

# 新型配电系统形态特征与技术展望

董旭柱<sup>1</sup>, 华祝虎<sup>1</sup>, 尚磊<sup>1</sup>, 王波<sup>1</sup>, 谌立坤<sup>1</sup>, 张秋萍<sup>1</sup>, 黄玉琛<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072; 2. 广东电网有限责任公司韶关供电局, 韶关 512026)

**摘要:**“碳达峰、碳中和”目标下, 配电系统逐渐发展为具有电能汇集、传输、存储和交易功能的新型区域电力系统, 具有了新的形态和特征。在此背景下, 首先从分布式新能源接入、电能替代、电力电子应用及数字化技术 4 个方面出发, 对“双碳”背景下配电系统的新特性进行了总结; 然后对其面临的静态问题、动态问题和管理问题进行了分析, 并提出了未来低碳化新型配电系统的形态格局构想, 对分布式电源与微电网技术、源荷互动技术、直流配电技术以及数字化管理技术等支撑新型配电系统建设的关键技术进行讨论, 分析了现阶段成果与新型配电系统需求之间的差距; 最后, 凝炼了新型配电系统建设面临的关键科学问题, 并对其未来技术发展方向提出了建议。

**关键词:** 新型配电系统; 形态特征; 分布式电源; 微电网; 源荷互动; 直流配电; 数字化技术

## Morphological Characteristics and Technology Prospect of New Distribution System

DONG Xuzhu<sup>1</sup>, HUA Zhuhu<sup>1</sup>, SHANG Lei<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>, CHEN Likun<sup>1</sup>, ZHANG Qiuping<sup>1</sup>, HUANG Yuchen<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Shaoguan Power Supply of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Shaoguan 512026, China)

**Abstract:** With the goal of “carbon emissions peak and carbon neutrality”, the power distribution systems has gradually developed into a new type of power distribution systems with the functions of energy integration, transmission, storage and power trade in new forms and characteristics. Thereby, we summarize the characteristics of the new distribution systems from four aspects, including distributed renewable energy integration, electric energy substitution, power electronic application, and digital technologies. Then, we discuss the static problems, dynamic issues and asset management issues, and propose the concept of the future low-carbon power distribution system morphology. Moreover, we discuss key technologies in details, such as distributed energy intergration, microgrid cluster control, source-load interaction, DC power distribution systems, and digital asset management technology. Finally, we analyze the gap between the current status and the requirements of the new power distribution systems, and propose key scientific issues in development of the new power distribution systems and the future technology trending.

**Key words:** new distribution system; morphological characteristics; distributed renewable energy; microgrid cluster; source-load interaction; DC distribution system; digital technology

## 0 引言

2020 年 12 月, 习近平主席提出了“碳达峰、碳中和”的目标。2021 年 3 月, 中央财经委员会第九次会议明确了实施可再生能源替代行动, 深化电力体制改革, 构建以新能源为主体的新型电力系统, 实现“双碳”目标<sup>[1-3]</sup>。国家电网和南方电网公司分别发布《国家电网公司能源互联网规划》<sup>[4]</sup>和《南方电网公司建设新型电力系统行动方案(2021—2030 年)白皮书》<sup>[5]</sup>规划新型电力系统建设目标与路径。

大力发展可再生能源、提高电能可在终端消费中

的占比是新型电力系统推动“双碳”目标实现的重要手段<sup>[6]</sup>。新型配电系统通过接入海量分布式新能源, 降低电力生产环节碳排放; 借助灵活的网架、分布式储能、柔性电力电子设备及多元化的灵活互动方式, 充分满足电动汽车等新型负荷用电需求, 推动电能加速替代。因此, 新型配电系统是建设新型电力系统、推动“双碳”目标实现的重要组成部分。

分布式电源、分布式储能与新型负荷的大量接入使得配电系统出现供电多元化、用电互动化、电力电子化、装备智能化以及管理数字化等全新形态特征。传统配电系统调度方式、运行控制策略、管理手段难以支撑低碳化的新型配电系统建设。

论文梳理了“双碳”背景下配电系统在源、网、

荷、储、关键设备、管理方式等方面出现的新特征以及面临的主要挑战,提出了未来低碳化新型配电系统的形态格局构想,并讨论了支撑新型配电系统建设的关键技术,分析了配电发展现状与新型配电系统需求之间的差距。最后凝练了构建新型配电系统面临的科学问题,并对技术发展方向提出建议。

## 1 “双碳”背景下配电系统的新特征

### 1.1 分布式新能源和储能接入导致供电多元化

传统交流配电网通常是无源的,只能从主网单一供电途径获取电能。“双碳”目标下,为实现电源的清洁低碳化,以风电、光伏为代表的分布式新能源发电必将更加蓬勃发展。传统配电系统中供、用电环节清晰的角色界限逐渐模糊,“双碳”目标下构建以新能源为主体的电力系统,负荷不再单纯从电网获取电能。

2016年12月,国家发展改革委、国家能源局联合印发了《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》,明确指出“十四五”期间,光伏、风电、生物质能、地热能等能源系统的分布式应用、创新发展将成为我国应对气候变化、保障能源安全的重要内容。截至2019年,分散式风电总装机93.5万kW<sup>[7]</sup>;截至2020年,分布式光伏总装机7831万kW<sup>[8]</sup>,装机总量不断提升的同时,风电、光伏平价上网进程也在加速推进。2020年7月,国家发展改革委、国家能源局联合印发了《关于公布2020年风电、光伏发电平价上网项目的通知》。平价上网项目的落地将会进一步提升新能源发电的竞争力,推动新型配电系统中分布式新能源发电占比不断提升。配电网呈现供电多元化的特征。

### 1.2 电能加速替代,用电互动化与电力市场化特征凸现

“双碳”目标下,为实现减少碳排放,电能替代将加速推进。2021年4月,国家能源局印发《2021年能源工作指导意见》,提出本年度电能占终端能源消费比重力争达到28%的目标。

一方面,在交通运输领域,电动汽车飞速发展,替代传统燃油汽车。中国汽车工业协会数据显示,2020年中国纯电动汽车销量为111.5万辆,同比增长14.8%,全国电动汽车保有量400万辆。国际上,多个国家颁布了燃油车禁售时间表,荷兰和挪威从2025年禁售燃油汽车,印度和德国从2030年禁售燃油汽车,法国和英国从2040年禁售燃油汽车。我

国海南省于2019年发布的《海南省清洁能源汽车发展规划》提出,2030年海南省全域禁售燃油车。电动汽车逐渐取代传统燃油车之后,将会给配电系统带来庞大的增量负荷。

另一方面,电能替代导致空调、取暖器、热水器等负荷增加。2017年12月,国家发展改革委等10部门联合印发《北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021年)》。规划中明确,2021年北方地区电供暖(含空气能热泵)面积将达到15亿m<sup>2</sup>,电供暖带动新增电量消费1100亿kWh。

此外,江苏、上海、浙江、广东等负荷集中地区,供电峰谷差大、配网资源紧张、扩建空间不足。2017年7月11日,江苏电网成功完成了首次以需求侧响应缓解电力供应紧张的技术实践<sup>[9]</sup>。实际响应负荷为2.6万kW,有效缓解了夏季高峰期的电力供应紧张问题。需求侧响应正逐渐替代传统有序用电行政手段,进一步提升用户用电体验。

此外,2015年9号文开启了新一轮电力市场改革的序幕。目前,全国所有省级电网已开展了电力市场化交易的改革,其中,广东、浙江等省现货市场已在运行,青海、甘肃等省辅助服务市场也已开启。基于智能用电技术,以电动汽车、分布式储能、商用空调、工业用户为主体的源荷储互动以及电力市场是维持系统功率与电量平衡的重要手段,也是配电系统未来运行控制的关键。

### 1.3 直流配电及新型电力电子装备大规模应用

随着电力电子变流技术的飞速发展,中低压直流配电技术快速兴起,有效精简了配电系统电能变换环节,增强了配电网潮流调控的灵活性,在配电网潮流精确调控<sup>[10]</sup>、低压远供<sup>[11]</sup>、海岛供电<sup>[12]</sup>、异步联网<sup>[13]</sup>等领域有广泛的应用前景。目前,国内已落地多个交直流混合配电网示范项目,包括珠海唐家湾多端柔性交直流混合配电网示范、浙江海宁尖山主动配电网示范、苏州工业园区主动配电网示范等<sup>[14]</sup>。上述示范项目在能量路由器、柔直换流阀、直流断路器、直流变压器等多类世界领先的柔直配电网核心装备自主研发方面取得了具有工程推广价值的示范成效。

电力电子技术及装备已在配电网中广泛应用。变频调速是在配电系统中最早应用的电力电子技术<sup>[15]</sup>,因其效率高、平滑性好、调速范围广、精度高等优点,已广泛应用于轨道交通、工业生产、家用电器等行业<sup>[15]</sup>。

