

doi: 10.3969/j.ISSN.1672-0792.2021.01.001

# 信息间隙决策理论在电力系统中的应用

刘乾晖, 唐 岚, 杨乔丹, 杨 婧, 赵开联

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650000)

**摘要:** 信息间隙决策理论 (IGDT) 是一种以非概率性模型处理当前电力系统中因电价、出力、负荷等不确定性因素而导致电力系统呈现“奈特氏不确定性”的方法。该方法已应用于包含电力系统在内的多种需要处理不确定性的优化领域中。介绍了 IGDT 的基本理论、优化模型和决策偏好模型, 从系统规划、系统运行、电力市场 3 方面对 IGDT 在电力系统中的应用进行综述。根据网络规模的大小将电力系统分为微网、配网和电网, 对系统运行进行论述; 根据市场参与者的角度分为发电商、零售商、大用户与运营商 4 类, 对电力市场的相关工作进行比较。最后对 IGDT 在电力系统中的应用进行归纳与总结, 以期 IGDT 能得到更为广泛地应用。

**关键词:** 信息间隙决策理论; 系统规划; 系统运行; 电力市场; 应用

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1672-0792(2021)01-0001-15

## Application of Information Gap Decision Theory in Power System

LIU Qianhui, TANG Lan, YANG Qiaodan, YANG Jing, ZHAO Kailian

(College of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China)

**Abstract:** Information gap decision theory (IGDT) is a method using non-probabilistic model to deal with the “Knightian uncertainty” caused by factors such as electricity price, output and load in the current power system. This method has been applied to many optimization fields such as power system which needs to deal with uncertainty. The basic theory, optimization model and decision preference model of IGDT have been introduced in this paper. The application of IGDT in power system is summarized from three aspects: system planning, system operation and power market. According to the scale of the network, the power system has been divided into micro network, distribution network and power grid, and the operation of the system has been discussed. According to the perspective of market participants, the power system can be divided into four categories: generator, retailer, large user and operator, and the relevant work of the power market has been compared. Finally, the application of IGDT in power system is summarized in order to achieve the purpose that IGDT can be more widely used.

**Key words:** information gap decision theory (IGDT); system planning; system operation; electricity market; application

收稿日期: 2020-09-29

基金项目: 云南省重大科技专项计划项目 (202002AF080001)

作者简介: 刘乾晖 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与调度;

唐 岚 (1977—), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析、控制与智能电网。

## 0 引言

当前电力系统面临诸多挑战。其一，随着人们对电网经济性和安全性要求越来越高，众多学者提出了许多电力系统领域内新颖的理论，以及在运行方式上产生的诸多改变，使得传统电网的理论和运行方式受到了一定制约和冲击；其二，传统化石能源的消耗以及政府对新能源问题的持续关注，使得新能源进入人们的生活，其中最具发展潜力的是风能和太阳能。由于风力发电的间歇性和随机性，太阳能发电受季节、天气、光照强度等因素的影响，以风-光为代表的新能源设备实际出力难以预测，且该类设备在电力系统中渗透率越来越高，使传统的运行调度方式受到了一定的影响。

新能源发电设备出力难以预测的问题，本质上是要解决如何处理不确定性的问题。文献[1]对处理不确定性方法进行了归纳与总结，将现有新能源参与的电力系统处理不确定的方法分为两类：一类是考虑风电、光伏出力的极限情况，建立鲁棒优化模型，采用集合描述不确定性<sup>[2]</sup>。文献[3]指出在鲁棒模型中不确定集的建立可以更好地描述不确定性；文献[4]建立鲁棒模型处理风机出力的不确定性；文献[5]提出风电多场景的鲁棒备用调度模式与鲁棒经济调度模式，采用极端场景法定义风机最大/最小出力，并基于 Benders 分解思想构建算法验证鲁棒模型的特性，但只考虑了常规机组参与调度，对风电渗透率较高的系统，此方法可能无法得到可行解。另一类是根据新能源发电预测结果，采用随机优化法，利用不确定量的概率密度函数建立调度模型。随机优化是在给定约束条件成立概率的置信水平下对目标期望值的优化<sup>[2]</sup>；文献[6]假设风电出力随机性服从 Beta 分布函数，在此基础上引入弃风成本和可中断负荷成本，建立了多目标非线性机组组合模型<sup>[7]</sup>；文献[8]利用威布尔分布描述风速随机性，利用 Beta 分布描述光伏出力，并使用机会约束规划处理多随机变量。

上述两种处理不确定性的方法有其各自的局限性：鲁棒优化虽然可以保证不确定集内的元素都满足约束，提高了系统的可靠性，但会导致经

济性下降；随机优化法实现的目标是在概率上的最优，但对于分布式电源实际出力或实际负荷远超预测值的极端场景，其决策效果可能会超出决策者的承受范围，且处理不确定性往往依赖于不确定量的概率分布和历史数据，但在奈特氏不确定性（无法被衡量、不能被计算或然率的风险）下这些条件难以实现。在此前提下，信息间隙决策理论（information-gap decision theory, IGDT）可有效克服上述方法中的缺点：相对于鲁棒优化，虽然同属区间优化方法，但鲁棒优化的输入是置信区间，IGDT 的输入是预期成本或利润，可在保证系统鲁棒性的同时兼顾系统的经济性；相对于随机优化法，信息间隙决策理论无需历史数据和概率分布，且能够根据决策者的承受范围制定相应的决策。

信息间隙决策理论为处理不确定性问题提供了新的思路，该理论的实用性和有效性已在金融<sup>[9]</sup>、水文地质<sup>[10-11]</sup>、民生<sup>[12-15]</sup>、机械<sup>[16]</sup>等领域中得到检验。

本文首先介绍了 IGDT 优化模型和决策偏好模型，随后对 IGDT 在系统规划、系统运行、电力市场中的应用进行了分类与论述，最后对所做工作进行归纳与总结。

## 1 IGDT 理论

### 1.1 IGDT 简介

IGDT 是 Ben-Haim 于 2001 年提出的一种有效处理不确定性的非概率非模糊数学优化方法，由非概率模型发展而来<sup>[17]</sup>。图 1 为 SCI 科学引文数据库每年收录的以信息间隙决策理论为主题的文献数量。图 2 为 SCI 科学引文数据库每年收录将该理论应用于电力系统中的文献数量。从图中可以直观地看出以信息间隙决策理论为主题的文献数量以及 IGDT 在电力系统中的应用以近似线性的关系在逐年增加，且电力系统中的应用占总文献比例也在逐年提高。

信息间隙决策理论的作用是在满足预设目标的条件下，研究不确定参数可能造成的影响。信息指影响目标函数的不确定信息，利用间隙来定义已知与未知信息之间的差异，并在不确定模型中用中心的概念对不确定性事件进行聚类。该方

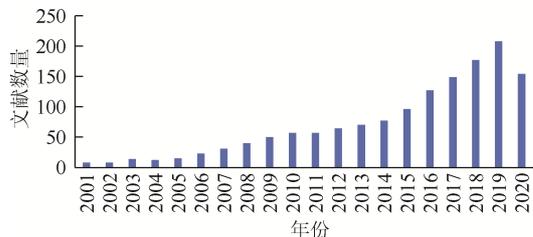


图 1 SCI 数据库中 IGDT 各年文献数量变化趋势图  
Fig. 1 Trend of literature quantity of IGDT in different years

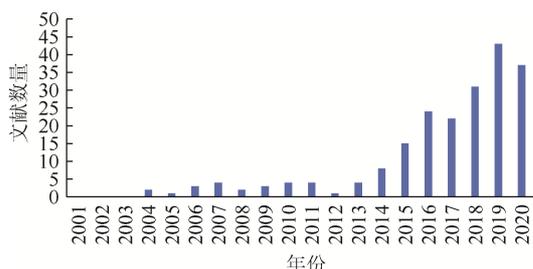


图 2 SCI 数据库中 IGDT 在电力系统中文献变化趋势图  
Fig. 2 Trend of literature quantity of IGDT in power system

