

计及不确定性的电力系统区间分析研究综述

朱立轩¹, 万 灿², 鞠 平¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:电力系统的不确定性逐步增强,如何合理表征不确定性因素并分析其对电力系统带来的影响是目前和未来研究的突出问题。对比常见不确定性分析方法,以不确定性区间分析方法为重点,将系统分析问题分为不确定性稳态区间分析和不确定性动态区间分析2个方面。首先,对电力系统不确定性因素的区间预测框架和方法进行了阐述;其次,针对不确定性稳态区间问题,从区间潮流和区间不确定性决策2个方面进行概括,并讨论了现有的不确定性稳态区间分析方法;然后,针对不确定性动态区间问题,从动态波动区间分析和稳定区间分析2个方面进行概括,并讨论了现有的不确定性动态区间分析方法;最后,对计及不确定性的电力系统区间分析研究进行展望。

关键词:电力系统;区间不确定性;稳态;动态

中图分类号:TM711

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202304020

0 引言

在碳达峰、碳中和目标下,新能源占比逐渐提高的新型电力系统不断发展。高比例新能源和新负荷的接入,给电力系统带来了持续的不确定性扰动。随着全球气候的恶化,加之电力系统中电力电子设备的比例不断攀升,电力系统遭受极端或异常不确定性事件的情况越来越频繁。因此,电力系统在由弱不确定性系统向强不确定性系统逐步转变。

由于传统电力系统分析中不确定性因素相对较弱,所以大多采用确定性分析方法。然而在电力系统不确定性显著增强的背景下,将给电力系统分析带来重大变化,确定性系统分析的模型、理论和方法已难以适用^[1]。为此,研究人员开始针对电力系统中存在的不确定性,采用不同的描述方式,充分融合气象、经济等多元信息,运用先进的大数据处理等手段,深入分析新能源、负荷等的变化规律与模式,对电力系统不确定性进行研究。目前,计及不确定性的电力系统分析方法大致可以分为随机分析方法、模糊分析方法和区间分析方法等^[2]。不同的分析方法往往适应不同的研究侧重点,可以根据应用场景和分析目的进行选择。

随机分析方法具有比较丰富的理论基础和处理方法^[3]。随机分析方法使用概率来表征系统中的不确定性,比如常采用高斯分布表征负荷的动态波动

和预测偏差,采用高斯白噪声模拟实际工程中可能存在的噪声和扰动,采用Weibull分布表示风速的概率分布等^[4]。在假设不确定性量遵循某种特定的概率或统计分布的基础上,便可以借助概率分配法、域方法论、随机动力学等理论加以分析,得到需求的概率指标和系统响应概率密度等^[5]。随着电力系统随机分析方法研究的深入,越来越多的研究表明,系统中存在的不确定性往往并不遵循某种特定的概率分布或简单的概率密度函数^[6],随机分析方法的局限性凸显。

模糊分析方法对不确定性的表征更为广义,可以摆脱概率分布的约束,在不确定性分析等方面取得了突破^[7]。在电力系统不确定性分析中,可以将系统中的不确定性因素表征为模糊集,考虑更为广义的不确定性。在不确定性稳态分析中,模糊分析方法适合于描述广义不确定性并处理不同量纲、相互冲突的多目标优化问题。在不确定性动态分析中,模糊分析方法常用于解决电力系统的控制问题,引入模糊控制器以保证系统的鲁棒稳定^[8]。但对于电力系统分析而言,使用模糊性表征往往会导致系统模型过于复杂,且常常需要通过经验来确定模糊参数^[9]。

区间分析方法保留了上述2种分析方法的优势,一般采用场景不确定性的表征方法^[1],即研究中的不确定性因素使用波动区间进行刻画。对于电力系统分析而言,常见于风电等新能源出力的不确定性^[10]、负荷的随机波动^[11]等。区间分析方法建模更加简单直接,理解和计算上都更为便利。在实际电力系统分析中,不确定性因素的波动区间往往易于获得,仅需要根据波动区间进行建模,不需要其余随机性假设,在理论和实际工程中均更具方便性和吸引力^[12]。

收稿日期:2022-12-07;修回日期:2023-04-05

在线出版日期:2023-04-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51837004,U2066601,52277130);“111”计划(B14022)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51837004, U2066601, 52277130) and the “111” Project (B14022)

电力系统随机分析方法和模糊分析方法已有很多研究,并有相关的综述性论文。而电力系统区间分析方法研究较少,还没有完整的综述性论文。所以,本文对电力系统区间分析从预测、稳态、动态几个方面进行综述,最后进行研究展望。

1 不确定性因素的区间预测

1.1 不确定性因素的类型

根据电力系统不确定性因素的来源,可以从不同的角度进行分类^[1-2]。本文结合区间分析方法,将电力系统不确定性因素分为以下2个类型。

1) 外部扰动类。

外部扰动的区间不确定性主要源于系统中的各种扰动,以往较多关注电气故障,目前开始关注功率扰动,常由新能源发电、主动负荷等引起,往往以功率约束或加性噪声的形式出现在系统的代数或微分方程中^[13]。文献[14]针对风电接入背景下的电力系统恢复决策优化问题进行了研究,采用区间不确定集描述风功率输入的时空不确定性,建立全过程二阶段鲁棒优化模型并通过列约束生成算法求解。在动态分析中,此种不确定性也可以采用区间变量或区间过程进行表示。例如,在结构力学分析中,文献[15]便将环境因素的侵蚀性、动态载荷的变化、材料性能的退化和机器表面的磨损等外部激励表征为动态变化的区间扰动,使用基于切比雪夫多项式展开的蒙特卡罗法对结构的动态响应进行计算,估计动态响应的变化范围。在电力系统动态分析中,相关研究尚处于起步阶段,多见于动态控制领域。文献[16]针对一类具有静止无功补偿器和未知线路传输时延的大型多机电力系统,在考虑其强非线性及不确定性有界外部干扰的情况下,提出了一种神经分散自适应量化动态表面控制方案,同时保证控制系统中的信号也一致有界、确实可行。文献[17]基于分布式人工智能理论,提出了一种基于广域测量的监督级电力系统稳定器,该控制器可以有效补偿电力系统的非线性动态运行和区间有界不确定性干扰。文献[18]借鉴控制理论中对于不确定性和非线性系统 L_∞ 稳定的定义,设计了一个简单、可扩展和鲁棒的动态状态估计器,并从区间扰动的范数性质出发,给出了获得估计误差上界和下界的理论方法。

2) 内部参数类。

内部参数的区间不确定性则主要源于模型参数和运行参数的变化,例如动态负荷的相关系数便具有较强的不确定性。文献[19]考虑了网络模型参数的近似理论和量测误差,利用高斯消去与Krawczyk算子法相结合的区间分析方法处理状态估计中的不确定性,得到系统状态量的上下界限。文献[20]针对多机电力系统中常见的线路中断等匹配加性不确

