

引用格式: 刘舒巍, 杨和辰, 余夏, 等. AI技术在电力系统发展中的应用与前景[J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 149-158. LIU Shuwei, YANG Hechen, YU Xia, et al. Application and prospect of AI technology in power system development [J]. Southern energy construction, 2024, 11(5): 149-158. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.16.

AI技术在电力系统发展中的应用与前景

刘舒巍^{1,2,✉}, 杨和辰¹, 余夏¹, 舒斌¹, 吴其荣¹

(1. 重庆远达烟气治理特许经营有限公司科技分公司, 重庆 401122;

2. 重庆大学能源与动力工程学院, 重庆 400044)

摘要: [目的]在现阶段能源紧缺和碳减排双重压力下, 以电为中心的清洁能源转型势在必行, 在此背景下, 电力系统的稳定性、运行管理自动化、智能化将是电力系统发展的必然选择, 而人工智能(AI)技术则是实现这一目标的关键手段之一。[方法]首先介绍了国内外电力系统碳排放情况, 并在此基础上指出了中国电力系统低碳发展的困局及可行的解决方案, 继而论述了AI技术在电力系统发展中的应用与前景。[结果]针对低碳、低能耗电力系统转型, 提出了火电行业资本和资源整、碳捕集技术应用等低碳改造, 以及促进清洁能源消纳、平滑替代等一系列电力系统低碳发展路线, 并指出在能源转型背景下, AI技术将成为电力系统自动化、智能化平稳运行的关键, 能够广泛应用于电力调度、继电保护、电力设备管理、电力系统稳定评估与决策等电力系统运行管理领域, 具备广阔的应用前景。[结论]随着第三代AI技术的不断优化甚至第四代AI技术的不断开发, 未来其在电力系统中的应用将越来越广泛。

关键词: 碳中和; 电力低碳转型; 电力系统; 人工智能

中图分类号: TM7; TP18

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)05-0149-10

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.16

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Application and Prospect of AI Technology in Power System Development

LIU Shuwei^{1,2,✉}, YANG Hechen¹, YU Xia¹, SHU Bin¹, WU Qirong¹

(1. Technology Branch of Chongqing Yuanda Flue Gas Control Franchise Co., Ltd., Chongqing 401122, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: [Introduction] In the face of energy scarcity and carbon reduction imperatives, the transition to clean energy centered on electricity is crucial. To achieve this, power system development must prioritize stability, automation and intelligence. Artificial intelligence (AI) technology is a key means to realize this goal. [Method] This paper introduced the carbon emissions of domestic and foreign power systems at first, and pointed out the difficulties and feasible solutions for low-carbon development of the power system in China on this basis. Then, the application and prospect of AI technology in power system development were discussed. [Result] In response to the transition to low-carbon and low-energy power systems, a series of low-carbon development routes, such as integration of capital and resources in the thermal power industry, low-carbon transition (such as the application of carbon capture technology), and promoting the consumption of and smooth replacement by clean energy, were proposed in this paper. It was also noted that AI technology will play a crucial role in automating, intelligentizing and optimizing power systems, with wide-ranging applications in power dispatching, relay protection, power equipment management, power system stability evaluation, and decision-making processes. [Conclusion] As third-generation AI technology continues to evolve and fourth-generation AI technology emerges, the application of AI technology in the power system will become increasingly widespread.

收稿日期: 2023-05-16 修回日期: 2023-07-29

基金项目: 重庆英才计划青年拔尖人才项目“燃煤电厂化学吸收法碳捕集技术开发与研究”(CQYC2021059461)

Key words: carbon neutrality; low-carbon transition; power system; AI

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

工业化开始时,大气中的二氧化碳(以下简称“CO₂”)浓度约为 0.028%,到 2020 年已攀升至 0.041 25%^[1]。CO₂浓度的升高将导致气候变暖、臭氧层消耗以及环境健康等诸多问题^[2]。在此背景下,无论是从中国还是全球来说,能源转型、减碳降碳都刻不容缓。2020 年 9 月,我国提出了“2030 年碳达峰、2060 年碳中和”的目标,在电力行业碳排放占比高达 40% 以上的情况下,构建新型电力系统,确保能源安全、低碳和能源高质量发展,实现以电为中心的清洁能源转型将是实现“双碳”目标的关键^[3]。在构建新型能源体系过程中,风电、光伏大规模间歇式新能源接入电力系统后,电力电量的平衡、安全稳定控制等将面临前所未有的考验,因此电力系统的运行管理自动化、智能化、稳定化将是电力系统发展的必然选择,而 AI 技术则是实现这一目标的关键。

1 电力系统碳排放现状

现阶段,电力系统的直接碳排放仍然来自于火电。

1.1 全球碳排放情况

根据 IEA 报告^[4],2021 年,全球能源工业的碳排放量为 363 亿 t,较 2020 年同比增长 6%,达到了有史以来最高水平,主要原因是新冠疫情致 2020 年全球碳排放创记录下降,而后自 2021 年起,新冠疫情后全球经济的复苏严重依赖于煤炭来推动。2021 年,煤炭使用产生的碳排放占全球 CO₂ 排放量的 42% 以上,达到 153 亿 t,也创造了历史新高,其中燃煤电厂的碳排放量上升至创纪录的 105 亿 t。图 1 为 2000—2021 年全球碳排放统计。

1.2 中国碳排放情况

2021 年,中国碳排放总量超过 119 亿 t,约占全球碳排放总量的 33%,其中能源行业排放量超 105 亿 t。2021 年度全口径发电量为 8 534.25 TWh,其中,火电发电量 5 805.87 TWh,占比超过 68%。按 2021 年全国单位火电发电量碳排放约为 828 g/kWh 计算,

