

新一代低压直流供用电系统在“新基建”中的应用技术分析与发展展望

梁永亮¹, 吴跃斌², 马钊^{1*}, 张恒旭¹, 孙媛媛¹, 姜杰¹, 李可军¹

(1. 山东大学电气工程学院, 山东省 济南市 250061;

2. 国网雄安新区供电公司, 河北省 雄安新区 071600)

Application and Development Prospect of New Generation of LVDC Supply and Utilization System in “New Infrastructure”

LIANG Yongliang¹, WU Yuebin², MA Zhao^{1*}, ZHANG Hengxu¹, SUN Yuanyuan¹, LOU Jie¹, LI Kejun¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China;

2. State Grid Xiongan New Area Electric Power Supply Company, Xiongan New Area 071600, Hebei Province, China)

ABSTRACT: To overcome social development challenges from energy, environment and economy, the development strategy of “New Infrastructure” represented by 5G base station and EV charging pile is proposed in China. As part of the infrastructure, the choice and construction of power supply system is very important for “New Infrastructure”. Firstly, the concept evolution and meaning of “New Infrastructure” is introduced and its characteristic of “DC load” is analyzed. Then, the concept and characteristics of Low Voltage Direct Current Supply and Utilization System (LVDCSUS) is introduced. In addition, based on the analysis of common and individual needs of power supply systems for various scenarios of “New Infrastructure”, advantages of LVDCSUS as power supply systems for 5G base station, data center, EV charging pile, DC green building, smart home, industrial internet, and rural area are introduced. Moreover, development suggestions of LVDCSUS under the “New Infrastructure” background were provided from views of top design, policy, way of thinking, technology innovation and key equipment, development route, including research route of key technology and core equipment and suggestions of ecological construction of the whole chain of LVDCSUS. Finally, the conclusion is made. In power supply and utilization area, the LVDCSUS can already be considered as assistance and substitution for AC power, and is promising to be a new type of digital power supply and utilization system.

KEY WORDS: New Infrastructure; low voltage direct current supply and utilization system (LVDCSUS); DC load; photovoltaic power generation; proconsumer; DC ecological model

摘要: 为应对当今社会发展所面临的能源、环境、经济等压

力, 以 5G 基站、充电桩等为代表的基础设施建设成为新时期经济发展的重点。新型基础设施电力供应系统的选择和建设至关重要。该文首先概述新基建的内容演变和意义, 分析普遍具有负荷直流化的特征。其次介绍新一代低压直流供用电系统(low voltage direct current supply and utilization system, LVDCSUS)及其内涵与特征, 然后分析新基建不同领域电力供应系统的共性和个性需求, 指出以 LVDCSUS 作为 5G 基站、数据中心、新能源汽车充电桩、直流绿色建筑、智能家居、工业互联网、农村及边远地区等 7 种不同领域基础设施电力供应系统的优势。进而从顶层设计、政策支持、思维方式、技术创新和核心设备、发展路线等维度探讨了新基建背景下 LVDCSUS 的发展方向并提出具体建议, 提出关键技术和核心设备的研发方向, 提出直流系统全链条、生态建设的建议。最后给出结论, 在供用电领域, 新一代低压直流供用电系统已经可以成为交流电源的辅助和替代, 并有望成为一种新型的数字化供用电系统。

关键词: 新基建; 新一代低压直流供用电系统; 负荷直流化; 光伏发电; 发储用一体化; 直流生态模式

0 引言

全球新冠病毒疫情的爆发, 严重危害也重创了人类发展进程, 但也为人类创造了一个重新思考, 谋划未来发展的重要机遇, 从而加快从第二次工业革命向第三次工业革命的转型。令人振奋的是, 绿色复苏已经成为世界主要经济体的共识, 投资经济模式大转型和新兴的“社会范畴的基础设施”已经成为各国救市新注入资本的主要流向。纵观人类社会有史以来的三次工业革命中, 每次革命的发生,

都伴随着新的通用目的技术、生产要素和基础设施三大驱动要素的出现^[1]。基础设施对经济社会、人类发展的重要作用不言而喻。为了适应经济社会的发展，应对能源、环境、经济等多方面的压力，布局以 5G 基建、新能源汽车充电桩为代表的新型基础设施建设成为推动经济高效健康发展的新战略，新型基础设施主要包括 5G 基站、大数据中心、人工智能、新能源汽车充电桩、城际高速铁路和城际轨道交通、工业互联网、特高压等领域^[2]。

投资建设具有前瞻性的基础设施，不仅可以转化为产业生态优势，还可以抢占新一轮全球科技竞

争的制高点。新基建的本质是信息数字化的基础设施，是以新发展理念为引领，以技术创新为驱动，以信息网络为基础，面向高质量发展需要，提供数字转型、智能升级、融合创新等服务的基础设施体系。新基建的建设不仅能够促进经济的高质量发展，同时还有利于塑造国家的数字竞争力。新基建的发展阶段及其内涵特征如表 1 所示^[3]。作为基础设施建设的一部分，电力供应系统的选择和建设具有重要意义，需要充分考虑 5G 基站等新型基础设施电力供应系统的自身特点，客观分析 AC 与 DC 在不同场景下各自的优势，进行深入的研究。

表 1 新基建内容的演变

Table 1 Evolution of new infrastructure content

发展阶段	具体包含的内容
“新基建” 1.0	七大板块：5G 基建，特高压，城际高速铁路和城市轨道交通，新能源汽车充电桩，大数据中心，人工智能及工业互联网。
	交通网：高铁，普铁，城市轨道交通等；
“新基建” 2.0	信息网：5G，大数据，人工智能，工业互联网等；
	能源网：特高压，智能电网，光伏，风能，核电，天然气，新能源充电桩，氢能源加气站等。
	三大方向：一是信息基础设施。主要是指基于新一代信息技术演化生成的基础设施，比如，以 5G，物联网，工业互联网，卫星互联网为代表的通信网络基础设施，以人工智能，区块链，云计算等为代表的新技术基础设施，以数据中心，智能计算中心为代表的算力基础设施等；
“新基建” 3.0	二是融合基础设施。主要是指深度应用互联网，大数据，人工智能等技术，支撑传统基础设施转型升级，进而形成的融合基础设施，比如，智能交通基础设施，智慧能源基础设施等；
	三是创新基础设施。主要是指支撑科学研究，技术开发，产品研制的具有公益属性的基础设施，比如，重大科技基础设施，科教基础设施，产业技术创新基础设施等。

回顾人类对电能的使用和发展，大体经历了 3 个历史时期：1) 萌芽阶段，约在 1892 年以前，发、输、用电均为直流电；2) 交流统治时代，约从 1893 年至 20 世纪 50 年代，发、输、用电基本均为交流电；3) 提升阶段，1950 年至今，直流电源和负荷所占比重逐渐增加，交直流输配电网络并存。通过分析不难发现，电网形态和交直流的选择无不是当时电源、负荷和技术条件下的自然结果。纵观交直流的发展历史，特别是爱迪生与特斯拉的交直流之争^[4-5]，不禁引起以下思考：1) 在早期的电力系统中，爱迪生尽量让发电装置和用电设备的距离不要太远的思路，对当今直流的发展有何可借鉴之处？2) 当时对负荷类型尚未深入考虑，基于用电负荷的发展趋势，是否直流更适合现在以及未来的负荷需求？3) 如果爱迪生和特斯拉在 1885 年不是恶意竞争，而是通力合作(无论是在交流或直流领域)，电力系统的历史又会是怎样的？

