

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240932

考虑多重不确定性的虚拟电厂可信备用评估

田富豪¹, 包铭磊², 惠恒宇², 裘愉涛^{2,3}, 丁一²

(1. 浙江大学工程师学院, 浙江 杭州 310015; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027;
3. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 虚拟电厂(virtual power plants, VPP)可为电网运行提供容量可观的备用资源。准确评估和量化 VPP 的备用是 VPP 参与电网调控的关键。然而, 分布式新能源出力、负荷用电、电价等具有较强的不确定性, 可能导致传统基于确定性方法的备用评估结果不可靠。为此, 结合 VPP 的特征, 提出了考虑多重不确定性的可信备用定义及评估方法。首先, 给出了 VPP 架构和可信备用定义。然后, 构建了考虑各类资源聚合的 VPP 提供备用的模型。通过蒙特卡洛模拟各类不确定因素, 利用核密度估计法确定具有不同置信度的可信备用集合, 有效量化了 VPP 的可信备用。最后, 以典型 VPP 为例进行仿真, 验证了所提方法能够有效地刻画多重不确定性条件下 VPP 所能提供备用的概率特性, 能够为调度机构提供更全面可靠的备用信息。

关键词: 可信备用; 虚拟电厂; 不确定性; 蒙特卡洛; 核密度估计

Reserve credit evaluation of virtual power plants considering multiple uncertainties

TIAN Fuhao¹, BAO Minglei², HUI Hengyu², QIU Yutao^{2,3}, DING Yi²

(1. College of Engineers, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: Virtual power plants (VPP) can provide considerable reserve capacity for power grid operation. Accurately evaluating and quantifying the reserve capacity of VPP is key to their participating in power grid regulation. However, the strong uncertainties associated with distributed renewable energy output, load consumption, electricity price, and other factors can lead to unreliable results when using traditional deterministic methods for reserve evaluation. To address this, a definition and evaluation method for reserve credit under multiple uncertainties is proposed based on the characteristics of VPP. First, the framework of VPP and the definition of reserve credit are introduced. Then, a VPP reserve provision model is constructed considering various resource aggregation. By applying Monte Carlo to model multiple uncertainties and using kernel density estimation, a set of reserve credit with different confidence levels is derived, effectively quantifying the reserve credit of VPP. Finally, a case study on a typical VPP is conducted. It demonstrates that the proposed method can effectively reflect the probability characteristics of the reserves that VPP can provide considering multiple uncertainties, providing dispatch agencies with more comprehensive and reliable reserve information.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20232026).

Key words: reserve credit; virtual power plant (VPP); uncertainty; Monte Carlo; kernel density estimation

0 引言

在“双碳”目标引领下, 我国加快推进清洁低碳安全高效的能源体系建设, 可再生能源近年来持续快速发展, 预计到 2030 年前可再生能源的发电量占比将达 30%以上。然而, 受风速、光照等气象因

素的影响, 可再生能源出力具有随机性、波动性和间歇性的特点, 导致电力系统面临的供需失衡风险不断增加^[1-3]。在此背景下, 亟须挖掘系统中潜在的调节资源, 以保证电力系统的供需平衡。

分布式光伏装机容量快速增长, 空调负荷和储能单元具有良好的功率实时响应潜力^[4-5]。因此, 随着信息通信技术的发展, VPP 可将分布式光伏、空调负荷、储能单元等分布式能源资源聚合为可调整

基金项目: 江苏省自然科学基金项目资助(BK20232026)

体, 为电力系统的安全运行提供备用。因其调节资源拓展能力强、成本低、清洁环保的优点, VPP 正日益成为未来高比例可再生能源情境下的电力系统备受关注的研究领域^[6-7]。在 VPP 参与电力系统调控时, 首要解决的关键问题是准确量化 VPP 未来一段时间(如日前)可提供的备用量, 为调度机构制定调度计划提供输入。

现阶段, 针对 VPP 的备用评估, 国内外诸多学者已开展了大量研究^[8-12]。文献[8]基于系统调控需求与用户出行需求的充放电合约机制, 分析了电动汽车在不同充电策略下向电网提供备用容量的能力。文献[11]分析了空调负荷提供电力系统运行备用机理, 建立了聚合空调负荷提供运行备用的动态响应模型。文献[12]考虑空调和电动汽车单体的物理状态和用户行为, 通过聚合得到 VPP 紧急功率多时间尺度调节能力。在上述研究中, 大多基于可再生能源出力和可控负荷用电功率的预测值, 采用确定性方法来评估 VPP 的备用能力。

然而, 在实际运行中, VPP 中的源荷储资源会受多重不确定因素的影响。具体来说, 分布式光伏出力受多重不稳定因素影响^[13], 空调负荷会受环境温度 and 用户设定温度的影响^[11], 储能的基线功率会受到电价的影响^[14], 使得源荷储资源的实际出力(用电功率)会与预测值存在偏差。因此, 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 VPP 备用变化的影响, 可能会导致备用的实际提供量与预测值偏差较大, 置信度较低。在此情况下, 若调度机构仍基于此制定调度计划, 可能导致 VPP 需要被调用时难以为电力系统提供其所需的备用, 威胁电力系统的安全运行。

近年来, 部分学者开展了考虑不确定性因素的 VPP 备用评估研究^[14-16]。文献[14]考虑决策依赖不确定性, 在维持电力系统可靠性一致的情况下, 通过计算广义储能被等效为传统机组的平均容量来量化其可信容量。文献[15]主要考虑风、光出力等源侧资源预测误差的不确定性, 通过机会约束将可再生能源出力的不确定性转化为确定性约束条件, 提出了一种 VPP 聚合功率可调节范围的评估方法。文献[16]考虑用户响应行为的不确定性, 通过响应前后净负荷包络域的期望来量化用户的平均响应能力。上述研究虽然在备用评估中考虑了不确定性, 多采用平均值、数学期望等方法来量化备用能力, 然而尚未给出不确定性因素影响下的 VPP 可信备用的明确定义及数学表征, 难以全面地刻画不同置信

度水平下 VPP 可提供的备用能力, 难以有效地描述多重不确定性条件下备用能力的概率特性。本文所提可信备用使得 VPP 上报备用量时可将对置信度下的可信备用替代确定性的备用, 从而将更加全面的备用信息以概率约束的形式提交给调度机构, 调度决策者则可综合考虑风险、经济等因素开展调度计划安排。

针对上述问题, 本文考虑分布式光伏出力、环境温度、用户设定温度、电价等不确定因素, 给出了 VPP 可信备用的定义, 即在给定置信度下所能提供备用的能力。所提出的可信备用可以更加全面有效地刻画 VPP 备用能力的概率分布, 可给调度决策者提供更全面有效的备用信息。本文首先以典型的空调负荷、储能单元和分布式光伏资源为例介绍了 VPP 的架构, 结合 VPP 内部资源的不确定性, 给出了可信备用的定义; 其次, 构建了 VPP 聚合资源的运行模型, 提出了考虑多重不确定因素的 VPP 可信备用评估方法及数学表征模型, 有效量化了 VPP 的可信备用; 最后通过算例验证了所提方法的有效性。

1 VPP 架构及可信备用定义

1.1 VPP 架构及其不确定性

VPP 利用先进的通信、计量、控制等技术, 将分布式发电单元、储能单元、可控负荷等分布式能源资源聚合, 从而形成一个特殊的电源协调管理系统^[17], 通过 VPP 管控平台, 对内可实现内部资源的协调优化运行, 对外可像传统电厂一样参与电网的协调调度^[18-19]。VPP 的架构如图 1 所示。

