



面向新型电力系统的人工智能: 趋势与挑战

毕天姝^{1*}, 丁肇豪¹, 饶宏², 刘念¹

1. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 北京 102206

2. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广州 510663

* E-mail: tsbi@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2025-07-01; 接受日期: 2025-11-17; 网络版发表日期: 2026-01-14

国家重点研发计划项目(编号: 2022YFB4202300)资助

摘要 在“双碳”目标推动下, 新型电力系统快速发展, 呈现出源荷随机波动性强、电力电子化程度高、外部因素影响大等主要特征, 给电网安全稳定经济运行带来了诸多挑战. 与此同时, 人工智能技术正经历快速变革, 初步具备自主知识发现并进行知识推演的能力, 推动科研范式发生从传统机理驱动、实验驱动到数据驱动、计算驱动的转变, 为解决新型电力系统中的复杂问题提供了新路径. 本文总结归纳了人工智能技术在新型电力系统仿真分析、规划设计、调度运行、稳定控制和市场交易等典型应用场景的理论与技术进展, 深入剖析了当前面向新型电力系统的人工智能技术发展现状与未来趋势. 本文针对应用过程中存在的关键技术瓶颈, 进一步探讨了人工智能赋能新型电力系统亟待突破的若干关键问题, 为后续研究提供了方向性参考.

关键词 新型电力系统, 人工智能, 数据驱动, 计算驱动

1 引言

在“双碳”目标驱动下, 构建新型电力系统已成为推动我国能源结构绿色低碳转型的关键支撑. 新型电力系统以新能源为主体^[1], 具备安全高效、清洁低碳、柔性灵活、智慧融合等特征^[2]. 在深化建设进程中, 新型电力系统呈现出3方面特性: 一是新能源发电占比快速提升带来的强随机波动性; 二是电力电子设备广泛应用导致的高度电力电子化; 三是多源外部因素耦合作用形成的复杂影响机制. 这些新特性给电网安全稳定经济运行带来了一系列新挑战^[3,4].

以风电、光伏为代表的新能源发电占比快速提

升, 其强随机波动性显著改变了电力系统运行特性, 导致电源出力波动幅度和频次大幅增加, 对电力系统规划、运行、控制等多个环节带来严峻挑战. 以西北某省为例, 2024年新能源大幅波动频次较“十三五”期间增加了18倍, 直接导致系统运行复杂度大幅提升. 这一变化在华北电网体现尤为明显: 为保障张北、锡盟新能源基地送出, 电网计算方式数从2016年30种增加至2024年超8000种, 传统依赖专家经验和人工方法已难以有效应对如此大规模的计算需求^[5].

新能源发电装备、柔性输电和新型负荷多通过电力电子设备与电力系统连接, 导致新型电力系统各环节的电力电子化程度大幅增加, 高维非线性特征使得

引用格式: 毕天姝, 丁肇豪, 饶宏, 等. 面向新型电力系统的人工智能: 趋势与挑战. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 2–20

Bi T S, Ding Z H, Rao H, et al. Artificial intelligence for the new power system: Trends and challenges (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 2–20, doi: 10.1360/SST-2025-0167

传统分析方法面临瓶颈. 预计到2060年, 我国电力系统发、输、用各环节的电力电子化程度将分别超过72%, 50%和95%^[6]. 这种转变导致电力系统呈现出高维非线性特征, 控制参数和模型阶数激增, 时间尺度跨度增大, 且多电力电子装置之间的控制耦合关系愈发紧密, 序贯响应问题突出, 加剧了建模的复杂度. 例如, 传统同步发电机的模型阶数通常不超过10阶, 而单台光伏和风力发电机的模型阶数却远大于此^[7], 使得传统仿真方法和稳定理论难以支撑新型电力系统场景下的稳定分析与控制^[8].

随着高比例新能源并网和电动汽车、数据中心等新型负荷规模化接入, 电力系统多个环节更易受到气象、社会、技术政策等外部因素耦合影响. 研究数据表明, 美国2014~2023年间由极端天气引发的停电事件比2000~2009年间增长60%^[9], 导致大量直接经济损失. 同时, 经济社会行为对电力负荷影响更为直接, 以电动汽车为例, 2035年场景下无序充电可导致电网峰谷差较2018年扩大超过10%^[10]. 这些外部因素交织耦合、作用方式复杂, 使得传统解析方法难以全面表征多维影响因素, 更难以精准刻画其作用机理和因果关系^[11].

在大数据、云计算等信息技术的推动下, 人工智能(artificial intelligence, AI)技术取得突破性进展, 在与各学科领域的深度融合中催生出了一系列具有里程碑意义的成果, 为应对上述挑战提供了全新的技术路径. 2016年, 面向围棋的专用人工智能模型AlphaGo问世^[12], 标志着深度强化学习解决复杂决策问题的强大能力; 随后, 其升级版AlphaZero通过自我博弈机制, 摆脱了对人类经验数据的依赖, 实现了更通用的多棋类自主学习和优化^[13]; 2018年, AlphaFold利用深度学习技术成功预测出蛋白质三维结构^[14], 解决了困扰生物学界半个世纪的重大难题; 2022年以来, 以ChatGPT为代表的大语言模型展现出强大的知识发现与推演能力^[15], 推动科研范式实现从传统的机理驱动、实验驱动到数据驱动、计算驱动的转变. 2024年诺贝尔物理学奖和化学奖首次同时授予人工智能领域学者, 进一步标志着人工智能作为新兴科研范式的学术价值和应用潜力. 与此同时, 新型电力系统在数字化、智能化转型过程中积累了海量信息、数据和算力支撑. 目前我国在运智能电表等采集终端设备已经超过5亿台^[16], 系统仿真计算数据突破TB级, 为人工智能赋能新型电

力系统提供了良好基础.

在此背景下, 本文聚焦于新型电力系统典型应用场景, 系统梳理人工智能在仿真、规划、运行、控制以及市场等关键领域的应用现状与发展趋势, 探讨未来人工智能赋能新型电力系统将面临的关键挑战, 为推动人工智能在电力领域的深度融合提供理论参考.

2 人工智能在新型电力系统中的典型应用场景与趋势分析

如图1所示, 人工智能技术针对新型电力系统仿真分析、规划设计、调度运行、稳定控制和市场交易等典型场景已经有了一定的研究和应用探索. 针对各场景特有的问题属性和技术需求, 人工智能技术能够发挥其在数据处理、模式识别和智能决策等方面的优势, 为新型电力系统提供相应的理论方法和技术解决方案.

2.1 电力系统仿真分析

为了适应新型电力系统的仿真需求, 实现资源高效配置, 电网仿真分析技术逐步向主配一体仿真分析、全电磁暂态计算, 以及多时间尺度长短周期分析方向发展^[17~20], 电气节点和控制节点总数急剧增长. 据测算, 典型的区域级新型电力系统仿真规模可达百万量级^[21]. 面对如此庞大的仿真规模, 传统电力系统

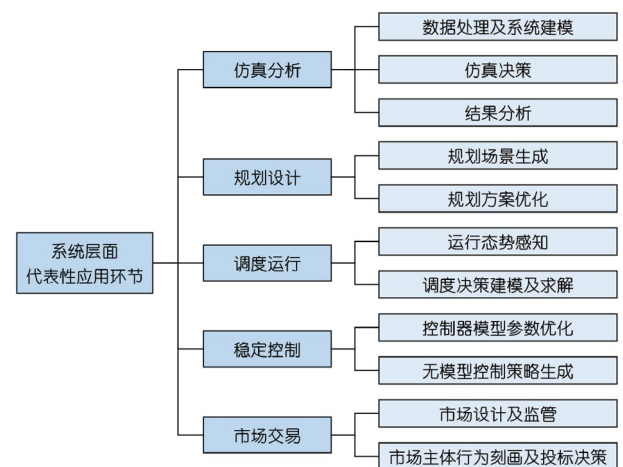


图1 (网络版彩图)人工智能在新型电力系统中的典型应用场景

Figure 1 (Color online) Typical application scenarios of artificial intelligence in the new power system.

仿真分析高度依赖专家经验, 人工成本高、错漏风险大、分析精度有限, 难以满足实际需求. 因此, 亟需通过技术创新, 提升新型电力系统仿真技术在数据处理、系统建模、仿真决策和结果分析等多方面的能力, 以应对系统规模化和复杂性带来的挑战. 面向不同仿真阶段, 当前研究从多个方面探索了人工智能技术可发挥的作用, 如表1所示.

在仿真计算前的数据处理^[22~25]与系统建模^[25~27]阶段, 现有文献利用卷积神经网络、循环神经网络等具有不同优势的深度学习方法, 解决了大规模异构数据预处理时间过长、电网拓扑结构特征提取难等挑战. 例如, 文献[22]针对同步相量测量装置采集到的高维矩阵形式的电力系统运行时空数据, 利用了并行卷积算法实现对其中冗余输入特征的处理. 文献[23,24]则进一步考虑了电网拓扑结构或者运行条件发生较大变化时, 其数据处理耗时过长的问题, 分别提出融合深度信念网络和主动学习方法的样本生成技术, 以及基于连续学习算法的数据管理方法. 上述研究主要针对海量常规数据的处理方法, 文献[25]则在仿真数据稀缺的场景下, 利用了半监督聚类学习算法实现从原始小数据集中获得标记样本, 并引入基于生成对抗网络的数据增强方法, 以创建额外的有效样本来扩展原始数据集, 并在此基础上, 建立系统扰动后的仿真评估模型. 此外, 文献[26]通过数据驱动的机器学习方法, 实现了对集成可再生能源系统中实体-组件-系统不同

层级的仿真建模. 文献[27]则是将电网拓扑划分为多个不同尺度的子图, 作为图深度学习中特征提取的基本单元, 解决了实际电网不同细粒度区域的仿真建模问题.

随后在仿真计算阶段, 现有研究面向电力系统大规模仿真计算加速需求, 通过人工智能技术优化决策过程, 提高了仿真计算效率. 文献[28,29]将基于数据驱动的预测模型嵌入仿真计算过程, 在保障仿真准确度的同时提高仿真速度. 文献[30]则是从与机理模型融合的角度出发, 提出了基于物理神经网络的电力系统单部件动力学过程演化模拟器, 拓宽了单步的时间步长, 从而实现快速时域仿真. 最后, 在仿真计算完成后的结果分析阶段, 一部分研究^[31~34]基于主动学习和半监督学习方法, 提出主导失稳模式智能识别框架, 减少了专家人工标注数据集的工作量; 另一部分研究^[35~37]则是针对失稳类型边界模糊问题, 利用图注意力网络等图像识别方法在提取电网拓扑信息和图像信息中的优势, 对暂态功角失稳和短期电压失稳进行区分.

