

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250336

考虑虚拟电厂可信调节能力的电网随机调度研究

包铭磊¹, 田富豪², 冯天夏², 杨扬³, 綦陆杰³, 刘盛福³

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学工程师学院, 浙江 杭州 310015;
3. 国网山东省电力有限公司经济技术研究院, 山东 济南 250021)

摘要: 虚拟电厂(virtual power plant, VPP)可通过参与电网调度, 为新能源消纳、电网安全运行提供容量可观的调节能力。然而, 受 VPP 内部多重不确定性因素的影响, VPP 可提供的调节能力具有较强的不确定性, 可能导致 VPP 被调用时无法为电网提供足够的调节能力。为此, 提出了考虑 VPP 可信调节能力的电网随机调度方法。首先, 给出了 VPP 可信调节能力的定义、量化指标及评估流程。其次, 考虑 VPP 提供调节能力的不确定性和风电出力的随机性, 构建了电力系统备用需求的机会约束, 建立了内嵌机会约束的电力系统随机调度模型。此外, 为降低模型的求解复杂度, 提出了适应系统备用需求机会约束的确定性转化方法。最后, 算例表明所提方法可有效降低系统的运行风险, 提高了系统应对可再生能源出力不确定性的能力, 促进了电力系统的安全运行。

关键词: 虚拟电厂; 可信调节能力; 不确定性; 随机调度; 机会约束

Research on stochastic power grid dispatch considering the credible regulation capability of virtual power plants

BAO Minglei¹, TIAN Fuhao², FENG Tianxia², YANG Yang³, QI Lujie³, LIU Shengfu³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China; 3. Economic and Technical Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Co., Ltd., Jinan 250021, China)

Abstract: Virtual power plants (VPPs) can participate in power system dispatch and provide considerable regulation capability, thereby supporting renewable energy integration and secure grid operation. However, due to multiple sources of uncertainty within VPPs, their available regulation capability is highly uncertain, which may result in insufficient support when a VPP is called upon by the grid. To address this issue, a stochastic power system dispatch method considering credible regulation capability of VPPs is proposed. First, the definition, quantitative indicator, and evaluation process of VPP credible regulation capability are presented. Then, considering the uncertainty of regulation capability that VPPs provide and the stochastic nature of wind power output, chance constraints on power system reserve requirements are constructed, and a power system stochastic dispatch model with embedded chance constraints is established. Furthermore, to reduce the computational complexity of the model, a deterministic transformation method suitable for the system reserve chance constraints is proposed. Finally, case studies show that the proposed method effectively reduces system operational risk, improves the system's ability to cope with renewable generation uncertainty, and promotes secure power system operation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52407149).

Key words: virtual power plant (VPP); credible regulation capability; uncertainty; stochastic dispatch; chance constraint

0 引言

在“双碳”目标引领下, 我国正在加快构建以新能源为主体的新型电力系统, 继续加快推进能源

系统低碳转型。可再生能源近年来持续快速发展, 预计到 2030 年我国风电、光伏发电总装机容量将达到 12 亿 kW^[1]。然而, 受可再生能源出力随机性、波动性和间歇性特点的影响, 电力系统面临的供需失衡风险不断增加^[2-3]。在此背景下, 亟需挖掘系统中潜在的调节资源, 以保证电力系统的供需平衡。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52407149)

虚拟电厂(virtual power plant, VPP)能够将分布式光伏、空调负荷以及储能单元等分布式资源聚合管理,通过控制中心协同控制内部聚合资源来参与电网调度和电力市场运行,实现真实物理电厂的对外功能特性^[4]。一方面,虚拟电厂能够作为一个整体与上级电网进行功率交换,在实现内部各类源、荷、储资源友好互动的同时,达到自身利益最大化。另一方面,随着可再生能源的装机比例不断提高,电力系统不确定性显著增加,虚拟电厂通过控制内部资源的运行功率,可为电力系统运行提供调节能力,能够有效降低系统的运行风险,提高系统应对可再生能源出力不确定性的能力。因此,有必要对虚拟电厂的调节能力评估及其参与电力系统优化调度展开研究。

现阶段,针对虚拟电厂调节能力的评估已有较多研究。文献[5]从电动汽车集群运营商的角度,基于荷电状态与充放电状态,考虑电池容量和出行需求的约束,建立了电动汽车时序状态模型,提出了电动汽车虚拟电厂参与电力系统调度时的多时间尺度响应能力评估方法。文献[6]通过聚合热泵和电冰箱等家用设备,结合设备数量和典型功率参数分别评估了夏季和冬季的响应潜力。文献[7]研究了设备最小开关机时间对温控负荷灵活性的影响,提出了考虑最小开关机时间约束的温控负荷的调节潜力评估方法和控制策略。文献[8]设计了一种智能充电策略,在保证用户驾驶需求的前提下,评估了聚合电动汽车可为电网运行提供的调节能力。

基于上述评估结果,国内外针对虚拟电厂参与电力系统优化调度的方面已开展了较多研究^[9-13]。文献[9]基于内部资源的综合需求响应资源模型,建立虚拟电厂可调能力的数学模型,提出了考虑虚拟电厂可调能力的综合需求响应市场出清策略,在保证虚拟电厂运营商利益的同时降低了总成本,实现了削峰填谷和促进了新能源消纳。文献[10]构建了基于激励的需求响应虚拟电厂模型,以含风电的电力系统运行成本最低为目标函数,建立了需求响应虚拟电厂参与的两阶段优化模型,研究了风电预测误差较大时,虚拟电厂中可中断负荷在日前和日内的调度情况。文献[11]为应对分布式能源资源的不确定性给电力系统带来的实时波动,提出了一种虚拟电厂参与日前实时市场的最优运行策略。文献[12]将虚拟电厂作为独立市场主体参与系统调度,提出一种虚拟电厂参与下含高渗透可再生能源的电力系统双层优化调度模型,上下层之间交替求解,实现各层收益主体的均衡。文献[13]将多种分布式能源资源聚合为虚拟电厂,建立了综合考虑总发电成本、

污染处理成本和机组启停成本的电力系统多目标优化调度模型,验证了虚拟电厂能够缓解分布式能源资源给电网带来的安全运行问题。

然而,上述方法多采用确定性的方法,即认为虚拟电厂提供的调节能力是可信的。在实际运行中,虚拟电厂内部具有多重不确定性因素,导致虚拟电厂所能提供的调节能力亦具有较强的不确定性。光伏出力受光照等因素影响,难以实现高精度预测^[14]。空调负荷的响应能力则受环境温度波动及用户设定温度随机性的双重影响,调节潜力评估较为困难^[15]。储能系统在运行过程中,其充放电策略受到电价波动的影响,使其基线功率存在较大的不确定性^[16]。上述因素的存在,将导致源、荷、储资源的实际输出与预测值之间可能存在偏差,若调度机构据此制定运行方案,当VPP被调度时,可能无法在实际工况下提供计划中的备用容量,从而对电力系统的安全运行构成潜在威胁^[17]。在这种情况下,虚拟电厂应将考虑多重不确定性得出的可信调节能力提交给调度机构,调度决策者如何将可信调节能力替代传统的确定性调节能力,将考虑多重不确定性的虚拟电厂可信调节能力纳入到电力系统调度模型中显得尤为重要。

现阶段关于不确定性影响下需求侧可调潜力的评估已开展较多的研究。文献[18]提出通过多参数优化与机会约束方法,构建运行不确定性区域(uncertainty operating region, UOR),用于刻画需求侧多能资源在随机扰动下的可调能力边界变化,进而量化不确定性对系统调度灵活性及容量评估结果的影响。文献[19]考虑了风电和光伏等可再生能源电源侧出力的不确定性,针对预测误差问题,采用机会约束的方法将该类随机性转化为确定性的约束表达,并据此构建了一种评估虚拟电厂聚合可调功率范围的模型。文献[20]针对用户响应行为的随机性问题,提出以响应前后净负荷包络域的期望值为依据,建立用户平均响应能力的量化方法。然而上述研究虽在调节能力评估时考虑了不确定性因素,但多采用调节能力的最值、数学期望的方法来量化调节能力,尚未给出调节能力及其对应的置信度,难以刻画虚拟电厂调节能力的概率特性,且基于不同置信度下调节能力的调度仍尚未开展。

