



研究与开发

面向全球能源互联网的天地协同卫星通信网络架构

李永亮¹, 李许安², 仝杰², 雷煜卿², 丁慧霞², 蓝俊锋³

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750001;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;

3. 广东省电信规划设计院有限公司, 广东 广州 510630)

摘要: 全球能源互联网的监测、调度、授时、同步及定位等业务均需要能提供广域覆盖、泛在灵活接入服务的可靠通信网络。针对该需求, 首先分析阐述全球能源互联背景下各种新型业务需求及其特点, 并总结各种业务的共性数据特征; 然后论述卫星通信技术的特点以及全球能源互联网业务特点与数据传输需求的高度契合性, 最终提出融合卫星通信网络的全球能源互联网天地协同网络体系架构。其以 IP 技术为基础, 各层网络通过星间、星地、星空、空空、空地以及地面有线、无线链路连接起来, 构建全球覆盖的一体化网络体系。

关键词: 全球能源互联网; 卫星通信; 天地协同网络; 北斗卫星导航系统; 新能源

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018294

Space-ground integrated satellite communication network architecture for global energy internet

LI Yongliang¹, LI Xu'an², TONG Jie², LEI Yuqing², DING Huixia², LAN Junfeng³

1. Electric Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China

3. Guangdong Planning and Designing Institute of Telecommunications Co., Ltd., Guangzhou 510630, China

Abstract: The system monitoring and scheduling, time service and synchronization, object location and other businesses of global energy internet all need reliable communication networks, which are able to provide wide area coverage and ubiquitous flexible access services. According to the requirement, various new businesses and their data features with the background of the global energy interconnection were firstly analyzed, and then the unique characteristics of satellite communication technology and how it highly accords with the demands of the global energy internet were discussed. Then a space-ground integrated network architecture by the integration of satellite communication networks was presented. Based on IP technology, each network layer interconnects through various communication links, including satellite to satellite, space to ground, ground cable, wireless link, etc., and then constitute an integrated network system with excellent global coverage performance.

Key words: global energy internet, satellite communication, space-ground integrated network, Beidou navigation satellite system, new energy

收稿日期: 2018-08-10; 修回日期: 2018-12-10

基金项目: 国家发展改革委物联网技术研发及产业化专项 (No.NDRC2012-2766)

Foundation Item: National Development and Reform Commission's Internet of Things Technology Research and Industrialization Special Project (No.NDRC2012-2766)



1 引言

全球水能、风能、太阳能以及海洋能等清洁能源资源非常丰富且开发效率不断提高,以清洁能源替代化石能源,走低碳绿色发展道路已成全球发展共识。全球能源互联网^[1]是以特高压电网为骨干网架(通道),以输送清洁能源为主导,全球互联泛在的坚强智能电网。通过构建跨国跨洲骨干网架和涵盖各国各电压等级电网(输电网、配电网)的国家泛在智能电网,连接“一极一道”和各洲大型能源基地,适应各种分布式电源接入需要,能够将可再生能源输送到各类用户,建立服务范围广、配置能力强、安全可靠、绿色低碳的全球能源配置平台。随着新能源技术和信息技术的快速发展与深度融合,推动全球能源互联网的发展与建设,将给人类社会的经济发展模式与生活方式带来深远影响。

当前,全球主要国家都将信息技术与能源的深度融合作为重要发展战略,如德国 E-Energy 计划^[2]、美国能源互联网计划^[3],均旨在把信息通信技术和能源这两个领域融合起来,以吸纳大量分布式可再生能源,建立具有智慧功能的革命性电网构架。全球能源互联网构想者刘振亚认为信息通信技术将为全球能源互联网的建设和运行提供更安全、更可靠、更智能的技术保障^[1]。网络通信技术是实现全球能源互联网智能化、广域互联互通和电网运行控制的重要基础。作为构建实现能源互联的重要基础设施,如何构建全球能源互联网通信网络受到产业界与学术界研究人员的广泛关注。

全球能源互联网涉及跨国跨洲的大尺度、大范围分布式能源及电力设施的广域互联,其监测、调度、授时、同步、定位等业务均需要能提供广域覆盖、泛在接入网络服务并且部署灵活的可靠通信网络。同时,由于很大部分的电力设施处于高山、荒漠、海洋等复杂地理环境与气候恶劣的区域,光纤、移动通信等基础网络设施建设难度

极大,迫切需要新型的通信技术手段。卫星通信具有覆盖范围广、传输带宽灵活可调、支持泛在接入、可靠安全等优点,非常适合偏远、缺乏通信基础设施地区的分布式能源广域泛在接入。为支撑全球能源互联网的业务需求,在现有网络通信技术的基础上,亟需集成融合卫星通信技术,从而构建空地协同的异构融合一体化通信网络,为分布式能源广域泛在网络接入与数据传输、动态互联与互动、超远距离监测与管控调度等提供实时可靠的网络通信服务。

针对构建全球能源互联网通信网络的需求,国网北京经济技术研究院苏澜初步设计融合卫星通信的天地协同通信技术体系架构方案,但业务应用模式缺乏详细研究阐述^[4]。全球能源互联网研究院曾鹏飞对面向全球能源互联网的信息通信技术及其标准体系展开分析研究,对标准体系的国际化突破方案提出一种思路^[5]。此外,空间信息网络的研究与建设近年来受到重点关注^[6-8],试图构建天空地一体化网络^[9-10],从而实时获取、传输和处理由部署在不同空间位置、执行不同任务的空间平台(如各类卫星、临近空间飞行器、航空器等)及相应的地面设施所产生的海量信息,能够有效实现陆海空天地多维信息系统地连接。这些研究可为能源互联网通信网络构建提供技术借鉴。总体来看,现阶段针对能源互联网网络通信体系研究正处于发展阶段,亟待开展深入研究。本文从全球能源互联网新型业务与数据特征分析出发,结合卫星通信技术演变趋势与特点分析,论述卫星通信技术在全球能源互联网网络体系中的地位与作用,设计融合卫星通信网络的全球能源互联网网络体系架构并分析其关键技术,并展开阐述基于卫星通信的新型业务应用模式。

