

文章编号:1671-6833(2019)05-0022-09

## 人工智能在电力系统中的应用综述

马民<sup>1</sup>, 秦佳<sup>2</sup>, 杨东升<sup>2</sup>, 周博文<sup>2</sup>, 庞永恒<sup>2</sup>, 汉焕英<sup>2</sup>

(1. 国网辽宁省电力有限公司 阜新供电公司, 辽宁 阜新 123000; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要:** 电力系统的发展程度是一个国家经济水平的重要评判指标.随着分布式可再生能源的不断接入与电网规模的不断扩大,电力系统正逐渐趋于复杂化,电力数据呈现出多源、异构、大量等典型的大数据特性,这对电力问题的分析处理方法提出了更高的要求.人工智能(artificial intelligence, AI)是未来科技进步的关键,我国已将推进人工智能发展提升为国家战略并将电力系统定为人工智能主要应用领域之一,人工智能的发展也为电力系统规划设计、仿真模拟、协调控制、预测估计、诊断识别等问题提供了强有力的工具.本文从近几年世界各国人工智能政策需求入手,主要讨论了以感知预测、管理控制、安全维护为主的人工智能在电力系统中的主要应用方向;以人工智能自身应用短板为基础,剖析了人工智能技术在电力应用领域的不足之处,深入挖掘了人工智能在不同电力应用方向的问题所在;并着眼于人工智能大局发展趋势,对电力智能化发展提出建议与展望.

**关键词:** 人工智能; 电力系统; 感知预测; 管理控制; 安全维护

**中图分类号:** TM769 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.05.012

### 0 引言

自“人工智能”概念被正式提出以来,人工智能经历了“两起两落”,直至2006年, Hinton在神经网络深度学习领域取得的突破使人类又一次看到了机器赶超人类的希望,也标志着“人工智能”又一次突飞猛进<sup>[1]</sup>.目前,世界各国都在围绕人工智能相关技术积极布局.从2016年起,美国在政府的大力支持下,先后成立了“机器学习与人工智能分委员会”(subcommittee on machine learning and artificial intelligence, MLAI),出台《为人工智能的未来做好准备》《人工智能、自动化与经济报告》国家咨询报告,发布了《国家人工智能研发战略规划》.2017年10月,英国政府网站发布报告《在英国发展人工智能》,并于11月发布《产业战略:建设适应未来的英国》白皮书.而早在2013年,在汉诺威工业博览会上,德国就正式提出以建设智能工厂为核心的“工业4.0战略”<sup>[2-3]</sup>.

为抢抓人工智能发展的重大战略机遇,构筑

我国人工智能发展的先发优势,我国先后出台了《中国制造2025》《新一代人工智能发展规划》等二十余项人工智能及其相关产业发展政策.其中,“人工智能在不同领域的深度融合与具体应用”是我国政策导向的核心所在,《中国制造2025》中明确指出要“以加快新一代信息技术与制造业深度融合为主线、以推进智能制造为主攻方向”;《新一代人工智能发展规划》更是将“推动人工智能与各行业融合创新”作为我国科技兴国战略部署的重点任务之一<sup>[4-5]</sup>.

电力系统是我国人工智能突破发展的重点领域之一.自20世纪80年代提出专家系统法以来,人工智能算法在电力系统中的应用探索从未停歇.然而,传统人工智能方法大多存在计算复杂、周期较长、学习困难等问题.目前,随着人工智能算法的有效改进,多源异构大数据模式逐渐形成,不断积累数据量,人工智能在电力系统中的应用又迎来了全新的机遇与挑战<sup>[6-7]</sup>.

笔者主要介绍了人工智能算法在电力系统中的应用方向,对其中3个主要方向进行详细阐述,

收稿日期:2018-11-01;修订日期:2019-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61703081、61433004);辽宁省自然科学基金资助项目(20170520113);中央高校基本科研基金(N160402003);新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS17013)

作者简介:马民(1968—),男,辽宁沈阳人,国网辽宁省电力有限公司高级工程师,主要从事电力系统人工智能应用研究, E-mail:529984634@qq.com.

并在此基础上总结了人工智能在电力系统中应用的不足之处并提出了改进措施。

## 1 人工智能概述与在电力系统中的应用方向

人工智能也称作机器智能,是指由人工制造出来的系统所表现出来的智能,即为了实现感知、学习、推理、规划、交流、操控物体,通过普通计算机实现的智能.人工智能的实现方法丰富,主要包括引领三次高潮的专家系统(expert systems, ESs)、人工神经网络(artificial neural networks, ANN)、深度学习(deep learning, DL)以及持续推动学科发展的模糊逻辑(fuzzy logic, FL)、遗传算法(genetic algorithm, GA)、机器学习(machine learning, ML)、多智能体(multi-agent system, MAS)、博弈论(game theory, GT)等。

