

现代智慧配电网发展方向与 关键技术框架研究

娄奇鹤¹, 李彦斌¹, 王登政², 肖智宏³, 韩柳³, 高星乐^{3,4}

(1. 华北电力大学经济与管理学院, 北京市 102206; 2. 国家电网有限公司, 北京市 100031; 3. 国网经济技术研究院有限公司, 北京市 102209; 4. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院, 石家庄市 050023)

摘 要:【目的】随着“双碳”目标的驱动与新型能源体系建设的深化,以分布式电源、电动汽车和可控用户侧资源为代表的新型源荷发展迅速,占比达到新高度。新型源荷功率的波动性和随机性对配电网的安全运行和灵活调控提出了新的挑战,迫切要求配电网向现代升级、向智慧升级。【方法】针对现代智慧配电网发展面临的形势要求,分析了现代智慧配电网具备的内涵特征,阐述了配电网的智慧化需求及发展重点。针对配电网建设的多样性和差异化特点,结合微电网协调发展、充电设施高效承载、新型储能高效利用、城乡配电网升级、源网荷储高效协同五个典型场景,对传统配电网向现代智慧升级的关键技术进行了探讨。围绕现代智慧配电网的内涵特征和发展重点,对未来配电网的技术发展方向和建设重点进行了展望。【结果】配电网亟需通过高质量发展建设,升级为“现代智慧配电网”,全面提高配电网安全供电保障能力、清洁能源消纳能力、多元负荷承载能力、优化配置资源能力。【结论】现代智慧配电网作为新型电力系统的重要组成部分,具备新型电力系统全部要素,将持续承接新要素的广泛接入、承载新业态新模式的蓬勃发展。

关键词:现代智慧配电网;新型能源体系;分布式电源;源网荷储协同

中图分类号: TM72

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2025)05-0069-15

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.05.007

Framework for the Development Direction and Key Technologies of Modern Smart Distribution Networks

LOU Qihe¹, LI Yanbin¹, WANG Dengzheng², XIAO Zhihong³, HAN Liu³, GAO Xingle^{3,4}

(1. College of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. State Grid Economic and Technological

Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 4. Economic and Technological Research

Institute of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050023, China)

ABSTRACT: [Objective] Driven by the “dual carbon” goal and the ongoing development of new energy systems, renewable sources and novel loads—such as distributed generation, electric vehicles, and controllable user-side resources—have expanded rapidly, reaching unprecedented levels. The fluctuation and randomness of these new energy sources and loads pose significant challenges for the safe operation and flexible regulation of distribution networks. Consequently, there is an urgent need to modernize and enhance the intelligence of the distribution networks. [Methods] This study analyzes the characteristics and underlying principles of modern smart distribution networks and outlines the intelligence requirements and development priorities for these networks. Given the diversity in distribution network construction, the key technologies for upgrading conventional distribution networks to modern and intelligent systems are explored across five representative scenarios: coordinated microgrid development; efficient integration of charging facilities; optimal utilization of new energy storage technologies; modernization of urban and rural distribution networks; and seamless coordination of generation, network, load, and storage. Based on these connotations, characteristics, and development priorities of modern smart distribution networks, the technical development trajectory and construction priorities for future distribution networks are forecasted. [Results] It is imperative to upgrade the distribution network to a “modern smart distribution network” via high-

quality development and construction. Such upgrades will significantly enhance the network's capability to ensure reliable power supply, support clean energy consumption, accommodate diverse loads, and optimize resource allocation.

[Conclusions] As an critical element of the new power system, the modern intelligent distribution network integrates all fundamental components of the new power system. It will continue to facilitate the seamless integration of emerging technologies and foster the development of novel business structures and operational models.

This work is supported by the National Social Science Foundation of China (No. 23BJL006).

KEYWORDS: modern smart distribution network; new energy system; distributed generation; coordination of generation, network, load, and storage

0 引言

配电网是重要的国家基础设施,覆盖城乡区域,连接千家万户,承担着广泛的政治责任、经济责任、社会责任^[1]。在推进中国式现代化、建设新型能源体系的新时代,保障电力安全可靠供应仍是配电网发展的首要责任,支撑能源清洁低碳转型成为配电网发展的重要任务,配电网发展面临更高要求、更高标准。传统配电网亟需通过高质量的发展建设,升级为“现代智慧配电网”,全面提高配电网安全供电保障能力、清洁能源消纳能力、多元负荷承载能力、优化配置资源能力,服务中国式现代化发展。现代智慧配电网是以中国式现代化为指引,以智慧化赋能为路径,以用户即插即用、主动支撑调节、能源自由转换、网络高度自愈为主要特征,以绿色低碳、安全可靠、透明智慧、开放共享为发展重点,从传统向现代升级、从数字向智慧升级的配电网。

我国配电网发展大致分为三个阶段,又称三代配电网。第一阶段为人工配电网阶段,无自动化手段,以无源辐射状网架、人工电话调度、现场人工操作为主要特征。第二阶段为自动化配电网阶段,配电自动化逐步覆盖,以网格化标准网架、数字化调度、自动化运维为主要特征。第三阶段为主动配电网阶段,以接纳大规模分布式电源、电动汽车为主要特征,和谐、绿色、可持续发展成为配电网的发展目标,电网由单向供电网络向混合能源互联网发展,形成分层分群、源网荷储协同的各种先进技术综合一体化现代智慧配电网。

中央财经委先后提出“构建新型电力系统”“建设分布式智能电网”,党的二十大要求“推动绿色发展”“积极稳妥推进碳达峰碳中和”“加快规划建设新型能源体系”,加快发展方式绿色转型,积极稳妥推进碳达峰碳中和,加快规划建设新型能源体系^[2-3]。国家电网公司2023年工作会议明确,以“一体四翼”高质量发展全面推进具有中国特色国际领先的能源互联网企业建设,要“加快建设现代智慧配电网,更好适应分布式能源、微电网、电动汽车等发展需要”。

配电网作为新型电力系统的重要组成部分,具备新型电力系统全部要素,将持续承接新要素的广泛接入、承载新业态新模式的蓬勃发展^[4]。

2022年,国家电网公司经营区分布式新能源装机达到1.34亿kW,约是2013年的47倍,其中部分省份分布式电源渗透率均超过20%,如河北、山东、陕西等。分布式新能源的出力呈现间歇性、波动性、不确定性,导致乡村分布式新能源高渗透率地区电压“日高夜低”问题,高比例末端接入容易引起电压越限^[5]。另外,近五年我国电动汽车规模增长迅猛,2022年底,电动汽车保有量超过1000万辆、充电桩520万台。电动汽车充电需求主要集中在夜间,无序充电将加剧晚高峰负荷波动,增大峰谷差。由于市场机制和调控技术仍不完善,电动汽车的储能潜力尚未充分挖掘,随着有序充电模式日益成熟,电动汽车的灵活互动能力有待激活^[6]。在储能建设方面,2022年底,我国新型储能规模约870万kW。新型储能呈现“规模较小、多点分散、各自为营”特征,存在利用率低、布局不合理、运行管理困难等问题,在配电网中的配置原则尚不明晰。

面向上述新发展形势,新型能源体系建设对配电网向现代智慧升级提出了更高要求。分布式电源的快速发展带来了配电网从单向逐级辐射网络向双向有源系统的根本转变,叠加电动汽车等新型负荷的规模化发展,配电网潮流双向概率化特征趋于显著,安全运行管理复杂性大幅增加,供电质量恶化,负荷峰谷差进一步拉大,延续传统发展模式将大幅增加电网建设投入、降低系统整体经济性^[7]。配电网海量灵活性资源能够有效应对电力系统日益加剧的源荷双侧不确定性,支撑大电网安全运行,提升系统整体经济性,但受技术及机制限制,需求侧响应远未被充分激活、唤醒^[8]。这就要求配电网加快向数字化智能化赋能升级,全面提升可观可测、可调可控能力及互动交易水平,着力解决当前配电网“盲管”“盲调”问题,破解需求侧资源参与互动的技术瓶颈及机制障碍,广泛承载多元要素、多种能源,支撑源网荷储协同高效运行,推动配电网安全、绿色、高效发展。

针对现代智慧配电网发展遇到的形势要求和关键问题,本文概述了现代智慧配电网的内涵特征和发展重点,然后针对配电网发展的多样性和差异化特点,整理了不同场景下国内外关于配电网发展的相关技术研究,分析和总结了不同场景下现代智慧配电网发展的关键技术。最后对现代智慧配电网的发展脉络进行梳理并给出相应研究和建设重点,旨在为我国电力清洁低碳转型提供指导性建议。

1 现代智慧配电网的内涵特征和发展重点

现代智慧配电网是以智慧化赋能为路径,从

传统向现代升级、从数字向智慧升级的配电网。现代智慧配电网从形态结构上可划分为三层,分别是物理形态、数字形态、商业形态,如图1所示。其中物理形态层主要承载电能的能量流动,包含源、网、荷、储等各种要素;数字形态层承载控制、保护等信息流,包含数据采集终端、信息传输网络、调度控制中心等;商业形态层主要承载各种市场参与主体,实现各类市场交易,包含电力交易、碳交易等。其功能定位为保障供电安全的基础平台、推动能源转型的配置平台、承载多元用户的服务平台和创造多维价值的支撑平台。

