

综合能源系统不确定性分析综述与展望^①

周丹^② 蒋达 朱嘉炜 张琦 朱元龙

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

摘要 综合能源系统(integrated energy system, IES)内存在的多种不确定性因素,使得系统实际规划与运行面临各种风险,给系统安全、稳定、经济运行带来了诸多不利影响。如何削弱或消除不确定因素对综合能源系统的影响,是综合能源系统领域的重要研究内容之一。首先,本文对综合能源系统中分布式能源、负荷、交通以及能源价格等多种不确定性因素产生机理进行分析,并研究其对综合能源系统的影响;其次,重点对场景法、点估计法、区间分析法、模糊分析法以及不确定集等多种不确定性分析方法进行介绍,并详细阐述这些方法在综合能源系统能源预测、负荷预测、潮流计算、能源市场、系统规划、经济调度以及稳定控制等领域的研究情况。最后,对未来综合能源系统不确定性研究中需要关注的问题进行了展望,以期为综合能源系统不确定性研究提供参考。

关键词 综合能源系统;不确定性建模;场景法;点估计法;区间分析法

由于能源结构和经营管理体制设定等原因,电力、天然气以及冷热等能源系统传统上采取单独规划、单独设计、单独运行的原则,导致不同能源系统之间协调能力弱、能源整体利用率难以进一步提升等问题^[1-2]。社会经济的不断发展,从能源利用率、环境保护、能源使用成本等多个方面对国家能源体系的改革和建设提出了更高的要求,综合能源系统(integrated energy system, IES)就是在这一背景下被提出并成为我国能源体系发展的主要方向之一。而对包含冷-热-电-气-交通等多种能源形式的综合能源系统进行统一协调规划和运行成为了综合能源系统发展的关键环节^[3]。相较于单一供能系统,综合能源系统中拥有多种转换装置如冷热电联产机组、电制冷机、电转气(power to gas, P2G)、充电桩等,使得电力、冷热、天然气和交通之间紧密耦合,实现了多能源之间互联互通、相互转换,提高了系统整体运行效率以及经济性^[4-5]。但由于综合能源系统内可再生能源发电、冷热电负荷以及能源价格等不

确定性因素的影响,要实现综合能源系统协调规划和运行并对其进行进一步优化存在着一定挑战^[6]。

在相关研究中,部分文献只是简单地将不确定性因素用确定性模型来表示,虽然该方法能够降低计算的复杂度,但牺牲了模型精确度,极大地影响了系统优化计算的结果。文献[7]指出若利用确定值来处理系统内存在的不确定性因素,则无法真实反映其对系统规划、调度和运行的影响。文献[8]指出,系统优化调度中若忽略不确定性对系统的影响,可能导致所得最优解与实际最佳运行点不符。因此在对综合能源系统进行研究时,忽略不确定因素的存在已经无法满足现有能源系统目标需求^[9]。

为此,针对分布式能源、负荷、交通以及能源价格等不确定性因素如何准确描述及建模的问题开展了大量的研究。文献[10]提出了基于动态场景法描述新能源的不确定性,同时通过递归估计协方差矩阵刻画风电和光伏的时间相关性。文献[11]采用两点估计法和 Cornish-Fisher 级数展开,将源荷多

① 浙江省重点研发计划(2019C01149)资助项目。

② 男,1983年生,博士,副教授;研究方向:新型电力系统数字化关键技术;联系人,E-mail: zhou dan@zjut.edu.cn。

(收稿日期:2023-05-18)

元不确定性转换为功率缺额的单一不确定性,提高了模型的求解效率。文献[12]采用区间数对系统中光伏出力以及负荷的不确定性进行描述,实验证明了区间数可以更好地反映系统中不确定因素对综合能源系统总盈利的影响。文献[13]考虑到电动汽车无序充电对电网的影响,提出了一种新颖的电动汽车不确定性模型。文献[14]利用模糊集理论对电力价格的不确定性进行了分析。文献[15]基于多场景技术和模糊数学理论对负荷需求和光伏出力的日前-日内不确定性进行分析。

综上所述,如何更好地解决不确定性问题已成为综合能源领域重要研究内容之一。为此,本文首先针对综合能源系统中分布式能源、负荷、交通以及能源价格等多种不确定性因素产生机理以及对系统的影响进行了分析。其次,介绍了场景法、点估计法、区间分析法、模糊分析法以及不确定集等多种不确定性建模方法,并阐述了每种方法的原理、优缺点以及运用对象和场景。在此基础上,指出了目前综合能源系统不确定性研究中有待解决的问题,并对未来的研究方向进行了展望。

1 综合能源系统不确定性因素分析

1.1 不确定性概述

由于人为活动的影响和环境的不可预测性,实际工程中普遍存在不确定性。因此为了保证系统安全性和可靠性,需要对不确定性进行适当的量化和控制^[16]。不确定性大致可分为2类:随机不确定性和认知不确定性^[17]。前者表示系统或环境中存在的固有随机性,后者表示因设计人员认识不足或设计过程中信息缺失所造成的不确定性。从现有研究状况来看,对不确定性进行建模的常用方法主要包括概率理论^[16]、区间分析理论^[18]、模糊算法^[19]和证据理论^[20]。

考虑到实际中综合能源系统不确定性因素众多,由于篇幅所限,本文仅对其中主要几个不确定性因素进行分析,包括:分布式能源出力不确定性、负荷不确定性、交通不确定性和能源价格不确定性。其中,分布式能源出力不确定性主要指风电、光伏等

可再生能源发电不确定性;负荷不确定性主要考虑系统内部冷/热/电负荷的不确定性;交通不确定性主要指电动汽车无序充电行为造成的充电时间以及充电功率的不确定性;能源价格不确定性则主要指电力和天然气价格的不确定性。具体分类如图1所示。



图1 综合能源系统不确定因素分类

1.2 机理分析

为了更好地研究不确定建模方法,有必要对前述不确定性因素的产生机理进行分析^[21]。

分布式能源中,光伏和风电具有较强的随机性和波动性。光伏发电不确定性主要与影响光伏面板受光面积、工作温度以及太阳辐照度等环境因素有关^[22]。风力发电不确定性主要源自平均风速和脉动风速的随机性,另外温度、压力和降雨量等大气特征以及地理条件也会影响实际风电输出功率^[23]。

冷热电负荷不确定性影响因素可分为气象因素和非气象因素2种。气象因素包括温度、湿度以及降水量,其中温度对负荷不确定性影响最大。非气象因素包括重大节假日、需求侧管理、消费观念、能源价格和人为习惯^[24]。此外,负荷在不同时间尺度下往往呈现出不同的不确定性特点。在短时间尺度内,负荷由于天气以及使用时间呈现多周期性变化和强随机性特点,而在长时间尺度下,负荷整体呈现阶跃变化^[25]。

