

全景信息感知及智慧电网

张宁¹, 马国明², 关永刚³, 胡军¹, 陆超¹, 文劲宇⁴,
程时杰⁴, 陈维江⁵, 何金良^{1*}

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 海淀区 102206; 3. 国家自然科学基金委员会, 北京市 海淀区 100085; 4. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074; 5. 国家电网公司, 北京市 西城区 100031)

Panoramic Information Perception and Intelligent Grid

ZHANG Ning¹, MA Guoming², GUAN Yonggang³, HU Jun¹, LU Chao¹, WEN Jinyu⁴,
CHENG Shijie⁴, CHEN Weijiang⁵, HE Jinliang^{1*}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Haidian District, Beijing 102206, China;

3. National Natural Science Foundation of China, Haidian District, Beijing 100085, China; 4. School of Electrical and

Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China;

5. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China)

ABSTRACT: The goal of carbon neutrality and the rapid development of renewable energy brings new opportunities and challenges to power systems. Accelerating digitalization and building smart grids is an essential path for the power system future development. Based on the 265th “Shuangqing forum” with the theme of “panoramic information perception enabling power grid wisdom,” this paper discussed three topics: advanced sensing theory and technology of power systems, intelligent sensing technology of power energy equipment, and intelligent analysis, operation and control of power systems based on panoramic information. This paper summarized the current research status, pointed out the future research focus, condensed fundamental scientific issues, hoping to provide references for the smart grid development in China.

KEY WORDS: panoramic information perception; intelligent grid; advanced sensing; energy equipment; data-driven method

摘要: 碳中和的目标和可再生能源的快速发展为电力系统带来新的机遇与挑战。加快电力系统的数字化转型, 建设智慧电网成为电力系统未来发展的重要路径。该文基于第 265 期“双清论坛”, 以“全景信息感知赋能电网智慧”为主题, 凝练基础科学问题, 从电网先进传感理论与技术、电力能源装备智能感知技术、基于全景信息的电网智能分析运行控制 3 个方面综述了当前研究现状, 指出该领域未来研究重点,

为我国智慧电网发展提供参考。

关键词: 全景信息感知; 智慧电网; 传感技术; 电力能源装备; 数据驱动方法

0 引言

碳中和的目标和未来电力系统的“双高”特性带来了新的机遇与挑战。在第七十五届联合国大会一般性辩论上, 国家主席习近平发表重要讲话: 中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和^[1]。能源系统是碳排放的主要来源, 大力发展风电与光伏等可再生能源, 开展电能替代以及清洁替代, 是实现碳中和目标的重要途径。到 2050 年, 电力占终端能源消费比重将从目前的 26% 提升至 45%~50%^[2], 电力系统发生质的变化。未来电网将具有“高比例可再生能源并网”以及“高比例电力电子装备并网”的“双高”特性。

“双高”电网面临安全稳定方面的新挑战, 与此同时, 电力系统数字化转型方兴未艾。传感器技术、通讯技术、智能电力装备以及电力系统集成化智能技术快速进步, 为电网可观性、可控性以及智能化的提升带来巨大机遇。分布式传感以及基于大数据的人工智能技术将使得电力系统发生巨大变

基金项目: 国家自然科学基金项目(51720105004, 51921005)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51720105004, 51921005).

化：通过低功耗自取能、芯片化、智能化微型传感器实现电力装备全景信息感知及设备健康状态评价与预测；在此基础上，建立广域、分布式电网全景信息实时采集的传感网络，通过对物理系统的智能感知、全面实时连接，构建实时完整映射的数字孪生体；基于传感网络建立电力系统大数据以及人工智能平台对电力系统调度运行与控制进行智能决策，在数字层面实现机理与数据融合的建模方法、智能决策、自主智能控制等，并闭环反作用于物理系统。通过互联互通、数字赋能，形成各要素之间的高效协同与资源的优化匹配，支撑消纳高比例可再生能源，提升电力系统安全稳定，促进电网低碳高效运行。

现阶段研究在电力装备全景信息感知、电力设备健康状况诊断以及基于人工智能的电力系统评估与决策方面，已经开展了一些工作并取得了一定成果。但是为了实现前述愿景，仍然需要进行一系列基础理论方法与关键技术的研究、大型科研平台与数据平台的搭建以及技术的落地应用验证，其中广泛涉及电气、材料、微电子、光学、大数据与人工智能、信息通信等学科领域的前沿技术，具有极强的学科交叉性。

电力系统面临的前述问题以及相关技术的革新将使其具有“智慧电网”的属性。“智慧电网”是智能电网的高级形式，智能电网能够通过量测和通信实现电力系统可观可控性增强，而智慧电网在此基础上应该能够主动感知并定义系统出现的问题并主动发现知识，具备解决问题的能力。本文基于国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、信息科学部与政策局共同主办的第265期“双清论坛”，以“全景信息感知赋能电网智慧”为主题，凝练了亟需关注和解决的重要基础科学问题，以电网先进传感理论与技术、电力能源装备智能感知技术、基于全景信息的电网智能分析运行控制3个方面为切入点，对于当前研究现状和发展趋势进行了综述，并分析了当前研究的不足，指出了未来的研究重点，以期对于我国的智慧电网发展提供参考。

1 关键科学问题

第265期“双清论坛”与会专家围绕“全景信息感知及智慧电网”主题进行了广泛深入讨论，凝练了本领域亟需解决的关键科学问题——“电力能源广域大系统信息感知与集成化智能”。如图1所示，

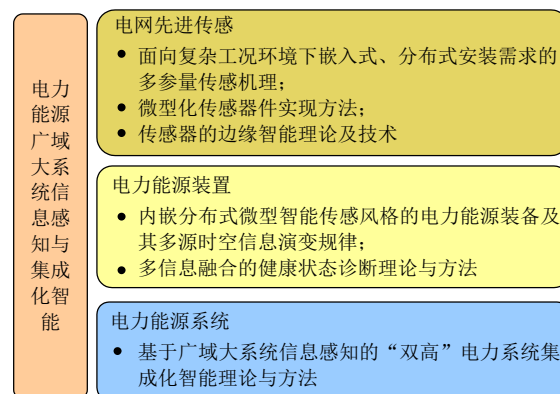


图1 “全景信息感知及智慧电网”关键科学问题

Fig. 1 Fundamental scientific problems of panoramic information perception and intelligent grid

