

DOI: 10.7652/xjtuxb201906019

应用全场景可行安全约束机组组合的风电最优消纳模型及解法

李轩^{1,2}, 翟桥柱^{1,2}, 吴江^{1,2}, 高峰^{1,2}, 管晓宏^{1,2,3,4}

(1. 西安交通大学智能网络与网络安全教育部重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学系统工程研究所, 710049, 西安; 3. 清华大学智能与网络化系统研究中心, 100084, 北京; 4. 清华大学自动化系, 100084, 北京)

摘要: 针对含风电电力系统的安全约束机组组合(SCUC)问题,目前广泛采用的鲁棒优化方法在求解时不能满足调度解的非预期约束并存在严重缺陷,且各种模型和算法中均未考虑最大消纳和最优经济消纳的区别。为克服以上困难,提出了满足非预期约束条件的风电最大消纳和最优消纳模型,并给出对应求解方法。该模型及对应求解方法为容纳可能的弃风决策以扩大调度解空间,引入了风电可变不确定集来替代广泛采用的固定不确定集;为满足调度解的非预期性,引入了一组规模极小的强非预期约束,避免了传统建模方式导致的大量非预期约束难题;为克服鲁棒优化中复杂极小极大结构带来的求解困难,引入了基于可变不确定集顶点场景的全场景可行调度模型,该模型具有单层混合整数线性规划(MILP)问题结构,求解可得调度问题的最优解。实验及测试结果表明:该算法在 IEEE118 节点系统中取得了良好效果,显示了最大消纳和最优消纳的区别,可以实现含风电 SCUC 问题的快速求解,并使风电消纳的经济性得到提高。

关键词: 电力系统;安全约束机组组合;最优经济消纳;全场景可行;非预期约束

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)06-0142-09

An Optimal Accommodation Model of Wind Power and Its Solution Based on All-Scenario-Feasible Security Constrained Unit Commitment

LI Xuan^{1,2}, ZHAI Qiaozhu^{1,2}, WU Jiang^{1,2}, GAO Feng^{1,2}, GUAN Xiaohong^{1,2,3,4}

(1. Ministry of Education Key Lab for Intelligent Networks and Network Security, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Institute of Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Center for Intelligent and Networked Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For the security constrained unit commitment (SCUC) with wind power, the nonanticipative constraints are not satisfied by the widely adopted two-stage robust optimization based methods, and there exists a very serious deficiency. Meanwhile, the maximum accommodation and the optimal economic accommodation of the wind energy are not clearly distinguished from each other. In this study, models and solution methods for solving the maximum accommodation and the optimal economic accommodation of the wind energy in SCUC are proposed to address these issues. A variable uncertainty set of wind power is introduced to replace the widely adopted fixed uncertainty set so that the model and the method can accommodate possible wind curtailment decision to expand the scheduling solution space. A group

收稿日期: 2018-10-13。 作者简介: 李轩(1990—),男,博士生;翟桥柱(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901900);国家自然科学基金资助项目(61773309,61773308)。

网络出版时间: 2019-02-27 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190226.0922.004.html>

of small scale strong nonanticipative constraints is introduced to guarantee the nonanticipativity of the scheduling solution and to avoid the huge number of nonanticipative constraints in the traditional modelling methods. An all-scenario-feasible scheduling model based on the vertices of the variable uncertainty set is established to avoid the complex min-max structure in the robust optimization based framework, so that only a single level mixed integer linear programming (MILP) problem needs to be solved in the proposed method, and the optimal scheduling solution is obtained. Numerical results on an IEEE 118-bus system show that the performance of the proposed algorithm is satisfactory. The differences between the maximum accommodation and the optimal economic accommodation of the wind energy are clearly revealed and the economic accommodation level of wind power is increased.

Keywords: power system; security constrained unit commitment; optimal economic accommodation; all-scenario-feasibility; nonanticipative constraints

随着化石能源日渐枯竭,全球气候变暖等问题日益严重,可再生新能源的利用变得更加重要。然而,风电、光电等新能源具有间歇性、出力不确定性等特点,给电网运行带来了很大的挑战。新能源的消纳必须在保证电网运行安全的前提下进行,同时兼顾经济性^[1]。

安全约束机组组合(SCUC)问题是电力系统短期运行调度中非常重要的一类问题,它是在满足传输约束等系统约束和单机组运行约束的前提下求取机组组合(UC)决策,使得系统运行的总成本最优^[2]。SCUC问题体现电力系统运行中的安全性与经济性,恰当建模并求解该问题,对新能源消纳至关重要。

在这样的背景下,考虑新能源不确定性的SCUC问题近年来受到广泛关注^[3],其求解方法按照是否采用新能源发电功率的概率分布信息分为两类:采用分布信息的包括基于场景或场景随机规划方法^[4-7]、机会约束方法^[8]等;不采用分布信息的包括两阶段及多阶段鲁棒优化方法^[9-10]、区间优化方法^[11]以及全场景可行混合整数线性规划(MILP)方法^[12]等。其中,随机规划方法及鲁棒优化方法的相关研究较多。

随机规划方法^[4-7]采用概率分布信息来刻画新能源出力特征,通过采样、约减等方法得到场景或场景树,然后通过求解一个含多个场景(树)的单层混合整数规划问题来寻找最优UC决策。在实际运行中,其经济性表现比较好,但由于有限个场景并不能涵盖本质上的不可数无穷场景,基于随机规划方法^[13]并不能在任何实现场景下保证调度解的安全性和可行性。同时,若想较精确地刻画新能源出力特征,场景数目通常较多,问题规模大,求解困难^[5]。