电能使用发展至今，从电源角度看，以光伏为代表的分布式直流电源日益增多；从负荷角度看，以通信为代表的移动式直流负荷呈快速增长之势，

且随着 IT 和物联网、无人驾驶、机器人、移动可穿戴设备、虚拟娱乐装置等的普及发展，负荷直流化趋势日益明显；从供用电网络看，系统中多元源荷呈现出非线性、随机性、强耦合等特征，需要经过较为复杂的转换设备和控制策略才能接入以交流为主体的传统供用电系统，且在运行模式、可靠性、能量损耗等方面遇到了严重挑战。与此同时，目前诸多因素推动着全球能源系统转向资源—市场混合形式，未来电网将出现不同能源的组合，电能消费者和生产者将频繁转换，系统结构和运行模式将面临更多运行风险。传统的交流供用电网络难以满足分布式可再生能源、负荷的发展要求。在源、荷皆为直流形态的情况下，采用直流供电网络，可省去中间的交直流变换环节，实现电源灵活、高效的接入，低损耗、高可靠、低碳的传输，以及能效更高、成本更低的负荷利用。

在直流配电领域，国外学者和研究机构较早开始相关研究。日本学者在 2004 年对直流配电网架构和关键技术展开研究，并提出基于直流微网的分布式发电系统^[6]。意大利学者也于 2004 年提出与文献[6]

中的双极结构类似的直流配电系统结构^[7]。自2008年以来,英国、瑞士和意大利等开展了 UNIFLEX-PM(Universal and Flexible Power Management)项目的研究^[8],美国也于2011年提出与 UNIFLEX-PM 类似的 FREEDM(The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management)交直流混合配电网,其主要用途是为了接纳和管理新能源^[9]。德国亚琛大学在其校园内建设的10kV双极结构直流研究网络被认为是真正意义上的中压直流配电系统^[10]。以上研究从电压等级序列、拓扑结构以及运行经验等方面对我国直流配电的发展起到了重要的借鉴意义。我国学者分别从网络拓扑^[11-12]、电压等级^[13]、运行控制^[14-15]及故障保护^[16-17]等方面对中压直流配电开展了卓有成效的研究。

与中压直流配电相比,低压直流供电系统(1500V及以下电压等级),具有广阔的应用前景,技术成熟度,经济可行性和市场化方面具有相对明显的优势^[18],CIGRE、IEC、IEEE等机构已经开始针对低压直流系统开展相关标准的研究。国内外学者针对低压直流供电系统的系统结构、负荷建模、故障分析、电能质量及保护与控制等方面开展了研究^[19-22]。国内已在多地开展了低压直流供电系统示范工程的建设,主要包括:雄安新区全直流生态的低压直流供电系统、珠海“光伏未来屋”、苏州同里综合能源服务中心、深圳未来大厦^[12,23-24],等。分布式直流电源经直流微网与终端直流负载直接相连的新一代低压直流供电系统(low voltage direct current supply and utilization system, LVDCSUS),不仅能在一定程度上减轻交流电网压力,还可省去大量电力电子转换装置,减少损耗,提高电网供电效率及经济性,且没有交流电网固有的同步和稳定性问题,有功和无功功率可快速且独立解耦控制,也可避免交流电的无功功率、频率等问题^[25]。

不难发现,新基建相关领域中,除特高压外,其他六大领域普遍具有负荷直流化的特点,同时计及低碳、节能、环保、绿色、智能等时代化要求, LVDCSUS 完全符合新基建对电力供应系统的要求,5G基站、新能源汽车充电桩、大数据中心、城市轨道交通等是 LVDCSUS 的直接应用场景。将 LVDCSUS 的发展与建设纳入到新基建的战略规划中,不仅可以很好地为新基建解决电力供应问题,而且可以带动可再生能源、电力电子、家电等相关产业的发展与升级,创造新的就业机会和经济增长点。下面简要介绍新一代 LVDCSUS,分析以

LVDCSUS 作为新基建电力供应系统的优势,探讨新基建背景下 LVDCSUS 的发展策略,并提出相应的建议。

1 新一代 LVDCSUS 内涵特征

新一代 LVDCSUS 是一体化的发-储-用全直流生态供电系统,由可再生能源、直流供电网络、储能装置、直流负荷等组成,除了承担传统的供电任务之外, LVDCSUS 更加强调可再生能源的消纳、发-储-用之间的协调统一、与 IoT、AI 和区块链等新技术的结合,通过对不同应用场景负荷特点的分析及因地制宜的模块化设计,不仅减少了 AC/DC、DC/AC 转换,在用电设备内还可减少 DC/DC 转换,从而进一步降低能耗,构造一种新的相对简单的直流供电模式,其主要运行模式可分为自主型全直流生态模式和辅助型全直流生态模式^[25-26],如图1中所示,发、储、用一体化(Procunsummer)的自主性全直流生态模式(如社区、智能楼宇等)可完全独立运行,也可在必要时支撑外部电网的运行。从技术上,主要具有以下特征:

最小构成单位是一个全息化的有机体(unit cell)。“麻雀虽小,五脏俱全”,新一代 LVDCSUS 中,任何一个构成单元都是“源-网-荷-储”四要素齐全的微网络系统,且与其他单元和网络都是通过网的形式连接,而不是单纯的源或者荷的接入。这又不同于微网,主要区别在于电力电子技术的嵌入使得这个最小源网荷储单元具有独立运行控制的特点,其目的是为了自身单元的需要,而不是仅仅配合交流电网。即便对交流电网来说,也大大增加了风光消纳的可行性。作为一个有机体,具有自组织、自适应、自主性,也天生具有“区块链”的性质。

具有极高灵活性,可满足多种目标需求。电力电子技术不仅可以通过改变设备拓扑结构产生多种功能的装置,也可以通过改变网络拓扑结构,构成灵活多变的网中网网络,适应电力的供需要求。同时,从系统运行方面,也可以实现各种控制策略。

具有绿色节能的特性。无论是光伏发电还是风力发电等分布式可再生能源都可十分方便地接入 LVDCSUS,这大大增加了新能源接入的可行性,为新能源的推广利用创造了更多机会,提高了新能源的渗透率。即使对于由 AC/DC 供电的网络,由于直流系统没有无功、集肤效应等诸多问题,使得输送电能的能力比交流系统更大,也就意味着损耗

