

“智能电网+”研究综述

鞠平^{1,2},周孝信³,陈维江⁴,余一平^{1,2},秦川^{1,2},李若梅⁵,王成山⁶,
董旭柱⁷,刘健⁸,文劲宇⁹,刘玉田¹⁰,李扬¹¹,陈庆¹²,陆晓¹²,
孙大雁^{1,12},徐春雷¹²,陈星莺^{1,2},吴峰^{1,2},马宏忠^{1,2}

(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;

2. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心,江苏 南京 211100;

3. 中国电力科学研究院,北京 100192;4. 国家电网公司,北京 100031;

5. 中国电机工程学会,北京 100761;6. 天津大学 教育部智能电网重点实验室,天津 300072;

7. 南方电网科学研究院有限责任公司,广东 广州 510080;8. 陕西电力科学研究院,陕西 西安 710054;

9. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074;

10. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室,山东 济南 250061;

11. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;12. 国网江苏省电力公司,江苏 南京 210024)

摘要:智能电网 SG(Smart Grid)是电力系统发展的必然趋势,其核心要义便是“智能”,但目前智能水平还很低。而人工智能 AI(Artificial Intelligence)技术取得了突破性进展,为 SG 的发展提供了重大机遇和强大支撑。为此,提出“智能电网+(Smart Grid Plus,SG+)”的概念,涵义是借助 AI 技术实现 SG 的升级版,使电网具有更高级、更深层的人工智能,从而进一步提升电网运行的安全性、经济性、可持续性。首先综述 AI 的研究进展,指出 AI 并非万能、也非无能;然后综述 SG 的研究进展,指出 SG 发展中“三高”(高比例新能源并网、高比例电力电子装置、高比例新负荷接入)和“三多”(多种能源相结合、多种网络相结合、多种主体相结合)的趋势。在回顾 AI 在电力行业应用的基础上,结合以深度学习为代表的第三代 AI 技术的发展,对深度学习等 AI 技术在 SG 适用的相关领域进行分析和展望。

关键词:智能电网;人工智能;深度学习;智能电网+

中图分类号:TM 74

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.001

0 引言

人工智能 AI(Artificial Intelligence)在半个多世纪发展历程中,几经起伏。近年来,随着大数据时代的到来和计算机性能的飞跃,AI 技术及应用有了质的发展,以深度学习为代表的机器学习算法在图像识别和语音识别等领域的应用取得了极大的成功,使 AI 受到学术界和产业界的广泛关注。伴随着 AI 技术发展的起伏,AI 在电力行业的应用也经历了几个阶段。当前,以深度学习为代表的第三代 AI 技术在电力行业的应用才刚刚起步。

智能电网 SG(Smart Grid)是能源与电力行业发展的必然趋势,欧美及中国等许多国家均在积极推进 SG 技术的研究与应用。虽然发展路径存在差异,但其核心要义都是“智能”。目前,SG 的物理建设取得较大进展,但其智能水平却非常有限。随着 SG 逐步建设,为 AI 技术在 SG 的应用提供了条件。为此,

借助 AI 来提升 SG 的智能水平,具有重要的研究意义。

本文首先回顾 AI 和 SG 的发展历程和技术热点,分析 AI 技术特别是第三代 AI 技术的特点和 SG 发展的需求,探寻两者的结合点;其次介绍 AI 技术不同发展阶段在电力行业不同领域的应用,从电力系统电源侧、电网侧和负荷侧分析并展望以深度学习为代表的第三代 AI 技术在电力行业的应用前景。

1 AI 研究综述

1.1 AI 的重要性

AI 有多重要? 有一句话概括得很到位:谁能引领 AI,谁就掌握了人类的未来。目前,世界各国都开始重视 AI 的发展。2016 年 5 月,美国发布了《为人工智能的未来做好准备》的报告;2016 年 12 月,英国发布了《人工智能:未来决策制定的机遇和影响》;2017 年 4 月,法国发布了《国家人工智能战略》。

我国政府更是高度重视,在《新一代人工智能发展规划》中明确指出:AI 将成为国际竞争的新焦点,经济发展的新引擎,并带来社会建设的新机遇。2017 年 6 月,首届世界智能大会在天津召开。中国工程院院士潘云鹤在大会主论坛作了题为“中国新

收稿日期:2018-02-23;修回日期:2018-03-02

基金项目:111 引智计划“新能源发电与智能电网学科创新引智基地”资助项目(B14022);国家自然科学基金资助项目(51407060,51422701)

Project supported by “111” Project of “Renewable Energy and Smart Grid”(B14022) and the National Natural Science Foundation of China(51407060,51422701)

一代人工智能”的主题演讲,报告中概括了世界各国在 AI 研究方面的战略,并提出 AI 正走向 2.0 时代^[1],而中国应当起到关键的促进作用。2017 年 11 月,科技部召开“新一代人工智能发展规划暨重大科技项目启动会”,全面推进规划和重大科技项目启动实施,并公布了第一批国家 AI 开放创新平台:依托百度公司建设自动驾驶国家新一代 AI 开放创新平台;依托阿里云公司建设城市大脑国家新一代 AI 开放创新平台;依托腾讯公司建设医疗影像国家新一代 AI 开放创新平台;依托科大讯飞公司建设智能语音国家新一代 AI 开放创新平台。2018 年 1 月,我国召开了国家 AI 标准化总体组、专家咨询组成立大会,并发布了《人工智能标准化白皮书》(2018 版)^[2],对 AI 及其产业发展提供了有力支撑。

1.2 AI 的概念

AI 作为一门前沿交叉学科,其定义一直存有不同观点。从普通人认知的角度,AI 定义分为 4 类:像人一样思考的系统、像人一样行动的系统、理性地思考的系统、理性地行动的系统^[3]。从系统及应用角度,AI 是利用数字计算机或者数字计算机控制的机器模拟、延伸和扩展人的智能,感知环境、获取知识并使用知识获得最佳结果的理论、方法、技术及应用系统^[2]。从科学研究的角度,AI 科学的主旨是研究和开发出智能实体,属于工程学,是一门集数门学科精华的尖端综合学科。

根据 AI 是否能真正实现推理、思考和解决问题,又可以将 AI 分为弱人工智能、强人工智能和超人工智能 3 个层次^[4]。在 AI 60 多年的发展过程中,其基本思想大致可以分为 4 个流派:符号主义、连接主义、行为主义和统计主义^[2,5]。这 4 个流派从不同侧面抓住了智能的部分特征,并都取得了里程碑式的成就。然而,迄今为止,基于上述 4 个流派设计制造的 AI 系统都还是实现特定功能的专用智能,都还是弱人工智能。

AI 的技术框架如图 1 所示^[6],其从下往上依次为基础设施层、算法层、技术层和应用层。基础设施层包括硬件/计算能力和大数据等;算法层包括机器学习、深度学习等;技术层包括计算机视觉、语音处理、自然语言处理、规划决策系统、大数据分析等;应用层包括金融/医疗/安防/交通/游戏/SG 等。

