

智慧能源——人工智能技术在电力系统中的应用与展望

孙秋野[†], 杨凌霄, 张化光

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要: 在环境污染日趋严重,化石能源逐渐枯竭的背景下,能源系统的发展趋向于清洁化、智能化,我国已将智慧能源的发展提升为国家战略. 电力系统作为能源系统的核心环节,应用广泛,具有较强的调节能力且控制复杂,其智能化程度将决定能源系统的智能化水平. 伴随着分布式电源、电动汽车、分布式储能元件等具有能源生产、存储、消费多种特性的新型能源终端高比例接入电网,现代电力系统呈现出复杂非线性、强不确定性、强耦合性等特点,传统建模、优化、控制技术存在诸多局限性,人工智能技术将是解决复杂系统控制与决策问题的有效措施. 鉴于此,首先梳理人工智能在电力系统应用的发展脉络;然后根据人工智能在电力系统的应用热点领域,阐述人工智能技术在电力系统调度、规划以及电力市场等方面的应用,并对各重点研究内容的未来方向进行展望.

关键词: 人工智能; 电力系统; 智慧能源; 能源互联网; 可再生能源; 优化控制

中图分类号: TM29

文献标志码: A

Smart energy—Applications and prospects of artificial intelligence technology in power system

SUN Qiu-ye[†], YANG Ling-xiao, ZHANG Hua-guang

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: In the context of the increasingly serious environmental pollution and the gradual depletion of fossil energy, the development of energy systems tends to be cleaner and smarter. Our country has promoted the development of smart energy to a national strategy. As a core part of energy system, power system has wide application and strong regulation ability and its control is complex, and its intelligence level will determine the intelligence level of the energy system. With the high proportion of new energy terminals such as distributed power, electric vehicles and distributed energy storage components which have diversified features including energy production, storage and consumption in power grids, modern power systems are characterized by complex nonlinearity, strong uncertainty and strong coupling. The traditional modeling, optimization and control technologies have many limitations. Artificial intelligence technology will be effective in solving complex system control and decision problems, therefore, this article combs the development of artificial intelligence in the application of power system firstly. According to the hot area of application of artificial intelligence in power system, this paper expounds the application of artificial intelligence in power system scheduling, planning and electricity market and the future direction of the research content is prospected.

Keywords: artificial intelligence; power system; smart energy; energy internet; renewable energy; optimal control

0 引言

2016年,国务院总理李克强在主持制定《能源发展“十三五”规划》中指出,我国将积极推动“互联网+”智慧能源的发展,推动能源生产和消费方式的根本转变,为绿色可持续发展提供可靠保障. 该规划将能源系统的智能化发展提升为国家战略,为新一代能源技术的变革指明了方向. 智慧能源的主旨为将先进的信息和通信技术、智能控制和优化技术与现代

能源生产、能源消纳、用户交易深度融合,建立和完善符合生态文明和可持续发展要求的能源技术和能源制度体系,从而形成一种全新的能源形式. 其具有数字化、信息化、自动化、互动化、智能化、自律控制等功能,通过对各类能源的开发、利用、相互转换,以及各能源网间的协调配合和优化互补等方面技术的革新,最终满足系统、安全、清洁和经济要求. 为此,国家主张大力发展能源科技,加快技术创新,充分开发和

收稿日期: 2017-12-02; 修回日期: 2018-01-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61433004, 61573094).

作者简介: 孙秋野(1977—),男,教授,博士生导师,从事能源互联网的建模与优化运行、多能源综合互补优化、分布式发电系统网络控制等研究; 杨凌霄(1992—),女,博士生,从事能源互联网优化运行与人工智能的研究.

[†]通讯作者. E-mail: sunqiuye@ise.neu.edu.cn

利用可再生能源,尤其是在新能源并网和储能、微网等技术上的突破,提升电力系统的调节能力,增强新能源消纳能力,发展先进高效节能技术,实现资源优化配置,最终达到能源生产和消费的高度自动化、智能化。电力系统作为能源系统终端消费的关键环节,其智能化程度将极大地影响到以上技术革新与进步的顺利实施。同时,电力系统所处的枢纽环节促使能源系统将以电力系统为核心,以新能源相关技术为基础实现整个能源系统的对接和整合。因此,集中发展电力系统中的智能技术至关重要。

人工智能于20世纪50年代中期被首次提出^[1],由于最早受软硬件应用的技术局限性影响,限制了其发展,但随着大规模并行计算、大数据、深度学习算法和人脑芯片技术的发展^[2-3],在近30年里取得了飞速的进步,已广泛应用于计算机科学、经济贸易、机器人控制、通信、医学等领域,并取得了丰硕的成果^[4]。在信息化智能化的全面推进下,人工智能技术在电力系统中也得到了充分的应用^[5]。

随着社会的发展和技术的进步,能源结构从单一传统能源向多源清洁能源转变,而未来分布式电源大规模接入的不确定性、不同类型的能源终端相互耦合以及多种能源的时空不同步特征使电网的结构趋向复杂和灵活。同时伴随我国市场经济的深入及智能电网的兴起,电力市场交易方式的变革是其发展的必然产物。在此情况下,电力系统呈现出复杂非线性、不确定性、时空差异性等特点,使传统分析方法在电力系统调度、规划、交易方式等方面将面临诸多挑战^[6]。以先进的传感器技术和计算机技术作为支撑的人工智能技术可能会改变传统的分析方法,形成一种更为灵活和自主的新模式,有助于促进现代电力系统的安全、经济和可靠性的发展。人工智能将是解决这一类控制与决策问题的有效措施之一。

本文针对现代电力系统的发展要求,结合人工智能技术特点,在比较国内外大量文献的基础上,综述了人工智能技术在电力系统调度、规划以及电力市场3个方面的研究进展,并对人工智能技术未来在电力系统中的研究方向进行了展望。

1 人工智能技术概述

人工智能技术的基础包括知识表示、推理、搜索、规划^[7-8],其是由计算机科学、控制论、信息论、神经生理学、心理学和语言学等多学科相互交叉融合进而发展起来的一门综合性前沿学科。

各类学科背景的学者从不同的出发点、方法学以及不同的应用领域出发,进行了大量的研究。在长

期的研究过程中,由于人们对智能本质的不同理解,针对人工智能技术可划分出多种不同的研究途径和学派,主要包括符号主义(Symbolism)、联结主义(Connectionism)和行为主义(Behaviorism),以下分别作简要介绍。

1.1 符号主义人工智能

符号主义人工智能所定义的人工智能起源于数理逻辑,20世纪30年代,将数理逻辑应用于描述智能行为,随之结合计算机实现逻辑演绎系统,开启了人工智能发展的先河^[9]。

符号主义人工智能中,其认知的基本元素为符号,将信息和行为抽象为基于符号和符号规则的物理符号系统,应用计算机本身的逻辑推理法则,仿照人脑的抽象思维,完成对智能行为的模拟。其基本方法包括根据已知环境进行模型规则、框架、程序的设计,利用样本进行调试,实现串行处理。

此类形式化的人工智能发展出了多种技术,从启发式算法到专家系统以及知识工程理论与技术,为早期的人工智能应用奠定了基础。专家系统作为符号主义人工智能的代表成就^[10],依据专家经验知识设计智能计算机程序系统,模拟专家进行推理判断从而解决复杂问题。专家系统所具有的启发性、透明性、灵活性,使专家经验应用于实际问题时具有较高的适应性和精确计算能力。

