

新型电力系统下5G+云边端协同的 源网荷储架构及关键技术初探

许鹏¹, 何霖²

(1. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司信息通信公司, 四川 成都 610041)

摘要: 低碳高效的新型电力系统建设给源网荷储各环节带来了全新的挑战。面向新形势下的电力系统运行需求, 提出一种5G+云边端协同的源网荷储协同运行架构并阐述了其关键技术。首先, 通过对新型电力系统中源、网、荷、储各环节技术特征进行分析, 明确其关键变革及特性; 进而, 提出了5G+云边端协同的技术概念, 将原有的信息化技术有机结合, 探索构建纵向贯通、横向互联的技术支撑平台, 并将其应用于新型电力系统的源网荷储协同运行过程中, 将源网荷之间以电网为枢纽横向串联的链式关系扩展为横向交叉连接、纵向各领域云-管-边-端拓展的多维网状关系, 克服传统源网荷技术局限性; 最后, 对所述架构下的关键技术进行分析, 明确新型电力系统下5G+云边端协同的源网荷储技术发展需求, 为后续的技术推进提供可借鉴方向。

关键词: 新型电力系统; 云边端协同; 源网荷储协同; 关键技术

中图分类号: TM 73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)06-67-07

DOI: 12.16527/j.issn.1003-6954.20210614

Preliminary Discussion on Source-grid-load-storage Architecture and Key Technology Based on 5G + Cloud-edge-terminal Cooperation in New Power System

Xu Peng¹, He Lin²

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Information and Communication Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The construction of new power system with low carbon and high efficiency has brought new challenges to all links of source-grid-load-storage (SGLS). Facing the operation requirements of power system under the new situation, a SGLS architecture based on 5G + cloud-edge-terminal cooperation and its key technologies are proposed. Firstly, by analyzing the technical characteristics of source, grid, load and storage in new power system, its main changes and characteristics are clarified. Furthermore, the technical concept of 5G + cloud-edge-terminal cooperation is proposed, which organically combines with the original information technologies, and a technical support platform with vertical connection and horizontal interconnection is constructed. Through its application to SGLS collaborative operation of new power system, the connected chain relationship of power grid between source, grid and load is expanded into a multi-dimensional network relationship with horizontally connection and vertically cloud-pipe-edge-terminal extension in various fields, which overcomes the limitations of traditional source-grid-load technology. Finally, the key technologies under the proposed architecture are analyzed to clarify the development requirements of SGLS technology of 5G + cloud-edge-terminal cooperation in new power system, so as to provide a reference for subsequent technology promotion.

Key words: new power system; cloud-edge-terminal cooperation; source-grid-load-storage; key technology

0 引言

在“双碳”战略目标的引领下,构建以新能源为主体的新型电力系统^[1]已成为必然。新型电力系统形态中新能源比例的大幅提升将给电力系统带来全新的挑战,已有众多学者针对高比例可再生能源接入的电力系统开展相关研究,从系统运行^[1-2]、市场机制^[3-4]、电网规划^[5]、配电网管理^[6]、需求响应^[7-8]、储能建设^[9-10]等方面深入研究支撑可再生能源高占比的电力系统支撑技术。文献[11]相对系统地分析了高比例可再生能源电力系统在不同渗透率水平下的特性以及在保护、运行、规划等方面面临的挑战,提出了一系列相应解决方案并剖析了关键技术。

近年来高峰电力供应紧张,传统意义上的电源侧的灵活性调整能力提升和电网侧的运行特性优化已经难以满足电力系统日益提升的安全、稳定、可靠、高效、经济运行需求。源-网-荷-储各环节协调优化的综合能源系统已成为能源电力发展的迫切需求。国家发改委、能源局在《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》中明确提出了源网荷储一体化和多能互补发展的重要意义以及发展实施路径。文献[12]综合性地提出源网荷储协调优化的系统架构,从基础条件分析、系统规划、系统运行、全过程综合评价4个层次构建了能源互联网源网荷储技术框架。文献[13-14]面向园区微网运行环境下的源网荷储协同优化技术展开研究,分别就运营模式和模型求解算法优化方面提供了技术解决方案。文献[15]则从电网规划层面引入了源网荷储协调优化概念,提出了电网发展新环境下的网架规划技术方案。