在上述技术的推动下, 人工智能在电力系统仿真分析中的应用价值不断深化, 研究人员围绕不同功能需求开展了实践探索, 以“高保真、高性能、高泛化性”为目标, 搭建了多种人工智能驱动的仿真平台^[38~41]. 其中, 文献[38]提出了新的数字孪生框架, 能够为电力系统提供高保真混合仿真能力. 文献[39]基于云边融合技术, 研发了面向新型电力系统的高性能

表 1 人工智能在电力系统仿真分析中的应用分类

Table 1 Application classification of artificial intelligence in power system simulation analysis

应用场景	文献	主要研究问题	难点及挑战	所用人工智能方法示例
仿真计算前数据处理及系统建模	[22~25]	电网运行高维矩阵数据、拓扑结构数据以及小样本仿真等数据处理	大规模异构数据处理时间过长	并行卷积算法、深度信念网络、主动学习、连续学习、半监督聚类学习、生成对抗网络
	[25~27]	集成可再生能源系统中实体-组件-系统不同层级、不同细粒度电网区域等的仿真模型构建	多层级电网拓扑结构建模困难	机器学习、图深度学习
仿真计算阶段加速	[28,29] [30]	仿真计算过程中预测模型嵌入 电网单部件动力学过程演化模拟	大规模仿真计算耗时长	数据驱动 物理神经网络
仿真计算后结果分析	[31~34]	主导失稳模式智能识别	人工标注成本高	主动学习、半监督学习
	[35~37]	暂态功角失稳和短期电压失稳区分	失稳类型边界模糊	图注意力网络
仿真平台搭建	[38]	电力系统高保真混合仿真平台		数字孪生
	[39]	高性能电磁暂态云仿真平台	高保真、高性能、高泛化性等能力难以兼顾	云边融合技术
	[40,41]	用于电力系统控制方案测试的联合仿真平台		深度强化学习

电磁暂态云仿真平台. 文献[40]系统介绍了其搭建的四个联合仿真平台, 可以测试电力系统中基于深度强化学习的控制方案. 文献[41]介绍了大模型在电网仿真中的实践应用, 通过融合电力物理规律与数据驱动方法, 有效突破了传统高阶微分代数方程仿真的计算瓶颈.

电力系统仿真分析场景下人工智能方法应用的性能评估, 应围绕仿真规模、计算精度、仿真效率及仿真模型适应性等方面的表现展开^[42,43]. 未来, 新型电力系统仿真分析可以进一步深化知识驱动与数据驱动融合的技术路径, 并推进与强化学习类人工智能的结合, 达到更高的正确率和更好的通用性. 同时, 探索知识图谱与大模型等人工智能新技术的潜力, 提升电力系统智能仿真分析在知识建模与推理、迁移泛化能力以及人机交互等方面的综合水平.

2.2 电力系统规划设计

为保障能源供需协调与系统运行稳定, 在进行新型电力系统规划时, 需要统筹考虑各类能源的发展规模、空间布局和时序安排, 并优化各类电源的运行方式. 这不仅要求在时间维度上精准预测能源发展的长期动态, 还需要在空间维度上充分考虑分布式能源的地理分布特性. 然而, 传统预测方法在应对新型电力系统的高度动态性和复杂性方面存在明显局限, 人工智能技术为解决这一难题提供了新思路, 如DeepMind提出的NeuralGCM模型将中长期气温预测精度提升了

66.7%^[44]. 此外, 通过融合环境、社会、能源等多源海量历史数据, 人工智能技术不仅可以支撑规划前期阶段的场景生成, 还可以实现长周期路径演化和规划方案优化, 如表2所示.

针对规划场景生成需求, 已有研究将人工智能技术分别应用于长期负荷预测^[45-47]、空间负荷预测^[48]、不确定性模拟^[49-51]以及极端事件模拟^[52]等方面, 以应对中长期感知能力不足、高维耦合特性辨识困难等挑战, 为后续制定规划方案提供决策依据. 在基于时序负荷预测的场景生成研究中, 文献[45]以月为时间尺度, 利用渐进式增长生成对抗网络解决了其场景建模中多元高维变量拟合困难、源-荷不确定性加剧等问题, 实现了月度源荷场景生成. 文献[46]将时间尺度拓展至年度, 基于聚类分析和马尔可夫链技术, 提出了年负荷序列建模和场景生成方法. 文献[47]进一步延伸时间尺度, 构建了结合混合卷积神经网络和长短期记忆网络的电网长期负荷预测模型, 用于预测三年内的月度峰值负荷. 在基于空间负荷预测的场景生成研究中, 文献[48]针对城市电网规划中历史负荷数据匮乏的场景, 提出了基于循环卷积生成式对抗网络的空间负荷预测方法, 得到的预测结果能够保持良好的稳定性和准确性. 随着新能源占比提升, 针对新能源出力的不确定性模拟也成为场景生成研究中另一重要的研究方向. 文献[49,50]基于新能源出力时间序列, 利用深度学习方法充分挖掘其出力特性, 得到了考虑不确定性的出力模拟序列, 为后续规划模型提供数据基础. 而不

表 2 人工智能在电力系统规划设计中的应用分类
Table 2 Application classification of artificial intelligence in power system planning

应用场景	文献	主要研究问题	难点及挑战	所用人工智能方法示例
规划场景生成	[45~47]	面向月度、年度及更长尺度下的时序负荷预测	中长期趋势感知能力不足、多元高维变量拟合困难、预测精度难以保障	渐进式增长生成对抗网络、混合卷积神经网络、长短期记忆网络、聚类分析算法
	[48]	空间负荷预测		循环卷积生成式对抗网络
	[49~51]	新能源出力不确定性模拟		深度学习、联邦学习、最小二乘生成对抗网络
	[52]	极端天气不确定性模拟		去噪变分自编码器算法
规划方案优化	[53~55]	电力信息物理系统、电-碳耦合市场等长周期新型电力系统演化分析	市场机制复杂多变导致建模一致性差	数字孪生、多智能体强化学习、深度强化学习、双延迟深度确定性策略梯度算法
	[56~59]	电网扩容拓扑自主规划、融合分布式光储、电动汽车等海量分布式资源的配电网规划	多目标多约束求解复杂、计算成本高	基于学习的解耦优化算法、强化学习、改进聚类算法

同于传统集中式方法, 文献[51]融合联邦学习和最小二乘生成对抗网络, 在保障隐私的前提下实现了高质量的分布式可再生能源场景生成。此外, 考虑到不同类型极端天气对规划方案的影响, 文献[52]构建了含有气候参数的系统运行抽象模型, 并基于去噪变分自编码器算法进行极端场景集生成。

针对规划方案优化过程中技术、政策、经济等多维复杂因素耦合下多目标、多约束求解等挑战, 现有研究分别在电力系统远景演化发展^[53~55]和含海量分布式资源的配电网规划^[56~59]等关键领域探索了人工智能技术的优势。一方面, 围绕长周期新型电力系统演化发展, 文献[53]面向电力信息物理系统, 阐述其基于数字孪生的形态演进关键技术, 提出了元件级和系统级的形态刻画方法, 又分别从安全和经济两个方面提出了运行形态演进分析方法。文献[54]面向电-碳耦合市场, 将其长期互动演化过程建模为多类均值场博弈模型, 并采用双延迟深度确定性策略梯度技术实现了高效求解。文献[55]则更多考虑社会-技术系统转型理论, 开发包含供需双方的智能体模型以分析荷兰电力系统的演化过程, 并预测探索荷兰电力系统低碳转型的可行路径。另一方面, 围绕含海量分布式资源的配电网规划, 文献[56,57]考虑配电网负荷快速增长给电网扩容规划带来的复杂性, 分别利用基于学习的解耦优化方法和强化学习方法, 实现了不同规模配电网的自主拓扑规划。在此基础上, 文献[58]还考虑源荷侧分布式光伏和负荷的不确定性, 基于并行迭代二分K-means聚类的多场景技术提出了配电网光储联合系统规划方法。文献[59]进一步将电动汽车充电站作为负荷侧柔性调节资源纳入配电网规划体系, 建立基于强化学习算法的多阶段配电网分布式光伏发电、电动汽车充电站和电池储能系统配置框架, 解决了现有配电网规划机制中多类型设备交互效应缺失这一技术难题。

为验证人工智能方法在电力系统规划设计场景中的性能表现, 应对规划方案的经济性、可靠性及鲁棒性等指标进行量化对比^[60]。而在长周期场景不确定性持续提升以及海量异构源荷设备深度耦合等因素影响下, 未来智能配电网将呈现出源荷储协同、交直流互联以及潮流多向流动等部分现有输电网的典型特征, 可以依托人工智能技术构建面向“源荷互动”模式下的配电网与大电网协调发展的新规划范式。

2.3 电力系统调度运行

随着分布式新能源以及电动汽车、虚拟电厂等新型负荷的广泛接入, 新型电力系统调度运行正面临前所未有的挑战。一方面, 接入主体数量庞大、类型多样且空间分布分散, 产生海量异构数据并叠加多源不确定性, 使得系统运行状态的精细化感知与准确估计面临突出难题; 另一方面, 调度规模随主体数量快速膨胀, 约束个数激增且呈现强耦合特性, 实时优化运行决策复杂度大幅增加。以我国某区域电网日前机组组合为例, 其模型的离散变量可达16万个、约束可达70万条, 使用传统方法无法在1 h内获得部分算例的可行解^[61]。面对具有超大规模和非线性约束的调度运行问题时, 传统优化方法在建模和求解方面均存在显著局限性, 难以适应电力系统在线运行决策需求。相比之下, 人工智能方法不仅可以通过多种机器学习方法有效提升电力系统运行态势感知能力, 还可以重构系统优化模型, 通过自主学习方法加速复杂问题的在线序贯决策, 从而提升电力系统大规模调度运行优化的计算效率, 如表3所示。

在人工智能赋能调度运行的相关研究中, 主要分为两类: 其一是围绕系统运行参数辨识、状态估计与趋势预测, 着力解决“感知难”的问题; 其二是面向调度建模与优化求解, 聚焦缓解“决策难”的挑战。具体来讲, 第一类研究旨在借助人工智能技术从识别、理解和预测3个层面构建前瞻性的运行状态智能推演与态势感知框架。在识别层面, 针对海量异构数据质量不稳定问题, 文献[62]提出了基于海量历史数据挖掘的配电网态势感知方法, 可以为传统状态估计器提供虚拟量测信息。文献[63]则是基于分散用电数据, 利用分布式聚类算法实现了对用户用电特性的感知。同时, 人工智能方法还被用于弥补传统加权最小二乘估计的不足, 使调度系统由部分可观测逐步演进为近似或完全可观测状态, 文献[64~66]提出的深度神经网络模型在大规模电力系统中提升了状态估计的计算效率、抗噪性能与泛化能力, 文献[67]则提出结合二次函数与广义相关熵损失函数的方法以抵御非高斯噪声和拒绝服务攻击, 从而提升状态估计的鲁棒性。在理解层面, 在多重异常干扰并存挑战下, 文献[68,69]均聚焦于大规模电力系统异常信号分析问题, 其中文献[68]建立了电网节点间的因果关系网络, 以识别并量化各节点对

表 3 人工智能在电力系统调度运行中的应用分类
Table 3 Application classification of artificial intelligence in power system dispatch and operation

应用场景	文献	主要研究问题	难点及挑战	所用人工智能方法示例
运行态势感知	[62,63,73,74]	配电网运行及用户用电特征提取等态势感知	海量异构数据质量不稳定	数据驱动算法、分布式聚类算法
	[64~67]	不可观测状态估计	观测数据缺失	深度神经网络
	[68,69]	大规模电力系统异常信号分析等态势理解	多重异常干扰并存	因果关系网络、基于聚类的稀疏编码方法
	[70~72]	分布式光伏系统超短期发电预测、电压实时预测、用户负荷预测等源网荷态势预测	不确定性增加	贝叶斯网络、强化学习
调度决策建模及求解	[75~79]	电力系统经济调度等问题中约束表征以及多元主体协同调控建模	约束复杂性提升	稀疏加权斜决策树算法、深度强化学习、安全强化学习、改进生成对抗网络
	[64~66,80~82]	安全约束经济调度、安全约束机组组合、交流最优潮流等运行问题求解	高维非线性模型求解困难	压缩学习、信息敏感型深度神经网络

