

变电站数字孪生技术研究与应用

李江成, 刘建戈, 张鹏宇, 李 茂, 姜蒙娜

(国网江苏省电力有限公司淮安供电公司, 江苏 淮安 223002)

摘要: 分析了数字孪生及其在电力行业中发展和应用情况, 变电站数字化应用存在分散化现状。提出了变电站数字孪生技术感知、传输、平台和应用的系统架构, 研究了三维建模、数据映射、可视化和应用场景四个方面关键技术, 并进行了典型应用分析。对于变电站数字孪生技术的发展, 给出模型接口、数据获取、应用拓展和规范标准等方面发展建议, 促进变电站数字孪生技术的发展和應用。

关键词: 变电站; 数字孪生; 系统架构; 三维建模; 数据映射; 可视化

Research and application of digital twin technology in substation

LI Jiangcheng, LIU Jiange, ZHANG Pengyu, LI Mao, JIANG Mengna

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Huai'an Power Supply Branch, Huai'an 223002, China)

Abstract: The digital twin and its development and application in the power industry is analyzed. There is a decentralized situation in the digital application of substation. The system architecture of perception, transmission, platform and application of digital twin substation is proposed. The key technologies of three-dimensional modeling, data mapping, visualization and application scenario are studied, and the typical applications are analyzed. The development suggestions on model interface, data acquisition, application expansion and specification standards are given to promote the development and application of substation data twin technology.

Key words: transformer substation; digital twin; system architecture; 3D modeling; data mapping; visualization theory

0 引言

当前社会经济可持续发展的需求下, 以新能源为主体的新型电力系统“双高”“双峰”特征凸显, 亟待运用数字化技术手段面对电力系统平衡和安全稳定的挑战。作为盛行的“元宇宙”概念重要基础的数字孪生 (Digital Twin, DT) 技术^[1], 融合了物联网、大数据、建模仿真、人工智能和自动控制等技术, 实现现实与虚拟空间的映射交互, 正推动全社会进入数字化时代。数字孪生电网是在电网实体基础上同构虚拟化的数字电网, 在数字世界中挖掘数字信息, 是电网数字化必由之路。

数字孪生变电站是数字孪生电网最基础、最重要的组成部分, 通过构造与实体变电站对应的数字变电站, 推进变电运检和管控智能化、数字化, 奠定电网数字化转型基石。数字孪生变电站能够深入挖掘电网数据资产价值, 实现智能运维、精准作业和远程协作等, 实现“数”与“智”的融合, 通过推动数字电网建设, 使新型电力系统更好地服务于“双碳”目标。

1 变电站数字化应用现状

20世纪90年代初, 变电站自动化建设开启了变电站数字化雏形, 变电站由有人值班逐步实

现了无人值班。随着信息技术的发展,又由数字变电站过渡到智能变电站和智慧变电站,出现机器人巡检等智能化手段,变电站的数字化程度不断提高。目前,除了变电站自动化系统,在变电站还有应用于安防、消防、视频和环境监测等智能辅助设备集控系统,各种设备状态在线监测系统,用于实时图像监控的统一视频监控系统,用于现场安全管控的安全管控平台等。各个应用系统自成体系,如调度 D5000、生产管理、无人机巡检和机器人巡检等系统的自动关联度不高,无法实现各类信息实时共享交互,数字化应用分散化、局部化^[2]。

变电站三维建模应用方面,目前已建设的三维数字孪生体基本还处于效果展示阶段,仅实现了一些初级应用。变电站设计阶段的 GIM/BIM 建模和运行阶段的激光扫描建模不能互访共享,重复建设和数据不能共享复用。变电设备智能运检缺乏全景化智能交互技术装备及技术手段,不能有效支撑智能运检所需的信息实时互联及远程专业协助。运检人员通常采用智能手机或平板开展运检作业,很难进行高度体验感的全景化、全息化显示;无法实时上传红外、紫外和局部放电等运检信息,从而形成巡检信息孤岛,无法实现远程专家实时诊断。

2 数字孪生技术

数字孪生技术以数字化方式在虚拟空间建立物理实体的多维度、多时空尺度、多学科和多物理量的动态虚拟模型,实时反映物理实体在真实环境中的属性、行为和规则等,从而实现物理信息空间的映射、交互和融合。