针对上述问题,本文建立了考虑虚拟电厂可信调节能力的电力系统随机调度模型,所提模型可以有效降低系统的运行风险,提高了系统应对可再生能源出力不确定性的能力。本文首先结合VPP的特征,给出了VPP可信调节能力的定义及评估流程;其次,考虑虚拟电厂提供调节能力的不确定性和风

电出力的随机性, 构建电力系统备用需求的机会约束, 建立了内嵌机会约束的电力系统随机调度模型, 确定虚拟电厂、常规发电机组等资源调度结果及备用安排。提出适应系统备用需求机会约束的确定性转化方法, 将机会约束转化为基于场景值排序的确定性约束, 保证了模型求解的可靠性和求解速率。最后, 算例表明所提模型可有效降低系统运行风险。

1 考虑多重不确定因素的VPP可信调节能力评估

1.1 VPP的可信调节能力建模

VPP中的聚合资源均有不确定性因素, 如图1所示。对于分布式光伏而言, 光伏发电系统出力主要与太阳辐照度有关, 而在一定时段内, 太阳辐照度近似为Beta分布^[14], 导致光伏出力具有一定的预测误差, 若预测值大于实际出力值, 则会导致虚拟电厂的上调节能力减小。对于空调负荷而言, 环境

温度和用户设定温度通过影响空调负荷压缩机的开机剩余时间和最大关机时间^[15], 进而影响空调负荷的上调节能力。在实际运行中, 用户可能会根据自己的偏好和需求随机调整空调的设定温度^[21], 环境温度预测往往会有预测误差^[22], 这两种不确定性导致空调负荷所能提供上调节能力的不确定性。对空调负荷下调节能力的影响, 与对上调节能力的影响类似, 在此不再赘述。对于储能单元而言, 由储能在日前市场的套利模型^[16]可知, 电价会影响储能单元的运行功率, 进而影响储能单元的调节能力。实际运行中, 电价会存在一定的预测误差^[23]。上述这些不确定性因素可能会导致可调资源提供的调节能力减小, 从而导致可调资源被调用时, 不能为电网提供充足的调节能力, 威胁电力系统的安全运行。因此, 考虑不确定性后, 可调资源的调节能力可能会减小, 故不能将确定性下的调节能力评估结果当作可调资源的实际调节能力。

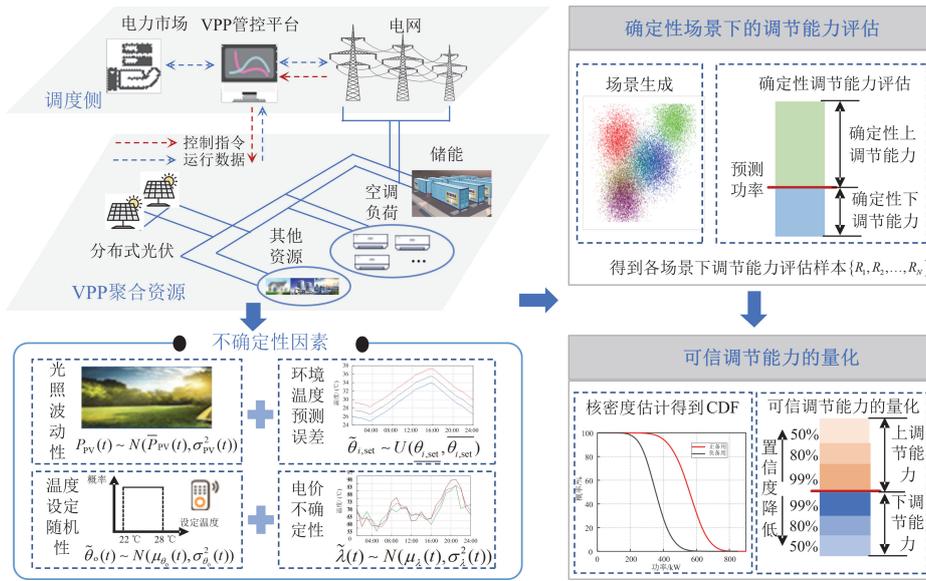


图1 VPP架构及可信调节能力模型

Fig. 1 Framework and the model of credible regulation capability of VPP

因此, 为了对多重不确定性因素下的VPP调节能力进行准确评估, 必须在传统调节能力量化指标的基础上赋予概率的维度, 用概率来表征VPP可提供调节能力的置信度, 从而得到一个高度可信的调节能力评估结果。为此, 提出可信调节能力来描述给定置信度下所能提供的调节能力, 它量化了VPP在不同的不确定性下能够覆盖给定可调范围的概率。如图1右下图所示。整个方块的不同颜色反映了不同的置信度。方块颜色越深, 置信度越高, 代表VPP可调范围处于阴影区域的概率越大。

已知这些随机变量的概率密度函数, 通过对随机变量的概率密度函数进行多重积分, 可以计算出可调范围 R 的累积分布函数, 如式(1)所示。

$$\Pr(R \geq R_{\alpha}) = \iint \dots \int_{G(y) \geq R_{\alpha}} f(y) dy \quad (1)$$

式中: $\Pr(\cdot)$ 表示事件发生的概率; R_{α} 为VPP的可信调节能力, 即在给定置信度下所能提供的调节能力; $G(\cdot)$ 为随机变量对应的VPP运行功率可调范围函数; $f(\cdot)$ 为随机变量的概率密度函数。

可信调节能力的定义表明, 尽管随机变量是不

确定性的,但 VPP 运行功率的可调范围大于等于可信调节能力 R_α 的概率等于给定的置信度 α , 即

$$\Pr(R \geq R_\alpha) = \alpha \quad (2)$$

1.2 VPP 可信调节能力评估流程

传统基于确定性的评估方法难以有效刻画多重不确定因素对虚拟电厂调节能力变化的影响,可能会导致调节能力的实际提供量与预测值偏差较大,置信度较低。因此,亟需对 VPP 进行可信调节能力评估。

评估流程如下。

1) 输入 VPP 各聚合资源运行特性参数及不确定性参数。

2) 选取 1 个场景,对不确定性参数生成场景值,对空调负荷和储能单元在此参数下的上下调节能力进行计算。

对于空调负荷而言,空调负荷提供的上下调节能力如式(3)和式(4)所示^[24]。

$$R_{i,\text{up}}^{\text{AC}}(t_s, T_D) = \begin{cases} P_i^{\text{AC}}, & m_i(t) = 1 \text{ 且 } T_D \leq \min\{T_{i,\text{on}}^{\text{res}}(t_s), T_{i,\text{off}}^{\text{max}}(t_s)\} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$R_{i,\text{down}}^{\text{AC}}(t_s, T_D) = \begin{cases} P_i^{\text{AC}}, & m_i(t) = 0 \text{ 且 } T_D \leq \min\{T_{i,\text{off}}^{\text{res}}, T_{i,\text{on}}^{\text{max}}\} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $R_{i,\text{up}}^{\text{AC}}$ 和 $R_{i,\text{down}}^{\text{AC}}$ 分别为空调负荷 i 的上、下调节能力; t_s 为评估时刻; T_D 为持续时长; P_i^{AC} 为空调负荷 i 的额定电功率; $m_i(t)$ 为空调负荷 i 压缩机的工作状态,取值为 1 时表示“开机”,取值为 0 时表示“关机”; $T_{i,\text{on}}^{\text{res}}$ 和 $T_{i,\text{off}}^{\text{res}}$ 分别为空调负荷 i 的开、关机剩余时间; $T_{i,\text{on}}^{\text{max}}$ 和 $T_{i,\text{off}}^{\text{max}}$ 分别为空调负荷 i 的最大开、关机时间^[11]。