示，具体包括3个层面：

1) 电网安全、优质、经济运行对电网先进传感技术提出了高要求，需要研究面向复杂工况环境下嵌入式、分布式安装需求的多参量传感机理，微型化传感器器件实现方法，以及传感器的边缘智能理论及技术。

2) 电力能源装备可靠运行对信息感知与融合提出了高要求，需要研究内嵌分布式微型智能传感网络的电力能源装备及其多源时空信息演变规律、多信息融合的健康状态诊断理论与方法。

3) 电力能源装备的全景信息感知将极大增强电力系统可观性与可控性，为应对电力系统“双高”挑战，需要研究基于广域大系统信息感知的“双高”电力系统集成化智能理论与方法。

论坛认为，上述研究涉及电气、材料、微电子、光学、大数据与人工智能、信息通信等多个学科领域的“大交叉”，也体现电气工程领域高电压与电力系统等不同二级学科之间的“小交叉”。通过交叉学科研究能够在该领域形成理论创新与重大技术突破。加强上述3个方面的研究，预期5~10年内将取得实质性的进展，将有助于我国电力系统应对能源转型与碳中和的巨大挑战，增强自主创新能力并突破核心技术，提升我国在智慧电网领域的科技竞争力。

2 全景信息感知及智慧电网的发展现状

本节从电网先进传感理论与技术、电力能源装备智能感知技术、基于全景信息的电网智能分析运行控制3个方面，讨论全景信息感知及智慧电网的发展现状。3个方面分别对应智慧电网的传感层、设备层和系统层，其具体关系如图2所示。

2.1 电网先进传感理论与技术

智慧电网的核心是全景信息下的智慧应用，其

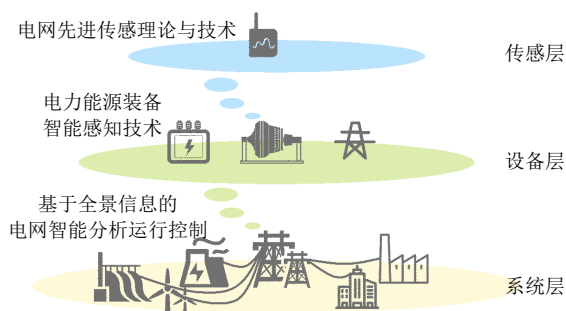


图2 “全景信息感知及智慧电网”研究框架

Fig. 2 Research framework of panoramic information perception and intelligent grid

基础是电力系统的全景信息，其采集依赖于可泛在部署、适用强电磁环境的高可靠先进传感器。我国本土企业智能传感器产值仅占全球13%，与我国制造业大国地位不匹配，在高性能先进传感器方面更是受制于人。传感正从化学、材料、物理、机械等单学科向上述学科与微电子、光学、计算机、人工智能等多学科融合的智能感知发展。近年来，我国在电网信息智能感知方面主要开展了微机械微结构(micro electromechanical system, MEMS)传感、磁场/电流传感、光传感及传感器融合集成关键技术等多方面的研究工作，为实现电网全景信息智能感知奠定了一定的基础。

首先，在MEMS传感研究方面，研究人员开展了电、磁、机械、声、热、微量气体等参量MEMS感知技术的基础性研究、结构设计、传感器封装测试等^[3]。探索了电气工程领域电压场传感、电流场传感^[4]、磁场传感^[5]、输电线路状态传感、电气设备振动传感^[6]、可听噪声、环境传感等特征参量的传感研究。受限于绝缘性能、供能方式及信号传输，目前MEMS传感还主要在集中在弱电磁环境下进行。基于巨磁阻效应及隧穿磁阻效应的磁场传感器可以实现宽频、宽量程的磁场测量，并实现对电流的监测^[7]。但对于变压器、气体绝缘开关等关键电力能源装备的内部传感研究较少^[8]，多参量融合、嵌入式传感是MEMS传感器后续的发展重点。

其次，在光传感研究方面，由于具备抗电磁干扰能力强、绝缘性能好、可以分布式非接触测量等诸多优点，近年来电网状态信息光学感知方法发展较快^[9]。研究人员初步开展了光纤电场感知、光纤磁场感知、光纤局部放电感知^[10-11]、光纤气体感知^[12]、光纤分布式温度感知、光纤分布式应变感知、多光谱感知等方面的基础理论及关键技术问题研究。探索了变压器、气体绝缘开关等关键电力能源装备内部光学状态检测方法，及输电线路、电缆等

运行不良工况的分布式检测手段。但在检测信噪比、检测系统稳定性、电力能源装备内部传感器安装方法等方面尚不能满足智能感知需求，还需要进一步开展研究工作。

最后，在传感器融合集成关键技术方面，主要面临传感器微型化、取能、抗电磁干扰及长期可靠性等方面的难题。我国学者也开展了一些基础性的研究工作，开展了基于MEMS技术的传感器微型化研究，探索了温差取能、电磁取能、振动取能等取能方法，初步实现了低功耗传感器的供能^[13]，还需进一步提高供能功率。开展了多种信噪分离方法的研究，降低了强电磁噪声的干扰^[14]。由于运行气候环境与电磁环境恶劣，传感器长期可靠性的研究尚需进一步的开展。

2.2 电力能源装备智能感知技术

电力能源装备是建设智慧电网的核心，装备故障是导致电网突发停电事故的主要诱因，电网60%左右的停电故障是由电力能源装备故障引起的，经济损失及社会影响极其巨大。对电力能源装备进行状态感知、缺陷诊断及故障预警具有重要意义。2000年以后，国内清华大学、西安交通大学、华北电力大学、重庆大学、武汉大学、中国电力科学研究院、平高集团等开展了大量电气装备状态诊断的研究，为发展智慧电力能源装备奠定了一定的基础。

首先，在电力能源装备内部缺陷信息特征研究方面，研究人员通过实验室小尺寸模型试验探索了微小缺陷发生、发展过程，利用传感系统采集了特高频信号、超声信号、光信号及脉冲电流信号等多维度缺陷表征状态信息^[15-16]。通过数据挖掘，初步建立了实验室小模型下多维信息融合方法，探索了状态参量与故障类型、部件、严重程度和发展趋势的关联关系^[17-18]。但由于对电力能源装备内部信息感知手段不足，对缺陷发生发展过程中多物理场信息及其时空演变规律的认知尚不充分。