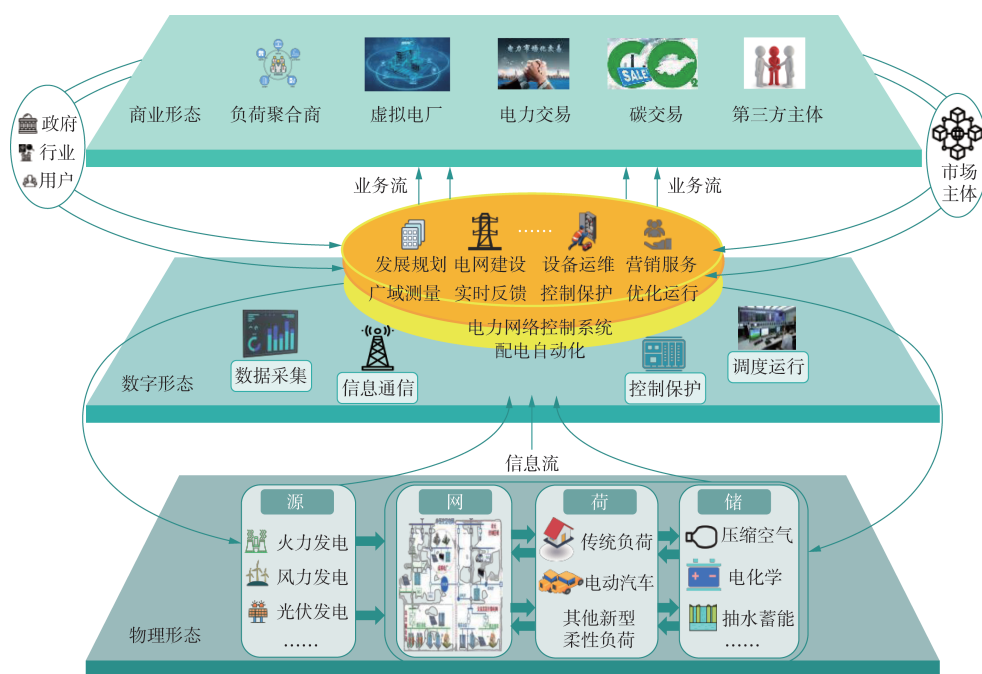


图1 现代智慧配电网形态结构

Fig. 1 The form and structure of modern smart distribution network

现代智慧配电网的概念图如图2所示,相对于传统配电网,在物理形态上,配电网从单向逐级辐射网络向双向有源、分层分群、多态并存网络转变,在数字形态上,从各专业分散独立采传存用模式向全环节集约采集、透明共享、协同控制、业务融合转变,在商业形态上,从计划为主、价格管制向市场驱动、主体多元、品种多样、互利共赢转变。现代智慧配电网具有用户即插即用、主动支撑调节、能源自由转换、网络高度自愈的特征,其发展以绿色低碳、安全可靠、透明智慧、开放共享为重点,下面对其含义进行说明。

现代智慧配电网的内涵特征如下:

1)用户即插即用。配电网承载能力和运行灵活性显著增强,分布式电源、新型储能、多元负荷等各类用户便捷接入,市场高度开放、各主体灵活参与,

用户满意度、获得感显著提升。

2)主动支撑调节。储能广泛应用,微电网规模化发展,要素主体自我管理,源储主动支撑,需求侧主动响应,主配微多级协同,系统多时间尺度主动平衡。

3)能源自由转换。电热冷气自由转换、高效利用,电氢技术不断完善,电碳市场趋于协同,能源多元主体价值创造、共享共赢局面广泛建立,以电为中心的能源互联网开放互动生态基本形成。

4)网络高度自愈。一次系统坚强可靠,二次系统成熟完善,各环节可观可测可控;故障快速恢复,系统自我诊断,供电可靠性显著提升。

现代智慧配电网的发展重点如下:

1)安全可靠。把保障安全可靠供电作为配电网的首要任务,推进网架韧性、安全质效升级,实现网

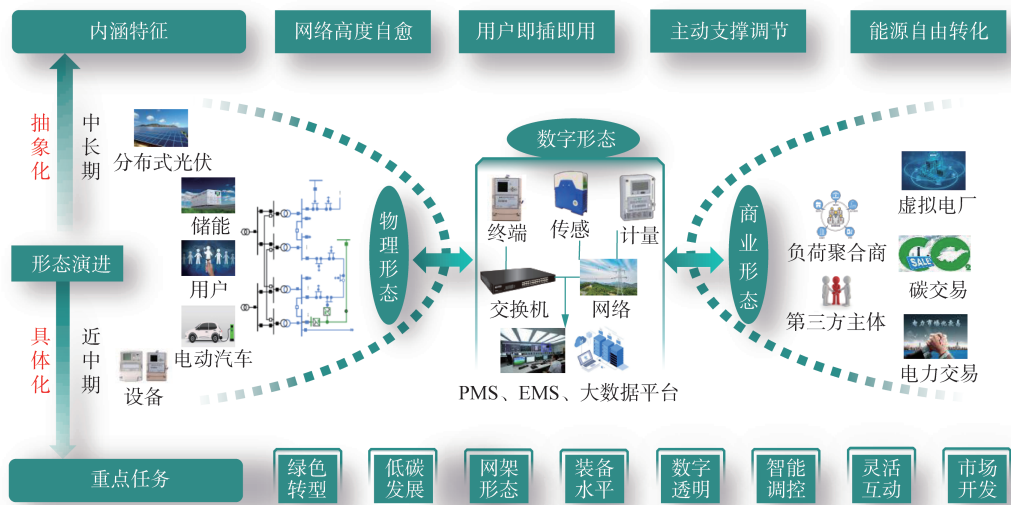


图 2 现代智慧配电网概念图

Fig. 2 Concept diagram of modern smart distribution network

架结构清晰坚强、供电能力合理充裕、设备设施健康可靠、供电质量持续提升。

2)透明智慧。统筹采传存用各环节,运用大数据、人工智能等数字技术,推进数字透明、智慧调控升级,推动感知终端优化部署、通信网络有序建设、多元数据融合应用、多级协同调控模式构建、分散资源聚合互动,实现各环节可观可测可控。

3)开放共享。推动市场机制及价格政策完善,保障国家战略部署落地,强化民生福祉服务水平,构建能源数字经济服务生态,促进电力资源配置优化,实现价值创造、普惠共赢。

4)绿色低碳。推动分布式新能源有序发展、新型储能规模化应用、电网节能降碳、绿色生产生活方式普及,源网荷储共同发力,促进能源生产清洁化、能源消费低碳化、能源利用高效化。

2 面向现代智慧配电网不同场景的关键技术

2.1 概述

根据国家发展改革委、国家能源局、国家数据局印发的《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》《国家发展改革委 国家能源局 关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》的有关要求,结合现代智慧配电网的内涵特征和发展重点,基于差异化的场景,聚焦微电网协调发展、充电设施高效承载、新型储能高效利用、城乡配电网升级、源网荷储高效协同五个方面,如图3所示,梳理了不同场景下国内外的相关技术研究,并对各场景下涉及的典型关键技术进行了总结。



图 3 现代智慧配电网关键技术及应用场景

Fig. 3 Key technologies and application scenarios of modern smart distribution network

2.2 微电网协调发展关键技术

微电网是利用新型发电技术和电网控制技术向负荷供电的小型电力系统,该系统以多种分布式电源分散供电,并且采用了大量的电力电子器件,微电网可视为配电网发展过程中出现的一种新形态。微电网运行方式灵活,能够进行自我保护、控制与管理。微电网协调发展作为现代智慧配电网建设的助推剂,发展微电网技术对于特定场景下解决电网消纳能力不足、电网延伸困难等问题具有积极作用,对于提高系统的供电可靠性、推进节能减排、实现能源可持续发展具有重要意义。根据场景的不同,微电网可分为分布式电源高渗透率地区微电网、大电网延伸困难地区微电网、园区多能互补微电网、商企建

筑光储直柔微电网等类型。

目前,我国和欧美日等发达国家均已开展了微电网相关的技术研究,并提出了具有不同特点的微电网发展规划。在微电网的运行控制方面,国内外学者研究了多源协调控制、能量管理等方面的问题,例如:混合供能系统的协调控制^[9]、微电网控制参数选择与稳定性分析^[10]、分散式多微电网逆变器协调控制^[11]、微电网的能量管理系统研究^[12]、混合微电网并离网切换控制^[13]等。在微电网的安全保护方面,现有成果提出了基于数字中继的集中式微电网自适应保护系统^[14],并构建了基于数字继电器的多级差动保护方案^[15]等。此外,微电网经济运行方面的研究主要聚焦于分布式电源出力波动处理和接入微电网后的配电网成本效益,包括基于序列运算理论的微电网经济运行研究^[16],以及计及分布式发电随机性的微电网与配电网连接点处的功率波动研究^[17]。关于微电网的研究还涉及规划设计^[18]、供电可靠性和电能质量研究^[19]等方面。