随机规划方法需要已知新能源发电功率的精确分布信息,在实际应用中较为困难^[14]。与随机规划方法不同,鲁棒优化方法使用不确定集来描述新能源实现值的可能范围,并且保证UC解对不确定集内新能源任意实现值均可行^[3],UC解具有全场景可行性,因此安全性可以保证。然而,鲁棒优化方法存在多层目标结构、结构复杂、解过于保守等问题^[15]。

在随机规划方法框架下,新能源消纳方面已从早期要求对于不确定净负荷全额消纳^[6]演变为允许弃风、弃光的经济消纳^[4],但仍缺乏准确的最大可消纳及经济消纳的定量分析计算模型。在鲁棒优化框架下,有的模型要求对净负荷在不确定集内的任意实现值进行全额消纳^[9];另有研究在经济分配(ED)模型中引入了弃风变量^[16];有些则在由不确定集生成的场景中引入弃风变量^[17]。

然而,以上文献均未考虑不确定性的优化方法中重要的非预期约束条件^[18](NC)。有研究指出,ED决策的非预期性是在建模和求解含不确定性UC问题中必须考虑的,它是保证电网运行真正安全不可或缺的因素,是否考虑ED决策的非预期性是考虑不确定性的两阶段与多阶段UC问题建模方式的本质区别^[10]。已有数值结果表明,使用两阶段鲁棒UC方法所得到的UC解在某些特定场景下并不可行,即使该场景落在不确定集内^[12]。为解决该问题,有研究工作采用多阶段鲁棒优化理论进行建模,以此来保证非预期性,并要求不确定集内的新能源实现值全额消纳,但未考虑弃风及经济消纳^[10]。

在这样的背景下,本文基于SCUC模型建立风电最大及经济消纳模型,模型能同时保证ED决策非预期性及UC决策的全场景可行性;基于隐式决

策规则对模型进行转化,并采用全场景可行 MILP 方法对转化后的模型进行求解。

1 问题描述

1.1 考虑风电不确定性的 SCUC 问题模型

假设一个电力系统有 I 个火电机组、 K 个风电场、 L 条传输线、 M 个负荷,调度时段总数为 T ,对应的编号下标为 i, k, l, m, t 。

设各风电场在各时段的预测出力满足

$$\underline{W}_{k,t} \leq w_{k,t} \leq \bar{W}_{k,t}, \quad \forall k, t \quad (1)$$

则各时段的一种简单不确定集如下式

$$\Omega_t = \{w_t \mid \underline{W}_t \leq w_t \leq \bar{W}_t\}, \quad \forall t \quad (2)$$

式中: $w_t = (w_{1,t}, \dots, w_{K,t})^T$, $\underline{W}_t = (\underline{W}_{1,t}, \dots, \underline{W}_{K,t})^T$, $\bar{W}_t = (\bar{W}_{1,t}, \dots, \bar{W}_{K,t})^T$ 为 t 时段风电出力变量、风电出力预测下限及上限对应的向量。

那么,所有时段风电出力的不确定集为每一个时段不确定集的笛卡尔积,如下式

$$\Omega = \Omega_1 \times \Omega_2 \times \dots \times \Omega_T \quad (3)$$

本文考虑的不确定集为一个盒式集合,可以通过引入不确定集预算约束进一步刻画风电出力的时空相关特征^[15]。

考虑随机因素的优化问题中决策的非预期性^[18]指的是,当前时段决策只能依赖于截至目前已实现的随机变量信息,而不能依赖于未来尚未实现的随机变量信息。在考虑风电不确定性的 SCUC 问题时,定义符号 $w_{[t]}$ 为截至第 t 时段已实现的风电场功率信息,即 $w_{[t]} = (w_1, \dots, w_t)$,则各机组在时段 t 的发电功率 p_t 是 $w_{[t]}$ 的函数,即 $p_t = p_t(w_{[t]})$ 。

考虑风电不确定性的 SCUC 问题模型如下

$$\min_{z, p} (C^S(z) + \sum_t C^F(p_t(w_{[t]}^{\text{rep}}))) \quad (4)$$

$$\text{s. t. } z \in X \quad (5)$$

$$\sum_i p_{i,t}(w_{[t]}) + \sum_k w_{k,t} - \sum_m d_{m,t} = 0, \quad \forall t, w \in \Omega \quad (6)$$

$$-F_l \leq \sum_i \Gamma_{l,i}^l p_{i,t}(w_{[t]}) + \sum_k \Gamma_{l,k}^w w_{k,t} -$$

$$\sum_m \Gamma_{l,m}^D d_{m,t} \leq F_l, \quad \forall l, t, w \in \Omega \quad (7)$$

$$z_{i,t} P_i \leq p_{i,t}(w_{[t]}) \leq z_{i,t} \bar{P}_i, \quad \forall i, t, w \in \Omega \quad (8)$$

$$\Delta_i^-(z_{i,t-1}, z_{i,t}) \leq p_{i,t}(w_{[t]}) - p_{i,t-1}(w_{[t-1]}) \leq \Delta_i^+(z_{i,t-1}, z_{i,t}), \quad \forall i, t, w \in \Omega \quad (9)$$

问题式(4)~(9)中,决策变量为 UC 决策, $z \in \{0, 1\}^{I \times T}$; 机组发电功率(ED)决策 $p = [p_{i,t}]^{I \times T} \in \mathbf{R}^{I \times T}$; $w \in \Omega$ 为风电场发电功率,是一个随机量。目标式(4)是最小化机组开机费用 $C^S(z)$ 及风电点代