电力系统是由发电、输电、变电、配电、用电等环节组成的电能生产与消费系统,电力系统的规模和技术高低已成为一个国家经济发展水平的标志之一.智能电网(smart grid)的提出对电力系统运行提出了新的要求,也为人工智能方法在电力系统中的应用提供了方向.目前,人工智能技术在电力系统中的应用逐渐从单一的技术应用向多样化的技术应用方向发展,涵盖了负荷、新能源发电、微网、需求侧管理、电网安全与稳定、网络安全、设备管理等多个场景,每个场景衍生出多个研究.笔者将人工智能技术在电力系统中的应用方向概括为感知预测、管理控制、安全维护3个方面加以阐述,图1为人工智能在电力系统的应用方向框架。

## 2 人工智能技术应用于电力系统感知预测

感知预测是指对环境中元素的感知,对当前形势的理解,以及对未来状况的投影.电力系统感知预测主要包括负荷预测、可再生能源发电预测、稳定裕度预测、电压谐波预测、发电机频率预测等.自电力系统概念形成之日起,负荷预测就是研究的重中之重,也是其他电力研究的基础,而随着电网规模逐步扩大与分布式电网结构的形成,可再生能源发电预测逐渐兴起。

### 2.1 负荷预测

1975年,Dillon等人首次利用人工神经网络(artificial neural network, ANN)的自学习功能进行负荷预测,并在第五次PSCC(电力系统计算)会议上宣读了成果,这次尝试虽然只停留在理论

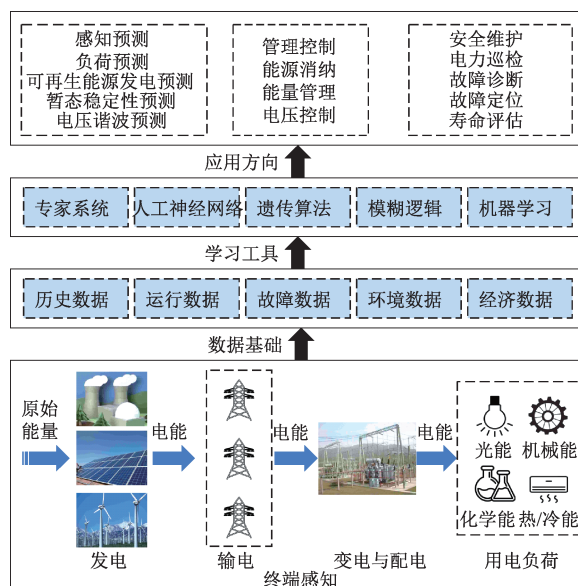


图1 人工智能在电力系统的应用方向

Fig.1 Application direction of artificial intelligence in power system field

研究阶段,但拉开了人工智能在电力系统感知预测领域的序幕<sup>[8]</sup>.为了打破ANN训练时间过长、提高预测精度与容错性,文献[9-11]通过优化训练方式、改进数据获取与网络参数选择方法、对历史数据进行预处理,加深了ANN的应用深度.文献[12-13]将ANN与自适应算法相结合,有效提高了模型的训练速度,文献[14-15]利用模糊逻辑对不明确对象的校正功能,修正了预测结果。

ANN主要应用于短期负荷预测,即用当天的气温、天气晴朗度、风向风力、峰谷负荷及相关负荷等预测当天的负荷大小,获得了较好的预测结果.而ANN在中长期负荷预测的研究还比较少,这是因为短期变化可认为是一个平稳的随机过程,而中长期负荷预测通常会有大的转折,不是一个平稳过程<sup>[16]</sup>.针对上述问题,文献[17]将支持向量机(support vector machines, SVM)应用到负荷中长期预测当中,取得了良好的预测效果.在此基础上,文献[18-19]提出了支持向量机回归修正模型,文献[20]在支持向量机模型上引入了经验模式分解与卡尔曼滤波,均在增加算法精度上获得一定突破,并在实际数据库上得以验证。

智能电网背景下电力系统数据呈现出多源异构的大数据特性,数据量大、复杂程度高,智能传感技术的发展使得负荷预测数据采样频率提高,这为深度学习在电力负荷预测领域的应用提供了契机也提出了要求.长短时记忆神经网络(long short-term memory, LSTM)利用其特殊的网络结构,可以实现时间序列预测分析,即利

用过去一段时间内某事件时间的特征来预测未来一段时间内该事件的特征,图 2 为 LSTM 神经网络模块结构图.和传统回归分析模型的预测不同,这是一类相对比较复杂的预测建模问题,模型依赖于事件发生的先后顺序,预测精度高,且同时适用于短期、中期、长期预测<sup>[21-22]</sup>,预测流程如图 3 所示.