2.1 数字孪生技术发展概况

数字孪生的概念最早源自于密歇根大学的 Michael Grieves 提出的信息镜像模型 (Information Mirroring Model, IMM), 也被称为数字双胞胎和数字化映射^[3]。数字孪生原型主要来源于企业在实施基于模型的系统工程过程中产生了大量的物理、数学及信息模型。数字孪生技术最早被应用于航空航天领域,在2010年被

美国航空航天局 (NASA) 和美国空军研究实验室 (AFRL) 采用。

近年来,得益于物联网、大数据、云计算和人工智能等新一代信息技术的发展,数字孪生的实施已逐渐成为可能。现阶段,除了航空航天领域,数字孪生还被应用于电力、船舶、城市管理、农业、建筑、制造、石油天然气、健康医疗和环境保护等行业^[4]。在智能制造领域,数字孪生被认为是一种实现制造信息世界与物理世界交互融合的有效手段。目前正在发展中的“元宇宙”概念是整合多种新技术而产生的新型虚实相融的互联网应用和社会形态,数字孪生变电站可以看作是其中未来的“元变电站”。

2.2 电网数字孪生应用情况

2000年卢强院士提出数字电力系统的概念,蕴含了数字孪生电网的雏形:实际运行的电力系统的物理结构、物理特性、技术性能、经济管理、环保指标、人员状况和科教活动等,数字化、形象化和实时地描述与再现。2018年以后,数字孪生电网 (Digital Twin Grid, DTG) 的出现,以数据驱动、实时交互和闭环反馈为特征,实现电网的实时态势感知和超实时虚拟推演,旨在为电力系统的运管调控决策提供参考。德国西门子通过软件与产品数据管理协同工具相结合,提供具体的电气数字双胞胎服务;美国GE公司通过在Predix平台上为设备创建DT来构建数字风电场风机,优化维护策略并增加能源生产^[5]。国内上海交通大学贺兴教授团队和中国电力科学研究院张东霞教授团队立足于电力物联网所承载的数据流,从工程和科学的视角聚焦于数据利用方法论,阐明了DTG的基础知识及其内涵与外延,系统性地探索了数字孪生技术在电力领域的早期应用^[6]。

近几年来,国网各网省公司针对电网数字孪生技术开展了系列试点应用。如国网山东公司建立了山东智慧物联数字孪生服务平台、输电线路智能运检服务平台;国网河北公司建设了雄安高铁数字孪生光伏电站、雄安数字孪生高压电缆系统和雄安王家寨数字孪生微电网等项目。上海

35 kV蔡伦站搭建了涵盖六大类设备涉及25类传感器的前端感知网络,打造了数字孪生变电站样板工程,建立了实体设备在虚拟空间内的数字镜像映射;110 kV博艺变电站实现实体变电站与数字孪生站的同步建设、同步移交^[7]。

3 面向变电站的数字孪生系统架构

《信息物理系统建设指南(2020)》中CPS(Cyber-Physical Systems)通用功能架构包含业务域、融合域、支撑域和安全域的四个功能架构^[8],如图1所示。相关研究从不同角度给出了数字孪生电网的系统架构,如工业4.0研究院在《数字孪生电网白皮书》中提出数字孪生基础设施、数字孪生体平台和数字孪生体应用的三层结构^[9]。河北电力《数字孪生变电站白皮书》从体系架构出发,将数字孪生电网划分设备级、单元级和系统级三个层级,技术架构分为数据层、模型层、功能层和展示层^[10]。



图1 CPS通用功能架构

Fig. 1 CPS general functional architecture

变电站数字孪生系统架构对应数字孪生电网的单元(场站)级层级,其系统架构除实体变电站外,通常包含感知层、传输层、平台层和应用层^[11],如图2所示。实体变电站即物理世界,感知层和传输层共同构建了数字孪生交互通道,平台层完成物理电网的数字化建模、数据处理、协

同计算和可视化等功能,应用层通过智能运维、远程协作和状态评价实现了孪生体数字价值。各层之间相互协同,共同支撑数字电网各项业务、服务和应用。



图2 数字孪生变电站系统架构

Fig. 2 System architecture of digital twin substation

3.1 感知层

感知层包含传感器层与数据汇聚层两部分,由各类物联网传感器、网络节点组成,实现传感信息的采集和汇聚。传感器层用来获取变电站内设备状态、运行工况和环境等参数,通过安装各类传感器,对变电站主设备及环境量进行全面采集和全面感知。如监测电网运行的电压电流互感器、监测气体的SF₆传感器、监测环境的温湿度传感器以及设备在线监测系统的声振、红外和局部放电等传感器。数据汇聚层汇聚采集数据,实现数据协同采访、整合和通信功能,如出线间隔的测控装置、合并单元等。

