)。

目标函数: 无

$$\text{s.t.} \begin{cases} f_{n,t}^0 + \sum_{m \in S_F^k} L_{m,n}^k f_{m,t}^0 \leq -E_n^{\max} \\ \text{约束式(24)中(c)-(f)} \end{cases} \quad (30)$$

类似地, 当松弛后辅助优化问题的目标函数值 $s_{n,t}^2$ 为 0 时, 此优化问题有解; 而当松弛后辅助优化问题的目标函数值 $s_{n,t}^2$ 大于 0 时, 此优化问题无解。

因此, 不等式约束和, 即故障态潮流上下限约束冗余的另一个充分不必要条件: 其对应的辅助优化问题 3(a)和 3(b)有解。

本节给出的辅助优化问题相比于辅助优化问题 2(a)和 2(b)减少了松弛变量以及相关约束, 并且判断一个线性规划问题是否有解一般快于计算一个线性规划问题的最优解。因此, 采用本节中给出的可行性判据将进一步加速冗余故障态安全约束辨识过程。

3.3 故障态安全约束预分类

通常情况下, 如果一条故障态安全约束在低负荷水平下是起作用的, 那么它在更高的负荷水平下也将是起作用的。基于此特性, 本节根据较低负荷水平下冗余约束的辨识结果, 为后续时段的故障态安全约束进行一个启发式的预分类, 以避免相似辅助优化问题的重复求解, 加速冗余约束辨识过程。

根据 $N-1$ 原则考虑故障态安全约束后, SCUC 问题的建模过程在每个时段都模拟了相同的故障态, 并为每个时段生成了相同的故障态安全约束集

合。设 S_{all}^c 为此故障态安全约束集合，它可以被分为预分类非冗余约束集合 S_{active}^c 和待定约束集合 S_{pend}^c ，它们满足如下关系。

$$S_{all}^c = S_{active}^c \cup S_{pend}^c \quad (31)$$

$$\emptyset = S_{active}^c \cap S_{pend}^c \quad (32)$$

如图 3 所示，冗余故障态安全约束辨识过程被修改为由低负荷水平时段向高负荷水平时段进行。低负荷水平时，对于被判定为非冗余的故障态安全约束，将其加入到预分类非冗余约束集合 S_{active}^c 中，在后续高负荷水平时段可以不对其进行辨识，直接将它判定为非冗余约束；对于被判定为冗余约束的故障态安全约束，则将其放入待定约束集合 S_{pend}^c 中。此时，因为预分类非冗余约束集合 S_{active}^c 中的故障态安全约束全部被认为是起作用的，所以每个时段下，只需要对待定约束集合 S_{pend}^c 中的故障态安全约束进行辨识。与之前需要对所有故障态安全约束进行辨识相比，采用预分类方法后辨识过程的计算量明显变少了。

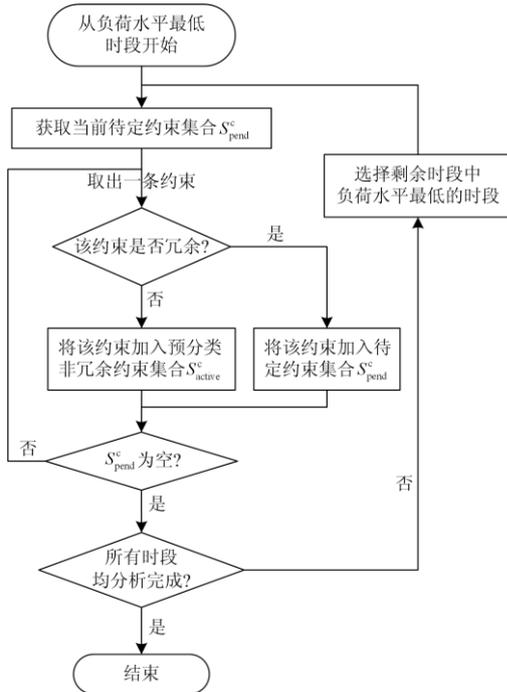


图 3 故障态安全约束预分类流程图

Fig. 3 Pre-classification of contingency security constraints

值得一提的是，有些时候，低负荷水平时起作用的约束在高负荷水平下可能是不起作用的。这种情况下，可能会将某条冗余约束错误地分类进预分类非冗余约束集合 S_{active}^c 中。然而，这只会增加优化问题求解的计算量，并不会对优化结果产生影响。