法不需要知道不确定参数的详细概率分布, 只需要考虑变量的上下界, 建模相对简单。信息间隙决策理论表达了这样一种观点: 不确定性可能是有害的, 也可能是有利的。

### 1.2 IGDT 优化模型

建立 IGDT 优化模型需考虑 3 个要素: 系统模型、不确定模型以及性能要求<sup>[18]</sup>。

#### 1.2.1 系统模型

系统模型即在理想条件下系统运行时考虑等式、不等式约束的数学模型。

系统模型如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} f(x, \gamma) \\ \text{s.t.} & m(x, \gamma) = 0 \\ & n_{\min} \leq n(x, \gamma) \leq n_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f$  为目标函数;  $x$  为决策变量;  $\gamma$  为输入参数;  $m$ 、 $n$  分别为等式、不等式约束。

#### 1.2.2 不确定模型

当前文献中建立的不确定模型主要有 3 种: 包络约束模型 (envelope bound model)、椭球不确定模型 (ellipsoid bound model) 和加权均方误差模型 (weighted mean squared error model), 在实际应用中根据可用信息来决定集合的结构<sup>[19]</sup>。

以下 3 种模型中均假设不确定参数为  $\gamma$ ,  $\alpha$  表示参数  $\tilde{\gamma}$  的偏差系数。

#### (1) 包络约束模型

假设不确定参数预测值是  $\tilde{\gamma}$ , 有:

$$\begin{cases} \gamma \in U(\alpha, \tilde{\gamma}) \\ U(\alpha, \tilde{\gamma}) = \{\gamma : |(\gamma - \tilde{\gamma}) / \tilde{\gamma}| \leq \alpha, \alpha \geq 0\} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $U$  表示参数  $\gamma$  的波动范围, 即对于集合  $U(\alpha, \tilde{\gamma})$  中的  $\gamma$ , 其相对于预测值  $\tilde{\gamma}$  的最大扰动量为  $\pm\alpha\tilde{\gamma}$ 。

#### (2) 椭球不确定模型

椭球不确定模型于 90 年代由 Ben-Tal 和 Nemirovki 提出<sup>[20-21]</sup>, 假设不确定参数样本均值是  $\bar{\gamma}$ , 有:

$$U(\alpha, \bar{\gamma}) = \{\gamma : (\gamma - \bar{\gamma})^T C^{-1} (\gamma - \bar{\gamma}) \leq \alpha^2, \alpha \geq 0\} \quad (3)$$

式中:  $U$  表示参数  $\gamma$  的波动范围;  $C$  表示对称且正定的协方差矩阵<sup>[22]</sup>, 其中对角线元素表示方差的可变性, 非对角线元素表示不同不确定参数之间协方差的协变性, 强调了不同动态不确定参数之间的变化和相互关系, 该矩阵可从历史数据以及协同变化信息中获得。

或可表示为:

$$U(\alpha, \bar{\gamma}) = \{\gamma : \Delta\gamma^T C^{-1} \Delta\gamma \leq \alpha^2, \alpha \geq 0\} \quad (4)$$

其中  $\Delta\gamma = \gamma - \bar{\gamma}$ , 表示实际值与均值之间的偏差。

#### (3) 加权均方误差模型

假设不确定参数其预测值是  $\tilde{\gamma}$ , 有:

$$U(\alpha, \gamma) = \{\gamma : e^T W^{-1} e \leq \alpha^2, \alpha \geq 0\} \quad (5)$$

式中:  $U$  表示参数  $\gamma$  的波动范围;  $e = \gamma - \tilde{\gamma}$  表示实际值与预测值之间的偏差;  $W$  表示方差-协方差矩阵, 且该矩阵可由历史数据获得<sup>[23]</sup>。

对 3 种不确定模型的总结见表 1。

表 1 3 种不确定模型

Tab. 1 Summary of three uncertain models

	优点	缺点
包络约束模型	简单直观, 无需不确定参数的历史数据	-
椭球不确定模型	更能体现变量的差异性和差异性之间的关系	协方差矩阵要求不确定参数的历史数据
加权均方误差模型	可充分说明实际值和预测值之间的明显差异	方差-协方差矩阵需要不确定参数的历史数据

### 1.3 决策偏好模型

IGDT 表述了不确定性可能有害也可能有

利,针对这两种可能性进行量化,在基础模型上建立鲁棒(风险回避)模型和机会(机会获利)模型。

### 1.3.1 基础模型

基础模型是一种确定性模型,如式(1)所示,即假设不确定参数精准预测时的情况,求解基础模型并假设其结果为 $r_0$ 。

### 1.3.2 鲁棒模型

鲁棒(风险回避)模型的目标是最大化不确定度,即当不确定参数向对运行结果不利的方向波动且在波动程度最大时,决策者可以通过IGDT做出鲁棒性决策,使系统在此时具有抵抗波动或回避风险的能力。

鲁棒模型可表示为式(6)。

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}(x, r_c) &= \max \{ \alpha : f(x, \gamma) \leq r_c = (1 + \delta)r_0 \} \\ \hat{\alpha}(x, r_c) &= \max \{ \alpha : f(x, \gamma) \geq r_c = (1 - \delta)r_0 \} \end{aligned} \quad (6)$$

其含义为最大化不确定度的波动程度以获得最大的鲁棒性。式中: $\hat{\alpha}(x, r_c)$ 表示 $\alpha$ 的波动程度; $r_c$ 表示可接受的预设目标值,或可理解为场景的恶劣程度; $\delta$ 为用户参与因子,由决策者主观决定。

针对不确定性的波动情况,鲁棒模型通常认为实际波动为 $(1+\alpha)$ 。 $\hat{\alpha}(x, r_c)$ 越大,表示系统抵抗波动或回避风险的能力越强,但系统需付出更多的成本,导致经济性恶化。

### 1.3.3 机会模型

机会(机会寻求)模型将不确定性视为可使运行结果向有利方向发展,是“决策者对回报最狂野的梦想<sup>[24]</sup>”其目标是 minimized 不确定度,以获得不少于机会模型下最大的回报收益。即:当不确定参数向对运行结果有利的方向波动且在波动程度最小时,决策者可以通过IGDT做出机会性决策,使系统在此时可以获得最大的收益。机会模型如式(7)所示。

$$\hat{\beta}(x, r_w) = \min \{ \beta : f(x, \gamma) \geq r_w = (1 + \delta)r_0 \} \quad (7)$$

其含义为最小化不确定性的波动程度以获得最大的机会性。式中: $\hat{\beta}(x, r_w)$ 表示 $\beta$ 的波动程度; $r_w$ 表示预期收益。

针对不确定性的波动情况,机会模型通常认为实际波动为 $(1-\beta)$ 。 $\hat{\beta}(x, r_w)$ 越大,表示可能获得的收益越大,但系统面临的风险会随之变大。采用机会模型即代表接受可能面临的风险,所获收益通常大于风险成本。

### 1.3.4 鲁棒模型和机会模型比较

由前文所述,两种模型各有优缺点和适用性,如表2所示。

表2 两种模型比较

Tab. 2 Comparison of two models

模型	优点	缺点	适用场合
鲁棒模型	对波动容忍度高; 风险度低	经济性较差	决策者欲规避风险, 不追求利润最大
机会模型	经济性较好,可在预期成本下获得最大利润	对变量波动容忍度低; 风险度高	决策者欲寻求风险, 希望获得最大利润

## 2 在系统规划中的应用

从一般的配网、输电网到风电场或综合能源系统都属于系统规划问题的范畴。为了研究不确定性对规划问题的影响,通常会选择建立鲁棒规划模型,并得到相应的鲁棒规划策略。

文献[25]考虑了两类不确定(随机/非随机不确定)因素,并联合机会约束规划研究多周期微网扩展规划问题。其中,IGDT用于处理非随机不确定因素(负荷的长期增长),机会约束用于规划随机不确定因素(可再生能源出力和负荷的小时变化),建立鲁棒模型研究以投资成本和运行成本之和最低为目标函数的优化问题,并基于此问题提出强化双线性Benders分解方法进行简化求解;文献[26]搭建配网强化规划鲁棒模型,利用标准化正态约束法求解鲁棒模型并得到一系列帕累托解,最后采用后验失样分析法在帕累托解域内寻找最优解,研究了分布式发电机(distributed generator, DG)投资成本不确定下预期成本对配网强化规划的影响;文献[27]中不确定性来源于配网中的风、光、荷,以年投资成本最小以及电压波动改善最大为目标函数,建立鲁棒优化模型研究配网储能配置优化问题,该文献的特点在于消除求解过程中预先设定偏差因子选择的主观性,引入了分类概率机会约束,并采用基于非劣排序的负荷微分进化算法进行迭代求解;文献[28]针对输电网扩展规划问题,以多年规划期内增加输电线路花费总成本最小为目标函数,分别考虑投资成本和负荷需求的不确定性,建立鲁棒模型,研究预期成本对目标函数的影响,文献中使用大 $M$