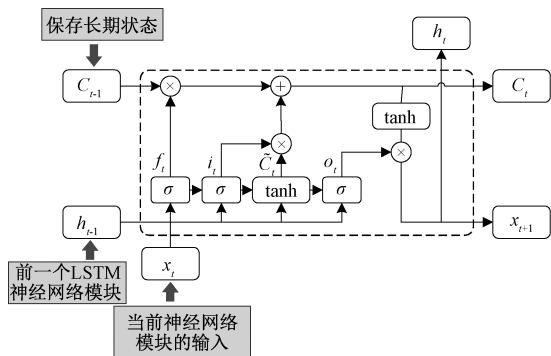


图 2 LSTM 神经网络模块结构图

Fig.2 Module structure diagram of LSTM

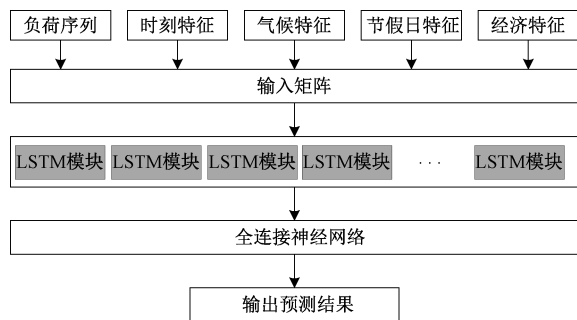


图 3 LSTM 负荷预测流程图

Fig.3 Flow chart of load forecasting by LSTM

2.2 再生能源发电预测

高比例可再生能源成为智能电网未来发展的一个突出特征,风电和光伏作为当前较为成熟的可再生能源发电技术,具有较强的波动性和随机性<sup>[23]</sup>.早期的风电、光伏发电功率预测主要依赖于统计学理论,随着研究的深入,小波变换、人工神经网络、支持向量机等方法逐渐融入其中,可以在地形复杂、风向或光照随机散乱的情况下初步实现分级预测<sup>[24-28]</sup>.

与负荷预测原理相似,LSTM 同样可以有效应用在风电、光伏发电功率预测中,除此之外,其他深度学习方法在可再生能源发电领域也有很多尝试:文献[29-30]基于深度置信网络(deep belief network, DBN)有效提取了复杂风速和光伏数据序列的非线性结构和不变性特征,进而对风电和光伏功率进行预测;文献[31-32]利用深度卷积神经网络(deep convolutional neural network,

DCNN)对光照数据进行特征提取,提高了预测的准确度和速度;文献[33]通过稀疏自动编码器(sparse autoencoder, SAE)将粗糙神经网络纳入深度学习模型以预测不确定性风速,从而提高模型的鲁棒性和预测精度<sup>[23]</sup>.

3 人工智能技术应用于电力系统管理控制

电力系统的管理控制技术主要由规划和运行控制两方面组成,规划是电力系统安全经济运行的必要手段,运行控制是为了电力系统的有功与无功出力时刻与负荷保持平衡,以保证优质经济的电能供应<sup>[34]</sup>.

3.1 能源消纳与能量管理

在能源结构变革、新能源产业高速发展、分布式可再生能源高比例渗透的环境下,对能源的规划调度逐渐成为重点研究领域.文献[35]在区域综合能源系统的背景下,基于多智能体系(multi-agent systems, MAS)搭建包含主管层、区域层、设备层的 3 层交互结构,实现空间尺度上不同实体的相互作用,提高了能源消纳率与能源使用效率.随着微电网大范围接入电网,一定区域内的多个微电网互联形成多微电网系统,文献[36-37]为了实现电力市场的管理以及交互,搭建了多微电网系统中的多智能体模型,文献[38-39]则将博弈论的思想应用于人工智能领域,采取合作博弈的手段,以各微电网网损最小为目标进行能量管理<sup>[40]</sup>.在智能电网、微电网、多能源互联系统、微能源网等多种现代综合能源应用场景中,电力系统的管理控制已经逐渐从单一或少量目标的最优控制发展为复杂场景下多层多区最优化问题.人工智能技术的引入恰恰为解决这一问题带来了契机.

3.2 电压控制

在电力系统中,通过人工智能能够有效提高电压的控制效率,电压控制是一个复杂的过程,不仅需要计算相应电压的潮流结果,还需预测未来的电流负荷,这些在智能电网的控制下能够轻松实现<sup>[41]</sup>.专家系统、人工神经网络、遗传算法、模糊逻辑等较为成熟的人工智能算法已经广泛应用于电压控制领域中<sup>[42-47]</sup>;文献[48]提出了基于多智能体协调的二级电压控制,文献[49]通过多智能体建立一种适用于分散自治控制的最优控制律,获得了含光伏发电的电压最优控制性能.

## 4 人工智能技术应用于电力系统安全维护

为了使电力系统突然发生扰动时仍不间断地向用户提供电力,或发生系统崩溃时能够尽快判断故障类型、确定故障位置并恢复供电,需要研究以电力巡检、故障诊断、寿命评估为主要方向的电力系统安全维护技术。

### 4.1 电力巡检

人工智能在电力巡检中的应用主要集中在输电线路,输电线路在正常运行过程中,很容易受到自然因素和人为因素的影响而致破坏,对整个电力系统的稳定运行造成影响。在很多情况下,输电线路会分布在荒郊野外,恶劣的环境使传统人工巡检、GPS 巡检技术捉襟见肘,而无人机技术、智能机器人技术与深度学习图像识别技术的发展使无人巡检成为可能。