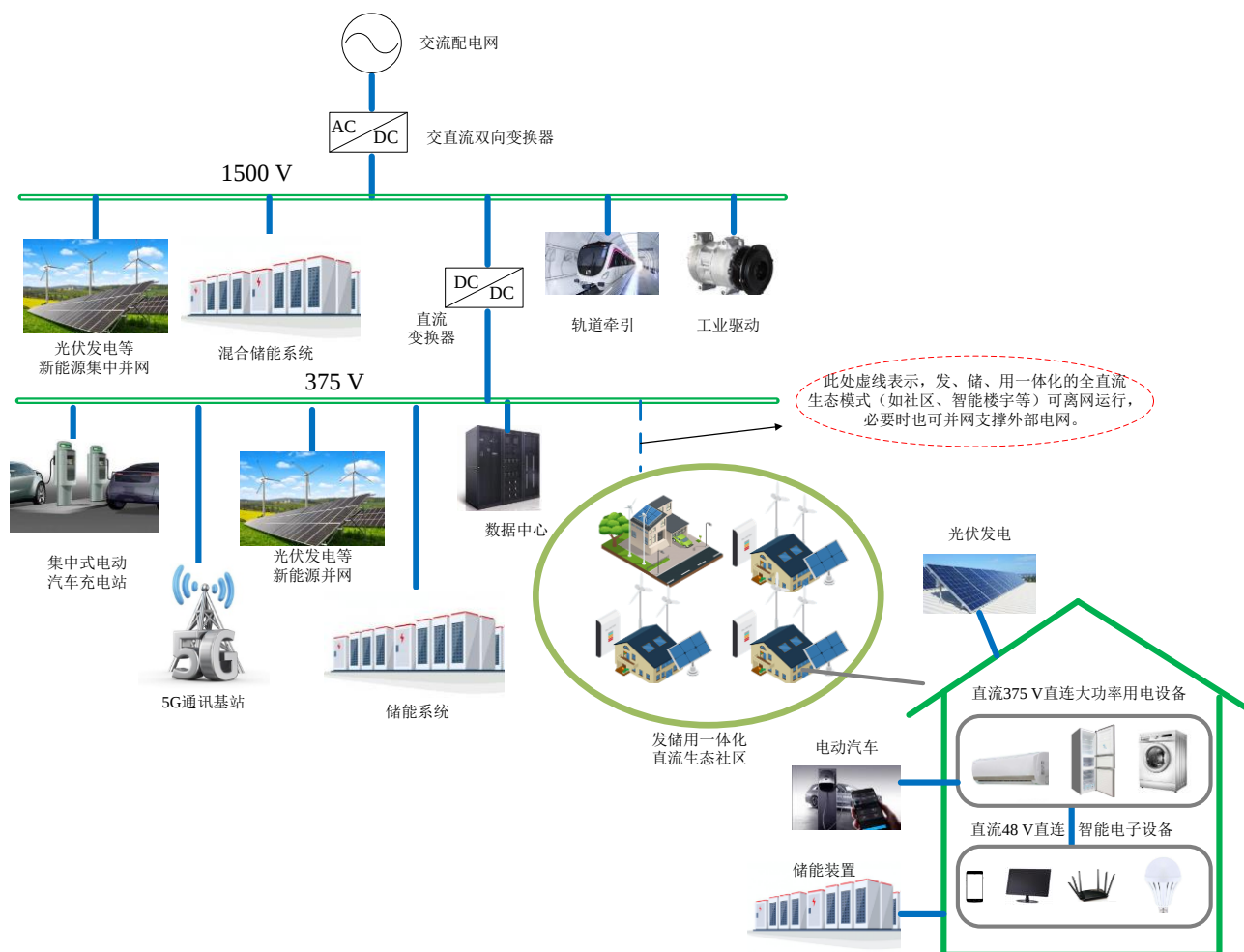


图1 LVDCSUS 整体架构示意图

Fig. 1 Architecture of LVDCSUS

更小，实现节能目的。

具有天然的物联网特性。从电力系统的观点来看，电力电子装置本身即具备一二次高度融合的特点，而 LVDCSUS 中对电力电子装置和直流家电等新型设备的大量使用，稍加改造即可成为物联网的一个节点，各种信息的获取极其容易。

LVDCSUS 包含 1500V 及以下的电压等级，通过理论研究、技术开发、应用示范发展至今，逐渐成为可及、可用、可控的技术体系。如图 1 所示，可实现光伏、储能装置等电源及家居、电动汽车、5G 基站、数据中心、城市轨道交通等负荷的接入，可满足新基建的供能要求，有望成为如交流系统一样的全生态产业链。

2 基于 LVDCSUS 的新基建电力供应系统

2.1 新基建电力供应系统特点及 LVDCSUS 适用性分析

新一代 LVDCSUS 在供电架构、电压等级方面完全符合新基建不同领域的要求，而其具备的灵活

性、高可靠性、高适应性、高经济性等特点，更可以提供差异化的电力供应定制化设计，在城市轨道交通领域，集成光伏发电和储能系统的直流牵引供电系统已经得到广泛关注和深入研究^[27]。

2.1.1 5G 基站

布局 5G 网络相关建设，在能源革命与数字革命深度融合的当下已成为共识。5G 基站设备功耗提升幅度较大，各厂家设备仍在不断优化，需要持续关注^[28]。5G 基站的有源天线处理单位(active antenna unit, AAU)采用了 64T/64R 天线阵列，相比传统 8T/8R 的 4G 天线单通道的平均功耗下降，但由于通道数量有较大幅度提升，AAU 整体功耗呈明显上升趋势。5G 微站的设备尚无成熟的产品可参考，功耗比 4G 微站高。5G 试验网设备单系统功耗大约是 4G 的 4 倍左右(当然其覆盖用户数量也大大增加)。在 5G 基站改造和新建的过程中，电源的选择确定是非常重要的一步，包括基站电源和供电电源^[29]。

5G 基站分布广泛，如果采用 LVDCSUS 直接

供电将更具优势。在有条件的区域基站,可充分利用光能等可再生能源,通过可再生能源、储能装置的合理配置,采用全直流生态模式,提升可再生能源利用率和供电可靠性,并带动光伏等产业的发展;同时,直流具备优异的电磁兼容性能,无感应干扰,可降低能耗,采取全直流负荷,对拉远站采用直流远端供电,不仅避免了同一站内甚至同一柜内交直流混杂的问题,也给光伏等直流电能提供了较为简洁的接入方式。

2.1.2 数据中心

当前通信行业中移动数据的需求量急速增长,未来能源物联网同样需要依托快速高效的海量数据传输^[30]。5G 技术由于其数据传输效率高而得到快速开发,为实现海量数据的存储、传输和交换等功能,数据中心 24 小时均处于运行状态,成为耗能巨兽。预计未来几年数据中心的能耗将保持 30% 以上的增长速度,耗电量的激增对供电行业而言是

一项巨大挑战^[31]。

传统的数据中心电力供应系统包括电源转换装置(AC/DC)、不间断电源(uninterruptible power system, UPS)、本地备用电源、本地电储能等。而数据中心的设备均为直流负荷, LVDCSUS 系统可为数据中心直接提供电力,相比于传统的电力供应方式,减少了电源转换环节(AC/DC 和 DC/AC),取消两级变换后电路结构得以简化,可减少由电源转换造成的约 10% 的能耗,如图 2 所示。采用光伏发电,合理配置储能,可减少甚至省去本地备用电源,若能成功实现冷、热、电等多种能源方式的综合利用,将进一步提高能源的综合利用效率。同时,结合数据存储需求和不同能源形式的规划,通过优化选址范围,可实现数据中心的优化布局和可靠运行。可预见,未来 LVDC 供电用电系统在通信行业,尤其是数据中心的发展过程中,将呈现出迫切的发展需求。

