

双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望

张勇军, 羿应棋, 李立涅, 钟康骅, 李钦豪, 刘斯亮, 肖晃庆

(智慧能源工程技术研究中心, 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640)

摘要: 新能源分布式应用是支撑中国实现“碳达峰·碳中和”战略目标的重要方式, 势必对低压配电系统形成革命性的冲击, 对传统的规划、运行、维护等方式提出了全新的挑战。首先, 分析了中国低压配电系统的元素与形态变化, 介绍各个环节的发展现状与面临的问题。其次, 从透明化、低碳化、互动化、灵活化、多元化5个维度分析了新型低压配电系统的典型特征, 并提出了其特征显著度定量评价指标。最后, 从电能质量、可靠性、经济性和安全性4个关键问题出发, 探讨了支撑新型低压配电系统的四大关键技术并展望了其未来发展方向。

关键词: 新型电力系统; 碳达峰; 碳中和; 新能源; 配电网; 数字孪生; 云边协同

0 引言

能源转型发展是国民经济健康发展的基础, 是国家安全的保障。2014年, 习近平主席提出能源革命的战略思想; 2020年, 中国在联合国大会上提出“双碳”战略目标; 2021年, 中央财经委员会第九次会议提出要构建以新能源为主体的新型电力系统^[1], 对中国能源电力的发展做出了最为重要的部署^[2]。

中国太阳能和风能的可用潜力巨大, 完全可以覆盖社会用能需求, 为解决国家能源安全和全球温室效应问题, 能源革命势在必行。然而, 巨量的新能源并网带来的强不确定性和弱惯性将颠覆传统电力系统的源荷特性, 传统“源随荷调”的调度模式、稳定性控制和三道防线等技术体系都将受到严重的挑战和冲击^[2]。在此背景下, 电力系统将迫切需要灵活可控的功率调节资源和数字化运行管理方式, 其形态也将随之改变。其中, 低压配电网^[3-4]受到的影响尤为显著, 构建新型低压配电系统, 是实现“双碳”战略的重要构成部分, 也是电网企业数字化转型和新型电力系统建设的重要落脚点^[5]。

本文认为, 新型低压配电系统是一种拓扑清晰、源荷耦合, 以数字化手段为支撑, 以满足能源电力新业态发展为目标, 具有透明化、低碳化、互动化、灵活化、多元化特征的低压配电网。与主动配电网相比, 最大的区别在于新型低压配电系统中电源多不可

控; 与传统低压配电网相比, 其区别不仅在于智能化技术的进步颠覆了后者盲乱无序的形态, 新元素的发展推动了低压负荷柔性化, 更在于“双碳”赋能令其使命与内涵极大延伸, 不仅要作为末端电能量的传输与分配的物理路径, 也要作为海量小规模分布式新能源消纳、用电大数据获取以及能源电力新业态发展的关键支撑平台, 其形态特征将发生质的变化。因此, 打破传统低压配电网研究的惯性思维, 探索适用于新型低压配电系统的技术研究框架势在必行。

本文首先分析了低压配电系统新元素与形态变化, 提出了新型低压配电系统的典型特征及其量化评价指标, 指出了新型低压配电系统所面临的关键问题和支撑关键技术, 最后展望了新型低压配电系统技术发展方向, 为新型电力系统背景下低压配电系统领域的研究提供了思路。

1 低压配电系统新形态

近年来, 低压配电系统的新元素正逐渐增加。一方面是新能源元素, 如光伏、电动汽车(EV)充电电站的建设^[6-7]; 另一方面是台区智能终端、一二次融合开关、小微传感器等智能化元素^[8-9]的应用; 另外, 直流配电网元素也驱动低压系统的形态逐渐演化^[10-11], 主要体现在源(电源)、网(网架)、荷(负荷)、数(数字化)等4个方面。

1.1 跃变性双向潮流形态

对比2020年底全国户用光伏装机总容量为10.1 GW, 截至2021年8月底, 当年全国户用光伏新增装机总容量为9.52 GW^[12]。以低压光伏为主体的分布式电源(DG)装机呈井喷式增长态势。2021年

收稿日期: 2021-09-22; 修回日期: 2022-04-24。

上网日期: 2022-06-02。

国家自然科学基金资助项目(52177085)。

6月,国家能源局发布了《关于整县屋顶分布式光伏开发试点方案的通知》^[13],低压系统成为新能源分布式消纳的主战场,DG渗透率达到甚至超过100%的场景将越来越多,消纳难度极大。

由于台区整体容量小,间歇性超高渗透率的光伏将使得低压系统经常发生跃变性、双向性潮流,进而引起配电变压器过载、过电压、电压暂降等问题^[14],逆变器的谐波特性也给部分用户的用电电能质量带来不良影响^[15]。与发展较为成熟的中压系统不同,由于调控手段缺乏,低压系统对超高渗透率的DG几乎没有招架之力。为此,户用储能的技术及其经济性将成为消纳屋顶光伏的关键^[16]。

1.2 分层互联分区自治网架形态

首先,低压系统将纳入更为规范的规划,结合“三线整治”等城市治理工作,逐步形成更为工整的布线形式和更为清晰的网架结构。其次,鉴于台区内部负荷双向波动较大且台区之间负荷的不完全同步特点,从可靠性角度,新型低压配电系统将因地制宜形成必要的互联网架结构,如图1所示。其中,涉及台区间首端联络、台区间末端联络和相线间联络(通过换相开关)^[17-18]以满足电网自愈性需求;或者在稳态情况下,调节台区间或者相间的负荷平衡度以提高运行的安全性和经济性。

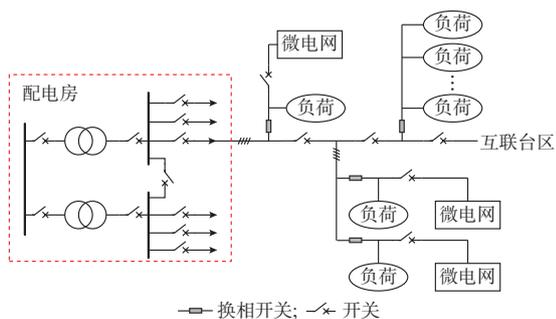


图1 低压配电系统互联网络架构

Fig. 1 Interconnection network architecture of low-voltage distribution system

此外,在部分偏远或高可靠性需求的低压负荷,可以整个低压台区或分支线或局部用户为单位,通过加装储能装置、并离网开关和微网控制器等,形成区域微电网(群)^[19-20],实现并/离网运行、灵活的功率互济与潮流优化,有效提升低压系统运行的安全性、稳定性和经济性。

考虑到新型低压配电系统中DG、充电桩、储能等新元素均为直流源或直流负荷,因而直流供用电技术将成为新型低压配电系统供用电的重要组成形态^[21]。数据中心、智能建筑、EV、智能家居、智慧市政都将是低压直流供用电的典型应用场景,低压供