我国火电行业 2021 年碳排放量达 48 亿 t,约占全国能源行业总排放量的 46%^[5]。面对能源紧缺和“碳减排”双重压力,现阶段我国电力系统的低碳发展任务艰巨。图 2 为 2000—2021 年中国碳排放统计(能源行业)。

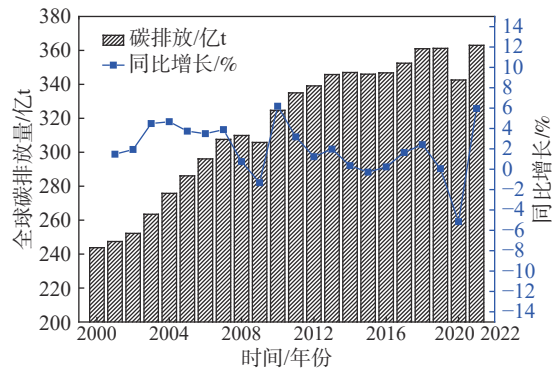


图 1 2000—2021 年全球碳排放统计

Fig. 1 Statistics of global carbon emissions (2000–2021)

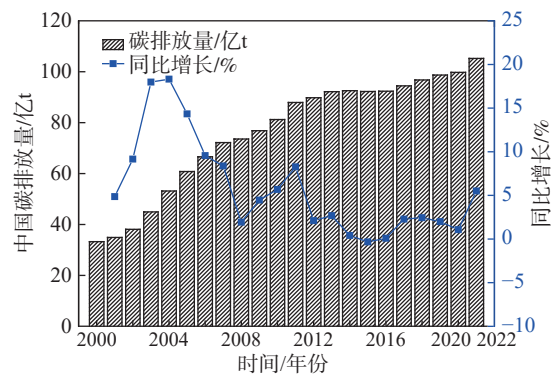


图 2 2000—2021 年中国碳排放统计(能源行业)

Fig. 2 Statistics of carbon emissions in China (energy industry) (2000–2021)

2 电力系统发展趋势

“电荒”是 2021—2022 年电力行业的关键词之一,虽然持续时间较短,但也传递出了我国电力系统存在“稳定性”问题的信号。从目前的发电结构来看,火电依然占据绝对优势,尽管太阳能、风能、水能、核能等新能源发电发展空间广阔,但目前仍然存

在稳定性不足、源荷匹配不足等问题。因此,在现阶段的用能侧需求不断增大和“碳中和”目标的压力下,以电为中心的清洁能源转型势在必行,而在此过程中, AI技术也必将发挥积极的作用。

2.1 提升火电经济性, 推进低碳改造

作为电力系统主力的火电在电力系统未来的发展中不可忽视。

1) 可以加快行业资本和资源整合, 提高火电营利性。如国家层面推进行业资本和资源整合, 支持企业间实现煤电、热电联动效应, 火电的盈利性会随着规模效应而有所改善^[6]。

2) 火电积极参与新能源开发, 拓宽服务模式。火电参与新能源开发已经是大势所趋, 很多企业已经投资建设了风光项目作为火电的补充。另外, 火电企业也可逐步增加自身业务中的服务属性。如气电的热启动及冷启动时间短, 就是针对间歇性的新能源电源最理想的补充。这种以出售辅助服务为主的业务形态会逐渐增加, 并成为行业的重要特征^[7]。

3) 在保证经济性的同时, 探索生物质掺烧、CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage, 碳捕集、封存及再利用) 技术改造等低碳发展路线。一方面可以探索生物质掺烧、污泥掺烧等多元电力结构, 减排降碳; 另一方面, 可以进行 CCUS 等主动型碳减排技术改造, 助力火电行业低碳发展, 而这也将成为未来火电减排的主力^[8]。

2.2 加强清洁能源发展和消纳, 逐步实现电能替代

在碳中和背景下, 需要逐步增大光伏、风电等清洁能源装机比例, 使其逐渐成为我国能源电力供应主体。与此同时, 清洁能源的不稳定性以及日夜间的波动问题也不可忽视, 需要结合火电的稳定性, 构建能源侧和用能侧之间的互动理论与方法, 合理高效地完成清洁能源的消纳^[9]。

目前, 促进新能源消纳比较成熟的措施有火电机组深度调峰、电网跨区互联; 发展中的措施有先进调度运行策略、需求响应, 抽水蓄能、压缩空气储能等; 未来着力发展的措施有碳捕集电厂灵活运行、灵活的市场机制与配额制、多能源系统。以上的这些措施中, 碳捕集、储能、电网跨区互联等措施的建设运行成本相对较高, 而灵活调度的成本相对较低, 因此针对清洁能源的高效消纳, 可以通过能源互联网进行灵活调度, 实现精细化出力预测、需求侧快速响

应以及多能源系统集成, 从而降低新能源消纳成本, 实现电能平稳替代^[10]。

2.3 借助 AI 技术, 保障电力系统安全稳定转型

在电力系统能源转型背景下, 随着光伏、风电等新能源的大规模并网以及电网负荷需求的日趋增长, 新能源的不稳定性以及日夜间的波动问题将导致电力系统存在多能源、多网络、多主体的融合需求, 电力系统的海量数据也将呈现出海量、多型、低价值密度、快速性这 4 个典型特征^[11]。在此背景下, 人工操作往往已经不能满足电力系统对发电侧、用户侧的海量动态大数据的及时分析处理、电力监控系统的安全可靠运行、运维过程的高效决策与调度以及智能化水平的不断提升等诸多需求。而 AI 技术具备高效性、智慧性等优势, 能够有效解决新能源不确定性、波动性的冲击, 有效平衡源、网、荷、储, 从而保障电网运行的安全性、经济性、可持续性^[12]。

