科学通报
观 点
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

场景驱动-学科支撑双重视角下新型电力系统技术创新需求

赵强[1*], 张玉琼[1], 周孝信[1], 周翔[2]

1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192
2. 国家电网有限公司, 北京 100031
* 联系人, E-mail: rick97@sohu.com

当前, 我国将科技创新摆在国家发展全局的核心位置. 《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》明确将创新驱动作为引领发展的第一动力, 强调以科技创新引领新质生产力发展[1]. 与此同时, 能源安全新战略深入推进, 党的二十届四中全会作出建设能源强国的战略擘画, 明确“十五五”时期初步建成新型能源体系的目标任务. 新型电力系统作为能源转型的核心载体与科技创新的重要战场, 其技术体系布局既关乎国家能源安全命脉, 也承载着培育能源领域新质生产力的战略使命.

能源转型背景下, 电力系统发展模式正发生根本性转变, 风光等可再生能源发电及直流输电快速发展, 分布式电源、储能、电动汽车等交互式能源设施逐步推广应用, 电网安全运行出现新特征, 为电力系统科技创新提出新挑战和新课题[2~5]. 而传统技术驱动型创新范式按惯性推进或由当前问题、局部观点驱动, 易产生路径依赖问题, 亟需从顶层设计入手, 构建全局性、前瞻性技术布局. 以“场景驱动”为导向, 从典型场景推导关键技术需求[6], 能够有效破解发展惯性、抓住主要矛盾, 充分发挥创新资源效能. 另一方面, 相关专业学科的发展, 为电力系统技术创新体系提供了基础性框架和关键支撑, 电气工程、动力工程等传统优势学科奠定了系统安全稳定运行理论根基, 明确了主干技术领域核心方向, 材料科学与工程、控制科学与工程等学科深度融入, 推动了储能、智能感知等新兴领域的拓展; 借助专业学科系统理论方法, 不仅可为技术创新领域细分提供逻辑依据, 也为多学科协同攻关、构建开放融合的完整创新体系奠定坚实基础. 由此, 本文以“场景驱动”为核心思路, 以“学科支撑”为底层逻辑, 探讨电力系统技术创新需求, 为电力技术创新布局提供参考.

1 电力系统发展场景构建

1.1 未来电力系统发展趋势

基于相关情景研究[7~10], 结合最新能源转型要求分析未来我国电力系统电源结构, 如图1所示, 风光发电装机在2020~2060年期间持续上升, 2035年风光发电装机或将超过40亿kW, 占比达到约60%; 2040年左右, 风光年发电量占比超过50%, 成为电量主体; 2050年后, 电力系统呈现显著的高比例新能源特征, 风光装机占比将超过75%, 发电量占比超过60%; 煤电装机于2035年后持续下降, 2045年后下降速度放缓, 年发电量于2030年后呈下降趋势, 2050年后低于1万亿kWh.



赵强 教授级高级工程师, 中国电力科学研究院技术战略研究中心副主任, 中国化学与物理电源行业协会储能应用分会副主任委员. 长期从事大电网安全稳定分析、能源战略、电网科技规划等研究工作. 曾参与制定国家标准6项, 发表SCI、EI文章40余篇, 合作出版编著6部、译著2部, 获省部级科技奖励6项.

可再生能源发电占比显著提升是我国电源结构演化的必然趋势[11,12], 主要体现在可再生能源发展规模和开发模式两方面. 规模方面: 新能源逐步实现从非主体电源到装机主体、最终成为电量主体的转变. 当前我国风光发电累计装机已达到18.4亿kW, 超过火电成为系统装机主体. 受风光特性和电网安全约束, 新能源发电利用小时数相对较低, 随着新能源并网规模持续扩大, 风光装机占比和发电量占比两项关键指标演化过程呈现“前者始终高于后者但增速总体低于后者”的特征. 模式方面: 新能源开发模式呈现集中式与分布式并重、陆上与海上并举特点. 预计2030年, 西部集中式开发风光规模达6亿kW左右, 大规模新能源集群式并网模式持续

引用格式: 赵强, 张玉琼, 周孝信, 等. 场景驱动-学科支撑双重视角下新型电力系统技术创新需求. 科学通报
Zhao Q, Zhang Y, Zhou X, et al. Technological innovation requirements for new power systems from the dual perspectives of scenario-driven and discipline-supported paradigms (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: 10.1360/CSB-2026-0327

© 2026《中国科学》杂志社

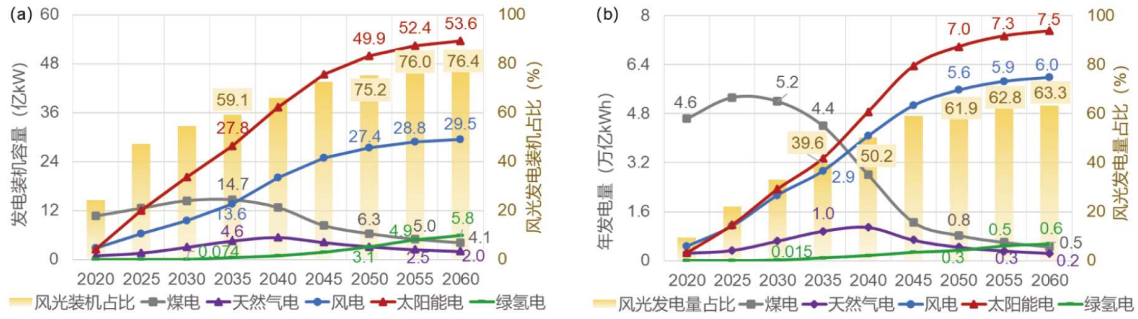


图 1 2020~2060年我国电源结构演化趋势. (a) 装机容量; (b) 发电量

Figure 1 Evolution trend of China's power source composition in 2020–2060. (a) Installed capacity; (b) power generation

发展; 分布式光伏达10亿kW左右, 东部海上风电达2亿kW以上, 由此带来日益增长的风光资源就地开发及消纳利用需求. 此外, 西南可再生资源利用未来将由过去传统单一水电开发模式, 转向大规模水风光一体化清洁能源基地建设, 将面临生态环境保护强约束下技术难度升级的系统性命题.