交通不确定性的影响因素主要包含两方面:外部因素和人为因素。外部因素如天气条件、道路情况、电池容量和节假日等,人为因素如用车行为、充电习惯和交通事故等,以上因素使得电动汽车充电

具有强不确定性^[26]。我国电动汽车类型主要为电动公交车、电动私家车、电动出租车3类。其中,电动公交车由于特殊安排运行较为规律,而电动私家车和电动出租车运行灵活多变。在工作日私家车运行时间一般在早上7点至8点以及晚上17点至19点,具有一定周期性,而在休息日或节假日出行规律较难分析。

能源价格在垂直垄断阶段,由于受到政府监管,很少出现波动。但随着市场的放开,能源价格具有一定的不确定性,其影响因素包括购能成本、市场结构、交易模式、能源损耗及能源政策等,其中市场能源供求的变化为主要因素。能源价格会因为市场的不确定性呈现随机变化的特性。在一个监管有力的能源市场中能源价格可以看作一个随机变量,其概率分布受到能源服务商以及未来时段负荷不确定的影响^[27]。

1.3 影响分析

综合能源系统中存在的不确定性因素会使其规划与运行面临风险。特别是综合能源系统相较于传统电力系统,能源形式多样化,能源网络相互耦合、相互影响,使得不确定性因素给综合能源系统带来的影响更加广泛。

一方面,不确定性因素的存在将影响综合能源系统功率平衡,尤其是短时间尺度下的功率极度失衡会引起电能网络频率与电压的波动以及设备长时间运行在非工况状态,使得系统安全稳定受到影响。

另一方面,不确定性因素对系统长时间尺度的能量平衡也会产生影响,如分布式能源和负荷预测值与实际值之间的偏差不可避免,使得能源企业无法准确地对系统进行规划及制定运行策略,进而造成系统经济效益无法实现最优。

2 不确定性因素建模方法

为了尽可能减少或消除不确定性因素对综合能源系统的影响,应首先对其进行表示和量化,常用方法包括场景法、点估计法、区间分析法、模糊分析法和不确定集。

2.1 场景法

场景法是将系统不确定输入当作随机变量,利

用概率分布函数通过采样方法或不确定参数的直接离散化来生成场景。其核心思想是将不确定性问题通过生成场景表征成为确定性问题^[28]。场景法原理简单且具有较高的精度,但其依赖大量的历史数据来获取不确定参数的精确概率分布,而对于实际工程问题,往往难以获取足够多的数据,以至于常对其作近似处理。文献[28,29]采用两参数 Weibull 分布和 Beta 分布来分别描述风速和光照强度的概率分布。文献[30]利用正态分布函数刻画负荷不确定性。由于不确定性因素受多种因素影响,整体拟合难以准确描述。因此,文献[31]利用了对于短期风电预测误差具有较好拟合效果的 Cauchy 分布对风电误差概率分布进行分段拟合。文献[32]为了改善厚尾效应,提高拟合精度,同时考虑到预测误差随时间变化的规律性,采用了带位移因子与伸缩系数的 t 分布对预测误差进行时序下的分段拟合。由于以上分布函数均无法兼顾预测误差概率密度分布不对称、多峰的特性,为此文献[33]提出利用高斯混合模型对风电功率预测误差概率密度分布进行拟合。

场景法的使用除了依赖大量数据外,其精确度还取决于场景的数量。为了在精确度与计算效率之间获得平衡,众多学者分别在场景抽样以及场景削减技术上做出了努力。首先,针对传统蒙特卡洛收敛速度慢、计算成本高等问题^[34],文献[35]采用基于差异性较小的拟蒙特卡洛方法生成风电出力场景,在相同采样次数下该方法能更准确描述随机变量的概率分布,且收敛速度更快。文献[29]采用拉丁超立方对风光及负荷概率模型进行抽样,该方法解决了蒙特卡洛法抽样过于集中的问题。文献[36]采用 Nataf 变换与 Cholesky 分解对拉丁超立方采样进行改进,在满足计算精度要求的同时最大可能地保留了数据特征。其次,在场景削减上,K-means 聚类法因操作简单、效率高且削减后场景多样化被广泛使用^[37]。但使用前需人为给定聚类中心数目,为了降低人为因素对场景削减的影响,文献[38]提出改进 K-means 聚类方法。文献[39]提出采用同步回代法对场景进行削减,该方法重点在于筛选场景条件的选取,一般运用 Kantorovich 距离来衡量场景

间的相似程度。另外,文献[40]提出一种基于改进的 K-means 聚类和同步回代消除算法相结合的场景缩减方法,在保证计算精度的同时,提高规模较大场景集合缩减的计算效率。

场景法适用于处理数据量充足的长时间尺度问题。虽然现有研究对其做出了改进,但仍存在以下一些问题亟待解决。(1)场景法对样本数据量要求较高,因此对综合能源系统中数据采集能力提出了挑战;(2)现有方法通过函数拟合求取随机变量概率分布函数,无法准确描述其所有特性,该方法本身就存在一定误差;(3)场景法计算量较大,不适用于综合能源系统超短期调度。

2.2 点估计法

点估计法(point estimate method, PEM)是在输入随机变量概率分布上取有限个估计点用以拟合输入随机变量的分布,并通过有限次的确定性计算求取输出变量的数字特征,如期望、方差和各阶矩等^[41]。由于 PEM 计算量小,处理复杂模型较为灵活简单,同时具有较高精度和无需知道输入与输出之间具体函数关系等特点而被广泛关注,并成功应用在处理不确定问题上^[42]。

PEM 最初由 Rosenblueth 提出,但此时对于 m 个输入随机变量需要 $2m$ 次仿真,计算量巨大。随后 Hong 改进了原有的 PEM,将计算量从 $2m$ 减少到 Km 和 $Km + 1$ (K 取决于 Hong 的点估计法方案类型)。文献[43]为了降低精度成本,减少计算量,采用 $2m$ PEM 模拟太阳能电池板输出功率的不确定性。文献[41]利用 $2m$ PEM 描述负荷不确定性,并与蒙特卡洛模拟法进行对比,所得结果与蒙特卡洛模拟法近似,但 $2m$ PEM 计算速度明显更快。 $2m$ PEM 虽然能够以较少的计算量刻画不确定性,但未考虑输入随机变量的变量峰度且估计点较少,以至于其精度远低于 $(2m + 1)$ PEM。由此,文献[44]提出了利用 $(2m + 1)$ PEM 模拟电-气-热系统中风光、各类负荷以及需求响应不确定性,并结合全纯嵌入法和图像法来分析不确定性对各能源网络的影响。文献[45]提出一种最优能量枢纽概率优化调度模型,采用 $(2m + 1)$ PEM 对枢纽中热电负荷和电价的不确定性进行模拟,并与 $2m$ PEM 和蒙特卡洛

