

“双碳”与“新基建”背景下特高压 输电技术的发展机遇

周远翔, 陈健宁, 张 灵, 张云霄, 滕陈源, 黄 欣

(清华大学电机工程与应用电子技术系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 随着“新基建”概念的提出与完善, 以 5G 通信、特高压、城际交通、新能源汽车充电桩、大数据中心、人工智能、工业物联网七大领域为核心的新型基础设施建设方向基本确定。文中通过阐述“新基建”的现状与趋势, 结合中国“碳达峰、碳中和”政策的推行, 考虑中国资源、人口分布不均的国情与特高压输电技术的优缺点, 对“新基建”下特高压输电技术的发展机遇进行探讨。分析结果表明, 中国能源与经济总量位列世界前茅, 但人均 GDP 与人均能源消耗量与发达国家相比仍有一定差距, 且二氧化碳排放量全球第一, 面临经济发展和环境保护的双重压力。一方面, 以 5G 通信、人工智能为新经济增长点的“新基建”将为中国带来可观的能源建设需求, 大容量、远距离的特高压输电技术在中国“西电东送”能源战略中将发挥关键性作用, 为“新基建”提供可靠的能源保障, 为“碳达峰、碳中和”提供灵活的清洁能源消纳调配。另一方面, “新基建”中以 5G 通信、人工智能、工业物联网为代表的新技术将促进特高压输电技术的发展与应用。在“新基建”背景下, 特高压输电技术面临新的能源与环保需求, 将有力带动电力行业、国家经济的发展, 为实现“碳达峰、碳中和”提供有效的解决方案。

关键词: 新基建; 特高压输电; 碳达峰; 碳中和; 5G 通信; 人工智能

Opportunity for Developing Ultra High Voltage Transmission Technology Under the Emission Peak, Carbon Neutrality and New Infrastructure

ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, ZHANG Yunxiao, TENG Chenyuan, HUANG Xin

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the development of ‘the new infrastructure’ in China, the infrastructure construction including 5G communication, ultra-high voltage transmission, intercity transportation, charging piles for new energy vehicles, big data center, artificial intelligence and industrial internet of things have been confirmed. By demonstrating the present situation and the tendency of ‘new infrastructure’, considering the unbalanced distribution of resources and the population in our country, in combination with the advantages of ultra-high voltage transmission technology and the implementation of ‘emission peak, carbon neutrality’ in China, the opportunity and prospects of ultra-high voltage transmission technology under the ‘new infrastructure’ are presented. The results show that, though energy consumption and GDP (Gross Domestic Product) rank top in the world, the GDP per capita and energy consumption per capita in China are much lower compared with the developed countries. Given that the CO₂ emission ranks first in the world, China faces the dual pressure of economic development and environmental protection. On the one hand, as new economic growth points, the ‘new infrastructure’ with 5G communication and artificial intelligence will bring considerable energy construction demands for China. The ultra-high voltage transmission technology will play an important role in China’s ‘West-east power transmission’ energy strategy, providing energy security for the ‘new infrastructure’, flexible consumption and deployment of renewable energy for ‘emission peak, carbon neutrality’. On the other hand, the new technologies including 5G communication, artificial intelligence and industrial internet of things in the ‘new infrastructure’ will promote the ultra-high voltage transmission technology. With the development of ‘new infrastructure’, ultra-high voltage transmission technology faces new energy construction and environment protection demands, promotes the development of the electrical industry and national economy in China, and provides an effective solution for achieving the goal of ‘emission peak, carbon neutrality’.

Key words: new infrastructure; ultra high voltage transmission technology; emission peak; carbon neutrality; 5G; artificial intelligence

0 引言

2016 年全球 178 个缔约方共同签署《巴黎协定》, 形成了 2020 年后的全球气候治理格局。2020 年 9 月 22 日, 中国在第 75 届联合国大会一般性辩论上提出将采取更有力的政策和措施参与全球环境治理, CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和, “碳达峰、碳中和”也在 2021 年全国两会期间被首次写入中国政府工作报告^[1]。“双碳”目标一方面为中国产业结构升级、低碳能源推广指明前进道路, 另一方面展示了中国负责任大国的担当, 体现了中国积极参与全球气候治理的决心。

“新基建”作为中国经济发展新阶段下的基础设施建设战略, 可大力推动新型冠状病毒疫情后的国民经济复苏, 并为实现“碳达峰、碳中和”提供绿色、智慧的能源互联网解决方案。“新基建”概念已在多次会议中被党中央所提及, 社会上关于“新基建”的讨论亦逐渐增多, 各地方政府也纷纷出台大规模“新基建”计划。一方面, 受国内新型冠状病毒疫情对经济的影响, 中国急需扩大投资以复苏经济^[2]; 另一方面, 当今国际形势复杂多变, 世界发展经历重大变局, 中国科技革命与企业变革正持续深化。中国面临经济发展与环境保护的双重压力, 进一步促使高新环保技术与基础设施建设的深度融合, “新基建”蓄势待发。

2020 年 3 月 1 日, 中央电视台中文国际频道“新基建”专题提出 5G、特高压、城际高速铁路和城际轨道交通、新能源汽车充电桩、大数据中心、人工智能、工业互联网七大“新基建”领域, 除数字基础设施外, 还包括其他新科技发展所推动的新能源、新材料等^[3]。随后, 国家电网有限公司在 2020 年 6 月 15 日举行的“数字新基建”重点建设任务发布会暨云签约仪式上, 和国家能源安全的特大型国有重点骨干企业签署战略合作协议, 表明对“新基建”的高度重视, 并表示今年 4 月份国家电网公司已将年度投资计划由 4 186 亿元调增至 4 600 亿元, 重点向特高压、新能源汽车充电桩和“数字新基建”等领域倾斜, 以实际行动服务党和国家工作大局^[4]。

由此可见, “新基建”不仅是数字基础设施建设, 还包括以特高压为代表的新能源、新材料等新型国家基础行业建设。中国特高压输电技术作为世界领先技术, 将在此次“新基建”中得以进一步发展与

推广, 特高压输电技术面临极大的发展机遇。一方面, 随着数字基础建设的大规模发展, 5G 通讯基站、数据中心、云计算中心等设备将产生大量能耗, 特高压输电作为中国能源跨区调配的主干道, 将为中国数字基础设施的大量建设与应用提供能源保障。另一方面, 以 5G 通讯技术、人工智能技术、工业互联网为代表的新型数字技术以及新型材料技术将为特高压输电技术注入新血液。最终, 包含特高压输电技术在内的“新基建”将大力推动我国经济的大力发展, 并助力达成“碳中和、碳达峰”的环境保护和能源结构升级目标。

1 新基建

1.1 新基建的发展现状

“新基建”内涵的发展如表 1 所示^[3]。2018 年中央经济工作会议提出“加快 5G 商用步伐, 加强人工智能、工业互联网、物联网等新型基础设施建设”, “新型基础设施建设”被首次提出, 此后, 中央相关会议多次使用了这一名词, 并随着时代的发展为之赋予具体的含义。2019 年, 在全国“两会”、国务院常务会议、中共中央政治局会议等, 中央均多次提出大力推进“新基建”。2020 年, 中国经历了经济结构转型、国内新冠疫情、国际中美贸易战、台中对峙形势紧张等, 经济下行压力大, “新基建”更是在国务院常务会议、中央全面深化改革委员会会议、中共中央政治局常务委员会会议等会议中再度多次被中央所提及。2020 年 3 月 1 日, 中央电视台中文国际频道提出了“新基建”的“七大领域”和“三大方面”, 构筑了“新基建”的宏观愿景, 如图 1 所示。

表 1 所示的新型基础设施的“新”主要体现在技术的先进性。当前全球范围内的新一轮科技革命核心驱动力是新一代信息技术与数字技术, 新型基础设施建设可理解为基于新技术的、围绕国家经济、国家安全、社会服务、居民生活等方面开展的基础设施建设。在国家“十四五”计划中, 新型基础设施建设将进行全面规划与发展。