因此, 在电力系统能源转型背景下, 电力系统的稳定性、运行管理自动化、智能化将是电力系统发展的必然选择, 而 AI 技术则是实现这一目标的关键手段之一。

3 AI 技术在电力系统中的应用现状

AI 技术, 即人工智能(Artificial Intelligence)技术, 最早在 1956 年的 Dartmouth 学会上被提出, 可以对人的意识、思维过程进行模拟、延伸和扩展, 浅显地讲就是可以像人一样思考决策、甚至超越人的智能技术。相对于传统人工操作, AI 技术能够高效稳定地完成设定工作, 从整体上提高应用效率, 降低运行成本。根据《新一代人工智能发展规划》^[13]中的分类, 目前应用于电力系统的 AI 基础理论主要有: 大数据、自主协同控制与优化决策、高级机器学习等, 通过此类技术的协同应用, AI 技术能够具备传统技术无法比拟的多种优势。

AI 技术在电力系统中的应用一般可分为 2 个阶段^[14]:

1) 以专家系统和人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)为代表的第二代 AI 技术在电力系统各子领域的应用, 在第二代 AI 技术中, 数据具有核心地位, 但是不再为系统灌输知识, 而是设法让系统从数据中自主学习知识, 即利用数据、算法与算力 3 个要素构造的 AI。其中, ANN 模块就是典型

的代表之一, ANN 具有强大的学习能力, 可以从原始数据中抽取出知识并存储在网络参数中, 因此可以应用在电力系统的电力调度、继电保护以及电力设备管理等方面。

2) 以深度学习为代表的第三代 AI 技术, 即融合了知识驱动和数据驱动的优点, 利用知识、数据、算法和算力 4 个要素建立新的可解释和鲁棒 (Robust) 的 AI 理论与方法, 能够更全面地利用知识和数据, 让 AI 技术更安全、可信、可靠, 如深度学习在电力系统稳定评估与决策中的应用等。

3.1 AI 技术在电力调度中的应用

随着发电侧的不断多元化以及用电侧对于电力需求的不断增加, 电力调度需要处理的实时数据也随之不断增加, AI 技术以其运算高效、操作精准、学习能力较强, 在电力调度中获得了广泛应用^[15]。

1) 专家系统

电网调度系统在运行过程中对知识经验的要求较高, AI 技术的“专家系统”, 是指在原有系统的基础上, 根据运行经验, 利用信息技术, 建立完善的数据库, 让 AI 技术具备“专家”的能力, 能够观察电力系统的运行调度状态, 模拟人工进行分析、决策, 对存在的问题进行及时处理, 并在运行中不断丰富自身的信息库, 以满足调度系统的运行需求^[16]。

当然, 专家系统作为第二代 AI 技术, 也存在一定的弊端, 主要体现在自主学习能力较差, 自我发展水平较低等方面, 未来可结合其他技术组建耦合模型, 共同作用实现电力系统的稳定运行^[17]。

2) 可视化技术

随着电力调度系统需要处理的实时数据不断增加, 电力调度的复杂度、排障难度也逐步增大。而可视化技术能够实现信息数据的图片化展示, 帮助调度人员直观地“看到”故障位置, 节约了对海量数据信息进行分析所消耗的时间和精力, 能够显著提升工作效率, 保障系统平稳运行^[18]。

3) 人工神经网络

人工神经网络技术是模拟人脑神经元, 建立某种简单模型, 从而实现智能化信息处理和传输的一种技术^[19]。在电力系统中, 诸如电厂、变压器等模块化的部件可以看作是简单的神经元, 这些模块均拥有特定的输出函数, 这些部件互联结构而成的电力系统则可以看作是整体的神经网络系统。依托这个

神经网络系统, 耦合一定的数值算法, 可以对海量数据进行分析和处理, 提高电力调度过程中的信息传输和处理效率; 同时, 神经网络系统还具备自我学习能力, 可以对实时数据进行在线学习和联想记忆, 从而实现对电力调度的有效管理和控制, 保障调度系统高速平稳运行^[20]。当然, 构建电力系统这样的神经网络系统, 并不是简单的几个神经元连接即可, 其中隐含层层数、隐含层节点数的确定也是需要重点考虑的问题, 例如针对隐含层节点数, 一般需要通过在网络训练中选取不同节点数分析、比较, 最后得出预测结果误差, 然后确定选取最优的节点数; 此外, 各神经元的初始权值和阈值的选取也十分重要, 针对 Sigmoid、Tanh、ReLU 等常用激励函数, 如果初值取得太大, 则会导致函数输入过大, 进而达到饱和^[21]。

总体而言, AI 技术有助于提升电力调度系统的可靠性和稳定性, 未来随着 AI 技术的不断升级优化, 它在电力调度系统中的应用将更加广泛。

3.2 AI 技术在继电保护中的应用

将 AI 技术应用于继电保护中, 能够提升继电保护灵敏度、准确度, 从而保障电力系统运行安全。

1) 专家系统

其原理与 3.1 节中的“专家系统”类似, 在继电保护中, 也可以利用专家系统, 让继电保护机制具备“专家”的运行知识和经验, 掌握自动分析和解决问题的方法, 提升继电保护运行水平^[22]。

2) 暂态保护

通过构建暂态保护机制, 利用 AI 技术的运算优势, 自动提取故障信息并进行故障识别, 为继电保护系统提供及时可靠的决策依据, 从而及时将其与故障隔离, 保证主设备安全^[23]。