3.2 传输层

传输层链接实体变电站和数字孪生体,是实现数字孪生变电站与实体变电站虚实协同、时空一致运行模式的通道,具备泛在可靠、终端接入灵活和双向互动的通信能力,提供广覆盖、大连接和高安全的数据传输与能力保障。满足孪生数据传输的通信方式有光纤、5G和电力无线专网等,变电站已建成电力光纤网,带宽速率完全满足数字孪生数据传输需求。

3.3 平台层

平台层是数字孪生变电站信息处理中枢，实现数据处理、数据同步映射、三维建模、孪生体管理、协同计算、智能分析处理和可视化等功能，为具体应用场景提供业务接口。平台层包含数据中台、人工智能平台、物联管理平台和调度自动化系统等接口，满足变电站多源异构数据的开放式接入、海量数据存储和融合处理，虚拟电网对物理电网超写实建模，通过表征解析、挖掘分析和模拟推演，形成虚拟电网与物理电网虚实协同的优化策略^[12-13]。

3.4 应用层

应用层通过变电站数字孪生体实现实时监视、虚拟巡视、远程协作、安全管控和状态评价等功能，推进变电运维及管理模式向数字化转型。如结合其在设备层设备自主缺陷诊断与故障预警、设备现场及远程友好互动应用，可以实现设备故障主动预警和智能运维^[14]。应用层通过变电设备和电网数字孪生模型开展的派生应用，能够辅助现场运维人员模拟作业环境，提高作业效率，保障作业安全。

4 变电站数字孪生技术

数字孪生变电站关键技术是对实体变电站进行三维建模，形成数字空间的变电站，实体变电站与虚拟空间变电站数据映射，包含可视化在内的各种数字孪生变电站的应用场景。

4.1 三维建模

三维建模技术从实现手段可以概括为测绘建模和图样参数建模两大类。测绘建模技术是以实景实物为对象，通过倾斜摄影、近景摄影或三维激光扫描等同步定位与建图（Simultaneous Localization And Mapping, SLAM）方法建立对应模型。图样参数化建模是将二维的图样或参数转化为三维的模型。基于SLAM方法的测绘建模三维模型能反映变电站设备外观和位置，真实描绘设备外观；但不能反映设备内部部件之间装配接口、电气连接等逻辑关系^[17]。图样参

数化建模反映模型的参数、装配和电气接线等逻辑关系，但模型外观不能反映实物形态，GIS设备模型如图3所示。数字孪生变电站中的孪生设备应能实时动态反映现场设备状态，如隔离开关的闭合等，需要层次化、结构化对设备进行三维建模。

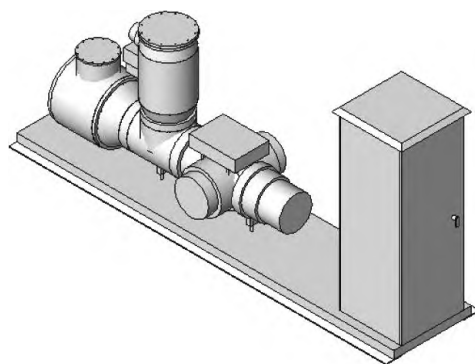


图3 GIS设备三维测绘模型

Fig. 3 3D mapping model of GIS equipment

为增加可视化效果，模型应尽量体现物理实体真实情况。要达到模型逼真效果和动态反映设备状态，需要将测绘建模和参数建模结合起来，满足数字孪生变电站智能运维要求。对于建成的变电站，通常在测绘建模的基础上，用BIM/GIM文件对模型进行结构化标注、部件分解，使三维模型在高逼真的效果上结构化、层次化。通常用激光雷达现场扫描变电站，配合使用计算机视觉标记技术，构建场站全局激光点云，达到厘米级的三维重建准确度；按照《输变电工程三维设计模型交互规范》，GIM模型对变压器、断路器和隔离开关等电气设备进行部件拆解、标注，构造设备模型部件之间电气、连接逻辑关系；根据变电站最新的SCD文件，按IEC 61850协议将变电站的一二次设备与变电站的三维重建模型形成对应关系。最后，采用基于物理渲染（Physical Based Rendering, PBR）的建模技术完成设备层次、高准确度的三维建模，效果如图4所示。