随着边缘计算、5G通信、云边协同等信息通信技术的高速发展,源网荷储协同优化激活了新的发展动力。文献[16-17]充分论证了5G技术在源网荷储协同优化的电力系统当中应用的可行性和必要性。文献[18]基于云边协调的技术概念,提出了云-群-端协同的虚拟电厂调度优化技术,实现了虚拟电厂这一新型主体的优化控制。文献[19]则基于云边协同技术架构构建了集中-分散联合控制的

信息物理模型,实现了对传统电网数学模型的优化提升。文献[20]对云边协同、边边协同、边缘智能等技术概念进行了剖析,将其应用于电力系统运行当中,对源网荷各环节的应用前景进行了探讨,促进云边智能在电力系统中的应用发展。但总体而言,对于5G+云边端协同综合作用于电力系统下的系统技术构架和协同机制还尚未形成明确的方案,尤其对于新型电力系统发展背景下,源-网-荷-储与云-边-端之间的协作关系还需进一步厘清。

鉴于此,面向新能源比例提升的新型电力系统源网荷储协调运行需求,尝试基于5G通信与云-边-端协同技术建立源网荷储友好互动的信息物理支撑体系,探索基于5G+云边端协同的源网荷储技术架构及关键技术,助力新型电力系统建设。

1 新型电力系统技术特征

1.1 电源侧的波动性与灵活性

新能源为主体是新型电力系统的重要特征,电源侧新能源比例提升带来的波动性和所配套的电源调峰调频能力灵活性构成了电源侧的鲜明特征。

灵活性调节资源的能力主要受到两个方面的约束:1)与电源侧新能源比例、新能源出力波动性呈现正相关关系。通常情况下,新能源出力的波动性体现为不可控的自然系数,故新能源比例的提升,即直接要求灵活性电源可调峰能力相应增大。当火电机组作为主要调峰调频灵活性电源,其最大调峰能力存在约束限制,虽然灵活性改造可一定程度缓解此约束,但本质上并未实质性突破约束。2)为保障投运机组的利用效率,装机量与用电负荷需求的比例存在一定意义上的上限约束关系,即在同等用电水平下,可接受装机量不能无限扩张,存在经济性边界,则新能源装机容量与灵活性电源装机容量将呈现一定的反相关约束。这两个约束,后者与前者构成了矛盾关系,因而如何实现高效经济的灵活性调节成为新型电力系统需突破的关键技术。若要在不改变当前模式的情况下突破此约束,则需在高峰时段弃风弃光,即在波动性区间基本确定的情况下,风光利用率、装机投资经济性和新能源比例之间需要取舍。

从技术升级角度而言,实现电源侧综合效能提

升的关键在于突破电源灵活性瓶颈,火电的灵活性改造可以很大程度缓解,但电源侧本质上的格局改变需要其他的灵活性手段提升,如天然气、调节性水电、抽水蓄能等灵活性更高的机组建设以及高效储能的配套建设应用等。

1.2 电网侧的连通性与风险性

电源侧与负荷侧的资源分布逆向性以及电源侧强波动性环境下,跨省跨区的大电网范围资源优化配置需求愈加显著。充分利用不同地区的资源禀赋和负荷特性互补性是新型电力系统的必然需求,电网的强连通性是其物理基础。但连通性增强的同时也意味着电网结构更加复杂,电力电子设备应用更加广泛,电力系统运行稳定性要求更加严格,局部风险对电网运行全局的影响更加扩大,电网运行将面临更加显著的风险性。

新型电力系统中电网运行风险有效控制的技术突破,有赖于电力系统运行及调度控制过程的智能化、数字化转型。从配电网到地方电网到跨省区互联电网,各个层级和环节需要有机结合、有序运行,就更加需要数字化及智能化的手段来切实提升系统及设备事件的预测、预警、分析、推演、隔离、处置等全流程的执行效率和效果,保障电力系统可靠运行。