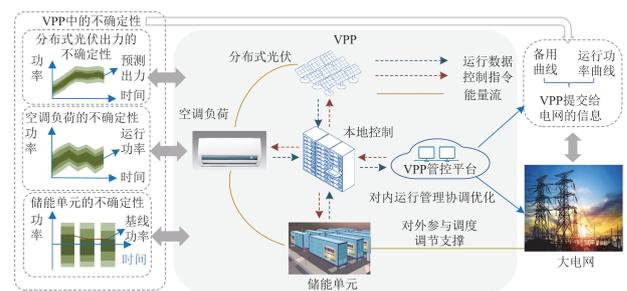


图 1 VPP 架构

Fig. 1 Framework of a VPP

如前文所述, VPP 中的聚合资源都有不确定性因素。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^[13], 导致光伏出力具有一定的预测误差; 在空调负荷的实际运行中, 空调负荷的功率与环境温度、用户的温度设定值有关^[11]。在气象

学中, 由于大气系统的复杂性以及气象观测、模型的限制, 次日的温度预测通常会受到一定的不确定性影响^[20]。而用户的设定温度、用户的个人偏好和舒适感受有关。储能资源的不确定性主要来源于运行状态、基线用能和可用容量等因素^[14]。

一般来说, VPP 的各聚合资源都存在许多不确定性, 这对 VPP 的运行和备用评估有着不可忽视的影响。若不考虑上述不确定因素, 可能导致 VPP 的备用评估结果在实际运行中置信度降低甚至无效。因此, 为了对多重不确定性因素下的 VPP 备用进行准确评估, 必须在传统备用量化指标的基础上赋予概率维度, 用概率来表征 VPP 可以提供备用的置信度, 从而得到一个高度可信的备用评估结果。

1.2 可信备用定义与数学描述

对于 VPP 中的聚合资源, 备用指在满足一定的爬坡、持续时长等约束下的可调度最大(最小)运行功率与实际运行功率之间的差值。VPP 通过聚合可调节资源为系统提供正负备用, 即通过降低运行功率或向电网放电来提供正备用, 通过增大运行功率来提供负备用。例如, 空调负荷作为一种响应速度较快的可控负荷, 在电网出现紧急容量需求时, 可通过上调设定温度减少其用电功率, 相当于为系统提供正备用; 在电网需要填谷时, 可通过下调设定温度增大其用电功率, 相当于为系统提供负备用。储能单元在满足电量约束和功率约束的前提下, 可以在充电状态下通过减小充电功率或放电状态下增大放电功率为系统提供正备用, 在充电状态下通过增大充电功率或在放电状态下减小放电功率为系统提供负备用。

一般地, VPP 确定性备用是其运行功率与最大、最小运行功率之差, 图 2 中时间-功率图表示 VPP 运行功率的可调范围。以图 1 中的 VPP 为例, 从随时间变化的运行功率可调范围, 可以得到 VPP 在不同时段的正负备用能力, 如图 2 所示。

考虑多重不确定性的影响, 确定性备用可能无法准确地描述 VPP 在实际运行过程中能够为电网提供的备用能力。在 VPP 中, 不确定性源于分布式光伏出力波动、环境温度预测不确定性、用户设定温度的随机性及电价不确定性。VPP 中的不确定性可以由随机变量表示, 因此, 提出采用可信备用来描述给定置信度下提供备用的能力, 其量化了 VPP 在不同不确定性下能够覆盖给定可调范围的概率。如图 2 中概率密度函数图所示, 以备用服从正态分布为例, 不同颜色阴影累计的概率表示备用大于等于可信备用的置信度, 如式(4)所示。以 99%置信度

为例, 99%置信度即为 VPP 可调范围处于置信区间 $[R_{99\%}, +\infty)$ 的概率。图 2 右下图表明, 阴影的不同颜色反映了不同的置信度。阴影颜色越深, 即置信度越高, 表示 VPP 可调范围处于阴影区域的概率越大。颜色最深的阴影表示置信度最高, 说明在大多数情况下, VPP 的可调范围处于颜色最深的阴影区域内。

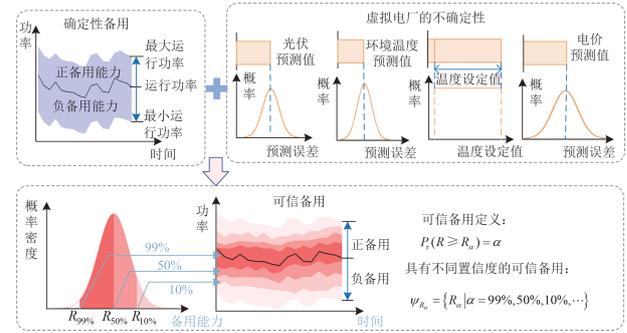


图 2 VPP 的不确定性和可信备用定义

Fig. 2 Uncertainties and reserve credit of a VPP

考虑到不确定性, VPP 中的变量既有确定性的, 也有不确定性的。采用随机变量来表示 VPP 中的不确定性。设这些随机变量的集合 y 表示为

$$y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \quad (1)$$

式中: $y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为 VPP 中的各个随机变量。

造成 VPP 中不确定性的原因一般是不同的, 因此可认为这些随机变量之间是相互独立的。

这些随机变量与 VPP 运行功率可调范围 R 之间的关系可以用一个函数 $G(\cdot)$ 来表示, 如式(2)所示。

$$R = G(y) \quad (2)$$

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的累积分布函数。

$$P_r(R \geq R_\alpha) = \iiint \dots \int_{G(y) \geq R_\alpha} f(y) dy \quad (3)$$

式中: $P_r(\cdot)$ 表示事件发生的概率; R_α 表示 VPP 的可信备用, 即在给定置信度下提供备用的能力; $f(\cdot)$ 表示随机变量的概率密度函数。

可信备用的定义表明, 尽管随机变量是具有不确定性的, 但 VPP 运行功率的可调范围大于等于可信备用 R_α 的概率等于给定的置信度 α , 即

$$P_r(R \geq R_\alpha) = \alpha \quad (4)$$

因此, 具有不同置信度的可信备用可以表示为

$$\psi_{R_\alpha} = \{R_\alpha | \alpha = 99\%, 90\%, 80\%, \dots\} \quad (5)$$

式中: ψ_{R_α} 为具有不同置信度的可信备用 R_α 的集合。

2 VPP 聚合资源建模

2.1 空调负荷提供备用建模

2.1.1 单个空调负荷模型

空调负荷的运行本质是空调内部、室内外及其之间的介质热交换的过程^[11]。空调的制冷(制热)过程一般采用热力学等值模型来描述,该模型通过建立空调负荷的用电功率与环境温度、能效比等物理量的关系,来描述室内温度的变化过程,其一阶常微分方程为^[21]

$$\frac{d\theta_i(t)}{dt} = -\frac{1}{R_i C_i} [\theta_i(t) - \tilde{\theta}_o(t) + m_i(t) R_i Q_i] \quad (6)$$