表场景 w^{rep} 的燃料成本,代表场景根据实际使用需求,可以为点预测值场景等。式(6)~(9)为全场景可行约束,要求对任意可能的风电实现值 $w \in \Omega$ 都满足。其中,式(6)是功率平衡约束, $d_{m,t}$ 为负荷 m 在时段 t 的负荷需求,此处为确定量;式(7)是基于直流潮流模型的传输约束,其中 F_l 是传输线 l 的传输能力上限,系数 Γ 是功率传输分布因子(PTDF);式(8)是机组发电能力约束;式(8)是机组爬升约束,其中, Δ^+ 与 Δ^- 是爬升与爬降功率的限制,它们的值与机组组合状态相关。式(5)代表所有仅与机组开关机变量相关的约束, X 在此为一确定性集合,由最小最大开关机时间约束、必须开关机约束等约束组成。基于备用宽度模型^[19],备用约束也可由式(5)表示。更为详细的确定性 UC 问题的数学表达可以参考文献[20]。

该模型的 UC 解满足多阶段全场景可行性,定义如下。

定义 1 多阶段全场景可行。给定一组机组组合 z , 如果对任意 $w \in \Omega$, 总存在一组机组发电功率决策 $p_t(w_{[t]})$, $\forall t$, 使得式(6)~(9)得到满足, 则称 z 在不确定集 Ω 上多阶段全场景可行。

1.2 可变不确定集

考虑弃风及经济消纳时,本文引入风电出力区间上限的“削减量”变量 $h, h = [h_{k,t}]^{K \times T} \in \mathbf{R}^{K \times T}$, 使不确定集 Ω 成为可变的确定集。变量 h 应满足

$$h_{k,t} \in [0, \bar{W}_{k,t}], \quad \forall k, t \quad (10)$$

根据变量 h 的定义,可变不确定集的风电出力上限为

$$\bar{W}_{k,t}^V(h_{k,t}) = \bar{W}_{k,t} - h_{k,t}, \quad \forall k, t \quad (11)$$

在计算可变不确定集的下限时,有以下两种情况需要考虑: ① $h_{k,t} \in [0, \bar{W}_{k,t} - \underline{W}_{k,t}]$, 此时 $\bar{W}_{k,t}^V(h_{k,t}) \in [\underline{W}_{k,t}, \bar{W}_{k,t}]$, 所以取 $\underline{W}_{k,t}^V(h_{k,t}) = \underline{W}_{k,t}$; ② $h_{k,t} \in [\bar{W}_{k,t} - \underline{W}_{k,t}, \bar{W}_{k,t}]$, 此时 $\bar{W}_{k,t}^V(h_{k,t}) \in [0, \underline{W}_{k,t}]$, 同时区间下限必须小于区间上限, $\underline{W}_{k,t}^V(h_{k,t}) \leq \bar{W}_{k,t}^V(h_{k,t})$, 所以取 $\underline{W}_{k,t}^V(h_{k,t}) = \bar{W}_{k,t}^V(h_{k,t}) = \bar{W}_{k,t} - h_{k,t}$, 即调整后的全额消纳区间缩为一点,如下式所示

$$\underline{W}_{k,t}^V(h_{k,t}) = \begin{cases} \underline{W}_{k,t}, & h_{k,t} \in [0, \bar{W}_{k,t} - \underline{W}_{k,t}], \forall k, t \\ \bar{W}_{k,t} - h_{k,t}, & \text{其他}, \forall k, t \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\bar{W}_{k,t}^V(h_{k,t})$ 为 $h_{k,t}$ 的分段线性函数,为方便后续计算,可采用类似于文献[16]的线性化方法,通过引入辅助变量、添加相关约束,将其在后续优化问题中替换为线性表达式。

基于以上分析,可变不确定集 Ω^V 可表示为

$$\Omega^V(\mathbf{h}) = \Omega_1^V(\mathbf{h}_1) \times \Omega_2^V(\mathbf{h}_2) \times \cdots \times \Omega_T^V(\mathbf{h}_T) \quad (13)$$

$$\Omega_t^V(\mathbf{h}_t) = \{\mathbf{w}_t \mid \underline{\mathbf{W}}_t^V(\mathbf{h}_t) \leq \mathbf{w}_t \leq \overline{\mathbf{W}}_t^V(\mathbf{h}_t)\}, \quad \forall t \quad (14)$$

1.3 风电最大消纳区间及经济消纳区间

在前文基础上,本文定义最大消纳区间如下。

定义2 最大消纳区间。如果 $\mathbf{h}^*$ 是问题式(15)~(19)的最优解,则将按式(11)~(12)计算得到的区间 $[\underline{\mathbf{W}}^V(\mathbf{h}), \overline{\mathbf{W}}^V(\mathbf{h})] \subset \mathbf{R}^{K \times T}$ 称为最大消纳区间,并称以下各式

$$\min_{\mathbf{z}, \mathbf{h}, \mathbf{p}(\cdot)} \sum_{k,t} h_{k,t} \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{z} \in X \quad (16)$$

$$h_{k,t} \in [0, \overline{W}_{k,t}], \quad \forall k, t \quad (17)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{p}_t(\mathbf{w}_{[t]}) + \mathbf{B}\mathbf{z} + \mathbf{E}\mathbf{w}_t \leq \mathbf{G}, \quad \forall t, \mathbf{w} \in \Omega^V(\mathbf{h}) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta^-(\mathbf{z}_{t-1}, \mathbf{z}_t) &\leq \mathbf{p}_t(\mathbf{w}_{[t]}) - \mathbf{p}_{t-1}(\mathbf{w}_{[t-1]}) \leq \\ \Delta^+(\mathbf{z}_{t-1}, \mathbf{z}_t), \quad \forall t, \mathbf{w} \in \Omega^V(\mathbf{h}) \end{aligned} \quad (19)$$