静止无功发生器(static var generator, SVG)是一种基于全控电力电子器件的无功补偿装备, 可根据需要注入感性或容性无功电流, 补充负荷消耗的无功功率, 改善负荷功率因数, 调节负荷电压, 降低线损<sup>[16]</sup>; SVG 具有动态响应速度快、无功连续可调的特征, 广泛应用于轧钢、炼钢、轨道交通等行业。在低压配电网中, 单相居民用电占总负荷比例较大, 三相不平衡导致的线损增大、电压偏移、变压器利用率降低等问题较为严重, SVG 利用其动态响应负荷变化、连续补偿不平衡功率的优势, 可有效解决三相不平衡带来的配电网电能质量及经济运行问题。文献[17]提出了一种基于智能电表量测数据配置 SVG 补偿容量的低压配电网三相不平衡抑制方法, 充分利用了 SVG 灵活可调、响应迅速的特性。

有源电力滤波器(active power filter, APF)是一种用于动态无功补偿和谐波抑制的电力电子装备<sup>[18]</sup>, APF 具有快速跟踪补偿冲击负荷和非线性负荷的无功补偿功能, 可抑制电压波动和闪变, 改善供电质量, 广泛应用于冶金、轨道交通、港口机械、空调密集场所等谐波污染严重场合。随着负荷的增长、分布式电源及其电力电子并网设备的大量接入, 谐波治理和无功补偿所需要的 APF 容量不断提升, 提高了 APF 的制造和运行成本。混合有源电力滤波器(hybrid active power filter, HAPF)是 APF 新的发展方向, HAPF 将 APF 和无源电力滤波器(power filter, PF)组合, 无源部分用于无功补偿, 有源部分用于谐波抑制, 可有效降低 APF 配置容量<sup>[19]</sup>。

智能软开关(soft open point, SOP)能够调节各条馈线的功率分布<sup>[20]</sup>。SOP 的应用使得传统“合环设计、开环运行”方式正在转变为更为灵活的“合环设计、合环运行”方式, 以利于多种分布式电源之间的功率互济, 有效解决短时间尺度内分布式新能源出力波动导致的线路功率不合理问题。文献[21]提出了一种基于多端 SOP 的交直流混联配电网多目标运行优化方法, 该方法利用 SOP 连续调节线路潮流分布的能力, 结合潮流优化方法, 降低了系统损耗以及节点电压偏差。以 SOP 为代表的电力电子柔性开关正逐渐取代传统配电线路之间的联络开关, 为提升配电系统运行安全性、稳定性和经济性带来了广阔的优化空间。

直流配电技术及新型电力电子装备为配电网灵活性提升提供了新手段, 其不仅能控制线路开通和关断, 还能连续调节有功、无功潮流, 减少分布

式发电与储能装置并入配网所需的电能变换环节。降低了电力电子变换设备的投入与配电损耗, 实现配电系统高效、绿色、可靠运行。借助直流配电技术和新型电力电子装备增强配电网灵活性是新型配电网的另一重要特征。

#### 1.4 数字化和智能化技术大规模推广和使用

传统配电系统基于监测控制和数据采集(supervisory control and data acquisition, SCADA)、能量管理系统(energy management system, EMS)等管理系统的整体管理依赖于企业网格员的手动输入和配网运维巡检人员的人工信息修正, 依赖于配电终端设备(distribution terminal unit, DTU)、馈线远方终端(feeder terminal unit, FTU)、配变监测终端(transformer terminal unit, TTU)等远程终端进行电气量数据的获取以实现配电系统的状态监测和稳定运行。

“双碳”背景下新型配电系统包含分布式电源、储能、充电桩等大量非电网资产以及透明配电网、增量配电网、能源互联网、微电网群等新业态的出现, 配电系统存在与交通网、天然气网等非电网网络在多时空状态下的耦合。设备产权归属不一、生产厂商多样、管理人员配置不合理。新型配电系统中设备管理的数据不仅包含传统配电系统的设备参量、设备运行状态、网络潮流、工作环境状态, 还包含新型配电系统下的电动汽车、充电桩等电网资产。

数字化技术的应用不仅可以提升配电设备管理水平和电能利用效率, 还将实现配电设备数字化、小微化、融合芯片的电力加电子集成转型, 减少传统配电设备的占地面积和损耗等, 进一步支撑碳减排。面向虚拟电厂、源-网-荷互动等新业态的信息通信技术和各类智能终端、电力专用芯片将得到大规模应用。

一方面, 数字化技术应用使得大量电网和非电网资产统一化管理成为现实; 另一方面, 一二次装备融合装备、基于边缘计算的智能终端装备将改变传统配电网 DTU、FTU、TTU 等远程终端的形态和功能。资产数字化和装备智能化是新型配电网的主要特征。

## 2 “双碳”背景下配电系统面临的主要挑战

新特征下, 配电系统主要面临以下 3 方面的问题: (1)静态问题, 即由于分布式电源与电动汽车等负荷的不确定性引发的经济调度与运行问题; (2)

动态问题,即由于电力电子装备低惯性特征与复杂的动态相互作用引发的稳定及电能质量恶化问题;

(3)管理问题,即大量非电网资产管理与调控问题。

### 2.1 电力电量平衡问题:源荷不确定性导致峰谷差增大、网损增加、资产利用率降低

一方面,新能源分布式发电装置大量接入造成了电源侧的不确定,给系统制定日前调度计划带来困难;另一方面,大量电动汽车的无序、随机充电带来了负荷的不确定性,虽然定制电力、需求侧响应、虚拟电厂等新型供用电模式的出现给用户主动参与配电管理提供了可能,但是用户响应受到环境、心理、市场规则等多方面因素影响,加之用户响应时滞性不可避免,导致负荷侧的不确定性愈发复杂<sup>[22]</sup>。发电侧与负荷侧的双重不确定性加剧了配电系统峰谷差问题,新能源发电装置(极端情况下)出力的反调峰特性和负荷的随机性严重制约了配电系统新能源消纳能力,降低了配电系统运行的经济性。

### 2.2 动态稳定问题:电力电子装备规模化接入、微电网(群)大量形成,稳定特征复杂、电能质量恶化

复杂动态稳定问题凸显。电力电子装备动态响应快、调节精度高,为解决配网运行控制带来了新手段,但低惯性变流设备缺乏对系统惯性支撑;电力电子装备采用多时间尺度级联控制结构,装备内部及装备间的多时间尺度控制相互作用复杂。上述原因导致配电网存在复杂的动态稳定问题。配电网网架结构、线路特征、负荷特征等迥异于输电网,动态稳定问题也将表现出与大电网不同的特征。

供电电能质量下降问题突出。大量电力电子装备接入使得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。此外,电力电子装备对电网故障、电压闪变等的影响机理尚未明晰。

### 2.3 数据资产管理问题:数据和多业务形态融合、信息安全

资产数字化和设备智能化趋势推动配电网转型,也将引发配电网的新问题。一方面,资产数字化和装备智能化趋势下,新型配电系统数据呈现多来源、多模态的特点,发电、配电、用电等电气量信息、天气信息、社会信息为电网设备的管理提供数据支撑,为智能算法和决策提供数据支撑,但多源数据融合是新型配电系统数字化和智能化需解决的首要问题。另一方面,装备智能化趋势下,信息安全及行为安全也是需重点关注的问题。

## 3 新型配电系统形态格局

“双碳”目标下,配电系统源、网、荷及管理等方面都显著变化,面临一系列全新问题,将呈现新的形态格局,如图1所示。

### 3.1 分布式可再生能源成为配电网重要甚至主力供电电源,多层级微网(群)互动灵活运行成为重要运行方式

新型配电系统中,风电、光伏、小水电、地热、生物质能等类型的分布式发电将会成为主力电源,实现发电侧低碳化甚至零碳化。分布式发电装置不仅能够基本满足配网内负荷用电需求,还具有构网能力,可实现对配网电压频率的主动支撑与调节功能。微电网将会成为分布式新能源就地消纳的主要形式,多层级微网(群)之间可实现灵活的功率互济与潮流优化,有效提升配网运行的安全性、稳定性和经济性。

### 3.2 负荷将不再只是被动受电,配电网运行模式也将从“源随荷动”变为“源荷互动”,柔性负荷深度调节参与源荷互动

电能加速替代将会带来巨量的电动汽车、集群空调、电供暖等增量负荷,这些增量负荷普遍具有柔性可调特性。柔性负荷将在源荷互动技术、高效的电力交易及博弈机制支持下,即时响应配电系统功率调节,深度参与源荷互动,平抑峰谷差,提升配网运行效率。