线性化技术将建立的多目标混合整数非线性模型在不影响精确度的情况下有效线性化, 随后线性化后的目标函数利用增广  $\epsilon$  约束法解决多目标问题以得到一系列帕累托解, 最后基于拉丁超立方体抽样的后优化程序寻找最优帕累托前沿; 文献[29]计及一般不纳入考虑的燃料运输路径, 利用 IGDT 处理投资成本的不确定性, 以年等效成本最低为目标函数建立鲁棒模型, 考虑发电单元年等效淘汰成本和扩大燃料运输路径下鲁棒电力系统扩展(发电机组与输电线路)规划问题。

文献[26,28]在配网/输电网长期规划的基础上建立相应的鲁棒模型, 其特点在于求解模型之后的寻优过程, 采用不同的方法求取帕累托解, 并基于各自的精度要求选择了适应其特点的帕累托前沿。文献[30]首次建立规划、运行两阶段联合规划模型, 考虑长期规划中负荷增长的不确定性, 应用机会约束控制在短期规划中风电不确定的适应性, 建立含规划决策及运行评估两阶段的联合规划鲁棒模型, 以水平年系统负荷波动最大为目标函数, 研究了风电场及其配套设施的规划问题; 文献[31]首次研究区域综合能源系统的扩展规划问题, 其中利用 IGDT 处理长期规划中的负荷增长的不确定性, 将短期规划中的可再生能源出力视为预测准确量, 利用 CVaR 调节规划方案中的短期规划适应度, 建立鲁棒模型研究以总规划成本最低为目标函数的规划问题。

### 3 在系统运行中的应用

将 IGDT 应用于系统运行问题中, 可在缺乏历史运行数据的前提下有效解决出力不确定问题, 并可获得波动范围与预期成本之间的联系, 这对调度决策者而言具有重大参考意义。以网络规模作为切入点, 将运行问题分为微网<sup>[32-37]</sup>、配网<sup>[38-43,45-46]</sup>和电网<sup>[18,47-74]</sup>3 类。

#### 3.1 微网问题

IGDT 在微网问题中的应用主要有微网能源集线器<sup>[32-33]</sup>和孤岛微网<sup>[34-37]</sup>两个方面。

##### (1) 微网能源集线器

文献[32]联合能源集线器与热电冷三联供组成微型能源网, 利用 IGDT 理论制定以运行成本最小为目标函数的 R/O (robust/opportunity) 运行

策略, 并基于电价不确定着重研究了不同策略对能源曲线的影响; 文献[33]研究在包含多种能源转换器的多能源系统中的经济运行策略问题, 利用 IGDT 对负荷需求, 风、电、光伏 3 种不确定同时存在的系统进行建模, 随后利用增强定向搜索域法对所建多目标鲁棒模型进行求解, 最后提出概率后优化法对求解方法进行有效性评价, 同时还可利用该方法实现对系统鲁棒程度的微调。

##### (2) 孤岛微网

在微网孤岛运行状态下, 无惯性、小规模能源的利用会危害微网频率的稳定性。文献[34]考虑微网中不确定性, 基于 IGDT 建立鲁棒模型以研究不确定性对建立的能量频率分级管理系统在目标预算下的频率偏移的影响; 文献[35]以海岛型微网为研究对象, 同时考虑风电和光伏出力不确定性对微网容量的影响, 提出了一种根据目标重要程度赋予不同权重系数的线性化方法, 并据此建立了风险规避模型; 文献[36]针对孤岛微网建立了一种权重 IGDT 聚合能源管理系统, 将风机出力作为主要的不确定性来源并将运行成本作为目标函数, 不考虑短期运行中每个时间间隔的系统风险, 通过建立 R/O 模型, 赋予 IGDT 不同的权重系数来处理频率响应不足的问题; 文献[37]也针对孤岛微网进行研究, 考虑了发电(尤其是光伏)和需求两方面的不确定性, 利用 IGDT 建立了风险规避型能源管理系统, 研究不确定性对运行成本的影响。

#### 3.2 配网问题

在配网问题中, IGDT 的应用场景除配网能源集线器<sup>[38-40]</sup>与配网运行<sup>[41-43,45]</sup>外, 还有配网的停电恢复<sup>[46]</sup>问题。

##### (1) 配网能源集线器

文献[38]将 IGDT 应用于小区能源集线器, 只考虑能源需求不确定性, 把电动汽车作为可控负荷并使其参与能源优化中, 以耗费电能与天然气费用最低作为目标函数, 建立 R/O 模型, 基于算例求出不同运行情况时的运行成本; 文献[39]针对能源枢纽管理问题, 在考虑需求侧负荷需求不确定的情况下将系统运行成本作为目标函数, 利用 IGDT 的鲁棒模型建立能源集线器管理的鲁棒优化框架; 文献[40]研究在配网中安装集成智能能源集线器对优化运行的影响, 对于该文献中的

3种不确定影响因素,分别采用了3种方法进行处理(使用随机规划处理可再生能源、区间优化法处理电价、IGDT处理负荷需求),建立以总成本最小为目标函数的R/O模型进行研究。

### (2) 配网运行

文献[41]以含多个微网的配网短期运行为背景,使用最恶劣场景鲁棒优化法处理日前市场电价的不确定性、IGDT处理新能源出力以及负荷的不确定性,建立混合鲁棒IGDT分布模型研究不确定性对运行成本的影响;文献[42]考虑到低压配网中负荷不集中且存在不平衡,以及缺少网络监测设备而导致的不确定性对低压配网影响明显的问题,以低压配网运行作为研究背景,将负荷需求作为不确定来源,有功损耗最小作为目标函数建立鲁棒模型,并在有转换开关和分接头变换器存在的实际低压配网进行验证;文献[43]提出一种电动汽车有序充电的方式,基于DG出力(风电、光伏)不确定性并考虑电容器组及SVC运行约束的情况下,建立R/O模型研究主动型配网<sup>[44]</sup>以成本最小为目标函数的优化运行问题;文献[45]提出一种灵活有功分布系统,该系统可实现有功分布,系统运营商对每个分布式能源无功的控制,其目标是实现将DERs(distributed energy resource, DER)作为系统旋转备用时且在备用不确定下与输电网交互无功损失最小,建立R/O模型,随后采用多目标差分进化算法对模型进行求解

### (3) 停电恢复

文献[46]研究主动型配电网失电后在一对相矛盾的不确定性(DG出力和负荷需求)下的鲁棒负荷恢复问题,其目标是恢复尽可能多的失电负荷,且对于DG出力和负荷需求,通过求取帕累托前沿来获取决策者可接受的最优解。

## 3.3 电网问题

在电网问题中,包括电网调度<sup>[18,47-64]</sup>、潮流优化<sup>[65-69]</sup>、机组组合<sup>[70-73]</sup>与停电恢复<sup>[74]</sup>4个方面。其中电网调度可根据调度的范围分为自调度策略<sup>[18,47-53]</sup>与区域间调度策略<sup>[54-64]</sup>两种。

### (1) 电网调度

文献[18]以风电机组可获得的最小利润为目标函数,考虑风电出力和电力市场电价的不确定性,设置市场清算系数,建立风险规避模型,研究风力发电商可获利润最大的自调度策略;文献[47]