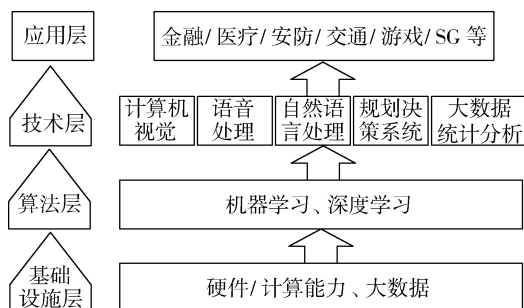


图 1 AI 的结构框架

Fig.1 Framework of AI

视觉、语音处理、规划决策系统、大数据统计分析等;应用层则是行业解决方案,如金融、医疗、安防、SG 等。

1.3 AI 的发展

1.3.1 AI 的历程

AI 始于 20 世纪 50 年代。60 多年来,AI 的发展经历了 3 个阶段,其发展历程如图 2 所示。

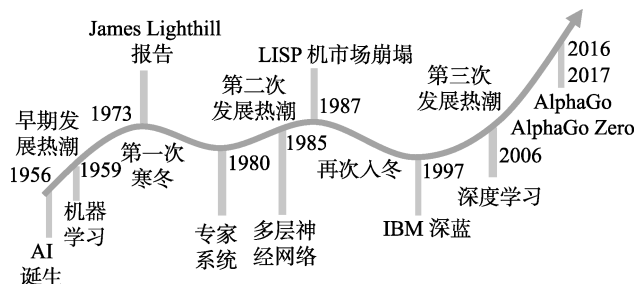


图 2 AI 发展历程

Fig.2 Development history of AI

第一阶段是 20 世纪 50 年代到 80 年代。1956 年,美国 Dartmouth 会议首次确立了 AI 的概念,标志着其作为一个研究领域的正式诞生。1959 年,Arthur Samuel 提出了机器学习,推动 AI 进入了第一次繁荣期。第二阶段是 20 世纪 80 年代到 90 年代末。专家系统和突破早期感知器局限的三层神经网络的出现,带来了 AI 的第二次繁荣期。然而,在这 2 个发展阶段的后期,受限于理论算法以及计算能力的发展水平,AI 的发展均遇到了瓶颈,并进入了萧瑟期。第三阶段是从 21 世纪初至今。随着大数据的出现、计算能力的提升以及理论算法的革新,AI 在多个应用领域取得了突破性的进展,迎来了第三次发展热潮^[3]。

1997 年,IBM 深蓝(Deep Blue)战胜国际象棋冠军是 AI 具有里程碑意义的成功。2006 年,加拿大多伦多大学 Geoffrey Hinton 在 Science 杂志发表文章,开启了深度学习^[7-8]的浪潮。2016 年,谷歌 DeepMind 团队开发的 AlphaGo^[9]围棋机器人击败了世界冠军李世石;2017 年,DeepMind 团队在 Nature 杂志发表文章,报道了新一代的围棋机器人 AlphaGo Zero^[10],其无需人类经验,通过自我对弈进行深度强化学习,并以 100:0 的成绩战胜了 AlphaGo。此外,IBM 的 Watson 医疗机器人^[11]、谷歌公司的谷歌大脑、微软公司的实时口译系统、苹果公司及亚马逊的智能助理均是 AI 第三次发展热潮的杰出成果代表。

在我国,AI 的发展已经具备一定的技术和产业基础,在数据、平台、应用等领域聚集了一批 AI 企业,在部分方向取得了阶段性成果并向市场化发展。例如,AI 在金融、安防、客服等行业领域已经实现应用^[6,12],语义识别、语音识别、人脸识别、图像识别等

AI 技术的精度和效率已经远超人工^[2]。

限于篇幅,下文着重对机器学习、深度学习等算法的研究进展进行综述。

1.3.2 机器学习

机器学习研究计算机如何模拟或实现人类的学习行为,以获取新的知识或技能,是 AI 的核心。根据学习模式、学习方法的不同,机器学习存在不同的分类方法^[2]。

根据学习模式,可以将机器学习分为有监督学习、无监督学习、半监督(强化)学习。监督学习是利用已标记的有限训练数据集进行机器学习,其输入输出均已知,类似于教师教学。无监督学习则是利用无标记的数据描述隐藏在未标记数据中的结构/规律,也即输入已知,输出未知,类似于自学。半监督(强化)学习是智能系统从环境到行为映射的学习,以使奖励函数值最大。其输入已知,输出少量已知,类似于导学。

根据学习方法,又可以将机器学习分为传统机器学习和深度学习等。

传统机器学习是从一些观测样本出发,试图发现规律(提取特征),实现对未来数据行为或趋势的预测。相关算法包括逻辑回归、隐马尔科夫方法、支持向量机方法、K 近邻方法、三层人工神经网络方法、Adaboost 算法、贝叶斯方法以及决策树方法等^[13-14]。传统机器学习方法已经在自然语言处理、语音识别、信息检索等许多领域获得了广泛应用。然而,传统机器学习方法具有一定的局限性:其性能受训练样本(如样本的完备性和正交性)影响大;一般需要人工选取特征;一般采用监督学习方法;属于浅度学习,所得知识一般属于浅度知识等。

深度学习由 Hinton 等人于 2006 年提出,其产生的背景有 2 个:一是新的测量、通信技术带来的大数据积累,人工难以处理,难以从中发现特征;二是由于大规模计算集群、GPU(图形处理器)等并行、异构计算的兴起带来的运算力提升。深度学习的特点可以归纳为:(1)海量的学习样本;(2)多隐层的网络结构(网络结构超过 3 层);(3)利用无监督或者半监督的学习算法对隐层网络进行贪心逐层预训练;(4)从低层特征出发,自动学习、发现数据的高级(分布式)特征组合。

典型的深度学习算法包括深度置信网络^[8]、卷积神经网络^[15-16]、受限玻尔兹曼机^[17-18]和循环神经网络^[19-20]等。其中,卷积神经网络常被应用于空间性分布数据;循环神经网络在神经网络中引入了记忆和反馈,常被应用于时间性分布数据。

深度学习的诞生开启了 AI 的第三次发展浪潮,目前已有多个企业或科研机构开发了相应的开源深度学习框架,如 TensorFlow、Caffe/Caffe2、CNTK、

Torch/PyTorch、MXNet 等,为深度学习的研究和应用提供了强有力支撑。

1.3.3 AI 的展望

以深度学习为代表的 AI 方法在多个应用领域,尤其是大规模数据集的应用取得了突破性的进展,但现阶段学习“深度”仍然不够,笔者认为还有以下问题值得进一步研究。

(1)在学习模式方面。目前,标记数据的特征学习(监督学习)仍然占据主导地位。深度学习的贪心逐层预训练方法只是利用无监督学习对多个隐层进行预训练,最终一般还是要采用监督学习算法对整个网络的权值进行全局修正。而真实世界存在的往往是海量的无标记数据,人工难以发现其中的特征,因此无标记数据的特征学习(无监督学习)还需要进一步研究。

