

促进风电消纳的VSC-MTDC互联系统鲁棒性安全约束机组组合

孙俊 艾欣

Robust Security-constrained Unit Commitment in VSC-MTDC Interconnected Systems for Promoting Wind Power Consumption

SUN Jun, AI Xin

引用本文:

孙俊, 艾欣. 促进风电消纳的VSC-MTDC互联系统鲁棒性安全约束机组组合[J]. 现代电力, 2025, 42(6): 1289–1298. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0287

SUN Jun, AI Xin. Robust Security-constrained Unit Commitment in VSC-MTDC Interconnected Systems for Promoting Wind Power Consumption[J]. Modern Electric Power, 2025, 42(6): 1289–1298. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0287

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0287>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[N-k重故障下计及频率安全约束的鲁棒优化机组组合](#)

Robust Optimized Unit Commitment Considering Frequency Security Constraints Under $N-k$ Contingencies

现代电力. 2023, 40(5): 641–650 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0086>

[基于集群机组组合的区域电力系统生产模拟仿真](#)

Regional Power System Production Simulation Based on Clustered Unit Commitment

现代电力. 2020, 37(5): 478–483 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0055>

[风电全消纳下虚拟电厂内部资源鲁棒调度策略](#)

Robust Scheduling Strategy of the Internal Resources in VPP Based on Wind Power Completely Consumed

现代电力. 2019, 36(3): 80–87 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I3/80>

[含惯量控制的高渗透率风电接入交直流混联输电系统的稳定性分析](#)

Stability Analysis of High Permeability Wind Power with Inertial Control Connected to AC-DC Hybrid Transmission System

现代电力. 2022, 39(4): 406–413 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0155>

[考虑源荷双重不确定性的电气互联综合能源系统分布鲁棒优化调度](#)

Robust Optimal Scheduling of Power-Gas Interconnected Integrated Energy System with Double Uncertainty of Source and Load

现代电力. 2019, 36(6): 52–60 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I6/52>

[计及风电相关性的主动配电网有功无功协调鲁棒优化调度策略](#)

A Robust Coordinated Active-reactive Power Optimal Operation Strategy for Active Distribution Network With Correlated Wind Power

现代电力. 2023, 40(6): 1013–1022 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0136>

促进风电消纳的 VSC-MTDC 互联系统鲁棒性 安全约束机组组合

孙俊, 艾欣

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Robust Security-constrained Unit Commitment in VSC-MTDC Interconnected Systems for Promoting Wind Power Consumption

SUN Jun, AI Xin

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Changping District, Beijing 102206, China)

摘要: 为减少温室气体的排放, 以风电为代表的清洁能源大规模接入电网。如何消纳高占比、波动剧烈的风电, 成为现代电力系统所面临的重要问题。在此背景下, 将多端柔性直流输电系统 (VSC based multi-terminal HVDC, VSC-MTDC) 对功率的灵活调节能力纳入安全约束机组组合 (security-constrained unit commitment, SCUC) 问题中进行调控。设计日前机组组合、短期实时调节和滚动重调节三段式配合的调度框架, 并基于列与约束生成算法 (column-and-constraint generation, C&CG) 设计三层迭代求解方法。通过该方法解决了传统二阶段鲁棒性机组组合偏于保守的弊端, 有效提高了风电消纳。为了充分利用 VSC 换流站能独立调节有功、无功的优势, 在 SCUC 结果的基础上进行无功电压优化, 并基于 Benders 分解算法进行求解, 有效降低了系统网损。最后, 将所提模型应用于改进 IEEE 30 节点系统算例, 验证模型的有效性和可行性。

关键词: 风电消纳; 安全约束机组组合; 交直流混联系统; 多端柔直输电系统; 鲁棒优化; C&CG 算法; Benders 分解

Abstract: To reduce greenhouse gas emissions, the integration of clean energy represented by wind power into the grid has been implemented on a large scale. Addressing the challenges associated with absorbing the high proportion and fluctuating wind power has become an crucial concern for modern power systems. In this context, the flexible adjustment capability of active and reactive power of voltage source converter (VSC) based multi-terminal high voltage direct current (VSC-MTDC) system is incorporated into the security-constrained unit commitment (SCUC). A three-stage scheduling framework, consisting of day-ahead unit commitment, short-term real-time adjustment and rescheduling, is designed. Meanwhile, a three-level iterative solution method is developed based on the column-and-constraint generation algorithm (C&CG). The

conservative nature of the traditional two-stage robust unit combination is addressed and wind power consumption is improved. Moreover, to take full advantage of the VSC converter station's ability to independently adjust active and reactive power, the reactive power-voltage is optimized based on the solution of SCUC and solved using the Benders decomposition algorithm, which effectively reduced the system network loss. Finally, an improved IEEE 30-node system is utilized as an example for model's feasibility and validity verification.

Keywords: wind power consumption; security-constrained unit commitment; AC/DC power system; voltage source converter based multi-terminal direct current (VSC-MTDC); robust optimization; C&CG algorithm; Benders decomposition

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0287

0 引言

安全性和经济性始终是电力系统运行的重要目标^[1]。为了实现“双碳”目标, 提高清洁能源的消纳成为现代电力系统运行要考虑的重要内容。安全约束机组组合 (security-constrained unit commitment, SCUC) 作为制定发电计划的核心环节, 是电力系统运行实现上述目标的重要技术支撑。考虑到基于电压源换流器 (voltage source convert, VSC) 的柔性直流技术发展成熟以及我国对直流系统加强建设, “强直强交”的互联系统将成为我国未来电网架构的基本形态^[2]。因此, 对于“双高”电力系统, 有必要构建考虑直流输电系统调节作用的交直流一体化 SCUC 模型, 从

而充分利用直流系统对网络潮流的广域、灵活的调节能力,以应对大规模新能源的波动,提高清洁能源的消纳。

目前,已有文献对交直流混联系统的 SCUC 问题进行研究。文献 [3-4] 将直流系统等效成恒定的功率注入,但该模型忽略了直流系统对交流系统潮流的影响。文献 [5-6] 分别对电流源换流器 (current source convert, CSC) 和电压源换流器建模,构建了计及换流器可调参量调节的确定性机组组合模型。文献 [7] 提出了交直流混联系统受端电网考虑直流闭锁故障的机组组合模型。文献 [8] 将直流线路等效为虚拟电机 (virtual motor, VM), 将直流线路出节点和入节点分别等值为虚拟发电机,以此模拟基于电压源换流器的高压直流输电系统 (VSC based high voltage direct current, VSC-HVDC) 对功率的灵活控制。

