

双碳目标下配用电系统的新使命和新挑战

马钊, 张恒旭, 赵浩然*, 王梦雪, 孙媛媛, 孙凯祺

(山东大学电气工程学院, 山东省 济南市 250061)

New Mission and Challenge of Power Distribution and Consumption System Under Dual-carbon Target

MA Zhao, ZHANG Hengxu, ZHAO Haoran*, WANG Mengxue, SUN Yuanyuan, SUN Kaiqi

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

ABSTRACT: Driven by the "30/60" dual-carbon goal, the energy revolution and the digital revolution are advancing together. The traditional distribution network is gradually evolving into an active distribution and consumption system, which takes the new energy as the main body and integrates new energy-distribution network-load-energy storage, presenting a constantly changing system form. With the development of science and technology and the improvement of social requirements, the distribution system faces significant challenges and unprecedented opportunities such as configuration mode subversion, enterprise transformation and upgrading, and product upgrading. Firstly, by reviewing the evolution of the distribution system, this paper analyzed the characteristics of one-low, two-peak, three-high and multiple random factors in the current distribution and consumption system. Secondly, starting from the initial intention and basic tasks of the distribution network, according to the requirements of green consumption and circular economy, this paper analyzed the necessity of transforming from the traditional distribution network to the digital active distribution system, and then constructed a new distribution and consumption system under integrated energy system. Furthermore, this paper analyzed the influence of a new era with the five basic requirements of the electric system and the new mission. Combined with the five dimensions development goals, the main difficulties and challenges in developing the new distribution system were summarized. Lastly, this paper prospected the technology direction that should be focused on in the future.

KEY WORDS: dual-carbon target; distribution and consumption system; digitalized active distribution systems; distributed renewable energy

摘要: 在“30/60”双碳目标的驱动下, 能源革命和数字革命相融并进, 传统配电网正逐渐演变为以新能源为主体、融合新能源-配电网-负荷-储能的有源(主动)配用电系统, 呈现出不断变化着的新的体系形态。面对科技发展和社会要求的提升, 配用电系统正面临着组态模式颠覆、企业转型升级、产品更新换代的巨大挑战和前所未有的机遇。通过回顾配用电系统的演变历程, 分析了当前配用电系统的“一低、两峰、三高、多随机因素”的特点; 从配电网的初心和基本任务出发, 根据双碳目标、绿色消费和循环经济的要求, 结合当下智能化、数字化、低碳化、模块化的新时代技术特征和配用电设备的发展现状, 分析了从传统配电网向数字化主动配用电系统转化, 进而建设综合能源体系下的新型配用电系统的必要性; 分析了新时代对配用电系统的五大基本要求和新使命, 并结合这五大维度发展目标, 总结了新型配用电系统发展中所面临的主要困难和挑战, 提出并展望了未来应该关注的技术方向, 给出了一些不成熟的观点建议, 希望能够抛砖引玉, 共同探讨。

关键词: 双碳目标; 配用电系统; 数字化主动配用电系统; 分布式可再生能源

0 引言

温室效应、环境污染、能源枯竭严重制约了人类社会的可持续发展, 新一轮能源革命已在全球范围内展开^[1-2]。2020年9月, 习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话, 提出了中国“碳达峰、碳中和”的宏伟目标。电力行业作为我国国民经济的基础能源产业, 是响应“双碳目标”进行能源改革的动力之源^[3]。

配电网作为电网重要组成部分, 是联接用能端与用户的最后一公里。在能源系统的新格局下, 其所承担的角色不仅是单纯的电能分配网络, 还是融合了“源-网-荷-储”的数字化主动配用电系统, 是

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0702200)。
National Key R&D Program of China (2018YFA0702200)。

新型电力系统的重要物理载体和基石，是未来综合能源系统中的资源配置中心^[4]，是多利益主体的交易平台。配电网作为连接输电侧和用电侧的纽带，将拥有包括用户侧需求^[5]、储能单元、分布式电源等环节相关的海量数据资源，为数字孪生和数据驱动等新技术提供了坚实的数据基础。

近年来，数字化主动配电系统引起了国内外专家学者的广泛关注，其优越的技术融合能力和数字化特征使其能够承载更加完备的硬件设备^[6]和灵活的软件控制，最终实现分布式供能-储能-配能-用能主动化和自动化，在节能减排的基础上最大程度提高能源利用效率^[7]。随着电力系统的进一步发展和能源改革的推进，传统配电和用电的界限日渐模糊，配用电的融合，跨专业、跨学科融合成为主要方向。例如与建筑、交通、通信、制造等行业产学研的融合，为未来配用电系统开拓了更广泛深入合作的机遇：《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》中提出，到 2025 年，建筑用能中电力消费比例超过 55%，要建设以“光储直柔”为特征的新型建筑电力系统，大力发展柔性用电建筑。在变革过程中，新技术和新设备是否能够经受住考验，配电系统能否更快更好地接住行业转型升级的接力棒，进化出与现代社会适配的新形态，对电力行业以及相关产业来说是一个巨大的挑战。

简言之，新型配用电系统为新设备新技术的诞生和使用提供了广阔平台和前所未有的发展机遇，但同时也对新型配用电系统的安全、环保、可靠、灵活、智能以及可持续^[8]等性能方面提出了更高要求。本文就配电网的发展演变过程、双碳目标激励作用下未来配用电系统的主要形态特性、建立新型配用电系统的使命与挑战以及未来研究方向等方面进行分析和讨论，旨在为配用电系统变革发展提供新的思路。

1 配电网的发展历程

配电指电力系统中直接与用户相连并向用户分配电能的环节。与输电网不同，配电网一般是从 110kV(有些国家是 132kV 甚至到 220kV)降压到 35kV、10kV，借由馈电线路将电能传送到终端用户。其中配电设备种类多、数量大，需管理的基础资料多，线路接线方式复杂多变，设备的增改和检修频繁，管理任务繁重。配电网作为电力系统相对薄弱的环节，其结构和功能随着科技和社会发展不

断革新，发展至现今形成数字化主动配电系统的过程中大致经过了传统配电网、智能配电网(期间也有从不同侧重点研究而命名的配电网，如透明配电网、灵活配电网、弹性配电网等)、主动配电系统 3 个重要阶段，未来将向着综合能源体系下的新型配用电系统发展，下面对配电网升级演变的过程和特征进行简要介绍(见图 1)。

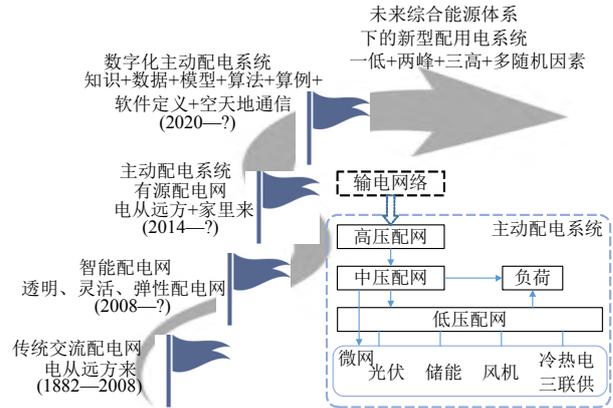


图 1 配电系统技术演进示意图
Fig. 1 Technical evolution diagram of power distribution system

1.1 传统交流配电网

世界上第一个商用电网由爱迪生于 1882 年建立。此阶段以直流为主，由于电压等级低，发电容量受限，电能只能在较短的距离内传输。配电网在起步阶段受到发电条件的限制，火电厂只能建设在用电负荷短距离范围内。此时配电网尚未形成系统的输配电网，仅仅作为负荷侧与发电侧的联络线。随着 1894 年建成尼亚加拉大瀑布水电站，1896 年采用三相交流输电送至 35km 外的布法罗，19 世纪初交直流之争结束，交流电开始主导世界的电力发展。

二战后，突增的工业用电需求使得电力负荷从简单的民用需求转变为复杂的商用需求，推动了电力系统的快速发展，此时配电网在功率上的限制已基本解除。随着高压长距离输电技术的成熟，输配电网的电压等级也在不断提升，高压输电网通过变电站逐级降压，经过配电网送入需求侧。经过 20 世纪中末期的发展，电网系统在技术上日趋成熟，配电网规模不断扩大，形成了互联互通的传统的高、中、低压配电网体系。此时配电网功能仅为单纯的电力分配，实现“电从远方来”的用电场景。

