

计及灵活性资源调控的低压台区可开放容量评估方法

周志恒¹, 张琳娟¹, 王晓冬², 罗潘², 韩军伟¹, 闫倩文^{3,4}, 王璐瑶^{3,4}

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 郑州 450000; 2. 国网河南省电力公司, 郑州 450000; 3. 华北电力大学自动化系, 河北 保定 071003; 4. 保定市博宏高科控制技术有限公司, 河北 保定 071000)

摘要: 分布式光伏、储能及电动汽车等灵活性资源广泛接入低压台区, 对台区可开放容量评估提出了新挑战。为此, 提出了一种计及灵活性资源调控的低压台区可开放容量弹性区间评估方法。首先, 建立了低压台区灵活性资源的数学模型, 分析其可调节潜力。其次, 基于灵活性资源优化调度并考虑不确定性因素, 构建了信息间隙决策理论(information gap decision theory, IGDT)的低压台区可开放容量弹性区间评估模型。最后, 通过不同台区算例仿真, 从电源接入与负荷接入两个维度分析了多种灵活性资源组合下的可开放容量弹性区间, 验证了模型的有效性。

关键词: 分布式光伏; 电动汽车; 优化调度; 弹性区间; 评估模型

Evaluation Method of Open Capacity of Low-Voltage Substation Considering Flexible Resource Regulation

ZHOU Zhiheng¹, ZHANG Linjuan¹, WANG Xiaodong², LUO Pan², HAN Junwei¹, YAN Qianwen^{3,4},
WANG Luyao^{3,4}

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute of Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China; 2. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China; 3. Automation Department of North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 4. Baoding Bohong High-Tech Control Technology Co., Ltd., Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: The widespread integration of flexible resources such as distributed photovoltaics, energy storage, and electric vehicles into low-voltage substations poses new challenges to the assessment of open capacity in substations. Therefore, an open capacity elastic interval evaluation method for low-voltage substation considering flexible resource regulation is proposed. Firstly, a mathematical model is established for the flexibility resources of the low-voltage substation and its adjustable potential is analyzed. Secondly, based on flexible resource optimal dispatch and considering uncertainty factors, an open capacity elastic interval evaluation model for low-voltage substation is constructed using information gap decision theory (IGDT). Finally, through simulations of different station areas, the open capacity elastic interval under various flexible resource combinations is analyzed from the perspectives of power supply and load access, and the effectiveness of the model is verified.

Key words: distributed photovoltaic; electric vehicle; optimal dispatch; elastic interval; evaluation mode

0 引言

近年来, 传统电力系统逐渐向分布式发展^[1],

低压台区作为连接用户与配电网的终端媒介, 将大量接入分布式光伏以及电动汽车、储能等多种灵活性资源。对低压台区可开放容量进行准确的评估是开展电源、负荷的常规接入以及临时接入等工作的基础。对灵活性资源的调节潜力进行挖掘将成为提升台区开放容量的重要手段^[2-4]。

在配电网可开放容量评估方面, 国内外已开展了诸多研究。传统的配网可开放容量评估多以电压

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62203172); 河南省电力公司科技项目(5217L0220001)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62203172); the Science and Technology Project of Henan Electric Power Company (5217L0220001).

不越限、电流不过载^[5]为约束条件,提出考虑线路、用户负荷响应能力以及 $N-1$ 安全的计算方法^[6-9]。现有研究开始聚焦于基于灵活性资源调控的可开放容量评估方法。文献[10]考虑用户侧储能的调节潜力设计了适用多场景的储能优化配置模型以提高可开放容量。文献[11]为提高分布式光伏的接入容量,采用综合需求响应模型和松弛技术评估了综合能源系统的接入能力。文献[12]充分利用空调、电动汽车用户的响应能力,改变单一对象的用电负荷,提出了基于馈线的开放容量评估模型。文献[13]针对分布式电源、负载等多个用户同时接入主动配电网多个节点的情况,建立了考虑多用户接入的主动配电网最大可开放容量优化模型。上述文献主要聚焦在区域级的分布式光伏承载能力或变电站以及10 kV以上线路的中高压配网层面,鲜有文献聚焦于低压台区的可开放容量测算,且上述研究成果在应用时仍须进一步考虑台区源、荷不确定性的影响。

目前,围绕能源系统优化调度问题已经出现了一些考虑源、荷不确定性的处理方法,例如随机优化^[14]、鲁棒优化^[15]、分布鲁棒优化、区间优化^[16]等方法。由于随机优化方法需要使用的概率密度函数难以准确获取,鲁棒优化方法可能会导致求解结果过于保守,分布鲁棒优化计算复杂度高,可能陷入局部最优解,区间优化方法需要预先确定变量取值范围,具有较强主观性。近年来,文献[17-18]提出了一种无需概率分布和置信区间的优化方法——信息间隙决策理论(information gap decision theory, IGDT),能在不确定量波动范围与概率分布均未知的情况下量化不确定性。目前,已有学者将IGDT用于能源系统优化问题,并取得了积极效果。文献[19]将能源系统的运行约束进行整合,考虑源荷双重不确定性,基于IGDT构建了综合能源系统优化调度的鲁棒模型和机会模型。文献[20]同时考虑分布式电源接入位置和出力的不确定性,将分布式电源容量评估模型进一步转化为含分布式电源接入位置最坏情况约束的改进IGDT模型。

整体来看,已有研究大多围绕中高压配网的可开放容量进行评估,很少涉及低压台区。另外,受天气、季节、用户行为等各种因素的影响,台区可开放容量存在一定的波动性,宜采用弹性区间方式表征可开放容量。本文提出了一种计及灵活性资源调控的低压台区可开放容量弹性区间评估方法。首

先,建立了台区下各类灵活性资源的数学模型并分析了其可调潜力;其次,考虑不确定性因素的影响建立了基于IGDT的可开放容量弹性区间评估模型,预测了台区可开放容量的区间上下限;最后,针对不同类型的低压台区从电源接入与负荷接入两方面评估了可开放容量弹性区间,并进行了对比分析。

1 低压台区灵活性资源数学模型

本文所研究的低压台区整体结构如图1所示。电源主要包括以光伏发电为代表的分布式能源,负荷主要包括基础电负荷以及电动汽车、储能系统等灵活性资源,该台区通过联络线与上级配电网连接。

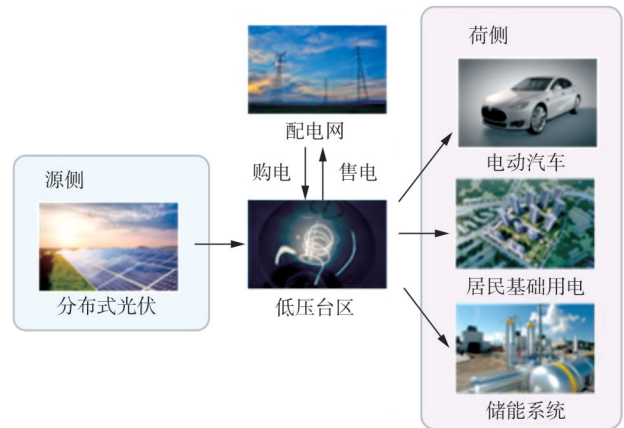


图1 低压台区系统结构

Fig. 1 System structure of low-voltage substation

1.1 分布式光伏出力特性分析

大量分布式光伏接入台区后会影响到台区系统的安全运行。对光伏出力特性进行分析可为开展灵活性资源调度、准确评估台区可开放容量提供依据。

分布式光伏出力具有随机性和间歇性主要受光照强度的影响。为表征光伏在某一时刻的功率输出,首先需要对光照强度进行刻画。

t 时刻光伏功率 P'_{pv} 与光照强度 λ_t 呈线性关系。

$$P'_{pv} = \lambda_t A \eta_{\lambda} \quad (1)$$

式中: A 为光伏阵列有效接收面积; η_{λ} 为光伏阵列转化效率。

通过Beta分布^[21]刻画 t 时刻光伏输出功率 P'_{pv} ,其概率密度函数 $f(P'_{pv})$ 如下。

$$f(P'_{pv}) = \frac{\Gamma(\theta + \beta)}{\Gamma(\theta)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P'_{pv}}{P'_{pv\max}} \right)^{\theta-1} \left(1 - \frac{P'_{pv}}{P'_{pv\max}} \right)^{\beta-1} \quad (2)$$