3) 人工神经网络

其原理与 3.1 节中的“人工神经网络”类似, 在继电保护系统中人工神经网络主要用于故障类别识别。例如发生故障后, 可以通过人工神经网络自动判断故障类别(瞬时故障还是永久故障), 若为瞬时故障则可执行重合闸指令, 若为永久故障则不可重合闸。此外, 模糊理论、遗传算法也可进一步优化继电保护运行算法, 提升继电保护系统运行水平^[22]。

总体而言, AI 技术能够有效优化继电保护机制, 及时、准确地切断系统故障, 避免故障扩大甚至影响主机运行, 从而进一步保障电力系统的安全稳定。

3.3 AI 技术在电力设备管理中的应用

电力生产设备的运行维护管理是保证电力系统安全的一项基础工作,同时也是影响电力系统安全可靠运行的重要因素。

以电力一次设备“变压器”的管理为例,在运行过程中,就可结合 AI 技术对其运行状态进行监测与评估。周元哲^[24]构建了基于 SOA-SVM(Seeker Optimization Algorithm-Support Vector Machines)的变压器故障诊断模型,通过实际项目验证,发现该模型的诊断精度较高,能够为变压器等电力一次、二次设备提供科学的在线监测与诊断。另外,在通信设备管理方面,叶利军^[25]也设计了基于 AI 技术的通信设备管理系统,实时采集通信系统设备运行数据,并利用 AI 技术自动检测运行状态,若存在异常则采用容错技术进行恢复,从而实现了对通信设备状态的精确分析、预警及恢复,保证通信系统的稳定运行。

此外,在设备管理过程中,对于基层运维人员,往往存在检修人员工作票开票、手工录入过程繁琐而导致人力资源浪费、速度慢、错误率高等问题,影响工作质量、工作效率的同时,也增加了因维护导致的停电时长。针对此问题,某电厂^[26]借助 AI 办公技术,使用了专用时间统计软件,建立了文件名词云,并结合现场工作需要,设计了一种基于 AI 技术的电力生产管理自动化系统,对系统内的各类数据信息进行关联化处理,具备日程提醒,资料、台账辅助指引,文字识别、文档自动录入等功能,大大简化了需要人为操作、记忆的工作,减轻了基层检修人员的工作负担,有效提升了电网调度专业管理及安全运行水平。

总体而言, AI 技术的应用是未来电力设备、生产管理的发展趋势,随着技术的发展, AI 也将在提高工作效率、降低基层人员负担中发挥更加重要的作用。

3.4 AI 技术在电力系统稳定评估与决策中的应用

以上提到的技术大多属于第二代 AI 技术在电力系统各子领域的基础应用,仍然存在进步的空间。在此背景下,以深度学习、强化学习为代表的第三代 AI 技术在处理数据、挖掘复杂非线性映射等方面具有强大的优势,将其应用于电力系统稳定评估与决策中,能够在一定程度上提升控制系统的智能性,具备重要的现实意义。

3.4.1 基本框架

在电力系统稳定评估与决策中,第三代 AI 技术的基本框架为“建立模型并离线训练、在线应用和实时修正”^[27]。首先,通过对电力系统运行的实时、历史以及其他仿真数据等样本进行学习,挖掘数据中的有效信息,建立模型并进行离线训练;与此同时,为提高模型准确度,还需对常规电网运行原始数据进行清洗和样本平衡,避免干扰。然后,将经过校验的模型应用于实际场景中,通过对多维电网状态信息等采集到的实时数据进行分析,完成系统运行稳定评估与决策。此外,在模型运行过程中,还可根据实际的评估与决策结果实时反馈,深度学习,从而进一步修正优化模型^[28]。

3.4.2 AI 技术在电力系统稳定评估中的应用

近年来,国际上发生的多起大停电事故都和电网暂态失稳有关,因此稳定问题是影响电力系统安全的关键因素^[29]。这就需要我们能够及时、准确、综合地评估电力系统运行稳定水平,降低事故发生率。目前,第三代 AI 技术在电力系统稳定问题上的研究较多,有功角、频率及电压等经典稳定问题,还有新型振荡问题等;所采用的模型也具备多元化,主要有传统机器学习集成、系统响应模型与传统机器学习的集成、高级机器学习的集成、Bagging 引导聚集算法、Stacking 集成模型、Boosting 集成算法等^[30]。

1) 功角、频率及电压稳定评估

功角稳定是指同步发电机受扰后系统保持同步运行的能力,可分为小干扰功角稳定(由系统初始运行状态决定)和暂态功角稳定(由系统初始运行状态、系统故障情况共同决定)^[31]。李常刚^[32]等提出了一种基于发电负荷和电网拓扑结构的评估模型,结合故障位置就可以进行电力系统的功角稳定评估。

电网侧和用户侧的供需不平衡会引发频率稳定问题。XIE^[33]等依托电力系统海量数据,构建了发电端和负荷端的时间序列模型,分析得到供需不平衡功率、最大频率偏差和偏差时刻、稳态频率偏差等定量参数,以此来评估衡量系统频率的稳定性。

电力系统受扰后需要维持各节点电压在可接受范围内,这就需要对电力系统受扰后的波动大小进行评估。与功角稳定一致,电压波动同样可分为小扰动和大扰动,小扰动的原因有负荷的缓慢增长或降低等,大扰动的原因有系统故障等^[34]。电压稳定