1.2 智能配电网

随着电力电子设备的使用以及通信技术的发展，配电网的电力调度实现了自动控制，电能质量

得到保证。计算机技术的发展也为配电网的设计建设、仿真验证、监控检测提供了工具,电网防护水平和安全预警能力得到显著提高。21 世纪以来,大电网、超/特高压输电网的建设,进一步推动了配电网的完善。由于能源资源紧缺以及对环境保护的重视,促使风电、光伏、核电、天然气、生物能等清洁能源进入了大规模供电的行列。与此同时,用电侧也发生了变化,随着制冷制热、电动汽车、储能设备等新型用电负荷的不断衍生,使得能源结构变得既复杂又灵活,配电网为应对这些变化不得不向智能化发展。

2001 年,美国电力科学研究院率先提出“Intelligrid”的概念,2008 年 11 月,中美清洁能源合作组织会议上正式开始使用“Smart Grid”这一名词,国内将其翻译为“智能电网”^[9]。智能电网是以物理电网为基础,将现代先进的传感测量、通信、信息、计算机和控制等技术高度集成形成的新型电网。智能配电网(smart distribution network, SDN)概念随之而生。SDN 的保护控制、配电自动化、以及故障定位排除能力,使配电网供能可靠、能够实现网络自愈、排除意外停电风险等。同时,用户侧参与电网调节,形成“源-网-荷”互动的 SDN 雏形。SDN 的进一步发展改变了现有电网资源供给,同时涌现出了交(直)流微电网、虚拟电厂等技术,为最终实现了多能源配网的 SDN 格局打下了基础。

1.3 主动配电系统(有源配电系统)

分布式能源(distributed energy resources, DERs)的大量接入与应用对系统潮流分布、电压水平、短路容量等原有电气特性造成了显著影响。传统配电网在设计阶段并未考虑上述因素,因此难以满足低碳经济背景下高渗透率新能源发电接入与高效利用的要求。2004 年 IEEE 年会上,曼彻斯特大学首次公开发表研究主动配电网技术的论文,并于 2005 年 18 届国际供电会议上提出了“active network”的概念。2008 年国际大电网会议(CIGRE)C6.11 工作组发布的研究报告使用了“active distribution network(ADN)”的术语,国内将其翻译为主动配电网。CIGRE2012 年年会上,C6 各国委员们一致同意将 ADN 改为“Active Distribution System”(ADS),翻译为中文是主动配电系统。

ADS 是指可以综合控制分布式能源(DERs、柔性负载和储能)的配电网,可以使用灵活的网络技术

实现潮流的有效管理,分布式能源在其合理的监管环境和接入准则基础上承担对系统一定的支撑作用^[10]。ADS 旨在解决配电侧兼容大规模间歇式新能源,提升绿色能源利用率以及调整一次能源结构等问题^[11]。

ADS 内部具有分布式能源,与 SDN 的作用相似,是具有控制和运行能力的配电网。但是 ADS 有更大的可观测范围,能掌握更多信息。其具有四个特征:具备一定分布式可控资源,有较为完善的可观可控水平,具有实现协调优化管理的管控中心和可灵活调节的网络拓扑结构^[12]。随着智能计量技术的开发和信息通信技术的发展,ADS 可以延缓投资,提高网络可视性以及网络灵活性,具有较高的电能质量和供电可靠性以及较高的自动化水平,更易接入 DERs,同时,能降低网络损耗,有较高的配电效率。

ADS 的发展面临一些问题和障碍,如维护问题、涉及大量利益相关者时的通信复杂性、投资费用(设备、教育、软件)增加^[13]等。随着分布式发电规模继续扩大,ADS 将面临着更加严峻的挑战。

过去几年中,国内学者们也提出了透明配电网、弹性配电网、灵活配电网等概念,基本上是侧重于某一方面特征和要求对配电网的命名,不同程度上促进了配电系统的发展。

1.4 数字化主动配电系统

数字化主动配电系统(digitalized ADS, D-ADS)是随着数字技术在配电领域形态演进而发展出的综合性交叉技术领域,是现今配电网发展所处的重要阶段。文献[14]将 D-ADS 定义为:遵循电力信息安全标准和统一数据模型,建立与配电物理系统相匹配的虚拟孪生系统,基于“知识(经验)+数据+模型+算法+算力+软件定义+空地通信”构造先进的数字技术体系,统筹源-网-荷-储-柔多元灵活性资源,协同感知、分析、决策等运行运营环节,形成分层、分级、分区管控的配电数字系统架构和分析决策体系,实现配电设备数字化、系统数字化和全业务流数字化。

相较于传统的配网信息化,D-ADS 的数字内涵更加丰富,数据与知识经验、规则等共同支撑全业务流的数字化;对数学思维和数理模型的依赖程度更高,模型、工具、算法与算力广泛融合为平台提供数据样本与分析能力;数字业务更加灵活开放,孪生系统给予决策高宽容度的试错空

间,数据驱动技术实现了从辅助角色到直接驱动角色的转换。然而,D-ADS在标准化、安全防护以及能源政策方面面临的困难致使ADS的数字化转型动力不足,需要在实践过程中开展跨行业思维融合和跨领域技术创新,探索助推ADS数字化的新模式和新方法。

1.5 未来综合能源体系下的新型配用电系统

电能的生产经过了从高碳到低碳,正在逐步过渡到绿色的阶段。电能的发输配供用也经过了从“电从远方来”到目前“电从远方+家里来”的因地制宜模式的改变。随着更大规模的新能源接入,目前配电系统中“一低、两峰、三高、多随机因素”的特点愈加明显,即:低系统惯量;夏、冬两季负荷两高峰;高比例新能源+高比例电力电子装备+高增长的直流负荷;发电出力 and 用电负荷双侧随机波动,技术、经济市场、风险等因素具有极强的不确定性。而综合能源系统中“源-网-荷-储”相关技术的发展也极大地增加了配电系统的灵活复杂程度。系统运行方式从集中统一调度逐渐过渡到分层分级、区域优化控制。分布式能源和柔性负荷合一的能源聚合体催化着新的供用电商业模式的产生,区块链等技术的应用正在萌发和孕育着全新的生态。在外部逐渐发展的技术条件和需求激励下,未来综合能源体系下的新型配用电系统正蓄势待发。

值得关注的是近年来迅速发展的新一代低压直流供用电系统。在源、荷皆为直流形态的情况下,采用直流供电,减少了大量不必要的交直流变换环节,能够实现电源灵活高效接入,电能低损耗,输配高可靠,负荷高效以及更便利、低成本的利用。同时,直流供用电也有效避免了传统交流电网固有的同步和稳定性问题,能够实现有功和无功的快速解耦。更值得重视的是,新一代直流供用电系统将从用户侧自下而上采用物联网及身联网(如健身环,心脏起搏器等)和人工智能等新技术,为供用电系统技术升级换代,“造血”“换芯”。直流供用电系统可作为交流供用电的辅助和替代,有望颠覆传统供用电形式,成为未来供用电发展新模式。

随着能源和数字革命的纵深发展,依靠互联网思维和各种新技术的强力推动,以新能源为主体的数字化主动配电系统和多能互补、提质增效的综合能源系统有机结合,形成的综合能源体系下的新型配用电系统(下称新型配用电系统)未来可期。

2 新型配用电系统形态特征

双碳目标驱动下,未来新能源将更多地以分布式方式接入,配电网逐渐过渡为综合能源+新能源+负荷+储能的新型配用电系统,呈现出“一低、两峰、三高、多随机因素”的特点和数智化综合能源的新形态与特征。

2.1 分布式主体作用强化

ADS虽已具备分布式电能管控能力,但在双碳目标推动下,配电侧在关注经济性可靠性的同时,对DERs的低碳化和灵活性程度有了更高要求。微电网作为ADS的结构单元,其服务于本地分布式能源的消纳与并网^[8],而在新型配用电系统中,能源生产不断向分布式结构靠拢、生产者与消费者的界限更加模糊,微电网作为微能网的一部分,既能够作为能源、服务的交易主体,又可以作为低碳化甚至零碳、负碳的碳交易主体^[15]。除此之外,面对多种能源耦合、大规模新能源接入的新形势,微电网将作为分布式运行控制的作用对象,在多能互补与清洁能源消纳中承担起灵活程度更高、可控能力更强的分布式角色。

