

综合能源系统运行可靠性评估综述及展望

李更丰¹, 黄玉雄¹, 别朝红¹, 安佳坤², 孙思源¹, 邱起瑞¹, 高晓松¹, 彭钰茗¹, 雷宇骁¹

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院, 河北 石家庄 050000)

摘要:研究综合能源系统的运行可靠性评估对规避综合能源系统的短期风险、保障其安全稳定运行具有重要价值。考虑系统运行状态、实时运行环境等因素的影响,分析综合能源系统在当前状态下未来短期内的可靠性水平,通过给出实时的运行可靠性指标为系统的运行调度提供决策支持。首先介绍综合能源系统的发展背景及意义、运行可靠性评估的概念及必要性;然后从运行可靠性评估建模、模型驱动以及数据驱动的运行可靠性评估方法3个方面,对国内外研究现状进行梳理,并分析归纳当前综合能源系统运行可靠性评估研究所面临的亟需解决的问题;最后针对问题,提出模型-数据混合驱动的综合能源系统运行可靠性评估思路,并对未来的研究方向进行展望。

关键词:综合能源系统;运行可靠性;可靠性评估;可靠性;模型驱动;数据驱动

中图分类号:TM 734

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201908040

0 引言

能源是人类赖以生存和发展的基础,是经济社会发展的命脉。提高能源效率、保障能源安全、促进可再生能源消纳和推动环境保护已经成为解决社会经济快速发展过程中,日益凸显的能源需求增长与能源紧缺、能源利用与环境保护之间矛盾的必然选择。在这样的背景下,综合能源系统的概念应运而生。

综合能源系统是打破供电、供气、供冷/热等各种能源供应系统单独规划、单独设计和独立运行的既有模式,对各类能源的分配、转化、存储和消费等环节进行有机协调与优化,充分利用可再生能源的新型区域能源供应系统,是能源互联网的物理载体^[1-2]。目前,综合能源系统已成为国内外能源领域未来发展的重要战略方向,开展综合能源系统相关技术的研究,掌握关键核心技术,对推动我国能源战略转型,构建“清洁低碳、安全高效”的现代能源体系,扩大我国在国际能源领域的影响力具有重大战略意义。

目前,针对综合能源系统相关技术的研究已得到国内外学者广泛关注。国外的综合能源系统研究起步较早。文献[3-7]对美国电力系统与天然气系统之间的交互影响进行了深入分析,用以指导综合能源系统的规划与运行。瑞士苏黎世联邦理工学院的研究团队提出的未来能源系统的能源集线器EH

(Energy Hub)模型^[8-9],已被广泛应用于综合能源系统的规划^[10]、需求响应控制^[11]、系统优化运行调度^[12]等相关研究中。相比于国外,我国的综合能源系统研究起步较晚,但发展迅速,目前相关研究已经在综合能源系统的概念和框架^[1,13]、技术经济性分析^[2]、运行分析与优化^[14]等方面取得了一系列成果。作为规划与运行的基础,综合能源系统的可靠性评估研究也已得到关注,以电力系统可靠性评估为基础,针对综合能源系统的可靠性评估研究已经起步。

现有的可靠性评估理论基本建立在概率和数理统计的基础上,对系统进行离线评估分析,并给出相应的可靠性指标。建模和算法中基本不考虑线路潮流、管道气压等系统运行状态,以及风速、气温等外部环境参数的变化对元件短期状态概率的影响,忽略机组的运行方式、负荷的实时变化、网络结构的变化等实时运行条件对系统可靠性的影响。为更好反映系统真实的可靠性水平,基于实时运行状态的运行可靠性评估不可或缺^[15]。

运行可靠性评估基于系统监控设备所提供的海量能源数据,考虑系统运行状态、实时运行环境等因素的影响,研究系统在当前状态下未来短期内的可靠性水平,并通过实时给出运行可靠性指标为系统的运行调度提供决策支持。运行可靠性评估作为监测、度量、预测系统短期运行风险的有效工具^[16],将为综合能源系统的规划、运行和交易等提供决策支持,在保障综合能源系统安全可靠运行中发挥重要作用。

运行可靠性评估的基本思路可以概括为:①建立计及系统运行状态、外部环境变化、元件健康状况、设备或系统运行方式等因素的可靠性评估概率模型;②基于模型随机采样得到系统未来短期内可

收稿日期:2019-03-29;修回日期:2019-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607136);国家自然科学基金联合基金资助项目(U1610122)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607136) and the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China(U1610122)

能的运行状态,进一步在多能流分析与优化的基础上实现系统状态评估;③计算系统运行可靠性指标。值得注意的是,这其实是一种基于模型驱动的思想。综合能源系统中,元件短期状态概率受到多类型时变因素的影响,且影响规律复杂,难以建立显式模型;另外,模型驱动的可靠性评估,在状态评估环节需要对每一个系统状态进行多能流分析与优化,评估效率低下。基于模型驱动的综合能源系统运行可靠性评估在精确建模和算法效率等方面存在难以克服的困难。

近年来,以大数据、机器学习为代表的新一代人工智能技术正深刻改变着世界各国的能源产业,能源领域信息物理高度融合的发展趋势,更为人工智能技术的广泛应用奠定了良好的基础,能源大数据中蕴含着不可估量的价值已成为学术界和工业界的共识^[17]。以数据驱动的思想为基础,利用机器学习技术,挖掘电力能源数据中的复杂非线性关联关系,解决电力能源系统规划和运行中面临的一系列难题,已成为电力能源领域的研究热点。数据驱动方法为综合能源系统的运行可靠性评估提供了一种新的途径^[18]。

本文首先介绍综合能源系统运行可靠性评估的背景及意义;然后从运行可靠性评估建模、模型驱动的运行可靠性评估方法和数据驱动的运行可靠性评估方法3个方面梳理研究现状并总结关键问题;最后,针对各关键问题,提出模型-数据混合驱动的综合能源系统运行可靠性评估思路,并对未来的研究方向进行展望。

1 运行可靠性评估建模

对元件状态概率的时变特性以及供需不确定性建模,是运行可靠性评估的内在需要,也是其区别于常规可靠性评估的特点。建立元件可靠性模型和供需不确定性模型,是分析系统运行可靠性的基础。