符号主义人工智能所具备的逻辑推理特征对于解决可用符号完整表达的系统问题具有较好的应用效果,是被应用于电力系统的最为成熟的人工智能技术,但其对全局性判断、模糊信息处理等问题的处理效率不高。

1.2 联结主义人工智能

联结主义人工智能认为人工智能起源于仿生学,1943年由生理学家Mcculloch和数理逻辑学家Pitts共同创立的脑模型,开创了从神经元角度研究人脑结构及功能模型的新途径。

联结主义人工智能中,认知的基本元素为神经元,通过模仿神经网络与神经元之间的联结机制和学习算法,实现人类智能行为在计算机上的模拟。其采用全局分布式数据存储模式和并行的数据处理方式,依据神经网络物理结构进行计算模拟和训练,可进行非逻辑的、具备环境适应性的信息处理。

人工神经网络技术作为联结主义人工智能的核心技术,借助其所具备的学习和适应,自组织、函数逼近以及大规模并行处理的能力,可解决非线性、多变量、实时动态系统问题,具有联想记忆、鲁棒性强

等特点,其模型及改进模型对应用于智能系统具有广阔前景.目前热度较高的深度学习则是在神经网络模型的基础上衍生出来的更深层的神经网络.在当前云计算和大数据技术日趋完善的基础上,其更加复杂的模型可适用于对大规模数据进行特征学习和分类^[11].

在实际工程所存在的一些复杂决策问题中,系统规模较大,数据众多,且可能存在数据不完备情况.对相关数据的变化规律进行分析,需满足一定的精度和速度.例如在对风电功率进行预测时,需根据天气预报提供的地区天气数据进行预测.如果输入数据误差较大,则会影响预测结果.再如电力市场变化所需进行的电价预测,具有波动变化特性且其相关影响因素众多,包括燃料价格、机组容量、用电需求以及市场体制影响等.神经网络、深度学习具有极强的非线性拟合能力、自主学习能力,能更好地提取数据特征,使此类型人工智能技术对于解决包含大量非线性的复杂电力系统具有很大的应用潜力.

1.3 行为主义人工智能

行为主义人工智能起源于控制论,20世纪80年代由Brooks为代表的研究学者将行为主义研究思想与人工智能融合,开启了与传统人工智能相区别的人工智能技术研究方向.

符号主义人工智能、联结主义人工智能是基于人类内在的思维形式,与之相区别的,行为主义人工智能则通过外在可观测的行为特征实现人工智能.根据主体与外在环境之间的交互影响,通过自主感知环境的反馈并作出相应的动作完成智能行为,运用分布并行的数据处理方式,分解复杂动作结构,由

底向上进行求解^[12].

目前此类人工智能技术主要分为进化计算和强化学习^[13]两种研究方法.进化计算方法可通过进化计算建立感知-动作法则驱动动作执行或建立行为模型,并运用进化计算驱动模型执行动作.强化学习方法基于无模型环境条件下,依据环境反馈所进行的动作自主评估学习过程.符号主义人工智能这种以快速自主反馈代替精确数学模型的方式,对于解决具有复杂、不确定和非结构化的环境系统问题具有较好的应用效果.

当前,能源结构的变化以及交易市场的改革使对电力系统的发展要求更为智能化、灵活化,而电力系统的结构发展也更为复杂和分散,可能会出现无法对环境模型精确建模的问题.在此背景下,依照符号主义人工智能的特征有望在未来电力系统优化控制研究方面发挥重大的作用.

综上所述,3种类型的人工智能技术对比如表1所示.3类人工智能技术均有各自的应用特点:符号主义人工智能在解决实际问题时不受外界环境影响,专家经验不受时空限制,但其对海量样本、模糊信息的处理效率不高;联结主义人工智能可实现数据特

表1 符号主义、联结主义、行为主义人工智能技术对比

人工智能技术	符号主义人工智能	联结主义人工智能	行为主义人工智能
思想起源	数理逻辑	仿生学	控制论
认知要素	符号	神经元	动作
智能来源	结构	功能	行为
核心思想	物理符号系统	神经网络及结构机制与学习算法	控制论及感知-动作控制系统
存在不足	大数据处理困难	常识获取困难	心理状态与行为的映射困难

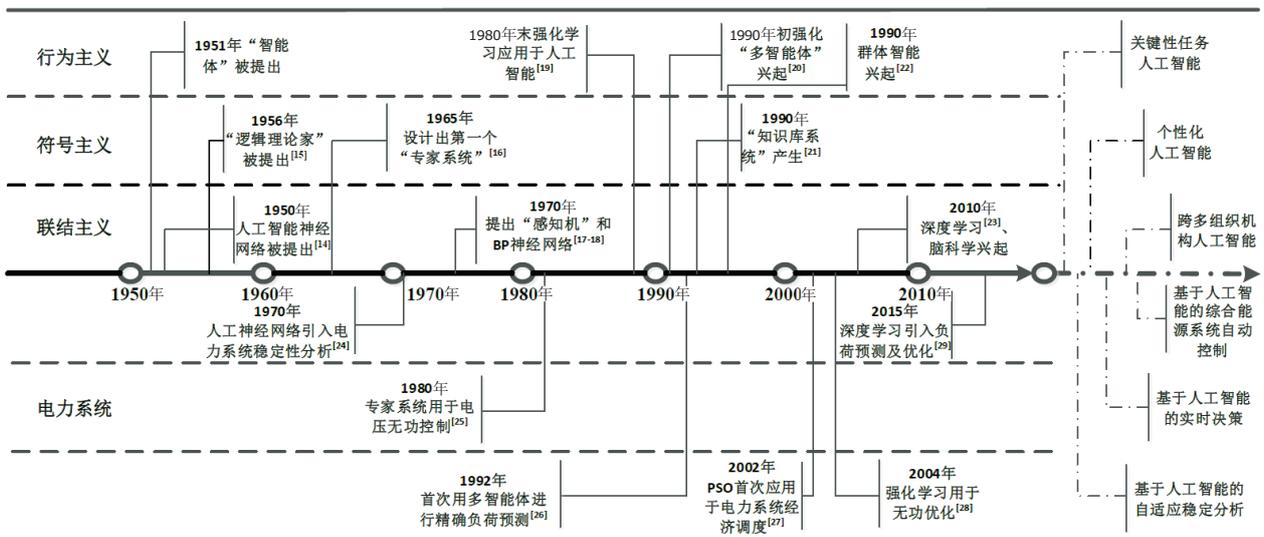


图1 人工智能技术及其在电力系统中的发展历程

征的自动提取,具有较强的鲁棒性和容错能力,可学习和自适应不确定系统,但目前机理尚不明确;行为主义人工智能体现出较强行为主动性和环境自调整性,可针对无具体环境模型系统进行实时控制,但由于其自下而上的决策过程,忽略人的心理状态,欠缺对全局整体性的把控.因此,结合上述3类人工智能技术的优缺点,可根据不同的场景、对象、目标,综合应用各类人工智能技术.人工智能技术及其应用于电力系统的发展历程如图1所示.