2.2 强耦合强关联的复杂大系统形态

星罗棋布的分布式能源直接或间接接入配电网,导致配电网由传统放射状无源网变为多联接有源网;电压偏差呈现先减小后增大的“U型”变化;逆变器增多,在光照强度急剧变化、输出功率过低等情况下,将产生大量谐波,影响配网自动化和继电保护动作;县级电网调峰难度加大。加之电、热、气系统在用能侧的联合调控,致使现代配用电系统正向强耦合、网中网、互关联、复杂大系统的形态过渡。新型配用电系统将同时具有动态多时空多尺度差异的源、高渗透分布式的大规模新能源、多维强耦合非线性的随机系统以及用户侧灵活可控的柔性负荷。

2.3 调控方式多样灵活

随着电源结构和负荷特性的改变,电网特性和调控方式等发生了极大改变。负载特性由感性、阻性的线性负载为主,转为大比例的非线性负载;系统调节由主要通过电源侧调压、调频转为通过多能源、柔性负荷加储能协同调控等手段;稳定调控由依靠发电机转动惯量转为依靠分布储能等;电力供需特征和用电高峰可能发生变化转移,由白天缺电,晚上富裕转为白天富裕,晚上缺电。随着前述

分布式主体的增多和复杂化，集中式控制向分布式控制逐渐过渡，源随荷动将向源荷互动，分层分级，区域优化转变，区块链技术以及分布式优化技术在交易、调度方面将发挥关键作用^[16]。国家电网 2021 年 7 月在保定建设了全国首个分布式能源调度业务综合试点，利用 4G、5G 技术将以光伏为主的分布式能源运行状况传输到供电总公司的总系统内，接受总系统的统一调度^[17]，为解决新能源大规模接入电网提供了可借鉴推广的新模式。但分布式动态系统的群体智能协同控制和运行是一大难题。因此，需将群体智能的协同、共享、控制等理念与能源互联网环境下地区电网可控资源的多样化类型和优化目标结合，建议能源互联网环境下的群体智能协同调度架构分为 3 级架构，上层为群体层，调控中心智能体代表电网利益，与新能源汽车充电站、智慧小区、储能站和负荷聚合商等群体的智能体共同完成地区电网层面的集体决策；中间层为子群层，包括直辖设备群和用户设备群，群体中心通过激励、合作等方式协调子群智能体共同完成群内决策；下层为终端层，归属群体中心直辖的设备由群体中心智能体通过功率快速分配算法直接控制，归属用户管理的设备由用户智能体自主控制，实现最优响应^[18]。与此同时，进化算法与人工智能算法在调控决策中也将发挥重要作用。

2.4 中低压直流配用电技术助力

高比例可再生能源的快速增长、负荷柔性化与直流化的趋势、资源市场的多元化、人工智能技术与数字技术的发展等因素催生了中低压直流供用电技术。该技术指在发、储、用一体化的全直流生态下以直流共母线为全直流负荷供电的新型、绿色、高效的技术^[14]。该技术的发展顺应了新型电力系统演化趋势，满足了新型电力系统安全可靠、经济高效、绿色低碳、开放互动等发展需求。中低压直流供用电技术对于以光伏为代表的可再生能源，接入电网不需要换流器、逆变器等装置，大大提高了新能源接入的便捷性；储能设备通过直流进行互联，根据能源系统特点和能耗情况控制其运行，以平抑新能源发电的波动性；终端直流负荷可到家级，智能化家电具备柔性特征，根据用户需求的变化快速响应，实现与电网的能量互动。光储直柔建筑为探索新型电力系统建设提供了一种解决方案。

2.5 数字化加持赋能

数字化配电系统现已成为学界和工业界关注的

热点问题。实际上，数字技术并非配电领域的全新命题，而是随着配电技术形态的演进而不断发展的综合性交叉性技术领域，其内涵和外延在不断扩大，并在当前构建综合能源体系下的新型配用电系统具有新的特点和需求。构建新型配用电系统是一项具有内在复杂性的系统工程。从结构上看，新型配用电系统属于一类典型的信息物理社会系统，具有多参与主体关联、多业务环节耦合、多类型要素资源协同、多目标/约束制约等特点，而在这个环节中，数字技术被寄予厚望。近年来，南方电网致力于数字电网的建设，2021 年上线的“南网智瞰”是基于公司的数字技术基础平台和数字地图技术，融合地理、物理、管理和业务信息，打造的全业务转型和创新、面向全网和社会服务的数字电网运营平台^[19]。

蓬勃发展的数字孪生技术，通过海量多元异构数据的采集、传输、储存、分析，对系统全景与全生命周期状态的观测、控制，对不确定性及复杂模型的进行预测模拟，能够为调度决策、运行优化、电力交易提供指导^[20]。

3 新型配用电系统的使命和挑战

从全面系统的角度出发，配用电系统的基本任务和先进性目标依然是功能安全、性能可靠、经济高效、技术绿色、智能数字五大维度的现代化和最优化。这既是配用电系统考核评价的 5 个指标，也是配用电系统不变的初心和使命。这 5 个维度的目标互联互通，关系错综复杂，如图 2 所示。如何实现 5 个维度的目标最优化，是新型配用电系统所要面临的关键挑战，也是数字化和人工智能化赋能配用电系统实现双碳目标的新使命。

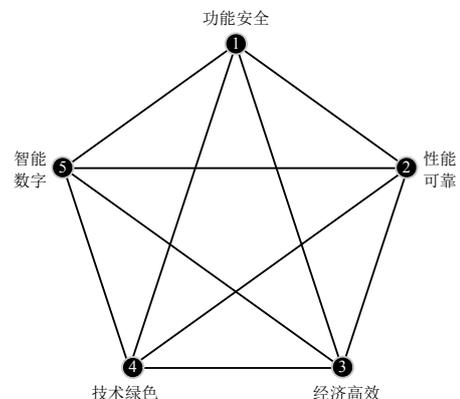


图 2 新型配用电系统的发展目标

Fig. 2 Goal of new distribution and consumption system

3.1 大规模新能源接入与系统安全稳定性的矛盾

新能源发展驶入快车道，随着新能源的大规模

接入，电力系统向“三高”转型成为必然趋势。电力电子设备响应快、精度高，但是其低惯性特征会导致整个系统惯性降低。同时，电力电子设备控制涉及多时间尺度，相互作用复杂，会极大地影响配电网的稳定性，频率、电压、功角等安全稳定问题将愈加明显。

3.2 复杂不确定性与系统经济性的矛盾

新能源本身具有极强的不确定性，极大考验着系统的调峰能力，而随着新型配用电系统用能方式的复杂化，例如多能源的互补性、电动汽车的随机性、用户响应的时滞性，会导致负荷侧不确定性更加复杂。源、荷侧的双重不确定性会增大配电系统峰谷差，而新能源发电在极端情况下的反调峰特性则会严重制约系统的消纳能力，降低配电系统运行的经济性，规划技术方法升级势在必行。

3.3 数字智能化与系统经济安全性的矛盾

新型配用电系统伴随着各类耦合设备及分布式能源设备的接入，逐渐具有高级量测体系与双向通信设施的大规模部署的特征^[21]。系统内多源数据(能源设备的状态数据、环境气象数据、终端用户的各类信息、配电网络的拓扑和运行数据等)均需要实时监测和采集，新型配用电系统成为一个强互动、强耦合的信息物理系统。基于此，系统数据信息采集、储存、分析、管理的开支不容忽视。与此同时，信息安全及行为安全在系统智能化的演变趋势下，成为数字技术与智能技术研究中的重要课题。

3.4 多调控手段与系统可靠性的矛盾

新型配用电系统具有丰富的分布式灵活性资源，是最大限度消纳新能源的同时维持系统正常运行的必要保障^[22-23]。实现系统的经济安全运行对系统可观可控能力有着较高要求，新型配用电系统作为复杂系统，集多能替代耦合设备端口、分布式能源、储能设备、柔性负荷、灵活用户响应于一体，控制变量复杂且耦合程度高。除此之外，人为因素，如用户用能极易受到环境、心理、政策的影响，人机互动，即插即用，在一定程度上会降低系统可控性，由此导致控制策略失效，系统可靠性降低。