基于IGDT理论在市场清算价格不确定时,建立鲁棒模型研究发电商可获最大利润的自调度问题;文献[48]忽略战略性投标策略和机组强制退出所带来的利润损失,基于IGDT建立R/O模型,讨论了火力发电商在考虑市场电价不确定性下的风险约束自调度决策方法;文献[49]考虑短期市场中需求响应聚合的自调度问题,其中用户参与因子和市场电价作为不确定性的来源,预期利润为目标函数,研究在鲁棒决策下需求响应的两种模式(分时电价和基于奖励需求响应)对利润的影响;文献[50]建立R/O模型研究可再生能源出力不确定时有金融传输权的VPP(virtual power plants)获取利润的自调度问题,其中VPP同时参与日前市场与实时市场,且在其中扮演价格制定者的角色;文献[51]与传统IGDT理论的应用不同,传统IGDT理论在建模过程中通常只使用一种优化策略,但该文献在此基础上针对VPP自调度问题提出了多视域IGDT理论,同时考虑来自于电价、风机和负荷的不确定性,通过将短期规划划分为不同的时间间隔,选择不同的运行策略(风险避免、风险中性、风险寻求)以实现获得利润的最大化,建模之后利用增强归一化正态约束法求取帕累托解集,最后利用双向决策法对帕累托解进行寻优实现目标函数;文献[52]利用随机规划法处理电价不确定性,IGDT处理风光出力不确定,以虚拟电厂经济调度为目标函数,通过赋予风光出力偏差系数不同的权重,分别建立以实现利润最大为目标的R/O模型,该文献特点在于引入风险成本,量化不同决策方案面临的风险,可为决策者提供选择最优策略的参考;文献[53]通过将集中式太阳能发电厂纳入VPP,且同时考虑该系统中存在的3种不确定性:电价、集中式太阳能发电厂终端出力以及需求响应中的用户参与因子,建立R/O模型研究影响可获利润的调度策略问题。

文献[54]研究在风电场出力不确定时,将含有火电、水电、核电参与的多源联合机组纳入日前联合调度,分别建立鲁棒模型与机会模型研究以发电总成本最小为目标函数的运行调度问题;文献[55]针对风电爬坡事件“大规模”和“短时间”的特点,利用IGDT理论处理风机出力问题,建立最恶劣场景下的鲁棒调度模型,验证模型可行性

和经济性的同时, 给出了调度决策方案; 文献[56]针对风机出力不确定下的受电区域风电消纳和调峰问题, 建立区域间调峰互济模型, 引入弃风惩罚系数, 并基于 IGDT 理论对调峰互济模型进行改进, 可以得到具有更好风电消纳能力和经济性的鲁棒调度策略; 文献[57]在风机出力的不确定性下, 考虑风-储-电动汽车混合系统, 建立鲁棒模型, 研究以系统利润最大为目标函数的优化调度问题; 文献[58]面临来源于电网供需两侧的不确定性(供给侧风机; 需求侧需求响应), 以调度成本最小为目标, 建立 R/O 模型研究安全约束的经济调度问题, 其中。对于需求响应不确定问题模型的选择, 同时采用基于价格需求响应和基于激励需求响应两种方式建立相应需求响应模型; 文献[59]基于含风电能源中心的短期调度策略, 提出一种新的混合随机 IGDT 方法: 使用随机规划法处理风机出力和能源需求不确定, 使用 IGDT 方法处理市场电价不确定, 同时引入罚成本, 建立 R/O 模型研究电价变化对运行成本的影响, 这种新的混合方法继承了两种单一处理方法的优点, 即寻找全局最优解同时使计算负担小; 文献[60]研究了在市场电价不确定下电动汽车聚合对期望利润影响的调度策略, 该文献使用截断高斯分布法生成随机场景, 并利用 IGDT 建立 R/O 模型, 以实现在降低计算负担的情况下还可采用两种调度策略来应对价格波动, 值得一提的是该文献在建模过程中考虑了不同类型电动汽车的电池差异, 并选取了 5 种最具代表性的电动汽车进行研究; 文献[61]将光伏出力设为不确定来源, 提出一种具有热能回收能力且含汽轮机的太阳能三态压缩空气储能(three state compressed air energy storage, TS-CAES)装置, 含有 TS-CAES 的系统通过收集并提供热能、产生与存储电能来参与热能市场和电力市场, 建立 R/O 模型研究影响运营商利润的风险约束调度策略; 文献[62]将市场电价作为不确定性来源, 研究以最小充电成本为目标函数的电动汽车聚合智能充电调度问题, 在建立鲁棒优化模型后, 使用析取不等式法将优化模型中的双线性项线性化; 文献[63]提出一种在智能电力系统中预防/惩罚性电压控制方法, 以处理电力系统中因新能源出力和负荷不确定性所导致的系统调度成本变大问题, 建立 R/O 模型研究了风险规避策略

下不确定预算与调度计划的关系, 以及风险寻求策略下成本减小的可能性; 文献[64]研究了网架重构阶段中, 风电出力不确定对风电场出力调度计划的影响。

### (2) 潮流优化

文献[65]将线路换流器和电压源换流器加入海上风电场, 基于 IGDT 理论建立 R/O 模型, 研究风机出力不确定时考虑购电成本对潮流优化策略的影响; 文献[66]在指定需求响应灵活性指数下模拟高估和低估风机出力两种情景, 考虑分布式风力发电机出力的不确定性, 建立 R/O 模型, 通过分析线路中交流最优潮流分布, 基于 IGDT 研究线路中电压拥塞的问题; 文献[67]在风电出力不确定的条件下建立 R/O 模型研究电力系统多目标最优潮流问题, 使用加权和法处理多目标函数(燃料成本最小、电压偏移最小、无功最优), 并使之成为单等价目标函数; 文献[68]在多风电场出力不确定性下, 考虑电压稳定约束的最优潮流, 建立鲁棒模型研究期望负荷裕度与可接受成本的关系; 文献[69]研究非决定性最优潮流的问题, 以运行成本作为目标函数, 考虑负荷需求和风能不确定性下建立 R/O 模型, 随后利用定向搜索域法处理不确定模型并得到帕累托前沿, 最后采用一种非决定性方法对求解性能进行评价。

### (3) 机组组合

文献[70]以风电出力不确定时的系统运行成本最小为目标函数, 分别基于风险规避和风险寻求两种策略进行建模, 利用随机场景验证所得机组组合策略的实用性与可行性, 同时还分析了需求侧响应对风险规避和风险寻求两种策略的积极影响; 文献[71]联合考虑可再生能源与有并网能力的电动汽车, 以风机出力和负荷需求作为不确定因素, 将系统运行成本作为目标函数, 建立鲁棒模型研究具有鲁棒安全约束的机组组合问题, 在建立的模型中使用正交边界交叉(normal boundary intersection, NBI)法求取帕累托前沿, 并采用 VIKOR 法选取最优帕累托解; 文献[72]将锂离子电池作为能源储存系统引入有安全约束的机组组合问题中, 考虑负荷需求不确定的同时也将锂电池的电池退化成本纳入运行成本中, 建立鲁棒模型研究鲁棒运行策略对运行成本的影响; 文献[73]以风机的最优利用作为切入点, 实际解决

的是考虑安全约束的机组组合问题，其中的不确定来源是风机出力，将运行成本作为目标函数，并考虑需求响应、储能与传输转换等灵活能源建立鲁棒优化模型，最后利用 Benders 分解对所建模型进行优化求解。

#### (4) 停电恢复

文献[74]研究电网整体的负荷恢复，考虑负荷的不确定性，建立基于 IGDT 的鲁棒恢复优化模型，利用人工蜂群算法求解所提出的非线性规划问题，采用算例验证了模型的可行性，但不足之处是需要损失一部分负荷恢复量以保证恢复过程的安全，且未考虑负荷类型的差异性。

## 4 IGDT 在电力市场中的应用

电力市场中存在各种不确定性，如在发电商问题中市场电价以及竞争对手投标价格不确定，或大用户问题中大用户购电时联营市场电价不确定等。在缺乏历史数据参考的情况下研究电力市场中相关问题，鲁棒优化可以得到对价格波动免疫程度最高的决策，但无法保证发电商或投标方能够获得的利润；随机优化在一定区间内可以获得最高利润，但可能会导致成本超出决策者的接受范围。因此，在电力市场中，IGDT 有其独有的优势：免疫不确定性波动的同时，还可兼顾决策者的最大可接受成本或最小可获得利润。从市场参与者的角度将电力市场分为：发电商<sup>[75-87]</sup>、零售商<sup>[88-89]</sup>、大用户<sup>[90-95]</sup>以及运营商 4 方面。

### 4.1 发电商问题

在发电商问题中，可细分为发电商的电量分配<sup>[75-76]</sup>、投标策略<sup>[77-82]</sup>、机组组合<sup>[83]</sup>以及交易组合<sup>[84-87]</sup>4 个问题。

