

智能配电网态势感知关键技术及实施效果评价

葛磊蛟¹, 李元良¹, 陈艳波², 崔庆雪¹, 马丛淦³

(1. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;
 2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;
 3. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

摘要: 智能配电网态势感知技术是智能配电网状态可观测性提升与系统稳定运行的重要保障。然而在实际应用过程中因场景差异性较大和实施效果的有效定量分析方法缺失, 常出现其难以完成对突发事件的智能快速响应。为此, 从配电网高效运维的角度阐述并分析了智能配电网态势感知及实施效果评价的涵义、框架和技术。首先, 介绍了智能配电网态势感知技术的内涵、框架和挑战; 其次, 从配电网精益化运维的视角深入阐述了智能配电网态势感知在态势觉察、态势理解和态势预测等 3 个阶段中各自主要的关键技术; 最后, 为实现对差异化场景下配电网态势感知实施效果的科学评价, 考虑配电网运行数据质量现状与主客观评估的模糊性, 从指标体系和赋权方法 2 个方面阐述了智能配电网态势感知实施效果评价的关键技术内容和发展趋势, 并分析归纳了自学习评价技术的框架和理念, 以期为智能配电网态势感知推广应用提供一定的评判标准, 也为配电网智能调控的实现提供有力的技术支撑。

关键词: 智能配电网; 态势感知; 实施效果评价; 指标体系; 赋权方法

Key Technologies of Situation Awareness and Implementation Effectiveness Evaluation in Smart Distribution Network

GE Leijiao¹, LI Yuanliang¹, CHEN Yanbo², CUI Qingxue¹, MA Conggan³

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
 3. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: The situation awareness (SA) of smart distribution network (SDN) is a vital guarantee for the observability improvement and stable operation of SDN. However, due to the great difference of scenes and the lack of appropriate quantitative analysis method of the SA implementation effectiveness, SA is often difficult to meet the actual application requirements of rapidly responding to emergencies in SDN. We analyze the meaning, framework, and key technologies of SA in SDN and the effectiveness evaluation from the perspective of efficient operation. Firstly, the connotation, framework, and challenges of SA in SDN are introduced. Secondly, the key technologies of SA in SDN in the three stages of situation perception, situation assessment, and situation prediction are explained from the perspective of meticulous operation of SDN. Finally, to achieve a scientific evaluation of SA effectiveness of SDN, considering the quality of the SDN operation data and the ambiguity of subjective and objective evaluation, we describe the key technical content and development trend of the implementation effectiveness evaluation of SA in SDN from the indicator system and the weighting method, and analyze the framework and concept of self-learning evaluation technology. It is expected to provide specific criteria for the promotion and application of SA in SDN, and provide strong technical support for intelligent control of SDN.

Key words: smart distribution network; situation awareness; implementation effectiveness evaluation; indicator system; weighting method

0 引言

智能配电网“态势感知”(situation awareness, SA)的理念源自于涉及感觉、知觉、行为习惯等的人类心理学，包括察觉、理解和预测等3方面。在心理学领域，感觉是大脑对直接作用于人体感觉器官的客观事物中各种属性的反映^[1]，人对客观事物的认知均以感觉为起点，它是对复杂事物的初步察觉，也是知觉、行为等复杂的认知活动的基础；基于感觉信息，知觉按特定的方式来处理多类感觉信息，根据个体的经验来解读由感觉提供的信息，挖掘感觉信息的深层涵义，即理解；行为是指人体受到内外部刺激后做出基于感觉、知觉产生的活动，其可以通过“计划行为理论”从感知信息加工的角度、以期望价值理论为出发点解释人体决策行为，并预测未来的行为和趋势^[2]，即预测。总体来说，人体通过感觉来搜集个体所需要的信息，依靠知觉来处理感觉收集到信息，最终的行为趋势可通过“计划行为理论”进行解释和预测。这正对应着智能配电网态势感知的基本理念，其实计划行为理论使用函数表达式量化解释“行为态度、主观规范、知觉行为控制”的机制正对应着智能配电网态势感知中对实施效果的定量评价技术。

另外，态势感知指在一定的时空条件下，对所处环境中各元素的觉察、理解及对未来态势的预测^[3]。为此，态势感知的流程可划分为态势觉察、态势理解、态势预测等3个阶段^[4]。现代社会已经踏入信息化时代，态势感知逐步应用于网络安全、军事管理、评估实践和情报学等各个领域^[5-8]。文献[5]提出了一种网络安全态势感知技术以实现对全球网络威胁的全局感知；文献[6]构建了人员量化能力评估领域中的态势感知体系；文献[7]旨在提高情报感知能力，归纳融合情境感知、数据感知和态势感知等相关领域构建了适于开展情报感知的技术模型；文献[8]讨论了有人机与无人机协同态势感知技术、协同互动控制技术、协同任务管理分配技术、协同航线规划技术和协同能效评估技术等关键技术。

2020年12月国务院新闻办公室发布了《新时代的中国能源发展》白皮书，对我国能源供应保障能力提出了进一步要求。作为电力能源系统枢纽的智能配电网，因其直接面向用户终端，其完备性将直接影响着终端用户的供电可靠性和用电、用能质量，且离不开运行状态充分的监测与分析，即智能

配电网态势感知技术。然智能配电网在运行状态、设备类型、拓扑结构上均具有多样性特点^[9-12]，不同场景下智能配电网态势感知实施效果差异较大，一些应用场景下所配置的配电网态势感知没有较好通过实时监视功能提升智能配电网的状态可观测性，并为主动防控提供关键信息^[13]，从而保障配电网安全、稳定、高效运营的能力^[14]，因此有必要深入探讨智能配电网态势感知实施效果的定量分析。在智能配电网态势感知发展初期，文献[4]已从系统接入的角度对其内涵和关键技术做出了阐述。而现如今智能配电网运行形式已然发生变化，交直流混合、源-网-荷-储交叉耦合、多源互补等形式使得配电网出现更复杂的运行状态和故障种类；清洁能源高比例并网、分布式发电无序接入导致电网不确定性显著增加；同时区域电力负荷提升、供电保障指标细化，使得“获得电力”水平要求越发严格。伴随着态势感知在智能配电网的日益广泛应用，亟需从配电网精益化运维的角度重新对智能配电网态势感知关键技术进行归纳分析，并对态势感知的实施效果进行系统评价。

智能配电网中的交直流混合^[15]、源-网-荷-储交叉耦合^[16]、多源互补^[17]等形式的迅速普及使得配电网的运行方式日益复杂、失稳风险日益加大，进而给态势感知技术的实施带来诸多挑战^[18]。此外，来自经济、环境、政策等方面的压力致使智能配电网日益达到其电能供应能力的极限，态势感知技术需针对当前智能配电网进行适配和改善。为应对以上挑战，文献[19]从设备状态监测水平、电能质量监测水平、电网可靠性水平、电网自愈能力、电网消纳可再生能源水平等5个方面对态势感知实施效果进行评估，但其未结合智能配电网态势感知的关键技术，没有针对每项技术的需求特性进行指标建立；文献[20]基于人工神经网络技术使用有限的量测数据实现对智能配电网的监视。基于改进区间层次分析法和多目标规划法的线性组合，文献[21]评估了智能配电网态势感知在各阶段的实现效果；文献[22]基于同步相量测量单元进行输电网态势评估，但该类方法并不适用于实时量测信息不健全的配电网；文献[23]提出了一种针对电力系统电压安全等级在线评估的定量分析方法以帮助管理部门进行决策；文献[24]提出了一种用于综合评估大规模光伏能源渗透下的交直流混合配电网经济运行可行性的方法。总而言之，上述工作仅聚焦于智能配电

