

# 数字技术赋能新型电力系统安全韧性提升的策略研究

陈晓红<sup>1,2,3</sup>, 张高南<sup>1,2</sup>, 张乘<sup>1,2</sup>, 陈蛟龙<sup>1,2</sup>, 关健<sup>1\*</sup>, 刘泽洪<sup>4</sup>, 刘昭成<sup>5</sup>

(1. 中南大学商学院, 长沙 410083; 2. 湘江实验室, 长沙 410205; 3. 湖南工商大学管理科学与工程学院, 长沙 410205;  
4. 全球能源互联网发展合作组织, 北京 100031; 5. 湖南省能源投资集团有限公司, 长沙 410012)

**摘要:** 构建新型电力系统是落实能源安全战略和“双碳”目标的重要举措, 提升安全韧性是新型电力系统安全稳定发展的核心要义, 亟需数字技术发挥关键的赋能作用。本文分析了新型电力系统安全韧性的内涵及特征, 从极端事件频发、系统结构复杂、多能协调冲突等方面梳理了新型电力系统安全韧性提升面临的挑战; 阐述了数字技术对新型电力系统安全韧性提升的赋能作用, 凝练了数字技术赋能新型电力系统安全韧性提升存在的主要问题, 进一步提出了数字技术赋能新型电力系统安全韧性提升的关键技术体系, 涵盖基于人工智能的多模态数据融合技术、基于云-边协同的智能态势感知与预警技术、基于大数据分析的多能协同优化调控技术、基于数字孪生的灾后应急决策技术。注重气候韧性重大工程顶层设计、加强“数字+电力”关键技术研发、建设数据基础设施并完善质量保障机制、优化电力行业复合型人才梯队建设等策略运用, 可为新型电力系统建设发展提供理论支撑。

**关键词:** 新型电力系统; 能源安全; 安全韧性; 数字技术; 多模态数据融合; 智能态势感知

**中图分类号:** TM73 **文献标识码:** A

## Strategies for Enhancing Security Resilience of New Power Systems Enabled by Digital Technology

Chen Xiaohong<sup>1,2,3</sup>, Zhang Gaonan<sup>1,2</sup>, Zhang Cheng<sup>1,2</sup>, Chen Jiaolong<sup>1,2</sup>, Guan Jian<sup>1\*</sup>,  
Liu Zehong<sup>4</sup>, Liu Zhaocheng<sup>5</sup>

(1. Business School, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Xiangjiang Laboratory, Changsha 410205, China;  
3. College of Management Science and Engineering, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205,  
China; 4. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Beijing 100031, China;  
5. Hunan Energy Investment Group Co., Ltd., Changsha 410012, China)

**Abstract:** Constructing a new power system is crucial for strengthening energy security and achieving the carbon peaking and carbon neutralization goals in China. Improving the security resilience is the core of the safe and stable development of the system, which requires the digital technology that could play a key enabling role. This study analyzes the implications and characteristics regarding the security resilience of new power systems, and sorts out the challenges faced by the improvement in security resilience, including frequent extreme events, complex system structure, and multi-energy coordination conflicts. This study expounds on the enabling effect of the digital technology on the improvement in security resilience of new power systems, summarizes the major problems existing in the enabling process, and further proposes a key technology system for improving the security resilience of new power systems through the digital technology, involving multimodal data fusion technology based on artificial intelligence, intelligent

收稿日期: 2024-06-05; 修回日期: 2024-09-26

通讯作者: \*关健, 中南大学商学院教授, 研究方向为战略管理等; E-mail: guanjian99@126.com

资助项目: 国家自然科学基金项目(72088101); 湘江实验室重大项目(23XJ01006)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

situation awareness and early-warning technology based on cloud-edge collaboration, multi-energy collaborative optimization and control technology based on big data analysis, and post-disaster emergency decision-making technology based on digital twins. To provide theoretical support for the development of new power systems, this study proposes the following suggestions: (1) emphasizing the top-level design of major projects regarding climate resilience, (2) strengthening the research and development of key digital and power technologies, (3) building data infrastructure while improving the quality assurance mechanism, and (4) optimizing the construction of a compound talent echelon in the power industry.

**Keywords:** new power system; energy security; security resilience; digital technology; multimodal data fusion; intelligent situation awareness

## 一、前言

实现“双碳”目标，能源是“主战场”，电力是“主力军”。加快规划建设新型能源体系、构建新型电力系统成为新时期能源电力发展的重大方向<sup>[1,2]</sup>。然而，近年来严重的自然灾害、恶意攻击等外部极端事件频发，电网面临的威胁呈现复杂多元化态势，对传统的电网安全风险应对手段及技术体系构成新的挑战。例如，2019年受台风影响，浙江、江苏、上海等十余个省份的72座35 kV以上变电站、4823条10 kV及以上的电力线路和供电设备出现严重故障，直接导致770万户居民和部分企业停电<sup>[3]</sup>。此外，随着新能源发电开发利用规模的快速增加，电网的形态特征和运行方式发生深刻变化，高比例可再生能源与电力设备接入、综合能源系统连锁故障等内部协调冲突，对电力系统的安全稳定运行带来极大压力<sup>[4,5]</sup>。可见，外部极端事件与内部协调冲突对电力能源供应提出更高要求，也对现有电力系统的安全韧性带来严峻挑战<sup>[6]</sup>。

在第五代移动通信（5G）、大数据、物联网、人工智能（AI）、数字孪生等新一代信息技术快速发展的背景下，新型电力系统的数字化、智能化、智慧化发展成为了重大趋势<sup>[7,8]</sup>。《国家能源局关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见》（2023年）提出，以数字化、智能化电网为支撑，加快新型电力系统的建设。数字化发展是新型电力系统建设的重要支撑，数字技术赋能“源网荷储”环节的协同运行与智能交互，能源流、业务流、数据流多流融合<sup>[9]</sup>，提升新型电力系统的智能化和智慧化水平。然而，数字技术赋能新型电力系统安全韧性提升过程不可避免地存在诸多问题，如网络安全与多源数据融合风险<sup>[6,10]</sup>、技术瓶颈与集成挑战<sup>[7]</sup>、经济性与市场问题<sup>[11]</sup>。运用大数据、云计算、AI等信息技术深度赋能新型电力系统安全韧性提升，突破相应的关键技术瓶颈，提高电网系统的抗

灾能力与新能源消纳能力，是当前新型电力系统数字化、智能化发展面临的重要挑战。

着眼更好发挥数字技术对新型电力系统安全韧性提升的关键赋能作用，本文分析新型电力系统安全韧性的内涵与特征，梳理安全韧性提升面临的挑战，厘清并凝练数字技术在新型电力系统安全韧性提升过程中的运用现状与关键技术体系，进一步提出新型电力系统安全韧性提升的发展建议。相关内容有助于充分发挥数字技术的赋能作用，为构建更加安全稳定的新型电力系统提供前沿技术认知与应用参考。