1.3 负荷侧的多样性与聚合性

负荷侧的多样性体现在两个方面:1)分布式电源的广泛接入。新型电力系统的建设进程中,要实现新能源为主的电源结构,采用集中式电站的形式对输电网络的坚强性带来挑战,亦不利于能源利用的经济性。分布式光伏及微网综合能源系统的发展也将成为新型电力系统的重要组成部分。2)用户侧负荷设备的多元化发展。随着经济生活水平的提升和电能替代工作的深入、电气化产品的研发完善,电能在终端能源消费中的地位更加显著,用户侧负荷设备的类型也更加多元,以温控负荷、电动汽车为代表的灵活性接入负荷成为电网运行的重要可调节资源^[21]。

但由于负荷侧资源广泛分散、单体能力有限的特点^[22],其灵活性体现不仅是对于新型负荷本身可调节能力的挖潜,更重要的是对于广泛用户终端负荷差异的聚合优化。充分利用用户用电行为以及分布式能源在时间-空间上的差异性,通过智能的优

化方法将差异性资源聚合成为符合电网运行需求的虚拟主体,为电网运行提供宝贵的调峰调频能力。

1.4 储能的功能性与经济性

在源、荷双侧均具有高波动性、高灵活性的电力系统中,储能具有至关重要的作用。根据配置部署的差异性,目前的主流储能主要包括以下形式:源端的风光储配套、荷端的分布式储能、第三方独立运营的储能电站。各类储能方式的功能性略有差异,但对于电力系统发展而言,最终,均可归结为对系统运行稳定性的贡献。而对于储能运营主体而言,储能的经济性则是决定其可持续发展的根基。随着电力现货市场、调峰调频辅助服务市场、峰谷/尖峰电价机制、需求响应激励机制等市场机制的逐步推进,储能的运营空间逐渐明朗,但目前的市场环境还处于建立和探索的阶段,需要更加成熟的市场环境吸引社会资源投入,建立更加完善的运营机制,实现功能性与经济性的统筹兼顾。

1.5 源网荷储系统的实时性与广泛性

新型电力系统环境下,源网荷储各环节之间的相互依存度、联系性和影响性更加突出,各方面信息流的实时交互是实现电网运行优化的基础,尤其是电源侧、负荷侧的波动性需在运行过程中及时传递到电力系统各个单元,实现实时动态优化。

同时,系统的广泛性会大大增强。目前的电力系统运行过程中,多环节之间呈现为链式的互动关系,且主要是源、网之间的双向互动,以及对负荷的单向配合。新型电力系统的运行架构下,主体连接性更强,负荷侧可通过需求响应等形式与电网构建双向互动关系;而市场环境下,源、荷双侧强波动性促使二者建立直接互动关系,储能则更加灵活,其在整个系统中接入点的不同和运营方式使得其与各个主体均可能存在显著互动关系。

2 5G+云边端协同

5G技术、云计算、边缘计算、智能终端互联等信息通信技术已在各个领域得到成功应用。5G+云边端协同的概念体现为众多信息通信技术的有机整合和系统性应用。直观来说,就是充分利用5G低时延、强接入的技术特征,实现源网荷储各环节中智

能设备与各级系统平台的广泛互联互通,从而建立终端感知处理、边缘节点本地化分析优化、云端平台统筹海量信息深度学习、综合智能决策的有机整体,其核心不在于个体技术的堆叠应用,而在于面向多层次分析决策场景需求的协同运作体系。

从技术层次来说,5G + 云边端协同的层次结构与态势感知、智能互联等技术结构具有共通之处^[23],从逻辑上可划分为感知层、传输层、计算层、决策层。感知层主要实现终端、设备环境、区域特征及系统全景等各层次的信息感知和采集;传输层主要是通过终端的5G延伸和主网的光纤支撑实现广泛接入、高速交互的通信环境,支撑云边端多级实时调控和广域信息互通;计算层主要根据分析需求,利用用户智能终端、边缘计算节点、云端平台的计算分析能力,实现多层次的数据挖掘和特征提取,构建基于用户设备个体特征、区域特性及海量数据分析结果的多维特征集;决策层则是云边端协同的最终体现,在高效的信息交互和多层次特征集基础上,根据不同的调控需求,可在设备自动控制、区域优化和全局决策中组合协同,实现局部优化与全局最优的统筹。