对应模型为最大消纳模型。

式(15)~(19)为多阶段优化问题,其中机组启停决策 $\mathbf{z}$ 与上限削减量 $\mathbf{h}$ 是第一阶段决策(风电出力实现之前做出的决策), $\mathbf{p}_t$ 是满足非预期性的后续阶段决策,与风电实现交替出现。该问题的目标为上限削减量之和最小,也就是使消纳区间上限之和最大。 $\mathbf{z}$ 与 $\mathbf{h}$ 分别受式(16)与(17)所约束。式(18)与(19)是鲁棒约束,要求在可变不确定集内风电的任意实现值下都满足。其中,式(18)是约束式(6)~(8)的矩阵形式,与负荷相关的项已合并至右端项 $\mathbf{G}$, 系数矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{E}$ 可根据式(6)~(8)直接得到。式(19)的含义类似式(9)。

按照最大消纳方式消纳风电并不一定是最优方式,考虑到如果为了消纳风电,部分火电机组必须保持开机以提供充足的备用,此时这部分机组也有可能运行在效率相对较低的区间。受此启发,本文引入“经济消纳”的概念。

给定一组可行的风电上限削减量后,SCUC问题仍为含随机量的优化问题,其最优成本与风电实现值有关,因此采用最优成本的期望值来衡量风电上限削减量的性能是比较恰当的,但在成本期望计算中不可避免地涉及到风电分布信息,而精确分布信息又难以获取,为避免这一困难,本文采用文献[9]中常用的一种方法,以风电代表场景下的成本(多个代表场景时为其加权和)作为成本期望的近

似,其具体形式如下

$$\mathbf{w}_{k,t}^{\text{rep}}(h_{k,t}) = \begin{cases} \hat{\mathbf{w}}_{k,t}^{\text{rep}}, h_{k,t} \in [0, \overline{W}_{k,t} - \hat{\mathbf{w}}_{k,t}^{\text{rep}}], \forall k, t \\ \overline{W}_{k,t} - h_{k,t}, \text{其他}, \forall k, t \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\hat{\mathbf{w}}_{k,t}^{\text{rep}}$ 为风电代表场景下的实现值,当削减后的上限大于 $\hat{\mathbf{w}}_{k,t}^{\text{rep}}$ 时,则该风电实现值可以被消纳,否则该场景下的风电消纳量等于削减后的上限。式(20)也可按文献[16]的方式进行线性化,便于后文计算。本文定义风电经济消纳区间如下。

定义3 经济消纳区间。如果 $\mathbf{h}^*$ 是问题式(21)~(26)的最优解,则将按式(11)~(12)计算出的 $[\underline{\mathbf{W}}^V(\mathbf{h}), \overline{\mathbf{W}}^V(\mathbf{h})] \subset \mathbf{R}^{K \times T}$ 称为经济消纳区间,并且称以下各式

$$\min_{\mathbf{z}, \mathbf{h}, \mathbf{p}^{\text{rep}}, \mathbf{p}(\cdot)} (C^S(\mathbf{z}) + C^F(\mathbf{p}^{\text{rep}})) \quad (21)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{z} \in X \quad (22)$$

$$h_{k,t} \in [0, \overline{W}_{k,t}], \quad \forall k, t \quad (23)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{p}_t(\mathbf{w}_{[t]}) + \mathbf{B}\mathbf{z} + \mathbf{E}\mathbf{w}_t \leq \mathbf{G}, \quad \forall t, \mathbf{w} \in \Omega^V(\mathbf{h}) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \Delta^-(\mathbf{z}_{t-1}, \mathbf{z}_t) &\leq \mathbf{p}_t(\mathbf{w}_{[t]}) - \mathbf{p}_{t-1}(\mathbf{w}_{[t-1]}) \leq \\ \Delta^+(\mathbf{z}_{t-1}, \mathbf{z}_t), \quad \forall t, \mathbf{w} \in \Omega^V(\mathbf{h}) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{p}_t^{\text{rep}} + \mathbf{B}\mathbf{z} + \mathbf{E}\mathbf{w}_t^{\text{rep}}(\mathbf{h}_t) &\leq \mathbf{G}, \quad \forall t \\ \Delta^-(\mathbf{z}_{t-1}, \mathbf{z}_t) &\leq \mathbf{p}_t^{\text{rep}} - \mathbf{p}_{t-1}^{\text{rep}} \leq \Delta^+(\mathbf{z}_{t-1}, \mathbf{z}_t), \quad \forall t \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

对应模型为经济消纳模型。

代表场景对应的火电机组发电功率为 $\mathbf{p}^{\text{rep}}$, 与 $\mathbf{z}$ 和 $\mathbf{h}$ 相同, $\mathbf{p}^{\text{rep}}$ 也作为第一阶段变量进行优化,其约束为式(26)。同时,也需要满足风电最大消纳模型中的约束式(16)~(19)。

由定义2、3可见,风电的最大消纳区间和经济消纳区间的计算依赖于以式(15)和式(21)为目标时的最优风电削减量 $\mathbf{h}^*$ 的计算。另外,在以上两个定义中,其UC解的多阶段全场景可行性及ED解的非预期性都得到了体现。同时考虑弃风决策和ED决策的非预期性,是本文与其他相关研究的本质区别。

2 求解方法

问题式(15)~(19)与问题式(21)~(26)并不能直接求解,难点有3个:①约束式(18)与(19)有无穷多个;②不确定集表达式中含有变量 $\mathbf{h}$, 本身也是优化对象;③最优函数 $\mathbf{p}_t(\mathbf{w}_{[t]})$ 的形式未知。同时还需要澄清,由于不确定集本身可变,这两个问题结构与多阶段鲁棒优化问题^[10,15]并不相同,相关方法无法直接套用。在本节中,先通过引入非预期约束克