#### (1) 电量分配

文献[75]研究了发电商电量分配策略，采用 IGDT 理论描述电力市场中电价的不确定性，建立鲁棒模型保证在电价波动时，风险厌恶型发电商可以在双边合同、看跌期权和现货市场等交易中选择合理电量分配策略以获得预期收益；文献[76]中，发电公司所发电能可通过双边合同、日前市场以及平衡市场 3 种渠道售出，且将发电公司参与的两个市场中电价作为不确定参数，利用椭球不确定模型表示不确定参数，建立鲁棒模型研究 3

种售电方式所占不同权重对发电公司所获回报的影响。

#### (2) 投标策略

文献[77]在市场电价不确定时，以发电厂可获得利润为目标函数，分别建立鲁棒模型、机会模型，提出风险规避和风险寻求两种投标策略，研究不同策略对预期利润和竞标曲线的直接影响；文献[78]考虑竞争对手投标价格的不确定性，基于随机场景分别采用概率盒理论和 IGDT 理论搭建概率盒模型和 R/O 模型，以研究不同场景下不同模型对发电公司可获得利润的影响；文献[79]考虑日前市场电价的不确定性建立风险规避模型，以发电公司在联营市场和双边合同中可获取的利润为目标函数，得到对价格偏差具有鲁棒性的鲁棒投标策略；文献[80]在智能微网背景下研究多目标风险约束最优投标策略，以微网负荷和市场电价作为不确定来源，建立 R/O 模型研究不确定性对发电商日前利润影响的问题，随后采用 NBI 算法，以获得不确定性的相关帕累托前沿；文献[81]建立鲁棒模型，研究在需求响应下日前市场电价波动对发电公司可获得利润的影响，基于价格风险预测发电公司投标曲线，得出在风险约束下的投标策略；文献[82]研究在非合作电力市场环境下，基于数据驱动的分布能源聚合投标策略问题，与其他利用 IGDT 理论处理不确定性的文献不同，该文献使用数据驱动方法的模糊集处理风机出力的不确定性，IGDT 仅用于研究对风险的容忍度最大化问题。

#### (3) 机组组合

文献[83]考虑联营市场中现货市场的能源价格不确定性，基于 IGDT 理论建立热电联产机组的 R/O 模型，通过比较传统热力机组、热电联产机组、纯热机组 3 种情况下发电商可获得的利润，得到电力市场中热电联产机组最优组合策略。

#### (4) 交易组合

文献[84]考虑多重能源市场价格的不确定性（上游的燃料市场及 CO<sub>2</sub> 排放市场，下游的电力市场），考虑采用 R/O 两种优化策略，应用拉格朗日松弛方法将双层模型转变为单层优化模型，研究发电公司可获得利润最大的最优交易组合策略；文献[85]考虑联营市场电价和拥塞收费的不确定性，分别建立 R/O 模型研究市场收益不确定的

最优交易组合;文献[86]研究在多市场环境下发电公司参与3个市场(燃料市场、排放市场、电力市场)下的交易问题,在该问题中现货市场电价为不确定量,目标函数是总利润最大,且采取了风险避免型决策策略;文献[87]针对需求响应聚合交易框架下的风险寻求型决策者可获得最大利润的问题,以用户参与需求响应的程度作为不确定量,建立机会模型求解该问题,这也是该文献的最大特点。

#### 4.2 零售商问题

零售商在电力市场中通过从上游市场或所持有发电设备获取电能并向终端用户出售来获取利润,因此与零售商问题相关的主要有投标策略以及购电策略两种。

文献[88]中不确定性来源分为两部分:分布式发电机中的风、光出力以及市场电价不确定,以利润最大为目标建立鲁棒模型研究电力零售商的投标策略;文献[89]从远期合同、电网购电、自发电设备成本以及售电价格4个影响电力零售商收益的方面出发,考虑联营市场电价的不确定性,基于IGDT理论搭建中期决策R/O模型,使用外近似/等式松弛法求解混合整数非线性规划问题,研究零售商获利最大的最优购电策略。

#### 4.3 大用户问题

大用户在电力市场中往往扮演消耗电能的角色,市场电价的波动对大用户购电成本有很大影响,因此研究大用户购电问题是当前研究关注的终点。

文献[90]假设日前小时电价和购电成本服从联合正态概率分布函数,考虑市场电价的不确定性,基于IGDT理论建立鲁棒模型研究大用户购电时如何使成本最小的投标策略,并采用一阶可靠性方法构造投标曲线;文献[91]基于IGDT理论建立风险规避模型,利用遗传算法和经典优化方法处理风险-利润的最小、最大问题,在需求响应下考虑联营市场电价的不确定性,研究大型电力企业可获得利润的投标策略;文献[92]基于IGDT理论对大用户从电力市场、双边合同以及分布式电源中获得电能进行研究,考虑联营电力市场电价的不确定性,建立R/O模型得到在不同性能要求下的用户购电策略;文献[93]基于IGDT理论对大用户从电力市场、双边合同以及分布式电

源中获得电能进行研究,考虑市场电价的不确定性,建立鲁棒模型,以能源购买成本最低为目标函数,得到大用户购电策略,且利用加权均方差模型构造不确定模型;文献[94]以联营市场中的电价为不确定变量,考虑光伏-风电-储能-电网以及需求响应策略下的大型工业用户购电问题,以购电成本为目标函数建立R/O模型研究两种购电策略对成本的影响;文献[95]建立R/O模型研究在市场电价不确定情况下大用户购电成本最低的问题,在该文献中,作者使用了两种方法来描述目标函数:(1)使用加权均方差模型描述不确定性后,通过对建立的不确定性表达式进行数学推导,利用所得表达式对目标函数进行描述;(2)假设小时电价服从正态概率分布,利用正态概率分布形式进行描述。

#### 4.4 运营商问题

运营商问题中按参与者可分为大规模储能装置运营商<sup>[96]</sup>、微网运营商<sup>[97-99]</sup>、配网运营商<sup>[100-102]</sup>与联合运营商<sup>[103]</sup>4种。

##### (1) 大规模储能装置运营商

文献[96]将商用压缩空气储能装置(CAES)作为研究对象,基于R/O模型制定相应的运行策略,研究在电价不确定情况下CAES运营商采用不同运行策略对可获利润的影响,该文献特点在于所选用的储能装置与其他储能装置不同,CAES中还含有燃气轮机以防止出现空气能耗尽却无法供能的情况。

##### (2) 微网运营商

文献[97]以运营商可获利润作为目标函数并分别搭建鲁棒模型与机会模型,研究微网运营商(MGO)在市场电价不确定时的最优能源供给策略,其中利用IGDT处理不确定性所带来的风险,并基于所得策略使用博弈论评估用户对电价波动所产生的回应;文献[98]针对与电网相连的微网运行问题建模,其不确定来源为分布式电源中的可再生能源(风电、光伏)出力,以MGO运行成本最低为目标函数建立R/O模型,研究与之对应的两种策略对成本的影响;文献[99]研究有应急响应参与的微网中分布系统运营商获得利润最大化的问题,其中不确定性来源于发电机(风机、光伏)和电价,并基于IGDT建立目标为成本最小和社会福利最高的双层鲁棒优化模型。

### (3) 配网运营商

文献[100]考虑在整个市场电价不确定下,建立鲁棒模型研究智能配网中零售市场电价设置对配网运营商利润的影响,对建立的数学模型采用预测校正近端乘子算法进行求解;文献[101]提出配网运营商为满足用户对电能的需求,需从联营市场、分布式电源和双边合同3种渠道中获得充足的电能,分别考虑市场电价和负荷需求的不确定性,以购电成本最低为目标函数,基于IGDT理论为配网运营商提供鲁棒参考决策;文献[102]将电动汽车视为集成负荷,考虑电价波动的不确定性,应用椭球不确定集建立不确定模型,分别建立以集成运营商获得收益为目标的R/O模型,研究不同模型下电价变化对运营商所获利润的影响。

文献[103]联合天然气网络与电力系统,且将电力系统视为天然气网络的负荷,在满足电力系统所需电量后将剩余电量通过电力市场售出。以运行成本最低为目标函数建立R/O模型,研究在市场电价不确定时,联合天然气网络与电力系统运营商的可获利润问题。