异常信号的权重值，实现对网络多重异常信号的溯因分析。文献[69]基于聚类的稀疏编码方法解决了电网多事件检测、识别和时间定位的难题，实现了电力系统高保真态势感知。在预测层面，面向高不确定性环境，针对源侧的分布式光伏系统超短期发电预测，文献[70]提出了基于贝叶斯网络的数据驱动推理模型。面向网侧，文献[71]提出了基于有限测量数据的人工智能电压预测模型，以提高预测的实时性。而面向负荷侧，文献[72]提出了基于智能体的用户负荷预测方法，能够准确预测负荷行为并为负荷调控提供了决策依据。进一步地，文献[73,74]提出了融合识别、理解与预测的整体框架，构建了系统化的空间电力负荷态势感知体系，为配电网主动调度提供了支撑。

另一类研究利用人工智能方法在电力系统调度运行的建模^[75~79]和求解^[64~66,80,81]方面均取得了诸多进展。其中，一部分研究用数据驱动的方法建立系统复杂运行约束，突破了传统解析化建模方法的局限性。文献[75,76]在电力系统经济调度模型中，分别基于稀疏加权斜决策树方法和深度强化学习方法嵌入安全性规则，显著提高了安全状态的比例。文献[77]在配电网与微电网的双层协同调控模型中，引入深度强化学习方法，嵌入了用户需求对电压稳定性的边际影响条件。除了表征约束条件，另一部分研究则直接建立了基于人工智能的调度运行模型。例如，文献[78]提出了基于改进生成对抗网络的电动汽车和可调温控负荷协同调度模型。文献[79]面向风电、光伏、储能和火电构成

的微电网能源管理问题，提出了基于李雅普诺夫方法的安全强化学习模型。在建模的基础上，通过学习历史求解记录，识别问题中相似的数学结构，生成热启动初始解，研究人员还开发了适用于电力系统高维非线性模型的高效求解技术。文献[80]面向安全约束经济调度问题，提出了基于堆叠去噪自编码器的紧约束筛选方法，减少了经济调度求解所需的计算量。文献[66,81]面向安全约束机组组合问题，利用神经网络处理机组状态等离散变量，提前预测不同情境下的启停决策，提升了机组组合优化的精度与计算效率。文献[64,65]面向交流最优潮流问题，分别提出了基于压缩学习的快速热启动点学习方法，以及基于信息敏感型深度神经网络的原始-对偶解计算方法。文献[82]在配网调度场景中实现了电力大模型的探索与实践，使单次转供决策时间大幅缩短，显著提升了电网调度效率。

人工智能方法在电力系统运行调度场景下的性能评估，应从辨识与感知精度、建模与求解效率、调度经济与安全水平等多个维度展开^[65,80]。随着相关技术的持续突破，人工智能在新型电力系统调度运行优化中的支撑作用有望进一步增强，面向未来，具备高可信度与强泛化能力的智能调度算法，以及与大模型技术的深度融合，可能成为该领域的研究热点方向。

2.4 电力系统稳定控制

新型电力系统的运行方式日益复杂多变，主要体现在运行控制层级大幅增加、运行状态时变性增强以

及多时间尺度动态耦合等方面。这些特征导致系统失稳机理更加复杂, 故障传播路径难以预测, 故障响应过程中的不确定性显著增加。在此背景下, 新型电力系统稳定控制面临着更高要求, 而传统预案式稳控技术依赖预想的故障集, 难以全面覆盖实际运行中可能发生的复杂故障情境。尤其是当新型电力系统稳定策略达数千甚至上万种时, 传统方法难以归集为少量确定规则, 导致匹配过程复杂、效率低下, 控制失效风险上升。如表4所示, 通过引入人工智能方法, 一方面可以在已有电力系统模型的基础上, 利用人工智能优化算法对控制器参数进行优化调整, 另一方面可以不依赖既有系统模型, 直接采用人工智能算法构建控制模型并生成控制策略, 实现对复杂系统的端到端控制^[83]。

现有基于人工智能方法的控制器参数优化研究主要有两类技术路径: 一类侧重于通过数据驱动的方法挖掘控制器输入输出之间的关联关系, 减弱对传统机理模型的依赖^[84,85]; 另一类则基于强化学习方法, 通过与环境交互实现参数优化策略的自主学习^[86-88]。在第一类方法中, 文献[84]利用神经网络提出嵌入负荷预测的静态同步补偿器控制参数优化策略, 增强了低频振荡阻尼并改善了复杂电力系统的稳定性。文献[85]使用监督学习算法训练出替代模型, 以建立功率振荡阻尼控制器参数与小信号不稳定裕度之间的近似关系, 并对其进行参数优化。与上述方法不同, 文献[86]将多频段电力系统稳定器构建为深度强化学习的智能体, 用于调整控制参数, 使其能够适应系统的不确定性和不同的运行条件。文献[87]基于多智能体深度强化学习, 提出了多区域电力系统协同负荷频率控制方法, 在连续动作空间中, 通过集中学习、分布执行

的策略, 非线性地、自适应地推导出多个负荷频率控制器的最优协同控制策略。文献[88]采用了异步优势演员-评论家算法, 使得基于比例谐振控制的新型电力系统稳定器能够在不同运行条件下提供最优的参数设置。

为满足电力系统稳定控制对鲁棒性、可靠性与快速性的要求, 针对基于人工智能的端到端控制模型策略生成, 现有研究主要面向电力系统正常运行方式控制^[89-91]、紧急控制^[92-94]与预防控制^[95-97]3个典型场景开展了大量工作。围绕电力系统正常运行方式下的控制问题, 文献[89]提出了基于深度强化学习的电网切机控制策略。同样利用该人工智能方法, 文献[90]则是考虑可再生能源接入带来的不确定性问题, 提出了端到端负荷频率控制方法。而文献[91]选取广域测量信号作为输入, 建立了基于数据驱动的背靠背柔性直流输电系统自适应广域阻尼控制器, 取代传统的数学模型。从紧急控制的角度出发, 相关研究将暂态稳定紧急控制问题建模为马尔可夫决策过程, 利用不同类型强化学习算法的优势提出控制策略。例如, 文献[92]采用深度Q网络算法, 利用其高维特征提取能力和非线性泛化能力, 优化了复杂电力系统的紧急控制策略。文献[93]采用了近端策略优化算法作为策略更新方法, 实现对紧急控制问题中混合动作空间的直接处理。文献[94]则结合了多Q学习方法和深度确定性策略梯度算法, 融合离线训练和在线近似方法的双重优势进行控制优化。面向电力系统预防控制场景, 文献[95]基于生成对抗网络, 将暂态稳定预防控制建模为样本空间映射问题。文献[96]利用了深度置信网络, 代替传统暂态稳定约束最优潮流模型中的非线性微分代数方程计算和暂稳校验。文献[97]则基于分布式深度强化学习实现了快速预防控制。

表 4 人工智能在电力系统稳定控制中的应用分类

Table 4 Application classification of artificial intelligence in power system stability control

应用场景	文献	主要研究问题	难点及挑战	所用人工智能方法示例
控制器模型参数优化	[84,85]	基于控制器输入输出关联关系的参数优化	模型依赖性高	数据驱动算法、监督学习
	[86-88]	基于环境交互学习的参数优化		深度强化学习、多智能体强化学习
	[89-91]	电力系统正常运行方式控制		端到端强化学习、数据驱动算法
无模型控制策略生成	[92-94]	电力系统紧急控制	鲁棒性、可靠性、快速性等难以兼顾	深度Q网络算法、近端策略优化算法
	[95-97]	电力系统预防控制		生成对抗网络、深度置信网络、分布式深度强化学习

在电力系统稳定控制应用场景下, 人工智能方法的性能评估应涵盖判别准确性、决策速度、控制效能与代价等多个维度^[98]. 未来人工智能与新型电力系统稳定控制的深度融合仍待突破多个关键问题: 一是针对人工智能方法对大数据集的依赖和实际系统中失稳样本稀缺的矛盾, 可以优化人工智能技术, 生成失稳场景数据. 二是可以通过人工智能技术将时序信息和电网拓扑信息相结合, 增强模型对系统结构变化的响应能力. 三是可以进一步开发在失稳原因复杂、类型多样情况下的人工智能技术, 提高其在不同失稳场景下的适用性.

2.5 电力市场交易

新型电力系统的演进推动电力市场结构呈现多元化、去中心化特征, 其核心特征体现为多元主体的异质性博弈与策略性操纵风险并存^[99]. 当前中国电力市场已经突破传统垂直一体化架构, 分布式能源运营商、储能集成商及负荷聚合商等新兴主体大量涌入, 逐步形成多层次、多维度竞争市场. 截至2023年底, 全国电力市场累计注册经营主体74.3万家^[100]. 这些主体具有个性化偏好, 在技术属性、利益诉求与行为模式上显著分化. 异质市场主体, 如新能源运营商和火电企业, 在成本结构和风险偏好层面存在根本差异, 导致市场均衡形成过程更为复杂. 同时, 部分寡头主体在市场场景下可能存在市场操纵等行为, 加剧价格波动与资源配置扭曲. 而传统分析方法面向这类复杂博弈问题时存在明显瓶颈, 例如, 经典的经济学模型通常依赖理性人假设与完全信息假设, 难以准确刻画市场多元主体的真实行为, 对市场决策、机制设计等支撑不足. 如表5所示, 人工智能方法可以通过数据驱动

的行为建模, 表征异质市场主体决策偏好和行为特征, 更准确获取市场均衡状态, 提取真实市场中的策略性操纵行为特征, 为市场分析与政策制定提供有效支撑.