服难点③,再采用全场景可行 MILP 方法克服难点①和②。本节以经济消纳模型式(21)~(26)为例展开讨论,最大消纳模型式(15)~(19)可以此类推。

2.1 模型变换

从多阶段全场景可行定义1中可以看出,获得多阶段全场景可行的第一阶段决策,关键在于这组决策必须使得满足式(24)(25)的机组发电功率决策“存在”。由于 $p_t(w_{[t]})$ 的形式未知,因此全场景可行性的判定非常困难。为此,多阶段鲁棒优化方法^[10]采用仿射决策规则(ADR)来明确 $p_t(w_{[t]})$ 的形式,但这样做限制了解空间,且显著增加了模型规模。为克服此困难,本文提出一种新方法如下。

引入辅助变量 $p^{\min}, p^{\max} \in \mathbf{R}^{I \times T}$, 将问题式(21)~(26)转化为如下形式

$$\min_{z, h, p^{\text{rep}}, p^{\min}, p^{\max}} (C^S(z) + C^F(p^{\text{rep}})) \quad (27)$$

$$\text{s. t. } z \in X \quad (28)$$

$$h_{k,t} \in [0, \bar{W}_{k,t}], \quad \forall k, t \quad (29)$$

$$p_t^{\max} - p_{t-1}^{\min} \leq \Delta^+(z_{t-1}, z_t), \quad \forall t \quad (30)$$

$$p_t^{\min} - p_{t-1}^{\max} \geq \Delta^-(z_{t-1}, z_t), \quad \forall t \quad (31)$$

$$Ap_t^{\text{rep}} + Bz + Ew_t^{\text{rep}}(h_t) \leq G, \quad \forall t \quad (32)$$

$$p_t^{\min} \leq p_t^{\text{rep}} \leq p_t^{\max}, \quad \forall t \quad (33)$$

$$\forall t, w_t \in \Omega_t^V(h_t), \exists p_t \in$$

$$\{p_t \in \mathbf{R}^{I \times 1} : Ap_t + Bz + Ew_t \leq G, \\ p_t^{\min} \leq p_t \leq p_t^{\max}\} \quad (34)$$

问题式(27)~(34)中, $z, h, p^{\text{rep}}, p^{\min}, p^{\max}$ 同为第一阶段决策,式(34)为鲁棒约束。在此问题中,机组发电功率决策 p_t 已经不再表达为 $w_{[t]}$ 的函数,同时引入新约束式(30)(31)、式(34)中 $p_t^{\min} \leq p_t \leq p_t^{\max}$, 替代了原问题中的爬升约束。问题式(27)~(34)的机组组合解满足多阶段全场景可行性,定理如下。

定理1 如果 $(\bar{z}, \bar{h}, \bar{p}^{\min}, \bar{p}^{\max})$ 是问题式(27)~(34)的可行解,那么 $\bar{z}$ 在 $\Omega^V(\bar{h})$ 上多阶段全场景可行。

证明 根据定义3,需要证明对任意 $w \in \Omega^V(\bar{h})$, p_t 满足非预期性,即 p_t 的可行域仅与 $w_{[t]}$ 有关;存在 $p_t, \forall t \in N_T$ 满足式(24)与(25)。

根据给定 $(\bar{z}, \bar{h}, \bar{p}^{\min}, \bar{p}^{\max})$, 对任意 $w \in \Omega^V(\bar{h})$, p_t 的可行域为

$$\{p_t : Ap_t + B\bar{z} + Ew_t \leq G; \bar{p}_t^{\min} \leq p_t \leq \bar{p}_t^{\max}\} \quad (35)$$

可见,式(35)仅与 $w_t(w_{[t]})$ 的分量)有关。

由定理条件可知,对任意 $w \in \Omega^V(\bar{h})$, 存在 p_t 满足式(34)。由于 p_t 的可行域仅与 $w_{[t]}$ 有关,式(18)

可由式(34)中 $Ap_t + Bz + Ew_t \leq G$ 保证。由于 $(\bar{z}, \bar{p}^{\min}, \bar{p}^{\max})$ 是问题的可行解,满足式(30)~(31),根据式(34)中 $p_t^{\min} \leq p_t \leq p_t^{\max}$ 和式(31),得到

$$p_t - p_{t-1} \geq \bar{p}_t^{\min} - \bar{p}_{t-1}^{\max} \geq \Delta^-(\bar{z}_{t-1}, \bar{z}_t) \quad (36)$$

同理,根据式(34)中 $p_t^{\min} \leq p_t \leq p_t^{\max}$ 和式(30),有

$$p_t - p_{t-1} \leq \bar{p}_t^{\max} - \bar{p}_{t-1}^{\min} \leq \Delta^+(\bar{z}_{t-1}, \bar{z}_t) \quad (37)$$

所以式(19)成立。

定理1说明,通过求解问题式(27)~(34),可以同时获得在式(27)意义下最优的不确定集 $\Omega^V(h)$ 和其对应的多阶段全场景可行机组组合决策 z , 且由于引入约束式(30)(31)、式(34)中 $p_t^{\min} \leq p_t \leq p_t^{\max}$, 成功地将机组发电功率决策从函数形式 $p_t(w_{[t]})$ 替换成了变量形式 p_t , 同时又能保证其非预期性。

2.2 全场景可行 MILP 方法

尽管问题式(27)~(34)不再以函数形式表达机组发电功率决策,但约束式(34)仍然具有无穷多个,且不确定集 $\Omega^V(h)$ 并不是提前给定的确定性集合。基于以上问题特点,采用全场景可行 MILP 方法^[12]进行求解。