## 5 总结与展望

本文对信息间隙决策理论在电力系统中的应用进行了综述,并基于系统规划、系统运行、电力市场3个应用场景对参考文献进行了分类与总结:在系统的规划和运行中,不确定性往往来源于新能源出力或负荷需求,由于其历史数据的匮乏,一般利用包络模型描述其不确定参数,而在电力市场中不确定性往往来源于价格波动,并且在电力市场中,参与者可能会涉及多个市场(如日前市场及平衡市场、电力市场及能源市场),因此在参与不同市场时电价可能会出现协同变化的趋势,或决策者需要在多种选择之间进行抉择,因此除最简单直观的包络集外,还可利用椭球不确定集、加权均方误差集两种方式建立不确定模型;从规划周期的角度来看,在电力市场和系统运行场景中,对电价、新能源出力亦或负荷需求的预测一般以日前预测,日前调度为主,因此都属于短期规划的问题,但在系统规划场景中,规划通常以中期或长期为主。

随着智能电网、信息物理系统、综合能源系

统等新概念的提出与应用,使电力系统对能量与信息流动的要求更加精准,因此,可有效处理其中不确定因素的IGDT会有更大的应用前景,且已有部分文献将该理论应用其中。且随着如需求响应、储能装置、电动汽车等新型负荷应用于电力系统的场景越来越多,仅需考虑单一不确定性对电力系统影响的场景越来越少,优化模型逐渐复杂,表现出典型非凸的特点,传统数学优化法在解决该类问题上的精度不尽如人意。因此,在一般信息间隙决策理论上混合或引入其他方法理论,如混合随机GDT方法、混合机会约束IGDT方法或引入博弈论,会为求解含不确定性电力系统提供新的研究思路。

### 参考文献:

- [1] SOROUDI A, AMRAEE T. Decision making under uncertainty in energy systems: state of the art[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 28: 376-384.
- [2] 梅生伟, 郭文涛, 王莹莹, 等. 一类电力系统鲁棒优化问题的博弈模型及应用实例[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(19): 47-56.  
MEI SHENGWEI, GUO WENTAO, WANG YINGYING, et al. A game model for robust optimization of power systems and its application[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(19): 47-56(in Chinese).
- [3] 魏韡, 刘锋, 梅生伟. 电力系统鲁棒经济调度(一)理论基础[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(17): 37-43.  
WEI WEI, LIU FENG, MEI SHENGWEI. Robust and economical scheduling methodology for power systems part: (one) theoretical foundations[J]. *Power System Automation*, 2013, 37(17): 37-43(in Chinese).
- [4] 杨甲甲, 赵俊华, 文福栓, 等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(13): 92-102.  
YANG JIAJIA, ZHAO JUNHUA, WEN FUSHUAN, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs for plug-in vehicles and wind generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(13): 92-102(in Chinese).
- [5] 徐秋实, 邓长虹, 赵维兴, 等. 含风电电力系统多场景鲁棒调度方法[J]. *电网技术*, 2014, 38(3): 653-661.  
XU QIUSHI, DENG CHANGHONG, ZHAO WEIXING, et al. A multi-scenario robust dispatching method for

- power grid integrated with wind farms[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(3): 653-661(in Chinese).
- [6] 孙欣, 方陈, 沈风, 等. 考虑风电出力不确定性的发用发电机组组合方法[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(4): 204-211.  
SUN XIN, FANG CHEN, SHEN FENG, et al. An integrated generation-consumption unit commitment model considering the uncertainty of wind power output[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(4): 204-211(in Chinese).
- [7] 潘昭旭, 刘三明, 王致杰, 等. 基于信息间隙决策理论的含风电电力系统调度[J]. *电力建设*, 2018, 39(9): 87-94.  
PAN ZHAOXU, LIU SANMING, WANG ZHIJIE, et al. Dispatch based on information gap decision theory for power system with wind power[J]. *Electric Power Construction*, 2018, 39(9): 87-94(in Chinese).
- [8] 范松丽, 艾芊, 贺兴. 基于机会约束规划的虚拟电厂调度风险分析[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(16): 4025-4034.  
FAN SONGLI, AI QIAN, HE XING. Risk analysis on dispatch of virtual power plant based on chance constrained programming[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(16): 4025-4034(in Chinese).
- [9] BERLEANT D, ANDRIEU L, ARGAUD J P, et al. Portfolio management under epistemic uncertainty using stochastic dominance and information-gap theory[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2008, 49(1): 101-116.
- [10] HIPE K W, BEN-HAIM Y. Decision making in an uncertain world: information-gap modeling in water resources management[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C(Applications and Reviews)*, 1999, 29(4): 506-517.
- [11] KORTELING B, DESSAI S, KAPELAN Z. Using information gap decision theory for water resources planning under severe uncertainty[J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(4): 1149-1172.
- [12] SISSO I, SHIMA T, BEN-HAIM Y. Info-gap approach to multiagent search under severe uncertainty[J]. *IEEE Transaction on Robotics*, 2010, 26(6): 1032-1041.
- [13] MCCARTHY M A, LINDNMAYER D B. Info-gap decision theory for assessing the management of catchments for timber production and urban water supply[J]. *Environmental Management*, 2007, 39(4): 553-562.
- [14] BEN-HAIM Y, ZETOLA N M, DACSO C C. Info-gap management of public health policy for TB with HIV-prevalence[J]. *BMC Public Health*, 2012, 12(1): 1091-1091.
- [15] DYLAN R H, VELIMIR V V. Contaminant remediation decision analysis using information gap theory[J]. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2013(27): 159-168.
- [16] HU JUNMING, HUANG HONGZHONG, LI FEIYANG. Reliability growth planning based on information gap decision theory[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, (133): 1-10.
- [17] BEN-HAIM Y. Info-gap decision theory[M]. San Diego, CA: Academic, 2001.
- [18] MORADI DALVAND M, MOGAMMADI-I B, AMJADYN N, et al. Self-scheduling of a wind producer based on information gap decision theory[J]. *Energy*, 2015(81): 588-600.
- [19] BEN-HAIM Y. Information gap decision theory: decisions under severe uncertainty[M]. San Diego, CA USA: Academic, 2006.
- [20] BEN-TA L A, NEMIROVSKI A. Robust convex optimization[J]. *Mathematics of Operations Research*, 1998, 23(4): 769 -805.
- [21] BEN-TA L A, NEMIROVSK A. Robust solutions of uncertain linear programs[J]. *Operations Research Letters*, 1999, 25(1): 1-3.
- [22] GUAN Y P, WANG J H. Uncertainty sets for robust unit commitment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014, 29(3): 1439-1440.
- [23] JOHNSTON J. *Econometric Methods*[M]. New York, McGraw-Hill Book Co, 1972.
- [24] BEN-HAIM Y. Decision certification with information-gap uncertainty[J]. *Structural Safety*, 1999 (21): 269-289.
- [25] CAO XIAOYU, WANG JIANXUE, ZENG BO. A chance constrained information-gap decision model for multi-period microgrid planning[J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2018, 3(33): 2684-2695.
- [26] AHMADIGORJI M, AMJADY N, DEHGHAN S. A Robust model for multiyear distribution network reinforcement planning based on information-gap decision theory[J]. *IEEE Transaction on Power Systems*, 2018, 33(2): 1339-1351.
- [27] 彭春华, 陈露, 张金克, 等. 基于分类概率机会约束 IGDT 的配网储能多目标优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(9): 2809-2819.  
PENG CHUNHUA, CHEN LU, ZHANG JINKE, et al. Multi-objective optimal allocation of energy storage in distribution network based on classified probability chance constraint information gap decision theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2809-2819(in Chinese).
- [28] DEHGHAN S, KAZEMI A, AMJADY N. Multi-objective robust transmission expansion planning