对于储能单元而言,储能单元提供的上下调节能力如式(5)和式(6)所示。

$$R_{j,\text{up}}^{\text{ESS}}(t_s, T_D) = \max\{P_j^{\text{ESS}}(t_s) + P_{j,\text{d,max}}^{\text{ESS}}, 0\} \quad (5)$$

$$R_{j,\text{down}}^{\text{ESS}}(t_s, T_D) = \max\{P_{j,\text{c,max}}^{\text{ESS}} - P_j^{\text{ESS}}(t_s), 0\} \quad (6)$$

式中: $R_{j,\text{up}}^{\text{ESS}}$ 和 $R_{j,\text{down}}^{\text{ESS}}$ 分别为储能单元 j 的上、下调节能力; P_j^{ESS} 为储能单元 j 的运行功率; $P_{j,\text{c,max}}^{\text{ESS}}$ 和 $P_{j,\text{d,max}}^{\text{ESS}}$ 分别为储能单元 j 的实际最大充、放电功率。

3) 计算 VPP 运行功率及其最大、最小运行功率,从而得到 VPP 可提供的上下调节能力。

4) 遍历所有场景后,得到 VPP 调节能力评估结果样本 $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$,以该样本作为输入,由核密度估计法^[25]得到 VPP 调节能力的概率密度函数 $\hat{g}(R)$ 。

$$\hat{g}(R) = \frac{1}{Nh} \sum_{n=1}^N K\left(\frac{R - R_n}{h}\right) \quad (7)$$

式中: N 为样本容量; h 为带宽; $K(\cdot)$ 为核函数,本文核函数取标准高斯函数; R_n 为第 n 个样本的可信调节能力。

5) 对概率密度函数进行积分,计算得到调节能力的累积分布函数如式(8)所示。

$$\Pr(R \geq R_{\alpha,t}) = \int_{R_{\alpha,t}}^{+\infty} \hat{g}(R) dR \quad (8)$$

式中: $R_{\alpha,t}$ 为 VPP 在 t 时刻的可信调节能力,即在置信度 α 下能够提供的调节能力。VPP 能够提供可信调节能力的概率为 α , 即

$$\Pr(R \geq R_{\alpha,t}) = \alpha \quad (9)$$

6) 给定置信度,可得到 VPP 具有不同置信度的可信调节能力集合为

$$P_{CR}(t) = \{R_{\alpha,t} | \alpha = 99\%, 90\%, 80\%, \dots\} \quad (10)$$

2 考虑 VPP 可信调节能力的电网随机调度模型

2.1 随机调度框架

本节基于 VPP 可信调节能力的评估结果,建立了考虑 VPP 可信调节能力的电力系统随机调度模型。考虑 VPP 为电力系统提供调节能力的不确定性和风电出力的随机性,构建电力系统备用需求的机会约束,建立内嵌机会约束的电力系统随机调度模型,从而确定 VPP、常规发电机组等资源调度结果及备用安排。

2.2 目标函数

该模型以最小化发电和备用成本之和为目标函数,包括常规机组的燃料成本、启停成本、备用成本和切负荷成本。该目标函数不包括虚拟电厂的运行成本,其运行成本通过节点功率平衡方程传递到常规机组燃料成本。目标函数表达式如式(11)所示。

$$\min f = \sum_{t=1}^T [\sum_{g=1}^{N_G} (C^f(P_{g,t}) + C^u(U_{g,t}) + C^r(R_{u,g,t}, R_{d,g,t}))] + \sum_{t=1}^T [\sum_{n=1}^{N_n} C^{\text{LC}}(P_{n,t}^{\text{LC}})] + \sum_{t=1}^T [\sum_{v=1}^{N_V} C^r(R_{u,v,t}^{\text{VPP}}, R_{d,v,t}^{\text{VPP}})] \quad (11)$$

式中: f 表示调度总成本; $C^f(P_{g,t})$ 、 $C^u(U_{g,t})$ 和 $C^r(R_{u,g,t}, R_{d,g,t})$ 分别表示常规机组的燃料成本函数、启停成本函数和备用成本函数,其中,常规机组燃料成本函数采用一次函数模型; $P_{g,t}$ 表示常规机组 g 在 t 时刻的出力; $U_{g,t}$ 表示常规机组 g 在 t 时刻的运行状态,为 0-1 变量,0 表示停机,1 表示开机;

$R_{u,g,t}$ 、 $R_{d,g,t}$ 分别表示常规机组 g 在 t 时刻的正、负备用; $C^{LC}(P_{n,t}^{LC})$ 表示失负荷成本函数; $P_{n,t}^{LC}$ 表示节点 n 在 t 时刻的失负荷量; $C^r(R_{u,v,t}^{VPP}, R_{d,v,t}^{VPP})$ 表示虚拟电厂的备用成本函数; $R_{u,v,t}^{VPP}$ 、 $R_{d,v,t}^{VPP}$ 分别表示虚拟电厂 v 在 t 时刻的正备用和负备用; T 为调度时段数; N_G 、 N_n 、 N_V 分别表示系统中常规机组、系统节点和虚拟电厂的数量。

1) 常规机组的启停成本^[26]

$$C^u(U_{g,t}) = U_{g,t}(1 - U_{g,t-1})S_g \quad (12)$$

式中: S_g 表示常规机组 g 启停一次的成本。

2) 常规机组备用成本

$$C^r(R_{u,g,t}, R_{d,g,t}) = c_{u,g}R_{u,g,t} + c_{d,g}R_{d,g,t} \quad (13)$$

式中: $c_{u,g}$ 、 $c_{d,g}$ 分别表示常规机组 g 的正、负备用成本。

3) 失负荷成本

$$C^{LC}(P_{n,t}^{LC}) = c^{LC}P_{n,t}^{LC} \quad (14)$$

式中: c^{LC} 表示失负荷成本。

4) 虚拟电厂备用成本

$$C^r(R_{u,v,t}^{VPP}, R_{d,v,t}^{VPP}) = c_{u,v}^{VPP}R_{u,v,t}^{VPP} + c_{d,v}^{VPP}R_{d,v,t}^{VPP} \quad (15)$$

式中: $c_{u,v}^{VPP}$ 、 $c_{d,v}^{VPP}$ 分别表示虚拟电厂 v 的正、负备用成本。

2.3 约束条件

约束条件主要分为系统运行约束和常规机组约束。其中, 系统运行约束包括节点功率平衡约束、线路容量约束、节点电压相角约束、失负荷约束及系统备用需求约束; 常规机组约束包括机组出力约束、爬坡约束、最小启停时间约束和备用约束等。为综合考量风险和经济等因素, 将电力系统备用需求约束建立为机会约束, 通过引入机会约束来刻画系统备用需求约束被破坏的概率。各约束条件如下所述。

1) 考虑 VPP 可信调节能力的系统备用需求机会约束

风电出力具有较强的不确定性, 若风电出力的预测值大于实际出力值, 实际少发的这部分风电出力则由系统的正备用来应对, 进而缩减系统的正备用容量。相反地, 若风电出力的预测值小于实际出力值, 实际多发的这部分风电出力则由系统的负备用来应对, 进而缩减系统的负备用容量。此外, 虚拟电厂内部聚合资源的多重不确定性, 导致虚拟电厂提供备用的不确定性。在日前调度模型中, 风电出力的不确定性和虚拟电厂提供备用的不确定性决定着系统中常规机组的备用预留量。因此, 本文主

要考虑风电的不确定性和虚拟电厂提供备用的不确定性, 建立电力系统随机优化调度模型。

在确定性的基础上, 考虑虚拟电厂的可信备用和风电出力的不确定性, 将系统备用需求约束建模为机会约束, 通过引入机会约束的形式来刻画系统备用需求约束被破坏的概率。即允许在极端情形下系统备用容量可以不满足要求, 但这种极端情形出现的可能性满足概率要求。通过调节机会约束的置信度可以控制调度计划的鲁棒性和经济性。系统备用需求机会约束如式(16)和式(17)所示。

$$P_r\left(\sum_{g=1}^{N_G} R_{u,g,t} + \sum_{v=1}^{N_V} R_{u,v,t}^{VPP} + \sum_{w=1}^{N_W} (P_{w,t} - \bar{P}_{w,t}) \geq R_{u,t,\text{ext}}\right) \geq \beta_1 \quad (16)$$

$$P_r\left(\sum_{g=1}^{N_G} R_{d,g,t} + \sum_{v=1}^{N_V} R_{d,v,t}^{VPP} - \sum_{w=1}^{N_W} (P_{w,t} - \bar{P}_{w,t}) \geq R_{d,t,\text{ext}}\right) \geq \beta_2 \quad (17)$$