1.2 新基建的能源建设需求

随着新型基础设施建设的大力发展, 5G 基站、数据中心、边缘计算服务器、智慧终端等数字技术设备及电动汽车充电站等电力电子设备将消耗巨大的能源^[5]。

1) 5G 通信基站

无线通信基站是连接移动终端与移动网络运营商固定线路的连接点，所有无线移动终端必须计入通信基站进而获取移动通信服务。目前无线基站主要分为 4 类，分别为宏基站、微基站、皮基站和飞基站，其基站能耗功率与覆盖范围如表 2 所示^[6]。

无线通信技术从 1G 到 5G，使用的频段越来越高，信号传输带宽越来越大，可大幅提高信息传输速率。然而，通信频段的提高使得信号的传输距离逐步缩短，无线基站的覆盖面积大幅减小，需要部署密度更大的基站保证无线通信服务的稳定性。目前广泛使用的 4G 通信基站在城区的覆盖半径大概为 1 000~3 000 m，5G 基站覆盖面积大约为 300~450 m，5G 宏基站数量约为 4G 宏基站数量的 2 倍以上才能覆盖 4G 通信的范围。

在单座通信基站中，能耗主要产生于主设备(45%)与空调系统(40%)，目前主要运营的 5G 基站主设备空载功耗约为 2.2 kW，满载功耗约为 3.7 kW，单站满载功耗约为 8.2 kW，远大于 4G 单座基站的 2 kW^[7]。据工信部 2019 年通信业统计公报数据显示^[8]，目前全国共有约 544 万座 4G 基站，至 2025 年，预计 5G 基站数目将达到 1000 万座，按照单座功率 6 kW 计算，新增电力能耗约为 60 GW。

2) 数据中心

数据中心用于数据进行集中存储与批量处理，可为新一代人工智能与大数据挖掘技术提供数据服务。数据中心主要由计算机主设备和制冷系统组成，能耗密度高，全球大型数据中心的电力能耗超过 100 MW。据统计，2020 年中国数据中心约有 357 万个标准机架在运行，需要的电力容量约为 28 GW，至 2025 年，标准机架总数将达到 1 325 万个，总电力容量约为 106 GW^[5]。

3) 边缘计算服务器

边缘计算将数据处理服务从云计算平台向用户侧迁移，降低数据交互时延，降低网络流量，为用户提供低时延、高稳定的计算服务。随着人工智能与工业互联网的快速发展，目前形成了“云计算+边缘计算”的数据处理模式，实现计算与网络资源的优化配置。据估算，2025 年边缘计算服务器总新增电力容量需求约为 39 GW^[5]。

4) 移动终端设备

在“万物皆可智慧互联”的时代，越来越多的具备计算、数据存数、智能互联的移动设备投入使

表 1 “新基建”内涵的发展

Table 1 Development of The New Infrastructure

时间	会议/场合	内容
2018-12-19	中央经济工作会议	把 5G、人工智能、工业互联网、物联网定义为“新型基础设施建设”
2019-07-30	中共中央政治局会议	提出“加快推进信息网络等新型基础设施建设”
2020-03-01	中央电视台中文国际频道	提出 5G、特高压、城际高速铁路和城际轨道交通、新能源汽车充电桩、大数据中心、人工智能、工业互联网七大“新基建”领域
2020-03-04	中共中央政治局常务委员会会议	强调“要加大公共卫生服务、应急物资保障领域投入，加快 5G 网络、数据中心等新型基础设施建设进度”
2020-04-20	发改委解读	“新基建”包括信息基础设施、融合基础设施和创新基础设施三方面

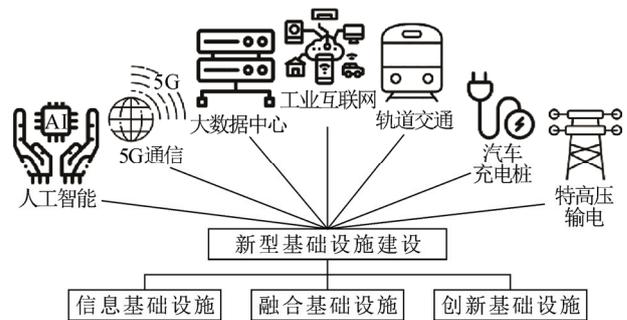


图 1 新型基础设施建设的“七大领域”和“三大方面”

Fig.1 The seven fields and three aspects of The New Infrastructure

表 2 不同类别的无线基站功率

Table 2 Power of various wireless base station

基站类型	单载波发射功率	覆盖半径
宏基站	10 W 以上	200 m 以上
微基站	500 mW~10 W	50~200 m
皮基站	100 mW~500 mW	20~50 m
飞基站	100 mW 以下	10~20 m

用，在今后 5 年，约有 25 亿个新的移动终端设备接入电网，包括电视、电脑、手机及大量智慧家居设备、智慧城市服务设备等等，约新增电力容量 17 GW^[5]。

5) 新能源汽车充电桩

随着新能源汽车的大力发展，近年来电动汽车充电桩等电力设备已大量投入使用，截至 2020 年 6 月底，全国各类充电桩保有量达 132.2 万个^[9]，预计 2025 年将新增 150 万个，按照单台充电桩功率 5 kW 进行估算，预计 2025 年电动汽车充电桩消耗的

峰值功率将新增 7.5 GW。

如表 3 所示, 随着新型基础设施建设的大力开展, 2025 年中国电力能耗容量需求预计新增约 201 GW。一方面, 以上负荷容量基于线性增长估计, 若未来 5 年内新型基础设施进入指数爆发式增长, 其负荷容量将大大超出预期; 另一方面, 200 GW 约为目前中国总装机容量的 10%, 然而中国人口分布与能源分布极不协调, 因此新型基础设施建设将对中国的能源输送提出更高需求, 具有大容量、长距离输电优势的超高压输电技术将在“新基建”中发挥至关重要的作用。

1.3 新基建七大领域的相互关系

新型基础设施建设主要包括 5G 通信、超高压输电、城际高速铁路和城际轨道交通、新能源汽车充电桩、大数据中心、人工智能、工业互联网七大领域, 其中, 超高压输电与新能源汽车充电桩为能源基础建设, 城际高速铁路和城际轨道交通为交通基础建设, 5G 通信、大数据中心、人工智能、工业互联网等领域为数字基础建设, 其相互关系如图 2 所示。

在新型基础设施建设中, 以 5G 通信、大数据中心、人工智能、工业互联网为主的数字基础建设是国民经济发展的直接推动力, 并为能源领域及交通领域的建设提供新技术, 提高企业能效; 以城际高速铁路和城际轨道交通为主的交通建设属于传统基础设施建设行业, 在数字技术的加持下将进一步拉动中国国民经济的积极发展; 以超高压输电与新能源充电桩为主的能源领域基础建设将与其他领域建设提供绿色清洁能源支撑, 其中超高压输电将作为“新基建”的心脏, 为其他六大领域提供源源不断的新鲜血液。

2 超高压输电技术

2.1 远距离大容量输电的必要性

目前, 中国已成为世界上发电装机容量第一的国家。1996 年, 中国发电量超过日本, 达到世界第二, 2008 年, 中国发电量超过欧盟各国之和, 2009 年超过英法德意日加六国总和, 2012 年超越美国, 成为世界上发电量最大的国家, 2018 年中国总发电量已高达 7.11 万亿 kWh。随着中国发电装机容量及电网投资水平的大幅提升, 困扰中国经济 40 年的“缺电”问题逐渐放缓, 2009 年以后真正实现不缺电。