1.4 人工智能技术应用框架

依据不同的人工智能技术应用环节和能源环节,

将人工智能技术在电力系统中的应用分别与两类环节的映射图归纳,如图2所示.根据人工智能技术应用环节的不同,将其分为感知、决策、执行3个环节.感知环节主要是信息的获取过程,体现为信息获取、辨识、预处理、分类、预测等功能的实现.决策环节主要是根据数据、模型等信息进行综合分析,体现为优化、博弈、推理、知识获取等过程.执行过程是实现系统的自主闭环控制、保护、自愈等功能,体现为控制、调度、保护、恢复等过程.以此为基础衍生出了人工智能技术的3个应用环节与电力系统应用领域的映射关系.

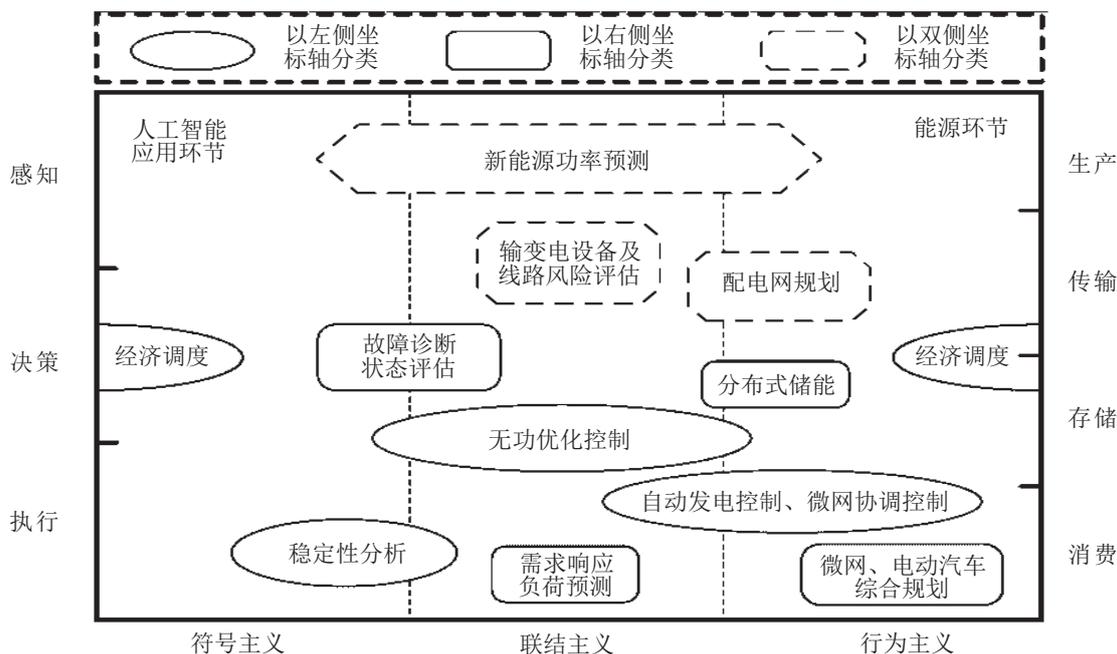


图2 人工智能技术在电力系统领域的应用映射图

为了实现智慧能源的核心环节,即能源的生产、传输、存储、消费4个环节的互联互通,人工智能技术与能源网络各环节技术融合的问题亦为研究热点.因此,从能源的生产、传输、存储、消费的角度总结了各类人工智能技术的应用,包括专家系统、深度学习、对抗学习、强化学习、图像处理、多智能体技术在内的各类人工智能方法被应用于能源系统.随着分布式能源的高比例渗透,分布式储能形式的介入,利用人工智能技术实现新能源功率预测、线路运行状态评估、需求响应等问题有利于提高新能源的消纳水平及实现源、网、荷、储各环节的协同控制.能源网络的结构复杂度促使网络的安全稳定问题更为突出,利用人工智能技术所进行的复杂系统建模分析、设备及线路风险评估、故障诊断将提升系统的整体安全性能.而针对能源系统模型的不确定性和随机性,结合人工智能技术实现离线分析、在线匹配的控制

策略将有效解决传统方法所存在的准确性、时效性方面的不足.同时,结合人工智能技术所进行的微网、电动汽车等系统的综合规划可满足能源网络的智能化需求.

2 人工智能技术在电力系统中的应用

随着能源结构变革,新能源产业得到快速发展,分布式能源的高比例渗透以及电动汽车大规模接入使电网结构更为复杂和灵活,存在不确定性大、非线性强、耦合关系复杂等特点.电网呈现智能化发展趋势,其对电力系统应用技术的要求趋向于高效、简单、可靠.而传统技术存在可靠性不高、缺少长久验证、机理不清等问题.因此,人工智能技术凭借其优势和特点,已成为解决复杂电力系统问题的有力措施,是提升新一代电力系统安全、可靠、经济性的有效工具.在研究进程中,人工智能技术首先在电力系统调度、规划、交易等领域得到广泛的应用,其应用技术分

析如图3所示。

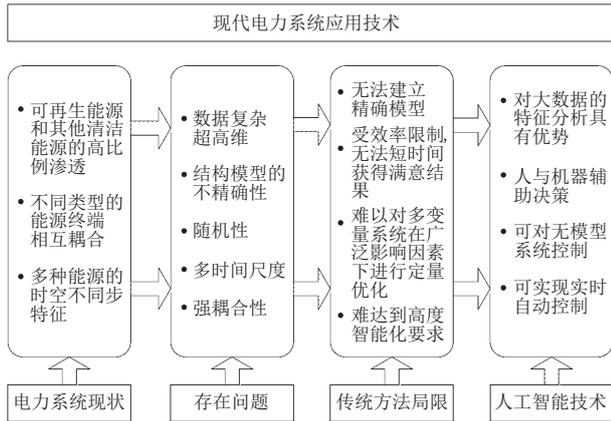


图3 现代电力系统应用技术分析

2.1 人工智能技术与电力系统调度

针对规模庞大、结构复杂的现代电力系统,调度的主要目的是保障系统的安全运行,保证用户的供电可靠性,同时提高系统的经济性^[30-32]。其根本问题是解决复杂网络的有约束优化问题,在数学模型上根据调度目标设定目标函数及满足网络物理运行的约束条件,并运用优化方法制定最优运行方案^[33-35]。基于人工智能技术的调度方法,对应于电力系统的调度功能,电力系统调度问题可分为机组组合优化、机组调度优化等。

2.1.1 机组组合优化

解决机组组合优化问题的目的是如何在满足电力系统电量需求及网络约束的情况下,制定合理的机组投切方案,从而减少能耗成本和机组启停费用。专家系统在20世纪80年代已被应用于解决电力系统调度问题,文献[36]构建了专家系统架构和不同的启发式规则,根据发电机容量划分类别,并制定粗略的24小时调度策略,通过逻辑推理实现全局优化。随着机组组合优化问题的约束繁杂,规模变大,文献[37]将专家系统与粒子群算法相结合,提出了一种双层机组组合优化模型。首先运用粒子群算法在预调度阶段建立鲁棒性强的群集,然后结合专家系统寻找最优解,使所有约束条件在预调度和演化阶段得到满足,提高了执行时间。考虑到负荷波动^[38]及可再生能源的接入可能导致机组组合容量不足等情况,文献[39]采用非参数神经网络对风电所带来的不确定性进行量化预测,并结合蒙特卡洛法,将风力发电场景作为约束条件纳入随机安全约束组合优化模型中,通过遗传算法求解最优组合优化方案。通过仿真验证,该方法降低了智能电网的运行风险。在考虑环境、经济等多方面因素下,机组组合优化问题演化为多目标问题,文献[40]以成本最低、碳排放量最小建立多目

