

基于负荷可行域的可靠性约束机组组合模型及其 两阶段求解方法

李 轩, 王 伟

(中冶赛迪电气技术有限公司, 重庆 400013)

摘要: 电力系统可靠性评估计算复杂性高、计算时间长, 难以应用于电力系统运行的短时间尺度。为了实现考虑可靠性的电力系统运行, 提出了一种基于负荷可行域的可靠性约束机组组合模型及其两阶段求解方法。首先, 采用负荷可行域模型构建可靠性约束, 实现机组组合过程中对系统可靠性的考虑与量化计算。其次, 提出可靠性约束机组组合模型的两阶段求解方法, 实现可靠性约束机组组合模型的快速求解。最后, 在 IEEE30 系统、IEEE RTS-96 系统进行了算例验证。算例结果表明: 可靠性约束机组组合模型可有效降低系统总成本; 两阶段求解方法可准确、快速地得到最优的机组组合方案。

关键词: 机组组合; 可靠性约束; 负荷可行域; 近似距离模型; 两阶段求解算法

A reliability-constrained unit commitment model based on load feasible region and its two-stage solution method

LI Xuan, WANG Wei

(CISDI Electric Technology Co., Ltd., Chongqing 400013, China)

Abstract: Power system reliability evaluation is highly complex and time-consuming, making it challenging to apply within short-term operational timescales. To enable power system operation that accounts for reliability, a reliability-constrained unit commitment (RCUC) model and its two-stage solution method are proposed based on load feasible region model. First, a load feasible region model is employed to formulate reliability constraints, enabling the integration and quantitative evaluation of system reliability during the unit commitment process. Then, a two-stage solution method is developed for the RCUC model to achieve efficient computation. Finally, case studies are performed in the IEEE30 and IEEE RTS-96 systems. The results demonstrate that the proposed RCUC model can effectively reduce the total operational costs, and the two-stage solution method can accurately and efficiently obtain the optimal unit commitment scheme.

This work is supported by the Special Fund Key Project for Technical Innovation and Application Development of Chongqing (No. CSTB2022TIAD-KPX0053).

Key words: unit commitment; reliability constraint; load feasible region; approximate distance method; two-stage solution method

0 引言

电力系统可靠性评估是指导电力系统规划和运行的重要技术之一^[1-4]。其计算复杂性高、计算时间长, 与电力系统运行所需的短时间尺度相矛盾。因此, 考虑可靠性的电力系统运行的相关研究相对较

少, 且现有研究对可靠性评估过程进行了简化。

传统的考虑可靠性的电力系统运行模型, 通过引入 $N-1$ 系统状态的系统安全约束, 建立安全约束机组组合(security-constrained unit commitment, SCUC)模型。文献[5]考虑抽水蓄能机组的运行调度, 建立了考虑抽水蓄能机组的 SCUC 模型。文献[6]提出了一种改进的动态规划方法, 提升了考虑交流潮流 SCUC 模型的计算效率。文献[7]提出了时间解耦方法和拉格朗日松弛方法, 在不影响求解准确度的情

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目资助 (CSTB2022TIAD-KPX0053)

况下,有效降低了系统安全约束的求解难度。文献[8]采用线路故障分布因子建立 $N-1$ 安全约束,提高了 SCUC 模型的计算效率。文献[9]采用随机优化方法求解 SCUC 模型,通过对系统状态空间进行缩减,求得近似的机组组合方案可靠性指标。

仅考虑 $N-1$ 系统状态无法满足系统运行可靠性的需求。考虑 $N-k$ 系统状态,可进一步提升系统运行可靠性。文献[10]提出了事件约束的机组组合(contingency-constrained unit commitment, CCUC)模型,实现了机组组合过程中对高阶系统状态的考虑。该模型可进一步考虑电池储能系统^[11]、输电线路开断^[12]、源荷不确定性^[13]、小型孤岛系统^[14]、随机优化模型^[15-16]等。然而,CCUC 模型考虑的系统状态过多,导致模型求解速度慢。因此,部分文献采用鲁棒优化思想求解 CCUC 模型^[17-18]。基于鲁棒优化模型,极端天气事件^[19]、电动汽车^[20]等因素也被考虑进 CCUC 问题中,以提升各类场景下 CCUC 模型的准确性。此外,部分研究通过构建机会约束模型(chance-constrained programming, CCP)^[21-25],实现考虑可靠性的电力系统优化运行。

CCUC 和 CCP 可以一定程度上考虑高阶系统状态。然而,大部分方法仅能将系统可靠性作为定性约束加入到电力系统运行模型中,而无法量化求解系统运行方案的可靠性指标,无法定量反映可靠性指标对系统运行方案的影响。少部分模型^[9,15-16]通过对可靠性评估过程进行简化,来计算系统可靠性指标。然而,所求得的可靠性指标与实际值相比具有误差,依然难以精确反映可靠性对机组组合方案的影响。

综上,现有的考虑可靠性的电力系统运行相关研究,未将完整的可靠性评估过程嵌入机组组合模型中,导致无法准确量化分析系统可靠性对机组组合方案的影响。然而,完整的可靠性评估包含数百万个系统状态的最优潮流计算,若在机组组合中考虑完整的可靠性评估,则需要在机组组合优化问题下嵌套数百万个子优化问题,导致模型无法求解。

负荷可行域模型^[26-27]通过建立表征系统状态安全负荷的高维域,将可靠性评估中的优化问题求解转变为了方程求解,大幅降低了可靠性评估的计算复杂性。通过负荷可行域构建机组组合模型的可靠性约束,可以避免大量子优化问题的嵌套,既能求得精确的系统可靠性指标,也能满足电力系统运行的短时间尺度要求。

因此,本文提出了一种基于负荷可行域的可靠性约束机组组合模型及其两阶段求解方法。主要贡献如下:

1) 通过系统状态的负荷可行域建模,实现机组组合模型中可靠性约束的构建,进而建立嵌入完整可靠性评估的可靠性约束机组组合模型。

2) 为了进一步降低所提模型的计算复杂性,引入基于负荷可行域的可靠性容量灵敏度模型^[28],提出了可靠性约束机组组合模型的两阶段快速求解方法。通过“机组组合方案可靠性评估”和“机组组合方案修正”两个阶段相互迭代,实现模型的快速求解。

3) 将所提模型应用于 IEEE30 节点系统和 IEEE RTS-96 系统,验证了所提模型和算法的有效性和高效性。

1 基于负荷可行域的可靠性约束机组组合模型

可靠性约束机组组合是一个混合整数非线性优化问题。混合整数是指机组组合过程中的机组启停是一组 $[0,1]$ 变量;非线性是指机组出力成本的二次函数以及系统可靠性的非线性特性。本文采用负荷可行域模型^[26]和近似距离模型^[27]建立可靠性约束,可以有效降低可靠性约束机组组合模型的计算复杂性。