### 3.3 基于电力电子的配电设备灵活调节电力潮流,提高配电网的灵活性,全面提升配网运行水平

随着柔性电力电子装备技术的推广应用,新型配电系统网架将会发展为灵活的环网状结构,各配电区域通过柔性开关实现互联,潮流流向及运行方

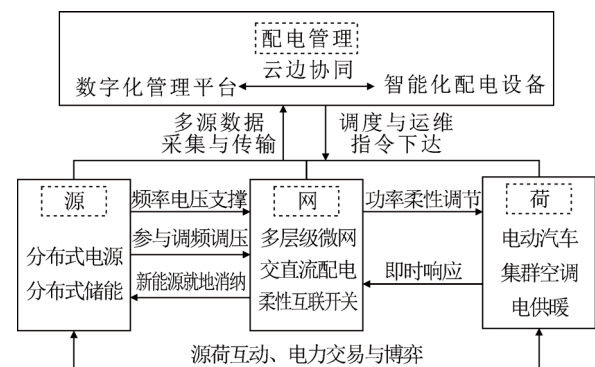


图1 新型配电系统形态

Fig.1 Morphological structure of new distribution systems

式日趋多样化。配电调度将具有对潮流进行大范围连续调节的能力, 系统运行灵活性显著提升。

### 3.4 数字赋能, 实现系统全景状态可观、可测、可控, 提升配电网管理水平及能源利用效率

新型配电系统具有对配网运行产生的海量多源异构数据进行采集、传输、存储、分析的能力, 从而实现系统全景状态可观、可测、可控, 并利用大数据技术为调度决策、运行维护、电力交易提供指导。配网管理水平及能源利用效率显著提升。

## 4 关键技术

新型配电系统面临管理和技术革命, 涉及从电工基础材料到配电网调度控制等一系列关键技术。面对新形态与新特征下新型配电系统运行控制, 论文对如下几类关键技术进行了总结, 并提出了如图2所示的新型配电系统研究框架。

### 4.1 分布式电源与微电网技术

此处分布式电源包括接入 110 kV 以下电压等级配电网的分散式风力发电和分布式光伏发电以及储能系统。其基本内涵是要求分布式新能源发电和储能可以灵活构建离、并网型区域微电网为负荷供

电, 同时, 区域多个微电网(群)间能量可灵活互动, 协同运行, 构建新型配电系统安全高效的运行体系。

#### 4.1.1 分布式新能源发电技术

分散式风电和分布式光伏通过低惯性电力电子装备大量接入配电网, 且大多数分布式新能源发电装置以追求最大发电量为目标, 电力电量平衡调节完全由电网承担。这给配网运行带来了两方面问题, 一方面, 新能源发电并网设备大多采用基于锁相环的跟网型控制策略, 在发生功率跃变时缺乏对系统的惯性支撑能力, 将会引发稳定性降低、电能质量恶化等问题; 另一方面, 最大功率跟踪控制策略下分布式电源出力随机、波动性大, 无法根据调度指令参与一二次调频、调压。为了解决上述两方面问题, 使分布式电源(在配电系统内)成为具有主动支撑能力的构网主力电源, 需要明确分布式电源并网标准, 研究出力预测技术为分布式电源参与调频调压提供基础, 研究分布式新能源集群控制技术以保证可再生能源大规模接入背景下配电系统安全、稳定、经济运行。

#### (1) 分布式新能源发电主动支撑技术

我国于 2017 年 5 月颁布了《GB/T 33593—2017

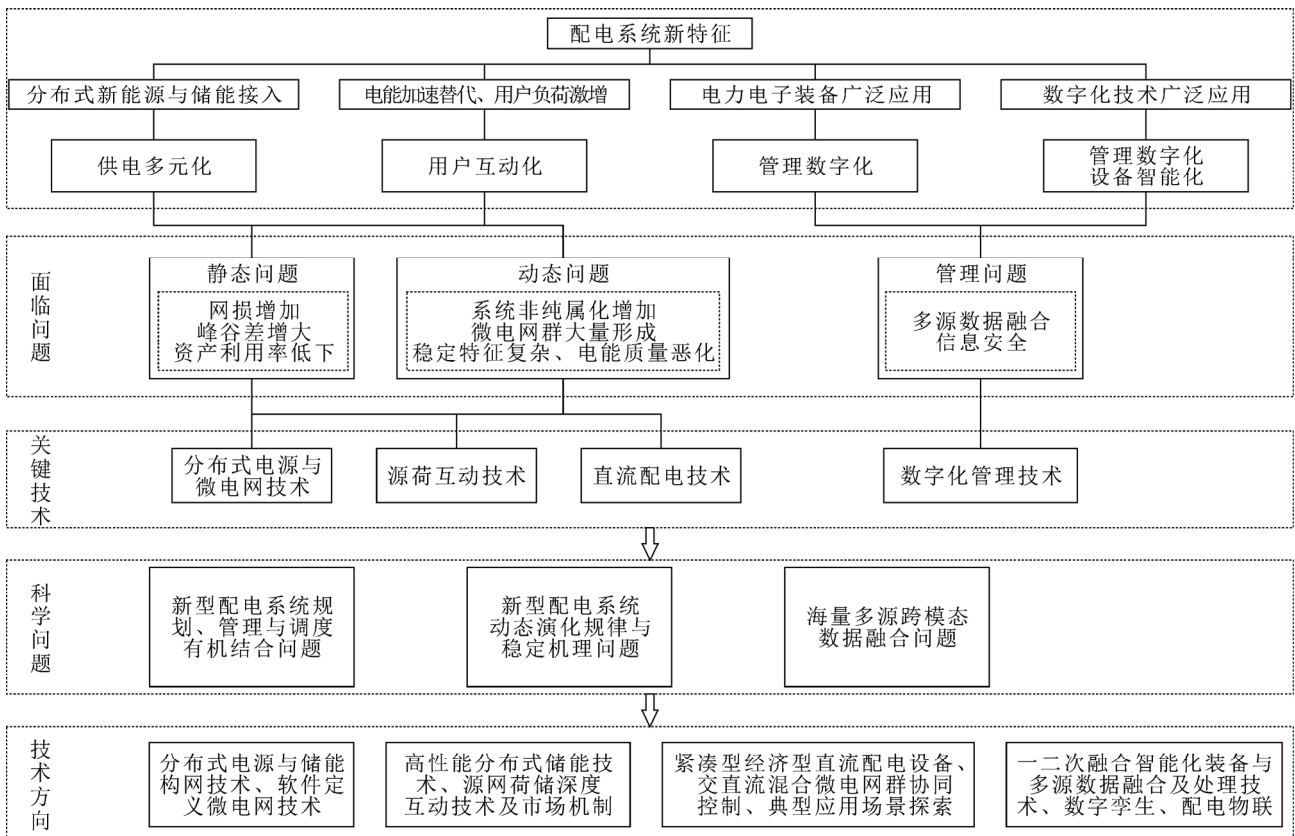


图2 新型配电系统研究框架

Fig.2 Research framework of new distribution systems

分布式电源并网技术要求》和《GB/T 33592—2017 分布式电源并网运行控制规范》，对分布式电源并网之后的有功功率控制和无功电压调节能力作出了明确规定。但是在高比例电力电子装备接入背景下，系统等效惯性降低，功率波动引起系统频率电压快速变化，严重威胁到系统的稳定运行。分布式电源不仅需要具备一定的范围内调节频率电压的能力，还要具有抑制频率电压快速变化的能力。现阶段，已有学者提出了一种“惯性-刚度补偿器”，使分布式电源在系统发生功率缺额时具有瞬时频率电压支撑能力<sup>[23]</sup>，并用功率跃变瞬间提供的有功功率补偿定量表述了分布式电源的频率惯性支撑能力，这为后续制定相关并网标准提供了依据。

### (2) 分布式新能源发电出力预测技术

精准预测新能源发电出力是调度规划备用容量、实现分布式电源参与一二次调频、调压的基础。大规模风电场、光伏电站的短期、超短期预测已有相关研究成果<sup>[24-27]</sup>。然而，分布式新能源发电具有空间广域分布、周边微气象特征复杂、受建筑及人类社会影响大等特点，出力预测较为困难。目前研究成果主要集中于利用天气预报<sup>[28]</sup>、气候条件<sup>[29]</sup>进行发电预测，较多地考虑了自然条件对新能源出力的影响，缺少对分布式电源空间分布特性及人类社会活动因素的考量。

### (3) 分布式新能源发电集群控制技术

“双碳”目标背景下，分布式电源以集群形式并入配电网，对单个电源进行独立控制难以实现分布式电源对系统频率电压的支撑功能，需要从集群协同控制的角度考虑分布式电源控制策略。集中式与分散式是两种主要的分布式电源并网集群控制策略<sup>[30]</sup>。集中式控制的优势在于利用全面搜集的量测数据对分布式电源进行协同控制，充分利用区域内可调资源，但对通信和计算能力要求较高。分散式控制则利用局部量测信息对分布式电源进行自治控制，虽然降低了对通信即时性和计算速度的需求，但是也放弃了大量可调资源，限制了分布式电源集群对系统的支撑能力。分布式控制方式将配网中的分布式电源划分为若干个子集群，每个子集群采用相同的控制策略，兼顾了集中式控制的资源调动能力和分散式控制的快速响应能力。具有理想的鲁棒性、灵活性以及扩展性<sup>[31]</sup>，是新能源高渗透配电系统中理想的分布式电源集群控制方式。