随着大量随机、间歇性清洁能源接入电网,专家学者们开始研究交直流混联系统的不确定性机组组合问题。不确定性机组组合主要有两种建模方法:一种是随机优化;另一种是鲁棒优化。与常见的随机优化方法如多场景法、机会约束法和条件风险价值理论等相比,两阶段鲁棒优化方法 [9-13] 具有不依赖于随机因素详细概率分布、随机变量区间易于获取 (通常取随机变量的历史数据的某分位数)、收敛性好等优点,在不确定性机组组合中得到了广泛应用。文献 [14] 建立了交直流电网的鲁棒性机组组合模型,并对系统中火电机组的热备用容量进行优化配置,提高了系统应对系统新能源波动的“非预期性”,但直流系统在模型中只作为潮流安全约束存在,并没有利用直流系统的主动调节能力。文献 [15] 考虑了换流站对有功功率的调节作用和直流输电线路的过载能力,仿真验证了高压直流输电系统灵活的调节作用有利于系统更好地应对风电的波动,维持系统的功率平衡。文献 [16-17] 对 VSC 在调度业务上的调节能力进行数学建模,并通过目标级联法 (analytical target cascade, ATC) 实现了计及 VSC 调节能力的交直流系统鲁棒性机组组合的分布计算,提高了计算效率的同时,保障了各级调度单位数据的私密性。

综上,虽然目前国内外对交直流混联系统 SCUC 问题已有部分研究成果,但大多以系统在正常或故障运行状态下的安全性和经济性为优化

目标,鲜见文献研究如何利用直流系统的快速调节能力提升新能源的消纳。为此,本文在已有研究成果的基础上,提出一种计及多端柔性直流输电系统 (VSC based multi-terminal HVDC, VSC-MTDC) 调节作用的新型鲁棒性安全约束机组组合模型。按照不确定性陆续揭示的逻辑,基于“多级协调、逐级细化”的调度原则,提出日前机组组合、短期实时调节和滚动重调节三段式紧凑配合的调度框架。日前机组组合阶段执行确定性机组组合;短期实时调节在风电出力波动的情况下,以消纳风电为目标,得出火电机组和 VSC-MTDC 的实时调节指令,随后在风电出力平稳后,以机组运行成本最小为目标进行滚动重调节,追求进一步的经济性。通过 3 个阶段的配合以及 VSC-MTDC 系统对网络潮流的调整,有效改善传统二阶段鲁棒性机组组合模型偏向保守的弊端,做出兼顾系统安全性、运行经济性和风电消纳三方面的最优解,并基于列与约束生成法 (column-and-constraint generation, C&CG) 设计三层迭代求解算法。此外,为了充分利用 VSC 换流站能对有功和无功功率独立调节的优点,在机组组合结果的基础上进行无功-电压优化,利用 VSC 对无功功率的调节,改善了系统的无功分布,提升系统电压质量,有效降低了系统的网损。对复杂的非线性无功优化问题采用 Benders 分解算法进行迭代求解。最后,在改进 IEEE 30 节点系统上执行所提模型,从运行经济性和风电消纳情况两方面证明所提模型的可行性与有效性。

1 三段式配合的调度模式

1.1 关于风电出力的假设

虽然目前对风电出力的预测方法都存在一定误差,但仍有重要的参考价值。若假设当日任何时刻风电的实际出力都远远偏离风电出力预测值,会导致所做决策偏于保守。

为此,本文对风电出力的模式做出如下假设:将一日分成 24 个时段,每个时段分为 3 个部分。第一部分:假设风电在各时段初始的短时间内按照预测值出力 (或偏差不大);第二部分:风电出力偏离预测值随机波动;第三部分:风电出力趋于平稳。这种假设既充分考虑了风电次日剧烈的波动,又不至于过度忽视风电预测的参考价值。基于上述假设,提出三阶段协调的调度框架。

1.2 调度模式详述

传统调度方式主要采用日前机组组合结合自动发电控制 (automatic generation control, AGC), 但这一调度模式已不适用于风电并网^[18]。为了适应新能源的波动, 本文按照风电不确定性陆续揭示的逻辑, 提出包含日前机组组合、短期实时调节、滚动重调节 3 个阶段的多级协调、逐级细化的调度模式。

图 1 为三阶段交直流一体化机组组合模型框架图。首先, 日前机组组合阶段按照风电预测出力执行确定性机组组合, 同时制定 VSC-MTDC 系统的预调指令; 当风电出力波动时, 通过多端柔直系统协调缓冲机组, 在上一阶段决策的基础上, 以短期调节成本和弃风成本最小为目标进行短期实时调节, 并得到极端场景下的弃风决策; 当风电出力平稳后, 根据上一阶段实际消纳的风电, 按照目前开启的机组运行成本最小为目标, 将负荷在机组间重新进行经济分配, 以追求进一步的经济性。为确保所有极端场景下短期实时调节都可以保障系统的安全运行, 一、二阶段要构成鲁棒优化问题。

图 2 为某机组实际出力示意图。其中蓝色、

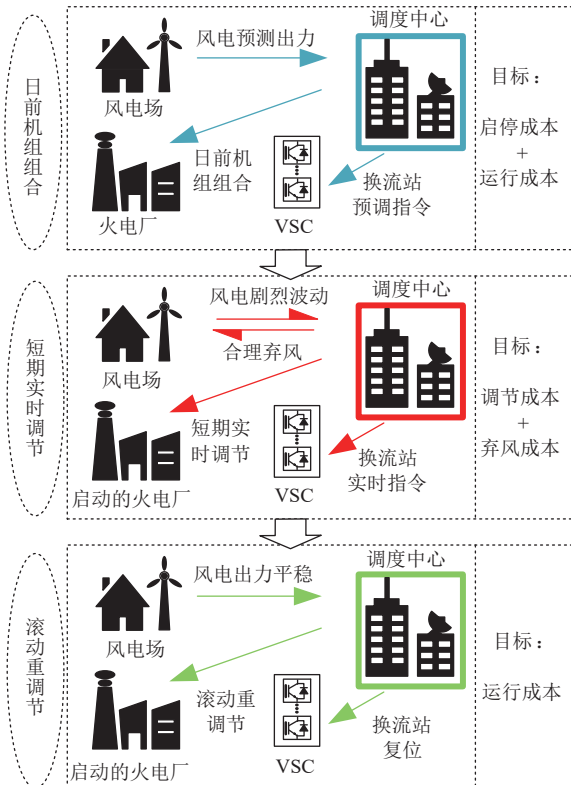


图 1 三段式交直流一体调度框架

Fig. 1 Three-stage AC-DC integrated dispatching framework

红色、绿色折线分别代表火电机组 3 个阶段的出力计划, 橙色虚线包络的是火电机组实际出力轨迹。

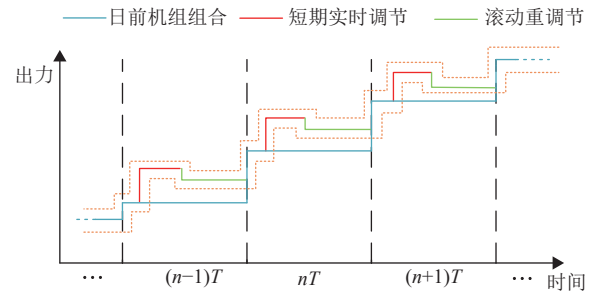


图 2 机组实际出力示意图

Fig. 2 Actual output of the units

2 数学模型

2.1 日前机组组合

本阶段为以风电出力为预测值的确定性机组组合问题。设日内共有 $T=24$ 个时段, 火电机组数目为 N , 则日前机组组合的目标函数为

$$\min \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N F_i y_{i,t} + \Phi_{i,t} + S_i u_{i,t} + W_i v_{i,t} \right) \quad (1)$$