3.4 引入多线程并行计算

多线程并行计算^[29-30]是指将一个大规模的复杂任务分解为多个独立子任务，然后将这些子任务按照一定的规则分配给不同的线程，并在不同的 CPU 内核上同时执行，从而提高 CPU 利用效率，减少整体所需时间。通常情况下，为一个复杂任务引入多线程并行计算需要满足：复杂任务可以分解为多个互相独立的子任务。

本文中提出的冗余故障态安全约束辨识过程，是对每一条故障态安全约束进行逐一辨识。很明显，同一时段下、不同故障态安全约束所对应的辅助优化问题是互相独立的，这意味着这些辅助优化问题的求解是互相独立的子任务。因此，可以为冗余故障态安全约束辨识过程引入多线程并行计算。具体为：将同一时段下、不同辅助优化问题的求解任务分配至不同的线程，并在不同的 CPU 核心上运行。

值得一提的是，第 3.2 节提出的预分类方法是需要逐个时段执行的，而本节提出的多线程并行计算，是针对同一时段下、不同故障态安全约束的辨识任务。因此，此多线程并行计算方法可以与前文方法很好地结合起来，进一步加速冗余故障态安全约束辨识的过程。

4 算例分析

为验证本文提出的基于辅助优化问题的 SCUC 约束削减方法，在 Microsoft Visual Studio 2015 平台上用 C++ 开发了相应的计算软件，并对 IEEE118 测试系统进行了仿真测试，对原始 SCUC 问题和通过本文方法进行约束削减后的 SCUC 问题进行了计算结果以及计算效率的比较，并分析了各加速方法的效果。所用计算机的配置为 Intel@CoreTM i5-7300HQ CPU@2.50 GHz, 8 GB 内存。在仿真中，选择 CPLEX 12.9 作为 MILP 问题的求解器，并将其所有参数设为默认值。

IEEE118 测试系统包含 186 条支路(7 条并联支路)和 54 台机组，其具体参数可参考文献[31]，在仿真中，根据 N-1 原理考虑了 304 个故障，包括 118 个母线和 186 条支路的开断。

表 1 给出了约束削减前后 IEEE118 测试系统中，SCUC 问题规模与计算时间的对比。为了证明约束削减前后 SCUC 问题的最优解没有改变，目标函数值保留了尽可能高的精度，即 5 位小数。可以看出，对于较大规模的 IEEE118 系统，其原始 SCUC 问题规模非常庞大，对其进行求解也非常耗时，完全不能满足实时调度的需要，因此有必要使用本文中基于辅助优化问题的 SCUC 约束削减方法对其

进行加速。进行约束削减后,可以看出 SCUC 问题的规模减小了 96.05%,总计算时间也相应地缩短了 88.36%。

表 1 约束削减前后 SCUC 问题对比

SCUC 模型	原始 SCUC	约束削减后的 SCUC
目标函数值/\$	818 022.063 67	818 022.063 67
起作用约束数量	7 768	7 768
约束数目	959046(100%)	37866(3.95%)
约束削减时间/s	—	96.434
优化求解时间/s	938.249	12.77
总计算时间/s	938.249(100%)	109.204(11.64%)

同样地,还可以看出,在本文保留的精度范围内,进行约束削减前后 SCUC 问题的最优目标函数值没有改变;而另一方面,起作用约束数目也没有区别。这证明了本文所提方法只针对冗余约束,没有错误地删除起作用约束。