## 二、新型电力系统安全韧性的内涵及特征

### （一）新型电力系统安全韧性的内涵

新型电力系统是以能源电力安全供应为前提，大规模新能源供给消纳体系建设为主线任务，智能柔性电网为枢纽平台，“源网荷储”互动、多能互补为重要支撑的电力系统。韧性指系统在超预期的严重干扰或极端事件下，能尽快恢复到原有正常状态的能力<sup>[12,13]</sup>。相应地，新型电力系统安全韧性指在极端事件与内部波动干扰下，可全面、快速、准确感知系统运行态势，协同内外部资源对各类扰动作出主动预判与防御，快速恢复重要电力负荷，保障关键电力基础设施及服务安全稳定运行的能力。

上述概念拓展了感知力、协同力、学习力，是新型电力系统安全弹性的延伸。在极端气候灾害条件下，防止设备损毁、快速响应调配资源<sup>[14,15]</sup>、通过多种调控手段保障新型配电网持续安全供电<sup>[2]</sup>、维持电力设施稳定运行等，均是新型电力系统安全韧性的具体表现<sup>[16]</sup>。需要指出的是，新型电力系统面临系统低惯性、频率电压振荡性、多能耦合系统不稳定性等挑战，安全稳定运行也受到多重扰动，实现全面的安全韧性具有相当的难度<sup>[1]</sup>。

## （二）新型电力系统安全韧性的特征

### 1. 可靠性

可靠性指系统在不同条件下无故障地持续执行指定功能的能力。在面对极端事件时，新型电力系统应能有效抵抗并持续保障电力安全供应<sup>[1]</sup>，如快速定位故障点、启动备用路线等；也需适应环境政策的变化，积极引入并融合新技术。

### 2. 灵活性

灵活性指系统在面临多重扰动时，以快速响应的形式调整运行模式、部署防控手段，在最短时间内或以最小成本恢复正常运行的能力。需优化调配系统中“源网荷储”环节的可用资源，把握可再生能源特性并利用新型储能设施<sup>[17]</sup>，快速恢复新型电力系统中关键电力设施及服务的运行<sup>[16]</sup>。

### 3. 冗余性

冗余性指系统中存在额外或备用的能源资源和供应恢复路径。建立冗余的电力供应路径和备用能源系统，增强新型电力系统中关键部件失效时的稳定性与恢复能力，积极引入分布式发电和新型储能，提升可靠应对局部故障的能力。

### 4. 自主可控性

自主可控性指电力企业和行业组织在技术、产品、服务等方面具有自主创新能力，实现电网系统硬件与软件的全程可控。新型电力系统整合能源电力应用软件和安全管理技术，部署韧性电网规划设计<sup>[18]</sup>、自动化调度系统、电力系统故障检测与安全防御方案<sup>[19]</sup>，全面支持系统能力演进和升级。

### 5. 协同耦合性

协同耦合性指系统内 / 外部的主体或组成部分保持协调合作，避免故障在系统间传播的能力。新型电力系统涉及多领域政策，跨部门、跨区域、跨

系统的协调合作，需拓展多种能源系统的互补互济空间，以实现应急场景下单联防联控<sup>[20]</sup>。

## 三、新型电力系统安全韧性提升面临的挑战

### （一）极端事件频发

极端事件分为严重自然灾害（如风暴、洪涝灾害等）、人为攻击（如网络攻击、物理攻击等）两类。极端事件发生概率极小，但发生后对新型电力系统的安全韧性造成极大威胁<sup>[21,22]</sup>。《2022年全球自然灾害评估报告》数据显示，2022年全球共发生321次较大自然灾害，受影响国家和地区为118个；全球气候极端事件呈上升趋势。《中国气候变化蓝皮书2023》认为，全球变暖趋势仍在持续，1961—2022年我国极端气候事件发生频次显著增加，气候风险指数也呈升高趋势。近20年全球因极端气候导致的电力事故如表1所示。

在自然灾害方面，极端高温、严寒冰雪等气候灾害事件频发，对新型电力系统的安全韧性运行构成直接威胁。寒潮天气灾害导致输电线路、风电机组倒塌，洪涝灾害导致变电站、输电杆塔等关键电力设施损毁。新型电力系统中风电、光伏发电占比不断提高，台风、寒潮等气候灾害将阻碍新能源出力，用电负荷激增、网络传输受阻等运行风险交叠。电力需求激增、发电效率降低也会引发电力供需不平衡的困境<sup>[21]</sup>。

在人为攻击方面，新型电力系统广泛依赖信息技术且网络边界不断扩大，面临网络攻击的直接威胁，如恶意破坏电力控制系统即可中断电力供应；易受技术故障、人为错误的直接影响，带来系统运行的风险，可能导致大范围的电力中断。此

表1 近20年来极端事件导致的典型电力事故

极端事件类型	典型事故
自然灾害	<p>风暴灾害 2005年中国台湾大规模停电，2005年中国海南大停电，2014年中国海南超强台风大停电，2016年澳大利亚南部全州大停电，2018年中国广东大停电，2023年美国东北部20万人无电可用</p> <p>雷暴灾害 2007年菲律宾马尼拉大停电，2011年美国纽约大停电</p> <p>洪涝灾害 2005年中国台湾大停电，2005年中国海南大停电，2018年中国广东大停电，2021年中国河南大停电</p> <p>低温冰冻 2008年中国南方冰灾大停电，2009年美国冰灾大停电，2021年美国得克萨斯州大规模停电，2023年中国山西高压输电线路故障</p> <p>极端高温 2005年法国热浪电荒，2020年美国加利福尼亚州大停电</p>
人为攻击	<p>网络攻击 2015年乌克兰大规模停电，2019年委内瑞拉20个州全面停电，2023年俄罗斯38个定居点大规模停电</p> <p>物理攻击 2015年土耳其大规模停电，2019年委内瑞拉20个州全面停电，2019年印尼雅加达50%人口受停电影响</p>

外, 极端事件还会增加电力基础设施的维修与运营维护成本, 将加大运营商投资风险, 影响技术创新意愿与服务保障能力<sup>[23]</sup>。

## (二) 系统结构复杂

随着可再生能源在电力系统中的占比不断提高, 系统的安全韧性面临新的挑战。分布式可再生能源具有间歇性、波动性, 多元化负荷也表现出随机性, 电网频率及电压波动、新型配电系统电力电量平衡困难等问题频发, 加大了可再生清洁能源可靠并网的风险<sup>[24]</sup>。例如, 2015—2017年新疆哈密风电基地频繁发生次/超同步振荡问题, 因振荡切除风电100余次, 引发了系统安全运行风险。