- using information-gap decision theory and augmented  $\epsilon$ -constraint method[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2014, 8(5): 828-840.
- [29] MAVALIZADEH H, ADMADI A, GANDOMAN F H, et al. Multi-objective robust power system expansion planning considering generation units retirement[J]. *IEEE Systems Journal*, 2018, 13(3): 2664-2675.
- [30] 李昀昊, 王建学, 曹晓宇, 等. 面向风电场-储能-输电网联合规划的机会约束 IGDT 模型[J]. *电网技术*, 2019, 43(10): 3716-3724.
- LI YUNHAO, WANG JIANXUE, CAO XIAOYU, et al. A chance-constrained IGDT model for joint planning of wind farm, energy storage and transmission[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(10): 3716-3724(in Chinese).
- [31] 王祺, 王承民, 谢宁, 等. 混合 CVaR-IGDT 的区域综合能源系统扩展规划模型[J]. *电网技术*, 2020, 44(2): 505-515.
- WANG QI, WANG CHENGMIN, XIE NING, et al. A hybrid CVaR-IGDT expansion planning model for regional integrated energy system[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(2): 505-515(in Chinese).
- [32] SAYYAD N, KASRA S, KAZEM Z. Risk-based performance of combined cooling, heating and power(CCHP) integrated with renewable energies using information gap decision theory[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 159: 1-16.
- [33] RAHMANI S, AMJADY N. Optimal operation strategy for multi-carrier energy systems including various energy converters by multi-objective information gap decision theory and enhanced directed search domain method[J]. *Energy Conversion Management*, 2019, 198: 1-14.
- [34] REZAEI N, AHMADI A, KHAZALI A, et al. Energy and frequency hierarchical management system using information gap decision theory for islanded microgrids[J]. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2018, 65(10): 7921-7932.
- [35] 张皓, 荆朝霞. 基于 IGDT 模型的海岛型微网容量鲁棒优化[J]. *自动化与仪器仪表*, 2017(7): 59-62.
- ZHANG HAO, JING ZHAOXIA. Robust optimization of island microgrid capacity based on IGDT model[J]. *Automation & Instrumentation*, 2017(7): 59-62(in Chinese).
- [36] MOHAMAD-AMIN NASR, EHSAN NASR-AZADANI, HAMED NAFISI, et al. Assessing the effectiveness of weighted information gap decision theory integrated with energy management systems for isolated microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(8): 5286-5299.
- [37] NASR M A, NASR-AZADANI E, NAFISI H, et al. Risk-averse energy management system for isolated microgrids considering generation and demand uncertainties based on information gap decision theory[J]. *IET Renew Power Gener*, 2019, 13(6): 940-951.
- [38] 张华一, 文福拴, 张璨, 等. 考虑能源需求不确定性的居民小区能源中心运行策略[J]. *电力建设*, 2016, 37(9): 14-21.
- ZHANG HUAYI, WEN FUSHUAN, ZHANG CAN, et al. Operation strategy for residential quarter energy hub considering energy demands uncertainties[J]. *Electric Power Construction*, 2016, 37(9): 14-21(in Chinese).
- [39] JAVADI M S, ANVARI-MOHAMMAD A, GUERRERO J M. Robust energy hub management using information gap decision theory[C]// *IECON 2017- 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Beijing: IEEE, 2017: 410-415.
- [40] MAJID M, KAZEM Z. Integration of smart energy hubs in distribution networks under uncertainties and demand response concept[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(1): 566-574.
- [41] ABOLI R, RAMEZANI M FALAGHI H. A hybrid robust distributed model for short-term operation of multi-microgrid distribution networks[J]. *Electric Power Systems Research*, 2019, 177: 1-13.
- [42] ALISON O, ALIREZA S, ANDREW K. Distribution network operation under uncertainty using information gap decision theory[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(3): 1848-1858.
- [43] 石文超, 吕林, 高红均, 等. 基于信息间隙决策理论的含 DG 和 EV 的主动配电网优化运行[J]. *电力建设*, 2019, 40(10): 64-74.
- SHI WENCHAO, LV LIN, GAO HONGJUN, et al. Optimization operation of active distribution network with DG and EV applying IGDT[J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(10): 64-74(in Chinese).
- [44] D'ADAMO C, JUPE S, ABBEY C. Global survey on planning and operation of active distribution networks: update of CIGRE C6. 11 working group activities[C]// *20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. Prague: IET, 2009.
- [45] ZHAO TIANYANG, ZHANG JIANHUA, WANG PENG. Flexible active distribution system management considering interaction with transmission networks using information-gap decision theory[J]. *CESS Journal of Power and Energy Systems*, 2016, 2(4): 76-86.
- [46] 陈柯宁, 吴文传, 张伯明, 等. 基于 IGDT 的有源配电网鲁棒恢复决策方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(19): 3057-3062.
- CHEN KENING, WU WENCHUAN, ZHANG

- BOMING, et al. A robust restoration decision method for active distribution network based on IGDT[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3057-3062(in Chinese).
- [47] KAVIANI R, RASHIDINEJAD M, ABDOLLAHI A. A MILP. IGDT-based self-scheduling model for participating in electricity markets[C]// 2016 24<sup>th</sup> Iranian Conference on Electrical Engineering(ICEE). Shiraz: IEEE, 2016: 152-157.
- [48] MOHAMMADI I B, ZAREIPOUR H, AMJADY N, et al. Application of information gap decision theory to risk-constrained self-scheduling of GenCos[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2): 1093-1102.
- [49] VAHID-GHAVIDEL M, MAHMOUDI N, MAHMOUDI-IVATLOO B. Self-scheduling of demand response aggregators in short-term markets based on information gap decision theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2115-2126.
- [50] GAZIJAHANI F S, SALEHI J. IGDT based complementarity approach for dealing with strategic decision making of price maker VPP considering demand flexibility[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(4): 2212-2220.
- [51] YAZDANINENEJAD M, AMJADY N, DEHGHAN S. VPP self-scheduling strategy using multi-horizon IGDT, enhanced normalized normal constraint and bi-directional decision-making approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3632-3645.
- [52] 孙国强, 周亦洲, 卫志农, 等. 基于混合随机规划/信息间隙决策理论的虚拟电厂调度优化模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 112-118.
- SUN GUOQIANG, ZHOU YIZHOU, WEI ZHINONG, et al. Dispatch optimization model for virtual power plant based on hybrid stochastic programming and information gap decision theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 112-118(in Chinese).
- [53] ZHAO YUXUAN, LIN ZHENZHI, WEN FUSHUAN, et al. Risk-constrained day-ahead scheduling for concentrating solar power plants with demand response using info-gap theory[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(10): 5475-5488.
- [54] 汪超群, 韦化, 吴思缘. 基于信息间隙决策理论的多源联合优化机组组合[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3431-3440.
- WANG CHAOQUN, WEI HUA, WU SIYUAN. Multi-power combined unit commitment based on information gap decision theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3431-3440(in Chinese).
- [55] 马欢, 刘玉田. 基于 IGDT 鲁棒模型的风电爬坡事件协调调度决策[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4580-4588.
- MA HUAN, LIU YUTIAN. IGDT robust model-based coordinated scheduling strategy for wind power ramp events[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4580-4588(in Chinese).
- [56] 马洪艳, 韩笑, 严正, 等. 鲁棒性驱动的含风电不确定性区域间调峰互济方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 28-36.
- MA HONGYAN, HAN XIAO, YAN ZHENG, et al. Robustness driving reciprocal peak-regulation trading method of inter-regional grids containing wind power uncertainty[J]. Automation of Electric Power System, 2017, 41(7): 28-36(in Chinese).
- [57] SUN BO, LI SIMIN, XIE JINGDONG, et al. IGDT-based wind-storage-EVs hybrid system robust optimization scheduling model[J]. Energies, 2019, 12: 1-13.
- [58] DAI XUEMEI, WANG YING, YANG SHENGCHUN, et al. IGDT-based economic dispatch considering the uncertainty of wind and demand response[J]. IET Renew Power Generation, 2019, 13(6): 856-866.
- [59] DOLATABADI A, JADIDIBONAB M, MOHAMMADI-IVATLOO B. Short-term scheduling strategy for wind-based energy hub: A hybrid stochastic/IGDT approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 438-448.
- [60] ALIASGHARI P, MOHAMMADI-IVATLOO B, ABAPOUR M. Risk-based scheduling strategy for electric vehicle aggregator using hybrid Stochastic/IGDT approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 248: 1-11.
- [61] JADIDIBONAB M, MOUSAVI-SARABI H, MOHAMMADI-IVATLOO B. Risk-constrained scheduling of solar-based three state compressed air energy storage with waste thermal recovery unit in the thermal energy market environment[J]. IET Renew Power Generation, 2019, 13(6): 920-929.
- [62] PRANJAL J K, VERMAN P P, KHEMKA V, et al. et al. Uncertainty handling for Electric Vehicle aggregator using IGDT[C]// 2018 20<sup>th</sup> National Power Systems Conference(NPSC). Tiruchirappalli : IEEE, 2018.
- [63] KHAZALI A, REZAEI N, AHMADI A, et al. Information gap decision theory based preventive/corrective voltage control for smart power systems with high wind penetration[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(10): 4385-4394.
- [64] 刘昌盛, 谢云云, 王晓丰, 等. 基于 IGDT 的网架重构过程中风电场出力调度[J]. 电力工程技术, 2019,