2018 年各国经济、能源消耗、碳排放情况如

表 3 “新基建”带来的新增能耗容量

Table 3 New load power by The New Infrastructure

能耗设备	2025 年预计新增能耗容量/GW
5G 通信基站	60
数据中心	78
边缘计算服务器	39
移动终端设备	17
电动汽车充电桩	7
总计	201

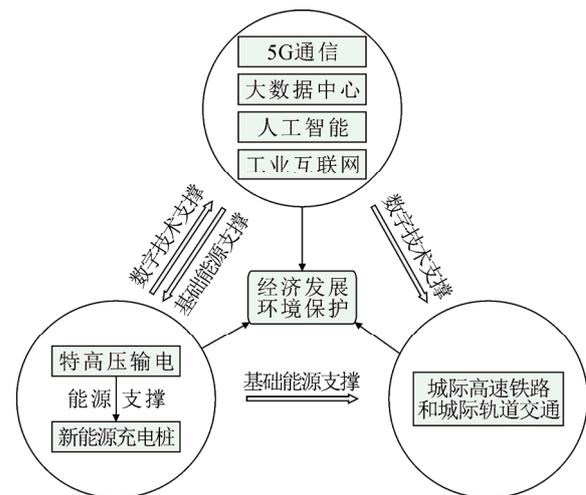


图 2 “新基建”七大领域关系示意图

Fig.2 Relationship among seven fields in The New Infrastructure

表 4 所示, 虽然中国经济总量、发电总量及能源消费总量均在世界前列, 然而, 人均国内生产总值 (gross domestic product, GDP)、人均能源消费量距离其他发达国家仍有很大差距, 中国电力与经济仍有待进一步发展^[10-12]。而且, 随着全球气候变暖, 作为全球 CO₂ 最大排放国, 中国能源建设面临的环保压力逐渐增大, 二氧化碳减排成为新的问题, 中国面临能源环境与经济发展的双重压力。2014 年中央提出能源革命的战略思想, 为中国未来能源的发展提出纲领性目标。十九大进一步明确了中国能源革命和转型的核心目标是构建清洁低碳、安全高效的新一代能源体系。2021 年全国两会期间被首次写入政府工作报告的“碳达峰、碳中和”提出“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”。因此必须大幅度提升发电用煤在煤炭消费中的比重、大幅度提升清洁可再生能源发电在总发电量中的比重, 大幅度提升电能终端能源消费中的比重。

中国 2030 年全社会用电量和负荷的发展趋势如图 3 所示。目前, 中国也是世界上总用电量最大

表 4 各国经济、能源消耗、碳排放量对比(2018)

Table 4 Economy, energy consumption and CO₂ emission of different country

国家	GDP/万亿美元	人均 GDP/美元	发电量(TW·h)	能源消费量/百万吨油当量	能源人均消费量/GJ	CO ₂ 排放总量/百万吨
美国	20.61	63 056	4 460.8	2 300.6	294.8	4921.1
中国	13.84	9 920	7 111.8	3 273.5	96.9	9 528.2
日本	4.95	39 150	1 051.6	454.1	149.5	1 080.7
德国	3.97	47 832	648.7	323.9	164.8	696.1
英国	2.86	43 114	333.9	192.3	120.9	352.4
法国	2.79	43 083	574.2	242.6	155.7	303.5
印度	2.71	2 006	1 561.1	809.2	25.0	2 307.8
意大利	2.09	34 500	290.6	154.5	109.1	317.1

数据来源: 国际货币基金组织世界经济展望数据库、BP 世界能源统计年鉴、国际能源署二氧化碳排放统计数据

的国家, 2018 年中国用电量高达 71 508 亿 kWh, 人均用电量为 4 290 kWh。从人均碳排放量与用电量看, 结合新型基础设施建设的全面开展, 今后若干年电力工业仍有较大的发展空间, 发展趋势基本不变, 预计到 2030 年中国全社会用电量将达到 10.4 万亿 kWh, 最大负荷达到 1 720 GW。

综上所述, 中国发电、用电规模及环境保护压力均为世界最大。然而, 中国大多数人口集中在东部地区, 而煤炭存储主要分布在中国西北地区, 水力资源主要分布在西部地区及长江中上游、黄河上游、西南雅砻江、金沙江、澜沧江、雅鲁藏布江等, 光电资源主要分布在西北地区, 因此, 中国电力能源消耗与传统化石能源、可再生能源供应中心分离, 大容量、长距离的能源输送方式不可或缺。

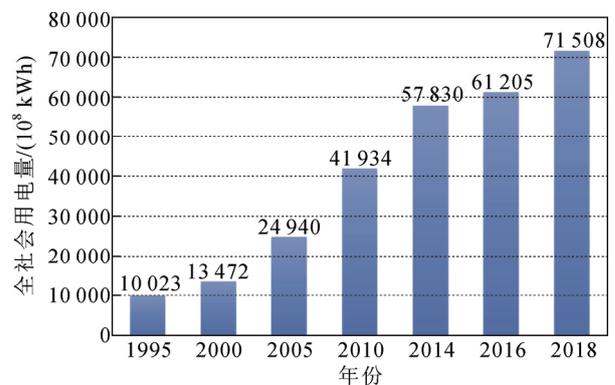
2.2 特高压输电的优点

在交流架空输电技术中, 输电线路的自然功率与输电电压的平方成正比^[13], 提高输电电压可有效地提高单回输电线路的输送容量, 如图 4 所示。

随着电压等级的提高, 交流输电系统单位公里的造价也急剧增加, 电力系统的稳定运行问题也逐渐显露, 因此超、特高压直流输电技术得以快速发展。在直流架空输电线路中, 单回线路的输送功率与输电电压及输电电流的乘积成正比, 常用的超特高压直流输电电压等级、额定电流及输送容量如表 5 所示^[13]。

相比于常规高压输电与超高压输电技术, 特高压输电技术具有以下优点:

1) 输送容量大。1 000 kV 特高压输电线路的自然功率接近 5 000 MW, 约为 500 kV 输电线路的 5 倍; ±800 kV 直流特高压输电能力达 6 400 MW, 是 ±500 kV 高压直流的 2.1 倍。



数据来源: 国家统计局统计年鉴

图 3 中国全社会用电量

Fig.3 Total electricity consumption in China

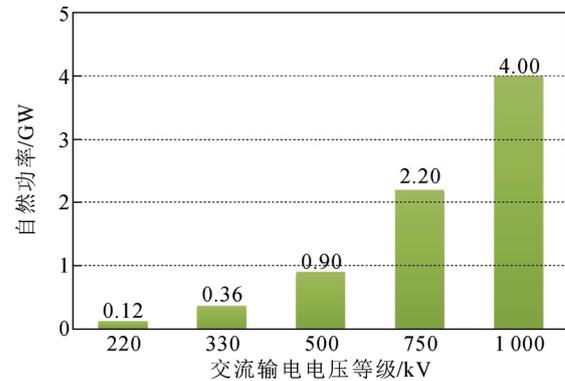


图 4 不同交流输电电压等级的线路输电能力

Fig.4 Power transmission capacity under different AC voltage grade

表 5 不同直流输电电压等级的线路输电能力

Table 5 Power transmission capacity under different DC voltage grade

	voltage grade			
电压/kV	±500	±660	±800	±1100
电流/kA	1~3	2.1~4	3~5	4~5
双极容量/GW	1~3	2.5~4.8	4.8~8	8.8~11

2) 送电距离远。在输送相同功率的情况下, 1 000 kV 特高压输电线路的最远送电距离约为 500 kV 线路的 4 倍; 采用 ± 800 kV 直流输电技术使超远距离的送电成为可能, 经济输电距离可以达到 2500 km 及以上。

3) 线路损耗低。在导线总截面、输送容量均相同时, 1 000 kV 交流线路电阻损耗是 500 kV 的 25%, ± 800 kV 直流线路的电阻损耗是 ± 500 kV 的 39%。特高压输电大幅度降低了输电线路损耗, 具有明显的节约电能、提高输电效率的作用。