电源结构及布局转变带来系统稳定特性、平衡模式、运行控制等一系列变化, 进而对跨区电力流送受格局及电网形态产生直接影响[13]. 为适应风光发电超预期发展, 实现能源资源大范围远距离安全高效配置, 未来电网形态结构演化呈现输电规模扩大、电网结构复杂等特征. 规模方面: 跨省区输电规模及新能源输送电量占比进一步提高. 预计2030年特高压直流将超过40回, 输电规模超过3.1亿kW. 随着大型风电光伏基地、水风光综合基地有序建设, 跨省区输电通道输送新能源电量占比将显著提高, 由主要输送煤电等传统电力逐步转变为清洁能源电力输送通道. 结构方面: 送端地区, "沙戈荒"新能源大基地多数位于主网末端, 呈现布局连片、出力同质、通道集群等特点, 电网结构需在间歇性、波动性新能源高比例接入情况下, 同时满足本地负荷平稳供给、远距离大容量电力外送等功能需求, 根据地区资源环境、网架现状及技术成熟度, 预计将呈现多电压等级交流汇集(0.69 kV-10(35) kV-110 kV-220(330) kV-500(750) kV)+特高压直流送出、多电压等级交流汇集+柔性直流送出、直流组网+柔性直流送出等多种电网形态[14]; 受端地区, 多回特高压直流馈入, 呈现落点密集、馈入容量大、系统短路比低等特征, 海量分布式新能源并网、储能和电动汽车设施广泛接入显著增加了配网复杂性[15,16]. 根据网架现状及技术成熟度, 未来预计将总体呈现特高压交直流混联电网+柔性直流、特高压交直流混联电网+柔性直流+局部直流电网等多种形态[17].

1.2 区域化场景特征

我国幅员辽阔, 地理、地质及气象条件复杂多样, 同时各区域间社会经济发展水平不均衡, 产业结构与用能需求差异显著, 这种双重异质性决定了我国电力系统具有覆盖面广、层级结构多、运行环境复杂多变等显著特点. 从电力系统运行角度看, 在大电网层面, 需综合考虑送端、受端面临不同的安全稳定问题, 在配用电层面, 需考虑省域、城市、乡村等各层级电网面临的安全可靠供电需求; 从工程建设及设备运维角度, 需应对高海拔、深远海、山地地形等多种极端环境挑战. 基于地理位置、资源分布及区域社会经济特点, 国家电网下辖华北、华东、华中、西南、东北、西北等六大区域27家省公司包含了能源资源富集区、城市/乡镇负荷中心以及内陆/沿海/山地等各类地质地理环境, 基本可覆盖上述问题. 由此, 本文调研了国家电网各省公司共178个电力系统未来发展场景, 并以此样本进行统计归类及特征分析, 已能够较好地代表我国新型电力系统建设中的主要共性问题和区域特色问题, 不影响核心结论的普适性.

根据各省区场景名称开展高频关键词分析, 为提升结果合理性, 关键词提取过程中重点关注能反映区域资源禀赋、地理环境、电网结构或技术焦点的词汇, 剔除例如电网、设备、安全、运行、提升等通用性词汇, 同时适当归并具有相近隐含含义的同义词(例如极寒/低温、外送/送出等). 图2所示为各区域出现频次不低于2次的关键词, 可直观体现未来电力系统发展场景的地域特色, 本质上包含以下几种类型要素: 一是地理资源要素, 例如华东地区海上风电、西南地区水风光、西北地区沙戈荒(风光资源丰富)、东北地区极寒低温问题; 二是社会要素, 例如华北、华东地区场景多关注"城市", 西南则关注"偏远地区"供电问题; 三是技术要素, 例如华东、华北等经济相对发达地区重点关注"智能"方面需求, 西南、西北则着眼于水风光或源网荷储等多类型资源协同问题, 华中、华东都较为关注供需"互动"; 四是系统要素, 例如华北、华东、西北、西南对配电网、微电网相关问题均较为关注, 东北、西北面临新能源外送、设备运维等方面重大挑战, 华中区域则聚焦多直流馈入问题, 这些充分体现了各区域电力系统自身特点.

根据各区域省公司场景, 并结合上述高频词分析, 通过

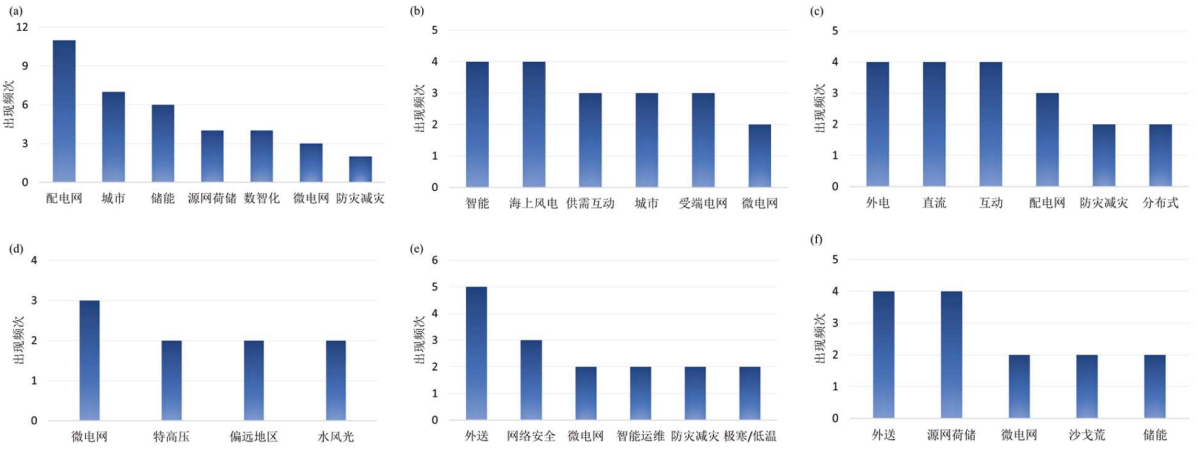


图 2 我国6个区域电力系统未来发展场景名称高频关键词. (a) 华北; (b) 华东; (c) 华中; (d) 西南; (e) 东北; (f) 西北

Figure 2 High-frequency keywords in the names of future development scenarios for China's six regional power systems. (a) North China; (b) East China; (c) Central China; (d) Southwest China; (e) Northeast China; (f) Northwest China

聚类及特征提取, 总结6个区域电力系统主要特征及场景, 如表1所示. 由此可见, 一是从具有典型负荷中心特点的地区(华北、华中、华东)来看, 呈现城市电网密集复杂、交直流混联等特点, 由功能需求牵引, 存在以下几个共性场景, 例如大型城市供电、多直流馈入受端电网、高比例新能源接入与消纳、供需互动与主配微协同等; 同时, 各区域具有若干特色场景, 例如华北和华东较为关注的人工智能融合场景、华中面向山区环境的极端条件电网建设与防灾场景、华东大规模远海风电送出场景、华东高敏感产业集群优质供电场景等. 二是从清洁资源相对富集的地区(东北、西北、西南)来看, 呈现电力外送需求大、气象/地理环境复杂等特点, 存在可再生能源大基地建设、风光水(核)一体化开发、极端环境下设备适应性等共性场景; 同时, 各区域还存在具有鲜明自身特点的场景, 例如东北极寒环境下设备可靠运行场景.

1.3 电力系统典型场景构建

在系统层面构建"场景驱动"下的电力系统技术创新框架, 需面向国家需要、引领行业发展, 充分考虑前瞻性和代表性, 涵盖并体现新型电力系统构建过程中最必要、最核心、最难突破的问题. 以此为原则, 结合电源结构清洁低碳转型与电网形态结构演化趋势, 同时考虑国家重大战略及重大工程, 以上述区域化场景特征为基础, 提出我国未来电力系统5类典型发展场景, 具体如下.