用电生态也将由目前以交流为绝对主体向交直流并存甚至纯直流方向演变。低压系统直流化比10 kV及以上电压等级的配电网直流化更加具有经济价值和可操作性。

因低压系统中的设备和用户数量级太大,在10 kV及以上电压等级电网普遍采用的集中式调度并不适用,按台区分区自治将是新型低压配电系统运行控制的主要模式。

1.3 柔性化终端负荷形态

除了在能源供给侧推进清洁能源替代以外,国家还在能源消费侧推进电能替代。发展EV成为交通领域低碳化和电能替代的重点工作。截至2021年6月,全国新能源汽车保有量达603万辆,其中纯电动汽车占比高达81.7%,全国低压充电基础设施累计数量为182.7万台,同比增加42%^[22]。由于EV充电负荷具有周期性强、负荷基数大等特点,容易在短时间内形成充电负荷高峰,一旦叠加传统负荷高峰,将会极大考验低压系统的供电能力,甚至会引发低压系统全面过载、电能质量劣化等运行问题^[23]。

所幸EV同时具备柔性负荷^[24]的特性,是一种可通过主动参与电网运行控制,与电网进行能量互动的负荷。传统低压配电网负荷基本上被认定为刚性的,随着辅助服务、现货交易、需求侧响应、虚拟电厂、隔墙售电等电力市场政策的逐步完善^[25],低压系统的负荷形态也将由不可控的刚性越来越多地转变为灵活可控的柔性,成为新型低压配电系统的关键特征和解决DG超高渗透率消纳的重要手段。

1.4 能源与数据融合价值形态

低压系统运行的不确定性远高于高电压等级电网,加强其传感、监测和态势分析是确保其安全可靠运行的必然选择。数字化技术发展推动着低压系统装备逐步向小型化、一二次融合、软件定义终端等方向转变,智能化水平不断提升,一二次融合塑壳开关、智能网关、小微传感器、芯片化智能终端等新型装备的应用也将层出不穷^[26-28]。

低压系统作为连接海量用户的桥梁,其用户资源和数据资源远比10 kV及以上电压等级电网丰富。随着小微传感器、物联网、数字孪生、云计算与边缘计算协同(简称云边协同)等信息与通信技术^[29]的不断发展,数据将作为新型低压配电系统的核心生产要素^[30],依托强大的“电力+算力”,通过大数据分析和高性能计算技术,依靠数据关系发现物理系统运行规律和潜在风险,进而实现低压系统源-网-荷-储各环节高度协同,确保DG充分消纳,同时支撑互联网技术与电力市场高度融合而产生能源

新业态发展需求。与传统低压配电网相比,新型低压配电系统从单纯的物理网络升维形成电力物联网和信息物理融合系统,从能源的一维连接发展为能源与数据的两维价值传导,这将是一个颠覆性的变化。10 kV及以上电压等级电网的数据主要服务于电网的运行控制,而低压系统的海量数据可以支撑面向更广泛低压用户的各种增值服务,是真正具有大数据价值的,因而成为新型低压配电系统最为突出的新元素。

2 新型低压配电系统特征与量化指标

随着低压系统形态格局变化,新型低压配电系统将呈现以下5个方面的典型特征。

2.1 系统透明化

传统低压配电网的拓扑、开关状态和运行参数通常缺乏有效的感知和采集。一方面,为保证海量DG的友好消纳,新型低压配电系统需要考虑在低压配电网无法精确建模的前提下如何掌握其系统潮流分布,进而调动可控资源来避免网络阻塞;另一方面,作为连接海量低压用户与DG的重要载体,新型低压配电系统的规划设计、保护控制、运维管理和市场交易等均需要大量数据作为支撑。因此,可通过广泛部署小微传感器和智能电表实现低压配电系统的透明化^[8,30]。系统透明化程度评价指标 S_V 是衡量低压系统可观、可测水平的关键特征指标,包含台区变-线-相-户拓扑关系透明度 $S_{V,TP}$ ^[31-35]、低压开关状态透明度 $S_{V,SW}$ 和重要节点运行数据透明度 $S_{V,ME}$,即

$$S_{V,\phi} = \frac{n_\phi}{N_\phi} \quad (1)$$

式中: $\phi \in \{TP, SW, ME\}$; N_{TP} 为低压系统中拓扑信息量总数,其值为低压系统中台区数、分支线数、相序数(AN/BN/CN/ABCN,默认值为4)和用户数的乘积; N_{SW} 为低压系统中低压分支开关总数; N_{ME} 为低压系统中待观测的重要节点总数,其值为台区低压用户与各分支节点数之和; n_{TP} 、 n_{SW} 分别为拓扑关系和开关状态信息完整且无偏差的信息量总数; n_{ME} 为待观测节点中已装设智能电表或低压量测终端的数量。随着低压系统新型化发展,透明化指标将由0逐渐提升至或趋向于1。

2.2 用能低碳化

传统终端用户用能粗放,缺乏对可再生能源的关注。大力发展可再生能源、提高电能终端消费中的占比是推动“双碳”目标实现的重要手段,在未来新型低压配电系统中,用能低碳化应是其典型特征之一。用能低碳化评价指标 S_C 包含源端低碳指

数 $S_{C,EN}$ 和终端低碳指数 $S_{C,CO}$ 。 $S_{C,EN}$ 表示台区中可再生DG发电量占终端电能消费量比例; $S_{C,CO}$ 表示终端电能消费量占终端能源消费量比例。

$$S_{C,EN} = \frac{W_{CL}}{W_{EL}} \quad (2)$$

$$S_{C,CO} = \frac{W_{EL}}{W_{EN}} \quad (3)$$

式中: W_{CL} 为低压系统中可再生DG所发电总量; W_{EL} 为低压系统中终端用户电能消费总量; W_{EN} 为终端用户能源消费总量,除电能外还包括煤、油、气等其他形式的能源消费。

新型低压配电系统中,低碳化指标宏观上也有不断提高的趋势。

2.3 供需互动化

由于用户侧资产不适合由电网公司直接调控,10 kV及以上电压等级电网中由调度部门直接集中管理源网荷的方式并不适用于低压配电系统。随着DG和储能主动控制^[20]、EV有序充电与车辆到电网(V2G)^[36-37]、智能家居用电管理^[38-39]等柔性可控手段不断增加,在未来灵活多样的市场化交易模式下,通过物联网、区块链等技术^[40]聚合海量用户侧资源,以虚拟电厂形式进行供需互动将成为新型低压配电系统典型特征之一。供需互动化程度评价指标 S_M 包含源端可控资源占比 $S_{M,SO}$ 和荷端可控资源占比 $S_{M,LO}$ 。

$$S_{M,SO} = \frac{I_{SO} + P_{ST}}{P_{SO}} \quad (4)$$

$$S_{M,LO} = \frac{I_{LO} + P_{ST}}{P_{LO}} \quad (5)$$

式中: I_{SO} 和 I_{LO} 分别为低压系统中可控DG和柔性负荷总量,此处柔性负荷是指以个体或委托负荷聚合商等形式参与市场化交易的终端负荷,该负荷可以通过市场化手段进行柔性调节; P_{SO} 和 P_{LO} 分别为低压系统中DG装机总容量和负荷报装总容量; P_{ST} 为低压系统中分布式储能额定功率总和。