网的某一方面性能或局限于智能配电网状态与态势感知实施效果评价指标之间的相关性, 没有结合智能配电网态势感知的关键技术进行分析, 无法凸显态势感知技术的特征, 或其权重固定的评估模式难以实现兼容多类型配电网的动态评估, 对态势感知实施效果的理解可能存在偏差。故仍需制定一套科学的智能配电网态势感知技术实施效果评价体系进行辅助和借鉴。

文中阐述了智能配电网态势感知技术的内涵、框架和挑战, 从智能配电网精益化运维的角度归纳提出了智能配电网态势感知各阶段的关键技术, 分析了智能配电网态势感知实施效果评价在指标体系和赋权方法两个方面的关键技木内容和挑战, 为后续研究工作提供借鉴。

1 智能配电网态势感知概述

针对智能配电网场景多样、数据量大、运行态势复杂的特点, 归纳分析了适应于配电网的多模态数据融合态势感知关键技术, 进而构建了多场景态势感知实施效果综合评估模型。所构建的智能配电网态势感知和实施效果评价技术如图1所示。

1.1 智能配电网态势感知内涵

态势感知技术是指在一定的时空条件下, 对周身环境中各元素的觉察、理解以及对未来态势的预测^[4]。态势感知技术的实现过程可划分为3个阶段: 首先是态势觉察阶段, 完成数据或信息收集的任务, 即获取并检测环境中的重要特征元素; 第2阶段为态势理解阶段, 本质上通过数据分析获取对自身和外界的认识, 即整合获取到的数据信息, 剖析数据中的对象及其行为和对象间的联系, 从而完成运行态势理解; 第3阶段为态势预测阶段, 实现对认知的实际应用, 即基于前两阶段对环境信息的觉察和理解, 预测未来的发展趋势。

1.2 智能配电网态势感知目标

1) 能对智能配电网进行实时或准实时的态势感知, 快速准确地判断出配电网安全状态, 并基于配电网安全属性的历史状态记录, 为管理调度人员提供合理准确的配电网运行趋势数据。

2) 实现超前预测, 即对可能发生的故障和事故进行预测, 为配电网管主动防控提供科学依据, 降低事故风险。

3) 通过创新算法等形式, 培养智能配电网态势感知系统自学习和自适应的能力, 实现对配电网

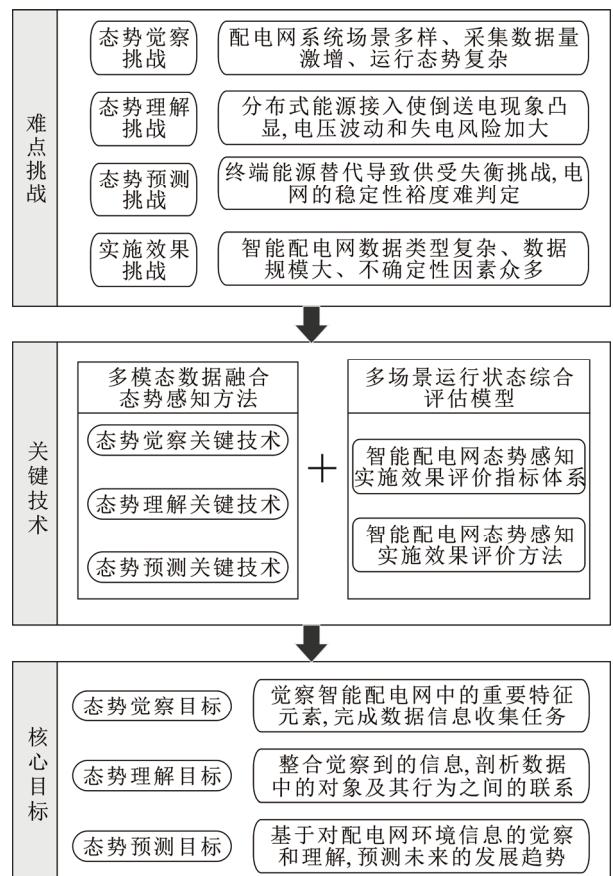


图1 智能配电网态势感知和实施效果评价技术框图

Fig.1 Technical framework of situation awareness and implementation effectiveness evaluation in smart distribution network

态势的智能感知、智能化改善和修正态势, 从而为后续配电网态势往好方向发展, 提供一定的建议。

4) 能够进行安全态势分析, 实时检测潜在的配电网运行风险, 及时发出预警, 提高智能配电网的韧性和弹性。

1.3 智能配电网态势感知面临的挑战

1) 态势觉察挑战。由于系统场景多样、数据量大、运行态势复杂, 态势感知面临巨大挑战。随着如高级量测体系、智能电表、同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)等新型量测设备的快速部署, 智能配电网态势感知采集的数据量同时激增, 不可避免地增加了态势觉察的冗余数据处理压力^[25]; 采集的电力数据大多只能反映配电网的良好运行状态, 而缺乏反映系统故障或不良运行状态的信息, 导致智能配电网态势感知系统的输入数据不对称, 故障预判可靠性差。如何快速觉察配电网状态是未来研究的焦点。

2) 态势理解挑战。配电网终端的倒送电现象

凸显, 电压波动和失电风险加大, 大规模分布式发电使得传统调度模式难以为继。不同地区智能配电网的系统结构和自动化水平存在较大差异^[26]。如何精准理解配电网实际情况必将是未来的研究热点。

3) 态势预测挑战。终端能源替代导致供受失衡挑战, 电网的稳定性裕度难判定。不同于无源配电网, 智能配电网具有更高比例的分布式电源^[27]。高渗透率分布式电源的并网提升了配网灵活性, 但同时增加了智能配电网运行的不确定性^[28]。如何有效准确研判配电网趋势成为态势感知的难点。

4) 实施效果挑战。智能配电网数据类型复杂、数据规模大、不确定性因素众多, 所配置配电网态势感知技术的用户差异化大, 如何有效判定所实施的配电网态势感知技术在差异化场景下能保障系统稳定运行, 满足实际应用需求, 挑战大。

2 智能配电网态势感知关键技术

开展智能配电网态势感知关键技术的研究, 并促进具有高精度、高可靠性的态势感知技术在智能配电网中的应用, 在电力系统领域有着广阔的发展空间与极高的应用价值。文中构建了一种如图2所示的多维度的智能配电网态势感知物理框架, 其集成了智能配电网数据采集与监控系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)、5G 通讯技术、能量管理系统、配网自动化系统、信息采集系统、

数据处理系统和通讯网络, 结合了态势觉察、态势理解和态势预测等3个阶段以深入剖析智能配电网态势感知的结构框架及其关键技术。面对运行方式复杂多样、清洁能源大量并网、供电指标持续细化的新型智能配电网, 从配电网精益化运维的角度归纳并分析了当前智能配电网态势感知技术在态势觉察、态势理解、态势预测等阶段的关键技术。