4) 走廊占地省。交流特高压线路走廊宽度为 81 m, 单位走廊输送能力为 62 MW/m, 约为 500 kV 线路的 3 倍。 ± 800 kV、6 400 MW 直流输电线路的走廊宽度约 76 m, 单位走廊宽度输送容量为 84 MW/m, 是 ± 500 kV、3000 MW 的 1.29 倍。特高压线路大幅度提高了单位走廊的输电能力, 节省线路占地面积和国土资源, 这在当前中国国土资源紧张的情况下, 具有重大的意义。

5) 跨区能源灵活调配与消纳。特高压交流输电适用于远距离、大容量电能传输, 同时还能构建网络, 实现跨区电力的灵活调配与消纳; 特高压直流输电可实现超远距离、超大容量的“点对点”电能传输, 超远距离的能源跨区调配与消纳。

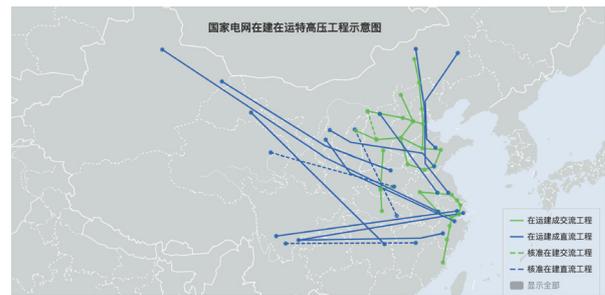
6) 清洁能源消纳。煤炭及风光水等可再生能源分布在中国西部, 特高压、大容量、远距离输电可实现清洁能源的有效消纳, 解决西部新能源消纳难题和东部环境压力, 缓解输煤带来的交通运输压力, 助力“碳达峰、碳中和”。

如图 5 所示, 中国已建成了 13 交 14 直特高压输电工程, 其中国家电网建成 13 交 11 直特高压输电工程, 南方电网建成 3 回特高压直流输电工程。在新型基础设施建设的背景下, 中国电力依旧按照“西电东送”战略进行长距离、大容量输送, 包括煤电、风光水电等大量清洁能源将通过特高压交直流输电网络进行跨省运输, 解决未来数十年中国人口、资源分布不均的能源战略问题。

3 新基建下的特高压输电技术发展机遇

3.1 新基建需要特高压

随着新型基础设施建设的全面部署与开展, 以 5G 通信、大数据中心、边缘计算服务器、移动终端为代表的数字化设备以及新能源汽车充电桩、轨道交通为代表的电气电子设备数量将大幅提升, 2025



数据来源: 国家电网官方网站 2021 年特高压建设公开数据

图 5 国家电网在运特高压工程示意图

Fig.5 Operating ultra-high voltage engineering by State Grid in China

年预计产生超过 200 GW 的负荷容量, 对中国电力系统的运行可靠性提出极大的挑战。考虑中国人口与能源分布不均、分布式可再生能源规模有待进一步发展等国情, 大容量、远距离的特高压输电技术成为中国新型基础设施建设的必要保障。

3.1.1 发挥特高压在电网中的主干骨架作用

特高压输电的大规模能源互联与跨区电能调配能力可作为新能源输送与消纳的“高速公路”, 为“新基建”提供能源保障, 促进国民经济又好又快发展, 保障“碳中和、碳达峰”能源建设与环境保护目标的实现。坚持“西电东送”的能源战略, 结合能源消耗地的能源消耗现状与未来城市规划, 充分调研与论证特高压输电工程的经济性与必要性, 有效发挥现有特高压输电工程与在建、规划中的特高压输电工程在中国电网中的主干骨架作用, 为中国高效开展新型基础设施建设保驾护航。

3.1.2 开展气体绝缘管道输电的探究与应用

架空输电线路是中国电力能源的主要输送方式, 其建设成本相对低廉、线路维护较为简单, 目前已在技术上实现了大容量、远距离的特高压输电, 并在中国的特高压输电工程中处于主导地位^[14-16]。然而架空输电线路在实际工程中也存在诸多问题。一方面, 架空线路设备裸露在大气中, 受自然污秽、气象灾害的影响较为严重, 使得部分地区的架空输电线路难以正常开展运维^[17-21]。另一方面, 架空输电线路的建设受特殊地形、地质和环境的影响较大, 在高海拔地区难以进行大容量电能传输, 在滑坡土质上杆塔结构需要进行特殊设计, 且无法穿过自然保护区等^[22-23]。另外, 架空输电线路无法应用于跨海输电, 且考虑输电走廊、输电景观、电磁影响及用电安全等问题, 城市电网不宜采用架空线路

进行输电^[24-26]。因此大容量电缆输电与气体绝缘管道输电技术(gas-insulated transmission lines, GIL)开始在超特高压输电工程中进行应用^[27-28]。

比起普通电线电缆, GIL 具有传输容量大、电能损耗小、不受环境影响、运行可靠性高、节省占地等显著优点^[29-30]。2019年9月26日, 苏通1000 kV 特高压气体绝缘输电管道投入运行, 隧道长达5468.5 m, 连接苏州与南通两地, 输送容量高达2000万kW, 它是目前电压等级最高输送容量最大、技术水平最高的GIL输电工程^[31]。

在新型基础设施建设大力发展的同时, 必须有效发挥特高压输电技术在“西电东送”中的主干骨架作用, 并进一步研究、论证GIL等新型特高压输电技术的可靠性、经济性与工程必要性, 按需设计、规划未来电网, 为“新基建”背景下的技术革命、产业转型注入能量, 为国民经济的发展提供绿色可持续的能源保障。

3.2 新基建助力特高压

如图6所示, 在“新基建”背景下, 特高压输电技术作为中国“西电东送”能源战略的关键技术, 为新型基础设施建设、国民经济增长提供可持续发展的动力, 同时, 新型基础设施建设也将反哺特高压输电技术的发展, 为特高压输电技术注入新血液, 提高特高压输电的运行质效, 降低运维检修成本, 为特高压输电注入新的内涵。

3.2.1 特高压设备生产全过程数字化管理

工业互联网是七大新型基础设施建设内容之一, 是中国制造智能化、信息化的重要手段, 是中国制造业产业升级的推动力, 加速“中国制造”向“中国智造”的产业转型, 最终提高中国的制造业水平, 提高制造企业的经济效益, 进而推动中国经济的高质量发展。

在特高压输电工程中, 关键设备主要为特高压换流变压器、大容量换流阀、大容量直流断路器等, 此类设备内部结构复杂、制造成本极高, 提高特高压关键设备的制造、管理水平, 对原料采购、部件安装、出厂检测、售后跟踪等生产全环节进行信息化建模与监管, 可有效降低特高压设备制造企业的生产成本, 提高企业产能, 助力中国特高压工程又好又快发展^[32-33]。

3.2.2 高可靠性智能传感技术应用

5G通信与人工智能是本次新型基础设施建设

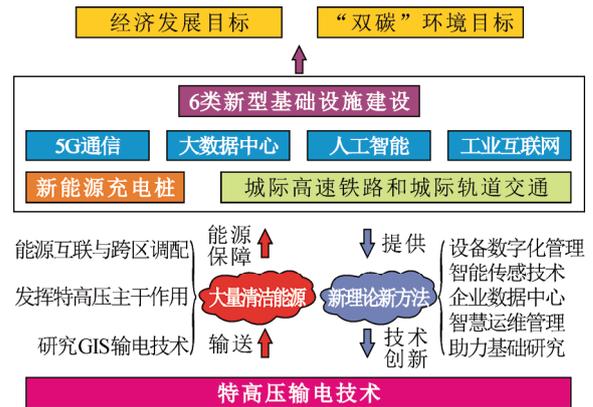


图6 “新基建”下特高压输电技术的发展机遇

Fig.6 Opportunity for ultra-high voltage transmission technology under The New Infrastructure