式中: $P'_{PV\max}$ 为 t 时刻光伏最大输出功率; θ 、 β 为概率分布参数; $\Gamma(\theta)$ 、 $\Gamma(\beta)$ 、 $\Gamma(\theta + \beta)$ 分别为 Gamma 函数在对应参数下的取值, 其组合构成了 Beta 分布的归一化常数。

不同季节下光照强度与温度有较大差异, 分布式光伏出力呈现季节特性, 其主要表现为夏季发电量大, 春秋季节发电量次之, 冬季发电量最小。采用分数不确定模型^[22]描述光伏不确定性, 不确定度 α 所对应的不确定变量集可表示为:

$$u \in U(\alpha, u) = \left\{ u: \left| \frac{u - \bar{u}}{\bar{u}} \right| \leq \alpha \right\}, \alpha \geq 0 \quad (3)$$

式中: u 为不确定变量; $\bar{u}$ 为不确定变量预测值; α 为不确定度; $U(\alpha, u)$ 为光伏出力的不确定集, 表示在给定不确定度 α 下实际出力 u 的可能取值范围。

1.2 电动汽车用电行为分析

电动汽车广泛接入居民台区后其无序充电将对台区用电负荷产生显著影响。由于电动汽车的接入时间、离开时间以及充电起始电量受车主行为特点的影响, 电动汽车集群负荷存在不确定性。根据调研居民区多以私家车为主, 故私家车用户的通勤时间决定了居民区电动汽车接入的集中时段在晚间 18:00 至次日 07:00, 充电高峰时段和车主通勤行为特征密切相关。

在无序充电背景下近似地认为用户充电起始时刻、结束时刻以及起始荷电状态 (state of charge, SOC) 服从正态分布^[23], 其概率密度函数如下。

$$f(t_a) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_a - \mu_a)^2}{2\sigma_a^2} \right], \mu_a - 12 \leq t_a \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_a + 24 - \mu_a)^2}{2\sigma_a^2} \right], 0 \leq t_a \leq \mu_a - 12 \end{cases} \quad (4)$$

$$f(t_1) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \right], 0 \leq t_1 \leq \mu_1 + 12 \\ \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_1 + 24 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \right], \mu_1 + 12 \leq t_1 \leq 24 \end{cases} \quad (5)$$

$$f(S_{EV}) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(S_{EV} - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (6)$$

式中: t_a 、 t_1 分别为开始/结束充电时刻; S_{EV} 为接入电网时的起始荷电量; $f(t_a)$ 、 $f(t_1)$ 、 $f(S_{EV})$ 分别为对应参数的概率密度函数; μ_a 、 μ_1 、 μ_s 为期望值; σ_a 、 σ_1 、 σ_s 为标准差。

1.3 分布式储能特性分析

在台区中配置一定量的分布式储能, 通过引导储能系统充放电可以降低负荷峰谷差从而提升台区可开放容量区间上下限。电储能系统在 t 时段末的

荷电状态 $S_{SOC}(t)$ 与 $t-1$ 时段末的荷电状态 $S_{SOC}(t-1)$ 、 t 时段的充放电功率 $P_{si}(t)$ 有关, 即:

$$S_{SOC}(t) = S_{SOC}(t-1) + \left(\frac{\eta_{si}^c + \frac{1}{\eta_{si}^d}}{2} P_{si}(t) + \frac{\eta_{si}^c - \frac{1}{\eta_{si}^d}}{2} |P_{si}(t)| \right) \quad (7)$$

式中: $P_{si}(t)$ 为 t 时刻储能系统充放电功率; η_{si}^c 、 η_{si}^d 分别为储能系统充放电效率; $S_{SOC}(t)$ 为 t 时刻储能系统荷电量。

1.4 居民基础负荷特性分析

居民负荷用能种类繁多, 难以集中控制, 用能行为存在多重不确定性。由于人们的生活习惯、出行规律不同, 日负荷峰值存在较大差异。受供暖、供冷负荷影响, 日负荷峰值主要呈现夏季和冬季大、春季和秋季小的波动趋势。以某典型台区为例, 其基础负荷曲线如图 2 所示, 居民负荷曲线整体呈现双峰趋势, 居民用电高峰主要集中在中午和晚上, 最大负荷一般出现在晚上 19:00 左右。中午用电负荷相对于全天用电负荷较高, 下午处于用电平段, 凌晨处于用电低谷。

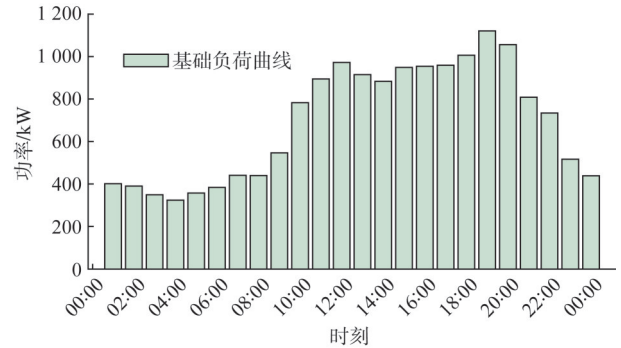


图2 居民区基础负荷柱状图

Fig. 2 Histogram of base loads in residential area

居民负荷的概率分布满足负荷曲线规律, 在此规律基础上利用 1.1 节所述分数不确定模型描述负荷预测的不确定性。

受负荷变化因素影响, 台区可开放容量也具有季节特性。本文选取居民冬季、夏季用电高峰月与春秋用电负荷低谷月作为典型月, 开展台区可开放容量弹性区间的讨论。

2 低压台区灵活性资源可调潜力分析

考虑低压台区系统的负荷侧, 针对电动汽车负荷和储能电负荷开展可调潜力分析, 为确定台区负荷的最大波动范围提供依据。

2.1 电动汽车可调潜力分析

电动汽车具有优良的可调节潜力。单辆电动汽车的充放电边界模型如图3所示,其中,斜率 k 表示电动汽车充放电功率值。电动汽车在 t_a 时刻到达后立刻以最大功率充电,直至 t_2 时刻满足预期电量,该过程的变化曲线为能量上界;电动汽车在 t_a 时刻到达后立刻以最大功率放电,直至 t_1 时刻达到最小允许电量,并在 t_3 时刻离网前以最大功率充电,保证 t_l 时刻离开时恰好达到用户离网时的期望荷电量 $S_{\text{SOC, EV}}^{\text{last}}$,该过程的变化曲线为能量下界;能量上下界之间区域为单辆电动汽车的可调范围。