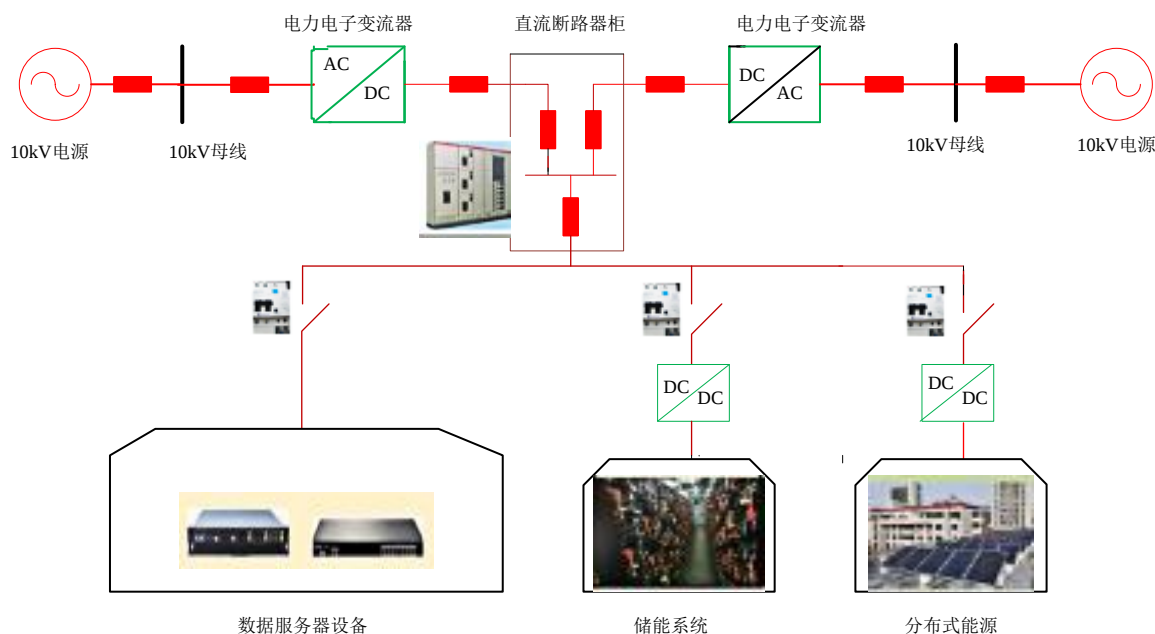


图2 数据中心直流供电网

Fig. 2 DC distribution network of data center

另外,随着海量数据处理需求增加和区块链在各个行业的应用,数据中心的建设在未来也很可能以图 3 所示的分布式形式发展,这与新一代 LVDCSUS 架构不谋而合,这种形式在某种程度上还可减轻数据中心的散热需求。总之,直流供电形式加上相似的架构,使得以 LVDCSUS 作为数据中心电力供应系统更具优势。

2.1.3 电动汽车充电桩

目前,电动汽车充电有交流充电桩(慢充)和直

流充电桩(快充)两种形式,其中直流充电由于电压、电流调节能力强,可提供足够的充电功率,可满足“快充”的要求,预计将得到大力发展^[32]。

电动汽车充电站具有分布式特点,在经济相对发达、电网成熟度高、充电站密集的区域,可以采用交流转直流满足大负荷密度要求,辅以光伏发电,一定程度上减轻电网负担,并提高供电可靠性;在相对偏远且光照条件较好的地区,其电动汽车充电站可采用全直流生态模式,充分利用光伏能源既

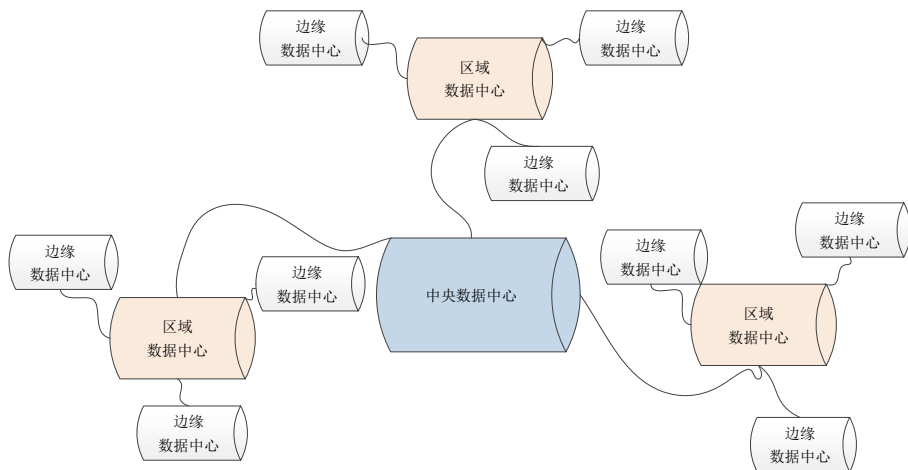


图3 未来数据中心可选架构

Fig. 3 Probable architecture of future data center

可满足充电需求又可省去交流电网的架设。总之，采用 LVDCSUS 为电动汽车充电桩供电，不仅可实现“快充”，光伏与储能的灵活配置，还可以扩大充电桩的可规划区域。未来新一代 LVDC 供用电系统的发展不仅能高效容纳大量直流电动汽车充电桩，还可通过物联网技术实现电动汽车的智能管理，实现大功率充电和智能充电，更有利于车路综合管理，具有广阔的市场应用前景。

2.1.4 直流绿色建筑

绿色建筑的特征即是近零能耗乃至零能耗。建筑屋顶和可接收足够太阳光的建筑垂直表面，都将成为安装太阳能光伏电池的最佳场景^[33]。据了解，我国未来可以安装太阳能光伏的建筑表面积超过 100 亿 m^2 ，每年可发电约 2 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，可满足建筑的大部分用电需求。建筑内的各类用电设备，LED 照明装置、IT 设备、空调、以及电梯等，都需要直流驱动，而光伏和储能设备也需要直流接入。

采用 LVDCSUS，可省去电源转换装置，如果采用“光伏+直流+储能+充电桩”的辅助性全直流供用电模式，在降低供电容量的同时还可采用物联网技术挖掘柔性负荷，以实现负荷与电网供电能力的实时优化匹配。LVDC 技术将推动建筑物不断迈向近零能耗乃至零能耗，而建筑领域相关标准的制定和执行也将为 LVDC 供用电系统的发展提供有力保障。

2.1.5 智能家居

纯直流家电能够实现智能管控、能源可视，可以提高供电质量与用户体验，是智能家居的重要组成部分。智能家居能够利用物联网技术实现各类家用设备全方位的信息交互和远程控制功能。据悉目前国内几个主要家电制造商已经初步成功制造智能

家电产品，家用电器也可基本实现全直流覆盖，其价格可以与同类交流产品基本相当，随着需求量增加价格还有下降空间^[34-35]。

采用直流供电，不仅能契合数字技术直接送电，也更有利于能源管理和用电安全。并且因为减少了逆变环节，降低了功率损耗，全生命周期运维费用也会降低。与此同时，如果安装用户侧储能设备，用户可根据自身能源系统的特点和能耗情况来控制储能设备的运行，既降低费用，利用柔性负载特性匹配分时电价获益，又为电网削峰填谷做出贡献。