其次，在电力能源装备信息分布式实时监测网络研究方面，电力能源装备内部全景信息分布式实时监测是智慧电力能源装备研究中的一个重要方向。研究人员开展了站域缺陷设备定位及电力能源装备内部缺陷监测两方面的研究工作。对于站域缺陷设备定位，主要开展了基于特高频信号故障设备定位研究，超声天线阵列电晕放电定位研究，及基于多光谱的电力能源装备缺陷定位研究^[19]，取得了良好的效果。对于电力能源装备内部缺陷，开展了

壳体传感器阵列布置方法^[20]、检测效率、缺陷信号在电气设备内部传播规律等方面的研究。但由于可测信号从内部传到外部发生显著衰减,通过设备外表电气参量,很难了解设备内部相关参量分布信息其有效性、准确性都受到极大制约。

最后,在电力能源装备健康状态诊断方面,对于电力能源装备内部缺陷的诊断与预测是智慧电力能源装备研究中的一个重要方向。研究人员基于多元统计分析、支持向量机、神经网络和贝叶斯网络等方法^[21-22],开展了变压器、气体绝缘开关、电缆等设备状态特征参量与故障类型、部件、严重程度和发展趋势的关联关系研究^[23-24]。在现场监测数据应用方面,研究人员针对输变电设备在线监测数据、带电检测数据、预防性试验数据等多源异构数据,采用深度关联分析、模糊聚类等大数据挖掘分析方法,尝试挖掘设备状态数据的耦合关系及内涵机理。探索了部件故障与设备故障之间的关联关系及演化规律,初步开展了基于现场数据驱动的缺陷诊断算法研究^[25]。对于电气装备外部缺陷开展了一些多光谱诊断的研究,取得了良好的效果,综合红外、可见光、紫外等多光谱数据,实现了电力能源装备外部状态智能识别与缺陷诊断。

2.3 基于全景信息的电网智能分析运行控制

近年来,随着大量可再生能源并网,电力系统不确定性和随机性大量增加^[26];分布式资源、电动汽车、需求响应等的发展,使电网的分析和控制更加复杂^[27]。与此同时,数据分析和处理技术得到了长足发展,使国内外学者对于数据驱动的电力系统研究愈加关注^[28]。大量量测装置的应用为数据驱动的方法提供了数据基础^[29]。从研究的对象上来看,可以分为数据驱动的电力系统稳态分析与控制、暂态分析和故障分析、电力用户侧分析等方面。

2.3.1 数据驱动的电力系统稳态分析与控制

在数据驱动的电力网络分析及优化方面,根据层次递进关系,主要包括元件参数与网络拓扑辨识、系统基础矩阵辨识、潮流计算和最优潮流计算^[30]。

电力系统拓扑辨识主要在状态估计的框架下展开研究^[31]。在输电网层面,主要解决的问题是基于现有拓扑信息识别量测错误^[32-33]。在配电网层面,针对分布式可再生能源并网,配网拓扑变化频繁,数学模型更加复杂,元件参数与拓扑的联合辨识也被广泛研究。电力系统矩阵辨识主要包括节点导纳阵和灵敏度矩阵两类矩阵。对于节点导纳矩阵

的辨识,主要基于广义测量系统的量测数据进行最小二乘回归^[34],所辨识的对象是数据量测较为完备的输电网系统。对于灵敏度矩阵,例如潮流方程的雅可比矩阵,其直接辨识方法是利用最小二乘及其衍生方法进行回归^[35]。

潮流计算是电力系统稳态分析的基础。在缺乏元件参数、拓扑信息的电力系统中,如信息不完备的配电网,难以根据物理模型建立潮流方程。在这种条件下,有研究将潮流方程转化为向量积,建立支持向量机回归模型^[36]。基于有功功率、无功功率、电压、相角的历史数据,训练数据驱动模型,实现数据驱动的潮流方程。最优潮流问题的数据驱动研究主要集中在不确定性的描述上。通过历史数据,学习不确定性变量的描述方法。例如通过计算历史数据的均值与方差等变量,给出概率密度函数对于某一自变量取值时因变量的范围。

在数据驱动的电力系统控制与决策方面,先进的信息通信和数据分析技术得到了大量关注^[37]。其中,基于强化学习的相关模型原理为首先应用实际数据或仿真生成的数据,对于强化学习模型进行训练,不断优化模型参数,获得控制决策模型,并在实时应用中应用模型生成策略,对电力系统进行控制。在一些场景中,对于决策实时性有较高的要求,传统基于优化的方法难以在有限的时间和有限的算力下给出优化结果;基于强化学习的模型经过离线训练后,在线应用时具有很高的计算效率,能够满足决策需求。例如,基于强化学习的能量管理^[38],基于强化学习的电力系统电压控制^[39]等。

2.3.2 数据驱动的电力系统暂态分析和故障分析

电力系统暂态分析中,随着大量可再生能源并网,以及直流输电工程的建设,电网的电力电子化比例不断提高,传统的稳定性分析方法如数值积分法、直接法、时域仿真法等已经越来越难以满足电力系统暂态分析的要求^[40]。同时,电网广域量测快速发展,提供了丰富的数据信息^[41]。基于数据驱动的电力系统暂态分析方法,不关注复杂的机理分析,而是直接建立从输入到输出的映射关系,得到了研究人员的广泛关注^[42]。

在电力系统稳定性判断上,大量研究通过建立稳定性分析的机器学习模型,并使用训练数据集对于模型的参数进行优化,已经取得了很多的进展。例如,使用人工神经网络,建立电力系统运行状态与稳定指标之间的联系^[43];使用支持向量机判断三

相短路故障的稳定性^[44]；使用基于交叉熵的集成学习算法实现多种对称与不对称暂态故障后电网频率暂态态势预测^[45]。随着深度学习技术的发展，相关模型也被应用到电力系统稳定性分析中，例如使用深度置信网络评估暂态故障后的电力系统稳定性^[46]；使用深度 Q-learning 网络实现静态电压稳定裕度评估^[47]。此外，具有可解释性的电力系统稳定性模型也是当前的研究方向，例如基于决策树模型学习电力系统稳定规则^[48]；引入电力系统稳定评估机器学习的可解释代理模型^[49]。

在电力系统稳定控制方法上，基于强化学习的算法是研究热点。文献[50]建立卷积神经网络结合强化学习的模型，用于进行电力系统大扰动故障后的切机决策；文献[51]基于经典的 Q-learning 强化学习算法，对于电力系统大扰动故障后的系统振荡给出广域控制策略。