2.1 态势觉察

态势觉察是数据获取阶段, 该阶段获取智能配电网分析和调控所需的数据, 从深度和广度两个层面实现对智能配电网的全面感知, 其架构见图3。态势觉察主要关键技术包括: 大数据技术、5G 通讯技术、虚拟采集技术、高级量测体系构建技术等。

目前智能配电网进入数据密集时代, 但数据类型复杂、变化迅速、规模和价值密度低^[29], 态势感知大数据技术应运而生, 通过应用海量数据压缩存储方法、数据预处理技术、异构网络融合技术以及多源数据融合等技术以适应智能配电网现状, 为态势感知的实现提供数据基础; 通讯技术是影响智能配电网观测性的核心因素, 当前先进的第5代移动通信(5G 通讯)技术凭借其高数据传输率和低传输延时的优势^[30], 开始投入到坚强智能电网与电力物联网建设中来, 并逐步应用于智能仪表和状态监测系统, 以满足态势感知对高容量、高带宽和低延时需求。

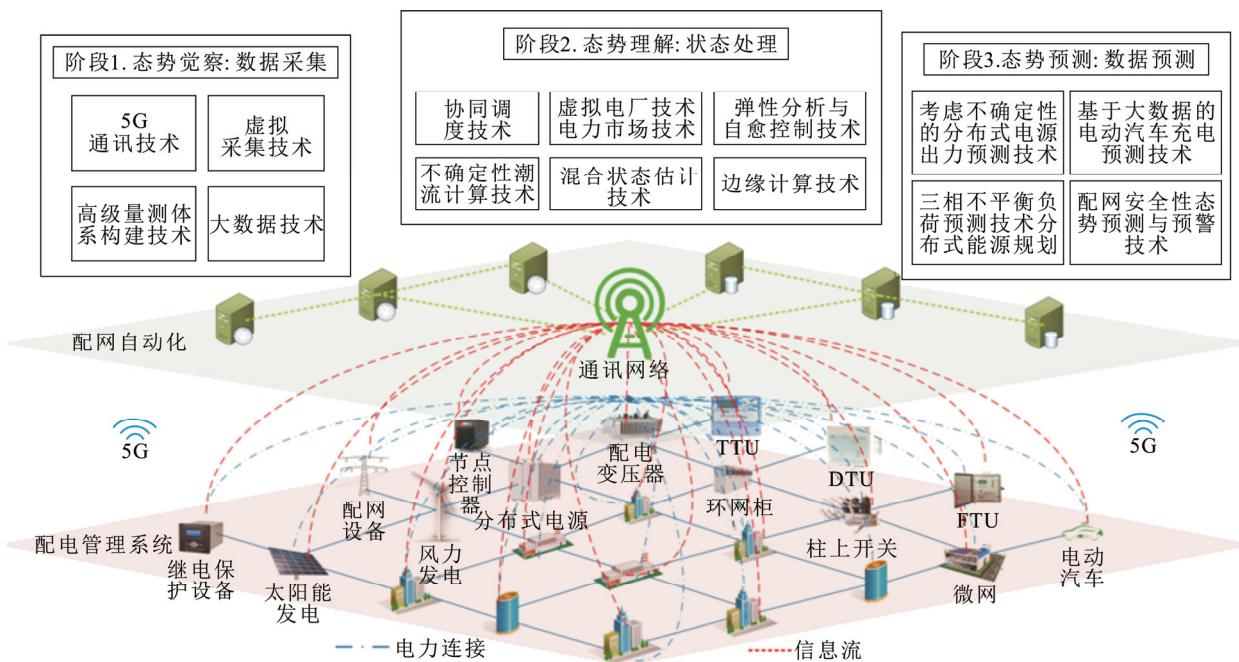


图2 智能配电网态势感知物理框架

Fig.2 Situational awareness physical framework of smart distribution network

为提升运维数据采集的全面性与准确性, 智能配电网虚拟采集技术正成为一个研究热点, 该技术并未通过实装的传感器、采集器和集中器等量测设备对配电网数据进行采集^[31], 而是对无法实时采集或采集难度较大的数据进行预测或数据外推以替代实际采集的一种新型预估技术, 其利用智能配电网大数据平台, 将实时完整采集的配电网运维数据作为标准, 根据部分配电网运维数据判断待采集配电网的相似区域, 通过挖掘该配电网与该配电网相似区域的实时采集数据的内在映射关系, 结合相似区域本身具有的部分实时采集数据, 对相似区域剩余数据实现预测, 实现智能配电网运维数据的全面采集。

智能配电网态势感知离不开完善的量测装置硬件基础, 高级量测体系构建技术包含量测优化配置技术、PMU 配置优化和数据应用技术等, 通过对智能电表、广域通信网络、量测数据管理系统和用户户内网络的整合, 实现智能配电网量测的智能化, 从而保障智能配电网的可观测性。

2.2 态势理解

态势理解是数据分析阶段, 深入理解与挖掘在态势觉察阶段中收集到的数据, 并从系统稳定性、经济性、负载转供能力、可靠性、灵活性、供电能力、负荷接入能力和分布式发电消纳能力等方面分析智能配电网的运行态势, 其架构如图 4 所示。态势理解主要关键技术包括: 不确定性潮流计算技术、混合状态估计技术、配网弹性分析与自愈控制技术、配网可靠性与灵活性分析技术、配网协同调度技术、配网故障定位技术、电力市场技术、虚拟电厂技术、边缘计算技术等。

不确定性潮流计算技术, 涉及区间潮流^[32]、模糊潮流^[33]、概率潮流^[34]等算法, 旨在估计不确定性因素带给配电网的影响, 其将确定性潮流计算中的已知和待求量都视为随机变量, 并基于模糊数或概率统计理论分析等方式建立配电网不确定潮流计算模型, 仅通过一次计算即可为智能配电网态势感知提供更全面的数据分析, 从而减轻配电网不确定因素导致的重复运算负担; 当前配电网运行数据主要来自于 SCADA 系统, 为进一步提升配电网量测精度、时效和范围, 提供量测信息更全面的 PMU 逐渐在智能配电网中普及, 但短期内智能配电网处于传统与新型量测装置大量并存的状态, 所以亟需基于 PMU/SCADA 混合量测的状态估计技术(混合状

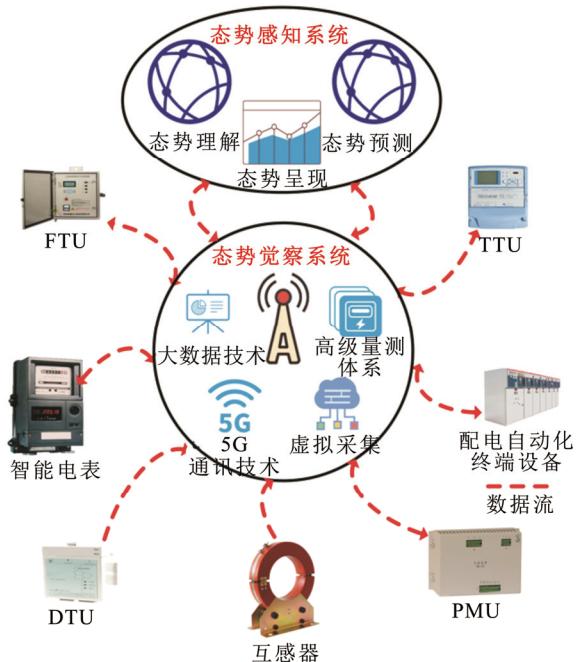


图 3 智能配电网态势觉察架构
Fig.3 Framework of situation perception for smart distribution network