的主要内容, 是“新基建”的“新”之所在。5G通信技术可用于特高压电力设备的状态信息高速低功耗广域传输, 实现特高压电力设备的实时感知; 人工智能与大数据挖掘技术可用于特高压电力设备的状态评价与运维决策、电力系统的故障诊断与运行优化等, 为特高压输电设备管理与电网运行提供新方法。自智能电网概念提出以来, 中国各省市电网输变电系统均先后配置了各种各样的电力设备多状态量传感器, 然而受限于传感器本身的测量精度与可靠性, 电力系统运维人员容易对电力设备的隐患、缺陷、故障分析等进行误判、漏判。只有在准确且稳定地获取特高压电力设备物理量的前提下, 后续对信号的无线传输及状态数据的数据挖掘才有意义。

1) 换流变压器。目前换流变压器中采用的感知手段主要包括油中气相色谱^[34]、局部放电识别与定位^[35]、绕组光纤测温^[36-37]、铁芯振动^[38]等, 能较好地对变压器内部存在的隐患、缺陷进行感知。然而, 目前超特高压换流变压器中使用的套管设备市场几乎被国外垄断, 由于套管故障导致的换流变压器事故也曾发生, 一方面中国需攻克换流变套管的制造技术, 另一方面需要加强对换流变套管的全方位状态感知, 包括对电流、局放等电气量与气体、温度、压力等非电气量进行高精度与高稳定性测量^[39-41]。

2) 输电线路。特高压输电线路的传统在线监测系统主要包括雷电在线测量系统、输电线路环境监测系统、导线微风振动检测系统及输电线路视频监控等, 在线监测技术较为成熟^[42]。然而随着无人机技术的广泛应用, 架空输电线路及电缆隧道的带电巡视技术也得到新的发展, 传统低效的人工巡视

逐渐被高效的无人机巡视所取代^[43]。架空输电线路无人机巡检系统进行作业时, 主要由地面操作人员根据视觉与回传图像进行无人机飞行与拍摄, 因此近年来无人机自主巡检开始被广泛研究并进行试点应用, 但目前无人机自主巡检技术仍处于起步阶段, 主要基于巡检影像对绝缘子、输电杆塔、输电导线、架空地线、金具及其他附属设施等进行缺陷识别与标记, 然而目前识别准确率较低, 仍需大量人工干预^[44-46]。

3) 直流断路器。特高压直流断路器是特高压直流输电系统中的关键开关设备, 起系统保护与控制作用, 目前对于断路器的状态感知主要集中在断路器的机械状态上, 主要通过选取合适量程与灵敏度的加速度传感器获取断路器的振动信号, 研究断路器的振动信号特征与诊断方法^[47-48]。

目前, 仍有更多新型传感技术被深入研究与开发, 包括电光式一体化电场传感器^[49], 基于太赫兹波、红外热成像等的绝缘缺陷可视化传感技术^[50-51], 基于磁光效应的电流传感器等^[52]。可以预见, 未来电网设备的状态感知与测量技术将会向自取能、高精度、高可靠性、非侵入式智能测量发展, 进一步提高特高压电力设备的状态感知水平, 最终提升特高压输电系统的运行可靠性与运维经济性, 有效保障国民经济生产的正常开展。

3.2.3 数据中心建设

“新基建”中, 人工智能与数据挖掘技术的引入使得数据成为一种可增值资源。以深度学习为代表的人工智能以数据驱动代替模型驱动应用于各种聚类、分类、回归、预测等任务, 为图像处理、文本提取、语音识别等领域注入新动能, 各行业多年以来沉淀的各类数据已成为科学研究、商业盈利的优质资源, 如何高效地收集、存储、管理、应用工业数据, 是“新基建”背景下的必修课程^[53]。

随着“新基建”中电力行业的工业互联网持续推进, 特高压电力设备从设备生产、采购、安装、投运、检修、退役等全生命周期的状态信息均能被全面感知, 在此过程将产生海量设备台账数据、在线监测数据、定期巡视数据、带电检测数据、故障检修数据等多源异构数据。目前各省市电网运行相对独立, 相互之间存在数据壁垒, 而特高压输变电设备数量相对较少, 且设备故障率低, 设备隐患、缺陷、故障数据较少, 且各省市电网数据平台数据模型各不相同, 可供人工智能算法进行数据挖掘的

负样本少之又少, 正负样本的失衡使得数据驱动的人工智能模型学习效果大幅下降。

因此, 未来电网必须制定统一数据模型, 建立共享型、开放型的数据中心, 一方面为企业内部进行设备状态评估与运维检修决策提供数据基础, 进而提高特高压输电系统的运行可靠性、运维经济性; 另一方面可将数据进行脱敏处理后, 投放数据集市或开源平台, 将数据作为企业增值业务, 同时促进人工智能与大数据挖掘技术在电力行业的应用。

3.2.4 智慧运维管理

中国在电力设备运维检修策略可分为 3 个阶段: 故障检修、定期检修和状态检修^[54]。故障检修是在电网设备故障后, 通过故障定位对故障后的设备进行维护或更换, 属于被动式维修。定期检修是根据运行经验总结出的设备故障率发展规律, 以一定的检修周期对设备进行检修维护, 属于预防性检修, 目前依然是中国电力系统设备检修的主要方法。状态检修即根据设备运行状态感知信息, 在设备存在发生故障隐患前安排运维检修。随着传感技术与人工智能技术的快速发展, 目前中国电力系统的运维检修制度逐渐向状态检修过渡。

1) 数字孪生系统^[55]。数字孪生(digital twin, DT)是一个集成多学科、多物理量、多时空尺度、多概率的仿真过程^[56], 利用“新基建”中大力发展的 5G 通信、云计算、大数据与人工智能技术, 在数字空间定义虚拟实体, 建立与现实世界的物理实体映射。相对于信息物理系统(cyber-physical system, CPS), 电力数字孪生系统更偏向数据驱动的实时态势感知和超实时虚拟推演, 进而辅助特高压电网运行调控与决策制定^[57-62]。

2) 差异化运维决策。结合“新基建”范畴中的数据中心建设、人工智能技术及新型传感技术, 可实现特高压电力设备的综合状态感知与设备状态评价, 结合设备台账、运维检修记录等静态数据及在线监测等动态数据, 通过同类故障研判、运行状态推演等方法实现特高压电力设备的风险评价与聚类, 充分考虑特高压电力设备与输电系统的运行可靠性与经济性对各类别、各区域、各运行状态下的特高压电力设备安排差异化运维检修^[63-67]。

3) 机器人巡检。随着工业机器人制造技术的飞速发展, 架空线路无人机巡检、管廊隧道机器人巡检已逐步代替人工巡检投入工程应用。目前机器人巡检包括巡检定位、图像采集、路线优化、自动

充电等^[68-69]。在特高压输电工程的线路运维中, 可结合边缘计算与机器人技术, 实现“自主巡视-智能诊断-消缺报告”一体化功能, 有效降低运维成本, 减少人工巡视带来的个体差异性, 提高特高压输电系统的运行可靠性与经济性。

3.2.5 基础科学研究

随着计算机中央处理器(central processing unit, CPU)图形处理单元(graphic processing unit, GPU)双精度浮点运算速率的大幅提升, 基于 GPU 加速的并行计算在计算高电压学中的应用逐渐增多, 包括基于分子模拟的计算材料学、基于有限元法的多物理场耦合计算、基于线性常微分方程组求解的大规模电路仿真等, 均可见“CPU+GPU”混合编程求解的身影, GPU 的加入使得线性代数方程组的并行计算处理速率得到数倍至数千倍的提升, 科学研究中可针对更大的时空尺度、更细致的物理过程进行数值模拟计算, 如特高压换流变设备中的大尺度油纸绝缘空间电荷分布仿真、交直流电压下大尺度油纸绝缘的沿面放电模拟、特高压输电系统的潮流、稳定、短路计算及运行优化计算等^[70]。