在电力系统连锁故障分析上，基于机器学习和基于统计分析的数据驱动算法同样得到了应用。文献[52]建立了人工神经网络模型，用于判断电力系统中的连锁故障。文献[53]使用马尔科夫链模型，实现了电力系统连锁故障传播路径的快速搜索。

2.3.3 数据驱动的电力用户侧分析

用户愈发成为电力系统中的重要角色。通过定制化的用户服务和广泛的用户互动，可以给电力系统提供大量的灵活性^[54]。随着智能电表等信息渠道的建设，电力系统正逐步形成“社会-物理-信息”的深度耦合。当前，数据驱动的电力用户分析的国内外相关研究主要可以分为负荷分析、负荷预测和负荷管理等^[55]。

在负荷分析方面，具体包括坏数据辨识、窃电检测和用电模式辨识等研究。其中，坏数据辨识是指在采集到的负荷数据中，由于传感器、通信等原因，存在坏数据，通过数据驱动的方法，如矩阵分解等，区分正常数据与坏数据，并对坏数据进行修复^[56]。窃电检测是根据采集到的智能电表数据，分析用户是否存在异常行为，并判断用户是否窃电^[57]。用电模式辨识是指对于用户的用电行为进行分析，将用户相应地进行分类^[58]。

在负荷预测方面，具体包括不含智能电表数据预测、含智能电表数据预测和概率预测等研究。其中，不含智能电表数据预测的颗粒度较粗^[59]；含智能电表数据预测由于拥有用户级别的数据，预测颗粒度较细^[60]。概率预测是近来负荷预测的发展趋

势，它不同于传统预测的点结果，而是输出预测结果的概率分布^[61]。

在负荷管理方面，具体包括用户特性辨识、需求响应资源定位和需求响应实施等研究。其中，用户特性辨识是指基于用户用电数据，用数据驱动的方法辨识用户的用电特性^[62]。需求响应资源定位用于分析用户的需求响应潜力大小^[63]，并根据分析结果，个性化设计需求响应实施方案^[64]。

此外，有研究通过提出用户行为模型来构建数据驱动的电力用户分析框架^[65]，将电力用户行为的基本组成分为 5 个部分：行为主体、行为环境、行为手段、行为结果和行为效用。

数据驱动的电力用户侧分析采用的数学工具包括传统的数据挖掘方法，例如基于统计的方法、基于矩阵分析的方法，也包括广泛应用的机器学习算法。其中，近年来取得长足进步的深度学习算法在电力用户分析领域也取得了广泛应用，例如基于深度学习的负荷预测、窃电检测、用户肖像描绘等。

3 现阶段不足与未来研究重点

本节讨论全景信息感知及智慧电网现阶段和不足，并提出未来的研究重点。从电网先进传感理论与技术、电力能源装备智能感知技术和基于全景信息的电网智能分析运行控制 3 个方面进行分析，未来主要研究重点如图 3 所示。

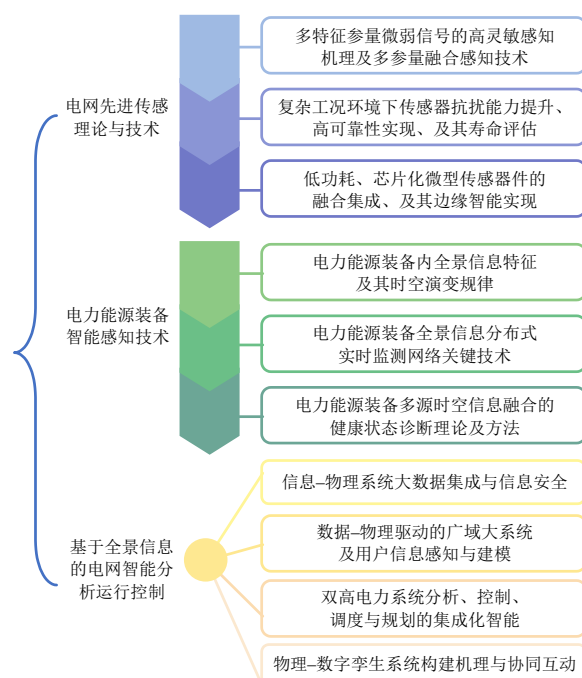


图3 “全景信息感知及智慧电网”未来研究重点

Fig.3 Future key research of panoramic information perception and intelligent grid

3.1 电网先进传感理论与技术

高可靠先进传感器是智慧电网的信息获取基础。现有传感器在物理尺寸、感知能力、供电方式、强电磁防护等方面存在局限性,同时对于海外具有高度依赖性。主要存在以下不足:①特征参量微弱信号的高灵敏感知机理研究不足,电气设备多参量融合感知技术不能满足设备缺陷诊断需求;②复杂电磁工况下传感器抗干扰能力、高可靠性不够,寿命短;③低功耗、芯片化微型传感器件研究落后国外先进水平。

因此,以下关键问题应该作为未来的研究重点:

1) 多特征参量微弱信号的高灵敏感知机理及多参量融合感知技术,包括电、磁、光、机械、声、热、微量气体等特征参量微弱信号的新型敏感材料与传感机理;基于分布式光纤的多参量融合传感方法;基于微纳制造工艺的多参量融合传感技术。通过上述研究,实现多特征参量微弱信号的融合感知。

2) 复杂工况环境下传感器抗扰能力提升、高可靠性实现、及其寿命评估,包括强电磁场环境对传感器的干扰、损伤机理,以及有效屏蔽、封装技术;复杂工况环境下传感器抗扰能力主动提升技术(干扰抑制,微弱信号检测等);复杂工况环境下传感器件长期运行老化特性及其寿命评估方法。通过上述研究,增强传感器在复杂工况下的抗干扰能力,提高传感器可靠性,评估传感器寿命。

3) 低功耗、芯片化微型传感器件的融合集成、及其边缘智能实现,包括微型传感器件与数据处理、通信等功能模块的芯片化融合集成,及其低功耗实现技术;微型传感器件的低延时通信传输及高精度时间同步;传感器自配置(即插即用)、自评估、自校准,以及云边协同的边缘智能技术。通过上述研究,实现微传感器件的融合集成和边缘智能。

3.2 电力能源装备智能感知技术

智慧电力能源装备是建设智慧电网的核心,设备故障往往会带来巨大的经济和社会损失。研究设计集量测、感知、信息融合为一体的智慧装备意义重大。当前研究主要存在以下不足:①对缺陷发生发展过程中多物理场信息及其时空演变规律的认知不足;②缺乏设备内部分布式全景信息感知网络,基于设备外间接参量对电力能源装备内部进行分析判断,其有效性、准确性都受到极大制约;③多源数据融合的设备健康状态诊断与寿命预测的理论与方法尚未完整建立。