式中: $\theta_i(t)$ 和 $\tilde{\theta}_o(t)$ 分别为 t 时刻的室内温度和环境温度, 次日的温度预测通常会受到不确定性影响, 因此, 将环境温度建模为随机变量; R_i 、 C_i 分别为空调负荷 i 的等效热阻和等效热容; $m_i(t)$ 为空调压缩机的工作状态, 取值为 0 时表示“关机”, 取值为 1 时表示“开机”; Q_i 为空调负荷 i 的制冷/制热功率, 与空调的额定电功率满足一定的比例关系, 如式(7)所示^[19]。

$$Q_i = \eta_i^{AC} \cdot P_i^{AC} \quad (7)$$

式中: η_i^{AC} 为空调负荷 i 的能效比; P_i^{AC} 为空调负荷 i 的额定电功率。当空调压缩机处于“开机”时, 室内温度逐渐下降, 当室内温度降至室内温度下限 $\theta_{i,\min}$ 时, 空调压缩机转换为“关机”; 相反地, 当空调压缩机处于“关机”时, 室内温度逐渐上升, 当室内温度上升至室内温度上限 $\theta_{i,\max}$ 时, 空调压缩机转换为“开机”。

$$m_i(t) = \begin{cases} 0, & \theta_i(t) \leq \theta_{i,\min} \\ 1, & \theta_i(t) \geq \theta_{i,\max} \\ m_i(t - \varepsilon), & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: ε 为数值足够小的时滞; $\theta_{i,\max}$ 、 $\theta_{i,\min}$ 分别为室内温度上、下限, 其与空调负荷的温度设定值关系为^[21]

$$\begin{cases} \theta_{i,\min} = \tilde{\theta}_{i,\text{set}} - \frac{\sigma_i}{2} \\ \theta_{i,\max} = \tilde{\theta}_{i,\text{set}} + \frac{\sigma_i}{2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\tilde{\theta}_{i,\text{set}}$ 为空调负荷 i 的温度设定值, 由于用户的温度设定值与用户的个人偏好和舒适感受有关, 因此温度设定值是随机的; σ_i 为空调负荷 i 的温度控制死区的宽度。

对于空调负荷而言, 空调负荷的不确定性主要来自环境温度预测误差和用户设定温度的随机性。

环境温度预测误差通常符合正态分布^[22], 如式(10)所示。

$$\tilde{\theta}_o(t) \sim \phi(\mu_{\theta_o}(t), \sigma_{\theta_o}^2(t)) \quad (10)$$

式中: $\mu_{\theta_o}(t)$ 为 t 时刻环境温度的预测值; $\sigma_{\theta_o}^2(t)$ 为 t 时刻环境温度预测误差的方差; ϕ 表示正态分布。

用户的温度设定值服从均匀分布^[11], 如式(11)所示。

$$\tilde{\theta}_{i,\text{set}} \sim U(\underline{\theta}_{i,\text{set}}, \overline{\theta}_{i,\text{set}}) \quad (11)$$

式中: $\overline{\theta}_{i,\text{set}}$ 、 $\underline{\theta}_{i,\text{set}}$ 分别为空调负荷 i 的温度设定值的上、下限; U 表示均匀分布。

2.1.2 空调负荷提供备用评估模型

在空调负荷的实际运行中, 环境温度和用户的温度设定值通过影响空调负荷的压缩机开关时间进而影响空调负荷的基线运行功率。此外, 用户的最高、最低忍受温度也影响着空调负荷的基线运行功率。

当 $m_i(t) = 1$, 即空调负荷 i 的压缩机处于开机时, 且持续时长 T_D 同时小于开机剩余时间和最大关机时间时, 可以通过控制空调压缩机持续关机为系统提供持续时长为 T_D 、大小为 P_i^{AC} 的正备用, 其他情形下, 空调负荷 i 提供正备用能力为 0。综上, 空调负荷 i 提供正备用能力 $R_{i,\text{up}}^{AC}(t_s, T_D)$ 如式(12)所示^[12]。

$$R_{i,\text{up}}^{AC}(t_s, T_D) = \begin{cases} P_i^{AC}, & m_i(t) = 1 \text{ 且 } T_D \leq \min\{T_{i,\text{on}}^{\text{res}}(t_s), T_{i,\text{off}}^{\text{max}}(t_s)\} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $T_{i,\text{on}}^{\text{res}}$ 为空调负荷 i 的开机剩余时间, 即不参与调节时从评估时刻 t_s 到自然关机的时间; $T_{i,\text{off}}^{\text{max}}$ 为空调负荷 i 的最大关机时间, 即控制空调负荷 i 的压缩机关机后室内温度上升到 $\theta_{i,\max} + \Delta\theta_i^{\text{max}}$ 的时间, $\Delta\theta_i^{\text{max}}$ 为空调负荷 i 的用户最高忍受温度与用户温度设定值之间的差值。将评估时刻 t_s 的室内温度 $\theta_i(t_s)$ 代入式(6), 通过式(6)一式(9)可解得 $T_{i,\text{on}}^{\text{res}}(t_s)$ 和 $T_{i,\text{off}}^{\text{max}}(t_s)$ ^[11]。

$$T_{i,\text{on}}^{\text{res}}(t_s) = R_i C_i \ln \left[\frac{\eta_i^{AC} P_i^{AC} R_i + \theta_i(t_s) - \tilde{\theta}_o(t_s)}{\eta_i^{AC} P_i^{AC} R_i + \theta_{i,\min} - \tilde{\theta}_o(t_s)} \right] \quad (13)$$

$$T_{i,\text{off}}^{\text{max}}(t_s) = R_i C_i \ln \left[\frac{\tilde{\theta}_o(t_s) - \theta_i(t_s)}{\tilde{\theta}_o(t_s) - \theta_{i,\max} - \Delta\theta_i^{\text{max}}} \right] \quad (14)$$

当 $m_i(t) = 0$, 即空调负荷 i 的压缩机处于关机时, 且持续时长 T_D 同时小于关机剩余时间和最大开机时间时, 可以通过控制空调压缩机持续开机, 来为系统提供持续时长为 T_D 、大小为 P_i^{AC} 的负备用, 在其他情形下, 空调负荷 i 提供负备用能力为 0。综

上, 空调负荷 i 提供负备用能力 $R_{i,\text{down}}^{\text{AC}}(t_s, T_D)$ 如式(15)所示^[12]。

$$R_{i,\text{down}}^{\text{AC}}(t_s, T_D) = \begin{cases} P_i^{\text{AC}}, & m_i(t) = 0 \text{ 且 } T_D \leq \min\{T_{i,\text{off}}^{\text{res}}, T_{i,\text{on}}^{\text{max}}\} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $T_{i,\text{off}}^{\text{res}}$ 为关机剩余时间, 即不参与调节时从评估时刻到自然开机的时间; $T_{i,\text{on}}^{\text{max}}$ 为空调负荷 i 的最大开机时间, 即控制空调负荷 i 的压缩机开机后室内温度下降到 $\theta_{i,\text{min}} - \Delta\theta_i^{\text{min}}$ 的时间, 其中 $\Delta\theta_i^{\text{min}}$ 为空调负荷 i 的用户温度设定值与用户最低忍受温度之间的差值。将评估时刻 t_s 的室内温度 $\theta_i(t_s)$ 代入式(6), 通过式(6)一式(9)可解得 $T_{i,\text{off}}^{\text{res}}(t_s)$ 和 $T_{i,\text{on}}^{\text{max}}(t_s)$ ^[11]。

$$T_{i,\text{off}}^{\text{res}}(t_s) = R_i C_i \ln \left[\frac{\tilde{\theta}_o(t) - \theta_i(t_s)}{\tilde{\theta}_o(t) - \theta_{i,\text{max}}} \right] \quad (16)$$

$$T_{i,\text{on}}^{\text{max}}(t_s) = R_i C_i \ln \left[\frac{\eta_i^{\text{AC}} P_i^{\text{AC}} R_i + \theta_i(t_s) - \tilde{\theta}_o(t_s)}{\eta_i^{\text{AC}} P_i^{\text{AC}} R_i + \theta_{i,\text{min}} - \Delta\theta_i^{\text{min}} - \tilde{\theta}_o(t_s)} \right] \quad (17)$$

2.2 储能单元提供备用建模

2.2.1 储能单元运行模型

储能单元是一种容量小、安装地点灵活的可调控资源, 具有快速功率调节和供蓄能力^[23], 可为电网安全可靠的运行提供有力支撑。因此, 构建精细化的储能单元运行模型, 对于评估储能单元提供备用能力具有重要意义。

储能单元提供备用取决于运行功率和可用容量, 对于储能单元的运行功率, 可采用日前电能市场套利模型来确定, 优化模型^[15]如下所述。

目标函数:

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_j^{N_{\text{ESS}}} P_j^{\text{ESS}}(t) \cdot \tilde{\lambda}(t) \quad (18)$$

约束条件:

$$S_j(t+1) = S_j(t) + \frac{\eta_j^{\text{ESS}} P_j^{\text{ESS}}(t) \Delta t}{E_{j,r}}, \eta_j^{\text{ESS}} = \begin{cases} \eta_{j,c}^{\text{ESS}} \\ 1/\eta_{j,d}^{\text{ESS}} \end{cases} \quad (19)$$

$$-\overline{P_{j,d}} \leq P_j^{\text{ESS}}(t) \leq \overline{P_{j,c}} \quad (20)$$

$$S_{j,\text{min}} \leq S_j(t) \leq S_{j,\text{max}} \quad (21)$$

$$S_j(T) = S_j(1) \quad (22)$$

式中: T 为优化时长; N_{ESS} 为储能单元数量; $P_j^{\text{ESS}}(t)$ 、 $S_j(t)$ 分别为 t 时刻储能单元 j 的运行功率(放电为正, 充电为负)和荷电状态(state of charge, SOC); $\tilde{\lambda}(t)$ 为 t 时刻的电价, 电价的不确定性导致储能单元运行功率的不确定性; η_j^{ESS} 为储能单元 j 的充放电效率; Δt 为足够小的时间间隔; $E_{j,r}$ 、 $\eta_{j,c}^{\text{ESS}}$ 、

$\eta_{j,d}^{\text{ESS}}$ 分别为储能单元 j 的额定容量和充、放电效率; $\overline{P_{j,c}}$ 、 $\overline{P_{j,d}}$ 和 $S_{j,\text{max}}$ 、 $S_{j,\text{min}}$ 分别为储能单元 j 的最大充、放电功率和 SOC 运行的上、下限。

对于储能单元而言, 储能单元的不确定性主要来自电价的预测误差。电价的预测误差通常符合正态分布^[24], 为便于计算, 本文也采用这一设定。设电价的预测误差 $\tilde{\lambda}(t)$ 服从正态分布, 如式(23)所示。

$$\tilde{\lambda}(t) \sim \phi(\mu_\lambda(t), \sigma_\lambda^2(t)) \quad (23)$$

式中: $\mu_\lambda(t)$ 为 t 时刻电价的预测值; $\sigma_\lambda^2(t)$ 为 t 时刻电价预测误差的方差。

2.2.2 储能单元提供备用评估模型

储能单元在充电状态下减小充电功率甚至转换为放电状态, 或在放电状态下增大放电功率来为电网提供正备用。储能单元在放电状态下减小放电功率甚至转换为充电状态, 或在充电状态下增大充电功率来为电网提供负备用。

储能单元在实际运行中, 要同时满足电量约束和功率约束。储能单元提供备用的能力是运行功率与实际最大充放电功率之间的差值。

实际最大放电功率由储能单元的最大放电功率和评估时刻的 SOC 决定。在满足持续时长 T_D 要求下, 储能单元 j 的实际最大放电功率 $P_{j,d,\text{max}}^{\text{ESS}}$ 为

$$P_{j,d,\text{max}}^{\text{ESS}}(t_s, T_D) = \min \left\{ \frac{[S(t_s) - S_{j,\text{min}}] E_{j,r} \eta_{j,d}^{\text{ESS}}}{T_D}, \overline{P_{j,d}} \right\} \quad (24)$$

式中: $S(t_s)$ 为 t_s 时刻的荷电状态。

因此, 储能单元 j 提供正备用能力 $R_{j,\text{up}}^{\text{ESS}}$ 如式(25)所示。

$$R_{j,\text{up}}^{\text{ESS}}(t_s, T_D) = \max \{ P_j^{\text{ESS}}(t_s) + P_{j,d,\text{max}}^{\text{ESS}}, 0 \} \quad (25)$$

实际最大充电功率由储能单元的最大充电功率和评估时刻的 SOC 决定。在满足持续时长 T_D 要求下, 储能单元 j 的实际最大充电功率 $P_{j,c,\text{max}}^{\text{ESS}}$ 为

$$P_{j,c,\text{max}}^{\text{ESS}}(t_s, T_D) = \min \left\{ \frac{[S_{j,\text{max}} - S(t_s)] E_{j,r}}{\eta_{j,c}^{\text{ESS}} T_D}, \overline{P_{j,c}} \right\} \quad (26)$$

因此, 储能单元 j 提供负备用能力 $R_{j,\text{down}}^{\text{ESS}}$ 如式(27)所示。

$$R_{j,\text{down}}^{\text{ESS}}(t_s, T_D) = \max \{ P_{j,c,\text{max}}^{\text{ESS}} - P_j^{\text{ESS}}(t_s), 0 \} \quad (27)$$

2.3 分布式光伏出力建模

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, 其出力预测误差近似服从正态分布^[25], 且预测误差随统计时间尺度的不同而不同。光伏出力模型如式(28)所示。

$$P_{\text{PV}}(t) = \overline{P}_{\text{PV}}(t) + \tilde{e}_{\text{PV}}(t) \quad (28)$$

式中: $P_{PV}(t)$ 、 $\bar{P}_{PV}(t)$ 和 $\tilde{e}_{PV}(t)$ 分别为分布式光伏时刻 t 的实际出力、预测值和预测误差。

本文将分布式光伏出力预测误差设置为正态分布, 如式(29)所示。

$$P_{PV}(t) \sim \phi(\bar{P}_{PV}(t), \sigma_{PV}^2(t)) \quad (29)$$

式中: $\sigma_{PV}^2(t)$ 为分布式光伏 t 时刻预测误差的方差。

3 VPP 可信备用评估方法

3.1 可信备用评估方法

分布式光伏出力、环境温度、用户设定温度及电价都是 VPP 中的随机变量。这些随机变量的集合表示为

$$y = \{\tilde{P}_{PV}, \tilde{\theta}_o, \tilde{\theta}_{set}, \tilde{\lambda}\} \quad (30)$$

VPP 中的这些随机变量之间是相互独立的, 不妨假定分布式光伏出力、环境温度和电价的预测误差均服从正态分布, 用户设定温度值服从均匀分布, 然后通过蒙特卡洛模拟各随机变量, 生成 VPP 的 N 个运行场景, 通过聚合计算 N 个场景下 VPP 的运行功率及其最大、最小运行功率, 进而得到 VPP 满足持续时长约束的正负备用能力, 即式(2)中的函数 $G(\cdot)$, 具体化为式(31)一式(35)。各场景下 VPP 的运行功率 P^{VPP} 及其最大、最小运行功率 P_{max}^{VPP} 、 P_{min}^{VPP} 为

$$P^{VPP} = P_{PV} - \sum_{i=1}^{N_{AC}} P_i^{AC} + \sum_{j=1}^{N_{ESS}} P_j^{ESS} \quad (31)$$

$$P_{max}^{VPP}(t_s, T_D) = \bar{P}_{PV} - \sum_{i=1}^{N_{AC}} (P_i^{AC} - R_{i,up}^{AC}) + \sum_{j=1}^{N_{ESS}} (P_j^{ESS} + R_{j,up}^{ESS}) \quad (32)$$

$$P_{min}^{VPP}(t_s, T_D) = \bar{P}_{PV} - \sum_{i=1}^{N_{AC}} (P_i^{AC} + R_{i,down}^{AC}) + \sum_{j=1}^{N_{ESS}} (P_j^{ESS} - R_{j,down}^{ESS}) \quad (33)$$