(1) "沙戈荒"大型风电光伏基地外送. 主要面向我国在沙漠、戈壁、荒漠等地区规划建设的大型风电光伏基地, 作为实现"双碳"目标与保障能源安全的关键举措. 该类场景面临资源富集区远离负荷中心、送端电网结构薄弱、波动性间歇性新能源占比高、多回直流通道外送下连锁故障易引发电网事故风险增加等多重挑战, 亟需突破多直流送出系统稳定控制、风光火储多能互补协同、特高压输电能力提升以及极端环境下设备适应性等核心问题[18~21], 构建源网协调、安全高效的新能源外送体系, 支撑国家清洁能源大基地开发战略.

(2) 深远海大型海上风电基地外送. 主要面向我国积极推动海上风电向深远海、大型化发展, 开发建设百万千瓦级深远海风电基地的重要战略布局. 该类场景亟待解决远距离海上输电、复杂气象及海况条件下设备可靠性、多电压等级汇集与送出等难题, 需借助柔性直流、低频交流等新型输电手段, 同时实现海上风电与陆上电网协调运行[22~26], 提升海上风电主动支撑能力和抗扰动能力, 为海洋能源强国建设提供有力支撑.

(3) 负荷中心特高压直流跨区受电. 主要面向负荷中心, 保障大规模、多直流馈入地区电网安全稳定运行这一直接关系国家能源供应命脉的重大战略需求. 该场景面临跨区输电走廊资源稀缺、多直流同时故障风险、受端电网电压支撑能力不足、系统短路电流大等挑战[27,28], 亟待解决安全高效输电、多馈入直流系统协调控制、短路电流超标治理等问题[17,29], 提升负荷中心对清洁电力的接纳能力与供电可靠性.

(4) 高比例分布式新能源承载利用. 主要面向能源消费侧绿色转型与城乡能源体系现代化建设的国家重大战略需求, 实现高比例分布式新能源开发利用. 该场景聚焦配网侧海量分布式光伏及储能、电动汽车等新型负荷的广泛接入, 面临配电网规划适应性不足、潮流双向化、电能质量恶化、保护与控制复杂化等挑战[30,31], 亟需提升智能微电网安全可靠运行、源网荷储协同调控、配用电系统智能量测/通信/运

表 1 我国6个区域电网主要特征及场景

Table 1 Main characteristics and scenarios of the six regional power grids in China

区域	特征	主要场景
华北	负荷密集、城市电网复杂、新能源接入比例高、应急保障要求高	高安全大型城市受端电网 高比例新能源接入与消纳 高可靠配电网与柔性城市配网 高效用能与负荷互动 主配微多级协同调控 交直流混联电网安全稳定控制 数智化赋能与智能运维
华东	电网密集、负荷集中、海风资源丰富	多馈入大受端电网安全稳定 大规模远海风电送出 超大城市电网供需协同 高敏感产业集群优质供电 智能微电网与源网荷储协同 人工智能与电网业务融合 超导电力系统与新型电工装备
华中	交直流混联、新能源就地开发与外来电并存、地理环境复杂	复杂交直流混联电网运行 高比例分布式新能源开发 新型配用电系统供需协同 高比例外来电消纳与稳定 极端环境下电网建设与防灾 多元负荷与电网互动 输变电设备健康管理
西南	水电为主、地理条件复杂、微电网发展需求突出	水风光储一体化基地建设与送出 弱交流支撑下新能源集群开发 特高压交直流混联电网 偏远地区微电网保供 配电网安全与优质供电 多元资源协同优化 新型智能量测与网络安全
东北	新能源外送、寒地环境、设备运维要求高	风光核一体化开发与消纳 沙戈荒/海上风电基地外送 交直流混联电网协同 极寒环境下设备可靠运行 智能运维与防灾减灾 多元负荷互动与微电网 电力监控与网络安全防御
西北	新能源大基地集中、外送通道密集、环境极端	沙戈荒大基地建设与外送 高比例新能源开发与消纳 源网荷储协同与微电网 多直流外送与电网安全 极端环境下设备适应性 智能应急与多灾种响应

行水平[32,33]，实现分布式新能源就地消纳与灵活互动，构建清洁低碳、安全高效的新型配电系统.

(5) 西南大型水电基地外送. 主要面向我国西南地区重要清洁能源战略基地，依托以水风光互补为特征的大型水电基地外送，实现水电流域梯级开发利用，满足跨区电力平衡与绿色低碳转型等重大需求. 该场景核心在于破解水电丰枯

季出力差异与新能源波动的协同难题，依托特高压直流实现大容量、远距离输送，需应对多回特高压直流外送、水电机组灵活调节能力提升、水风光储一体化联合运行、局部地区高地震烈度等重大挑战[34–36]，构建安全、经济、清洁的跨区输电通道.

上述5类典型发展场景与6个区域存在普遍的交叉关联关系，具体如图3所示. 场景1与西北、东北存在关联关系，与西北联系最为紧密；场景2与华东、东北强关联，与华北具有一定联系；场景3和场景4与华东、华北、华中均存在较强关联关系，其中场景4与其他区域存在一定的弱联系，场景3与西南也存在一定关联；场景5则与西南存在独立强关联. 可见，不同区域与各场景间存在大量的交叉耦合关联性，这5类场景基本可涵盖我国各区域电力系统的典型特征及关键问题，涵盖了能源资源富集区外送、负荷中心安全受电、分布式能源广泛接入等新型电力系统建设中的核心形态，并体现了国家重大战略需求与电力系统功能定位的深度融合.

2 场景驱动的新型电力系统技术创新需求

以1.3节凝练提出的我国未来电力系统五大典型场景为驱动，分别系统剖析各场景在能源资源禀赋、电网结构形态、运行控制特征等方面的核心挑战，提炼出37项关键技术需求，具体见图4所示.

场景1：为支撑沙戈荒基地的大规模风光资源开发与安全外送，对新能源资源模拟与发电功率预测、多能互补协调规划与运行控制、高比例新能源送端电网稳定运行控制、特高压/柔性直流输电装备与系统集成、高安全长寿命储能装备、极端环境输电线路建设与运维、沙戈荒基地生态保护与修复等技术需求迫切. 场景2：为应对深远海风电外送难题，亟待研发深远海风电综合开发与多能转换、海上风电平台设备可靠性提升、特高压/柔性直流输电装备与系统集成、极端环境输电线路建设与运维、极端气候下电网防灾减灾等关键技术. 场景3：为支撑负荷中心大规模、多直流馈入系统的安全稳定运行，需突破多馈入直流系统安全稳定运行控制、受端电网规划、规模化储能规划与调控、高比例电力电子系统继电保护等技术，提升电压调节能力、加强受端电网韧性. 场景4：海量分布式光伏、分散式风电及储能、电动汽车等新型资源广泛接入，对有源配电网规划与安全高效运行、微电网自治运行与可靠供电、配电网保护与故障自愈、分布式资源聚合调度等技术提出迫切需求. 场景5：面向西南大型水电基地外送战略需求，亟须借助多能互补协调规划与运行控制、水风光储多能互补联合调度、大型水电机组快速调节与跨流域水电优化运行等先进手段，依托特高压/柔性直流输电装备、极端环境下电网防灾减灾、复杂地形地质条件下输电线路施工建设等核心技术，破解水风光互补与远距离输送难题.