因此,以下关键问题应该作为未来的研究重点:

1) 电力能源装备内全景信息特征及其时空演变规律,包括部件状态与电场、磁场、温度场、力场、光、微量气体、局放等全景信息的映射关系;电力能源装备内关键部件的失效机理及失效过程中全景信息的时空演变特性;各部件健康状态的全景信息指纹特征库。通过上述研究,掌握电力能源装备全景信息特征的监测方法。

2) 电力能源装备全景信息分布式实时监测网络关键技术,包括基于内置式光纤、低功耗无线通信的电力能源装备分布式实时监测局域网络及其灵活组网方式;设备运行工况与环境等因素对设备有效状态信息的影响规律,改善信号检测信噪比的噪声抑制方法及措施;电力能源装备环境能量的分布特性,电力能源装备内多元、高效环境微取能的原理及方法。通过上述研究,建立电力能源装备全景信息的实时监测网络。

3) 电力能源装备多源时空信息融合的健康状态诊断理论及方法,包括电力能源装备多源时空信息间的耦合关系,多源时空信息融合理论及方法;融合多源时空演变信息的电力能源装备健康状态诊断理论及方法;基于数字孪生技术的电力能源装备运行风险和安全域估计方法。通过上述研究,实现基于全景信息的电力能源装备健康状态监测和诊断。

3.3 基于全景信息的电网智能分析运行控制

当前,基于全景信息的电网智能分析运行控制研究仍然存在不足,难以支持未来智慧电网社会-物理-信息高度耦合;实现广域信息感知与云边协同;采用物理-数字孪生技术支撑物理系统分析管控;广泛采用人工智能介入控制决策,系统具备自寻优、自校正、自愈能力的愿景。主要存在的不足可以概括为如下3个方面:①信息-物理耦合下复杂广域系统数据质量较低、数据安全问题仍有待解决;②数据-物理联合驱动的广域大系统与用户信息感知与建模理论和方法仍需突破;③基于人工智能的电力系统分析与控制方法其可信性、可解释性与可迁移性还有待提高。

因此,以下关键问题应该作为未来的研究重点:

1) 信息-物理系统大数据集成与信息安全,包括社会物理信息系统混杂数据特征下的数据自治融合、数据质量提升与高效利用,电力系统从信息化到数字化的提升方法;信息-物理系统针对网络攻击的智能识别与安全防护方法与技术;满足电网

高安全、高可靠要求的5G通信组网与高速通信技术。通过上述研究,解决信息-物理耦合下复杂广域系统数据质量与数据安全问题。

2) 数据-物理驱动的广域大系统及用户信息感知与建模,包括基于量测数据的源网荷储动态特性在线建模与辨识方法;反映广域大系统复杂动态特性的智能模型;数据驱动建模的理论精度上界以及理论精度下界;模型-数据驱动的用户侧分布式资源的建模、特征信息提取以及聚合方法。通过上述研究,增强复杂大系统可观性并实现其有效特征信息提取。

3) 双高电力系统分析、控制、调度与规划的集成化智能,包括数据驱动的双高电力系统复杂行为关联分析与因果推断机理;面向电力系统分析与优化的可信、可解释、可迁移的人工智能方法;基于人工智能技术的双高电力系统规划、在线稳定评估和控制方法;基于电力物联网与人工智能的配电网云-边协同运行调控技术;综合能源系统广域自适应协同控制与动态规划方法。通过上述研究,使电网分析与决策能够充分利用电网信息感知以及人工智能技术,实现双高电力系统安全稳定与低碳高效运行。

4) 物理-数字孪生系统构建机理与协同互动,包括数据驱动的相关性模型与知识驱动的因果性模型融合方法;高效的多物理场仿真方法以及场路耦合的优化方法;面向多应用场景的配电网多颗粒度孪生建模与高效求解技术;物理系统与数字孪生系统动态实时映射与协同控制。通过上述研究,构建支撑复杂大系统运行与规划的数字孪生平台与仿真工具。

3.4 智慧电网展望

智能电网概念提出的十余年以来,通讯技术、人工智能技术、芯片技术、材料技术都发生了翻天覆地的变化,这些技术将推动智能电网向智慧电网演进。智慧电网涉及电气、材料、微电子、光学、大数据与人工智能、信息通信等多个学科领域的交叉,需要从电网先进传感理论与技术、电力能源装备智能感知技术和基于全景信息的电网智能分析运行控制3个方面实现突破。在传感层,实现特征参量微弱信号高灵敏感知和参量融合,提高复杂工况适应能力,研制低功耗传感芯片,实现电力系统边缘智能;在设备层,研究电力能源装备的全景信息感知理论和检测网络,实现多源时空信息融合的精

准健康状态诊断与寿命预测;在系统层面,实现信息-物理系统大数据集成与信息安全,基于数据-物理联合驱动开展用户信息感知与建模,提高基于人工智能的电力系统分析与控制理论的可信性、可解释性与可迁移性。在未来5~10年内,通过传感层、设备层和系统层的协同发展,期望能够在智慧电网建设方面取得显著进步,助力我国能源转型与碳中和重大战略目标,提升我国电力领域科技竞争力。

4 结语

能源转型与碳中和对于电力系统提出了新的要求,未来电网面临“高比例可再生能源并网”以及“高比例电力电子设备并网”的“双高”挑战。同时,电力系统数字化转型方兴未艾,传感器技术、通讯技术、智能电力装备以及电力系统集成化智能技术快速进步,为电网可观性、可控性以及智能化的提升带来巨大机遇。本文基于第265期“双清论坛”,以“全景信息感知及智慧电网”为主题,对关键基础性科学问题进行了凝练与展望,对于电网先进传感理论与技术、电力能源装备智能感知技术、基于全景信息的电网智能分析运行控制3个方面的研究现状和发展趋势进行了探讨,总结了现阶段的不足与未来研究重点,期望对于我国电网未来发展提供参考。