如引言中所述,传统的云边协同模式主要是将云端作为大数据分析平台,将边端作为数据汇集和预处理的前端环节,且各环节的功能性划分较为明确。因而云边信息流交互主要呈现为垂直的线性关系,且受制于接入容量和通信性能,边缘节点仅能设置在已有较好通信条件的接入点,如变电站等,难以支撑对于广泛终端设备的延伸接入。相较而言,所述5G + 云边协同的主要架构特征在于其物理上的“云-管-边-端”层次与逻辑上的“感知-传输-计算-决策”层次不再是一维线性对应的线性关系,而是纵横交错的二维交叉协同关系。典型如大多数的技术架构中将终端更多地定义为一个感知的单元,用于数据的采集、解析、传输,计算功能则通常从边缘节点甚至云端平台的层次开始。在5G + 云边端协同架构下,终端是具备基本决策和处理能力的独立单元,一定程度上代理了用户的行为,而非单纯的用户行为信息采集。边缘节点(端)、云平台的概念亦然,各环节存在自身的垂直运行体系和横向的协同关系,详见图1。



图1 5G + 云边端协同技术层次

3 基于5G + 云边端协同的源网荷储技术架构

3.1 传统源网荷储技术推广局限性

源网荷储技术概念提出后,长期未能实现大范围推广应用的主要瓶颈除外在环境因素外,更多在于传统模式存在的部分技术局限性。

1)网荷交互时延与电网运行需求时效的不匹配:以往的需求侧响应尝试中,大多数的实现方式采用提前约定响应时段及响应量并以短信提前告知的方式。用户的真实响应量、响应时效往往需要事后核验,而电网的运行需求往往是即时性甚至突发性的,两者之间存在需求和特性不匹配的直接问题。

2)终端接入成本高:源、网之间基于自动发电控制(automatic generation control, AGC)的互动方式目前在电力系统中广泛应用,其基础在于电源侧通过专用光纤接入了电力通信网,但接入成本高昂。源网荷储方面,江苏等地也做出了很多有益的尝试^[24],通过专用光纤、4G专网等方式,实现了毫秒级的负荷控制,但此类方式同样对于用户侧终端及接入条件要求很高,建设成本较大,仅适用于部分大工业用户改造,对普遍性的用户投资存在局限性。

3)控制精度不足:传统源网荷储控制系统主要是通过用户侧不同性质用电设备的物理接线改造来实现集中式控制,改造成本高,灵活性不足;控制过程

主要体现为开关式控制,对用户侧的用电体验影响显著,一定程度影响参与意愿。

4)决策难度大:由于源网荷储协同的电力系统中各环节、各设备广泛的互联互通,也导致了在处理同等问题的过程中需要考虑的约束和影响线性增加,其决策难度和复杂性呈指数性上升。因此已有系统中通常采用较为简单的判定逻辑和动作关系进行决策,对于策略的综合优化和多样性发展还有所欠缺。

3.2 基于 5G + 云边端协同的源网荷储

5G + 云边端协同技术架构的灵活接入、高效交互及多层次协同分析决策等优势,对于弥补当前源网荷储技术局限性具有可借鉴意义,为新型电力系统源网荷储提供了新的可能。基于 5G + 云边端协同的源网荷储技术架构,受益于 5G 技术大容量的接入特性及低时延的传输特性,可在大幅降低用户接入成本的同时,保障通信过程的实时性需求,真正实现源网荷储实时交互。同时,借助网络 5G 切片技术^[25],可采用电力专用切片保障通信过程的安全性,而无需构建专网。