式中: $\Phi_{i,t}$ 为 i 机组在 t 时段的运行成本, $\Phi_{i,t} \geq f_i^k(P_{i,t}^{UC})$, $k=1, \dots, K$; f_i^k 为机组 i 的发电成本曲线经 K 段线性化的第 k 段线性函数; S_i 、 W_i 、 F_i 分别为 i 机组的启动、关停和固定成本。

交流、直流系统的有功平衡约束如式 (2)、(3) 所示。

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t}^{UC} + \sum_{w=1}^{N_W} P_{w,t}^{Wpre} = \sum_{m=1}^{N_A} D_{m,t} \quad (2)$$

$$P_{vsc(N_D,t)}^{ref} + \sum_{a=1}^{N_D-1} P_{vsc(a,t)}^{ref} = 0 \quad (3)$$

式中: $P_{i,t}^{UC}$ 为本阶段机组的出力; $P_{w,t}^{Wpre}$ 为风电场 w 在 t 时段的预测出力; $D_{m,t}$ 为交流节点 m 处 t 时刻的负荷; $P_{vsc(a,t)}^{ref}$ 为换流站 a 在 t 时段的有功预调指令 (设注入直流电网为正); N_A 、 N_D 分别为交、直流节点数; N_W 为风电场数。本文约定换流站编号和其对应的直流节点编号相同, 且交流或直流系统都以编号最大的节点为平衡节点。

式 (4)~(8) 分别为机组启停标志的定义、最短启停时间约束、机组出力上下限约束、机组爬坡约束以及系统热备用约束。

$$\begin{cases} u_{i,t} \geq y_{i,t} - y_{i,t-1} \\ v_{i,t} \geq y_{i,t-1} - y_{i,t} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} y_{i,t} - y_{i,t-1} - y_{i,k} \leq 0 \\ -y_{i,t} + y_{i,t-1} + y_{i,h} \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$k \in [t+1, \min(t_{Gi} + t - 1, T)]$$

$$h \in [t+1, \min(t_{Hi} + t - 1, T)]$$

$$y_{i,t} P_{Li} \leq P_{i,t}^{UC} \leq y_{i,t} P_{Ui} \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_{i,t}^{UC} - P_{i,t-1}^{UC} \leq (2 - y_{i,t-1} - y_{i,t}) r_i^{u0} + (1 + y_{i,t-1} - y_{i,t}) r_i^u \\ P_{i,t-1}^{UC} - P_{i,t}^{UC} \leq (2 - y_{i,t-1} - y_{i,t}) r_i^{d0} + (1 - y_{i,t-1} + y_{i,t}) r_i^d \end{cases} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N y_{i,t} U_i - P_{i,t}^{UC} \geq R_0 \sum_{m=1}^{N_A} D_{m,t} \quad (8)$$

式中: $y_{i,t}$ 、 $u_{i,t}$ 和 $v_{i,t}$ 分别表示机组启停状态、启动和关停的 0-1 变量; t_{Gi} 、 t_{Hi} 分别表示机组最短启停时间; P_{Ui} 、 P_{Li} 分别表示机组出力的上下限; r_i^{u0} 、 r_i^{d0} 、 r_i^u 和 r_i^d 表示机组(初始)爬坡/滑坡约束; R_0 表示系统运行要求的热备用容量。

式(9)为交流线路潮流约束。式(10)为 VSC-MTDC 系统的线路潮流约束, 参见文献[19]所提出的 VSC-MTDC 系统的静态线性化模型。

$$\begin{cases} -P_l^{\lim} \leq \sum_{m=1}^{N_A-1} G_s(l, m) P_{m,t}^{\text{inj}} \leq P_l^{\lim} \\ P_{m,t}^{\text{inj}} = \sum_{i \in m} (P_{i,t}^{UC} - P_{\text{vsc}(i,t)}^{\text{ref}} + P_{i,t}^{\text{wpre}} - D_{i,t}) \end{cases} \quad (9)$$

$$-P_{\text{dc},b}^{\lim} \leq \sum_{a=1}^{N_D-1} G_s^{\text{dc}}(b, a) P_{\text{vsc}(a,t)}^{\text{ref}} \leq P_{\text{dc},b}^{\lim} \quad (10)$$

式中: G_s 为机组输出功率转移因子矩阵; $P_{m,t}^{\text{inj}}$ 为注入交流节点 m 的净功率; $P_l^{\lim}$ 、 $P_{\text{dc}}^{\lim}$ 分别为交流和直流线路的传输功率约束; G_s^{dc} 为直流电网的节点注入功率转移矩阵。

式(11)—(17)为 VSC 换流站在调度过程中的数学模型[16-17]。

$$P_a^{\text{VSC}} \leq P_{\text{vsc}(a,t)}^{\text{ref}} \leq \bar{P}_a^{\text{VSC}} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \bar{v}_{a,t} + \underline{v}_{a,t} = v_{a,t} \\ \bar{v}_{a,t} + \underline{v}_{a,t} \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \kappa_{a,t}^- + \sum_{\tau=t+1}^{\min(T, t+N_{\text{hold}})} \kappa_{a,\tau}^+ \leq 1 \\ \kappa_{a,t}^+ \geq v_{a,t+1} - v_{a,t} \\ \kappa_{a,t}^- \geq v_{a,t} - v_{a,t+1} \\ \kappa_{a,t}^+ + \kappa_{a,t}^- \leq 1 \\ \kappa_{a,t}^+ + \kappa_{a,t+1}^+ \leq 1 \\ \kappa_{a,t}^- + \kappa_{a,t+1}^- \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_{\text{vsc}(a,t)}^{\text{ref}} - P_{\text{vsc}(a,t-1)}^{\text{ref}} \leq M \bar{v}_{a,t} \\ P_{\text{vsc}(a,t-1)}^{\text{ref}} - P_{\text{vsc}(a,t)}^{\text{ref}} \leq M \underline{v}_{a,t} \end{cases} \quad (14)$$