一方面, 现有研究探索了人工智能技术在电力市场设计^[101~104]和监管^[105~108]中的应用潜力. 大量电力市场设计领域的研究考虑了异质性主体行为特性, 例如, 文献[101]基于智能体的方法分析了参与不同市场对减少储能电力成本和碳排放量的影响, 进行了含储能的市場设计. 文献[102]则是面向含分布式光伏的能源共享市场, 提出了基于深度学习的双向拍卖机制, 刻画了市场参与者之间的互动关系. 文献[103]在考虑电动汽车的电力市场设计中, 深入探讨了机器学习技术在议价机制、合约设计、拍卖理论、博弈论以及定价和收益优化等方面的适用性及其落地挑战. 而围绕点对点能源交易设计, 文献[104]提出了整合物理网络约束的多智能体强化学习框架以确保物理可行性, 为实际部署提供了技术支撑. 除此之外, 在市场操纵行为监管方面, 现有研究融合了基本经济原理和无监督学习, 从海量数据中自适应学习市场操纵特征, 以实现复杂市场操纵行为的自动化监管. 例如, 文献[105]在有合作竞争关系的电力市场中, 首先基于轻微利他理论建立针对发售电一体化集团成员的合谋模型, 接着构建多智能体深度双Q网络算法模拟不完全信息情况下的发售电一体化集团成员的报价行为. 相似地, 文献[106]建立了允许发电商自由合作的竞价模型, 并利用两阶段深度强化学习算法进行求解, 实现对市场主体自由联合行为的有效模拟, 以发现潜在合谋组合. 而针对市场操纵行为预警, 文献[107]在不完全信息环境下构建基于强化学习的动态斯塔伯格博弈和消费者社交网络模型, 优化了监管策略并提高了监管效率. 文献

表 5 人工智能在电力市场交易中的应用分类

Table 5 Application classification of artificial intelligence in power system electricity market transactions

应用场景	文献	主要研究问题	难点及挑战	所用人工智能方法示例
市场设计及监管	[101~104]	面向含有储能、分布式光伏、电动汽车、点对点交易等的电力市场设计	异质性主体行为建模困难	机器学习、深度学习、多智能体强化学习
	[105~108]	市场主体合谋行为建模、不完全信息场景下市场监管以及电力市场潜在危害行为识别		多智能体强化学习、深度强化学习、云模型
市场主体行为刻画及投标决策	[109~112]	发电厂、用户等不同主体行为偏好分析	不完全信息约束导致不确定性增加	数据驱动算法、逆强化学习、贝叶斯推断算法
	[113~116]	多能源主体交易、点对点交易、对手信息不完全和不确定性下的投标决策		深度强化学习、多智能体强化学习、复合差分进化算法

[108]则是提出了基于云模型与模糊Petri网的电力市场潜在危害行为识别方法, 对交易过程中潜在危害行为进行实时预警。

另一方面, 现有研究面向电力市场交易行为刻画和均衡分析, 利用人工智能技术从历史数据中反推个体行为决策偏好, 提出多种能够反映个性化行为特性的市场建模和分析方法。针对发电厂行为偏好, 文献[109]提出了基于历史数据和逆强化学习的发电厂风险偏好分析方法。而针对用户行为偏好, 文献[110]利用逆强化学习从历史环境和用户行为数据中反推出储能系统参与多个耦合市场投标的模型参数。文献[111]引入数据驱动方法以识别隐藏在原始投标数据中的个体收益函数。与前述历史数据驱动的方法不同, 文献[112]则考虑用户签订合约和参与差额响应两种方式, 从用电满意度和收益补偿两个维度构建用户偏好模型, 通过贝叶斯推断方法对用户行为进行学习。在此基础上, 诸多研究进一步构建了基于人工智能方法的市场交易和投标决策模型。例如, 文献[113]考虑不同主体异质交易偏好, 提出了能够满足用户隐私和个性化需求的多能源交易深度强化学习模型。文献[114]则是将点对点交易问题建模为多智能体协同问题, 结合多智能体深度确定性策略梯度算法和参数共享技术, 在集群内共享经验和策略以加速训练, 同时保持不同集群间的策略多样性。考虑到竞价者有限理性, 文献[115]提出进化博弈模型帮助用户投标决策, 结合Q学

习和复合差分进化算法, 解决了对对手决策不完全信息和不确定性问题。文献[116]面向电力交易数智化转型, 将“光明”大模型与知识图谱深度融合, 通过自然语言交互实现了电力交易数据的智能解析与深度分析。

人工智能方法在电力市场交易场景应用效果的量化与评估, 应综合考虑其模拟市场主体行为的真实性、所生成投标策略的盈利性、对市场运行效率与公平性的影响等方面^[111,117]。在未来研究中, 人工智能技术可以助力多类型市场交易, 在市场机制与电力系统物理特性的深度融合中发挥潜力, 并挖掘市场规则中的潜在漏洞, 辅助制定促进公平竞争的监管政策, 从而在提升市场运行效率的同时, 实现市场自由与系统安全之间的有机平衡。

3 人工智能赋能新型电力系统的若干挑战

尽管当前人工智能技术在电力系统部分场景中已取得初步成效, 但现有人工智能方法的应用范式仍主要停留在经典模型的迁移应用, 缺乏针对新型电力系统特有属性的系统性解决方案, 尚未形成与之深度融合的技术范式, 存在物理知识利用不充分、小概率工况表征能力有限、黑盒模型可解释性缺失、信息物理安全风险加剧等局限性。因此, 如图2所示, 要实现人工智能在新型电力系统的广泛应用, 需要充分结合电力领域的学科属性和技术特点, 这也对人工智能方法提

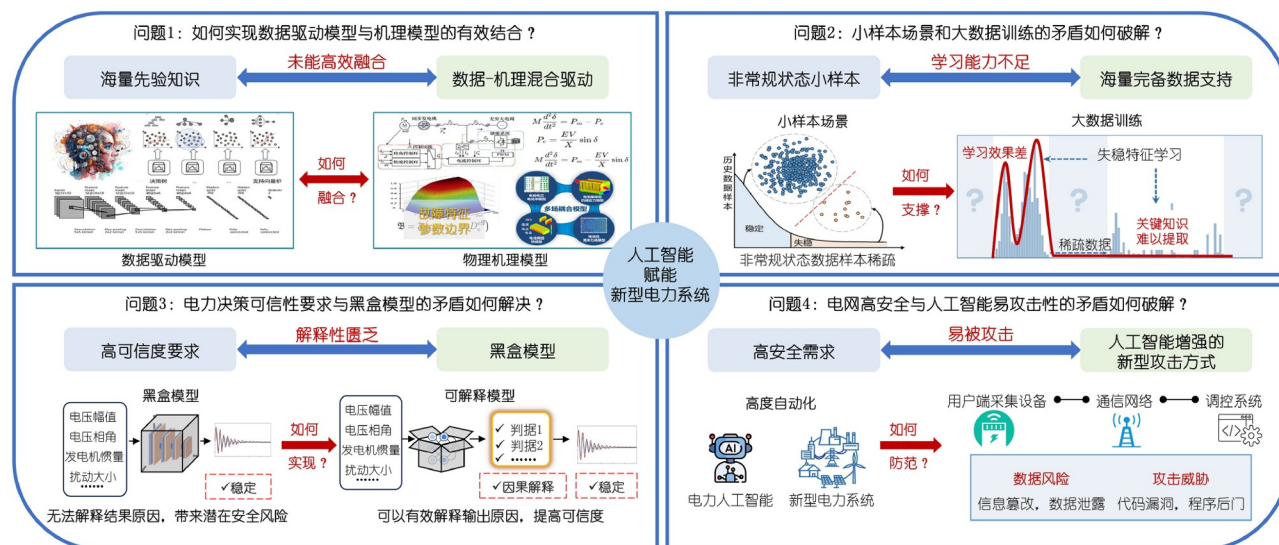


图2 (网络版彩图)人工智能赋能新型电力系统面临的四类关键挑战

Figure 2 (Color online) Four key challenges of the AI-empowered new power system.

出了新的挑战,尤其在电力先验知识利用、小样本高效学习、高可信度决策和系统安全保障等方面仍存在诸多技术瓶颈。

3.1 数据驱动模型与电力先验知识的深度融合

人工智能技术主要依赖数据驱动的方法,在其应用于电力系统领域时,侧重于从大量数据中挖掘潜在规律,而非依托显式的物理机理模型^[79,118]。然而,电气工程学科经过百余年的发展,已经拥有了丰富的理论体系和实践经验,积累了海量先验知识,其中包含诸多经典物理规律。如果人工智能方法单纯依赖数据而未对先验知识加以有效利用,可能会削弱其学习效率和有效性。

针对这一问题,已有研究探索了数据-机理混合驱动方法,并通过机理增强的数据驱动、数据调优的机理驱动以及数据机理互补融合等方式,在电力系统的潮流计算与状态估计、安全稳定分析、故障决策、电力设备参数辨识、新能源出力预测等领域取得一定进展^[119]。然而,现有应用仍集中于模型的简单组合,对于电力系统中不同类型的应用场景,以及其中公理、公式、规则等不同类型的先验知识,尚缺乏统一标准化的表征方法,难以有效转化为可与数据联合计算的形式。如何有效融合二者优势,充分利用电力系统领域积累的丰富先验知识,发挥数据-机理混合驱动模型在电力系统中的潜在优势,以超越单一模型的性能瓶颈,仍然是未来研究中的关键难点之一。

3.2 电力系统小样本场景下的人工智能高效学习

受限于不同工况下样本获取难度和分布差异,电力系统在运行过程中常面临数据稀缺与样本分布不均等双重挑战。一方面,由于发生频率低,极端天气下系统运行、故障状态下系统运行、设备停电检修等偶发性工况的相关样本数据较为稀缺。以输电网暂态稳定评估为例,正常工况样本通常占比超过97%,临界失稳样本的获取成本高昂且数量极其有限^[120]。另一方面,在电力系统正常工况下,不同场景之间的数据采集能力差异显著,造成不同类型正常运行样本的数量分布失衡。例如,变电站中主变压器等关键设备通常配备完善的监测系统和高频次的数据采集装置,而偏远地区的输电线路等场景由于监测设备部署困难、通信条件受限等因素,可获取的数据量相对有限,导致前者采

集的样本在整体数据集中占据较大比重。然而,当前主流的人工智能方法在建模时通常需要满足两个基本前提:一是训练数据集具备足够大的样本规模,以确保模型能够学习到表征空间的复杂特征;二是不同类别样本的分布保持相对均衡,以避免模型在分类时产生偏差。研究表明,当训练样本类别比例失衡超过10:1时,小样本的识别率可能会下降30%以上^[121,122]。这一电力系统数据特性与人工智能模型训练需求之间存在的根本性矛盾,限制了智能算法在电力系统中的有效应用。

针对小样本问题,人工智能领域提出元学习、迁移学习、生成对抗网络等多种改进方法,电力领域的专家学者也在积极探索这些方法在电力系统中的应用,并尝试将其与电力系统的特定需求相结合^[123~125]。然而,电力系统的动态特性和多尺度特征使得数据样本的空间和时间分布具有较强的异质性^[126~128],现有标准人工智能算法通常依赖数据分布相似性假设,面对新型电力系统不均衡数据集难以有效从中提取规律,导致在复杂多变的系统工况下适应性仍显不足。如何实现人工智能在电力系统小样本场景下的高效学习,并提升其对非常规运行状态的知识提取和规律认知能力,也是当前另一个亟待解决的重要挑战。

3.3 适配电力系统要求的人工智能高可信度决策

电力系统固有的高安全属性对决策的可信性要求极高,而人工智能模型多为黑盒模型,自身缺乏可解释性。一方面,深度学习模型具有高维非线性,其复杂的网络结构和高度耦合的参数关系使得模型内部的因果机制难以明确表征,决策过程往往缺乏可追溯的逻辑推导路径。这一问题导致电力工程师难以理解其决策依据、识别关键影响参数,从而削弱对其结果的信任度^[129~131]。另一方面,神经网络模型的训练通常依赖于特定的数据集,面向不同场景的泛化能力不足,难以保证在变化的电力系统工况下的稳定性与可靠性^[132~134]。此外,近年来基于Transformer架构的大模型在电网中的应用受到广泛关注,然而,生成式大模型在数据不足或者信息不完整的情况下会生成虚假、误导性的结论,引发“大模型幻觉”问题,给电力系统带来了不可预测的风险^[135,136]。上述人工智能技术的固有特性与电力系统高可信度要求之间形成了本质矛盾,严重制约了人工智能技术在电力关键场景中发挥作用。