目前，分布式新能源电源发电集群控制技术的

研究仍然处于起步阶段，尚不能使分布式电源成为具有构网能力的新型配电系统主力电源。相关成果主要集中在单台发电设备的控制，较少考虑多台新能源发电设备通过并网逆变器接入系统的协同控制策略，多个逆变器在功率跃变时刻的不平衡功率分配机理尚不明确；多个逆变器的多时间尺度控制策略交互影响机理亦不明确；传统基于有功-频率、无功-电压特性曲线的下垂控制方式在配电线路电阻不可忽略的情况下不再适用，分布式电源难以参与一次调频、调压。

### 4.1.2 分布式储能技术

从功率角度来看，新型配电系统的静态问题和动态问题本质上是不同时间尺度内的功率不平衡问题。在负荷高峰期这一相对较长的时间尺度内，源荷两侧功率不平衡导致了峰谷差等静态问题；在系统发生功率跃变时刻到一次调频、调压动作前这一相对较短的时间尺度内，电力电子设备缺乏类似同步发电机的转子惯性，无法对系统功率不平衡进行支撑，导致系统稳定性下降，电能质量恶化。分布式储能技术为解决上述不同时间尺度内功率不平衡导致的静态、动态问题提供了可行方案。

#### (1) 储能调峰调频技术

以分布式抽水蓄能、液流电池、锂离子电池、储冷储热技术为代表的能量型储能可以实现消除负荷尖峰、削峰填谷、平抑波动、与充电桩联合运行缓解充电功率冲击等功能，提升配电设备利用率<sup>[32-33]</sup>。锂离子电池储能累计装机容量已达到全球电化学储能投运项目的76%<sup>[32]</sup>，是目前应用最为广泛的电化学储能技术；飞轮和超级电容可应对短时高频次的电力负荷冲击；移动储能车可实现应急供电与保障；储冷储热是在区域综合能源系统中应用较为广泛的储能技术。相比电化学储能，储冷储热技术具有经济性、安全性方面的优势，分布式抽水蓄能实现更大范围的能量调节与配置。储能调峰调频技术对储能装置在容量、响应速度、成本、安全性、功率/能量密度等方面均具有较高要求，采用单一储能形式难以满足需求，需要研究具有全方位优势的复合储能技术。

#### (2) 稳定性与电能质量增强技术

大量电力电子装备随分布式能源接入配网，系统等效惯性降低，频率电压稳定性面临威胁，另外，高频功率开关器件引入大量谐波，降低电能质量，对半导体制造等敏感工业负荷造成消极影响。分布

式储能技术为提升新型配电系统稳定性及电能质量提供了可行方案。文献[23]提出了一种储能装置与并网逆变器控制策略配合的方法, 实现了分布式电源对系统的动态稳定性支撑。在电力电子设备大量接入导致系统惯性降低的情况下, 并网逆变器配合储能将是提升系统动态稳定性的重要手段。另外, 以超级电容为代表的功率型储能具有快速响应能力, 在改善配电系统电能质量方面发挥重要作用<sup>[34]</sup>。

目前, 分布式储能技术的发展尚不能较好地解决峰谷差、稳定性降低、电能质量恶化问题。大容量、安全、经济的储能装置尚未取得成熟应用, 无法充分满足增量负荷规模化接入的调峰需求。缺乏基于构网型逆变器的储能控制策略, 在系统发生功率跃变时, 低惯性的电力电子设备无法为配网提供电压频率支撑。

#### 4.1.3 微电网技术

微电网作为配电系统中一个相对独立的自治区域, 可以高效集成多种分布式新能源发电装置与多元负荷, 实现新能源的就地生产和消纳。从微网层面内考虑各种分布式资源的协同控制, 将微网对外等效为电压/电流源, 可降低配电系统频率、电压稳定性控制的复杂度; 从微网群层面考虑功率互济与调度优化, 可利用不同区域内新能源及负荷互补特性解决分布式电源出力波动、峰谷差等经济调度问题。

##### (1) 新能源微电网频率和电压动态稳定技术

新能源微电网作为一个相对独立自主的区域, 面临着与配电系统类似的动态稳定性问题。尤其是在电力电子设备大量接入、引起微电网等效惯量及阻尼降低的情况下, 微网抵御功率冲击、维持频率电压动态稳定能力急剧下降。

文献[35]提出了一种电压源型虚拟同步发电机控制策略, 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)是一种常用的提升分布式电源频率电压动态支撑能力的控制方法。其核心思想是对并网逆变器进行控制, 模拟同步发电机有功-频率、无功-电压的外特性。传统VSG技术模拟出的同步发电机虚拟惯量及阻尼一般是固定不变的, 在不同类型功率扰动下, 固定的惯量参数不能满足微电网频率动态调节对于稳定性和快速性的需求。基于上述考量, 有学者提出了虚拟惯量自适应控制技术<sup>[36-37]</sup>。另外, 也有学者从改进传统下垂控制的角度, 提出了广义下垂控制技术<sup>[38]</sup>, 在传统下垂控制的基础上

加入二次频率控制, 模拟惯量及阻尼特性。

新能源微网在孤岛运行状态时, 缺少坚强主网的支撑, 因此具有模拟惯量及阻尼特性的控制策略对于维持微网频率电压动态稳定具有重要意义。

##### (2) 微电网群观群控技术

微电网群观群控是指集中采集多个微电网的信息, 集中协调控制各个微电网的运行状态, 从而实现微电网群的协调优化、能量互济等功能。在新能源发电装置与增量负荷规模化接入配电系统的发展趋势下, 越来越多的微电网将会以集群形式出现在配网中, 给新型配电系统的运行控制方式带来新的挑战。多个微电网如何统一调控、如何实现功率互济及优化运行是微电网群运行与控制的关键。

文献[39]提出一种包括配电层、微网群层、微网层和单元层的微电网四级控制结构。参考分布式电源的协调控制策略, 微网群层一般采用主从控制和对等控制策略。对于主从控制方式, 主控单元在并网时采用PQ控制, 相当于电流源; 在离网时采用V/f控制, 相当于电压源为微网群提供频率和电压支撑<sup>[40]</sup>。主从控制对于微网间的通信要求较高, 且主控单元调压调频压力较大。对等控制方式则克服了上述缺点, 各微网单元按照预先整定的下垂曲线进行自主对等控制, 无需通信和上层控制。文献[41]提出了一种由交、直流微网组成的混合微电网群控制策略, 将交流微网的有功-频率特性与直流微网的有功-电压特性进行标准化计算, 得到统一的控制尺度, 实现混合微电网群的对等控制。交直流混合微电网的控制策略相关研究工作在微网类型多元化的趋势下具有重要意义。

利用微电网的功率互济及优化技术, 既可以实现微网新能源互补以平抑出力波动, 又可以提升微电网供电可靠性。然而微电网群中的控制变量较多, 优化算法快速求解难度大, 给微电网群实时调度优化带来了挑战。文献[42]提出了一种基于分散结构下部分可观测马尔可夫决策过程的微电网群协调优化问题建模方法, 弱通信条件下依然可以根据部分观测信息进行优化建模, 并利用拉格朗日乘子对目标函数解耦, 降低了求解难度。该研究对于实现包含复杂变量、对等控制下的微电网群实时调度优化具有重要的指导意义。

#### 4.2 源荷互动技术

源荷互动技术是指新能源发电出力动态变化时, 根据系统源荷平衡关系, 动态调节可控负荷消

耗的电力,利用源荷交互关系,实现更加安全、高效、经济地提高电力系统动态平衡能力的目标,其本质是一种实现能源最大化利用的运行模式<sup>[43]</sup>。源荷互动技术利用不同分布式新能源发电的互补特性,协同规划配电区域内各种新能源发电装置容量配置,抑制总体出力波动,从而提升新能源利用率;利用柔性负荷可控特性平抑峰谷差,提升配电设备利用率。因此,基于信息技术、传感技术、控制技术的“源荷互动”模式将成为未来电力系统的重要调度运行方式<sup>[44]</sup>。目前,源荷互动模式下的配电系统调度研究集中在以下几个方面<sup>[43]</sup>:

#### (1) 计及源荷不确定性因素的潮流计算方法

潮流计算是配电系统规划与调度运行的重要基础。分布式电源出力的波动性、多元负荷接入的随机性以及负荷侧响应调度调峰需求意愿的复杂性给配电系统调度运行带来了较高的不确定性,传统确定性潮流计算方法已经难以处理变量以及互动的不确定性。现阶段,已有学者提出了考虑光伏<sup>[45]</sup>、风电<sup>[46]</sup>出力不确定性的潮流计算方法。此外,文献<sup>[47-48]</sup>分别提出了考虑负荷不确定性及负荷响应调峰需求不确定性的潮流计算方法。总体来看,现有研究成果已经较为广泛地考虑了源荷互动各环节不确定性因素,并提出了各种不确定性因素单独作用下的潮流计算方法。

#### (2) 源荷互动模式下配电系统多目标优化调度技术

传统配电系统调度优化一般以单一经济性目标为导向,系统供电的安全性和可靠性主要取决于设备本身,优化模型中一般将安全性和可靠性作为约束条件处理<sup>[49-51]</sup>。源荷互动模式下,调度决策很大程度上影响了系统运行的安全性与可靠性,在优化模型中将安全性与可靠性作为量化的目标函数,可以直观地观察安全性、可靠性与经济性的相互定量影响关系<sup>[52-53]</sup>,这在日前调度方案制定中具有参考意义。目前,已有学者提出了利用二阶锥优化、粒子群算法进行多目标潮流优化的方案<sup>[54-56]</sup>,该类方案通常利用帕雷托最优解集对潜在最优解进行多维度评价,给运行调度人员提供了更灵活的决策方案,有助于实现源荷互动模式下的安全、稳定、经济调度。