智能终端、边缘节点和云端平台为互动过程的决策和计算提供了物理基础。智能终端市场的逐步完善使得用户侧负荷设备接入后,互动控制更加智能和精细,不再局限于开关式控制,而可以按需采用更加人性化的温度控制、功率控制等灵活调控模式,为精细化组合调控策略的实现提供技术基础。云、边、端的三级计算体系可以根据不同层级业务的计算需求提供相应的环境,实现对业务处理过程时效性、精确性、全面性等多方面的综合统筹均衡。

从具体技术架构而言,5G + 云边端协同技术的介入使得原先源网荷之间以电网为枢纽横向串联的链式关系扩展为横向交叉连接、纵向各领域“云-管-边-端”拓展的多维网状关系。储能灵活配置在电源侧或用户侧(独立储能单元接入电网的也可视为用户侧灵活性单元),源、网、荷、储通过更加多样化的电力流和信息流,以及更加丰富的终端设备类型,构成连接关系更加密切、信息流汇聚和交互更加灵活的技术架构,如图 2 所示。

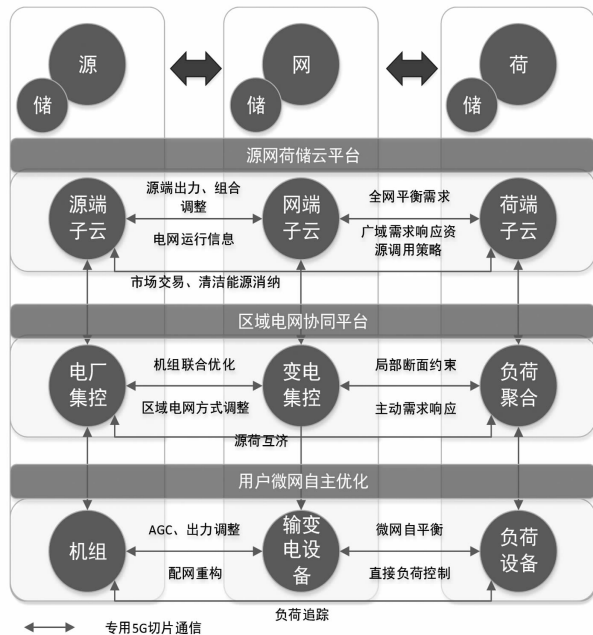


图 2 基于 5G + 云边端协同的源网荷储技术架构

4 关键技术

4.1 源-网-荷-储多级协调的辅助服务执行机制

5G + 云边端协同支撑下的源网荷储体系中,能够为系统提供辅助服务的手段和方式更加多样,各个层级、各类方式之间的协同配合和时序衔接成为实际电力系统运行中的关键。从时序而言,可以根据电网辅助服务的控制时效需求,匹配不同闭环控制动作完成所需的时间周期,实现初步的协同,如调频需求优先调用 AGC 秒级应用、日前调峰考虑开停机和日前需求响应等。进一步地,对于满足相同时序需求的多个控制方式,需建立充分考虑多因素综合决策的协作机制,如局部故障产生日内小时级调控需求时,电源增发、电网运行调整、需求响应、虚拟电厂、储能调用等方式均为可选方式^[8,12,17,21]。但实际执行中如何根据电力电量平衡、电网运行约束、经济性、环保性等多方面因素综合决策,实现多方式组合最优化调度,是新型电力系统中需要深入研究的关键技术。

4.2 精准需求响应及其运行策略

相比于源、网的调度控制而言,荷端的可调用性仍在起步阶段。广义的需求响应涵盖了价格引导、直接负荷控制、可中断负荷、紧急需求响应、辅助服务、市场竞标等具体形式^[26]。不同方式的影响程

度、实现难度、动作模式、参与主体、执行逻辑等方面均存在显著差异,典型体现如图 3 所示。新型电力系统源荷双侧波动性和电网的复杂性对需求响应的时效、规模、执行效果等均提出了更高的精准要求,如何充分利用 5G + 云边端协同的技术优势,兼顾用户、电网、运营主体等多方面需求,实现需求侧多种响应手段时序综合最优决策是源网荷储协同的重要基础。同时,需通过深入研究用户行为学习、多主体博弈、多目标优化等技术,构建精准、精确的需求响应交互及执行机制,以保障决策结果与执行效果的匹配度,提升源网荷储协同的有效性。