1.1 基于负荷可行域的可靠性约束

可靠性约束机组组合须计算系统各时刻的可靠性指标,用于计算机组组合方案的预期停电经济损失。

$$E_{\text{ens}}(t) = T \cdot \sum_{s \in S} P_{\text{ls},s}(t) \cdot P_{\text{r},s} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{ens}}(t)$ 为 t 时刻系统的期望缺供电量(expected energy not supplied, EENS); T 为可靠性评估周期; S 为系统状态集合; $P_{\text{ls},s}(t)$ 为 t 时刻系统状态 s 的切负荷量,一般由最优切负荷模型计算得到^[26]; $P_{\text{r},s}$ 为系统状态 s 的概率。

可靠性评估须计算数万甚至数百万个系统状态的切负荷量,导致考虑可靠性的机组组合模型下需要嵌套数万个子优化问题,使模型难以求解。文献[26-27]先后提出了负荷可行域模型和近似距离模型,大幅度降低了可靠性评估的计算复杂性,提升了可靠性评估的计算速度。其中,近似距离模型将切负荷计算从优化问题转变为方程问题,采用近似距离模型建立可靠性约束可以避免机组组合模型嵌套大量子优化问题,如式(2)一式(4)所示。

$$P_{\text{ls},s}(t) = [1 - \kappa_{\text{min},s}(t)] I^T L_0(t) \quad (2)$$

$$\kappa_{\text{min},s}(t) = \min_{i=1,2,\dots,n_b} \left\{ \kappa \mid A_{s,i} L_0(t) \cdot \kappa = \beta_{\text{T},s,i} P_{\text{T},\text{max}} + \beta_{\text{G},s,i} P_{\text{G}}(t), \kappa > 0 \right\} \quad (3)$$

$$A_s L_0(t) \leq \beta_{T,s} P_{T,\max} + \beta_{G,s} P_G(t) \quad (4)$$

式中: κ 、 $\kappa_{\min,s}(t)$ 为负荷可行域近似距离模型的中间变量; I 为全为 1 的列向量; $L_0(t)$ 为 t 时刻节点负荷组成的向量; n_b 为负荷可行域边界数量; $A_{s,i}$ 、 $\beta_{T,s,i}$ 和 $\beta_{G,s,i}$ 为系统状态 s 下负荷可行域的第 i 个边界; $P_{T,\max}$ 为各线路额定容量组成的列向量; A_s 、 $\beta_{T,s}$ 和 $\beta_{G,s}$ 为系统状态 s 下的负荷可行域系数矩阵; $P_G(t)$ 为 t 时刻发电机出力组成的向量。

1.2 目标函数与其他约束

可靠性约束机组组合模型的目标是最小化总成本, 包括: 煤炭成本、机组启停成本与可靠性成本(期望缺供电量所造成的预期经济损失), 如式(5)所示。

$$\min \sum_{t=1}^{24} [C_f(t) + C_s(t) + C_{ls}(t)] \quad (5)$$

$$C_f(t) = \sum_{i=1}^{n_G} [a_i P_{G,i}(t)^2 + b_i P_{G,i}(t) + c_i] \quad (6)$$

$$C_s(t) = \sum_{i=1}^{n_G} [C_{u,i}(t) + C_{d,i}(t)] \quad (7)$$

$$C_{ls}(t) = C_{lspu} \cdot E_{ens}(t) \quad (8)$$

式中: $C_f(t)$ 为 t 时刻的煤炭成本; $C_s(t)$ 为 t 时刻的机组启停成本; $C_{ls}(t)$ 为 t 时刻期望缺供电量所造成的经济损失; n_G 为系统中的机组数; a_i 、 b_i 、 c_i 为第 i 台机组的煤耗参数; $P_{G,i}(t)$ 为第 i 台机组在 t 时刻的出力; $C_{u,i}(t)$ 为 t 时刻机组 i 的启动成本; $C_{d,i}(t)$ 为 t 时刻机组 i 的关停成本; C_{lspu} 为单位停电经济损失。

约束条件除了可靠性约束以外, 还包括常规机组组合约束, 如式(9)一式(16)所示。

$$P_{G,\min,i} \cdot I_{G,i}(t) \leq P_{G,i}(t) \leq P_{G,\max,i} \cdot I_{G,i}(t) \quad (9)$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_{S,i}-1} (1 - I_{G,i}(k)) \geq T_{S,i} (I_{G,i}(t-1) - I_{G,i}(t)) \quad (10)$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_{O,i}-1} I_{G,i}(k) \geq T_{O,i} (I_{G,i}(t) - I_{G,i}(t-1)) \quad (11)$$

$$P_{G,i}(t) - P_{G,i}(t-1) \leq (R_{U,i} - R_{Us,i}) \cdot I_{G,i}(t-1) + R_{Us,i} \quad (12)$$

$$P_{G,i}(t-1) - P_{G,i}(t) \leq (R_{D,i} - R_{Ds,i}) \cdot I_{G,i}(t) + R_{Ds,i} \quad (13)$$

$$C_{u,i}(t) \geq \max[C_{u,i} \cdot [I_{G,i}(t) - I_{G,i}(t-1)], 0] \quad (14)$$

$$C_{d,i}(t) \geq \max[C_{d,i} \cdot [I_{G,i}(t-1) - I_{G,i}(t)], 0] \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{n_G} [P_{G,\max,i} \cdot I_{G,i}(t) - P_{G,i}(t)] \geq \rho \sum_{i=1}^n L_{0,i}(t) \quad (16)$$

式中: $P_{G,\min,i}$ 为第 i 台发电机组的最小出力; $P_{G,\max,i}$ 为第 i 台发电机组的最大出力; $I_{G,i}(t)$ 为第 i 台机组在 t 时刻的启停状态, 取 1 表示启动, 取 0 表示停止; $T_{S,i}$ 为第 i 台机组的最小停止时间; $T_{O,i}$ 为第 i 台机组的最小启动时间; $R_{U,i}$ 为第 i 台机组的向上额定爬坡率; $R_{Us,i}$ 为第 i 台机组的启动最大升速率; $R_{D,i}$ 为第 i 台机组的向下额定爬坡率; $R_{Ds,i}$ 为第 i 台机组的停机最大降速率; $C_{u,i}$ 为第 i 台机组的启动成本; $C_{d,i}$ 为第 i 台机组的关停成本; ρ 为系统的备用系数; $L_{0,i}(t)$ 为第 i 个节点在 t 时刻的负荷。

2 基于容量灵敏度的机组组合模型两阶段求解方法

即使近似距离模型避免了大量子优化问题的嵌套, 但对每个系统状态仍需要建立一组约束, 即式(2)一式(4), 导致约束极多。考虑可靠性的机组组合模型依然是一个非线性程度和计算复杂性极高的优化模型, 其求解速度慢, 依然无法满足系统运行的需求。为此, 本文基于负荷可行域的容量灵敏度模型^[28], 提出了可靠性约束机组组合模型的两阶段求解方法, 旨在提升可靠性约束机组组合模型的计算效率。