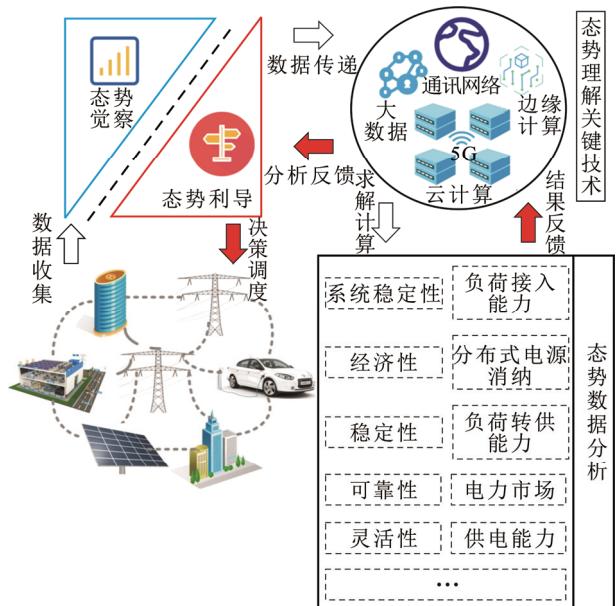


图 4 智能配电网态势理解架构
Fig.4 Framework of situation assessment for smart distribution network

态估计技术)来提升态势感知精度和广度, 未来阶段的研究将会聚焦于不同类型量测装置在频率、时标、结构、延时等方面的区别, 并探寻合适的数据处理方法。

配网弹性分析与自愈控制技术可有效提升智

能配电网的韧性和柔性，其主要包含配网故障恢复定位技术、配电网网络重构技术、配电网快速仿真与模拟技术、高级配电自动化技术等，该类技术结合智能配电网态势感知实现扰动预判分析，以保障重要基础设施在各类突发事件下的可靠持续供电；配网可靠性与灵活性分析技术，充分利用态势觉察提供的配电网信息来完成对配网可靠性和灵活性的深入分析，并建立兼容多类配电网终端设备的可靠性模型，进而实现智能配电网运行状态的灵活校正。

为充分协同不同类型能源和储能的互补性，配网协同调度技术成为构建多能互补配电网的关键，其协同一次系统和二次系统实现时间尺度和空间布局上的系统调控，引导智能配电网走可持续发展路线；电力市场技术，围绕电力市场的发展规律，运用博弈理论建立基于电能生产者和用户的双向良性竞争的电力市场；电力物联网的普及使物联网终端趋于微型和智能化，通过边缘计算技术实现各智能终端间的灵活协同，可以有效提升智能配电网态势感知的计算效率和响应速度^[35]。

2.3 态势预测

态势预测是状态预测阶段，用于预测智能配电网状态的未来变化趋势，例如不确定性负荷、分布式电源和电动汽车的功率预测；同时态势预测可以实时评估配电网的运行风险，并提醒配网管理部门及时做出调控，其架构如图 5 所示。态势预测主要关键技术包括：三相不平衡负荷预测技术、考虑不确定性的分布式发电出力预测技术、基于大数据的电动汽车充电预测技术、分布式能源规划技术、配网安全性态势预测与预警技术。

三相不平衡负荷预测技术，在大数据背景下构建三相不对称负荷态势分析及其预测方法，建立高效的三相不平衡度计算模型，实现高精度的不对称负荷与配电网不平衡度预测以适应配电网三相不平衡的特性；分布式电源出力的间歇性不利于配电网的稳定运行，而分布式发电出力预测技术量化了智能配电网中分布式电源的不确定性影响，通常采用概率统计规律、区间估计算法、模糊理论等算法来预测分布式电源的出力，使预测结果兼容包含各类不确定性参数的智能配电网区域。

当今社会新能源汽车技术迅速发展并普及，但其高度的时空随机性为智能配电网优化调度策略带来重大挑战^[36]，如何模拟电动汽车出行链，提取电动汽车充电的特征因素，并实现高精度的电动汽车

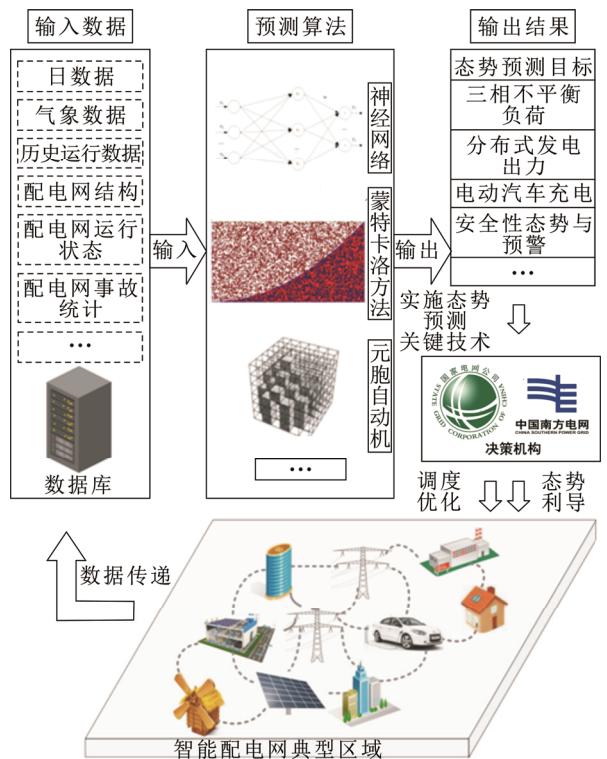


图 5 智能配电网态势预测架构
Fig.5 Framework of situation prediction for smart distribution network

负荷的时空预测仍是目前的研究难点，而基于大数据的电动汽车充电预测技术可妥善处理该类问题，通过融合大数据技术来精准预测电动汽车负荷的时空分布是态势预测的核心工作之一；为加快推动坚强智能电网建设，智能配电网安全性态势预测与预警技术兴起，其通过对配电网安全运行状态与潜在威胁的分析，评估并预测配电网运行风险与安全态势，最终提出安全校正控制法并实现在线预警^[24]，而快速准确提取配电网安全态势要素及辨识态势异常状况是其技术核心和关键需求。

智能配电网多能互补技术有效促进未来城市的能源转型升级，伴随着风力/光伏能源、直流电解水制/储氢设备、交流供电冰蓄冷/水蓄冷设备等能源设备顺利接入智能配电网，如何实现各类能源的优化配置，改善配电网能源结构是未来亟需解决的问题，而基于鲁棒优化理论开展分布式能源规划技术，并实现多扰动的源–网–荷–储协调优化，可满足智能配电网精益化运维的需求，同时降低不确定决策的盲目性；随着配电网结构日益复杂，配电网故障类型众多且影响因素冗余性增强，配电网故障预测技术面临如何提取故障特征和故障定位分层解耦

的难题, 而通过结合态势觉察和态势理解完成深层次数据挖掘, 实现配电网故障的超前预测和定位, 可有效提升精益化管控水平和抢修效率, 为配电网精益化运维提供可靠的决策支持。