2 全球能源互联网新型业务与数据特征

2.1 全球能源互联网新型业务特征与技术瓶颈

与传统区域范围的电力系统相比,全球能源

互联网电力设施与用户分布在全球范围,在电力系统发、输、变、配、用各环节呈现出新的业务需求,要求其服务范围更广泛、网络覆盖能力更强、监控调度与配置能力更加精准、运行过程更加坚强可靠。其呈现的代表性新业务需求阐述如下。

在发电环节,除现有化石能源、水力等发电外,大规模风能、太阳能、海洋能等可再生清洁能源接入带来新的业务需求,如能源天气预报与功率预测。与传统利用化石能源发电不同,这些新能源供给能力与天气环境关系密切、波动较为频繁,为实现更加精准的能源调度与配置,需要对所在区域气候环境进行监测、预报并以此对其能源供给功率进行预测。此外,新能源电力设施多处于较极端的自然环境,实时监测设施运行状态并进行科学精准的健康管理,有利于提高新能源供给的稳定性。

在输电、变电、配电环节,全球能源互联网电力设施大规模广域分布,呈现出更多新型业务需求。

(1) 广域授时/同步/定位

全球范围广域分布的电力设施需要基于统一的时间基准以及空间物理坐标运行,需要通过全球范围精准授时、同步以及空间定位,以满足事件顺序记录、故障录波、实时数据采集等时间、空间一致性要求。

(2) 广域范围输电线路异常监测

跨国域、洲域的输电线路部分架设在高山、荒漠等人烟稀少区域,难以依靠人力进行输电线路巡检,实现广域范围尤其是人烟稀少区域无人远程的输电杆塔倾斜、输电线路灾害监测等是保障能源互联网稳定、坚强运行的重要前提。

(3) 广域系统保护

全球各大区域电网互联、电网规模庞大,因此,影响电网稳定运行的因素种类繁多,如暂态功角不稳、小信号功角不稳、频率不稳、电压不稳定、连锁故障等,均给电力系统广域保护带来

了更大挑战,需要采取有效手段全覆盖采集全球范围电网各个环节、各个重要节点的数据,如广域PMU(同步相量测量)数据等,经智能分析计算与科学决策,精准控制保护及安全自动装置,保障电网安全稳定运行。

(4) 大范围调度自动化

全球能源互联网囊括了大规模范围分布的新能源、输变电设备、各类用电用户以及调度自动化主站、分站,存在新能源电能输出不稳定、输变电设施运行状态波动、用户用电负荷及其分布动态变化等问题,如何实现全球范围全网运行状态实时监测以及调度自动化主站、分站无缝网络覆盖与实时通信,是实现全球能源互联大范围调度自动化面临的新挑战。

在用电环节,全球能源互联网平台上有数十亿用户在线,其地域分布广泛,但广域范围尤其是缺乏通信基础设施区域用电信息采集困难。全覆盖采集用户用电信息,了解用户用电习惯与行为特征,实现需求侧响应等互动功能,将提升全球能源互联网服务质量。综上所述,全球能源互联网新型业务特点对比分析见表1。

2.2 全球能源互联网数据特征

数据信息在各种设备之间有效的双向传递是实现全球互联网新型业务协调运行的基础。如何快速、灵活、廉价地有效连接并获取广域分布的能源电力系统中的“数据”,是这些新型业务应用发展迫切需要解决的共性问题。除呈现海量、大规模、类型杂等基本特性外,全球能源互联网中的“数据”还具有显著的自身特性。

(1) 海量数据接入分散、分布广、连接难

全球能源互联网囊括遍布各洲的新能源发电点、储能点、分散负荷点,大规模输、变、配电网络与设备以及大量的终端用户,其数据接入呈现出海量、大尺度、大范围分布的特点,需要覆盖性强的网络采集这些大尺度、大范围分布、高度分散的数据。然而,大量的电力设施部署在极地、荒漠、



表 1 全球能源互联网新型业务特点分析

业务类型	业务覆盖范围	数据类型	通信实时性要求	通信可靠性要求
能源天气预报、功率预测	全球广域范围	结构化数据、少量图像等非结构化数据	一般	一般
广域授时/同步/定位	全球广域范围	结构化数据	较高	高
广域范围输电线路异常监测	全球广域范围	结构化数据、少量图像等非结构化数据	一般	一般
广域系统保护	全球广域范围	结构化数据	高	高
大范围调度自动化	全球广域范围	结构化数据	高	高
用户用电信息采集	全球广域范围	结构化数据	一般	一般
应急通信	全球广域范围	结构化、非结构化数据	高	高

海洋等复杂环境，固定通信设施建设困难、故障率高、维护成本极其高昂，迫切需要能支持全球广域覆盖、稳定可靠且灵活接入的通信手段。

(2) 结构化数据多、低通量采集多

在电力系统发、输、变、配、用各环节，全球能源互联网新业务相关数据采集与通信多数是结构化数据，如电压、电流、环境参数、相量等，非结构化数据如图像、文本等数据较少，其数据通信带宽需求不高；同时，大部分此类数据的状态变化缓慢，呈现稳态特性，如设备基础沉降、电气设备温度、杆塔倾斜等，其状态均在分钟级、小时级、日级或更长的时间尺度内缓慢变化^[11]，较低的数据采集频次就能满足业务需要。