2.1 基于容量灵敏度的两阶段迭代求解基本思想

基于容量灵敏度的两阶段迭代求解方法如图 1 所示。

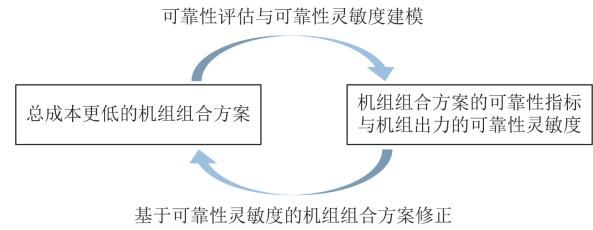


图 1 基于容量灵敏度的两阶段迭代求解方法

Fig. 1 Two-stage iterative solution method based on capacity sensitivity

第一阶段: 采用可靠性容量灵敏度模型, 计算可靠性成本, 修正机组组合方案。其核心思路为: 根据可靠性容量灵敏度, 对已有机组组合方案的机组出力、启停机状态进行修正, 更新煤炭成本、机组启停成本和可靠性成本, 得到总成本更小的新的机组组合方案。将所得到的机组组合方案结果传递给第二阶段, 这是第二阶段机组组合方案可靠性评估与灵敏度建模的数据基础。

第二阶段: 机组组合方案的可靠性评估与可靠

性灵敏度建模。计算当前机组组合方案的可靠性指标,并建立可靠性容量灵敏度。将所得到的可靠性指标和灵敏度返回给第一阶段,为机组组合方案的修正提供支撑。

每次迭代得到的机组组合方案,相比上一次迭代产生的方案总成本更低,其原因在于可靠性成本的降低和煤炭、启停成本的提升。对于可靠性灵敏度较大的机组,提升其出力可有效提升系统可靠性,降低可靠性成本。这个过程会导致系统煤耗成本增加,然而,只要煤耗成本增加量小于可靠性成本的减少量,就可以使总成本降低。具体模型将在 2.2 节进行详细介绍。

通过设置合适的迭代步长,使两个阶段相互迭代,更新机组组合方案直到总成本收敛,即可得到总成本达到局部最优的一个机组组合方案。该过程将原本复杂的单阶段问题拆分为两个交替迭代的两阶段问题,大幅度减小了模型的计算复杂性,可实现可靠性约束机组组合模型的快速求解。

2.2 基于容量灵敏度的机组组合修正模型

基于容量灵敏度的机组组合修正模型具有以下特点:

1) 目标函数中,可靠性成本不再通过计算精确的系统可靠性指标得到,而是采用上一轮迭代中的可靠性成本修正得到。后者使用的是可靠性容量灵敏度模型。

2) 约束函数中,不再加入可靠性计算的相关约束,所有可靠性有关计算全部放在了第二阶段进行。

3) 因可靠性容量灵敏度模型求得的是 EENS 对机组容量的局部灵敏度,因此,需要保证每次迭代过程中机组出力只在小范围内变化,约束中需要加入机组出力变化的最大步长约束和机组启停限制约束。

综上所述,基于容量灵敏度的机组组合修正模型的目标函数为

$$\min \sum_{t=1}^{24} [C_f(t) + C_s(t) + C'_{ls}(t)] \quad (17)$$

$$C'_{ls}(t) = C_{ls}^0(t) + \Delta C_{ls} = C_{ls}^0(t) + C_{lspu} \cdot \Delta E_{ens}(t) =$$

$$C_{ls}^0(t) + C_{lspu} \cdot \sum_{i=1}^{n_G} [\Delta P_{G,i}(t) \cdot S_{G,i}(t)] \quad (18)$$

$$\Delta P_{G,i}(t) = P_{G,i}(t) - P_{G,i}^0(t) \quad (19)$$

式中: $C'_{ls}(t)$ 为 t 时刻的近似可靠性成本,由前一轮迭代的可靠性成本经过灵敏度修正得到; $C_{ls}^0(t)$ 为 t 时刻上一轮迭代计算得到的可靠性成本; ΔC_{ls} 为两轮迭代间系统可靠性成本的变化量; $\Delta E_{ens}(t)$ 为两

轮迭代间系统 EENS 的差值; $\Delta P_{G,i}(t)$ 为两轮迭代间第 i 台机组在 t 时刻出力的差值; $S_{G,i}(t)$ 为上一轮迭代中所求得的 EENS 对机组 i 在 t 时刻出力的灵敏度; $P_{G,i}^0(t)$ 为上一轮迭代所得到的第 i 台机组在 t 时刻的出力。值得注意的是,在迭代过程中,煤耗成本、启停成本和可靠性成本都会发生变化,但这些成本变化并不都是通过“修正”计算得到。可靠性成本的原始计算方法过于复杂,需要采用简化方法计算,因此本文采用“近似修正”的方法进行计算。另一方面,煤耗成本和启停成本计算并不复杂,因此可直接采用原本的计算方法,而无需采用修正计算方法。

基于容量灵敏度的机组组合修正模型的约束,包括常规机组组合约束、机组出力修正最大步长约束和机组启停限制约束。

1) 常规机组组合约束

常规机组组合约束包括潮流约束、发电机组出力约束、机组最小启停时间约束、机组爬坡约束、机组启停费用约束、备用约束,即式(9)一式(16)。

2) 机组出力修正最大步长约束

为了保证灵敏度模型的准确性,两轮迭代间的机组出力修正应被限制在一定范围内。机组出力修正范围应由两轮迭代间机组启停状态决定,如表 1 所示,其中: α 为机组出力修正最大步长。

表 1 不同机组启停状态下本轮迭代的机组出力范围

Table 1 Generation output range of this round of iteration for different units in on/off states

上一轮迭代机组状态	本轮迭代机组状态	本轮机组出力范围
启动	启动	$[P_{G,i}^0(t) - \alpha, P_{G,i}^0(t) + \alpha]$
停止	启动	$[P_{G,min,i}, P_{G,max,i}]$
—	停止	0

当两轮迭代的机组状态都是启动时,本轮迭代的机组出力应该在上一轮迭代的机组出力附近,以保证灵敏度模型的准确性。当上一轮机组停止,本轮迭代机组启动时,机组出力范围应只受本轮迭代中的爬坡、启停机等约束决定,不由上一轮迭代的机组出力决定。当本轮迭代中机组关停,则无论上一轮迭代中机组状态如何,本轮的机组出力范围都为 0。

因此,机组出力修正最大步长约束如下。

(1) 当两轮迭代都启动时,约束为

$$P_{G,i}(t) - P_{G,i}^0(t) \leq \alpha \quad I_{G,i}^0(t) = 1, I_{G,i}(t) = 1 \quad (20)$$

$$P_{G,i}^0(t) - P_{G,i}(t) \leq \alpha \quad I_{G,i}^0(t) = 1, I_{G,i}(t) = 1 \quad (21)$$