1.1 研究现状

1.1.1 元件可靠性建模

在传统可靠性评估中,元件通常采用可修复的两状态或多状态模型,状态之间的转移概率基于历史数据统计得到^[19],该模型反映了元件在长时间尺度内处于各状态的平均概率,未充分考虑其时变特性,不适合用于运行可靠性评估。综合能源系统中涉及供电、供气、供冷/热等不同子系统的各种不同的元件,元件短期状态概率受到运行不确定性、外部环境条件以及元件服役时间等多种因素的共同影响,而呈现时变特性。

文献[20]采用时间依存的元件状态模型来刻画元件故障率随元件寿命变化的趋势,但未考虑其他因素对元件故障率的影响。文献[21-22]针对电力

系统,分析了实时运行条件对元件可靠性模型的影响,对各停运因素进行分类并单独建模,认为各停运因素之间互斥,在分析多停运因素对元件故障率的共同影响时存在局限性。文献[16]总结了常用的短期输电线路可靠性模型和短期发电机可靠性模型。文献[23]依据天气三状态模型^[24],采用加权平均方法计算系统的平均故障率。文献[25]应用模糊技术建立天气相关模糊元件故障率模型。文献[26]采用决策树作为单个学习器,基于集成学习分析了环境参数对元件可靠性参数的影响。此外,文献[27]提出了与腐蚀程度和管道气压相关的输气管道故障模型,以分析管道在其生命周期内的故障率变化。文献[28]建立了供热管道强度失效概率模型。文献[29]提出了基于支持向量机 SVM(Support Vector Machine)的燃料电池故障诊断方法,通过分析燃料电池运行状态监测量预测其运行状态。文献[30]分析了离心式压缩机的主要故障类型,提出了基于蚁群算法的智能故障诊断算法。

综上,运行可靠性评估的元件建模在电力系统已具备一定的研究基础,但现有研究侧重于对影响元件状态概率的各因素单独建模,适用性受限,而其他供能系统的元件建模,多见于针对个别设备,且对外部环境的影响考虑较少^[31]。常见的元件可靠性模型及其所考虑的影响因素和适用范围如表1所示。

表1 元件可靠性模型

Table 1 Models of components reliability

模型种类	影响因素	适用范围
长期统计平均模型	无	长期规划可靠性评估
时间依存元件状态模型	元件服役时间	运行可靠性评估
条件依存元件状态模型	运行不确定性、 外部环境条件	运行可靠性评估

1.1.2 供需不确定性建模

综合能源系统中大量接入的间歇性可再生能源与多类型负荷所导致的供需不确定性,也将影响系统的运行可靠性。在供需不确定性建模方面,文献[32]提出了基于SVM的天然气负荷预测方法。文献[33]提出了基于机器学习的区域供热系统的热负荷预测方法。文献[34]对常用的风电出力预测技术进行了综述。文献[35]对基于神经网络的短期负荷预测方法进行了综述和评价。文献[36]将虚拟电厂的概念引入具有风电、光伏等间歇性可再生能源的微电网建模中,分析了其对主动配电网的影响。文献[37]研究了考虑风电不确定性的发电系统可靠性评估方法,并提出利用储能来提高具有高风电渗透率系统的可靠性。文献[38]采用了累计制表法对负荷不确定性建模,进而通过蒙特卡洛法模拟负荷时变特性。

综上,综合能源系统供需不确定性主要来源于

风电、光伏,以及电、气、冷/热等不同形式的负荷。目前,针对上述各对象,均有较成熟的预测技术^[39-41],有必要基于现有研究,综合分析供需不确定性对综合能源系统运行可靠性评估的影响。

此外,近年来数据驱动方法在元件状态建模和供需不确定性建模方面得到了较为广泛的应用。随着综合能源系统的发展以及计算、通信、传感等信息技术的应用,将产生海量有关能源系统生产、运行、控制、交易、消费等的能源数据^[17]。基于此,研究数据驱动的综合能源系统运行可靠性评估模型,符合未来技术发展的趋势,有望解决运行可靠性评估难以构建精确数学模型的问题。

1.2 关键问题

本节内容基于研究现状,归纳了目前综合能源系统运行可靠性评估建模方面仍面临的主要问题。

(1)如何准确刻画内外部多类型时变因素对元件可靠性参数的影响?元件状态模型是可靠性评估的基础,传统可靠性评估基于元件长期统计平均模型,元件可靠性参数在评估期间为恒定值,无法刻画元件状态概率在实际运行中的时变特性。为保证运行可靠性评估的准确性,首先需要对诸多影响元件状态概率的因素进行分析并筛选,进而建立与多影响因素相依存的元件状态模型,得到元件在评估期间各时段的可靠性参数。然而,综合能源系统元件种类繁多、影响因素庞杂、影响关系复杂,导致难以准确刻画多类型时变因素对元件可靠性参数的影响。

(2)如何反映间歇性可再生能源出力以及负荷的不确定性对运行可靠性评估的影响?风电、光伏等间歇性可再生能源的大量接入,其输出功率的不确定性给系统带来大量短期风险^[42],负荷的随机波动对系统造成的影响与间歇性可再生能源出力的不确定性类似。供需不确定性直接影响综合能源系统运行可靠性评估的准确性。在运行可靠性评估中,应基于可再生能源出力和负荷的预测及预测误差,建立适用于综合能源系统运行可靠性评估的供需不确定性模型。

2 模型驱动的运行可靠性评估方法

在得到运行可靠性评估模型的基础上,模型驱动的运行可靠性评估方法通常包括系统状态生成、系统状态评估、可靠性指标计算等主要步骤。其中,系统的状态通常采用蒙特卡洛模拟法,在可靠性评估模型基础上随机采样生成(解析法无需随机采样系统状态,但通常不适用于大规模复杂系统);在状态评估环节,对每一个系统状态进行多能流分析,如果有需要还需进一步进行系统状态校正,即求解以削减供能量最小为目标的最优能流问题;在可靠性