图 3 广义需求响应典型模式及特点

4.3 面向全系统周期的泛化数据驱动模式

新型电力系统下各环节复杂性和联动性大幅提升,对于全系统周期运行的技术支撑手段提出了更高的要求。尤其在 5G + 云边端协同体系下,各环节的数据采集和接入能力显著提升,感知数据的维度也将向末端设备尤其用户侧负荷设备泛化。面向海量、泛化、异构的源-网-荷-储各端数据,目前的数据挖掘和分析手段还具有局限性^[27],且尚未形成各环节感知、分析、决策、执行有效协同的数据驱动运行模式,需充分结合运用计算机科学领域的智能化、数字化研究成果,深入研究探索,实现面向新型电力系统全系统周期的数据驱动运行模式,提升系统整体运行效率和智能化水平。

5 结论

上面提出了一种面向新型电力系统的 5G + 云边端协同的源网荷储技术架构,通过对新型电力系统源、网、荷、储各端特性的分析,基于 5G + 云边端协同技术实现对于源网荷储协同的时效性、灵活性、

精确性和合理性提升,构建了横向源网荷储交叉连接、纵向各领域云-管-边-端拓展的技术架构,并阐明该架构下的关键技术研究方向,更加适应新型电力系统灵活多变、广泛多样的系统运行需求,为相关领域的研究实践提供可借鉴方案。

从应用前景而言,在高波动性、灵活性、复杂性新型电力系统中,所述的技术体系为电力供需平衡的调峰应用、设备故障或新能源出力剧烈波动导致的紧急调频应用、广泛分布式电源及柔性负荷设备接入的电网鲁棒性提升应用等场景,提供了具备探索意义的技术架构。可以预见,其运行灵活性、手段多样性和综合优化性提升的优势将为促进源网荷储的技术发展提供新的环境和可能,但其具体实施效果可能受到关键技术瓶颈、应用环境、特性差异等诸多约束,这也是后续相关的研究和实践工作中需继续深化的关键所在。

参考文献

- [1] 张子扬,张宁,杜尔顺,等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J/OL]. 中国电机工程学报:1-23[2021-09-06]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211425>.
- [2] Zhang Weiqi, Zhang Xinyan, Huan Shaowei g, et al. Evolution of a transmission network with high proportion of renewable energy in the future[J]. Renewable Energy, 2017,102:372-379.
- [3] 陈亦平,卓映君,刘映尚,等. 高比例可再生能源电力系统的快速频率响应市场发展与建议[J]. 电力系统自动化,2021,45(10):174-183.
- [4] 樊宇琦,丁涛,汤洪海,等. 考虑路径折算的跨省跨区可再生能源增量现货交易模型[J]. 电力系统自动化,2021,45(18):103-112.
- [5] 柳璐,程浩忠,吴耀武,等. 面向高比例可再生能源的输电网规划方法研究进展与展望[J]. 电力系统自动化,2021,45(13):176-183.
- [6] 孙伟卿,刘唯,张婕. 高比例可再生能源下配电网动态重构与移动储能协同优化[J]. 电力系统自动化,2021,45(19):80-90.
- [7] Muhammad Faizan Tahir. 考虑储能和需求响应的高比例可再生能源综合能源系统建模[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [8] 杨洪朝,杨迪,孟科. 高比例可再生能源渗透下多虚拟电厂多时间尺度协调优化调度[J]. 智慧电力,2021,49(2):60-68.
- [9] 姜海洋,杜尔顺,金晨,等. 高比例清洁能源并网的跨国互联电力系统多时间尺度储能容量优化规划[J].

中国电机工程学报,2021,41(6):2101-2115.