微电网作为典型的分布式发电系统,具有灵活控制和高效应用的优势,综合国内外微电网技术的发展现状,面向现代智慧配电网发展需求,未来微电网发展的关键技术领域可概括为:1)微电网协同规划及源荷储资源优化配置技术;2)标准化、模块化、免维护、即插即用组网装备技术;3)涉网性能评估及并网检测技术;4)运行优化与控制保护技术;5)电压频率主动支撑技术;6)面向多微网接入的主-配-微协同调控技术等。另外,在管理及运营方面,包括微电网全过程建设运行管理模式,以及定功率曲线运行及偏差考核机制的研究;针对公用型微电网,探索输配电价疏导的实施路径;针对自用型微电网,探索参与电能量及辅助服务的市场交易品种和交易机制,以及不同利益主体的成本收益分摊机制等。

2.3 充电设施高效承载关键技术

新能源汽车作为绿色交通工具,是开展电能替代、实现低碳交通的重要手段,也是现代智慧配电网建设的重要环节。充电设施作为电动汽车与电网之间信息传递和能量互动的媒介,是电动汽车推广应用的重要基础,是智能交通、智慧配电网的综合节点,是实现“双碳”目标的实施路径。

近年来,新能源汽车发展进入“快车道”,迈向规模化发展阶段,对应的充电网络等配套设施建设在各国都被提上了日程^[20]。目前,国内外学者在电动汽车及充电网络建设方面从多个角度开展了相关研究。在充电站规划方面,现有成果对充电站规划影响因素及评价体系进行了研究,例如影响充电站选

址布局的相关因素分析^[21],充电站选址布局与交通、配电网、城市路网的相关性分析^[22]以及充电站选址评价指标体系的制定^[23-24]等。充电需求估计也是充电站规划的重要因素,可从充电站端和车端两个维度进行研究,相关的研究包括基于停车位置和停车时间特征的充电需求估计^[25],基于充电记录、电动汽车到达和离开时间等静态数据的充电需求估计^[26-27]等。另外,充电站选址定容方法研究作为充电规划的重要方面,国内外学者提出了大量方法对该领域进行研究,例如:基于P-中位模型和覆盖模型的充电站选址方法^[28-30],考虑站点容量限制的流量补能选址模型^[31]、基于网络均衡模型的多类型充电设施优化部署^[32]、考虑车流量及路网节点充电需求的充电站容量规划^[33]等。在电动汽车参与电网调峰方面,现有研究分析了电动汽车参与调峰辅助服务市场的交易模式^[34],并在电动汽车可调节容量预测方面进行了研究,例如:综合用户出行需求、电池寿命、电池容量的电动汽车上调容量与下调容量评估方法^[35],以及基于随机森林算法的电动汽车集群充放电容量预测^[36]。此外,国内外学者在电动汽车有序充电控制策略以及车网互动(vehicle-to-grid, V2G)控制策略方面也进行了大量研究,并取得了一些成果,例如:以配网有功损耗最小为目标的电动汽车充电控制方法^[37]、基于动态分时电价和用户自主响应的有序充电方法^[38]、考虑电网侧负荷波动和负荷侧收益的V2G控制策略^[39]等。

随着电动汽车规模的不断扩大,加强充电设施的高效承载能力,利用电动汽车“源荷”特性实现源网荷储的友好互动是实现现代智慧配电网的重要手段。为避免充电设施规划不合理、电动汽车无序充电等因素给电网带来的影响,并进一步提高充电设施的承载能力,综合目前电动汽车及配套充电设施的研究现状,未来电动汽车发展的主要技术方向可概括为:1)各类典型场景下充电负荷预测方法研究;2)考虑充电负荷的饱和空间负荷密度计算方法研究;3)配电网承载能力量化分析方法研究;4)规模化电动汽车智能有序充电技术研究;5)规模化充电负荷聚合参与电网互动调节技术研究;6)一定规模车网互动技术等。管理及运营方面,包括示范配电网承载能力动态评估机制、配套电网建设投资成本疏导机制以及用户参与车网互动的准入规则和补偿机制等方面的研究。

2.4 新型储能高效利用关键技术

新型储能是指除抽水蓄能外,以输出电力为主要形式,并对外提供服务的储能技术,这些技术包括

电化学储能、机械储能、热储能以及氢储能等,主要储能技术分类如图4所示,可在电力系统运行中发挥调峰、调频、调压、备用、黑启动、惯量响应等多种功能。相比传统储能,新型储能具有如下几个主要特点:1)更高的能量密度。新型储能技术,如锂电池储能,能量密度远高于传统储能,使其占地面积更小。2)响应速度快。电化学储能(如电池储能)可以在毫秒级时间内响应电力系统的调度需求,适合短时功率调节。3)适用场景更广。新型储能技术不仅适用于大规模电网储能,还可应用于微电网、家庭储能以及电动汽车领域,而传统储能通常局限于大型集中式电力系统。4)技术多样化。新型储能涵盖了电化学、机械、热能等多种形式,技术路线更为丰富,满足了不同的能源存储需求。

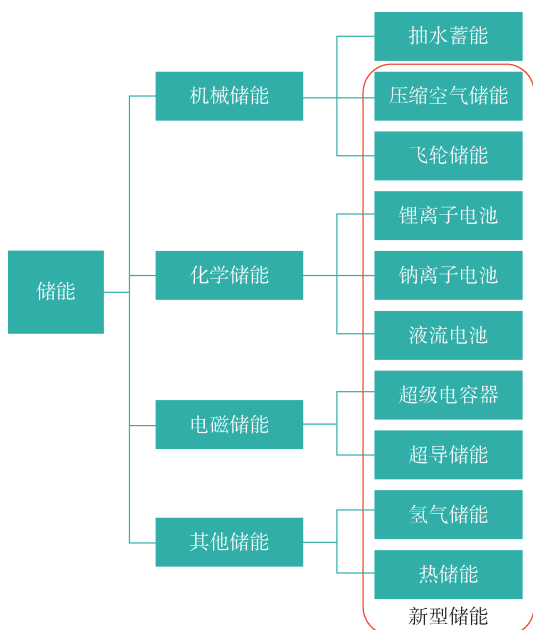


图4 储能技术分类

Fig. 4 Classification of energy storage technologies

本文主要分析新型储能技术,所提储能均指新型储能。储能作为新型电力系统中重要的灵活性调节电源,是支撑电力系统稳定运行的重要技术和基础装备。大量分布式新能源和储能接入是现代智慧配电网发展的必然趋势,储能解决了能源生产使用的时空不匹配问题,使电能在时间和空间上的运用更具灵活性,对推动能源绿色转型、推动现代智慧配电网建设等目标的实现有重要意义。不同类型新型储能对电网产生影响不同,例如,在电网关键节点,应用电网侧独立储能电站参与电网调频、调峰、调压、转动惯量、阻尼、爬坡等主动响应技术,可以增加调频调压容量和控制灵活性,有利于调度运行和系统稳定。在供电能力不足且电网补强困难的地区,

应用电网替代性储能电站,可以提升电网供电保障能力,降低电网建设投资,发挥储能容量支撑效益。

目前,国内外学者已对储能在新能源平滑出力、火电机组调峰、用户需求响应等融合场景的应用开展了广泛的研究。在提升新能源并网性能方面,现有研究提出通过储能系统的选址和配置实现提升新能源的消纳能力和降低网损的目的^[40],并研究了利用混合储能系统的多级协调控制策略实现新能源的平滑上网^[41]等。在提升系统运行稳定性方面,储能的双向调节能力为电网提供了优质调节资源,已有研究对储能提供调峰、调频等服务的配置和运行问题进行了研究,例如基于负荷预测与动态规划的储能调峰运行控制策略研究^[42]、考虑动态频率安全的储能规划方案研究^[43]、储能系统紧急无功支撑策略研究^[44]、含有储能的黑启动优化方案及控制策略研究^[45]等。另外,在储能的多功能应用方面,现有研究提出了储能参与辅助服务市场和电能量市场的运营策略^[46],提出了利用储能降低煤耗和线损的优化运行方法^[47],并通过建立储能系统经济效益计算模型分析储能系统的经济效益^[48]等。

尽管国内外已经对储能应用技术进行了广泛研究,但储能与配电设备融合及储能协同调控等方面的研究尚处于起步阶段。新型储能技术从促进可再生能源消纳到提升电网系统运行稳定性,需要结合不同场景需求进行创新设计,推动新型储能规模化发展与高效利用。总的来说,未来储能高效利用涉及的关键技术研究可概括如下:1)新型储能规划布局及选址定容技术;2)系统集成及安全管控优化设计技术;3)涉网性能评估及并网检测技术;4)多时间尺度协同调度运行控制技术;5)构网型储能多时间尺度频率电压主动支撑技术;6)安全风险评估防范及智能运维技术等。在管理及运营方面,包括探索新型储能全过程建设运行管理模式、消防安全保障机制,以及储能调度运行偏差考核机制、市场交易机制等方面的研究。