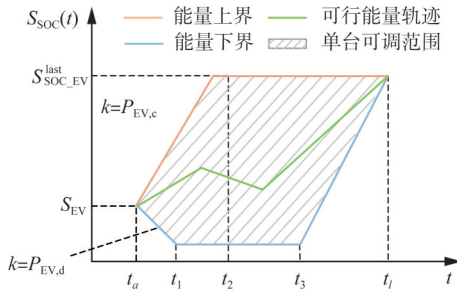


图3 单台电动汽车充放电边界模型

Fig. 3 Charge and discharge boundary model of a single electric vehicle

假设台区有100台电动汽车,均实施慢速充放电策略,结合上述电动汽车用电行为分析,利用蒙特卡洛模拟进行抽样,结合闵可夫斯基加法^[24]对个体电动汽车的决策空间进行叠加,生成集群电动汽车的调节上、下限以及无序充电曲线,结果如图4所示,阴影部分为集群电动汽车充放电的可调范围。

集群电动汽车中每一个体都在各自的能量边界内同时具备上调和下调的潜力。因此,对电动汽车进行有序充放电控制有助于台区分布式光伏消纳与负荷平滑,对提高台区可开放容量起到积极作用。

2.2 储能系统可调潜力分析

分布式储能具有灵活的充放电能力,可以在台区控制下进行充放电。通过模拟可用容量与可用功率可以获得储能系统的充电和放电调度潜力。在调度储能时其可用容量应满足以下约束条件。

$$E_{\text{str}}^- \leq E_{\text{str}} \leq E_{\text{str}}^+ \quad (8)$$

式中: E_{str} 为储能系统 i 荷电量; E_{str}^- 、 E_{str}^+ 分别为储能系统荷电量上下限。

可用功率应满足以下约束条件。

$$P_{\text{str}}^- \leq P_{\text{str}} \leq P_{\text{str}}^+ \quad (9)$$

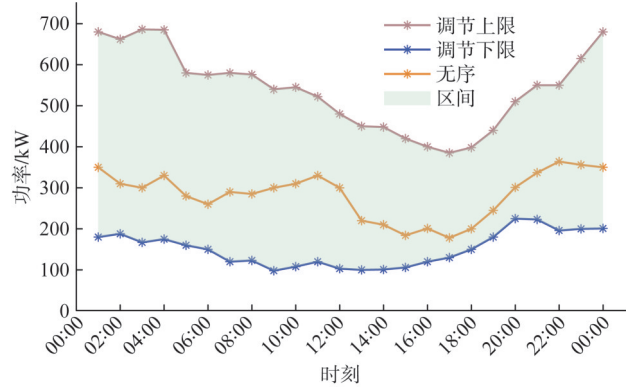


图4 集群电动汽车充放电边界模型

Fig. 4 Charge-discharge boundary model of cluster electric vehicles

$$P_{\text{str}}^+ = P_{\text{str}}^c \eta_{\text{str}}^c \quad (10)$$

$$P_{\text{str}}^- = P_{\text{str}}^d / \eta_{\text{str}}^d = P_{\text{str}}^d / \eta_{\text{str}}^d \quad (11)$$

式中: P_{str}^+ 、 P_{str}^- 分别为储能系统充放电功率上下限; P_{str}^c 、 P_{str}^d 分别为储能系统充放电功率。

通过研究储能系统在 $[0, t_0]$ 时间段内的运行状态可以得出储能系统的充、放电可调节潜力分别为:

$$E_{\text{str, c}} = E_{\text{str}}^+ - E_{\text{str}} \quad (12)$$

$$E_{\text{str, d}} = E_{\text{str}} - E_{\text{str}}^- \quad (13)$$

式中 $E_{\text{str, c}}$ 、 $E_{\text{str, d}}$ 分别为储能系统充放电剩余可用容量。

储能系统参与有序充放电调度,在负荷低谷时段充电,其功率上下限为正值,放电功率的上限明显降低,放电功率下限的可调节范围增大。通过储能的充放电变化实现对台区负荷的削峰填谷。

3 低压台区可开放容量评估模型

本文通过分析台区内灵活性资源的可调节潜力,提出了计及灵活性资源调控的台区可开放容量弹性区间评估模型。

3.1 基于IGDT的台区可开放容量评估

通过研究分布式光伏与灵活性资源的特性规律,明确了电源、负荷等资源调控对可开放容量的影响。考虑实际应用场景,本文从负荷接入与电源接入两个角度考虑台区可开放容量:接入负荷时负荷的可开放容量应考虑台区净负荷的上限;接入电源时需要考虑新能源消纳(支持台区向电网反送电),电源可开放容量应考虑台区净负荷的下限,并且以弹性区间形式表征低压台区可开放容量。其中,基于灵

活性资源调控的负荷可开放容量计算方法为:

$$F_{\text{open}}^{\text{load}} = F \times \omega - \max F_{\text{net}}^{\text{load}} \quad (14)$$

式中: $F_{\text{open}}^{\text{load}}$ 为台区的负荷容量; F 为台区额定容量; ω 为变压器负载率; $F_{\text{net}}^{\text{load}}$ 为台区净负荷, 即台区总负荷消纳光伏后剩余的用电负荷。

基于灵活性资源调控的电源可开放容量计算方法为:

$$F_{\text{open}}^{\text{PV}} = \min (F_{\text{sum}}^{\text{load}} - F_{\text{PV}}) = \min F_{\text{net}}^{\text{load}} \quad (15)$$

式中: $F_{\text{open}}^{\text{PV}}$ 为电源可开放容量; $F_{\text{sum}}^{\text{load}}$ 为台区总负荷, 在此考虑灵活性资源负荷与居民用电负荷; F_{PV} 为台区下分布式光伏发电功率。

本文所考虑的低压台区弹性可开放容量以一年中典型月为基础, 考虑台区年度中可能的最大净负荷与最小净负荷, 通过式(15)得到年度可开放容量的弹性区间。由于台区变压器的额定容量与负载率一定, 因此, 正确评估台区净负荷 $F_{\text{net}}^{\text{load}}$ 是可开放容量评估的关键, 故在此引入IGDT处理调度模型中的不确定性问题。

第1节利用分数不确定模型对光伏、负荷不确定性进行了描述, 引入了不确定度的概念; 为消除不确定度权重带来的主观性, 本文采用熵权法^[25]来计算光伏、负荷的不确定性权重, 得到各不确定性变量在总不确定度中所占的比重, 如式(16)所示。

根据不确定因素及决策者态度, IGDT分为风险规避和机会寻求2种策略^[26]。机会寻求策略认为源、荷的波动性能使调度朝经济有利的方向发展, 善于抓住不确定性带来的机会, 同时不确定性带来的风险增加, 故基于熵权法的机会寻求型IGDT模型如式(17)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} X_k = \{x_{k,1}, x_{k,2}, \dots, x_{k,T}\} \\ \hat{x}_{k,t} = \frac{\hat{x}_{k,t} - \min X_k}{\max X_k - \min X_k} \\ v_{k,t} = \frac{\hat{x}_{k,t}}{\sum_{t=1}^T \hat{x}_{k,t}} \\ H_k = -\ln(k)^{-1} \sum_{t=1}^T v_{k,t} \ln v_{k,t} \\ w_k = \frac{1 - H_k}{n - \sum_{k=1}^K H_k} \\ \alpha_k = w_k \alpha \end{array} \right. \quad (16)$$

式中: X_k 为评价指标集合, k 为评价指标序号, K

为评价指标数量; $x_{k,t}$ 为正向指标, $t=1, 2, \dots, T$, 其中 T 为调度时段数量; $\tilde{x}_{k,t}$ 、 $\hat{x}_{k,t}$ 分别为第 k 个指标在第 t 时段的预测值和标准化值; $v_{k,t}$ 为指标所占比重; H_k 为信息熵; w_k 为各指标权重; α 为总不确定度, α_k 为各指标在总不确定度中所占比重。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \alpha \\ \text{s.t. } f(X, u_1, u_2, \dots, u_k) \leq (1 - \delta_o) f_{\text{cr}} \\ h(X, u_1, u_2, \dots, u_k) = 0 \\ g(X, u_1, u_2, \dots, u_k) \leq 0 \\ P_{\text{load}}(t) = (1 - \alpha_{\text{load}}) \bar{P}_{\text{load}}(t) \\ P_{\text{pv}}(t) = (1 + \alpha_{\text{load}}) \bar{P}_{\text{pv}}(t) \\ \alpha_k \geq 0 \end{array} \right. \quad (17)$$

