

引用格式:顾靖达,白小会,李伟,等.新型电力系统变电站绿色低碳技术分析[J].南方能源建设,2024,11(4):111-117. GU Jingda, BAI Xiaohui, LI Wei, et al. Analysis on green and low carbon technologies for new power system substations [J]. Southern energy construction, 2024, 11(4): 111-117. DOI: 10.16516/j.cec.2024.4.11.

新型电力系统变电站绿色低碳技术分析

顾靖达^{1,2,*}, 白小会^{1,2}, 李伟^{1,2}, 王亚峰¹, 宋宝同^{1,2}

(1. 国网北京市电力公司, 北京 100031; 2. 北京电力经济技术研究院有限公司, 北京 100055)

摘要: [目的]“双碳”目标愿景下,新型电力系统变电站建设势在必行。[方法]为推动传统变电站向新型电力系统变电站转型升级,通过分析电力系统中变电站的角色转换、功能定位与建设方案,提出1种新型电力系统变电站全生命周期的绿色低碳建设方案。从聚焦电气设备、建筑结构、建筑设备、综合能源等方面,降低变电站全生命周期碳排放,支撑新型电力系统变电站建设及运行全环节绿色低碳。[结果]结果表明:与常规变电站相比,采用所提绿色低碳建设方案后,不仅提高可再生能源开发利用水平,加快电网低碳升级,还能够推动电网设备节能降耗,降低变电站碳排放与运维成本,提高变电站基础资源利用水平,从而提高了变电站的综合经济效益。[结论]文章所提绿色低碳建设方案具有一定的普适性与可复制性,能够为变电站的转型过渡提供理论与实践指导,为电网低碳化发展奠定基础。

关键词: 新型电力系统; 变电站建设; 绿色低碳; 全生命周期; 碳排放

中图分类号: TM7; TM732

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)04-0111-07

DOI: 10.16516/j.cec.2024.4.11

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Analysis on Green and Low Carbon Technologies for New Power System Substations

GU Jingda^{1,2,*}, BAI Xiaohui^{1,2}, LI Wei^{1,2}, WANG Yafeng¹, SONG Baotong^{1,2}

(1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China;

2. Beijing Electric Power Economic and Technical Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China)

Abstract: [Introduction] Under the vision of carbon peak and carbon neutralization, the construction of the new power system substations is imperative. [Method] To promote the transformation of traditional substations to new power system substations, a full-lifecycle green and low-carbon construction scheme for new power system substations was proposed. Focusing on electrical equipment, building structures, building equipment and integrated energy, the carbon emissions throughout the entire life cycle of substations were reduced, and the new power system substations were constructed and operated in a green and low-carbon manner. [Result] The results show that compared with conventional substations, the proposed green and low-carbon construction scheme not only improves the development and utilization of renewable energy and accelerates the low-carbon upgrade of power grids, but also promotes energy saving and consumption reduction of power grid equipment, reduces carbon emissions and O&M costs of substations, and improves the utilization level of basic resources of substations, thus improving the comprehensive economic benefits of the substations. [Conclusion] The proposed green and low-carbon construction scheme has certain universality and replicability. It can provide theoretical and practical guidance for the transformation and transition of substations, and lay the foundation for the low-carbon development of the power grid.

收稿日期: 2023-04-27 修回日期: 2023-07-17

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目“储能在高比例分布式光伏县域配电网的布局优化和协同控制技术研究及应用”(5419-202211066A-1-1-ZN)

Key words: new power system; substation construction; green and low-carbon; full-lifecycle; carbon emission.

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

2020年9月,习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布,(中国)二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和(以下简称“双碳”目标)^[1]。为推动“双碳”目标的实现,中央财经委员会第九次会议上指出:要构建新型电力系统,实施可再生能源替代行动,促使传统电力系统向新型电力系统转型^[2]。北京作为中国的首都和世界首个“双奥之城”,随着其重点功能区域的高水平开发建设,具备能源电力绿色低碳转型的良好基础与条件,有能力、有责任在全国“双碳”行动中发挥示范引领作用,在全球共同应对气候变化中彰显负责任的大国首都形象^[3-4]。

北京市资源禀赋有限,城市能源消费主要靠外部输入,电网结构是典型的受端特大城市电网,外调电占比近70%,本地电源结构单一,外调绿电需求量大,负荷冬夏双高且稳步增长,电能终端能源消费占比低,电力系统调节能力低。然而,北京电网各电压等级的电网具有均衡的供电格局和稳定的运行方式,网架结构坚强可靠。