2.5 城乡配电网升级关键技术

城市配电网升级是现代智慧配电网建设的重要组成部分,也是城市现代化建设的重要手段。城市配电网的显著特点是负荷密度高和供电质量要求高,其发展目标 and 建设方式需要与城市发展目标紧密配合,推进城市配电网升级是现代城市电网建设发展的必然趋势。目前对于城市配电网的研究涉及故障处理、可靠性评估、可靠性网架设计、通信技术应用等多个方面,例如:城市配电网单相接地故障处理及相关配置策略研究^[49]、负荷响应和开关配置等

因素对供电可靠性的影响的评估^[50-52]、计及经济性和可靠性的城区配电网改造方案研究^[53]、综合多因素的城市配电网高可靠网架方案设计^[54]、城市配电网可靠性优化策略研究^[55]、基于5G通信的配电网差动保护模式研究^[56-57]等。上述研究为现代智慧配电网建设背景下的城市配电网的改造升级提供了借鉴。

面向现代智慧配电网建设的新形势新要求,结合上述研究现状,在未来城市配电网改造升级过程中涉及到的关键技术可概述为:1)城市配电网“标准化接线+自愈保护”模式的构建,包括“级差保护+馈线自动化”“光纤纵差保护+备自投”模式;2)单相接地故障选线选段快速跳闸技术;3)探索基于无线/载波横向通信的自愈型分布式智能保护;4)探索配电网不停电合环的低成本解决方案等。以上述关键技术为手段,加速推进城市配电网升级,提高保护选择性、复电快速性,减少故障停电范围和时间。

相较于城市配电网,农村地区配电网相对落后,并且大规模分布式光伏并网以及电动汽车、电采暖等新型负荷的普及影响了农村配电网的电能质量和运行控制。现代智慧配电网建设的推进对农村配电网的高效可靠运行提出了更高要求。目前,国内外学者在电能质量提升方面进行了广泛的研究,例如:含分布式能源的农村配电网三相不平衡治理^[58]、以经济性最优为目标的农村配电网储能调压策略研究^[59]、基于混沌遗传智能算法的农村配电网无功补偿研究^[60]、基于风光储一体化的新型农村配电网研究^[61]。此外,现有研究还包括柔性互联、农村能源网建模评价等方面,例如:低压柔性互联技术在农村配电网的应用研究^[62]、农村综合能源网的建模^[63]及农村微能网的评价指标构建及应用^[64]等。

农村配电网是面向农村用户供电服务的“最后一公里”,具有管理需求变化快,管理设备规模大等特点。为适应现代智慧配电网的发展需求,未来农村配电网发展的关键技术可概述为:1)区域-网络-台区自治运行控制技术;2)县域100%清洁能源长周期自给自足模式研究;3)光-车-储-网-荷一体化“微电网”技术及建设运行模式;4)高比例分布式电源接入下配电网保护控制技术;5)配电网站-线-台自动电压协同控制技术;6)电网资源紧张区域分布式光伏“升压汇流”建设及运营模式探索等。

2.6 源网荷储高效协同关键技术

源网荷储系统以先进技术和体制创新为支撑,通过优化整合源、网、荷各侧资源,推进新型电力系统的发展。现代智慧配电网的典型特征之一就是源网荷储高效协同,源网荷储协同是通过可对调资源的聚合

及源荷时空优化匹配,支撑电网安全稳定运行。

目前国内外已经对源网荷储系统进行了广泛研究,并取得了一定成果,如源网荷储协同规划、源网荷储协同调控、源网荷储运营模式及关键技术等方面的研究。在源网荷储协同规划方面,现有研究提出了多种思路和方法,例如,基于信息动态博弈理论的多主体源网荷储协同规划方法^[65]、考虑配电公司与需求响应用户以及分布式电源运营商间互动关系的源网荷储协同规划方法^[66]、考虑利益主体有限理性的配电网源网荷储协同规划方法^[67]等。在源网荷储协同调控方面,通过主动管理分布式电源、储能和需求响应负荷,可实现源网荷储协调优化控制,保障配电网运行的经济性。目前,国内外学者在源网荷储调控方面取得了一些成果,例如,考虑电力市场机制影响的源网荷储协调互动多时间尺度联合优化调控方法^[68]、基于模型预测控制的多主体协调优化方法^[69]、基于Fisher时段划分的配电网源网荷储多时间尺度协调优化调控方法^[70]、基于Nash-Q均衡迁移算法的源网荷储协同优化策略^[71]等。此外,源网荷储一体化运营模式为配电网分布式能源、储能等技术的应用提供了平台。在源网荷储运营方面,现有研究工作提出面向园区微网的源网荷储一体化运营模式^[72],该模型考虑源网荷储优化控制、市场交易、辅助服务和需求侧响应等因素,提出投资主体多元化的源网荷储一体化运营模式框架。

为充分利用配电网的各类调控资源,有效推进现代智慧配电网的发展,保证配电网安全经济优化运行,未来源网荷储协同关键技术研究可概述为:1)涵盖多元负荷特性分析、灵活资源潜力评估、电网承载能力评估、源网荷储多维度诊断评价、电力电量平衡分析、一二次协同智能规划等各环节的配电网协同规划技术及实现方法;2)源网荷储协调、一二次专业贯通、省-市-县-供电所多级协同的配电网规划线上作业管理模式;3)规模化分布式光伏调控技术;4)省-地-配-微调节能力逐级汇聚上报、全网资源统筹决策、控制策略分解下发的分层协同控制技术;5)源网荷储分散资源的分层聚合调控技术;6)探索新要素参与电力市场的分层分类交易策略、偏差考核机制及价格机制、电力交易与碳交易的衔接模式等。

3 现代智慧配电网建设重点展望

实现现代智慧配电网建设是极具挑战性的战略工程,聚焦绿色低碳、安全可靠、透明智慧、开放共享四个重点,加快现代智慧配电网规划建设,推动配电网从传统向现代升级、从数字向智慧升级,是支撑新

型电力系统建设的关键步骤。本文对现代智慧配电网的内涵特征、发展重点进行了剖析,并对现代智慧配电网不同场景下的关键技术进行了梳理总结,据此提出对现代智慧配电网建设的启示。下面从绿色转型、低碳发展、网架韧性、安全质效、数字透明、智能调控、市场开放、优质服务八个方面对现代智慧配电网的建设重点进行说明。

3.1 绿色转型升级

随着分布式能源、电动汽车、储能的快速发展,配电网必将成为清洁能源消纳的支撑平台。为了推动配电网侧能源清洁化升级,需要加快引导分布式新能源、电动汽车的有序发展,推进新型储能的规模应用。

1) 引导分布式新能源发展。

加强分布式新能源统筹规划,科学测算分布式新能源开发潜力,统筹新能源发展、负荷增长及调节能力建设,开展分层分区电力电量平衡分析。加强可开放容量发布管理,统筹负荷特征及增长情况、各级配电网容量裕度,动态测算分布式光伏可开放容量,推动各地政府建立可开放容量发布,引导分布式光伏科学布局、有序开发、就地消纳。

2) 服务电动汽车高效承载。

研究考虑充电负荷的饱和空间负荷密度计算方法,做好电网规划与充电基础设施规划的衔接。保障充电设施便捷接入,引导合理分层接入中低压配电网,助力构建智能有序慢充为主、应急快充为辅的居民区充电服务模式,及快充为主、慢充为辅的道路交通和城乡公共充电网络。加强车网互动研究应用,大力推广智能有序充电,推动地方政府全面落实峰谷分时电价政策、拉大峰谷价差,引导错峰充电。

3) 推动新型储能规模应用。

在分布式光伏集中开发地区,探索分布式新能源+储能建设模式,鼓励采用低压台区分散部署的云储能建设模式,就近平抑潮流及电压波动。加快提升储能利用效率,推进共建共享或共享租赁储能的新模式,探索集中式新能源场站内部配建储能的独立调用补偿机制,促进储能资源高效利用。强化储能全过程安全管理,严格电化学储能电站并网验收,规范新型储能并网运行控制,防范新型储能安全风险。

3.2 低碳发展升级

为满足配电网建设的低碳要求,需要从用户侧和电网侧共同发力,对外推动城市、农村构建绿色生产生活方式,由单纯消费向绿色产销一体转变;对内推进电网侧向全链条低碳管理升级,强化绿色采购供应、绿色建造运维、低碳节能技术应用。

1) 推动农村能源低碳转型。

构建新能源为主体的新型农村电网,利用农村户用建筑屋顶发展分布式光伏、利用农村零散闲置非耕地建设分散式风电、利用农林废弃物发展生物质发电,推动分布式新能源配建分布式储能,就地解决台区侧电压越限及反向重过载问题。提倡低碳能源的使用,在种植、养殖、农产品加工产业中应用新能源、生物质、电动农机技术,在居民家庭应用电采暖、光伏+蓄热等绿色用能方式,减少秸秆、柴薪等的直接燃烧,提升乡村用能清洁化、电气化水平。促进农村光伏与电动汽车统筹发展,因地制宜探索“户用光伏+台区储能+充电桩”模式,通过价格政策等引导电动汽车充电时间与分布式发电时间匹配衔接,发挥对光伏的抵充效应。在用电负荷重、新能源汽车渗透率高、消费能力强的东部农村地区,开展微电站、微储能、微能网“三微”协同示范试点。