2.1.6 工业园区

工业园区聚集各种生产要素，是相对集中的用电负荷中心，具有高耗能的产业特色。对于经济发达地区的工业园区，存在有诸如购电价格高、电力负荷峰谷差大、用电量等特点^[36]，如何实现节能增效是其面临的主要现实问题。

在工业园区采用新一代 LVDCSUS 系统，可大力发展以光伏和风电为代表的可再生能源，有利于节能降耗和提升电网安全，特别是高峰期可以缓解电力负荷压力，同时降低企业用电成本。此外，全直流的生态模式也满足了工业园区对供电质量越来越高的要求，尤其是涉及到半导体行业的园区，电能质量的要求非常高，直流在这方面相比交流有着天然的优势。结合软件中间件、物联网技术以及云计算等先进技术，可以更加方便各类入驻企业对电能的管理需求。

2.1.7 农村及边远地区

尽管无电地区的电力设施建设未在新基建中得到体现，但对国家扶贫政策的实施有着积极的意义^[37]。使用 LVDCSUS 作为边远地区无电户的供电手段，相比传统的交流架线供电方式而言，采用光

伏建筑一体化、离网运行微电网的方式,避免了远距离架线和运行维护问题,在提供更高的供电质量的同时更具经济性,且能够更加快速、高效的建成。

2.2 LVDCSUS 在新基建中的优势和意义

将 LVDCSUS 作为新基建的电力供应方式,对新基建的发展乃至电力行业本身,都具有重要的意义。以“分布式光伏+低压直流供用电+储能”的新型供电模式可以成为支撑新型基础设施建设的关键技术,具有以下经济技术优势及意义:

1) LVDCSUS 拓扑构建容易、配置灵活丰富,可根据应用场景、负荷容量的不同,实现差异化、定制化设计和快速高效建设。LVDCSUS 便捷的配置方式可直接助力国家光伏扶贫,经济快速解决无电户问题,促进农村和城乡结合部再电气化,并有可能形成“农村供给城镇”的能源生产消费新模式。

2) LVDCSUS 更适合光伏发电等新能源形式的接入,符合能源技术的发展方向。既可以为当下新基建提供电力供应,又满足长远的需求。可高效接纳分布式可再生能源,采用全直流生态模式,取消了交直流的电源变换环节,可节省约 10%的损耗^[38],通过供电电压等级与负荷电器的一致化设计,通过取消负荷电器内的 DC/DC 环节,将进一步降低能耗。

3) 在新冠疫情之后,人们的生活也会有所变化,健康生活,数字化革命,均可带动一批产业企业,不仅制造就业机会,拉动国内经济市场,又可以开拓国际市场,发展 LVDCSUS 可助力数字经济的发展,满足未来的数字基建长远需求,提升国家数字竞争力。

4) LVDCSUS 可带动包括碳化硅、氮化镓等新型宽禁带半导体材料和储能技术的研发及应用、一批新型终端直流电器(如具备集成“传感+测量+保护+开断+通信+计量”等功能的直流一体化装备)、直流家电等产业的快速升级,让中国制造在新一代互联网时代再现辉煌。

5) 促进低压直流供电的研发投入,抢占技术制高点和标准制定主动权,可使相关企业和人员在行业内占据国际话语权,制定未来低压直流供用电系统和相关设备的行业标准,推动中国在 LVDCSUS 领域引领未来。

6) 相比于将经费投资在传统的电力供应系统建设中,投资 LVDCSUS 不仅可以满足新基建各个领域对电力供应的要求,还可以带动相关技术的发展和储备,加快相关产业升级。

3 新基建背景下 LVDCSUS 的发展建议

经过前文分析可知,新基建的发展需要 LVDCSUS 为其提供优质、环保、绿色的供电保障,同时也为 LVDCSUS 的发展提供了现实驱动力。在新基建发展规划、电力系统负荷直流化的背景下, LVDCSUS 的发展需要从顶层设计、政策支持和技术创新等方面,统筹规划、重点突破。

3.1 转变思维方式

新一代低压直流供用电系统具有典型的领域交叉、学科融合,呈网中网结构的复杂大系统的特征。需要跳出高压直流技术和传统交流技术惯性思维的限制,从“网思维”向“系统思维”,从“物理学思维”向“生物学思维”,从单纯技术观念向全社会经济开阔视野转变。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。特别是以生物学思维方法,追求适应、联系、共生,解决复杂的、跨界的、系统性的问题。

同时,需要从“狭隘的功利思想、产业竞争和纯粹依赖市场”这三个禁锢中跳出来,客观分析交直流的优势;着眼于从中国丰富的应用场景中寻找切入口,以全社会效益、核心技术竞争和技术+市场为目标,攻克核心技术,解决社会难题。逐步建立完善公平可行的市场机制,发挥政府财政资金引导和补空,最大化发挥投资带动作用。

通过上述分析可知,从大电网输电的角度,目前直流的确是交流的补充,例如高压直流输电。但从用电角度,直流和交流各有特点,在许多方面直流甚至更具优势。因此,在供用电系统,要转变直流只是交流电网的补充的观念。不能简单的把直流供用电看作交流系统的补充,而应看作一个独立完整的产业。事实上,直流已经渗透到诸多行业,成为一种可行的供电形式。

走出直流不安全的误区。由于历史原因和诸多因素造成了普遍轻视直流,重视交流的现象。这里不仅有客观因素,也有主观臆断造成的误区。除了交流电网的客观优势和庞大基础,还有对于直流安全问题的心理障碍,认为直流的安全问题较之交流更加严重,尤其是以直流电弧为代表的诸多与交流的不同之处。实际上,对低压直流设备,根据不同电压和产品特点,遵循 IEC61140,按照相应的不同保护级别(CLASS)来保障其安全运行。如 CLASS III 产品,其防触电保护依靠电源电压为安全特低电压(SELV),并且其中不会产生危险电压。CLASS II

产品,其防触电保护不仅依靠基本绝缘,而且还包括附加的安全措施,例如双重绝缘或加强绝缘,但没有接地或依赖安装条件的保护措施。CLASS I 产品,其防触电保护不仅依靠基本绝缘,而且还包括接地方式。所以,不仅仅是电力电子器件和装置能够保证足够的安全,科学设计的机械开关也可在不同电压等级具有足够的安全性、可靠性。实际上,对于通信、可穿戴设备、移动工具、绝大多数传感器和部分家用电器,电压均低于 48V,此类直流电器设备更安全。通过合理的设计和采取适当的防护措施,低压直流设备和系统都可达到安全要求。

减少交直流的对比甚至对立思维。交直流从来都是供用电领域可选的形式。在未来的供电形式选择上,应根据电源和负荷的特性,因地制宜选择相适应的供电形式,充分利用交直流各自的优势,打造安全、可靠、节能、环保、智能的先进供用电系统。