总而言之，构建新型配用电系统面临的最大挑战是不断增长的电力需求和安全、可靠、经济、清洁、智慧电能供应之间的矛盾。新型配用电系统的使命就是：既要确保安全可靠的电力能源供应，又要达到绿色环保、经济高效、智能数字、可持续发展的目标，同时培养新一代复合型电力能源人才，

保障电力能源体系转型升级，更新换代。

4 未来的主要技术方向

纵观当前配电网，“源-网-荷-储”各个环节都发生了深刻的变革。新的形势和挑战孕育着新的机遇和市场，需要从理念、思维、技术、产品等方面进行创新。从宏观来看，有以下主要技术方向值得关注(见图 3)。

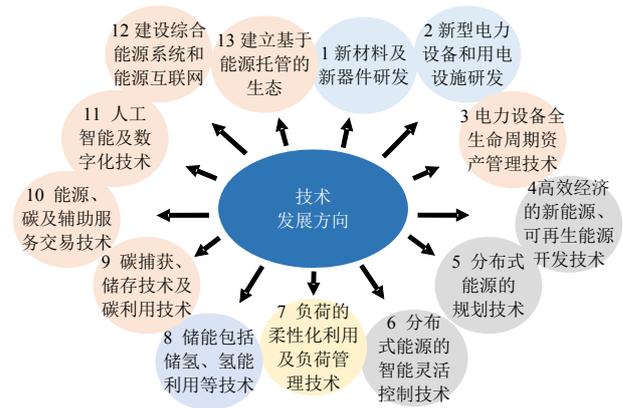


图 3 未来应该关注的技术方向

Fig. 3 Technical direction that should be paid attention to in the future

4.1 新材料及新器件研发

电力器件决定了电力设备的性能，进而决定了电力系统的特性。由分布式发电电源、储能装置、耦合设备、新能源汽车等可控负荷以及变流装置等有机融合的新型配用电系统，借助信息电子和电力电子技术，能够智能调控本地资源，充分发挥能源的互补性优势，为本地用户和配电网提供优质、可靠、可调度的电能。各类新材料是系统中能量变换、电力传输和运行控制的直接载体，直接决定运行效率、安全可靠性和系统成本。例如电阻率低、机械强度高、耐腐蚀、磨损性能好、性价比高的新型导电材料能够降低能耗，能源短缺和环境污染等问题；先进电工磁性材料应用于电网智能传感器，有助于实现信息采集和状态监测，提高系统运行的可靠性；新型绝缘材料和绝缘结构能够解决引入电力电子设备所导致的更加频繁的瞬时脉冲过电压问题^[24]；以氮化镓(GaN)、碳化硅(SiC)为代表的第三代半导体材料具有宽带隙、高电子饱和速度、高击穿电场、高热导率和低介电常数等优越的电子特性，基于此发展出的新一代微波射频器件和功率电子器件，能够为通信领域和电子领域的节能降耗提供技术支撑^[25]。

4.2 新型电力设备和用电设施研发

双碳目标对新型配用电系统中的电力设备以及用电设施提出了更高要求，安全、清洁、可靠、灵活、高效是设备研发的关键词。开发新一代智能配电设备，首先要颠覆配用电电器制造的传统观念，打破传统的模式体系，放弃测绘仿制等低端思维，立足未来数字化智能制造，探索中国的智能制造模式；其次，开展产品全生命周期的生态设计，包含创意、构思、原材料、制造工艺、使用、废弃后回收处理以及再生利用等各个环节；再次，在整个生命周期内贯穿“减量化、再利用、再循环”的 3R 原则，不仅考虑产品基本功能属性，还要预先考虑产品从设计到生产到使用再到回收的全过程中是否对环境造成负面影响。

创新是引领发展的第一动力，企业应该根据自身情况，从产业格局，竞争策略，产业链分析等多维度，科学、完整地规划未来发展。应用先进的计算机技术、电子技术、数字控制技术，灵活高效的通信技术、传感器技术，成熟的机械设计技术、纳米技术、人工智能技术、数字孪生等等诸多高新技术，开发新产品。加快推进数字经济、智能制造，形成新的增长点，实现企业转型。

具体新产品上，需要研发助力实现新型配用电系统的灵活快速开合技术和装置，通过系统拓扑、阻抗、运行方式的灵活动态调整，实现“源-网-荷-储”的快速协同，保障系统的安全稳定运行，提高综合技术经济性能；通过故障快速清除和设备快速保护，保障供电可靠性及设备、人身安全。开发新型电力电子设备，特别是软常开开关设备，通过控制连接馈线上的有功潮流和无功潮流，以实现平衡功率、改善电压、负荷转供、限制故障电流等功能。发、储、用一体化的聚合单元的标准化、模块化设备，融合检测、保护、计量等功能的新型电器等研发不可或缺。在能源互联网的大潮中，融合新技术，实现功能+监测+电子化+数字化+人工智能，从低端仿造跨越到高端制造，从单一产品向综合解决方案延伸，从制造工厂跨越到创新工厂。让低压电器制造与革新为低碳化、数字化、可持续发展贡献力量。

4.3 电力设备全生命周期资产管理技术

全生命周期理论^[26]主要是在保证设备自身性能和运作可靠性的基础上，考虑设备从规划设计、设备采购，一直到后续维护修理、退役报废的各个

步骤，立足于设备的长期经济效益，保证设备在整个生命周期中实现成本最小的一种管理方式^[27]。

如前所述，新型配用电系统中新型电力设备和用电设备繁杂多样，配电设备的全寿命管理以及生态设计极其重要，必须在实现经济性的同时，保障各类设备安全运作。特别是随着越来越多的分布式可再生能源和新型负荷的接入，配用电设备的资产管理主体和责任并不十分明确。全生命周期运维包括采购需求阶段、设备验收阶段、生产运营阶段、报废退役阶段，在资产管理中要实现一体化设计，保证数据共享，优化管理，结合“互联网+”等技术拓展管理空间，提升管理效率。

4.4 高效经济的新能源、可再生能源开发技术

新能源开发技术的研究一方面能降低传统能源的压力，减少二氧化碳排放，另一方面能有效提升能源利用效率，节约开发成本，提高经济利润。随着技术进步，部分可再生能源已达到较高的应用水平，如风能、太阳能，目前在配电系统中已经占据主要地位，但开发更低成本、更高效率的新材料和光伏板集成新技术仍然十分必要。同时针对氢能、地热能、生物质能等其他能源的开发仍然需要继续推动，例如制-储-运氢技术^[28]、地热能多级利用技术^[29]以及生物燃料技术^[30]等。

除此之外，新能源利用技术的不成熟也会降低新能源的利用效率。协同开发集中式和分布式新能源，降低输电损耗，提高新能源利用效率，提升电网对新能源的消纳能力，从而带来更好的社会经济效益^[31]。

4.5 分布式能源的规划技术

分布式能源归属主体的独立性导致规划与优化难以统一，如何打破各个主体间的信息沟通壁垒、调度协同壁垒，是规划与优化问题的关键所在。从技术层面考虑，研发不确定条件下动态多目标概率优化方法和算法是当务之急。新型配用电系统所具有的“一低、两峰、三高、多随机因素”特征致使规划需要考虑的内容繁多复杂，包括强随机性的运行过程，强不确定性负荷需求响应，多类型储能系统等，因此在规划阶段就必须考虑更多的技术约束条件，包括电压水平、短路电流水平、电能质量（闪变、谐波）等。从数学上来看，考虑运行过程的配电系统规划将具有非线性、动态性、多目标性不确定性等复杂性特征。涉及多目标及众多不确定因素的组合优化的规划方法非常复杂，综合资源和运

行的多元目标优化规划至关重要。

在规划模型方面,应从确定型模型向计及电源负荷双侧不确定性的风险评估和概率规划模型转变;在时间尺度方面,应从特定时间断面模型向合理的时间序列模型转变;在规划方法上,应从以成本为导向向以风险为导向转变。在此基础上,开展含分布式能源的网络分析与评价,配电系统与通信网的融合及优化规划,综合可靠性、风险和经济性分析的模型和仿真工具的研发应当受到重视^[32]。