定性和负荷发电变化等输入乘性不确定性,设计了一种多时间尺度分离的鲁棒稳定控制器,从而有效降低或消除系统中电压崩溃等现象出现的可能性。在多区域大型电力系统中,还可能存在通信系统参数因拒绝服务攻击等原因造成的参数不稳定现象。文献[21]和文献[22]考虑了通信网络中的不确定参数和时滞,针对不同攻击场景下的电力系统,通过求解基于线性矩阵不等式的优化问题,提出了基于Lyapunov理论的不确定性的稳定判据和一种鲁棒预测负荷频率控制方法。而初值的不确定性是一种准稳态的不确定性,其主要源自发电或负荷的慢速变化,也可表征系统在经受不确定扰动后的初始状态^[6],目前在电力系统分析中考虑初值的区间不确定性的研究较少且集中在稳态问题的分析。

1.2 不确定性因素的区间预测框架

准确可靠的不确定性因素区间预测,是电力系统区间分析的基础^[23]。

不同于传统确定性预测以数学期望、中位数等单点值作为输出,不确定性因素的预测一般以区间或概率分布的形式给出预测结论,可呈现待预测对象更为完整的统计信息。且由于概率密度预测和分位数预测方法仍基于已知的概率分布或密度函数,而区间预测的表现更为直观,便于决策者直接使用,被广泛应用于鲁棒优化与区间优化中^[24],系统分析中的不确定性因素常采用区间预测的形式表征。不确定性区间预测指的是在给定置信水平的情况下,给出未来某一时刻预测对象可能处在的预测区间^[25]。在新型电力系统中,不确定性区间预测的对象主要包括负荷、新能源发电功率、电价等^[26]。文献[27]使用上下限估计和bootstrap方法量化不确定性,测试了2种基于神经网络的风电场发电量短期预测方法,所提方法可以在短时间内构建可靠的预测区间。为了追求更高的区间性能,文献[28]指出,预测区间上下界分位数的选取并不一定关于中位数对称。

在对待预测量进行不确定性区间预测时,还需根据预测场景选择合适的预测时间尺度。根据不同的时间尺度,不确定性区间预测可以分为超短期、短期、中期和长期预测^[29]。不同时间尺度的预测也将被应用于不同的实际场合。新能源发电机组控制、实时经济调度等较强调时效性的研究一般要求超短期预测做支撑;机组组合优化、经济调度、备用优化等稳态优化问题一般仅需短期预测结果,考虑日前情况;而电力市场中长期交易、月度或年度发电计划的制定,则一般需要借助中长期预测的结果进行分析^[30-31]。需要注意的是,对于不确定性区间预测的不同时间尺度而言,其相应的预测精度、预测模型和预测方法都将发生相应的改变。

对于区间预测的结果,一般会采用通用的评价指标进行评估以验证预测的有效性^[23]。其中,常用的区间预测性能评价指标包括预测区间覆盖率(prediction interval coverage probability, PICP)、区间预测归一化平均宽度(prediction interval normalized average width, PINAW)、区间预测累积偏差(prediction interval accumulation deviation, PIAD)等^[32]。预测区间覆盖率常用于表征区间预测的可靠性,是预测模型和结果评估的主要指标;区间预测归一化平均宽度主要用于描述预测区间的质量和保守性,是一种锐度指标^[33];而区间预测累积偏差则主要注重预测中脱离实际值的预测结果,结合前两者考察预测的综合性能。

1.3 不确定性因素的区间预测方法

虽然计及不确定性的电力系统预测输出形式存在不同,但预测的基本方法往往可以通用。对于系统分析中不确定性因素的区间预测,根据采用模型的不同,可以将其分为物理方法、统计学方法、人工智能方法、组合方法等。物理方法考虑了对象的物理机理及实际存在的环境特征,挖掘预测对象和各种物理量之间的内在联系,为预测模型提供准确的信息支撑^[34]。但需要注意的是,为限制不确定性的累积并保证模型的准确性,物理方法对环境数据的可靠性要求往往较高,环境监测成本较高。统计学方法是传统预测的常用方法,因其简单易实现被广泛应用于多种动态预测领域。最为常见的统计学方法应用就是时间序列模型,该模型已被大量研究。但统计学方法的顺利有效实现往往需要大量历史数据,对于可能缺失数据的场景,例如新能源场站出力预测等并不友好,因此研究人员常将其与人工智能等方法相结合以改进其预测性能。人工智能方法基于给定的输入输出黑箱模型,采用人工神经网络等智能方法进行学习,得到输入输出的非线性映射关系,并对所求的后续状态进行预测^[35]。随着信息系统与电力系统的进一步耦合,以及计算机技术的普及,海量数据的获取变得更加便捷,基于人工智能等数据驱动的区间预测方法被逐步开发,该方法在电力系统的动态区间预测中应用广泛。此种预测方法的普适性与可靠性更强,可以量化处理非线性问题,准确捕捉隐藏的数据特征。虽存在物理机理模糊、可解释性较差等不足^[36],但基于数据驱动的区间预测技术仍将是未来区间预测的主要趋势。由上文也可以知道,单一区间预测方法在某些场景下可能会展现出优势但其弊端也较为明显。因此,鉴于新型电力系统的不确定性对预测普适性的要求进一步提高,可以尝试将多种预测模型和方法相结合,实现不确定性多场景的灵活适用。数据驱动和模型驱动相结合的预测方法能在构建模型拟合输入特征与预测

目标之间的关系的同时,采用海量数据提供可靠的历史背景,实现更为准确的区间预测,这将是目前以及将来区间预测的研究重点。例如,文献[37]提出了一种模型与数据融合驱动的非参数自适应集成数据驱动方法,基于历史数据集和自适应加权集成,从历史观测中挖掘不确定性特征,并通过信息熵量化了电力负荷的不确定性程度,准确输出预测结果。目前,有关使用融合驱动方法处理不确定性区间预测的研究仍处于起步阶段,如何根据研究场景对算法本身进行适应性改进值得进一步研究。从电力系统模型的角度,不确定性因素的区间预测即为不确定性系统输入的准确量化,以支持电力系统规划、稳定分析与控制等稳态和动态问题的分析,应用十分广泛。一方面,对于系统稳态分析问题,在电力系统不确定性激增的大背景下,不确定性量的区间预测可以有效应对新能源出力等不确定性给系统规划带来的严峻挑战。在系统不确定性经济调度、机组优化组合等问题上,由于涉及多时间尺度特性,不确定性区间预测也能根据合适的预测时间尺度,合理描述不确定性因素,为上述问题的求解提供支撑^[38]。另一方面,对于系统动态分析问题,不确定性因素的区间预测也为考虑新能源出力波动、系统调峰能力等提供了思路和前提,以综合考虑系统的动态稳定性和控制的有效性,保证系统的安全、稳定、经济运行^[39]。

2 电力系统稳态区间分析

电力系统稳态区间问题是针对不确定性因素对系统运行经济性的影响,分析电力系统稳态区间特性,本文按研究内容将其分为区间特征分析和区间决策问题^[3]。

2.1 电力系统稳态区间分析模型

1) 区间特征分析模型。

使用迭代法求解的区间潮流等特征分析问题,通过牛顿法等方法的转化,其本质为求解含区间量的线性代数方程组,该方程组一般采用式(1)所示的形式表示^[40]。

$$[A][x]=[B] \quad (1)$$

式中:[A]=[\underline{A}, \bar{A}]为含不确定性参数的非奇异区间矩阵,其不确定性可来源于新能源出力、输电网络参数变化、负荷波动等各方面^[41]; $[B]=[B, \bar{B}]$ 为区间向量; $[x]=[x, \bar{x}]$ 为区间解向量(待求状态向量),一般为各节点的电压、相角等。需要注意的是,就区间潮流分析而言,该部分模型仅适用于各种迭代分析方法。