评估模型的输入特征主要有发电机出力、负荷水平、支路潮流、节点电压、换流阀触发角和灭弧角、故障前全网损耗等^[35]。

2) 宽频振荡稳定评估

在现阶段以及未来含高比例新能源的电力系统中,宽频振荡将时有发生,这是由于电力系统中各个不同的电气设备间相互作用引起的。宽频振荡往往表现为电压、电流、功率等随时间周期性变化,其频率在 0.1 Hz 至数千赫兹之间,严重时会影响电力系统稳定运行^[36]。目前,对宽频振荡的稳定评估研究还较少,且基本都是针对低频振荡,主要原因在于高频振荡以及多种振荡模式下模型的建立难度较大,这也是下一步研究要考虑的方向^[37]。

3.4.3 AI 技术在电力系统稳定决策中的应用

对电力系统波动进行了稳定性评估后,还需要给出针对性的解决方案,这就是所谓的“稳定决策”。在 AI 智能决策中,往往根据电网状态(经稳定评估的状态),结合实际经验,给出对应的调整方案,从而提高决策效率,减少调度或运行人员工作量、保障电力系统运行安全水平。

电力系统中的稳定决策主要有紧急控制、恢复控制和预防控制。在决策机制的实现过程,运用到的第三代 AI 技术主要有深度学习、迁移学习、随机森林、强化学习、知识图谱等^[38]。

1) 紧急控制

紧急控制,即当稳定评估结果显示电力系统遭受严重扰动发生故障时,如局部停电、孤岛运行等,需要稳定决策系统及时决策出对应措施,在尽量不影响其他系统的情况下进行紧急控制。现阶段,电力系统紧急控制的手段主要有:切断发电机、切断负荷、低频减载、低压减载等^[39]。冯双^[40]等开发了一种基于 SPWVD 图像和深度迁移学习的强迫振荡源定位方法,当电网出现强迫振荡时能够快速、准确定位,同时指导运行人员及时切断故障点,实现对强迫振荡的紧急控制。

2) 恢复控制

恢复控制,即故障控制解决后,对故障元件进行恢复的过程,可分为机组恢复、网络重构和负荷恢复等,目前以机组恢复的研究居多。孙润稼^[41]等就针对机组恢复控制,提出一种结合蒙特卡洛树搜索和深度学习的恢复控制在线决策方法,利用改进的上

限置信区间算法、支路修剪技术和估值网络对机组恢复措施进行决策,并行多次结果以确定最终的恢复措施,能够有效应对恢复过程中的多种不确定性状况。

3) 预防控制

预防控制,则是在电力系统正常运行状态下,针对稳定评估过程中发现的稳定裕度不足等问题,提出优化策略和方案,在发生扰动前采取相应措施,预防电力系统失稳^[42]。主要的控制策略有调整电网拓扑、发电机出力,调节直流功率和负荷等,目前的针对性研究还较少,且主要集中在基于深度学习的暂态稳定问题上。例如,田芳^[43]等结合卷积神经网络进行了系统灵敏度计算,通过叠加减负荷策略,调整发电机出力,实现了暂态稳定的预防控制。

3.4.4 发展方向

总的来说,针对电力系统稳定评估,现阶段对系统整体稳定性的把握还不够,未来,应当深入探索电力系统整体稳定性的特征指标,并将不同评估问题不断耦合细化,进一步提高对系统整体稳定性的把控。关于电力系统稳定决策,目前可以说尚处于起步阶段,大多仍然处于对紧急、恢复、预防控制的研究阶段,而对于校正控制领域的研究很少,未来 AI 技术在电力系统稳定决策中的应用研究仍需不断探索。

4 AI 技术应用于电力系统的前景

随着 AI 技术的不断进步,人工智能未来必将成为电力系统自动化、智能化的关键组成部分;而电力系统的优化发展也必然伴随着 AI 技术的发展而稳步进行,两者是协同发展的。未来,随着以大数据、深度学习等技术为依托的新一代 AI 技术的广泛应用,电力系统自主化和自动化的能力将不断提升,也将具备更高的安全性、稳定性、高效性和经济性。

现阶段,AI 技术在电力系统中的应用仍存在一些问

题,需要在发展中进一步优化完善,主要体现在:
1) AI 技术的应用离不开大量数据样本、分布式通信协议以及高效的计算能力,因此大数据采集、通信传输、平台云计算等基础设施的建设是充分利用 AI 技术的前提。在未来的发展过程中,电力系统的

数据、通信等基础设施还需进一步完善。
2) 现有的评估模型大多都是基于已有的数据、

算例事先构建好再进行离线训练,这些数据、算例往往针对性很强,几乎是针对单一特性的;而对实际运行过程中暂态、频率、电压等各种不稳定问题的交织状态未进行全盘考虑,在现有的研究中也还难以开展多个不稳定模式彼此耦合的复杂情况的评估。

3) 现有的 AI 模型中往往也只能针对单一的任务进行决策,如单一的继电保护、电网故障恢复路径选择、电力调度等,即尚缺乏“多任务”模型。因此,未来若要实现 AI 技术在电力系统中的广泛应用,就必须大幅提升 AI 模型的任务处理能力,实现“混合智能”,即将“专家系统控制技术”、“神经网络控制技术”、“模糊控制技术”、“线性最优控制技术”等多种控制方法和工具结合起来形成“混合智能”,从而实现从孤立判断到多问题的统一分析、从单一模块到整体系统的统一把控。

4) 在利用 AI 技术提升电力系统智能化的同时,还需要加强数据管理及隐私安全保护,谨防数据泄密。电力系统的安全不仅关系到社会稳定,还关乎军事国防安全,因此 AI 技术在应用到电力系统中时必须展开深入且全面的安全保障研究,做出相应的风险评估,保障电网运行的稳定与安全。

