

人工智能技术在电力系统的应用综述

张琳琪¹ 于卓君²

1. 陆军航空兵学院 北京 101100

2. 东北大学 辽宁沈阳 110169

摘要: 在“双碳”目标驱动下,全球能源结构正加速向以新能源为主体的新型电力系统转型,传统电网的稳定性、效率与安全性遇到了前所未有的挑战。人工智能(AI)凭借其卓越的数据分析、模式识别和优化决策能力,正深刻重塑电力系统的各个环节,实现从被动响应到主动预测的根本性转变。本文在简要阐述新型电力系统概况的基础上,详细论述了AI技术在其中的关键赋能优势,介绍了智能电网的相关知识,并展望了AI与数字孪生等前沿技术的融合前景,为电力行业的数字化、智能化转型提供有价值的理论与实践参考。

关键词: 人工智能;新型电力系统;“双碳”目标;数字孪生;虚拟电厂

引言

传统化石能曾是驱动人类社会发展的核心动力,但由于其不可逆转性,化石能源(如煤炭、石油、天然气)逐渐走向枯竭,而且对环境气候和生物健康伤害极大。走清洁发展道路,开辟新型智能电网逐渐走入人类视野。而这一切都离不开人工智能技术对电力行业的赋能。

一、新型电力系统的核心内涵与重大意义

新型电力系统与传统的、依赖化石燃料的集中式电网截然不同。其核心特征在于^[1]:

(1) 高比例清洁能源接入:系统大规模整合风能、太阳能等间歇性可再生能源,形成多元化、互补性的电源结构。

(2) 坚强智能电网:通过数字化与智能化技术,电网具备实时监控、故障自愈和精准调度的能力,从而更高效地传输和分配电力。

(3) 高度互动化用电模式:用户不再是单纯的消费者,而是通过需求侧响应和虚拟电厂等技术,深度参与电网的供需调节,实现能量的双向流动。

构建新型电力系统是全球应对气候变化的必然选择,

是实现“碳达峰”与“碳中和”目标的关键路径。它不仅显著减少碳排放,提升国家能源安全,而且随着可再生能源发电成本的持续下降,其经济可行性也日益增强。这是一个更清洁、更高效、更安全的能源体系,是未来能源发展的重要方向。

二、人工智能技术对新型电网的赋能优势

1. 提升能源预测与调度精度

AI在能源预测方面具有无可比拟的优势。针对风电、光伏等间歇性可再生能源,深度学习技术能够建立高度精确的预测模型。例如,长短期记忆网络(LSTM)善于捕捉时序变化特征,可以精准预测光伏系统输出功率;而深度卷积神经网络(DCNN)则能从海量数据中提取非线性特征,进一步提升预测准确性。这使得电网调度部门能够更科学地制定发电计划,有效减少弃风弃光现象。

2. 强化系统稳定与控制能力

传统电网的稳定控制方法难以适应新型电力系统快速变化的结构与设备。AI则提供了数据驱动的解决方案。强化学习(RL)凭借其强大的自主决策能力,可以根据电网运行信息直接生成稳定控制策略。结合深度学习的特征提取能力,可以为强化学习提供高价值的输入数据,确保控制决策的正确性与效率,有效应对电网的复杂工况。

3. 改进故障诊断与运维效率

在故障诊断方面,AI的强识别能力优于传统模式。深度学习能够自动从海量运行数据中挖掘出深层的故障

作者简介:

1. 张琳琪(1995.7-),女,黑龙江大庆人,汉族,讲师,硕士研究生,研究方向为计算机科学。

2. 于卓君(2006.5-),女,黑龙江省齐齐哈尔市人,汉族,本科在读,研究方向为软件工程。

特征，避免了人为选取特征的主观性和复杂性，从而实现更快速、更准确的故障定位与诊断，大幅提升电网的运维效率与可靠性。

三、高性能计算与AI技术的协同应用

1. 高性能计算与人工智能协同应用：加速电力系统复杂问题求解

高性能计算（HPC）与人工智能（AI）技术的深度融合^[2]，正为电力系统的组合优化难题提供前所未有的求解能力。传统的电网调度、规划和运行涉及海量的变量与约束，如机组组合（Unit Commitment）、最优潮流（Optimal Power Flow）以及大规模故障恢复等。这些问题通常属于NP-Hard类别，其计算复杂度随问题规模呈指数级增长。因此，即使是超级计算机也难以在短时间内找到全局最优解，更不用说满足电网实时运行的严苛要求。