4.6 分布式能源的智能灵活控制技术

就配电网而言,分布式能源的接入可以平衡局部节点的功率波动,实现能量调度优化,使得系统具备更高的自控性。在充分解决分布式能源统一调度的基础之上,并网运行的分布式发电系统与电网互为储备,能够充分发挥可再生能源的经济性同时弥补其来源的不稳定性^[33-34]。

而大规模分布式能源接入带来的强不确定性、分布式资源低可观性和低可控性以及电力电子并网装置的低惯量和弱抗扰特性^[35],也会给新型配用电系统的安全可靠运行带来极大挑战,因此需要实现分布式能源的智能控制,在保障系统稳定性的基础上,对具有时变性和不确定性的分布式能源进行灵活使用和调度,同时加强需求侧用户的协调交互,发掘分布式能源的最大利用潜力。如何高效控制调度星罗棋布的分布式能源是当前世界一大难题。可根据分层分级,区域优化的原则,采用诸如人工智能、虚拟电厂^[20,36]等技术,开发人-机-物有机结合,源随荷动的智能运维和调度控制,以提高目前配用电系统最稀缺的灵活性。

4.7 负荷的柔性化利用及负荷管理技术

柔性负荷能够主动参与电网运行控制,与电网进行能量互动,例如新型配用电系统中的电动汽车、空调以及分布式电源等。柔性负荷的利用能够提升系统弹性,缓解供需侧矛盾,但是柔性负荷的不确定性也将为电力系统带来安全和可靠性隐患,因此对柔性负荷调控技术的研究至关重要:基于柔性负荷的特性对其进行分类建模,充分发掘负荷弹性潜力;积极完善柔性负荷机制,推进示范工程建设^[37];使用智能技术对用户行为进行差异化分析,提升调控精准程度^[38-39]等。负荷柔性化利用是未来开发智慧用能节能的重要环节,有利于促进能源节约型社会的发展^[40]。

除此之外,分布式电源、智能电网技术和新型

可控负载(如电动汽车、智能家电)的部署对电力负荷侧管理系统提出了新的挑战^[41]。作为集现代先进的计算机技术、通信技术、网络信息技术、软件技术于一体的电力负荷管理系统,其运行功能与发展目标也从负荷控制转变为负荷管理。有效的负荷管理能够减轻新型能源系统因新能源不稳定及负荷侧不确定造成的供需矛盾,提高新能源消纳能力,改善电网运行状况,带给电力系统稳定的静态与动态效益^[42]。目前电力负荷管理技术已具备电费管理、电能损耗管理、窃电分析以及数据共享等功能。随着数据驱动、虚拟电厂^[43]、5G通信等技术的发展,电力负荷管理系统将在负荷数据预测、负荷协调控制技术以及管理实效性方面得到极大地提升,有力保障各类分布式电源、电动汽车、储能系统等不同类型的元件的协同运行,提高资源合理利用率。

4.8 储能包括储氢、氢能利用等技术

构建综合能源体系下的新型配用电系统需要经历逐步升级和动态调整过程,储能技术是其发展的重要基础和关键支撑。该技术具有双向功率特性和灵活调剂能力,可以实现能源“断点续传”,保障配用电系统用电安全,同时支撑能源和信息的实时交互,可有效改善配用电系统调峰能力不足的状况^[44]。

氢能作为一种高能量密度和无污染绿色能源,具有极佳的储能能力。储氢可以进行大规模、长周期存储,其灵活应用特点可有效适用于配用电系统复杂网络结构,解决其他新能源波动性、随机性问题,使输出可控制、可调度^[45]。

当今中国能源结构中,电力系统供能依旧以煤炭、石油等为主要燃料,化石燃料的大量燃烧对实现碳中和目标造成严重阻碍。同时,新能源通常远离需求中心,如西部地区的产能远远超过地区的能源需求,虽然可通过远距离输电网输送到需求地区,但由于运输成本昂贵,难以实现。可再生能源转氢气后再运输到用电区域直接发电可有效解决可再生能源远距离传输问题。同时,氢能作为清洁优质能源,有必要也有潜力实现在配用电系统的广泛应用^[46]。

4.9 碳捕获、储存技术及碳利用技术

化石能源消耗产生的温室气体是导致气候变化甚至出现极端气候的最直接因素。然而,当今能源供应仍以化石燃料为主,探索更加高效、更加实用的途径调控气候变化变得愈发重要^[47]。

碳捕获和存储技术能够在燃烧源排放中分离出二氧化碳, 并进行收集、净化和压缩^[48], 降低产电过程中二氧化碳的排放, 进而减少大气中二氧化碳含量。该技术能够在保持能源耗费现状的前提下, 降低对环境的损害, 维持能源的高效利用^[49]。储存的二氧化碳可以通过资源化利用技术合成高纯度一氧化碳、化肥生产等, 或通过化学方法转化为其他产品, 如燃料、化学品等, 实现对二氧化碳资源的有效利用, 进一步推进碳中和目标的实现。

4.10 能源、碳及辅助服务交易技术

为了刺激竞争和奖励服务、产品和技术的创新, 电力市场应该向新的参与者开放。此外, 它们应向投资者提供正确的信号, 以确保以最具有成本效益的方式进行必要的长期投资。

如前所述, 新型配用电系统中分布式主体作用得到强化, 该作用不仅体现在分布式能源的自消纳, 还体现在各个单元间的能源交易(包括常规电交易、绿电交易)、碳交易^[50-51]以及辅助服务交易的自主权^[52]。明确各类交易市场的多参与主体的作用, 如常规电交易市场中的微电网、负荷聚合商、售电商、配网运营商; 绿电交易市场中的售电商、终端用户、分布式能源、配网、监管中心、认证中心^[53-54]; 碳交易市场中的监管部门及碳排放源等。分析交易主体的数据特征, 研究主体交易数据的时空特性和偏好特性, 建立交易资源的合理价格模型, 采用区块链、智能合约等技术实现点对点交易, 对资源分配进行整体调控。

4.11 人工智能及数字化技术

人工智能和数字化技术是实现配电系统效率提升和可持续发展的必由之路^[55]。在新型配用电系统这样一个强耦合强关联的复杂系统中, 这类新技术的合理应用必将提升配网的管理水平和能源利用效率, 为配电系统决策调度、运行、交易进行有力辅助和指导。

人工智能技术目前正在配电自动化、负荷预测预警、故障诊断^[56]、智能巡检^[57]等方面展开应用并发挥了重要作用, 极大减低了人为因素导致的设备误差。而数字化技术在智能终端和智能电柜方面的应用也实现了系统的实时监控和科学管理^[58]。

应继续以应用为驱动, 以新方法开发融合“云大物深”和人工智能技术。例如开发基于数字孪生的数字化监-管-控-验平台, 实现全系统的可靠数据监测、灵活服务管理、精准运行控制以及调度方

案检验等功能。结合大数据技术、数据融合技术、数字孪生技术、三维仿真技术以及物联网技术^[59], 实现电网运营态势真实还原与全景再现, 集成多元核心业务, 深层次应用基于三维地理信息系统的规划设计^[60], 对电网进行全域立体化应急管理, 同时为配用电系统提供空间信息支撑、为系统规划、设计、建设以及运行提供决策支持服务。促进新型配用电系统的透明化、智能化和精细化, 最大程度利用数据资源。

数字化进程中数据和互联网安全也是不可忽视的重要方向。除了对抗攻击、数据中毒、成员推理等其他已知的安全问题之外, 受恶意软件感染的神经网络也将成为深度学习的未来中真正的威胁之一。在研究安全问题的同时, 也必须对用于图片分析或语音识别的数量庞杂的数据背后所隐藏的东西保持警惕。