#### (3) 电力市场环境下经济运行技术

通过各种激励方式引导多元主体参与电力市场交易是推进源荷互动的重要手段,其具体技术形

式包括需求侧响应和虚拟电厂<sup>[57]</sup>。目前,相关研究集中在利用价格激励机制激发用户参与响应的积极性<sup>[58-60]</sup>。负荷侧的响应意愿和参与程度确实是源荷双侧高效互动的关键一环,但是仅依靠负荷侧的积极响应并不能充分发挥源荷互动潜力,实现削峰填谷。为了充分挖掘并调动系统中的可调资源,文献<sup>[61]</sup>开展了源网荷整体态势感知、响应能力实时量化评估、响应策略从群体落实到个体、源网荷协调控制技术、负荷多时间尺度特性等方面的研究,为基于需求侧响应的系统动态功率平衡技术发展提供了思路。

围绕源荷互动开展的研究主要包括潮流分析及优化技术和市场引导机制两方面。在潮流分析与优化技术方面,现有不确定性潮流计算及优化调度策略研究大多只单独考虑了分布式发电装置出力的波动性或是增量负荷取能的随机性,忽略了配电系统源荷集聚带来的时空耦合特性以及气温关联特性。难以提升新型配电系统的潮流控制精度,无法实现短时间尺度内峰谷差的平抑。在市场引导机制方面,需求侧响应仍然是引导多利益主体参与源荷互动的主要方式,但该方式是一种基于预测信息在系统发生或即将发生较大功率不平衡事件时的补救措施,考虑到负荷响应不可避免的时滞特性,需求侧响应并不能完美解决配电系统峰谷差问题。需要考虑结合柔性负荷深度控制技术,使得负荷用能曲线能够实时跟踪新能源发电曲线,以实现实时源荷平衡,从根本上解决峰谷差问题,提升配电设备利用率。

### 4.3 直流配电技术

直流配电技术为提升新型配电系统运行经济性、灵活性、可靠性以及电能质量提供了可行方案。直流配电网可通过较少的电能变换环节接纳新能源发电装置以及向电动汽车等直流负荷进行供电,减少了电能多级变化带来的损耗和谐波,有效提高供电能效和电能质量。另外,借助电力电子变流装置柔性可调特性,可实现潮流灵活控制,在用电高峰期避免个别线路功率阻塞,提升供电能力。

目前,直流配电技术研究主要集中在以下几个方面:

#### (1) 电压序列与标准化

直流电压等级序列是直流配电网规划建设的关键性基础问题。合理规划直流电压等级序列可以有效避免直流设备电压等级混乱、电能变换环节重



复设置、配电效能低下、建设成本过高等问题<sup>[62]</sup>。目前,国际上暂无统一的直流配电电压等级序列标准<sup>[63]</sup>。国内外学者从供电能力<sup>[64]</sup>、投资成本<sup>[65]</sup>、直流设备制造水平、电能质量要求、配电经济性、各种典型配电场景<sup>[66-67]</sup>的负荷需求特征等方面提出了多种直流电压等级序列选择方案。我国于2017年12月颁布了《GB/T 35727—2017 中低压直流配电电压导则》,明确了直流配电系统电压等级确定应当坚持简化电压等级、减少变压层次、优化网络结构的原则,另外还需要考虑与现有交流电压序列的衔接,方便直流负荷、新能源、储能装置的友好接入。目前,相关标准集中在中低压公共直流配电系统电压等级的规划,对于通信系统、楼宇供电、船舶供电、城市轨道交通等具体场景的直流电压等级序列规划还缺乏细化标准。

### (2) 直流配电系统故障保护技术

直流配电网故障保护技术是保障直流配电网安全运行的关键手段。以两电平电压源换流器(voltage source converter, VSC)、模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)为代表的新型配电设备以及环网拓扑结构的出现,深刻改变了配电网的故障特征。文献<sup>[68]</sup>总结了低压直流配电网故障特征,主要包括:故障电流持续时间短、源荷角色模糊、故障电流振荡、断路器开断时间长、配网运行方式和节点状态不确定,并提出了基于流向对比法、极值比较法、方向预测法以及“单支路即时记忆、多支路短时定位”的保护策略,提升了故障类型识别速度和故障隔离的可靠性。

### (3) 直流配电系统协调控制与调度优化技术

直流配电网一般通过多个换流站与交流电网连接,形成一种多端供电、运行方式多样、双向潮流的环网状拓扑结构。利用换流站改变交直流系统间传递的有功功率,可实现线路潮流的灵活控制。这就涉及到直流配电网的协同控制与调度优化问题。直流配电网的控制一般可以归纳为4层:器件级控制、换流阀级控制、换流站级控制和系统调度级控制<sup>[69]</sup>。其中,换流站级控制的目标是实现直流电压稳定,系统调度级控制是实现配网经济运行。这是论文关注的重点。

目前,直流配电网的电压控制策略主要采用主从控制、下垂控制和电压裕度控制3种方式。主从控制原理简单,但是依赖换流站之间的低时延通信;下垂控制借鉴同步发电机的下垂调节特性,所有具

有功率裕度的换流站均可根据预先整定的下垂曲线参与直流电压控制,对站间通信依赖程度低,但是存在电压调节的稳态误差;电压裕度控制原理与主从控制类似,考虑到作为平衡节点的主站在负荷高峰期可能出现备用容量不足问题,该控制方式选定多个后备定电压换流站,在需要进行主站的切换。从直流配电网示范工程建设经验来看<sup>[70]</sup>,主从控制是现阶段应用较为广泛的直流配电网电压控制方式。也有学者提出了改进的电压控制策略,文献<sup>[71]</sup>提出一种结合下垂控制和偏差控制的直流电压偏差斜率控制策略,克服了偏差控制响应速度慢以及下垂控制的稳态误差问题。

直流配电技术的研究虽然在关键设备研发、规划建设、保护控制、调度优化技术等方面取得了一定成果,但是仍未满足新型配电系统的发展需求。作为交直流配电系统的核心接口设备,大功率VSC换流器大多采用带联络变压器的隔离型结构,增加了直流配电网运行损耗,难以发挥直流配电方式在经济性方面的优势。另外,随着分布式电源、储能以及柔性负荷的大量接入,微电网将会是实现配电系统新能源友好接入与高效消纳的重要途径,结合直流配电技术的交直流微电网协同控制技术是后续值得关注的研究方向。

## 4.4 数字化配电网技术

数字化技术泛指以计算机技术为首的人工智能、深度学习、强化学习技术以及信息通信技术为基础的云边协同、数据驱动等技术。数字化技术为电力系统处理复杂场景中的海量多源异构数据提供了解决方案,凭借其优良的抗干扰能力、高精度、强保密、多通用的特点,可解决新型配电系统中的资产管理、电能质量管理、分布式发电管理、智能表计以及储能负荷的协调控制问题。

### (1) 电气设备智能化技术

数字化管理技术的基础是电气设备具有数据采集、运算及通信能力。数据采集依赖于高精度的传感技术,然而嵌入式传感器的精度又与体积、成本成正比<sup>[72]</sup>。文献<sup>[73]</sup>指出,压缩感知(compressed sensing, CS)技术可以利用低秩数据对原始信号进行高概率重构<sup>[74]</sup>,是解决智能电力设备传感器成本与性能矛盾的有效方法。智能化电力设备的运算能力主要体现在基于传感数据进行故障预测、诊断及状态评估,目前,已有学者提出了实现相关功能的算法,如何实现算法轻量化并应用于边缘计算是值

得关注的问题<sup>[73]</sup>。在通信方面,无线通信、光纤通信及载波通信是现阶段电力设备实现远程通信的主要方式,文献<sup>[75]</sup>所指出的智能终端信息安全问题也是智能化电力设备研究中需要重点关注的问题。

## (2) 配(微)电网透明化技术

新型配电系统所存在的多类传感器带来海量的电气量及非电气量数据,数字化技术依靠构筑底层逻辑的电力定制化芯片和顶层算法的人工智能、数据驱动体系进行海量多源数据的融合,通过构建设备的多状态监测库实现新型配电系统整体的可观可控,逐步向透明化方向发展。新型配电系统所产生的多参量包括以电力量测为代表的时间序列等结构化参量,也包括图像、检修报告等非结构化参量,二者在物理意义和表征形式上有很大的差别,即电力异构多参量。对多参量进行融合,使其相互补充和增强,能有效提高电力感知的精确性,提高配电设备运维管理的效率。目前电力多参量融合已有一定应用基础<sup>[76]</sup>,但跨类型、多维度的数据分析技术薄弱,状态量间的关联分析挖掘能力不足,对异构多参量进行融合的迫切需求与有限的技术手段之间的矛盾依旧突出,仍需要不断研究。