- 38(3): 27-33.
- LIU CHANGSHENG, XIE YUNYUN, WANG XIAOFENG, et al. Power dispatching based on IGDT for wind farms participating in power system restoration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3): 27-33(in Chinese).
- [65] RABIEE A, SOROUDI A, KEANE A. Information gap decision theory based OPF with HVDC connected wind farms[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting. Denver: IEEE, 2015: 1-11.
- [66] MURPHY C, SORUDI A, KEANE A. Information gap decision theory based congestion and voltage management in the presence of uncertain wind power[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting. Boston: IEEE, 2016.
- [67] AYVAZ A, GENÇ V M I. Information gap decision theory based multi-objective OPF for a power system with wind energy resources[C]// 2019 7th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG). Istanbul: IEEE, 2019: 228-232.
- [68] RABIEE A, NIKKHAH S, SOROUDI A. Information gap decision theory for voltage stability constrained OPF considering the uncertainty of multiple wind farms[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(5): 585-592.
- [69] RAHMANI S, AMJADY N. Non-deterministic optimal power flow considering the uncertainties of wind power and load demand by multi-objective information gap decision theory and directed search domain method[J]. IET Renew Power Generation, 2018, 12(2): 1354-1365.
- [70] SOROUDI A, RABIEE A, KEANE A. Information gap decision theory approach to deal with wind power uncertainty in unit commitment[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 145: 137-148.
- [71] AHMADI A, ESMAEEL NEZHAD A, SIANO P, et al. Information-gap decision theory for robust security-constrained unit commitment for joint renewable energy and gridable vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 3064-3075.
- [72] AHMADI A, NEZHAD A E, HREDZAK B. Security-constrained unit commitment in presence of lithium-Ion battery storage units using information-gap decision theory[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(1): 148-157.
- [73] NIKOOBAKHT A, AHAEI, J. IGDT-based robust optimal utilization of wind power generation using coordinated flexibility resources[J]. IET Renew Power Generation, 2017, 11(2): 264-277.
- [74] 宋坤隆, 谢云云, 陈晞, 等. 基于信息间隙决策理论的电网负荷恢复鲁棒优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 113-120.
- SONG KUNLONG, XIE YUNYUN, CHEN XI, et al. Robust restoration method for power system load based on information gap decision theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 113-120(in Chinese).
- [75] 赵琛, 张少华. 基于信息间隙决策理论的发电商电量分配策略[J]. 控制与决策, 2017, 32(4): 751-754.
- ZHAO CHEN, ZHANG SHAOHUA. Generation asset allocation strategies based on IGDT[J]. Control and Decision, 2017, 32(4): 751-754(in Chinese).
- [76] MATHURIA P, SINGH A. Robust self scheduling framework for GenCos with portfolio optimization[C]// 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston: IEEE, 2016.
- [77] NOJAVAN S, ZARE K, FEYZI M R. Optimal bidding strategy of generation station in power market using information gap decision theory(IGDT)[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 96: 56-63.
- [78] CHEONG M P, BERLEANT D, SHEBLE G B. Information gap decision theory as a tool for strategic bidding in competitive electricity markets[C]// International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Ames, IA: IEEE, 2004: 421-426.
- [79] KAZEMI M, MOHAMMDI-IVATLOO B, EHSAN M. IGDT based risk-constrained strategic bidding of gencos considering bilateral contracts[C]// 21st Iranian Conference on Electrical Engineering(ICEE). Mashhad: IEEE, 2013: 1-6.
- [80] REZAEI N, AHMADI A, KHAZALI A, et al. Multiobjective risk-constrained optimal bidding strategy of smart microgrids: An IGDT-based normal boundary intersection approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1532-1543.
- [81] KAZEMI M, MOHAMMDI-IVATLOO B, EHSAN M. Risk-constrained strategic bidding of gencos considering demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 376-384.
- [82] LI BOSONG, WANG XU, SHAHIDEHPOUR M, et al. DER aggregator's data-driven bidding strategy using the information gap decision theory in a non-cooperative electricity market[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6756-6767.
- [83] AGHAEI J, AGELIDIS V G, CHARWAND M, et al. Optimal robust unit commitment of CHP plants in electricity markets using information gap decision theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2296-2304.

- [84] MATHURIA P, BHAKAR R. GenCo's integrated trading decision making to manage multimarket uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(3): 1465-1474.
- [85] MATHURIA P, BHAKAR R. Info-gap approach to manage GenCo's trading portfolio with uncertain market returns[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(6): 2916-2925.
- [86] MATHURIA P, BHAKAR R. IGDT based genco's trading decision making in multimarket environment[C]// 2014 IEEE PES General Meeting, Conference & Exposition. National Harbor, MD: IEEE, 2014.
- [87] VAHID-GHAVIDEL J, CATALAO P S, SHAFIE-KHAH M, et al. IGDT opportunity method in the trading framework of risk-seeker demand response aggregators[C]// *IEEE Milan Power Tech. Milan: IEEE*, 2019.
- [88] XUE MILIANG, ZHAO CHEN, ZHANG SHAOHUA. Application of information-gap decision theory to robust optimization for electricity retailers[C]// 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Xi'an: IEEE, 2016: 161-165.
- [89] CHARWAND M, MOSHAVASH Z. Midterm decision-making framework for an electricity retailer based on information gap decision theory[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2014, 63: 185-195.
- [90] ZARE K, MOHAMMAD M P, ESLAMI M K S E. Demand bidding construction for a large consumer through a hybrid IGDT-probability methodology[J]. *Energy*, 2010, 36(3): 2999-3007.
- [91] KAZEMI M, MOHAMMDI-IVATLOO B, EHSAN M. Risk-based bidding of large electric utilities using information gap decision theory considering demand response[J]. *Electric Power Systems Research*, 2014, 114: 86-92.
- [92] ZARE K, MOGHADDAM M P, MOHAMMAD S E. Electricity procurement for large consumers based on information gap decision theory[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 234-242.
- [93] ZARE K, CONEJO A J, CARRION M, et al. Multi-market energy procurement for a large consumer using a risk-aversion procedure[J]. *Electric Power Systems Research*, 2010, 80(1): 63-70.
- [94] BAGAL H A, SOLTANABAD Y N, DADJUO M, et al. Risk-assessment of photovoltaic-wind-battery-grid based large industrial consumer using information gap decision theory[J]. *Solar Energy*, 2018, 169: 343-352.
- [95] ZARE K, MOHAMMAD M P, SHEIKH-EI-ESLAMI M K. Risk-based electricity procurement for large consumers[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(4): 1826-1835.
- [96] SHAFIEE S, ZATEIPOUR H, KNIGHT A M, et al. Risk-constrained bidding and offering strategy for a merchant compressed air energy storage plant[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2): 946-957.
- [97] DEHGHAN S, KHOJASTEH M, MARZBAND M, et al. Optimal energy providing strategy of micro-Grid's operator based on a game theoretical approach[C]// 2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). Thessaloniki: IEEE, 2018: 104-109.
- [98] BAHRAMARA S, MAFAKHHERI R, SHEIKHAHMADI P, et al. Information gap decision theory-based approach for modeling operation problem of a grid-connected micro-grid with uncertainties[C]// 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). Porto: IEEE, 2019.
- [99] GAZIJAHANI F S, SALEHI J. Game theory based profit maximization model for microgrid aggregators with Presence of EDRP using information gap decision theory[J]. *IEEE System Journal*, 2019, 13(2): 1767-1775.
- [100] FENG KUO, ZHOU HONG, LIU ZHIWEI, et al. Retail market pricing design in smart distribution networks considering whole sale market price uncertainty[C]// *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Beijing: IEEE, 2017: 5968-5973.
- [101] SOROUDI A, EHSAN M. IGDT based robust decision making tool for DNOs in load procurement under severe uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(2): 886-895.
- [102] ZHAO JIAN, WAN CAN, XU ZHAO, et al. Risk-based day-ahead scheduling of electric vehicle aggregator using information gap decision theory[J]. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2017, 8(4): 1609-1618.
- [103] SOHRABI F, JABARI F, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Coordination of interdependent natural gas and electricity systems based on information gap decision theory[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2019, 13(15): 3362-3369.