根据首都能源现状以及电力系统面临的挑战,首都新型电力系统具有清洁低碳、安全可控、灵活高效、智能友好、开放互动等特征。清洁低碳需要依靠高比例的新能源接入,形成以电力为核心的能源供应和消费体系^[5]。安全可控需要构建坚强韧性网架,畅通外来绿电通道,提升应急调峰能力^[6]。灵活高效要求发电侧、负荷侧调节能力强,电网侧资源配置能力强,能够实现各类能源互通互济灵活转换^[7-8]。智能友好需要通过建设可靠智慧的配电网,提升电网智能水平,促进能源与数字技术融合发展^[9-10]。开放互动则要求促进能源互通互济,承载多元负荷运行,从而提高配电网的需求响应能力^[11]。

在上述特征要求下,变电站成为承接电源、电网、负荷等角色的关键枢纽^[12-13],在电力系统中扮演多重重要角色,随着传统电力系统向新型电力系统转型过渡,有必要构建新型电力系统变电站,推动新型电

力系统建设与“双碳”目标实现。鉴于此,本文围绕新型电力系统建设过程中的变电站发展趋势,讨论阐述变电站的角色转变与功能定位,提出1种新型电力系统变电站全生命周期的绿色低碳建设方案,聚焦电气设备、建筑结构、建筑设备、综合能源等方面,降低变电站全生命周期碳排放,支撑新型电力系统变电站建设及运行全环节绿色低碳,为新型电力系统变电站相关研究与建设工作提供借鉴与参考。

1 变电站的角色转变

传统电力系统中,变电站是电力系统的重要组成部分,是电能转换和分配的基础,是重要的枢纽和关键节点。随着传统电力系统向新型电力系统转型升级,变电站由单一功能向多种角色转变,主要受以下几方面因素影响^[14]。

1) 新能源占比逐渐升高:与传统化石能源相比,无碳、清洁、可再生的新能源,如水电、风电、光电、核电、地热等,占比逐步升高。

2) 电力成为多能互补的核心:随着可再生能源的大规模开发,能源路由器、多能转换、能源物联网等能源技术的发展,电力成为多种能源相互转化的核心。

3) 电力产供用独立向产消融合转变:电网结构向“主干电网+中小型电网及微型电网”的柔性互联形态发展,主网架向“合理分区、柔性互联、安全可控、开放互济”发展,配网向“交直流混合柔性配电网+智能微电网”发展,共同促进电力产供用独立向产消融合转变^[15]。

4) 电力由自成一体向多业态融合转变:转变前,为用户提供单向供电服务;转变后,逐步形成发供一体、多元用能、多态服务的模式^[16]。

在上述影响因素下,新型电力系统中变电站具有如图1所示的多重角色与功能定位。

1) 电源角色:变电站由不具备电力生产特征转变为就地利用分布式电源。

传统变电站在电力系统中的作用主要是将发电厂输出的电压转换为用户使用的电压等级,分配输

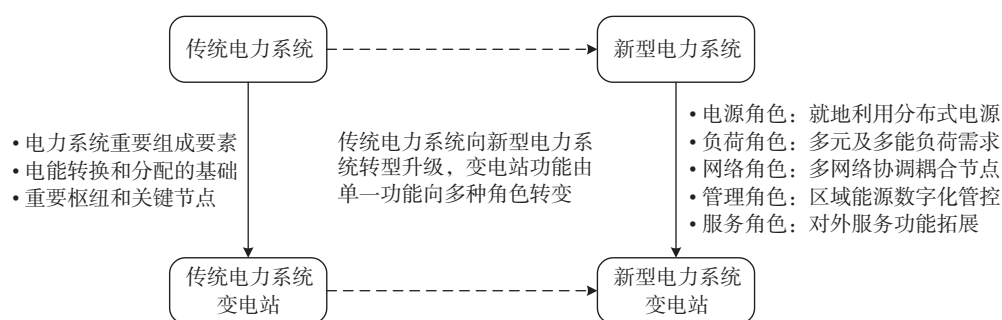


图1 新型电力系统变电站角色转变

Fig. 1 Role transformation of the new power system substations

送到用户使用,并不具备电力生产特征。然而,新型电力系统变电站通过在变电站及附属建筑物等建设分布式光伏或分布式风力发电,为站内提供分布式新能源,并且分布式新能源发电实现站内就近消纳利用,减少站用电或附属建筑用电消耗。