2) 促进城市多能互补应用。

聚焦工商业园区、城市综合体等典型用能场景,通过分布式光伏、热泵、集中制冷、蓄能、余能回收等技术,推动电、气、冷、热等多种能源互补互济,持续提升终端能源利用效率。推动建筑领域低碳用能,推广建筑光伏开发利用,开展供冷供热等环节电能替代,利用建筑自身蓄能、空调、充电桩等灵活资源柔性调节,降低建筑能耗、提升用电质量高效发展。在交通枢纽、物流运输密集区域,推广光伏+充电+加氢一体综合能源站,探究分布式制氢、光储充放等一体化技术,推动构建电氢融合的零碳交通网。

3) 强化电网低碳节能管理。

推行绿色采购供应,加快绿色现代数智供应链建设,制定绿色采购指南和管理制度,优选绿色产品、绿色供应商,促进供应链上下游企业、产品全生命周期绿色低碳。强化绿色建筑运维,推广节能导线、高强钢、装配式建筑等技术,加强工程建设全过程节能、节地、节水、节材和环境保护管理,做好水土保持和植被恢复工作。

3.3 网架韧性升级

提高网架韧性是现代智慧配电网建设的重要任务之一,为了塑造配电网“强健躯干”,可靠承载多元用户,需要坚持差异化规划,因地制宜推动配电网格局从被动依附大电网的单向逐级配送网络,向主配微协同、源网荷储一体的双向有源系统升级。

1) 构建分层分群电网络格局。

推动配电网合理分层分群,主动适应新要素规模化发展态势,合理划分110 kV供电分区及10 kV供电网格、单元,构建纵向主配微分层、横向差异化分

群的电网形态格局,进一步加强各级配电网在不同地域范围、不同时间尺度的资源优化配置平台作用。强化主配微层间协调,确保主配微各层级容量匹配、相互支援,支撑电力有序疏散和消纳。根据不同地域范围的资源、环境、用电需求等因地制宜划分群组,实现“横向差异化分群”,例如新能源富集区、电网延伸困难地区、个性化用电用能需求区域等。强化群内源网荷储协同,根据资源禀赋、源荷特征等,引导各类储能合理布局,提升集群自治平衡能力。

2) 打造坚强灵活主干网架。

优化完善高压网架,逐步形成以链式结构为主、其他类型网架合理配置的网架结构。强化中压主干网架,差异化构建简洁清晰的中压目标网架,城市电网按照“一城一网”原则,合理设置中压线路分段点和联络点,加快推进网架标准化建设,支撑故障快速自愈;农村电网按照“一乡一策”原则,适度增强站间或线间联络,提高负荷转供能力。面向极高可靠性供电需求区域,尝试采用“双花瓣”、柔性互联等新型接线组网模式,进一步提升运行灵活性。

3) 服务微电网规模化发展。

坚持微电网与输配电网协调融合,推动微电网发展与各级能源电力规划统筹衔接。针对新能源资源富集场景,通过优化源荷储要素配置提升微电网自平衡自调节能力,促进分布式电源就近接入就地消纳。针对个性化用能需求场景,通过构建交直流混合、电气冷热互补微电网组网形态,提升供电可靠性水平和能源综合利用效率。针对大电网延伸困难场景,通过提升频率电压支撑、并离网无缝切换和黑启动快速恢复能力,强化微电网供电保障水平。

3.4 安全质效升级

配电网承担着向电力用户配电的重要职责,确保配电网的高质量安全运行是配电网向现代智慧升级的基本要求。为满足上述要求,需要推动配电网从结构安全向综合安全升级。

1) 持续提升电力保供能力。

着力消除供电卡口隐患,加快解决主(配)变重过载、线路重过载问题。确保供电能力合理充裕,推进大电网延伸覆盖,进一步提高电力供应可及性;持续优化变配电布局,适度超前规划变电站布点,按照“密布点、短半径”原则合理规划配变布点。提升电源保障能力,加强城市应急保障电源建设,引导退役机组转应急备用,合理布局一批中小型燃气电站作为城市保障电源;推动完善小水电、小火电的顶峰技术措施,充分挖掘非统调机组调节能力。

2) 稳步提升电网装备水平。

加快老旧设备设施改造,制定重点治理清单和改造计划,强化治理质量管控,消除运行安全隐患。推动自主可控装备应用,推进电力工控芯片、基础软件、电力电子功率器件等装备实现自主可控、国产替代,保障产业链供应安全。提升设备智慧运维水平,在重要电缆管廊、配电站房等场景合理部署设备/环境监测终端及无人机/机器人巡检终端,加快设备状态智能监测分析、设备缺陷智能辨识等技术应用。

3) 提升综合防灾抗灾水平。

加快坚强局部电网建设,完善“坚强统一电网联络支撑、本地保障电源分区平衡、应急自备电源承担兜底以及移动电源作为补充”四级保障体系,提升极端状态下重点地区的电力供应保障能力。提升综合防灾抗灾能力,细致分析台风、暴雨、冰冻、地震等各类灾害影响范围及影响位置,推进存量设施改造,差异化提升新建设设施防标准。

4) 持续优化电网供电质量。

构建新型供电电压管理体系,推进供电电压全面有效监测,细化供电电压分级动态评价。强化电压问题管控,全面消除长期低电压问题,差异化解决季节性、波动性负荷引发的电压问题,着力解决城市高电缆化率地区电压越上限、乡村分布式电源高渗透率地区电压“日高夜低”问题。加强不停电作业能力建设,推广应用带电作业机器人,推动配电网检修由停电为主向不停电为主转变。

3.5 数字透明升级

开展电力行业数字化转型,是提升电网管理主动性、促进电力行业健康发展的有力支撑。为了推动配电网数字形态升级,健全配电网“神经系统”,实现各环节高度数字透明化、数字与物理系统深度融合,需要推进感知终端部署、通信网络建设、多元数据融合。

1) 推进感知终端有序部署。

加快源储监控终端部署,中低压源储全面实现可观可测,低压分布式电源根据发展规模及影响范围稳步有序推进可调可控改造。加快配自终端部署,在联络开关、重要分段开关等关键节点部署配自终端,持续提升配电自动化有效覆盖率。优化低压台区终端部署,坚持台区侧“一个终端、一次采集”,根据涉及运行控制业务需求有序部署台区智能融合终端,避免重复采集,提高集中器、智能电表采集频次和可靠性。

2) 加快配电通信网络建设。

加快中压配电通信网建设,城市中压电缆网供电区域,持续完善光纤专网,新建电缆线路同步建设

光缆;无线专网未覆盖的农村涉控区域,应用5G/4G无线虚拟专网,推进无线公网采用虚拟专用网络(virtual private network, VPN)、网络切片等虚拟专网技术开展安全升级,切实保障通信传输安全。提升低压配电通信网可靠性,推动载波+高速无线双模技术在涉控台区应用。探索新型配电通信技术,研究应用电力专用高安全卫星系统、北斗短报文等,支撑通信盲区覆盖。

3) 加快多元数据融合应用。

按照“最小化精准采集+数字系统计算推演”原则,基于企业级实时量测中心统一汇聚存储配自、调自、用采数据,基于物联管理平台统一接入管理信息大区 and 互联网大区非电类数据。依托电网资源业务中台和“网上电网”,构建涵盖规划态、建设态和运行态的“电网一张图”,推进电网全环节数据贯通,实现电网透明化。深化数据融合应用,加快推动基于中台的电网气象服务中心、人工智能及区块链技术与配电网生产管控体系的融合创新应用。

3.6 智能调控升级

智能调控是智慧配电网的重要体现,通过构建多级协同调控机制,强化源荷储调控管理,促进分散资源聚合互动,可以实现配电网调控模式由源荷单向、计划调度,向多向互动、智能调度升级。

1) 构建多级协同调控机制。

统筹调自、配自、负荷管理系统生产控制大区功能,构建省地配微协同、源网荷储一体的调控机制。强化主配微协同控制能力,建立调节能力逐级汇聚上报、全网资源统筹决策、控制策略分解下发的分层协同控制模式,推进主配协同的有功调节及精准事故拉路能力建设。强化区域自治调控能力,推动各类自治单元作为整体优化单元对内通过自身控制中心实现有功/电压控制、故障处理等自我管理,对外以发用电计划曲线或累积交换电量接受调度管理。

2) 加强源荷储调控管理。

加强分布式电源、地区小水电的调控管理,地区小水电根据水库调节性能分类施策,构建以流域为单元的上下游联动调度机制。加强新型储能调控管理,研究制定各类新型储能分时、分域、分级多场景科学调用策略。深化完善负荷调控管理,加快电力负荷管理系统建设应用,提升负荷监控和调节能力。强化新要素主动支撑能力,加强分布式新能源故障穿越、频率电压适应性、集群功率预测水平,将配网侧储能、微电网、可中断负荷等纳入电网安全稳定紧急控制体系。