随着互动化指标的提升,新型低压配电系统将利用互动化平台的信息互动、体验增强与经济激励等相结合的方式来实现源荷多元柔性的协同运行。

2.4 运行灵活化

受限于技术手段和投资价值约束,传统低压配电网缺乏必要手段来保障运行灵活性和可靠性。而在新型低压配电系统中,分层互联与分区自治的网架拓扑结构、广泛覆盖的一、二次智能装备以及配套低压配电自动化系统将使运行方式呈现灵活化特点。正常工况下,通过智能可调设备与智能开关协

同控制优化潮流分布,进而提高 DG 消纳水平,改善电能质量和降低线路损耗^[41];故障工况下,基于故障定位信息,通过分段开关、联络开关以及微电网并网开关进行故障隔离、负荷转供以及微电网离网运行等,进而提升低压供电可靠性。运行灵活化评价指标 S_F 包含可转供用户数占比 $S_{F,TR}$ 和可离网用户数占比 $S_{F,OG}$ 。

$$S_{F,TR} = \frac{N_{TR}}{N_{total}} \quad (6)$$

$$S_{F,OG} = \frac{N_{OG}}{N_{total}} \quad (7)$$

式中: N_{TR} 为可转供用户数,可转供用户是指可通过自动化开关在不同台区、分支线和相线间实现供电路径切换的低压用户; N_{OG} 为可通过微电网进行离网运行的用户数; N_{total} 为低压系统中低压用户总数。

随着低压系统新型化发展,灵活化指标将由 0 逐渐提升至或趋向于 1。

2.5 业态多元化

传统低压配电网仅仅执行由电网公司向终端用户单向售电功能。能源互联在新型电力系统的概念下不仅是源网荷储充的多能互补,也形成了在现货市场、分布式售电和辅助服务等多样化市场机制下的新型互联网商业模式。除传统服务外,绿色电力、定制化服务、优质供电、精准计量、电力大数据等新型增值服务将成为新体验、新需求,低压售电与服务业态将由单一化变为多元化,且逐渐成为新型电力零售市场的新常态^[42]。为此,多元化评价指标 S_P 包含市场化交易电量占比 $S_{P,MA}$ 和新型服务收入占比 $S_{P,SE}$ 。

$$S_{P,MA} = \frac{W_{MA}}{W_{EL}} \quad (8)$$

$$S_{P,SE} = \frac{M_{SE}}{M_{SE} + M_{EL}} \quad (9)$$

式中: W_{MA} 为低压用户参与市场化交易电量的总和,即除传统统购统销^[43]模式外低压用户参与市场化交易所购或所销电量; M_{SE} 为新型增值服务营收,即在新型低压配电系统运营者角度通过提供新型增值服务所创造的营收; M_{EL} 为传统售电服务营收。在新型低压配电系统发展趋势下,多元化指标也将越来越高。

2.6 新型低压配电系统特征指标

为量化评价新型电力系统背景下传统低压系统转型速度与深度,可基于上述五大特征对新型低压系统特征显著度 S 进行定量评估。该指标数值主要与其特征评估指标相关,可以表示为 S_V 、 S_C 、 S_M 、 S_F

和 S_P 的加权函数,即 $S = f(S_V, S_C, S_M, S_F, S_P)$,而其中各特征评估指标又与其特征描述二级指标相关,也可以表示为其加权函数,具体映射关系如图 2 所示。

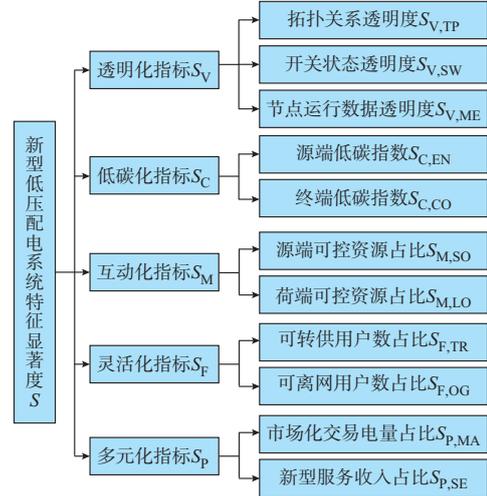


图 2 新型低压配电系统特征显著度指标体系
Fig. 2 Characteristic significance index system of new low-voltage distribution system

因此,当评估某地区低压系统是否具备新型电力系统特征时,只需要通过特征描述指标与加权函数计算其新型化特征显著度 S ,通过该数值判断其新型化转型建设效果与亟待加强的方面。

3 新型低压配电系统关键问题与技术

3.1 新型低压配电系统关键问题

新型电力系统背景下,低压系统所面临的电能质量、可靠性、经济性和安全性等关键问题将会呈现出更加复杂的机理。

3.1.1 电能质量问题

1)电压质量方面:大量 DG、EV 随机性接入影响了低压系统潮流分布,导致其系统电压分布呈现高度不确定性与剧烈的波动性、跃变性,负荷节点电压甚至会出现过电压、低电压和电压暂降等问题并存的现象。由于低压网络的拓扑复杂多变、参数不易明确,新型低压配电系统的电压质量问题表象将更加复杂。

2)谐波治理方面:随着变流器、电力电子开关等大量电力电子装备接入,将会使得新型低压配电系统谐波源呈现高密度、分散化、全网化趋势,影响供电质量^[44],但现阶段仍无法准确评估其影响程度与影响范围。

3.1.2 可靠性问题

1)可靠性数据监测方面:海量低压用户停电事件数据的采集、通信与存储将会给现有用电采集系

统带来巨大压力。

2) 低压可靠性评估方面: 由于 DG、储能、EV 可以在用户侧改变可靠性感受, 当前配电网可靠性的统计与评估体系无法准确反映低压用户用电可靠性的真实状况^[45]。

3) 智能化装备可靠性提升方面: 虽然新型低压配电系统灵活化的运行方式自愈能力强, 但由于智能化装备构造相对复杂, 装置本身的可靠性也成为影响其整体可靠性的关键因素。

4) 大量新型终端和装备在新型低压配电系统中的应用更是直接增加了新的运行风险。

3.1.3 经济性问题

1) 从电网运营商视角, 低压系统在源荷两端均存在高度的不确定性, 无法准确预测的峰谷差将导致系统规划偏保守, 经济性问题成为低压系统智能化的最大制约。

2) 为了支撑低压系统新型化转型, 大量智能传感终端和一、二次智能装备将在低压系统中广泛部署, 其投资效益的发挥也有赖于新型售电与服务态的建立与完善。目前对此存在很大的争议。

3) 从用户或负荷聚合商视角, 新型电力系统意味着更加广泛的市场交易参与机会。因此, 如何根据自身负荷特性, 制定更具经济效益的市场化交易策略, 是非常复杂的难题。

3.1.4 安全性问题

1) 物理安全方面: 不确定性的重过载将经常威胁到低压系统的安全运行; 未来低压系统短路故障特征以及故障下的 DG 孤岛运行问题将会变得更加复杂, 继电保护难以适应。

2) 信息安全方面: 从云计算信息安全角度, 未来低压系统配套系统平台建设将会普遍呈现“云化”趋势, 亟须解决云计算在实际应用中面临的安全问题, 包括云安全技术体系、管理体系和评价检测体系等^[46]。