将音视频监测系统、定点采集系统、上位机系统集成到机器人上,机器人可以采集相应位置的音频、视频传到控制终端,相关工作人员可以通过远程操作机器人进行巡检<sup>[50-52]</sup>。以无人机的航拍图像为基础数据进行识别是近两年电力巡检的主要发展方向,借助卷积神经网络的特征提取与分类功能可有效区分绝缘子、变压器、断路器、输电线路电杆和输电线路铁塔等电力设备,还可以实现电力杆塔倾斜的自动识别<sup>[53-54]</sup>。

### 4.2 故障诊断

电力系统故障诊断按诊断对象可以分为输电线路故障和电力设备故障,按诊断目的可以分为判断事故类型和定位故障位置。在输电线路故障中,架空线路接地、短路方面的问题与开关跳闸问题是比较常见的电气故障,此外,输电线路导线电缆物理损伤也会造成一系列的故障发生。基于人工智能技术的输电线路故障诊断主要包括故障分类、故障定位和故障预测几个方面,常用的方法包括 SVM、LSTM、模糊推理系统、极限学习机等。文献[55]利用 SVM 对电力线路故障类型进行准确识别;文献[56]在 SVM 基础上加入深度学习的 LSTM,对线路跳闸故障实现了分类和预测。人工智能在线路故障定位上的应用较故障诊断更加广泛,张庆超等基于人工神经网络提出非直接接地中性点系统单相接地故障的输电线路故障定位方法<sup>[57]</sup>;李小叶等提出了一种基于混合智能算法的直流输电线路故障定位方法,利用神经网络建模并利用遗传算法对模型进行修正,解决了传统测

距结果受制于故障行波波头检测准确性的问题<sup>[58]</sup>;徐舜等基于本征模函数(intrinsic mode function, IMF)特征能量矩的故障信息提取方法,并利用 SVM 进行故障定位,仅需测量故障电流就可以准确、有效地识别故障区段<sup>[59]</sup>。近年来,对输电线路故障的研究越来越趋向判断事故类型和定位故障位置同时进行的方向发展,文献[60]和文献[61]分别借助自适应神经模糊推理系统和小波极限学习机这种新型机器学习算法对输电线路故障同时进行分类与定位。

电力设备故障常见于汽轮机、锅炉、旋转电机等发电设备与变压器、断路器、互感器等输变电设备中,其中人工智能方法在变压器故障中的应用发展较快,很多深度学习算法已经成功应用于故障识别中,应用方式如图4所示。文献[62]对比了不同机器学习算法及融合算法在基于溶解气体分析的变压器故障诊断中的应用效果。文献[63]借助深度置信网络,将诊断范围由单一故障扩展为单一故障与多重故障相结合,振动信号同样可以用于诊断变压器故障。文献[64]利用射频识别(radio frequency identification, RFID)传感器在器身内部采集绕组振动信号并利用深度学习的堆叠去噪自动编码器提取信号特征用于故障识别。除此之外,互感器故障智能诊断方法也有一些研究<sup>[65]</sup>。

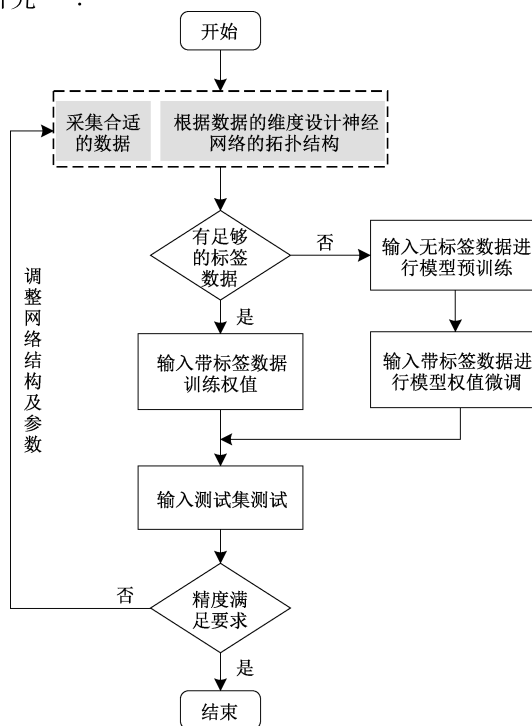


图4 电力故障智能诊断系统

Fig.4 Intelligent power fault diagnosis system



### 4.3 寿命评估

电力系统的寿命主要取决于电力设备的使用寿命,为有效延长电力设备的使用寿命,让电力系统的投资和回报有一个最佳平衡,必须进行寿命评估<sup>[66]</sup>.变压器的寿命由于其影响因素的多维性而较难计算,文献[67]介绍了变压器绝缘老化在线检测分析的模型,叙述了人工神经网络在变压器绝缘老化程度诊断和寿命评估方面应用的可行性和有效性;为了给决策者提供更为详细和多元化的检修信息,文献[68-70]利用模糊理论建立变压器寿命评估模型.文献[71]利用神经网络模型的预测功能,将电机振动信号作为输入,也可实现电机寿命评估功能.随着锂离子电池的广泛应用,其健康状态(state-of-health, SOH)估计逐渐成为电力领域的热点问题.人工智能在电池 SOH 中的应用思路为基于电池模型,采用人工智能算法对电池等效模型的电容、电阻等参数进行识别,进而描述电池 SOH,文献[72]沿此思路,针对在线应用问题,采用神经网络电池模型估计电池的荷电状态(state-of-charge, SOC),然后利用开路电压与 SOC 之间的关系,采用模糊逻辑和最小二乘法实现 SOH 的在线评估<sup>[73]</sup>.