(2)在模型结构方面。目前的网络结构还是平面网络,而人类大脑不仅是平面分布成层,还有纵向排列。因此,为了实现更深层次的学习,还需要进一步研究相应的模型结构。例如,目前 Hinton 正在搭建的“胶囊”人工神经网络^[21],其模仿人类大脑皮层中的微柱体,把关注同一个类别或者同一个属性的神经元打包集成成一个胶囊,并已经解决了不同胶囊间连接权重(路由)的学习。

(3)在训练速度及精度方面。深度神经网络结构复杂,模型规模庞大。在海量样本数据集下,模型规模越大,训练速度越慢。如何在保证一定训练精度的前提下提高训练速度,仍然需要进一步研究。为此,深度学习与其他智能方法的结合可能是一种思路。例如,南京大学周志华教授提出的深度森林学习^[22],其结合了深度学习的概念与决策树方法,既可以适用于不同规模的样本数据,而且在同等的训练精度下,训练更加快速。

1.4 关于 AI 的一些思考

相比传统的浅层机器学习方法,以深度学习为代表的现代 AI 技术正变得更加智能,能够学习到更深层的知识。然而,从科学研究以及实际应用的角度,则需要辩证地看待 AI。

一方面,AI 并非万能,如丁肇中教授所言,其无法发现相对论、量子力学、暗物质等,想象力、创造性还是人的优势。

另一方面,AI 也非无能,它可以辅助人类减轻脑力和体力劳动,不应该一概排斥、拒绝。所以,关键是要找准“AI+”的结合点,即采用传统方法、人工方法难以奏效,而借助 AI 却很有效的领域。

2 SG 研究综述

2.1 SG 的重要性

发展 SG 是国家的能源战略需求。国家提出

了“四个革命、一个合作”的新能源战略,而 SG 是实施新能源战略的重要平台,对调整我国能源结构、节能减排、应对气候变化具有重大意义。为此,SG 连续 6 年写入我国政府工作报告,并连续入选国民经济和社会发展的“十二五”和“十三五”规划纲要。在“十三五”规划纲要中,明确指出:加强智能电网建设,提高电网与发电侧、需求侧交互响应能力。

发展 SG 是电力系统的行业需求^[23]。随着能源行业的变革以及新技术的涌现,SG 发展具有如下趋势:(1)“三高”,一是高比例新能源并网(包括风力发电、太阳能发电、海洋能发电等),二是高比例电力电子装置(包括源、网、荷等方面),三是高比例新负荷接入(包括电动汽车、分布式发电、分布式储能、变频空调、LED 照明等);(2)“三多”,一是多种能源相结合(包括电、热、气等),二是多种网络相结合(包括电网、信息网、气象网、交通网等),三是多种主体相结合(包括供电多元、电力市场等)。

2.2 SG 的概念

目前,由于各国自身国情以及发展 SG 的驱动力不尽相同,SG 的定义尚未统一。美国能源部将 SG 描述为:利用数字化技术改进电力系统(涵盖发电、输配电网、用电,包括分布式发电和分布式储能)的可靠性、安全性和运行效率^[24]。欧盟对 SG 的描述是:可以智能化地集成所有接于其中的用户(包括电力生产者、消费者和产消合一者)的行为和行动,保证电力供应的可持续性、经济性和安全性^[24]。中国国家电网公司则提出坚强 SG,即以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强网架为基础,以通信信息平台为支撑,包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度 6 大环节,涵盖所有电压等级,实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合,具有坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放和友好互动内涵的现代电网^[25-26]。概括而言,SG 将融合和集成新的量测、通信、控制和决策技术,实现电力行业的技术变革,其核心要义是“智能”。

由于世界各国对 SG 发展的侧重点不同,其对 SG 的特征描述也不相同。如美国将 SG 的特征描述为:自愈、安全、兼容、交互、协调、高效、优质、集成^[24]。我国将 SG 的特征描述为:数字化、信息化、自动化、互动化^[27]。综合国内外研究,本文引用文献^[28]的观点进行介绍,将 SG 的主要特征归结为灵活性、可观测性和可控性、互操作性 3 个方面。

a. 灵活性。灵活性是指系统功率/负荷发生较快的变化,造成较大功率不平衡时,通过调整发电或负荷保持可靠供电的能力^[24]。功率的不平衡可能由于负荷变化而引起,也可能由间歇式能源发电功率的变化而引起。SG 中,间歇性可再生能源的大量

接入,使得电源的不可控性增加,灵活性降低。而另一方面,电动汽车等主动负荷的接入,又使得需求侧可控性增加,灵活性加大。

b. 可观测性和可控性。SG 连接着众多的不可控源和灵活源,为保证电网的安全稳定运行,需要进一步提高电网的可观测性和可控性。如基于广域测量系统(WAMS)对电网的运行状态进行监测,通过柔性交流输电(FACTS)技术、高压直流技术等,对输电线路进行控制,都是以提高电网可观测性和可控性为目的。

c. 互操作性。互操作性是指保证多个网络、系统、设备、应用或元件之间相互通信以及在不需要过多人工介入即可有效、安全、协调运行的能力^[24]。提高 SG 的灵活性、可观测性和可控性,离不开先进的传感技术、网络通信技术以及自动化技术。SG 是现代量测、通信、控制和决策技术的结合体,需满足互操作性。

2.3 SG 的发展

2.3.1 SG 的历程

美国于 2000 年提出了 Intelligent Grid 的未来电网发展概念。2003 年,美国能源部发布了“Grid 2030”计划并开始启动相应的研究工作^[29]。欧盟于 2005 年正式成立了“智能电网(Smart Grids)欧洲技术论坛”,并于 2006 年制定了《欧洲未来电网的愿景和策略》等一系列文件,提出了建设 SG 的愿景和策略^[30]。2008 年美国能源部出版了一份报告^[31],也采用了“Smart Grid”这一术语,自此 SG 这个称谓被全世界普遍采用。2009 年,随着奥巴马经济复兴计划的出台,SG 被提升为美国的国家战略^[32]。

在我国,国家电网公司于 2005 年通过“SG186”工程提出了数字化电网的建设规划^[32]。2007 年,华北电网公司和华东电网公司分别对 SG 进行立项研究^[33-34]。2008 年,中美清洁能源合作组织会议和中美绿色能源论坛分别设立了“Smart Grid”special session,探讨 SG 的发展思路。2009 年,国家电网公司正式公布了 SG 发展计划,并提出了到 2020 年全面建成坚强 SG 的目标^[27]。