3.2 聚焦技术创新

从产业发展的角度,解析新一代 LVDCSUS 与新基建的关系,因地制宜地发展直流供用电,实现现代交流电网与直流供用电系统的和谐发展和完美融合;鼓励电气行业的学者专家技术人员充分分析新基建各个领域的用电特点,细化供用电需求,提供直流供用电的精准解决方案;在直流供用电领域提倡新技术新产品的研究和应用,建立健全直流供用电系统各个方面的标准制定等。

3.2.1 关键技术

1) 在规划设计方面,需考虑供电的安全性、可靠性、建设/运行的经济性、供电能力以及多电压等级网络的综合协调和统一规划,以充分发挥 LVDCSUS 安全可靠、经济高效、绿色低碳、开放互动等特征。

灵活的供用电形式、适应多变的直流负荷是 LVDCSUS 的主要优势之一。低压直流供用电系统具有显著的应用场景差异化特征,不同应用场景对直流容量、供用电可靠性及电能质量的要求不同,其规划的目标也有所差别,因此要因地制宜地开展电压序列等级和网络拓扑的研究,通过网络与负荷(尤其是低压电器)的合理匹配设计,在保证高可靠性、高安全性的同时,提升系统整体的经济性;研究适应不同场景、不同容量的差异化标准化模块设计,如低压直流和智能建筑的集成规划方法、标准化模块设计等。

另外,综合能源的研究近年来也方兴未艾。就

规划而言,低压直流以其能直连太阳能光伏、电储能装置等优势,便于形成以电能为中心的综合能源发展路径。研究基于直流网络并融合多种能源的网络建模及规划方法,兼顾能源多元供应、多轮驱动、负荷动态互动、储能容量匹配和实时管理的设计方法,集成运行实现多目标优化;研发考虑不同运行方式下提升网络灵活性和复原力的群智能控制设计方法,综合考虑分布式直流电源特点和柔性负荷特点,研究建立风险概率评估模型,实现基于风险的多目标优化。

根据低压直流在新基建不同领域的需求和特点,特别注重开拓创新思路,研究不同应用场景下的系统架构和拓扑结构。例如,针对以直流供电方式为基础的 5G 基站供电系统,可采取如图 4 所示的拓扑结构,在增加可再生能源利用率的同时,可通过直流实现对拉远站的直接供电,减少变换环节,提高效率,同时也可使用直流照明、空调等直流节能设备。

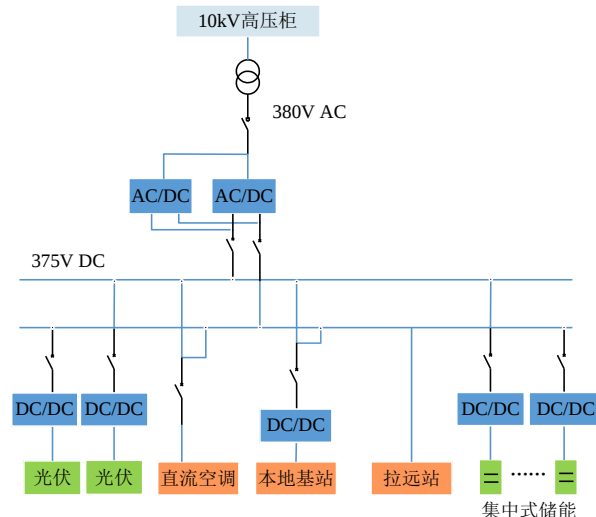


图4 未来可能的5G基站直流供电方式

Fig. 4 Probable DC power supply topology of 5G base station

2) 在运行保护方面,研究确定 LVDCSUS 在不同场景下的接地方式、故障隔离、保护策略和方案等。

重点研究接地方式对故障特征和人身安全的影响,针对不同场景制定相应的接地方式;考虑到低压直流对故障隔离的时间要求,需在 5G 通讯背景下,结合 IoT 等技术,计及分布式直流电源、网络拓扑、隔离设备及柔性负荷等,研究基于故障暂态特征的检测与识别方法,并制定相应的保护原理及方案。

研究 LVDCSUS 设备和系统的监测网络拓扑,

研发基于多元异构数据、人工智能、边缘计算的低压直流系统设备的态势感知方法；研究基于专业经验和人工智能的直流配网运行状态评估方法，实现数据知识融合的直流供用电网络故障诊断与智能运维；开发融合 IoT、人工智能和智能家居的智能化管控技术，结合现代 IT 和能源物联网技术，利用边缘计算实现低压直流系统用户侧的监测与保护。

3) 在储能方面，综合可靠性、经济性和质量等诸多因素，研究储能容量匹配的原则和方法，通过新型电化学储能方式并创新储能结构的设计、多类型配置等技术，综合提升储能配置的综合效益；充分计及电池健康度、荷电状态、电池充放电次数等因素研究储能系统全寿命周期评估技术；开展储能技术应用对低压直流供用电系统特性的影响及其评估研究，结合多类储能形式及 IoT 技术实现系统智能化管理；重视废旧电池及光伏发电设备的安全处理问题，杜绝因此造成的环境污染。

重视柔性负荷在需求响应中的作用，充分挖掘利用诸如电动汽车充放电设施、可适当调节的负荷(如家用电器使用时间等)，以利为系统削峰填谷，增强系统的灵活控制性，使电网和用户及开发商和谐共处，共赢发展。

4) 在电能质量方面，研究低压直流供电系统电能质量问题产生的机理，建立 LVDCSUS 电能质量评价指标集及其定量评价方法，重点关注间谐波及超高次谐波、电压暂降、纹波及噪音，系统损耗、母线线路损耗等问题；分析电能质量监测数据与低压直流系统设备、系统之间的关联特征，结合 IoT 和人工智能，建立基于电能质量数据的 LVDCSUS 设备及系统异常工况检测及分类方法。

3.2.2 核心装备

新一代低压直流供用电系统的建设是一个复杂的系统工程，除了对低压直流供用电运行技术进行基础理论研究之外，还需进一步融合新一代电力电子技术、IT 技术，开发智能供用电设备，以适应 IoT 发展并满足未来供用电系统在安全性、可靠性、可控性等多方面的需求。

重点关注安全领域。研究低压直流电弧的机理、危害、检测及其防范措施，开展直流开关、直流插座和插头及安全无弧开关的研制，特别是 375V 及以上电压等级；研究直流剩余电流及其特性，研制带漏电保护的直流空气开关，重点关注漏电保护的检测方法、检测精度，以及直流电弧快速熄灭能力，并研究适用不同电压和场合的产品序列；注重

未来发展需求，融合边缘计算、区块链以及物联网技术，重点研究以多功能、小型化、一体化、经济实用为特征的智能新设备。如，集成“传感+测量+保护+开断+通信+计量”等功能的智能直流开关，并具备故障定位、控制保护功能以及支撑智能调度决策与市场交易等功能；开发融合新一代电力电子技术、IT 等新技术的新型智能直流家电。

在已有的 AC/DC 装置的基础上，加强效率提升技术研究；研究具备高效率主回路的 DC/DC 转换器的拓扑结构，开展 DC/DC 变换器的宽电压高效率研究工作，研究兼顾效率和电能质量的新的控制算法，推进 DC/DC 变换器、电能路由器、直流用电适配器等设备的升级和创新；同时，要注重新型碳化硅、氮化镓等功率半导体器件的应用，尽快实现宽禁带大功率半导体器件的小型化以及在低压直流领域的应用。