式中: $I_{G,i}^0(t)$ 为上一轮迭代所得到的第 i 台机组在 t 时刻的启停状态。

(2) 当本轮迭代启动, 上一轮迭代关停时: 本轮机组出力应松弛, 仅考虑 1.2 节的发电机组出力约束, 同式(9)。

(3) 当本轮迭代关停、机组没有出力时, 约束为

$$P_{G,i}(t) \leq 0 \quad I_{G,i}(t) = 0 \quad (22)$$

$$-P_{G,i}(t) \leq 0 \quad I_{G,i}(t) = 0 \quad (23)$$

采用大 M 法简化式(20)一式(23), 简化后的机组出力修正最大步长约束为

$$P_{G,i}(t) \leq [(\alpha + P_{G,i}^0(t) - M_{\text{big}}) \cdot I_{G,i}^0(t) + M_{\text{big}}] \cdot I_{G,i}(t) \quad (24)$$

$$P_{G,i}(t) \geq -[(\alpha - P_{G,i}^0(t) - M_{\text{big}}) \cdot I_{G,i}^0(t) + M_{\text{big}}] \cdot I_{G,i}(t) \quad (25)$$

式中: M_{big} 为一个极大常数。

3) 机组启停限制约束

某些情况下, 机组的容量灵敏度极大, 可能会出现两轮迭代间将某一具有较高出力的机组直接关停的情况, 造成误差。因此, 须确保机组在上一轮迭代已达到最小出力时, 才能在新一轮迭代中被关停, 如式(26)所示。

$$I_{G,i}(t) \geq P_{G,i}^0(t) - P_{G,\min,i} \quad (26)$$

2.3 机组组合方案可靠性评估与灵敏度建模

机组组合方案的可靠性评估, 求得的是以机组出力为边界条件的可靠性指标。本文采用近似距离模型, 进行机组组合方案的可靠性评估, 其模型同式(2)一式(4)。

在此基础上, 还须针对机组出力进行可靠性灵敏度建模, 计算系统可靠性指标对该机组组合方案下各机组出力的灵敏度, 用于返回第一阶段, 实现模型的迭代求解。机组出力灵敏度模型可参考文献[27]。值得注意的是, 系统失负荷概率(loss of load probability, LOLP)也是可靠性评估的重要指标之一。然而, LOLP 是一个关于设备容量的阶跃函数、不可导, 无法建立针对机组出力的灵敏度模型^[27]。因此, 本文所提的可靠性约束机组组合模型难以考虑 LOLP 指标。

3 基于负荷可行域的可靠性约束机组组合模型两阶段求解流程

所提两阶段求解方法采用可靠性容量灵敏度模型, 迭代修正得到新的机组组合方案。因此, 在第一次迭代开始前, 须提供初始的机组组合方案, 作为初值输入到两阶段求解方法中。初始机组组合方案需要具有确定的机组启停和机组出力, 本文采用不考虑可靠性的传统机组组合模型计算得到。传

统机组组合模型受初值影响大、易陷入局部最优。以 IEEE30^[29]系统为例, 系统共有 6 台机组, 若将机组初始启停状态设置为全关, 则得到的机组组合方案会开启 4 台机组; 若将机组初始启停状态设置为全开, 则得到的机组组合方案会开启全部 6 台机组。不同的机组开机数量对系统可靠性、所提算法收敛速度均有影响。须考虑多种机组组合方案作为所提模型的初值方案, 分析这些影响, 详见 4.3 节。本文共考虑了 3 种初始机组组合方案。

方案 1: 具有最小开机数的机组组合方案;

方案 2: 在方案 1 基础上, 开启部分关停机组;

方案 3: 开启全部机组的机组组合方案。

3 种初始机组组合方案的具体计算方法如下:

1) 将所有机组初始启停状态设置为关停, 通过传统机组组合模型求得方案 1;

2) 在方案 1 的关停机组中选择若干台, 将其初始状态改为开启, 通过传统机组组合求得方案 2;

3) 将所有机组初始启停状态设置为开启, 运行传统机组组合模型, 求得方案 3。

在每轮迭代过程中, 第一阶段采用容量灵敏度模型修正得到的可靠性成本可能存在误差, 因此, 在第二阶段对该机组组合方案进行可靠性评估后, 需使用精确的可靠性指标替换第一阶段中求得的可靠性指标, 对系统总成本进行修正, 进而得到精确的机组组合方案总成本。

在两个阶段不断迭代的过程中, 随着机组组合方案的不断更新, 系统总成本不断减小, 当总成本接近局部最优时, 会逐渐收敛。须设定收敛条件或收敛系数, 收敛系数的设定须同时考虑求解速度和结果准确性进行综合选择。此外, 机组出力修正最大步长的设置也影响模型的速度和精度, 最大步长的选择也应综合考虑两者影响。

值得注意的是, 可靠性成本相对于机组出力是一个凸函数, 这是由可靠性本身的物理意义决定的: 在保证系统相同出力的情况下, 开的机组越多、机组出力越平均, 则系统可靠性越高。因此, 认为在同一个机组启停方案下, 所提的迭代方法可以达到该机组启停方案的局部最优。根据实际需求确定若干初始机组组合方案后, 采用所提的两阶段方法求得若干达到局部最优的机组组合方案, 可以从中筛选出最优解。该最优解虽然无法保证达到全局最优, 但是可以满足系统实际运行需求。

综上所述, 基于负荷可行域和容量灵敏度的可靠性约束机组组合模型的两阶段求解流程如图 2 所示。

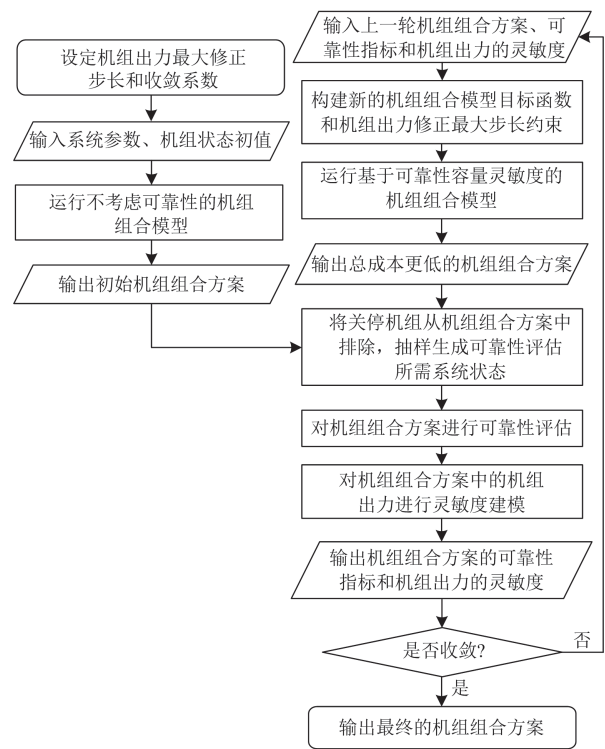


图 2 基于负荷可行域和容量灵敏度的可靠性约束机组组合模型求解流程

Fig. 2 Flowchart of reliability-constrained unit commitment model using load feasible region and capacity sensitivity