## 5 人工智能在电力系统中应用的不足与改进措施

人工智能领域的知名科学家,原 IBM Woston Group 的首席科学家周伯文博士在演讲中指出:“如今我们仅处于人工智能发展的最初级阶段,人工智能依然依赖于专家设置的体系结构,学习性也依赖于人工设计的算法.”《中国制造 2025》中则明确指出:“我国人工智能缺少重大原创成果,在基础理论、核心算法以及关键设备等方面差距较大.”不论是放眼于世界还是着眼于中国,人工智能技术发展面临的最主要问题是数据结构未成体系、算法自主学习能力较弱以及计算能力有限,这些问题也相应地制约了人工智能技术在电力系统中的应用.

由上文综述不难发现,人工智能在电力系统感知预测和安全维护领域的应用进展十分迅速,很多新颖的深度学习算法已经成功运用到负荷预测、新能源发电预测、故障诊断等方向中,这些尝试都取得了很大的突破也显露出一定的缺陷.随着智能传感技术逐渐完善,电力系统感知预测的历史数据容易获取,在坚实的数据基础下,配备大量高性能硬件、组成高计算能力设备成为人工智能应用于电力

系统感知预测领域的关键.亟需研究面向电力系统感知预测的高精尖软、硬件模块,研制软硬件结合的集成人工智能芯片;亟需通过处理器等技术的研提升计算处理能力,提高响应速度.数据是人工智能的基础,没有足够故障特征明显的数据的故障诊断无异于空中楼阁,智能电力故障诊断亟待研究能够精准捕捉故障数据的专用智能传感技术,亟待提出故障数据准确快速贴标签的方法,亟待解决故障数据库不完全问题.算法是人工智能的前提,相比于感知预测和安全维护,人工智能在电力管理控制领域的应用仍存在算法适应性较差的问题,如何改进基础算法,提出贴合领域特色的电力系统专用智能算法是研究的重点.

我国人工智能技术在电力系统各领域中的应用程度参差不齐,在积极应对人工智能技术主要问题的同时,要根据自身电力系统特点做出改进,后续研究可从以下方面扩展:

(1)构建分布式人工智能算法:纵观人工智能技术的发展历程,早期的专家系统、模糊逻辑、人工神经网络对事件的演化机理依赖较多,属于理论驱动方法;而近期的深度学习算法依赖于大量多源异构数据集,属于数据驱动方法.电力系统智能化使得电力数据量呈指数增长、数据结构复杂度大大增加,也对人工智能算法的计算能力提出了更高的要求.分布式人工智能(distributed artificial intelligence, DAI)是电力系统人工智能的发展方向之一,通过并行分布式计算提高计算能力.

(2)搭建电力系统智能化平台:谷歌、百度以及各人工智能相关企业都拥有自己的智能化平台,然而,现有的人工智能平台主要针对数据科学家与实验员设计,真正应用于实际的专业性工具仍然很少.未来电力系统中的人工智能将向混合智能方向发展,综合多种智能技术,取长补短,目的是搭建集成发电、输电、变电、配电、用电各环节与感知预测、管理控制、安全维护功能于一体的电力智能化平台,消除数据壁垒,真正提供人工智能学习运用的数据基础.

(3)完善电力系统数物结合思想:以深度学习为代表的人工智能新算法虽然更适合现代电力系统的分析与处理,但其结果的可信度仍然制约于算法的可解释性,这样的系统较容易受到虚假数据干扰.且在电力故障检测时,由于程序中断造成的故障输出难以与实际故障区分,大大降低了电力基础设施故障的诊断效率与精度.未来对电力系统进行智能分析与判断时要依靠数据而不是完全依赖数

据,出发点仍要放在电力系统基础理论上,找出物理模型与数据结构之间千丝万缕的联系,完善电力系统数物结合思想,并将数据结构与机理模型之间的联系高效地应用于电力系统分布式人工智能算法与智能化平台中,真正实现数物有机结合。

6 结论

人工智能技术是引领未来的创新性技术,在

电力系统应用领域仍有很大潜力,世界各国对前沿技术的研究也从未停歇.笔者以第三次人工智能热潮为契机,从世界各国对待人工智能的态度与出台的相关政策出发,对人工智能算法在电力系统中的应用方向进行了综述,深入挖掘了人工智能在电力系统领域的短板并对未来发展方向进行了展望,主要内容如表 1 所示,旨在推动人工智能技术在电力系统应用领域的发展。