标函数,通过加权求和将多目标函数转化为单目标函数,并运用伪代码算法与加权粒子群算法混合的优化方法处理搜索最优机组组合策略的优先级和约束问题。文献[41]针对电动汽车大规模接入的电力系统的情况,研究了基于技术和经济角度的电动汽车充电策略,分别考虑了每日成本的总值最小和峰值负载最小,通过GA在可行域搜索得出智能充电最优策略。

2.1.2 机组调度优化

解决机组调度优化问题的目的是如何根据现有的能源和设备情况,制定合理的系统负荷配置方案,在满足对用户安全可靠供电的情况下实现电力系统运行的经济效益最大化。文献[42]针对大规模电力系统最优潮流问题,重点研究了开发专家系统以观察和管理不同负载下的电压曲线,通过专家系统解决了约束越限问题,可在短时间内得出合理解决方案,减少了大规模互联电力系统的总传输损耗。文献[43]综合考虑了风能和太阳能接入电力系统的影响,提出了一种模糊遗传优化方法,通过运用模糊集考虑每小时负荷,可用水、风速和太阳辐射等状态量的预测误差,并结合遗传算法的鲁棒性优势,实现在不确定环境下的优化调度。文献[44]结合了差分进化算法(DE)和蚁群算法,基于原始差分演化算法,结合了变量缩放突变和概率状态转换规则的蚁群系统处理调度问题,通过在IEEE30节点系统上测试,该混合智能算法相对于进化规划及粒子群优化算法,可以获得更好的结果、较低的有功功率传输损耗以及更好的收敛性能。但随着电动汽车^[45]和可再生能源的接入,电力系统结构的复杂不确定性致使部分电力系统调度的精确数学模型和优化算法不能完全适应电网结构、参数和运行方式的改变。文献[46]针对大规模电力系统提出了基于多智能体的分布式强化学习算法,用于解决最优无功优化问题,两个多智能体之间通过对应的耦合电力线路进行传输,通过一致性全局搜索算法获取多智能体的全局奖励函数,并结合分布式Q学习算法得到满足全局约束的最优运行方案。该算法不需要准确的系统模型,将其分别在不同规模的电力系统的仿真研究表明,方法具有较好的计算效率和良好的在线学习潜力。文献[47]研究了一种考虑可再生能源发电和电网相结合的人工神经网络-遗传算法(ANN-GA)的智能电器调度方案,通过ANN训练来学习考虑环境和居住因素的能源管理模型,并通过基于GA的优化过程实现智能控制装置的能耗最小。所提出方法降低了“高峰期”的能源需求,最大限度地利用可再生能源(光伏和风力发电机),同时减

少对电网能源的依赖. 该方案在一个含四卧室的房屋进行了演示,对电网的能耗分别降低了10%、25%和40%. 由于风能、太阳能等这类可再生能源具有随机和无秩序性,分布式储能技术所具有的可有效消除能量流不确定性的特点,对于实现能源网络能量时空转移和能量流的有序流动具有关键作用. 为了实现微网的智能化动态管理,文献[48]提出了一种演化的自适应动态规划和强化学习结构,根据微网的状态,运用前馈网络实时评估控制信号,最大限度地应用可再生能源和能量存储设备满足关键负荷的需求. 文献[49]在解决以虚拟电厂作为分布式能源的能量管理问题中,充分考虑储能系统的需求响应、削峰填谷和提高电压质量作用,并构建了储能系统的优化配置模型,结合混合整数线性规划和粒子群优化算法对整体模型进行求解.

2.1.3 研究展望

目前,基于人工智能技术的电力系统调度研究已取得一定的发展,为该领域的研究奠定了基础. 未来研究工作可从以下几个方面进一步展开:

1) 电网的智能化发展随之演化而来的将是运行调度问题的维度升高、约束条件数量增多、类型繁杂、负荷及运行方式的不确定性提高以及存在变量的离散化形式,在此情况下,其对算法的要求也日益提高. 现有的人工智能技术在电力系统中的应用具有非实时、非闭环、人参与以及人工智能辅助的特点,如何有效快速地收敛到全局最优解,实现实时、闭环、自动控制是需要进一步解决的问题. 基于前文三类人工智能技术的特点和局限性,综合多种人工智能技术的优势,开发混合人工智能算法成为人工智能技术的重要发展方向之一. 同时,对于复杂调度问题的近似优化方法也应重点关注.

2) 由于分布式能源的渗透比例升高,如光伏发电、电池能量存储、随机接入电网的电动汽车、提供需求响应的可控负载等,相对于集中式方法,分布式人工智能技术所具有的对网络安全性的提高、减少必要的通信基础设施费用、鲁棒性高、更快的求解速度等优势在分布式发电场景中越来越重要. 包括分布式问题求解、并行人工智能以及需考虑智能主体内部状态间的协调、智能主体间协调的多智能体技术等内容的分布式人工智能技术的应用应进行更为深入的探讨.

3) 结合大数据、云计算、深度学习等技术所进行的复杂大规模电力系统运行特征分析和预测也需要进行更为深入的研究.

2.2 人工智能技术与电力系统规划

电力系统规划的主要目的在于,在对未来电力波动、负荷曲线和电力分布情况实施预测的前提下,研究未来一段时间内电源和输电线路的投产情况. 结合各人工智能技术特点^[50-51],在电力系统规划中的应用主要体现在电源规划、电网规划、源网协调规划等方面^[52].

2.2.1 电源规划

在电源规划方面,根据负荷预测设计满足目标需求的电源规划方案,可分为传统电源规划和分布式电源规划. 在传统电源规划研究中,文献[53]针对城市电网规划中变电站规划提出了一种混合人工智能算法. 该算法通过贪心算法快速确定需新建变电站的个数以及各变电站容量的初始可行解,并运用Hopfield神经网络校验变电站的供电范围及新建站址. 文中Hopfield神经网络可以将能量函数的数值减小到最小,对于求解此类复杂的组合优化问题具有较好的效果. 文献[54]在考虑环保投资因素的基础上,建立了火电厂的多目标选址模型. 根据从地理信息系统(GIS)所获取的选址所需数据,采用多目标遗传理论,通过NSGA-II算法求解得到最终的火电厂的选址合理的解决方案,此种改进遗传算法可使计算结果在目标空间均匀分布,具有较好的鲁棒性. 在电力市场的影响下,文献[55]提出了一种基于多智能体的电源规划模型,利用多智能体技术建立基于发电集团、发电厂和发电市场的智能体,并结合遗传算法、强化学习算法以提高各智能体的寻优能力. 随着分布式发电的发展和运用,其对于电力系统的电能损失和投资成本的降低起到了关键作用. 在分布式电源规划研究中,电源规划问题更加复杂^[56-58]. 文献[59]综合考虑了系统功率损耗、电压幅值、DG容量以及温室气体排放等因素,研究了基于粒子群优化算法和引力搜索算法的混合智能算法的配电网多DG规划问题,结合粒子群算法的开发能力和引力搜索算法的探索能力,可在几秒时间内精确找到近似全局最优解,对于处理复杂优化问题具有良好效果. 文献[60]考虑了风能和太阳能的波动性,综合考虑风、光、火、水4类电源的碳排放成本,建立了以碳减排效益最大的电源规划模型,由于该规划模型所具备的复杂多维非线性特性,传统的数学优化算法不能完全适用,利用蚁群算法无需初始可行解的特性便可更有效地求解此类节点数较多的模型. 考虑到电动汽车日益增长的