参考文献

- [1] 新华网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. (2020-09-22). [2020-12-10]. http://www.xinhuanet.com/2020-09/22/c_1126527652.htm. Xinhua News. Xi Jinping's speech at the general debate of the seventy-fifth united nations general assembly [EB/OL]. (2020-09-22). [2020-12-10]. [http://www.xinhuanet.com/2020-09/22/c_1126527652.htm\(in Chinese\)](http://www.xinhuanet.com/2020-09/22/c_1126527652.htm(in Chinese)).
- [2] 中国电建. 院士专家热议能源转型: 中国要直接进入清洁能源时代[EB/OL]. (2020-11-17). [2020-12-10]. https://www.powerchina.cn/art/2020/11/17/art_7459_909228.html. Power Construction Corporation of China. Academicians' hot discussion on energy transformation: China wants to directly enter the era of clean energy[EB/OL]. (2020-11-17). [2020-12-10]. [https://www.powerchina.cn/art/2020/11/17/art_7459_909228.html\(in Chinese\)](https://www.powerchina.cn/art/2020/11/17/art_7459_909228.html(in Chinese)).
- [3] 王继业, 蒲天骄, 仝杰, 等. 能源互联网智能感知技术框架与应用布局[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 1-14. WANG Jiye, PU Tianjiao, TONG Jie, et al. Intelligent perception technology framework and application layout of energy internet[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 1-14(in Chinese).

- [4] 李忠晶, 鞠登峰, 周兴, 等. 基于巨磁电阻传感器的微弱电流测量方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(15): 28-32.
LI Zhongjing, JU Dengfeng, ZHOU Xing, et al. Research on weak current measuring method based on giant magneto-resistance sensor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(15): 28-32(in Chinese).
- [5] 胡军, 赵根, 常文治, 等. 基于隧穿磁阻效应的多点电晕放电磁场传感及定位[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 1003-1008.
HU Jun, ZHAO Gen, CHANG Wenzhi, et al. Measurement and location of multiple corona discharges based on tunneling magnetoresistive sensors[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 1003-1008(in Chinese).
- [6] 汤明, 郑婧, 黄文婷, 等. 基于 ZigBee 的无线振动传感器设计与实现[J]. 传感技术学报, 2018, 31(2): 312-318.
TANG Ming, ZHENG Jing, HUANG Wenting, et al. Design and implementation of a ZigBee-based wireless vibration transducer for power transformer condition monitoring[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(2): 312-318(in Chinese).
- [7] DUAN Lian, HU Jun, ZHAO Gen, et al. Method of inter-turn fault detection for next-generation smart transformers based on deep learning algorithm[J]. High Voltage, 2019, 4(4): 282-291.
- [8] OUYANG Yong, HE Jinliang, HU Jun, et al. A current sensor based on the giant magnetoresistance effect: Design and potential smart grid applications[J]. Sensors, 2012, 12(11): 15520-15541.
- [9] ZHOU Hongyang, MA Guoming, WANG Yuan, et al. Optical sensing in condition monitoring of gas insulated apparatus: a review[J]. High Voltage, 2019, 4(4): 259-270.
- [10] GAO Chao, YU Lei, XU Yue, et al. Partial discharge localization inside transformer windings via fiber-optic acoustic sensor array[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1251-1260.
- [11] MA Guoming, ZHOU Hongyang, SHI Cheng, et al. Distributed partial discharge detection in a power transformer based on phase-shifted FBG[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(7): 2788-2795.
- [12] 万福, 陈伟根, 王品一, 等. 基于频率锁定吸收光谱技术的变压器故障特征气体检测研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5504-5510.
WAN Fu, CHEN Weigen, WANG Pinyi, et al. Detection study of transformer fault characteristic gases based on frequency-locking absorption spectroscopy technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5504-5510(in Chinese).
- [13] 张鋆, 张明皓, 全杰, 等. 用于电力资产在线感知的 eRFID 标签设计[J]. 电工技术学报, 2020, 35(11): 2296-2305.
ZHANG Jun, ZHANG Minghao, TONG Jie, et al. A eRFID tag design for online perception of power assets [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(11): 2296-2305(in Chinese).
- [14] 全杰, 雷煜卿, 刘国华, 等. 微型电场传感器在工频电场测量中的应用研究[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(12): 3036-3041.
TONG Jie, LEI Yuqing, LIU Guohua, et al. Power-frequency electric field measurement using a micromachined electric field sensor[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(12): 3036-3041(in Chinese).
- [15] 唐炬, 雷志城, 万兆丰, 等. 环保型 C₆F₁₂O 气体绝缘介质过热分解的反应热力学特性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5257-5262.
TANG Ju, LEI Zhicheng, WAN Zhaofeng, et al. Reaction thermodynamics of overthermal decomposition of C₆F₁₂O [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5257-5262(in Chinese).
- [16] 张连根, 路士杰, 李成榕, 等. 气体绝缘组合电器中微米量级金属粉尘运动和放电特征[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 444-452.
ZHANG Liangen, LU Shijie, LI Chengrong, et al. Movement and discharge characteristics of micron-scale metal dust in gas insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 444-452(in Chinese).
- [17] 杨宁, 毕建刚, 弓艳朋, 等. 1100 kV GIS 设备内部缺陷局部放电带电检测方法试验研究及比较分析[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 37-47, 57.
YANG Ning, BI Jiangang, GONG Yanpeng, et al. Experimental research and comparative analysis on live test methods of partial discharge of internal defects in 1100 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 37-47, 57(in Chinese).
- [18] 蒲天骄, 乔骥, 韩笑, 等. 人工智能技术在电力设备运维检修中的研究及应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 369-383.
PU Tianjiao, QIAO Ji, HAN Xiao, et al. Research and application of artificial intelligence in operation and maintenance for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 369-383(in Chinese).
- [19] 马欢, 郭裕钧, 张血琴, 等. 基于高光谱技术的绝缘子污秽含水量检测[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1396-1404.
MA Huan, GUO Yujun, ZHANG Xueqin, et al. Moisture content detection of insulator contamination based on hyperspectral technology[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1396-1404(in Chinese).
- [20] 郑书生. 变压器绕组中局部放电特高频定位方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
ZHENG Shusheng. Location of partial discharges in transformer windings by using UHF method[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015(in Chinese).
- [21] ASHKEZARI A D, MA Hui, SAHA T K, et al. Investigation of feature selection techniques for improving efficiency of power transformer condition assessment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(2): 836-844.
- [22] 陈伟根, 刘娟, 曹敏. 基于信息融合的变压器内部故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3797-3803.
CHEN Weigen, LIU Juan, CAO Min. Diagnosis method of internal fault for transformers based on information fusion[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3797-3803(in Chinese).
- [23] MAJIDI M, FADALI M S, ETEZADI-AMOLI M, et al. Partial discharge pattern recognition via sparse representa-