新建变电站是在图样参数化建模的基础上，用倾斜摄影、三维激光扫描等测绘点云数据对模型进行贴图渲染。



图4 GIS设备三维测绘加参数化模型

Fig. 4 3D mapping and parametric model of GIS equipment

4.2 数据映射

数字空间创建的变电站三维模型只是变电站及设备外观的复制,要达到数字孪生的效果,虚拟变电站应能实时反映物理变电站及设备状态,实现数据及信息映射。数据的同步映射需要获取数据、传输数据和融合展示数据。数据获取主要通过感知层安装于设备的传感器实时感知设备运行及环境参数,以及其他智能系统推送、数据中台拉取等。数据传输利用已建成的电力光纤通信网,可满足变电站数字孪生带宽和实时性要求。

变电站数字孪生体实时数据全景映射,实现变电站实景对孪生体各环境、运行模块间数据的时空互联,信息深度融合,实现对实体运行状态的详细模拟。变电站孪生体的数据互联技术根据不同场景,将变电站环境数据、设备运行数据分别进行模块化划分,基于知识图谱的电网环境数据、运行数据抽取技术,分别提取各环境模块、运行模块的数据,构建环境模块、运行模块实体要素,包括时间要素、空间要素和物理信息等;基于知识图谱的电网实体对齐技术,从关联关系、时间要素、空间要素和物理信息等方面,对环境信息、运行信息进行对齐、融合,实现变电站孪生体信息的深度融合和全景映射,如图5所示。

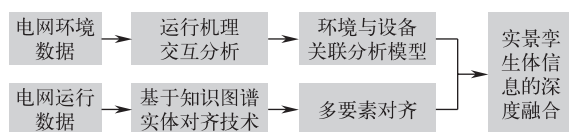


图5 “虚-实”数据映射机制

Fig. 5 Virtual real data mapping mechanism

4.3 可视化技术

三维可视化技术有VR、AR和MR三种。虚

拟现实 (Virtual Reality, VR) 将现实场景通过计算机生成三维模型表现出来,使用户在虚拟环境中感受真实世界。增强现实 (Augmented Reality, AR) 将现实世界的一定时间空间范围内很难体验到的实体信息通过计算机模拟仿真后再叠加,将虚拟的信息应用到真实世界被人类感官所感知,达到超越现实的感官体验。混合现实 (Mixed Reality, MR) 包括增强现实和增强虚拟,是合并现实和虚拟世界而产生的新的可视化环境,在新的可视化环境中物理和数字对象共存,并实时互动。

用于数字孪生变电站的三维可视化技术主要为AR和MR技术。AR可以将真实的变电设备和虚拟的环境实时地叠加在同一个画面或空间。AR技术通过高清摄像展现了真实设备场景,同时显示出运行信息,两种信息相互补充、叠加。利用头盔显示器,把变电站设备与运行及状态参数以图形化重合在一起,更直观地“透视”设备或远程运维^[16]。

MR在AR实现真实设备场景与运行信息增强显示的基础上,通过SLAM技术确定空间位置,模型随位置和视角变化并可多方互动。MR终端上有多种传感器,包含第一人称视角前向摄像头、感知变电站内的空间结构和手势输入的激光深度传感器以及麦克风和立体扬声器;其中全息透镜模块用于虚拟数据和变电站设备的混合现实展示,工作人员MR终端视角如图6所示。MR的现场作业融合实时协作,现场作业人员能够根据数字孪生体的映射关系,很直观地发现设备存在的问题和之前检修的数据内容,并得到基于空间计算的三维MR实时指导。



图6 工作人员在开关室MR终端视角

Fig. 6 View of workers at MR terminal in switch room

4.4 应用场景

数字孪生变电站主要应用场景有智能巡检、远程协作、安全管控和状态评价等。这些场景的MR前端数据进行关联分析,通过大屏或MR终端进行可视化展示,实现数字孪生与现场、远端支持与现场作业等不同场景的协作共融。包括电力设备运行状态在线监视、电力设备故障预警等智能巡检场景,协助现场人员进行设备运维、设备检修和设备故障处理等远程协作场景。针对关键、重要电力设备进行检修、故障排查等状态检修场景,对电力设备健康状态、运行环境等进行安全监测等安全管控场景的广泛应用。