式中: X 为不确定变量; $h(\cdot)$ 、 $g(\cdot)$ 为模型约束; δ_o 为目标函数机会偏差因子; f_{cr} 为确定性模型下的目标函数; $P_{\text{load}}(t)$ 为 t 时刻居民用电负荷; $\bar{P}_{\text{load}}(t)$ 、 $\bar{P}_{\text{pv}}(t)$ 分别为居民用电负荷和光伏的预测值; α_{load} 、 α_{pv} 分别为居民用电负荷和光伏在总不确定度中所占比重; u_k 为第 k 类不确定变量。

风险规避策略的目的在于找到能满足预设目标的最大不确定性变量集, 从而规避不确定性带来的风险。风险规避模型往往通过增加成本来达到规避风险的目的, 故考虑不利扰动下的最大可接受成本为 $(1+\delta)f_{\text{cr}}$ 。为了保证最低预期目标的实现, 通常将不确定参数的不利扰动最大化, 故基于熵权法的风险规避型IGDT模型如式(18)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \alpha \\ \text{s.t. } f(X, u_1, u_2, \dots, u_k) \leq (1 + \delta_c) f_{\text{cr}} \\ h(X, u_1, u_2, \dots, u_k) = 0 \\ g(X, u_1, u_2, \dots, u_k) \leq 0 \\ P_{\text{load}}(t) = (1 + \alpha_{\text{load}}) \bar{P}_{\text{load}}(t) \\ P_{\text{pv}}(t) = (1 - \alpha_{\text{load}}) \bar{P}_{\text{pv}}(t) \\ \alpha_k \geq 0 \end{array} \right. \quad (18)$$

式中 δ_c 为目标函数鲁棒偏差因子。

将光伏、负荷的输出功率表述为区间变量, 如式(19)所示。

$$P((1 - \alpha) \bar{u} \leq u \leq (1 + \alpha) \bar{u}) = \int_{(1 - \alpha) \bar{u}}^{(1 + \alpha) \bar{u}} F(u) du = 1 - \sigma \quad (19)$$

式中: $1 - \sigma$ 为置信水平; $(1 - \alpha) \bar{u}$ 、 $(1 + \alpha) \bar{u}$ 分别为置信区间的上下限; $P(\cdot)$ 为输出功率满足约束条件的概率; $F(u)$ 为概率密度函数; $\bar{u}$ 为输出功率的预测值。由于实际值在预测值附近波动, 且波动幅度

有限, 故基于前述工作确定光伏、负荷的概率密度函数后即可确定在置信水平 $1-\sigma$ 下的光伏、负荷的合理不确定度。

3.2 目标函数

为使变压器台区下的可开放容量区间最大化, 需考虑在达到年度最大负荷与最小负荷时均实现可开放容量区间边界最大化, 故选择以最小化负荷峰谷差为优化目标, 通过调度优化台区内的灵活性资源, 求解典型月的最大可开放容量, 从而得到台区可开放容量弹性区间。台区下的负荷为居民用电负荷、电动汽车负荷、储能系统容量, 电源为分布式光伏, 以最小化台区净负荷峰谷差为目标, 构建目标函数 f 的约束条件如下。

$$\min f = \min \left(\max \left(P_{EV}(t) + P_{load}(t) + P_{str}(t) - P_{pv}(t) \right) - \min \left(P_{EV}(t) + P_{load}(t) + P_{str}(t) - P_{pv}(t) \right) \right) \quad (20)$$

式中: $P_{EV}(t)$ 为 t 时刻电动汽车充放电功率; $P_{si}(t)$ 为 t 时刻储能系统 i 充放电功率。

3.3 约束条件

在下列相关约束下建立基于 IGDT 的台区可开放容量弹性区间评估模型。

1) 运行成本约束

用户侧运行成本包括光伏和储能设备运维成本、低压台区与上级电网之间的购售电成本。

$$\min f = f_{pv} + f_{str} + f_{buy} \leq (1 + \delta) f_0 \quad (21)$$

式中: f_{pv} 、 f_{str} 、 f_{buy} 分别为光伏和储能系统 i 运维成本及从上级电网购电的成本; f_0 为确定性模型的运行成本。

$$f_{pv} = \sum_{t=1}^T C_{pv} P_{pv}(t) \quad (22)$$

$$f_{ess} = \sum_{t=1}^T C_{str} P_{str}(t) \quad (23)$$

$$f_{buy} = \sum_{t=1}^T \left(\frac{C_{buy}(t) + C_{sell}(t)}{2} P_g(t) + \frac{C_{buy}(t) - C_{sell}(t)}{2} |P_g(t)| \right) \quad (24)$$

式中: C_{pv} 、 C_{si} 分别为光伏和储能设备 i 的单位容量价格; $P_g(t)$ 为 t 时刻与电网交互功率; $C_{buy}(t)$ 、 $C_{sell}(t)$ 分别为 t 时刻购电与售电的分时电价, 本文取 1 h。

台区内可调度的灵活性资源主要为电动汽车负

荷及分布式储能, 对电动汽车进行调度需考虑满足其出行需求, 而分布式储能需考虑电池的使用寿命等因素, 以此设置约束条件。

2) 电动汽车约束条件

$$S_{soc}^{EV}(t) = S_{soc}^{EV}(t-1) + \left(\frac{\eta_{EV}^c + \frac{1}{\eta_{EV}^d}}{2} P_{EV}(t) + \frac{\eta_{EV}^c - \frac{1}{\eta_{EV}^d}}{2} |P_{EV}(t)| \right) \quad (25)$$

$$\underline{S}_{EV}^{SOC} \leq S_{EV}^{SOC}(t) \leq \overline{S}_{EV}^{SOC} \quad (26)$$

$$0.95 \times C \leq S_{EV}^{SOC, last}(t) \leq C \quad (27)$$

式中: η_{EV}^c 、 η_{EV}^d 分别为电动汽车充放电效率; C 为电动汽车电池容量; $S_{EV}^{SOC}(t)$ 为 t 时刻电动汽车电量; $\underline{S}_{EV}^{SOC}$ 、 $\overline{S}_{EV}^{SOC}$ 分别为电动汽车电量的上限和下限; $S_{EV}^{SOC, last}(t)$ 为离开时的期望电量。

3) 储能约束条件

在储能系统充放电全过程中对储能装置进行安全约束, 充放电功率与荷电量应控制在合理范围内, 并结合式(8)对储能系统荷电状态进行约束。

$$P_{str}^{min} \leq P_{str}(t) \leq P_{str}^{max} \quad (28)$$

$$S_{soc}^{min} \leq S_{soc}(t) \leq S_{soc}^{max} \quad (29)$$

$$S_{soc}(0) = S_{soc}(24) \quad (30)$$

式中: P_{str}^{max} 、 P_{str}^{min} 分别为储能系统充放电功率上下限; S_{soc}^{max} 、 S_{soc}^{min} 分别为储能系统荷电量上下限。

4 模型求解

本文采用基于 IGDT 的优化算法求解台区可开放容量弹性区间评估模型, 算法流程如图 5 所示。具体步骤为:

步骤 1: 以台区净负荷峰谷差最小为目标建立确定性模型, 将居民用电负荷、光伏发电功率的预测值代入确定性模型中进行优化, 求解得到满足要求的台区负荷值, 计算得到台区确定性优化模型运行成本, 并作为 IGDT 模型的基准值;