进行对比分析,仿真结果证实在精度上 $(2m + 1)$ PEM 优于 $2m$ PEM。

由上可知,点估计法是一种处理随机变量的有效方法,被广泛运用于概率潮流计算,但其使用条件为不确定随机变量之间相互独立。而综合能源系统中能源网络间的耦合以及能源形式间的相互转换使得不确定变量之间具有相关性,因此在处理该类问题时,需先进行解耦,常用方法包括正交变换^[46]、Rosenblatt 变换^[47]和 Nataf 变换^[48]。

2.3 区间分析法

区间分析法是将随机变量和状态变量利用区间表示,控制变量为实数变量,目标是寻求能使区间状态变量满足约束条件且使得目标函数最优的控制变量^[49]。相较于场景法,区间分析法只需要知道不确定变量范围,即可求得目标函数区间值。同时,对于决策者而言,利用其可以直观看到目标函数的区间估计以及各机组出力的变化趋势^[50],便于决策者对系统的调控。

虽然区间分析法不需要已知不确定变量概率分布,但是对于区间范围的选择尤为关键,区间间隔太狭隘可能无法覆盖整个不确定谱,若太大可能会导致最优解并非实际最优。同时由于综合能源系统是一个含有多种不确定变量的非线性系统,对于此类系统,区间分析法主要是将不确定性问题转换为确定性问题进行求解,此时转换模型及方法的选取至关重要^[51]。文献[50]建立了考虑风电出力不确定性的区间经济调度模型。由于该文输入不确定区间只存在于优化模型等式约束和不等式约束右手项,因此根据 2 个标准的双层优化模型,将区间优化模型转换为了乐观优化模型和悲观优化模型 2 个确定性的数学规划问题。文献[52,53]基于区间序关系和区间可能度将区间模型转换为确定性模型,同时区间分析也为决策者提供了关于风电出力不确定性条件下的利润区间。文献[54]针对区域综合能源系统中可再生能源出力、负荷和购能价格的不确定性,采用强化区间线性规划方法将不确定性问题分解为 2 个确定性的子模型进行求解。该方法能够保证解空间的绝对可行性,有助于深入了解系统效益与违反约束风险之间的预期价值导向的权衡^[55]。

除以上问题外,由于区间数学本身的限制,使得在区间运算时无法考虑变量之间的相关性,导致运算结果无效扩大、精度降低^[56],目前主要解决方法是采用仿射算术^[49]对其进行优化。

区间分析法适用于只知不确定变量变化范围而无法得到其概率分布的场景。虽然已有一些转换模型被提出,但所转换成的确定性问题通常为两层嵌套的复杂模型,传统基于梯度的方法难以适用。因此如何针对系统中两层嵌套问题的特点,提出有效的解决方案已成为区间分析法研究领域的一项重要研究内容。

2.4 模糊分析法

模糊分析法是将不确定变量视为模糊数,约束用模糊集表示,利用隶属函数来表达约束条件的满足程度,通过构建不同的等值模型转化为非模糊模型,最后用传统数学方法求解^[57]。模糊分析法考虑了系统内部关系的复杂性和不确定性,相较于场景法,其对样本数据量以及数据的可信度要求较低,具有普适性。

但模糊分析法对含有不确定变量系统进行求解时,必须首先获取不确定变量精确的隶属函数,然而目前缺少一种有效的构建隶属函数的方法。实际应用中通常利用有限的样本数据和决策者的经验来确立隶属函数,这导致了在其构建过程中具有很大的主观性,同时也给问题的求解带来一定的误差。文献[58]提出一种基于模糊分析法的多能源系统优化调度模型。其中,由于任意时刻实际供能总大于相应的需求,所以针对能源需求的不确定性采用单调递增线性隶属函数进行描述,同时对于能量枢纽中风电出力以及电价的不确定性采用三角隶属函数描述。文献[59]利用梯形隶属函数表示风速和光照的不确定性,再通过风电和光伏的出力特性方程得到其相应的隶属函数。上述文献所采用的模糊集均属 TYPE1 模糊集,该模糊集缺陷在于利用单个隶属函数并不能准确描述系统中存在的不确定性。因此,Zadeh^[60]提出了 TYPE2 模糊集,该模糊集有两层隶属函数,适用于隶属函数难以确定的情况且精度较高,但该模型不具有处理系统中随机不确定性的能力。为此,文献[61]提出利用模糊随机理论对

源荷双侧预测误差的随机模糊性进行建模。文献[62]采用中间型柯西隶属函数对不确定变量的预测值和实际值之间的相对误差进行描述,基于双重不确定性理论建立了海上微能系统模糊随机规划模型。文献[61,62]将概率理论与模糊理论相结合,用以描述不确定变量的随机性和模糊性。

现有研究虽然有许多隶属函数被提出,但其建立仍存在较强的主观性。因此需要一种先进的优化技术,以更公平的隶属函数描述系统中存在的不确定性,但这同时可能会增加计算的复杂度^[8]。

2.5 不确定集

不确定集是指一个预先定义的包含随机变量变化的不确定集合,其目的是为了寻求一个解,使得当随机变量取任意值时,约束条件均满足,且该解为最坏情况下目标函数的最优解^[63]。相对于概率法和模糊分析法,不确定集不需要提前获取不确定参数的概率密度函数或隶属函数,因此该方法对样本数据量要求较低。利用不确定集所得的解是在不确定参数最坏情况下计算而得,因此所得决策方案具有较强的鲁棒性。然而在实际应用中不确定参数最坏情况发生极少,并且根据 Lindeberg-Feller 中心极限定理也可发现所有不确定因素同时处于最坏情况值的概率极低^[64],所以造成了所得决策方案过于保守及系统经济效益低下。根据文献[64]可知,不确定集设定的不同会使系统具有不同的鲁棒性和保守性,不确定集设置越大,优化结果保守性越强^[65]。

文献[66]提出一种能评估综合能源系统中光伏消纳能力的鲁棒模型,该模型针对光照强度的不确定性,采用盒式不确定集对其进行描述。虽然该文献引入了不确定度参数来调节模型的鲁棒性和保守性,但其本质仍是盒式不确定集,且未利用任何历史场景作为辅助,导致所得结果非常保守。为此,文献[67]利用多面体不确定集代替盒式不确定集对微网中风光以及电动汽车充电不确定性进行刻画,建立了微网鲁棒经济调度模型。多面体不确定集由于引入不确定集预算概念,利用其可以有效调控经济调度策略的鲁棒性和经济性。然而不确定集预算的设定值主要取决于操作员的个人经验或操作风险偏好^[64],因此该方法具有很大的主观因素。文献[68]