充电设施建设需求,文献[61]综合分析了区域社会用户的电动汽车供电容量要求,应用深度学习方法预测所需要的电动汽车供电容量,以充电站周边交通、区域发展和电网安全等环境因素为基础,训练并建立服务环境和充电需求之间的神经网络映射模型,从而实现充电站的精确规划。

2.2.2 电网规划

在电网规划方面,主要为在满足规划期的输电要求下,基于负荷预测和电源规划,确定使输电系统经济效益最优的输电线路的建设方案。文献[62]研究了一种综合考虑成本和风险的多目标输电规划模型,采用多目标进化算法寻找输电规划方案的帕累托最优解。该智能算法将多目标优化问题分解为一组优化子问题进行求解,每个子问题的优化信息仅来源于相邻的子问题,从而降低了计算复杂度。文献[63]为了改善输电规划解决方案的效率和准确性,采用多组粒子群优化算法研究了静态直流输电规划问题。该方法在传统粒子群算法的基础上结合协同进化算法以提高全局搜索能力,并运用提早淘汰策略提高算法的有效性。文献[64]所采用的遗传算法输电规划方案,同时满足了投资成本最低、电压水平提高、线路损耗最少的目的。

2.2.3 源网协调规划

近年来,由于“弃风”等问题显著,电源规划与电网规划的不协调问题成为研究热点,人工智能技术在其中也起到了关键作用。文献[65]提出了一种源网荷协同规划模型,利用随机、模糊理论表征风电等可再生能源接入所带来的不确定性特性,同时考虑了需求响应对电力供应的平衡能力,通过在IEEE30节点系统的仿真验证,表明该模型能有效实现系统总成本的最小化。文献[66]针对DG和配电网网架的相互作用,建立了双层协调规划模型,上层规划为综合优化决策,下层规划则考虑了DG规划的优势,最后应用Pareto理论和混沌二进制粒子群算法对双层规划模型进行了求解。

2.2.4 研究展望

基于人工智能技术的电力系统规划问题的后续研究可从以下方面扩展:

1) 在全面推进分布式电源建设、发展以清洁能源为主的分布式发电就地消纳模式的情况下,为了充分考虑多阶段规划周期、供能可靠性、能源价格的影响,更加优化配置、实现低碳经济用电,如何应用人工

智能技术有效地考虑电源规划与电网规划的协调进行、实现能源高效传输是电力系统规划的研究重点之一。

2) 考虑到可再生能源发电的随机性、燃料价格的波动性、未来负荷的增长、未来可用性燃料供应系统和插电式电动车辆的不确定性影响,需结合可进行随机优化和具有强大编程能力的人工智能技术来解决此类系统规划中所存在的问题。

3) 未来系统规划方式的发展以集中式与分布式相结合为主,结合多智能体技术^[67]、深度学习、强化学习的人工智能技术应用需进一步研究。

2.3 人工智能技术与电力市场

电力市场是应用计算机、现代化测量和通信设备,以电价交易为基础,电力生产者和消费者采用协商、竞价等方式对电力资源进行优化配置,实现供需平衡的机制。随着电力交易变革,所带来的电力系统优化决策问题更为复杂^[68-70],人工智能技术在解决此类问题中发挥了重要作用。人工智能技术在电力市场中的应用主要体现在发电侧、配电侧、用户侧的电力交易决策等方面。

2.3.1 发电侧电力市场

在发电侧,发电公司的售电决策主要为基于边际成本、机会成本以及最优化理论,对发电侧电力市场及备用辅助服务进行报价以获取最大利润策略和交易中心招标策略。文献[71]将决策支持系统与人工智能技术相结合,提出了基于智能决策支持系统的发电公司报价优化决策方案。文献[72]综合考虑了负荷需求随机性和线路故障停运风险,应用改进协同进化算法,使发电公司依据不同运行场景相应地调整均衡竞价策略,以获得最大的期望收益。文献[73]提出了一种捕食者优化算法以解决电力市场下发电公司的交易问题,模型分为两层,上层为发电公司的最优投标策略,下层为解决基于社会效益最大的独立系统运营商的市场清算问题。用捕食者优化算法优化上层目标,并运用迭代算法求解发电公司间供给均衡函数,该方法在具备不完全信息的IEEE57节点和118节点得到了有效验证。

2.3.2 配电侧电力市场

在配电侧,智能微网的兴起使电力市场运行更加复杂,其中一个关键特征在于供需管理方面,如定价、交互影响、自适应决策和动态操作所面临的技术挑战^[74-75]。应用人工智能技术解决此类能源管理问题

也成为研究热点. 文献[76]针对由多微网组成的配电网构建基于多智能体的动态博弈协调控制系统, 根据价格差异与时间贯序权重建立快速决策模型, 并建立了最大投标风险承受比例的电量和最小用电成本的电价投标决策模型. 在多智能体仿真平台模拟多微网动态博弈交易过程, 充分发挥了智能体的自治性和协作性, 提高了微网控制的灵活性和可靠性. 文献[77]提出了一种基于重复博弈的新能源交易框架, 使每个微电网按一定概率随机选择策略并独立进行能源交易, 从而使平均收益最大化. 将强化学习算法与博弈均衡思想相结合, 可计算在信息不完全下的微网收益, 为有界随机问题的解决提供思路. 文献[78]针对含微电网的配电侧建立了双层优化模型, 利用遗传算法求解微电网运营商的日前最优竞价策略, 并用内点法求解市场运营商的最优经济调度问题, 最后, 应用动态博弈方法确定双层优化的纳什均衡点. 文献[79]为了通过微电网满足可再生能源和清洁能源得到最大限度的利用和需求侧管理, 提出了一种考虑微网概念的配电系统运行的新范式, 充分考虑了风力涡轮机和光伏的负载及以发电功率的波动复杂性, 通过微网与主电网之间的电力交换保证供需平衡, 并提出运用经验竞争算法求解整体优化模型.

2.3.3 用电侧电力市场

在用户侧, 当系统的电价上升或可靠性受到威胁时, 用户将依据供电方激励措施减少负荷或改变用电方式, 从而响应电力供应, 起到维持系统稳定和平抑电价的作用. 基于人工智能技术的需求响应, 在优化、预测和用户互动等方面都得到了成功应用. 文献[80]提出了含有权重的不同需求和价格的复合需求表达式, 并基于此模型利用Q学习算法实现能源零售商的最优实时价格安排. 随着电力体制的改革, 大用户直

购电形式出现, 对于电力交易的管理趋向于分布式形式. 文献[81]结合大用户直购电的特点, 构建了基于区块链技术的大用户直购电交易模型, 并对其交易模式的技术实现进行制定. 所提出的模型尚不够完善, 但为区块链技术在电力系统中的应用奠定了实践基础. 文献[82]针对插入式电动汽车的需求响应, 提出了一种新的降低长期充电成本的方法, 考虑到电费的变化差异, 结合当日电价并运用贝叶斯神经网络所预测的次日电价, 通过强化学习根据样本预学习最优充电策略, 并对实时场景作出最优决策.