“新基建”中人工智能与工业物联网的建设为特高压输变电设备的状态评价提供了新的理论与方法。工业物联网使得特高压输变电设备的全方位状态感知、信息互联成为可能, 以深度学习为代表的新一代人工智能技术使得数据驱动的设备状态评价与故障诊断、推演模型成为研究热点, 目前已在局放图谱识别、声纹识别、热点温度计算、绝缘子图像定位、故障案例文本挖掘、电力专业知识图谱、电力设备综合状态评价等方面有所应用。然而纯数据驱动的数学模型可解释性低, 泛化能力取决于训练数据集及神经网络结构, 依然为“黑盒子”模型。在未来, 基于“CPU+GPU”架构的计算服务将在特高压电力设备的计算材料学、计算放电学以及特高压输电系统的数字孪生中发挥其强大的计算效用。同时, 人工智能需要与物理控制方程进行有机融合, 建立“数据-模型双驱动”的数学物理模型, 综合提高模型的准确性、泛化性与可解释性。

3.3 新基建下的能源互联网

如图 7 所示, 随着可再生能源、数字技术的进一步发展, 中国未来电网将是多能互补能源互联网与新技术的融合体, 化石能源与可再生能源多能互补, 以特高压电网为能源输送骨架实现能源跨区调配, 结合分布式取能与智慧调度技术实现能源就地



图 7 中国未来电网技术融合展望

Fig.7 Outlook of technology integration in China power grid

消纳, 通过新材料新技术实现电力系统的多维状态感知, 进而实现高质效的差异化运维检修, 最终提高提升电力系统的可靠性, 促进中国经济的高速可持续发展, 促进能源结构的全面绿色转型, 为实现“碳达峰、碳中和”目标奠定基础。

4 总结

中国 GDP 总量位列世界前茅, 但人均 GDP 及人均能源消耗量与其他发达国家相比仍有较大发展空间, 且中国作为世界碳排放量最大的国家, 目前面临经济发展和环境保护的双重压力。在新型基础设施建设的背景下, 特高压输电技术可同步支撑中国的经济建设与环境保护, 一方面为“新基建”提供能源保障, 另一方面也可在“新基建”新技术的加持下得以进一步发展与应用。“新基建”与特高压输电技术一同助力“碳达峰、碳中和”, 促进中国经济发展与能源绿色转型。

以 5G 通信、人工智能为新经济增长点的“新基建”将为中国带来可观的能源建设需求。在分布式可再生能源发电技术有待进一步的条件下, 大容量、远距离的特高压输电技术在中国“西电东送”能源战略中将发挥关键性作用, 为“新基建”提供可靠稳定的能源保障, 促进社会经济的平稳发展。

“新基建”与特高压密不可分。一方面, “新基建”既包含特高压, 也需要特高压, 另一方面, “新基建”中以 5G 通信、人工智能、工业物联网为代表的新技术为特高压输电技术注入新血液, 丰富特高压技术的内涵, 促进特高压的发展与应用。

综上所述, 在“新基建”背景下, 特高压输电

技术面临新的能源建设需求,将迎来新的发展机遇,进而带动电力行业、国家经济的可持续发展。电力设备制造企业、电网运行企业将在本次“新基建”中获得经济增长与产业结构调整的机会,科研方面将有新的研究方向与课题,中国的能源结构将向高比例可再生能源进一步倾斜,国民经济将又好又快可持续发展。未来的中国电网将发展为多能互补能源互联网与新技术的融合体,进一步促进中国经济发展与能源绿色转型。

参考文献 References

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23.
XI Jinping. Speech at the general debate of the seventyfifth United Nations General Assembly[N]. The People's Daily, 2020-09-23.
- [2] 中国疾病预防控制中心. 新型冠状病毒肺炎流行病学特征分析[J]. 中华流行病学杂志, 2020, 41(2): 145-151.
Epidemiology Working Group for NCIP Epidemic Response, Chinese Center for Disease Control and Prevention. The epidemiological characteristics of an outbreak of 2019 novel coronavirus diseases (COVID-19) in China[J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2020, 41(2): 145-151.
- [3] 李晓华. 面向智慧社会的“新基建”及其政策取向[J]. 改革, 2020(5): 34-48.
LI Xiaohua. New infrastructure construction and policy orientation for a smart society[J]. Reform, 2020(5): 34-48.
- [4] 姜 琳. 国家电网发布“数字新基建”十大任务[N]. 经济参考报, 2020-06-18.
JIANG Lin. State Grid issues ten tasks of 'new digital infrastructure'[N]. Economic Information Daily, 2020-06-18.
- [5] 陈新华. 新基建将引发全国用电量暴涨近两成, 如何应对? [N]. 财经十一人, 2020-07-10.
CHEN Xinhua. The new infrastructure will trigger a sharp increase of nearly 20% in electricity consumption nationwide. How to deal with it[N]. Caijing, 2020-07-10.
- [6] 张 晔. 打造高质量 5G 离不开这对“超强组合”[N]. 科技日报, 2020-03-25.
ZHANG Ye. Creating high quality 5G can't do without this pair of 'super combination'[N]. Science and Technology Daily, 2020-03-25.
- [7] 何家爱, 刘晓村. 基站节能减排措施探讨[J]. 信息技术与信息化, 2018(10): 195-197.
HE Jiaai, LIU Xiaocun. Discussion on energy saving and emission reduction measures of base station[J]. Information Technology & Informatization, 2018(10): 195-197.
- [8] 工信部运行监测协调局. 2019 年通信业统计公报[J]. 通信企业管理, 2020(2): 6-11.
The Ministry of Industry and Information Technology Operation Monitoring and Coordination Bureau. Statistical bulletin of communication industry in 2019[J]. C-Enterprise Management, 2020(2): 6-11.
- [9] 韩 鑫. 把握充电桩建设新机遇[N]. 人民日报, 2020-08-18(5).
HAN Xin. Seize the new opportunity of charging pile construction[N]. The People's Daily, 2020-08-18(5).
- [10] International Monetary Fund. World economic outlook database[DB/OL]. (2020-10-13). <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2020/October>.
- [11] BP. Statistical review of world energy[EB/OL]. (2019-07-30). https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/zh_cn/china/home/reports/statistical-review-of-world-energy/2019/2019srbook.pdf.
- [12] IEA. CO₂ emission statistics[DB/OL]. (2020-11-16). <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/co2-emissions-statistics>.
- [13] 梁曦东, 周远翔, 曾 嵘. 高电压工程[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2015: 1.
LIANG Xidong, ZHOU Yuanxiang, ZENG Rong. High voltage engineering[M]. 2nd ed. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2015: 1.
- [14] 汤广福, 贺之渊, 庞 辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [15] 徐 政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [16] 舒印彪. 中国直流输电的现状 & 展望[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 1-2, 20.
SHU Yinbiao. Present status and prospect of HVDC transmission in China[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 1-2, 20.
- [17] 孙才新, 舒立春, 蒋兴良, 等. 高海拔、污秽、覆冰环境下超高压线路绝缘子交直流放电特性闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 115-120.
SUN Caixin, SHU Lichun, JIANG Xingliang, et al. AC/DC flashover performance and its voltage correction of UHV insulators in high altitude and icing and pollution environments[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 115-120.
- [18] 张志劲, 蒋兴良, 孙才新. 污秽绝缘子闪络特性研究现状及展望[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 35-40.
ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, SUN Caixin. Present situation and prospect of research on flashover characteristics of polluted insulators[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 35-40.
- [19] 关志成, 彭功茂, 王黎明, 等. 复合绝缘子的应用及关键技术研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 513-519.
GUAN Zhicheng, PENG Gongmao, WANG Liming, et al. Application and key technical study of composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 513-519.
- [20] 宿志一, 李庆峰. 我国电网防污闪措施的回顾和总结[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 124-130.
SU Zhiyi, LI Qingfeng. Historical review and summary on measures against pollution flashover occurred in power grids in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 124-130.
- [21] 王 彬, 梁曦东, 张轶博, 等. 交、直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2322-2328.
WANG Bin, LIANG Xidong, ZHANG Yibo, et al. Natural pollution test of composite and porcelain insulators under AC and DC stress[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2322-2328.
- [22] 杨 庆, 董 岳, 叶 轩, 等. 高海拔地区 500kV 输电线路用复合绝缘子与并联间隙的绝缘配合[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 407-414.
YANG Qing, DONG Yue, YE Xuan, et al. Insulating coordination between composite insulator and parallel gap device of 500 kV transmission line at high altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 407-414.