3 智能配电网态势感知实施效果评价关键技术

对智能配电网态势感知实施效果进行量化评价, 并根据评价结果制定改善配电网运行环境的措施, 有利于协助配电网快速响应台风、霜冻、暴雨、暴雪、地震等重大自然灾害^[20], 同时大幅提升智能配电网柔性、韧性、弹性以及电力决策的准确性、快速性^[37]。不同于配置完备的输电网, 配电网结构复杂多样, 准确可靠的数据采集单元难以覆盖其全部节点, 因此削弱了配电网态势感知的实施效果。伴随着诸如高级量测设备、智能传感器之类的新型量测设备的大量接入, 智能配电网运行数据的采集难度随之降低, 但海量数据的预处理会显著加重运算负担甚至导致大量数据失效。态势感知技术的不完备以及态势感知实施效果的不完善被视为全球范围近期多起大规模供电事故的主要原因之一^[23]。

智能配电网态势感知实施效果评价可分为指标体系和评估方法两部分。鉴于智能配电网态势感知物理框架和智能配电网新特性, 智能配电网态势感知的技术架构和影响因素较为复杂, 若想制定出合理的态势感知实施效果评价指标和评价方法, 降低评价的片面性和主观偏袒性, 并提高指标计算效率和实用性, 必须针对智能配电网态势感知在不同阶段的关键技术, 根据其技术特征设计对应评价指标及其量化公式, 同时智能配电网态势感知实施效果评价方法应该使综合评价结果具有足够的鲁棒性和灵活性。配电网态势感知实施效果评价的顶层设计如图 6 所示。

3.1 智能配电网态势感知实施效果评价困境

智能配电网态势感知实施效果评价的最终目标是通过定义合适的指标体系并采用科学的赋权方法来全面理解态势感知技术在各种智能配电网环境下的实现效果。但是配电网的特殊性为智能配电网态势感知实施效果评价带来以下困境:

1) 智能配电网的数据类型复杂并且数据规模较大, 须筛选出合理且代表性强的评价指标, 并在有限的数据规模下采用高效合适的赋权方法。

2) 不同地区智能配电网在系统架构和自动化

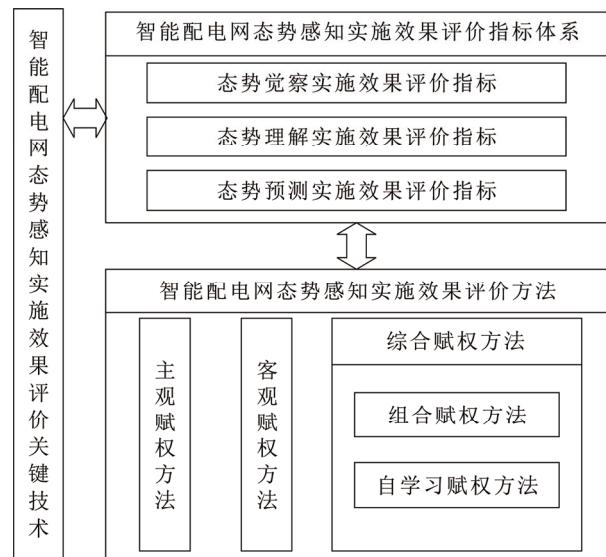


图 6 智能配电网态势感知实施效果评价顶层设计

Fig.6 Top-level design for the evaluation of the implementation effect of smart distribution network situation awareness

水平上的巨大差异性对智能配电网态势感知实施效果评价提出了更高的兼容性和鲁棒性要求。

3) 如今大量间歇性能源接入配电网, 发电功率的波动导致态势感知实施效果评价技术难以准确判断智能配电网状态。

4) 与输电网相比, 智能配电网数据量测的覆盖率和精度实际上较为落后, 这将会大幅降低态势感知效果评价准确性, 目前为定量分析智能配电网态势感知效果所做的研究有限。

3.2 智能配电网态势感知实施效果评价指标体系

近年来, 态势感知技术已经逐渐应用于智能配电网领域中来, 但是对于态势感知在智能配电网中的实施效果如何进行综合评价始终没有达成一致。若是评估指标体系只是针对智能配电网某一特定性能进行分析, 如经济性、可靠性、安全性等, 但如此构建的指标体系可能无法恰当地建立起量化指标与态势感知关键技术的联系, 对于智能配电网态势感知需求的适应性欠佳。

为对应智能配电网态势感知的 3 个阶段, 态势感知实施效果评价指标体系应该包含目标层、准则层和指标层, 其中目标层代指智能配电网态势感知的综合实施效果, 准则层针对智能配电网态势感知中的 3 个阶段“态势觉察、态势理解和态势预测”进行划分, 指标层应根据相应态势感知阶段的关键技术特征及需求设计对应评价指标, 具体层次结构如图 7 所示。按照以上架构定义全部评价指标后,

需根据一定的原则对现有的态势感知实施效果评价指标进行筛选，指标挑选原则包含可计算性、兼容性、实用性、科学性、真实性、层次性等。

针对智能配电网态势感知中的3个阶段“态势觉察、态势理解和态势预测”，态势觉察主要聚焦于配电网可观测程度、测量冗余度、通讯延时等指标；态势理解主要聚焦于配电网电压越限风险、潮流越限风险、供电可靠性等指标；态势预测主要聚焦于配电网负荷波动程度、功率预测误差、故障预测率等指标。据此构建的指标体系可有效促进高精度态势感知技术在智能配电网中的应用，为态势感知关键技术的实施提供评判标准和技术支撑，将会有效提升智能配电网在安全、环保和资源利用效率等方面性能表现。

3.3 智能配电网态势感知实施效果评价方法

综合评价方法可初步划分为主观评价方法、客观评价方法以及综合评价方法，其中综合评价方法可进一步细分为传统的组合评价方法和新兴的自学习评价方法。数据驱动的智能配电网态势感知实施效果评价流程如图8所示。

3.3.1 主观评价方法

主观评价方法在权重中融入了专家、工程师对评价对象的知识认识、主观态度、运行经验等隐形知识，使评价结果贴合于评价专家的主观偏好，区间算法和模糊算法的引入拓宽了主观评价模糊性的解决途径，增强了评估可信度和灵活性，但不同专家对于指标的偏好程度不同，并且缺乏客观数据的支撑，仍然可能导致评价结果偏颇或不稳定，同时区间结果不便于工程中的直接应用。主流的主观评价包括层次分析法^[38]、区间层次分析法^[39]、模糊层次分析法^[40]、二项系数法^[41]等。

3.3.2 客观评价方法

客观评价方法通过分析客观数据的特征来判断指标间的数学关系，具备较强的数学理论依据，但其依赖于大量准确的客观数据，对数据规模和精度有着较高的要求，权重结果缺少专家主观意见的修正，可能会使评价结果偏离实际需求。目前的主流客观评估方法包括熵权法^[42-43]、多目标规划法^[21]、主成分分析法^[44]等。