(3) 跨时空关联、业务关联性强

能源互联网数据之间存在跨时空关联，这种关联的本质是物理对象之间和过程的语义关联，并不是数据字段的关联，比如，气候环境数据的动态变化与发电效率之间存在强关联，发电效率、机组设备不稳定与短期电压不稳定存在关联等。对其各个环节、各个关键点数据进行全面采集，挖掘其中隐藏的关联模式，对支撑全球能源互联网更加科学智能的运行管控具有重要意义。

(4) 关键突变数据重要度高、实时可靠性要求强、应急要求高

尽管多数业务相关数据平常状态呈现稳态特性，但其异常突变状态则通常意味着重大事件发

生，如系统失稳、杆塔倒塌、电气设备温度剧升等，这类突变数据重要度非常高，是及时采取系统保护与调度措施的重要依据，其数据获取实时性与可靠性需要得到充分保障，在某些缺乏固定通信基础网络的场合还需有应急通信手段。

构建全球能源互联网将面临诸多技术瓶颈，如远距离输电技术、实时通信技术、异构网络互联互通技术、大范围智能调度管控技术等。从全球能源互联网通信网络构建需求来看，其新型业务呈现一个共性特点，即从传统区域范围重点覆盖扩展到全球广域大范围无缝覆盖，同时，其对通信的实时性、可靠性以及安全性有着较高要求，现有网络通信体系架构与基础设施面临新的技术瓶颈：广域无缝覆盖能力欠缺：偏远、人烟稀少区域严重缺乏网络基础设施；泛在节点小数据接入困难：现有网络设施以有线网络为主，移动灵活或泛在分布的电力设施难以接入；容灾、应急能力与可靠性待加强：偏远地区光纤骨干通信网因灾害发生断裂，难以及时维修解决，需要能保障跨域网络互联与信息传输的灾备通信网络；异构网络融合管控能力不足：亟待建立有线网络、无线网络、蜂窝网络、卫星网络、自组织网络等多种网络的融合管控体系，实现业务感知的异构网络资源智能调度优化。综上分析，为支撑全球能源互联网新型业务需求，需要一种具有大覆盖范围、稳定运行、一定通信带宽且支持关键业务

数据、实时可靠应急通信能力的新型网络,与现有光纤、移动通信等网络无缝融合,共同构建全球能源互联网广域数据采集与分发、跨地域测量和控制等功能为一体的新型综合通信网络。

3 融合卫星通信技术的优势与挑战

随着北斗定位系统的逐步建立和量子卫星的发射,中国卫星通信技术有了很大的发展^[12]。首颗量子卫星“墨子号”准备通过卫星和地球站之间的量子密钥分发和卫星中转实现覆盖全球的量子保密通信^[13]。同时,卫星网络与地面网络的异构融合组网受到研究人员广泛关注,如构建融合卫星通信网络的5G网络架构并实现地面网络和卫星网络的无缝切换^[14],建立融合卫星通信的天地一体化网络体系架构,设计优化路由策略有效提高网络的通信效率^[15]。卫星通信在智能电网、智能交通、工业生产等许多领域中开始发挥巨大的作用。在智能电网领域,洪杰等人^[16]提出一种基于北斗导航的移动应急系统,通过卫星通信的可靠性提高了对电网突发事件的应急能力;程栩等人^[17]提出基于北斗的电力数据传输平台,能够实现电网的智能调度。

当前,随着卫星通信应用领域日益广泛,其技术也呈现出新的演变趋势,如大容量高速度、多媒体宽带通信、星座 mesh 联网、多种通信网络融合等,使得卫星通信的实时性、可靠性、吞吐量等性能得到极大提升,与全球能源互联网广域数据采集与通信需求高度契合,具体阐述如下。

(1) 全球大范围无缝覆盖、泛在接入

每一颗地球同步卫星能够覆盖地球表面约42%的面积,用3颗卫星即可覆盖全球除两极外的所有地区。通信不用受到地理环境、气候条件、时间的限制,在卫星电波覆盖范围内的两点均可进行通信,满足应急通信需求。

(2) 通信容量大、支持多业务传输

卫星通信信道处于微波频率范围,可以使用的频带很宽,传统的Ku频段及C频段的卫星频

宽可达500~1 000 MHz,而Ka频段带宽达到3.5 GHz。ViaSat-1全Ka波段卫星通信总容量达到了140 Gbit/s,为Ku波段卫星容量的100倍以上。

(3) 通信性能稳定、可靠性高

卫星通信链路是自由空间传播的视距通信,传输损耗相当稳定且可以根据通信理论进行估计,同时不易受地球上自然灾害和干扰的影响,可靠性高并适用于构建灾备网络。

卫星通信技术的高速发展与大规模部署,为全球能源互联网广域数据的采集与分发、跨地域测量和控制等业务提供一种新的网络通信手段,弥补目前地基网络覆盖能力不足、受灾害影响大、条件恶劣区域难部署等问题,为构建全球能源互联网广域无缝覆盖的天空地协同通信网络提供有力支撑。同时,融入卫星通信后现有能源互联网通信网络将面临一些新的挑战,主要包括3方面。

- 网络结构更复杂,动态组网更困难:卫星通信网络具有较强的动态性,与地基固定网络动态协同组网复杂。
- 异构网络互联互通更迫切:不同网络使用不同的网络通信协议,尤其是物理层、链路层协议差距巨大,异构网络间协议互联互通是迫切需要解决的问题。
- 异构网络动态资源智能管控要求更高:网络规模庞大、结构复杂,需构建网络运行实时状态与资源管控体系,保障全球能源互联网业务数据多样性网络服务的质量需求。为此,本文将深入分析研究融合卫星通信的全球能源互联网网络体系架构与关键技术,为其后续建设提供一定建议与思路。