随着可再生能源的大规模接入、负荷侧再电气化过程的推进, 大量特性各异的电源、负荷、储能等电力电子装置接入现有电力系统, 使电网能量流更为复杂, 容易引发电力系统振荡。新型电力系统的动态特性具有全新且更为复杂的动力学特征, 在一次能源特性、元件数量、元件种类、时间尺度上均呈现多样化的差异性<sup>[25]</sup>。与此同时, 交直流配电网故障耦合流程机理复杂, 故障特性难以刻画, 加大安全稳定运行的风险。单一设备的故障可能引发连锁反应, 进而导致系统其他部分出现故障, 这种联动效应在高度互联的新型电力系统中尤为突出。例如, 2003年美国东北部地区、加拿大东部地区出现大规模停电事件, 起因是输电线路因树木接触而跳闸, 随后引发连锁故障, 导致超5000万人受到影响。

## (三) 多能协调冲突

电动汽车、分布式能源、储能等交互式用能设备广泛应用, 新能源发电设备大量替代常规机组, 电力系统呈现高比例可再生能源、高比例电力电子设备的“双高”特征。新型电力系统的转动惯量和支撑能力下降, 抗扰动能力减弱, 致使故障特性与连锁反应更加复杂, 系统安全运行面临挑战。分布式新能源快速发展, 新型用能形式不断涌现, 配电网有源化特征凸显, 局部区域中电压越限、设备反向重过载等问题突出。

电力系统调度需要考虑能源价格、天气预报、负荷预测等实时因素, 这些因素的不确定性和复杂性增加了调度决策的难度<sup>[26]</sup>。例如, 风电、光伏发电的输出功率受天气条件影响较大, 调度中心需实

时调整发电计划的平衡供需关系才能尽量避免能源浪费或短缺。新型配电系统存在复杂的耦合关系且资源灵活多变, 导致传统的配电网调度运行机制不再适用, 也因监管手段不足而使安全防御面临风险<sup>[27,28]</sup>。

## 四、数字技术在新型电力系统安全韧性提升中的运用现状

### (一) 数字技术对新型电力系统安全韧性提升的赋能作用

#### 1. 态势感知与预警

融合应用AI、物联网、大数据等信息技术, 实现对自然灾害、人为攻击的安全预警与感知<sup>[29]</sup>。应用物联网技术, 实现对新型电力系统的精细化实时监控能力; 部署高精度传感器, 监测系统中关键节点的电流、电压、频率等参数, 同时结合气象传感器获取天气条件数据。通过数字孪生技术、大数据分析平台, 将新型电力系统中采集的数据用于精准模拟和仿真, 对收集到的海量电力数据进行深度挖掘和分析。

建立复杂的预测模型, 准确判断可再生能源的产出量、发电波动性以及电网运行状态。将实时采集的数据与数字孪生模型结果进行比对<sup>[30]</sup>, 实现新型电力系统的系统实时在线监控和状态评估。精准感知并实时监测电力系统状态, 支持运营人员快速识别潜在问题、作出快速响应及决策, 更好保障电力系统的安全性和可靠性。

#### 2. 优化资源配置与调度

从资源端看, 分布式能源资源集成与智能管理可快速响应调度需求, 如风电、光伏发电、储能等设备在智能管控模式下提供备用电源能力<sup>[31]</sup>, 利用机器学习模型精准预测涵盖天气数据、历史用电数据的电网负荷变化趋势。

从系统端看, 利用AI技术完善发电、输电、配电等的调度计划, 构建智能化的电力调度系统, 更好保障电力资源的有效供应与可靠配置。基于预测模型与安全防控系统, 切实提升针对网络恶意攻击的防御能力。

从用户端看, 分析用户行为大数据, 动态调整电力供应并减少系统负荷, 据此构建电力供应需求响应策略。部署高级配电网管理系统, 实现电网监

控、故障实时检测、自动化隔离等功能<sup>[32]</sup>。

### 3. 强化应急响应与快速恢复能力

在极端事件发生前，自愈电网技术与AI、自动化技术结合，检测系统异常并自动隔离受损部分，通过电网重新配置来快速恢复供电；部署传感器收集关键电力设施的实时运行数据，基于深度学习预测模型结果及时开展设施维护或更换；应用大数据分析仿真技术模拟不同的应急响应策略，基于分析结果优选相应策略，减少试错成本<sup>[33]</sup>。

在极端事件发生后，利用5G、云计算等移动通信和协作平台，保障关键人员和设备的实时通信需求，支持远程控制与指挥以加快故障诊断；利用区块链技术改善跨区域信息共享能力，提高新型电力系统共享互济的能力与灵活性<sup>[1]</sup>；应用数字技术强化新型电力系统的自愈能力与决策支持能力，提升应急响应与恢复效率。

### 4. 促进电网数字化转型

在数字技术驱动下，电网从传统运行模式逐步向数字化转型，高效收集、分析和处理数据，将提供更智能的新型电力系统解决方案。数字孪生技术支持实时映射和模拟电网的运行状态，提升日常运维决策效率，为应对极端事件提供分析预演能力<sup>[29]</sup>。云计算、边缘计算提供计算资源及数据存储条件，支持极端事件应对所需的大规模数据处理与分析能力，提高电网决策的智能化水平。电网云平台、数据中台、业务中台、技术中台等新型数字化基础平台，将直接支撑电网数字化转型<sup>[34]</sup>。

## (二) 数字技术赋能新型电力系统安全韧性提升涉及的主要问题

### 1. 极端事件具有突发性和不可预测性

极端天气事件呈现多发、频发、强发、并发趋势，台风、暴雨、极寒、高温等极端天气频繁出现，叠加夏季和冬季用电“三高双峰”特征，对电力系统安全稳定运行提出重大挑战<sup>[35]</sup>。极端自然灾害、恶意的人为攻击行为，多为突发性和不可预测事件。数字技术可以通过大量的极端事件历史数据并应用AI模型，分析并识别极端事件的异常模式与突发趋势。然而，现实世界中的极端事件通常具有不确定性和不规律性。包含高比例可再生能源的电力系统更容易受到气候变化和极端气候事件的影响。例如，极端高温、极端低温均增加用电负荷，

各类极端天气往往影响可再生能源发电的出力，加大电力系统调配难度和脆弱性<sup>[36]</sup>。

### 2. 技术融合与集成具有复杂性

电力系统在数字化转型和智能化发展过程中，涉及的技术更为复杂多样，各个环节都存在特定的技术要求和操作规范。将数字技术与电力系统各个环节进行深度融合以协同提升电力系统的安全韧性，这一实现过程极具挑战性。各类数字技术具有不同的技术标准和规范，难以有效融合。例如，电力系统的不同环节中涉及类别多样的传感器、设备和网络，各自的通信协议、数据格式等均可能有差异，增加了技术融合与集成的不确定性和应用风险<sup>[37]</sup>。此外，电力系统自身涉及的技术和设备都已经高比例实现电子化，进一步增加了技术融合与集成的复杂性。