$$-r_a^{\text{d vsc}} \leq P_{\text{vsc}(a,t)}^{\text{ref}} - P_{\text{vsc}(a,t-1)}^{\text{ref}} \leq r_a^{\text{u vsc}} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \bar{v}_{a,t} + \bar{v}_{a,t-1} \leq 1 \\ \underline{v}_{a,t} + \underline{v}_{a,t-1} \leq 1 \\ \bar{v}_{a,t} + \underline{v}_{a,t-1} \leq 1 \\ \underline{v}_{a,t} + \bar{v}_{a,t-1} \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

$$\sum_{t=1}^T v_{a,t} \leq S_a \quad (17)$$

式中: $\bar{P}_a^{\text{VSC}}$ 、 P_a^{VSC} 分别为换流站允许流过功率的上、下限; $v_{a,t}$ 、 $\bar{v}_{a,t}$ 和 $\underline{v}_{a,t}$ 为表示换流器是否动作及其调节方向的 0-1 变量; M 为足够大的常数。

为了保护换流站, 要求参与调控的换流站每次动作后至少维持当前指令一段时间, 设 N_{hold} 为换流站动作后最少持续小时数; $\kappa_{a,t}^+$ 与 $\kappa_{a,t}^-$ 为引入的 0-1 辅助变量; $r_a^{\text{u vsc}}$ 、 $r_a^{\text{d vsc}}$ 分别为相邻时段换流站有功调空指令的变化量上、下限; S_a 代表一个调度周期内换流站动作次数上限。VSC-MTDC 系统中采用定功率控制的换流站参与调控, 而采用定电压控制的换流站不参与调控, 起到平衡节点的作用。

式(11)—(17)依次为流过换流站功率上下限约束、调节方向与动作状态的定义、动作后最少维持时间约束、功率调整方向的定义、最大调节量约束、换流站调控连续性约束, 以及调度周期内最大调节次数约束, 除平衡节点外的所有直流节点均需满足上述约束。

2.2 短期实时调节与滚动重调节

由于系统的备用容量和机组的爬坡能力有限, 在风电渗透率较高、波动性较大的情况下, 通过实时调控机组来消纳全部风电并不现实, 而且会产生较高的调节成本。在这种情况下, 适度地弃风是合理的选择。文献[20]讨论了风电的可调度性; 文献[21]将不确定的风能作为灵活性资源, 假设从 0 到最大可用风能均可控, 使其全方位参与调度, 显著提高了电力市场的灵活性。类似地, 本文认为风电场可以在 0 到该风电场最大可发风电功率范围内灵活地控制调控。在此基础上, 本阶段以系统面对风电出力剧烈波动时弃风成本和火电机组调节成本最小为目标函数进行短期实时调节。

2.2.1 风电不确定集

风电出力随机变量 $\bar{P}_w$ 在设置的区间内任意波动, 受该时段气候条件等因素影响, 同时也是风

电机组 w 在 t 时段的最大可用发电功率。在鲁棒优化问题中，最坏的场景必定在不确定集的顶点上，因此引入 0-1 变量 $g_{w,t}$ 表示随机变量的取值， $P_{w,t}^{\text{ub}}$ 和 $P_{w,t}^{\text{lb}}$ 分别代表 w 风电场在 t 时段出力的上、下界。风电不确定集 W 可以表示为

$$W: \left\{ \begin{array}{l} \tilde{P}_w(t) = P_{w,t}^{\text{lb}} + (P_{w,t}^{\text{ub}} - P_{w,t}^{\text{lb}})g_{w,t}, \\ \chi_k \leq \sum_{t=1}^{T_k} g_{w,t} \leq \bar{\chi}_k, k \in \{1, \dots, K\}, \\ g_{w,t} \in [0, 1] \end{array} \right\} \quad (18)$$

为了避免不确定集过于保守，将总时段 T 分成 K 个部分，限制每部分时间内风电出力达到上、下界次数最多为 $\bar{\chi}_k$ 和 χ_k 。

2.2.2 短期实时调节数学模型

设 SCUC 计划中机组的出力为 $\hat{P}_{i,t}^{\text{UC}}$ ，机组的启停状态为 $\hat{y}_{i,t}$ ，换流站预调指令为 $\hat{P}_{\text{vsc}(a,t)}^{\text{ref}}$ 。本阶段机组的出力为 $P_{i,t}^{\text{sh}}$ ，换流站实时调节直流为 $P_{\text{vsc}(a,t)}^{\text{sh}}$ ，实际消纳风电功率为 $P_{w,t}^{\text{wind}}$ ，弃风功率为 $P_{w,t}^{\text{curt}}$ ，本阶段火电机组的调节量为 $P_{i,t}^{\text{adj}}$ ，机组 i 的单位功率调节成本为 J_i ， t 时段的弃风惩罚系数为 K_t ， C_1 、 C_2 分别为火电机组调节成本和弃风成本的权重系数。本阶段目标函数为

$$\max_{\tilde{P}_w \in W} \min \sum_{t=1}^T \left(C_1 \sum_{i=1}^N J_i P_{i,t}^{\text{adj}} + C_2 \sum_{w=1}^{N_w} K_t P_{w,t}^{\text{curt}} \right) \quad (19)$$

外层最大化问题的决策变量为 $\tilde{P}_w$ ，内层最小化问题的决策变量为实际消纳风电功率、短期调节期间火电机组调节量以及各 VSC 换流站的实时调控指令。本阶段问题的约束调节如下：

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{sh}} + \sum_{w=1}^{N_w} P_{w,t}^{\text{wind}} = \sum_{m=1}^{N_A} D_{m,t} \quad (20)$$

$$P_{\text{vsc}(N_D,t)}^{\text{sh}} + \sum_{a=1}^{N_D-1} P_{\text{vsc}(a,t)}^{\text{sh}} = 0 \quad (21)$$

$$\hat{y}_{i,t} P_{L,i} \leq P_{i,t}^{\text{sh}} \leq \hat{y}_{i,t} P_{U,i} \quad (22)$$

$$\hat{P}_{i,t}^{\text{UC}} - r_i^d \leq P_{i,t}^{\text{sh}} \leq \hat{P}_{i,t}^{\text{UC}} + r_i^u \quad (23)$$