4.12 建设综合能源系统和能源互联网

综合能源系统利用信息系统和先进能源技术, 通过对多种能源(如电能、天然气、热能)的产生、分配、转换、存储、消费等环节进行协调优化后, 最终形成一种自组织的高度有序的现代综合高效智能能源系统。能源互联网(非广义)作为各类能源的横向交联, 能够实现能源的多能补、梯级利用, 是节能减排的需求下有力的能源结构支撑^[61], 多类能源的接入能有效减轻配电系统的供能负担, 同时能源替代也能提高配电系统的安全、经济、环保、灵活等特性。新型配用电系统作为综合能源系统和能源互联网配能侧的重要组分, 需要适应大系统互联互通的特点。明确新型配用电系统在综合能源系统中的地位与作用, 尝试以园区级综合能源系统为单位, 打破配能网络壁垒, 深入研究可再生能源的一体化, 多种能源阶梯互补的综合能源系统的架构、管理和市场机制, 实现多能网络协同调度与控制。

4.13 建立基于能源托管的生态

能源托管指节能服务公司对用能企业的能源购进、使用以及用能设备效率、用能方式、政府节能考核进行全面承包管理; 同时提供资金实现技术和设备更新, 实现节能和节约能源费用, 用能单位按照合同约定向节能服务公司支付能源费用及日常维护费用^[62-63]。目前我国能源服务公司存在业务水平不足、运行人员专业能力参差不齐、自动运行手段不足、行业发展规模小、能源托管模式不透明

等问题^[64]。在综合能源服务概念盛行的当下,传统的能源托管服务模式也被注入了综合能源服务的概念,成为面向用能企业提供能源管理、机电运维托管、设备管理、能源费用托管、区域用能规划咨询、节能技改、多能互补能源站建设与运营的一站式设备与能源综合管理的综合能源服务解决方案^[65]。基于能源托管模式的综合能源服务解决方案具有规划系统、覆盖全面、责任清晰、持续优化、互利双赢等特点,能够最大程度的实现节能降耗,推动用能企业的智慧管理升级。

归根结底,新型配用电系统是实现效率提升和绿色可持续发展的必由之路,是传统电力系统的继承和进化,在深度和广度、技术和方法等方面都赋予了新的内涵和外延。总之,为了实现综合能源系统这一未来的理想目标,应以新型配用电系统的实现为前提和基础,科学、理智、有序地发展。

5 结语

“碳达峰、碳中和”已成为全球范围内实现可持续发展的重要共识。综合能源体系下以新能源为主体、含高比例电力电子装备的未来电力能源系统正在形成,配用电行业面临着前所未有的大变局。

面对新挑战,新机遇,亟需新理念,新思路,“与众不同”的创新才是科学真正的价值。在科研创新方面,要摒弃跟班式科研,做真学问,追求原始创新。跳出大电网,交流电的思维模式和束缚,深入研究新市场,新模型、新算法,新规划、新技术。

首要解决的问题是思想理念的转变:在研究对象上,传统配电网向主动配电系统转变,需要将软件和硬件,人和机器,物理和信息和社会融合;研究范围上,从单纯配电网向主动配电网和用电相结合,进而向综合能源系统体系下的配用电系统转变;思维方法上,从传统的物理思维向生物思维方向转变,赋能配电系统容错机制和智能进化优化能力;市场理念上,从单纯的市场思维向技术和市场相结合的思维方向转变,追求适应、联系、共生、共赢,把技术视野下的“硬件组合”和经济社会以及人文相关的“软件组合”相结合,从而更好地解决复杂的、跨界的、系统性的问题。

我们必须深入分析面临的挑战及技术成熟程度、可行性和经济性,前瞻未来发展,进而科学理智地制定切实可行的技术路线,因地制宜,大道至简。希望从基础理论、新材料、关键技术、软硬件

设备处发力,最终实现可复制的工程示范,探索颠覆性技术,实现能源技术自主创新。

期待产学研用专家学者共同发力,供配用电制造业融合发展,引领传统配电网颠覆重构,实现硬件设施腾笼换鸟、软件控保更新换代、企业行业转型升级,为构建新型配用电系统,实现双碳宏伟目标做出应有的贡献。

参考文献

- [1] 万宇, 尚凯元, 屈佩. 实现“双碳”目标 共建绿色家园[N]. 人民日报, 2021-09-08(003).
WAN Yu, SHANG Kaiyuan, QU Pei. Achieve the goal of "dual carbon" and build a green home[N]. The People's Daily, 2021-09-08(003)(in Chinese).
- [2] GOVERNMENT H. Energy white paper: powering our net zero future[R]. 2020.
- [3] 徐韶峰. 拥抱碳中和, 助力构建电网低碳可持续未来[J]. 电气技术, 2020, 21(12): T2-T3.
XU Shaofeng. Embrace carbon neutrality and help build a low-carbon and sustainable future for power grids[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(12): T2-T3(in Chinese).
- [4] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035(in Chinese).
- [5] 王彩霞, 时智勇, 梁志峰, 等. 新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 37-48.
WANG Caixia, SHI Zhiyong, LIANG Zhifeng, et al. Key technologies and prospects of demand-side resource utilization for power systems dominated by renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 37-48(in Chinese).
- [6] 杨舒. 实现碳中和 基础设施建设大有可为[N]. 光明日报, 2021-06-29(009).
YANG Shu. There is much to be done to achieve carbon-neutral infrastructure[N]. Guangming Daily, 2021-06-29(009)(in Chinese).
- [7] 周勤勇. 如何构建符合“双碳”目标的新型电力系统[J]. 能源, 2021(10): 28-32.
ZHOU Qinyong. How to build a new power system in line with the goal of "dual carbon"[J]. Energy, 2021(10): 28-32(in Chinese).
- [8] 吴克河, 王继业, 李为, 等. 面向能源互联网的新一代电力系统运行模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 966-978.
WU Kehe, WANG Jiye, LI Wei, et al. Research on the

- operation mode of new generation electric power system for the future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 966-978(in Chinese).
- [9] 鞠平, 周孝信, 陈维江, 等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 2-11.
JU Ping, ZHOU Xiaoxin, CHEN Weijiang, et al. "Smart Grid Plus" research overview[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 2-11(in Chinese).
- [10] D'ADAMO C, JUPE S, ABBEY C. Global survey on planning and operation of active distribution networks - Update of CIGRE C6.11 working group activities[C]// Proceedings of the 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Prague: IEEE, 2009.
- [11] 马钊. “双碳”目标倒逼新型电力系统建设提速[N]. 中国能源报, 2021-03-22(004).
MA Zhao. The "dual carbon" target has accelerated the construction of new power systems[N]. China Energy News, 2021-03-22(004)(in Chinese).
- [12] 刘姝, 高媛, 单俊玮. 面向主动配电网的源-网-荷-储新型能源协调控制技术研究[J]. 电子测试, 2018(4): 36-37, 8.
LIU Shu, GAO Yuan, SHAN Junwei. Research on source network load storage new energy coordination control technology for active distribution network[J]. Electronic Test, 2018(4): 36-37, 8(in Chinese).
- [13] 王成山, 孙充勃, 李鹏. 主动配电网优化技术研究现状及展望[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 8-15.
WANG Chengshan, SUN Chongbo, LI Peng. Review and perspective on the optimization of active distribution network[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 8-15(in Chinese).
- [14] 尚宇炜, 周莉梅, 马钊, 等. 数字化主动配电系统初探[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1760-1772.
SHANG Yuwei, ZHOU Limei, MA Zhao, et al. Preliminary study of digitalized active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1760-1772(in Chinese).
- [15] 龚钢军, 张心语, 张哲宁, 等. 基于区块链动态合作博弈的多微网共治交易模式[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 803-818.
GONG Gangjun, ZHANG Xinyu, ZHANG Zhening, et al. Multi-microgrid co-governance transaction model based on dynamic cooperation game of blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 803-818(in Chinese).
- [16] LI Zhetao, KANG Jiawen, YU Rong, et al. Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(8): 3690-3700.
- [17] 本刊讯. 国家电网系统内全国首个分布式新能源调度业务综合试点建设在保定启动[J]. 电器工业, 2021(8): 4. Chinese Journal. The first comprehensive pilot construction of distributed new energy dispatching service in national power grid system starts in Baoding[J]. China Electrical Equipment Industry, 2021(8): 4(in Chinese).
- [18] 汤必强, 李亚平, 杨胜春. 新一代人工智能将给电力调度带来哪些改变[N]. 国家电网报, 2021-09-28(008).
TANG Biqiang, LI Yaping, YANG Shengchun. What changes will the new generation of artificial intelligence bring to power scheduling[N]. State Grid News, 2021-09-28(008)(in Chinese).
- [19] 郑婕莹, 朱婷婷, 冷迪, 等. 南方电网做优数字电网 赋能新型电力系统[N]. 深圳特区报, 2021-12-16(A07).
ZHENG Jieying, ZHU Tingting, LENG Di, et al. China Southern Power Grid to optimize digital grid to enable new power system[N]. Shenzhen Special Zone Daily, 2021-12-16(A07)(in Chinese).
- [20] MOUTIS P, ALIZADEH-MOUSAVI O. Digital twin of distribution power transformer for real-time monitoring of medium voltage from low voltage measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 1952-1963.
- [21] 董朝阳, 陈莹莹, 罗逢吉. 未来主动配电网中的新型数据驱动应用: 技术, 展望与挑战[J]. 电力建设, 2017, 38(5): 2-10.
DONG Zhaoyang, CHEN Yingying, LUO Fengji. Innovative data-driven applications in future active distribution network: technologies, prospect and challenges[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(5): 2-10(in Chinese).
- [22] 苏剑, 尚宇炜, 马钊, 等. 2019CIGRE 成都国际研讨会配电技术报道[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2642-2648.
SU Jian, SHANG Yuwei, MA Zhao, et al. Technical review of power distribution technologies in CIGRE Chengdu 2019 symposium[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2642-2648(in Chinese).
- [23] 杨运国, 侯健生, 边晓燕, 等. 面向高比例新能源配电网的灵活性资源综合评价[J]. 供用电, 2021, 38(11): 68-76.
YANG Yunguo, HOU Jiansheng, BIAN Xiaoyan, et al. Comprehensive evaluation of flexible resources for high penetration of renewable energy sources integrated to the distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(11): 68-76(in Chinese).