针对上述挑战,部分人工智能领域学者提出了自

解释人工智能等方法以提高决策可信度^[137~139]。然而, 这些方法多侧重于统计学特征与黑盒模型的可视化, 在追求可解释性的同时, 不可避免地牺牲一定的算法的性能和准确性。更为关键的是, 现有研究尚未从根本上解决神经网络隐藏层难以体现电力系统物理意义这一核心问题。因此, 未来的研究应聚焦于如何在人工智能模型可解释性和电力系统决策需求之间建立有效的关联机制, 以构建高可信度的电力人工智能方法。

3.4 人工智能场景下新型电力系统的安全保障

人工智能与电力系统深度融合后, 电力系统数字化、自动化程度将进一步提升, 但同时电力系统面临的安全风险也在显著增加。据统计, 近十年来全球电力系统因网络攻击导致的停电事故累计时长达数百小时, 造成经济损失达数十亿美元; 近三年来中国电力行业预警网络安全事件高达上万起。此外, 电力系统数据具有一定的敏感性, 在电力系统智能化过程中也存在数据泄漏等隐私风险。因此, 在智能电网环境下, 数据安全、网络安全和隐私保护问题已成为电力系统安全稳定运行的重要挑战。

从数据安全和网络安全的角度来看, 人工智能的广泛应用扩大了电力系统的受攻击面和攻击类型, 增加了系统安全防护的复杂性。攻击者能够通过虚假数据注入干扰电网监测^[140,141], 借助自动化入侵检测规避方法绕过既有防御机制^[142,143]。从隐私保护的角度出发, 电力系统数字化水平的提升, 以及数据驱动技术的推广应用, 加剧了隐私泄露风险^[144,145]。另外, 人工智能的发展使得攻击者技术手段进一步增强^[146,147], 如何防范人工智能增强的攻击威胁也是当前亟待解决的挑战之一。在上述背景下, 未来研究可重点关注人工智能广泛应用场景下的电力系统信息物理安全, 融合攻防双侧视角提升新型电力系统安全保障能力。

4 结论与建议

围绕人工智能和新型电力系统的深度融合, 本文

从系统层面切入, 综述了人工智能技术在新型电力系统部分关键环节应用的研究现状与趋势, 并探讨了潜在挑战和未来发展方向。

“双高”背景下, 新型电力系统面临着随机波动性增加、电力电子化特征明显、多元外部因素交织影响等新挑战。人工智能技术作为推动新型电力系统转型的关键工具, 面向仿真分析、规划设计、调度运行、稳定控制和市场交易等多个电力系统核心环节, 为新型电力系统的发展提供了全新的科研范式。这些技术在电力系统仿真数据处理与决策分析、规划场景生成和方案优化、运行态势感知与调度决策、稳定控制参数优化和建模、电力市场设计监管及交易等多方面均发挥了重要作用。

然而, 人工智能与新型电力系统的深度融合应用仍面临着若干亟待解决的核心挑战。首先, 当前不同类型电力先验知识尚缺乏统一标准化的表征方法, 难以有效转化为可与数据联合计算的形式, 因此数据-机理混合驱动模型无法在新型电力系统应用中确保其超越单一模型的性能优势。其次, 人工智能模型训练往往依赖于大规模、完备的数据集, 在新型电力系统小样本场景下知识提取和规律认知的能力存在明显欠缺。此外, 电力系统具有高安全属性, 对分析决策的可信度要求极高, 这与人工智能黑盒模型在决策可解释性方面的不足形成矛盾, 难以从新型电力系统物理意义上解释决策依据。最后, 电力系统广泛应用人工智能后高度自动化, 缺陷和后门被攻击利用的风险凸显, 使用过程中也存在数据泄漏、数据注入等风险。

综上所述, 应深度结合电力行业特点和应用场景特性, 着力破解人工智能赋能新型电力系统过程中先验知识利用、小样本学习、高可信度决策和信息物理安全等方面的若干挑战, 为新型电力系统发展问题提供新的解决途径。同时, 还应推动数据开放共享、标准体系构建等配套措施, 全面支撑电力人工智能模型的开发与应用, 推动新型电力系统安全经济可持续发展。

致谢 本文根据国家自然科学基金委员会第390期“双清论坛”报告内容撰写。谨此感谢国家自然科学基金委员会的支持, 感谢与会专家在相关技术问题讨论过程中所提出的宝贵意见与建议。

参考文献

- 1 Xinhuanet. Xi Jinping presided over the ninth meeting of the Central Financial and Economic Affairs Commission, stressing the need to incorporate carbon peaking and carbon neutrality into the overall framework of ecological civilization development (in Chinese). 2021-03-15 [新华网. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议强调把碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局. 2021-03-15, https://www.xinhuanet.com/politics/2021-03/15/c_1127214324.htm]
- 2 National Energy Administration. Blue book on the development of new power system (in Chinese). 2023-06-02 [国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书. 2023-06-02, <https://www.nea.gov.cn/download/xxdlxtfzlpzgk.pdf>]
- 3 Liu J Z, Wang Q H, Hu Y, et al. Connotation, characteristics and key technologies of new power systems (in Chinese). New Type Power Syst, 2023, 1: 49–65 [刘吉臻, 王庆华, 胡阳, 等. 新型电力系统的内涵、特征及关键技术. 新型电力系统, 2023, 1: 49–65]
- 4 Dai J, Wang J X, Zhang Z H, et al. Morphological characteristics and key technologies of new power system (in Chinese). New Type Power Syst, 2023, 1: 161–183 [戴璟, 王剑晓, 张兆华, 等. 新型电力系统形态特征与关键技术. 新型电力系统, 2023, 1: 161–183]
- 5 Saadat H. Power System Analysis. New York: McGraw-Hill, 1999
- 6 Tang G F. Accelerating the construction of a new power system with ‘four modernizations’ characteristics (in Chinese). State Grid News, 2021-10-12: 005 [汤广福. 加快构建“四化”特征新型电力系统. 国家电网报, 2021-10-12: 005]
- 7 Liu Y F, Zou M, Wang Y, et al. Equivalent modeling method for electromagnetic transient of permanent magnet synchronous generator for offshore wind power simulation (in Chinese). Trans China Electrotech Soc, 2024, 39: 2400–2411 [刘逸凡, 邹明, 王焱, 等. 面向海上风电仿真的永磁同步发电机电磁暂态等效建模方法. 电工技术学报, 2024, 39: 2400–2411]
- 8 Kundur P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 2007
- 9 Climate Central. Heat season power outages. 2024-08-21, <https://www.climatecentral.org/climate-matters/heat-season-power-outages>
- 10 Xue L L, Xia J R, Yu R J, et al. Quantifying the grid impacts from large adoption of electric vehicles in china (in Chinese). Technical Report. 2020 [薛露露, 夏俊荣, 禹如杰, 等. 中国新能源汽车规模化推广对电网的影响分析. 技术报告. 2020]
- 11 Elahe M F, Jin M, Zeng P. Review of load data analytics using deep learning in smart grids: Open load datasets, methodologies, and application challenges. Intl J Energy Res, 2021, 45: 14274–14305
- 12 Silver D, Huang A, Maddison C J, et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. Nature, 2016, 529: 484–489
- 13 Silver D, Hubert T, Schrittwieser J, et al. A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and Go through self-play. Science, 2018, 362: 1140–1144
- 14 Jumper J, Evans R, Pritzel A, et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. Nature, 2021, 596: 583–589
- 15 Ouyang L, Wu J, Jiang X, et al. Training language models to follow instructions with human feedback. In: Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems. New York: Curran Associates, 2022. 27730–27744
- 16 Hua L. Breakthroughs have been made in key technologies of new electric force measuring equipment in China (in Chinese). Sci Technol Daily, 2024, 42: 110 [华凌. 我国新型电力量测设备关键技术取得突破. 科技日报, 2024, 42: 110]
- 17 Shen C, Chen Y, Huang S W, et al. Design idea and development path of simulation application software for new power system (in Chinese). Autom Electr Power Syst, 2022, 46: 75–86 [沈沉, 陈颖, 黄少伟, 等. 新型电力系统仿真应用软件设计理念与发展路径. 电力系统自动化, 2022, 46: 75–86]
- 18 Li Q X, Chao C H, Li Y L, et al. Design and implementation of resource mutual mechanism for electromagnetic transient cloud simulation in three-layer dispatching centers (in Chinese). Power Syst Tech, 2024: 1–8 [李勤新, 晁春晖, 李亚楼, 等. 三级调度电磁暂态云仿真资源互济机制设计与实现. 电网技术, 2024: 1–8]
- 19 Lian P J, Liu W Z, Sun H D, et al. Efficient initialization method for electromagnetic transient simulation system of large-scale new energy connected to the power grid through VSC-HVDO (in Chinese). Proc CSEE, 2025, 45: 3775–3787 [连攀杰, 刘文焯, 孙华东, 等. 大规模新能源经柔直联网电磁暂态仿真系统的高效初始化方法. 中国电机工程学报, 2025, 45: 3775–3787]
- 20 Pang B H, Liu W Z, Tang Y, et al. Induction motor-network decoupling model for power system electromagnetic transients simulation with induction motor as load (in Chinese). Proc CSEE, 2024, 44: 3804–3815 [庞博涵, 刘文焯, 汤涌, 等. 电力系统电磁暂态仿真中异步电动机的机-网解耦模型. 中国电机工程学报, 2024, 44: 3804–3815]
- 21 Department of Electrical Engineering, Tsinghua University. Breakthrough launch: Million-node electromagnetic transient simulation platform