3) 促进分散资源聚合互动。

构建需求侧调节资源池,深入排查传统高载能工业负荷、工商业可中断负荷及电动汽车充电网络、通信基站等新型可调节负荷,建立不同时间尺度的灵活调节资源池。支持虚拟电厂和负荷聚合商发展,依托各类平台集聚需求侧分散资源,充分挖掘各类柔性负荷调节潜力,探索电网侧公共服务平台面向第三方聚合商开放云基础设施的运营模式。规范虚拟电厂、负荷聚合商等并网要求及偏差考核机制,推动其参与电网实时调控、现货交易、辅助服务、需求侧响应等各类互动。

目前虚拟电厂发展面临市场交易频次与收益低、现有调度系统尚不支持、各地技术路线不统一、标准规范尚不健全等问题。面临上述问题,未来可从以下方面推动虚拟电厂发展:一是积极推动虚拟电厂投资建设,引导园区综合能源、充电设施运营商、分布式光伏开发商、用户侧储能投资商、楼宇建筑等开展虚拟电厂建设;二是规范虚拟电厂建设原则,从电网安全、信息安全、市场公平角度确定虚拟电厂合理容量上限,统一提供虚拟电厂资源管理、调控管理、偏差考核、市场服务、交易结算;三是加快技术支持系统建设,加快调控系统支撑功能,建立数据互信交互机制,明确终端配置原则,构建多维度安全防护体系;四是推动技术标准体制机制完善,制定虚拟电厂规划设计、平台装备、试验检测、调试验收、调度运行、网络安全、管理评价等技术标准体系。

3.7 市场开放升级

各种新要素的出现改变了电力市场的运营模式,面对新形势新要求,有必要完善新兴主体交易机制,推动完善电价政策机制,促进电力资源配置优化,推动资源配置方式由主体有限、品种单一、激励不足,向广泛参与、品种丰富、充分竞争升级。

1) 推动新兴主体参与市场。

推动健全新兴主体准入条件,落实国家关于支持培育分布式电源、储能、虚拟电厂、微电网等新兴主体参与市场的政策要求,重点围绕调度控制、信息通信、计量表计等方面,健全准入条件、畅通入市通道。推动丰富市场交易品种,逐步扩展新兴主体参与中长期、现货、辅助服务等批发市场的交易品种,探索将分布式新能源纳入绿电交易范畴,创新电动汽车V2G等商业运营模式,拓宽新兴主体盈利渠道。在绿电绿证政策的推动下,绿电绿证交易市场迎来市场主体多元化的发展。同时,随着市场主体多元化的发展,中国绿证交易规模也在持续扩大。提升绿电绿证消费意愿,推动绿色产品认证与标识体系建设,建立丰富的绿电绿证应用场景,加强市场信息

披露,建立绿色电力消费企业排行榜,有效推动企业用户积极参与绿电绿证交易。未来,随着全球对清洁能源需求的不断增长,绿电绿证市场主体多元化和交易规模持续扩大的趋势也将继续延续,推动中国绿电绿证交易市场不断向前发展。市场交易品种如图5所示。

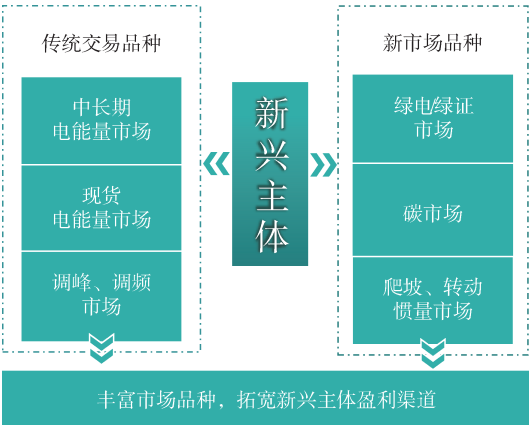


图5 市场交易品种

Fig. 5 Market trading varieties

2)推动完善电价政策机制。

推动健全价格激励政策,推动拉大峰谷价差,扩大峰谷电价用户范围,探索容量补偿电价、可中断负荷电价等激励方式,引导各类主体节约用电、合理错峰,主动参与电网调节。推动完善系统成本分摊机制,做好电能价值、调节价值、容量价值和绿色价值的价格形成与传导机制设计,按照“谁受益、谁承担”的原则,将新型电力系统成本在所有市场主体中公平合理分摊。统筹绿电、绿证、碳减排量,强化电力市场、碳市场机制衔接,探索构建协同交易机制。

3.8 优质服务升级

随着政府、社会对电网服务要求的不断提高,推动服务水平从传统、单一供电服务,向综合化、普惠化能源服务升级已是大势所趋,为保障国家战略部署落地,强化民生福祉服务水平,可从以下几个方面开展工作:

1)保障国家战略部署落地。

服务新型城镇化战略,按照“一城一网”打造坚强清晰的中压骨干网架,提升城市电网的保障能力和智慧水平,构建与经济社会高质量发展、人民美好生活需求和产业转型升级相适应的城市电网。服务乡村振兴战略,加快推进农网巩固提升,持续提升供电能力与供电质量,重点完善国家乡村振兴帮扶县、脱贫地区、革命老区农村电网设施。

2)强化民生福祉服务水平。

着力解决人民群众关心关注问题,有序推进城

镇地区高层小区双电源改造、老旧小区改造等,加强农村地区低电压、频繁停电等供电质量突出问题治理,全力做好居民分布式光伏并网、“新能源汽车下乡”等相关服务。推进供电服务均等化,东部地区推进城乡电网一体化,中部地区推进城乡供电服务均等化,西部地区继续落实各项优先支持政策,持续加大电网基础设施补短板力度。

3)打造能源数字服务生态。

提升新要素公共服务能力,深化国家电网新能源云、车联网、智慧能源服务平台应用,提升新能源、电动汽车、综合能源等服务水平。推进国家级碳排放监测服务平台建设,综合火电厂碳计量数据、外部能源数据、用户用电数据开展全环节碳排放计量和分析,支撑政府对各行业的碳核查、碳交易、碳普惠等应用。加快推动能源大数据融合应用,依托能源大数据中心,统一归集管理电力、煤炭、石油、天然气等全行业能源数据,开展能源统计分析、监测预警、综合服务。

4 结 论

党的二十大提出“推动绿色发展,建设新型能源体系”,决定了我国能源体系未来发展的价值方向。分布式电源、电动汽车等新要素快速发展是能源清洁化转型的重要支撑点,为配电网实现碳中和创造了条件。然而,伴随着配电网形态的变化,传统配电网发展的不平衡不充分问题,与新能源快速发展带来的源荷模糊化、潮流概率化等新问题交织叠加,给配电网整体技术体系带来很大挑战。本文在“碳达峰、碳中和”成为新时代电力行业发展目标的背景下,提出了配电网向现代升级、向智慧升级的发展需求。针对配电网在中国式现代化发展中的功能定位,概述了未来智慧配电网的内涵特征、发展重点、关键技术、发展方向和建设重点。现代智慧配电网为保障供电安全、推动能源转型、承载多元用户、创造多维价值提供了支撑,期望本文能够为“双碳”目标引导下的现代智慧配电网建设提供有益的思考和借鉴。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

娄奇鹤提出本文的研究方向,设计论文框架;李彦斌提出现代智慧配电网的基本研究框架;王登政开展了研究框架的可行性调查分析;肖智宏确定了关键技术的研究范围并收集数据;韩柳开展文献调研与整