2) 区间优化模型。

若基于仿射算术等非迭代方法对区间潮流进行计算,则一般会将原问题转化为优化问题,将含有噪

声元等不确定性量的功率平衡方程等作为约束条件,通过参数的优化取值求解系统状态量的适应区间^[42]。其模型与区间最优潮流、机组组合等区间不确定性稳态决策问题类似,一般采用含区间变量的优化模型^[43],如式(2)所示。

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, [\xi]) \\ g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, [\xi])=0 \\ h(\mathbf{x}, \mathbf{u}, [\xi])\leq h^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{x} 为决策向量; \mathbf{u} 为系统的控制(输入)向量; $[\xi]$ 为不确定性区间量,其不确定性可以来自系统参数或外界扰动等; $f(\cdot)$ 为待优化的目标函数,可以表示经济效益最大、运行风险最低^[44]等; g 和 h 分别为优化问题需要满足的等式和不等式约束,常包含线路潮流约束、机组出力约束、不确定性量所带来的其余约束^[45]等。根据不确定性稳态决策问题的类型,可以进一步细化式(2)中各参数的含义,也可以在式(2)的模型基础上,衍生出多目标、多层多阶段的不确定性稳态优化模型^[46]。

2.2 电力系统区间潮流分析

与不确定性的建模分类方式类似,区间潮流与模糊潮流、概率潮流同属不确定性潮流范畴。其中:模糊潮流方法采用隶属密度函数描述不确定量,运用模糊数学理论求解潮流状态量的隶属度函数^[47],该类潮流方法对不确定性的表征最为广义,能够处理复杂多样的潮流问题,但相关数学理论复杂抽象且常需要根据经验定义模糊参数,很难应用于大型系统;概率潮流方法采用随机变量来描述不确定量,运用蒙特卡罗仿真、点估计、半不变量法等方法求解潮流状态量的概率分布特征^[48],该类不确定性潮流的研究最为成熟,计算方法多样,但由于理论要求对于随机变量的概率假设过于具体,常常不符合系统的实际情况;区间潮流方法采用区间数来描述不确定量,运用区间分析理论求解含区间数的潮流方程^[49],该潮流方法建模方式简单,符合电力系统常见的不确定性量的区间形式表征和系统的实际情况,但相关理论研究仍相对较少。与其他不确定性潮流分析方法相比,区间潮流更符合电力系统大运行方式、小运行方式的建模思路,一直以来备受研究人员关注。区间潮流分析应用范围广泛,可将其与区间优化潮流、电压稳定分析、区间状态估计等问题相结合,保证系统在不确定性因素影响下的静态安全性和经济性。

根据目前已有的研究成果,区间潮流的分析计算方法主要分为区间迭代法、仿射优化法和直接优化法^[40]3种。区间迭代法是通过不同的区间迭代算法进行收缩潮流区间解,以收敛到一个最窄的区间范围,常用的区间迭代法有区间高斯迭代法、区间

Krawczyk迭代法、仿射迭代法^[50]等。区间高斯迭代法由确定性潮流计算的迭代法演化而来,原理简单清晰,易于理解;但其在计算时需要选择合适的初始区间以保证算法的收敛性,且由于迭代中乘法运算的存在,区间扩张问题较为严重。仿射优化法基于仿射算术,建立多重不确定性量之间的内在联系,将潮流方程的求解问题转化为含噪声元的待求量优化问题,是目前应用最为广泛的区间潮流计算分析方法^[51]。仿射-线性优化法^[52]、仿射-非线性优化法^[53]、扩展仿射算术^[54]等分析方法可以将区间潮流问题转化为不同的仿射优化模型进行求解,一定程度上避免了迭代类区间潮流分析方法对初始解选择的约束及区间扩张问题,由于噪声元的独立建模方式,往往可以通过该类方法对各个输入不确定性量对响应的影响进行量化分析,但在仿射优化法的计算过程中,噪声元会被不可避免地放大。为此,研究人员采用直接优化法,将含区间参数的潮流方程等效为一个不等式约束,根据代数方程与区间边界相对应的性质,将区间潮流的求解转化为最值求解的问题^[55]。由于直接优化法涉及非线性优化等求解算法,其计算复杂度和时间复杂度均比前述2种方法高。目前已有不少关于区间潮流分析方法的研究,如何进一步借鉴区间数学工具缩小所求区间范围、根据实际应用场景对几种区间潮流分析计算方法进行选取或结合,起到扬长避短的作用,是未来相关研究的重点。

2.3 电力系统区间决策问题

区间不确定性规划(决策)的基本思想是将系统中的不确定性信息表示为区间(集合)的形式,即为一个取值范围。在数据质量无法达到获取变量概率分布函数或隶属度函数时,可采用区间数学规划方法来解决系统所反映的不确定性问题,该分析思想已被运用到能源管理^[56]、环境规划^[57]等多个领域。

对于含区间型不确定性扰动信息的规划决策问题,鲁棒优化方法是一类常用的、普适性较强的优化方法。鲁棒优化考虑在区间内的最劣扰动条件下对所求问题进行最优决策,即通常所说的最大最小决策问题^[58]。相较于不确定性决策中另一种广泛采用的随机规划方法,鲁棒优化具有如下特点:①决策关注不确定参量的边界情况,无需随机变量的准确概率分布形式;②一般可将鲁棒优化模型转化成确定性等价模型求解,求解规模与随机规划方法相比较小;③由于鲁棒优化决策针对最劣实现情况,其解存在一定的保守性^[59]。目前常见的鲁棒优化分析方法主要包括自适应鲁棒优化、分布鲁棒优化、数据驱动的鲁棒优化等。

由于鲁棒优化方法仅需不确定量的区间信息、计算快捷等优点,其在电力系统的调度决策问题中

具有广阔的应用前景,尤其在解决新能源接入电网不确定性区间问题中具有明显优势,引起了广泛关注^[60]。以下将着重介绍考虑区间不确定性的电力系统机组组合和经济调度问题。

电力系统的机组组合是在满足发电机组物理约束、电网输电能力约束以及负荷需求约束条件下,合理安排机组开停机顺序,使总的机组启停费用和运行费用最小的一类运行决策问题^[61]。为考虑电力系统中多种持续性的区间功率扰动,研究人员首次将鲁棒优化引入机组组合问题,构建了一类机组组合两阶段鲁棒优化的典型模型^[62]。除此之外,相关研究也常使用场景集来表征扰动的区间不确定性,并选取最劣情况进行优化。对于目标函数和约束条件的选取,往往也需要根据实际工程情况进行调整。例如文献[63]在目标函数中考虑了弃风代价,保证风电的优先上网;文献[64]在约束条件中加入了抽水蓄能机组的相关功率约束,以反映该机组在功率分配过程中的重要作用。但这一类优化模型的准确度和保守性依赖对不确定性区间的划定,若划定不合适,某些出现概率非常小的极端情况也将被考虑,可能导致调度结果过于保守。