4 算例分析

为验证所提机组组合模型的可行性、两阶段求解方法的有效性和高效性，采用 IEEE30 和 IEEE RTS-96^[30]测试系统，设计了 3 个算例。

在算例 1 中，分别应用可靠性约束机组组合模型与传统机组组合模型，验证可靠性约束机组组合模型的可行性和局限性。

在算例 2 中，应用所提的基于负荷可行域的两阶段求解方法，验证求解方法的有效性和高效性。

在算例 3 中，进行两阶段迭代求解方法的适应

性分析，包括：不同初值情况下，两阶段求解方法的有效性；不同机组出力修正最大步长下，两阶段求解方法的收敛效果。

4.1 可靠性约束机组组合模型的可行性

为了验证可靠性约束机组组合模型的可行性，对 IEEE30 和 IEEE RTS-96 系统，分别应用可靠性约束机组组合模型与传统机组组合模型，对比所求得的机组组合方案和各类成本。机组组合模型中，所有机组初始启停状态设为关停。可靠性评估中，考虑机组当前出力 5% 的机组备用，评估周期为 1 h。

两种模型求得的 IEEE30 系统的机组组合方案如图 3 所示，对应的成本、可靠性指标与计算时间如表 2 所示。可以看出，在考虑系统可靠性成本的情况下，所提出的可靠性约束机组组合模型可达到较低的总成本。该较低的总成本是通过略微提升煤耗成本的同时有效降低系统可靠性成本实现的。可靠性约束机组组合模型通过平均化各机组的出力，有效提高了系统可靠性，但也使机组煤耗成本偏离最优值。在求解时间方面，随着可靠性约束的加入，机组组合模型的求解时间大幅度增加。

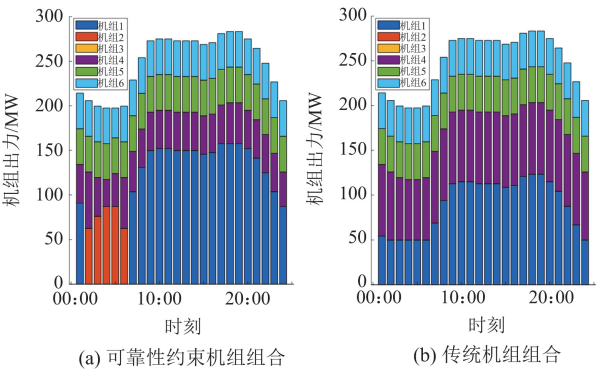


图 3 IEEE30 系统中传统机组组合模型与可靠性约束机组组合模型所求的机组组合方案对比

Fig. 3 Unit commitment comparison between traditional unit commitment and reliability-constrained unit commitment of the IEEE30 system

表 2 IEEE30 系统中传统机组组合模型和可靠性约束机组组合模型的成本、可靠性指标和计算时间
Table 2 Cost, reliability, and calculation time using traditional unit commitment and reliability-constrained unit commitment of the IEEE30 system

模型	总成本/万元	运行成本/万元	可靠性成本/万元	LOLP	EENS/MWh	计算时间/s
可靠性约束机组组合	2287.3	1717.8	569.5	0.096	11.9	4657
传统机组组合	2404.1	1710.5	693.6	0.115	14.5	3.8

为了验证模型在较大系统中的可行性，在 IEEE RTS-96 系统中测试两种模型的效果，所得到的结果如表 3 所示。与 IEEE30 系统类似，在考虑系统可靠性成本的情况下，所提出的可靠性约束机组组合

模型提升了系统可靠性，使系统 EENS 降低 18%。因此，可以达到更低的可靠性成本，进而达到更低的系统总成本，总成本降低幅度高达 8.6%。但是，由于在模型中加入了大量系统状态的切负荷计算约

束, 模型的计算时间高达数百个小时, 无法满足电力系统运行的短时间尺度需求。证实了可靠性约束机组组合模型具有极高的计算复杂性, 须提出合适的求解方法实现模型的快速求解。

表 3 IEEE RTS-96 系统中传统机组组合模型和可靠性约束机组组合模型的成本、可靠性指标和计算时间

Table 3 Cost, reliability and calculation time using traditional unit commitment and reliability-constrained unit commitment of the IEEE RTS-96 system						
模型	总成本/万元	运行成本/万元	可靠性成本/万元	LOLP	EENS/MWh	计算时间/s
可靠性约束机组组合	14 645	8586	6059	0.0533	126.2	494 303
传统机组组合	16 015	8584	7431	0.0648	154.8	8.5

4. 2 两阶段迭代求解方法有效性和高效性

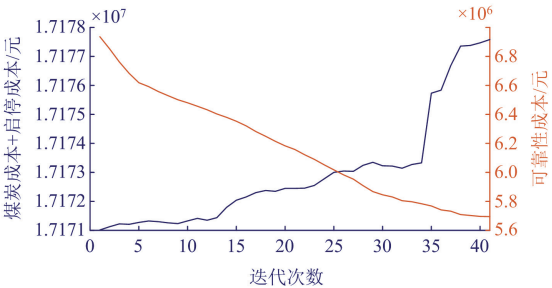
对 IEEE30 和 IEEE RTS-96 测试系统应用所提的两阶段求解方法, 测试其有效性和高效性。在测试过程中, 两阶段求解算法的机组出力最大修正步长设为 1 MW, 求解方法的收敛系数设为 0.1%。两个系统的成本随迭代次数的变化如图 4 所示, 最终结果如表 4 所示。

随着两阶段求解方法的不断迭代, 系统的煤耗成本和机组启停成本逐渐增加。这个过程中, 系统可靠性成本不断减小, 且运行成本的增加量始终小于可靠性成本的减少量, 使得系统总成本不断降低。随着迭代的不断进行, 可靠性成本下降速度逐渐降低, 当可靠性成本降低与系统运行成本增长持平时, 系统总成本收敛, 输出最优的机组组合方案。

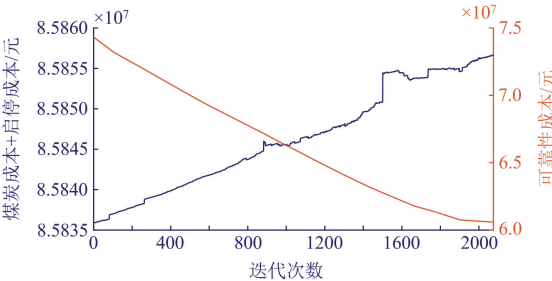
表 4 传统机组组合模型、可靠性约束机组组合模型与两阶段求解方法对比

Table 4 Comparison of traditional unit commitment, reliability-constrained unit commitment and two-stage solution method