4 融合卫星通信的全球能源互联网网络体系架构与关键技术

4.1 融合卫星通信的全球能源互联网网络体系架构

全球能源互联网网络的核心是通过信息网络



使原本割裂的电力系统各环节数据实现流通，在引入卫星通信网络后，其网络组成结构更加复杂，如图 1 所示，从地基、空基到天基，涵盖多种异构异质网络，通过星间、星空、星地、空空、空地 and 地面链路实现互联互通。其中，地基网络涵盖光纤通信网、大型关口站、蜂窝移动网络、窄带物联网、无线局域网、无线城域网、无线传感网等；空基网络主要由大型临近空间飞行器、大型航空平台、小型近地面飞行器等空基平台通信节点自组织组成；天基网络主要由非静止轨道星座网络以及高轨地球静止/同步轨道星座网络组成^[9]。

从网络组成要素分析，全球能源互联网具体表现出以下 3 种显著特征。

- 大尺度互联：突破地面网络所存在的地理环境限制，覆盖空间广、时空跨度大，从地面拓展到海洋、天空乃至外太空。
- 大规模泛在接入：广域用户随时随地接入，用户数量众多且应用业务需求各异，在数据传输延迟与容量、服务优先级与服务质量、系统安全性等方面具有不同要求。
- 网络异构、拓扑动态：融合卫星通信网络

的全球能源互联网是典型的混合网络，涉及卫星网络、空基飞行器自组织网络以及地面网络等多种网络形式，空基或天基骨干网络节点动态变化、无线通信链路不连续等导致网络拓扑动态变化，不同的网络在传输速率、通信协议、数据格式等方面存在差异，异构异质网络的融合与网络动态重构等具有高度的复杂性。

融合卫星通信网络的全球能源互联网天空地协同网络体系架构如图 2 所示，按网络节点所处位置层次不同，可分为天基网络、空基网络与地基网络。在 IP 技术为基本框架和协议基础上，各层网络通过星间、星地、星空、空空、空地以及地面有线、无线链路连接起来，统一形成全球覆盖的一体化网络体系。

地基网络由光纤骨干通信网、蜂窝通信网、WLAN 等各种网络异构融合组成，为人口密集、自然环境较好区域的电力设施提供通信服务。另外，地面卫星关口站连通卫星星座网络，为各卫星通信接入用户提供优质可靠的网络服务。