为了克服风电场鲁棒性差的问题,利用椭球不确定集描述风电场出力不确定性。相对盒式不确定集,椭球不确定集在对不确定参数范围进行拟合时更合理,保守性相对较低,但计算过程复杂。近年来,有学者尝试将随机方法引入到不确定集的建立当中,用以改善决策方案的保守性。例如,文献[69]提出一种两阶段分布式鲁棒协调控制策略,该策略利用预先定义的函数将风电历史数据的分布信息合并到不确定集中。值得注意的是,该方法所得解为最差情况下对应的最小运行成本期望值而非实际值。

综上所述,不确定集主要应用在决策者要求系统具有较高的鲁棒性或者无法接受系统故障带来的损失的场景中,该方法可保证系统稳定运行,但会导致系统经济性变差。虽然有一系列改善系统鲁棒性和经济性的措施被提出,但仍缺乏一种有效的通用处理方法,因此该方向仍需进一步研究。

3 应用场景

为了进一步了解上述方法适用的应用场景,本节对这些方法在综合能源系统能源预测、负荷预测、潮流计算、能源市场、系统规划、经济调度以及稳定控制等 7 个业务场景中的应用情况进行了分析,如图 2 所示。

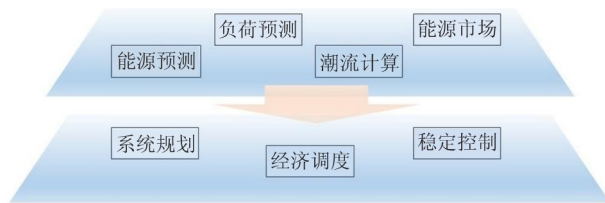


图 2 应用场景

3.1 能源预测

能源预测主要针对具有强随机性和波动性的风电及光伏出力不确定性进行预测。能源预测是系统规划和调度的基础,其预测精度也影响到系统的稳定控制。

由于获取风速与光照强度的采样数据较为容易,且场景法能够描述风光出力不确定性的概率特征,因此文献[70]建立了计及风电和光伏发电不确定性的微网热电联产机组协调调度模型,基于输入

随机变量的概率密度函数,利用轮盘机制生成典型场景。在能源预测中使用点估计法,主要是为了在获得较高精度的同时减少模型的计算量,文献[71]采用基于 Nataf 转换的三点估计法,使用近似函数来公式化具有确定性估计点的预期发电成本。由于区间分析法所得结果能够反映综合能源系统不确定性对系统运行的影响,文献[72]以综合能源系统运行成本最小为目标,采取区间数学的方法对系统中存在的耦合机组效率、用户响应率及电能替代等多重不确定性因素进行统筹描述。考虑到风光历史数据的模糊性,文献[73]采用直觉模糊集对风电出力不确定性进行量化。为了减少具有强随机性的风光出力不确定性对系统的影响,保证系统稳定运行,文献[74]利用盒式不确定性模型描述可再生能源预测误差不确定性。

综上所述,在能源预测场景中,场景法、点估计法、区间分析法、模糊分析法以及不确定集等多种不确定建模方法都能用于其中,但具体方法的选取还需根据实际研究内容而定。

3.2 负荷预测

负荷预测是根据系统运行状态、自然条件和历史数据等多种因素,在满足一定精度的情况下,预测未来某一时刻负荷值,其中包括冷/热/电等多种负荷。

由于负荷变化具有一定周期性,且获取负荷历史数据较为容易,文献[29]将负荷预测误差概率分布视为正态分布,通过求取负荷预测值与预测误差之和,得到负荷预测概率密度函数。利用拉丁超立方和 Kantorovich 距离生成负荷典型场景。由于点估计法克服了对负荷不确定性概率密度函数认知不足而带来的困难,文献[41]采用两点估计法建立了概率无功调度中负荷不确定性模型。常规点预测的固定值与实际值存在一定误差,而区间分析法作为一种能够描绘预测误差的常用方法,文献[75]结合区间预测和极限场景理论,以获取负荷极值来确定系统的正负旋转备用容量。考虑到历史负荷数据存在一定模糊性,文献[76]运用三角模糊数描述光伏、负荷预测功率以及柔性负荷响应量的不确定性。考虑到长时间尺度下负荷不确定性对综合能源系统

资产利用效率的影响,文献[77]采用不确定集描述系统中负荷不确定性。

由上可知,在对综合能源系统进行研究时,大部分都会考虑到负荷的不确定性,以提高系统的精确度。前述所提出的不确定性建模方法都适用于负荷预测。

3.3 潮流计算

潮流计算能反映综合能源系统中各不确定性因素对系统规划和运行的影响,为操作人员提供全面的、有价值的系统状态信息。但由于综合能源系统中存在大量不确定性因素,能源之间相互耦合,各网络特征具有差异性,因此传统的潮流计算方法无法在综合能源系统中直接使用。

点估计法由于计算量小、精度高以及不需要获得输入输出具体函数表达式等优点^[42],常用于求解概率潮流问题。文献[46]考虑到电-气互联系统中风电场出力与电气负荷具有的不确定性和相关性,以系统总运行成本最小为目标,提出基于 Nataf 变换的三点估计法概率最优潮流计算。文献[48]建立了综合能源系统概率能量流模型,利用 Nataf 变换对不确定性因素之间相关性进行解耦,并通过三点估计法对随机变量进行建模。区间潮流由于只需要知道不确定变量上下界以及能够观测到不确定变量所引起的状态变量区间变化范围等特点,文献[78]针对电-热综合能源系统利用区间潮流算法对负荷不确定性给系统所带来的影响进行了分析。

以点估计法为代表的概率潮流和基于区间理论的区间潮流都能有效解决综合能源系统潮流问题,但点估计法随着输入随机变量数目的增加其计算量会显著增大。

3.4 能源市场

能源市场领域研究中能源价格不确定性目前主要侧重于电价不确定性,应用研究包括风险评估、风险管理、收购电决策等。

文献[79]为了实现售电公司风险和综合业务效益最大化,提出一种综合业务决策与风险评估模型。模型中购售电业务的现货价格、用户需求以及可再生能源出力等多种不确定性均采用场景法进行处理。文献[80]建立了不确定性市场环境下风电

交易的风险规避优化模型,利用条件风险价值理论来限制期望利润的波动,采用场景法生成能源价格与风力发电场景,每个场景代表一组特定的随机参数值的结果,从而将不确定性问题转换为确定性问题的。