2.3.4 研究展望

基于人工智能技术的电力市场研究已经得到了高度的关注, 为该方向的发展奠定了一定基础, 未来研究工作可以从以下几方面进一步深化:

1) 电力交易机制将依据市场形势发生变化. 目前用户与供电公司的电力交易多为点对面的形式, 点对点的交易方式也将是未来的发展趋势, 同时智能用户的参与也使得交易更加复杂多变. 在此情况下, 对市场激励下产生的电价进行预测, 提高对用户供电的灵活性和可靠性服务, 开发先进的市场清算软件等问题应进一步探究. 因此, 考虑如何应用人工智能技术解决综合考虑上述要素及其作用的较为完备的电力交易模型和方法体系是未来需深入研究的方向.

2) 配电侧分布式电源的大规模接入使电力交易主体数量增多, 随机性更强, 由此造成对电力交易的管理难度加大. 同时, 伴随电力体制的改革将是未来更多大用户直购电现象的出现, 电力的生产和消费也趋向于分布式结构. 分布式人工智能技术的应用研究将更为深入, 尤其以区块链技术为主导, 其作为新兴的分布式数据库技术, 与传统技术相比具有成本低、安全性高的特点, 可实现电力交易的去中心化管理, 在未来的电力系统中也会有较大的应用空间.

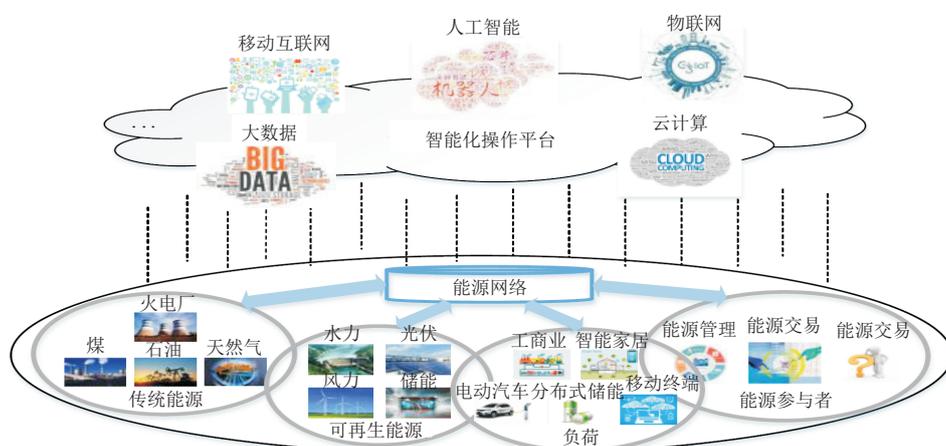


图4 人工智能技术在能源网络的应用框架

3 结语

在智慧能源的大力倡导下,未来能源系统发展的关键是产能、储能、用能一体化发展,更多能源生产、转化、传输、储存、消费环节将通过信息技术进行深入融合,推动能源系统高效运行.当前,人工智能技术对于解决现代电力系统所含有的非线性、不确定性强、耦合性强、多变量等特点的问题具有较好的适应性和灵活性,对于提高电力系统的运行效率,提高其安全可靠性以及智能化水平将起到重要作用.在此基础上,人工智能技术也将更多地渗透入能源系统,以真正实现智慧能源的智能化.

智能电网和能源互联网作为新一代能源变革的重要载体,在智慧能源的发展中占据着核心和引领地位.能源互联网的主要功能将是以智能电网、人工智能技术、云计算、物联网、大数据和移动互联网为支撑,基于信息、物理、社会三者深度融合结构,实现能源的优化决策和广域协调,框架如图4所示.为此,人工智能技术与能源互联网技术的融合,将赋予传统能源网络智能化的功能.

近年来,基于深度学习的智能电网输电线路故障预警、基于多智能体的配电网自愈控制等研究已逐步展开,未来在能源互联网领域,以动态系统建模与深度学习相结合的复杂工况参数辨识、以预测与强化学习相结合的混合能源实时优化决策、以小样本技术为支撑的能源设备故障分析等方面也将成为重点研究方向.同时,人工智能技术将着重考虑如何依据与动态环境交互影响,充分考虑电力系统及时、稳定、安全的决策要求,设计可不断学习和自适应的人工智能系统.对于诸如微电网黑启动电源选择和方案制定的研究,如何结合人工智能技术设计个性化决策系统以保障用电的安全性也将是研究重点.此外,在新一代电力系统的发展下,亦需探究如何综合运用支持跨多组织的人工智能系统,实现横向多能互补、纵向源-网-荷-储协调的能源与信息融合的问题.

本文总结了人工智能技术在电力系统中的典型应用,并对未来可能的研究方向进行了展望,旨在推动人工智能技术在电力系统理论研究和实际应用中的发展.

参考文献(References)

[1] 蔡自兴. 人工智能及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 8-20.
(Cai Z X. Artificial Intelligence: Principles and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press,

2004: 8-20.)
[2] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 12-35.
(Zhou Z H. Machine learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 12-35.)
[3] Sutton R S, Barto A. Reinforcement learning: An introduction[M]. Cambridge: MIT Press, 1998: 23-52.
[4] Zhou S H, Fong J, Crocher V, et al. Learning control in robot-assisted rehabilitation of motor skills—A review[J]. J of Control and Decision, 2016, 3(1): 19-43.
[5] 任浩, 屈剑锋, 柴毅, 等. 深度学习在故障诊断领域中的研究现状与挑战[J]. 控制与决策, 2017, 32(8): 1345-1358.
(Ren H, Qu J F, Chai Y, et al. Deep learning for fault diagnosis: The state of the art and challenge[J]. Control and Decision, 2017, 32(8): 1345-1358.)
[6] Shao C, Shahidehpour M, Wang X, et al. Power system economic dispatch considering steady-state secure region for wind power[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 268-278.
[7] Nilsson N J. Artificial intelligence: A new synthesis[M]. San Fran Cisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1998: 37-48.
[8] Brooks R A. Intelligence without reason[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1991: 63-107.
[9] 顾险峰. 人工智能中的联结主义和符号主义[J]. 科技导报, 2016, 34(7): 20-25.
(Gu X F. Connectionism and symbolism of artificial intelligence[J]. Science and Technology Review, 2016, 34(7): 20-25.)
[10] Sai T K, Reddy K A. New rules generation from measurement data using an expert system in a power station[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2015, 30(1): 167-173.
[11] Yang H F, Dillon T S, Chen Y P. Optimized structure of the traffic flow forecasting model with a deep learning approach[J]. IEEE Trans on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 99: 1-11.
[12] 徐心和, 么健石. 有关行为主义人工智能研究综述[J]. 控制与决策, 2004, 19(3): 241-246.
(Xu X H, Yao J S. Survey of behaviorism in artificial intelligence research[J]. Control and Decision, 2004, 19(3): 241-246.)
[13] Xu H, Zhao Q, Jagannathan S. Optimal regulation of uncertain dynamic systems using adaptive dynamic programming[J]. J of Control and Decision, 2014, 1(3): 226-256.
[14] Bankert R L, Aha D W. Improvement to a neural network cloud classifier[J]. J of Applied Meteorology, 1952, 35(11): 2036-2039.
[15] Newell A, Simon H. The logic theory machine — A complex information processing system[J]. IRE Trans on