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{adj}} \geq P_{i,t}^{\text{sh}} - P_{i,t}^{\text{UC}} \\ P_{i,t}^{\text{adj}} \geq P_{i,t}^{\text{UC}} - P_{i,t}^{\text{sh}} \end{cases} \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^N \hat{y}_{i,t} U_i - P_{i,t}^{\text{sh}} \geq R_0 \sum_{m=1}^{N_A} D_{m,t} \quad (25)$$

$$-P_l^{\text{lim}} \leq \sum_{m=1}^{N_A-1} G_s(l, m) P_{m,t}^{\text{inj}} \leq P_l^{\text{lim}} \quad (26)$$

$$-P_{\text{dc},b}^{\text{lim}} \leq \sum_{a=1}^{N_D-1} G_s^{\text{dc}}(b, a) P_{\text{vsc}(a,t)}^{\text{sh}} \leq P_{\text{dc},b}^{\text{lim}} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \max(P_a^{\text{VSC}}, \hat{P}_{\text{vsc}(a,t)}^{\text{ref}} - r_a^{\text{d VSC}}) &\leq P_{\text{vsc}(a,t)}^{\text{sh}} \leq \\ \min(\bar{P}_a^{\text{VSC}}, \hat{P}_{\text{vsc}(a,t)}^{\text{ref}} + r_a^{\text{u VSC}}) &\end{aligned} \quad (28)$$

$$P_{w,t}^{\text{curt}} \geq \tilde{P}_{w,t} - P_{w,t}^{\text{wind}} \geq 0, P_{w,t}^{\text{wind}} \geq 0 \quad (29)$$

上述约束分别为交直流系统的功率平衡约束、机组实时调节功率上下限、机组调节量的定义、系统热备用约束、交直流系统潮流约束、换流器调节量约束以及弃风量定义。

2.2.3 滚动重调节

短期实时调节期间，机组的出力调整是根据各自的爬坡能力、热备用容量以及在电网中所处的位置而定的，在该阶段为了尽量消纳新能源，难免出现功率在机组间分配不合理，导致某些机组在不经济的状态下运行的情况。若继续以此状态运行，会造成不必要的经济损失。因此，在短期实时调节阶段之后增设了滚动重调节环节，基于上一阶段实际消纳的风电功率，对系统的负荷进行重新经济分配。

本阶段问题的优化目标为已启动机组的运行成本，约束条件包括系统功率平衡约束、机组和换流站调节上下限、热备用约束以及交直流系统潮流约束。目标函数与约束条件与前两阶段类似，此处不再赘述。

2.3 无功-电压优化

求解鲁棒性 SCUC 问题，直到收敛后，即可确定各时段机组的启停状态和实际出力情况。在此基础上，进行无功-电压优化。VSC 换流站可对有功、无功功率进行独立的调控，又考虑到高压输电线路电抗远大于电阻，系统的无功分布与节点电压幅值有强耦合关系，而与线路两端电压相角差关系不大，因此对系统的有功和无功功率进行解耦，单独进行系统的无功电压优化。目标函数与约束条件如下所示：

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^B \Delta P_t^l \quad (30)$$

$$\begin{cases} \Delta P_t^l = P_{l,t}^{\text{loss}} \\ P_{l,t}^{\text{loss}} = \Delta U_{l,t}^2 R / (R^2 + X^2) \\ Q_i^{\min} \leq Q_i' \leq Q_i^{\max} \\ U_i^{\min} \leq U_{i,t} \leq U_i^{\max} \\ Q_i' = U_{i,t} \sum_{j=1}^{N_A} -B_{ij} U_{j,t} \end{cases} \quad (31)$$

式中 ΔP_i^l 为各条线路的网损,服从网损平衡约束、机组和换流站的无功容量限制、节点电压幅值约束以及解耦后的非线性潮流方程。

3 求解方法

3.1 鲁棒性 SCUC 求解

求解二阶段鲁棒优化问题的算法主要有奔德斯分解法^[22]和列与约束生成算法^[23]。本文采取收敛性更好的后者。由日前机组组合与短期实时调节构成的二阶段鲁棒问题可写成式(32),服从约束式(2)—(17)和(20)—(29)。

$$\begin{aligned} \min \{ & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (\Phi_{i,t} + S_i u_{i,t} + W_i v_{i,t} + F_i y_{i,t}) + \\ & \max_{P_w \in W} \min \sum_{t=1}^T (C_1 \sum_{i=1}^N J_i P_{i,t}^{\text{adj}} + C_2 \sum_{w=1}^{N_w} K_t P_{w,t}^{\text{curt}}) \} \end{aligned} \quad (32)$$

C&CG方法流程如图3所示。迭代初期,日前机组组合阶段没有充分考虑日内风电的波动,以至短期实时调节无解。此时,将问题松弛,构造可行性对偶子问题(feasibility dual subproblem, FDSP),以功率不平衡量为目标函数(objFDSP)。随着迭代的进行,短期实时调节问题有可行解(以功率不平衡量降至0为标志),此时通过最优性对偶子问题(optimal dual subproblem, ODSP),以调节成本和运行成本为目标函数,可得出最优解的

上界,直到ODSP得到的上界 B^u 与主问题求解出的下界 B^l 相等时,鲁棒优化问题收敛。此后,滚动重调节问题与主问题构成二阶段决策问题,前者的求解结果可以更新当前的上界 B^{u2} ,从而改善短期实时调节的调节量和弃风决策,避免短期实时调节过度,偏离机组经济运行点。

3.2 无功-电压优化求解

从潮流计算的角度,将决策变量划分成控制变量和状态变量,并基于Benders分解的思想将控制变量留在主问题中,将状态变量放在子问题中进行安全校核。

主问题:选取经济性最好的机组为平衡机组,控制其节点电压始终为额定电压,以网损最小为目标优化其余机组的无功出力。

子问题:根据主问题给出的决策进行潮流计算,得到网络状态变量,校验节点电压、平衡机组无功功率以及网损平衡是否越限。根据潮流计算结果以及非线性的潮流方程的雅可比矩阵,构造Benders割回补给主问题,直到主问题所做的决策使子问题的网络安全越限量降为0。此方法将高维的非线性优化问题分解成两部分以降低维度,并用多次求解线性规划代替非线性规划的求解,提高了计算速度。

4 算例

4.1 算例设置

算例在IEEE 30节点标准系统上进行修改,具体如图4所示。在原有交流系统上增加了一个三端环网VSC-MTDC(连接于1、15、30号交流节点)和一个三端链式VSC-MTDC(连接于2、6、22号交流节点),分别对应1—6号直流节点。选定直流节点1和6为直流系统的平衡节点,对应的换流器采取定直流电压控制,其余的换流器采取定有功功率控制,可参与调控。风电场并网点设置在交流节点6和15处,记为W1、W2,装机容量分别为100 MW和150 MW。算例的基准容量为100 MVA。

图5给出系统的负荷预测曲线和两个风电场预测出力之和的曲线,并给出预先设置的风电波动上下限。算例在高比例风电接入且风电波动剧烈的场景下,从系统运行经济性和风电消纳效果两方面证明所提模型的有效性和可行性。仿真采