而对于电力系统的区间不确定性经济调度问题,目前关于鲁棒经济调度的研究已考虑风电功率、小水电功率及光伏功率波动等不确定性因素^[65]。在上述不确定性新能源广泛接入电网的大背景下,系统的功率平衡难度增大,此时的备用容量优化问题便成为系统经济调度中的一类热点问题。传统备用计算方法虽能增加全系统的备用容量,起到很好的平衡功率的效果,但却无法考虑系统中具有强不确定性和低运行费用的可再生能源,导致系统的运行成本大幅增加^[66]。自适应鲁棒优化方法由于其对各类扰动具有自适应性,调度寻优空间大,被广泛应用于电力系统不确定性区间经济调度中^[67],一般可以根据建模思路分为按照调度时序构建的两阶段鲁棒优化方法以及由调度决策和扰动构建的零和博弈方法^[59]。通过将新能源出力等区间不确定性因素作为约束引入模型求解,该类鲁棒优化方法可以灵活考虑系统的运行成本和用户侧行为等多方面因素,在促进新能源消纳的同时,保证系统的安全稳定经济运行。文献[68]将调度成本和运行成本作为目标函数,构建了考虑风电不确定性和需求侧响应的两阶段鲁棒优化模型,在保证系统运行成本最低的情况下,有效提升了系统配置的灵活性和可操作性。需要注意的是,在电力系统的调度问题中,虽然已经将不确定性量整合为区间(集合)的形式,但系统在实际运行中可能并不具备完全平抑节点功率扰动的能力^[69],因此需要从电力系统自身调控能力出发,量化系统对扰动的最大接纳区间范围,进而得到合适的

备用配置策略。然而就目前的研究而言,不确定性区间经济调度仍很难避免区间参数划定需要依赖专家经验的弊端,更为通用的构建方法值得进一步研究。

3 电力系统动态区间分析

电力系统动态区间问题是针对不确定性因素对系统运行安全性的影响,分析电力系统动态区间特性,本文按研究内容将其分为波动区间分析和稳定区间分析。

3.1 电力系统动态区间分析模型

针对电力系统不确定性动态区间问题,一般使用连续型区间变量表征不确定性量。同时,采用含区间变量的微分方程对该问题进行描述:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}_x[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\theta}(t), t] + \mathbf{G}_x[\mathbf{x}(t), \boldsymbol{\theta}(t), t] \boldsymbol{\delta}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{F}_y[\mathbf{x}(t), \boldsymbol{\theta}(t), t] + \mathbf{G}_y[\mathbf{x}(t), \boldsymbol{\theta}(t), t] \boldsymbol{\delta}(t) \\ \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{x}(t)$ 为系统的状态向量; $\mathbf{u}(t)$ 为控制等输入向量; $\mathbf{y}(t)$ 为输出向量; $\boldsymbol{\theta}(t)$ 为参数向量; \mathbf{F}_x 、 \mathbf{G}_x 、 \mathbf{F}_y 、 \mathbf{G}_y 为非线性函数向量; \mathbf{x}_0 为初值向量; $\boldsymbol{\delta}(t)$ 为外部扰动向量; t 为时刻。其中,根据不确定性模型的不同,系统初值 \mathbf{x}_0 、系统参数 $\boldsymbol{\theta}(t)$ 和外部扰动 $\boldsymbol{\delta}(t)$ 均可能表现为时变区间量 $[\mathbf{x}_0]$ 、 $[\boldsymbol{\theta}(t)]$ 和 $[\boldsymbol{\delta}(t)]$ 的形式^[70],具体类型将在后文进行总结。

3.2 电力系统波动区间分析

当电力系统遭受较小的不确定性扰动时,其动态响应的波动幅度有多大,是否会超过所允许的范围,是学者们关注的问题。电力系统最重要的3个指标是功角、频率和电压。在传统电力系统中,由负荷变化等所造成的扰动其波动幅度一般较小。但随着近年来新能源以及新型负荷的接入,不确定性扰动逐渐凸显,强度也逐渐增大,系统的各项指标有可能会越限的风险^[71-72]。

对于外部不确定性扰动的影响研究,从时域上看,目前主要还是采用基于随机过程(随机微分方程)的分析方法,将外部扰动视作已知分布的随机激励,借助随机动力学方法^[73],分析系统的随机响应和随机动态指标^[74];从频域上看,当电力系统的固有弱阻尼模式被小扰动激发时,则会发生相应频率的广义强迫振荡^[75],振荡较大时由于非线性作用还会引发随机内共振^[76]。

对于考虑区间不确定性的电力系统动态波动问题,大部分研究集中在考虑系统状态矩阵的不确定性上。例如,文献[77]建立了一种带有区间参数的含异步风电机组的电力系统小干扰区间模型,在系统的状态矩阵加入区间变量。文献[78]考虑了系统中的不确定因素,构建了异步风电机组区间模型,并

基于等效集中质量建模方法,建立了三质量块轴系模型,分析不确定性因素对响应的影响。此外,运行参数的变化将改变系统的潮流分布,从而影响系统状态矩阵,进而改变振荡模式。利用系统运行参数的特征值灵敏度可以进行更广泛的分析,以得到不确定性运行参数发生变化时振荡模式阻尼的变化趋势,继而采取措施改善系统的阻尼以抑制动态波动^[79]。相比于采用概率方式表征的参数不确定性,系统运行参数区间建模方式更为直观,得到的分析结果也是状态参数相应的变化区间,便于运行人员理解和使用。

为评估电力系统在不确定性扰动下的波动性,常常需要对电力系统进行仿真计算。仿真中使用的模型通常是对实际系统的近似描述,各模型特别是电力系统动态元件——负荷参数等会对系统的动态仿真造成很大的影响,使用不正确的参数甚至可能产生与实际相反的仿真结果,影响系统安全性和稳定性的判断^[80]。随着新能源以及新型负荷的引入,电力系统的不确定性不断增强,如何量化模型的不确定性并分析其对仿真结果的影响,对电力系统的动态仿真及安全分析有着重要的理论和工程价值。为避免蒙特卡罗法需要随机进行海量仿真才可能得到较为可信的结果的弊端,传统模型不确定性对动态仿真影响的分析一般基于输入变量的概率分布进行计算^[81]。但在实际工程中,系统参数的不确定性往往并不遵循某种特定的概率分布,而是在某个区间内变化,所以引入区间分析方法对该问题进行建模和分析更为合适^[82]。

3.3 电力系统稳定区间分析

当电力系统遭受较大的不确定性扰动时,其动态响应的波动是否越过稳定域而导致系统失去稳定,是人们重视的问题。不同于以往受遵循概率分布的随机扰动的系统响应可以采用概率或者统计形式给出系统的稳定条件,电力系统不确定性区间特性往往表征为区间不等式的求解^[83]。相对基于随机过程的稳定性定义,区间形式的稳定性更加便捷和单一,即保证预测动态区间在电网稳定域内。这方面的研究常借鉴控制论的稳定性定义,如指数稳定^[84]和鲁棒区间稳定^[85]等。