测试系统	模型	总成本/万元	迭代次数	计算时间/s
IEEE30	传统机组组合	2404	—	3.8
	可靠性约束机组组合	2287	—	4657
	两阶段求解方法	2287	41	1411
IEEE RTS-96	传统机组组合	16 015	—	8.5
	可靠性约束机组组合	14 645	—	494 303
	两阶段求解方法	14 645	207	5955



(a) IEEE30系统变化情况



(b) IEEE RTS-96系统变化情况

图 4 迭代过程中煤炭成本、启停成本与可靠性成本的变化
Fig. 4 Changes in operational cost, start-up and shutdown cost, and reliability cost in the iteration process

在 IEEE30 系统中, 两阶段求解方法将可靠性约束机组组合模型的求解时间缩短至 30%。在 IEEE RTS-96 系统中两阶段求解方法的计算效率提升更为明显, 求解时间降低至可靠性约束机组组合模型的 1.2%。可以看出, 所提的两阶段求解方法可大幅度缩减优化问题所需的求解时间, 同时保证系统总成本依然在最优解附近, 证实了所提的基于负荷可行域的两阶段求解方法的有效性。

4. 3 两阶段迭代求解方法适应性分析

1) 不同初值影响分析

为了测试初值对所提的两阶段求解方法的影响, 本节采用不同的输入初值对两个测试系统机组组合进行分析。所采用的机组组合初始方案为第 3 节所提的 3 种初始方案。

对于 IEEE30 系统, 分别采用以上 3 种初始方案分析所提两阶段求解方法的有效性。3 种方案的初始机组组合方案与最终优化方案如图 5 所示。

可以看出, 在考虑可靠性成本后, 无论机组组合方案初值如何, 最终的机组组合方案均为减小机组 4 的出力。这是因为机组 4 虽然具有较高的容量和较低的煤耗成本, 但是在所有机组中它具有最高

的故障率。为了提升系统的可靠性，机组 4 的出力被大幅度减小：在方案 2 与方案 3 中，机组 4 的出力被减小至最小出力。在方案 1 中，机组 4 并未减小至最小出力，其原因在于：为了保证系统功率平衡，机组 1 的出力已优化在一个极高的水平，其煤耗成本较高；继续降低机组 4 的出力会导致机组 1

的出力进一步提高，导致系统总成本的提升。

进一步分析不同机组组合方案的总成本变化情况，迭代过程中可靠性成本与运行成本变化如图 6 所示，所求的最优机组组合方案成本、可靠性指标与计算时间如表 5 所示。

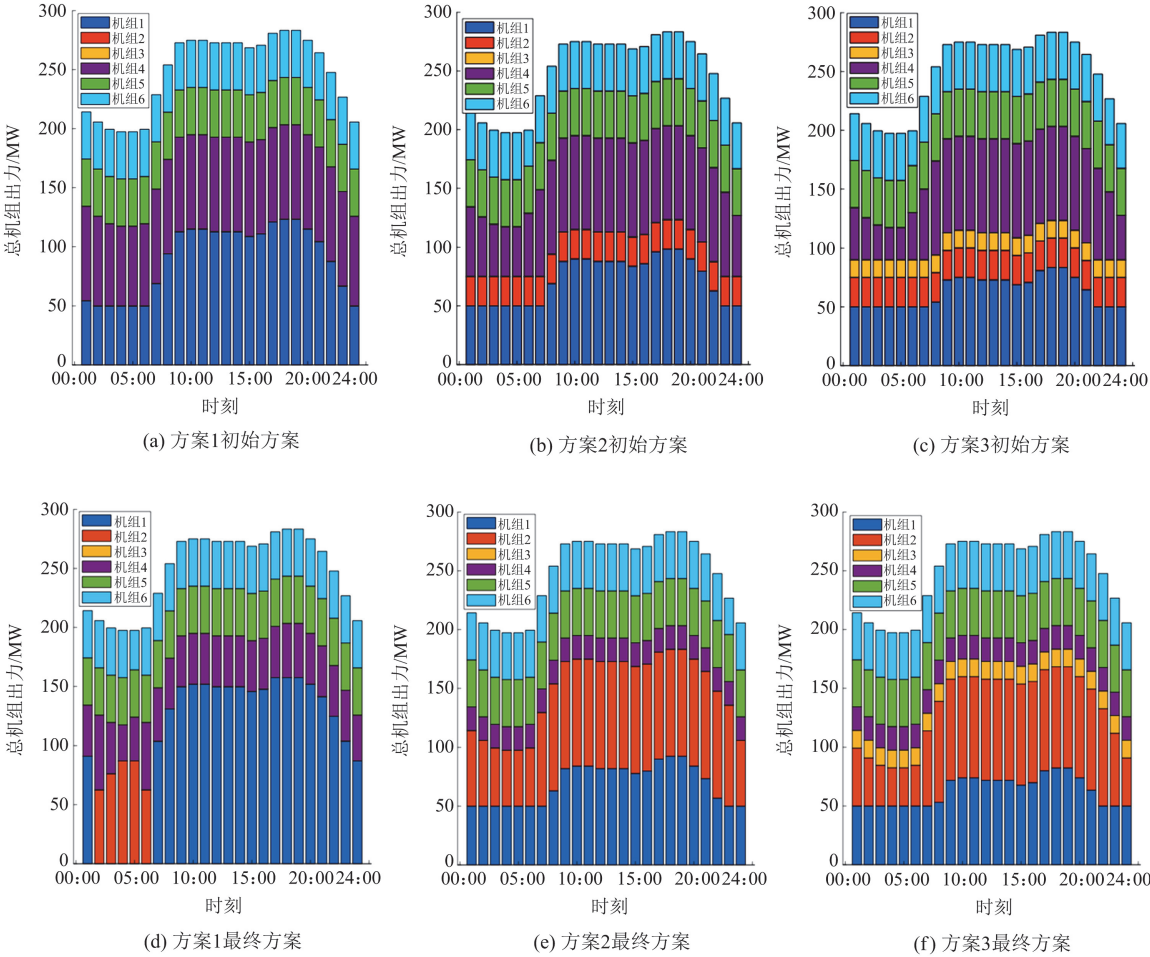


图 5 IEEE30 系统中不同初始方案与优化后的最终方案

Fig. 5 Different initial unit commitment decisions and final decision after optimization of the IEEE30 system

表 5 IEEE30 系统中不同初始方案的成本、可靠性指标与计算时间

Table 5 Cost, reliability and calculation time with different initial unit commitment decisions of the IEEE30 system