- powers next-gen grid Systems via supercomputing cloud (in Chinese). 2022-11-08 [清华大学电机工程与应用电子技术系. 成果推介: 百万节点级新型电力系统电磁暂态高性能超算云仿真平台. 2022-11-08, <https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/5381.htm>]
- 22 Li X, Liu C, Guo P, et al. Deep learning-based transient stability assessment framework for large-scale modern power system. *Int J Electrical Power Energy Syst*, 2022, 139: 108010
- 23 Li B, Wu J. Adaptive assessment of power system transient stability based on active transfer learning with deep belief network. *IEEE Trans Automat Sci Eng*, 2023, 20: 1047–1058
- 24 Li X, Yang Z, Guo P, et al. An intelligent transient stability assessment framework with continual learning ability. *IEEE Trans Ind Inf*, 2021, 17: 8131–8141
- 25 Li Y, Zhang M, Chen C. A deep-learning intelligent system incorporating data augmentation for short-term voltage stability assessment of power systems. *Appl Energy*, 2022, 308: 118347
- 26 Cheng T, Chen R, Lin N, et al. Machine-learning-reinforced massively parallel transient simulation for large-scale renewable-energy-integrated power systems. *IEEE Trans Power Syst*, 2025, 40: 970–981
- 27 Fu T G Y, Du Y T, Lyu H, et al. Transient stability assessment of power systems based on multi-scale graph attention network (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2025, 49: 60–70 [傅太国屹, 杜友田, 吕昊, 等. 基于多尺度图注意力网络的电力系统暂态稳定评估. 电力系统自动化, 2025, 49: 60–70]
- 28 Li Y K, Liu B Z, Hu J J. Rapid evaluation of power system transient stability based on fusion of data-driven and time-domain simulation (in Chinese). *Power Syst Tech*, 2023, 47: 4386–4396 [李永康, 刘宝柱, 胡俊杰. 基于数据驱动与时域仿真融合的电力系统暂态稳定快速评估. 电网技术, 2023, 47: 4386–4396]
- 29 Zhuang Y R, Xiao T N, Cheng L, et al. Transient stability assessment of power system based on spatio-temporal graph convolutional network (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2022, 46: 11–18 [庄颖睿, 肖谭南, 程林, 等. 基于时空图卷积网络的电力系统暂态稳定评估. 电力系统自动化, 2022, 46: 11–18]
- 30 Stiasny J, Zhang B, Chatzivasileiadis S. PINNSim: A simulator for power system dynamics based on Physics-Informed Neural Networks. *Electric Power Syst Res*, 2024, 235: 110796
- 31 Shi Z, Yao W, Tang Y, et al. Bidirectional active transfer learning for adaptive power system stability assessment and dominant instability mode identification. *IEEE Trans Power Syst*, 2023, 38: 5128–5142
- 32 Shi Z, Yao W, Tang Y, et al. Intelligent power system stability assessment and dominant instability mode identification using integrated active deep learning. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 2024, 35: 9970–9984
- 33 Zhang R F, Yao W, Shi Z T, et al. Semi-supervised learning framework of dominant instability mode identification via fusion of virtual adversarial training and mean teacher model (in Chinese). *Proc CSEE*, 2022, 42: 7497–7509 [张润丰, 姚伟, 石重托, 等. 融合虚拟对抗训练和均值教师模型的主导失稳模式识别半监督学习框架. 中国电机工程学报, 2022, 42: 7497–7509]
- 34 Shi Z, Yao W, Zhao Y, et al. Two-stage weakly supervised learning to mitigate label noise for intelligent identification of power system dominant instability mode. *Appl Energy*, 2024, 359: 122659
- 35 Zhang R, Yao W, Shi Z, et al. Encoding time series as images: A robust and transferable framework for power system DIM identification combining rules and VGGNet. *IEEE Trans Power Syst*, 2023, 38: 5781–5793
- 36 Zhang R, Yao W, Shi Z, et al. A graph attention networks-based model to distinguish the transient rotor angle instability and short-term voltage instability in power systems. *Int J Electrical Power Energy Syst*, 2022, 137: 107783
- 37 Wang C J, Zhang Q L, Jiang T, et al. Power system dominant instability mode identification based on graph convolutional networks and bidirectional gated cyclic units (in Chinese). *Proc CSEE*, 2025, 45: 6326–6339 [王长江, 张千龙, 姜涛, 等. 基于图卷积网络和双向门控循环单元的电力系统主导失稳模式辨识. 中国电机工程学报, 2025, 45: 6326–6339]
- 38 Abo-Khalil A G. Digital twin real-time hybrid simulation platform for power system stability. *Case Studies Therm Eng*, 2023, 49: 103237
- 39 Chen Y, Gao S L, Song Y K, et al. High-performance electromagnetic transient simulation for new-type power system based on cloud computing (in Chinese). *Proc CSEE*, 2022, 42: 2854–2864 [陈颖, 高仕林, 宋炎侃, 等. 面向新型电力系统的高性能电磁暂态云仿真技术. 中国电机工程学报, 2022, 42: 2854–2864]
- 40 Tu Z, Fan Z, Zhang W, et al. Development of deep reinforcement learning co-simulation platforms for power system control. *IEEE Trans Automat Sci Eng*, 2025, 22: 4780–4789
- 41 Xinhuanet. China Southern Power Grid’s “Yudian” large model is ready for deployment and will provide maximum support for the development

- and utilization of new energy (in Chinese). 2024-12-17 [新华网. 南方电网“驭电”大模型具备投用条件 将最大限度支撑 新能源开发和利用. 2024-12-17, <http://www.gd.xinhuanet.com/20241217/0bd91b07e0b9487082c1bf4ea8a09d10/c.html>]
- 42 Zhu Q M, Chen J F, Li H Y, et al. Transient stability assessment based on stacked autoencoder (in Chinese). *Proc CSEE*, 2018, 38: 2937–2946 +3144 [朱乔木, 陈金富, 李弘毅, 等. 基于堆叠自动编码器的电力系统暂态稳定评估. *中国电机工程学报*, 2018, 38: 2937–2946+3144]
 - 43 Wang Y T, Wen Y F, Zheng W W, et al. Optimization and simulation synergetic approach for power system critical inertia requirement assessment (in Chinese). *Proc CSEE*, 2025, in press [王彦婷, 文云峰, 郑文伟, 等. 电力系统临界惯量需求的优化仿真协同评估方法. *中国电机工程学报*, 2025, 待发表]
 - 44 Kochkov D, Yuval J, Langmore I, et al. Neural general circulation models for weather and climate. *Nature*, 2024, 632: 1060–1066
 - 45 Zhu C Z H, Liu D G, Huang J J, et al. Monthly source and load scenario generation based on progressive growing of generative adversarial nets (in Chinese). *High Volt Eng*, 2024, 50: 3955–3964 [朱陈政翰, 柳东歌, 黄津钜, 等. 基于渐进式增长生成对抗网络的月度源荷场景生成. *高电压技术*, 2024, 50: 3955–3964]
 - 46 Qu K, Li P, Huang Y H, et al. Modeling and scenario generation method of annual load series for evaluation of renewable energy accommodation capacity (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2021, 45: 123–131 [曲凯, 李湃, 黄越辉, 等. 面向新能源消纳能力评估的年度负荷序列建模及场景生成方法. *电力系统自动化*, 2021, 45: 123–131]
 - 47 Rubasinghe O, Zhang X, Chau T K, et al. A novel sequence to sequence data modelling based CNN-LSTM algorithm for three years ahead monthly peak load forecasting. *IEEE Trans Power Syst*, 2024, 39: 1932–1947
 - 48 Xiao B, Huang Y R, Jiang Z, et al. The method of spatial load forecasting based on the generative adversarial network for data scarcity scenarios (in Chinese). *Proc CSEE*, 2020, 40: 7990–8001+8236 [肖白, 黄钰茹, 姜卓, 等. 数据匮乏场景下采用生成对抗网络的空间负荷预测方法. *中国电机工程学报*, 2020, 40: 7990–8001+8236]
 - 49 Rastgoo R, Amjadi N, Zareipour H. A deep generative model for selecting representative periods in renewable energy-integrated power systems. *Appl Soft Computing*, 2024, 165: 112107
 - 50 Shi Z D, Huang Y H, Li P, et al. Collaborative optimization planning for wind/PV/storage based on scenario generated by deep belief network (in Chinese). *Power Syst Tech*, 2023, 47: 1331–1342 [史昭娣, 黄越辉, 李湃, 等. 计及深度信念网络场景生成的风/光/储协同优化规划方法. *电网技术*, 2023, 47: 1331–1342]
 - 51 Li Y, Li J, Wang Y. Privacy-preserving spatiotemporal scenario generation of renewable energies: A federated deep generative learning approach. *IEEE Trans Ind Inf*, 2021, 18: 2310–2320
 - 52 Ruan Q T, Ye R. Power source planning of new power system for guaranteeing supply-demand security under extreme weather (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2025, 49: 103–115 [阮前途, 叶荣. 保障极端天气下供需安全的新型电力系统电源规划. *电力系统自动化*, 2025, 49: 103–115]
 - 53 Fan Q, Liu D, Wang Y F, et al. Key technologies and trends of cyber physical power system morphology evolution (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 8341–8353 [樊强, 刘东, 王宇飞, 等. 电力信息物理系统形态演进关键技术及其进展. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 8341–8353]
 - 54 Jiang K, Wang K, Wu C, et al. Trajectory simulation and optimization for interactive electricity-carbon system evolution. *Appl Energy*, 2024, 360: 122808
 - 55 Yücel G, van Daalen C. A simulation-based analysis of transition pathways for the Dutch electricity system. *Energy Policy*, 2012, 42: 557–568
 - 56 Xiang Y, Dai J, Xue P, et al. Autonomous topology planning for distribution network expansion: A learning-based decoupled optimization method. *Appl Energy*, 2023, 348: 121522
 - 57 Hua W, Stephen B, Wallom D C H. Digital twin based reinforcement learning for extracting network structures and load patterns in planning and operation of distribution systems. *Appl Energy*, 2023, 342: 121128
 - 58 Peng C H, Yu Y, Sun H J. Stochastic production simulation method for new power system considering uncertainty of source network load and storage (in Chinese). *Power Syst Tech*, 2019, 43: 3944–3951 [彭春华, 余愿, 孙惠娟. 基于源网荷协同优化的配电网光储联合系统规划. *电网技术*, 2019, 43: 3944–3951]
 - 59 Adetunji K E, Hofsajer I W, Abu-Mahfouz A M, et al. An optimization planning framework for allocating multiple distributed energy resources and electric vehicle charging stations in distribution networks. *Appl Energy*, 2022, 322: 119513
 - 60 Liu W X, Liu J Y, Wan H Y, et al. Full-scenario risk assessment of new power system planning scheme for multiple types of extreme weather (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2025, 49: 65–78 [刘文霞, 刘佳怡, 万海洋, 等. 面向多类型极端天气的新型电力系统规划方案全场景风险评估. *电力系统自动化*, 2025, 49: 65–78]