对于计及区间不确定性的电力系统稳定性的研究,目前仍处于起步阶段。力学等其他工程领域的常用分析方法主要分为2种:一种是直接预测或求解动态过程的区间,分析该区间与系统稳定域之间的关系^[86]。这种方法常借助数值计算,缺少解析表达。另一种则是借鉴控制理论,考虑构造 Lyapunov 函数,以分析系统的稳定条件^[83]。相比之下,这种方法的理论性较强,存在解析表达形式,但 Lyapunov 函数构造的差异性较强,很难得到通用的结论。对于

电力系统稳定研究,由于缺乏其他学科相应理论支撑,能够解析求解的动态响应区间是极为有限的,构造 Lyapunov 函数是相对可取的分析方法。

为保证电力系统受扰情况下的稳定性,应当对系统进行适当的控制,常使用基于线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)或动态优化的控制方法。例如,文献[87]考虑了感应电能传输系统中,负载变化等不确定性功率波动对系统性能产生的影响,并基于 LMI 和极点配置约束求解得到鲁棒控制器,以优化系统性能。文献[88]将孤岛直流微电网的电压控制问题转化为基于 LMI 的优化问题,求解得到鲁棒动态输出反馈控制器,保证了系统的 H_2 稳定。总体而言,在区间不确定性扰动的作用下,系统的控制分析也常借鉴控制理论方法,一般偏重于理论的研究,即使在引入控制后能得到理想的控制效果,其实际控制和物理机理也往往难以实现,且很难在电网中找到确实可行的控制量。

5 电力系统区间分析研究展望

随着新能源大规模并网、电力市场化改革逐步推进,电力系统中的不确定性因素日益增多,电力系统的安全稳定与经济运行面临严峻挑战。不确定性区间分析方法的建模方式简单而且分析结果清晰,目前已有一些相关研究,但仍处于初级阶段,有许多理论和应用问题值得深入研究。

1)多元数据驱动的自适应区间量化。随着新能源占比的越来越高以及新能源不确定性之间时空关联性的增强,电力系统向自动化、信息化、智能化转型,越来越多的研究倾向于将人工智能与大数据等数据驱动方法引入电力系统分析,通过挖掘样本数据输入输出的内在联系,更准确地量化系统响应、制定控制策略等。对于电力系统区间分析,其不确定性仅由区间表征,虽然简洁明了但可用特征少,各不确定性源之间的时空关联性也难以量化,使用传统分析方法能够处理的问题有限。人工智能与大数据方法能够反映区间变量包含的不确定性特征,揭示系统数据内部的潜在逻辑,为电力系统区间分析提供解决方案^[89]。因此,可以考虑采用多元数据驱动方法,对新能源出力、不确定性扰动等区间不确定性因素进行自适应量化,结合已有风电等新能源区间预测方法,以数据驱动为导向,考虑更多与区间相结合的算法,建立以数据为基础的区间分析体系,更好地适应智能电网背景下的系统区间分析与决策问题。但区间不确定性特征与现有算法的结合将会是该领域新的难点。

2)数据与模型融合驱动的新型电力系统区间分析模型。随着能源结构的低碳化转型,新型电力系统不断发展,新能源多点化广泛接入,电力电子设备

等新型元件越来越多地被引入电力系统的各个方面。很多已有的模型由于难以描述不确定性因素、忽略电力电子器件的开关特性等原因,已经无法适应系统的新要求。因此,应当从模型的角度,以实际规划、运行等物理问题为导向,从源-网-荷各侧进行相应的改进,对系统进行更为准确的描述。另一方面,近年来针对电力系统不确定性分析的人工智能方法层出不穷,成果丰富。但该方法计算精度与样本质量、模型选择和训练情况密切相关,且物理机理较为模糊。综合模型方法机理清晰、条件简单和数据驱动方法快速准确、便于处理不确定性的特点,对于区间不确定性的分析,应当考虑数据与模型的融合驱动方法,在改进模型的基础上发挥大数据的优势,兼顾系统分析的计算精度和泛化能力,使分析结果更易于推广应用。

3)价值导向的区间预测方法。在已有的电力系统研究中,往往将新能源出力等预测结果作为系统运行方式等决策问题的输入或约束条件,代入后进行求解。而反过来通过决策优化问题来考虑区间预测的研究则较为少见。在新型电力系统中,由于新能源的分布式结构和不确定性,二者的联系将更加紧密,研究人员在得到准确的区间预测结果的同时也希望系统运行的成本最低^[90]。故可以将二者协同考虑,在区间分析中引入决策问题的优化目标,即价值导向的区间预测,以优化区间分析或预测模型的性能,得到适应性更强的区间预测结果。

4)新型电力系统的动态区间分析。对于电力系统的动态区间分析,由于模型和方法的局限性,多研究基于数值计算的分析方法或基于控制论的动态控制,鲜有解析推导和响应分析,该方面相关研究仍处于起步阶段。对此,应进一步研究动态相关的区间数学理论或考虑传统随机动态理论的区间向拓展,借鉴力学、航空航天等学科关于不确定性动态区间分析的研究方法,寻找物理机理、等效模型等方面的共通点,以寻求适用于电力系统领域的新方法。

5)借鉴随机动力学等理论。在基于概率的随机分析方法中,对于系统不确定性动态响应和性能的研究通常采用随机动力学等理论方法。其中,基于均匀分布随机过程的分析类似于区间分析,将随机变量限制在一个给定的区间内。虽然需要已知其概率密度函数等性质,但由于随机动力学理论较为成熟,仍值得借鉴,特别是在数值仿真中,两者采用的计算方法近乎相同。可以考虑从均匀分布随机过程的低阶矩入手,采用随机动力学等理论作为依托,尝试构建随机微分方程,必要时引入哈密顿等形式的等效模型,对计及区间不确定性的电力系统进行定量分析。

6)区间分析的应用价值挖掘。目前计及不确定

性的电力系统区间分析多聚焦于理论研究,根据分析方法和理论的不同,往往还存在特定的假设,很多实际场景并不适用。随着新型电力系统区间不确定性的增多和增强,区间分析可以更多地以应用价值为导向,重点关注常涉及或涉及较多区间不确定性的应用场景,如新能源出力预测、鲁棒优化、动态稳定域分析等,结合区间分析理论与方法,使其更容易被实际工程所用,凸显其应用价值。

总而言之,计及不确定性的电力系统区间分析研究,目前主要集中在稳态区间分析方面,今后需要着力开展动态区间分析方面的研究,并推动工程应用研究。

参考文献:

- [1] 徐潇源,王晗,严正,等. 能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J]. 电力系统自动化,2021,45(16):2-13.
XU Xiaoyuan, WANG Han, YAN Zheng, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 2-13.
- [2] 舒印彪,薛禹胜,蔡斌,等. 关于能源转型分析的评述(二)不确定性及其应对[J]. 电力系统自动化,2018,42(10):1-12.
SHU Yinbiao, XUE Yusheng, CAI Bin, et al. A review of energy transition analysis: part II uncertainties and approaches [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 1-12.
- [3] 王冲,王秀丽,鞠平,等. 电力系统随机分析方法研究综述[J]. 电力系统自动化,2022,46(3):184-199.
WANG Chong, WANG Xiuli, JU Ping, et al. Review of research on power system stochastic analysis methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 184-199.
- [4] 王传坤,何怡刚,王晨苑,等. 计及疲劳损伤的多时间尺度风电变流器IGBT可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):173-178.
WANG Chuankun, HE Yigang, WANG Chenyuan, et al. Multi-time scale reliability evaluation of wind power converter IGBT considering fatigue damage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 173-178.
- [5] 周海强,鞠平,薛禹胜,等. 基于拟哈密顿理论的随机电力系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(19):9-14.
ZHOU Haiqiang, JU Ping, XUE Yusheng, et al. Transient stability analysis of stochastic power system based on quasi-Hamiltonian system theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 9-14.
- [6] WAN C, XU Z, PINSON P, et al. Optimal prediction intervals of wind power generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1166-1174.
- [7] MENDEL J M, JOHN R I B. Type-2 fuzzy sets made simple [J]. IEEE Transactions on Fuzzy systems, 2002, 10(2): 117-127.
- [8] CHANG Xiaoheng, WANG Yiming. Peak-to-peak filtering for networked nonlinear DC motor systems with quantization [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(12): 5378-5388.
- [9] SHANMUGAM L, JOO Y H. Stability and stabilization for T-S fuzzy large-scale interconnected power system with wind farm via sampled-data control [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(4): 2134-2144.
- [10] 邱革非,张鹏坤,贺漂. 考虑风电接入的电力系统鲁棒经济优

- 化调度[J]. 电力建设, 2021, 42(10): 101-109.
- QIU Gefei, ZHANG Pengkun, HE Piao. Economic dispatch of power system considering wind power integration[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(10): 101-109.
- [11] 王文睿, 瞿凯平, 余涛, 等. 消纳大规模风电的电气互联系统鲁棒区间调度模型与方法[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(6): 1270-1283.
- WANG Wenrui, QU Kaiping, YU Tao, et al. A robust interval scheduling model and method accommodating large-scale wind power generation for integrated electric and gas system[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(6): 1270-1283.
- [12] 姜潮, 黄新萍, 韩旭, 等. 含区间不确定性的结构时变可靠度分析方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 186-193.
- JIANG Chao, HUANG Xinping, HAN Xu, et al. Time-dependent structural reliability analysis method with interval uncertainty[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(10): 186-193.
- [13] YANG X, HE H. Adaptive dynamic programming for decentralized stabilization of uncertain nonlinear large-scale systems with mismatched interconnections[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(8): 2870-2882.
- [14] 顾雪平, 白岩松, 李少岩, 等. 考虑风电不确定性的电力系统恢复全过程两阶段鲁棒优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5462-5477.
- GU Xueping, BAI Yansong, LI Shaoyan, et al. Two stage robust optimization method for the whole-process power system restoration considering wind power uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5462-5477.
- [15] XIA Baizhan, QIN Yuan, YU Dejie, et al. Dynamic response analysis of structure under time-variant interval process model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 381: 121-138.
- [16] ZHANG Xiuyu, LI Bin, ZHU Guoqiang, et al. Decentralized adaptive quantized excitation control for multi-machine power systems by considering the line-transmission delays[J]. IEEE Access, 2018, 6: 61918-61933.
- [17] HEYDT G T, MILI L. Power system stability agents using robust wide area control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 1123-1131.
- [18] NUGROHO S A, TAHA A F, QI J. Robust dynamic state estimation of synchronous machines with asymptotic state estimation error performance guarantees[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1923-1935.
- [19] 卫志农, 颜全椿, 孙国强, 等. 考虑参数不确定性的电力系统区间线性状态估计[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2862-2868.
- WEI Zhinong, YAN Quanchun, SUN Guoqiang, et al. Power system interval linear state estimation considering network parameter uncertainty[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2862-2868.
- [20] CHAKRABORTTY A, SCHOLTZ E. Time-scale separation designs for performance recovery of power systems with unknown parameters and faults[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(2): 382-390.
- [21] OJAGHI P, RAHMANI M. LMI-based robust predictive load frequency control for power systems with communication delays[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4091-4100.
- [22] ZHANG Yajian, PENG Chen, XIE Shaorong, et al. Deterministic network calculus-based H_∞ load frequency control of multiarea power systems under malicious DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 1542-1554.
- [23] 万灿, 宋永华. 新能源电力系统概率预测理论与方法及其在应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1): 2-16.
- WAN Can, SONG Yonghua. Theories, methodologies and applications of probabilistic forecasting for power systems with renewable energy sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 2-16.
- [24] 梅飞, 顾佳琪, 裴鑫, 等. 基于自适应滚动匹配预测修正模式的光伏区间预测[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2): 92-98.
- MEI Fei, GU Jiaqi, PEI Xin, et al. Photovoltaic interval prediction based on adaptive rolling matching prediction correction mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 92-98.
- [25] WAN Can, WANG Jianhui, LIN Jin, et al. Nonparametric prediction intervals of wind power via linear programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1074-1076.
- [26] VALENCIA F, COLLADO J, SÁEZ D, et al. Robust energy management system for a microgrid based on a fuzzy prediction interval model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1486-1494.
- [27] KHOSRAVI A, NAHAVANDI S, CREIGHTON D. Prediction intervals for short-term wind farm power generation forecasts[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 602-610.
- [28] ZHAO Changfei, WAN Can, SONG Yonghua. An adaptive bi-level programming model for nonparametric prediction intervals of wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 424-439.
- [29] 黎静华, 骆怡辰, 杨舒惠, 等. 可再生能源电力不确定性预测方法综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1144-1155.
- LI Jinghua, LUO Yichen, YANG Shuhui, et al. Review of uncertainty forecasting methods for renewable energy power[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1144-1155.
- [30] 余光正, 陆柳, 汤波, 等. 考虑转折性天气的海上风电功率超短期分段预测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4859-4870.
- YU Guangzheng, LU Liu, TANG Bo, et al. Research on ultra-short-term subsection forecasting method of offshore wind power considering transitional weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4859-4870.
- [31] 曾林俊, 许加柱, 王家禹, 等. 考虑区间构造的改进极限学习机短期电力负荷区间预测[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2555-2563.
- ZENG Linjun, XU Jiazhu, WANG Jiayu, et al. Short-term electrical load interval forecasting based on improved extreme learning machine considering interval construction[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2555-2563.
- [32] KHOSRAVI A, NAHAVANDI S, CREIGHTON D, et al. Lower upper bound estimation method for construction of neural network-based prediction intervals[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(3): 337-346.
- [33] WAN Can, NIU Ming, SONG Yonghua, et al. Pareto optimal prediction intervals of electricity price[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 817-819.
- [34] XIE Jingrui, HONG Tao. Temperature scenario generation for probabilistic load forecasting[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1680-1687.
- [35] HOU Chenyu, WU Jiwei, CAO Bin, et al. A deep-learning prediction model for imbalanced time series data forecasting[J]. Big Data Mining and Analytics, 2021, 4(4): 266-278.
- [36] 崔颖, 马平. 基于优化BP神经网络和非参数估计的风功率区间预测[J]. 电子设计工程, 2022, 30(13): 6-10.
- CUI Hao, MA Ping. Wind power interval prediction based on optimized BP neural network and non-parametric estimation