式中: $R_{u,t,\text{ext}}$ 、 $R_{d,t,\text{ext}}$ 分别表示系统正、负备用需求; $P_{w,t}$ 、 $\bar{P}_{w,t}$ 分别表示风电场 w 在 t 时刻的实际出力和预测出力; N_W 表示系统中风电场数; β_1 、 β_2 分别表示给定的满足系统正、负备用需求的置信度。

对于风电不确定性, 一般将预测误差建模为正态分布的随机量^[27]。本文考虑风电预测误差服从正态分布, 风电出力如式(18)所示。

$$P_{w,t} = \bar{P}_{w,t} + \Delta P_{w,t} \quad (18)$$

式中: $\Delta P_{w,t}$ 表示风电场 w 在 t 时刻的预测误差。

考虑式(18), 式(16)和式(17)可分别转化为

$$P_r\left(\sum_{g=1}^{N_G} R_{u,g,t} + \sum_{v=1}^{N_V} R_{u,v,t}^{VPP} + \sum_{w=1}^{N_W} \Delta P_{w,t} \geq R_{u,t,\text{ext}}\right) \geq \beta_1 \quad (19)$$

$$P_r\left(\sum_{g=1}^{N_G} R_{d,g,t} + \sum_{v=1}^{N_V} R_{d,v,t}^{VPP} - \sum_{w=1}^{N_W} \Delta P_{w,t} \geq R_{d,t,\text{ext}}\right) \geq \beta_2 \quad (20)$$

2) 其余电力系统运行约束

(1) 节点功率平衡约束

$$\sum_{g=1}^{N_G} P_{g,t} + \sum_{v=1}^{N_V} P_{v,t}^{VPP} + \sum_{w=1}^{N_W} \bar{P}_{w,t} - (P_{L,n,t} - P_{n,t}^{LC}) = -\sum_{m=1}^{N_m} P_{nm,t} \quad (21)$$

$$P_{nm,t} = \frac{\theta_{n,t} - \theta_{m,t}}{X_{nm}} \quad (22)$$

式中: $P_{v,t}^{VPP}$ 表示虚拟电厂 v 在 t 时刻的运行功率; $P_{L,n,t}$ 表示节点 n 在 t 时刻的负荷; N_g 、 N_v 、 N_w 和 N_m 分别表示与节点 n 直接连接的常规机组数、虚拟电厂数、风电场数和节点数; $P_{nm,t}$ 表示线路 nm 在 t 时刻的传输功率; $\theta_{n,t}$ 、 $\theta_{m,t}$ 分别表示节点 n 、 m 在 t

时刻的相角； X_{nm} 表示线路 nm 的电抗。

(2) 线路容量约束

$$P_{nm,\min} \leq P_{nm,t} \leq P_{nm,\max} \quad (23)$$

式中： $P_{nm,\max}$ 、 $P_{nm,\min}$ 分别表示线路 nm 的最大、最小传输功率。

(3) 节点电压相角约束

$$\theta_{\min} \leq \theta_{n,t} \leq \theta_{\max} \quad (24)$$

式中： θ_{\max} 、 θ_{\min} 分别表示节点电压相角的最大值和最小值。

(4) 失负荷约束

$$0 \leq P_{n,t}^{\text{LC}} \leq P_{L,n,t} \quad (25)$$

(5) 常规机组出力约束

$$U_{g,t} P_{g,\min} \leq P_{g,t} \leq U_{g,t} P_{g,\max} \quad (26)$$

式中： $P_{g,\max}$ 、 $P_{g,\min}$ 分别表示常规机组 g 的最大、最小出力。

(6) 常规机组爬坡约束

$$-P_{g,d} \leq P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq P_{g,u} \quad (27)$$

式中： $P_{g,u}$ 、 $P_{g,d}$ 分别表示常规机组 g 的最大上爬坡速率和最大下爬坡速率。

(7) 常规机组最小启停时间约束

$$\sum_{k=t}^{t+T_{\text{on}}-1} U_{g,k} \geq T_{\text{on},g} (U_{g,t} - U_{g,t-1}) \quad (28)$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_{\text{off}}-1} (1 - U_{g,k}) \geq T_{\text{off},g} (U_{g,t-1} - U_{g,t}) \quad (29)$$

式中： T_{on} 、 T_{off} 分别表示最小开机时间和最小停机时间； $T_{\text{on},g}$ 、 $T_{\text{off},g}$ 分别表示常规机组 g 的最小开机时间和最小停机时间。

(8) 常规机组备用约束

$$R_{u,g,t} \leq U_{g,t} \min(P_{g,\max} - P_{g,t}, \frac{T_{15}}{\Delta T} P_{g,u}) \quad (30)$$

$$R_{d,g,t} \leq U_{g,t} \min(P_{g,t} - P_{g,\min}, \frac{T_{15}}{\Delta T} P_{g,d}) \quad (31)$$

式中： T_{15} 表示旋转备用响应时间，取值为 15 min； ΔT 为调度时间间隔。

3 求解方法

在上述优化调度模型中，由于风电出力的不确定性和虚拟电厂提供备用的不确定性，将系统备用需求约束建模为机会约束。由于需要大量的模拟计算，导致机会约束求解速度较慢。将机会约束转化为等效的确定性约束是提高机会约束模型求解速度的有效方法。考虑到解析法往往会受到单一随机变量的限制，因此本文基于场景法将机会约束转化为

确定性约束。本节介绍机会约束的确定性转化过程。主要过程如下所述。

1) 基于可调资源模型和外部扰动(如温度、电价)生成典型随机场景，计算对应的备用能力样本序列。

2) 采用核密度估计方法构建 R 的概率密度函数， $f_R(r)$ 通过积分计算得到满足 $\int_{R_\alpha}^{\infty} f_R(r) dr = \alpha$ 的可信备用值 R_α 。

3) 将该值作为调度模型中的常数输入，替代原始的机会约束，从而完成模型从含不确定性概率约束向确定性约束的转变。

具体来说，将式(19)和式(20)分别转化为式(32)和式(33)。

$$P_r \left(\sum_{v=1}^{N_v} R_{u,v,t}^{\text{VPP}} + \sum_{w=1}^{N_w} \Delta P_{w,t} + \sum_{g=1}^{N_g} R_{u,g,t} - R_{u,t,\text{ext}} \geq 0 \right) \geq \beta_1 \quad (32)$$

$$P_r \left(\sum_{v=1}^{N_v} R_{d,v,t}^{\text{VPP}} - \sum_{w=1}^{N_w} \Delta P_{w,t} + \sum_{g=1}^{N_g} R_{d,g,t} - R_{d,t,\text{ext}} \geq 0 \right) \geq \beta_2 \quad (33)$$

式(32)和式(33)中均有两个随机变量，分别对两个随机变量按各自服从的分布规律生成 N_s 个场景。设第 s 个场景下，随机变量的场景值分别为 $R_{u,v,t}^{\text{VPP},s}$ 、 $R_{d,v,t}^{\text{VPP},s}$ 和 $\Delta P_{w,t}^s$ ，则机会约束式(32)和式(33)可以转换为如下混合整数线性约束。

$$\sum_{v=1}^{N_v} R_{u,v,t}^{\text{VPP},s} + \sum_{w=1}^{N_w} \Delta P_{w,t}^s + \sum_{g=1}^{N_g} R_{u,g,t} - R_{u,t,\text{ext}} \geq L \cdot (1 - d_{1,t}(s)) \quad (34)$$

$$\sum_{v=1}^{N_v} R_{d,v,t}^{\text{VPP},s} - \sum_{w=1}^{N_w} \Delta P_{w,t}^s + \sum_{g=1}^{N_g} R_{d,g,t} - R_{d,t,\text{ext}} \geq L \cdot (1 - d_{2,t}(s)) \quad (35)$$

$$\sum_{s=1}^{N_s} d_{1,t}(s) \geq \beta_1 \cdot N_s \quad (36)$$

$$\sum_{s=1}^{N_s} d_{2,t}(s) \geq \beta_2 \cdot N_s \quad (37)$$

$$d_{1,t}(s) = 0 \text{ or } 1, \forall s \in [1, N_s], 1 \leq t \leq T \quad (38)$$

$$d_{2,t}(s) = 0 \text{ or } 1, \forall s \in [1, N_s], 1 \leq t \leq T \quad (39)$$