- tion and ANN[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 1061-1070.
- [23] BALLAL M S, JAISWAL G C, TUTKANE D R, et al. Online condition monitoring system for substation and service transformers[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(7): 1187-1195.
- [24] 唐炬, 张晓星, 曾福平. 组合电器设备局部放电特高频检测与故障诊断[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
TANG Ju, ZHANG Xiaoxing, ZENG Fuping. UHF detection and fault diagnosis of partial discharge in combined electrical equipment[M]. Beijing: Science Press, 2016(in Chinese).
- [26] 别朝红, 王旭, 胡源. 能源互联网规划研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6445-6462.
BIE ZhaoHong, WANG Xu, HU Yuan. Review and prospect of planning of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6445-6462(in Chinese).
- [27] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23(in Chinese).
- [28] 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 DiYuan, 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(in Chinese).
- [29] 王克英, 穆钢, 陈学允. 计及 PMU 的状态估计精度分析及配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 29-33.
WANG Keying, MU Gang, CHEN Xueyun. Precision improvement and PMU placement studies on state estimation of a hybrid measurement system with PMUs[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 29-33(in Chinese).
- [30] 刘羽霄, 张宁, 康重庆. 数据驱动的电力网络分析与优化研究综述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 157-167.
LIU Yuxiao, ZHANG Ning, KANG Chongqing. A review on data-driven analysis and optimization of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 157-167(in Chinese).
- [31] SINGH H, ALVARADO F L. Network topology determination using least absolute value state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1159-1165.
- [32] 王兴志, 严正, 沈沉, 等. 基于在线核学习的电网不良数据检测与辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 50-55.
WANG Xingzhi, YAN Zheng, SHEN Chen, et al. Power grid bad-data detection and identification based on online kernel learning method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 50-55(in Chinese).
- [33] ABUR A, EXPOSITO A G. Power system state estimation: theory and implementation[J]. Universiti Teknologi Petronas, 2004, 17(95): 213-256.
- [34] DU Z P, ARRILLAGA J, WATSON N R, et al. Identification of harmonic sources of power systems using state estimation[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(1): 7-12.
- [35] CHEN Y C, WANG Jianhui, DOMÍNGUEZ-GARCÍA A D, et al. Measurement-based estimation of the power flow Jacobian matrix[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5): 2507-2515.
- [36] YU Jiafan, WENG Yang, RAJAGOPAL R. Mapping rule estimation for power flow analysis in distribution grids[EB/OL]. (2017-02-25). <https://arxiv.org/pdf/1702.07948.pdf>.
- [37] 孙秋野, 滕菲, 张化光, 等. 能源互联网动态协调优化控制体系构建[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3667-3677.
SUN Qiuye, TENG Fei, ZHANG Huaguang, et al. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3667-3677(in Chinese).
- [38] WU Xiaohua, HU Xiaosong, MOURA S, et al. Stochastic control of smart home energy management with plug-in electric vehicle battery energy storage and photovoltaic array[J]. Journal of Power Sources, 2016, 333: 203-212.
- [39] VLACHOGIANNIS J G, HATZIARGYRIOU N D. Reinforcement learning for reactive power control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1317-1325.
- [40] 郭创新, 朱传柏, 曹一家, 等. 电力系统故障诊断的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 98-103.
GUO Chuangxin, ZHU Chuanbai, CAO Yijia, et al. State of arts of fault diagnosis of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 98-103(in Chinese).
- [41] 程云峰, 张欣然, 陆超. 广域测量技术在电力系统中的应用研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 145-153.
CHENG Yunfeng, ZHANG Xinran, LU Chao. Research progress of the application of wide area measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 145-153(in Chinese).
- [42] 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.
HE Jinghan, LUO Guomin, CHENG Mengxiao, et al. A research review on application of artificial intelligence in power system fault analysis and location[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5506-5516(in Chinese).
- [43] 顾雪平, 曹绍杰, 张文勤. 人工神经网络和短时仿真结合的暂态安全评估事故筛选方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 16-19, 26.
GU Xueping, TSO S K, ZHANG Wenqin. Integration of ANNs and short-duration numerical simulation for contingency screening of transient security assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8): 16-19, 26(in Chinese).
- [44] 戴远航, 陈磊, 张玮灵, 等. 基于多支持向量机综合的电力系统暂态稳定评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1173-1180.
DAI Yuanhang, CHEN Lei, ZHANG Weiling, et al. Power system transient stability assessment based on multi-support vector machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1173-1180(in Chinese).