数字化管理技术的研究仍然处于起步阶段。在多源数据采集环节,配电设备还未实现智能化,缺少各种电量及非电量数据的采集手段,亦未形成统一的数据上传接口标准。在数据处理与分析环节,缺乏多模态、多类型数据相关性的挖掘技术,无法充分利用数据中包含的时空关联信息进行配电运行优化。

## 5 科学问题与技术展望

### 5.1 关键科学问题

面对新型配电系统的新特征与新形态,如下关键科学问题仍需解决:

科学问题 1: 多时空强不确定性条件下,新型配电系统及微电网(群)存在的多类规划、管理、调度问题。

科学问题 2: 供电侧新能源占主导地位、配电侧大量新能源入网、用电侧大规模储能接入等造成新型配电系统中微电网及微电网群的稳定机理不明、动态特性不清,发展瞬时频率和电压的基本概念、厘清稳定机理与特征是另一个亟待解决的科学问题。

科学问题 3: 新型配电系统的多类智能设备及

传感器带来了海量的跨模态数据,为新型配电系统的可靠运行提供支持,但不同结构数据之间存在的壁垒导致海量支撑数据被浪费,如何有效利用这些多来源数据,进行数据融合和多业务形态融合是另一个重要科学问题。

### 5.2 技术发展展望

结合目前新型配电系统面临的关键问题及关键技术的发展现状,论文认为下列技术需重点关注。

#### 5.2.1 分布式电源与微电网技术

(1) 发展分布式新能源发电、储能的构网技术,实现新能源与储能独立组网运行

剖析电网的本质内涵,厘清构建电网对新能源发电和储能运行的根本要求。研究多时间尺度构网控制技术,包括:具备构网能力的新能源与储能的协调控制,研制相应的新能源和储能并网装备;研究电网频率和电压与新能源和储能装备的深层联系,提出频率和电压建立与调节方法;研究新能源发电与储能集群控制技术,研制地区、变电站、馈线以及场站多层级能量管理系统,使得新能源发电与储能有序构网运行;研究新型配电系统的稳定机理、失稳特征与稳定问题分类等。

(2) 发展软件定义配电网和微电网,实现多层次微网(群)互动运行与网架灵活控制技术

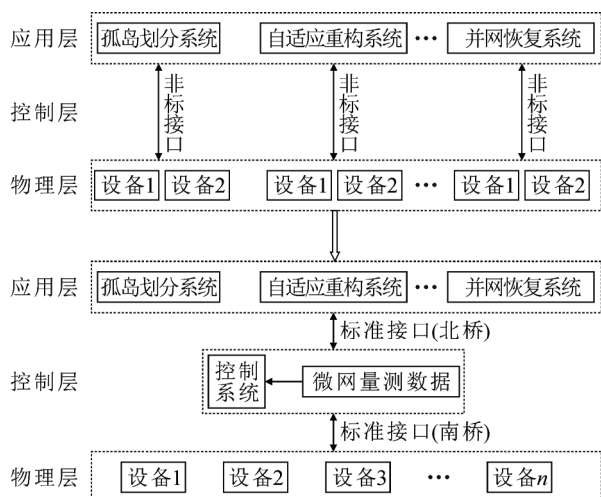
配电网架构和边界条件相对固定,严重制约了微电网(群)重构的灵活性与供电恢复弹性。软件定义理论为解决上述问题提供了思路。通过探索软件定义配电网和微电网整体架构、原理与技术、应用功能定义与应用场景,充分考虑区域分布式能源和灵活性负荷资源的种类和分散性,研究基于软件定义平台的微电网孤岛划分策略、孤岛检测技术、自适应重构策略及并网恢复策略,使微电网服务、控制与硬件分离(如图 3 所示<sup>[77]</sup>),可解决传统微电网(群)基于确定性源网荷约束的集中控制策略的灵活性不足和实时性差的问题,实现微电网不同模式平滑切换的灵活可恢复与安全稳定经济运行。

#### 5.2.2 源荷互动技术

(1) 发展全方位电力市场机制,提高电力用户主动参与源荷互动的积极性

研究与新型配电系统契合的电力市场机制,丰富电价形成机制,还原电力商品属性;制订分时、分区及响应形态的源荷互动市场机制,利用市场手段撬动用户主动参与的积极性。

(2) 发展高性能分布式储能及源网荷储深度互

图3 软件定义微电网<sup>[77]</sup>Fig.3 Software-defined microgrids<sup>[77]</sup>

动技术, 解决峰谷差、设备利用率低等静态问题

大容量、安全、稳定、经济、高效、响应迅速的分布式储能装置是平抑配电系统峰谷差的关键设备。另外, 还需要研究结合分布式电源、储能、可控负荷、柔性联络开关等一切可调资源的源网荷储深度互动技术, 以提升系统调峰能力。其中, 计及互动过程中各种不确定性因素的优化调度技术以及基于发电曲线跟踪的负荷主动响应机制是实现源网荷储深度互动的核心手段。

### 5.2.3 直流配电技术

(1) 发展紧凑型经济型直流配电设备与交直流混合微电网群协同控制技术, 提升新能源渗透率及运行经济性

大功率换流器、直流变压器、能量路由器等直流配电关键设备造价高昂、运行效率不高, 严重制约了直流配电方式的推广, 需要重点关注紧凑型经济型直流配电设备的研发, 充分发挥直流配电技术经济性, 扩展应用场景。另外, 结合交直流混合配电技术的微电网是实现新能源友好接入与就地消纳的理想方式, 微电网群的接入将会深刻改变配电系统运行控制方式, 需要重点关注微电网群协同控制技术的研究, 以提升新能源高渗透背景下新型配电系统运行安全性、稳定性和经济性。

(2) 发展典型应用场景的定制化直流配用电供电模式, 充分发掘直流配电优势

直流配电技术作为传统交流配电技术的有机补充, 在高比例分布式新能源区域、数据中心、工业园区、城中村改造、新型城镇、独立电力系统等

新型典型场景中具有卓越的应用潜力。需要系统性地研究用户侧直流配用电技术的适宜应用场景, 发展直流配用电技术安全性、稳定性、灵活性、经济性综合评价体系, 从设备选型、网架结构、控制模式等多角度构建各种典型应用场景的定制化直流配用电供电模式, 推广直流配电应用, 实现交直流配用电技术在新型配电系统中的优势互补。

### 5.2.4 数字赋能技术

(1) 发展一二次融合智能化装备与多源数据融合及处理技术在配电系统中的应用, 实现系统全景状态感知, 提升运行管理水平

数字化技术在配电系统中的应用是海量多源跨模态数据大量出现背景下配电系统运行管理的必然需求。需要重点研究柱上开关、环网柜、变压器等关键配电设备的一二次融合技术, 实现多源信息的实时采集与数字化处理、设备状态评估与风险感知、自适应本地控制、标准化通信交互。集成传感、通信、数据处理、控制功能的定制化电力芯片是实现电力设备一二次融合与多源数据融合利用的理想技术形式。

(2) 发展数字孪生、配电物联平台等技术在新型配电网中的应用

研究新型配电系统源网储荷跨域互动的数字孪生虚实映射机制、面向全景可观的新型配电系统电场/声场/温度多物理场成像与跨模态融合技术、新型配电系统数字孪生通用模型架构与范式等关键技术, 解决新型配电系统源网储荷高度互动和能量/数字深度融合所带来的可测可观可控难问题。

研究配电与物联网深度融合的配电物联平台技术, 构建基于设备状态感知、软件定义服务、分布式智能协作的数字化配电系统运行模式, 依托灵活支持各种配网服务的企业业务中台, 实现数据、服务、功能应用解耦, 打破多源数据融合的壁垒, 有效提升配网运行灵活性。

## 参考文献 References

- [1] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.  
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [2] 李立涅, 张勇军, 陈泽兴, 等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 1-9.  
LI Licheng, ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, et al. Merger between smart grid and energy-net: mode and development prospects[J]. Au-