3) 从物联网信息安全角度, 低压系统海量量测数据的采集、5G 等通信与应用的信息安全等级都是极大的挑战。

3.2 新型低压配电系统关键技术

除了被广泛关注的储能储电技术之外, 本文介绍分析了当前新型低压配电系统建设的几个关键热点技术。

3.2.1 数字孪生技术

数字孪生^[47]技术可以实现物理电网运行状态的实时、全息映射, 并通过数据分析实现对物理电网复杂特性的认知与态势预测, 是新型低压配电系统规划、运行、保护与控制的重要支撑技术。针对低压

系统数字孪生技术的研究主要包括以下几个方面。

1) 小微传感技术

由海量小微传感器^[48]构成的智能化感知体系是电网数字孪生的基础。由于低压系统规模远远大于其他电压等级电网, 其底层感知技术应具备泛在部署条件, 满足低成本、高可靠、低运维需求等特点。中国已在微型电流传感器方面取得创新技术突破, 并在低压系统开展了应用^[49-50]。未来, 低压系统中传感器除了满足小微特点外, 还应考虑具备多源数据采集融合的特点, 即在传统电气量、环境量等结构化数据采集的基础上, 考虑融合视频、图像等非结构化数据, 实现多源数据的高效采集。

2) 多模异构通信技术

构建多模异构通信网络是解决新型低压配电系统中海量传感设备、智能装备之间互联互通、稳定可靠通信问题的关键。当前, 低压系统本地通信方式主要包括低压电力线宽带载波、LoRa、微功率无线、RS-485 等, 其中载波通信在低压场景应用最为广泛^[51]。但当遭遇分支线开关调闸或断线等情况时, 则无法保证信息稳定上报。因此, 基于多模态通信方式有望成为主流方向^[52]。同时, 为满足低压系统大量异构设备的平台统一接入, 需构建不同通信协议的统一服务。低压配电网设备点多面广、种类繁多、运行环境差异大, 通过分析各典型场景的特点, 制定不同数据接口与通信协议的多模异构通信技术框架具有重要意义。

3) 低压拓扑自动识别技术

准确的低压系统拓扑信息是其数字孪生的基础。低压系统拓扑识别包括节点连接关系识别、网络参数辨识等^[53-55]。随着高级量测体系和电力物联网的建设发展, 通过挖掘低压量测数据特征来自动识别低压系统拓扑将成为该领域主要技术方向^[56]。文献^[57]从系统状态估计角度出发提出了拓扑推演方法。文献^[33, 55]通过分析电压时序相似性, 联合电流/功率偏差拟合实现拓扑识别。由于新型低压配电系统网络特性的多元、复杂、易变, 传统配电网拓扑分析方法难以适用。因此, 当前新型低压配电系统拓扑问题的研究重点在于: 1) “知识-数据”混合驱动建模方法, 基于深度学习、迁移学习等算法挖掘潮流数据与拓扑结构的映射关系; 2) 融入先验知识和专家经验的拓扑自动识别建模方法; 3) 基于多源数据融合、集成学习的拓扑识别结果可信度评价方法。

3.2.2 低压直流配电技术

与交流低压系统相比, 直流低压系统具有电能转换效率高、控制方式灵活、供电可靠性强、有利于

分布式新能源大规模消纳等优势^[58]。目前,对低压直流技术的研究主要集中在以下两方面。

1) 直流低压系统运行协调控制技术

直流低压系统控制按系统级别可分为单元级、微网级和配网级。单元级控制目前的研究主要针对DC/DC变压器和DC/AC变流器^[59]。微网级控制聚焦于多个源储荷的协调运行与维持直流母线电压的稳定^[60]。多个微电网接入直流配电网后,需要通过合理的配网级控制来保证整个配电网的经济、安全、可靠运行,须关注屋顶光伏群的低压多源功率预测和直流配电网的优化调度等方面^[61]。

2) 多源直流低压系统故障保护技术

与交流故障相比,直流系统的惯量低、阻尼小、故障发展过程更快,而且直流故障电流没有过零点,故障清除难度大,直流故障给配电网带来的冲击和挑战更大^[62-63]。此外,多源分散接入的低压直流系统的故障特性与低压交流电网特性显著不同。因此,低压直流系统的故障机理、检测和保护控制技术还有待深入研究。

3.2.3 云边协同技术

低压系统点多面广如同电力系统的毛细血管,传统集中化运行管控模式难以适用。一方面,低压系统传感网络产生的数据量极大,若集中于云端数据中心分析,则上行通信与云端的数据存储计算压力将成指数级增长;另一方面,低压配电网特性差异大,拓扑常有调整,而运行控制的实时要求高,云端集中模型难以支撑其动态性、个性化和实时性控制需求。为此,将低压配电网按配电台区进行划分,由各台区采用内部分布式自治控制方式,更容易解决实时响应控制问题。但纯粹的自治控制缺乏全局优化的逻辑。因此,可将实时性要求较低、优化性要求较高的任务交回云端处理,从而结合形成云边协同的控制模式^[64]。但云边协同控制如何建模,以及在通信压力尽可能小的情况下如何有效分配数据资源、满足边端实时且接近最优化的控制和云端大数据采集的需求,目前还处在理论框架研究阶段^[29],还存在诸多技术限制。

根据云平台与边缘计算终端的特点差异,设计面向业务应用需求的云边协同数据分析模型与策略是云边协同技术的核心。鉴于边端数据采集便利、实时性强,各类人工智能技术逐步从云端下沉至有一定算力的边缘,文献[64]围绕负荷预测场景,提出边缘端个性化预测与云端全域预测相结合的云边协同模型;面对不同应用场景,利用时序数据库、边缘流数据分析、异构计算等技术对边缘数据进行差异化分析,文献[65]提出了云边协同的配电变压器运

行状态评估与态势预测方法;通过搭建云端的全局管理平台,对边缘节点统一管控,从资源、数据、服务等方面实现多维协同,文献[66]提出了基于云边协同的电动汽车实时需求响应调度策略。随着新型低压配电系统中可控设备元素的增多,为实现整体调控目标,所涉及的调控对象也将会大幅增加,其云边协同控制策略的研究价值日益凸显。

3.2.4 信息安全防护技术

随着物联与通信技术在新型低压配电系统中应用的不断深入,相比于传统低压配电网,新型低压配电系统面对破坏多源协同调度和用户隐私信息窃取等网络攻击具有更低的耐受能力与更高的不确定性^[67]。随着新型低压配电系统云边协同计算单元的增多,外部攻击、虚假数据篡改^[68]、数据泄露等信息安全风险也将愈发严重,且新型低压配电系统的信息安全将影响低压系统业务应用的方方面面。文献[69]提出了边缘物联代理安全防护技术,形成了系统可信启动、基于数字证书的身份认证技术、基于国产商用密码算法的数据保护技术等。由于目前研究大多基于物联网的信息安全防护体系开展,随着低压系统中新元素逐渐增多,源网荷储协同控制、源荷互动等具备应用条件,基于新元素信息安全防护特点制定新型低压配电系统的信息安全防护体系将至关重要。