除上述场景自身需求外，若干技术呈现出显著跨场景共性需求，为新型电力系统发展提供共性基础性支撑. 例如：电力人工智能应用、新型电力系统网络安全防护等先进信息技术，贯穿所有场景规划、运行与运维环节，为系统提供数智化赋能；极端环境下装备安全防护材料、新型环境友好电工材料、高压大容量硅基功率器件、高压宽禁带功率半导体器件等材料器件技术，广泛适用于沙戈荒、深远海、受端、分布式、水电等各类场景，成为装备性能提升的共同基础；新型电力系统战略规划与政策推演、电力技术经济分析

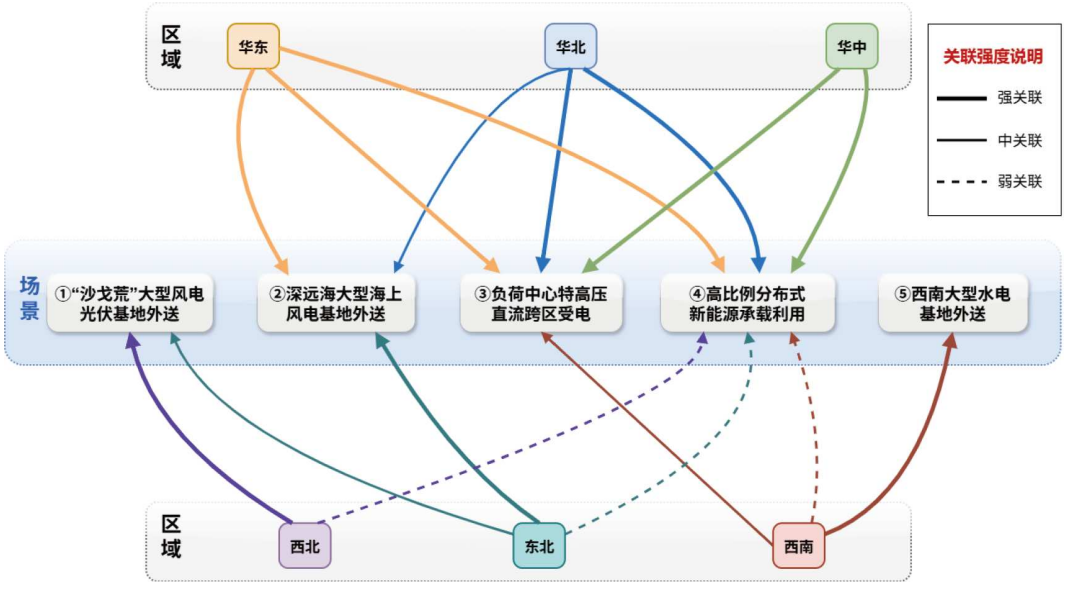


图 3 5类典型发展场景与6个区域关联关系
Figure 3 Relationships between five typical development scenarios and six regions

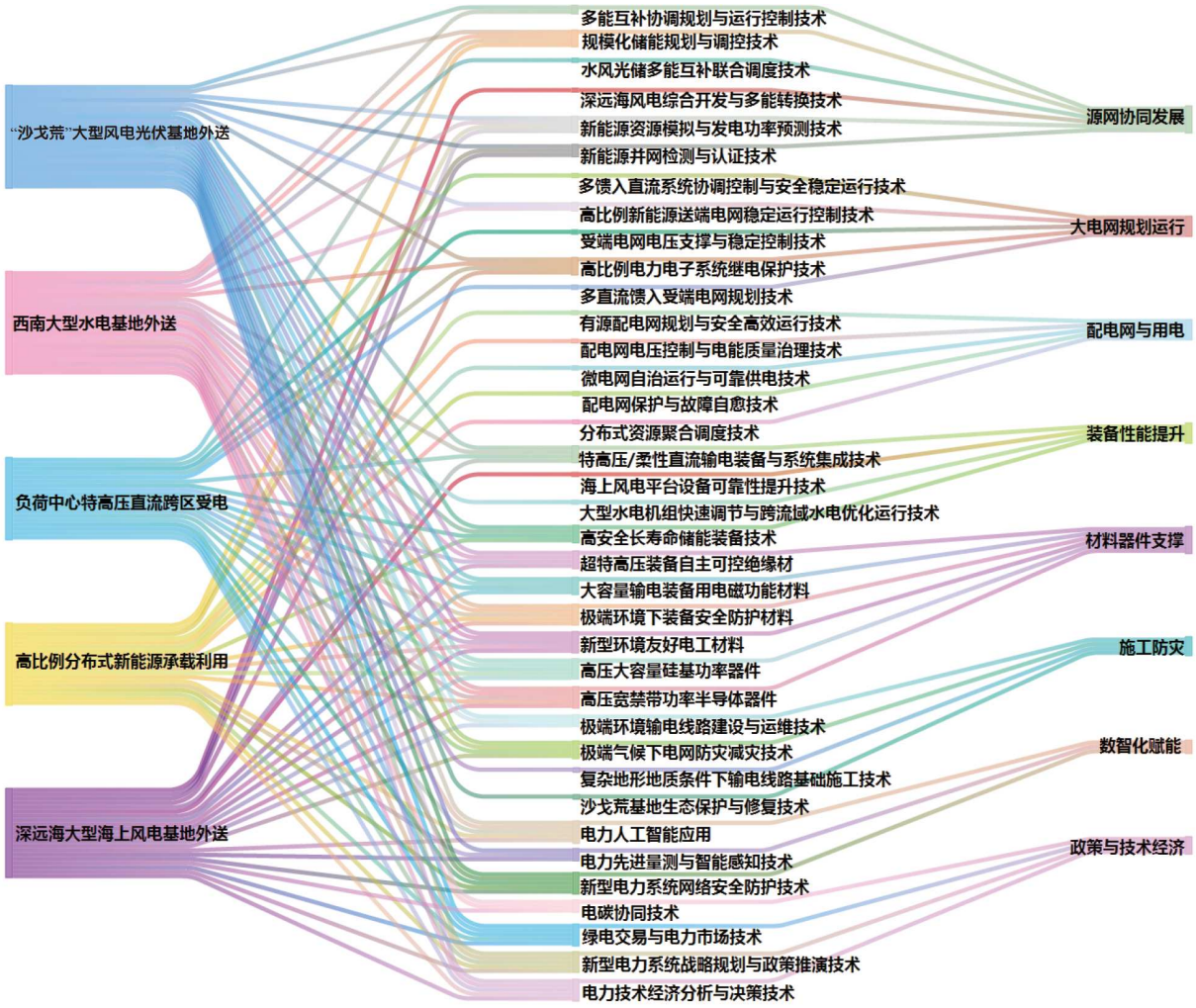


图 4　典型场景-技术需求-领域方向映射关系图
Figure 4　Mapping of typical scenarios to technical requirements and research directions