图 4 给出了剩余故障态安全约束数目与负荷水平之间的关系。可以看出,在 IEEE118 测试系统中,剩余故障态安全约束的数目仍与负荷水平紧密相关。这证明了本文所提方法只对冗余约束起作用,没有错误地删除非冗余约束。

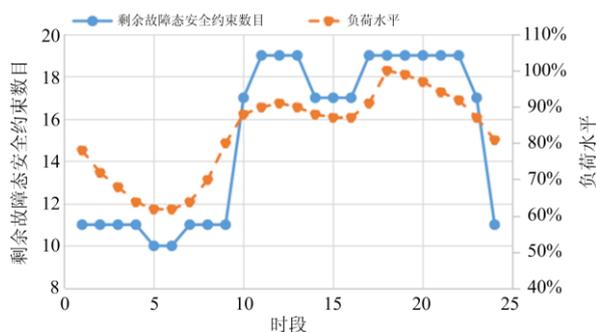


图 4 剩余故障态安全约束数目与负荷水平关系

Fig. 4 Load versus number of remained constraints

表 2 给出了 IEEE118 测试系统中,不同方法对辨识过程的加速效果,其中原始加速过程时间过长,仅粗略给出了一个下界。可以看出,四种加速方法均有一定的加速效果,其中故障态安全约束预分类效果最好。而结合四种方法进行加速后,辨识过程所消耗的时间不到原始辨识过程的 0.10%。这说明本文提出的加速方法对基于辅助优化问题辨识过程的实际应用有着重要意义。另外值得一提的是,本文仿真中引入的多线程数量为 4,在最理想情况下,速度应当是原来单一线程的 4 倍,相应地,加速比例也应该为 75%。但是,在实际应用中很难达到这

一理想结果,原因在于为了确保同步性,多线程之间需要进行通信,当它们对同一变量进行修改时需要对变量加上同步锁,或者进入阻塞状态等待被加锁变量释放。这一等待过程拉低了多线程处理的速度,因此加速效果达不到理论上的 75%,而是略低于这个值,在本文实际测试中约为 67.50%。

为了对比本文约束削减方法在不同规模系统中的效果,本文在 IEEE118 测试系统之外,还对新英格兰 39 节点系统进行了类似的测试,具体对比结果见表 3。可以看出在 IEEE118 测试系统中,本文约束削减方法效果更好,能削减的约束更多,对 SCUC 问题优化求解时间和总计算时间的削减比例也更高。这表明本文所提基于辅助优化问题的约束削减方法对于大规模电力系统的效果会更好。

表 2 不同方法对辨识过程加速效果

加速方法	时间/s	加速比例
原始辨识过程	>100 000	—
松弛辅助优化问题后	35 647.68	>64.35%
使用可行性判据后	6 059.519	83.00%
故障态安全约束预分类后	296.707	95.55%
引入多线程并行计算后	96.434	67.50%
加速后辨识过程	96.434	>99.90%

表 3 不同测试系统中本文方法效果对比

削减比例统计项	新英格兰 39 节点系统	IEEE118 测试系统
约束削减比例	91.84%	96.05%
SCUC 问题优化求解时间削减比例	88.76%	98.64%
总计算时间削减比例	62.61%	88.36%

5 结语

本文针对 SCUC 问题规模过于庞大这一问题,提出了基于辅助优化问题的 SCUC 约束削减方法。首先给出一个辨识冗余故障态安全约束的充分必要条件,它具有一定的理论意义。而后,针对于冗余故障态安全约束辨识过程较为耗时这一问题,给出了四种加速方法,包括松弛辅助优化问题,使用可行性判据,进行故障态安全约束预分类,引入多线程并行计算。这些加速措施之间互不冲突,可以结合起来以达到更好的加速效果。

本文的加速方法是通过一系列充分不必要条件实现的,这意味着本文方法并不能识别 SCUC 问题中全部的冗余约束。在今后的研究中将进一步探寻更为精准有效的冗余约束判据。