VPP 满足持续时长的提供正、负备用能力 R_{up}^{VPP} 、 R_{down}^{VPP} 可表示为

$$R_{up}^{VPP}(t_s, T_D) = P_{max}^{VPP} - P^{VPP} \quad (34)$$

$$R_{down}^{VPP}(t_s, T_D) = P^{VPP} - P_{min}^{VPP} \quad (35)$$

得到 VPP 提供备用能力的 N 个样本后, 对 N 个样本利用核密度估计方法计算出备用能力的概率密度函数。设 R_1, R_2, \dots, R_N 为 VPP 运行功率可调范围的 N 个样本, 设 $g(\cdot)$ 为 R 的概率密度函数, 其定义域 \hat{g} 为 $[0, +\infty)$ 。则此概率密度函数的核估计^[26]为

$$\hat{g}(R) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{R - R_i}{h}\right) \quad (36)$$

式中: h 为带宽; $K(\cdot)$ 为核函数, 本文核函数取标准高斯函数。

结合备用能力的概率密度函数, 通过对备用能力的概率密度函数积分, 可以计算出其累积分布函数。

$$P_r(R \geq R_{\alpha,t}) = \int_{R_{\alpha,t}}^{+\infty} \hat{g}(R) dR \quad (37)$$

式中: $R_{\alpha,t}$ 为 VPP 在 t 时刻的可信备用, 即在置信度 α 下能够提供 $R_{\alpha,t}$ 的备用能力。VPP 能够提供 $R_{\alpha,t}$ 可信备用的概率为 α 。

$$P_r(R \geq R_{\alpha,t}) = \alpha \quad (38)$$

因此, VPP 在各时刻具有不同置信度的可信备用 $\psi_{R_{\alpha,t}}$ 可以表示为

$$\psi_{R_{\alpha,t}}(t) = \{R_{\alpha,t} | \alpha = 99\%, 90\%, 80\%, \dots\} \quad (39)$$

VPP 可信备用评估方法, 具体流程如图 3 所示, 其中 n 为场景序号。

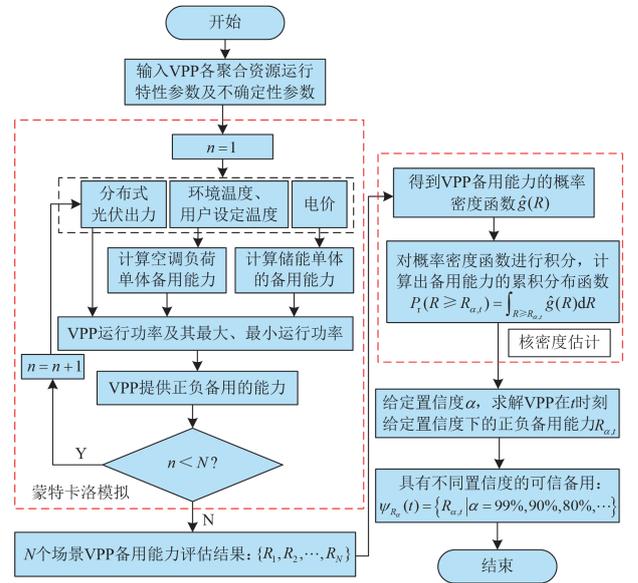


图 3 VPP 可信备用评估流程

Fig. 3 Reserve credit evaluation process of a VPP

3.2 可信备用实际应用分析

在不考虑不确定性时, 采用确定性的方法对 VPP 的备用进行评估, 得到的评估结果是一个可调范围, 即确定性备用。考虑 VPP 中的不确定性对其备用进行评估, 可以得到备用的概率密度函数。进一步地, 可以计算出具有不同置信度的备用能力, 即不同置信度的可信备用。与确定的方法相比, 考虑不确定性的方法给出了 VPP 所能提供备用的概率分布, 赋予了备用更全面和有效的信息。

在电力系统实际调用备用的过程中, 理想情况是备用资源能够严格按照调度指令响应。如果 VPP 在评估备用时不考虑不确定性, 将确定性的备用评估结果提交给电力系统调度机构。在电力系统面临紧急情况时, 电力系统调度机构按照 VPP 确定性的

备用制定备用调用策略并发布调度指令。由于此时VPP在运行过程中面临不确定性,它可能无法有效执行调度指令来提供足够的备用。在这种情况下,VPP应将考虑不确定性得出的可信备用提交给调度机构,调度决策者基于此综合考量风险和经济等因素,在电力系统允许的最大风险水平 β 下^[27],将VPP对置信度 α ($\alpha=1-\beta$)下的可信备用 R_α 替代确定性的备用,作为该风险水平下的VPP能够提供正备用和负备用的最大值,建立VPP备用容量约束如式(40)和式(41)所示。

$$R_{up,t}^{VPP} \leq R_{up,\alpha,t}^{VPP} \quad (40)$$

$$R_{down,t}^{VPP} \leq R_{down,\alpha,t}^{VPP} \quad (41)$$

式中: $R_{up,\alpha,t}^{VPP}$ 、 $R_{down,\alpha,t}^{VPP}$ 分别为VPP在 t 时刻具有置信度为 α 的正、负可信备用; $R_{up,t}^{VPP}$ 、 $R_{down,t}^{VPP}$ 分别为VPP在 t 时刻正、负备用的调度策略。

将式(40)、式(41)耦合到经济调度模型里,以最小化发电和备用费用之和为目标函数,制定备用策略并发布调度指令,实现风险可控、经济性最优的备用资源调度,确保电力系统安全经济运行。

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4所示。

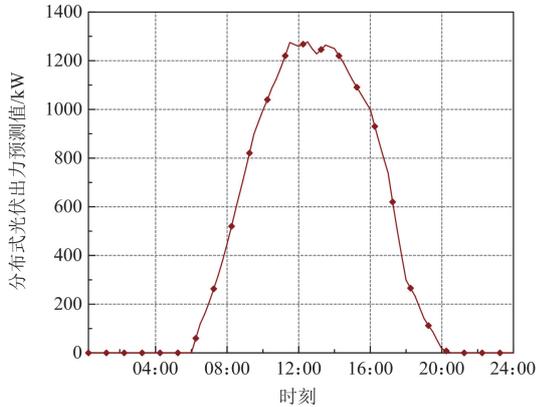


图4 分布式光伏预测出力
Fig. 4 Predicted generation of PV

空调数量为3000台,假设空调负荷全天开机,运行参数如表1所示^[28],环境温度预测值如图5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 。储能单元运行参数如表2所示,电价预测值取日前出清电价,如图6所示。测试系统负荷曲线如图7所示。

表1 空调负荷运行参数

Table 1 Operating parameters of air conditioners

参数	描述	取值
A_i	房间面积/ m^2	$\phi(20,5)^{[28]}$
P_i^{AC}	空调功率/ kW	$U(40 \cdot A_i, 70 \cdot A_i)^{[28]}$
C_i	等效热容/ $(\text{kWh}/^\circ\text{C})$	$0.015 \cdot A_i^{[28]}$
R_i	等效热阻/ $(^\circ\text{C}/\text{kW})$	$100 \cdot A_i^{-1[28]}$
η_i^{AC}	能效比	$3.0^{[10]}$

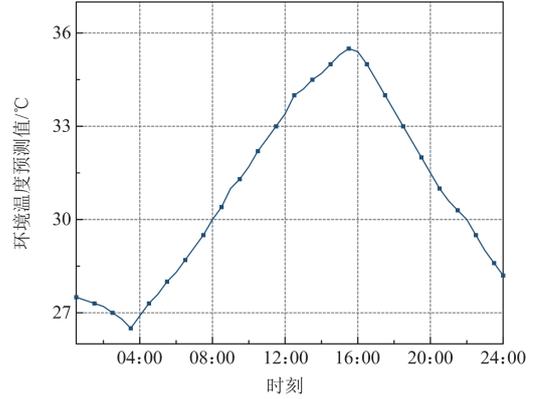


图5 环境温度预测值

Fig. 5 Predicted value of the ambient temperature

表2 储能单元运行参数

Table 2 Operating parameters of energy storage units

参数	描述	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	$U(57,60)$
$\eta_{j,d}^{ESS}$	放电效率	$U(0.88,0.93)$
$\eta_{j,c}^{ESS}$	充电效率	$U(0.92,0.95)$