### 3. 数据质量问题制约应用效能

在自然灾害发生时，电力系统中的传感器、通信设备等可能遭受影响，导致数据采集、传输、处理等过程出现故障甚至中断。相关问题直接影响采集数据的质量和可靠性，也将弱化数字技术效用的发挥<sup>[38]</sup>。例如，在暴雨、暴雪、强风、恶意攻击等极端情况下，智能传感器较多面临物理损坏、通信中断、雨水浸泡等情况，电力基础设施的监测数据不完整或无法及时回传，导致电力系统的运行状态无法被完整记录和分析。基础数据质量的不稳定，不利于应用数字技术开展电力系统运行状态的全面分析，也使针对关键特征信息的智能推理和学习过程不充分，难以开展相关状态的精准预测和评估。这些情况可能导致决策失误或延误，直接影响电力系统的应急响应速度，也将加大新型电力系统的恢复和重建难度<sup>[26]</sup>。

### 4. 网络安全与隐私保护问题突出

随着数字技术应用规模的扩大，电力系统面临的网络安全风险也在增加，如黑客攻击、数据泄露事件对电网稳定运行造成威胁。电力系统中存在大量的敏感数据，如用户用电信息、设备运行状态等；数字技术既可以赋能新型电力系统，也能带来网络安全风险，对现有技术架构、安全防护体系等产生冲击<sup>[38]</sup>。分布式电源、储能等设备终端大量接入，分布式能源、电动汽车、虚拟电厂、综合能源服务等新型业务快速涌现<sup>[24]</sup>，能源聚合商、综合能源服务商等多元化主体广泛参与，体现出新型电力系

统中交互主体具有多样性,增加了电力系统的安全防御关口,延伸了网络空间边界,明显扩展了安全风险<sup>[26]</sup>。

数字技术应用在面临传统的网络攻击风险以外,还存在终端侵入、用户仿冒、数据篡改的风险。新型电力系统产生海量数据,对数据存储、处理和分析提出了极高要求,智慧电网的普及将进一步增加系统面临的网络攻击、数据泄露等风险。在收集和使用用户数据时,应保障数据隐私与合规性,也需应对不断演变的网络威胁、维护大量敏感数据的安全<sup>[39]</sup>。

#### 5. 高层次、复合型人才短缺

发展新型电力系统,亟需高层次、复合型人才。传统的电力系统培养体系注重电力工程、电力传输与分配等方向的专业知识及技能,忽视了应急响应、组织协调、战略规划能力的培养,不利于在紧急情况下有效整合资源、高效指挥调度,对系统性故障风险把控力度不强,应急响应效率不佳<sup>[40]</sup>。预防和响应极端事件需要综合运用技术、管理、应急响应等领域的知识及技能,而现有的培养体系无法满足这种需求。此外,传统电网体系中的人才梯队,掌握网络安全领域的知识及技能相对有限,缺乏对安全漏洞的识别和预防能力,基本上不具备应对恶意攻击的经验和技术手段<sup>[41]</sup>。

## 五、数字技术赋能新型电力系统安全韧性提升的关键技术体系

高质量构建并高可靠运行新型电力系统,需要深度融合数字孪生、5G、深度学习、AI、大数据分析等新一代信息技术,适应复杂的应用环境、匹配多样化的安全场景。其中,数字技术赋能新型电力系统安全韧性提升的关键技术体系(见图1)构建尤为关键。

### (一) 基于AI的多模态数据融合技术

应用多模态数据融合技术,训练深度学习AI模型,实现新型电力系统运行状态的全面感知。其中,安全韧性评估需要以气象、电气、基础设施监测等方面的多模态数据为支撑。通常,数据级融合要求数据格式具有一致性,如融合结构化的广域测量系统、数据采集与监控系统的数据,支持开展电

网的状态评估<sup>[42]</sup>。

新型电力系统多模态数据融合技术主要涉及5个方面。①适应多源异构数据的输入,融合数据结构、时间尺度上的多样性。②采用时间尺度对齐技术,由点估计或插值方法进行结构化数据的高频重构,对于非结构化或异构数据可使用时间对齐方法。③通过手工特征提取网络、深度特征提取网络进行特征提取,采用时频分析、小波变换等方法提取有用特征,利用相关性分析、主成分分析等方法进行特征选择<sup>[43]</sup>。④应用特征同化技术,将不同特征映射至同一空间或坐标系,实现特征融合。⑤在特征融合及分析阶段,结合多决策器融合、基于权重的特征拼接等策略,随机森林、支持向量机、神经网络等AI预测模型,开展新型电力系统安全风险评估和潜在故障预测。

### (二) 基于云-边协同的智能态势感知与预警技术

应用基于云-边协同的韧性电网故障态势感知技术,在变电站同步相量测量装置、配电自动化数据源附近部署边缘节点,实现数据采集及处理、故障分析的本地化。其中,数据采集和监控系统(SCADA)是电网运行监测远程控制的核心,主要由网络终端设备、通信网络、中心工作站构成<sup>[32]</sup>。

智能态势感知与预警技术应用于事故处置全过程,主要涉及3个方面。①在事故发生前,综合运用大数据分析技术和机器学习算法,挖掘设备的历史运行数据和环境参数,预测潜在的故障隐患;在极端事件条件下替代人工进行设备巡检,实时采集设备的状态数据<sup>[44]</sup>。②在事故过程中,着眼实时监控和应急响应,引入深度学习、增强学习等增强SCADA系统能力,开展电网状态的实时分析和预测<sup>[45]</sup>,由智能决策支持系统提供最优的应急响应方案,实现电力、热力、燃气等能源的互补和优化调度<sup>[46,47]</sup>。③在事故后期,利用大数据分析技术和AI算法,开展故障分析与智能修复,识别故障模式和根本原因<sup>[48]</sup>,自动调整电网运行参数,实现快速恢复供电,通过物联网进行远程自我修复。