3.3 科学有序发展

LVDCSUS 的发展应该根据电源、网络、负荷的客观技术现实和发展规律，根据不同应用场景，对已有系统和新建系统实行不同发展策略，在集中力量突破关键技术和核心设备的同时，重视相关技术标准的建立和国际合作，以创新示范工程引领 LVDCSUS 走向实用化。

1) 低压交直流协同发展。低压直流供用电系统目前仍处于技术累计和快速发展阶段，某些关键设备及运行经验仍有待于开发和积累。且就目前技术发展趋势和电网特征而言，在低压领域，将有很长一段时间的交直流并存时期，根据不同运行场景，发挥交直流各自优势、二者协调发展，并在高可靠性及高电能质量要求供电、数据中心、5G 基站等上述提及的新基建领域中发挥直流供用电优势，是逐步发展低压直流供用电的合理途径。

2) 重视标准制定及国际合作。加强统筹规划和顶层设计，建议综合差异化、定制化、模块化、灵活性、多功能融合和柔性需求等，因应用场景而异开展差异化技术标准研究。加强国际合作，建议相关研究人员积极参与国际学术组织的技术委员会或具体工作组，发挥我国在直流供用电领域的领先地位，借助国际资源，共同推动直流供用电技术的发展。

3) 鼓励支持创新示范应用，以试点示范推进新发展。鼓励支持地方政府和相关企业开展具有示范并可真正复制的单元设计、工程等，逐步推广。雄安新区已经在直流供用电领域做了大量工作，建设

了以直流屋、雄安截洪渠景观路直流照明工程、雄安直流公寓等为代表的示范项目,取得了一定的经验。建议继续坚持“世界眼光、国际标准、中国特色、高点定位”的理念,加大力度,以雄安新区为先行示范区,建设一个全直流供用电系统的示范小区,引领支持真正可复制可推广的创新示范应用。努力使雄安成为直流全生态的先行者和引领者,努力打造为贯彻新发展理念的创新发展示范区。

4 结论

1) 分布式可再生能源的高渗透和未来大量负荷直流化的发展趋势,可期的光伏发电效率提升和制造成本的进一步下降,日益成熟的电力电子技术和储能技术的普及发展,柔性直流负荷的开发利用,从能源的生产、消费、技术方面为新一代低压直流供用电系统的发展奠定了坚实的基础,开拓了广阔的前景。DERs+ LVDCSUS+储能+AI+IoT 等技术,打造智能直流供用电产业生态,有望颠覆传统的供用电模式。因此, LVDCSUS 已成为一个研究的热点吸引了全球同行们的关注。尽管国外关于直流系统的研究相对较早,但因缺乏终端直流负荷如直流家电等电器,大多还停留在理论或者实验室研究阶段。而国内不同领域的众多学者同仁们相向而行,已开发出较为完整的系列化低压直流家用电器。同时,目前大力推进的新基建,为新一代 LVDCSUS 发展创造了条件。得益于国内许多企业、开发商、高校、研究机构及制造厂商在低压直流领域的研究投入,使得中国在 LVDCSUS 领域目前处于领先地位。

2) 新一代 LVDCSUS 与新基建相关领域广泛存在的大量直流负荷具有天然的适应性,同时其所具备的灵活、可靠、可定制以及经济等特点,可满足新基建不同领域对电力供应系统的要求。采取因地制宜地适应负荷直流化、终端化、分布式趋势,可更好满足用户多元化、更高品质的用能需求,并能促进能源产用储一体化的发展。LVDC 直接助力新基建、数字经济和健康生活,可带动一批产业企业,不仅制造就业机会,拉动经济,推动低压直流供用电系统与新基建的协同发展,而且可开拓国际市场,让中国制造在新一代互联网时代再现辉煌。

3) 在新基建发展规划、电力系统负荷直流化的背景下, LVDCSUS 的发展尚需从顶层设计、政策支持和技术创新等方面,统筹规划、重点突破。特别聚焦技术创新,研究不同应用场景下结合运行

的多元目标优化设计,跨越传统的新系统架构,拓扑结构;创新能量管理模式,研究兼顾效率和电能质量的新的控制算法,制定运维保护策略和技术路线;重视柔性负荷在需求响应中的作用,着力开发新一代低压直流供用电系列新产品,推进 DC/DC 变换器、电能路由器、直流用电适配器等设备,以及新型直流家电产品的升级和创新;同时,要注重新型碳化硅、氮化镓等功率半导体器件的应用,尽快实现宽禁带大功率半导体器件的小型化以及在低压直流领域的应用。

综上所述,新一代低压直流供用电系统可直接助力新基建的发展,推动可再生能源、电力电子、智能家电等产业的发展,具有广阔的市场前景和巨大的经济潜力。同时也是着眼于未来,奠定国家数字经济基础,实现经济、社会与生态环境的综合性可持续发展的利器,是推进“绿色新政”和“零碳社会”的重要举措。为此,建议在顶层设计、政策支持、技术创新等领域加大支持力度和研发投入,以创新示范工程为先导,借助新基建的东风促使其落地化和实用化,以 LVDCSUS 这一新型的供用电新业态和全新的产业模式助力国家发展与建设。

参考文献

- [1] VOLKOVA V N, KUDRYAVTSEVA A S, LOGINOVA A V, et al. System analysis of innovative technologies of the industrial revolutions[C]// 2018 Third International Conference on Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (ERGO), St. Petersburg, Russia, 2018.
- [2] 李晓华. 面向智慧社会的“新基建”及其政策取向[J]. 改革, 2020(5): 34-48.
LI Xiaohua. New infrastructure construction and policy orientation for a smart society[J]. Reform, 2020(5): 34-48(in Chinese).
- [3] 新基建 3.0[EB/OL]. http://www.360doc.com/content/20/0420/21-8897250_907318202.shtml.
- [4] ZHANG Wentao. Development of HVDC and FACTS in China[C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Yokohama, Japan: IEEE, 2002.
- [5] DE Andrade L, DE Leão T P. A brief history of direct current in electrical power systems[C]//2012 Third IEEE History of Electro-Technology Conference (HISTELCON). Pavia: IEEE, 2012: 1-6.
- [6] ITO Y, YANG Zhongqing, AKAGI H. DC microgrid based distribution power generation system[C]//4th International Power Electronics and Motion Control