由于能源市场领域相关研究时间尺度较长,一般为日前制定策略,因此常用场景法来处理研究中存在的不确定性。

3.5 系统规划

随着综合能源系统发展规模的不断扩大,风光出力、冷热电负荷、电动汽车充电、能源价格等关键因素呈现出较大的不确定性,给系统实际规划带来了挑战。

在样本数据足够多且可信度较高的情况下,利用场景法所得规划结果能够适应系统不同运行状态。但在发生概率极低的极端场景下,其不能保证系统稳定运行。文献[81]采用场景法描述风电出力不确定性,建立了以不同场景下的系统总规划成本最小为目标的规划模型。区间分析法和模糊分析法一般运用在当决策者无法获取系统中不确定因素的历史数据或者历史数据无法准确描述不确定特性的场景。文献[54]建立了考虑负荷、可再生能源预测误差和能源价格不确定性的综合能源系统规划模型,采用粒子群优化-区间线性规划双层模型进行求解。文献[82]在计及动态氢价和不确定性的区域综合能源系统规划-运行中基于模糊机会约束规划方法描述可再生能源出力及负荷需求的不确定性,以增强系统稳健性。不确定集能够保证系统具有较高鲁棒性,但规划成本相对其他几种方法所需较高。文献[83]提出了一种考虑多能负荷的区域综合能源系统两阶段鲁棒规划方法,其中利用鲁棒性可调的区间方法描述了综合能源系统中多能负荷的不确定集。

系统规划由于时间尺度较长,因此对控制策略计算速度没有过高要求,在选择相应不确定因素建模方法时,可从系统经济性和稳定性角度出发进行考虑。

3.6 经济调度

综合能源系统经济调度是指在满足系统运行安

全和供电质量的前提下,合理安排系统中各能源设施和转换装置,以最低运行成本满足用户能源需求的一种调度方法。

场景法在历史数据足够多的情况下具有较高精度,同时由于其计算量极大,因此不适用于综合能源系统实时调度。文献[84]考虑到风光和负荷等多种不确定性因素,利用场景法生成典型场景拟合次日运行工况,建立了以调度方案成本和调整成本期望值之和最小为目标函数的综合能源系统日前调度模型。点估计法在系统调度中一般运用于概率调度策略的研究,文献[45]针对多输入多输出的能量枢纽,提出基于点估计法的概率调度策略。区间分析法可以为决策者或运行商提供收益区间,在制定下次调度策略时可将此作为参考,具有一定的工程应用价值。文献[52]提出一种考虑需求响应和风电出力不确定性的电-气综合能源区间优化运行策略,该策略以实现系统运行成本最小为目标。可信性理论由于具有坚实的公理化体系,相比于传统隶属度理论更有利于模糊条件下处理机会约束,其被广泛地应用于处理电力系统不确定性问题,文献[85]从源、荷两侧出发,用模糊隶属度参数来表征新能源及负荷的不确定性,建立了计及风电及电、气负荷不确定性的可信性模糊机会约束模型。不确定集的运用主要是为了保证系统安全稳定运行,其次获取效益最优。文献[86]将随机方法引入不确定集中,提出一种考虑风电不确定性的电气综合能源系统两阶段调度策略。

系统调度可分为日前调度和实时调度,实时调度相较于日前调度要求控制算法计算量小且具有较高的实时性。因此,场景法不适用于实时调度,而对于日前调度上述方法皆适用。

3.7 稳定控制

安全稳定是系统运行的基本要求,但在实际应用中系统内存在的各种不确定性因素已严重影响到系统的功率平衡。

为此,文献[87]为了解决风电、光伏以及负荷需求等多种不确定性因素造成的电网电压波动问题,提出一种以网络负荷总线实际功率损耗和稳态电压偏差最小为目标函数的无功优化调度策略,其

中针对上述不确定性因素通过场景法生成大量场景,并采用场景削减技术以获得典型场景。文献[88]提出一种考虑综合需求响应(integrated demand response, IDR)不确定性的电-气综合能源系统(integrated electricity-gas system, IEGS)优化运行模型,以点估计法计算系统概率能量流,并将其计算结果作为机会约束,使在最小化 IEGS 运行成本的同时,保证系统运行的安全稳定运行。文献[89]考虑到光伏出力与负荷不确定性对系统稳定性影响,提出一种鲁棒电压控制模型,保证系统在给定不确定集内安全稳定运行。

不确定集由于考虑到集合内所有可能发生的场景,因此其在维护系统安全稳定方面强于场景法和点估计法。以上介绍的方法以及应用场景在表1中进行了总结。

4 研究展望

4.1 不确定因素相关性分析

地理环境、气候特征以及人为因素等原因,使得不确定因素之间具有一定的相关性。在系统规划和运行时对之不加以考虑,将会对系统的安全经济运行造成影响。为此,文献[10]利用递归估计法得到协方差矩阵来描述风力和光伏的时间相关性。文献[90]采用秩相关系数刻画风速、光照强度和负荷之间的相关性。由于风力发电场地理位置相近,又受当地气候影响,文献[91]基于历史数据通过线性模型得到风电相关系数,并将其引入到描述风速不确定的多面体不确定集中加以考虑。文献[92]基于相关向量机方法,提出了一种多维风电场风速的联合分布计算方法,该方法采用核函数有效避免了参数估计带来的二次误差,从而提高了计算精度。文献[93]基于历史风电出力数据的相关系数矩阵和 Copula 函数,构建计及风电场出力空间相关性的风电出力预测误差概率模型。由上述文献可以看出,目前针对综合能源系统不确定因素相关性研究,主要集中在分布式电源与负荷以及自身相关性研究方面且负荷一般只针对电力负荷。很少有学者在研究中考虑到不同负荷类型之间相关性以及将电动汽车和能源价格不确定因素纳入相关性研究中。因

表1 不确定性因素建模方法的对比情况

方法	计算精度	计算效率	优点	缺点	应用场景
场景法	高	低	1. 原理简单	1. 依赖于大量历史数据以及场景的选取 2. 计算量大	能源预测、负荷预测、风险评估、收购电决策、系统规划、日前调度、稳定控制
点估计法	高	中	1. 能够处理复杂模型 2. 无需知道输入与输出之间具体的函数关系表达式	1. 解决具有相关性不确定变量前需进行解耦处理 2. 计算量随输入不确定变量增多而显著增大	能源预测、负荷预测、潮流计算、经济调度、稳定控制
区间分析法	中	中	1. 只需要知道不确定变量上下边界 2. 决策者可以直观看到系统运行成本的区间估计以及各机组出力的变化趋势	1. 从不确定模型转换为确定性模型通常为两层嵌套复杂模型,传统基于梯度方法难以适用	能源预测、负荷预测、潮流计算、系统规划、经济调度
模糊分析法	低	中	1. 对样本数据量以及数据的可信度要求较低 2. 具有普适性	1. 隶属函数的建立具有主观性	能源预测、负荷预测、系统规划、经济调度
不确定集	中		1. 可使得系统具有高可靠性	1. 经济性较差	能源预测、负荷预测、系统规划、经济调度、稳定控制