- Information Theory, 1956, 2(3): 61-79.
- [16] Biemann K, McMurray W. Computer-aided interpretation of high resolution mass spectra[J]. Tetrahedron Letters, 1965, 6(11): 647-653.
- [17] French M, Recknagel F. Modeling of algal blooms in freshwaters using artificial neural networks[J]. WIT Trans on Ecology and the Environment, 1970, 6(1): 1-8.
- [18] Albus J S. A new approach to manipulator control: The cerebellar model articulation controller(CMAC)[J]. J of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1975, 97(3): 220-227.
- [19] Williams R J. On the use of backpropagation in associative reinforcement learning[C]. Proc of the IEEE Int Conf on Neural Networks. San Diego: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 1988, 1: 263-270.
- [20] Le Pape C. A combination of centralized and distributed methods for multi-agent planning and scheduling[C]. Proc of 1990 IEEE Int Conference. Cincinnati: IEEE, 1990: 488-493.
- [21] Steinke G. Design aspects of access control in a knowledge base system[J]. Computers and Security, 1991, 10(7): 612-625.
- [22] Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. From natural to artificial swarm intelligence[M]. Oxford: Oxford University Press, 1999: 112-320.
- [23] Hinton G E, Osindero S, Teh Y W. A fast learning algorithm for deep belief nets[J]. Neural Computation, 2006, 18(7): 15-27.
- [24] 党德玉. 人工神经网络及其电力系统应用综述[J]. 东北电力技术, 1996, 1(3): 58-62.
(Dang D Y. Application of artificial neural network in power system[J]. Northeastern Electric Power Technology, 1996, 1(3): 58-62.)
- [25] Cheng S J, Malik O P, Hope G S. An expert system for voltage and reactive power control of a power system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(4): 1449-1455.
- [26] Tsai R, Chen J L. Design of a distributed problem-solving system for short-term load forecasting[C]. Proc of the Midwest Symposium on Circuits and Systems. Washington DC: IEEE, 1992: 395-399.
- [27] El-Gallad A, El-Hawary M, Sallam A, et al. Particle swarm optimizer for constrained economic dispatch with prohibited operating zones[C]. IEEE CCECE 2002 Canadian Electrical and Computer Engineering. Winnipeg: IEEE, 2002: 78-81.
- [28] Vlachogiannis J G, Hatziaargyriou N D. Reinforcement learning for reactive power control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1317-1325.
- [29] Tao Y, Chen H, Qiu C. Wind power prediction and pattern feature based on deep learning method[C]. IEEE Pes Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf. Hong Kong: IEEE, 2015: 1-4.
- [30] Ali Y, Rasheed Z, Muhammad N, et al. Energy optimization in the wake of China pakistan economic corridor(CPEC)[J]. J of Control and Decision, 2018, 5(2): 129-147.
- [31] Kopsidas K, Kapetanaki A, Levi V, et al. Optimal demand response scheduling with real time thermal ratings of overhead lines for improved network reliability[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2017, 8(6): 2813-2825.
- [32] 孙秋野, 滕菲, 张化光. 能源互联网及其关键控制问题[J]. 自动化学报, 2017, 43(2): 176-194.
(Sun Q Y, Teng F, Zhang H G. Energy internet and its key control issues[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(2): 176-194.)
- [33] Takeuchi A, Hayashi T, Nozaki Y, et al. Optimal scheduling using metaheuristics for energy networks[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(2): 968-974.
- [34] Sousa T, Morais H, Vale Z, et al. Intelligent energy resource management considering vehicle-to-grid: A simulated annealing approach[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(1): 535-542.
- [35] Zhao B, Guo C X, Cao Y J. A multiagent-based particle swarm optimization approach for optimal reactive power dispatch[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 1070-1078.
- [36] Li S, Shahidehpour S M, Wang C. Promoting the application of expert systems in short-term unit commitment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 286-292.
- [37] Chen P H. Two-level hierarchical approach to unit commitment using expert system and elite PSO[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(2): 780-789.
- [38] Kurban M, Filik U B. Unit commitment scheduling by using the autoregressive and artificial neural network models based short-term load forecasting[C]. Int Conf on Probabilistic Methods Applied To Power Systems. Rin Con: IEEE, 2008: 1-5.
- [39] Quan H, Srinivasan D, Khosravi A. Incorporating wind power forecast uncertainties into stochastic unit commitment using neural network-based prediction intervals[J]. IEEE Trans on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(9): 2123-2135.
- [40] Shukla A, Singh S N. Multi-objective unit commitment with renewable energy using hybrid approach[J]. Iet Renewable Power Generation, 2016, 10(3): 327-338.
- [41] Mehta R, Srinivasan D, Trivedi A, et al. Hybrid planning method based on cost-Benefit analysis for smart charging of plug-in electric vehicles in distribution systems[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2017, 99: 1-13.
- [42] Azmy A M. Optimal power flow to manage voltage profiles in interconnected networks using expert systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4):

- 1622-1628.
- [43] Liang R H, Liao J H. A Fuzzy-optimization approach for generation scheduling with wind and solar energy systems[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2007, 22(4): 1665-1674.
- [44] Huang C M, Huang Y C. Combined differential evolution algorithm and ant system for optimal reactive power dispatch[J]. *Energy Procedia*, 2012, 14(1): 1238-1243.
- [45] Sun J. Optimisation-based control for electrified vehicles: Challenges and opportunities[J]. *J of Control and Decision*, 2015, 2(1): 46-63.
- [46] Xu Y, Zhang W, Liu W, et al. Multiagent-based reinforcement learning for optimal reactive power dispatch[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2012, 42(6): 1742-1751.
- [47] Yuce B, Rezgui Y, Mourshed M. ANN-GA smart appliance scheduling for optimised energy management in the domestic sector[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 111(1): 311-325.
- [48] Venayagamoorthy G K, Sharma R K, Gautam P K, et al. Dynamic energy management system for a smart microgrid[J]. *IEEE Trans on Neural Networks and Learning Systems*, 2016, 27(8): 1643-1656.
- [49] 韦立坤, 赵波, 吴红斌, 等. 虚拟电厂下计及大规模分布式光伏的储能系统配置优化模型[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(23): 66-74.
(Wei L K, Zhao B, Wu H B, et al. Optimal allocation model of energy storage system in virtual power plant environment with a high penetration of distributed photovoltaic generation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(23): 66-74.)
- [50] 孙昱, 姚佩阳, 孙鹏, 等. 基于鲁棒多目标优化的智能体群组协同任务规划[J]. *控制与决策*, 2016, 31(11): 2045-2052.
(Sun Y, Yao P Y, Sun P, et al. Cooperative task scheduling method for agent group using robust multiobjective optimization approach[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(11): 2045-2052.)
- [51] 何大阔, 王福利, 毛志忠. 离散非线性规划问题的改进遗传算法[J]. *控制与决策*, 2006, 21(4): 396-399.
(He D K, Wang F L, Mao Z Z. Improved genetic algorithm in discrete variable non-linear programming problems[J]. *Control and Decision*, 2006, 21(4): 396-399.)
- [52] Tan W S, Hassan M Y, Majid M S, et al. Optimal distributed renewable generation planning: A review of different approaches[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18(2): 626-645.
- [53] 高炜欣, 罗先觉, 朱颖. 贪心算法结合 Hopfield 神经网络优化配电变电站规划[J]. *电网技术*, 2004, 28(7): 73-76.
(Gao W X, Luo X J, Zhu Y. A new distribution substation planning algorithm based on greedy algorithm and Hopfield neural network[J]. *Power System Technology*, 2004, 28(7): 73-76.)
- [54] 包伟, 姚建刚, 李晴, 等. GIS 支持下基于 NSGA-算法的火电厂多目标选址[J]. *电力系统保护与控制*, 2008, 36(22): 25-28.
(Bao W, Yao J G, Li Q, et al. The multi-objective site selection for thermal power plant based on NSGA- and GIS[J]. *Power System Protection and Control*, 2008, 36(22): 25-28.)
- [55] 黄仙, 郭睿. 一种电力市场环境下的电源规划多智能体模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(24): 1-8.
(Xian X, Guo R. A multi-agent model of generation expansion planning in electricity market[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(24): 1-8.)
- [56] Che L, Zhang X, Shahidehpour M, et al. Optimal interconnection planning of community microgrids with renewable energy sources[J]. *IEEE Trans on Smart Grid*, 2017, 8(3): 1054-1063.
- [57] Shojaabadi S, Abapour S, Abapour M, et al. Optimal planning of plug-in hybrid electric vehicle charging station in distribution network considering demand response programs and uncertainties[J]. *Iet Generation Transmission and Distribution*, 2016, 10(13): 3330-3340.
- [58] Qin M, Chan K W, Chi Y C, et al. Optimal planning and operation of energy storage systems in radial networks for wind power integration with reserve support[J]. *Iet Generation Transmission and Distribution*, 2016, 10(8): 2019-2025.
- [59] Tan W S, Hassan M Y, Rahman H A, et al. Multi-distributed generation planning using hybrid particle swarm optimisation-gravitational search algorithm including voltage rise issue[J]. *Iet Generation Transmission and Distribution*, 2013, 7(9): 929-942.
- [60] 段建民, 王志新, 王承民, 等. 考虑碳减排效益的可再生电源规划[J]. *电网技术*, 2015, 39(1): 11-15.
(Duan J M, Wang Z X, Wang C M, et al. Renewable power planning considering carbon emission reduction benefits[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(1): 11-15.)
- [61] 李智, 侯兴哲, 刘永相, 等. 基于深度学习的充电站容量规划方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 21: 67-73.
(Li Z, Hou X Z, Liu Y X, et al. A capacity planning method of charging station based on depth learning[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 21: 67-73.)
- [62] Qiu J, Dong Z Y, Meng K, et al. Multi-objective transmission expansion planning in a smart grid using a decomposition-based evolutionary algorithm[J]. *Iet Generation Transmission and Distribution*, 2016, 10(16): 4024-4031.
- [63] Huang S, Dinavahi V. Multi-group particle swarm