初始方案	总成本/万元	运行成本/万元	可靠性成本/万元	LOLP	EENS/MWh	迭代次数	计算时间/s
方案 1	2287.3	1717.8	569.5	0.096	11.9	41	1411
方案 2	2162.7	1713.8	448.9	0.112	9.3	65	1887
方案 3	2177.4	1711.9	465.5	0.131	9.7	60	1722

可以看出，对不同机组组合方案初值，采用两阶段求解方法所得到的最终机组组合方案也有较大的不同：方案 2 具有最高的系统可靠性，其可靠性成本最低。同时，其具有较低的运行成本，综合实现最低的总成本。与方案 2 相比，方案 3 额外开启

了机组 3，但是因机组 3 的故障率较高，将一部分出力从可靠性较好的机组转移到可靠性较差的机组上，导致系统可靠性降低，造成可靠性成本提升。此外，不同初始方案所需的迭代次数和计算时间也不同，且迭代次数和计算时间整体呈现正比例趋势。

不同的机组组合方案初值得到的最终方案也不同, 核心原因在于: 因为可靠性容量灵敏度模型求取的是局部灵敏度, 其适用范围有限。在某一机组达到最小出力需要关停或某一关停机组需要开启时, 机组出力变化远大于灵敏度模型适用范围, 导致所求得的机组关停/启动后的机组组合方案成本具有较大的误差, 进而难以在迭代过程中改变机组启停。因此, 在采用所提两阶段方法求解机组组合方案时, 需选择合适的初值, 使机组组合方案实现预期效果。

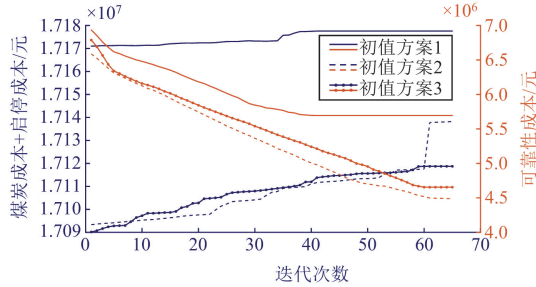


图6 IEEE30系统中不同初始方案下煤炭成本、启停成本与可靠性成本随迭代过程变化情况

Fig. 6 Coal cost, start-up and shutdown cost, and reliability cost changes vs. iteration in different initial decisions of IEEE30 system

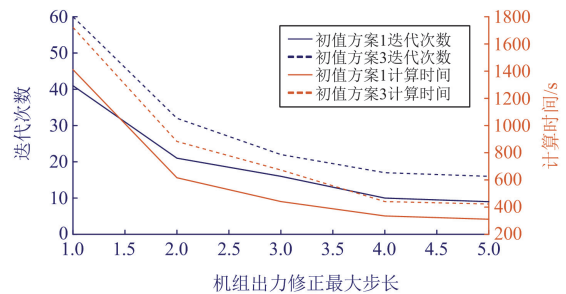
2) 不同机组出力修正最大步长

为了测试不同机组出力修正最大步长对模型收敛速度的影响, 分别采用不同最大步长数值, 计算最优的机组组合方案。所设置的步长分别为1~5 MW。本小节考虑方案1和方案3的两种机组组合方案初值进行分析, 以保证结论的正确性。

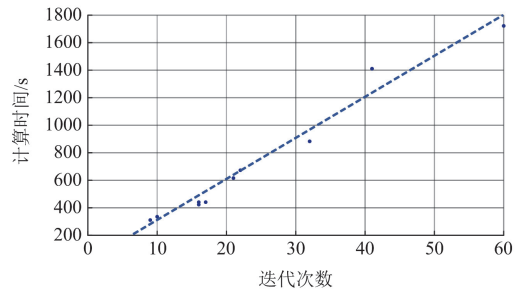
IEEE30系统中迭代次数、计算时间和最大步长的关系如图7所示。可以看出, 迭代次数、计算时间与机组出力修正最大步长的设置整体呈反比例趋势, 迭代次数和计算时间呈线性相关。这是因为机

组出力从初始值修正到最终值的变化固定, “最大步长 $\times$ 迭代次数”应是一个相近的值。但是, 在最大步长较大的情况下, 迭代次数没有如预期的按反比例关系减小。这是因为当最大步长设置过大, 灵敏度模型无法保证每次迭代的精确性, 导致需要进行更多次迭代才能收敛。

进一步地, 在IEEE RTS-96测试系统中, 测试不同最大步长对系统机组组合方案结果和计算效率的影响, 如表6所示。可以看出, 当步长设置过大时, 系统总成本会出现误差。其原因在于: 步长设



(a) 不同机组出力修正最大步长对应的迭代次数与计算时间



(b) 迭代次数和计算时间的关系

图7 迭代次数、计算时间和机组出力修正最大步长的关系

Fig. 7 Relationship between the times of iteration, calculation time and the correction step size

表6 IEEE RTS-96系统中不同机组出力修正最大步长所求得的成本、可靠性指标与计算时间

Table 6 Cost, reliability and calculation time considering different correction step size of the IEEE RTS-96 system

初始方案	步长/MW	总成本/万元	可靠性成本/万元	LOLP	EENS/MWh	迭代次数	计算时间/s
方案1	1	14 645	6059	0.0533	126.2	207	5955
	2	14 655	6002	0.0524	125.1	107	2961
	3	14 721	6059	0.0533	126.2	69	1799
	4	14 784	6034	0.0533	125.6	58	1838
	5	14 774	6034	0.0533	125.6	46	1539
方案3	1	14 235	5692	0.0511	118.5	198	4752
	2	14 236	5702	0.0516	118.7	97	2388
	3	14 458	5942	0.0523	124.7	64	1641
	4	14 447	5943	0.0523	124.7	48	1290
	5	14 434	5943	0.0523	124.7	39	914

置过大,会导致成本在达到最优值之前便因为数值振荡而发生收敛,使最终结果难以收敛到最优值。然而,即使较大的最大步长导致机组组合方案无法达到最优值,所得到的结果也依然具有较高的精度。不同步长下的可靠性指标极差仅有 5%,机组组合总成本极差仅有 1.4%。

在系统计算过程中,为了保证模型的收敛性,需要根据不同系统的实际需求选择合适的步长。可以首先选择一个较大的步长,进行一次计算,并记录计算时间。对比该计算时间和实际需求所允许的计算时间,通过反比例关系计算得到新的步长。新的步长可以视为该系统收敛性最佳的步长。

5 结论

本文提出了基于负荷可行域的可靠性约束机组组合模型及其两阶段求解方法。首先,提出了基于负荷可行域和近似距离模型的可靠性约束机组组合模型,避免了机组组合模型中嵌入大量的优化问题,降低了模型计算复杂性。在此基础上,提出了基于可靠性容量灵敏度模型的两阶段求解方法,通过机组组合方案修正与机组组合方案可靠性评估两个阶段的迭代,实现模型的快速求解。