- Conference. Xi'an, China: IEEE, 2013.
- [7] BRENNA M, TIRONI E, UBEZIO G. Proposal of a local dc distribution network with distributed energy resources [C]//11th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Lake Placid: IEEE, 2004: 397-402.
- [8] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [9] IOV F, BLAABJERG F, CLARE J, et al. Uniflex-PM—a key-enabling technology for future European electricity networks[J]. EPE Journal, 2009, 19(4): 6-16.
- [10] STIENEKER M, BUTZ J, RABIEE S, et al. Medium-voltage DC research grid Aachen[C]//International ETG Congress 2015; Die Energiewende - Blueprints for the New Energy Age. . Bonn, Germany: IEEE, 2015.
- [11] 吴峻, 武迪, 朱金大, 等. 多端柔性直流配电网接地方式设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2551-2560.
- WU Jun, WU Di, ZHU Jinda, et al. Grounding method design of multi-terminal flexible DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2551-2560(in Chinese).
- [12] 马钊, 焦在滨, 李蕊. 直流配电网架构与关键技术[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3348-3357.
- MA Zhao, JIAO Zaibin, LI Rui. Network structures and key technologies of DC distribution systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3348-3357(in Chinese).
- [13] 盛万兴, 李蕊, 李跃, 等. 直流配电电压等级序列与典型网络架构初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3391-3403.
- SHENG Wanxing, LI Rui, LI Yue, et al. A preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3391-3403(in Chinese).
- [14] 季一润, 袁志昌, 赵剑锋, 等. 一种适用于柔性直流配电网的电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 335-341.
- JI Yirun, YUAN Zhichang, ZHAO Jianfeng, et al. A suitable voltage control strategy for DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 335-341(in Chinese).
- [15] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统下垂控制 P - V 特性曲线时域分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 408-415.
- LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, et al. Time-domain analysis of P - V characteristic for droop control strategy of VSC-MTDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 408-415(in Chinese).
- [16] 胡竟竞, 徐习东, 裘鹏, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 844-851.
- HU Jingjing, XU Xidong, QIU Peng, et al. A review of the protection methods in DC distribution system [J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 844-851(in Chinese).
- [17] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749.
- LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749(in Chinese).
- [18] Medium voltage direct current(MVDC) grid feasibility study[R]. Paris France: CIGRE, 2020.
- [19] HAROUN R, EL Aroudi A, Cid-Pastor A, et al. Modelling and control of modular DC-nanogrids based on loss-free resistors[J]. IEEE Access, 2020, 8: 33305-33317.
- [20] CORTI M, TIRONI E, UBEZIO G. DC networks including multiport DC/DC converters: fault analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5): 3655-3662.
- [21] 廖建权, 周念成, 王强钢, 等. 直流配电网电能质量指标定义及关联性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6847-6860.
- LIAO Jianquan, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Definition and correlation analysis of power quality index of DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE 2018, 38(23): 6847-6860(in Chinese).
- [22] SHAMSODDINI M, VAHIDI B, RAZANI R, et al. A novel protection scheme for low voltage DC microgrid using inductance estimation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 120: 105992.
- [23] 雍静, 徐欣, 曾礼强, 等. 低压直流供电系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 42-52.
- YONG Jing, XU Xin, ZENG Liqiang, et al. A review of low voltage DC power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 42-52(in Chinese).
- [24] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
- SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19(in Chinese).
- [25] 马钊, 赵志刚, 孙媛媛, 等. 新一代低压直流供电用电系统关键技术及发展展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 12-22.

- MA Zhao, ZHAO Zhigang, SUN Yuanyuan, et al. Key technologies and development prospect of new generation low-voltage DC power supply and utilization system[J]. Automation of Power systems, 2019, 43(23): 12-22(in Chinese).
- [26] 马钊, 刘颖异, 尚宇炜, 等. CIGRE 2016 未来电力系统及主动配电系统技术新动向[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 27-35.
- MA Zhao, LIU Yingyi, SHANG Yuwei, et al. CIGRE 2016 development trends of future power system and active distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 27-35(in Chinese).
- [27] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣. 轨道交通能源互联网背景下光伏在交/直流牵引供电系统中的应用及关键问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5692-5702.
- DENG Wenli, DAI Chaohua, CHEN Weirong. Application of PV generation in AC/DC traction power supply system and the key problem analysis under the background of rail transit energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5692-5702(in Chinese).
- [28] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4024.
- ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous internet of things in electricity: technical principles and typical applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4024(in Chinese).
- [29] QI Shuguang, GONG Xin, LI Shang. Study on power feeding system for 5G network[C]//2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). Turin: IEEE, 2018.
- [30] 何宝宏. 数据中心: 下一波技术创新的制高点[J]. 信息通信技术与政策, 2020(6): 1-3.
- HE Baohong. Data center: the commanding height of the next wave of technological innovation[J]. ICT and policy, 2020(6): 1-3(in Chinese).
- [31] DAYARATHNA M, WEN Yonggang, FAN Rui. Data center energy consumption modeling: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 732-794.
- [32] 侯波, 傅留虎, 董渊. 关于充电桩的使用及前景[J]. 机械工程与自动化, 2020, (3): 225-226.
- HOU Bo, FU Liuhu, DONG Yuan. About the use and prospects of charging piles[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2020(3): 225-226(in Chinese).
- [33] 秦文军, 李想. 中国光伏建筑一体化行业概况与发展前景[J]. 建筑学报, 2019(S2): 6-9.
- QIN Wenjun, LI Xiang. Overview and development prospects of China's photovoltaic building integration industry[J]. Journal of Architecture, 2019(S2): 6-9(in Chinese).
- [34] 谭丰枫. 智能家居产业发展情况分析[J]. 产业与科技论坛, 2020, 19(5): 117-118.
- TAN Fengfeng. Analysis of the development of smart home industry[J]. Industry and Technology Forum, 2020, 19(5): 117-118(in Chinese).
- [35] AGARWAL K, AGARWAL A, MISRA G. Review and performance analysis on wireless smart home and home automation using IoT[C]//2019 Third International Conference on I-SMAC(IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC). Palladam, India: IEEE, 2019.
- [36] 李文兴, 鲁鹏. 工业园区的智能用电设计探讨——以渠江云谷为例[J]. 工程建设与设计, 2020, (1): 83-85.
- LI Wenxing, LU Peng. Discussion on intelligent electricity design of industrial park——taking Qujiang cloud valley as an example[J]. Construction & Design for Project, 2020, (1): 83-85(in Chinese).
- [37] 黄泽晟. 分布式光伏发电项目扶贫探析[J]. 低碳世界, 2019, 9(8): 110-111.
- HUANG Zesheng. Analysis of poverty alleviation in distributed photovoltaic power generation projects[J]. Low Carbon World, 2019, 9(8): 110-111(in Chinese).
- [38] 江亿. 柔性直流用电: 建筑用能的未来[N]. 中国科学报, 2020-03-04(3).
- JIANG Yi. Flexible DC power consumption: the future of building power usage[N]. China Science Daily, 2020-03-04(3)(in Chinese).



梁永亮

在线出版日期: 2020-10-30.

收稿日期: 2020-07-10.

作者简介:

梁永亮(1987), 男, 博士, 主要研究方向为新能源直流供用电系统、基于 AI 的变压器及配电网的态势感知等, liangyl@sdu.edu.cn;

吴跃斌(1971), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定运行与控制、能源互联网、直流供用电系统、新能源技术研究等工作, twins0530@163.com;

*通信作者: 马钊(1957), 男, 博士, 山东大学特聘教授, 博士生导师, CEng, FIET, FCSEE, CIGRE 中国及亚太区 SC C6 专委会主席, 主要研究方向: 智能配电网、新能源直流供用电系统、智能电器、能源互联网等, Zhao.ma@sdu.edu.cn.

(责任编辑 乔宝榆)