指标计算环节,通过定量计算可靠性指标以准确度量系统的实际运行可靠性水平。

2.1 研究现状

文献[43]提出了综合能源系统的可靠性评估框架,采用蒙特卡洛模拟法生成系统状态,在状态分析中考虑不同能源网络中能量流动模型^[44],例如考虑电力网络中电能的实时平衡以及天然气输气网络流量平衡等。文献[45]提出了考虑蒸汽网络的电热耦合潮流计算算法,并进一步应用于综合能源系统风险评估。文献[46]提出了一种含电转气的电-气互联系统可靠性评估方法,并建立了相应的能流模型、负荷削减优化模型。文献[47]提出了一种基于分层解耦优化框架的综合能源系统可靠性方法,旨在提高可靠性评估中多能流优化的效率。文献[48-49]采用解析法对考虑多能耦合的综合能源系统可靠性进行评估,但如前文所述,解析法需要列写系统可靠性指标的解析表达式,对复杂系统而言难以实现。文献[50]提出了基于智能体通信的综合能源系统可靠性评估方法,考虑了系统重构的影响。

多能耦合的最优能流建模及其求解是系统状态评估的核心。近年来,多能流优化问题已取得初步研究成果。文献[51]对考虑运行约束的区域电力-天然气-热力综合能源系统能量流优化进行了分析。文献[52]提出了一种考虑区域供热网络热惯性的综合能源系统优化运行模型。文献[53]对综合能源系统负荷侧灵活的能源需求进行研究。文献[54-56]分别对冷-热-电联产系统的系统集成方案、运行分析与优化、经济性分析与优化等方面进行了较为深入的研究。

在运行可靠性指标体系方面,文献[57]提出了电力系统运行可靠性指标的定位和定义。文献[58]在常规可靠性指标基础上拓展,建立了配电网运行可靠性4维指标体系,包括状态维、程度维、层次维和时间维。天然气系统的可靠性指标常见于单条天然气管道及树枝状输气管网,指标涉及系统可靠度、系统故障率和系统可用度等^[59-60],而针对大型天然气管网,目前仍缺乏一套客观、明确的可靠性评价体系^[61]。文献[62]提出了热力系统的运行可靠度指标。文献[63]针对热力、天然气等管网系统,提出了系统平均故障频率、系统平均故障持续时间等可靠性指标,这些指标与配电网可靠性指标^[64]是类似的。

综上,现有的综合能源系统可靠性评估方法主要为模型驱动的方法,其涉及的最优能流问题在模型精度、求解效率上取得了初步进展^[65]。但值得注意的是,模型驱动的可靠性评估精度与样本数量成正比,为保证评估结果的精度,需要求解成千上万个系统状态的能量流优化问题,且每个状态的求解需多次迭代计算,导致可靠性评估的计算时间长,效率

低。在评价指标方面,综合能源系统中各供能子系统对可靠性的需求是类似的,即衡量供能安全性与充裕度,目前电力系统相较于天然气、热力系统,其可靠性指标体系更为健全。

2.2 关键问题

本节对综合能源系统运行可靠性评估方法面临的主要问题进行分析,总结如下。

(1)如何针对综合能源系统设计合理的运行可靠性评价指标体系?由于各能源载体的特性各异^[66],首先需要对各供能子系统制定具有针对性的评价指标,并基于此建立系统整体的评价指标。此外,由于运行可靠性评估用于支持系统运行决策,因此指标要符合运行层面的要求和定位^[57]。综合能源系统目前还缺乏一套客观、明确、统一的可靠性评价指标体系。

(2)如何突破现有可靠性评估方法效率低下的局限,设计满足实际应用需求的运行可靠性评估方法?运行可靠性评估的应用需求包含准确性和快速性2个方面。然而,综合能源系统不同形式能源之间通过燃气轮机、电转气、电锅炉等能源转换设备相互耦合,各供能子系统间能量相互流动。综合能源系统可靠性评估在状态评估环节涉及多能流优化问题,导致可靠性评估的建模和计算复杂度大幅增加^[46]。传统模型驱动的方法难以同时满足运行可靠性评估对准确性和快速性的要求,一般采用降低准确性(削减系统状态数)的方式以保证评估的快速性^[20]。若在评估过程中考虑元件状态概率的时变特性以及供需的不确定性,将进一步加剧这一矛盾。因此,有必要探索更加高效的运行可靠性评估理论和方法。

3 数据驱动的运行可靠性评估方法

数据驱动的运行可靠性评估方法,通过采用机器学习等技术加速系统状态生成或系统状态评估环节,以提高运行可靠性评估的计算效率。目前,以机器学习为代表的人工智能技术及其在能源领域的应用已经成为研究热点。

3.1 研究现状

多位学者通过“机器学习”专刊^[67-68],针对机器学习在电力系统和综合能源系统中应用的现状和展望进行了讨论。文献[69-70]针对网络拓扑,提出了一种基于SVM的可靠性评估经验模型,用以提高基于蒙特卡洛模拟的可靠性评估效率。文献[71-72]先后研究了基于机器学习的两状态、多状态网络的近似可靠性计算方法。文献[73-74]研究了基于蒙特卡洛模拟和SVM的可靠性评估方法。文献[75]对贝叶斯网络在可靠性评估中的应用进行了综述。文献[76]提出一种基于拓扑特征分析和深度卷积神

经网络的配电网网架结构坚强性评估方法。文献[77]依托人工智能技术快速高效地寻找能够反映电网安全信息的关键特征,实现对实际电网的实时监控和分析。文献[78]提出了一种对故障数据进行特征自学习,进而实现输电线路故障类型辨识的方法。文献[79]提出了利用深度神经网络求解概率能量流,克服原有计算需要求解大量高维非线性方程组的瓶颈。文献[80-81]分别提出了将神经网络、SVM与蒙特卡洛模拟结合的发输电系统可靠性评估方法。

虽然目前人工智能呈现蓬勃发展态势,但同时该技术本身及其在能源系统的应用仍面临诸多挑战。文献[82]指出人工智能算法存在算法训练耗时较长、模型泛化性能难以保证、可解释性较弱等关键问题。针对机器学习方法在电力系统安全稳定研究中应用的局限,文献[18]将领域知识与机器学习理论相结合,进行模型-数据混合驱动的电网安全 and 信息安全分析;文献[83]也指出人工智能技术将以数据驱动和仿真建模相结合的形式在综合能源系统中应用。

综上,数据驱动的网络拓扑可靠性评估理论与方法已得到初步发展,利用机器学习解决能源领域现有问题,已成为当下学界的研究热点,并在诸多方面已取得初步研究成果,但仍面临诸多科学挑战和技术难题,模型-数据混合驱动有望成为未来机器学习在综合能源系统中应用的主要形式。