参考文献

- [1] 张学军, 王振. 含风储联合单元的电力系统两阶段日前调度模型[J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 57-62.
ZHANG Xuejun, WANG Zhen. The two-stage day-ahead operation model of the power system with wind-storage combined unit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5): 57-62.
- [2] 傅其皓, 何坚, 吕林, 等. 考虑 DG 运行特性及负荷重要性的多微网应急综合资源优化调度[J]. 电测与仪表, 2019, 56(2): 33-40.
FU Qihao, HE Jian, LÜ Lin, et al. Optimal scheduling of disaster-relief integrated resources considering operating characteristics of DG and importance of load in multi-microgrid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(2): 33-40.
- [3] 边晓燕, 杨帅帅, 黄铃燃, 等. 虚拟电厂接入配电网的电力系统调度灵活性研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 66-71.
BIAN Xiaoyan, YANG Shuaishuai, HUANG Lingran, et al. Research on power system scheduling flexibility of virtual power plant accessing to distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(3): 66-71.
- [4] 邹京希, 秦汉, 刘东, 等. 风储联合发电系统中储能系统的优化调度和配置[J]. 供用电, 2019, 36(9): 86-92.
ZOU Jingxi, QIN Han, LIU Dong, et al. Optimal scheduling and configuration of energy storage system in wind storage combined generation system[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(9): 86-92.
- [5] 汪洋, 夏清, 康重庆. 机组组合算法中起作用整数变量的辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 46-52.
WANG Yang, XIA Qing, KANG Chongqing. Identification of the active integer variables in security constrained unit commitment[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 46-52.
- [6] 陈冰松, 张章煌, 章禹, 等. 计及极端天气影响的中短期安全约束机组组合研究[J]. 电气自动化, 2019, 41(4): 37-39.
CHEN Bingsong, ZHANG Zhanghuang, ZHANG Yu, et al. Research on medium and short-term security constrained unit commitment considering effects of extreme weather[J]. Electrical Automation, 2019, 41(4): 37-39.
- [7] 崔承刚, 郝慧玲, 杨宁, 等. 基于优化 Kriging 代理模型的场景分析法求解机组组合问题[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 49-56.
CUI Chenggang, HAO Huiling, YANG Ning, et al. Scenario analysis based on the optimization Kriging model for solving unit commitment problems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 49-56.
- [8] 陈鹤冲, 陈轩恕, 刘波, 等. 一种发电机保护用断路器布置方案的动稳定校核及仿真分析[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 86-93.
CHEN Hechong, CHEN Xuanshu, LIU Bo, et al. Dynamic stability check and simulation analysis of a circuit breaker layout scheme for generator protection[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 86-93.
- [9] 万易, 谭亲跃, 丁月明, 等. 基于软开关技术的大型发电机灭磁性能优化[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 161-167.
WAN Yi, TAN Qinyue, DING Yueming, et al. Optimization of de-excitation performance of large capacity generators based on soft-switching technology[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 161-167.
- [10] 王力, 杜济园. 基于电力市场环境的机组组合优化运行研究[J]. 电气技术, 2019, 20(8): 38-44.
WANG Li, DU Jiyuan. Study on optimal operation of unit combination based on power market environment[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(8): 38-44.
- [11] 韦化, 龙丹丽, 黎静华. 求解大规模机组组合问题的策略迭代近似动态规划[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4420-4429.
WEI Hua, LONG Danli, LI Jinghua. Policy iteration-approximate dynamic programming for large scale unit commitment problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4420-4429.
- [12] LOTFJOU A, SHAHIDEHPOUR M, FU Y, et al. Security-constrained unit commitment with AC/DC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 531-542.
- [13] 张宁宇, 高山, 赵欣. 一种求解机组组合问题的快速拉格朗日松弛法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 47-53.
ZHANG Ningyu, GAO Shan, ZHAO Xin. A fast Lagrangian relaxation method for unit commitment[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 47-53.
- [14] 卢艺, 卢苑, 梁俊文, 等. 含抽水蓄能电网安全约束机组组合问题的混合整数线性规划算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 39-47.
LU Yi, LU Yuan, LIANG Junwen, et al. Mixed integer linear programming algorithm for solving security constrained unit commitment problem of power grid with pumped storage hydro[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 39-47.