空基网络由大型空中平台（包括大型临近空间飞行器、大型航空平台、小型近地面飞行器等

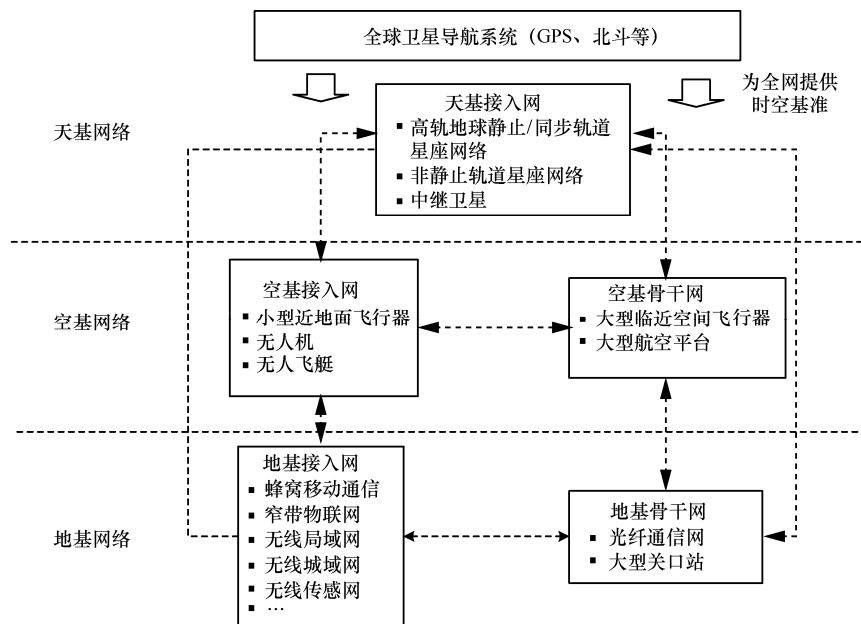


图 1 全球能源互联网网络组成

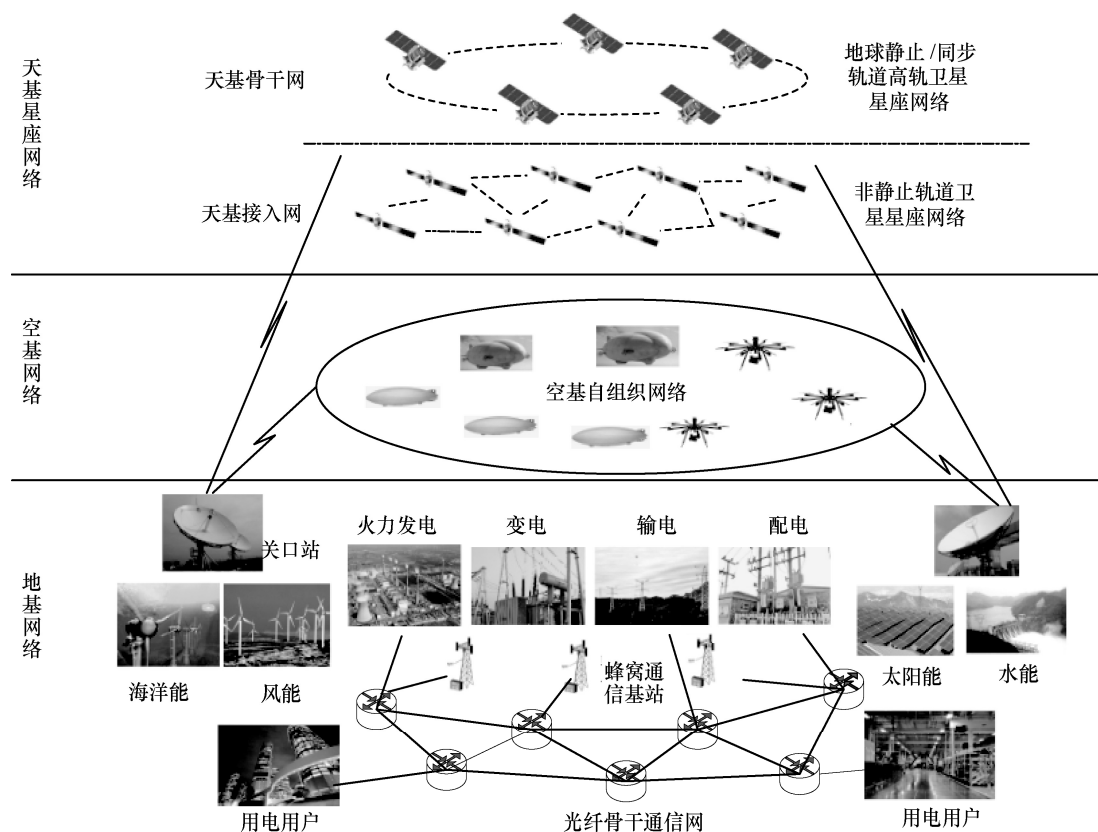


图2 全球能源互联网天空地协同网络体系架构

空基平台) 搭载通信设施构成, 按无线 mesh 自组网形式组成成灵活、高效的网状型网络。该网络中各个空中平台具有数据路由转发功能, 超通信范围数据传输可通过多跳方式实现数据路由、交换与转发。空基平台主要在局部区域提供服务, 如缺乏地面通信网络的应急通信场合。另外, 通过空基骨干节点可拓展地面网络的覆盖范围。

天基网络主要由地球静止/同步轨道高轨通信卫星构成的星座骨干网络以及由非静止轨道通信卫星星座接入网络组成, 两种星座网络形成立体化、交叉式多层卫星网络, 通过星间链路完成数据信息在网络中的路由、交换和传输。天基网络为空基信息网络提供服务, 空基骨干节点可通过天基骨干网络中继通信, 进一步增大整个网络的通信范围, 提高网络的顽健性和灵活性。同时, 为地面通信网络提供服务, 重点针对人口稀少和

自然环境恶劣的地方, 由于成本和技术等原因, 地面通信网络难以覆盖区域。

4.2 关键技术

构建全球能源互联网天空地协同网络体系, 需重点突破新型网络体系、一体化异构网络融合、大规模网络状态监测与智能管控、网络安全与隐私保护等方面的关键技术问题, 具体如下。

(1) 基于软件定义网络的全球能源互联网网络体系架构

为增强全球能源互联网大规模异构网络运行的灵活管控能力, 以软件定义网络为重要技术手段, 设计并构建弹性可扩展、分域跨层协同、动态可重构的新型网络体系架构。针对网络节点类型多样、技术体制不一、软件升级难度大等问题, 通过网络设备及其资源的虚拟化, 构建屏蔽底层硬件差异的全网统一的资源管控模型, 通过软件



定义网络控制平面,实现网络资源灵活调度、联合优化与综合管理。

(2) 一体化异构网络融合

针对互联网、移动通信网、无线传感网、无线自组网、卫星通信网等异构网络统一体系和深度融合的需求,需研究构建基于 IPv6 的一体化融合网络,包含统一编址、泛在互联和高效路由等技术,屏蔽各种异构网络的巨大差异,实现一体化融合网络的统一网络层协议和高效路由。同时,面向延迟、误码、移动性等差异度巨大的各种网络环境条件,构建一体化融合网络统一传输层协议,实现异构网络的有效协同传输,保障不同应用业务的多样性需求。

(3) 大规模网络状态监测与智能管控

以软件定义网络为技术手段,构建面向运维的网络状态大数据分析 with 智能管控系统。建立多样性业务需求到网络资源的映射机制,监测网络状态信息,并根据不同业务的资源需求,灵活部署网络功能单元,分配合理的带宽、存储等资源,从而保障业务的资源需求。在网络拥塞或故障等状态下,动态调整业务路径、迁移网络功能单元等,实现业务的全生命周期 QoS 保障。

(4) 网络安全与隐私保护

网络安全是能源互联网可靠、稳定运行的重要基石。构建能源互联网环境下的设备安全、网络安全与数据安全等机制;构建能源互联网设备的内嵌安全机制,其均适用于能源互联网的身份认证、加密、访问控制、隐私保护、安全审计等关键安全技术。

除上述关键技术问题需要解决外,构建全球能源互联网异构融合网络架构,还需重点关注以下卫星通信频谱资源与轨道资源受限问题。

(1) 卫星通信频谱资源受限

现阶段卫星通信频谱资源无法满足新业务增长需求,频谱拥塞和卫星干扰越来越严重,同时,卫星通信系统与 5G 移动通信系统存在频谱资源

竞争问题。

(2) 卫星轨道资源受限

大多数通信卫星都选用静止轨道位置,一颗静止卫星可以覆盖地球表面约 40% 的区域且信号稳定,但是,在整个对地静止轨道上的同频段卫星通常不超过 150 个,静止卫星轨道数量有限。随着全球能源互联网新业务的增长,卫星通信网络承载能力将受到一定挑战。