- [J]. *Electronic Design Engineering*, 2022, 30(13): 6-10.
- [37] WAN Can, CAO Zhaojing, LEE W J, et al. An adaptive ensemble data driven approach for nonparametric probabilistic forecasting of electricity load[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(6): 5396-5408.
- [38] ZHANG Zhaosui, SUN Yuanzhang, GAO D W, et al. A versatile probability distribution model for wind power forecast errors and its application in economic dispatch[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 3114-3125.
- [39] DA SILVA NETO A C, SCHILLING M T. Power system security taxonomy introducing two new approaches[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(1): 487-495.
- [40] 廖小兵, 刘开培, 乐健, 等. 电力系统区间潮流计算方法综述[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(2): 447-458.
LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, LE Jian, et al. Review on interval power flow calculation methods in power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(2): 447-458.
- [41] 彭琰, 余一平, 鞠平, 等. 计及不确定性的电力系统电压波动分析方法[J]. *电力自动化设备*, 2017, 38(8): 137-142.
PENG Yan, YU Yiping, JU Ping, et al. Voltage fluctuation analysis method considering uncertainties of power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 38(8): 137-142.
- [42] 陈宇辛, 江岳文. 考虑变量相关性的改进场景优化法区间潮流计算[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(3): 161-167.
CHEN Yuxin, JIANG Yuewen. Interval power flow calculation with improved scenario optimization method considering correlation of variables[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(3): 161-167.
- [43] ZHANG Hui, LI Pu. Chance constrained programming for optimal power flow under uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(4): 2417-2424.
- [44] 晏鸣宇, 张伊宁, 艾小猛, 等. 采用Benders分解含机组禁止运行区间的安全约束最优潮流[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(6): 60-65.
YAN Mingyu, ZHANG Yining, AI Xiaomeng, et al. Benders decomposition based security-constrained optimal power flow considering generator prohibited zones[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 60-65.
- [45] 宫成, 宋靛云, 王卫, 等. 鲁棒优化在电力系统机组组合中的应用综述[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(12): 4687-4695.
GONG Cheng, SONG Liangyun, WANG Wei, et al. An overview of robust optimization used for power system unit commitment[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(12): 4687-4695.
- [46] 陈哲, 王榕裕, 郭创新, 等. 基于风险的多区互联电力系统分布式鲁棒动态经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(23): 113-122.
CHEN Zhe, WANG Luyu, GUO Chuangxin, et al. Risk-based distributed robust dynamic economic dispatch for interconnected multi-regional power systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(23): 113-122.
- [47] MATOS M A, GOUVEIA E. The fuzzy power flow revisited[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23(1): 213-218.
- [48] 李国庆, 陆为华, 李赫, 等. 基于模糊C-均值聚类的时序概率潮流快速计算方法[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(4): 116-122.
LI Guoqing, LU Weihua, LI He, et al. Fast calculation method of time sequence probabilistic power flow based on fuzzy C-means clustering[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(4): 116-122.
- [49] MOORE R E. *Interval analysis* [M]. Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1966: 105-127.
- [50] 王树洪, 邵振国. 考虑DG运行不确定性的复仿射Ybus高斯迭代区间潮流算法[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(3): 38-44.
WANG Shuhong, SHAO Zhenguo. Interval power-flow algorithm based on complex affine Ybus-Gaussian iteration considering uncertainty of DG operation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(3): 38-44.
- [51] VACCARO A, CANIZARES C A, VILLACCI D. An affine arithmetic-based methodology for reliable power flow analysis in the presence of data uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(2): 624-632.
- [52] 廖小兵, 刘开培, 李彧野, 等. 基于混合潮流方程的区间潮流计算方法[J]. *高电压技术*, 2018, 44(10): 3417-3424.
LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, LI Yuye, et al. Interval power flow calculation method based on mixed power flow equations[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(10): 3417-3424.
- [53] ZHANG Cong, CHEN Haoyong, NGAN H, et al. A mixed interval power flow analysis under rectangular and polar coordinate system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2): 1422-1429.
- [54] 彭寒梅, 昌玲, 郭颖聪, 等. 主从控制微电网的动态区间潮流计算[J]. *电网技术*, 2018, 42(1): 195-202.
PENG Hanmei, CHANG Ling, GUO Yingcong, et al. Dynamic interval power flow calculation of microgrid under master-slave control[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(1): 195-202.
- [55] LEVIN V I. Comparison of interval numbers and optimization of interval-parameter systems[J]. *Automation and Remote Control*, 2004, 65(4): 625-633.
- [56] 高晗, 李正烁. 考虑电转气响应特性与风电出力不确定性的电-气综合能源系统协调调度[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(9): 24-30.
GAO Han, LI Zhengshuo. Coordinated scheduling of integrated electricity-gas energy system considering response characteristic of power-to-gas and wind power uncertainty[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(9): 24-30.
- [57] 张相斌, 倪友谊, 袁亚敏. 网格环境下制造资源在线优化调度的区间规划模型[J]. *运筹与管理*, 2016, 25(1): 46-52.
ZHANG Xiangbin, NI Youyi, YUAN Yamin. Interval programming models for manufacturing resources optimal scheduling in grid[J]. *Operations Research and Management Science*, 2016, 25(1): 46-52.
- [58] BEN-TAL A, EL GHAOUI L, NEMIROVSKIĬ A S. *Robust optimization* [M]. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 2009: 27-64.
- [59] 于丹文, 杨明, 翟鹤峰, 等. 鲁棒优化在电力系统调度决策中的应用研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(7): 134-143, 148.
YU Danwen, YANG Ming, ZHAI Hefeng, et al. An overview of robust optimization used for power system dispatch and decision-making[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(7): 134-143, 148.
- [60] 鲁卓欣, 徐潇源, 严正, 等. 不确定性环境下数据驱动的电力系统优化调度方法综述[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(21): 172-183.
LU Zhuoxin, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Overview on data-driven optimal scheduling methods of power system in uncertain environment[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(21): 172-183.
- [61] 申家锴, 刘洋, 李卫东, 等. 考虑频率与区间接络线功率安全约束的两区互联电力系统机组组合[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(12): 167-175, 189.
SHEN Jiakai, LIU Yang, LI Weidong, et al. Unit commitment considering safety constraints of frequency and inter-areal tie-line power in two-area interconnected power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(12): 167-175, 189.