算例结果表明:所提的可靠性约束机组组合模型可在略微提升系统运行成本的同时,有效降低系统可靠性成本,从而减小系统总成本。所提两阶段求解算法可有效降低可靠性约束机组组合模型的计算复杂性,且保证计算结果的准确性。不同的初值设置会导致最终的机组组合方案不同,应根据需求合理选择求解方法的输入初值。此外,不同的机组出力修正最大步长会导致收敛速度的变化。整体而言,最大步长增大,计算时间会呈反比例减少,但同时模型的精度也会变差。

参考文献

- [1] KHANAVANDI A H, GANDOMKAR M, NIKOUKAR J. Reliability-based planning and partitioning of multiple micro-grid considering demand side response program[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2024, 19(8): 4749-4765.
- [2] 巨云涛, 周伟鹏, 于宗民. 考虑移动储能车提升系统供电可靠性的配电网规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 128-138.
JU Yuntao, ZHOU Weipeng, YU Zongmin. A distribution network planning approach considering mobile energy storage vehicles to enhance system power supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 128-138.
- [3] 张玉莹, 范小克, 孙博, 等. 计及可靠性的城市配电网中公交枢纽多层优化规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 25-36.
ZHANG Yuying, FAN Xiaoke, SUN Bo, et al. Multi-level optimization approach for public transport hub allocation in urban distribution systems considering reliability[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 25-36.
- [4] GHOSH B, CHAKRABORTY A K, BHOWMIK A R. Reliability and efficiency enhancement of a radial distribution system through value-based auto-recloser placement and network remodeling[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-14.
- [5] 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.
- [6] CHEN Jiajun, ZHU Jianquan, ZHUO Yelin, et al. An improved dynamic programming algorithm for security-constrained unit commitment under spatial-temporal decomposition framework[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 155.
- [7] 彭超逸, 顾慧杰, 周华锋, 等. 一种基于拉格朗日与时间解耦的超大规模 SCUC 求解框架[J]. 南方电网技术, 2024, 18(1): 3-13, 27.
PENG Chaoyi, GU Huijie, ZHOU Huafeng, et al. A super large SCUC solution framework based on Lagrangian and time decoupling[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(1): 3-13, 27.
- [8] RAMESH A V, LI X, 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.
- [9] FERNANDEZ-BLANCO R, DVORKIN Y, ORTEGA-VAZQUEZ M A. Probabilistic security-constrained unit commitment with generation and transmission contingencies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 228-239.
- [10] CHEN R L, FAN N, PINAR A, et al. Contingency-constrained unit commitment with post-contingency corrective recourse[J]. Annals of Operations Research, 2017, 249: 381-407.
- [11] ALEXANDRE M, BRUNO F, PATRICIA S, et al. On the role of battery energy storage systems in the day-ahead contingency-constrained unit commitment problem under

- renewable penetration[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 235.
- [12] SAAVEDRA R, STREET A, ARROYO J M. Day-ahead contingency-constrained unit commitment with co-optimized post-contingency transmission switching[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(6): 4408-4420.
- [13] WANG Ying, WANG Xiaojun, ZHANG Yizhi, et al. Over-limit risk assessment method of integrated energy system considering source-load correlation[J]. *Global Energy Interconnection*, 2023, 6(6): 661-674.
- [14] SOKOLER L E, VINTER P, BÆRENTSEN R, et al. Contingency-constrained unit commitment in meshed isolated power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(5): 3516-3526.
- [15] VAHEDIPOUR D M, RASHIDIZADEH K H, ANVARI M A, et al. Stochastic risk-constrained scheduling of renewable-powered autonomous microgrids with demand response actions: reliability and economic implications[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(2): 1882-1895.
- [16] 卢睿, 熊小伏, 陈红州. 考虑台风时空特性的海上风电场群协同紧急防御策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(12): 13-24.
- LU Rui, XIONG Xiaofu, CHEN Hongzhou. Collaborative emergency defense strategy for offshore wind farm clusters considering the spatial-temporal characteristics of a typhoon[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(12): 13-24.
- [17] CHEN Yanbo, ZHANG Zhi, LIU Zhaoyan, et al. Robust N-k CCUC model considering the fault outage probability of units and transmission lines[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2019, 13(17): 3782-3791.
- [18] ZHAO Chaoyue, JIANG Ruiwei. Distributionally robust contingency-constrained unit commitment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 94-102.
- [19] TRAKAS D N, HATZIARGYRIOU N D. Resilience constrained day-ahead unit commitment under extreme weather events[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(2): 1242-1253.
- [20] AHMADI A, ESMAEEL N A, SIANO P, et al. Information-gap decision theory for robust security-constrained unit commitment of joint renewable energy and gridable vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(5): 3064-3075.
- [21] WU Hongyu, SHAHIDEHPUR M, LI Zuyi, et al. Chance-constrained day-ahead scheduling in stochastic power system operation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(4): 1583-1591.
- [22] YANG Yue, WU Wenchuan, WANG Bin, et al. Chance-constrained economic dispatch considering curtailment strategy of renewable energy[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(6): 5792-5802.
- [23] LIANG Jinhao, JIANG Wenqian, LU Chenbei, et al. Joint chance-constrained unit commitment: statistically feasible robust optimization with learning-to-optimize acceleration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(5): 6508-6521.
- [24] JAIN S, PACHAR R K, GIDWANI L. Chance constrained day ahead stochastic unit commitment with multiple uncertainties[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2024: 1-18.
- [25] SUNDAR K, NAGARAJAN H, ROALD L, et al. Chance-constrained unit commitment with N-1 security and wind uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2019, 6(3): 1062-1074.
- [26] LI Xuan, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. A region-based approach for the operational reliability evaluation of power systems with renewable energy integration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(2): 3389-3400.
- [27] LI Xuan, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. A sensitivity-based rolling operational reliability evaluation that follows the changing available generation capacity of renewable energies[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, early access, 2024.
- [28] 李轩, 谢开贵, 邵常政, 等. 基于负荷可行域和可靠性跟踪的电力系统扩容规划及其求解算法[J/OL]. *上海交通大学学报*: 1-24[2024-10-29]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.048>
- LI Xuan, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. Power system expansion planning model and solution algorithm based on load feasible region and reliability tracking[J/OL]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*: 1-24[2024-10-29]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.048>
- [29] WU Q, CAO Y, WEN J. Optimal reactive power dispatch using an adaptive genetic algorithm[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 1998, 20: 563-569.
- [30] GRIGG C, WONG P. The IEEE reliability test system-1996[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1999, 14(3): 1010-1020.

收稿日期: 2024-10-31; 修回日期: 2025-04-30

作者简介:

李 轩(1996—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统可靠性评估与工业企业电网规划; E-mail: Xuan.Li@cisdi.com.cn

王 伟(1970—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 研究方向为工业企业电网规划。E-mail: Wei.Wang@cisdi.com.cn

(编辑 周金梅)