式中： L 表示一个足够小的负数。

以式(34)为例，对于第 s 个场景，当 $d_{1,t}(s) = 1$ 时，式(40)成立；当 $d_{1,t}(s) = 0$ 时，式(40)不成立；由式(36)可知，在 N_s 个场景中，式(40)需成立 $\beta_1 \cdot N_s$ 次，即与式(32)等价。

$$\sum_{v=1}^{N_v} R_{u,v,t}^{\text{VPP}} + \sum_{w=1}^{N_w} \Delta P_{w,t} + \sum_{g=1}^{N_g} R_{u,g,t} - R_{u,t,\text{ext}} \geq 0 \quad (40)$$

由于机会约束中的决策变量和随机变量是相

分离的, 因此可以按影响式(40)成立程度的大小对生成的场景值进行排序, 从而将式(34)一式(39)进一步等效为式(41)一式(46)所示约束。

$$\sum_{g=1}^{N_g} R_{u,g,t} - R_{u,t,\text{ext}} + A_t (\text{floor}((1 - \beta_1) N_s)) \geq 0 \quad (41)$$

$$\sum_{g=1}^{N_g} R_{d,g,t} - R_{d,t,\text{ext}} + B_t (\text{floor}((1 - \beta_2) N_s)) \geq 0 \quad (42)$$

$$A_t^s = \sum_{v=1}^{N_v} R_{u,v,t}^{\text{VPP},s} + \sum_{w=1}^{N_w} \Delta P_{w,t}^s \quad (43)$$

$$A_t = \text{sort}([A_t^1, A_t^2, A_t^3, \dots, A_t^{N_s}]) \quad (44)$$

$$B_t^s = \sum_{v=1}^{N_v} R_{d,v,t}^{\text{VPP},s} - \sum_{w=1}^{N_w} \Delta P_{w,t}^s \quad (45)$$

$$B_t = \text{sort}([B_t^1, B_t^2, B_t^3, \dots, B_t^{N_s}]) \quad (46)$$

式中: $\text{floor}(\cdot)$ 表示向下取整函数; $\text{sort}(\cdot)$ 表示升序排序函数, 即将相量按从小到大的顺序重新排列。

4 算例分析

4.1 算例场景及参数设置

VPP 聚合了分布式光伏、空调负荷和储能单元。以夏季典型日为运行场景, 分布式光伏装机容量为 2 MW, 其出力预测值如图 2 所示。空调数量为 5000 台, 假设空调负荷全天开机, 运行参数如表 1^[28]所示, 环境温度预测值如图 3 所示, 用户最高、最低忍受温度与用户温度设定值之间的差值为 1 °C。储能单元参数如表 2 所示, 电价预测值取日前出清电价, 如图 3 所示。

VPP 中的不确定性主要来自于分布式光伏的预测误差、环境温度的预测不确定性、用户设定温度的随机性及电价的不确定性。将分布式光伏出力设为正态分布, 其均值见图 2 所示的预测值, 标准差为均值的 5%。设环境温度预测误差服从正态分布^[30],

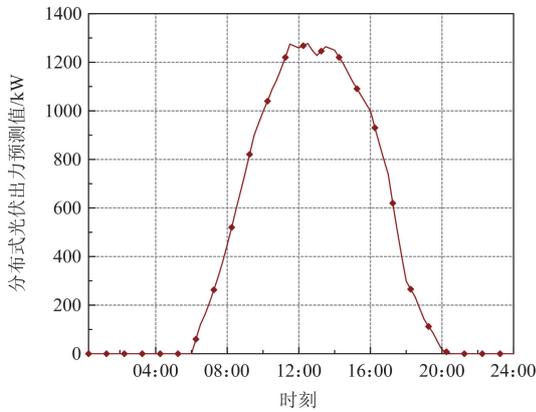


图 2 分布式光伏预测出力

Fig. 2 Predicted generation of distributed PV

表 1 空调负荷运行参数

Table 1 Operating parameters of air conditioners

参数	参数描述	参数取值
A_i	房间面积/m ²	$N(20,5)$ ^[28]
P_i^{AC}	空调功率/kW	$U(40 \cdot A_i, 70 \cdot A_i)$ ^[28]
C_i	等效热容/(kWh/°C)	$0.015 \cdot A_i$ ^[28]
R_i	等效热阻/(°C/kW)	$100 \cdot A_i^{-1}$ ^[28]
η_i^{AC}	能效比	3.0 ^[29]

表 2 储能单元运行参数

Table 2 Operating parameters of energy storage units

参数	参数描述	参数取值
S_{\min}	SOC 允许最小值	0.1
S_{\max}	SOC 允许最大值	0.9
$\overline{P}_{j,d}$	最大放电功率/kW	$U(57,63)$
$\overline{P}_{j,c}$	最大充电功率/kW	$U(57,60)$
$\eta_{j,d}^{\text{ESS}}$	放电效率	$U(0.88,0.93)$
$\eta_{j,c}^{\text{ESS}}$	充电效率	$U(0.92,0.95)$

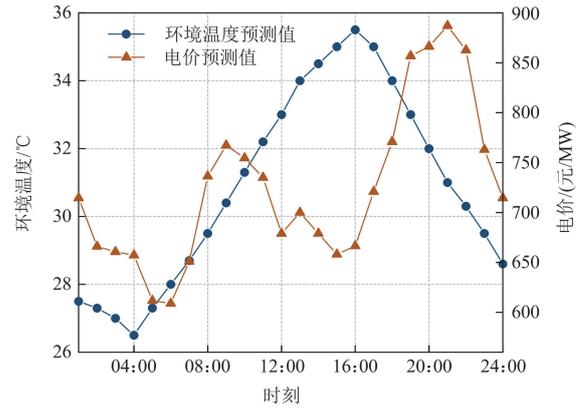


图 3 环境温度和电价的预测值

Fig. 3 Predicted value of ambient temperature and electricity price

其均值见图 3 所示的预测值, 标准差为均值的 2%。用户的温度设定值服从 18 °C 到 27 °C 之间的均匀分布。电价的不确定性服从正态分布, 其均值见图 3 所示的预测值, 标准差为均值的 1%。

为了验证考虑 VPP 可信备用的电力系统随机调度模型的有效性, 本节选取改进后的 IEEE30 节点测试系统^[31]进行了实例研究与结果分析。其中, 系统备用需求取负荷的 10%。负荷曲线如图 4 所示。设风电出力服从正态分布, 其均值见图 4 所示的预测值, 标准差为均值的 10%^[32]。

此外, 为突出 VPP 可信备用的不同导致调控结果不同的效果, 将 10 个典型 VPP 接入该系统, 其中, VPP 的正负备用成本均设置为 45 元/MW。以 1 h 为一个调度周期, 优化时间段为 00:00—24:00。仿