与决策等政策经济类技术，则为各场景技术应用与价值实现提供机制保障. 基于上述分析，可进一步将37项技术创新需求按照技术属性归纳为八大技术领域(见图4右侧，领域划分及命名方式参考《国家电网公司“十五五”科技规划及中长期科技发展纲要》): 源网协同发展领域聚焦新能源、储能、常规水火电等开发利用及其并网调控，大电网规划运行领域涵盖大电网规划、系统运行与控制保护、自动化等方向，配电网与用电领域涵盖配网规划、配电设备运维、用电能效、供需互动等相关技术，装备性能提升领域关注高端装备研制、超/特高压设备运检, 材料器件支撑领域着眼于高性能材料、器件相关研究，施工防灾领域包含施工、防灾减灾、设计、环保等方向，数智化赋能领域着力于推动通信、信息、传感、计量、人工智能等技术应用，政策与技术经济领域围绕政策机制、电碳协同、电力市场机制等开展研究. 八大领域共同构成系统完备、相互支撑、重点突出的技术创新体系, 为新型电力系统建设提供全要素支撑与前瞻性引领.

3　新型电力系统技术研发的学科支撑

专业学科是技术领域划分的重要依据，其类别主要有两种划分标准，一是国务院学位委员会、教育部印发的《学位授予和人才培养学科目录》及其相关文件[37,38]，是国家进行学位授权审核与学科管理、学位授予单位开展学位授予与人才培养工作的基本依据；二是国家标准类文件《学科分类与代码》(GB/T 13745-2009), 适用于国家宏观管理和科技统计, 现行版本于2009年11月1日起实施[39]. 考虑到本文探讨的技术研发方向面向未来电网实际需求，《学科分类与代码》建立的学科分类体系是“直接为科技政策和科技发展规划以及科研项目、科研成果统计和管理服务”, 对于电力系统行业

科研顶层设计、技术研发布局具有更高适用性，故以此为分析对象.

针对上述37项技术，对照《学科分类与代码》逐一梳理，可进一步分析电力系统技术创新的专业学科基础，厘清各领域研究交叉关系. 需要说明的是，各技术支撑学科的对应关系分析不可避免具有一定的主观性，同时为突出各技术的主要支撑性学科，此分析中仅考虑具有相对显性关联的学科，部分存在潜在弱联系的不再逐一体现；此外，《学科分类与代码》中部分二级学科未下设三级学科. 综合上述因素，考虑分析系统性、准确性和覆盖度，重点针对二级学科开展分析. 图5可直观呈现技术研发的学科支撑和交叉关系，由此可见，共51个二级学科为新型电力系统技术创新提供底层支撑，且每个技术领域、各项技术均有多个学科支撑，相互之间存在普遍的交叉关系，充分体现了未来电力系统技术研究学科融合、专业交叉的需求特点.

各技术领域学科支撑具有以下几方面特征：一是大电网规划运行、配电网与用电、装备性能提升3个技术领域与电力系统发输配用等环节直接联系，支撑该类技术领域的二级学科具有高度重合性和相互关联性；二是源网协同发展、大电网规划运行、材料器件支撑、配电网与用电等4个技术领域支撑学科数量较多，学科交叉性强；三是施工防灾、政策与技术经济为相对独立领域，其关联学科与其他技术领域重叠度较低，前者直接面向电网建设工程一线需求，后者则面向企业决策需求，需要统筹多个非电气类学科支撑；四是电气类主专业学科——电气工程关联技术领域数量最多(对15项技术研发需求具有支撑作用)，其次，控制科学与技术、能

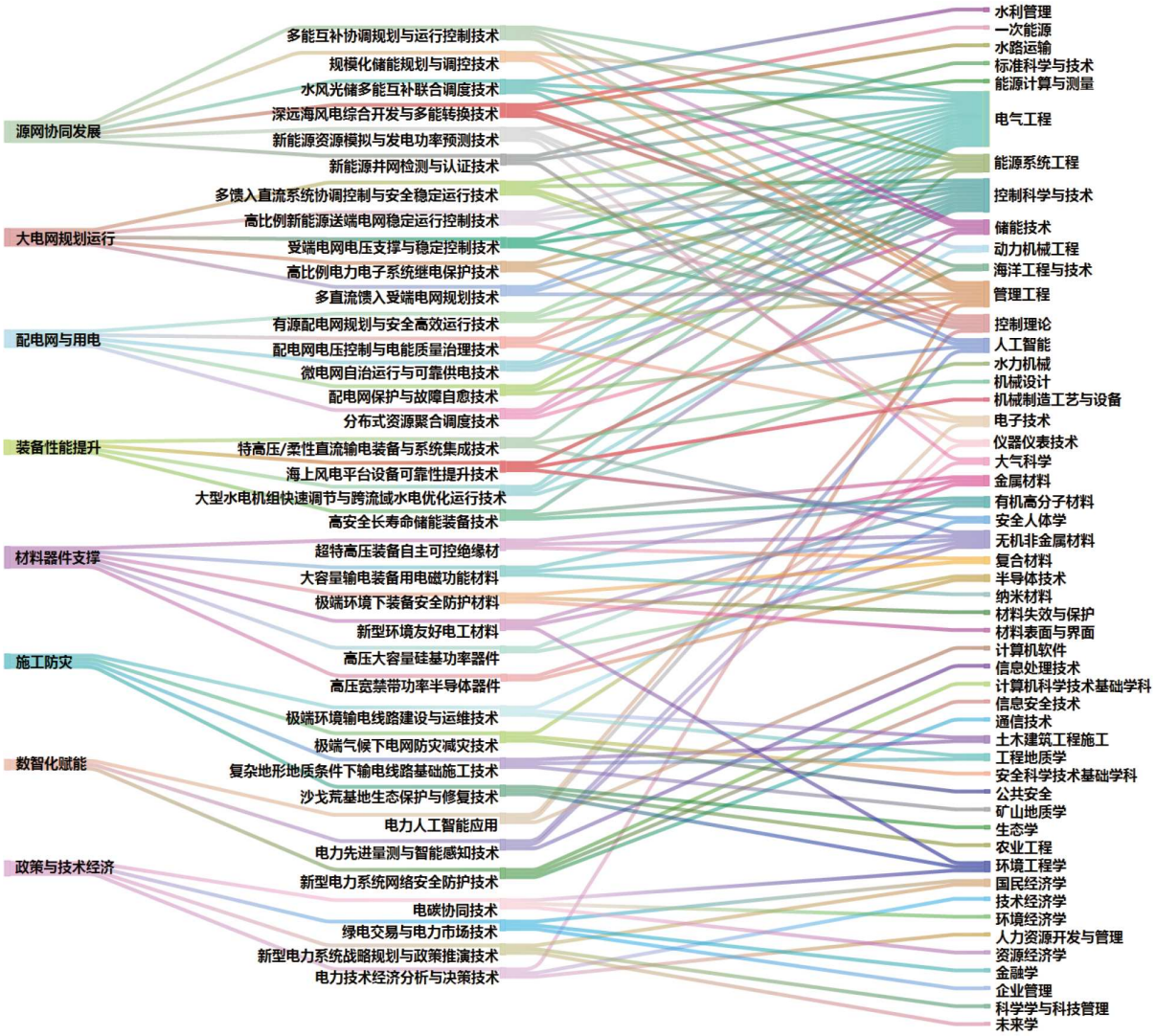


图 5 技术需求-学科支撑关系图

Figure 5 Correlations of technical requirements and supporting disciplines

源系统工程等二级学科, 也为较大数量的技术研究提供支撑.