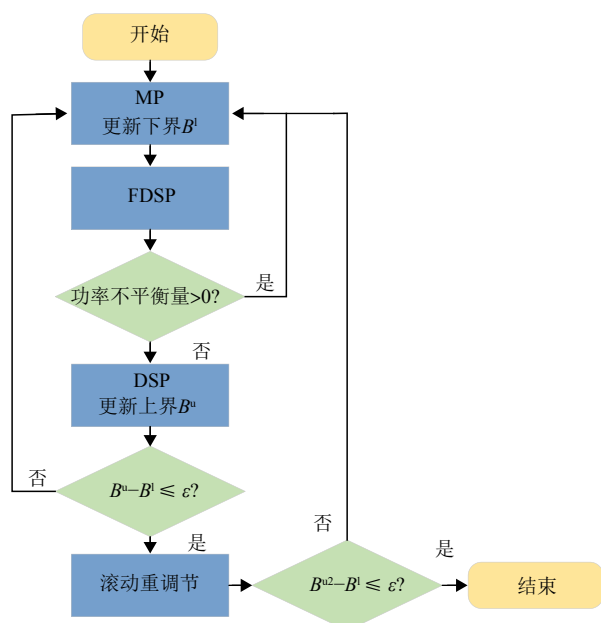


图3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flowchart

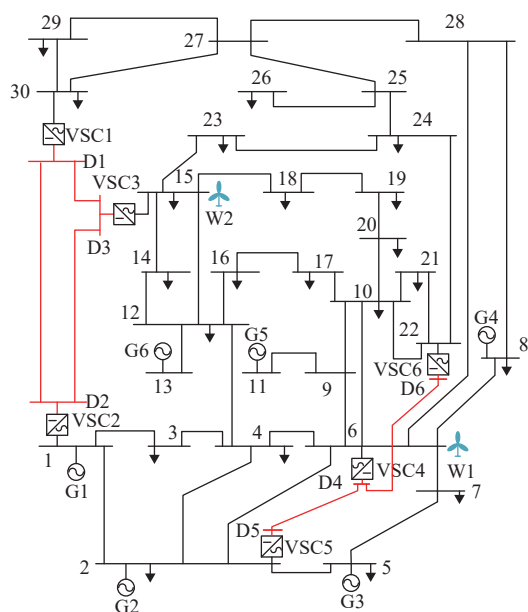


图 4 改进 IEEE30 节点系统拓扑图

Fig. 4 Topology of improved IEEE 30-bus system

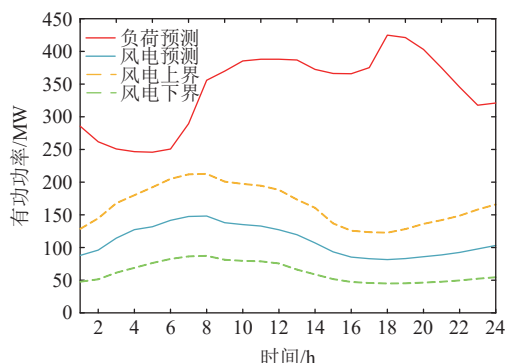


图 5 总负荷预测曲线和风电日前预测曲线

Fig. 5 Day-ahead forecast wind power and total load forecast curves

用 Matlab2021a 调用 gurobi10.0.1 求解。

4.2 运行经济性

将第二阶段优化的权重系数均设为 0.5。为了展示多端柔直系统的调节作用，将算例中 5 条直流线路替换为容量相同、阻抗适中的交流线路作为对照组，与本算例 (实验组) 的结果进行对比。两者的日前机组组合结果如图 6、7 所示。

实验组和对照组的总运行成本分别为 158.210 9 万元和 186.167 1 万元。对比观察图 6 和图 7 可见，没有多端柔性直流系统调节作用的对照组系统机组出力有较大幅度的波动，机组启停频繁，并且开启了经济性不好的 5 号机组。下文对其原因展开具体分析。

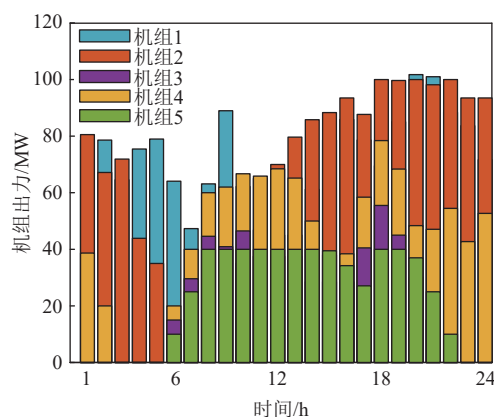


图 6 机组出力情况 (无 VSC-MTDC 调节)

Fig. 6 Unit output without VSC-MTDC regulation

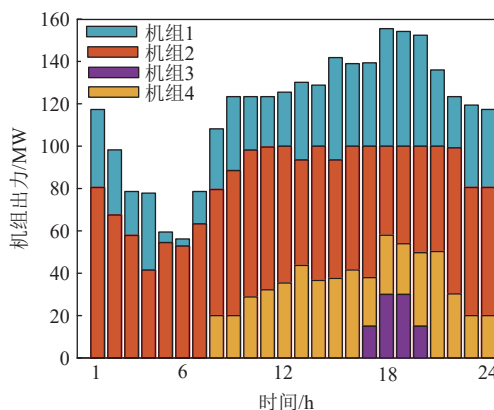


图 7 机组出力情况 (有 VSC-MTDC 调节)

Fig. 7 Unit output with VSC-MTDC regulation

日前机组组合要保证在所决策的基础上进行短期实时调节，可以应对次日风电的波动。在最坏的场景下，风电集中注入系统会造成网络局部堵塞，导致某些机组在较大运行成本的工作点处运行，甚至被迫停机。例如，图 6 中的 2 号机组在负荷低谷、风电出力处于高峰的第 6 个时段关停，受最短关停时间和启动成本的影响，直到第 10 个时段负荷再次达到高峰时重启。图 8 给出 VSC-MTDC 系统的日内有功调控指令，从图 8 可见在第 6 个时段 2、3、5 号换流站同时动作，主动将 2 号发电机母线处冗余的功率抽出送往负荷集中处，有效缓解了网络堵塞，避免了不必要的机组启停。