全场景可行 MILP 方法首先根据不确定集结构构建有限个场景,然后基于这些场景构建 MILP 问题进行求解,可以在保证解的多阶段全场景可行性的同时解决无穷约束的问题。同时,在采用可变不确定集的情况下,顶点场景为变量 h 的解析表达式,从而达到 h 与其他第一阶段决策一起优化的目的。

设 t 时段可变不确定集 $\Omega_t^V(h_t)$ 的顶点场景^[12]构建如下

$$v_t^1(h_t), v_t^2(h_t), \dots, v_t^{S_t}(h_t) \in \mathbf{R}^{K \times 1} \quad (38)$$

由于 $\Omega^V(h)$ 是凸多面体集合,结合前文提到的线性化方法,容易获得式(38)。

用于求解问题式(27)~(34)的全场景可行 MILP 模型如下

$$\min_{z, h, p^{\text{rep}}, p^s, p^{\min}, p^{\max}} (C^S(z) + C^F(p^{\text{rep}})) \quad (39)$$

$$\text{s. t. } z \in X \quad (40)$$

$$h_{k,t} \in [0, \bar{W}_{k,t}], \quad \forall k, t \quad (41)$$

$$p_t^{\max} - p_{t-1}^{\min} \leq \Delta^+(z_{t-1}, z_t), \quad \forall t \quad (42)$$

$$p_t^{\min} - p_{t-1}^{\max} \geq \Delta^-(z_{t-1}, z_t), \quad \forall t \quad (43)$$

$$Ap_t^{\text{rep}} + Bz + Ew_t^{\text{rep}}(h_t) \leq G, \quad \forall t \quad (44)$$

$$p_t^{\min} \leq p_t^{\text{rep}} \leq p_t^{\max}, \quad \forall t \quad (45)$$

$$Ap_t^s + Bz + Ev_t^s(h_t) \leq G, \quad \forall t, s \in N_{S_t} \quad (46)$$

$$p_t^{\min} \leq p_t^s \leq p_t^{\max}, \quad \forall t, s \in N_{S_t} \quad (47)$$

问题式(39)~(47)是一个混合整数规划问题。其中, p^s 是对应顶点场景 s 的发电功率决策, N_{S_t} 是

式(38)中 t 时段顶点场景上标集合。

通过求解问题式(39)~(47),可以获得在目标意义下最优的不确定集削减决策 h^* , UC 决策 z^* 以及辅助变量最优解 $p^{*\min}$ 、 $p^{*\max}$ 。

根据文献[12]容易得到如下结论。

定理 2 问题式(39)~(47)的可行解与问题式(27)~(34)的可行解集合相同,最优目标值也相同。

2.3 解在新能源消纳过程中的应用

假设问题式(39)~(47)的最优解为 h^* 、 z^* 、 $p^{*\min}$ 、 $p^{*\max}$,在实时调度阶段根据这组解与风电的实际实现值进行风电消纳和 ED 问题求解的具体步骤如下。

步骤 1 风电消纳。对时段 t 的风电实现值 $w_t \in \Omega_t$,如果该实现值不超过削减后的风电消纳上限 $\bar{W}_{k,t}^V(h_{k,t}^*)$,则实际消纳量 $\hat{w}_t$ 即为 w_t ,否则实际消纳量 $\hat{w}_t$ 即为上限 $\bar{W}_{k,t}^V(h_{k,t}^*)$ 。

步骤 2 ED 问题求解。求解问题式(48)~(50),获得 p_t^*

$$\min_{p_t} C^F(p_t) \quad (48)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{A}p_t + \mathbf{B}z^* + \mathbf{E}\hat{w}_t \leq \mathbf{G} \quad (49)$$

$$p_t^{*\min} \leq p_t \leq p_t^{*\max} \quad (50)$$

与传统 SCED 问题不同,问题式(48)~(50)是一个单时段问题,不需要提前考虑未来多个时段以获取满足爬升约束的 ED 决策^[10],而是引入了式(50)来保证 ED 解满足非预期性和爬升约束。问题式(48)~(50)仍为线性规划问题,且规模比传统 ED 问题小。

3 数值测试

构建两个案例分别测试风电最大消纳模型和经济消纳模型。测试环境为 Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU @ 3.40 GHz PC(8 GB RAM),MATLAB R2015b,CPLEX 12.5。

3.1 最大消纳模型测试(案例 1)

测试案例为 IEEE 118-bus 测试系统^[21],共 54 台火电机组,其燃料成本表示为功率的分段线性函数。在原系统基础上,于节点 10、25、65、80 上各添加了一个装机容量为 300 MW 的风电场(共 1 200 MW),其总装机容量占峰值负荷(6 000 MW)的 20%,占低谷值负荷(3 200 MW)的 37.5%。其中,风电场 1 的预测区间如图 1 所示,其他风电场有类似规律。

在本案例中,使用原始全场景可行 MILP 方

法^[12]和最大风电消纳模型式(15)~(19)进行测试。CPLEX 求解器的混合整数规划间隙设定为 0.01%。

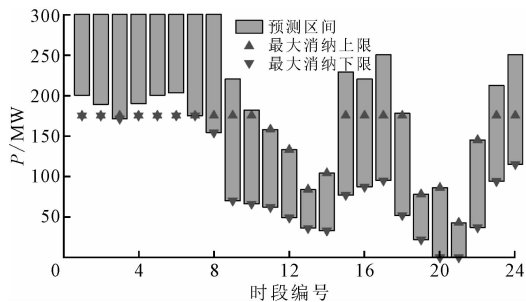


图 1 风电场 1 的预测区间和消纳区间

经过测试发现,要求全额消纳的原始全场景可行 MILP 找不到可行解。这意味着,在当前系统配置情况下,全额消纳风电是无法做到的。

接下来,对该案例建立最大风电消纳模型并进行求解,该模型由于引入了不确定集削减变量,可以找到可行解。原始所有时段所有风电场的预测出力上限之和为 20 075 MW,在使用最大消纳模型计算后,所有时段所有风电场的最大消纳区间上限之和为 18 734 MW,为原始预测上限之和的 93.3%。