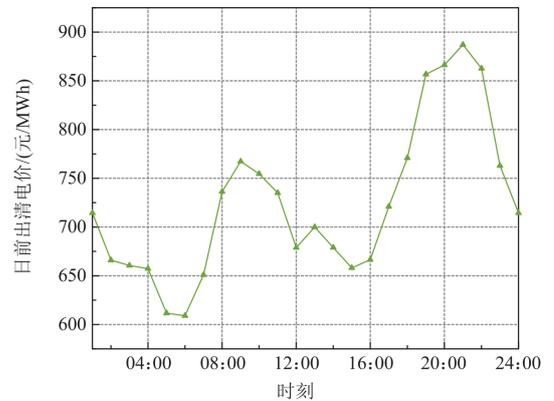


图6 日前出清电价

Fig. 6 Day-ahead market clearing price

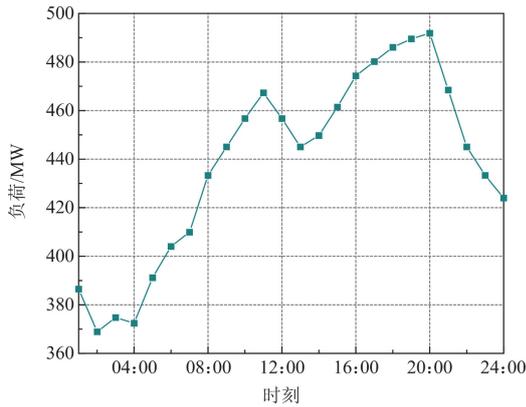


图7 测试系统负荷曲线

Fig. 7 Curve of electric load of test system

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。假设分布式光伏出力服从正态分布，其均值如图 4 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^[22]，环境温度的均值见图 5 所示的预测值，标准差为均值的 2%。用户的温度设定值服从 18~27 °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 6 所示的预测值，标准差为均值的 1%。

4.2 考虑不确定性的VPP 可信备用评估结果及分析

累积分布函数得到的VPP 在 13:00 所能提供的正负可信备用评估结果如图 8 所示。可以看出，置信度与备用能力一一对应，即给定置信度，可以得到该置信度下的备用能力，或给定备用需求，可以得到该备用需求下的置信度。随着置信度的增大，可信备用减小，且 VPP 在 13:00 所能提供的正可信备用大于负可信备用。

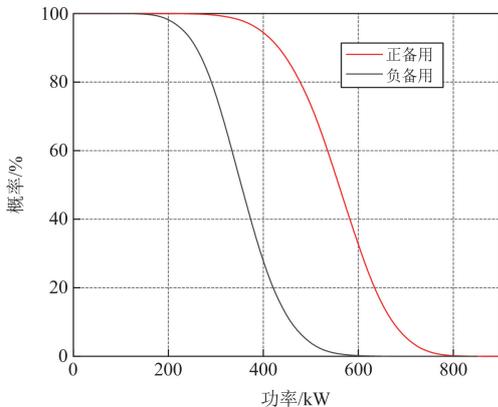
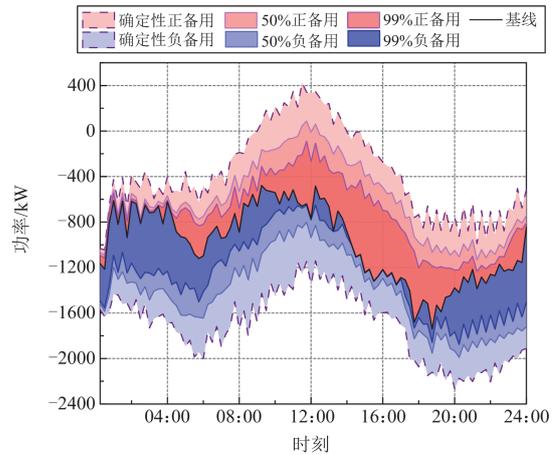


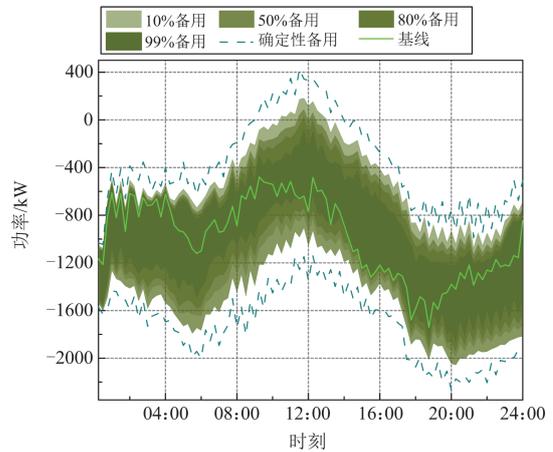
图8 13:00 时虚拟电厂正负可信备用评估结果

Fig. 8 Positive/negative reserve credit evaluation results of a VPP at 13:00

图 9(a)是一天 24 h 备用评估结果(以 VPP 作为电源为例，负值表示从电网吸收，正值表示向电网发出)。从图 9(a)可以看出，在温度较高时，99% 置信度下的可信备用评估结果大约是确定性情形下的 60%，因此考虑不确定性是必要的。VPP 在 10:00—17:00 提供正备用较大，负备用较小，是由于在环境温度较高时，空调大多数处于开机状态且当前时刻至自然开机时间较小，故能提供的负备用较小。图 9(b)是不同置信度下的可信备用评估结果，可知可信备用评估结果随着置信度增大而减小，即不确定性可能会阻碍 VPP 提供可信备用。



(a) 99%置信度与确定性情况下的可信备用评估结果



(b) 不同置信度下的可信备用评估结果

图9 不同置信度下的可信备用评估结果

Fig. 9 Reserve credit evaluation results at different confidence levels

4.3 用户最大可忍受温度对 VPP 可信备用的影响

用户在不同最大忍受温度下具有 99% 置信度的可信备用评估结果如图 10 所示。可以看出，在中午、下午环境温度较高时，用户最大可忍受温度对 VPP

提供的正备用影响较大, 对负备用影响较小, 原因是当环境温度较高时, 空调关机后, 室内温度上升较快, 在持续时长(15 min)相同的情况下, 用户可忍受 2℃升温情境下的空调负荷与可忍受 1℃升温情景下的空调负荷相比, 用户可忍受 2℃升温情境下的空调负荷关机后温度上升时间能达到持续时长的空调负荷数更多。而环境温度较低时, 空调关机后, 室内温度上升较慢, 用户可忍受 2℃升温情境下, 温度上升时间达到持续时长的空调负荷数, 和可忍受 1℃升温情境下的温度上升时间达到持续时长的空调负荷数几乎相等。在凌晨温度较低时, 用户最大可忍受温度对 VPP 提供的负备用影响较大, 对正备用影响较小。

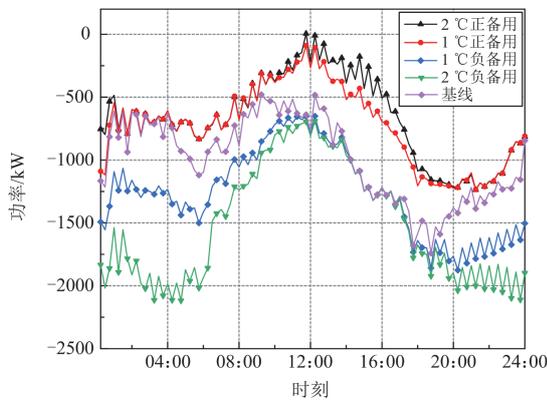


图 10 用户在不同最大忍受温度下具有 99%置信度的可信备用
Fig. 10 Reserve credit with 99% confidence under different maximum tolerable temperature of users