3.3.3 组合评价方法

为防止信息的缺失，避免单一评估方法造成的片面影响，综合评价方法应运而生，其中组合评价方法通过一定形式的数学运算将主观评价结果和客

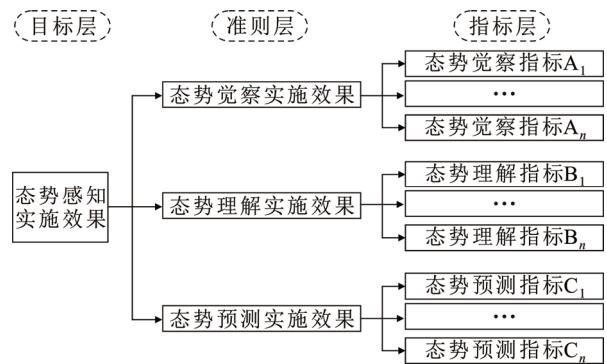


图7 智能配电网态势感知实施效果评价指标体系

Fig.7 Evaluation index system of implementation effect of intelligent distribution network situation awareness

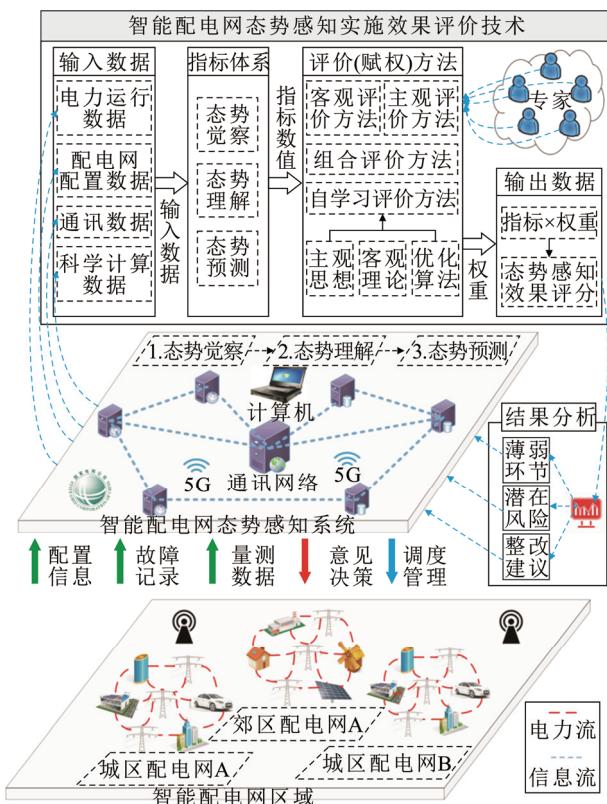


图8 智能配电网态势感知实施效果评价流程

Fig.8 Evaluation process of the implementation effect of situation awareness in smart distribution networks

观评价结果进行组合，而自学习方法是以主观权重区间作为边界，基于一定迭代寻优方法遵从客观准则来实现主观思想和客观理论的有机融合。组合评价方法大都采用线性加权的形式^[45]，具体如下所示

$$\omega_i = \alpha a_i + (1 - \alpha) b_i \quad (1)$$

式中： α 为 0-1 之间的主观权重系数， $1-\alpha$ 为客观权重系数； ω_i 为指标 i 的组合权重； a_i 、 b_i 分别为指

标 i 的主观权重和客观权重。

组合评价方法将主观赋权方法和客观赋权的方法结果进行整合, 通过调节主观权重系数和客观权重系数, 实现主客观评价方法的优缺点互补, 但组合评价只是将两种评价方法的结果进行分步组合, 没有将客观理论和主观思想融合进一个完整算法中来, 权重因子的确定缺乏理论支撑, 进而导致评价效果有时并不能反映真实情况。

3.3.4 自学习评价方法

目前逐渐有学者开始研究自学习评价方法, 并初步应用于电力系统中来, 文献[46-47]在量化评价领域提出权重自学习(自适应)的概念, 以极大熵准则为目标导向, 优化算法为求解途径, 专家认知为启动基石, 建立起主客观思想有机融合的动态赋权方法。但其采用的如梯度下降法、退火模拟算法等传统优化算法, 寻优效果较主流的群智能优化、商用求解器仍有一定差距。

自学习评价方法蕴含着自学习、自适应、动态调节等涵义, 可以实现对动态的场景、需求和目标的自适应。自学习评价的运行框架如图9所示, 主要包含目标函数、主观区间、优化算法、约束条件等4个部分, 具体如下:

1) 目标函数。为提升评价的客观性, 自学习评价方法通常定义1到多个可量化的自学习目标, 并将目标函数(适应度函数)取为某种客观性准则, 如极大熵准则^[46], 由此在自学习过程中目标函数将引导权重不断向着熵值增加的方向变化, 使权重分布更符合客观事物的发展规律并且数值趋于均衡, 从而降低因数据缺失或误差造成的不合理评价风险, 提升自学习评价的鲁棒性和容错率。

2) 约束条件。在自学习过程中, 限制只有满足约束条件的权重才可输出为最终的权重结果。当政策方针或运行环境发生变化时, 往往管理部门需要重新邀请专家和工程师对指标重要性进行权衡, 而约束条件的设立可以实现自学习评价的动态调整, 无需反复邀请专家、学者耗费大量人力物力。在已有的指标重要性信息基础上, 管理者可以根据不同的场景需求增加或修正约束条件, 如“规定某一指标的权重值不低于一定数值”, “限制最优评价值与最劣评价值间的差值不大于一定数值”等约束手段, 从而适应外界环境发生的变化, 实现对权重或评价结果的动态干预。新约束条件的加入可以通过程序快速求解得到新环境下的权重结果, 由此提

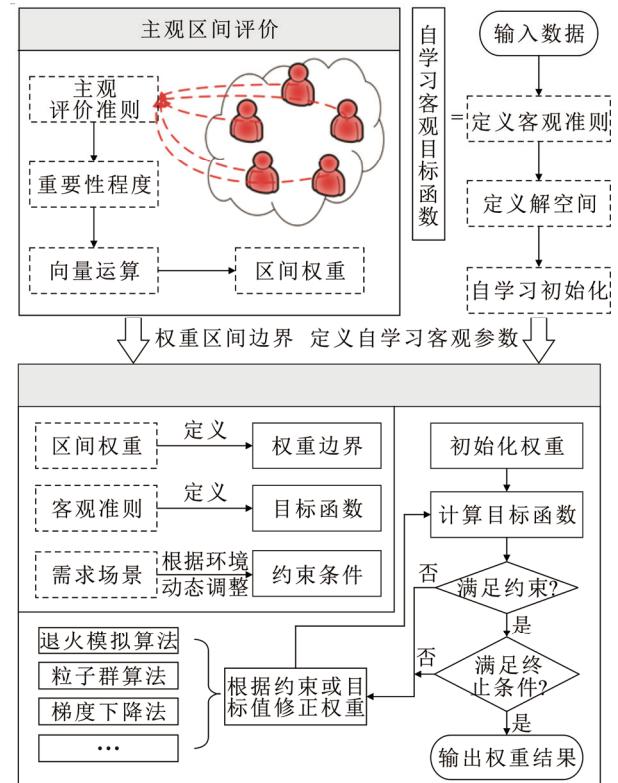


图9 自学习评价框架

Fig.9 Self-learning evaluation framework

升自学习评价的灵活性、快速性、兼容性, 进而实现低成本下的多场景动态适应。

3) 主观区间。通过主观评价方法获取各指标的权重区间, 并将得到的权重区间应用于自学习评价中权重的上限和下限, 以生成自学习权重初值并限制权重的修正过程。这一环节将专家、工程师、现场管控人员的主观经验和思想融入到自学习评价结果中来, 提升自学习评价的合理性和可信度, 并为后续自学习寻优过程提供边界条件。