### (三) 基于大数据分析的多能协同优化调控技术

电网智能化调度是电网体系的“神经中枢”,应用多能协同优化调控技术增强新型电力系统能源供应保障能力<sup>[49]</sup>。①基于先进传感器并应用大数据

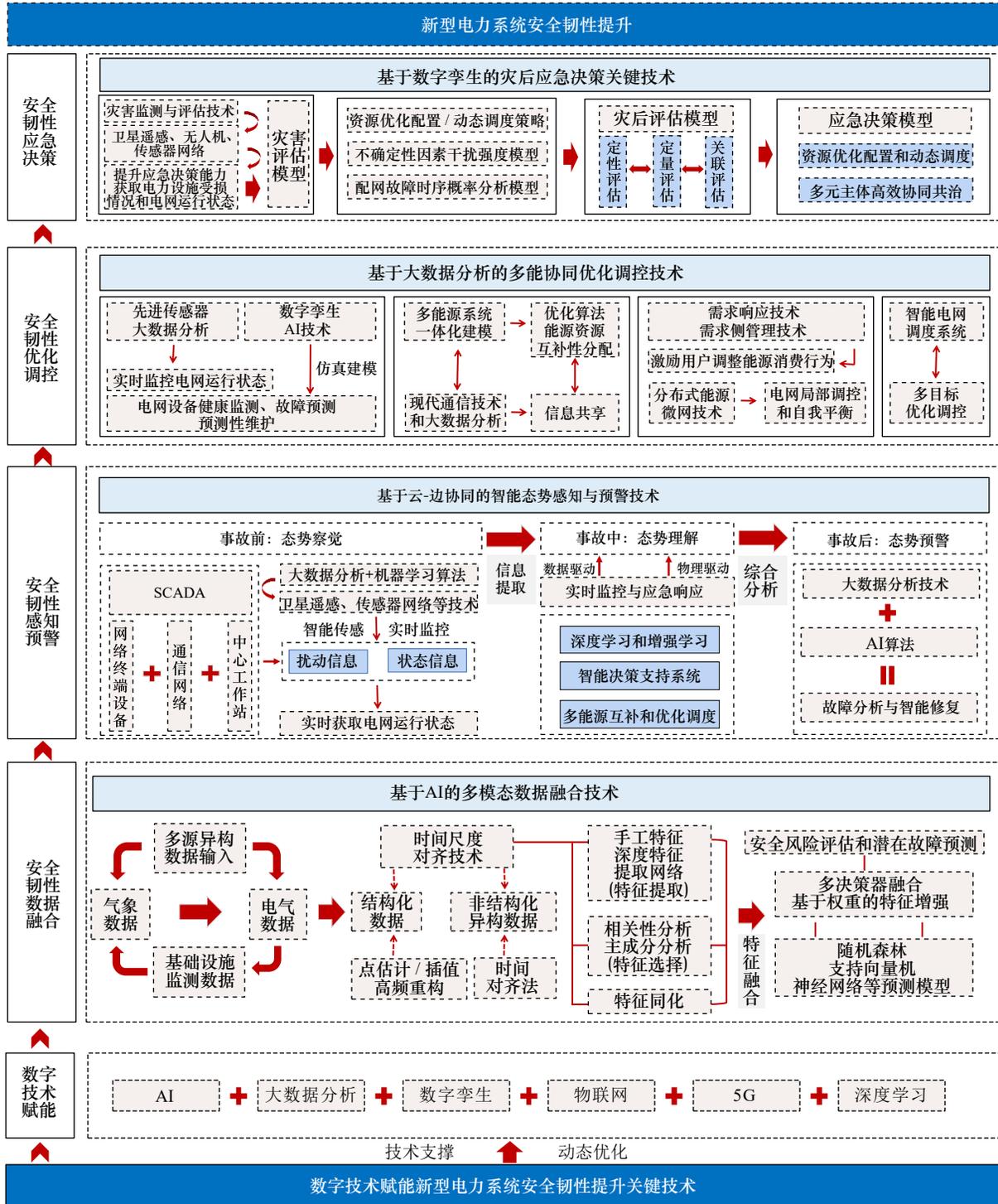


图1 数字技术赋能新型电力系统安全韧性提升的关键技术体系

分析技术，实时监控电网运行状态，采用数字孪生、AI技术进行电网设备的健康监测与故障预测，支持设备的预测性维护<sup>[50]</sup>。②对电力、热力、燃气等能源系统进行一体化建模，考虑相互关系和转换过程，开展能源资源的优化分配，实现各类能源的

有效互补、高效替代、信息共享。③通过需求响应、需求侧管理技术，激励用户在电力系统出现风险时主动调整能源消费行为（如高峰时段减少用电量以减轻电网压力）。④利用分布式能源和微网技术，实现电网的局部调控与自主平衡；基于智能电

网调度系统，在不同时间尺度上优化调控并实现多目标最优<sup>[49,51]</sup>。

#### (四) 基于数字孪生的灾后应急决策技术

应用灾害监测与评估技术提升新型电力系统的应急决策能力。通过卫星遥感、无人机、传感器网络，实时获取电力设施的受损情况、电网运行状态信息，搭建数字孪生基础数据集；构建灾害评估模型，分析灾害的影响范围、严重程度、恢复时间等。采用资源优化配置和动态调度策略，确保资源到达特定地区的时效性；迅速恢复常规通信网络或者建立临时通信网络，利用卫星通信为通信盲区提供支持<sup>[52]</sup>，提升灾后应急决策效率。

构建不确定性因素的干扰强度模型，表征外界灾害环境作用下配电线路、变电设备的停运概率；考虑系统拓扑变化，建立配网故障时序概率分析模型。基于数字孪生计算模型，快速分析韧性配电网概率潮流<sup>[30]</sup>，掌握系统拓扑重构后的电压安全、容量安全水平<sup>[53]</sup>。构建负荷转供的鲁棒优化决策模型，获得优化转供策略，保障灾后应急决策需求。

## 六、数字技术赋能新型电力系统安全韧性提升的发展策略

### (一) 注重气候重大韧性工程顶层设计

#### 1. 引入气候可行性评估机制

在新型电力系统的规划和建设过程中，面向电力重大韧性工程应用需求，引入气候可行性评估机制<sup>[54]</sup>；考虑气候变化（包含暴雨、台风、干旱等极端天气因素）对电力系统的影响，对应调整工程规划和设计方案<sup>[54]</sup>。在韧性工程建设过程中，增强电力设施的抗灾能力，采用可持续的建筑材料与前沿数字技术，设计抗震、抗风、抗洪能力，更好适应未来气候变化<sup>[55]</sup>。

#### 2. 完善电力气象应急指挥体系

完善应急指挥体系的组织结构、信息报送、应急方案设计。气象、建设、供电管理等部门优化协调联动工作机制，联合加强气候风险预警预报工作。基于数字技术构建智慧能源应急平台，形成应急事件响应机制，增强极端天气事件下的电力供应保障能力<sup>[56,57]</sup>。优化电力气象部门联防联控机制，完善电力气象应急指挥体系。

### 3. 构建跨区域电力调度平台

建立跨区域电力调度平台，支持输电网、配电网、微电网的灵活互济与协调运行，全面加强受灾地区的电力供应保障能力。针对备用电源、应急电源、储能设施、电煤储备、电气储备等，完善项目建设、长效运营等方面的支持政策。鼓励发展先进可靠的备用电源、新型储能技术，扩大应用规模，提升系统灵活性；逐步调整火力发电设施，留作备用能源<sup>[58]</sup>。