综上所述,相比于传统低压配电网,新型低压配电系统源端具有跃变性双向潮流特性;网端具有交直流混合发展特性;荷端具有柔性变化趋势;数端则具有能源数据价值深度融合趋势。新型低压配电系统研究框架归纳如图3所示。

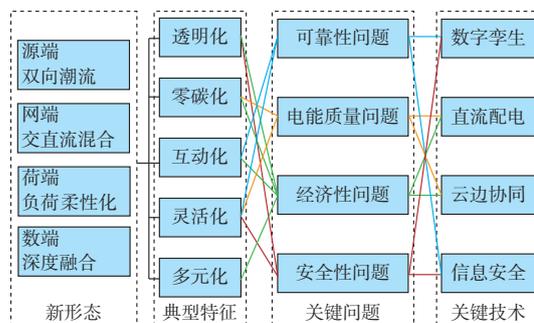


图3 新型低压配电系统研究框架
Fig. 3 Research framework of new low-voltage distribution system

4 新型低压配电系统技术发展展望

新型低压配电系统目前正处于起步阶段。随着新能源占比的持续增长,系统的特性将会越来越复杂,其建设、运行、运营等理念需要不断革新,各项技

术也需要不断发展,以支持经济高质量发展。

4.1 数字孪生技术展望

1)宽频测量与多频段态势感知技术

DG 普遍采用变换器与电网连接,使电力系统中的电力电子器件大量增加。而电力电子器件的宽频特征也让电力系统产生了多种频段的特性^[70],从而产生电力电子化系统特有的问题。传统的电力系统测量并未考虑宽频率的监测。为了更加真实地感知新型低压配电系统,应研究宽频测量的技术体系,包括采集、处理、通信和存储等方案。在此基础上,应充分挖掘多频段数据反映出来的新型低压配电系统特征,对新型低压配电系统进行多频段的态势感知。

2)分层数字孪生技术

虽然数字孪生技术具有高保真性、可扩展性、互操作性等优点^[71],但其对数据资源和计算资源的要求很高,应用在新型低压配电系统中容易受到现实条件的限制。为了提高数据孪生的实用性,应研究分层数字孪生技术,在空间尺寸上,从单个设备、多设备聚合、全系统等尺度分别采用不同的孪生体;在业务层面上,针对稳态、暂态分析区分频域和时域。

3)多领域交互技术

在新能源为主体的新型低压配电系统中,电力系统受天气的影响将十分显著。同时,低碳化的目标也在促使其他形式的源、荷进行电气化。新型低压配电系统的特征不可避免地与其他能源系统产生密切的耦合。为适应多个系统的耦合作用,应研究多领域交互技术,分别对电力系统、气象系统和其他能源系统的个体和系统建立孪生体,研究不同系统之间的交互接口,研究多领域仿真技术。

4)碳足迹时空模拟与优化技术

能源的生产、传输、消费产生温室气体,形成碳足迹。数字孪生技术为新型低压配电系统的碳足迹定位、溯源及其优化提供了清晰直观、可推演的有力工具。为深度结合数字孪生技术与新型低压配电系统碳足迹模拟,应研究新型低压配电系统碳足迹空间数字模拟技术、碳足迹时序推演技术、碳足迹优化技术。

4.2 低压直流配电技术展望

1)源网荷协同的低压交直流配电网规划运行技术

低压直流配电网对新型低压配电系统接纳 DG 具有多种优点,但在以交流系统占据绝对主体的条件下,低压直流配电网的实际应用仍有许多障碍。与中压配电网相比,低压配电网本来就缺乏科学的规划和优化的运行方法,面对新型低压配电系统的

升级发展,源网荷协同的低压交直流配电网规划运行技术成为当前最大的技术瓶颈。为提高低压直流配电网的适应性,应着重研究交直流电网的交互方式,以及考虑不确定性的交直流新型低压配电系统网络拓扑结构规划方法。未来,交直流微电网群协同控制技术也是值得关注的研究方向。

2)终端泛电气化技术

终端用能从以往的电气化,到当前阶段的再电气化,而未来还将发展泛电气化技术^[72]。基于屋顶光伏发电容易阶段性过载等特点,以低压配电网中的电能尤其是过剩电能为主体形式,结合碳捕捉与泛电气化技术利用电制氢、甲醇和有机材料等,最终支撑低压用户实现以可再生能源为原料的物品制造模式,并且提升终端电能的需求响应能力,进一步深化可再生能源对化石能源的替代。在新型低压配电系统的平台上,如何结合需求响应建立高效的泛电气化转换和生产技术,是非常有前途的一个研究方向。

3)新能源主体下的系统安全成本评估

与传统电力系统相比,以随机性、间歇性新能源为主体的新型低压配电系统,其安全风险有本质的变化。在以微网形式组织的低压系统中,应研究系统安全成本的评估方法,针对并、离网状态以及不同时间尺度的运行场景,建立系统运行安全评估体系,研究对应的防范手段,研究系统安全成本的分摊方法。

4.3 云边协同技术展望

1)软件定义高性能边缘计算终端技术

边缘计算通过将云端的部分数据应用功能部署至数据源的边缘节点,实现海量数据的就地处理,通过分层协同模式解决海量数据处理与精细化分析的矛盾。边缘计算终端是支撑云边协同技术实现的重要载体。软件定义高性能边缘计算终端技术是指在物理资源虚拟化的基础上,通过编程实现灵活、多样和定制的系统功能,实现对终端硬件的赋值、赋能和赋智。应加强边缘计算终端的功能架构设计、人工智能算法的深化和应用软件的开发等研发工作。

2)高维不确定性下的云边协同感知技术

新型低压配电系统将接入大量具有显著不确定性的“源储充微”元素。同时,随着电力市场逐步开放,用户广泛参与需求响应,其行为的高度个性化将伴随显著不确定性,导致新型低压配电系统难以预测。为此,需要研究云端、边缘端的源荷不确定性感知技术,以及云边协同下高维不确定性感知技术等。

3)兼顾多主体利益的云边协同调控技术

新型低压配电系统广泛存在源、储、荷多元可控

设备,电网公司、储能运营商、充电桩运营商、屋顶光伏业主等多元运营主体并存,在确保系统安全稳定前提下,最大化各运营主体的利益,应研究考虑共识约束的多主体边缘侧分布式自治技术,研究基于博弈论的云边协同调控技术等。

4.4 信息安全防护技术展望

1) 多元化主体参与的信息安全技术

新型低压配电系统包含各种“源储充微”元素,将衍生出相应的运营主体,如“光伏云”“储能云”等,通过公共网络参与到新型低压配电系统的信息体系中。若各主体的隐私保护、身份信任、身份保护等信息安全机制存在漏洞,则易形成危及低压系统运行安全性的跨信息物理空间攻击路径。应研究面向多主体协同的区块链技术、基于共识机制的信息安全防护技术等。