SG 发展过程中,美国关注电力网络基础架构的升级更新,同时最大限度利用信息技术,实现机器智能对人工的替代,建设满足智能控制、智能管理和智能分析为特征的灵活应变的 SG。欧洲结合自身电网的发展背景,更关注可再生能源和分布式能源的发展,在电力需求趋于饱和后提高供电可靠性和电能质量,带动整个行业发展模式的转变,满足用户可接入性、可靠性、经济性的多元化电力需求。我国则从自身特点出发,以特高压电网为骨干网架、各电压等级电网协调发展的坚强物理电网为基础,建设现代先进传感技术、通信技术、信息技术、计算机技术

和控制技术与物理电网高度集成而形成的 SG。

2.3.2 我国 SG 的发展

近年来,我国的 SG 建设取得了丰硕的成果^[25-26],开展了数百项 SG 试点项目建设,试点范围涵盖了发电、输电、配电、用电、调度 6 大环节和通信信息平台,并根据技术成熟度和应用情况,陆续选择了 SG 调度系统、配电自动化、用电信息采集等 14 类项目进行推广建设^[28]。南方电网公司也建设了 SG 技术研究平台,并开展了海南省级电网、广州中新知识城智能配电网、珠海万山岛智能微电网等一批示范工程建设。归纳而言,我国在 SG 的建设方面,取得了如下一系列突出成果。

a. 一批智能输配电技术得到应用,提升了电网的可控性和灵活性,从而提升了电网输送能力和安全稳定水平。2015 年 12 月,我国首个统一潮流控制器(UPFC)工程——南京 220 kV 西环网 UPFC 工程正式投运^[35-36];2017 年 12 月,苏州南部电网 500 kV UPFC 工程正式投运^[37]。2016 年 6 月,我国首套源网荷友好互动精准负荷控制系统在江苏电网投入运行,可以提供 3 500 MW 秒级准实时控制和 1 000 MW 毫秒级紧急控制能力^[38]。

b. SG 调度技术支持系统全面推广应用,全面提升了大电网安全运行水平。研发了 SG 调度技术支持系统 D5000,并在 31 个省级以上电网成功投运,大幅提高了大电网的可观测性和可控性,多调度中心协同运行和在线安全预警能力、电网运行经济性和新能源消纳能力以及电网调度抵御重大自然灾害和集团式网络攻击能力显著增强^[39]。

c. 智能变电站和配电自动化加速推广应用,显著提升了电网的互操作性。新建并投运了大批量智能变电站,实现了全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化;在全国范围内多个城市核心区建设配电网自动化系统,提升了配电网的智能化运行水平^[28]。

d. 开展了电网大数据平台的建设及应用探索。在国家电网范围内,建设并推广了调度系统 D5000、WAMS、大规模的用电信息采集(AMI)系统等数据采集系统,积累了海量的电网大数据。在此基础上,中国电力科学研究院等单位在技术领域开展了大数据平台的建设探索,如基于 SG 统一数据模型开展了调控业务领域及配用电业务领域的融合等。在应用领域,启动了大数据挖掘和分析的研究工作,如基于大数据的配变重过载预警研究及应用等^[40]。

2.4 关于 SG 的一些思考

SG 的核心要义是“智能”或者说“人工智能”。但到目前为止,电网的智能水平还处在浅层阶段,远远不能够满足电网的需要。

纵观我国 SG 的建设成果,现有的成果还主要集

中在智能输配电装备、数据系统构建等硬件层面,而大数据的挖掘分析应用等软件层面的研究应用工作才刚刚起步。

AI 技术的快速发展,为 SG 的发展提供了绝好的机遇,也提供了强大的手段。所以,SG 的发展已经到了升级阶段,要走向更高层次的深度智能。为此,笔者提出了“智能电网+(Smart Grid Plus,SG+)”的概念,涵义是借助 AI 技术实现 SG 的升级版,使电网具有更高级、更深层的 AI,从而进一步提升电网运行的安全性、经济性和可持续性。

3 “SG+”研究展望

3.1 AI 在电力行业的应用

AI 技术在电力行业的应用历程随着 AI 技术的发展阶段不同可以分为 2 个阶段:第一个阶段对应于 AI 技术发展的第二阶段,主要表现为专家系统和人工神经网络(ANN)在电力系统各领域的应用;第二个阶段对应于 AI 技术发展的第三阶段,主要表现为以深度学习为代表的第三代 AI 技术在电力行业的应用。从 20 世纪 80 年代中期开始,专家系统和 ANN 方法在电力系统各领域应用的研究逐步展开并成为当时的热点。文献[41-42]介绍了当时专家系统在电力系统中研究及应用的基本情况,并很好地总结了电力专家系统的特点及其在相关研究和应用中得到的启示及问题。文献[43-45]总结了当时 ANN 方法的基本原理和特点,介绍了 ANN 在静态和动态安全分析、警报处理与故障诊断、电力系统负荷预测、配电网线损计算、机组最优组合、发电规划及拓扑可观性分析、经济运行、ANN 的电路实现、电力系统的控制等领域的研究成果。经历 AI 技术在电力行业应用的第一阶段,研究人员在学术上取得了很大的发展,发表了一些优秀的论文,积累了很多经验,但是由于大数据基础、算法技术和硬件计算性能等方面的限制,AI 的应用并没有取得突破性进展,在电力系统的应用也逐步冷却,趋于平淡。

近年来随着以深度学习为代表的第三代 AI 算法的快速发展和硬件计算性能的几何增长,AI 技术在电力行业的应用逐步进入第二个阶段。而当前 SG 建设面临高比例新能源、高比例新负荷和高比例电力电子等问题的严峻考验,同时存在多能源融合、多网络融合和多主体融合需求,为了保障电网更安全高效的运行,提高 SG 的智慧性、柔韧性,解决不确定性带来的问题迫在眉睫。SG 中采集的相量测量单元(PMU)和数据采集与监视控制(SCADA)等海量动态和稳态数据,以及用户电量数据、故障录波数据等其他数据,为 AI 和 SG 的结合提供了大数据基础。同时现代计算机硬件技术的快速发展为 AI 在电力行业的应用提供了高性能的计算能力。“AI+

电力”成为 SG 发展的必然趋势,利用 AI 技术以及互联网平台,让 AI 技术与电力行业进行深度融合,促进电力行业安全高效运行,创造新的发展。通过第三代 AI 技术实现 SG 的升级版,使电网具有更高级、更深层的 AI,从而进一步提升电网运行的安全性、经济性和可持续性,实现“SG+”。