- [62] ZHANG Muhong, GUAN Yongpei. Two-stage robust unit commitment problem[R]. Tempe, AZ, USA: Arizona State University, 2009.
- [63] WU Wenchuan, CHEN Jianhua, ZHANG Boming, et al. A robust wind power optimization method for look-ahead power dispatch[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2):507-515.
- [64] JIANG Ruiwei, WANG Jianhui, GUAN Yongpei. Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2):800-810.
- [65] 李运龙, 李志刚, 郑杰辉. 考虑风电不确定性和相关性的多区域电网分布鲁棒经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8):97-104.
LI Yunlong, LI Zhigang, ZHENG Jiehui. Distributionally robust economic dispatch of multi-regional power grid considering uncertainty and correlation of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8):97-104.
- [66] 张志, 徐忱, 李新鹏, 等. 考虑大规模风电接入的电力系统旋转备用容量优化[J]. 华北电力技术, 2017(11):6-11.
ZHANG Zhi, XU Chen, LI Xinpeng, et al. Optimization of spinning reserve capacity of power system with wind-power[J]. North China Electric Power, 2017(11):6-11.
- [67] 郑义, 白晓清, 苏向阳. 考虑风电不确定性的 φ -散度下基于条件风险价值的鲁棒动态经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2):63-70.
ZHENG Yi, BAI Xiaoqing, SU Xiangyang. Robust dynamic economic dispatch considering uncertainty of wind power based on conditional value-at-risk under φ -divergence[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2):63-70.
- [68] 董军, 聂麟鹏, 聂仕麟, 等. 考虑需求响应与风电不确定性的两阶段鲁棒旋转备用容量优化模型[J]. 电力建设, 2019, 40(11):55-64.
DONG Jun, NIE Linpeng, NIE Shilin, et al. Two-stage robust optimization model for spinning reserve capacity considering demand response and uncertainty of wind power[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(11):55-64.
- [69] 陈建华, 吴文传, 张伯明, 等. 安全性与经济性协调的鲁棒区间风电调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7):1033-1040.
CHEN Jianhua, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A robust interval wind power dispatch method considering the tradeoff between security and economy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7):1033-1040.
- [70] JU Ping, LI Hongyu, GAN Chun, et al. Analytical assessment for transient stability under stochastic continuous disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2):2004-2014.
- [71] 鞠平. 现代电力系统频率安全分析与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2022:122-130.
- [72] LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, NIU Huanhuan, et al. An interval Taylor-based method for transient stability assessment of power systems with uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 98:108-117.
- [73] ZHU Weiqiu, CAI Guoqiang. Nonlinear stochastic dynamics: a survey of recent developments[J]. Acta Mechanica Sinica, 2002, 18(6):551-566.
- [74] 李洪宇, 鞠平, 余一平, 等. 随机激励下系统频率动态安全性量化评估及半解析分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7):1955-1962.
LI Hongyu, JU Ping, YU Yiping, et al. Quantitative assessment and semi-analytical analysis for system frequency dynamic security under stochastic excitation[J]. Proceedings of CSEE, 2017, 37(7):1955-1962.
- [75] 鞠平, 刘咏飞, 王红印, 等. 电力系统的广义强迫振荡[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5):1-6.
JU Ping, LIU Yongfei, WANG Hongyin, et al. General forced oscillations of power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5):1-6.
- [76] 刘咏飞, 鞠平, 熊浩清, 等. 电力系统广义强迫振荡的内共振现象[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23):6003-6010.
LIU Yongfei, JU Ping, XIONG Haoqing, et al. Internal resonance in general forced oscillations of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23):6003-6010.
- [77] 颀迪, 卢占会, 李庚银, 等. 一类含异步风电机组的电力系统小干扰区间稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3):609-614.
XIE Di, LU Zhanhui, LI Gengyin, et al. Interval stability analysis of small signal for a class of power system with asynchronous wind turbine generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3):609-614.
- [78] LU Zhanhui, XU Fanting, WEI Junqiang, et al. Interval stability analysis of power systems with wind turbine based on three-mass shaft model[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2019, 10(11):3181-3187.
- [79] 邢洁. 运行参数变化对电力系统小干扰稳定性的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
XING Jie. The influence of operation parameter on small-signal stability in power system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [80] 吴荻, 辛焕海, 甘德强. 电力系统动态仿真中参数不确定性影响的评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5):15-19.
WU Di, XIN Huanhai, GAN Deqiang. Evaluation on impact of parameter uncertainty in power system dynamic simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5):15-19.
- [81] 伍双喜, 张伯明, 吴文传. 电力系统仿真不确定性评估中主导参数的选择[J]. 电网技术, 2013, 37(4):999-1004.
WU Shuangxi, ZHANG Boming, WU Wenchuan. Selection of key parameters in uncertainty evaluation for power system simulation[J]. Power System Technology, 2013, 37(4):999-1004.
- [82] 王守相, 郑志杰, 王成山. 计及不确定性的电力系统时域仿真的区间算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7):40-44.
WANG Shouxiang, ZHENG Zhijie, WANG Chengshan. Power system time domain simulation under uncertainty based on interval method[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7):40-44.
- [83] KLINSHOV V V, KIRILLOV S, KURTHS J, et al. Interval stability for complex systems[J]. New Journal of Physics, 2018, 54(4):810-815.
- [84] CHANTAWAT C, BOTMART T, SUPAMA R, et al. Hybrid feedback control for exponential stability and robust H_∞ control of a class of uncertain neural network with mixed interval and distributed time-varying delays[J]. Computation, 2021, 9(6):62.
- [85] ZHANG Huasheng, XIA Jianwei, PARK J H, et al. Interval stability and interval stabilization of linear stochastic systems with time-varying delay[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2021, 31(6):2334-2347.
- [86] LI Jinwu, JIANG Chao, NI Bingyu, et al. Uncertain vibration analysis based on the conceptions of differential and integral of interval process[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2020, 16(2):225-244.
- [87] LI Yanling, DU Hao, HE Zhengyou, et al. Robust control for the IPT system with parametric uncertainty using LMI pole constraints[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1):1022-1035.

- [88] SHAFIEE-RAD M, SADABADI M S, SHAFIEE Q, et al. Robust performance satisfaction of DC microgrids using a decentralized optimal voltage control strategy[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(1):464-474.
- [89] ZHAO Changfei, WAN Can, SONG Yonhua. Operating reserve quantification using prediction intervals of wind power: an integrated probabilistic forecasting and decision methodology [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4):3701-3714.
- [90] ZHAO Changfei, WAN Can, SONG Yonhua. Cost-oriented prediction intervals: on bridging the gap between forecasting and decision [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4):3048-3062.

作者简介:



朱立轩

朱立轩(1996—),男,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统不确定性分析与控制等(**E-mail**:zlx@hhu.edu.cn);

万 灿(1986—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源电力系统不确定性预测、分析与控制(**E-mail**:canwan@zju.edu.cn);

鞠 平(1962—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源电力系统建模、分析与控制等(**E-mail**:pju@hhu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Review on power system interval analysis considering uncertainty

ZHU Lixuan¹, WAN Can², JU Ping¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The uncertainty of power system is gradually increasing. How to reasonably characterize the uncertainties and accurately analyze the impact on power system is a prominent issue for current and future researches. By comparing various uncertainty representations and focusing on interval uncertainty, the power system uncertain problems are divided into two categories of steady state interval analysis and dynamic interval analysis. Firstly, the interval prediction framework and method of uncertain factors in power system analysis are elaborated. Secondly, for the interval steady state problems, existing methods are reviewed and discussed from two perspectives of interval power flow and interval decision-making problems. Then, for the interval dynamic problems, existing interval analysis methods are reviewed and discussed from two perspectives of dynamic fluctuation and dynamic stability. Finally, the prospect of power system analysis considering interval uncertainty is discussed.

Key words: electric power systems; interval uncertainty; steady state; dynamic state