理、探索发展方向和建设重点;高星乐撰写论文并绘制图表。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

5 参考文献

- [1] 李鹏,王瑞,冀浩然,等. 低碳化智能配电网规划研究与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 10-21.
LI Peng, WANG Rui, JI Haoran, et al. Research and prospect of planning for low-carbon smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 10-21.
- [2] 滕贤亮,谈超,昌力,等. 高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 12-35.
TENG Xianliang, TAN Chao, CHANG Li, et al. Review and prospect of research on active power and frequency control in power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 12-35.
- [3] 高红均,郭明浩,刘俊勇,等. 从四川高温干旱限电事件看新型电力系统保供挑战与应对展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4517-4538.
GAO Hongjun, GUO Minghao, LIU Junyong, et al. Power supply challenges and prospects in new power system from Sichuan electricity curtailment events caused by high-temperature drought weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4517-4538.
- [4] 马钊,安婷,尚宇炜. 国内外配电网前沿技术动态及发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1552-1567.
MA Zhao, AN Ting, SHANG Yuwei. State of the art and development trends of power distribution technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1552-1567.
- [5] 宋璇坤,韩鞠,鞠黄培,等. 中国智能电网技术发展实践综述[J]. 电力建设, 2016, 37(7): 1-11.
SONG Xuankun, HAN Liu, JU Huangpei, et al. A review on development practice of smart grid technology in China[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(7): 1-11.
- [6] 谭泽富,周正洋,高树坤,等. V2G应用进展综述[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(3): 222-229.
TAN Zefu, ZHOU Zhengyang, GAO Shukun, et al. Literature review of vehicle-to-grid application progress [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(3): 222-229.
- [7] 王成山,李鹏,于浩. 智能配电网的新形态及其灵活性特征分析与应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 13-21.
WANG Chengshan, LI Peng, YU Hao. Development and characteristic analysis of flexibility in smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 13-21.
- [8] 孙建军,王灿,陈业伟,等. 新型配电网运行韧性综述与展望[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(9): 919-929.
SUN Jianjun, WANG Can, CHEN Yewei, et al. Review and prospects of operation resilience in novel distribution network[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(9): 919-929.
- [9] 郭力,李霞林,王成山. 计及非线性因素的混合供能系统协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 60-69, 11.
GUO Li, LI Xialin, WANG Chengshan. Coordinated control of hybrid power supply systems considering non-linear factors [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 60-69, 11.
- [10] 张明锐,黎娜,杜志超,等. 基于小信号模型的微网控制参数选择与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 9-19, 5.
ZHANG Mingrui, LI Na, DU Zhichao, et al. Control parameter selection and stability analysis of microgrid based on small-signal model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 9-19, 5.
- [11] PRODANOVIC M, GREEN T C. High-quality power generation through distributed control of a power park microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1471-1482.
- [12] 李波,李世明,赵瑞锋,等. 能量管理系统图模一致性的双向校验方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 147-152, 158.
LI Bo, LI Shiming, ZHAO Ruifeng, et al. A chart-model consistency bidirectional calibration method for the energy management system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 147-152, 158.
- [13] 许莹,陈卓,郝正航,等. 混合微电网并网切换控制技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(4): 137-146.
XU Ying, CHEN Zhuo, HAO Zhenghang, et al. Research on parallel off-grid switching control technology of hybrid microgrid [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(4): 137-146.
- [14] 周龙,齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [15] SORTOMME E, VENKATA S S, MITRA J. Microgrid protection using communication-assisted digital relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2789-2796.
- [16] 金鹏,艾欣,许佳佳. 基于序列运算理论的孤立微电网经济运行模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 52-59, 10.
JIN Peng, AI Xin, XU Jiajia. An economic operation model for isolated microgrid based on sequence operation theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 52-59, 10.
- [17] 徐立中,杨光亚,许昭,等. 考虑风电随机性的微电网热电联合调度[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 53-60, 66.
XU Lizhong, YANG Guangya, XU Zhao, et al. Combined scheduling of electricity and heat in a microgrid with volatile wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 53-60, 66.
- [18] 孟明,陈世超,赵树军,等. 新能源微电网研究综述[J]. 现代电力, 2017, 34(1): 1-7.
MENG Ming, CHEN Shichao, ZHAO Shujun, et al. Overview on research of renewable energy microgrid [J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 1-7.
- [19] 王成山,武震,李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [20] 王震坡,张瑾,刘鹏,等. 电动汽车充电站规划研究综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(12): 230-252.
WANG Zhenpo, ZHANG Jin, LIU Peng, et al. Overview of

- planning of electric vehicle charging stations[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(12): 230-252.
- [21] WANG Z P, LIU P, HAN H B, et al. A distribution model of electric vehicle charging station [J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 44: 1543-1548.
- [22] 刘自发, 张伟, 王泽黎. 基于量子粒子群优化算法的城市电动汽车充电站优化布局[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 39-45, 20.
- LIU Zifa, ZHANG Wei, WANG Zeli. Optimal planning of charging station for electric vehicle based on quantum PSO algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 39-45, 20.
- [23] SCHMIDT M, STAUDT P, WEINHARDT C. Evaluating the importance and impact of user behavior on public destination charging of electric vehicles [J]. Applied Energy, 2020, 258: 114061.
- [24] LIU A J, ZHAO Y X, MENG X G, et al. A three-phase fuzzy multi-criteria decision model for charging station location of the sharing electric vehicle [J]. International Journal of Production Economics, 2020, 225: 107572.
- [25] HARRIS C B, WEBBER M E. An empirically-validated methodology to simulate electricity demand for electric vehicle charging[J]. Applied Energy, 2014, 126: 172-181.
- [26] SCHÄUBLE J, KASCHUB T, ENSSLEN A, et al. Generating electric vehicle load profiles from empirical data of three EV fleets in Southwest Germany [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 150: 253-266.
- [27] WOLBERTUS R, KROESEN M, VAN DEN HOED R, et al. Fully charged: an empirical study into the factors that influence connection times at EV-charging stations [J]. Energy Policy, 2018, 123: 1-7.
- [28] CHEN T D, KOCKELMAN K M, KHAN M. Locating electric vehicle charging stations [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2385(1): 28-36.
- [29] HE J, YANG H, TANG T Q, et al. An optimal charging station location model with the consideration of electric vehicle's driving range [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 86: 641-654.
- [30] HE S Y, KUO Y H, WU D. Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the optimal locations of public electric vehicle charging facilities: a case study of Beijing, China [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 67: 131-148.
- [31] UPCHURCH C, KUBY M, LIM S. A model for location of capacitated alternative-fuel stations [J]. Geographical Analysis, 2009, 41(1): 85-106.
- [32] LIU H X, WANG D Z W. Locating multiple types of charging facilities for battery electric vehicles [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 103: 30-55.
- [33] XIANG Y, LIU J Y, LI R, et al. Economic planning of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates[J]. Applied Energy, 2016, 178: 647-659.
- [34] 侯慧, 王逸凡, 赵波, 等. 价格与激励需求响应下电动汽车负荷聚集商调度策略[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1259-1269.
- HOU Hui, WANG Yifan, ZHAO Bo, et al. Electric vehicle aggregator dispatching strategy under price and incentive demand response [J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1259-1269.
- [35] 王伟杰, 黄海宇, 徐远途, 等. 电动汽车参与主动配电网电压调控的策略研究[J]. 广东电力, 2023, 36(10): 93-104.
- WANG Weijie, HUANG Haiyu, XU Yuantu, et al. Strategy research on electric vehicles participating in active distribution network voltage regulation [J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(10): 93-104.
- [36] 邓艺璇, 黄玉萍, 黄周春. 基于随机森林算法的电动汽车充放电容量预测[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 181-188.
- DENG Yixuan, HUANG Yuping, HUANG Zhouchun. Charging and discharging capacity forecasting of electric vehicles based on random forest algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 181-188.
- [37] CLEMENT-NYNS K, HAESSEN E, DRIESEN J. The impact of charging plug-In hybrid electric vehicles on a residential distribution grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 371-380.
- [38] 吴雨, 王育飞, 张宇, 等. 基于改进免疫克隆选择算法的电动汽车充电站选址定容方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 95-103.
- WU Yu, WANG Yufei, ZHANG Yu, et al. Siting and sizing method of electric vehicle charging station based on improved immune clonal selection algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 95-103.
- [39] 范培潇, 刘学成, 杨军, 等. 考虑配电网与电化学储能交互耦合关系的异常运行状态预警方法[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(4): 383-392.
- FAN Peixiao, LIU Xuecheng, YANG Jun, et al. An abnormal operation state early warning method considering the interactive coupling relationship between distribution networks and electrochemical energy storage [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(4): 383-392.
- [40] 肖冰, 吴晓丹, 尹宏学, 等. 蒙东地区适应新能源消纳的储能系统配置效果分析[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 13-20.
- XIAO Bing, WU Xiaodan, YIN Hongxue, et al. Configuration effect of energy storage system in Mengdong grid for new energy consumption [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 13-20.
- [41] 鄂志君, 王桂林, 李振斌, 等. 提升新能源电网消纳水平的混合储能系统优化控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(3): 132-137.
- E Zhijun, WANG Guilin, LI Zhenbin, et al. Optimization control method for hybrid energy storage system to enhance the renewable energy absorption level of power grid [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(3): 132-137.
- [42] 王伟, 孙夏, 郭俊, 等. 考虑负荷不确定性的配电网分层协调控制策略[J]. 分布式能源, 2024, 9(2): 89-96.
- WANG Wei, SUN Xia, GUO Jun, et al. Layered coordination control of distribution network considering load uncertainty [J]. Distributed Energy, 2024, 9(2): 89-96.
- [43] 张智, 周明, 武昭原, 等. 考虑动态频率支撑的储能选址定容规