目前第二代、第三代 AI 技术在电力系统中已有了一些示范应用,并朝着更高的方向迈进,虽然从总体看, AI 技术在电力系统中的应用还处于起步阶段,要形成完整成熟的体系化技术系统还需要很长的时间。但随着我国电力系统的迅速建设以及 AI 技术的不断优化改进,其在电力系统中的应用前景是十分广阔的。

5 结论

在“碳中和”背景下,面对能源紧缺和“碳减排”双重压力,现阶段我国电力系统的低碳发展任务艰巨。一方面要对火电进行经济性提升和低碳改造,筑牢火电“压舱石”的能源保障和托底作用;另一方面也要加快发展清洁能源,逐步推进电能替代。而在此过程中, AI 技术也将成为电力系统自动化、智能化平稳运行的关键。

随着我国电力系统建设的快速发展,电网侧、用户侧数据的体量大幅增加,电网管理的复杂性也在不断提升。而 AI 技术具备智慧性、高效性和便捷性,能够有效平衡源、网、荷、储,保障电力系统的稳定

运行,因此在电力系统中得到了高效应用。目前以专家系统和人工神经网络(ANN)为代表的第二代 AI 技术已在电力调度、继电保护、电力设备管理等领域得到了广泛应用,以深度学习为代表的融合了知识驱动和数据驱动的第三代 AI 技术也正逐步应用到电力系统稳定评估与决策中,从而更安全、可信、可靠地推动电力系统智能化进程。与此同时,在“双碳”背景下,光伏、风电等分布式能源的快速布局,对电力系统的负荷能力和运行方式提出了更高的要求,这些需求也为 AI 技术的应用提供了无限的可能^[44-45]。总的来说,进一步开发和完善 AI 技术是让电力系统实现更智能、更安全发展的有效解决方案之一。

参考文献:

- [1] BOGDANOV D, RAM M, AGHAHOSSEINI A, et al. Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability [J]. *Energy*, 2021, 227: 120467. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120467.
- [2] 蔡绍宽. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.
- [3] CAI S K. Challenges and prospects for the trends of power structure adjustment under the goal of carbon peak and neutrality [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.
- [4] 黄海泉, 黄晓巍, 姜望, 等. 新型配电网分布式储能系统方案及配置研究综述 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(4): 42-53. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.05.
- [5] HUANG H Q, HUANG X W, JIANG W, et al. A review of distributed energy storage system solutions and configurations for new distribution grids [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(4): 42-53. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.05.
- [6] IEA. Global methane tracker 2022 [R/OL]. (2022-02-23) [2023-05-16]. <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022>.
- [7] 舒印彪, 谢典, 赵良, 等. 碳中和目标下我国再电气化研究 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(3): 195-204. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.020.
- [8] SHU Y B, XIE D, ZHAO L, et al. Re-electrification in China under the carbon neutrality goal [J]. *Strategic study of CAE*, 2022, 24(3): 195-204. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.020.
- [9] 王放放, 杨鹏威, 赵光金, 等. 新型电力系统下火电机组灵活性运行技术发展及挑战 [J]. *发电技术*, 2024, 45(2): 189-198. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23079.
- [10] WANG F F, YANG P W, ZHAO G J, et al. Development and