此,如何更全面地考虑不确定因素之间的相关性是下一步亟待解决的问题。

4.2 离散不确定性因素

综合能源系统中存在的不确定性因素大致可分为连续不确定性和离散不确定性。连续不确定性是指连续的且发生频率较高的不确定性因素,如风光出力不确定性、负荷不确定性、电价不确定性等。离散不确定性是指发生频率较低的不确定性因素,如燃气轮机、电锅炉等转换设备的随机启停以及输电线路的中断阻塞。目前大部分文献主要侧重于对连续不确定性因素的研究,而针对离散不确定性研究较少。文献[94]提出了利用随机方法和信息鸿沟理论对可再生能源不确定性和天然气管道随机中断进行建模,但该方法依赖于历史数据的可靠性,而在实际情况下可能无法提供详细的可靠信息。因此,对于综合能源系统中离散不确定性因素应进行深入的研究。

4.3 人工智能在综合能源系统不确定性因素建模领域中的应用

近年来,有学者将人工智能应用在综合能源系

统不确定性因素预测方面,文献[95]考虑到风光出力以及负荷的不确定性,采用递归神经网络智能算法对其进行预测,以保证所提优化模型的精确性。文献[96]利用极限学习机智能算法建立热负荷预测模型,以提高控制策略精准度。但目前人工智能在不确定性因素预测应用方面主要集中在可再生能源发电预测以及负荷预测,而对于综合能源系统中其他不确定因素预测的相关研究较少。

4.4 求解算法

综合能源系统作为一种强非线性系统,在考虑不确定性研究计算中,计算量将随着系统规模的不断扩大以及考虑不确定性因素数量的增多,呈指数形式增长^[97]。同时系统内各能源网络所具有的不同特性也会增加模型的求解难度。目前,对于考虑综合能源系统不确定性问题通常利用智能算法进行求解,但当模型复杂度逐渐增加时,智能算法的计算效率以及精度将大幅降低。因此,如何针对所需求解问题的不同特点,对现有方法进行改进或提出一种新的、高效的求解算法,也是目前亟需解决的关键问题之一。

5 结论

综合能源系统作为能源行业的新兴领域,融合了电力网、热网、天然气网以及交通网等,实现了多能源之间的相互转换,在满足用户能源需求的同时,也提高了能源利用率。但随着综合能源系统规模的不断扩大,不确定性因素所带来的影响也越发突出,给其规划与运行带来了新的挑战。

本文介绍了针对综合能源系统中风光、负荷、电动汽车以及能源价格等多种不确定性因素的建模方法,每种建模方法都有其优缺点及适用场景。尽管有许多学者对这些方法进行了改进,但仍存在很大的发展空间,特别是在综合能源系统环境下,现有方法的计算速度和精度都不够。同时,本文也对综合能源系统不确定性研究中存在的问题以及未来的发展进行了展望,以期可以更好、更全面地处理不确定性因素给综合能源系统所带来的影响。

参考文献

- [1] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. 电工技术学报, 2016,31(1):1-13.
- [2] 侯鲁洋,葛磊蛟,王飏,等. 面向新型产消者的综合能源系统和电力市场研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(12):40-48.
- [3] 贾宏杰,穆云飞,余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设, 2015,36(1):16-25.
- [4] 骆钊,刘德文,沈鑫,等. 综合能源系统优化运行技术研究综述[J]. 电力建设, 2022,43(12):3-14.
- [5] 吕佳炜,张沈习,程浩忠,等. 考虑互联互动的区域综合能源系统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021,41(12):4001-4021.
- [6] 陈云辉,王伊晓,潘俊,等. 多能流耦合的综合能源系统规划运行一体化优化[J]. 电力与能源, 2022, 43(5):369-373,388.
- [7] 周任军,刘志勇,闵雄帮,等. 不确定性优化方法在电力系统研究中的应用[J]. 电力科学与技术学报, 2014,29(2):21-29.
- [8] PRAKASH K K, SARAVANAN B. Recent techniques to model uncertainties in power generation from renewable energy sources and loads in microgrids; a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,71(1):348-358.
- [9] ZAKARIAZADEH A, JADID S, SIANO P P. Smart microgrid energy and reserve scheduling with demand response using stochastic optimization [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 63(1):523-533.
- [10] 王静,徐箭,廖思阳,等. 计及新能源出力不确定性的电气综合能源系统协同优化[J]. 电力系统自动化, 2019,43(15):2-15.
- [11] 孔德政,张靖,何宇,等. 区域综合能源系统 IGDT-MPC 双层能量优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(10):3970-3979.
- [12] 白牧可,王越,唐巍,等. 基于区间线性规划的区域综合能源系统日前优化调度[J]. 电网技术, 2017, 41(12):3963-3970.
- [13] ALAHYARI A, EHSAN M, MOUSAVIZADEH M. A hybrid storage-wind virtual power plant (VPP) participation in the electricity markets: a self-scheduling optimization considering price, renewable generation, and electric vehicles uncertainties [J]. Journal of Energy Storage, 2019,25:1-12.
- [14] MORADI M H, ESKANDARI M. A hybrid method for simultaneous optimization of DG capacity and operational strategy in microgrids considering uncertainty in electricity price forecasting[J]. Renewable Energy, 2014,68(1):697-714.
- [15] 南斌,姜春娣,董树锋,等. 计及源荷不确定性的综合能源系统日前-日内协调优化调度[J]. 电网技术, 2023,47(9):3669-3683.
- [16] ZHANG Z, RUAN X X, DUAN M F, et al. An efficient epistemic uncertainty analysis method using evidence theory[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018,339(1):443-466.
- [17] 熊芬芬,杨树兴,刘宇,等. 工程概率不确定性分析方法[M]. 北京:科学出版社, 2015:222-229.
- [18] ABRAHAMSSON M. Uncertainty in quantitative risk analysis[R]. Lund: Lund University, 2002.
- [19] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965,8(3):338-353.
- [20] SHAFER G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976:38-46.
- [21] 康重庆,夏清,徐玮,等. 电力系统不确定性分析[M]. 北京:科学出版社, 2011:4-9.
- [22] 李欣彤. 考虑光伏出力时空关联特征的电力系统跨区优化调度研究[D]. 吉林:东北电力大学, 2021.
- [23] 纪代颖. 基于风电的不确定性对电力系统的影响分析[J]. 电子测试, 2022,36(10):99-101.
- [24] 唐良艳. 电力系统负荷特性分析与负荷预测研究[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
- [25] 杨允. 区域型分布式供能系统优化配置研究及不确定