3.2 关键问题

目前,电力系统和其他供能系统的可靠性评估研究仍以模型驱动的方法为主,数据驱动方法在能源系统可靠性评估领域的应用尚未得到重视,其应用模式、应用效果有待进一步的深入研究。

4 展望

针对前文所分析的综合能源系统运行可靠性评估目前所面临的关键问题,本节将提出可能的解决思路,并进一步对未来的研究方向进行展望。

4.1 数据驱动的条件依存元件状态建模

元件发生故障后经过修理能再次恢复到原来的工作状态,这种元件称为可修复元件;元件发生故障后不能修复或虽能修复,但很不经济,这种元件称为不可修复元件^[58]。在运行可靠性评估中,当研究的时间范围较短而元件修复时间较长时,可采用元件的不可修复故障模型,简化可靠性分析过程;当研究的时间范围较长而元件修复时间较短时,依据元件类型采用可修复故障模型或不可修复故障模型^[84]。其次,针对元件短期可靠性参数的时变特性,现有方法一般逐一分析影响因素与元件可靠性参数之间的相依关系,认为影响因素之间相互独立,在刻画多因

素与元件可靠性参数之间的关联关系时存在局限性。

近年来,数据驱动方法被应用于解决能源领域的实际问题,通过分析大量能源数据自动或半自动地获取知识,这里知识定义为对于数据间关系的定量描述。采用机器学习挖掘可靠性参数及其影响因素之间的关联关系的数据驱动方法^[26,74],替代需要建立精确数学模型的模型驱动方法,有望解决元件状态难以准确建模的问题。其基本思路为:

(1)确定元件状态的主要影响因素,包括环境相关因素^[26]、系统运行状态^[22]以及元件服役时间^[20]等;

(2)确定元件状态数,若采用两状态元件模型,则元件可能的状态包括运行状态和故障状态;

(3)确定学习器,如决策树^[26]、SVM^[69]等,将影响因素作为学习器的预测因子,元件状态作为标签;

(4)根据选择的学习器,确定学习算法并训练学习器,得到预测因子与标签数据之间的数学关系;

(5)保存学习器参数,用于预测元件在评估期间各时段处于各状态的概率。

以两状态的条件依存元件状态模型为例, $P_{c(t)}^{\text{down}}$ 为元件 c 在时段 t 处于故障状态 $s_{c(t)}$ 的概率,即:

$$P_{c(t)}^{\text{down}} = f(X_t) \quad (1)$$

其中, X_t 为时段 t 的影响因素集合,即学习器的输入; f 为学习得到的关联函数。进一步地,时段 t 的系统状态 S_t 可由元件状态组合得到:

$$S_t = \{s_{1(t)}, s_{2(t)}, \dots, s_{n(t)}\} \quad (2)$$

其中, n 为元件数目。

目前,许多数据驱动方法已在能源系统诸多方面取得了不同程度的应用,集成学习和深度学习等学习算法可用于条件依存的元件状态建模,但相关数据质量较差且不完备,是目前进行数据驱动的元件状态建模所面临的主要问题。

4.2 基于预测及预测误差的供需不确定性建模

可再生能源出力及负荷的不确定性直接影响运行可靠性评估的准确性^[85-86]。为定量分析供需不确定性对系统运行可靠性的影响,需要建立基于预测及预测误差的供需不确定模型。综合能源系统中,包含多种类型的间歇性可再生能源和多种能源形式的负荷,为简化供需不确定性模型,可将具有优先调度等级的可再生能源出力视为负值负荷处理,定义综合能源系统净负荷预测值为:

$$L_{\text{net}} = \sum_{i \in A} l_i - \sum_{j \in B} p_j \quad (3)$$

其中, L_{net} 为系统净负荷预测值; A 和 B 分别为系统中各形式负荷和各类型间歇性可再生能源的集合; l_i 为负荷 i 的需求预测值; p_j 为可再生能源 j 的出力预测值。假设负荷需求和可再生能源出力符合正态分

布,且正态分布之间相互独立,则系统净负荷预测标准差为:

$$\sigma_{L_{\text{net}}} = \sqrt{\sum_{i \in A} \sigma_{l_i}^2 + \sum_{j \in B} \sigma_{p_j}^2} \quad (4)$$

其中, $\sigma_{L_{\text{net}}}$ 、 σ_{l_i} 和 σ_{p_j} 分别为系统净负荷、负荷需求 l_i 和可再生能源出力 p_j 的预测标准差。

净负荷预测不确定性可采用正态分布或累计制表方法处理,然后使用蒙特卡洛方法随机抽样,并考虑负荷时变特性 Gauss-Markov 过程。得到综合能源系统净负荷需求预测值及其预测标准差后,通过对预测误差离散化,可得到净负荷在评估期间各时段的可能取值及其概率,进而基于蒙特卡洛抽样等方法分析供需不确定性对综合能源系统运行可靠性的影响。

综合能源系统的条件依存元件状态模型和供需不确定模型,共同刻画了短期影响因素对系统运行可靠性的影响。

4.3 综合能源系统运行可靠性评价指标体系

评价指标旨在定量度量故障发生的可能性及其可能导致的后果的严重性。综合能源系统中各供能子系统对可靠性的需求类似,即衡量供能安全性与充裕度,目前电力系统的可靠性研究,相较于天然气系统和热力系统,发展得更早,受关注程度更高,体系也更加健全,文献[57]提出的电力系统运行可靠性指标的定位和定义,可作为设计综合能源系统运行可靠性评价指标体系的参考。

由于综合能源系统包含多个供能子系统,因此,首先需要根据不同供能子系统的供能特点,研究具有针对性的评价指标,并且在此基础上得到系统整体的评价指标。以供能不足期望值 EENS(Expected Energy Not Supplied)为例,EENS 用于度量故障所导致的缺供能,在电力系统中,EENS 常定义为故障持续时间与平均负荷的乘积。由于冷/热能传播的时间尺度较大,其负荷模型有别于电负荷,具有冷负荷启动 CLPU(Cold Load Pick-Up)现象^[66,87],即负荷需求在故障修复后的一段时间内明显大于故障修复前的水平,从供能方的角度出发,可以理解为部分缺供能得以弥补,针对上述现象,定义考虑 CLPU 的供冷/热系统的 EENS 修正指标^[66] λ_{EENS} 为:

$$\lambda_{\text{EENS}} = LD - E^r \quad (5)$$

其中, L 为平均负荷; D 为故障持续时间; E^r 为 EENS 指标修正量。进一步可得到综合能源系统的 EENS 指标为:

$$\lambda_{\text{EENS}}^{\text{IES}} = \sum_{i \in G} L_i D - \sum_{j \in H} E_j^r \quad (6)$$