3.2 电力大数据研究展望

大数据是 SG 的必要条件,也是实现“AI+电力”的基础,文献[46]阐述了 SG 大数据的基本概念、国内外 SG 大数据研究和工程应用现状,总结了大数据的理论基础和技术体系,提出了 SG 大数据研究框架和技术发展路线。文献[47-48]在演绎大数据基本概念、结构类型及本质特征的基础上,归纳了电力大数据的特点,探索了电力大数据的应用,认为大数据技术将成为提高电力流效率及防御大停电灾难的基础。文献[49]在分析大数据、云计算、SG 关系的基础上,给出了具有通用性的电力大数据平台总体架构,并从电力大数据的集成管理技术、数据分析技术、数据处理技术、数据展现技术 4 个方面探讨符合电力企业需求的大数据关键技术,并分析了电力大数据关键技术在新能源并网、风电机组安全评估、电网灾难预警上的应用。在具体大数据挖掘方面,文献[50]提出了一种基于大数据平台的电网故障追踪方法,将故障诊断数据源延展至变电站层面。文献[51]将大数据挖掘方法应用场景扩展到深度融合“信息-物理-社会”的复杂系统,展望了深度学习、转移学习、多源数据融合在能源系统中的广阔应用前景。

大数据是 AI 技术应用的根本,大数据挖掘和分析也是 AI 技术的主要优势。当前电力系统已有 EMS/DMS、WAMS、故障录波、智能电表等大数据源,但还难以完全满足 AI 技术的需求,根据具体应用需求还有必要接入其他信息数据,例如气象信息、设备振动信息等。对各类设备,从输电系统到配电系统有必要增加面向分析需求的传感器,例如在 220 kV 及以下电压等级安装 PMU 动态量测,在各发电机、变压器等设备安装故障诊断用量测传感器。在此基础上,根据不同应用及需求,实现多数据源的深度融合。另外,由于电力系统很多领域中可能没有能够满足 AI 技术需要的足够多的样本数据,例如当前电网已没有很多实测大扰动故障样本,因此需要在 AI 算法方面实现突破,从算法上实现逻辑推理和深度学习的深度融合,借助小样本学习获得理想的学习结果。

3.3 电源侧研究展望

目前 AI 技术在电源侧的应用主要针对可再生能源接入后的功率波动不确定性,基于深度学习在预测方面的优势,开展基于气象因素的风电、光伏等

可再生能源发电功率预测研究。例如文献[52]采用深度信念网络 DBN(Deep Belief Network)的深度学习方法进行光伏功率预测,分析了影响模型准确性的主要因素,发现其具有更好的预测准确性。文献[53]借助深度学习在预测工作上的强大能力,综合使用 DBN、AutoEncoder 和长短记忆递归神经网络(LSTM)等不同的深度学习和 ANN 算法进行光伏发电功率预测,取得较好的效果。文献[54]针对可再生能源发电,采用堆叠自动编码器(SAE)和堆栈降噪自编码器(SDAE)神经网络进行超短期和短期风速预测,结果显示深度神经网络模型在处理风速数据中的不确定性上要优于传统的人工神经网络模型,从而提高预测精度。文献[55]介绍了巴西东北区域借助深度学习在分类和模式识别中的优势开展风速预测研究的情况。文献[56]采用预测深度玻尔兹曼机 PDBM(Predictive Deep Boltzmann Machine)和相应的学习算法进行短期和长期风速预测,PDBM 随机模型适用于捕捉风速的概率特性,在处理估计非线性和非平滑函数上具有很强的能力。文献[57]综合应用小波变换 WT(Wavelet Transform)、DBN 和分位数回归方法 QR(Quantile Regression)对中国和澳大利亚的实际风电场数据进行风速预测,在应对风速高阶非线性和非平稳特性上取得较好的效果。

在电源侧,除可再生能源发电功率预测外,借助深度学习等 AI 方法在应对不确定性方面的优势,开展风电场、风电场群等可再生能源接入“即插即用”式建模,借助 AI 模式识别方面的优势,实现常规发电机组、风电机组等发电设备的故障诊断与预警都具有较大的应用前景。

3.4 电网侧研究展望

电力系统暂态稳定评估及控制往往先建立系统特征量与暂态稳定性之间的映射关系,通过离线仿真获得大量失稳样本,实际电网运行中遇到相应运行状态时通过映射关系快速评估稳定性及进行控制。针对这一特点,深度学习方法在映射关系的学习上具有明显的优势,因此在电网侧暂态稳定评估与控制中取得的成果较为显著。文献[58]将深度学习方法应用于电力系统稳定评估的研究中,基于稳定域边界的概念解释了机器学习方法得到的暂态稳定评估规则的物理意义,提出了稳定评估方法与流程,最终实现基于大数据技术深度学习的暂态稳定评估。文献[59-60]亦将深度学习的思想和模型引入电力系统暂态稳定评估中,分别提出了一种基于 DBN 和 SAE 的电力系统暂态稳定评估方法,具有较优越的评估性能。文献[61]根据单机能量函数理论,组合搜索得到一组严重受扰机组,将受扰严重机组的变量构建成原始输入特征,经过特征选择后,

作为暂态稳定评估模型的输入,实现基于受扰严重机组特征及机器学习方法的电力系统暂态稳定评估。文献[62]对于电网控制策略这一复杂决策问题,将 AI 方法引入决策控制,提出了一种基于深度强化学习的电网切机控制策略,利用深度卷积网络提取电网运行特征,构建深度强化学习框架,给出切机控制决策。文献[63]基于机器学习领域发展起来的改进约束谱聚类算法,进行电网主动解列断面搜索,并提出了解列后孤岛的优化调整策略。

借助 AI 方法在优化学习和模式识别上的优势,在电力系统运行优化和电网状态诊断等方面也开展了相关应用研究。文献[64]针对传统 AI 在随机复杂环境的适应及交互能力较低的问题,提出了一种具有记忆自学能力的快速动态寻优算法,应用于电力系统无功优化求解,寻优速度得到大幅提高。文献[65-66]结合电力行业特征,提出了一种内嵌专业知识和经验的机器学习方法,并将其应用于配电网健康指数诊断,可显著提高安全性和鲁棒性。

在电网侧电力系统仿真分析领域,随着特高压交直流联网,我国电网规模非常大,在仿真分析中遇到很多问题,例如潮流不收敛原因查找、不收敛时如何调整等,能否借助 AI 的方法加速潮流收敛过程值得研究。在稳定计算领域,稳定类型多样,例如电压稳定、暂态稳定、频率稳定、小干扰稳定等,能否通过 AI 技术实现不同稳定特征量识别、稳定控制措施的自动推荐匹配。同时由于当前电力系统实际稳定破坏事故样本非常少,而在日常电网小扰动积累的样本非常多,能否借助 AI 技术,一方面基于微小扰动下的电网响应实现动态特征提取、扰动源识别,实现电网动态安全的预警预控;另一方面通过实际电网微小扰动响应验证仿真模型的准确性。在其他方面,例如电网全景化运行监测、多层一体化精细无人调度、设备管理、设备健康程度诊断等也有广阔的应用前景。