- 性优化探索[D]. 北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2016.
- [26] 张美霞, 吴子敬, 杨秀. 基于动态能耗模型与用户心理的电动汽车充电负荷预测[J]. 现代电力, 2022, 39(6):710-719.
- [27] 杨瑾. 空调负荷的不确定性建模及其在电力系统中的应用研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
- [28] JU L W, TAN Z F, YUAN J Y, et al. A bi-level stochastic scheduling optimization model for a virtual power plant connected to a wind-photovoltaic-energy storage system considering the uncertainty and demand response [J]. Applied Energy, 2016, 171(1):184-199.
- [29] TAN Z F, WANG G, JU L W, et al. Application of CVaR risk aversion approach in the dynamical scheduling optimization model for virtual power plant connected with wind-photovoltaic-energy storage system with uncertainties and demand response[J]. Energy, 2017, 124(1):198-213.
- [30] 黄伟, 刘斯亮, 王武, 等. 长时间尺度下计及光伏不确定性的配电网无功优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5):154-162.
- [31] 赵书强, 王扬, 徐岩. 基于风电预测误差随机性的火储联合相关机会规划调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(S1):9-16.
- [32] 王成福, 王昭卿, 孙宏斌, 等. 考虑预测误差时序分布特性的含风电机组组合模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15):4081-4090.
- [33] 叶林, 张亚丽, 巨云涛, 等. 用于含风电场的电力系统概率潮流计算的高斯混合模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15):4379-4387, 4578.
- [34] 王鹏, 修东滨. 不确定性量化导论[M]. 北京:科学出版社, 2019.
- [35] 李禹鹏, 冯楠, 崔勇, 等. 考虑风电不确定性及柔性负荷的安全约束机组组合问题研究[J]. 电力建设, 2017, 38(2):129-137.
- [36] 杨若浦, 刘佳, 曾平良, 等. 考虑多元异质源荷相关性的区域综合能源系统规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16):31-39.
- [37] 初壮, 李钊, 白望望. 计及不确定性和环境因素的多类型分布式电源选址定容[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13):34-41.
- [38] 刘婷, 郭海湘, 诸克军, 等. 一种改进的遗传 k-means 聚类算法[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(8):104-111.
- [39] 王瑾然, 卫志农, 张勇, 等. 计及不确定性的区域综合能源系统日前多目标优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(11):3496-3506.
- [40] 要金铭, 赵书强, 韦子瑜, 等. 基于场景分析的电力系统日前调度及其快速求解方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9):102-110.
- [41] MOHSENI-BONAB S M, RABIEE A, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. A two-point estimate method for uncertainty modeling in multi-objective optimal reactive power dispatch problem[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 75(1):194-201.
- [42] 艾小猛. 含大规模风电场的电力系统运行优化方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2014.
- [43] RASTEGAR M, FOTUHI-FIRUZABAD M, ZAREIPOUR H, et al. A probabilistic energy management scheme for renewable-based residential energy hubs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5):2217-2227.
- [44] MASSRUR H R, NIKNAM T, FOTUHI-FIRUZABAD M. Investigation of carrier demand response uncertainty on energy flow of renewable-based integrated electricity-gas-heat systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(11):5133-5142.
- [45] ALIPOUR M, ZARE K, ABAPOUR M. MINLP probabilistic scheduling model for demand response programs integrated energy hubs[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(1):79-88.
- [46] 孙国强, 陈霜, 卫志农, 等. 计及相关性的电—气互联系统概率最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21):11-17.
- [47] 苏晨博, 刘崇茹, 李至峪, 等. 基于贝叶斯理论的考虑多维风速之间相关性的概率潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3):157-165.
- [48] 韩佶, 苗世洪, 李超, 等. 计及相关性的电-气-热综合能源系统概率最优能量流[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5):1055-1067.
- [49] 张聪. 基于区间理论的不确定性无功优化模型及算法[D]. 广州:华南理工大学, 2018.
- [50] 丁涛, 郭庆来, 柏瑞, 等. 考虑风电不确定性的区间经济调度模型及空间分支定界法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22):3707-3714.
- [51] 姜潮, 韩旭, 谢慧超. 区间不确定性设计优化理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2017:5-13.
- [52] BAI L Q, LI F X, CUI H T, et al. Interval optimization based operating strategy for gas-electricity integrated energy systems considering demand response and wind uncertainty[J]. Applied Energy, 2016, 167(1):270-279.
- [53] 苏永新, 聂伟棋, 谭貌. 考虑风电接入和电气转换的综合能源系统日前区间优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17):63-74.
- [54] 仇知, 王蓓蓓, 贲树俊, 等. 计及不确定性的区域综合能源系统双层优化配置规划模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8):176-185.
- [55] ZHOU F, H. HUANG GORDON, CHEN G X, et al.