- [24] THABET A, FOUAD M. Dielectric strength and patterns of partial discharges in nanocomposites insulation of three-core belted power cables[J]. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 2022, 23(2): 136-148.
- [25] ADACHI K, MUTO H, OKAMOTO K, et al. Development of new types of insulators for electric power apparatuses using nanocomposites and functionally graded materials[C]//*Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Dielectrics(ICD)*. Valencia: IEEE, 2020: 317-320.
- [26] 李湘旗, 禹海峰, 李欣然, 等. 考虑储能系统动态全寿命周期特性的多功能应用需求规划方法[J]. *电力建设*, 2020, 41(1): 45-54.
LI Xiangqi, YU Haifeng, LI Xinran, et al. Planning method for multi-functional application demand considering dynamic life cycle characteristics of energy storage[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(1): 45-54(in Chinese).
- [27] 郑楚玥. 基于全生命周期理论的输变电设备资产管理探讨[J]. *通信电源技术*, 2018, 35(10): 249-250.
ZHENG Chuyue. The discussion of transmission and transformation equipment asset management based on the whole life cycle theory[J]. *Telecom Power Technology*, 2018, 35(10): 249-250(in Chinese).
- [28] 李争, 张蕊, 孙鹤旭, 等. 可再生能源多能互补制-储运氢关键技术综述[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(3): 446-462.
LI Zheng, ZHANG Rui, SUN Hexu, et al. Review on key technologies of hydrogen generation, storage and transportation based on multi-energy complementary renewable energy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(3): 446-462(in Chinese).
- [29] LIMBERGER J, BOXEM T, PLUYMAEKERS M, et al. Geothermal energy in deep aquifers: a global assessment of the resource base for direct heat utilization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 961-975.
- [30] TURSI A. A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion[J]. *Biofuel Research Journal*, 2019, 6(2): 962-979.
- [31] 潘林辉. 新能源开发中的电气工程自动化节能环保技术[J]. *中国高新科技*, 2020(12): 94-95.
PAN Linhui. Energy saving and environmental protection technology for electrical engineering automation in new energy development[J]. *China High and New Technology*, 2020(12): 94-95(in Chinese).
- [32] 罗凯. 分布式能源接入智能配电网的关键性问题[J]. *中阿科技论坛(中英文)*, 2021(9): 108-111.
LUO Kai. Key issues of distributed energy's access to smart distribution network[J]. *China-Arab States Science and Technology Forum*, 2021(9): 108-111(in Chinese).
- [33] 曹永吉, 张恒旭, 施啸寒, 等. 规模化分布式能源参与大电网安全稳定控制的机制初探[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(18): 1-8.
CAO Yongji, ZHANG Hengxu, SHI Xiaohan, et al. Preliminary study on participation mechanism of large-scale distributed energy resource in security and stability control of large power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(18): 1-8(in Chinese).
- [34] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(6): 1289-1298.
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(6): 1289-1298(in Chinese).
- [35] 孙毅, 李泽坤, 许鹏, 等. 异构柔性负荷建模调控关键技术及发展方向研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(24): 7146-7158.
SUN Yi, LI Zekun, XU Peng, et al. Research on key technologies and development direction of heterogeneous flexible load modeling and regulation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(24): 7146-7158(in Chinese).
- [36] WU Chenyu, GU Wei, ZHOU Suyang, et al. Coordinated optimal power flow for integrated active distribution network and virtual power plants using decentralized algorithm[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(4): 3541-3551.
- [37] 姜婷玉, 李亚平, 鞠平, 等. 柔性负荷控制及模型研究综述[J]. *智慧电力*, 2020, 48(10): 1-8.
JIANG Tingyu, LI Yaping, JU Ping, et al. Overview of modeling method for flexible load and its control[J]. *Smart Power*, 2020, 48(10): 1-8(in Chinese).
- [38] 马钊, 梁永亮, 尚宇炜, 等. CIGRE SC6 2020 专题报道暨主动配电系统发展动向与展望[J]. *电网技术*, 2021, 45(4): 1471-1479.
MA Zhao, LIANG Yongliang, SHANG Yuwei, et al. CIGRE SC6 2020 special report and development trend analysis of active power distribution systems[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(4): 1471-1479(in Chinese).
- [39] 马钊, 梁惠施, 苏剑. 主动配电系统规划和运行中的重要问题[J]. *电网技术*, 2015, 39(6): 1499-1503.
MA Zhao, LIANG Huishi, SU Jian. Important issues in planning and operation of active distribution system[J].