另一方面, 上述学科支撑关系在不同典型场景下也会呈现出差异化特征. 例如, “沙戈荒”大型风电光伏基地外送场景下, 极端环境条件对输电线路建设、设备适应性及生态修复提出了更高要求, 相应的技术研发对材料科学、环境科学等学科的依赖更为突出; 深远海海上风电基地外送场景则更需要海洋科学等学科支撑; 负荷中心特高压直流跨区受电场景核心挑战在于多馈入直流系统的稳定控制与保护, 对动力与电气工程、信息科学与系统科学等学科的支撑需求尤为迫切; 高比例分布式新能源承载利用场景则更强调配电网运行、供需互动及智能感知, 对动力与电气工程、电子与通信技术等学科融合需求更为显著. 由此可见, 不同场景的技术瓶颈决定了其支撑学科存在结构性差异, 场景驱动下的技术需求与学科基础之间存在动态适配特征, 并非单一静态映射关系.

4 总结

本文开展了“场景驱动-学科支撑”双重视角下的新型电力系统技术创新需求研究, 在我国未来电力系统演化趋势分析基础上, 以未来电力系统典型场景为驱动, 推导了关键技术创新需求, 并系统梳理了各领域技术研发的专业学科基础, 为新型电力系统技术创新体系顶层设计提供思路方法. 研究结合华北、华东、华中、西南、东北、西北六大区域27个省178个未来电力系统发展场景梳理及特征凝练, 进一步考虑国家重大战略及重大工程, 提出“沙戈荒”大型风电光伏基地外送、深远海大型海上风电基地外送、负荷中心特高压直流跨区受电、高比例分布式新能源承载利用、西南大型水电基地外送等五大典型场景, 以场景需求为牵引, 识别提出新能源资源模拟与功率预测、多能互补协调运行、高比例新能源送端电网稳定运行控制、高安全长寿命储能、微电网自治控制、极端环境下设备适应性、电力人工智能应用等37项关键技术需求, 归纳为源网协同、大电网规划运行、配用电、装备提升、材料器件、施工防灾、数智化赋能、政策经济等八大技术领域, 形成系统完备的创新体系, 最后通过51项支撑性二级学科梳理, 揭示了电力系统创新的多学科支撑及深度交叉融合特征. 场景驱动可为技术方向的研判提供需求牵引, 学科支撑则为技术实现提供实现基础, 二者相辅相成, 共同构成新型电力系统技术创新从需求识别到能力保障的闭环逻辑. 研究表明, 未来电力系统技术创新需坚持场景需求导向, 依托多学科协同攻关实现重点突破, 为电力系统技术研发布局与创新资源要素投入提供决策支撑.

致谢 感谢国家电网公司总部科技项目(项目名称: “双碳”目标下我国终端消费需求及电网发展场景研究, 项目号: 1400-202455413A-3-5-YS)资助. 本文研究过程中得到了国家电网有限公司科技创新部计划处的支持.

推荐阅读文献

1 The Central Committee of the Communist Party of China. Recommendations of the Central Committee of the Communist Party of China for Formulating the 15th Five-Year Plan for National Economic and Social Development (in Chinese). 2025, https://www.gov.cn/gongbao/2025/issue_12386/202511/content_7047415.html [中共中央. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议. 2025, https://www.gov.cn/gongbao/2025/issue_12386/202511/content_7047415.html]

2 National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guiding Opinions of the National Development and Reform Commission and the National Energy Administration on Promoting the High-Quality Development of Power Grids (in Chinese). 2025, https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202512/t20251231_1402949.html [国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委、国家能源局关于促进电网高质量发展的指导意见. 2025, https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202512/t20251231_1402949.html]

3 National Energy Administration. Guiding Opinions of the National Energy Administration on Promoting the Integrated and Coordinated Development of New Energy (in Chinese). 2025, https://www.nea.gov.cn/20251112/79210278a3184efea9ccf2d546fdf1b7/c.html [国家能源局. 国家能源局关于促进新能源集成融合发展的指导意见. 2025, https://www.nea.gov.cn/20251112/79210278a3184efea9ccf2d546fdf1b7/c.html]

4 National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Special Action Plan for Large-scale Construction of New Energy Storage (2025–2027) (in Chinese). 2025, https://www.nea.gov.cn/20250912/73455a1a61b248d4aef65cc124631398/c.html [国家发展改革委, 国家能源局. 新型储能规模化建设专项行动方案(2025—2027年). 2025, https://www.nea.gov.cn/20250912/73455a1a61b248d4aef65cc124631398/c.html]

5 Zhou X X. Examining and changing the traditional power system with internet thinking (in Chinese). Electrotech Appl, 2019, 38: 4–8 [周孝信. 以互联网思维审视和改变传统电力系统. 电气应用, 2019, 38: 4–8]

6 Zhao Q, Zhang Y, Chen Z, et al. Typical scenarios and technical requirements of China’s power grid towards 2030 for power system transformation. Engineering, 2026, 59: 16–21

7 Zhou X X, Zhao Q, Zhang Y Q. Prospect of China’s energy and power system under dual carbon goals (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 983–