- challenge of flexible operation technology of thermal power units under new power system [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(2): 189-198. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23079.
- [7] 于沛东, 郑印伟, 何晓迪, 等. “双碳”背景下火电企业转型升级与发展对策及路径 [J]. *能源研究与管理*, 2022, 14(3): 20-25. DOI: 10.16056/j.2096-7705.2022.03.004.
- YU P D, ZHENG Y W, HE X D, et al. Countermeasures and paths for transformation and upgrading and development of thermal power enterprises under the background of "double carbon" [J]. *Energy research and management*, 2022, 14(3): 20-25. DOI: 10.16056/j.2096-7705.2022.03.004.
- [8] 罗海中, 吴大卫, 范永春, 等. 碳中和背景下 CCUS 技术发展及广东离岸封存潜力评估 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(6): 1-13. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.001.
- LUO H Z, WU D W, FAN Y C, et al. Development of CCUS technology in the context of carbon neutrality and assessment of the potential for offshore storage in Guangdong Province [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(6): 1-13. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.001.
- [9] 袁春峰, 刘锴慧, 张帆, 等. 火电机组一次调频技术研究进展综述 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(3): 1-8. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.001.
- YUAN C F, LIU K H, ZHANG F, et al. Review on the research progress of primary frequency modulation technology for thermal power units [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(3): 1-8. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.001.
- [10] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(9): 171-191. DOI: 10.7500/AEPS20200922001.
- ZHUO Z Y, ZHANG N, XIE X R, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(9): 171-191. DOI: 10.7500/AEPS20200922001.
- [11] 李维聪, 胡玉涛, 李伟. 基于大数据平台的智能电厂数据及系统集成方案研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 143-149. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.018.
- LI W C, HU Y T, LI W. Research on data and system integration of intelligent power plant based on big data platform [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 143-149. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.018.
- [12] GAO D W, WANG Q, ZHANG F, et al. Application of AI techniques in monitoring and operation of power systems [J]. *Frontiers in energy*, 2019, 13(1): 71-85. DOI: 10.1007/s11708-018-0589-4.
- [13] 中华人民共和国国务院. 新一代人工智能发展规划 [EB/OL]. (2017-07-20) [2022-03-05]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm.
- The State Council of the People's Republic of China. Artificial intelligence [EB/OL]. (2017-07-20) [2022-03-05]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm.
- [14] 姚建国, 余涛, 杨胜春, 等. 提升电网调度中人工智能可用性的混合增强智能知识演化技术 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(20): 1-12. DOI: 10.7500/AEPS20220110004.
- YAO J G, YU T, YANG S C, et al. Knowledge evolution technology based on hybrid-augmented intelligence for improving practicability of artificial intelligence in power grid dispatch [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(20): 1-12. DOI: 10.7500/AEPS20220110004.
- [15] 王川, 张杰, 李伟, 等. 人工智能技术在电力调度自动化系统中的应用分析 [J]. *科技创新与应用*, 2021, 11(12): 149-151.
- WANG C, ZHANG J, LI W, et al. Application analysis of artificial intelligence technology in power dispatching automation system [J]. *Technology innovation and application*, 2021, 11(12): 149-151.
- [16] CAI G L, WANG G C, GUAN C L, et al. Based on clustering algorithm expert system of self-learning rule base [C]//2022 34th Chinese Control and Decision Conference, Hefei, China, August 15-17, 2022. Hefei: IEEE, 2022: 1563-1566. DOI: 10.1109/CCDC55256.2022.10033463.
- [17] 袁丁, 郝威, 张可可, 等. AI 技术在电力调度自动化中的应用 [J]. *电子技术与软件工程*, 2021(22): 119-121.
- YUAN D, HAO W, ZHANG K K, et al. Application of AI technology in power dispatching automation [J]. *Electronic technology and software engineering*, 2021(22): 119-121.
- [18] WANG X L, LU M X, CAI D D, et al. The applications of information visualization in power systems [J]. *Applied mechanics and materials*, 2014, 721: 703-706. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.721.703.
- [19] ZHU G R, ZHANG Y H, CHENG F, et al. Research on prediction of electric quantity based on artificial neural network [J]. *IOP conference series: materials science and engineering*, 2018, 452(3): 032110. DOI: 10.1088/1757-899X/452/3/032110.
- [20] 赵晋泉, 夏雪, 徐春雷, 等. 新一代人工智能技术在电力系统调度运行中的应用评述 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(24): 1-10. DOI: 10.7500/AEPS20200720009.
- ZHAO J Q, XIA X, XU C L, et al. Review on application of new generation artificial intelligence technology in power system dispatching and operation [J]. *Automation of electric power systems*, 2020, 44(24): 1-10. DOI: 10.7500/AEPS20200720009.
- [21] BARRETO N E M, RODRIGUES R, SCHUMACHER R, et al. Artificial neural network approach for fault detection and identification in power systems with wide area measurement systems [J]. *Journal of control, automation and electrical systems*, 2021, 32(6): 1617-1626. DOI: 10.1007/s40313-021-00785-y.

- [22] ZHU Z W. Research on the protection of power system based on artificial intelligence [J]. *Journal of residuals science & technology*, 2016, 13(5): 413-422.
- [23] ZHAO X Y, ZHANG X Y. Artificial intelligence applications in power system [C]//Proceedings of the 2016 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering (AIIE 2016). 2016: 158-161.
- [24] 周元哲. 电力一次设备在线监测与故障诊断 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
ZHOU Y Z. On line monitoring and fault diagnosis of power primary equipment [D]. Ji'nan: Shandong University, 2016.
- [25] 叶利军. 基于人工智能的通信自动控制系统 [J]. *自动化技术与应用*, 2022, 41(9): 36-39. DOI: [10.20033/j.1003-7241\(2022\)09-0036-04](https://doi.org/10.20033/j.1003-7241(2022)09-0036-04).
YE L J. Research on communication automatic control system based on artificial intelligence [J]. *Techniques of automation and applications*, 2022, 41(9): 36-39. DOI: [10.20033/j.1003-7241\(2022\)09-0036-04](https://doi.org/10.20033/j.1003-7241(2022)09-0036-04).
- [26] 陈学伟, 王伟, 田新成, 等. 基于 AI 技术的电力生产管理自动化系统研究 [J]. *电工技术*, 2022(16): 24-26,29. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2022.16.007](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2022.16.007).
CHEN X W, WANG W, TIAN X C, et al. Research on automation system of electric power production management based on AI technology [J]. *Electric engineering*, 2022(16): 24-26,29. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2022.16.007](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2022.16.007).
- [27] WANG S, LI B, LI G Z, et al. Short-term wind power prediction based on multidimensional data cleaning and feature reconfiguration [J]. *Applied energy*, 2021, 292: 116851. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.116851](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116851).
- [28] ZHU L P, LU C, DONG Z Y, et al. Imbalance learning machine-based power system short-term voltage stability assessment [J]. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2017, 13(5): 2533-2543. DOI: [10.1109/TII.2017.2696534](https://doi.org/10.1109/TII.2017.2696534).
- [29] LI N, LI B L, GAO L. Transient stability assessment of power system based on XGBoost and factorization machine [J]. *IEEE access*, 2020, 8: 28403-28414. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.2969446](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969446).
- [30] 杨博, 陈义军, 姚伟, 等. 基于新一代人工智能技术的电力系统稳定评估与决策综述 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(22): 200-223. DOI: [10.7500/AEPS20220114001](https://doi.org/10.7500/AEPS20220114001).
YANG B, CHEN Y J, YAO W, et al. Review on stability assessment and decision for power systems based on new-generation artificial intelligence technology [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(22): 200-223. DOI: [10.7500/AEPS20220114001](https://doi.org/10.7500/AEPS20220114001).
- [31] 郭梦轩, 管霖, 苏寅生, 等. 基于改进边图卷积网络的电力系统小干扰稳定评估模型 [J]. *电网技术*, 2022, 46(6): 2095-2103. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0855](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0855).
GUO M X, GUAN L, SU Y S, et al. Small-signal stability assessment model based on improved edge graph convolutional networks of power system [J]. *Power system technology*, 2022, 46(6): 2095-2103. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0855](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0855).
- [32] 李常刚, 李华瑞, 刘玉田, 等. 大电网动态安全风险智能评估系统 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(22): 67-75. DOI: [10.7500/AEPS20190507003](https://doi.org/10.7500/AEPS20190507003).
LI C G, LI H R, LIU Y T, et al. Intelligent assessment system for dynamic security risk of large-scale power grid [J]. *Automation of electric power systems*, 2019, 43(22): 67-75. DOI: [10.7500/AEPS20190507003](https://doi.org/10.7500/AEPS20190507003).
- [33] XIE J, SUN W. A transfer and deep learning-based method for online frequency stability assessment and control [J]. *IEEE access*, 2021, 9: 75712-75721. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3082001](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3082001).
- [34] 王海超. 基于深度学习的智能电网电压稳定性评估研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001275](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001275).
WANG H C. Smart grid voltage stability evaluation research based on deep learning [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2020. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001275](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.001275).
- [35] 朱林, 张健, 陈达, 等. 面向暂态电压稳定评估的卷积神经网络输入特征构建方法 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(1): 85-93. DOI: [10.7500/AEPS20201126003](https://doi.org/10.7500/AEPS20201126003).
ZHU L, ZHANG J, CHEN D, et al. Construction method for input features of convolutional neural network for transient voltage stability assessment [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(1): 85-93. DOI: [10.7500/AEPS20201126003](https://doi.org/10.7500/AEPS20201126003).
- [36] 张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(1): 1-24. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.211425](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211425).
ZHANG Z Y, ZHANG N, DU E S, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(1): 1-24. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.211425](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211425).
- [37] 马宁宁, 谢小荣, 唐健, 等. “双高”电力系统宽频振荡广域监测与预警系统 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(5): 457-464. DOI: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.21.014](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.21.014).
MA N N, XIE X R, TANG J, et al. Wide-area measurement and early warning system for wide-band oscillations in "double-high" power systems [J]. *Journal of Tsinghua University (science and technology)*, 2021, 61(5): 457-464. DOI: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.21.014](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.21.014).
- [38] 周念成, 廖建权, 王强钢, 等. 深度学习在智能电网中的应用现