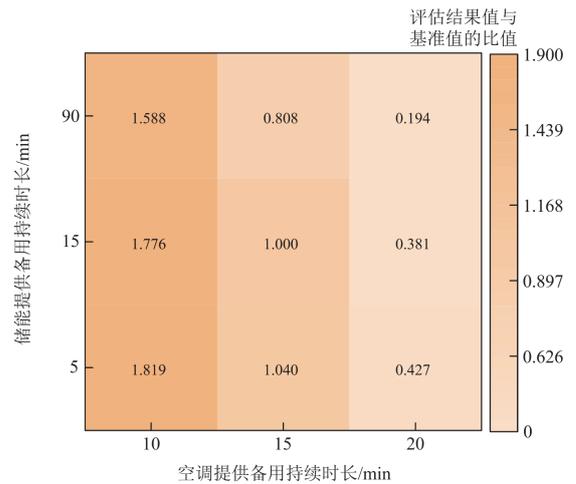
4.4 持续时长对 VPP 可信备用的影响

将空调负荷提供备用持续时长分别设置为 10 min、15 min、20 min, 储能单元提供备用持续时长分别为 5 min、15 min、90 min, 以空调负荷、储能单元提供备用持续时长均为 15min、具有 99%置信度的评估结果为基准值, 图 11 中彩色块中的数值为各持续时长下具有 99%置信度的评估结果与基准值的比值。

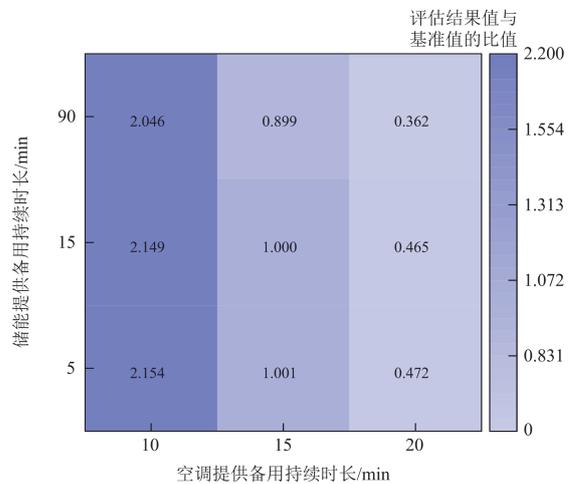
由图 11 可知, 可信备用与持续时长呈负相关, 彩色块中的数值水平变化幅度大于竖直变化幅度, 表明 VPP 可信备用受空调负荷提供备用持续时长的影响大于储能单元提供备用持续时长的影响。

4.5 不确定性对 VPP 可信备用影响的灵敏度分析

将环境温度预测误差和分布式光伏出力预测误差的标准差分别设置为 2%、5%和 8%。以两者预测误差的标准差均为 5%、具有 99%置信度的可信备用评估结果为基准值, 图 12 中彩色块中的数值为各预测误差下具有 99%置信度的评估结果与基准值的比值。

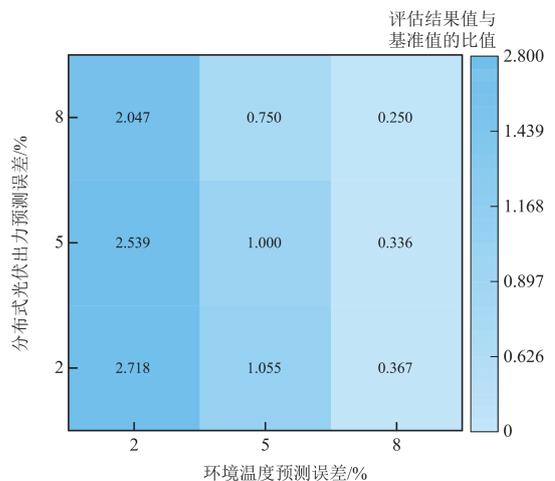


(a) 99%置信度下11:30时虚拟电厂可信正备用

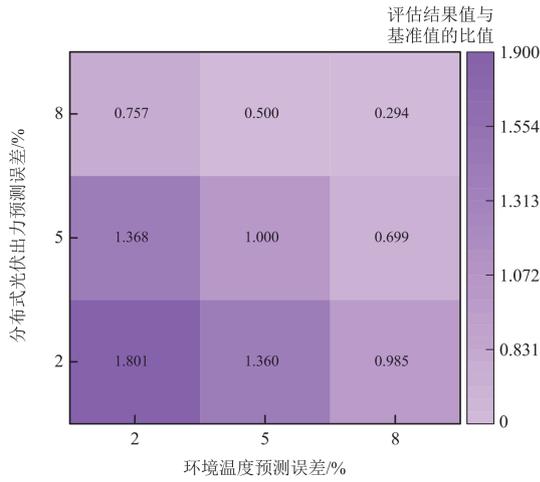


(b) 99%置信度下24:00时虚拟电厂可信负备用

图 11 不同持续时长下具有 99%置信度的可信备用
Fig. 11 Reserve credit with 99% confidence under different duration



(a) 99%置信度下13:00时虚拟电厂可信正备用



(b) 99%置信度下13:00时虚拟电厂可信备用

图 12 随机变量的不同误差下具有 99%置信度的可信备用
Fig. 12 Reserve credit with 99% confidence under different deviations of the random variables

由图 12 可以看出,可信备用与随机变量的预测误差均呈负相关,即预测误差越大,可信备用评估结果越小,说明不确定性可能会阻碍 VPP 提供可信的备用。图 12 中彩色块的数值水平变化幅度大于竖直变化幅度,表明 VPP 可信备用受环境温度预测误差的影响大于分布式光伏出力预测误差的影响。

4.6 可信备用评估对电力系统调控结果的影响

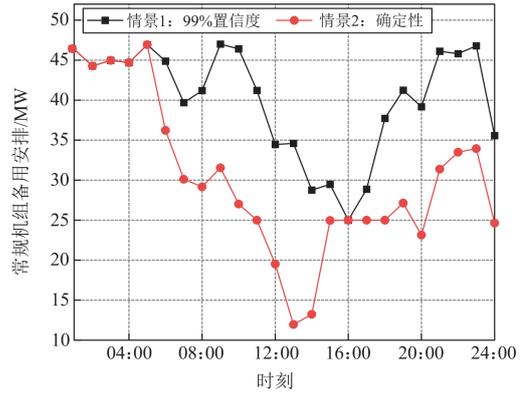
为量化说明 VPP 可信备用的评估结果不同,从而导致电力系统和 VPP 的调控结果不同,将考虑不同置信度的备用评估结果作为 VPP 提供备用的最大值,纳入到电力系统的调度模型,确定常规机组和 VPP 的调度计划。采用文献[29]中改进的 IEEE-30 节点系统及参数进行结果分析。其中,系统备用需求取负荷的 12%, VPP 接在节点 1 处。此外,为突出 VPP 可信备用评估结果不同导致调控结果不同这一效果,设置 VPP 的平均功率占系统总负荷的 10%。

情景 1: 将 VPP 具有 99%置信度的可信备用评估结果纳入到电力系统的调度模型;