其中, G 为所有形式负荷的集合; H 为时间尺度较大的负荷的集合。

运行可靠性评估旨在为系统运行调度提供决策

支持,因此指标不仅要反映系统的负荷损失情况、切负荷频率等,还要反映系统的安全裕度以及运行约束越限的情况,并能反映评估期间内关键元件的重要度,支持系统薄弱环节的辨识。

4.4 模型-数据混合驱动的运行可靠性评估方法

为保证评估结果的精度,传统模型驱动的可靠性评估方法需要求解大量系统状态的能流计算及优化问题,导致可靠性评估的计算时间长、效率低,难以满足运行可靠性实时评估的要求。近年来,以机器学习为代表的新一代人工智能技术的兴起,为解决能源领域现有问题提供了新思路,基于数据驱动方法“离线建模-在线应用”的模式,将大量的在线计算任务转移到离线环节,可以有效解决评估准确性和快速性的矛盾。而为了克服数据驱动方法自身的局限性,需要探索模型-数据混合驱动的运行可靠性评估方法。

本文提出模型-数据混合驱动的运行可靠性评估思路,以模型驱动思想建立并求解系统状态分析与校正模型,计及多供能子系统运行约束与耦合关联特性,保证可靠性评估精度,为数据驱动提供训练标签;以数据驱动思想构建机器学习模型和参数训练算法,挖掘系统状态与运行可靠性间复杂非线性关联关系,实现运行可靠性实时评估。进一步地,将模型-数据混合驱动的思想用于运行可靠性评估的各个环节,形成综合能源系统运行可靠性评估的“离线建模-在线评估”新模式,拟解决传统方法评估效率低下的问题,所提模式如图1所示。

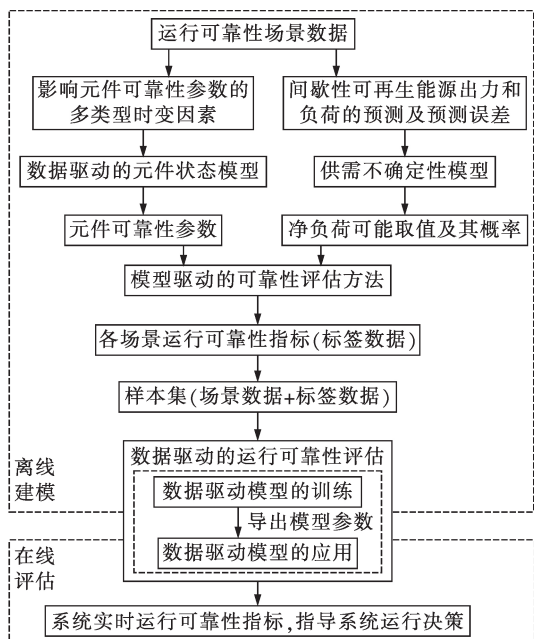


Fig.1 “Offline modeling-online evaluation” operational reliability assessment mode

4.4.1 离线建模环节

对于离线建模环节,首先基于历史运行可靠性场景数据(包括影响元件短期状态概率的系统运行

状态、环境参数等数据,以及用于分析供需不确定性的可再生能源出力和负荷的预测及预测误差数据),由数据驱动的元素状态模型和供需不确定性模型得到评估期间内各时段的元件可靠性参数和净负荷可能取值及其概率。在此基础上,采用模型驱动的可靠性评估方法(仍以多能流计算及优化为核心)计算可靠性指标,即标签数据,场景数据和标签数据构成训练数据驱动模型的样本集。然后,选取合适的机器学习算法,自主挖掘标签数据和场景数据之间的关联关系,并以模型参数的形式保存。该环节包含大量计算任务,以保证评估的准确性。

4.4.2 在线评估环节

对于在线评估环节,导出数据驱动模型的参数,由系统实时的场景数据作为数据驱动模型的输入,可实时得到系统运行可靠性指标。基于此,对可靠性指标进行灵敏度分析,利用灵敏度分析的结果和重要度排序理论辨识综合能源系统的薄弱环节,由此制定系统运行可靠性提升策略,指导系统运行决策。

5 结论

运行可靠性评估作为规避系统短期风险、保障系统安全稳定运行的有效工具,对促进综合能源系统发展具有重要作用。本文首先介绍了综合能源系统的发展背景及意义、运行可靠性评估的概念及必要性;然后从运行可靠性评估建模、模型驱动以及数据驱动的可靠性评估方法3个方面出发,梳理了研究现状及关键问题,目前,综合能源系统运行可靠性评估在元件状态建模、供需不确定性建模、评价指标体系以及可靠性评估方法等方面仍面临诸多问题,亟待解决;最后针对问题提出了模型-数据混合驱动的综合能源系统运行可靠性评估思路,以及“离线建模-在线评估”的可靠性评估新模式,该模式通过将大量的在线计算任务转移到离线环节,有望突破传统可靠性评估方法效率低下的瓶颈,实现运行可靠性实时评估。

值得注意的是,综合能源系统结构复杂、能源类型多样、耦合特性复杂,且运行可靠性评估相比于长期规划可靠性评估,需要计及诸多时变因素的影响,实现对综合能源系统运行可靠性的实时准确评估十分具有难度;此外,目前综合能源系统中各供能子系统的可靠性评估方法仍以模型驱动为主,数据驱动方法的应用十分有限。但随着信息物理融合的发展,模型-数据混合驱动的运行可靠性评估方法,将成为未来的重要研究方向。

参考文献:

- [1] 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.

- JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 16-25.
- [2] 曾鸣, 刘道新, 李娜, 等. 综合能源系统的关键经济问题研究[J]. 华东电力, 2013, 41(7): 1403-1408.
- ZENG Ming, LIU Daoxin, LI Na, et al. Key economic issues in integrated energy system[J]. East China Electric Power, 2013, 41(7): 1403-1408.
- [3] SHAHIDEHPOUR M, FU Y, WIEDMAN T. Impact of natural gas infrastructure on electric power systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 1042-1056.
- [4] LI T, EREMA M, SHAHIDEHPOUR M. Interdependency of natural gas network and power system security[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1817-1824.
- [5] SAHIN C, LI Z, SHAHIDEHPOUR M, et al. Impact of natural gas system on risk-constrained midterm hydrothermal scheduling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 520-531.
- [6] SAHIN C, SHAHIDEHPOUR M, ERKMEN I. Generation risk assessment in volatile conditions with wind, hydro and natural gas units[J]. Applied Energy, 2012, 96: 4-11.
- [7] LIU C, SHAHIDEHPOUR M, WANG J. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow[J]. Chaos, 2011, 21(2): 1-12.
- [8] GEIDL M, KOEPEL G, FAVREPERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [9] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 145-155.
- [10] ZHANG X, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2302-2311.
- [11] SHEIKHI A, RAYATI M, BAHRAMI S, et al. Integrated demand side management game in smart energy hubs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 675-683.
- [12] MANSHADI S D, KHODAYAR M E. Resilient operation of multiple energy carrier microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2283-2292.
- [13] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
- JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [14] GU W, WANG J, LU S, et al. Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings[J]. Applied Energy, 2017, 199: 234-246.
- [15] 孙元章, 程林, 刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 6-12.
- SUN Yuanzhang, CHENG Lin, LIU Haitao. Power system operating reliability evaluation based on real-time operating state[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 6-12.
- [16] 孙羽, 王秀丽, 王博学, 等. 电力系统短期可靠性评估综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 143-154.
- SUN Yu, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. An overview of the short-term reliability evaluation of power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 143-154.
- [17] 赵俊华, 董朝阳, 文福拴, 等. 面向能源系统的数据科学: 理论与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 1-11.
- ZHAO Junhua, DONG Zhaoyang, WEN Fushuan, et al. Data science for energy systems: theory, techniques and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 1-11.
- [18] 黄天恩, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 模型-数据混合驱动的电网安全特征选择和知识发现关键技术与工程应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 95-101, 208.
- HUANG Tianen, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Hybrid model and data driven concepts for power systems security feature selection and knowledge discovery: key technologies and engineering application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 95-101, 208.
- [19] BILLINTON R. Power system reliability evaluation[M]. New York, USA: Taylor & Francis, 1970.
- [20] LIU H, SUN Y, CHENG L, et al. Online short-term reliability evaluation using a fast sorting technique[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(1): 139-148.
- [21] 刘海涛, 程林, 孙元章, 等. 基于实时运行条件的元件停运因素分析与停运率建模[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 6-11, 44.
- LIU Haitao, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. Outage factors analysis and outage rate model of components based on operating conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 6-11, 44.
- [22] 孙元章, 程林, 刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 6-12.
- SUN Yuanzhang, CHENG Lin, LIU Haitao. Power system operating reliability evaluation based on real-time operating state[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 6-12.
- [23] BILLINTON R, SINGH G. Application of adverse and extreme adverse weather modeling in transmission and distribution system reliability evaluation[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(1): 115-120.
- [24] KOEN H R, BOSSHART W R, PIERCE H E, et al. Terms for reporting and analyzing outage of electrical transmission and distribution facilities and interruptions to customer service: IEEE Standard 346[S]. Piscataway, NJ, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1973.
- [25] LI W, ZHOU J, XIE K, et al. Power system risk assessment using a hybrid method of fuzzy set and Monte Carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 336-343.
- [26] NATEGHI R. Multi-dimensional infrastructure resilience modeling: an application to hurricane-prone electric power distribution systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 13478-13489.
- [27] TEE K F, PESINIS K. Reliability prediction for corroding natural gas pipelines[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 65: 91-105.
- [28] VALINČIUS M, ŽUTAUTAITĖ I, DUNDULIS G, et al. Integrated assessment of failure probability of the district heating network[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 133: 314-322.
- [29] 王兴娣. 基于数据驱动的质子交换膜燃料电池电堆故障诊断研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- WANG Xingdi. Study on data-driven fault diagnosis for proton exchange membrane fuel cell stack[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [30] 桂博翔. 基于蚁群算法的离心式压缩机智能故障诊断方法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015.
- GUI Boxiang. The study of centrifugal compressor fault diagnosis based on the ant colonies algorithm[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015.
- [31] 丁一, 江艺宝, 宋永华, 等. 能源互联网风险评估研究综述(一): 物理层面[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3806-3817.
- DING Yi, JIANG Yibao, SONG Yonghua, et al. Review of risk assessment for energy internet, part I: physical level[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3806-3817.
- [32] 刘涵, 刘丁, 郑岗, 等. 基于最小二乘支持向量机的天然气负荷预测[J]. 化工学报, 2004, 55(5): 828-832.