## (二) 加强“数字+电力”关键技术研发

### 1. 建立多元化的专项委托项目机制

依托行业管理部门、电网企业发布“揭榜挂帅”专项委托项目，精准支持“数字+电力”技术研发，提高可再生能源的可靠预测、稳定应用等能力，扩大可再生能源、储能技术的应用规模<sup>[17,59]</sup>。合理加大电力系统网络安全投入，建立电力系统网络安全监测和响应机制，保护电力系统免受网络攻击和恶意操作的影响。确保数字技术在电力系统中的安全应用，防止潜在的风险和漏洞<sup>[37]</sup>。

### 2. 强化核心技术研发的政策支持

鼓励高校、企业、科研院所在数字技术领域进行基础研究与应用创新。合理加大对数据基础设施建设、数据技术创新应用的资金支持，建立“产学研用”合作机制和同行竞争机制；遴选出最具实力、富有创新性的研究团队，加快数字技术转移和工程应用，集中力量攻克数字技术应对极端事件涉及的关键问题<sup>[26,37]</sup>。

## (三) 建设数据基础设施并完善质量保障机制

### 1. 加强数据基础设施建设

研发并推广具有高抗灾能力的电力系统数据采集设备，如具有防水、防尘、抗风、抗电磁干扰等功能的智能传感器，确保在极端天气、自然灾害时仍能稳定工作<sup>[26]</sup>。优化新型电力系统通信网络布局，建立备份和冗余的数据传输系统，在主要数据传输通道遭受破坏甚至中断时，可靠切换至备用通道传输数据。采用有线、无线相结合的数据传输技术，提高数据传输的可靠性及韧性<sup>[60]</sup>。

### 2. 健全数据全生命周期管理机制

建议由能源管理部门牵头组建专业团队，制定数据采集和监测行动计划，明确数据采集、传输、

处理、存储等环节的质量标准，确保数据的完备性和一致性<sup>[61]</sup>。构建数据质量保障机制，涵盖数据验证、校验、纠错等方面，确保数据的准确性和完整性。形成统一的数据质量评估工具，对电力系统安全韧性提升全生命周期内的数据进行实时监控和评估<sup>[44]</sup>。实行数据质量保障、数字技术应用的责任追究机制，对造成严重后果的责任人进行追责。

### 3. 建立跨领域的信息共享与协同机制

推动气象、建设、供电管理等部门之间的数据共享和交换，打破“数据孤岛”，提高信息交流、共享和应用水平。强化数据资源利用，推动跨部门、跨领域的联防联控与信息共享<sup>[62]</sup>，增强新型电力系统对极端气候灾害、恶意网络攻击事件的监测能力以及应急响应效率。

## (四) 优化电力行业复合型人才培养

### 1. 完善新型电力系统复合型人才教育体系

在高校设立新型电力系统安全韧性方面的专业课程，如电力系统基础、智能电网技术、网络安全、风险评估与管理等。建立跨学科研究中心，鼓励电气工程、计算机科学与工程、管理学等学科交叉融合，重点研究电力系统与信息科学领域的融合应用，如电力系统与气候变化、社会经济影响等新兴方向，更多培育电力行业亟需的复合型人才。

### 2. 建立灵活多元的人才培养机制

在培训基础型应急响应人才<sup>[63]</sup>、提升中层应急管理和协调人才的能力、引进和培养应急规划与战略型高端人才等方面分别加强工作部署，与国际电工委员会、国际能源署等组织建立交流合作关系，参与国际标准的研究和制定项目。与电力企业、行业监管机构合作，建立联合实验室、实训基地，提升电力行业人员的实践能力。

### 3. 建立专业人士继续教育认证体系

营造持续学习的文化氛围，激励专业人士定期更新知识和技能。开展大数据、AI技术的行业知识传播应用，个性化、精准化推荐学习资源以提高学习成效。设立专项基金，支持与新型电力系统安全韧性相关的研究项目和人才培养计划<sup>[40]</sup>。

## 七、结语

构建安全可控、清洁低碳、柔性灵活、经济高

效的新型电力系统，是落实能源安全战略和“双碳”目标的重要举措，而外部的严重自然灾害与恶意攻击等极端事件、内部的系统协调相关问题，影响了新型电力系统甚至经济社会的安全稳定。数字技术赋能新型电力系统建设与安全韧性提升已是行业共识和未来方向，也面临着诸多的内在隐患与发展问题。在此背景下，本文较为系统地分析了新型电力系统安全韧性的内涵特征及其提升面临的挑战，厘清了数字技术在新型电力系统安全韧性提升中的运用现状，凝练了相应的关键技术并提出了发展策略，以为我国新型电力系统建设发展提供理论支撑。

也要注意，本文尚未开展因数字技术与新型电力系统安全韧性提升融合而面临的瓶颈环节突破、实践应用等研究，后续可从数字经济时代背景下新兴技术应用层面展开探讨。当前，新一代生成式AI技术正在快速演进，对新型电力系统建设发展、安全韧性提升的作用与挑战等，也是有待进一步探讨的关键内容。

### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** June 5, 2024; **Revised date:** September 26, 2024

**Corresponding author:** Guan Jian is a professor from the Business School, South Central University. Her major research field is strategic management. E-mail: guanjian99@126.com

**Funding project:** National Natural Science Found Project (72088101); Xiangjiang Laboratory Major Project (23XJ01006)

### 参考文献

- [1] 汤广福,周静,庞辉,等. 能源安全格局下新型电力系统发展战略框架[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 79–88.  
Tang G F, Zhou J, Pang H, et al. Strategic framework for new electric power system development under the energy security pattern [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 79–88.
- [2] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806–2819.  
Zhang Z G, Kang C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806–2819.
- [3] 张亚超,丁志龙,谢仕炜,等. 面向能源互联网的配电网韧性提升研究综述及展望[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 2054–2069.  
Zhang Y C, Ding Z L, Xie S W, et al. Review and prospect of power distribution network resilience enhancement for energy Internet [J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 2054–2069.
- [4] 李丹奇,梅飞,张宸宇,等. 基于深度置信网络的电压暂降特征提取及源辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 150–158.  
Li D Q, Mei F, Zhang C Y, et al. Deep belief network based method