AI，特别是机器学习和深度学习，提供了一种数据驱动的替代方案。通过对历史运行数据进行学习，AI模型能够快速给出近似最优解，或为传统的优化算法提供高质量的初始值。例如，可以利用深度强化学习（Deep Reinforcement Learning, DRL）训练智能体，使其在复杂多变的电网环境中自主学习最优的调度策略。这种方法将复杂的优化问题转化为一个实时决策问题，从而有效规避了传统优化算法的计算瓶颈。

2. 量子计算：突破性的新范式

在AI与HPC的协同之外，量子计算（Quantum Computing）则代表了解决这些超大规模优化问题的未来。与依赖二进制位（0或1）的经典计算机不同，量子计算机利用量子比特（Qubit）的量子叠加和量子纠缠特性。这使得它能够同时处理海量的计算状态，并以指数级的速度探索巨大的解空间。

对于电网中的机组组合问题，量子算法，如量子近似优化算法（Quantum Approximate Optimization Algorithm, QAOA），可以并行地评估数以万亿计的潜在解决方案，从而在极短时间内找到比传统方法更优的机组启停方案，大幅提高经济效益和运行效率。虽然目前该技术仍处于发展初期，受限于量子比特的相干时间和错误率，但其在电力系统超大规模优化、电网风险评估和能源市场建模等领域的潜力巨大，有望彻底革新电网的决策模式。

四、虚拟电厂—新兴发展的技术

1. 虚拟电厂的概念

虚拟电厂（VPP）是未来实现可变发电和灵活需求最佳平衡的几种有前景的方式之一。VPP被定义为不同

类型分布式资源的聚合，这些资源可能分散在配电网的不同点。VPP由多种具有不同运行模式和可用性的技术组成，它们可以连接到配电网的不同点。在FENIX项目概念中，VPP被定义为：“虚拟电厂（VPP）聚合了许多不同分布式能源（DER）的容量^[4]，它从表征每个DER的参数组合中创建一个单一的运行特性，并且可以纳入网络对聚合DER输出的影响。VPP是DER组合的灵活表示，可用于在批发市场进行合同，并向系统运营商提供服务。

2. 技术型虚拟电厂和商业型虚拟电厂：双翼齐飞

技术型虚拟电厂主要关注本地电网管理，通过聚合同一地理区域的分布式能源，为配电系统运营商（DSO）提供系统平衡和辅助服务，例如解决网络瓶颈和提供电压支持。

商业型虚拟电厂^[3]则更注重市场运作，其聚合的分布式能源不受地理位置限制，核心功能是通过优化和调度来最大化市场收益，参与批发能源市场的交易。

无论是哪种类型，虚拟电厂都依赖于先进的信息技术（ICT）作为其能量管理系统（EMS）的核心，实现与各分布式单元的双向通信和协调控制。通过这种智能化的聚合与管理，虚拟电厂有效地将海量分散的资源整合为一股强大的力量，不仅提高了电网的灵活性和效率，也为电力部门的去中心化转型和可持续发展提供了关键的技术支撑。

3. 虚拟电厂的技术架构与关键技术

（1）技术架构

虚拟电厂的技术架构以三部分构成，分别是通信层、控制层和执行层。通信层利用物联网和先进的通信技术，实现分布式能源之间的数据传输与信息交换，确保对能源运行状态的实时监测。控制层作为虚拟电厂的大脑，运用先进的算法和数据分析技术，进行资源的优化调度和控制，制定出资源利用的最优策略。执行层则负责将控制层的指令转化为实际操作，协调分布式能源的运行，保障电网的稳定与高效^[5]。

（2）运作过程

虚拟电厂通过通信与控制技术，将这些原本分散的能源装置“虚拟整合”，形成一个协同运作的“能源集合体”，替代传统“单一大型电厂”的角色。

这其中包括风能水能等可再生能源和火电、热电等传统能源。通过内部的组合优化，可消除可再生能源发电对外部系统的间歇性和随机性影响^[8]，提高电能质

量,实现对可再生能源发电的高效利用。作为智能调控中心,虚拟电厂基于实时数据,控制中心用算法优化调度:比如风电、光伏充足时,优先消纳可再生能源;风光出力不足时,启动传统电厂或释放储能;甚至引导需求端“柔性用电”(如调整工业负荷时段、居民区错峰用电)。虚拟电厂很好的满足了供需协同能力,虚拟电厂通过“聚合-调度”机制,一方面实现对电网的支撑,它可以像常规电厂一样参与调峰、调频、备用。另一方面,实现对可再生能源的消纳:解决风电、光伏“间歇性、波动性”问题,让分散的绿电更稳定地接入电网。