随着卫星宽带通信技术的发展,如认知无线电频谱共享技术、干扰消除技术、中低轨道卫星网络动态组网技术、高效切换与频谱分配策略等,卫星通信频谱与轨道资源受限问题将逐步得到缓解,为构建天空地协同的全球能源互联网网络架构提供技术支撑。

5 融合卫星通信的典型新业务应用模式

在全球广域分布新型业务的泛在接入需求下,卫星通信网络将发挥重要作用,通过一张全球覆盖的一体化通信网络,构建共平台、多业务应用场景的图景,为全球能源互联发展提供良好的网络服务支撑。本节将重点阐述几种基于卫星通信的全球能源互联网典型新型业务应用模式。

5.1 新能源天气预报、功率预测与发电设备健康监测管理

如图 3 所示,卫星星座网络实现全球“一极一道”以及所有新能源基地的全覆盖,通过与地面天气监测、环境监测、气象卫星的结合,可实现新能源基地天气预报,包括风力、光照强度、洋流动向等;通过天气预报数据以及计算模型,可实现新能源发电功率波动预测,为电网调度提供依据;通过卫星通信网络,对恶劣自然环境下电力发电设备运行状态数据进行采集;通过数据智能分析,掌握设备健康状态。

5.2 广域范围输电线路异常监测

全球能源互联网中部分电力传输线网都在人烟稀少、自然环境恶劣区域,地面通信网络难以

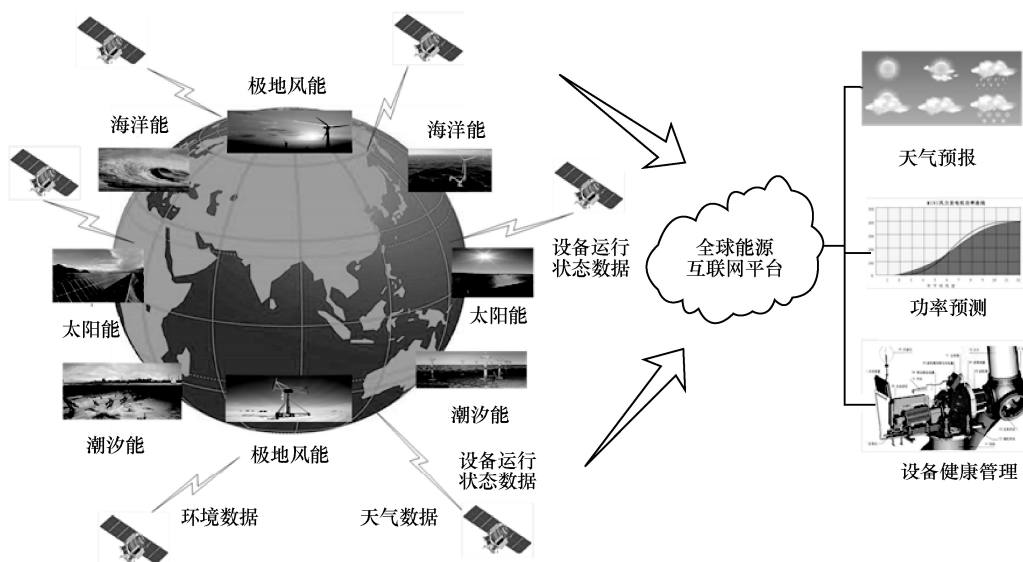


图3 新能源天气预报、功率预测与发电设备健康管理

覆盖，利用卫星通信网络对广域范围的输电线路进行状态监测与异常检测，如图4所示。为监测输电杆塔现场姿态信息，防止出现由输电杆塔倾斜、沉降、位移等因素引起的电力事故，利用北斗差分技术定位输电杆塔的地理位置信息，采用高精度的二维倾角传感器检测输电杆塔的姿态信息，从而实现可视化的输电杆塔姿态监测。另外，为防止输电线路因大风、冰冻雨雪等自然灾害导致断裂事故，通过在传输线路上安装各类传感器，

比如，图4中的压力传感器、湿度传感器、张力传感器等，用卫星接收实时数据并发送给后端平台，实现广域范围内输电线路异常监测以及预警。

5.3 基于广域 PMU 监测的系统预警与控制保护

如图5所示，基于北斗 PMU（同步相量测量）的广域预警与控制保护主要由北斗广域 PMU 测量、天基网络测量数据传输以及后端平台广域预警系统与广域控制保护系统构成。北斗卫星系统负责为 PMU 测量装置提供精准授时、同步与定