步骤 2: 在不超过预期运行成本的基础上, 结合相关约束, 求解源、荷的最大不确定度与偏差因子的关系;

步骤 3: 根据需要选取合适的不确定度值, 利用插值法处理上述获取到的对应关系, 得到该不确定度值对应的偏差因子;

步骤 4: 求解 IGDT 模型得到对应的运行成本, 负荷出力的波动程度以及调度计划, 求取考虑源、荷不确定性的台区最大可开放容量弹性区间。

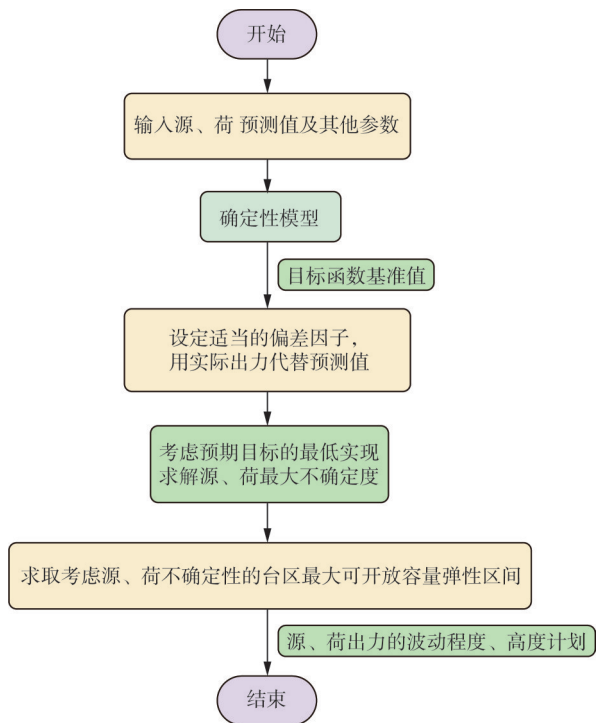


图 5 基于 IGDT 的台区可开放容量算法流程图
Fig. 5 Flow chart of the open capacity algorithm of the substation based on IGDT

5 算例分析

5.1 参数设置

本文对不同灵活性资源组合的台区进行算例仿真, 各台区参数设置如下。

- 台区 1: 仅包含电动汽车及居民用电负荷;
- 台区 2: 包含分布式光伏、电动汽车及居民用电负荷;
- 台区 3: 包含分布式光伏、储能及居民用电负荷。

本文只考虑以上设备的运行成本, 单个台区的额定容量为 2 500 kVA, 台区内负荷的运行均满足电压约束、电流约束, 为保证台区变压器不超载, 通常在台区正常运行工况下取负载率为 0.8; 分布式储能以 1 C 的倍率进行充/放电, 电动汽车与储能系统充放电效率均为 0.9; 储能电池损耗费用为 0.08 元/kWh, 分布式光伏的运行费用为 0.08 元/kWh; 所使用的具体参数如表 1—2 所示。

5.2 偏差因子对结果影响

考虑 200 辆电动汽车, 在不同偏差因子下各台区运行情况如表 3 所示, 利用式(17)—(18), 在满

表 1 配电网分时电价信息表

Tab. 1 Distribution network time-of-use price information table

时段	时间段	购电价 /(元·kWh ⁻¹)	售电价 /(元·kWh ⁻¹)
谷	01:00—08:00	0.36	0.24
平	13:00—16:00; 22:00—00:00	0.69	0.51
峰	09:0—12:00; 17:00—21:00	0.87	0.72

表 2 设备相关参数

Tab. 2 Equipment related parameters

设备	电量/kWh	功率/kW
光伏发电	1 400	
储能系统	380	[−80, 80]
电动汽车	50k	[−5, 5]

足相关约束基础上, 通过调整偏差因子的大小求解得到该偏差下源、荷的不确定度。由表 3 可知, 在风险规避策略下偏差因子与不确定度、运行成本呈正相关, 这是因为决策者认为在该偏差方向下不确定因素将对台区运行成本产生负面的影响, 不确定度越大则源、荷不确定性带来的风险越大, 因此台区运行成本越大; 在机会寻求策略下偏差因子与不确定度呈正相关, 与运行成本呈负相关, 这是因为当决策者从积极的角度出发, 会倾向于最大限度的抓住不确定性带来的积极影响, 存在机会使调度的运行成本低于基准值。由于台区源、荷的波动大多会使调度朝不利的方向发展, 故后续主要针对风险规避型策略展开分析。

为方便后续研究, 需统一不确定变量的波动范围, 以光伏、负荷的概率密度函数为依据, 分别得到在 0.98 和 0.97 的置信水平下所对应的不确定度为 0.05; 利用插值法对表 3 中偏差因子与不确定度的对应关系进行处理, 找到不确定度为 0.05 时对应的偏差因子为 0.03, 故后续均在偏差因子为 0.03 的基础上展开讨论。

图 6 为 200 辆电动汽车在不同偏差因子下的可开放容量区间对比, 在寻求风险规避的策略下, 随着偏差因子的增大可开放容量呈下降趋势, 以部分容量的损失换取台区整体的运行安全; 随着不确定度的增大该调度方法对不确定参数的波动响应越消极。受分时电价影响, 电动汽车受价格激励集中在谷电价时段充电, 导致 00:00—05:00 时的可开放

表 3 各台区不同偏差因子对比
Tab. 3 Comparison of different deviation factors in each

substation			
台区序号	偏差因子	不确定度	运行成本/元
台区 1	0	0	7 870
	风险规避	0.01	0.021 1
		0.03	0.049 2
		0.05	0.077 6
		0.077 6	8 163
	机会寻求	0	7 870
		0.01	0.013 4
		0.03	0.038 3
		0.05	0.071 2
		0.071 2	7 476
台区 2	0	0	3 925
	风险规避	0.01	0.025 8
		0.03	0.051 2
		0.05	0.074 9
		0.074 9	4 101
	机会寻求	0	3 925
		0.01	0.018 5
		0.03	0.043 2
		0.05	0.070 9
		0.070 9	3 729
台区 3	0	0	2 555
	风险规避	0.01	0.022 1
		0.03	0.050 7
		0.05	0.078 7
		0.078 7	2 662
	机会寻求	0	2 555
		0.01	0.012 2
		0.03	0.049 7
		0.05	0.075 6
		0.075 6	2 427

容量较小。

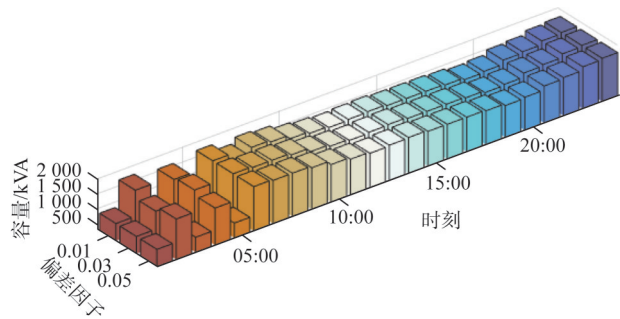


图 6 基于不同偏差因子的可开放容量

Fig. 6 Openable capacity based on different deviation factors

5.3 灵活性资源优化情况分析

因为电动汽车用户行为习惯的差异性会对台区实时负荷造成影响，且在实际调度过程中用户负荷无法做到完全响应，为了贴切实际，对用户侧负荷

不同的响应情况进行优化，探究灵活性资源对台区可开放容量的影响。考虑储能系统和不同数量电动汽车接入电网，灵活性资源优化前后的负荷情况如图 7 所示，不同优化方法设定情况为：1)优化前，即不考虑对灵活性资源进行调度；2)优化后/常规优化，即对灵活性资源进行负荷峰谷差最小的调度优化，且不考虑源、荷不确定性；3)IGDT 优化，即对灵活性资源进行负荷峰谷差最小的调度优化，且考虑源、荷不确定性的影响。