- [10] 潘光胜,顾伟,张会岩,等.面向高比例可再生能源消纳的电氢能源系统[J].电力系统自动化,2020,44(23):1-10.
- [11] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
- [12] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等.能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J].电网技术,2016,40(1):114-124.
- [13] 刘敦楠,徐尔丰,许小峰.面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式[J].电网技术,2018,42(3):681-689.
- [14] 朱涛,陈嘉俊,段秦刚,等.基于近似动态规划的工业园区源-网-荷-储联合运行在线优化算法[J].电网技术,2020,44(10):3744-3752.
- [15] 曾顺奇,汤森垚,程浩忠,等.考虑源网荷储协调优化的主动配电网网架规划[J].南方电网技术,2018,12(3):35-43.
- [16] 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):4015-4025.
- [17] 任浩,孟仁杰,窦仁晖,等.基于5G网络的“源-网-荷-储”优化调控系统设计[J].电力信息与通信技术,2020,18(12):23-28.
- [18] 赵昊天,王彬,潘昭光,等.支撑云-群-端协同调度的多能园区虚拟电厂:研发与应用[J].电力系统自动化,2021,45(5):111-121.
- [19] 司羽飞,谭阳红,汪泓,等.面向电力物联网的云边协同结构模型[J].中国电机工程学报,2020,40(24):

7973-7979.

- [20] 白昱阳,黄彦浩,陈思远,等.云边智能:电力系统运行控制的边缘计算方法及其应用现状与展望[J].自动化学报,2020,46(3):397-410.
- [21] 孙毅,李泽坤,许鹏,等.异构柔性负荷建模调控关键技术及发展方向研究[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7146-7158.
- [22] 孙毅,许鹏,单葆国,等.售电侧改革背景下“互联网+”电能替代发展路线[J].电网技术,2016,40(12):3648-3654.
- [23] 许鹏,孙毅,石墨,等.负荷态势感知:概念、架构及关键技术[J].中国电机工程学报,2018,38(10):2918-2926.
- [24] 陈庆,闪鑫,罗建裕,等.特高压直流故障下源网荷协调控制策略及应用[J].电力系统自动化,2017,41(5):147-152.
- [25] 高维良,高厚磊,徐彬,等.5G用作配电网差动保护通道的可行性分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(8):1-7.
- [26] 曾璐琨.需求侧聚合负荷协同控制策略研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [27] 曹雨洁,丁肇豪,王鹏,等.能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(二):机遇与挑战[J/OL].中国电机工程学报:1-16[2021-10-08].<http://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210814>.

作者简介:

许鹏(1990),男,博士,工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

何霖(1990),女,硕士,工程师,研究方向为电力系统通信。

(收稿日期:2021-09-06)

(上接第62页)

参考文献

- [1] 李振玲.230 MHz 电力无线专网演进及业务测试研究[D].北京:华北电力大学,2020.
- [2] Lovepreet Kaur. Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey [J]. International Journal of Computer Applications,2014:25-29.
- [3] 单泽,范菁,曲金帅,等.智能电网CPS关键技术综述[J].云南民族大学学报(自然科学版),2019,28(5):517-522.
- [4] 余贻鑫,刘艳丽.智能电网的挑战性问题[J].电力系统自动化,2015,39(2):1-5.
- [5] 马文静,孙凤杰,高波,等.融合工频通信的电力线载波路径搜索算法[J].电力系统自动化,2017,41(3):141-146.
- [6] 颜军.电力无线专网230 MHz和1800 MHz关键技术

对比分析[J].移动通信,2020,44(2):58-63.

- [7] 赵训威,白杰,丁高泉,等.230 MHz 电力无线通信技术的优化[J].电信科学,2019,35(9):158-164.
- [8] 马钊,周孝信,尚宇炜,等.未来配电系统形态及发展趋势[J].中国电机工程学报,2015,35(6):1289-1298.
- [9] 徐长福,王小波,周超,等.面向应急通信的LTE电力无线专网应用研究[J].电力信息与通信技术,2015,13(1):27-31.
- [10] 孔令华.窄带物联网NB-IoT关键技术应用分析[J].电子技术与软件工程,2020(12):15-16.

作者简介:

赵晓坤(1983),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统通信;

高洁(1981),女,硕士,工程师,研究方向为电力通信;

郭冰洁(1987),女,工程师,从事电力信息通信工作;

曾建(1971),男,硕士,高级工程师,从事电力信息通信工作。

(收稿日期:2021-07-26)