4) 优化算法。优化算法是整合上述目标函数、约束条件、主观区间的关鍵, 其以主观权重区间为边界条件, 在约束条件满足的情况下引导权重向着提升目标函数值的方向变化。目前对于优化算法的选择暂未有统一论, 商用求解器、智能群优化算法如粒子群算法^[48]、灰狼算法^[27]等都是求解自学习评价模型的高效方法。

自学习方法凭借着主观区间和客观准则, 保证了组合评价方法在主客观融合上的优势; 此外, 通过在自学习过程中引入或更改人为约束, 自学习评价实现了对指标偏好和评估分布的人工干预, 相比于传统的赋权方法处理约束更为方便快捷, 并提升了评价的灵活性与可信度; 另一个显著优势是自学

习评价改良了“单次评价，权定终生”的不合理局面，面对外界环境或方针政策的变化，其以低成本实现了对不同环境的动态适应。综上所述，自学习评价方法将是未来针对智能配电网态势感知实施效果的主流评价方法，具备着良好的研究前景和应用潜力。

4 结论

现阶段，态势感知技术已经顺利在智能配电网推广应用，但随着5G通讯技术、人工智能技术、大数据技术的兴起以及智能配电网特性的快速发展变化，智能配电网态势感知的关键技术需要相应调整以适应现状；同时，智能配电网态势感知实施效果需要构建系统科学的评价体系为态势感知提供导向。巩固发展智能配电网态势感知的关键技术，实现各类技术的有机融合，以态势感知实施效果为导向积极开发并加快实施其关键技术是未来的研究方向。

同时，通过智能配电网态势感知技术来全面掌握智能配电网运行态势，并为智能配电网的精益化运维提供有力的技术支撑。为此，文中针对智能配电网态势感知技术、态势感知实施效果评价技术的模型、框架及其关键技术进行了综述和探讨，并针对自学习评价理念进行了详细阐述，以期为后续智能配电网的新型技术研究提供一定的思路。

参考文献 References

- [1] LINDSAY P H, NORMAN D A. Human information processing: an introduction to psychology[J]. *Science*, 1971, 174(4010): 683-684.
- [2] 段文婷, 江光荣. 计划行为理论述评[J]. 心理科学进展, 2008, 16(2): 315-320.
DUAN Wenting, JIANG Guangrong. A review of the theory of planned behavior[J]. *Advances in Psychological Science*, 2008, 16(2): 315-320.
- [3] ENDSLEY M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems[J]. *Human Factors*, 1995, 37(1): 32-64.
- [4] 王守相, 梁栋, 葛磊蛟. 智能配电网态势感知和态势利导关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 2-8.
WANG Shouxiang, LIANG Dong, GE Leijiao. Key technologies of situation awareness and orientation for smart distribution systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(12): 2-8.
- [5] LIU X W, YU J G, LV W F, et al. Network security situation: from awareness to awareness-control[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2019, 139: 15-30.
- [6] GARCIA G L, STEVAHN L. Situational awareness and interpersonal competence as evaluator competencies[J]. *American Journal of Evaluation*, 2020, 41(1): 107-124.
- [7] 赵柯然, 王延飞. 情报感知的方法探析[J]. 情报理论与实践, 2018, 41(8): 11-16.
- ZHAO Keran, WANG Yanfei. Analysis on information awareness methods[J]. *Information Studies: Theory & Application*, 2018, 41(8): 11-16.
- [8] 樊洁茹, 李东光. 无人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术, 2019, 2(1): 39-47.
FAN Jieru, LI Dongguang. Overview of MAV/UAV collaborative combat and its key technologies[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2019, 2(1): 39-47.
- [9] WEN L, GAO L, LI X Y. A new deep transfer learning based on sparse auto-encoder for fault diagnosis[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(1): 136-144.
- [10] VON MEIER A, STEWART E, MCEACHERN A, et al. Precision micro-synchrophasors for distribution systems: a summary of applications[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(6): 2926-2936.
- [11] PRIMADIANTO A, LU C N. A review on distribution system state estimation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5): 3875-3883.
- [12] GU L, ZENG D Z, GUO S, et al. Cost efficient resource management in fog computing supported medical cyber-physical system[J]. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2017, 5(1): 108-119.
- [13] QUIJANO D A, PADILHA-FELTRIN A. Optimal integration of distributed generation and conservation voltage reduction in active distribution networks[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 113: 197-207.
- [14] KOSEN I, HUANG C, CHEN Z, et al. UPS: unified PMU-data storage system to enhance T+D PMU data usability[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 739-748.
- [15] 李凯, 赵争鸣, 袁立强, 等. 面向交直流混合配电系统的多端口电力电子变压器研究综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1233-1250.
LI Kai, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Overview on research of multi-port power electronic transformer oriented for AC/DC hybrid distribution grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(4): 1233-1250.
- [16] 徐韵, 颜湘武, 李若瑾, 等. 电力市场环境下含“源-网-荷-储”互动的主动配电网有功/无功联合优化[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3778-3789.
XU Yun, YAN Xiangwu, LI Ruojin, et al. Joint optimization of active and reactive powers in active distribution network with “generation-grid-load-energy storage” interaction in power market environment[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(10): 3778-3789.
- [17] 梁子鹏, 陈皓勇, 雷佳, 等. 考虑风电不确定度的风-火-水-气-核-抽水蓄能多源协同旋转备用优化[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2111-2119.
LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, LEI Jia, et al. A multi-source coordinated spinning reserve model considering wind power uncertainty[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(7): 2111-2119.
- [18] SHEN F F, WU Q W, HUANG S J, et al. Two-tier demand response with flexible demand swap and transactive control for real-time congestion management in distribution networks[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 114: 105399.
- [19] 葛磊蛟, 李元良, 汪宇倩. 智能配电网态势感知实现效果综合评估模型[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(11): 1101-1111.
GE Leijiao, LI Yuanliang, WANG Yuqian. Comprehensive evaluation model for situational awareness effects of a smart distribution network[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2020, 53(11): 1101-1111.
- [20] TAN Y S, QIU F, DAS A K, et al. Scheduling post-disaster repairs in electricity distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Sys-*