- LIU Han, LIU Ding, ZHENG Gang, et al. Natural gas load forecasting based on least squares support vector machine [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2004, 55(5): 828-832.
- [33] IDOWU S, SAGUNA S, AHLUND C, et al. Applied machine learning: forecasting heat load in district heating system [J]. Energy and Buildings, 2016, 133: 478-488.
- [34] FOLEY A M, LEAHY P G, MARVUGLIA A, et al. Current methods and advances in forecasting of wind power generation [J]. Renewable Energy, 2012, 37(1): 1-8.
- [35] HIPPERT H S, PEDREIRA C E, SOUZA R C. Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(1): 44-55.
- [36] BIE Z, ZHANG P, LI G, et al. Reliability evaluation of active distribution systems including microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2342-2350.
- [37] HU P, KARKI R, BILLINTON R. Reliability evaluation of generating systems containing wind power and energy storage [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3(8): 783-791.
- [38] LI W, BILLINTON R. Effect of bus load uncertainty and correlation in composite system adequacy evaluation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(4): 1522-1529.
- [39] 李燕青, 杜莹莹. 基于双维度顺序填补框架与改进 Kohonen 天气聚类的光伏发电短期预测 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 60-65.
- LI Yanqing, DU Yingying. Short-term photovoltaic power forecasting based on double-dimensional sequential imputation framework and improved Kohonen clustering [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 60-65.
- [40] ZHI Li, LIN Ye, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-16.
- [41] 李彬, 彭曙蓉, 彭君哲, 等. 基于深度学习分位数回归模型的风电功率概率密度预测 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 15-20.
- LI Bin, PENG Shurong, PENG Junzhe, et al. Wind power probability density forecasting based on deep learning quantile regression model [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 15-20.
- [42] DOHERTY R, O'MALLEY M. A new approach to quantify reserve demand in systems with significant installed wind capacity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 587-595.
- [43] 加鹤萍, 丁一, 宋永华, 等. 信息物理深度融合背景下综合能源系统可靠性分析评述 [J]. 电网技术, 2019, 43(1): 1-11.
- JIA Heping, DING Yi, SONG Yonghua, et al. Review of reliability analysis for integrated energy systems with integration of cyber physical systems [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 1-11.
- [44] 陈胜, 卫志农, 孙国强, 等. 电-气混联综合能源系统概率能量流分析 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6331-6340.
- CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Probabilistic energy flow analysis in integrated electricity and natural-gas energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6331-6340.
- [45] 任志超, 程超, 何仲藩, 等. 基于电热耦合潮流的综合能源系统风险评估方法 [J]. 电力建设, 2018, 39(12): 102-108.
- REN Zhichao, CHENG Chao, HE Zhongxiao, et al. Risk assessment of integrated energy system based on electricity and heat power flow [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(12): 102-108.
- [46] 余娟, 马梦楠, 郭林, 等. 含电转气的电-气互联系统可靠性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 708-715.
- YU Juan, MA Mengnan, GUO Lin, et al. Reliability evaluation of integrated electrical and natural-gas system with power-to-gas [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 708-715.
- [47] LEI Y, HOU K, WANG Y, et al. A new reliability assessment approach for integrated energy systems: using hierarchical decoupling optimization framework and impact-increment based state enumeration method [J]. Applied Energy, 2018, 210: 1237-1250.
- [48] 任洪波, 吴琼, 邱留良, 等. 分布式能源系统可靠性评价 [J]. 热力发电, 2016, 45(4): 65-69.
- REN Hongbo, WU Qiong, QIU Liuliang, et al. Reliability assessment of distributed energy system [J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 65-69.
- [49] 肖白, 刘亚伟, 施永刚, 等. 基于主成分分析的中压配电网供电可靠性评估 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 7-12.
- XIAO Bai, LIU Yawei, SHI Yonggang, et al. Power supply reliability assessment of mid-voltage distribution network based on principal component analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 7-12.
- [50] LI G, BIE Z, KOU Y, et al. Reliability evaluation of integrated energy systems based on smart agent communication [J]. Applied Energy, 2016, 167: 397-406.
- [51] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑运行约束的区域电力-天然气-热力综合能源系统能量流优化分析 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7108-7120, 7425.
- WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Analysis of energy flow optimization in regional electricity-gas-heat integrated energy system considering operational constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7108-7120, 7425.
- [52] GU W, WANG J, LU S, et al. Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings [J]. Applied Energy, 2017, 199: 234-246.
- [53] SHAO C, DING Y, WANG J, et al. Modeling and integration of flexible demand in heat and electricity integrated energy system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 361-370.
- [54] 王进, 李欣然, 杨洪明, 等. 与电力系统协同区域型分布式冷热电联供能源系统集成方案 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 16-21.
- WANG Jin, LI Xinran, YANG Hongming, et al. An integration scheme for DES/CCHP coordinated with power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 16-21.
- [55] 周任军, 冉晓洪, 毛发龙, 等. 分布式冷热电三联供系统节能协调优化调度 [J]. 电网技术, 2012, 36(6): 8-14.
- ZHOU Renjun, RAN Xiaohong, MAO Falong, et al. Energy-saving coordinated optimal dispatch of distributed combined cool, heat and power supply [J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 8-14.
- [56] 王亚楠, 吴杰康, 毛晓明. 基于随机动态规划的多能联供系统冷热电经济分配模型 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 21-26.
- WANG Yanan, WU Jiekang, MAO Xiaoming. Economic distribution model of cooling, heating and power energy in multi-energy supply system based on stochastic dynamic programming [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 21-26.
- [57] 孙元章, 程林, 何剑. 电力系统运行可靠性理论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [58] 胡丽娟, 刁赢龙, 刘科研, 等. 基于大数据技术的配电网运行可靠性分析 [J]. 电网技术, 2017, 41(1): 265-271.
- HU Lijuan, DIAO Yinglong, LIU Keyan, et al. Operational reliability analysis of distribution network based on big data tech-