真平台为 MATLAB R2021a, 通过 YALMIP 工具箱调用 GUROBI9.5.1 进行求解。

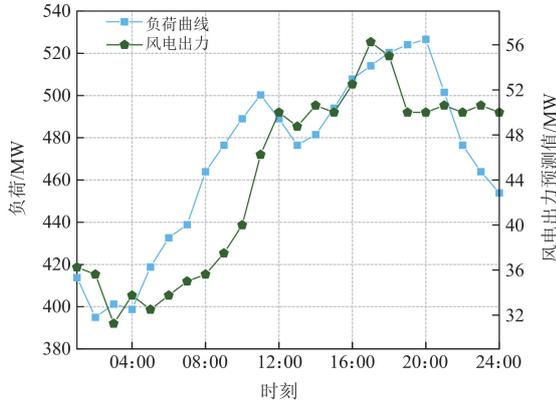


图 4 负荷曲线和风电出力预测值

Fig. 4 Curves of electric load and the predicted generation of wind

4.2 考虑不确定性的 VPP 可信备用评估结果及分析

根据累积分布函数得到的 VPP 在 13:00 所能提供的上下可信调节能力评估结果如图 5 所示。从图中不难得出, 置信度与调节能力一一对应, 即给定置信度, 可以得到该置信度下的 VPP 的调节能力, 随着置信度的增大, 可信调节能力减小, 且 VPP 在 13:00 所能提供的上可信调节能力大于下可信调节能力。

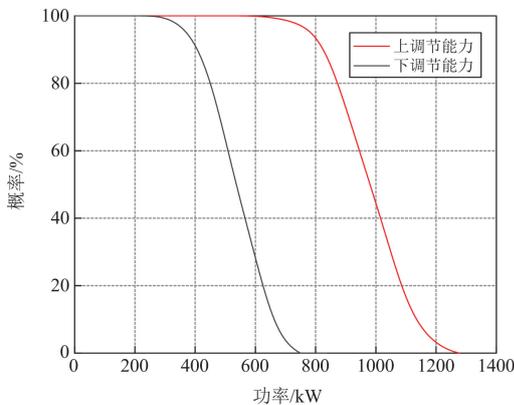


图 5 13:00 上下可信调节能力评估结果

Fig. 5 Credible regulation capability evaluation results at 13:00

图 6 是一天 24 个时刻 99%置信度和确定性情况下调节能力评估结果(以 VPP 作为电源为例, 负值表示从电网吸收功率, 正值表示向电网发出功率)。从图 6 可以看出, VPP 在环境温度较高时(12:00—17:00)提供上调节能力较大, 而提供下调节能力很小, 主要是由于在环境温度较高时, 空调大多数处于开机状态, 且持续时长同时小于开机剩余时间和最大关机时间, 因此 VPP 可提供较大的上调节能力

和较小的下调节能力。

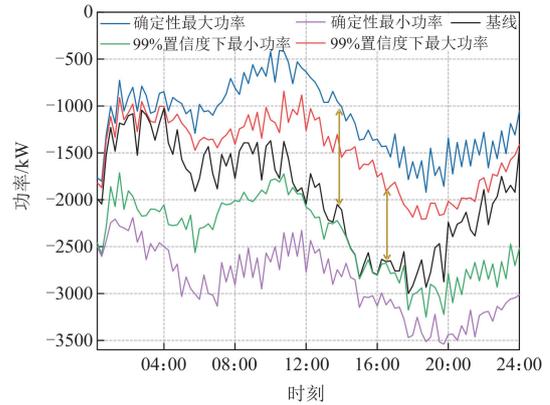


图 6 不同置信度下的可信调节能力评估结果

Fig. 6 Credible regulation capability evaluation results at different confidence levels

4.3 考虑可信调节能力与确定性调节能力的系统调度结果对比分析

为充分体现考虑 VPP 可信调节能力的电力系统随机调度模型的有效性, 设置确定性情景和不确定性情景进行对比分析。

情景 1: 不考虑 VPP 提供调节能力的不确定性和风电出力的不确定性, 将 VPP 确定性的调节能力评估结果和风电出力预测值输入到电力系统调度模型中进行计算分析。

情景 2: 考虑 VPP 提供调节能力的不确定性和风电出力的不确定性, 将 VPP 的可信调节能力和风电出力预测误差纳入到电力系统的调度模型, 其中置信度 $\beta_1 = \beta_2 = 99\%$ 。

常规机组和 VPP 在不同情景下的正备用资源调控结果分别如图 7 和图 8 所示。其中常规机组备用安排是系统中所有常规机组备用安排的总和。由图 7 和图 8 可知, VPP 和常规机组提供备用量的趋势相反, 共同满足系统备用需求。由于考虑不确定性的 VPP 提供调节能力的置信度越高, 虚拟电厂可提供的可信调节能力越小, 故相较于确定性的情景, 高置信度下的常规机组正备用安排较大, 以满足系统的正备用需求。相反地, 在确定性情景下, VPP 可提供的调节能力较大, 常规机组正备用安排会相应减小。

为进一步说明忽略不确定性对电力系统可靠性的影响, 以调控结果为基础, 来评估电力系统可靠性。其中, 风电的不确定性主要考虑风速的随机性, 采用正态分布来建模, VPP 提供调节能力的不确定性, 基于图 5 获得的调节能力概率分布来建模。基于上述风电出力和 VPP 提供调节能力的不确定性模

型, 使用蒙特卡洛模拟法采样生成海量的不确定场景, 以切负荷量最小为目标函数, 通过最优潮流计算各不确定场景下系统的失负荷量, 最终加权获得平均切负荷量(expected energy not supplied, EENS)^[33]。基于图 7 和图 8 中的常规机组和 VPP 的调度结果, 开展电力系统的可靠性评估, 结果如表 3 所示。

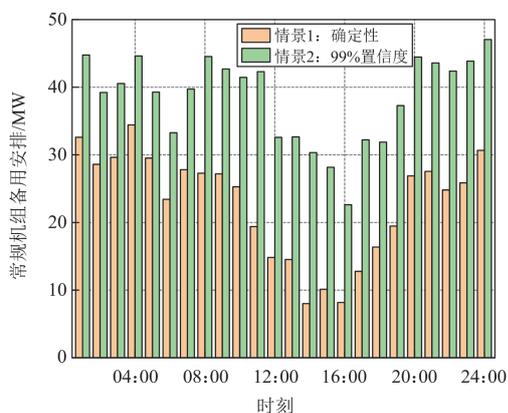


图 7 常规机组备用资源的调控结果

Fig. 7 Dispatch results of reserve resource of conventional generators

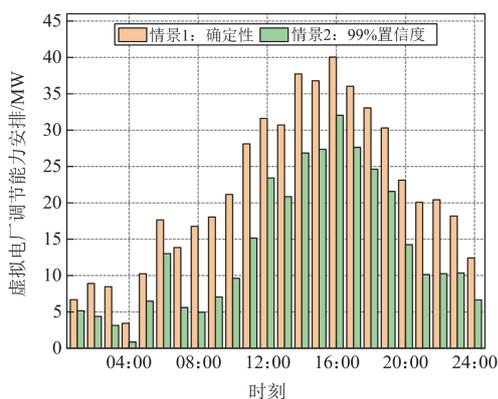


图 8 VPP 调节能力的调控结果

Fig. 8 Dispatch results of regulation capability of VPP

表 3 可靠性评估结果

Table 3 Assessment results of reliability

情景	总成本/万元	EENS/MWh
情景 1	440.44	3.34
情景 2	442.93	1.31

由表 3 可知, 考虑风电出力的不确定性和 VPP 提供调节能力的不确定性后, 调度总成本变大, 同时, EENS 指标变小。不考虑 VPP 不确定性下的确定性调控结果, 虽然调度成本低, 但由于 VPP 内部资源具有较强的不确定性, 影响 VPP 所能提供的调节能力。若 VPP 将确定性评估结果提交给调度机构, 调度决策者以此为依据制定调度策略, 当 VPP

的调节能力需要被调用、而 VPP 因不确定性因素不能够提供相应的调节能力时, 常规机组可能因备用容量不足, 导致系统产生切负荷风险, 且切负荷量会随着置信度的减小而增大。因此, 在制定调度策略时若忽略 VPP 调节能力的不确定性, 将威胁电力系统的安全运行。

4.4 基于实际系统的可信调节能力与确定性调节能力的系统调度结果对比分析

为了说明可信备用评估方法及随机调度模型在工程中的可行性, 本节采用我国东部某省的实际数据开展验证, 其中部分节点的负荷替换成 20 个 VPP。为验证在实际系统调度模型中考虑不确定性的必要性, 本节引入两个场景加以说明, 具体情景设置同 4.3 节, 这里不再赘述。