- optimisation for transmission expansion planning solution based on LU decomposition[J]. *Iet Generation Transmission and Distribution*, 2017, 11(6): 1434-1442.
- [64] Cabrera N G, Jimenez J T. Transmission expansion planning systems using algorithm genetic with multi-objective criterion[J]. *IEEE Trans on Latin America*, 2017, 15(3): 563-568.
- [65] 张宁, 胡兆光, 周渝慧, 等. 计及随机模糊双重不确定性的源网荷协同规划模型[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(1): 39-44.
(Zhang N, Hu Z G, Zhou Y H, et al. Source-grid-load coordinated planning model considering randomness and fuzziness [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(1): 39-44.)
- [66] Gao Y, Hu X, Yang W, et al. Multi-objective bi-level coordinated planning of distributed generation and distribution network frame based on multi-scenario technique considering timing characteristics[J]. *IEEE Trans on Sustainable Energy*, 2017, 99: 1415-1429.
- [67] Wu L B, He X Q, Zhang D Q. Cooperative adaptive fuzzy control for a class of uncertain non-linear multi-agent systems with time delays[J]. *J of Control and Decision*, 2016, 4(3): 131-152.
- [68] Wu H, Shahidepour M, Alabdulwahab A, et al. A game theoretic approach to risk-based optimal bidding strategies for electric vehicle aggregators in electricity markets with variable wind energy resources[J]. *IEEE Trans on Sustainable Energy*, 2017, 7(1): 374-385.
- [69] Xu Z, Hu Z, Song Y, et al. Risk-averse optimal bidding strategy for demand-side resource aggregators in day-ahead electricity markets under uncertainty[J]. *IEEE Trans on Smart Grid*, 2017, 8(1): 96-105.
- [70] Dai T, Qiao W. Optimal bidding strategy of a strategic wind power producer in the short-term market[J]. *IEEE Trans on Sustainable Energy*, 2015, 6(3): 707-719.
- [71] 方德斌, 王先甲, 张玉新, 等. 电力市场环境下发电公司投标智能决策支持系统[J]. *电网技术*, 2003, 27(11): 38-42.
(Fang D B, Wang X J, Zhang Y X, et al. Intelligent bidding decision support system for generating companies under electricity market[J]. *Power System Technology*, 2003, 27(11): 38-42.)
- [72] 杨彦, 张尧, 陈皓勇, 等. 考虑系统运行不确定性的电力市场均衡模型[J]. *电网技术*, 2012(7): 100-105.
(Yang Y, Zhang Y, Chen H Y, et al. An electricity market equilibrium model considering uncertainty in power system operation[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(7): 100-105.)
- [73] Bahmani-Firouzi B, Sharifinia S, Azizipanah-Abarghooee R, et al. Scenario-based optimal bidding strategies of genscos in the incomplete information electricity market using a new improved prey — Predator optimization algorithm[J]. *IEEE Systems J*, 2015, 9(4): 1485-1495.
- [74] Mohan V, Singh J G, Ongsakul W. Sortino ratio based portfolio optimization considering EVs and renewable energy in microgrid power market[J]. *IEEE Trans on Sustainable Energy*, 2016, 8(1): 219-229.
- [75] Liu G, Xu Y, Tomsovic K. Bidding strategy for microgrid in day-ahead market based on hybrid stochastic/robust optimization[J]. *IEEE Trans on Smart Grid*, 2015, 7(1): 227-237.
- [76] 江润洲, 邱晓燕, 李丹. 基于多代理的多微网智能配电网动态博弈模型[J]. *电网技术*, 2014, 38(12): 3321-3327.
(Jiang R Z, Qiu X Y, Li D. Multi-agent system based dynamic game model of smart distribution network containing multi-microgrid[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(12): 3321-3327.)
- [77] Wang H, Huang T, Liao X, et al. Reinforcement learning in energy trading game among smart microgrids[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2016, 63(8): 5109-5119.
- [78] 刘一欣, 郭力, 王成山. 多微电网参与下的配电侧电力市场竞价博弈方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(8): 2469-2476.
(Liu Y X, Guo L, Wang C S. Optimal bidding strategy for microgrids in electricity distribution market[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(8): 2469-2476.)
- [79] Nikmehr N, Najafi-Ravadanegh S. Optimal operation of distributed generations in micro-grids under uncertainties in load and renewable power generation using heuristic algorithm[J]. *Iet Renewable Power Generation*, 2015, 9(8): 982-990.
- [80] Yousefi S, Moghaddam M P, Majd V J. Optimal real time pricing in an agent-based retail market using a comprehensive demand response model[J]. *Energy*, 2011, 36(9): 5716-5727.
- [81] 欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 等. 区块链技术在大用户直购电中的应用初探[J]. *中国电机工程学报*, 2017(13): 3737-3745.
(Ouyang X, Zhu X Q, Ye L, et al. Preliminary applications of blockchain technique in large consumers direct power trading[J]. *Proc of the CSEE*, 2017, 37(13): 3737-3745.)
- [82] Chi A, Lundén J, Koivunen V. Reinforcement learning-based plug-in electric vehicle charging with forecasted price[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2017, 66(5): 3674-3684.

(责任编辑: 郑晓蕾)