3.5 负荷侧研究展望

在负荷侧,深度学习的应用主要聚焦在负荷预测领域,特别是单个家庭用户负荷随机性、不确定性大带来的预测难题。文献[67]基于海量的智能电表电量数据采用时变 C-vine 混合模型聚类(CVMM)算法进行用户分类,为供应商需求侧服务。文献[68]基于 LSTM 深度学习方法进行短期智能电表级用户负荷预测,结果显示优于传统的时间序列和卡尔曼滤波负荷预测方法。文献[69]针对传统电网总负荷或变电站负荷预测方法不适用于单个家庭负荷预测的问题,基于 LSTM 和递归神经网络 RNN (Recurrent Neural Network) 深度学习方法进行单个家庭用户的短期负荷预测,解决了负荷随机波动和不确定性大的难题。文献[70]将 PDRNN (Pooling-

based Deep Recurrent Neural Network) 深度学习方法应用于家庭负荷预测,预测结果明显优于 ARIMA、SVR 和 RNN 等传统方法。

当前随着负荷侧风电、光伏等大量分布式电源接入带来的功率随机波动性,以及空调等温度敏感型负荷的增多,地区电网超短期和短期负荷预测不准确已成为困扰电网运行调度的主要问题之一。基于负荷历史数据和气象数据,借助深度学习等 AI 技术在预测上的优势开展相关研究可提高地区电网负荷预测的准确性。此外,在负荷建模领域,借助深度学习方法在分类上的优势,基于用户侧营销系统与调度系统海量数据,借助深度学习技术,从用户和变电站 2 个层面,实现非侵入式识别底层用户的负荷成分,评估柔性负荷比例,掌握负荷时变性规律,进而可能解决负荷建模中负荷时变性的难题。

4 结语

随着当前 SG 发展具备了超强计算性能和大数据条件,第三代 AI 技术的突破将为 SG 的发展带来颠覆性的影响,通过“AI+电力”的发展,建设“SG+”,保障电网的安全高效运行,成为电力行业发展的必然趋势。结合第三代 AI 技术的特点和 SG 建设面临的需求和挑战,在 AI 实际应用方面提出以下几点建议和设想:

a. AI 技术本身的发展还没有完全成熟,尚未达到人类思维的程度,当前还是基于大数据、计算性能和算法优势比人类分析更快、量更大、效率更高,在电力系统哪些领域适用,能解决什么问题,还需要深入研究;

b. AI 在电力行业的应用必须要面向需求,其重点应用领域可以发挥 AI 优势,代替危险的工作,实现靠现有技术难以完成的工作,或者可以极大提高效率,带来很大效益,兼顾电网安全性和经济性,有助于实现 SG 安全、高效、清洁、低碳的目标;

c. AI 应用领域必须具备大数据基础,电力系统目前已有的 EMS、WAMS、故障录波、智能电表等数据虽然很大,但根据具体需求还有必要对各类设备,从输电系统到配电系统增加配备传感器,同时借助 AI 技术发展,突破逻辑推理和深度学习的深度融合,借助小样本学习获得好的学习结果;

d. 借助 AI 在预测、识别以及决策支持方面的优势,在依赖于数据分析、依赖于经验的领域,在电力系统的设备管理、电力系统运行控制、电力系统的灾害防御、电力市场交易领域存在广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] PAN Yunhe. Heading toward Artificial Intelligence 2.0[J]. Engineering, 2016, 2(4): 51-61.
- [2] 中国电子技术标准化研究院. 人工智能标准化白皮书(2018

- 版)[R]. 北京:中国电子技术标准化研究院,2018.
- [3] RUSSELL S J, NORVIG P. Artificial intelligence: a modern approach [M]. 3rd ed. Upper Saddle River, USA: Pearson Education, Inc., 2005.
 - [4] MAKRIDAKIS S. The forthcoming Artificial Intelligence (AI) revolution: its impact on society and firms [J]. Futures, 2017, 90: 46-60.
 - [5] 顾险峰. 人工智能的历史回顾和发展现状 [J]. 自然杂志, 2016, 38(3): 157-166.
GU Xianfeng. Historical review and current development of artificial intelligence [J]. Chinese Journal of Nature, 2016, 38(3): 157-166.
 - [6] 腾讯研究院, 中国信息通信研究院互联网法律研究中心, 腾讯AILAB, 等. 人工智能 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2017.
 - [7] HINTON G E, SALAKHUTDINOV R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks [J]. Science, 2006, 313(5786): 504-507.
 - [8] HINTON G E, OSINDERO S, TEH Y W. A fast learning algorithm for deep belief nets [J]. Neural Computation, 2006, 18(7): 1527-1554.
 - [9] SILVER D, HUANG A, MADDISON C J, et al. Mastering the game of go with deep neural networks and tree search [J]. Nature, 2016, 529(7587): 484-489.
 - [10] SILVER D, SCHRITTWIESER J, SIMONYAN K, et al. Mastering the game of go without human knowledge [J]. Nature, 2017, 550(7676): 354.
 - [11] FERRUCCI D, LEVAS A, BAGCHI S, et al. Watson: beyond jeopardy! [J]. Artificial Intelligence, 2013, 199: 93-105.
 - [12] China Business Intelligence. Global and China speech recognition industry report, 2015 - 2020 [R/OL]. (2016-04-01) [2018-02-02]. <http://www.researchinchina.com/Htmls/Report/2016/10246.html>.
 - [13] 周志华. 机器学习 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
 - [14] 李航. 统计学习方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
 - [15] LECUN Y, KAVUKCUOGLU K, FARABET C. Convolutional networks and applications in vision [C]//Circuits and Systems (ISCAS), Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on. Paris, France: IEEE, 2010: 253-256.
 - [16] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks [C]//Advances in Neural Information Processing Systems. Lake Tahoe, USA: Curran Associates Inc., 2012: 1097-1105.
 - [17] HINTON G E. Training products of experts by minimizing contrastive divergence [J]. Neural Computation, 2002, 14(8): 1771-1800.
 - [18] SRIVASTAVA N, SALAKHUTDINOV R R. Multimodal learning with deep boltzmann machines [C]//Advances in Neural Information Processing Systems. Lake Tahoe, USA: Curran Associates Inc., 2012: 2222-2230.
 - [19] GRAVES A, MOHAMED A, HINTON G. Speech recognition with deep recurrent neural networks [C]//2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech And Signal Processing (ICASSP). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2013: 6645-6649.
 - [20] PASCANU R, GULCEHRE C, CHO K, et al. How to construct deep recurrent neural networks [J/OL]. (2014-04-24) [2018-02-04]. <https://arxiv.org/abs/1312.6026>.
 - [21] SABOUR S, FROSST N, HINTON G E. Dynamic routing between capsules [C]//Advances in Neural Information Processing Systems. Long Beach, CA, USA: Neural Information Processing Systems Foundation, Inc., 2017: 3859-3869.
 - [22] ZHOU Z H, FENG J. Deep forest: towards an alternative to deep neural networks [J/OL]. (2017-05-31) [2018-02-04]. <https://arxiv.org/abs/1702.08835>.
 - [23] 鞠平, 秦川, 黄桦, 等. 面向智能电网的建模研究展望 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 1-6.
JU Ping, QIN Chuan, HUANG Hua, et al. Research trends of power system modeling geared to smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 1-6.
 - [24] EC JRC, U.S DOE. Assessing smart grid benefits and impacts: EU and U.S initiatives [R/OL]. [2018-02-04]. <http://ses.jrc.ec.europa.eu/assessing-smart-grid-benefits-and-impacts-eu-and-us-initiatives>.
 - [25] IEA. Smart grid roadmap [R/OL]. [2018-02-04]. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/smartgrids_roadmap.pdf.
 - [26] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
 - [27] 刘振亚. 智能电网技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
 - [28] 张东霞, 姚良忠, 马文媛. 中外智能电网发展战略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 1-15.
ZHANG Dongxia, YAO Liangzhong, MA Wenyuan. Development strategies of smart grid in China and abroad [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 1-15.
 - [29] European Commission. European technology platform smart-grids: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future [EB/OL]. [2018-02-06]. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf.
 - [30] United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. Grid2030: a national vision for electricity's second 100 years [EB/OL]. [2018-02-06]. http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/Elec_Vision_2-9-4.pdf.
 - [31] United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. The smart grid: an introduction [EB/OL]. [2018-02-06]. [http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages\(1\).pdf](http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages(1).pdf).
 - [32] 梅生伟, 朱建全. 智能电网中的若干数学与控制科学问题及其展望 [J]. 自动化学报, 2013, 39(2): 119-131.
MEI Shengwei, ZHU Jianquan. Mathematical and control scientific issues of smart grid and its prospects [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(2): 119-131.
 - [33] 何光宇, 孙英云, 梅生伟, 等. 多指标自趋优的智能电网 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 1-5.
HE Guangyu, SUN Yingyun, MEI Shengwei, et al. Multi-indices self-approximate-optimal smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 1-5.
 - [34] 张文亮, 刘壮志, 王明俊, 等. 智能电网的研究进展及发展趋势 [J]. 电网技术, 2009, 33(13): 1-11.
ZHANG Wenliang, LIU Zhuangzhi, WANG Mingjun, et al. Research status and development trend of smart grid [J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 1-11.
 - [35] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究 [J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92-96.
QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng, et al. UPFC system control strategy research in Nanjing Western Power Grid [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 92-96.
 - [36] 陈刚, 李鹏, 袁宇波. MMC-UPFC 在南京西环网的应用及其谐波特性分析 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 121-127.
CHEN Gang, LI Peng, YUAN Yubo. Application of MMC-UPFC on Nanjing Western Grid and its harmonic analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 121-127.
 - [37] 刘纲, 蔡晖, 祁万春, 等. 500 kV 统一潮流控制器在苏州南部电