不同情景下, 电网中不同机组和 VPP 的调度结果分别如图 9 和图 10 所示。

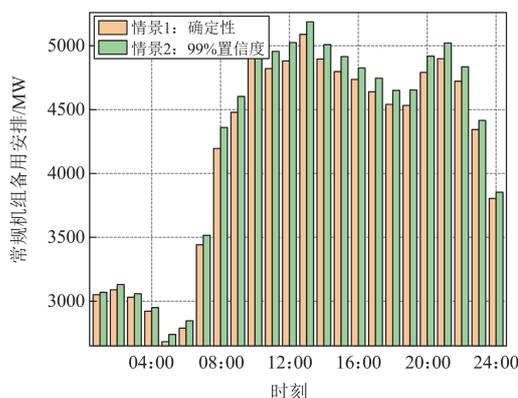


图 9 常规机组备用资源的调控结果

Fig. 9 Dispatch results of reserve resource of conventional generators

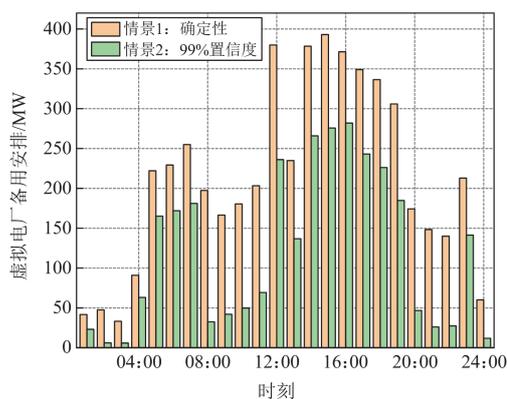


图 10 VPP 调节能力的调控结果

Fig. 10 Dispatch results of regulation capability of VPP

在确定性情景下, 常规机组的备用安排小于 99%置信度情景下的备用安排, 而 VPP 的备用安排

则大于 99%置信度情景下的备用安排。这主要是因为考虑 VPP 提供的备用置信度越高, VPP 可提供的可信备用越小。因此, 相较于确定性的情景, 高置信度下的常规机组备用安排较大, 以满足系统的正备用需求。相反地, 在确定性情景下, VPP 可提供的备用较大, 常规机组正备用安排会相应减小。若调度机构将低置信度下的调度结果发布给各机组, 当系统需要调用备用资源时, 一旦 VPP 因不确定性不能够提供相应的备用容量, 此时常规机组也没有足够的备用容量向系统提供, 进而会威胁电力系统的安全运行。

4.5 不同置信度对备用资源调度的影响

为定量说明 VPP 可信调节能力的评估结果对电力系统和 VPP 调控结果的影响, 在随机调度模型中, 为系统备用需求约束设置不同的置信度。通过求解不同置信度下的模型, 可以确定常规机组在不同置信度下各时段的备用资源调度安排。图 11 和图 12 分别是常规机组、VPP 在不同置信度下各时段的正备用资源调度安排情况。其中, 常规机组正备用资源调度安排是系统中所有常规机组正备用调度安排之和。以常规机组和 VPP 的正备用资源调度安排为例进行分析说明。

从时间维度上看, VPP 在 11:00—18:00 提供上调节能力较大, 在 01:00—07:00 提供上调节能力较小。而常规机组只有在 16:00 左右所提供备用较小, 其余时段均较大。这表明 VPP 和常规机组提供备用容量互补, 共同满足系统备用需求。

从置信度维度上看, 随着置信度的增大, 常规机组正备用资源安排越大, VPP 上调节能力安排越小。这是因为系统备用需求约束置信度越大, VPP 所提供的上调节能力越小, 同时系统备用需求约束

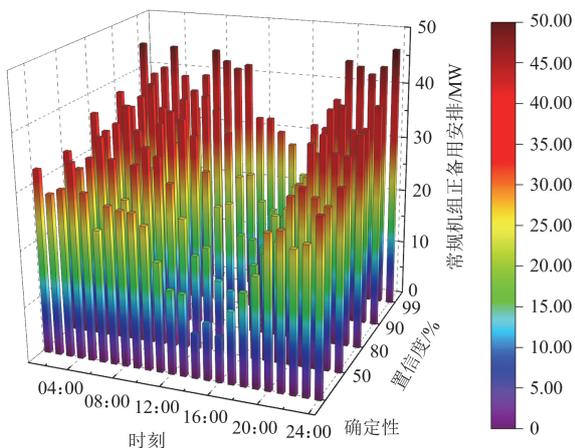


图 11 常规机组正备用资源在不同置信度下的安排情况

Fig. 11 Arrangement of active reserve resource of conventional generators at different confidence levels

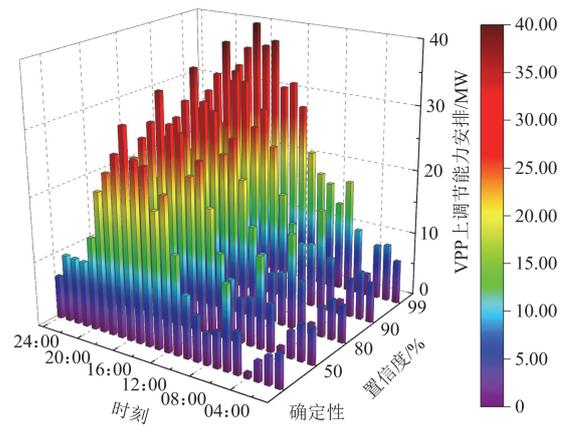


图 12 VPP 上调节能力在不同置信度下的安排情况

Fig. 12 Arrangement of upward regulation capability of VPP at different confidence levels

允许被破坏的概率越小, 即需要常规机组提供更大的备用资源, 以满足系统正备用需求。负备用资源安排情况与正备用资源安排情况相似, 在此不再赘述。

5 结论

VPP 内部聚合资源的多重不确定性因素, 导致 VPP 所能提供的调节能力具有较强的不确定性, 若调度机构基于确定性调节能力评估结果进行调度决策, 可能会导致 VPP 无法有效执行调度指令来提供足够的调节能力, 影响电力系统的安全运行和电力的可靠供应。因此, 本文建立了一种考虑 VPP 可信调节能力的电网随机调度模型。考虑 VPP 提供调节能力的不确定性和风电出力的随机性, 构建电力系统备用需求的机会约束, 建立了内嵌机会约束的电力系统随机调度模型, 确定 VPP、常规发电机组等资源调度结果及备用安排。为了保证模型求解的可靠性和提高模型求解速度, 针对性地给出机会约束的确定性转化方法, 将机会约束转化为基于场景值排序的确定性约束。基于典型 VPP 的算例, 对所提出的考虑 VPP 可信调节能力的电网随机调度模型进行了算例验证与分析。

算例结果表明, 所提电力系统随机调度模型将 VPP 的可信调节能力纳入电力系统优化模型中, 从而将 VPP 中的不确定性因素和风电的不确定性考虑到优化调度模型中, 可以在实现电力系统运行经济性的同时, 有效降低系统的运行风险, 促进了电力系统的安全运行和电力的可靠供应。