- Enhanced-interval linear programming [J]. *European Journal of Operation Research*, 2009,199(2):323-333.
- [56] 房少纯. 区间优化算法的研究及应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [57] 吴军. 计及风电不确定性的电力系统差异化规划模型研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2018.
- [58] MOHAMMADI M, NOOROLLAHI Y, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Fuzzy-based scheduling of wind integrated multi-energy systems under multiple uncertainty[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2019, 37(1):152-165.
- [59] 杨毅, 韦钢, 周冰, 等. 含分布式电源的配电网模糊优化规划[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(13):19-23.
- [60] 黄文静. 概率模糊集理论研究及其建模[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [61] 赵冬梅, 殷加球. 考虑源荷双侧不确定性的模糊随机机会约束优先目标规划调度模型[J]. *电工技术学报*, 2018,33(5):1076-1085.
- [62] 张安安, 张红, 李茜, 等. 电-气联合储能的海上微能系统模糊随机规划[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(20):5915-5925, 6172.
- [63] 张艺镛. 基于数据驱动的含大规模新能源并网的电力系统两阶段鲁棒运行研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [64] LIANG Z, CHEN H, WANG X, et al. Risk-based uncertainty set optimization method for energy management of hybrid AC/DC microgrids with uncertain renewable generation [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2):1526-1542.
- [65] BERTSIMAS D, SIM M. The price of robustness [J]. *Operations Research*, 2004,52(1):35-53.
- [66] 魏炜, 贾皓越, 穆云飞, 等. 光电—光热区域综合能源系统太阳能消纳能力评估模型[J]. *电力系统自动化*, 2019,3(20):16-23.
- [67] 梁子鹏, 陈皓勇, 王勇超, 等. 含电动汽车的微网鲁棒经济调度[J]. *电网技术*, 2017,41(8):2647-2658.
- [68] LIU S D, JIAN J B, WANG Y Y, et al. A robust optimization approach to wind farm diversification[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2013,53(1):409-415.
- [69] ZHANG Y C, LE J, ZHENG F, et al. Two-stage distributionally robust coordinated scheduling for gas-electricity integrated energy system considering wind power uncertainty and reserve capacity configuration[J]. *Renewable Energy*, 2019,135(1):122-135.
- [70] BORNAPOUR M, HOOSMAND R A, KHODABAKHS-HIAN A, et al. Optimal coordinated scheduling of combined heat and power fuel cell, wind, and photovoltaic units in micro grids considering uncertainties [J]. *Energy*, 2016,117(15):176-189.
- [71] QU K,ZHENG X,LI X,et al. Stochastic robust real-time power dispatch with wind uncertainty using difference-of-convexity optimization[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022,37(6), 4497-4511.
- [72] 崔杨, 郭福音, 仲悟之, 等. 多重不确定性环境下的综合能源系统区间多目标优化调度[J]. *电网技术*, 2022,46(8):2964-2975.
- [73] 王勇, 穆永强, 刘靖波, 等. 基于风电不确定性模糊量化的综合能源系统规划方法研究[J]. *可再生能源*, 2019,37(9):1340-1345.
- [74] XIE P, CAI Z X, LIU P, et al. Microgrid system energy storage capacity optimization considering multiple time scale uncertainty coupling [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019,10(5):5234-5245.
- [75] 蔺海明, 刘天琪, 李兴源. 考虑风电出力和负荷不确定性的电力系统有功优化潮流[J]. *电网技术*, 2013, 37(6):1584-1589.
- [76] 林文智, 杨苹, 陈芯羽, 等. 计及需求响应不确定性的园区综合能源系统日前经济优化调度[J]. *电力建设*, 2021,42(12):9-20.
- [77] 王盛, 丁一. 考虑多能互补和负荷不确定性的区域综合能源系统优化定容与资产利用效率分析[J]. *全球能源互联网*, 2019,2(5):426-432.
- [78] 王文学, 胡伟, 孙国强, 等. 电-热互联综合能源系统区间潮流计算方法[J]. *电网技术*, 2019,43(1):83-95.
- [79] 王林炎, 张粒子, 张凡, 等. 售电公司购售电业务决策与风险评估[J]. *电力系统自动化*, 2018,42(1):47-54,143.
- [80] POUSINHO H M I, MENDES V M F, CATALÃO J P S. A risk-averse optimization model for trading wind energy in a market environment under uncertainty [J]. *Energy*, 2011,36(8):4935-4942.
- [81] 李哲, 王成福, 梁军, 等. 计及风电不确定性的电-气-热综合能源系统扩展规划方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(11):3477-3487.
- [82] 汪飞, 龚丹丹, 郭慧, 等. 计及动态氢价和不确定性的区域综合能源系统规划—运行两阶段优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2022,50(13):53-62.
- [83] 沈欣炜, 郭庆来, 许银亮, 等. 考虑多能负荷不确定性的区域综合能源系统鲁棒规划[J]. *电力系统自动化*, 2019,43(7):34-45.
- [84] 黄伟, 葛良军, 华亮亮, 等. 参与双重市场的区域综合能源系统日前优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2019,43(12):68-82.
- [85] 邱革非, 何超, 骆钊, 等. 考虑源、荷不确定性的工业

- 园区电-气互联综合能源系统模糊优化调度[J]. 电力自动化设备, 2022,42(5):8-14.
- [86] 税月, 刘俊勇, 高红均, 等. 考虑风电不确定性的电气能源系统两阶段分布鲁棒协同调度[J]. 电力系统自动化, 2018,42(13):43-50,75.
- [87] BISWAS P P, SUGANTHAN P N, MALLIPEDDI R, et al. Optimal reactive power dispatch with uncertainties in load demand and renewable energy sources adopting scenario-based approach[J]. Applied Soft Computing, 2019,75(1):616-632.
- [88] 罗金满, 赵善龙, 封祐钧, 等. 考虑综合需求响应不确定性的电-气综合能源系统优化运行[J]. 中国电力, 2020,53(12):119-126.
- [89] 王永杰, 吴文传, 张伯明. 考虑负荷量测和光伏不确定性的主动配电网鲁棒电压控制[J]. 电力系统自动化, 2015,39(9):138-144.
- [90] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 考虑相关性的间歇性分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2015,39(8):53-58,140.
- [91] WEI W, LIU F, MEI S W. Adaptive robust energy and reserve co-optimization of integrated electricity and heating system considering wind uncertainty[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016,7(1):289-300.
- [92] 朱溪, 苏晨博, 刘教民. 基于RVM和全纯嵌入法的考虑多风电场出力相关性的电-热互联概率能流计算方法[J]. 可再生能源, 2021,39(6):832-839.
- [93] 李雪, 李佳奇, 张儒峰, 等. 计及风电出力相关性和条件价值风险的电力系统概率可用输电能力评估[J]. 电工技术学报, 2023,38(15):4162-4177.
- [94] NIKOOBAKHT A, AGHAEI J, FALLAHZADEH-ABARGHOUEI H, et al. Flexible co-scheduling of integrated electrical and gas energy networks under continuous and discrete uncertainties[J]. Energy, 2019,182(1):201-210.
- [95] 蒋超凡, 艾欣. 计及多能耦合机组不确定性的综合能源系统运行优化模型研究[J]. 电网技术, 2019,43(8):2843-2854.
- [96] SAJJADI S, SHAMSHIRBAND S, ALIZAMIR M, et al. Extreme learning machine for prediction of heat load in district heating systems[J]. Energy and Buildings, 2016,122(15):222-227.
- [97] 张沈习, 程浩忠, 邢海军, 等. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016,36(8):1-9.

Review and prospects of uncertainty analysis of integrated energy system

ZHOU Dan, JIANG Da, ZHU Jiawei, ZHANG Qi, ZHU Yuanlong

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

The multiple uncertain factors of integrated energy system (IES) make the actual planning and operation of the system face various risks and bring many adverse effects to its stable and economical operation. How to reduce or eliminate the influence of uncertainties on IES is an important research focus in this field. Firstly, this paper analyzes the generation mechanism of various uncertain factors of IES such as distributed energy, load, transportation and energy price, and studies their influence on IES. Secondly, it focuses on introducing a variety of uncertainty analysis methods such as scenario method, point estimation method, interval analysis method, fuzzy analysis method and uncertainty set. The research of these methods in energy forecasting, load forecasting, power flow calculation, energy market, system planning, economic dispatching and stable control of IES is described in detail. Lastly, prospects for critical challenges in future research on IES uncertainty are outlined, providing insights for the research of IES.

Key words: integrated energy system, uncertainty modeling, scenario method, point estimate method, interval analysis method