- 网的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(6): 119-124.
- LIU Gang, CAI Hui, QI Wanchun, et al. Study on application of 500 kV unified power flow controller at southern power system of Suzhou [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6): 119-124.
- [38] 罗建裕, 李海峰, 江叶峰, 等. 基于稳控技术的源网荷友好互动精准负荷控制系统[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 25-29.
- LUO Jianyu, LI Haifeng, JIANG Yefeng, et al. Source network load friendly interactive and precise load control system based on stability control technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 25-29.
- [39] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 2-8.
- XIN Yaozhong, SHI Junjie, ZHOU Jingyang, et al. Technology development trends of smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 2-8.
- [40] 王继业. 智能电网大数据[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [41] 薛禹胜, 刘觉, 岑文辉. 专家系统在电力系统中的应用——特点、现状和展望[J]. 电力系统自动化, 1989, 13(2): 10-19.
- XUE Yusheng, LIU Jue, CEN Wenhui. Expert systems in power systems—features, current status and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 1989, 13(2): 10-19.
- [42] 韩祯祥, 文福拴. 电力系统中专家系统的应用综述[J]. 电力系统自动化, 1993, 17(3): 51-56.
- HAN Zhenxiang, WEN Fushuan. A survey of the applications of expert systems to power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(3): 51-56.
- [43] 韩祯祥, 文福拴. 人工智能及其在电力系统中的应用——从专家系统到人工神经网络[J]. 电力系统自动化, 1991, 15(3): 5-15.
- HAN Zhenxiang, WEN Fushuan. Artificial intelligence and its applications to power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1991, 15(3): 5-15.
- [44] 韩祯祥, 文福拴. 人工神经网络在电力系统中的应用新进展(一)[J]. 电力系统自动化, 1993, 17(1): 53-59.
- HAN Zhenxiang, WEN Fushuan. The new development of artificial neural networks application to power systems(I)[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(1): 53-59.
- [45] 韩祯祥, 文福拴. 人工神经网络在电力系统中的应用新进展(二)[J]. 电力系统自动化, 1993, 17(2): 55-62.
- HAN Zhenxiang, WEN Fushuan. The new development of artificial neural networks application to power systems(II)[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(2): 55-62.
- [46] 张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-12.
- ZHANG Dongxia, MIAO Xin, LIU Liping, et al. Research on development strategy for smart grid big data[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 2-12.
- [47] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合(一) 大数据与电力大数据[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 1-8.
- XUE Yusheng, LAI Yening. Integration of macro energy thinking and big data thinking part one big data and power big data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 1-8.
- [48] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合(二) 应用及探索[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 1-13.
- XUE Yusheng, LAI Yening. Integration of macro energy thinking and big data thinking part two applications and explorations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 1-13.
- [49] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 503-511.
- PENG Xiaosheng, DENG Diyu, CHENG Shijie, et al. Key technologies of electric power big data and its application prospects in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 503-511.
- [50] 王磊, 陈青, 高洪雨, 等. 基于大数据挖掘技术的智能变电站故障追踪架构[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 1-8.
- WANG Lei, CHEN Qing, GAO Hongyu, et al. Framework for smart substation fault trace based on big data mining[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 1-8.
- [51] 赵俊华, 董朝阳, 文福拴, 等. 面向能源系统的数据科学: 理论与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 1-11.
- ZHAO Junhua, DONG Zhaoyang, WEN Fushuan, et al. Data science for energy systems: theory, techniques and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 1-11.
- [52] NEO Y Q, TEO T T, WOO W L, et al. Forecasting of photovoltaic power using deep belief network[C]//Proc of the 2017 IEEE Region 10 Conference (TENCON). Penang, Malaysia: IEEE, 2017: 1189-1194.
- [53] ANDRE G, JANOSCH H, BERNHARD S. Deep learning for solar power forecasting – an approach using autoencoder and LSTM neural networks[C]//2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2016). Budapest, Hungary: IEEE, 2016: 2858-2865.
- [54] MAHDI K, OKYAY K, MOHAMMAD E K. Rough deep neural architecture for short-term wind speed forecasting[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 2770-2779.
- [55] ANDERSON T S, TERESA B L. Deep learning for wind speed forecasting in northeastern region of Brazil[C]//2015 Brazilian Conference on Intelligent Systems. Natal, Brazil: IEEE, 2015: 322-327.
- [56] ZHANG C Y, CHEN C P, GAN M, et al. Predictive deep boltzmann machine for multiperiod wind speed forecasting[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1416-1425.
- [57] 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.
- [58] 胡伟, 郑乐, 闵勇, 等. 基于深度学习的电力系统故障后暂态稳定评估研究[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3140-3146.
- HU Wei, ZHENG Le, MIN Yong, et al. Research on power system transient stability assessment based on deep learning of big data technique[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3140-3146.
- [59] 朱乔木, 党杰, 陈金富, 等. 基于深度置信网络的电力系统暂态稳定评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 735-743.
- ZHU Qiaomu, DANG Jie, CHEN Jinfu, et al. A method for power system transient stability assessment based on deep belief networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 735-743.
- [60] 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[EB/OL]. (2017-06-12) [2018-02-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20170612.1911.015.html>.
- ZHU Qiaomu, CHEN Jinfu, LI Hongyi, et al. Transient stability assessment based on stacked autoencoder[EB/OL]. (2017-06-12) [2018-02-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20170612.1911.015.html>.
- [61] 叶圣永, 王晓茹, 刘志刚, 等. 基于受扰严重机组特征及机器学习方法的电力系统暂态稳定评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 46-51.
- YE Shengyong, WANG Xiaoru, LIU Zhigang, et al. Power system transient stability assessment based on severely disturbed generator attributes and machine learning method[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2011, 31(1): 46-51.
- [62] 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[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 109-119.
LIU Wei, ZHANG Dongxia, WANG Xinying, et al. A decision making strategy for generating unit tripping under emergency circumstances based on deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 109-119.
- [63] 程敏, 杨文涛, 文福拴, 等. 电力系统主动解列断面搜索方法与孤岛调整策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 37-45.
CHENG Min, YANG Wentao, WEN Fushuan, et al. Controlled splitting sections searching method and islanding adjustment strategy for power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 37-45.
- [64] 余涛, 张孝顺. 一种具有记忆自学习能力的快速动态寻优算法及其无功优化求解[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(3): 256-267.
YU Tao, ZHANG Xiaoshun. A fast dynamic optimization algorithm with memory and self-learning and its application on reactive power optimization[J]. Scientia Sinica Technologica, 2016, 46(3): 256-267.
- [65] 尚宇炜, 马钊, 彭晨阳, 等. 内嵌专业知识和经验的机器学习方法探索(一): 引导学习的提出与理论基础[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5560-5572.
SHANG Yuwei, MA Zhao, PENG Chenyang, et al. Study of a novel machine learning method embedding expertise part I: proposals and fundamentals of guiding learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5560-5572.
- [66] 尚宇炜, 马钊, 彭晨阳, 等. 内嵌专业知识和经验的机器学习方法探索(二): 引导学习的应用与实践[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5852-5861.
SHANG Yuwei, MA Zhao, PENG Chenyang, et al. Study of a novel machine learning method embedding expertise part II: applications and practices of guiding learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5852-5861.
- [67] SUN M Y, KONSTANTELOS I, STRBAC G. C-vine copula mixture model for clustering of residential electrical load pattern data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2382-2393.
- [68] KONG W, DONG Z Y, HILL D J, et al. Short-term residential load forecasting based on resident behavior learning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1087-1088.
- [69] KONG W, DONG Z Y, JIA Y, et al. Short-term residential load forecasting based on LSTM recurrent neural network[EB/OL]. (2017-03-27) [2018-02-12]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7887751/>.
- [70] SHI H, XU M, LI R. Deep learning for household load forecasting - a novel pooling deep RNN[J/OL]. (2017-03-22) [2018-02-12]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7885096/>.