- 状分析与展望 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(4): 180-191. DOI: 10.7500/AEPS20180323002.
- ZHOU N C, LIAO J Q, WANG Q G, et al. Analysis and prospect of deep learning application in smart grid [J]. *Automation of electric power systems*, 2019, 43(4): 180-191. DOI: 10.7500/AEPS20180323002.
- [39] HUANG Q H, HUANG R K, HAO W T, et al. Adaptive power system emergency control using deep reinforcement learning [J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2020, 11(2): 1171-1182. DOI: 10.1109/TSG.2019.2933191.
- [40] 冯双, 陈佳宁, 汤奕, 等. 基于 SPWVD 图像和深度迁移学习的强迫振荡源定位方法 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(17): 78-87. DOI: 10.7500/AEPS20191225001.
- FENG S, CHEN J N, TANG Y, et al. Location method of forced oscillation source based on SPWVD image and deep transfer learning [J]. *Automation of electric power systems*, 2020, 44(17): 78-87. DOI: 10.7500/AEPS20191225001.
- [41] 孙润稼, 刘玉田. 基于深度学习和蒙特卡洛树搜索的机组恢复在线决策 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(14): 40-47. DOI: 10.7500/AEPS20170930011.
- SUN R J, LIU Y T. Online decision-making for generator start-up based on deep learning and Monte Carlo tree search [J]. *Automation of electric power systems*, 2018, 42(14): 40-47. DOI: 10.7500/AEPS20170930011.
- [42] 周艳真, 吴俊勇, 冀鲁豫, 等. 基于两阶段支持向量机的电力系统暂态稳定预测及预防控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(1): 137-147. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162072.
- ZHOU Y Z, WU J Y, JI L Y, et al. Two-stage support vector machines for transient stability prediction and preventive control of power systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(1): 137-147. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162072.
- [43] 田芳, 周孝信, 史东宇, 等. 基于卷积神经网络的电力系统暂态稳定预防控制方法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(18): 1-8. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191310.
- TIAN F, ZHOU X X, SHI D Y, et al. A preventive control method of power system transient stability based on a convolutional neural network [J]. *Power system protection and control*, 2020, 48(18): 1-8. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191310.
- [44] 高盛, 许沛华, 陈正洪. 基于机器学习的风电场风速多模式集合预报 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(1): 85-95. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.09.
- GAO S, XU P H, CHEN Z H. Wind speed multi-mode ensemble forecasting for wind farms based on machine learning [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(1): 85-95. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.09.
- [45] 梁凌宇, 赵翔宇, 黄文琦, 等. 融合多类人工智能模型的电力系统负荷短期预测技术研究 [J]. *电力大数据*, 2022, 25(6): 16-23. DOI: 10.19317/j.cnki.1008-083x.2022.06.004.
- LIANG L Y, ZHAO X Y, HUANG W Q, et al. Research on power system load short-term forecasting technology integrating multiple artificial intelligence models [J]. *Power systems and big data*, 2022, 25(6): 16-23. DOI: 10.19317/j.cnki.1008-083x.2022.06.004.

作者简介:



刘舒巍

刘舒巍(通信作者)

1992-, 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为能源与环保(e-mail) liushuwei1111@163.com。

(编辑 赵琪)