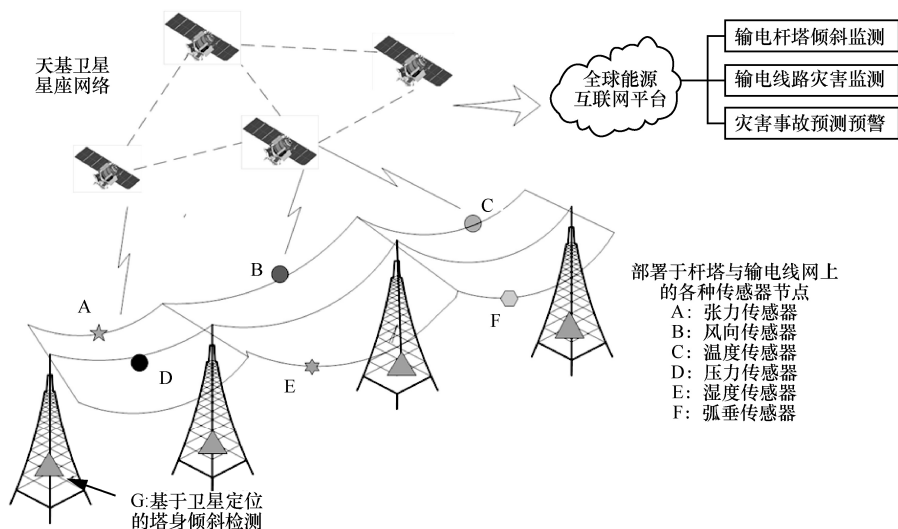


图4 广域范围输电线路异常监测

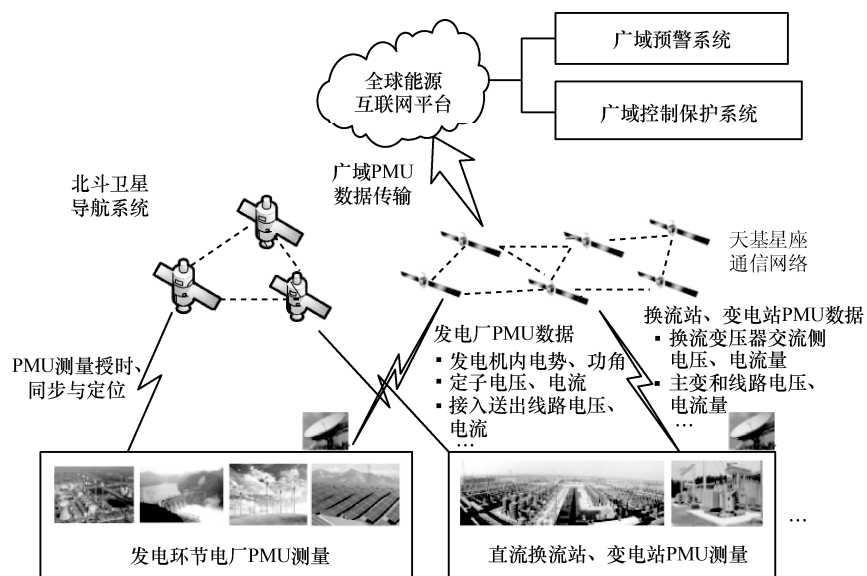


图5 基于北斗PMU监测的广域预警与控制保护

位，为系统中各个节点采集的电压、电流等电气量打上精确时标，PMU装置通常部署于发电、换流以及变电环节。通过将各广域量的时间断面对齐，可得到完整的系统动态曲线，既可用于校核模型和参数，也可从中提取关于电能动态质量和系统动态安全的各种信息，为系统运行广域预警与广域控制保护提供科学依据。

5.4 用户用电信息采集

如图6所示，为了进一步充分利用有限的电力资源以及进行合理调度，利用卫星通信网络对全范围内尤其是偏远地区的用户用电情况进行实时的监控和预测，监测数据传输至后端能源互

网平台，通过用户用电数据，分析其用电行为特征，为发电、电能存储、电能调度合理规划决策提供依据，提高资源利用率。

5.5 应急通信

在自然灾害发生率较高的环境中，电网的各种设施容易遭到破坏，并且很难在第一时间检查到电网中各个节点出现的故障，进行抢修恢复，卫星通信可为偏远地区作业现场提供有效的应急通信手段，如图7所示，通过与临近空间微型飞行器、近地无人机以及地面雷达站、卫星通信车的联合协同组网，为救灾人员提供可靠的网络通信服务。