- nology[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 265-271.
- [59] 曲慎扬. 油气管道可靠性评价指标及其计算[J]. 油气储运, 1996, 15(4): 1-4.
- QU Shenyang. Evaluation indexes and calculations of the reliability of oil and gas pipelines[J]. Oil Gas Storage and Transportation, 1996, 15(4): 1-4.
- [60] 陈思锭, 李重剑, 陈黎鹏. 树枝状输气管网可靠性评估[J]. 油气储运, 2012, 31(5): 335-339, 408.
- CHEN Siding, LI Zhongjian, CHEN Lipeng. Reliability evaluation of dendritic gas pipeline network[J]. Oil Gas Storage and Transportation, 2012, 31(5): 335-339, 408.
- [61] 黄维和. 大型天然气管网系统可靠性[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 401-404.
- HUANG Weihe. Reliability of large-scale natural gas pipeline network[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 401-404.
- [62] SHARAPOV V I, ORLOV M E, KUNIN M V. Reliability analysis of the combined district heating systems[J]. Thermal Engineering, 2015, 62(14): 1012-1016.
- [63] RIMKEVICIUS S, KALIATKA A, VALINCIUS M, et al. Development of approach for reliability assessment of pipeline network systems[J]. Applied energy, 2012, 94: 22-33.
- [64] LI W. Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods[M]. Boston, USA: Springer Science & Business Media, 2013.
- [65] 张义志, 王小君, 和敬涵, 等. 考虑供热系统建模的综合能源系统最优能流计算方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 562-570.
- ZHANG Yizhi, WANG Xiaojun, HE Jinghan, et al. Optimal energy flow calculation method of integrated energy system considering thermal system modeling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 562-570.
- [66] LI G, HUANG Y, BIE Z. Reliability evaluation of smart distribution systems considering load rebound characteristics[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1713-1721.
- [67] 胡伟. 新一代人工智能在智能电网和能源互联网中的应用专题特约主编寄语[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 1.
- HU Wei. The application of new generation artificial intelligence in smart grid and energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 1.
- [68] 杨挺, 高昆仑, 岳东. 人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用专辑特约主编寄语[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 1.
- YANG Ting, GAO Kunlun, YUE Dong. Application of artificial intelligence in power system and integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 1.
- [69] ROCCO C M, MORENO J A. Fast Monte Carlo reliability evaluation using support vector machine[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2002, 76(3): 237-243.
- [70] LI H, LÜ Z, YUE Z. Support vector machine for structural reliability analysis[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(10): 1295-1303.
- [71] MUSELLI M. Empirical models based on machine learning techniques for determining approximate reliability expressions[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 83(3): 301-309.
- [72] MUSELLI M. Approximate multi-state reliability expressions using a new machine learning technique[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2005, 89(3): 261-270.
- [73] MORENO J A. System reliability evaluation using monte carlo & support vector machine[C]//Annual Reliability and Maintainability Symposium. Tampa, USA: IEEE, 2003: 482-486.
- [74] PAN Q, DIAS D. An efficient reliability method combining adaptive support vector machine and Monte Carlo simulation[J]. Structural Safety, 2017, 67: 85-95.
- [75] CAI B, KONG X, LIU Y, et al. Application of Bayesian networks in reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2146-2157.
- [76] 林君豪, 张焰, 赵腾, 等. 基于改进卷积神经网络拓扑特征挖掘的配电网结构坚强性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 84-96, 323.
- LIN Junhao, ZHANG Yan, ZHAO Teng, et al. Structure strength assessment method of distribution network based on improved convolution neural network and network topology feature mining[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 84-96, 323.
- [77] 吴双, 胡伟, 张林, 等. 基于AI技术的电网关键稳定特征智能选择方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 14-21, 316.
- WU Shuang, HU Wei, ZHANG Lin, et al. An intelligent key feature selection method of power grid based on artificial intelligence technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 14-21, 316.
- [78] 徐舒玮, 邱才明, 张东霞, 等. 基于深度学习的输电线路故障类型辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 65-74, 321.
- XU Shuwei, QIU Caiming, ZHANG Dongxia, et al. A deep learning approach for fault type identification of transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 65-74, 321.
- [79] 余娟, 杨燕, 杨知方, 等. 基于深度学习的概率能量流快速计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 22-30, 317.
- YU Juan, YANG Yan, YANG Zhifang, et al. Fast probabilistic energy flow analysis based on deep learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 22-30, 317.
- [80] DA SILVA A M L, DE RESENDE L C, DA FONSECAMANSO L A, et al. Composite reliability assessment based on Monte Carlo simulation and artificial neural networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1202-1209.
- [81] PINDORIYA N M, JIRUTITIJARON P, SRINIVASAN D, et al. Composite reliability evaluation using Monte Carlo simulation and least squares support vector classifier[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2483-2490.
- [82] 汤奕, 崔晗, 李峰, 等. 人工智能在电力系统暂态问题中的应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 2-13, 315.
- TANG Yi, CUI Han, LI Feng, et al. Review on artificial intelligence in power system transient stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 2-13, 315.
- [83] 杨挺, 赵黎媛, 王成山. 人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 2-14.
- YANG Ting, ZHAO Liyuan, WANG Chengshan. Review on application of artificial intelligence in power system and integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 2-14.
- [84] ZHANG N, KANG C, LIU J, et al. Mid-short-term risk assessment of power systems considering impact of external environment[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(2): 118-126.
- [85] JIANG Wen, ZHENG Yan, FENG Donghan. A review on reliability assessment for wind power[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9): 2485-2494.
- [86] BILLINTON R, HUANG D. Effects of load forecast uncertainty on bulk electric system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 418-425.
- [87] SCHNEIDER K P, SORTOMME E, VENKATA S S, et al. Evaluating the magnitude and duration of cold load pick-up on residential distribution using multi-state load models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3765-3774.

作者简介:

李更丰(1984—),男,湖南邵东人,副教授,博士,主要研究方向为综合能源系统规划与运行(**E-mail**:gengfengli@mail.xjtu.edu.cn);

黄玉雄(1995—),男,福建永安人,博士研究生,主要研究方向为综合能源系统可靠性评估、机器学习在电力系统中的应用(**E-mail**:hyx.xj@stu.xjtu.edu.cn);



李更丰

别朝红(1970—),女,山东潍坊人,教授,博士,主要研究方向为能源互联网和电力系统恢复力(**E-mail**:zhbie@mail.xjtu.edu.cn);

安佳坤(1988—),男,河北石家庄人,工程师,硕士,主要研究方向为配电网规划、综合能源规划(**E-mail**:anjiakun_work@126.com)。

Review and prospect of operational reliability evaluation of integrated energy system

LI Gengfeng¹,HUANG Yuxiong¹,BIE Zhaohong¹,AN Jiakun²,SUN Siyuan¹,
QIU Qirui¹,GAO Xiaosong¹,PENG Yuming¹,LEI Yuxiao¹

(1. School of Electrical Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China;

2. State Grid Hebei Economic Research Institute,Shijiazhuang 050000,China)

Abstract:Operational reliability evaluation of integrated energy system is of great value to avoid short-term risks and ensure the safe and stable operation. The short-term reliability of integrated energy system under the current state is analyzed,and the decision support for system operation scheduling by giving real-time operational reliability indices is provided. Firstly,the background of the integrated energy system and the necessity of operational reliability evaluation are introduced. Secondly,from the aspects of operational reliability evaluation modeling,model driven and data driven operational reliability evaluation approaches,the research status is reviewed and the key problems faced currently are analyzed and summarized. Finally,the idea of model-data hybrid driven operational reliability evaluation of integrated energy system is proposed and the future research directions are prospected.

Key words:integrated energy system;operational reliability;reliability evaluation;reliability;model driven;data driven