由图 7 可知，在优化前台区负荷呈现明显的峰谷趋势，私家车用户通常在 17:30—18:30 时回到居民区，立即开始充电，充电高峰时段和车主通勤、车辆运营时间息息相关，并且随着电动汽车数量的增加台区负荷也相应增加。优化后，私家车用户在早上 01:00—07:00 进行充电，使电动汽车充电负荷高峰转移至台区负荷谷时段，有效减少了台区总负荷的峰谷差。

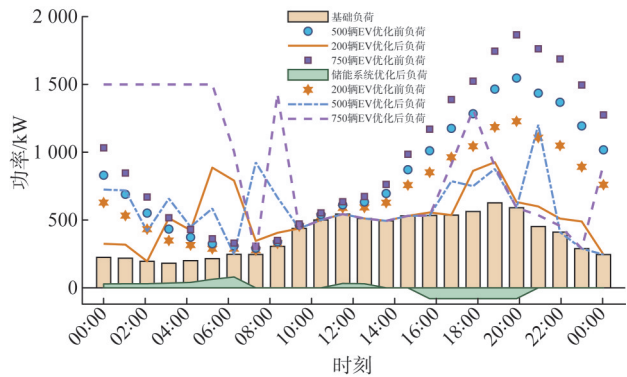


图 7 优化前后负荷情况

Fig. 7 Loads before and after optimization

储能系统优化后呈现负荷低谷期充电、负荷高峰期放电的趋势。考虑对灵活性资源进行调度的常规优化模型，得到的台区电动汽车负荷变化规律性与优化前模型不同，虽使部分时刻负荷高于优化前，但日最大负荷有所降低。而可开放容量下限为日内的可接纳容量下限，故在优化后台区可开放容量增大，验证了优化调度方法的有效性。

5.4 负荷可开放容量评估分析

考虑 200 辆电动汽车时，优化前后各台区可开放容量区间的具体数值如表 4 所示，基于前文建立的可开放容量评估模型计算得到台区优化前后可开放容量弹性区间。结果表明，台区负荷上下限在优化前后会有明显提升，可开放容量区间上、下限均

增大。在优化前电动汽车接入电网立即开始充电直至达到期望电量停止充电, 用户经济性差, 同时可开放容量区间受到巨大波动; 在常规优化调度中, 安排电动汽车在台区负荷压力较小的时段进行充电, 从而使日可开放容量增大, 但经济性较差; IGDT 调度中, 考虑实际灵活性资源出力波动, 通过增加成本降低不确定性带来的负面影响, 虽然可开放容量区间较常规优化调度有所下降, 但更具安全性, 调度效果更加稳定, 且成本增加控制在一定范围内, 经济性更好。

表 4 不同台区负荷可开放容量区间				
Tab. 4 Open capacity intervals of loads in different substations				
台区序号	优化方法	变压器容量/ kVA	可开放容量区 间/kVA	运行成本 /元
台区 1	优化前	2 500	[771, 1 723]	8 539
	常规优化		[1 073, 1 800]	7 870
	IGDT 优化		[963, 1 764]	8 026
台区 2	优化前	2 500	[771, 1 723]	5 218
	常规优化		[1 373, 1 818]	3 925
	IGDT 优化		[1 142, 1 769]	4 012
台区 3	优化前	2 500	[514, 1 627]	3 126
	常规优化		[1 089, 1 681]	2 555
	IGDT 优化		[807, 1 654]	2 607

不同电动汽车数量下, 考虑电源接入对台区可开放容量的影响情况, 如图 8 所示, 从各台区来看, 随着电动汽车数量的增加, 电动汽车接入带来的充放电负荷使台区可开放容量区间下界呈现减少趋势。纵向来看, 考虑电动汽车接入、离开电网的时间, 在电动汽车可调度时段, 采取台区负荷峰谷差最小的优化方法后, 整体可开放容量区间增大, 最小可开放容量大幅度提升, 避免了某时刻开放容量过小, 超出台区变压器承载力; 同时, 最大可开放容量也得到小幅提高, 为台区的安全运行提供了合理的调度方法; 其中, 加入电源的台区二可开放容量区间下界较台区一提升不少, 这是由于接入电源可以平衡部分用户负荷, 当电源功率超过台区负荷时, 负荷功率将完全抵消。

基于 IGDT 的电源接入对台区可开放容量区间的影响如图 9 所示, 可以看出, 随着资源负荷增加可调节的范围增大, 可开放容量弹性区间的提升效果越明显。值得注意的是, 考虑不确定性的 IGDT 方法可以提升台区负荷可开放容量区间上下限, 但

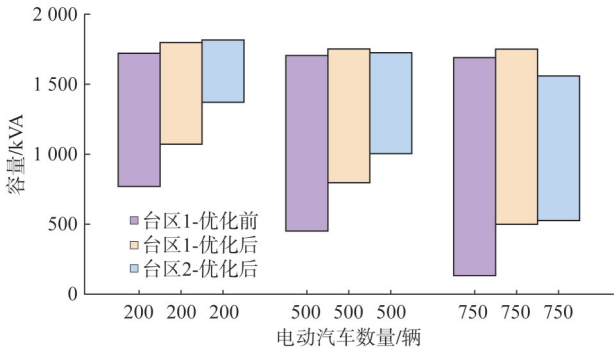


图 8 台区负荷可开放容量

Fig. 8 Open capacity of station load

效果比常规优化方法差。结合表 4 可以发现, 这是因为 IGDT-风险规避保证在负荷波动范围内使台区运行成本低于预期值, 故所求弹性区间范围, 既考虑在台区运行安全范围内实现可开放容量最大化, 又兼顾台区经济性。对于台区 2, 由于某时刻光伏出力大于负荷, 负荷消纳光伏有余, 则部分光伏可以上网。若没有达到最大上网量则还可以少量接入电源。台区分布式电源的接入量增加使得台区电源与负荷的可开放容量区间增大。

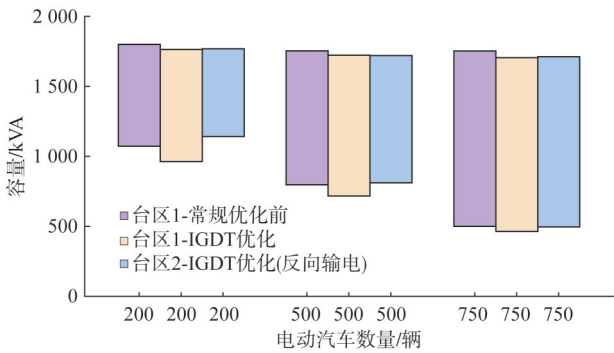


图 9 基于 IGDT 的台区负荷可开放容量

Fig. 9 Open capacities of substation loads based on IGDT

5.5 电源可接入容量评估分析

假设台区变压器向上级电网反向送电的最大容量为 200 kVA, 在负荷需求高于光伏出力时可以接入电源以平衡台区负荷。在负荷需求低于光伏出力时可以向电网反向送电, 台区只需考虑向电网的反送电限制。考虑 200 辆电动汽车时台区电源可开放容量区间的具体数值, 如表 5 所示。结果表明, 在使用 IGDT 优化方法时, 虽然电源可开放容量区间上下限小于常规优化, 但充分考虑了源、荷不确定性的影响, 赋予了可开放容量一定的裕度, 偏向更加安全的方式, 更具鲁棒性。