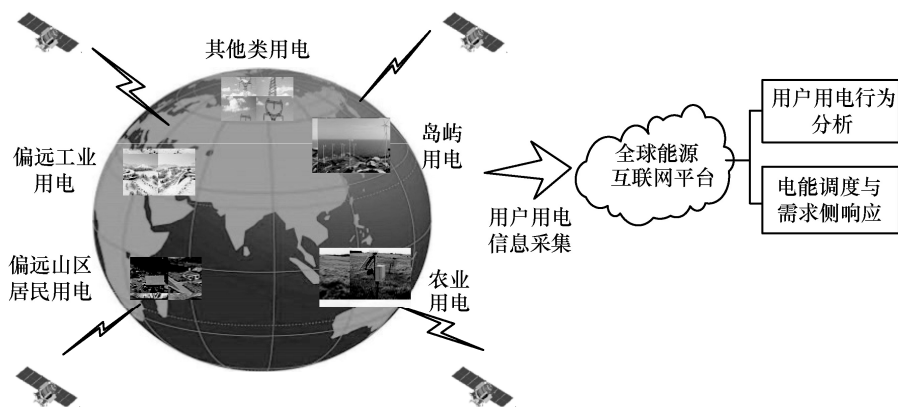


图6 偏远地区用户用电信息采集

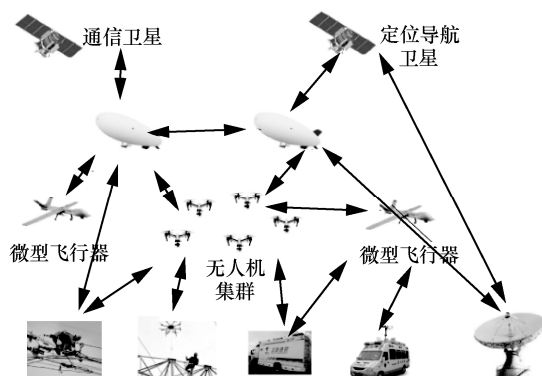


图7 融合卫星通信网络的应急通信

6 结束语

卫星通信是构建全球能源互联网天空地协同一体化信息网络的核心支撑,是当今网络通信科研领域的热点。本文从分析全球能源互联网新型业务入手,重点分析论述了各种新型业务的共性数据特征以及卫星通信技术最新演变趋势与独特特点。进一步阐明了融合卫星通信网络的全球能源互联网天空地协同网络体系架构以及各层组成,通过空空、星空、空地链路完成整个网络的互联互通,探讨了天空地协同网络构建所需突破的关键技术。聚焦卫星通信技术,展示了几种典型的全球能源互联网典型新业务应用模式,为未来卫星通信技术在全球能源互联过程中的研发与应用提供一定参考,对促进全球能源互联网的建设发展具有一定现实意义。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
LIU Z Y. Global energy internet[M]. Beijing: China Power Press, 2015.
- [2] Ancillary Research. E-energy German smart grid projects overview[R]. 2010.
- [3] 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.
- [4] 苏澜, 王玉东, 辛培哲, 等. 全球能源互联网天地协同通信技术体系架构研究[J]. 电信科学, 2017, 33(Z1): 45-50.
SU L, WANG Y D, XIN P Z, et al. Research on architecture of global energy internet synergic communication technology system[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(Z1): 45-50.
- [5] 曾鹏飞, 梁云, 王瑶, 等. 全球能源互联网信息通信标准体系架构研究[J]. 智能电网, 2016, 4(9): 851-856.
ZENG P F, LIANG Y, WANG Y, et al. Research on information and communication standard architecture of global energy internet[J]. Smart Grid, 2016, 4(9): 851-856.
- [6] 李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2015, 40(6): 711-715.
LI D R, SHEN X, GONG J Y, et al. On construction of China's space information network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6): 711-715.
- [7] NASA tracking and data relay satellite system [Z]. 2010.
- [8] Space Communication and Navigation Office/NASA. Space communication and navigation(SCaN) network architecture definition document volume 1[R]. 2011.
- [9] 梁俊, 胡猛, 管桦, 等. 空间骨干网络体系架构与关键技术研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(4): 52-58, 69.
LIANG J, HU M, GUANG Y, et al. Research on space backbone network architecture and key technologies[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2016, 17(4): 52-58, 69.
- [10] 黄松华, 梁维泰. 基于 mesh 和 NEMO 的天空地网络体系架构研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(1): 37-43.
HUANG S H, LIANG W T. Research on space-air-ground information network architecture based on mesh and NEMO[J]. Journal of CAEIT, 2015, 10(1): 37-43.
- [11] 陈永波, 汤奕, 艾鑫伟, 等. 基于 LPWAN 技术的能源电力物联专网[J]. 电信科学, 2017, 33(5): 143-152.
CHEN Y B, TANG Y, AI X W, et al. Electricity internet of things based on LPWAN technology[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(5): 143-152.
- [12] 胡喆, 白国龙, 余晓洁. 北斗第三步 当惊世界殊——揭秘北斗三号全球组网卫星[J]. 中国产经, 2017(12): 84-86.
HU Z, BAI G L, YU X J. Disclosure of Beidou 3 global networking satellite[J]. Chinese Industry & Economy, 2017(12): 84-86.
- [13] 彭承志, 潘建伟. 量子科学实验卫星——“墨子号”[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(9): 1096-1104.
PENG C Z, PAN J W. Quantum science experimental satellite “Micius”[J]. Progress on CAS Strategic Priority Research Program, 2016, 31(9): 1096-1104.
- [14] 李广达, 孙晨华, 刘刚. 卫星网络与地面网络融合的 5G 网络架构[J]. 无线电工程, 2016, 46(3): 5-8.
LI G D, SUN C H, LIU G. 5G network architecture based on satellite-terrestrial integration[J]. Radio Engineering, 2016, 46(3): 5-8.
- [15] 张杰, 郁小松. 天地一体化网络中卫星通信港控制架构与路由技术研究[J]. 无线电通信技术, 2017, 43(2): 1-5.
ZHANG J, YU X S. Control and routing of satellite communication port in integrated space-ground networks[J]. Radio



Communications Technology, 2017, 43(2): 1-5.

- [16] 洪杰, 林密, 陈明, 等. 基于北斗导航的电网移动应急系统设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(12): 63-65.

HONG J, LIN M, CHEN M, et al. A grid condition monitoring and mobile emergency system based on the Beidou satellite navigation system[J]. Automation and Instrumentation, 2017(12): 63-65.

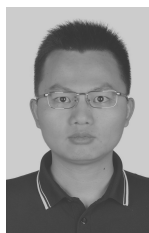
- [17] 程栩, 王松, 王正风, 等. 基于北斗卫星通信技术的电力信息传输关键技术研究及应用[J]. 智能电网, 2017, 5(8): 795-799.

CHENG X, WANG S, WANG Z F, et al. Research and application of the key technology of electric power information transmission based on Beidou satellite communication technology[J]. Smart Grid, 2017, 5(8): 795-799.

[作者简介]



李永亮 (1984-), 男, 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院工程师, 主要研究方向为输变电设备状态监测技术、电力通信技术、电力大数据分析应用等。



李许安 (1990-), 男, 中国电力科学研究院有限公司工程师, 主要从事电力无线通信与物联网技术研究工作。

全杰 (1983-), 男, 博士, 中国电力科学研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为智能传感、电力物联网、能源互联网等。

雷煜卿 (1975-), 男, 中国电力科学研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为光纤传感、智能传感、电力物联网等。

丁慧霞 (1981-), 女, 中国电力科学研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力光纤通信、电力信息通信测试与仿真等。

蓝俊锋 (1974-), 男, 广东省电信规划设计院有限公司高级工程师, 主要研究方向为移动通信网络咨询、规划、设计和优化, 主持的项目曾获得国家级奖项 3 项、部级奖项 13 项。