此外，经滚动重调节后，实验组的运行成本从 158.210 9 万元进一步降低至 147.091 9 万元。

4.3 风电消纳效果

为证实 VSC-MTDC 系统应对风电波动的优势，设当前算例中风电的波动程度为 $Z\%$ ，在此

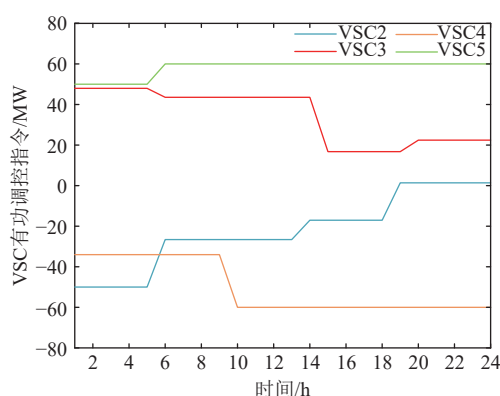


图8 VSC换流站有功调控指令

Fig. 8 VSC station power instruction

基础上逐渐改变风电的波动程度,得到对照组和实验组弃风电量随风电波动程度的变化曲线,如图9所示。当风电波动程度为0时(确定性机组组合),二者都不弃风。随着风电波动逐渐剧烈,纯交流系统率先开始弃风,当波动程度达到(Z-4)%时,交直流系统开始弃风。实验组的弃风电量始终远小于纯交流系统,且随风电波动的增长速度也小于纯交流系统。可见VSC-MTDC系统灵活、广域的调节作用可以有效应对风电的波动,在风电占比高、波动剧烈的场合优势更加明显。

图10、11为对照组和实验组中的两个风电场在最坏场景下的风电消纳情况。

对比图10、11可见,具有VSC-MTDC调节作用的系统风电消纳效果远好于纯交流系统,两者在最坏场景下的总弃风电量分别为63.6215 MW·h和505.3173 MW·h。对照组中,风电场W2与火电机组的电气距离较远,通过火电机组的调节来消纳W2的功率很大程度上受网络安全约束的限制,因此W2弃风现象严重。相比之下,

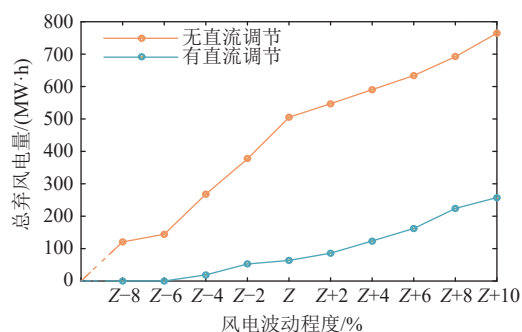
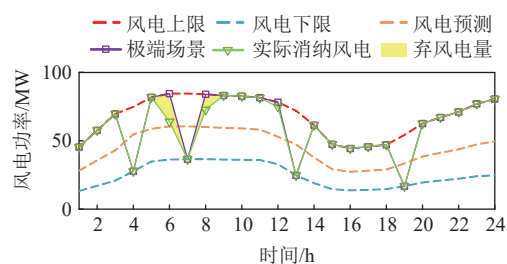
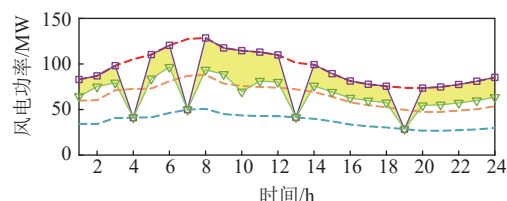


图9 弃风电量-风电波动变化曲线

Fig. 9 Curve of wind power curtailment variation with or without VSC-MTDC regulation



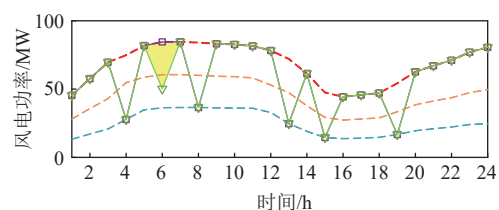
(a) 交流系统中风电场W1弃风情况



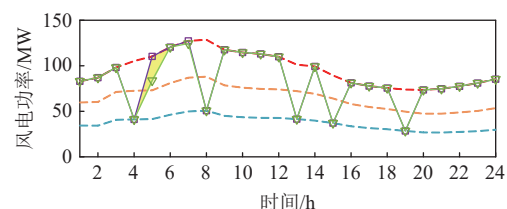
(b) 交流系统中风电场W2弃风情况

图10 两风电场实际弃风情况(无VSC-MTDC调节)

Fig. 10 Actual wind curtailment of the two wind farms (without VSC-MTDC regulation)



(a) 交直流系统中风电场W1弃风情况



(b) 交直流系统中风电场W2弃风情况

图11 两风电场实际弃风情况(有VSC-MTDC调节)

Fig. 11 Actual wind curtailment of the two wind farms (with VSC-MTDC regulation)

对照组通过柔性直流系统的调节改善了网络潮流分布,削减网络安全约束对机组的限制,提高了风电的消纳。

4.4 无功优化结果

图12为对照组和实验组在第18时段的节点电压,设置节点电压约束上下限分别为1.05、0.95 pu。由图12可见,通过直流系统适当调节无功功率分布,可以使系统电压更接近额定电压,进而提高电压质量。

表1和表2分别是实验组机组和换流站的无功调控指令,通过VSC-MTDC系统对无功功率

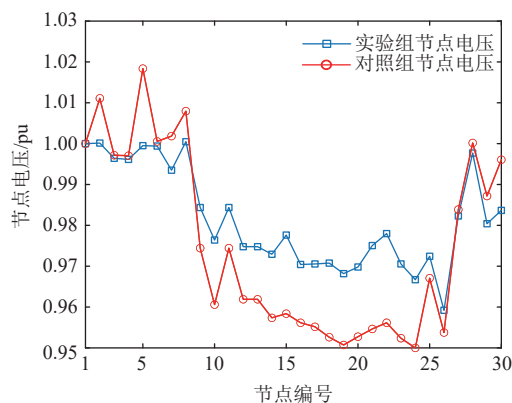


图 12 无功优化后系统的节点电压

Fig. 12 System node voltage after reactive power optimization

表 1 机组无功出力情况

Table 1 Unit reactive power output

机组号	1	2	3	4
无功功率/Mvar	1.60	28.03	23.49	33.8

表 2 换流站无功调控指令

Table 2 VSC reactive power control instructions

VSC号	1	2	3	4	5	6
无功功率/Mvar	2.46	11.31	1.052	25.00	-12.50	14.93

的调节，在该时段实验组和对照组的网损分别为 0.189 7 MW 和 0.480 7 MW。

5 结论

为了促进电力系统消纳高占比、波动剧烈的风能，本文将具有对功率灵活调节能力的多端柔性直流输电系统纳入 SCUC 问题中调控，设计一种包括日前机组组合、短期实时调节和滚动重调节三段式配合的调度架构，建立由日前机组组合与短期实时调节构成的多阶段鲁棒优化模型，并提出一种基于列与约束生成法的模型求解方法。最后，得到兼顾经济性和鲁棒性的日前机组组合策略，解决了传统二阶段鲁棒 SCUC 过于保守的弊端并有效提高了风电的消纳效果。考虑到高压输电系统的特点，对系统有功、无功功率进行解耦，并计及 VSC 独立调节无功功率的能力，基于 Benders 分解算法进行系统的无功-电压优化，降低了系统的网损。通过仿真分析得到结论：