表 5 不同台区电源可开放容量区间

Tab. 5 Open capacities interval of power supplies in different

stations

台区序号	优化方法	上网容量/kVA	可开放容量区间/ kVA
台区 2	优化前	200	[0, 1 028]
	常规优化		[70, 1 163]
	IGDT 优化		[20, 1 109]
台区 3	优化前	200	[0, 671]
	常规优化		[50, 826]
	IGDT 优化		[18, 730]

考虑灵活性资源和分布式光伏的接入,台区可开放容量如图 10 所示,结合表 5 可以发现,台区三整体可开放容量区间小于台区二,但弹性区间均大于优化前。这是由于在现阶段低压台区的储能规模较小,与电动汽车负荷相比,虽起到一定的削峰填谷作用,但实际削减量和增加量有限。单一的储能负荷、电动汽车负荷与光伏出力特性结合,在光伏发电高峰时段出现反向送电现象。可以在满足上网电量约束的前提下增大分布式光伏的接入容量,通过调度电动汽车或储能负荷消纳新能源出力,从而实现台区可开放容量区间的增大。

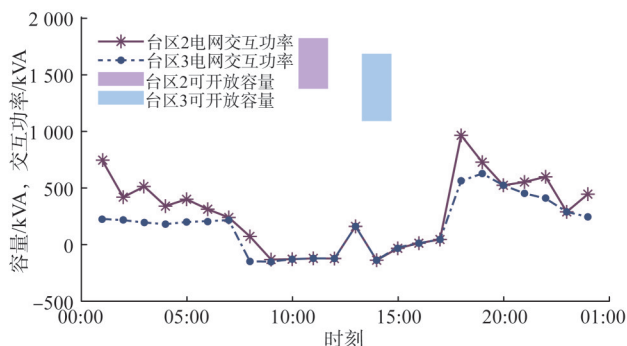


图 10 台区电源可接入容量

Fig. 10 Accessible capacities of power supplies in station area

考虑电源接入时,基于 IGDT 的不同灵活性资源下台区可开放容量区间如图 11 所示。台区三负荷可开放容量区间上、下限小于台区二。相较图 10 可以发现,IGDT 的鲁棒性使得可开放容量区间较常规优化有所减小,决策者对于光伏出力波动呈现消极态度,从而对台区优化采取更加保守的策略。

6 结论

为科学评估台区可开放容量,本文在传统中高

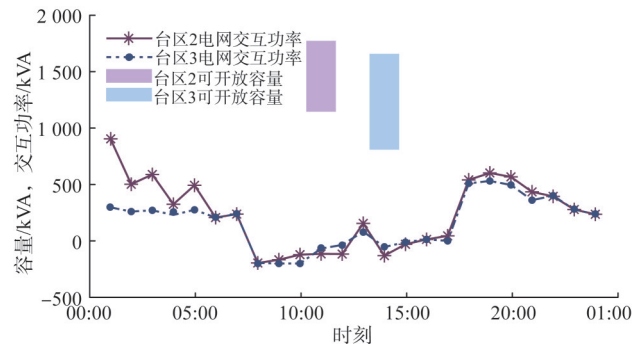


图 11 基于 IGDT 的台区电源可接入容量

Fig. 11 Accessible capacities of substation power supplies based on IGDT

压配网模型基础上构建了低压台区评估模型。建立了基于 IGDT 的台区可开放容量弹性区间评估方法,该方法计及灵活性资源调控,综合考虑用户侧运行成本和灵活性资源不确定性。通过算例分析验证了所提方法的有效性。本文主要结论如下。

1) 风险规避策略可以有效应对不确定性因素带来的消极影响,保障鲁棒性的同时有效控制成本;机会寻求策略则可以利用源、荷的不确定性,为台区带来更好的经济性。

2) IGDT-风险规避策略下偏差因子与不确定度、运行成本呈正相关,随着不确定度的增大,该调度方法对不确定参数的波动响应越消极,可开放容量呈下降趋势。

3) IGDT-风险规避策略下常规优化较优化前可开放容量区间上、下限均增大。IGDT 优化负荷可开放容量区间较常规优化有所下降,但调度效果更加稳定,经济性更好。

4) IGDT-风险规避策略下考虑向电网反向送电,IGDT 优化电源可开放容量区间上下限小于常规优化但赋予了可开放容量一定的裕度,偏向更加安全的方式,更具鲁棒性。

在后续研究工作中,本文将依据所提方法建立不同灵活性资源配置场景下的台区可开放容量样本库,并尝试利用机器学习方法建立预测模型,实现任意灵活性资源配置场景下的台区可开放容量预测,以提高所提方法应用的便捷性。

参考文献

- [1] JIANG Yibao, WAN Can, BOTTERUD A, et al. Efficient robust scheduling of integrated electricity and heat systems: a direct constraint tightening approach [J]. IEEE transactions on