989 [周孝信, 赵强, 张玉琼. “双碳”目标下我国能源电力系统发展前景. 科学通报, 2024, 69: 983–989]
8 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 (in Chinese). Proc CSEE, 2024, 44: 6707–6720 [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. 中国电机工程学报, 2024, 44: 6707–6720]
9 Zhou X X, Zhang Y Q, Chen Z W, et al. Comprehensive analysis and discussion on transition paths of China’s power system towards carbon neutrality — Part I: system modeling and path designs. CSEE J Power Energy Systems, 2025, 11: 2810–2820
10 Yang H H, Chen Z W, Gao J M, et al. Comprehensive analysis and discussion on transition paths of China’s power system towards carbon neutrality — Part II: system simulation and economic analysis. CSEE J Power Energy Systems, 2025, 11: 2821–2831
11 Zhang S, Chen W. Assessing the energy transition in China towards carbon neutrality with a probabilistic framework. Nat Commun, 2022, 13: 87
12 Yang F, Yang X, Li X F. China’s diverse energy transition pathways toward carbon neutrality by 2060. Sustainable Prod Consump, 2024, 47: 236–250
13 Shu Y B, Zhang Z L, Tang Y, et al. Fundamental issues of new-type power system construction (in Chinese). Proc CSEE, 2024, 44: 8327–8341 [舒印彪, 张正陵, 汤涌, 等. 新型电力系统构建的若干基本问题. 中国电机工程学报, 2024, 44: 8327–8341]
14 Zhou X X, Lu Z X, Liu Y M, et al. Development models and key technologies of future grid in China (in Chinese). Proc CSEE, 2014, 34: 4999–5008 [周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术. 中国电机工程学报, 2014, 34: 4999–5008]
15 National Energy Administration. Action Plan for High-Quality Development of Distribution Networks (2024–2027) (in Chinese). 2024, https://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-08/02/c_1310784260.htm [国家能源局. 配电网高质量发展行动实施方案(2024—2027年). 2024, https://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-08/02/c_1310784260.htm]
16 Ma Z, Zhou X X, Shang Y W, et al. Form and development trend of future distribution system (in Chinese). Proc CSEE, 2015, 35: 1289–1298 [马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势. 中国电机工程学报, 2015, 35: 1289–1298]
17 Rao H, Huang W H, Guo Z, et al. Grid-supporting VSC-HVDC for enhancing the stability of receiving end power grid: forms, key technologies, and prospects (in Chinese). Proc CSEE, 2024, 44: 6818–6831 [饶宏, 黄伟煌, 郭铸, 等. 提升受端电网稳定性的主动支撑型柔性直流的形态、关键技术与展望. 中国电机工程学报, 2024, 44: 6818–6831]
18 Xie Q, Liu Q W, Wu H N. Impact and challenges of extreme conditions on electrical equipment in desert, Gobi, and other arid regions (in Chinese). J Tsinghua Univ (Sci Technol), 2025, https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2026.26.005 [谢强, 刘前卫, 吴海楠. 沙戈荒极端环境对电工装备的影响和挑战. 清华大学学报(自然科学版), 2025, https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2026.26.005]
19 Di H T, Xiang W, Yang M R, et al. Parameter design method and operating characteristics analysis of hybrid AC/DC collection and DC transmission system for renewable energy of the desert, Gobi, and barren areas (in Chinese). Proc CSEE, 2025, https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250912.1134.002 [底昊天, 向往, 杨明睿, 等. 沙戈荒新能源交直流混合汇集直流外送系统参数设计方法与运行特性分析. 中国电机工程学报, 2025, https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250912.1134.002]
20 Sun Y D, Wang Q C, Xie C Z, et al. Transmission-storage collaborative planning method for the bases in the Gobi and desertification land accounting for UHVDC transmission characteristics (in Chinese). Electric Power Construct, 2025, 46: 72–84 [孙一丁, 王千辰, 谢忱峥, 等. 计及特高压直流输电特性的沙戈荒基地输-储协同规划方法. 电力建设, 2025, 46: 72–84]
21 Wang Y, Jiang C X, Song S L, et al. Transmission scheme for large-scale renewable energy bases in Gobi desert and other arid areas based on integration of source, grid, DC and storage (in Chinese). Automat Electric Power Systems, 2025, 49: 126–134 [王宇, 姜崇学, 宋胜利, 等. 基于源网直储一体化的沙戈荒大规模新能源基地外送方案. 电力系统自动化, 2025, 49: 126–134]
22 Huang L L, Xue Y, Liu Y, et al. Economic grid-connected planning of offshore DC system considering transmission capability of onshore power grid (in Chinese). Automat Electric Power Systems, 2025, 49: 56–67 [黄玲玲, 薛禹, 刘阳, 等. 计及陆上电网外送能力影响的海上直流系统经济并网规划. 电力系统自动化, 2025, 49: 56–67]
23 Tu R, Xiang W, Zheng S Y, et al. Hybrid multi-terminal HVDC integrated system for large-scale offshore wind farms based on DC bus (in Chinese). Power System Technol, 2024, https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1604 [涂睿, 向往, 郑双燕, 等. 基于直流大母线的大规模海上风电混合多端直流并网系统. 电网技术, 2024, https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1604]
24 Yu Z, Yuan Z Y, Song Q, et al. Power hub for low-frequency AC transmission for large-scale offshore wind power base (in Chinese). Automat Electric Power Systems, 2024, 48: 16–27 [余宙, 袁智勇, 宋强, 等. 面向大规模海上风电基地低频交流送出的功率集线器. 电力系统自动化, 2024, 48: 16–27]
25 Fan X J, Chi Y N, Ma S C, et al. Research and application of key technologies and technical standards for large-scale offshore wind farms connecting to power grid (in Chinese). Power System Technol, 2022, 46: 2859–2870 [樊肖杰, 迟永宁, 马士聪, 等. 大规模海上风电接入电网关键技术与技术标准的研究及应用. 电网技术, 2022, 46: 2859–2870]
26 Cai X P, Zou C Y, Peng F X, et al. Discussion on HVDC transmission technology for super-large scale offshore wind power under offshore-onshore integration (in Chinese). Power System Technol, 2024, 48: 2895–2901 [蔡希鹏, 邹常跃, 彭发喜, 等. 超大规模海上风电海陆一体直流输电技术探讨. 电网技术, 2024, 48: 2895–2901]

27 Li Z W, Zhai H B, Liu F S, et al. DC access capability evaluation for East China power grid (in Chinese). Automat Electric Power Syst, 2016, 40: 147–152 [李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 华东大受端电网直流接入能力评估. 电力系统自动化, 2016, 40: 147–152]

28 Wang X H, Ding Z W, Song K G, et al. Cascading failure in multi-infeed HVDC system considering DC coupling and generator transient characteristics (in Chinese). Automat Electric Power Systems, 2026, https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20260226.1335.008 [王晓辉, 丁则文, 宋凯歌, 等. 计及直流耦合及发电机暂态特性的多直流馈入系统连锁故障. 电力系统自动化, 2026, https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20260226.1335.008]

29 Xu S Y, He J B, Fan M J, et al. Stability and control of receiving-end power system after hierarchical connection of ±1100 kV UHVDC (in Chinese). Power System Technol, 2019, 43: 1683–1689 [徐式蕴, 贺静波, 樊明鉴, 等. ±1100 kV特高压直流分层接入后受端电网稳定特性及控制措施. 电网技术, 2019, 43: 1683–1689]

30 Li J W, Zhang G Y. Impact of large scale distributed new energy access on provincial power grid stability (in Chinese). Electric Power, 2024, 57: 174–180 [李佳蔚, 张冠宇. 大规模分布式新能源接入对省级电网稳定性影响. 中国电力, 2024, 57: 174–180]

31 Li F, Ding J, Zhou C Q, et al. Key technologies of large-scale grid-connected operation of distributed photovoltaic under new-type power system (in Chinese). Power System Technol, 2024, 48: 184–199 [栗峰, 丁杰, 周才期, 等. 新型电力系统下分布式光伏规模化并网运行关键技术探讨. 电网技术, 2024, 48: 184–199]