2) 多维立体的信息安全防护体系

不同于传统低压配电网的载波通信方式,伴随新型低压配电系统应运而生的各类智能设备依赖433 MHz、Zigbee和运营商网络等3种方式进行无线数据传输组网^[73]。此类通信方式下的信息安全问题包括隐私保护、密钥白盒攻击、去信任、秘钥攻击、身份保护、防窃听等。防护技术应在数据传输、聚合与发布、查询3个环节展开。例如,在传输阶段利用网络中间盒技术提供反监听防护^[74];在云端数据聚合阶段利用同态加密算法提供隐私加密保护^[75];在数据查询阶段利用可搜索加密技术提供查询内容与结果保护^[76]。为此,须研究同态加密、量子密码等新型密码技术,研究不同类型防护技术的融合机制,从而形成多维立体的信息安全防护体系。

5 结语

中国“双碳”战略目标的提出使得电力行业开始重新审视电力系统的形态,构建以新能源为主体的新型电力系统,低压配电系统从传统被忽略的神经末梢转变为新型电力系统建设的重要组成部分,其使命也从单纯支撑传统低压配售电业务扩展为支撑海量分布式电源消纳、终端大规模电能替代以及电力增值服务新业态开展。具备透明化、低碳化、互动化、灵活化和多元化特点的新型低压配电系统将集成最新的信息通信技术与材料装备技术,其规划设计、运行控制、运维检修和资产管理思路将极大地区别于传统低压配电系统,真正体现了“新型”电力系统的内涵,具有巨大的发展潜力与产业化空间。随着新材料、新器件、新装备和新技术的不断涌现,以及更充分地面临市场挑战,新型低压配电系统仍有更多的创新发展空间值得期待。

参考文献

- [1] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等.双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J].高电压技术,2021,47(9):3036-3046.
HAN Xiaqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47 (9): 3036-3046.
- [2] 舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [3] SMIL V. Distributed generation and megacities: are renewables the answer?[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17 (2): 37-41.
- [4] 张勇军,刘斯亮,江金群,等.低压智能配电网技术研究综述[J].广东电力,2019,32(1):1-12.
ZHANG Yongjun, LIU Siliang, JIANG Jinqun, et al. Research review on low-voltage intelligent distribution network technology [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 1-12.
- [5] 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.
- [6] HA T, ZHANG Y J, THANG V V, et al. Energy hub modeling to minimize residential energy costs considering solar energy and BESS [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 389-399.
- [7] INJETI S K, THUNUGUNTLA V K. Optimal integration of DGs into radial distribution network in the presence of plug-in electric vehicles to minimize daily active power losses and to improve the voltage profile of the system using bio-inspired optimization algorithms [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 21-35.
- [8] 赵鹏,蒲天骄,王新迎,等.面向能源互联网数字孪生的电力物联网关键技术及展望[J].中国电机工程学报,2022,42(2):447-458.
ZHAO Peng, PU Tianjiao, WANG Xinying, et al. Key technologies and perspectives of power Internet of Things facing with digital twins of the energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 447-458.
- [9] 李钦豪,张勇军,陈佳琦,等.泛在电力物联网发展形态与挑战[J].电力系统自动化,2020,44(1):13-22.
LI Qin hao, ZHANG Yongjun, CHEN Jiaqi, et al. Development patterns and challenges of ubiquitous power Internet of Things [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (1) : 13-22.
- [10] 刘健,魏昊焜,张志华,等.未来配电网的主要形态——基于储能的低压直流微电网[J].电力系统保护与控制,2018,46(18):11-16.
LIU Jian, WEI Haokun, ZHANG Zhihua, et al. Future architecture of power distribution network—low-voltage direct current micro-grids based on energy storage [J]. Power System

- Protection and Control, 2018, 46(18): 11-16.
- [11] 魏然,张磐,高强伟,等.基于网络树状图的低压配电网故障研判仿真分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(13):167-173.
WEI Ran, ZHANG Pan, GAO Qiangwei, et al. Simulation analysis of low-voltage distribution network fault diagnosis based on tree structure diagram[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 167-173.
- [12] 昌校宇,杨洁.投资回报率超10%!说说你不甚了解的“户用光伏”[EB/OL].[2021-08-07].<https://www.163.com/dy/article/GMCOL26805505W4N.html>.
CHANG Xiaoyu, YANG Jie. The return on investment exceeds 10%! Talk about the “household PV” you don’t know very well [EB/OL]. [2021-08-07]. <https://www.163.com/dy/article/GMCOL26805505W4N.html>.
- [13] 对分布式光伏电站整县推进政策的疑问?[EB/OL].[2021-07-07].http://www.nea.gov.cn/2021-07/09/c_1310051436.htm.
Questions about the promotion policy of distributed photovoltaic power stations in the whole county? [EB/OL]. [2021-07-07]. http://www.nea.gov.cn/2021-07/09/c_1310051436.htm.
- [14] 张锶恒.考虑分布式光伏与储能接入的配电变压器选型定容规划[D].广州:华南理工大学,2020.
ZHANG Siheng. Distribution transformer selection and capacity planning considering distributed photovoltaic and energy storage access [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [15] ADEFARATI T, BANSAL R C. Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(7): 873-884.
- [16] ZHOU L, ZHANG Y J, LIN X M, et al. Optimal sizing of PV and BESS for a smart household considering different price mechanisms[J]. IEEE Access, 2018, 6: 41050-41059.
- [17] 张明明,秦平,陈永进,等.低压配电网分段和联络开关优化配置方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(5):138-144.
ZHANG Mingming, QIN Ping, CHEN Yongjin, et al. Study on optimal allocation method of section and loop switches in low-voltage distribution network [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(5): 138-144.
- [18] 吴在军,成晟,朱承治,等.基于线性近似模型的三相不平衡有源配电网重构[J].电力系统自动化,2018,42(12):134-141.
WU Zaijun, CHENG Sheng, ZHU Chengzhi, et al. Reconfiguration of unbalanced active distribution network based on linear approximation model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 134-141.
- [19] XIE P, CAI Z X, LIU P, et al. Microgrid system energy storage capacity optimization considering multiple time scale uncertainty coupling [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5234-5245.
- [20] LIU Z H, YI Y Q, YANG J H, et al. Optimal planning and operation of dispatchable active power resources for islanded multi-microgrids under decentralised collaborative dispatch framework [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(3): 408-422.
- [21] 张勇军,刘子文,宋伟伟,等.直流配电系统的组网技术及其应用[J].电力系统自动化,2019,43(23):39-49.
ZHANG Yongjun, LIU Ziwen, SONG Weiwei, et al. Networking technology and its application of DC distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 39-49.
- [22] 全国纯电动汽车保有量达493万辆,占新能源汽车总量的81.7% [EB/OL]. [2021-07-07]. <https://www.chinaz.com/2021/0707/1275585.shtml>.
The number of pure EV in China reached 4.93 million, accounting for 81.7% of the total number of new energy vehicles [EB/OL]. [2021-07-07]. <https://www.chinaz.com/2021/0707/1275585.shtml>.
- [23] 赵黄江,向月,刘俊勇,等.基于改进配电网安全域的规模化电动汽车入网影响分析[J].电力自动化设备,2021,41(11):66-73.
ZHAO Huangjiang, XIANG Yue, LIU Junyong, et al. Analysis on impact of large-scale electric vehicles integration based on improved security region of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 66-73.
- [24] 齐宁,程林,田立亭,等.考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J].电力系统自动化,2020,44(10):193-207.
QI Ning, CHENG Lin, TIAN Liting, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 193-207.
- [25] 尚楠,张翔,宋艺航,等.适应清洁能源发展和现货市场运行的容量市场机制设计[J].电力系统自动化,2021,45(22):174-182.
SHANG Nan, ZHANG Xiang, SONG Yihang, et al. Design of capacity market mechanism adapting to clean energy development and spot market operation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 174-182.
- [26] KIGUCHI Y, WEEKS M, ARAKAWA R. Predicting winners and losers under time-of-use tariffs using smart meter data[J]. Energy, 2021, 236: 121438.
- [27] XIA Y, XU Y, GOU B. Current sensor fault diagnosis and fault-tolerant control for single-phase PWM rectifier based on a hybrid model-based and data-driven method [J]. IET Power Electronics, 2020, 13(18): 4150-4157.
- [28] 王日宁,武一,魏浩铭,等.基于智能终端特征信号的配电网台区拓扑识别方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(6):83-89.
WANG Rining, WU Yi, WEI Haoming, et al. Topology identification method for a distribution network area based on the characteristic signal of a smart terminal unit [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 83-89.
- [29] 彭超逸,刘映尚,周华锋,等.基于云边融合的电力生态运行:理论框架[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3204-3214.
PENG Chaoyi, LIU Yingshang, ZHOU Huaifeng, et al. Power ecosystem operation based on cloud-edge collaboration: theoretical framework [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3204-3214.
- [30] 中国南方电网有限责任公司.数字电网推动构建以新能源为主体的新型电力系统白皮书[R/OL].[2021-04-24].<https://news.bjx.com.cn/html/20210425/1149180.shtml>.
China Southern Power Grid Co., Ltd. White paper on digital power grid promoting the construction of new power system with renewable energy as the main body [R/OL]. [2021-04-