- tomation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1-9.
- [3] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904. ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [4] 北极星电力网. 《国家电网公司能源互联网规划》[R/OL]. (2021-04-26). <https://news.bjx.com.cn/html/20210426/1149465.shtml>. Polaris Power Network. "State Grid Corporation of China energy internet plan" released! (announcement details attached)[R/OL]. (2021-04-26). <https://news.bjx.com.cn/html/20210426/1149465.shtml>.
- [5] 中国南方电网有限责任公司. 南方电网公司建设新型电力系统行动方案(2021—2030年)白皮书[R/OL]. (2021-05-15). [https://mp.weixin.qq.com/s/W5EhFA\\_wMp8zUTdKx3oWhg](https://mp.weixin.qq.com/s/W5EhFA_wMp8zUTdKx3oWhg). China Southern Power Grid Co., Ltd.. China Southern Power Grid Corporation's action plan for building a new power system (2021—2030) white paper[R/OL]. (2021-05-15). [https://mp.weixin.qq.com/s/W5EhFA\\_wMp8zUTdKx3oWhg](https://mp.weixin.qq.com/s/W5EhFA_wMp8zUTdKx3oWhg).
- [6] 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/OL]. 高电压技术: 1-12[2021-08-26]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210809>. HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New problems and key technologies of new power system planning under dual carbon goals[J/OL]. High voltage technology: 1-12[2021-08-26]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210809>.
- [7] 2019年风电产业地图[R]. 中国可再生能源学会风能专业委员会, 2020. Map of the wind power industry in 2019[R]. Wind Energy Professional Committee of China Renewable Energy Society, 2020.
- [8] 中国光伏发电行业专题调研与深度分析报告[R]. 韦伯产业研究院, 2021. Special investigation and in-depth analysis report of China's photovoltaic power generation industry[R]. Weber Industry Research Institute, 2021.
- [9] 中国电力报. 江苏首次以需求侧响应缓解电力供应紧张[R/OL]. (2017-07-14). [http://www.cpnn.com.cn/zdyw/201707/t20170714\\_984306.html](http://www.cpnn.com.cn/zdyw/201707/t20170714_984306.html). China Electric Power News. For the first time, Jiangsu responded to the demand side to ease the shortage of power supply[R/OL]. (2017-07-14). [http://www.cpnn.com.cn/zdyw/201707/t20170714\\_984306.html](http://www.cpnn.com.cn/zdyw/201707/t20170714_984306.html).
- [10] 金国彬, 石超, 陈庆, 等. 考虑变换器功率约束和直流电压约束的交直流混合配电网最优潮流计算[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1487-1496. JIN Guobin, SHI Chao, CHEN Qing, et al. Optimal power flow calculation of AC-DC hybrid distribution network considering converter power constraint and DC voltage constraint[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1487-1496.
- [11] 张达志. 直流远供技术应用简介[J]. 中国管理信息化, 2018, 21(13): 75-76. ZHANG Dazhi. Introduction to the application of DC remote supply technology[J]. China Management Informatization, 2018, 21(13): 75-76.
- [12] 汪致洵, 林湘宁, 丁苏阳, 等. 适应于海岛独立微网的交直流混合风力发电系统及其优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4692-4704. WANG Zhixun, LIN Xiangning, DING Suyang, et al. Hybrid AC/DC wind energy system in an independent island microgrid and its optimal dispatching strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4692-4704.
- [13] 张学, 裴玮, 范士雄, 等. 含多端柔性互联装置的交直流混合配电网协调控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 185-191. ZHANG Xue, PEI Wei, FAN Shixiong, et al. Coordinated control method of AC/DC hybrid distribution network with multi-terminal flexible interconnection device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 185-191.
- [14] 首批“互联网+”智慧能源(能源互联网)示范项目验收总结报告—专题4: 城市能源互联网中的智能配电网[R]. 广东电网有限责任公司, 2021. Summary report on the acceptance of the first batch of “internet +” smart energy (energy internet) demonstration projects—topic 4: smart distribution grids in the urban energy internet[R]. Guangdong Power Grid Co., Ltd., 2021.
- [15] 赵相宾, 年培新. 谈我国变频调速技术的发展及应用[J]. 电气传动, 2000(2): 3-6. ZHAO Xiangbin, NIAN Peixin. About the development and application of variable frequency regulating speed technology in our country[J]. Electric Drive, 2000(2): 3-6.
- [16] 李旷, 刘进军, 魏标, 等. 静止无功发生器补偿电网电压不平衡的控制及其优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 58-63. LI Kuang, LIU Jinjun, WEI Biao, et al. Control and optimization of static var generator for grid voltage unbalance mitigation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 58-63.
- [17] HAN Z, WANG D, JIANG Y Q, et al. The control strategy of three-phase unbalance load in low voltage distribution networks based on SVG[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 510(2): 022032.
- [18] 陈国柱, 吕征宇, 钱照明. 有源电力滤波器的一般原理及应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 17-21. CHEN Guozhu, LÜ Zhengyu, QIAN Zhaoming. The general principle of active filter and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 17-21.
- [19] 杜夏冰, 赵成勇, 吴方劼, 等. LCC-HVDC系统混合型有源滤波器谐振抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 115-122. DU Xiabing, ZHAO Chengyong, WU Fangjie, et al. LCC-HVDC system hybrid active filter resonance suppression strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 115-122.
- [20] BLOEMINK J M, GREEN T C. Benefits of distribution-level power electronics for supporting distributed generation growth[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 911-919.
- [21] 徐全, 袁智勇, 于力, 等. 基于多端SOP的交直流混联配电网多目标运行优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(9): 42-48, 54. XU Quan, YUAN Zhiyong, YU Li, et al. Multi-objective operation optimization method of AC/DC hybrid distribution network based on multi-terminal SOP[J]. Journal of Electric Power System and Automation, 2020, 32(9): 42-48, 54.
- [22] 陶顺, 陈鹏伟, 肖湘宁, 等. 智能配电网不确定性建模与供电特征优化技术综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 77-91. TAO Shun, CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, et al. Review on uncertainty modeling and power supply characteristics optimization technology in smart distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 77-91.
- [23] 尚磊. 用于改善电网频率和电压动态的惯量-刚度补偿器的关键技术与应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017. SHANG Lei. Research on the key technology and application of the inertia-stiffness compensator used to improve the frequency and voltage dynamics of the power grid[D]. Wuhan, China: Huazhong

- University of Science and Technology, 2017.
- [24] 袁铁江, 晁勤, 李义岩, 等. 大规模风电并网电力系统经济调度中风电场出力的短期预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 23-27.  
YUAN Tiejia, CHAO Qin, LI Yiyang, et al. Short-term wind power output forecasting model for economic dispatch of power system incorporating large-scale wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 23-27.
- [25] 梁志峰, 王铮, 冯双磊, 等. 基于波动规律挖掘的风电功率超短期预测方法[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4096-4104.  
LIANG Zhifeng, WANG Zheng, FENG Shuanglei, et al. Ultra-short-term forecasting method of wind power based on fluctuation law mining[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4096-4104.
- [26] 王育飞, 付玉超, 孙路, 等. 基于混沌-RBF神经网络的光伏发电功率超短期预测模型[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1110-1116.  
WANG Yufei, FU Yuchao, SUN Lu, et al. Ultra-short term prediction model of photovoltaic output power based on chaos-RBF neural network[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1110-1116.
- [27] 高阳, 张碧玲, 毛京丽, 等. 基于机器学习的自适应光伏超短期出力预测模型[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 307-311.  
GAO Yang, ZHANG Biling, MAO Jingli, et al. Machine learning-based adaptive very-short-term forecast model for photovoltaic power[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 307-311.
- [28] 雷振. 基于深度学习的微电网水-风-光伏发电功率预测和优化研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.  
LEI Zhen. Research on power prediction and optimization of microgrid water-wind-photovoltaic power generation based on deep learning[D]. Guangzhou, China: Guangdong University of Technology, 2020.
- [29] 潘雪. 基于光伏出力预测的配电网故障恢复策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.  
PAN Xue. Research on distribution network failure recovery strategy based on photovoltaic output prediction[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [30] 陈旭, 张勇军, 黄向敏. 主动配电网背景下无功电压控制方法综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 143-151.  
CHEN Xu, ZHANG Yongjun, HUANG Xiangmin. Review of reactive power and voltage control method in the background of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 143-151.
- [31] 乐健, 周谦, 王曹, 等. 基于分布式协同的配电网电压和功率优化控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1249-1257.  
LE Jian, ZHOU Qian, WANG Cao, et al. Research on voltage and power optimal control strategy of distribution network based on distributed collaborative principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1249-1257.
- [32] 孙玉树, 杨敏, 师长立, 等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高压技术, 2020, 46(1): 80-89.  
SUN Yushu, YANG Min, SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 80-89.
- [33] 王成山, 武震, 李鹏. 分布式电能存储技术的应用前景与挑战[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 1-8, 73.  
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Prospects and challenges of distributed electricity storage technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 1-8, 73.
- [34] 尚磊, 董旭柱, 刘超. 惯量-刚度补偿器增强接入弱电网风电场直流电压时间尺度小干扰稳定的作用机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2321-2330.  
SHANG Lei, DONG Xuzhu, LIU Chao. Mechanism analysis of stability improvement of wind farm connected into weak grid by inertia-stiffness compensator in DC-link voltage time scale[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2321-2330.
- [35] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 89-93.  
DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui. Microgrid inverter power control strategy based on the idea of virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 89-93.
- [36] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 82-89.  
CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89.
- [37] 章伟明, 赵巧娥, 刘毓梅, 等. 孤岛模式自适应转动惯量 VSG 逆变电源控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(2): 95-100.  
ZHANG Weiming, ZHAO Qiao'e, LIU Yumei, et al. Island mode adaptive moment of inertia VSG inverter power control strategy[J]. Journal of Electric Power System and Automation, 2019, 31(2): 95-100.
- [38] MENG X, LIU J J, LIU Z. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.
- [39] LI P, GUAN X H, WU J, et al. An integrated energy exchange scheduling and pricing strategy for multi-microgrid system[C] // Proceedings of 2013 IEEE International Conference of IEEE Region 10. Xi'an, China: IEEE, 2013: 1-5.
- [40] 熊雄. 微电网群混合协调控制及有功功率优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.  
XIONG Xiong. Research on hybrid coordinated control and active power optimization of microgrid group[D]. Beijing, China: China Agricultural University, 2017.
- [41] LOH P C, BLAABJERG F. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC sub-grids[C] // Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications. Birmingham, UK: IEEE, 2011: 1-10.
- [42] 熊雄, 井天军, 孙可, 等. 主动配电网下多微电网间功率协调优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 15-21.  
XIONG Xiong, JING Tianjun, SUN Ke, et al. Power coordinated optimization among multi-microgrid in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 15-21.
- [43] 韩海腾. 考虑源荷互动的电力系统优化调度研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.  
HAN Haiteng. Research on optimal dispatching of power system considering the interaction of source and load[D]. Nanjing, China: Southeast University, 2019.
- [44] KEMPTON W, PIMENTA F M, VERON D E, et al. Electric power from offshore wind via synoptic-scale interconnection[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(16): 7240-7245.
- [45] 范宏, 左路浩, 张节潭, 等. 考虑光伏出力不确定性的输电网络概率潮流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(11): 111-116.  
FAN Hong, ZUO Luhao, ZHANG Jietan, et al. Probabilistic power flow calculation of transmission grid considering the uncertainty of photovoltaic output[J]. Journal of Electric Power System and Automation, 2017, 29(11): 111-116.
- [46] 白洁, 王守相, 赵倩宇, 等. 考虑风电出力不确定性的配电网概