- tems, 2019, 34(4): 2611-2621.
- [21] GE L J, LI Y L, LI S X, et al. Evaluation of the situational awareness effects for smart distribution networks under the novel design of indicator framework and hybrid weighting method[J]. *Frontiers in Energy*, 2021, 15(1): 143-158.
- [22] 高 爽, 盛万兴, 徐 斌, 等. 含分布式光伏的多级变压交直流混合配电网经济性评估[J]. *电网技术*, 2019, 43(5): 1520-1528.
GAO Shuang, SHENG Wanxing, XU Bin, et al. Economic evaluation of multi-voltage hybrid AC/DC distribution networks with high penetration of photovoltaics[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1520-1528.
- [23] WANG T, ZHANG S, GU X P. A trend-based approach for situation awareness in power systems[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2017, 27(12): e2446.
- [24] MENKE J H, BORNHORST N, BRAUN M. Distribution system monitoring for smart power grids with distributed generation using artificial neural networks[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 113: 472-480.
- [25] FANG Z, LIN Y Z, SONG S J, et al. State estimation for situational awareness of active distribution system with photovoltaic power plants[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(1): 239-250.
- [26] 孙充勃, 李敬如, 原 凯, 等. 基于区间优化的配电网智能软开关与储能系统联合优化方法[J]. *高电压技术*, 2021, 47(1): 45-54.
SUN Chongbo, LI Jingru, YUAN Kai, et al. Two-stage optimization method of soft open point and energy storage system in distribution network based on interval optimization[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(1): 45-54.
- [27] GE L J, LI Y L, XIAN Y M, et al. A FA-GWO-GRNN method for short-term photovoltaic output prediction[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Montreal, Canada: IEEE, 2020: 1-5.
- [28] XIAO J, ZHANG B Q, LUO F Z. Distribution network security situation awareness method based on security distance[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 37855-37864.
- [29] 刘科研, 盛万兴, 张东霞, 等. 智能配电网大数据应用需求和场景分析研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(2): 287-293.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHANG Dongxia, et al. Big data application requirements and scenario analysis in smart distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(2): 287-293.
- [30] 张 宁, 杨经纬, 王 毅, 等. 面向泛在电力物联网的5G通信: 技术原理与典型应用[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(14): 4015-4024.
ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous internet of things in electricity: technical principles and typical applications[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(14): 4015-4024.
- [31] 张凌浩, 张 明, 楼文路, 等. 基于灰色关联理论和BP神经网络的分布式光伏电站运维数据虚拟采集方法[J]. *电力建设*, 2021, 42(1): 125-131.
ZHANG Linghao, ZHANG Ming, JI Wenlu, et al. Virtual acquisition method for operation data of distributed PV applying the mixture of grey relational theory and bp neural work[J]. *Electric Power Construction*, 2021, 42(1): 125-131.
- [32] 廖小兵, 刘开培, 乐 健, 等. 电力系统区间潮流计算方法综述[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(2): 447-458.
LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, LE Jian, et al. Review on interval power flow calculation methods in power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(2): 447-458.
- [33] 胡 帅, 向 月, 刘俊勇, 等. 基于参数化隶属度匹配函数的含分布式发电配电网模糊潮流计算[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(18): 5370-5379.
HU Shuai, XIANG Yue, LIU Junyong, et al. Fuzzy power flow calculation in distribution networks with distributed generation based on parameterized membership matching function[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(18): 5370-5379.
- [34] WANG Z W, SHEN C, LIU F, et al. Analytical expressions for joint distributions in probabilistic load flow[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(3): 2473-2474.
- [35] 杨 挺, 翟 峰, 赵英杰, 等. 泛在电力物联网释义与研究展望[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(13): 9-20, 53.
YANG Ting, ZHAI Feng, ZHAO Yingjie, et al. Explanation and prospect of ubiquitous electric power internet of things[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(13): 9-20, 53.
- [36] 李含玉, 杜兆斌, 陈丽丹, 等. 基于出行模拟的电动汽车充电负荷预测模型及V2G评估[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(21): 88-96.
LI Hanyu, DU Zhaobin, CHEN Lidan, et al. Trip simulation based charging load forecasting model and vehicle-to-grid evaluation of electric vehicles[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(21): 88-96.
- [37] 刘鑫蕊, 李 欣, 孙秋野, 等. 考虑冰灾环境的配电网态势感知和薄弱环节辨识方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2243-2250.
LIU Xinrui, LI Xin, SUN Qiuye, et al. A new method for situation awareness and weakness identification of distribution network considering ice disaster[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2243-2250.
- [38] WANG J S, DENG X C. Comprehensive economic benefit evaluation method of coastal enterprises based on AHP[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 103(S1): 24-28.
- [39] WANG S X, GE L J, CAI S X, et al. Hybrid interval AHP-entropy method for electricity user evaluation in smart electricity utilization[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2018, 6(4): 701-711.
- [40] ARMAN H, HADI-VENCHEH A, ARMAN A, et al. Revisiting the approximated weight extraction methods in fuzzy analytic hierarchy process[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2021, 36(4): 1644-1667.
- [41] 程明熙. 处理多目标决策问题的二项系数加权法[J]. *系统工程理论与实践*, 1983(4): 23-26.
CHENG Mingxi. Binomial coefficient weighted sum method for multi-objective decision making[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 1983(4): 23-26.
- [42] 杨锡运, 张艳峰, 叶天泽, 等. 基于朴素贝叶斯的风电功率组合概率区间预测[J]. *高电压技术*, 2020, 46(3): 1096-1104.
YANG Xiyun, ZHANG Yanfeng, YE Tianze. Prediction of combination probability interval of wind power based on naive Bayes[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(3): 1096-1104.
- [43] REN Z L. Evaluation method of port enterprise product quality based on entropy weight TOPSIS[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 103(S1): 766-769.
- [44] 荣智海, 齐 波, 张 鹏, 等. 基于核主成分分析的油色谱在线监测装置异常状态快速辨识[J]. *高电压技术*, 2019, 45(10): 3308-3316.
RONG Zhihai, QI Bo, ZHANG Peng, et al. Fast identification of abnormal state based on kernel principal component analysis for oil chromatography analysis on-line monitoring device[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(10): 3308-3316.
- [45] 张华一, 文福拴, 张 璞, 等. 基于前景理论的电网建设项目组合多属性决策方法[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(14): 8-14.
ZHANG Huayi, WEN Fushuan, ZHANG Can, et al. Prospect theory

- based multiple-attribute decision-making method for determining portfolio of construction projects in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 8-14.
- [46] 张宏博, 陈伟炯, 闫明. 多式联运路径优化模型中的贝叶斯极大熵权重自学习方法研究[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(10): 28-32, 44.
ZHANG Hongbo, CHEN Weijiong, YAN Ming. The Bayesian maximum entropy weight self-learning method in the multimodal transport
- path optimization model[J]. Computer Applications and Software, 2018, 35(10): 28-32, 44.
- [47] GE L J, LI Y L, ZHU X S, et al. An evaluation system for HVDC protection systems by a novel indicator framework and a self-learning combination method[J]. IEEE Access, 2020, 8: 152053-152070.
- [48] ZHU Q L, LIN Q Z, CHEN W N, et al. An external archive-guided multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(9): 2794-2808.



葛磊蛟(通信作者)

1984—, 男, 博士, 副教授

主要从事智能配电网态势感知、云计算和大数据方面的研究

E-mail: legendglj99@tju.edu.cn

GE Leijiao

Ph.D.

Associate professor
Corresponding author

李元良

1998—, 男, 硕士生

主要从事智能配电网态势感知、能源优化配置方面的研究

E-mail: tjlyliang@foxmail.com

LI Yuanliang



陈艳波

1982—, 男, 博士, 副教授, 博导

主要从事电力系统状态估计、态势感知、综合能源优化与分析及数据驱动方面的研究

E-mail: chenyanbo@ncepu.edu.cn.

CHEN Yanbo

Ph.D.

Associate professor



崔庆雪

1999—, 女, 硕士生

主要从事配电网时滞不确定性方面的研究

E-mail: a1023480040@163.com



马丛淦

1986—, 男, 硕士, 高工

主要从事主动配电网和综合能源方面的研究

E-mail: macongan@bj.sgcc.com.cn

MA Conggan
Senior engineer