- [23] 周 军, 王胜辉, 丁玉剑, 等. 高海拔地区直流输电线路鸟粪闪络模拟试验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1345-1352.
ZHOU Jun, WANG Shenghui, DING Yujian, et al. Simulated experimental research on the bird streamer flashover of DC transmission line in high altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1345-1352.
- [24] 李双辰, 段雅娜, 刘 超. 高海拔地区大型输电项目环境影响评价方法研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(8): 59-64.
LI Shuangchen, DUAN Yana, LIU Chao. Study on environmental impact assessment methods of large transmission projects in high altitude areas[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(8): 59-64.
- [25] 甘 艳, 阮江军, 鄂 雄. 有限元法分析高压架空线路附近电场分布[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 52-55.
GAN Yan, RUAN Jiangjun, WU Xiong. Analysis of the electric field intensity nearby high voltage transmission line by FEM[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(8): 52-55.
- [26] 王建华, 文 武, 阮江军, 等. UHV 交变电场在人体中感应电流计算分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 46-49.
WANG Jianhua, WEN Wu, RUAN Jiangjun, et al. Calculation of electric field induced currents on human bodys under 1000kV UHV[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 46-49.
- [27] 周远翔, 赵健康, 刘 睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2593-2612.
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [28] 杜伯学, 李忠磊, 杨卓然, 等. 高压直流交联聚乙烯电缆应用与研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 344-354.
DU Boxue, LI Zhonglei, YANG Zhuoran, et al. Application and research progress of HVDC XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 344-354.
- [29] 齐 波, 张贵新, 李成榕, 等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1466-1473.
QI Bo, ZHANG Guixin, LI Chengrong, et al. Research status and prospect of gas-insulated metal enclosed transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1466-1473.
- [30] ZHANG Y M, QIAN Y, WANG H, et al. Method of GIL partial discharge localization based on natural neighbour interpolation and ECOC-MLP-SVM using optical simulation technology[J]. High Voltage, 2021, 6(3): 514-524.
- [31] 变压器. 西安交大关键技术助力苏通 1 000 千伏特高压交流 GIL 综合管廊工程建成投运[J]. 变压器, 2019, 56(11): 52.
Transformer. Key technologies of Xi'an Jiaotong University help Sutong 1 000 kV high voltage AC Gil utility tunnel project to be completed and put into operation[J]. Transformer, 2019, 56(11): 52.
- [32] 杨 帆, 吴 涛, 廖瑞金, 等. 数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1505-1521.
YANG Fan, WU Tao, LIAO Ruijin, et al. Application and implementation method of digital twin in electric equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1505-1521.
- [33] 刘亚东, 陈 思, 丛子涵, 等. 电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1539-1554.
LIU Yadong, CHEN Si, CONG Zihan, et al. Key technology and application prospect of digital twin in power equipment industry[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1539-1554.
- [34] 严 莉, 王维建, 周东华. 变压器故障诊断的油色谱分析方法综述[J]. 控制工程, 2003, 10(6): 488-491.
YAN Li, WANG Weijian, ZHOU Donghua. A survey on oil chromatogram analysis for fault diagnosis of transformers[J]. Control Engineering of China, 2003, 10(6): 488-491.
- [35] 唐志国, 李成榕, 常文治, 等. 变压器局部放电定位技术及新兴 UHF 方法的关键问题[J]. 南方电网技术, 2008, 2(1): 36-40.
TANG Zhiguo, LI Chengrong, CHANG Wenzhi, et al. The partial discharge location technology of power transformer and the key issues of newly developed UHF method[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(1): 36-40.
- [36] 邓建钢, 郭 涛, 徐秋元, 等. 变压器绕组测温光纤光栅传感器设计及性能测试[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1348-1355.
DENG Jiangang, GUO Tao, XU Qiuyuan, et al. Design and performance test for fiber Bragg grating sensors of transformer winding temperature measurement[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1348-1355.
- [37] 尹海晶. 基于红外测温技术的电力变压器过热故障在线监测系统的设计与开发[D]. 南京: 南京理工大学, 2010: 4-6.
YIN Haijing. Design and development of an on-line monitoring system for power transformer overheating faults based on infrared temperature measurement technology[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2010: 4-6.
- [38] 汲胜昌, 刘味果, 单 平, 等. 小波包分析在振动法监测变压器铁芯及绕组状况中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 24-27, 49.
JI Shengchang, LIU Weiguo, SHAN Ping, et al. The application of the wavelet packet to the monitoring of the core and winding condition of transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 24-27, 49.
- [39] 穆海宝, 赵浩翔, 张大宁, 等. 变压器油纸绝缘套管多参量智能感知技术研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1903-1912.
MU Haibao, ZHAO Haoxiang, ZHANG Daning, et al. Study on multi-parameter intelligent sensing technology for transformer oil-paper bushing[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1903-1912.
- [40] ZHANG S L, PENG Z R, LIU P, et al. Design and dielectric characteristics of the ± 1100 kV UHVDC wall bushing in China[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 409-419.
- [41] WANG Q Y, XIE G S, TIAN H D, et al. Impact of temperature on the transient DC field distribution of ± 1100 kV UHVDC wall bushing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1449-1457.
- [42] 王敏学, 李 黎, 周达明, 等. 分布式光纤传感技术在输电线路在线监测的应用研究综述[J/OL]. 电网技术, [2021-06-24]: 1-10. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1795>.
WANG Minxue, LI Li, ZHOU Daming, et al. Overview of research on application of distributed optical fiber sensing technology in online monitoring of transmission lines[J/OL]. Power System Technology, [2021-06-24]: 1-10. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1795>.
- [43] 符 杨, 荣帅昂, 刘恩圻, 等. 架空输电通道图像监测中大场景双目测距的方法及校正算法[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 377-385.
FU Yang, RONG Shuaiang, LIU Enqi, et al. Calibration method and regulation algorithm of binocular distance measurement in the large scene of image monitoring for overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 377-385.
- [44] 邵瑰玮, 刘壮, 付晶, 等. 架空输电线路无人机巡检技术研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 14-22.
SHAO Guiwei, LIU Zhuang, FU Jing, et al. Research progress in unmanned aerial vehicle inspection technology on overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 14-22.
- [45] 王晓希. 特高压输电线路状态监测技术的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 7-11.
WANG Xiaoxi. Application of condition monitoring technologies for