- for feature extraction and source identification of voltage sag [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(4): 150–158.
- [5] Zheng D S, Tong D, Davis S J, et al. Climate change impacts on the extreme power shortage events of wind-solar supply systems worldwide during 1980–2022 [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 5225.
- [6] 周孝信, 赵强, 张玉琼, 等. “双碳”目标下我国能源电力系统发展趋势分析: 绿电替代与绿氢替代 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(17): 6707–6721.
- Zhou X X, Zhao Q, Zhang Y Q, et al. Analysis of the development trend of China's energy and power system under the dual carbon target: Green electricity substitution and green hydrogen substitution [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(17): 6707–6721.
- [7] 盛戈峰, 钱勇, 罗林根, 等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势 [J]. *高电压技术*, 2023, 49(5): 1765–1778.
- Sheng G H, Qian Y, Luo L G, et al. Key technologies and development trends of digital power equipment for new type power system [J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(5): 1765–1778.
- [8] 陈晓红, 李杨扬, 宋丽洁, 等. 数字经济理论体系与研究展望 [J]. *管理世界*, 2022, 38(2): 208–224.
- Chen X H, Li Y Y, Song L J, et al. Theoretical framework and research prospect of digital economy [J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(2): 208–224.
- [9] Xue Y S. Active support of power system to energy transition [J]. *Engineering*, 2021, 7(8): 1035–1036.
- [10] 周劫英, 张晓, 邵立嵩, 等. 新型电力系统网络安全防护挑战与展望 [J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(8): 15–24.
- Zhou J Y, Zhang X, Shao L S, et al. Challenges and prospects of cyber security protection for new power system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(8): 15–24.
- [11] 程松, 周鑫, 任景, 等. 面向多级市场出清的负荷聚合商联合交易策略 [J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(20): 158–167.
- Cheng S, Zhou X, Ren J, et al. Bidding strategy for load aggregators in a multi-stage electricity market [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(20): 158–167.
- [12] Panteli M, Mancarella P. The grid: Stronger, bigger, smarter? [J]. *IEEE Power & Energy Magazine*, 2015, 13(3): 58–66.
- [13] 姜涛, 唐少南, 李雪, 等. 应对台风影响的海岛微网群韧性全过程提升 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(18): 6625–6641.
- Jiang T, Tang S N, Li X, et al. Resilience boosting strategy for island microgrid clusters against typhoons [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(18): 6625–6641.
- [14] Arif A, Wang Z Y, Chen C, et al. A stochastic multi-commodity logistic model for disaster preparation in distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 565–576.
- [15] Noebels M, Quiros-Tortos J, Panteli M. Decision-making under uncertainty on preventive actions boosting power grid resilience [J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 16(2): 2614–2625.
- [16] Mahzarnia M, Moghaddam M P, Baboli P T, et al. A review of the measures to enhance power systems resilience [J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(3): 4059–4070.
- [17] Panwar N L, Kaushik S C, Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(3): 1513–1524.
- [18] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(21): 6773–6784.
- Ruan Q T, Xie W, Xu Y, et al. Concept and key features of resilient power grids [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(21): 6773–6784.
- [19] 孙彦斌, 汪弘毅, 田志宏, 等. 工业控制系统安全防护技术发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2023, 25(6): 126–136.
- Sun Y B, Wang H Y, Tian Z H, et al. Development of security protection technologies for industrial control system [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(6): 126–136.
- [20] Kumar R, De M L. Power system resilience quantification and enhancement strategy for real-time operation [J]. *Electrical Engineering*, 2024, 106(5): 6227–6250.
- [21] 杜敏, 刘绚, 周元刚. 考虑极端事件下的高比例可再生能源电力系统韧性增强策略 [J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(12): 19–27.
- Du M, Liu X, Zhou Y G. Resilience enhancement strategy for power system with high proportion of renewable energy considering extreme events [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(12): 19–27.
- [22] 胡源, 薛松, 张寒, 等. 近 30 年全球大停电事故发生的深层次原因分析及启示 [J]. *中国电力*, 2021, 54(10): 204–210.
- Hu Y, Xue S, Zhang H, et al. Cause analysis and enlightenment of global blackouts in the past 30 years [J]. *Electric Power*, 2021, 54(10): 204–210.
- [23] He P J, Ng T S, Su B. Energy import resilience with input–output linear programming models [J]. *Energy Economics*, 2015, 50: 215–226.
- [24] 王钢, 冯婧桐, 白浩, 等. 含逆变型分布式电源和储能系统的配电网反时限过流保护定值优化方法 [J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(11): 202–209.
- Wang G, Feng J T, Bai H, et al. Optimization method of inverse-time overcurrent protection setting for distribution network with inverter-interfaced distributed generator and energy storage system [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(11): 202–209.
- [25] 杨鹏, 刘锋, 姜齐荣, 等. “双高”电力系统大扰动稳定性: 问题、挑战与展望 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(5): 403–414.
- Yang P, Liu F, Jiang Q R, et al. Large-disturbance stability of power systems with high penetration of renewables and inverters: Phenomena, challenges, and perspectives [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, 61(5): 403–414.
- [26] Rezaei M, Tolou-Askari M, Amirahmadi M, et al. Challenges of generation and transmission expansion planning considering power system resilience and provide solutions [J]. *International Journal of Engineering*, 2023: 824–841.
- [27] 杨志淳, 闵怀东, 杨帆, 等. 新型配电系统层级式数字化架构体系发展范式 [J]. *电力自动化设备*, 2024 (12): 42–51.
- Yang Z C, Min H D, Yang F, et al. Development paradigm of hierarchical digital architecture system for new power distribution system [J]. *Power Automation Equipment*, 2024 (12): 42–51.
- [28] 孙秋野, 于潇寒, 王靖傲. “双高”配电系统的挑战与应对措施探