作者简介:



鞠平

鞠平(1962—),男,江苏靖江人,教授,博士,研究方向为电力系统建模与控制(E-mail: pju@hhu.edu.cn);

周孝信(1940—),男,山东蓬莱人,中国科学院院士,研究方向为电力系统分析与控制、电力系统仿真及 FACTS 技术等(E-mail: zxx@epri.sgcc.com.cn);

陈维江(1958—),男,山东淄博人,教授级高级工程师,中国科学院院士,研究方向为电力系统防雷、过电压与绝缘配合、电磁环境和特高压等(E-mail: weijiang-chen@sgcc.com.cn)。

“Smart Grid Plus” research overview

JU Ping^{1,2}, ZHOU Xiaoxin³, CHEN Weijiang⁴, YU Yiping^{1,2}, QIN Chuan^{1,2},
LI Ruomei⁵, WANG Chengshan⁶, DONG Xuzhu⁷, LIU Jian⁸, WEN Jinyu⁹,
LIU Yutian¹⁰, LI Yang¹¹, CHEN Qing¹², LU Xiao¹², SUN Dayan^{1,12}, XU Chunlei¹²,
CHEN Xingying^{1,2}, WU Feng^{1,2}, MA Hongzhong^{1,2}

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 211100, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 4. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

5. Chinese Society for Electrical Engineering, Beijing 100761, China; 6. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,

Tianjin University, Tianjin 300072, China; 7. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080,

China; 8. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China; 9. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic

Engineering and Technology (AEET), School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan 430074, China; 10. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education of China,

Shandong University, Ji'nan 250061, China; 11. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

12. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: SG(Smart Grid) is the inevitable trend of the electrical power system. Its core idea is “smart”, but SG is not “smart” enough yet. In recent years, the AI(Artificial Intelligence) technology has made breakthrough progress, providing great opportunities and powerful support for the development of SG. For this reason, a novel concept, “SG+”(Smart Grid Plus), is proposed. It is an upgraded version of SG with higher and deeper intelligence by drawing support from AI. It will further improve the safety, efficiency and sustainability of the electrical power system. The research and development progresses of AI technology are reviewed. It is pointed out that AI is not a panacea, nor is it incompetent. After a review of the development progress of SG, the trends in SG are highlighted. One is the integration of high proportion of renewable generations, power electronic devices and active loads, the other is the combination of multiple-energy carriers, multiple-energy networks, and multiple operating modes. Finally, the applications of AI, particularly the 3rd generation technologies such as deep learning, in the electrical power systems are reviewed. Moreover, the research topics of “SG+” are discussed and prospected.

Key words: Smart Grid; artificial intelligence; deep learning; Smart Grid Plus