可以发现,风电场 2、3 和 4 的最大消纳区间与其风电预测出力区间完全相同。也就是说,消纳能力的不足主要集中在风电场 1,其详细消纳结果如图 1 所示,可以看到,对风电场 1 的消纳上限被限制在了 175 MW。观察系统的网络拓扑结构及相关参数可以发现,风电场 1 仅通过 1 条容量为 175 MW 的线路与主电网进行连接,若风电场 1 发电功率超过 175 MW,则无法全额送出。所以,可对该线路进行扩容以提高传输网络的承载能力。

3.2 经济消纳模型测试(案例 2)

案例 2 也采用 IEEE 118-总线测试系统,与案例 1 中的线路相比,案例 2 中所有线路传输容量均大于 125 MW。接着,在该案例上测试并对比了传统的全额消纳^[12]以及本文的经济消纳模型式(21)~(26)。后文中分别称之为全额消纳和经济消纳。

在本小节中,代表场景为风电点预测值以及式(38)中的顶点场景。代表场景的权系数设定如下:风电点预测值场景权系数为 0.5,其余场景的权系数平均分配,总和为 0.5。问题求解结果见表 1,其中区间削减率定义为

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \frac{h_{k,t}}{\bar{W}_{k,t} - \underline{W}_{k,t}} \quad (51)$$

用于衡量原始不确定集缩小的程度。

表 1 全额消纳与经济消纳求解结果对比

方法	目标值 / 10^6 \$	计算时间 /s	区间削减率 /%	总开机数
全额消纳	1.388 2	357.1	0.00	429
经济消纳	1.378 1	296.3	1.70	427

各时段全额消纳与经济消纳的风电区间如图 2 所示,各时段开机数如图 3 所示。

接下来对获得的 UC 解进行蒙特卡洛仿真,根据多种分布,共生成 1 000 个风电样本,这样所得到的解与具体的风电分布关系较弱。使用 2.3 节的 ED 模型对每个风电场景进行求解。这 1 000 个样本的平均成本可以较好地逼近期望意义下的燃料成本,主要结果见表 2。其中,平均弃风率为所有场景弃风相比于实现值的平均比率,平均火电功率为各样本各时段的平均火电功率。

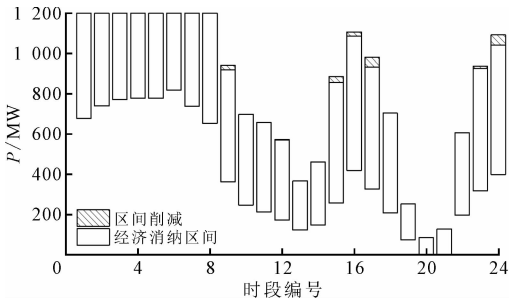


图 2 风电全额消纳与经济消纳的功率对比

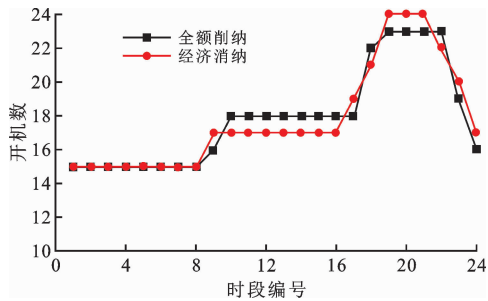


图 3 全额消纳与经济消纳的开机数对比

表 2 全额消纳与经济消纳仿真结果对比

方法	平均成本 / 10^6 \$	最大成本 / 10^6 \$	平均弃风率 /%	平均火电 功率/MW
全额消纳	1.389 7	1.413 9	0.00	4 154.7
经济消纳	1.379 2	1.403 8	0.22	4 156.1

综上所述,可以得到以下结果。

(1)在蒙特卡洛仿真结果中,经济消纳模型的平均成本比全额消纳模型的平均成本低 0.76%,经济消纳模型的目标值比全额消纳的目标值小 0.73%,

说明与全额消纳相比,在实际运行中弃掉一部分风电可能会降低火电成本。

(2)表 1 中的区间削减率与表 2 中的平均弃风率分别为 1.70%和 0.22%,所以无论是可变不确定集相比于原不确定集的缩小程度还是在仿真过程中实际弃掉的风电都很少。由平均火电功率可以看出,经济消纳相比于全额消纳的火电机组发电功率更高,但即使这样,火电成本也会有明显地降低(见表 2)。

(3)由图 3 可以看出,通过对风电消纳区间的削减,可以有效平缓火电机组 UC 决策的变化幅度,在时段 8~10,全额消纳开机数由 15 升至 18,而最优消纳的开机数仅在 8~9 时段由 15 升至 17,之后若干时段保持不变。在时段 17~18 及 22~23,全额消纳方式分别有 4 个机组开机和 4 个机组关机,而经济消纳仅在时段 18~19、23~24 有 3 个机组开机或关机,其余时段最大开关机数为 2。

(4)与全额消纳相比,经济消纳模型的求解时间减少了 10.98%。

同时经济消纳模型引入了变量 h ,而变量数量是影响 MILP 模型求解的关键因素。为验证经济消纳模型是否真正减少计算时间,又在不同的混合整数间隙水平下测试了这两个模型,结果见表 3。