- 划方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2708-2721.
- ZHANG Zhi, ZHOU Ming, WU Zhaoyuan, et al. Energy storage location and capacity planning method considering dynamic frequency support [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2708-2721.
- [44] 柴文化. 抑制直流系统连续换相失败的储能电站控制策略[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- CHAI Wenhua. Control strategy of energy storage power station to suppress continuous commutation failure of DC system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [45] LI J, MA X Y, LIU C C, et al. Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3021-3029.
- [46] 宋天昊, 李柯江, 韩肖清, 等. 储能系统参与多应用场景的协同运行策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 43-51.
- SONG Tianhao, LI Kejiang, HAN Xiaoqing, et al. Coordinated operation strategy of energy storage system participating in multiple application scenarios [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 43-51.
- [47] 李煜阳, 李相俊, 刘国静, 等. 适应多功能需求的储能系统优化运行研究[J]. 供用电, 2021, 38(6): 29-34, 42.
- LI Yuyang, LI Xiangjun, LIU Guojing, et al. Research on distributed energy storage operation majorization under multiple application scenarios [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(6): 29-34, 42.
- [48] 熊雄, 杨仁刚, 叶林, 等. 电力需求侧大规模储能系统经济性评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 224-230.
- XIONG Xiong, YANG Rengang, YE Lin, et al. Economic evaluation of large-scale energy storage allocation in power demand side [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 224-230.
- [49] 张志华, 刘健, 张小庆, 等. 面向供电可靠性的城市配电网单相接地故障处理配置策略研究[J]. 供用电, 2022, 39(9): 27-34.
- ZHANG Zhihua, LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, et al. Research on strategy of single-phase grounding fault treatment in urban distribution network for power supply reliability [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(9): 27-34.
- [50] 雷敏, 魏务卿, 曾进辉, 等. 考虑需求响应的负荷控制对供电可靠性影响分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 53-59.
- LEI Min, WEI Wuqing, ZENG Jinhui, et al. Effect of load control on power supply reliability considering demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 53-59.
- [51] 廖一茜, 张静, 王主丁, 等. 中压架空线开关配置三阶段优化算法[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3413-3419.
- LIAO Yixi, ZHANG Jing, WANG Zhuding, et al. Three-stage optimization algorithm for the sectionalizing switch placement of a medium voltage overhead line [J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3413-3419.
- [52] 胡子健, 朱红, 韦磊, 等. 考虑风光荷储互动的配电网孤岛划分图计算方法[J]. 广东电力, 2024, 37(12): 70-78.
- HU Zijian, ZHU Hong, WEI Lei, et al. Islanding partition of active distribution network based on graph computation considering wind-solar-storage-load interaction [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(12): 70-78.
- [53] 苏韵掣, 刘俊勇, 刘友波, 等. 大规模中压配电网可靠性建设改造措施优选模型及求解方法[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 201-210.
- SU Yunche, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Optimization model of selecting power supply reliability reconstruction measures in large-scale MV distribution network and its solution method [J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 201-210.
- [54] 谢义苗, 熊颖杰, 赖永萍, 等. 城市配电网高可靠性网架设计方案[J]. 供用电, 2019, 36(12): 55-61.
- XIE Yimiao, XIONG Yingjie, LAI Yongping, et al. High-reliability grid design scheme for urban distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(12): 55-61.
- [55] 宋若晨, 袁明瀚, 仇成. 上海城市配电网分层架构中应用“开关站链”模式的可靠性优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4466-4472.
- SONG Ruochen, YUAN Minghan, QIU Cheng. Reliability upgrade strategy with application of switch station chain mode in layered architecture of Shanghai electricity distribution network [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4466-4472.
- [56] 郁海彬, 董烨, 翁锦德, 等. 电力5G切片在城市配电网中的应用及经济效益研究[J]. 综合智慧能源, 2024, 46(1): 75-83.
- YU Haibin, DONG Ye, WENG Jinde, et al. Research on the application and economic benefits of 5G slice in the urban distribution network [J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(1): 75-83.
- [57] 于洋, 孙辉, 方照, 等. 配电网保护通信时延需求约束的5G通信切片接入优化研究[J]. 供用电, 2021, 38(5): 29-34.
- YU Yang, SUN Hui, FANG Zhao, et al. Research on 5G communication slice access optimization with communication delay demand constraint of distribution network protection [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(5): 29-34.
- [58] 杨金东, 吴万军, 孙文静, 等. 含高渗透率光伏的农村配电网三相不平衡治理[J]. 供用电, 2023, 40(1): 65-72.
- YANG Jindong, WU Wanjun, SUN Wenjing, et al. Three-phase imbalance control of rural distribution network with high-penetration photovoltaic [J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(1): 65-72.
- [59] 詹琪, 李鹏丽, 孟晓丽, 等. 考虑经济性最优的农村配电网储能调压策略[J]. 农村电气化, 2023(2): 18-23.
- ZHAN Qi, LI Pengli, MENG Xiaoli, et al. Energy storage and voltage regulation strategy for rural distribution network considering economic optimization [J]. Rural Electrification, 2023(2): 18-23.
- [60] 易春磊, 柴良明, 王世友, 等. 基于改进型混沌遗传算法的农村配电网无功补偿研究[J]. 电气自动化, 2022, 44(4): 40-43.
- YI Chunlei, CHAI Liangming, WANG Shiyu, et al. Research on reactive power compensation of rural distribution network based on improved chaotic genetic algorithm [J]. Electrical Automation, 2022, 44(4): 40-43.
- [61] 缪雨函, 许寅, 王颖. 面向恢复力提升的高比例分布式光伏接入配电网规划方法[J]. 山东电力技术, 2024, 51(8): 1-9.
- MIAO Yuhan, XU Yin, WANG Ying. Planning of distribution system integrated with high-penetration photovoltaic for the resilience improvement [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(8): 1-9.

- [62] 何启晨,阮浩洁,王劲松.台区低压柔性互联技术在新农村配电网的实践应用[J].农村电气化,2023(3):32-38.
HE Qichen, RUAN Haojie, WANG Jinsong. Practical application of low-voltage flexible interconnection technology of station area for new rural distribution network[J]. Rural Electrification, 2023(3): 32-38.
- [63] LIU X Z, MANCARELLA P. Modelling, assessment and Sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems[J]. Applied Energy, 2016, 167: 336-352.
- [64] 张新,杨建华,王维洲,等.面向农村微能网的评价指标构建及应用[J].农业工程学报,2020,36(6):196-205.
ZHANG Xin, YANG Jianhua, WANG Weizhou, et al. Construction and application of evaluation indexes for rural micro-energy-grid[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(6): 196-205.
- [65] 金秋龙,刘文霞,成锐,等.基于完全信息动态博弈理论的光储接入网源协调规划[J].电力系统自动化,2017,41(21):112-118.
JIN Qiulong, LIU Wenxia, CHENG Rui, et al. Coordinated planning model for photovoltaic station, storage battery and grid based on complete information dynamic game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 112-118.
- [66] 李逐云,雷霞,邱少引,等.考虑“源-网-荷”三方利益的主动配电网协调规划[J].电网技术,2017,41(2):378-387.
LI Zhuyun, LEI Xia, QIU Shaoyin, et al. Coordinated planning of active distribution network considering “source-grid-load” benefits[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 378-387.
- [67] 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[J].电网技术,2023,47(12):5046-5058.
LIU Zifa, ZHANG Ziteng. Collaborative planning of distribution network source-network-load-storage considering multi-agent game[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5046-5058.
- [68] 徐韵,颜湘武,李若瑾,等.电力市场环境下的“源-网-荷-储”互动的主动配电网有功/无功联合优化[J].电网技术,2019,43(10):3778-3789.
XU Yun, YAN Xiangwu, LI Ruojin, et al. Joint optimization of active and reactive powers in active distribution network with “generation-grid-load-energy storage” interaction in power market environment[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3778-3789.
- [69] GUO Y F, WU Q W, GAO H L, et al. MPC-based coordinated voltage regulation for distribution networks with distributed generation and energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1731-1739.
- [70] 柴园园,赵晓波,吕超贤,等.基于Fisher时段划分的配电网源-网-荷-储多时间尺度协调优化调控策略[J].电网技术,2024,48(4):1593-1606.
CHAI Yuanyuan, ZHAO Xiaobo, LÜ Chaoxian, et al. Coordinated multi-time scale optimal regulation for source-grid-load-storage of distribution network based on fisher period division[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1593-1606.
- [71] 赵晶晶,朱炯达,刘帅,等.基于集群划分的配电网多时间尺度分布式有功-无功协同优化方法[J].电测与仪表,2024,61(10):57-66.
ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LIU Shuai, et al. Multi-timescale distributed active and reactive power coordinated optimization method of distributed network based on cluster division[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 57-66.
- [72] 刘敦楠,徐尔丰,许小峰.面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式[J].电网技术,2018,42(3):681-689.
LIU Dunnan, XU Erfeng, XU Xiaofeng. “Source-network-load-storage” integrated operation model for microgrid in park[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 681-689.

收稿日期:2024-07-18 修回日期:2024-10-05

作者简介:

姜奇鹤(1977),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向为电网规划与投资管理,E-mail: louqihe@ncepu.edu.cn;

李彦斌(1967),男,博士,教授,主要研究方向为电力企业安全管理,E-mail: liyb@ncepu.edu.cn;

王登政(1988),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为智能配电网规划与设计;

肖智宏(1977),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化;

韩柳(1975),女,硕士,教授级高级工程师,通信作者,主要研究方向为电力系统及其自动化,E-mail: hanliu@chinasperi.sgcc.com.cn;

高星乐(1991),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化。

(编辑 魏希辉)