- Power System Technology, 2015, 39(6): 1499-1503(in Chinese).
- [40] 胡泽春, 谢旭, 张放, 等. 含储能资源参与的自动发电控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5080-5087.
- HU Zechun, XIE Xu, ZHANG Fang, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5080-5087(in Chinese).
- [41] JI Yuting, BUECHLER E, RAJAGOPAL R. Data-driven load modeling and forecasting of residential appliances [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2652-2661.
- [42] DOS REIS F B, TONKOSKI R, HANSEN T M. Synthetic residential load models for smart city energy management simulations[J]. IET Smart Grid, 2020, 3(3): 342-354.
- [43] 张卫国, 宋杰, 杨璐彤, 等. 考虑电动汽车充电需求的虚拟电厂负荷均衡管理策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 118-126.
- ZHANG Weiguo, SONG Jie, YANG Lutong, et al. Load balancing management strategy for virtual power plants considering charging demand of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 118-126(in Chinese).
- [44] XING Xiaofan, WANG Rong, BAUER N, et al. Spatially explicit analysis identifies significant potential for bioenergy with carbon capture and storage in China[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 3159.
- [45] 高乾恒, 黄帅飞, 李二超, 等. 市场环境下含氢储能的售电公司优化调度[J]. 电力建设, 2019, 40(4): 42-48.
- GAO Qianheng, HUANG Shuaifei, LI Erchao, et al. Optimal dispatching of electricity retailers considering hydrogen storage in the electricity market[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(4): 42-48(in Chinese).
- [46] MEHRJERDI H, HEMMATI R. Wind-hydrogen storage in distribution network expansion planning considering investment deferral and uncertainty[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020, 39: 100687.
- [47] 盛戈皞, 钱勇, 罗林根, 等. 面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3072-3084.
- SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Linggen, et al. Key technologies and application prospects for operation and maintenance of power equipment in new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3072-3084(in Chinese).
- [48] DING Tao, YANG Qingrun, WANG Min, et al. Multi-period economic dispatch considering combined carbon and electricity networks[J]. Electric Power Components and Systems, 2018, 46(10): 1173-1184.
- [49] AKBARI-DIBAVAR A, MOHAMMADI-IVATLOO B, ZARE K, et al. Economic-emission dispatch problem in power systems with carbon capture power plants[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 3341-3351.
- [50] ZHANG Tingting, WANG Ling, CHEN Hua. The game of interests in China's unified carbon market: a perspective of sustainability[J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2020, 19(9): 1535-1541.
- [51] YAN Mingyu, SHAHIDEHPUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Blockchain for transacting energy and carbon allowance in networked microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4702-4714.
- [52] AL-OBAIDI A A, FARAG H E Z. Electric vehicles optimal scheduling for peer-to-peer energy trade and ancillary services provision to the grid[C]//Proceedings of 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Montreal: IEEE, 2020.
- [53] GERLACH H, ZHENG Xuemei. Preferences for green electricity, investment and regulatory incentives[J]. Energy Economics, 2018, 69: 430-441.
- [54] LI Taoyong, ZHANG Jing, WANG Jiani, et al. Design ideas of green energy market trading mechanism based on charging network and vehicle network[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 233(5): 052011.
- [55] CHAO Yue, YUAN L. Research on artificial intelligence algorithm for reactive power optimization of distribution network[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1345(5): 052054.
- [56] 张成洲, 王瑜, 徐群, 等. 人工智能在输配电网故障诊断中的应用分析[J]. 电子制作, 2021(8): 65-66, 27.
- ZHANG Chengzhou, WANG Yu, XU Qun, et al. Application analysis of artificial intelligence in fault diagnosis of transmission and distribution network[J]. Practical Electronics, 2021(8): 65-66, 27(in Chinese).
- [57] 刘宇, 郑琳, 于力, 等. 基于多传感器融合技术的配电室智能巡检系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(2): 63-68.
- LIU Yu, ZHENG Lin, YU Li, et al. Design of distribution room intelligent inspection system based on multi sensor fusion technology[J]. Industrial Instrumentation &

- Automation, 2021(2): 63-68(in Chinese).
- [58] 周卫宁, 郝勇. 基于数字化技术的智慧配电系统及其设计应用[J]. 电子技术与软件工程, 2020(13): 204-205. ZHOU Weining, HAO Yong. Intelligent distribution system based on digital technology and its design and application[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2020(13): 204-205(in Chinese).
- [59] LIU Tao, YU Haobo, YIN Hongling, et al. Research and application of digital twin technology in power grid development business[C]//Proceedings of 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering. Chongqing: IEEE, 2021: 383-387.
- [60] 熊雄, 黄晓莉. 基于 GIS 的数字电网平台设计与应用[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(10): 28-33. XIONG Xiong, HUANG Xiaoli. Design and application of digital power grid platform based on GIS[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(10): 28-33(in Chinese).
- [61] 潘尔生, 宋毅, 原凯, 等. 考虑可再生能源接入的综合能源系统规划评述与展望[J]. 电力建设, 2020, 41(12): 3-15. PAN Ersheng, SONG Yi, YUAN Kai, et al. Review and prospect of integrated energy system planning considering the integration of renewable energy [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(12): 3-15(in Chinese).
- [62] FENG Luyao, GUO Jingjuan, LI Ying. Financing mode of energy performance contract based on network joint guarantee and carbon emission option for coastal areas[J]. Journal of Coastal Research, 2020, 197(S1): 317-322.
- [63] XU Song, FANG Lei, GOVINDAN K. Energy performance contracting in a supply chain with financially asymmetric manufacturers under carbon tax regulation for climate change mitigation[J]. Omega, 2022, 106: 102535.
- [64] TAN B. Design of balanced energy savings performance contracts[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(5): 1401-1424.
- [65] RUAN Hongquan, GAO Xin, MAO Chaoxuan. Empirical study on annual energy-saving performance of energy performance contracting in China[J]. Sustainability, 2018, 10(5): 1666.



马钊

在线出版日期: 2022-06-22。

收稿日期: 2021-12-02。

作者简介:

马钊(1957), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为先进配电和分布式能源系统, 智能电器设备设计/开发与技术咨询、中低压直流配电技术、综合能源、人工智能在电力能源系统中的应用, zhao.ma@sdu.edu.cn;

张恒旭(1975), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统同步测量与稳定控制, zhanghx@sdu.edu.cn;

*通信作者: 赵浩然(1983), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为风机与风电场控制、风电并网、风电场数字孪生、综合能源系统, hzhao@sdu.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

New Mission and Challenge of Power Distribution and Consumption System Under Dual-carbon Target

MA Zhao, ZHANG Hengxu, ZHAO Haoran*, WANG Mengxue, SUN Yuanyuan, SUN Kaiqi
(School of Electrical Engineering, Shandong University)

KEY WORDS: dual-carbon target; distribution and consumption system; digitalized active distribution systems; distributed renewable energy

Driven by the goals of carbon neutrality and carbon peak, the energy revolution and digital revolution promote the transformation of the traditional distribution network to a new system form which refers to an active distribution and consumption system taking the new energy as the main body and integrating the new energy, distribution network, load, and storage. Furthermore, with the development of science and technology and the improvement of social requirements, distribution system faces significant challenges and unprecedented opportunities, such as configuration mode subversion, enterprise transformation, and product upgrading.

Technical evolution diagram of power distribution system is shown in Fig. 1. By reviewing the evolution of the distribution system, this paper analyzes the current distribution system's characteristics of "one-low, two-peak, three-high and multiple random factors." These characteristics refer to the low inertia of the system; two peak loads in summer and winter; a high proportion of new energy + a high proportion of power electronic equipment + a high growth of DC load; random fluctuation of power generation output and load, uncertainty in technology, economic market, and risk.

Starting from the original aspiration and the

primary task of power distribution network, combined with the requirement of the dual-carbon target, green consumption, and the circular economy, according to the current technology characteristics of intelligent, digital, low carbon, and the development status of electric equipment, this paper analyzes the necessity of transforming from traditional distribution network to the digitalized active distribution system as well as the necessity of constructing new distribution and consumption system under integrated energy system. Then, the new distribution and consumption system structure is preliminarily conceived in this paper. Five basic requirements and the new mission of the distribution and consumption system in the new era are analyzed. The five basic requirements are function safety, reliable performance, green technology, intelligent digital, economical and efficient. Combined with these five dimensions of development goals, this paper sums up the main difficulties and challenges faced in developing a new distribution and consumption system, proposes and looks forward to the future important technology development directions. Finally, the authors give some immature views and suggestions, hoping to start a discussion.

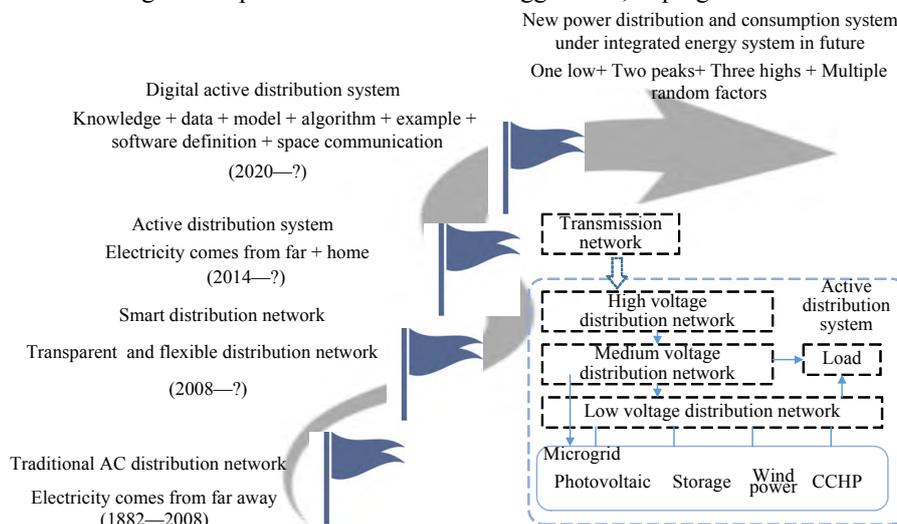


Fig. 1 Technical evolution diagram of power distribution system