表 3 经济消纳模型在不同间隙设定水平下的计算时间及目标值

间隙	计算时间/s		目标值/ 10^6 \$	
	全额消纳	经济消纳	全额消纳	经济消纳
10^{-4}	357.1	296.3	1.388 2	1.378 1
10^{-3}	355.3	270.8	1.388 2	1.378 1
10^{-2}	318.5	271.0	1.392 1	1.378 1
10^{-1}	283.3	272.2	1.409 6	1.378 1
2×10^{-1}	284.2	220.5	1.409 6	1.672 9

从表 3 中可以看出,经济消纳模型的计算时间在所有间隙设定下都要少于全额消纳模型。这很有可能是因为当模型中允许弃风时,其对应的可行域可能会更大,故 MILP 求解器寻找可行解也会更容易,且间隙越大,计算时间通常越短。

4 结 论

UC 决策的全场景可行性与 ED 决策的非预期性在电力系统短期调度问题中十分重要。本文采用不确定集描述风电的实现值范围,并通过引入削减变量,使其变为可变不确定集。基于可变不确定集,

在考虑以上两种性质等一系列短期运行约束的基础上,给出风电最大消纳区间和经济消纳区间的定义及模型。通过基于非预期约束的模型变换,并采用全场景可行 MILP 方法,可以同时得到最优风电消纳区间及其对应的 UC 决策。数值测试结果表明,最大消纳量模型能够准确计算当前系统设定下的新能源最大消纳能力,而经济消纳量模型测试结果揭示了全额消纳并非消纳新能源的最优方式,同时方法的有效性也得到了验证。

当风电场数量较多时,使用全场景可行 MILP 求解可能会有规模较大的问题。未来工作可以从缩小问题规模的角度着手或采用基于迭代框架的方法对本文模型进行求解,以提升大规模案例的计算效率。

参考文献:

- [1] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems [J]. Proceedings of CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [2] 夏清, 钟海旺, 康重庆. 安全约束机组组合理论与应用的发展和展望 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 94-103.
XIA Qing, ZHONG Haiwang, KANG Chongqing. Review and prospects of the security constrained unit commitment theory and applications [J]. Proceedings of CSEE, 2013, 33(16): 94-103.
- [3] 朱光远, 林济铿, 罗治强, 等. 鲁棒优化在电力系统发电计划中的应用综述 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5881-5892.
ZHU Guangyuan, LIN Jikeng, LUO Zhiqiang, et al. Review of robust optimization for generation scheduling in power systems [J]. Proceedings of CSEE, 2017, 37(20): 5881-5892.
- [4] JU Liwei, TAN Zhongfu, YUAN Jinyun, et al. A bi-level stochastic scheduling optimization model for a virtual power plant connected to a wind-photovoltaic-energy storage system considering the uncertainty and demand response [J]. Applied Energy, 2016, 171: 184-199.
- [5] ZHENG Qipeng, WANG Jianhui, LIU A L. Stochastic optimization for unit commitment: a review [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1913-1924.
- [6] TAKRITI S, BIRGE J, LONG E. A stochastic model for the unit commitment problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(3): 1497-1508.
- [7] 吴玮坪, 胡泽春, 宋永华. 结合随机规划和序贯蒙特卡洛模拟的风电场储能优化配置方法 [J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1055-1062.
WU Weiping, HU Zechun, SONG Yonghua. Optimal sizing of energy storage system for wind farms combining stochastic programming and sequential Monte Carlo simulation [J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1055-1062.
- [8] WU Hongyu, SHAHIDEHPOUR 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.
- [9] YE Hongxing, LI Zuyi. Robust security-constrained unit commitment and dispatch with recourse cost requirement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3527-3536.
- [10] LORCA Á, SUN X, LITVINOV E, et al. Multistage adaptive robust optimization for the unit commitment problem [J]. Operations Research, 2016, 64: 6432-6451.
- [11] WANG Yang, XIA Qing, KANG Chongqing. Unit commitment with volatile node injections by using interval optimization [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1705-1713.
- [12] ZHAI Qiaozhu, LI Xuan, LEI Xuejiao, et al. Transmission constrained UC with wind power: an all-scenario-feasible MILP formulation with strong nonanticipativity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 1805-1817.
- [13] BERTSIMAS D, LITVINOV E, SUN A, et al. Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 52-63.
- [14] JIANG Ruiwei, WANG Jianhui, GUAN Yongpei. Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 800-810.
- [15] BEN-TAL A, EL GHAOU L, NEMIROVSKI A. Robust optimization [M]. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2009: 32-34.
- [16] DING Tao, HUANG Can, BO Rui, et al. Interval arithmetic based optimal curtailment for infeasible SCED considering wind power uncertainties [C]//Proceedings of the 2015 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE,

- 2015: 1-5.
- [17] DVORKIN Y, PANDZIC H, ORTEGA-VAZQUEZ M, et al. A hybrid stochastic/interval approach to transmission-constrained unit commitment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 621-631.
- [18] BIRGE J, LOUVEAUX F. Introduction to stochastic programming [M]. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media, 2011: 56-58.
- [19] 翟桥柱, 田建芳, 毛亚珊. 发电机组旋转备用宽度的概念、性质及应用: (一)概念和基本性质 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4808-4816.
- ZHAI Qiaozhu, TIAN Jianfang, MAO Yashan. Spinning reserve width of generator unit: concept, properties and applications: part I Concept and properties [J]. Proceedings of CSEE, 2016, 36(18): 4808-4816.
- [20] CARRION M, ARROYO J. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1371-1378.
- [21] ZIMMERMAN R, MURILLO-SÁNCHEZ C, THOMAS R. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 9-12.
- (编辑 武红江)