(3) 关键技术

为确保虚拟电厂的高效运作,多项关键技术必须协同合作。首先,先进计量技术保证了能源使用数据的实时性和准确性,为后续的调度决策提供了可靠的数据支持。通信技术的高效与可靠性是虚拟电厂正常运作的前提,5G技术的应用大幅提升了数据传输的速度和系统的响应能力。智能控制技术结合人工智能、机器学习和大数据分析,可以根据动态市场实时调整策略。区块链技术则通过其去中心化特性,增强了数据安全和交易透明度,为建立信任机制提供了保障。

其中,需求侧相应是电网灵活性调节和需求侧资源优化调度的关键手段。需求响应分为电价型需求响应和激励型需求响应。一种是电价型需求响应,顾名思义,是用户根据电价,动态自主调整用电时间、用电方式、用电策略。例如连接到电网的电动汽车通过对所请求的不同需求场景进行建模后,可以与电网交换电力。但是,这也容易出现负荷挂钩现象,指负荷高峰时段的电力价格或机组利用小时数低于负荷低谷时段,即使应用博弈理论动态调整电价,也无法大规模应用,缺乏稳定性。另一种是激励型需求响应,分为直接经济补偿,包括折扣、补贴这种实际上的经济利益,和非经济激励,如优先供电,引导用户在电力供需紧张、电网故障等特定场景下主动削减或转移用电负荷。未来,用户可以通过调节智能家居、电动汽车充电桩来在电价低谷期用电。

五、人工智能技术与数字孪生等技术融合的未来展望

在电力行业,特别是电厂运营领域,人工智能与数字孪生(DigitalTwin)技术的融合正在开启一个全新虚拟电厂的高效运行依赖于一系列关键技术的智能化时代。这种融合使电厂从一个复杂的物理实体转变为可自我学

习、自我优化的智能系统。通过构建电厂的数字孪生模型,可以实时收集锅炉、汽轮机等关键设备的运行数据,并借助AI算法进行深度学习,实现对设备性能衰减和潜在故障点的精准预测,将被动维修变为预测性维护,大幅减少停机损失。

综上所述,人工智能技术正以前所未有的深度和广度为“双碳”目标下电力系统的转型提供核心驱动力,其对于构建一个更清洁、更高效、也更安全的未来能源体系具有革命性的意义。这种颠覆性的价值体现在电力系统的多个关键环节:在预测与调度层面,以深度学习为代表的AI模型能够精准预测可再生能源的出力,显著减少能源浪费;在系统控制层面,强化学习等技术能够自主生成稳定控制策略,有效应对复杂多变的电网工况;在运行与维护方面,AI通过智能故障诊断和自动化巡检,大幅提升了电网的可靠性与运维效率;在市场与聚合方面,AI则作为虚拟电厂的“大脑”,通过优化调度聚合的分布式资源,实现市场收益的最大化。展望未来,AI技术的应用将超越单一功能的优化,它不仅将与数字孪生技术深度融合,实现从预测性维护到运行参数自主寻优的智能飞跃,更将与物联网、区块链及边缘计算等前沿技术协同演进。这种深度融合必将推动电网向信息-物理高度融合的能源互联网演变,最终描绘出一个更加宏大、高效、智能的未来能源生态系统蓝图。

参考文献

- [1] 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(01): 2-14.
- [2] 李鹏, 刘念, 胡秦然, 等. “新型电力系统数字化关键技术综述”专辑评述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(06): 1-12.
- [3] 刘睿. “双碳”目标下虚拟电厂的技术进展与应用综述[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(08): 131-132.
- [4] 和敬涵, 罗国敏, 程梦晓, 等. 新一代人工智能在电力系统故障分析及定位中的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5506-5516. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200032.
- [5] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9. DOI: CNKI: SUN: DLXT.0.2013-13-002.