- Control, 2019, 47(3): 39-47.
- [15] 沈海平, 陈铭, 钱磊, 等. 计及电转气耦合的电-气互联系统机组组合线性模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 34-41.
SHEN Haiping, CHEN Ming, QIAN Lei, et al. Linear model research of unit commitment for integrated electricity and natural-gas systems considering power-to-gas coupling[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 34-41.
- [16] 马伟哲, 程韧俐, 史军, 等. 考虑柔性负荷的机组组合模型及求解[J]. 广东电力, 2019, 32(8): 73-82.
MA Weizhe, CHENG Renli, SHI Jun, et al. Unit combined model considering flexible load and its solution[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(8): 73-82.
- [17] 吴凡. 基于粒子群优化算法的风电-火电机组组合调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
WU Fan. Economic dispatch for wind-thermal hybrid power system based on particle swarm optimization[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [18] MORALES-ESPAÑA G, CORREA-POSADA C M, RAMOS A. Tight and compact MIP formulation of configuration-based combined-cycle units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1350-1359.
- [19] 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.
- [20] 李大虎, 孙建波, 陈冰松, 等. 基于风险指标与非支配故障筛选理论的安全约束机组组合算法[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4): 65-72.
LI Dahu, SUN Jianbo, CHEN Bingsong, et al. Security constrained unit commitment algorithm based on risk index and non-dominated contingency screening theory[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 65-72.
- [21] XAVIER Á S, QIU F, WANG F, et al. Transmission constraint filtering in large-scale security-constrained unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2457-2460.
- [22] 谢胤喆. 引入风电机组的安全约束机组组合方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
XIE Yinzhe. The method of security-constrained unit commitment with wind power generators[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [23] 谢毓广. 计及网络安全约束和风力发电的机组组合问题的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
XIE Yuguang. Research on the unit commitment problem with security-constraints and wind power[J]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [24] CARRION M, ARROYO J M. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1371-1378.
- [25] TEJADA-ARANGO D A, SÁNCHEZ-MARTÍN P, RAMOS A. Security constrained unit commitment using line outage distribution factors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 329-337.
- [26] DANTZIG G B. Programming in a linear structure[J]. Report of the September Meeting in Madison, 1949, 17: 73-74.
- [27] DANTZIG G B. Maximization of a linear function of variables subject to linear inequalities[C] // KOOPMANS T C. ed. Activity Analysis of Production and Allocation, Cowls Commission Monograph 13, New York: John Wiley & Sons Inc, 1951.
- [28] CHARNE A. Optimality and degeneracy in linear programming[J]. Econometrica, 1952, 20: 160-170.
- [29] 罗彬, 李刚, 苗树敏, 等. 大规模电力系统潮流转移比多核并行批处理方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5446-5454.
LUO Bin, LI Gang, MIAO Shumin, et al. A parallel batch method for power flow transferring analysis in large-scale power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5446-5454.
- [30] YANG Yude, SONG Anjun, LIU Hui, et al. Parallel computing of multi-contingency optimal power flow with transient stability constraints[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 204-213. DOI: 10.1186/s41601-018-0095-z.
- [31] FU Yong, SHAHIDEHPOUR M, LI Zuyi. Security-constrained unit commitment with AC constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1538-1550.

收稿日期: 2021-02-04; 修回日期: 2021-06-08

作者简介:

付 聪(1988—), 男, 高级工程师, 研究方向为大电网安全稳定分析、电力电量平衡。

(编辑 许 威)