表 1 人工智能在电力系统中的应用综述  
Tab. 1 Review on the Application of Artificial Intelligence in Power Systems

| 应用方向 | 应用领域          | 研究进展                          | 技术优势/瓶颈                | 下一步研究方向                                       | 长期愿景   |
|------|---------------|-------------------------------|------------------------|---|--|
| 感知预测 | 负荷预测          | 短期预测:ANN                      | 数据容易获取/<br>计算能力不足      | 研究高精尖软、硬件模块,研<br>制软、硬件结合的集成人工智<br>能芯片;研究处理器技术 | 构建分<br>布式人<br>工智能<br>算法<br>搭建电<br>力系统<br>智能化<br>平台<br>完善电<br>力系统<br>数物结<br>合思想 |
|      |               | 中长期预测:SVM                     |                        |   |  |
|      | 再生能源<br>发电预测  | 大数据高精度预测:LSTM                 |                        |   |  |
|      |               | 初步分级预测:ANN/SVM                |                        |   |  |
| 管理控制 | 能源消纳<br>与能量管理 | 大数据高精度预测:<br>LSTM/DBN/CNN/SAE | 数据需求量较<br>小/算法适应<br>性弱 | 改进基础算法;提出贴合领域<br>特色的电力系统专用智能<br>算法            |  |
|      |               | 能源规划:MAS                      |                        |   |  |
|      | 电压控制          | 能量管理:MAS/GT                   |                        |   |  |
| 安全维护 | 电力巡检          | ESs/ANN/GA/FL/MAS             | 算法适应性强/<br>故障数据不足      | 研究专用智能传感技术;研究<br>故障数据准确快速贴标签方<br>法;完善故障数据库    |  |
|      | 故障诊断          | 图像采集:机器人/无人机<br>特征提取:CNN      |                        |   |  |
|      |               | 电力线路故障:SVM/LSTM               |                        |   |  |
|      | 寿命评估          | 电力设备故障:DBN/SAE                |                        |   |  |
|      |               | 电力设备寿命:ANN/FL                 |                        |   |  |
|      |               | 电池寿命:ANN/FL                   |                        |   |  |

参考文献:

[1] HINTON G E, OSINDERO S, TEH Y W. A fast learning algorithm for deep belief nets [J]. Neural computation, 2006, 18(7): 1527-1554.

[2] 贾开,郭雨晖,雷鸿竹.人工智能公共政策的国际比较研究:历史、特征与启示[J].电子政务, 2018,189(9): 78-86.

[3] CALO R. Artificial intelligence policy: a primer and roadmap[J]. Social Science Electronic Publishing, 2017.

[4] 中华人民共和国国务院. 中国制造 2025 [R]. 2015,6.

[5] 中华人民共和国国务院.《国务院关于印发新一代人工智能发展规划的通知》[R].2017.

[6] 朱永利,尹金良.人工智能在电力系统中的应用研究与实践综述[J].发电技术, 2018, 39(2): 106-111.

[7] MOKHTARI S, SING J, WOLLENBERG B. A unit commitment expert system (power system control) [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(1): 272-277.

[8] DILLON T S. Artificial neural network applications to power systems and their relationship to symbolic methods[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1991, 13(10): 66-72.

[9] LU C N, WU H T, VEMURI S. Neural network based short term load forecasting[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 336-342.

[10] HIGHLEY D D, HILMES T J. Load forecasting by ANN[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(3): 10-15.

[11] ASAR A U, MCDONALD J R. A specification of neural network applications in the load forecasting problem[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1994,2(2): 135-141.

[12] HO K L, HSU Y, YANG C. Short term load forecasting using a multilayer neural network with an adaptive learning algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 141-149.

[13] KHOTANZAD A, HWANG R C, ABAYE A, et al. An adaptive modular artificial neural network hourly load forecaster and its implementation at electric