- 讨 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7115–7136.
- Sun Q Y, Yu X H, Wang J A. Discussion on challenges and countermeasures of “double high” power distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7115–7136.
- [29] 唐文虎, 牛哲文, 赵柏宁, 等. 数据驱动的人工智能技术在电力设备状态分析中的研究与应用 [J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 2985–2999.
- Tang W H, Niu Z W, Zhao B N, et al. Research and application of data-driven artificial intelligence technology for condition analysis of power equipment [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 2985–2999.
- [30] 李浩, 刘根, 文笑雨, 等. 面向人机交互的数字孪生系统工业安全控制体系与关键技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 374–389.
- Li H, Liu G, Wen X Y, et al. Industrial safety control system and key technologies of digital twin system oriented to human-machine interaction [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 374–389.
- [31] 李明节, 陶洪铸, 许洪强, 等. 电网调控领域人工智能技术框架与应用展望 [J]. 电网技术, 2020, 44(2): 393–400.
- Li M J, Tao H Z, Xu H Q, et al. The technical framework and application prospect of artificial intelligence application in the field of power grid dispatching and control [J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 393–400.
- [32] Plotnek J J, Slay J. Power systems resilience: Definition and taxonomy with a view towards metrics [J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2021, 33: 100411.
- [33] Koltsaklis N E, Panapakidis I P, Christoforidis G C. Assessing the impacts of energy storage on the electricity market-clearing algorithms [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(8): 12968.
- [34] 江秀臣, 许永鹏, 李曜丞, 等. 新型电力系统背景下的输变电数字化转型 [J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 1–10.
- Jiang X C, Xu Y P, Li Y C, et al. Digitalization transformation of power transmission and transformation under the background of new power system [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 1–10.
- [35] 徐雪松, 唐加乐, 曾子洋, 等. 极端自然灾害下我国城市电力系统韧性提升框架与发展策略研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 198–209.
- Xu X S, Tang J L, Zeng Z Y, et al. Framework and strategy for enhancing resilience of China’s urban power systems under extreme natural disasters [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(2): 198–209.
- [36] Wang Y Z, Chen C, Wang J H, et al. Research on resilience of power systems under natural disasters—A review [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1604–1613.
- [37] Zhou S C, Li Y F, Jiang C W, et al. Enhancing the resilience of the power system to accommodate the construction of the new power system: Key technologies and challenges [J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1256850.
- [38] May C K. Coastal community resilience and power in the United States: A comparative analysis of adaptability in North Carolina and Louisiana [J]. Environmental Management, 2021, 68(1): 100–116.
- [39] Arghandeh R, von Meier A, Mehrmanesh L, et al. On the definition of cyber-physical resilience in power systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1060–1069.
- [40] 符杨, 韦钢, 唐忠, 等. 面向能源战略变革的“复合型”电力工科人才培养机制构建 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3683–3691.
- Fu Y, Wei G, Tang Z, et al. Construction of “composite” power engineering personnel training mechanism for energy strategic reform [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3683–3691.
- [41] Zare-Bahramabadi M, Abbaspour A, Fotuhi-Firuzabad M, et al. Resilience-based framework for switch placement problem in power distribution systems [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(5): 1223–1230.
- [42] 张虎成, 李雷孝, 刘东江. 多模态数据融合研究综述 [J]. 计算机科学与探索, 2024, 18(10): 2501–2520.
- Zhang H C, Li L X, Liu D J. Survey of multimodal data fusion research [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2024, 18(10): 2501–2520.
- [43] 王波, 王红霞, 姚良忠, 等. 电力系统多模态数据融合模式及关键技术问题 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 188–199.
- Wang B, Wang H X, Yao L Z, et al. Multi-modal data fusion mode for power system and its key technical issues [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 188–199.
- [44] 杨挺, 耿毅男, 郭经红, 等. 人工智能在新型电力系统智能传感、通信与数据处理领域应用 [J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 19–29.
- Yang T, Geng Y N, Guo J H, et al. Applications of artificial intelligence in sensing, communication, and data processing in the new power system [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 19–29.
- [45] Ajagekar A, You F Q. Quantum computing based hybrid deep learning for fault diagnosis in electrical power systems [J]. Applied Energy, 2021, 303: 117628.
- [46] 李明轩, 魏鞞, 许寅, 等. 基于预演算法的灾后配电网应急抢修决策优化 [J]. 电力建设, 2023, 44(12): 85–94.
- Li M X, Wei W, Xu Y, et al. Rollout algorithm-based post-disaster distribution system emergency repair optimization [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 85–94.
- [47] 田启东, 张家琦, 陈颖, 等. 基于强化学习的灾后配电网应急抢修决策方法 [J]. 电工电能新技术, 2023, 42(3): 66–75.
- Tian Q D, Zhang J Q, Chen Y, et al. Post-disaster emergency repair and reconfiguration plan of faulty distribution system based on reinforcement learning [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(3): 66–75.
- [48] Espinoza S, Panteli M, Mancarella P, et al. Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 136: 352–361.
- [49] Zhou Y Z, Li X, Han H T, et al. Resilience-oriented planning of integrated electricity and heat systems: A stochastic distributionally robust optimization approach [J]. Applied Energy, 2024, 353: 122053.
- [50] 秦潘昊, 陈威宇, 胡秦然, 等. 新型电力系统设备状态监测与故障诊断传感芯片关键技术与展望 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(6): 83–95.
- Qin P H, Chen W Y, Hu Q R, et al. Key technologies and prospect

- of equipment condition monitoring and diagnosis sensor chips for new power systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(6): 83–95.
- [51] 陈磊, 邓欣怡, 陈红坤, 等. 电力系统韧性评估与提升研究综述 [J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(13): 11–22.
- Chen L, Deng X Y, Chen H K, et al. Review of the assessment and improvement of power system resilience [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(13): 11–22.
- [52] 姚建国, 余涛, 杨胜春, 等. 提升电网调度中人工智能可用性的混合增强智能知识演化技术 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(20): 1–12.
- Yao J G, Yu T, Yang S C, et al. Knowledge evolution technology based on hybrid-augmented intelligence for improving practicability of artificial intelligence in power grid dispatch [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(20): 1–12.
- [53] Dobson I. Models, metrics, and their formulas for typical electric power system resilience events [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(6): 5949–5952.
- [54] Nazemi M, Moeini-Aghtaie M, Fotuhi-Firuzabad M, et al. Energy storage planning for enhanced resilience of power distribution networks against earthquakes [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(2): 795–806.
- [55] Lammers K, Bertheau P, Blechinger P. Exploring requirements for sustainable energy supply planning with regard to climate resilience of Southeast Asian Islands [J]. *Energy Policy*, 2020, 146: 111770.
- [56] Sang M S, Ding Y, Bao M L, et al. Enhancing resilience of integrated electricity-gas systems: A skeleton-network based strategy [J]. *Advances in Applied Energy*, 2022, 7: 100101.
- [57] Kelly-Gorham M R, Hines P D H, Zhou K, et al. Using utility outage statistics to quantify improvements in bulk power system resilience [J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 189: 106676.
- [58] Mazur C, Hoegerle Y, Brucoli M, et al. A holistic resilience framework development for rural power systems in emerging economies [J]. *Applied Energy*, 2019, 235: 219–232.
- [59] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 61–69.
- Shu Y B, Chen G P, He J B, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 61–69.
- [60] 孙为民, 孙华东, 何剑, 等. 面向严重自然灾害的电力系统韧性评估技术综述 [J]. *电网技术*, 2024, 48(1): 129–139.
- Sun W M, Sun H D, He J, et al. Review of power system resilience assessment techniques for severe natural disasters [J]. *Power System Technology*, 2024, 48(1): 129–139.
- [61] Zhang W X, Shao C Z, Hu B, et al. Transmission defense hardening against typhoon disasters under decision-dependent uncertainty [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(3): 2653–2665.
- [62] Pagliaro M. Renewable energy systems: Enhanced resilience, lower costs [J]. *Energy Technology*, 2019, 7(11): 1900791.
- [63] Li X, Du X X, Jiang T, et al. Coordinating multi-energy to improve urban integrated energy system resilience against extreme weather events [J]. *Applied Energy*, 2022, 309: 118455.