智能巡检实现对变电设备运行状态的自动巡视、远程虚拟巡视和机器人巡视辅助等。自动巡视对设备状态自动识别,异常进行提前预警等场景;远程虚拟巡视是工作人员通过MR终端在变电站孪生体上完成巡视工作。远程协作是现场人员在设备运维、设备检修和设备故障处理等操作场景通过MR技术沟通现场与远端,实现数字孪生双向智能协作。智能安全管控应用MR技术和三维可视化展示组件,在数字孪生模型中模拟安装安全作业围栏,并与现场安全作业围栏位置进行匹配,对不安全行为及时通过远程进行预警,保障现场作业安全。状态评价能够利用专家知识、人工智能分析等核心技术,对传感器采集的动态数据以及历史数据进行研判分析,实时诊断设备的健康状态以及异常发展趋势。

5 数字孪生变电站应用实例

对已建成的110 kV红旗变电站全站设备设施进行数字孪生建设,推进变电站设备设施状态信息的数字化转型。构建了基于大数据与数据挖掘应用的数字化孪生变电站,有效融合变电业务需求和智能运检技术优势,提高了设备状态的掌控力和运检管理穿透力。

5.1 变电站数字孪生

针对建成的变电站特点,采用三维激光扫描加无人机倾斜摄影进行全站三维测绘建模,根据

变电站图样和SCD文件建设设备之间关联关系,运用GIM模型完成设备部件分解和标注,通过智能传感、人工智能、图像识别和大数据分析等新技术,构建数字孪生变电站模型。电网运行参数通过安全生产I区,辅助系统通过安全生产II区,视频及其他环境参数通过管理大区上送到服务器,经数据抽取、对齐和融合,实现变电站孪生体信息的全景映射和融合展示。

5.2 数字孪生体应用

融合变电专业管理规程标准制度要求,实现巡视巡检人工替代、倒闸操作一键顺控、异常处理智能决策、设备信息关联分析和作业现场智能管控等功能。

实现巡视巡检人工替代,依据变电站巡视巡检作业标准,建立智能化巡视巡检模型,实时监控设备设施状态,进行历史数据比对,及时发出异常报警信息。实现异常处理智能决策,综合历史数据、同类设备数据、在线监测和带电检测数据,精准定性缺陷性质,自动生成检修策略和停电施工方案。实现设备状态评价,建立设备状态联动分析模型,关联分析在线监测、设备老旧程度和关键部件温度等信息,历史检修试验数据,预判设备健康状态,及时预警异常状态。实现作业现场智能化管控,应用可穿戴设备、电子围栏、数字化“两票”和智能工器具等新技术,实施远程监控管理,实现人员信息、作业行为和电网设备状态的有效关联,推进安全风险的全流程、全景化管控。图7为数字孪生变电站开关室智能巡视场景。



图7 数字孪生变电站开关室智能巡视场景

Fig. 7 Intelligent patrol scene of switch room in digital twin substation

6 变电站数字孪生技术展望

变电站自动化及调度自动化建设,使变电站有人值班过渡到无人值班,带来生产模式和管理模式的巨大变化。数字孪生技术应用于电力生产,特别是作为电网重要节点的变电站构建数字孪生变电站,随着数字孪生技术研究深入和应用场景不断拓展,将会带来电力生产管理模式的新一轮革命性变化。目前,数字孪生变电站无论是建成站还是新建站,都处于零星的探索试点应用阶段,数字孪生技术缺乏成熟的工具,应用场景还需进一步拓展,相应技术规范和建设标准尚未建立。

变电站三维测绘建模或图样参数化建模工具相对比较成熟,但存在建成站或新建站不同的建模方式。建成站的三维测绘建模需要对设备部件进行层次化分解标注,建立对应连接关系,需要根据GIM模型要求开展人工智能手段自主学习和分解标注的研究工作。同时设计阶段的GIM/BIM建模和运行阶段的激光扫描建模还存在三维模型不能互访共享、各专业重复建设和数据不能共享复用的现象,有必要开展三维建模及标准化统一访问接口技术研究,建立三维模型数据的统一访问接口。

变电站孪生数据的获取,目前主要取自变电站自动化系统、辅助集中监控系统和统一视频等现有系统数据,以及变压器油色谱、局部放电等在线监测系统,不能全方位多维度反映设备运行状态,仅有少数变电站的传感设备可支撑数字孪生的无人巡视和智能自主运维。部分地区正在开展变电站电力物联化试点改造,增加各种电量和非电量传感器,使变电站内设备全过程全方面可测、可观、可知。受制于传感器技术和成本所限,要实现变电站深度数字孪生还要假以时日。