- utilities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1716-1722.
- [14] KIM K H, PARK J K, HWANG K J, et al. Implementation of hybrid short-term load forecasting system using artificial neural networks and fuzzy expert systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1534-1539.
- [15] KASSAEI H R, KEYHANI A, WOUNG T, et al. A hybrid fuzzy, neural network bus load modeling and predication[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 718-724.
- [16] 周中明,李建平,张鑫,等. ANN 在电力系统中期负荷预测中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003(2): 36-39.
- [17] CHEN B J, CHANG M W, LIN C J. Load forecasting using support vector Machines: a study on EUNITE competition 2001[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1821-1830.
- [18] ELATTAR E E, GOULERMAS J, WU Q H. Electric Load Forecasting Based on Locally Weighted Support Vector Regression[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2010, 40(4): 438-447.
- [19] CEPERIC E, CEPERIC V, BARIC A. A Strategy for Short-Term Load Forecasting by Support Vector Regression Machines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4356-4364.
- [20] LIU Q, SHEN Y, WU L, et al. A hybrid FCW-EMD and KF-BA-SVM based model for short-term load forecasting[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 226-237.
- [21] JIAO R, ZHANG T, JIANG Y, et al. Short-Term Non-Residential Load Forecasting Based on Multiple Sequences LSTM Recurrent Neural Network[J]. IEEE Access, 2018, 6: 59438-59448.
- [22] BEDI J, TOSHNIWAL D. Empirical Mode Decomposition Based Deep Learning for Electricity Demand Forecasting[J]. IEEE Access, 2018, 6: 49144-49156.
- [23] 戴彦,王刘旺,李媛,等. 新一代人工智能在智能电网中的应用研究综述[J]. 电力建设, 2018, 39(10): 1-11.
- [24] SIDERATOS G, HATZIARGYRIOU N D. An Advanced Statistical Method for Wind Power Forecasting[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 258-265.
- [25] LIU Y Q, SHI J, YANG Y P, et al. Short-term wind-power prediction based on wavelet transform-support vector machine and statistic-characteristics analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(4): 1136-1141.
- [26] BUHAN S, CADIRCI I. Multistage wind-electric power forecast by using a combination of advanced statistical methods[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(5): 1231-1242.
- [27] YANG M, LIN Y, HAN X S. Probabilistic wind generation forecast based on sparse bayesian classification and dempster-shafer theory[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 1998-2005.
- [28] SHI J, LEE W J, LIU Y Q, et al. Forecasting power output of photovoltaic systems based on weather classification and support vector machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(3): 1064-1069.
- [29] WANG H Z, WANG G B, LI G Q, et al. Deep belief network based deterministic and probabilistic wind speed forecasting approach[J]. Applied Energy, 2016, 182: 80-93.
- [30] 史佳琪,张建华. 基于深度学习的超短期光伏精细化预测模型研究[J]. 电力建设, 2017, 38(6): 28-35.
- [31] QURESHI A S, KHAN A, ZAMEER A, et al. Wind power prediction using deep neural network based meta regression and transfer learning[J]. Applied Soft Computing, 2017, 58: 742-755.
- [32] ZANG H. Hybrid method for short-term photovoltaic power forecasting based on deep convolutional neural network[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(20): 4557-4567.
- [33] KHODAYAR M, KAYNAK O, KHODAYAR M. Rough deep neural architecture for short-term wind speed forecasting[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 2770-2779.
- [34] 肖俊明,周谦,瞿博阳,等. 多目标进化算法及其在电力环境经济调度中的应用综述[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 1-9.
- [35] 雷霞,唐文左,李逐云,何锦宇,刘群英. 考虑区域综合能源系统优化运行的配电网扩展规划[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3459-3470.
- [36] 吴红斌,孙天赐松,蔡高原. 多微网互联系统的动态经济调度研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(5): 1426-1433.
- [37] KUMAR NUNNA H S V S, DOOLLA S. Multiagent-based distributed-energy-resource management for intelligent microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1678-1687.
- [38] SAAD W, HAN Z, POOR H V. Coalitional game theory for cooperative micro-grid distribution networks[C]//IEEE International Conference on Communications Workshops, 2011: 1-5.

- [39] FADLULLAH Z M, KATO N. Game-theoretic coalition formulation strategy for reducing power loss in micro grids[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2014, 25(9): 2307-2317.
- [40] 陈其森,汪湘晋,池伟,等.多微电网互联系统能量管理方法研究[J].电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 83-91.
- [41] 姜潇娜,张栋.基于人工智能的电力系统自动化控制[J].通信电源技术, 2018, 35(3): 140-141.
- [42] LE T L, NEGNEVITSKY M. Network equivalents and expert system application for voltage and VAR control in large-scale power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(4): 1440-1445.
- [43] LIU C C, TOMSOVIC K. An expert system assisting decision-making of reactive power/voltage control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1986, 1(3): 195-201.
- [44] HSU Y Y, YANG C C. A hybrid artificial neural network-dynamic programming approach for feeder capacitor schedule[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 1069-1075.
- [45] 娄信明,盛戈峰,等.改进遗传算法在水电站自动电压控制中的应用[J].电力系统自动化, 2000, 24(24): 41-44.
- [46] SU C T, LIN C T. A new fuzzy control approach to voltage profile enhancement for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(3): 1654-1659.
- [47] 杨胡萍,李威仁,左士伟,等.基于改进遗传算法的电力系统无功优化[J].郑州大学学报(工学版), 2015, 36(6): 66-69+75.
- [48] 潘哲龙,张伯明,孙宏斌,等.分布计算的遗传算法在无功优化中的应用[J].电力系统自动化, 2001, 25(12): 37-41.
- [49] YORINO N, ZOKA Y, WATANABE M, et al. An optimal autonomous decentralized control method for voltage control devices by using a multi-agent system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2225-2233.
- [50] 王翔.电力系统机器人的研究现状与展望[J].中国设备工程, 2018(13): 171-172.
- [51] 牛志华,石炎.巡检机器人在超特高压变电站的应用[J].山东电力技术, 2018, 45(6): 74-77.
- [52] 朱海,李小娇.浅谈变电站智能机器人巡检系统的应用[J].低碳世界, 2017(33): 147-148.
- [53] 李军锋,王钦若,李敏.结合深度学习和随机森林的电力设备图像识别[J].高电压技术, 2017, 43(11): 3705-3711.
- [54] 王榆夫,韩军,赵庆喜,等.基于无人机图像的电力杆塔倾斜检测[J].计算机仿真, 2017, 34(7): 426-431.
- [55] 祝志慧,孙云莲.基于 EMD 近似熵和 SVM 的电力线路故障类型识别[J].电力自动化设备, 2008, 7: 81-84.
- [56] ZHANG S, WANG Y, LIU M, et al. Data-based line trip fault prediction in power systems using LSTM networks and SVM [J]. IEEE Access, 2018, 6: 7675-7686.
- [57] ZHANG Q C, ZHANG Y, SONG W, et al. Transmission line fault location for single-phase-to-earth fault on non-direct-ground neutral system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1086-1092.
- [58] 李小叶,李永丽,张烁.基于混合智能算法的直流输电线路故障测距方法[J].电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 108-113.
- [59] 徐舜,杨毅,王奕,等.基于 IMF 能量矩和 SVM 的电力线路故障定位[J].电测与仪表, 2015, 52(11): 117-123.
- [60] REDDY M J, MOHANTA D K. Adaptive-neuro-fuzzy inference system approach for transmission line fault classification and location incorporating effects of power swings[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(2): 235-244.
- [61] CHEN Y Q, FINK O, SANSAVINI G. Combined fault location and classification for power transmission lines fault diagnosis with integrated feature extraction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 561-569.
- [62] SENOUSAOUI M E A, BRAHAMI M, Fofana I. Combining and comparing various machine-learning algorithms to improve dissolved gas analysis interpretation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(15): 3673-3679.
- [63] DAI J J, SONG H, SHENG G, et al. Dissolved gas analysis of insulating oil for power transformer fault diagnosis with deep belief network [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5): 2828-2835.
- [64] WANG T, HE Y, LI B, et al. Transformer Fault Diagnosis Using Self-Powered RFID Sensor and Deep Learning Approach[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(15): 6399-6411.
- [65] HONG Y, CHANG C P. Detection and correction of distorted current transformer current using wavelet transform and artificial intelligence[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(4): 566-575.