- Smart Grid, 2021, 12(4):3016-3029.
- [2] 杨小磊,路轶,汤亚宸,等.考虑电力碳强度约束的主配协同可开放容量在线计算[J].供用电,2022,39(10):17-26.
YANG Xiaolei, LU Yi, TANG Yachen, et al. On-line calculation of Open capacity of main distribution coordination considering power carbon intensity constraint [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(10):17-26.
- [3] 王勇,王婷,岳园园,等.提升分布式光伏承载力的灵活资源协同规划[J].电网与清洁能源,2023,39(8):116-126.
WANG Yong, WANG Ting, YUE Yuanyuan, et al. Collaborative planning of flexible resources to enhance the carrying capacity of distributed photovoltaic [J]. Power System and Clean Energy, 2023,39(8):116-126.
- [4] 慕静茹,喻锐,曾祥君,等.考虑多扰动因子的含光伏电源低压台区漏电故障检测[J].南方电网技术,2024,18(10):130-141.
MU Jingru, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Leakage fault detection in low-voltage station area with photovoltaic power supply considering multi-disturbance factors [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10):130-141.
- [5] 颜湘武,王庆澳,卢俊达,等.计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度[J].电力系统保护与控制,2023,51(17):69-79.
YAN Xiangwu, WANG Qing'ao, LU Junda, et al. Micro-grid energy dispatching considering electric vehicles and flexible loads [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17):69-79.
- [6] 胡伟,杨梓俊,荆江平,等.计及 $N-1$ 安全和网络重构的配网可开放容量评估[J].现代电力,2020,37(2):125-132.
HU Wei, YANG Zijun, JING Jiangping, et al. Evaluation of distribution network open capacity considering $N-1$ security and network reconfiguration [J]. Modern Electric Power, 2020, 37(2):125-132.
- [7] 顾江,曹伟杰,王泽民.基于可开放容量计算的线路负荷预判分析[J].电工技术,2021(22):132-134.
GU Jiang, CAO Weijie, WANG Zemin. Analysis of line load prediction based on open capacity calculation [J]. Electrotechnical Technology, 2021(22):132-134.
- [8] 郑勇,孙明,曹照静,等.一种基于数据挖掘的馈线可装容量模型分析方法[J].现代电力,2018,35(2):64-70.
ZHENG Yong, SUN Ming, CAO Zhaojing, et al. An analysis method of feeder available capacity based on data mining [J]. Modern Electric Power, 2018,35(2):64-70.
- [9] 孙伟卿,黄福泉,张巍.考虑需求响应的馈线可开放容量评估[J].电力自动化设备,2021,41(6):156-165.
SUN Weiqing, HUANG Fuquan, ZHANG Wei. Evaluation of the open capacity of feeder considering demand response [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6):156-165.
- [10] 史林军,杨帆,刘英,等.计及社会发展的多场景用户侧储能容量优化配置[J].电力系统保护与控制,2021,49(22):59-66.
SHI Linjun, YANG Fan, LIU Ying, et al. Optimal allocation of energy storage capacity of multi-scenario users considering social development [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22):59-66.
- [11] 马红明,刘林青,谢海鹏,等.计及综合需求响应的电-热综合能源系统分布式光伏最大接入容量评估[J].智慧电力,2021,49(8):23-30.
MA Hongming, LIU Linqing, XIE Haipeng, et al. Evaluation of the maximum access capacity of distributed photovoltaic system with comprehensive demand response [J]. Smart Power, 2021, 49(8):23-30.
- [12] 陈群杰,卢炜,杨金豪,等.空调及电动汽车响应下馈线可开放容量评估[J].电力科学与工程,2022,38(8):63-71.
CHEN Qunjie, LU Wei, YANG Jinhao, et al. Evaluation of feeder opening capacity under the response of air conditioners and electric vehicles [J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(8):63-71.
- [13] XU Rui, CHEN Changming, CHEN Daxing, et al. Maximum openable capacity optimization method of active distribution network considering multiple users access [J]. Energy Reports, 2022, 8(S5):43-50.
- [14] 李咸善,李晨杰,张磊.氢耦合区域综合能源系统集群双层博弈随机优化调度策略[J].电力自动化设备,2023,43(12):238-247.
LI Xianshan, LI Chenjie, ZHANG Lei. Stochastic optimal scheduling strategy of two-level game for hydrogen-coupled regional comprehensive energy system cluster [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12):238-247.
- [15] 朱梦姝,方家琨,艾小猛,等.面向平稳氢气需求的综合制氢系统鲁棒优化配置方法[J].电力自动化设备,2023,43(12):62-69.
ZHU Mengshu, FANG Jiakun, AI Xiaomeng, et al. Robust optimal configuration method of integrated hydrogen production system for stable hydrogen demand [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12):62-69.
- [16] 胡荷娟,孙晓燕,曾博,等.考虑源-荷不确定性的矿山综合能源系统多时间尺度区间优化调度[J].控制与决策,2024,39(3):827-835.
HU Hejuan, SUN Xiaoyan, ZENG Bo, et al. Multi-time scale interval optimal scheduling of mine comprehensive energy system considering source-load uncertainty [J]. Control and Decision, 2024,39(3):827-835.
- [17] DAI Xuemei, LI Yaping, ZHANG Kaifeng, et al. A robust offering strategy for wind producers considering uncertainties of demand response and wind power [J]. Applied Energy, 2020, 279(1):115742.1-115742.6.
- [18] LI Junkai, GE Shaoyun, ZHANG Shida, et al. A multi-objective stochastic-information gap decision model for soft open points planning considering power fluctuation and growth uncertainty [J]. Applied Energy, 2022(317):119141.1-119141.8.
- [19] QU Meining, BAI Di. Optimal scheduling of integrated energy systems with carbon and hydrogen storage based on IGD [J]. Journal of Physics, 2023, 2563(1):012024.1-012024.10.
- [20] LI Junkai, GE Shaoyun, LIU Hong, et al. An improved IGD approach for distributed generation hosting capacity evaluation in multi-feeders distribution system with soft open points [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2023(154):109404.1-109404.9.
- [21] 张博,马梓耀,王辰,等.含光储充一体化电站的城市交直流混合配电网韧性提升策略[J].电力系统自动化,2023,47(12):28-37.
ZHANG Bo, MA Ziyao, WANG Chen, et al. Toughness improvement strategy of urban AC-DC hybrid distribution network with integrated optical storage-charging power station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12):28

- 37.
- [22] MEHDIZADEH A, TAGHIZADEGAENERGY D, SALEHI J. Risk-based energy management of renewable-based microgrid using information gap decision theory in the presence of peak load management [J]. *Applied Energy*, 2018 (211): 617 – 630.
- [23] 张卫国, 徐青山, 陈堃, 等. 考虑电价敏感用户行为的电动汽车虚拟电厂外特性 [J]. *高电压技术*, 2023, 49(4): 1372 – 1379.
- ZHANG Weiguo, XU Qingshan, CHEN Kun, et al. External characteristics of virtual power plant of electric vehicle considering the behavior of electricity price-sensitive users [J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(4): 1372 – 1379.
- [24] 边晓燕, 孙明琦, 董璐, 等. 计及灵活性聚合功率的源-荷分布式协调调度 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(17): 89 – 98.
- BIAN Xiaoyan, SUN Mingqi, DONG Lu, et al. Distributed coordination of source-load scheduling considering flexible aggregated power [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(17): 89 – 98.
- [25] HE Ning, QIAN Cheng, SHEN Chao, et al. A fusion framework for lithium-ion batteries state of health estimation using compressed sensing and entropy weight method. [J]. *ISA Transactions*, 2022, 135(135): 585 – 604.
- [26] 于雪菲, 张帅, 刘琳琳, 等. 基于信息间隙决策理论的碳捕集电厂调度 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(9): 1467 – 1473.
- YU Xuefei, ZHANG Shuai, LIU Linlin, et al. Scheduling of carbon capture power plants based on information gap decision theory [J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)*, 2022, 62(9): 1467 – 1473.

收稿日期: 2023-11-20; 网络首发日期: 2024-07-24

作者简介:

周志恒(1996), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力通信及智能化, 1015661878@qq.com;

张琳娟(1985), 女, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力通信及智能化, zlinj@163.com;

闫倩文(1999), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统优化, yqw1145930496@163.com。

(上接第 111 页 Continued from Page 111)

- [22] 刘欣博, 周元钧. 具有双级 LC 滤波器的恒功率负载系统在大扰动下的稳定性 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(27): 29 – 35.
- LIU Xinbo, ZHOU Yuanjun. Large signal stability criteria for constant power loads with double-stage LC filters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(27): 29 – 35.
- [23] 刘欣博, 周元钧, 张巍. 具有阻尼滤波器的恒功率负载系统在大扰动下的稳定性 [J]. *电工技术学报*, 2011, 26(S1): 154 – 160.
- LIU Xinbo, ZHOU Yuanjun, ZHANG Wei. Large Signal stability criteria for constant power loads with damped filters [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(S1): 154 – 160.
- [24] 厉泽坤, 孔力, 裴玮, 等. 基于混合势函数的下垂控制直流微电网大扰动稳定性分析 [J]. *电网技术*, 2018, 42(11): 3725 – 3734.
- LI Zekun, KONG Li, PEI Wei, et al. Large-disturbance stability analysis of droop-controlled dc microgrid based on mixed potential function [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(11): 3725 – 3734.
- [25] 王力, 谭振杰, 曾祥君, 等. 基于改进等效电路模型的直流微电网大信号稳定性分析 [J]. *电工技术学报*, 2024, 39(5): 1284 – 1299.
- WANG Li, TAN Zhenjie, ZENG Xiangjun, et al. Large-signal stability analysis for DC microgrids based on the improved equivalent circuit model [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(5): 1284 – 1299.
- [26] HUANG M, JI H, SUN J, et al. Bifurcation based stability analysis of photovoltaic-battery hybrid power system [J]. *IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics*, 2017, 5(3): 1055 – 1067.
- [27] XIE Wenqiang, HAN Minxiao, CAO Wenyuan, et al. System-level large-signal stability analysis of droop-controlled DC microgrids [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(4): 4224 – 4236.

收稿日期: 2023-12-21; 网络首发日期: 2024-05-22

作者简介:

李秋良(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网稳定性, 944584977@qq.com;

汤赐(1978), 男, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为能量管理、变流器优化, 1813354737@qq.com;

杨杰(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网优化运行, 576194590@qq.com。