- 率潮流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(1): 78-84.
- BAI Jie, WANG Shouxiang, ZHAO Qianyu, et al. Probabilistic power flow calculation of distribution network considering the uncertainty of wind power output[J]. Journal of Electric Power System and Automation, 2021, 33(1): 78-84.
- [47] 裴爱华, 刘明波, 张弛. 考虑负荷不确定性的区间潮流计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(6): 24-27, 43.
- PEI Aihua, LIU Mingbo, ZHANG Chi. Interval power flow calculation method considering load uncertainty[J]. Journal of Electric Power System and Automation, 2004, 16(6): 24-27, 43.
- [48] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 计及价格型负荷响应不确定性的概率潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 66-71, 97.
- ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Probabilistic power flow calculation taking into account the uncertainty of price-type load response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 66-71, 97.
- [49] 王守相, 陈思佳, 谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 85-91.
- WANG Shouxiang, CHEN Sijia, XIE Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.
- [50] JIANG Q, XU K. A novel iterative contingency filtering approach to corrective security-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1099-1109.
- [51] 刘翠平, 林舜江, 刘明波, 等. 应用近似动态规划算法求解安全约束随机动态经济调度问题[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 34-42.
- LIU Cuiping, LIN Shunjiang, LIU Mingbo, et al. Solution of security-constrained stochastic dynamic economic dispatch problem based on approximate dynamic programming algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 34-42.
- [52] 查浩, 韩学山, 王勇, 等. 电力系统安全经济协调的概率调度理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 16-22.
- ZHA Hao, HAN Xueshan, WANG Yong, et al. Study of power system probabilistic dispatching with security-economy coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 16-22.
- [53] XIAO F, MCCALLEY J D. Risk-based security and economy tradeoff analysis for real-time operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 2287-2288.
- [54] 辛业春, 张一峰, 徐广健. 基于二阶锥优化的交直流系统多目标最优潮流研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-9[2021-08-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200827.1718.036.html>.
- XIN Yechun, ZHANG Yifeng, XU Guangjian. Research on multi-objective optimal power flow of AC/DC system based on second-order cone optimization[J/OL]. Electrical measurement and instrumentation: 1-9[2021-08-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200827.1718.036.html>.
- [55] 李亚辉, 李扬, 李国庆. 基于协同多目标粒子群优化的交直流系统最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 94-100, 138.
- LI Yahui, LI Yang, LI Guoqing. Optimal power flow of AC/DC system based on collaborative multi-objective particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 94-100, 138.
- [56] 张勤, 张健美, 马强, 等. 求解多目标最优潮流的改进粒子群优化算法[J]. 电气技术, 2017(10): 57-60.
- ZHANG Qin, ZHANG Jianjian, MA Qiang, et al. Improved particle swarm optimization algorithm for multi-objective optimal power flow[J]. Electrical Technology, 2017(10): 57-60.
- [57] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.
- WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [58] MURATORI M, RIZZONI G. Residential demand response: dynamic energy management and time-varying electricity pricing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1108-1117.
- [59] YOON J H, BALDICK R, NOVOSELAC A. Dynamic demand response controller based on real-time retail price for residential buildings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 121-129.
- [60] ALTHAHER S, MANCARELLA P, MUTALE J. Automated demand response from home energy management system under dynamic pricing and power and comfort constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1874-1883.
- [61] 宁佳. 基于源网荷态势的电力智能需求侧响应技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- NING Jia. Research of intelligent power demand response based on the source-grid-load situation[D]. Nanjing, China: Southeast University, 2018.
- [62] 安婷, 乐波, 杨鹏, 等. 直流电网直流电压等级确定方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2871-2879.
- AN Ting, YUE Bo, YANG Peng, et al. A determination method of DC voltage levels for DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2871-2879.
- [63] BOROYEVICH D, CVETKOVIĆ I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems a contemplative view[C]// Proceedings of 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. Brasov, Romania: IEEE, 2010: 1369-1380.
- [64] RODRIGUEZ-DIAZ E, CHEN F, VASQUEZ J C, et al. Voltage-level selection of future two-level LVDC distribution grids: a compromise between grid compatibility, safety and efficiency[J]. IEEE Electrification Magazine, 2016, 4(2): 20-28.
- [65] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 柔性直流输电不同电压等级的经济性比较[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 98-102.
- ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Economy comparison of VSC-HVDC with different voltage levels[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 98-102.
- [66] WANG C, JAIN P. A quantitative comparison and evaluation of 48 V DC and 380 V DC distribution systems for datacenters[C] // Proceedings of 2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference. Vancouver, Canada: IEEE, 2014: 1-7.
- [67] IEEE B E. Recommended practice for 1 kV to 35 kV medium-voltage DC power systems on ships: IEEE 1709—2010[S]. IEEE, 2010.
- [68] 刘永生, 陈俊, 李娟, 等. 基于电流暂态量的分布式直流配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 159-167.
- LIU Yongsheng, CHEN Jun, LI Juan, et al. Distributed protection scheme for DC distribution network based on current transients[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 159-167.
- [69] 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 voltage control strategy suitable for flexible DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 335-341.
- [70] 姜淞瀚, 彭克, 徐丙垠, 等. 直流配电网示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 219-231.
- JIANG Songhan, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Current status and prospects of DC power distribution system demonstration projects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 219-231.
- [71] 唐庚, 徐政, 刘昇, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 125-132.

TANG Geng, XU Zheng, LIU Sheng, et al. A new DC voltage control strategy suitable for multi-terminal flexible DC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 125-132.

[72] YEON P, KIM M G, BRAND O, et al. Optimal design of passive resonating wireless sensors for wearable and implantable devices[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(17): 7460-7470.

[73] 赵仕策, 赵洪山, 寿佩瑶. 智能电力设备关键技术及运维探讨[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 1-10.

ZHAO Shice, ZHAO Hongshan, SHOU Peiyao. Discussion on key technologies and operation and maintenance of intelligent power equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 1-10.

[74] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.

[75] 张 涛, 赵东艳, 薛 峰, 等. 电力系统智能终端信息安全防护技术研究框架[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 1-8.

ZHANG Tao, ZHAO Dongyan, XUE Feng, et al. Research framework of information security protection technology for intelligent terminal of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 1-8.

[76] 王红霞, 王 波, 陈红坤, 等. 电力数据融合: 基本概念、抽象化结构、关键技术和应用场景[J]. 供用电, 2020, 37(4): 24-32.

WANG Hongxia, WANG Bo, CHEN Hongkun, et al. Power data fusion: basic concepts, abstract structures, key technologies and application scenarios[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(4): 24-32.

[77] 曹 袖, 黄 瀚, 王雪平, 等. 软件定义电网: 概念、结构与示例[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 1-9.

CAO Xiu, HUANG Han, WANG Xueping, et al. Software defined grid: concept, architecture and samples[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 1-9.



DONG Xuzhu  
Ph.D., Professor

董旭柱

1970—, 男, 博士, 教授  
研究方向为智能配电网等



HUA Zhuhu  
Ph.D. candidate

华祝虎

1997—, 男, 博士生  
研究方向为直流配电网、微电网等



SHANG Lei  
Post-doctorate  
Corresponding author

尚 磊(通信作者)

1986—, 男, 博士(后), 讲师  
研究方向为电力电子化电力系统频率/电压分析与优化控制技术、能源互联网技术等  
E-mail: shanglei@whu.edu.cn

收稿日期 2021-07-05 修回日期 2021-08-30 编辑 程子丰