- 24]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210425/1149180.shtml>.
- [31] HUANG X M, LIU X, ZHANG Y J, et al. Data operation & maintenance technology based on comprehensive measurement of transparent distribution network [C]// 2018 IEEE International Conference on Power System Technology, November 6-8, 2018, Guangzhou, China: 4272-4277.
- [32] LAI X P, CAO M, LIU S Y, et al. Low-voltage distribution network topology identification method based on characteristic current [C]// 2021 IEEE 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), April 8-11, 2021, Chongqing, China: 1233-1238.
- [33] ZHOU L, ZHANG Y J, LIU S L, et al. Consumer phase identification in low-voltage distribution network considering vacant users [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 121: 106079.
- [34] ZHOU L, LI Q H, ZHANG Y J, et al. Consumer phase identification under incomplete data condition with dimensional calibration [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 129: 106851.
- [35] 高泽璞, 赵云, 余伊兰, 等. 基于知识图谱的低压配电网拓扑结构辨识方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 34-43.
GAO Zepu, ZHAO Yun, YU Yilan, et al. Low-voltage distribution network topology identification method based on knowledge graph [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 34-43.
- [36] SRILAKSHMI E, SINGH S P. Energy regulation of EV using MILP for optimal operation of incentive based prosumer microgrid with uncertainty modelling [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134: 107353.
- [37] LI S Q, GU C H, ZENG X W, et al. Vehicle-to-grid management for multi-time scale grid power balancing [J]. Energy, 2021, 234: 121201.
- [38] PÁRAMO O A, RIVERA J C, LÓPEZ G A. Effects on electricity markets of a demand response model based on day ahead real time prices: application to the Colombian case [J]. IEEE Latin America Transactions, 2018, 16(5): 1416-1423.
- [39] 余玉龙. 智能家居系统能效优化管理的研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
SHE Yulong. Research on energy efficiency optimization management of smart home system [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2020.
- [40] 叶琳浩, 刘泽槐, 张勇军, 等. 智能用电技术背景下的配电网运行规划研究综述 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 154-163.
YE Linhao, LIU Zehuai, ZHANG Yongjun, et al. Review on operation and planning of distribution network in background of smart power utilization technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 154-163.
- [41] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 提升配电网新能源消纳能力的分布式储能集群优化控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 76-83.
LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Optimal control strategy of distributed energy storage cluster for prompting renewable energy accommodation in distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 76-83.
- [42] 陈启鑫, 房曦晨, 郭鸿业, 等. 电力现货市场建设进展与关键问题 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 3-15.
CHEN Qixin, FANG Xichen, GUO Hongye, et al. Progress and key issues for construction of electricity spot market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 3-15.
- [43] 孙素苗, 迟东训, 于波, 等. 构建新型电力市场体系及电价机制 [J]. 宏观经济管理, 2021(3): 71-77.
SUN Sumiao, CHI Dongxun, YU Bo, et al. Build a new-type electric market system and an electric pricing mechanism [J]. Macroeconomic Management, 2021(3): 71-77.
- [44] 林丽娟, 贾清泉, 田书娅, 等. 基于一致性算法的配电网谐波分布式治理策略 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 109-117.
LIN Lijuan, JIA Qingquan, TIAN Shuya, et al. Distributed harmonic mitigation strategy of distribution network based on consensus algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 109-117.
- [45] 莫一夫, 张勇军. 基于变权灰关联的智能配电网用电可靠性提升对象优选 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 26-34.
MO Yifu, ZHANG Yongjun. Optimal object selection of power utilization reliability promotion for smart distribution grid based on weighted grey correlation [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 26-34.
- [46] SINGH S, CHANA I. A survey on resource scheduling in cloud computing: issues and challenges [J]. Journal of Grid Computing, 2016, 14(2): 217-264.
- [47] GEHRMANN C, GUNNARSSON M. A digital twin based industrial automation and control system security architecture [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(1): 669-680.
- [48] 中国工程院院士李立涅理想中的“透明电网”是何方神圣? [EB/OL]. [2018-09-11]. <http://m.bjx.com.cn/mnews/20180911/927093.shtml>.
What is sacred about the “transparent power grid” in the ideal of LI Licheng, an academician of the Chinese Academy of Engineering? [EB/OL]. [2018-09-11]. <http://m.bjx.com.cn/mnews/20180911/927093.shtml>.
- [49] 吴煜文, 田翠华, 吴凡, 等. 磁阀式电磁型电流互感器 [J]. 高压电压技术, 2020, 46(9): 3154-3163.
WU Yuwen, TIAN Cuihua, WU Fan, et al. Magnetic-valve-type electromagnetic current transformer [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3154-3163.
- [50] 朱梦梦, 罗强, 曹敏, 等. 电子式电流互感器传变特性测试与分析 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 143-149.
ZHU Mengmeng, LUO Qiang, CAO Min, et al. Test and analysis of transfer characteristics of electronic current transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 143-149.
- [51] 金鑫, 肖勇, 曾勇刚, 等. 低压电力线宽带载波通信信道建模及误差补偿 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2800-2809.
JIN Xin, XIAO Yong, ZENG Yonggang, et al. Modeling and error compensation for low-voltage broadband power line communications [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2800-2809.
- [52] 史建超, 谢志远. 面向电力物联网信息感知的低压电力线与微