32 Ge L J, Fan Y H, Lai J G, et al. Artificial intelligence enabled microgrid optimization technology for low carbon economy (in Chinese). High Voltage Eng, 2023, 49: 2219–2238 [葛磊蛟, 范延赫, 来金钢, 等. 面向低碳经济的人工智能赋能微电网优化运行技术. 高电压技术, 2023, 49: 2219–2238]

33 Liu Z F, Zhang Z T. Collaborative planning of distribution network source-network-load-storage considering multi-agent game (in Chinese). Power System Technol, 2023, 47: 5046–5058 [刘自发, 张子腾. 考虑多主体博弈的配电网源网荷储协同规划. 电网技术, 2023, 47: 5046–5058]

34 Li S D, Zhou J P. Prospects for intelligent and green construction in the southern Tibetan Plateau hydropower project (in Chinese). Water Resources Power, 2026, 44: 1–9 [李世东, 周建平. 藏东南水电工程智能建造与绿色建造发展前景. 水电能源科学, 2026, 44: 1–9]

35 Shen J J, Wang Y, Cheng C T, et al. Research status and prospect of generation scheduling for hydropower-wind-solar energy complementary system (in Chinese). Proc CSEE, 2022, 42: 3871–3885 [申建建, 王月, 程春田, 等. 水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望. 中国电机工程学报, 2022, 42: 3871–3885]

36 Xiang W, Mei X B, Zhao Z, et al. Topology design of ±800 kV/10000 MW HVDC transmission for inland large-scale renewable energy bases (in Chinese). High Voltage Eng, 2024, 50: 2052–2066 [向往, 梅晓波, 赵峥, 等. 内陆清洁能源基地±800 kV/10000 MW直流外送拓扑设计. 高电压技术, 2024, 50: 2052–2066]

37 Academic Degrees Committee of the State Council of the People's Republic of China, Ministry of Education of the People's Republic of China. Subject Catalogue of Degree Conferment and Talent Cultivation (2011) (in Chinese). 2011, http://www.moe.gov.cn/srcsite/A22/moe_833/201103/t20110308_116439.htm [国务院学位委员会, 中华人民共和国教育部. 学位授予和人才培养学科目录(2011年). 2011, http://www.moe.gov.cn/srcsite/A22/moe_833/201103/t20110308_116439.html]

38 Academic Degrees Committee of the State Council of the People's Republic of China, Ministry of Education of the People's Republic of China. Graduate Education Discipline and Speciality Catalog (2022) (in Chinese). 2022, http://www.moe.gov.cn/srcsite/A22/moe_833/202209/t20220914_660828.html [国务院学位委员会, 中华人民共和国教育部. 研究生教育学科专业目录(2022年). 2022, http://www.moe.gov.cn/srcsite/A22/moe_833/202209/t20220914_660828.html]

39 General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classification and Code of Disciplines (GB/T 13745-2009) (in Chinese). 2009, https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=4C13F521FD6ECB6E5EC026FCD779986E [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2009, 学科分类与代码(GB/T 13745-2009). https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=4C13F521FD6ECB6E5EC026FCD779986E]

Summary for “场景驱动-学科支撑双重视角下新型电力系统技术创新需求”

Technological innovation requirements for new power systems from the dual perspectives of scenario-driven and discipline-supported paradigms

Qiang Zhao[1*], Yuqiong Zhang[1], Xiaoxin Zhou[1] & Xiang Zhou[2]

[1] *China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China*
[2] *State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China*
* Corresponding author, E-mail: rick97@sohu.com

Under the strategic background of China’s energy transition and technological self-reliance, the innovation system of new power systems urgently requires forward-looking and systematic top-level design. Traditional technology-driven innovation paradigms, which advance by inertia or are driven by current problems, are prone to path dependence and may fail to address the fundamental challenges of the energy transition. To overcome this limitation, this paper proposes a “scenario-driven and discipline-supported” dual-perspective analytical framework to systematically explore the technological innovation requirements for new power systems. This framework takes future typical scenarios as the core orientation, deducing technology needs from scenario characteristics, while leveraging the disciplinary system as foundational support to provide a logical basis for technology field subdivision and multi-disciplinary collaborative research.

Based on the evolution trends of China’s power source composition during 2020–2060, which show that wind and solar power will become the dominant electricity source by around 2040, this study collects and analyzes 178 future power grid development scenarios from 27 provincial power companies across six regional power grids in China. Through keyword frequency analysis and feature clustering, the main characteristics and key scenarios of each region are summarized. Further considering national major strategies and significant projects, five typical development scenarios are proposed: large-scale wind-PV base transmission in desert and Gobi areas, facing challenges of weak sending-end grids and extreme environments; large-scale offshore wind power base transmission in deep-sea areas, confronting difficulties in long-distance transmission and marine environment adaptability; UHVDC cross-regional power receiving in load centers, dealing with multi-infeed DC system stability and voltage support; high-proportion distributed new energy accommodation and utilization, tackling issues of bidirectional power flow and power quality in active distribution networks; and large-scale hydropower base transmission in Southwest China, addressing the coordination of hydropower seasonal variation and renewable energy fluctuation. These five scenarios demonstrate broad cross-regional relevance, collectively covering the core challenges of China’s regional power systems.

Driven by these five typical scenarios, the core challenges faced by each scenario are systematically analyzed, and 37 key technological requirements are identified. These include new energy resource simulation and power forecasting, multi-energy complementary coordinated planning and operation control, stable operation control of high-proportion renewable energy sending-end grids, UHV/flexible DC transmission equipment and system integration, high-safety long-life energy storage equipment, transmission line construction in extreme environments, deep-sea wind power platform reliability, multi-infeed DC system stability control, active distribution network planning, microgrid autonomous control, distributed resource aggregation, artificial intelligence applications in power systems, advanced sensing and measurement, cybersecurity protection, materials suitable for extreme environments, and power semiconductor devices. These technological requirements are further categorized into eight technology fields: source-grid coordinated development, large power grid planning and operation, distribution network and electricity consumption, equipment performance enhancement, material and device support, construction and disaster prevention, digital and intelligent empowerment, and policy and techno-economics. These fields collectively constitute a comprehensive innovation system providing full-element support for new power system construction.

Based on the national standard Classification and Code of Disciplines (GB/T 13745-2009), the disciplinary foundations supporting the 37 technological requirements are systematically analyzed at the secondary discipline level. The results show that 51 secondary disciplines provide underlying support, with extensive cross-disciplinary relationships. Electrical engineering is the most widely involved discipline. Control science & technology and energy system engineering also provide support for a significant number of technologies. The “scenario-driven and discipline-supported” framework provides methodological support for the top-level design of the technological innovation system for new power systems and offers decision-making references for the layout of power technology research and the allocation of innovation resources.

new power system, scenario-driven, discipline support, technological innovation requirements, typical scenarios

doi: 10.1360/CSB-2026-0327