1) 本文所提模型相较传统鲁棒性 SCUC 可为调度人员提供更丰富的调度参考信息，以备对次日可能出现的风电出力情况进行灵活调整。三

阶段调度更加紧凑的配合，可以利用缓冲机组的实时调节能力。计及日内实时调节，可以拓宽日前机组组合问题的可行域，得到更加经济的机组组合策略。

2) 通过实验组与对照组的对比，证实了 VSC-MTDC 系统对有功功率和无功功率的独立、灵活调节作用有利于改善网络中潮流分布，从而能降低网络安全约束对机组组合经济性的制约和改善网络无功分布，进而减少系统网损。

3) 利用 VSC-MTDC 系统的快速灵活调节能力可以有效提高风电消纳的效果。从算例分析可知，相比纯交流系统，多端柔性直流输电系统的调节作用在风电波动越剧烈的场合优势越明显。

安全约束机组组合需要有抵御小概率故障风险的能力，未来将进一步研究如何将系统 $N-1$ 乃至 $N-k$ 故障下的频率稳定约束整合到本文所提的三段式调度框架中。

参考文献

- [1] 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 the CSEE, 2013, 33(16): 94-103(in Chinese).
- [2] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17(in Chinese).
- [3] SARKAR V, KHAPARDE S A. Implementation of LMP-FTR mechanism in an AC-DC system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 737-746.
- [4] LI Zuyi, SHAHIDEHPOUR M. Security-constrained unit commitment for simultaneous clearing of energy and ancillary services markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 1079-1088.
- [5] LOTFJOU A, SHAHIDEHPOUR M, FU Yong, et al. Security-constrained unit commitment with AC/DC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 531-542.
- [6] LOTFJOU A, SHAHIDEHPOUR M, FU Yong. Hourly scheduling of dc transmission lines in SCUC with voltage source converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 650-660.

- [7] 张宇宇, 周前, 唐竞驰, 等. 适用于交直流混联受端电网的机组组合模型及算法 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(11): 77–84.
ZHANG Ningyu, ZHOU Qian, TANG Jingchi, *et al.* Unit commitment model and algorithm for receiving-end power grid in hybrid AC/DC system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(11): 77–84(in Chinese).
- [8] 刘聪, 周京阳, Mohammad SHAHIDEHPOUR, 等. 交直流混联系统一体化日前现货市场优化出清方法 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(11): 94–101.
LIU Cong, ZHOU Jingyang, SHAHIDEHPOUR M, *et al.* Integrated optimal clearing method of day-ahead spot market for hybrid AC/DC power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(11): 94–101(in Chinese).
- [9] HE Chuan, LIU Tianqi, WU Lei, *et al.* Robust coordination of interdependent electricity and natural gas systems in day-ahead scheduling for facilitating volatile renewable generations via power-to-gas technology[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2017, 5(3): 375–388.
- [10] 郭尊, 李庚银, 周明, 等. 面向风电消纳的电-气联合系统分散协调鲁棒优化调度模型 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(20): 6442–6455.
GUO Zun, LI Gengyin, ZHOU Ming, *et al.* A decentralized and robust optimal scheduling model of integrated electricity-gas system for wind power accommodation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(20): 6442–6455(in Chinese).
- [11] 郭尊, 李庚银, 周明, 等. 考虑网络约束和源荷不确定性的区域综合能源系统两阶段鲁棒优化调度 [J]. *电网技术*, 2019, 43(9): 3090–3100.
GUO Zun, LI Gengyin, ZHOU Ming, *et al.* Two-stage robust optimal scheduling of regional integrated energy system considering network constraints and uncertainties in source and load[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(9): 3090–3100(in Chinese).
- [12] 税月, 刘俊勇, 高红均, 等. 考虑风电不确定性的电气能源系统两阶段分布鲁棒协同调度 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(13): 43–50.
SUI Yue, LIU Junyong, GAO Hongjun, *et al.* Two-stage distributed robust cooperative dispatch for integrated electricity and natural gas energy systems considering uncertainty of wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(13): 43–50(in Chinese).
- [13] WANG Cheng, GAO Rui, QIU Feng, *et al.* Risk-based distributionally robust optimal gas-power flow with Wasserstein distance[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 6074–6086.
- [14] ISURU M, HOTZ M, GOOI H, *et al.* Network-constrained thermal unit commitment for hybrid AC/DC transmission grids under wind power uncertainty[J]. *Applied Energy*, 2020, 258(15): 114031.1–114031.17.
- [15] JIANG Sufan, GAO Shan, PAN Guangsheng, *et al.* A novel robust security constrained unit commitment model considering HVDC regulation[J]. *Applied Energy*, 2020, 258(15): 115652.1–115652.11.
- [16] ZHAI Junyi, ZHOU Ming, LI Jianing, *et al.* Hierarchical and robust scheduling approach for VSC-MTDC meshed AC/DC grid with high share of wind power[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(1): 793–805.
- [17] ZHOU Ming, ZHAI Junyi, LI Gengyin, *et al.* Distributed dispatch approach for bulk AC/DC hybrid systems with high wind power penetration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(3): 3325–3336.
- [18] 杨喆麟, 汪可友, 李国杰. 考虑风电不确定性的 VSC-MTDC 互联系统两阶段交直流最优潮流 [J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(14): 25–34.
YANG Zhelin, WANG Keyou, LI Guojie. Two-stage AC/DC optimal power flow with VSC-MTDC considering uncertainty of wind power[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(14): 25–34(in Chinese).
- [19] FU Yong, WANG Chunheng, TIAN Wei, *et al.* Integration of large-scale offshore wind energy via VSC-HVDC in day-ahead scheduling[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(2): 535–545.
- [20] HU Bingqian, WU Lei, MARWALI 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] YE Hongxing, WANG Jiahui, GE Yinyin, *et al.* Robust integration of high-level dispatchable renewables in power system operation[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(2): 826–835.
- [22] JIANG Ruiwei, WANG Jiahui, GUAN Yongpei. Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(2): 800–810.
- [23] ZENG Bo, ZHAO Long. Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint generation method[J]. *Operations Research Letters*, 2013, 41(5): 457–461.

收稿日期: 2023–08–14

作者简介:

孙俊 (2000), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: 120212201487@ncepu.edu.cn;

艾欣 (1964), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新型电力系统分析与控制, E-mail: aixin@ncepu.edu.cn。