- 61 Gao Q, Yang Z F, Li W Y. Prospect on operations research for mixed-integer linear programming problems in power systems (in Chinese). *Trans China Electrotech Soc*, 2024, 39: 3291–3307 [高倩, 杨知方, 李文沅. 电力系统混合整数线性规划问题的运筹决策关键技术综述与展望. *电工技术学报*, 2024, 39: 3291–3307]
- 62 Huang M Y, Wei Z N, Sun G Q, et al. A novel situation awareness approach based on historical data-mining model in distribution networks (in Chinese). *Power Syst Tech*, 2017, 41: 1139–1145 [黄蔓云, 卫志农, 孙国强, 等. 基于历史数据挖掘的配电网态势感知方法. *电网技术*, 2017, 41: 1139–1145]
- 63 Zhu W J, Wang Y, Luo M, et al. Distributed clustering algorithm for awareness of electricity consumption characteristics of massive consumers (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2016, 40: 21–27 [朱文俊, 王毅, 罗敏, 等. 面向海量用户用电特性感知的分布式聚类算法. *电力系统自动化*, 2016, 40: 21–27]
- 64 Park S, Chen W, Mak T W K, et al. Compact optimization learning for AC optimal power flow. *IEEE Trans Power Syst*, 2023, 39: 4350–4359
- 65 Singh M K, Kekatos V, Giannakis G B. Learning to solve the AC-OPF using sensitivity-informed deep neural networks. *IEEE Trans Power Syst*, 2021, 37: 2833–2846
- 66 Wu T, Angela Zhang Y J, Wang S. Deep learning to optimize: Security-constrained unit commitment with uncertain wind power generation and BESSs. *IEEE Trans Sustain Energy*, 2021, 13: 231–240
- 67 Chen T, Luo H, Gooi H B, et al. A robust state estimation method for power systems using generalized correntropy loss function. *Expert Syst Appl*, 2024, 251: 123994
- 68 Xu J J, Cao D L, Wang Z W, et al. A framework of anomaly signal detection and abduction analysis in active distribution network situation based on embedded physics knowledge learning (in Chinese). *Proc CSEE*, 2025: 1–13 [徐俊俊, 曹冬磊, 王志伟, 等. 内嵌物理知识学习的主动配电网态势异常信号检测与溯因. *中国电机工程学报*, 2025: 1–13]
- 69 Song Y, Wang W, Zhang Z, et al. Multiple event detection and recognition for large-scale power systems through cluster-based sparse coding. *IEEE Trans Power Syst*, 2017, 32: 4199–4210
- 70 Zhang R, Ma H, Hua W, et al. Data-driven photovoltaic generation forecasting based on a bayesian network with spatial-temporal correlation analysis. *IEEE Trans Ind Inf*, 2019, 16: 1635–1644
- 71 Dobbe R, van Westering W, Liu S, et al. Linear single- and three-phase voltage forecasting and Bayesian state estimation with limited sensing. *IEEE Trans Power Syst*, 2019, 35: 1674–1683
- 72 Xu P, Sun Y, Zhang J, et al. Load situation awareness and control method based on artificial intelligence agent (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2019, 43: 178–186 [许鹏, 孙毅, 张健, 等. 基于人工智能代理的负荷态势感知及调控方法. *电力系统自动化*, 2019, 43: 178–186]
- 73 Xiao B, Xiao Z F, Jiang Z, et al. Spatial load situation awareness based on denoising autoencoder, singular spectrum analysis and long short-term memory neural networks (in Chinese). *Proc CSEE*, 2021, 41: 4858–4867 [肖白, 肖志峰, 姜卓, 等. 基于降噪自编码器、奇异谱分析和长短期记忆神经网络的空间电力负荷态势感知. *中国电机工程学报*, 2021, 41: 4858–4867]
- 74 Xiao B, Zhou W K, Jiang Z. Spatial load situation awareness based on isolation forest, mode decomposition and neural networks (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2022, 46: 190–198 [肖白, 周文凯, 姜卓. 基于孤立森林、模态分解和神经网络的空间负荷态势感知. *电力系统自动化*, 2022, 46: 190–198]
- 75 Yang T, Liu H, Wang J, et al. Deep reinforcement learning-based low-carbon economic dispatch of park integrated energy system (in Chinese). *Power Syst Tech*, 2024, 48: 3604–3613 [杨挺, 刘豪, 王静, 等. 基于深度强化学习的园区综合能源系统低碳经济调度. *电网技术*, 2024, 48: 3604–3613]
- 76 Hou Q, Zhang N, Kirschen D S, et al. Sparse oblique decision tree for power system security rules extraction and embedding. *IEEE Trans Power Syst*, 2020, 36: 1605–1615
- 77 Fan P X, Yang J, Wen Y X, et al. Bi-layer coordinated control strategy of distribution network considering participation of electric vehicles and microgrid (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2024, 48: 60–68 [范培潇, 杨军, 温裕鑫, 等. 考虑电动汽车与微电网参与的配电网双层协调控制策略. *电力系统自动化*, 2024, 48: 60–68]
- 78 Tao Y, Qiu J, Lai S. A data-driven management strategy of electric vehicles and thermostatically controlled loads based on modified generative adversarial network. *IEEE Trans Transp Electrific*, 2021, 8: 1430–1444
- 79 Hao G, Li Y, Li Y, et al. Lyapunov-based safe reinforcement learning for microgrid energy management. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 2025, 36: 9985–9999
- 80 Yang Y, Yang Z, Yu J, et al. Fast economic dispatch in smart grids using deep learning: An active constraint screening approach. *IEEE Internet*

- Things J, 2020, 7: 11030–11040
- 81 Pourahmadi F, Kazempour J. Unit commitment predictor with a performance guarantee: A support vector machine classifier. *IEEE Trans Power Syst*, 2025, 40: 715–727
 - 82 The People's Government of Hunan Province Official Website. The nation's first artificial intelligence "distribution network dispatcher" has been put into operation (in Chinese). 2024-12-23 [湖南省人民政府网. 全国电力领域首个人工智能“配网调度员”上岗. 2024-12-23, https://www.hunan.gov.cn/topic/hnsz/szmtbd/202412/t20241223_33533414.html]
 - 83 Feng S, Cui H, Chen J N, et al. Applications and challenges of artificial intelligence in power system wide-band oscillations (in Chinese). *Proc CSEE*, 2021, 41: 7889–7905 [冯双, 崔昊, 陈佳宁, 等. 人工智能在电力系统宽频振荡中的应用与挑战. *中国电机工程学报*, 2021, 41: 7889–7905]
 - 84 Chau T K, Yu S S, Fernando T, et al. A load-forecasting-based adaptive parameter optimization strategy of STATCOM using ANNs for enhancement of LFOD in power systems. *IEEE Trans Ind Inf*, 2018, 14: 2463–2472
 - 85 Gurung S, Naetiladdanon S, Sangswang A. A surrogate based computationally efficient method to coordinate damping controllers for enhancement of probabilistic small-signal stability. *IEEE Access*, 2021, 9: 32882–32896
 - 86 Zhang G, Hu W, Zhao J, et al. A novel deep reinforcement learning enabled multi-band PSS for multi-mode oscillation control. *IEEE Trans Power Syst*, 2021, 36: 3794–3797
 - 87 Yan Z, Xu Y. A multi-agent deep reinforcement learning method for cooperative load frequency control of a multi-area power system. *IEEE Trans Power Syst*, 2020, 35: 4599–4608
 - 88 Zhang G, Hu W, Cao D, et al. Deep reinforcement learning-based approach for proportional resonance power system stabilizer to prevent ultra-low-frequency oscillations. *IEEE Trans Smart Grid*, 2020, 11: 5260–5272
 - 89 Liu W, Zhang D X, Wang X Y, et al. A decision making strategy for generating unit tripping under emergency circumstances based on deep reinforcement learning (in Chinese). *Proc CSEE*, 2018, 38: 109–119+347 [刘威, 张东霞, 王新迎, 等. 基于深度强化学习的电网紧急控制策略研究. *中国电机工程学报*, 2018, 38: 109–119+347]
 - 90 Yan Z, Xu Y. Data-driven load frequency control for stochastic power systems: A deep reinforcement learning method with continuous action search. *IEEE Trans Power Syst*, 2019, 34: 1653–1656
 - 91 Zeng L K, Li D H, Yao W, et al. A data driven-based adaptive wide-area damping control for back to back VSC-HVDC (in Chinese). *Proc CSEE*, 2018, 38: 6582–6594 [曾令康, 李大虎, 姚伟, 等. 基于数据驱动的背靠背柔性直流自适应广域阻尼控制. *中国电机工程学报*, 2018, 38: 6582–6594]
 - 92 Huang Q, Huang R, Hao W, et al. Adaptive power system emergency control using deep reinforcement learning. *IEEE Trans Smart Grid*, 2020, 11: 1171–1182
 - 93 Chen Y X, Zhu J Z, Liu J Y, et al. Power system transient stability emergency control based on hybrid distributed deep reinforcement learning (in Chinese). *Power Syst Tech*, 2025, 49: 1513–1523 [陈一熙, 朱继忠, 刘嘉媛, 等. 基于混合分布式深度强化学习的电力系统暂态稳定紧急控制. *电网技术*, 2025, 49: 1513–1523]
 - 94 Chen C, Cui M, Li F, et al. Model-free emergency frequency control based on reinforcement learning. *IEEE Trans Ind Inf*, 2021, 17: 2336–2346
 - 95 Guan H Z, Chen Y, Huang S W, et al. Preventive control for transient stability based on generative adversarial network (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2020, 44: 36–43 [关慧哲, 陈颖, 黄少伟, 等. 基于生成对抗网络的暂态稳定预防控制. *电力系统自动化*, 2020, 44: 36–43]
 - 96 Su T, Liu Y B, Shen X D, et al. Deep learning-driven evolutionary algorithm for preventive control of power system transient stability (in Chinese). *Proc CSEE*, 2020, 40: 3813–3824 [苏童, 刘友波, 沈晓东, 等. 深度学习驱动的电力系统暂态稳定预防控制进化算法. *中国电机工程学报*, 2020, 40: 3813–3824]
 - 97 Zeng H, Zhou Y, Guo Q, et al. Distributed deep reinforcement learning-based approach for fast preventive control considering transient stability constraints. *CSEE J Power Energy Syst*, 2021, 9: 197–208
 - 98 Zhou W, Shan Q. STVS assessment and simulation study of power systems based on bayesian optimization algorithm and convolutional neural networks (in Chinese). *Lamps Light*, 2024, 12: 225–227 [周伟, 单强. 基于贝叶斯优化算法和卷积神经网络的电力系统STVS评估及仿真研究. *光源与照明*, 2024, 12: 225–227]
 - 99 Xie K, Liu D N, Li Z, et al. Multi-dimensional collaborative electricity market system for new power system (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2024, 48: 2–12 [谢开, 刘敦楠, 李竹, 等. 适应新型电力系统的多维协同电力市场体系. *电力系统自动化*, 2024, 48: 2–12]
 - 100 People's Daily Overseas Edition. The blue book of the national unified electricity market development plan was released-promoting the