- UHVAC transmission lines[J]. *Power System Technology*, 2007, 31(22): 7-11.
- [46] 陈浩楠. 特高压输电塔状态监测系统的声音监测与定位方法研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2020: 5.
CHEN Haonan. Study on the monitoring system of the UHV transmission tower state based on sound source localization[D]. Chongqing, China: Chongqing University of Technology, 2020: 5.
- [47] 花国祥, 魏晓光, 高 阳. 混合式高压直流断路器数据监测平台的研制[J]. *中国电力*, 2015, 48(10): 84-89.
HUA Guoxiang, WEI Xiaoguang, GAO Yang. Design of the monitoring system for hybrid arc-less high voltage direct current circuit breaker[J]. *Electric Power*, 2015, 48(10): 84-89.
- [48] 王 竞, 夏加富, 刘晓晖, 等. 牵引变电站直流断路器机械状态监测与故障诊断研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(1): 33-40.
WANG Jing, XIA Jiafu, LIU Xiaohui, et al. Research on mechanical condition monitoring and fault diagnosis for DC circuit breaker in traction substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(1): 33-40.
- [49] 杨怀远, 庄池杰, 谢施君, 等. 非接触式暂态电压测量的简化解耦方法[J]. *高电压技术*, 2020, 46(6): 1948-1954.
YANG Huaiyuan, ZHUANG Chijie, XIE Shijun, et al. Simplified decoupling method for non-contact transient voltage measurement[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(6): 1948-1954.
- [50] 吴 雄, 邹开刚, 王可嘉. 复合材料内部缺陷的太赫兹无损检测技术研究[J]. *光学与光电技术*, 2020, 18(5): 10-15.
WU Xiong, ZOU Kaigang, WANG Kejia. Research on terahertz non-destructive testing technology for internal defects of composite materials[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2020, 18(5): 10-15.
- [51] 邵 进, 胡武炎, 贾凤鸣, 等. 红外热成像技术在电力设备状态检修中的应用[J]. *高压电器*, 2013, 49(1): 126-129, 133.
SHAO Jin, HU Wuyan, JIA Fengming, et al. Application of infrared thermal imaging technology to condition-based maintenance of power equipment[J]. *High Voltage Apparatus*, 2013, 49(1): 126-129, 133.
- [52] 司马文霞, 郑荣锋, 杨 鸣, 等. 基于稀土磁光玻璃的非接触式电流传感器研制及其传感性能[J]. *高电压技术*, 2020, 46(6): 1867-1876.
SIMA Wenxia, ZHENG Rongfeng, YANG Ming, et al. Development and sensing performance of a non-contact current sensor based on rare earth magneto-optic glasses[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(6): 1867-1876.
- [53] 王德文. 基于云计算的电力数据中心基础架构及其关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(11): 67-71, 107.
WANG Dewen. Basic framework and key technology for a new generation of data center in electric power corporation based on cloud computation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(11): 67-71, 107.
- [54] 许 婧, 王 晶, 高 峰, 等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. *电网技术*, 2000, 24(8): 48-52.
XU Jing, WANG Jing, GAO Feng, et al. A survey of condition based maintenance technology for electric power equipments[J]. *Power System Technology*, 2000, 24(8): 48-52.
- [55] 贺 兴, 艾 芊, 朱天怡, 等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J]. *电网技术*, 2020, 44(6): 2009-2019.
HE Xing, AI Qian, ZHU Tianyi, et al. Opportunities and challenges of the digital twin in power system applications[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(6): 2009-2019.
- [56] BOSCHERT S, ROSEN R. Digital twin—the simulation aspect[M]//HEHENBERGER P, BRADLEY D. *Mechatronic Futures*. Cham: Springer, 2016: 59-74.
- [57] HE X, CHU L, QIU R C, et al. A novel data-driven situation awareness approach for future grids—using large random matrices for big data modeling[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 13855-13865.
- [58] 齐 波, 张 鹏, 张书琦, 等. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1522-1538.
QI Bo, ZHANG Peng, ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(5): 1522-1538.
- [59] 相晨萌, 曾四鸣, 闫 鹏, 等. 数字孪生技术在电网运行中的典型应用与展望[J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1564-1575.
XIANG Chenmeng, ZENG Siming, YAN Peng, et al. Typical application and prospect of digital twin technology in power grid operation[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(5): 1564-1575.
- [60] 高 扬, 贺 兴, 艾 芊. 基于数字孪生驱动的智慧微电网多智能体协调优化控制策略[J/OL]. *电网技术*, [2021-06-24]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2278>.
GAO Yang, HE Xing, AI Qian. Multi agent coordinated optimal control strategy for smart microgrid based on digital twin drive[J/OL]. *Power System Technology*, [2021-06-24]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2278>.
- [61] 蒲天骄, 陈 盛, 赵 琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(6): 2012-2029.
PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(6): 2012-2029.
- [62] 沈 沉, 贾孟硕, 陈 颖, 等. 能源互联网数字孪生及其应用[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(1): 1-13.
SHEN Chen, JIA Mengshuo, CHEN Ying, et al. Digital twin of the energy internet and its application[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(1): 1-13.
- [63] 李二霞, 亢超群, 李玉凌, 等. 基于设备状态评价和电网损失风险的配电网检修计划优化模型[J]. *高电压技术*, 2018, 44(11): 3751-3759.
LI Erxia, KANG Chaoqun, LI Yuling, et al. Optimization model of distribution network maintenance plan based on equipment condition evaluation and grid loss risk[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(11): 3751-3759.
- [64] 吴卓文. 基于风险评估的输变电设备差异化运维策略应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
WU Zhuowen. Application research on risk based differentiated operation and maintenance strategy of power transmission and transformation equipments[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2014.
- [65] 文志强, 舒乃秋, 彭 辉, 等. 输电线路差异化运维计划优化[J]. *电网技术*, 2015, 39(4): 1101-1108.
WEN Zhiqiang, SHU Naiqiu, PENG Hui, et al. Differentiated operation and maintenance scheduling optimization of transmission lines[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(4): 1101-1108.
- [66] 徐 彦, 方华亮, 廖家齐, 等. 基于风险评估的集成式隔离断路器运维策略[J]. *高电压技术*, 2020, 46(11): 3951-3959.
XU Yan, FANG Hualiang, LIAO Jiaqi, et al. Operation and maintenance strategy of integrated disconnecting circuit breakers based on risk assessment[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(11): 3951-3959.
- [67] 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 Wenhui, NIU Zhewen, ZHAO Boning, 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.

- [68] 王建元, 王 娟, 陈永辉, 等. 基于图论的电力巡检机器人智能寻迹方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(9): 78-81.

WANG Jianyuan, WANG Xian, CHEN Yonghui, et al. An intelligent patrolling robot addressing program based on graph method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(9): 78-81.

- [69] 王 致, 马 力, 洪永健, 等. 基于电力巡检机器人巡视系统的设备故障诊断研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(1): 68-71.

WANG Zhi, MA Li, HONG Yongjian, et al. Research on equipment fault diagnosis based on power patrol robot inspection system[J]. Automation & Instrumentation, 2019(1): 68-71.

- [70] 孟庆东, 张 嵩, 李本新, 等. 基于快速解耦的电力系统连续潮流并行计算方法[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, [2021-06-24]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000742>.

MENG Qingdong, ZHANG Song, LI Benxin, et al. Fast decoupled power flow based parallel computing for continuation power flow[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, [2021-06-24]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000742>.



周远翔(通信作者)

1966—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事高电压与绝缘技术的教学与科研工作
E-mail: zhou-yx@tsinghua.edu.cn

ZHOU Yuanxiang
Ph.D., Professor
Corresponding author



陈健宁

1995—, 男, 博士生
主要从事高压电力设备绝缘放电计算与人工智能应用研究
E-mail: chen-jn18@mails.tsinghua.edu.cn

CHEN Jianning
Ph.D. candidate



张 灵

1987—, 男, 博士, 助理研究员
从事交直流电缆绝缘、高电压测量技术、微纳界面电学研究
E-mail: zhangling15@tsinghua.edu.cn

ZHANG Ling
Ph.D.



张云霄

1990—, 男, 博士, 助理研究员
主要从事绝缘材料、结构及状态评价技术研究
E-mail: zhangyxthu@163.com

ZHANG Yunxiao
Ph.D.



滕陈源

1992—, 男, 博士生
主要从事复合电介质材料及其绝缘特性研究
tengchenyuan@126.com

TENG Chenyuan
Ph.D. candidate



黄 欣

1994—, 女, 博士生
主要从事油纸绝缘及其空间电荷特性研究
18023156862@163.com

HUANG Xin
Ph.D. candidate

收稿日期 2021-01-10 修回日期 2021-06-24 编辑 曹昭君