智能巡检、远程协作、状态检修和安全管控是数字孪生变电站基本应用场景,关注电网自身的安全生产,作为电网数字化基础更重要目标是价值创造,通过资产智能管理、设备全生命周期管理等应用拓展发掘变电站价值。当前,怎样运

行好实体变电站和数字孪生变电站,发挥数字孪生技术优势,推动变电站运检及管理模式转变,需要通过不断拓展变电站数字孪生体的应用场景来实现。

变电站数字孪生技术规范和标准方面,相关研究机构以及国网河北电力公司分别出版了《数字孪生电网白皮书》,南方电网发布了《数字电网白皮书》;上海电力公司针对数字孪生变电站发布了相应的系统标准化功能技术规范和主子站通信规范^[17-19],为推进变电站数字孪生技术的发展和应用进行了有益的探索。现有试点数字孪生变电站的建设、运维技术积累和沉淀,将有助于形成在规划、设计、建设和运维方面的规范标准,从而更好地推进变电站数字孪生技术的发展应用。

数字孪生变电站作为数字孪生电网的关键组成部分,是电网实现数字化转型的落脚点。通过变电站数字孪生建设实现电网可测、可知、可观和可控,打造能源互联网生态体系,适应新能源为主体的新型电力系统发展需求,推动电力行业转型升级和经济社会高质量发展。

参考文献

- [1] 周博文,奚超,李广地,等.元宇宙在电力系统中的应用[J/OL].发电技术:1-9[2022-02-26].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1405.TK.20220126.1028.002.html>.
- [2] 张鹏,雷昊,胡东林,等.基于多维信息的电网设备健康分析及故障概率研究[J].电力信息与通信技术,2021,19(7):9-16.
- [3] 何冰,谢天祥.数字孪生技术在输电线路中的应用研究[J].电力信息与通信技术,2021,19(7):83-89.
- [4] 陶飞,刘蔚然,张萌,等.数字孪生五维模型及十大领域应用[J].计算机集成制造系统,2019,25(1):1-18.
- [5] 蒲天骄,陈盛,赵琦,等.能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J].中国电机工程学报,2021,41(6):2012-2029

- [6] 贺兴, 艾芊, 朱天怡, 等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2009-2019.
- [7] 潘博, 张弛, 张华, 等. 数字孪生变电站在电网企业数智化转型的探索与应用[J]. 电力与能源, 2020, 41(5): 558-560, 590.
- [8] 中国电子标准信息化研究院. 信息物理系统建设指南(2020)[R]. (2020-08-28)
- [9] 工业4.0研究院. 数字孪生电网白皮书[R/OL]. (2021-07) [2021-09-20]. <http://www.innovation4.cn/>.
- [10] 国网河北省电力有限公司. 数字孪生电网白皮书[R/OL]. (2021-07-29) [2021-09-20]. <https://wenku.baidu.com/>.
- [11] 刘海峰, 池威威, 贾志辉, 等. 变电站数字孪生系统的设计与应用[J]. 河北电力技术, 2021, 40(3): 8-14.
- [12] 唐文虎, 陈星宇, 钱瞳, 等. 面向智慧能源系统的数字孪生技术及其应用[J]. 中国工程科学, 2020, 22(4): 74-85.
- [13] 白浩, 周长城, 袁智勇, 等. 基于数字孪生的数字电网展望和思考[J]. 南方电网技术, 2020, 14(8): 18-24, 40.
- [14] 相晨萌, 曾四鸣, 闫鹏, 等. 数字孪生技术在电网运行中的典型应用与展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1564-1575.
- [15] 王志鹏, 兰峰, 赵勇, 等. 数字孪生技术在坚强智能电网中的应用探讨[J]. 电气应用, 2021, 40(6): 111-115.
- [16] 孙冬, 吉炫颖, 王洪香. 增强现实技术在变电站设备运检中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(6): 44-49.
- [17] 中国南方电网有限责任公司. 数字电网白皮书[R/OL]. (2020-10) [2021-09-20]. <http://www.chinapower.com.cn/>.
- [18] 国网上海电力公司. 变电站数字孪生系统标准化功能技术规范(试行)[Z]. (2019-07-01)
- [19] 国网上海电力公司. 变电站数字孪生系统主站通信规范(试行)[Z]. (2019-07-01)

作者简介

李江成 (1980—), 男, 高级工程师, 从事电力系统自动化和电力营销相关工作。

刘建戈 (1975—), 男, 研究员级高级工程师, 主要从事电力系统自动化和电力信息工作。

(收稿日期: 2022-03-10)