- [66] 范永哲,倪晓蕊,范旭日.超期服役机组寿命评估技术及研究进展[J].河北电力技术, 2003, 22(4): 7-8.
- [67] 杨启平,薛五德,蓝之达.变压器绝缘老化的诊断与寿命评估[J].变压器, 2004(2): 13-17.
- [68] 栗然,韩彪,卢云,等.基于随机模糊理论的变压器经济寿命评估[J].电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 9-16.
- [69] 杨丽徙,蔡红飞,任家印,等.模糊层次分析法的改进及其在变压器寿命评估中的应用[J].郑州大学学报(工学版), 2013, 34(3): 10-13.
- [70] 石光,吴春红,韩伟,等.基于随机模糊理论的电力变压器剩余寿命评估[J].电气应用, 2014, 33(21): 59-64.
- [71] GEBRAEEL N, LAWLRY M, LIU R, et al. Residual life predictions from vibration-based degradation signals: a neural network approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(3): 694-700.
- [72] SHAHRIARI M, FARROKHI M. On-line State of health estimation of VRLA batteries using state of charge [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(1): 191-202.
- [73] 刘大同,周建宝,郭力萌,等.锂离子电池健康评估和寿命预测综述[J].仪器仪表学报, 2015, 36(1): 1-16.

## Review on the Application of Artificial Intelligence in Power Systems

MA Min<sup>1</sup>, QIN Jia<sup>2</sup>, YANG Dongsheng<sup>2</sup>, ZHOU Bowen<sup>2</sup>, PANG Yongheng<sup>2</sup>, HAN Huanying<sup>2</sup>

(1.State Grid Liaoning Fuxin Power Supply Co. Ltd., Fuxin 123000, China; 2.School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** The development of electric power system was an important evaluation index of national economic level. With the continuous access of distributed renewable energy and the continuous expansion of power grid scale, the power system was gradually become more and more complicated. The power data with the characteristics of multi-source, heterogeneous, large amounts of typical big data, which puts forward higher requirements for the analysis and processing methods of power problems. Artificial intelligence was the key to the future science and technology progress. China has to promote the development of Artificial Intelligence to national strategy. The emergence and development of artificial intelligence could provide powerful tools for power system planning and design, simulation, coordination and control, prediction and estimation, diagnosis, and recognition. Power system was one of the main application fields of artificial intelligence in our country. This review began with the policy requirements of artificial intelligence in the world in recent years; and mainly discussed the main application direction of artificial intelligence in power system, which focused on perception prediction, management control and security maintenance. Then, based on the shortcoming of the application of artificial intelligence itself, the shortcomings of artificial intelligence technology in the field of electric power application was analyzed. In addition, based on the characteristics of various directions, the problems of artificial intelligence in different directions of electric power application was deeply explored. Finally, suggestions and prospects for the development of intelligent power was put forward in view of the overall development trend of artificial intelligence.

**Key words:** artificial Intelligence; power system; perception prediction; management control; security maintenance