- [45] TANG Yi, CUI Han, WANG Qi. Prediction model of the power system frequency using a cross-entropy ensemble algorithm[J]. Entropy, 2017, 19(10): 552.
- [46] 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(in Chinese).
- [47] 李京, 刘道伟, 安军, 等. 基于强化学习理论的静态电压稳定裕度评估[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5136-5148.
LI Jing, LIU Daowei, AN Jun, et al. Static voltage stability margin assessment based on reinforcement learning theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5136-5148(in Chinese).
- [48] HOU Qingchun, ZHANG Ning, KIRSCHEN D S, et al. Sparse oblique decision tree for power system security rules extraction and embedding[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3019383.
- [49] 韩天森, 陈金富, 李银红, 等. 电力系统稳定评估机器学习可解释代理模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4122-4131.
HAN Tiansen, CHEN Jinfu, LI Yinong, et al. Study on interpretable surrogate model for power system stability evaluation machine learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(13): 4122-4131(in Chinese).
- [50] 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(in Chinese).
- [51] HADIDI R, JEYASURYA B. Reinforcement learning based real-time wide-area stabilizing control agents to enhance power system stability[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 489-497.
- [52] CHEN Yousu, YIN Tianzhixi, HUANG Renke, et al. Big data analytic for cascading failure analysis[C]//2019 IEEE International Conference on Big Data(Big Data). Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2019: 1625-1630.
- [53] LIU Yuxiao, WANG Yi, YONG Pei, et al. Fast power system cascading failure path searching with high wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2274-2283.
- [54] 王继业, 季知祥, 史梦洁, 等. 智能配用电大数据需求分析与应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1829-1836.
WANG Jiye, JI Zhixiang, SHI Mengjie, et al. Scenario analysis and application research on big data in smart power distribution and consumption systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1829-1836(in Chinese).
- [55] WANG Yi, CHEN Qixin, HONG Tao, et al. Review of smart meter data analytics: applications, methodologies, and challenges[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3125-3148.
- [56] AKOUEMO H N, POVINELLI R J. Data improving in time series using ARX and ANN models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3352-3359.
- [57] 赵文清, 沈哲吉, 李刚. 基于深度学习的用户异常用电模式检测[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 34-38.
ZHAO Wenqing, SHEN Zheji, LI Gang. Anomaly detection for power consumption pattern based on deep learning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 34-38(in Chinese).
- [58] GRANELL R, AXON C J, WALLOM D C H. Impacts of raw data temporal resolution using selected clustering methods on residential electricity load profiles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3217-3224.
- [59] WANG Pu, LIU Bidong, HONG Tao. Electric load forecasting with recency effect: a big data approach[J]. International Journal of Forecasting, 2016, 32(3): 585-597.
- [60] CHITSAZ H, SHAKER H, ZAREIPOUR H, et al. Short-term electricity load forecasting of buildings in microgrids[J]. Energy and Buildings, 2015, 99: 50-60.
- [61] XIE Jingrui, HONG Tao, LAING T, et al. On normality assumption in residual simulation for probabilistic load forecasting[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(3): 1046-1053.
- [62] KAVOUSIAN A, RAJAGOPAL R, FISCHER M. Determinants of residential electricity consumption: using smart meter data to examine the effect of climate, building characteristics, appliance stock, and occupants' behavior[J]. Energy, 2013, 55: 184-194.
- [63] 王冬, 王拓, 王旗, 等. 一种面向需求响应资源的模糊聚类算法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4056-4063.
WANG Dong, WANG Tuo, WANG Qi, et al. A fuzzy C-means clustering algorithm for demand-side response resource[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4056-4063(in Chinese).
- [64] MAHMOUDI-KOHAN N, MOGHADDAM M P, SHEIKH-EL-ESLAMI M K. An annual framework for clustering-based pricing for an electricity retailer[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(9): 1042-1048.
- [65] 王毅, 张宁, 康重庆, 等. 电力用户行为模型: 基本概念与研究框架[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2056-2068.
WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Electrical consumer behavior model: basic concept and research framework[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2056-2068(in Chinese).



张宁

收稿日期: 2020-12-15。

作者简介:

张宁(1985), 男, 副教授, 研究方向为可再生能源、多能源系统、电力系统规划及运行等, ningzhang@tsinghua.edu.cn;

*通信作者: 何金良(1966), 男, 教授, IEEE Fellow, 主要从事输变电技术及电介质材料等方面研究, hejl@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

Panoramic Information Perception and Intelligent Grid

ZHANG Ning¹, MA Guoming², GUAN Yonggang³, HU Jun¹, LU Chao¹, WEN Jinyu⁴, CHENG Shijie⁴,
CHEN Weijiang⁵, HE Jinliang^{1*}

(1. Tsinghua University; 2. North China Electric Power University; 3. National Natural Science Foundation of China; 4. Huazhong University of Science and Technology; 5. State Grid Corporation of China)

KEY WORDS: panoramic information perception; advanced sensing; energy equipment; intelligent grid

The goal of carbon neutrality and the rapid development of renewable energy brings new opportunities and challenges to power systems. Accelerating digitalization and building smart grids is an important way of tackling the future challenges. On October 31st and November 1st 2020, the 265th “Shuangqing forum” was held with the theme of “panoramic information perception enabling power grid wisdom.” This paper is written based on the discussion on this forum.

Firstly, based on the extensive and in-depth discussion of the 265th “Shuangqing forum,” the fundamental scientific issue is concluded as “Information perception and integrated intelligence of power energy wide-area large scale system.” The forum also come to a consensus that the intelligent grid is an advanced form of smart grid. The smart grid can enhance the observability and controllability of the power system through measurement and communication; while on this basis, the intelligent grid should be able to actively aware the situation, to define the problems of the system, to discover knowledge, and to solve the problems.

Then, this paper discusses the current development status of the intelligent grid. Three topics are covered: advanced sensing theory and technology of power systems, intelligent sensing technology of power energy equipment, and intelligent analysis, operation and control of power systems based on panoramic information. They correspond to the sensing layer, the equipment layer, and the system layer in the power system, as shown in Fig. 1. In the field of advanced

sensing theory and technology of power systems, microelectromechanical systems (MEMS) sensing, optical sensing, and sensor fusion and integration technology have been discussed. In the field of intelligent sensing technology of power energy equipment, equipment internal defect characteristics, distributed real-time monitoring network, and equipment health diagnosis have been studied. In the area of intelligent analysis, operation and control of power systems based on panoramic information, data-driven steady-state analysis and control of the power system, data-driven power system transient analysis and fault analysis, and data-driven user side analysis have been researched.

Further, this paper points out the future research need in this field. At the sensing layer, high sensitivity perception, multi-parameter fusion sensing, anti-interference and high-reliability sensors and their life assessment, fusion and integration of low-power chip-based microsensors and their edge intelligence implementation are the future trends. At the equipment layer, equipment panoramic information characteristics and their spatiotemporal evolution, distributed real-time monitoring network technology, theories and methods of equipment health diagnosis should be studied. At the system layer, big data integration and information security, system and user information perception and modeling, integrated intelligence of power system analysis, control, dispatch and planning are the key technologies.

The research of “Panoramic Information Perception and Intelligent Grid” involves the wide interdisciplinary research of electrical, materials, microelectronics, optics, big data and artificial intelligence, information communication and other disciplines, and also reflects the narrow inter-discipline between high voltage and the power system. It is expected that substantial progress will be made in the future 5-10 years, which will help China’s power system to cope with the huge challenges of energy transformation and carbon neutrality, enhance the ability of independent innovation and breakthrough core technologies, and improve China’s scientific and technological competitiveness in the field of intelligent grid.

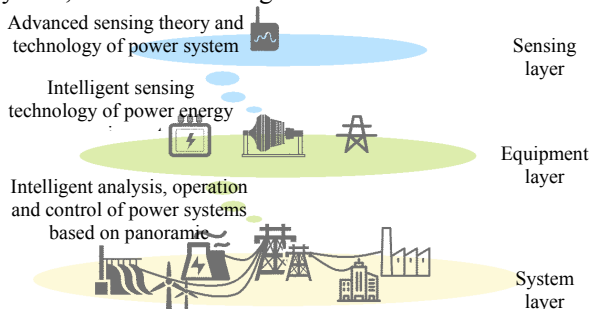


Fig. 1 Research scope of panoramic information perception and intelligent grid