- construction of a unified electricity market in three steps (in Chinese). 2024-11-30 [人民日报海外版. 《全国统一电力市场发展规划蓝皮书》发布——分“三步走”推动统一电力市场建设. 2024-11-30, https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202411/content_6990228.htm]
- 101 Qin X, Xu B, Lestas I, et al. The role of electricity market design for energy storage in cost-efficient decarbonization. *Joule*, 2023, 7: 1227–1240
- 102 He L, Zhang J. A Community sharing market with PV and energy storage: An adaptive bidding-based double-side auction mechanism. *IEEE Trans Smart Grid*, 2020, 12: 2450–2461
- 103 Salehpour M J, Hossain M J. Leveraging machine learning for efficient EV integration as mobile battery energy storage systems: Exploring strategic frameworks and incentives. *J Energy Storage*, 2024, 92: 112151
- 104 Feng C, Liu A L. Peer-to-peer energy trading of solar and energy storage: A networked multiagent reinforcement learning approach. *Appl Energy*, 2025, 383: 125283
- 105 Wang B B, Liu F Y, Yang P P, et al. Study on collusion behavior between the members in electricity producers-retailers integration group considering slightly altruistic utility based on multi-agent deep double Q network (in Chinese). *Proc CSEE*, 2023, 43: 2640–2652 [王蓓蓓, 刘飞宇, 杨朋朋, 等. 考虑轻微利他效用的发售电一体化集团成员合谋行为的多智能体深度双Q网络推演研究. *中国电机工程学报*, 2023, 43: 2640–2652]
- 106 Liu F Y, Wang J W, Wang Z F, et al. Study on free joint bidding mechanism in multi-agent environment based on two-stage deep reinforcement learning algorithm (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 4626–4639 [刘飞宇, 王吉文, 王正风, 等. 基于两阶段深度强化学习算法的多智能体自由合谋竞价机理研究. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 4626–4639]
- 107 Wang P, Fang D, Wang S. Optimal dynamic regulation in retail electricity market with consumer feedback and social learning. *Energy Policy*, 2022, 168: 113148
- 108 Liu D N, Zhang Q, Li X T, et al. Identification of potential harmful behaviors in electricity market based on cloud model and fuzzy Petri net (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2019, 43: 25–33 [刘敦楠, 张潜, 李霄彤, 等. 基于云模型与模糊Petri网的电力市场潜在危害行为识别. *电力系统自动化*, 2019, 43: 25–33]
- 109 Zhao H, Zhao J, Qiu J, et al. Data-driven risk preference analysis in day-ahead electricity market. *IEEE Trans Smart Grid*, 2020, 12: 2508–2517
- 110 Tang Q, Guo H, Chen Q. Multi-market bidding behavior analysis of energy storage system based on inverse reinforcement learning. *IEEE Trans Power Syst*, 2022, 37: 4819–4831
- 111 Guo H, Chen Q, Xia Q, et al. Deep inverse reinforcement learning for objective function identification in bidding models. *IEEE Trans Power Syst*, 2021, 36: 5684–5696
- 112 Sun W Q, Liu X N, Xiang W, et al. User preference learning and response optimization based on Bayesian inference (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2020, 44: 92–100 [孙伟卿, 刘晓楠, 向威, 等. 基于贝叶斯推断的用户偏好学习与响应优化. *电力系统自动化*, 2020, 44: 92–100]
- 113 Yang L, Sun Q, Zhang N, et al. Indirect multi-energy transactions of energy internet with deep reinforcement learning approach. *IEEE Trans Power Syst*, 2022, 37: 4067–4077
- 114 Qiu D, Ye Y, Papadaskalopoulos D, et al. Scalable coordinated management of peer-to-peer energy trading: A multi-cluster deep reinforcement learning approach. *Appl Energy*, 2021, 292: 116940
- 115 Han O, Ding T, Bai L, et al. Evolutionary game based demand response bidding strategy for end-users using Q-learning and compound differential evolution. *IEEE Trans Cloud Comput*, 2021, 10: 97–110
- 116 State Grid Shanxi Electric Power Company. The next-generation power trading platform has been integrated with the “Guangming Power Large Model” (in Chinese). 2025-03-17 [国网山西电力. 新一代电力交易平台接入“光明电力大模型”. 2025-03-17, <http://www.sx.sgcc.com.cn/homepage/wbw/articles/202503/a1162390.html>]
- 117 Guo H, Chen Q, Gu Y, et al. A data-driven pattern extraction method for analyzing bidding behaviors in power markets. *IEEE Trans Smart Grid*, 2019, 11: 3509–3521
- 118 Xu H, Dominguez-Garcia A D, Veeravalli V V, et al. Data-driven voltage regulation in radial power distribution systems. *IEEE Trans Power Syst*, 2019, 35: 2133–2143
- 119 Pu T J, Han X. Research on key technologies in the application of artificial intelligence in new type power systems (in Chinese). *Electr Power Inf Commun Technol*, 2024, 22: 1–13 [蒲天骄, 韩笑. 新型电力系统中人工智能应用的关键技术. *电力信息与通信技术*, 2024, 22: 1–13]
- 120 Ji J S, Wu J Y, Wang Y B, et al. Power system transient voltage stability assessment based on deep residual network (in Chinese). *Power Syst Tech*, 2022, 46: 2500–2511 [季佳伸, 吴俊勇, 王彦博, 等. 基于深度残差网络的电力系统暂态电压稳定评估. *电网技术*, 2022, 46: 2500–

2511]

- 121 Fernandez A, Garcia S, Herrera F, et al. SMOTE for learning from imbalanced data: Progress and challenges, marking the 15-year anniversary. *J Artif Intell Res*, 2018, 61: 863–905
- 122 Chawla N V, Bowyer K W, Hall L O, et al. SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique. *J Artif Intell Res*, 2002, 16: 321–357
- 123 Fu S Y, Gao X, Zhang H, et al. Anomaly detection for power dispatching data based on meta-learning dynamic ensemble selection (in Chinese). *Power Syst Tech*, 2022, 46: 3248–3261 [傅世元, 高欣, 张浩, 等. 基于元学习动态选择集成的电力调度数据异常检测方法. 电网技术, 2022, 46: 3248–3261]
- 124 Wang S X, Chen H W, Pan Z X, et al. A reconstruction method for missing data in power system measurement using an improved generative adversarial network (in Chinese). *Proc CSEE*, 2019, 39: 56–64+320 [王守相, 陈海文, 潘志新, 等. 采用改进生成式对抗网络的电力系统量测缺失数据重建方法. 中国电机工程学报, 2019, 39: 56–64+320]
- 125 Xie B C, Zhang Y, Liu G W, et al. Stress optimization of high-speed permanent magnet motor based on few-shot transfer learning surrogate model (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 5362–5374 [谢冰川, 张岳, 刘光伟, 等. 基于小样本迁移代理模型的高速永磁电机应力优化. 中国电机工程学报, 2024, 44: 5362–5374]
- 126 Xu J, Li K, Li D. An automated few-shot learning for time-series forecasting in smart grid under data scarcity. *IEEE Trans Artif Intell*, 2024, 5: 2482–2492
- 127 Ren C, Xu Y, Dai B, et al. An integrated transfer learning method for power system dynamic security assessment of unlearned faults with missing data. *IEEE Trans Power Syst*, 2021, 36: 4856–4859
- 128 Ren C, Xu Y. Transfer learning-based power system online dynamic security assessment: Using one model to assess many unlearned faults. *IEEE Trans Power Syst*, 2020, 35: 821–824
- 129 Machlev R, Perl M, Belikov J, et al. Measuring explainability and trustworthiness of power quality disturbances classifiers using XAI—explainable artificial intelligence. *IEEE Trans Ind Inf*, 2021, 18: 5127–5137
- 130 Pu T J, Qiao J, Zhao Z X, et al. Research on interpretable methods of machine learning applied in intelligent analysis of power system (part I): Basic concept and framework (in Chinese). *Proc CSEE*, 2023, 43: 7010–7030 [蒲天骄, 乔骥, 赵紫璇, 等. 面向电力系统智能分析的机器学习可解释性方法研究(一): 基本概念与框架. 中国电机工程学报, 2023, 43: 7010–7030]
- 131 Venzke A, Chatzivasileiadis S. Verification of neural network behaviour: Formal guarantees for power system applications. *IEEE Trans Smart Grid*, 2020, 12: 383–397
- 132 Gao H, Cai G W, Yang D Y, et al. Feature selection approach based on FCC-eAI in static voltage stability margin estimation (in Chinese). *Electr Power Autom Equip*, 2023, 43: 168–176 [高晗, 蔡国伟, 杨德友, 等. 基于累积贡献率和可解释人工智能的静态电压稳定裕度估计特征量筛选方法. 电力自动化设备, 2023, 43: 168–176]
- 133 Heo S K, Ko J, Kim S Y, et al. Explainable AI-driven net-zero carbon roadmap for petrochemical industry considering stochastic scenarios of remotely sensed offshore wind energy. *J Cleaner Production*, 2022, 379: 134793
- 134 Zhou T, Yang J, Zhan X P, et al. Data-driven method and interpretability analysis for transient voltage stability assessment (in Chinese). *Power Syst Tech*, 2021, 45: 4416–4425 [周挺, 杨军, 詹祥澎, 等. 一种数据驱动的暂态电压稳定评估方法及其可解释性研究. 电网技术, 2021, 45: 4416–4425]
- 135 Joshi R K, Sengupta S, Ekbal A. From hallucinations to facts: Enhancing language models with curated knowledge graphs. arXiv: 2412.18672
- 136 Liu Y, Liu G, Zhang R, et al. Hallucination-aware optimization for large language model-empowered communications. arXiv: 2412.06007
- 137 Fang J S, Liu C R, Su C B, et al. Multi-stage transient stability assessment of power system based on self-attention transformer encoder (in Chinese). *Proc CSEE*, 2023, 43: 5745–5759 [房佳姝, 刘崇茹, 苏晨博, 等. 基于自注意力Transformer编码器的多阶段电力系统暂态稳定评估方法. 中国电机工程学报, 2023, 43: 5745–5759]
- 138 Su X J, Zhou W X, Li C J, et al. Interpretable offshore wind power output forecasting based on long short-term memory neural network with dual-stage attention (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2022, 46: 141–151 [苏向敬, 周汶鑫, 李超杰, 等. 基于双重注意力LSTM神经网络的可解释海上风电出力预测. 电力系统自动化, 2022, 46: 141–151]
- 139 Wu Y X, Han X Q, Niu Z W, et al. Interpretable photovoltaic power interval prediction using multi-attention deep neural networks (in Chinese). *Power Syst Tech*, 2024, 48: 2928–2939 [武宇翔, 韩肖清, 牛哲文, 等. 融合多注意力深度神经网络的可解释光伏功率区间预测. 电网技术, 2024, 48: 2928–2939]
- 140 Zhao J, Mili L, Wang M. A generalized false data injection attacks against power system nonlinear state estimator and countermeasures. *IEEE*

- [Trans Power Syst](#), 2018, 33: 4868–4877
- 141 Liu X R, Chang P, Sun Q Y. Grid false data injection attacks detection based on XGBoost and unscented Kalman filter adaptive hybrid prediction (in Chinese). *Proc CSEE*, 2021, 41: 5462–5476 [刘鑫蕊, 常鹏, 孙秋野. 基于XGBoost和无迹卡尔曼滤波自适应混合预测的电网虚假数据注入攻击检测. *中国电机工程学报*, 2021, 41: 5462–5476]
- 142 Selim A, Zhao J, Ding F, et al. Adaptive deep reinforcement learning algorithm for distribution system cyber attack defense with high penetration of DERs. *IEEE Trans Smart Grid*, 2023, 15: 4077–4089
- 143 Pan A, Lee Y, Zhang H, et al. Improving robustness of reinforcement learning for power system control with adversarial training. *arXiv: 2110.08956*
- 144 He J, Wang J, Wang N, et al. Preventing non-intrusive load monitoring privacy invasion: A precise adversarial attack scheme for networked smart meters. *IEEE Trans Mobile Comput*, 2025, 24: 13696–13709
- 145 Dai S, Meng F, Wang Q, et al. DP2-NILM: A distributed and privacy-preserving framework for non-intrusive load monitoring. *Renew Sustain Energy Rev*, 2024, 191: 114091
- 146 Huang R, Li Y. Adversarial attack mitigation strategy for machine learning-based network attack detection model in power system. *IEEE Trans Smart Grid*, 2022, 14: 2367–2376
- 147 Bhattacharjee A, Bai G, Tushar W, et al. DeeBBAA: A benchmark deep black-box adversarial attack against cyber-physical power systems. *IEEE Internet Things J*, 2024, 11: 40670–40688

Artificial intelligence for the new power system: Trends and challenges

BI TianShu¹, DING ZhaoHao¹, RAO Hong² & LIU Nian¹

¹ State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

² State Key Laboratory of HVDC (Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid), Guangzhou 510663, China

Driven by the goals of carbon peak and carbon neutrality, the new power system has developed rapidly, exhibiting main characteristics such as strong stochastic volatility, high power electronization, and significant susceptibility to external influences, which pose numerous challenges to the secure, stable, and economic operation of power grids. Simultaneously, the swift advancement of artificial intelligence has enabled it to initially possess the capabilities of autonomous knowledge discovery and inference, thereby driving a transformation of the scientific research paradigm from traditional mechanism- and experiment-driven approaches to data- and computing-driven ones, which provides a new path to address the issues in the new power system. From a system-level perspective, this paper focuses on artificial intelligence technologies tailored for the new power system, summarizing the current development status and emerging trends in core application areas, including simulation analysis, planning, dispatch and operation, stability control, and electricity market transactions. Furthermore, it discusses several technical bottlenecks and key challenges associated with the artificial intelligence-assisted new power system.

new power system, artificial intelligence, data-driven approaches, computing-driven approaches

doi: [10.1360/SST-2025-0167](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0167)