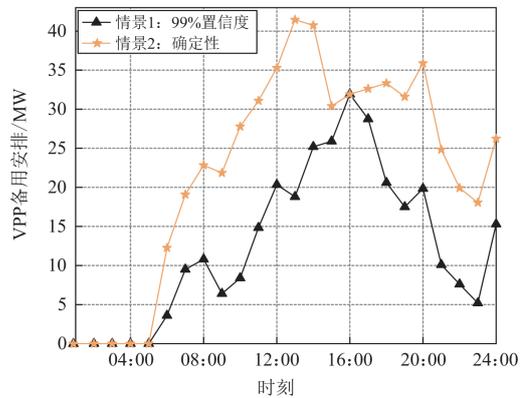
情景 2: 将 VPP 确定性的备用评估结果纳入到电力系统的调度模型。

常规机组及 VPP 在不同情景下的备用调度结果如图 13 所示。

由图 13 可知,由于考虑的 VPP 提供备用置信度越高, VPP 可提供的可信备用越小。故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,低置信度下的常规机组正备用安排较小。



(a) 常规机组备用安排



(b) VPP 备用安排

图 13 不同置信度下的调控结果
Fig. 13 Dispatch results at different confidence levels

5 结论

本文以 VPP 为依托,提出了可信备用的定义、评估方法及数学表征。在考虑分布式光伏出力、环境温度、用户设定温度及电价等多重不确定性的基础上,给出了可信备用的定义,即在给定置信度下所能提供备用的能力。通过建立 VPP 聚合资源的运行模型及提供备用模型,利用蒙特卡洛法模拟各种不确定性,提出 VPP 可信备用评估方法,得出具有不同置信度的可信备用集合,作为调度决策者制定调度计划的输入。基于典型 VPP 的算例分析表明,不确定性导致 VPP 备用能力的减小,99%置信度下的可信备用大约是不考虑不确定性情况下的 60%,且可信备用评估结果随着置信度的增大而减小。

为了使以上可信备用评估方法得到更好的应用,调度决策者应将可信备用替代确定性的备用,制定备用策略,实现风险可控、经济性最优的备用资源调度,确保电力系统安全经济运行。下一步重点研究重点将可信备用评估结果纳入到系统随机优化中,使 VPP 能够为电网提供可靠的备用能力,提

升电网可靠性。

参考文献

- [1] 韩子娇, 那广宇, 董鹤楠, 等. 考虑灵活性供需平衡的含电转氢综合能源系统鲁棒优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 161-169.
HAN Zijiao, NA Guangyu, DONG Henan, et al. Robust optimal operation of integrated energy system with P2H considering flexibility balance[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 161-169.
- [2] 许竞, 赵铁军, 高小刚, 等. 高比例新能源电力系统调节资源灵活性不足风险分析[J]. 中国电力, 2024, 57(11): 129-138.
XU Jing, ZHAO Tiejun, GAO Xiaogang, et al. Risk analysis of insufficient flexibility from regulation resources in high proportion renewable energy power systems[J]. Electric Power, 2024, 57(11): 129-138.
- [3] 任景, 高敏, 程松, 等. 面向新能源不确定性的西北电力电量平衡机制[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 66-78.
REN Jing, GAO Min, CHENG Song, et al. A balance method for power supply-demand adapting to high uncertainties of renewable energy in northwest power grid[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 66-78.
- [4] 韩笑, 周明, 李庚银. 计及储能和空调负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 14-23.
HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimal dispatching of active distribution networks considering energy storage systems and air-conditioning loads[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 14-23.
- [5] 朱梦岩, 包宇庆, 季振亚, 等. 基于数据驱动的聚合空调特性建模及控制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 11-19.
ZHU Mengyan, BAO Yuqing, JI Zhenya, et al. Data-driven-based aggregate air conditioning loads external modeling and load tracking control strategy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 11-19.
- [6] 舒征宇, 朱凯翔, 王灿, 等. 考虑碳交易的虚拟电厂日前电力市场竞价策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(5): 58-68, 149.
SHU Zhengyu, ZHU Kaixiang, WANG Can, et al. Virtual power plants participating in day-ahead electricity market bidding strategy considering carbon trading[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(5): 58-68, 149.
- [7] 曾小青, 唐超雯. 分时电价环境下计及新能源消纳的虚拟电厂优化调度研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 24-34.
ZENG Xiaoqing, TANG Chaowen. Research on optimization of virtual power plants dispatch by considering the consumption of new energy under time-of-use electricity price environment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 24-34.
- [8] 张俊成, 黎敏, 刘志文, 等. 配电网用户侧多类型柔性资源调节能力评估方法[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 96-103, 119.
ZHANG Juncheng, LI Min, LIU Zhiwen, et al. An evaluation method for multi-type flexible resource regulation capability on the user side of distribution networks[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 96-103, 119.
- [9] 吴巨爱, 薛禹胜, 谢东亮, 等. 电动汽车参与运行备用的能力评估及其仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 101-107, 168.
WU Juai, XUE Yusheng, XIE Dongliang, et al. Evaluation and simulation analysis of reserve capability for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 101-107, 168.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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): 1-12.
- [14] 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.
- [15] WANG Siyuan, WU Wenchuan, CHEN Qizhan, 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.
- [16] 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.
- [17] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.
WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [18] 陈皓勇, 黄宇翔, 张扬, 等. 基于“三流分离-汇聚”的虚拟电厂架构设计[J]. 发电技术, 2023, 44(5): 616-624.
CHEN Haoyong, HUANG Yuxiang, ZHANG Yang, et al. Architecture design of virtual power plant based on “three flow separation-convergence”[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 616-624.
- [19] 钟永洁, 纪陵, 李靖霞, 等. 虚拟电厂智慧运营管控平台系统框架与综合功能[J]. 发电技术, 2023, 44(5): 656-666.
ZHONG Yongjie, JI Ling, LI Jingxia, et al. System framework comprehensive functions of intelligent operation management and control platform for virtual power plant[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 656-666.
- [20] HYRKKÄNEN J, KILPINEN J, NURMI P, et al. Error characteristics of temperature forecast in Finland for the period 1979-2011 in relation to various weather patterns[J]. Royal Meteorological Society, 2016, 23: 244-253.
- [21] BASHASH S, FATHY H K. Modeling and control of aggregate air conditioning loads for robust renewable power management[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1318-1327.
- [22] MÖLLER A, GROß J. Probabilistic temperature forecasting based on an ensemble autoregressive modification[J]. Royal Meteorological Society, 2016, 142: 1385-1394.
- [23] 余鹏飞, 朱继忠, 熊小伏, 等. 基于储能的电力系统安全调控方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 173-186.
YU Pengfei, ZHU Jizhong, XIONG Xiaofu, et al. Regulating & control method of power system security based on battery energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 173-186.
- [24] 白庆立, 赵志鹏, 靳晓雨, 等. 考虑风电出力 and 电价不确定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.
- [25] 翟晶晶, 吴晓蓓, 傅质馨, 等. 考虑需求响应与光伏不确定性的综合能源系统鲁棒优化[J]. 中国电力, 2020, 53(8): 9-18.
ZHAI Jingjing, WU Xiaobei, FU Zhixin, et al. Robust optimization of integrated energy systems considering demand response and photovoltaic uncertainty[J]. Electric Power, 2020, 53(8): 9-18.
- [26] 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.
- [27] 吴文传, 许书伟, 杨越, 等. 风险量化的高比例新能源电力系统概率调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 3-11.
WU Wenchuan, XU Shuwei, YANG Yue, et al. Risk-quantified probabilistic dispatch for power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 3-11.
- [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] 姚宇, 叶承晋, 朱超, 等. 考虑需求侧快速响应资源的数据驱动频率约束经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 34-45.
YAO Yu, YE Chengjin, ZHU Chao, et al. Data-driven frequency constrained economic dispatch considering fast demand resources[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 34-45.

收稿日期: 2024-07-16; 修回日期: 2024-10-24

作者简介:

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

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

惠恒宇(1997—), 男, 博士, 研究方向为综合能源系统、灵活性等。E-mail: huihengyu@zju.edu.cn

(编辑 张颖)