参考文献

[1] 林顺富, 张琪, 沈运帷, 等. 面向灵活爬坡服务的高比例新能源电力系统可调节资源优化调度模型[J]. 电力

- 系统保护与控制, 2024, 52(2): 90-100.
- LIN Shunfu, ZHANG Qi, SHEN Yunwei, et al. Optimal dispatch model of adjustable resources in a power system with high proportion of renewable energy for flexible ramping product[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 90-100.
- [2] 项佳宇, 王方敏, 李冰, 等. 计及灵活性资源传输的配电网灵活性供需协同规划方法[J]. 电力建设, 2025, 46(6): 76-91.
- XU Jiayu, WANG Fangmin, LI Bing, et al. Collaborative planning method for flexibility supply and demand in distribution networks considering flexible resource transmission[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(6): 76-91.
- [3] 王蓬蓬, 宋运忠. 计及最恶劣场景概率和供需灵活性的综合能源系统分布鲁棒低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 78-89.
- WANG Pengpeng, SONG Yunzhong. Distributed robust low-carbon optimal scheduling of an integrated energy system considering worst-case scenario probability and flexibility of supply and demand[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 78-89.
- [4] 钟永洁, 纪陵, 李靖霞, 等. 虚拟电厂基础特征内涵与发展现状概述[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(6): 25-36.
- ZHONG Yongjie, JI Ling, LI Jingxia, et al. Overview on the characteristics, connotation and development status of virtual power plants in China[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(6): 25-36.
- [5] 张亚朋, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 电动汽车虚拟电厂的多时间尺度响应能力评估模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 94-103.
- ZHANG Yapeng, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Response capability evaluation model with multiple time scales for electric vehicle virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 94-103.
- [6] MUHSSIN M, CIPCIGAN W, SAMI S, et al. Potential of demand side response aggregation for the stabilization of the grids frequency[J]. Applied Energy, 2018, 220: 643-656.
- [7] WANG P, WU D, KALSI K, et al. Flexibility estimation and control of thermostatically controlled loads with lock time for regulation service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3221-3230.
- [8] ZHANG Hongcai, HU Zechun, XU Zhiwei, et al. Evaluation of achievable vehicle-to-grid capacity using aggregate PEV model[J]. IEEE Transactions on Power System, 2017, 32(1): 784-794.
- [9] 龚超, 张轩, 赵越, 等. 考虑虚拟电厂可调能力的综合需求响应市场出清策略[J]. 南方电网技术, 2021, 15(12): 56-65.
- GONG Chao, ZHANG Xuan, ZHAO Yue, et al. Market clearing strategy of integrated demand response considering adjustable capacity of virtual power plant[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(12): 56-65.
- [10] 贲树俊, 胡楠, 韩伟, 等. 考虑需求响应虚拟电厂的新能源电力系统两阶段优化调度研究[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(1): 41-47.
- BEN Shujun, HU Nan, HAN Wei, et al. Research on two-stage optimal dispatching of new energy power system considering demand response virtual power plant[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(1): 41-47.
- [11] JINHO L, DONGJUN W. Optimal operation strategy of virtual power plant considering real-time dispatch uncertainty of distributed energy resource aggregation[J]. IEEE Access, 2021, 9: 56965-56983.
- [12] 余英, 王海云, 王维庆, 等. 虚拟电厂参与下含高渗透可再生能源系统的运行策略[J]. 电测与仪表, 2023, 60(1): 94-103.
- YU Ying, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Operation strategy of high permeability renewable energy with virtual power plant participation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(1): 94-103.
- [13] CHENG H, GAO Y, ZHANG J, et al. The power system multi-objective optimization dispatching containing virtual power plant[C] // 2014 International Conference on Power System Technology, October 20-22, 2014, Chengdu, China: 3316-3321.
- [14] FU Xueqian. Statistical machine learning model for capacitor planning considering uncertainties in photovoltaic power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 51-63.
- [15] DING Yi, CUI Wenqi, ZHANG Shujun, et al. Multi-state operating reserve model of aggregate thermostatically-controlled loads for power system short-term reliability evaluation[J]. Applied Energy, 2019, 241: 46-58.
- [16] 齐宁, 程林, 刘锋, 等. 计及决策依赖不确定性的广义储能可信容量评估[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4916-4930.
- QI Ning, CHENG Lin, LIU Feng, et al. Capacity credit evaluation of generic energy storage under decision-dependent uncertainty[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4916-4930.
- [17] 田富豪, 包铭磊, 惠恒宇, 等. 考虑多重不确定性的虚拟电厂可信备用评估[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(10): 45-56.
- TIAN Fuhao, BAO Minglei, HUI Hengyu, et al. Credible reserve evaluation of virtual power plant considering multiple uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(10): 45-56.
- [18] TAN Hong, YANG Ao, LIN Zhenjia, et al. Uncertain operation region of electricity-hydrogen virtual power

- plant: concept and description method[J]. Applied Energy, 2025, 396.
- [19] WANG S, WU W, CHEN Q, et al. Stochastic flexibility evaluation for virtual power plants by aggregating distributed energy resources[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2024, 10(3): 988-999.
- [20] 郑若楠, 李志浩, 唐雅洁, 等. 考虑居民用户参与度不确定性的激励型需求响应模型与评估[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 154-162.
ZHENG Ruonan, LI Zhihao, TANG Yajie, et al. Incentive demand response model and evaluation considering uncertainty of residential customer participation degree[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 154-162.
- [21] 姜婷玉, 鞠萍, 王冲. 考虑用户调节行为随机性的空调负荷聚合功率模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 105-113.
JIANG Tingyu, JU Ping, WANG Chong. Aggregated power model of air-conditioning load considering stochastic adjustment behaviors of consumers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 105-113.
- [22] MÖLLER A, GROß J. Probabilistic temperature forecasting based on an ensemble autoregressive modification[J]. Royal Meteorological Society, 2016, 142: 1385-1394.
- [23] 白庆立, 赵志鹏, 靳晓雨, 等. 考虑风电出力 and 电价不确定性的水风联合现货市场竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(11): 122-133.
BAI Qingli, ZHAO Zhipeng, JIN Xiaoyu, et al. Hydro-wind power joint bidding strategies for electricity spot market considering uncertainties of wind power output and electricity price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(11): 122-133.
- [24] 薛景润, 施啸寒, 王超, 等. 兼顾物理状态和用户行为的虚拟电厂紧急功率调节能力量化评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 2906-2921.
XUE Jingrun, SHI Xiaohan, WANG Chao, et al. Online evaluation of emergency power regulation capability for virtual power plants considering physical characteristics and user behavior constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2906-2921.
- [25] DAI Qian, CAI Tao, DUAN Shanxu, et al. Stochastic modeling and forecasting of load demand for electric bus battery-swap station[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1909-1917.
- [26] 李志伟, 赵书强, 李东旭, 等. 基于改进 ε -约束与采样确定性转化的电力系统日前调度机会约束模型快速求解技术[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4679-4691, 4973.
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LI Dongxu, et al. Fast solving of day-ahead power system scheduling chance-constrained model based on improved ε -constrained and deterministic transform by sampling[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4679-4691, 4973.
- [27] 王智冬, 姜素华, 范臻, 等. 基于机会约束规划的含大规模风电电力系统阻塞调度优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 147-154.
WANG Zhidong, LOU Suhua, FAN Zhen, et al. Chance-constrained programming based congestion dispatching optimization of power system with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 147-154.
- [28] 崔文琪. 考虑聚合空调负荷提供运行备用的电力系统可靠性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
CUI Wenqi. Power system reliability evaluation considering operating reserve provided by air conditioners[J]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [29] 李亚平, 姚建国, 雍太有, 等. 居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5519-5528, 5829.
LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Estimation approach to aggregated power and response potential of residential thermostatically controlled loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5519-5528, 5829.
- [30] MÖLLER A, GROß J. Probabilistic temperature forecasting based on an ensemble autoregressive modification[J]. Royal Meteorological Society, 2016, 142: 1385-1394.
- [31] SHAO C, DING Y, WANG J, et al. Modeling and integration of flexible demand in heat and electricity integrated energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 361-370.
- [32] FABRI A, GOMEZ T, ROMAN S, et al. Assessment of the cost associated with wind generation prediction errors in a liberalized electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1440-1446.
- [33] BAO M, DING Y, SINGH C, et al. A multi-state model for reliability assessment of integrated gas and power systems utilizing universal generating function techniques[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6271-6283.

收稿日期: 2025-03-31; 修回日期: 2025-07-15

作者简介:

包铭磊(1994—), 男, 通信作者, 博士, 新百人计划研究员, 研究方向为综合能源系统、可靠性和电力市场; E-mail: baominglei@zju.edu.cn

田富豪(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为虚拟电厂备用评估; E-mail: tianfuhao@zju.edu.cn

冯天夏(2003—), 男, 硕士研究生, 研究方向为负荷侧资源参与系统调节的控制。E-mail: tianxiafeng@zju.edu.cn

(编辑 魏小丽)