- 功率无线通信融合方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 147-157.
- SHI Jianchao, XIE Zhiyuan. Fusion method of low voltage power line and micro power wireless communication for information perception of Power Internet of Things[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 147-157.
- [53] 张天策, 王剑晓, 李庚银, 等. 面向高比例新能源接入的配电网电压时空分布感知方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 37-45.
- ZHANG Tiance, WANG Jianxiao, LI Gengyin, et al. Perception method of voltage spatial-temporal distribution of distribution network with high penetration of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 37-45.
- [54] LUAN W P, PENG J, MARAS M, et al. Smart meter data analytics for distribution network connectivity verification [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1964-1971.
- [55] 唐捷, 蔡永智, 周来, 等. 基于数据驱动的低压配电网线户关系识别方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 127-134.
- TANG Jie, CAI Yongzhi, ZHOU Lai, et al. Data-driven based identification method of feeder-consumer connectivity in low-voltage distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 127-134.
- [56] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.
- HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of Internet of Things in smart grid [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [57] CUNHA V C, FREITAS W, TRINDADE F C L, et al. Automated determination of topology and line parameters in low voltage systems using smart meters measurements [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5028-5038.
- [58] SALOMONSSON D, SANNINO A. Low-voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1620-1627.
- [59] ZHAO S S, CHEN Y, CUI S H, et al. Three-port bidirectional operation scheme of modular-multilevel DC-DC converters interconnecting MVDC and LVDC grids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7342-7348.
- [60] ROUZBEHI K, MIRANIAN A, CANDELA J I, et al. A generalized voltage droop strategy for control of multiterminal DC grids [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 607-618.
- [61] 金国彬, 潘狄, 陈庆, 等. 考虑自适应实时调度的多电压等级直流配电网能量优化方法[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3906-3917.
- JIN Guobin, PAN Di, CHEN Qing, et al. Energy optimization method of multi-voltage-level DC distribution network considering adaptive real-time scheduling [J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3906-3917.
- [62] 徐政, 肖晃庆, 张哲任. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- XU Zheng, XIAO Huangqing, ZHANG Zheren. Flexible DC transmission system [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [63] XIAO H Q, XU Z, XIAO L, et al. Components sharing based integrated HVDC circuit breaker for meshed HVDC grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1856-1866.
- [64] GONG Y, CHEN C Y, LIU B Y, et al. Research on the ubiquitous electric power Internet of Things security management based on edge-cloud computing collaboration technology [C]// 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference, November 21-23, 2019, Beijing, China: 1997-2002.
- [65] 张波, 刘海涛, 彭港, 等. 面向云边协同的配电变压器运行状态评估及态势预测[J/OL]. 重庆大学学报: 1-13 [2021-09-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20210924.2138.002.html>.
- ZHANG Bo, LIU Haitao, PENG Gang, et al. Operation state assessment and situation prediction of distribution transformer for cloud edge collaboration [J/OL]. Journal of Chongqing University: 1-13 [2021-09-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20210924.2138.002.html>.
- [66] 张巍, 王丹. 基于云边协同的电动汽车实时需求响应调度策略[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1447-1458.
- ZHANG Wei, WANG Dan. Real-time demand response scheduling strategy for electric vehicles based on cloud edge collaboration [J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1447-1458.
- [67] 吴艳莉. 云计算环境下智能配电网数据传输安全研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- WU Yanli. Research on data transmission security of smart distribution network in cloud computing environment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [68] 梁英, 王耀坤, 刘科研, 等. 计及网络信息安全的配电网CPS故障仿真[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 235-242.
- LIANG Ying, WANG Yaokun, LIU Keyan, et al. CPS fault simulation of distribution network considering network information security [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 235-242.
- [69] YANG W Y, LIU W, WEI X S, et al. EdgeKeeper: a trusted edge computing framework for ubiquitous power Internet of Things [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(3): 374-399.
- [70] 吴艳平, 姚建国, 常乃超, 等. 多功能宽频测量装置的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 136-141.
- WU Yanping, YAO Jianguo, CHANG Naichao, et al. Design and implementation of multi-functional wide-frequency measurement device [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 136-141.
- [71] 沈沉, 曹仟妮, 贾孟硕, 等. 电力系统数字孪生的概念、特点及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 487-499.
- SHEN Chen, CAO Qianni, JIA Mengshuo, et al. Concepts, characteristics and prospects of application of digital twin in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 487-499.

- [72] 李立涅. 建设透明电网, 支持能源绿色转型[EB/OL].[2021-09-16].https://m.thepaper.cn/baijiahao_14527282.
LI Licheng. Building a transparent power grid and supporting green transformation of energy [EB/OL]. [2021-09-16].
https://m.thepaper.cn/baijiahao_14527282.
- [73] 任昊. 新型网络环境下的数据安全与隐私保护关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
REN Hao. Research on key technologies of data security and privacy protection in new network environments[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [74] SHERRY J, LAN C, POPA R A, et al. BlindBox[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2015, 45(4): 213-226.
- [75] HAN S, ZHAO S, LI Q H, et al. PPM-HDA: privacy-preserving and multifunctional health data aggregation with fault tolerance[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2016, 11(9): 1940-1955.
- [76] WANG B Y, LI M, XIONG L. FastGeo: efficient geometric range queries on encrypted spatial data[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2019, 16(2): 245-258.
- 张勇军(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 智能电网与能源互联网的规划、运行与控制等。E-mail: zhangjun@scut.edu.cn
- 羿应棋(1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 配用电大数据分析与应用。E-mail: yi_yingqi@foxmail.com
- 李立涅(1941—), 男, 博士, 中国工程院院士, 主要研究方向: 透明电网、能源互联网、高电压技术。
- 钟康骅(1998—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向: 泛在电力物联网、低压配电网大数据应用。E-mail: konver@foxmail.com
- (编辑 代长振)

Prospect of New Low-voltage Distribution System Technology Driven by Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality Targets

ZHANG Yongjun, YI Yingqi, LI Licheng, ZHONG Kanghua, LI Qinshao, LIU Siliang, XIAO Huangqing
(Research Center of Smart Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Distributed application of renewable energy is an important way to support China to achieve the strategic target of “carbon emission peak and carbon neutrality”, which is bound to have a revolutionary impact on the low-voltage distribution system and pose a new challenge to the traditional planning, operation and maintenance methods. First, the elements and morphological changes of low-voltage distribution systems in China are analyzed, and the development status and problems of each link are introduced. Secondly, the typical characteristics of the new low-voltage distribution system are analyzed from the five dimensions of transparency, low-carbon, interaction, flexibility and diversification, and the quantitative evaluation index of its characteristic significance is proposed. Finally, aiming at the four key issues of power quality, reliability, economy and security, the four key technologies supporting the new low-voltage distribution system are discussed and its future development direction is prospected.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52177085).

Key words: new power system; carbon emission peak; carbon neutrality; renewable energy; distribution system; digital twin; cloud-edge collaboration