2)负荷角色:变电站由仅满足站用电负荷转变为多元及多能负荷需求。

传统变电站的负荷主要满足基础的站用电需求,如主变压器的冷却设备、蓄电池的充电设备或硅整流电源、油处理设备、照明、检修器械以及供水水泵等用电负荷。新型电力系统变电站结合电动汽车充换电站、边缘数据中心、5G基站等进行建设,因此,需要进一步考虑上述多元及多能新型负荷的用电需求。

3)网络角色:变电站由单纯电能转换和分配转变为多网络协调耦合节点。

传统变电站是电力系统变换电压、接受和分配电能、控制电力的流向和调整电压的电力设施,是将电能逐级分配给各类用户的重要载体。新型电力系统变电站实现了电力网、热力网、算力网及交通网耦合转化。尽管各网络功能不相同,但都具有动力层、物理层、数据层、应用层和业态层5层结构,在同1层,各网络之间有很强的相关性和内在联系,通过分层对接,实现能源、设施、数据、业务和产业融合,发挥网网协同优势,提高效率效益。

4)管理角色:变电站由电力系统节点控制转变为区域能源数字化管控。

传统变电站在站点层面,实现对电力系统的节点管控,是发电厂到用户的重要环节。新型电力系统变电站利用数字化技术手段,实现对区域能源的数字化管控,实现电、冷、热、气等多种能源数据的

全面汇集,充分挖掘能源数据价值,推动能源智慧管理,促进能源利用高效化。

5)服务角色:变电站由不具备对外服务功能转变为对外服务功能拓展。

传统变电站不具备对外服务功能,仅作为电网设施进行电力传输,不参与城市商业服务或者便民服务信息展示。新型电力系统变电站集变电站、充换电站、商业宣传、便民服务等于一体,进行站、人、环境与能源的多维交融,相互联通,实现变电站的业态拓展和价值再造。

2 新型电力系统变电站的定位

2.1 变电站的价值分析

在“双碳”目标的大背景下,新型电力系统变电站作为融合多种资源的新型设施,其价值创造与实现不同于传统的能源生产、转换和消费设施,而是面向多类型主体,呈现多种价值并存、多维度价值共享的态势。

1)价值创造

基础服务上,新型电力系统变电站的价值创造主要体现在能源供应、新能源开发利用等方面。以电力能源供应为出发点,以用户需求为导向,以数字为驱动,创新电力服务方式和服务内容,提升用户用电体验,助力电力营商环境提升优化。

增值服务上,新型电力系统变电站的价值创造主要体现在多能互补、业态拓展等方面,利用先进的技术设备,打造能源管理平台,建设充换电站、边缘数据中心等多站融合场景,拓展变电站商业便民服务,推动新型电力系统变电站的业态拓展和价值再造。

2)价值实现

新型电力系统变电站的价值通过社会、用户、

电网多方共同实现。

社会价值上,城市建设用地资源日益稀缺,而变电站布点均衡、遍及用电负荷中心,具备网络节点优势。新型电力系统变电站充分发挥变电站所处位置的土地集约价值,整合分布式电站、储能站、充电站等分散功能,匹配当地用能需求。

用户价值上,新型电力系统变电站通过对能源的高效管理,引入储能、充换电站、光储柔直一体化等应用场景,通过技术与经济手段引导削峰填谷,降低用电成本。

电网价值上,在大电网的支撑下,协同调度区域内的分布式电源、储能、可控负荷,促使运行方式更灵活,既能够有效应对通道阻塞和上级电源故障,又能够为用户提供安全、不间断的高可靠性电力保障。

2.2 变电站的功能定位

推进新型电力系统建设的过程中,变电站的角色自然转变,其价值与功能定位也随之变化^[17]。不同于传统的能源生产、转换和消费设施,新型电力系统变电站作为融合多种资源的新型设施,其价值创造与实现而是面向多类型主体,呈现多种价值并存、多维度价值共享的态势^[18]。

如图 2 所示,首都新型电力系统变电站的功能定位主要有 4 个方面。

1) “双高”新型电力系统的支撑新节点:利用先进的信息通信技术及安全可靠的电力设备,满足大规模新能源与电力电子设备接入的物理设施需求和系统调控需求,保障电网的安全稳定水平。同时,利用光储柔直一体化应用、站内新能源发电及就地利

用等应用实现新型电力系统变电站源网荷储互动,成为“双高”新型电力系统的支撑节点。

2) 率先实现能源具备零碳排放条件的共享新平台:加快实现消费侧具备零碳排放条件,推动终端消费能源电气化,结合碳足迹的追踪与溯源,提高能源利用效率,潮流均衡降损,使得能源生产快速清洁化,能源消费高度电气化,能源配置日趋平台化,能源利用日益高效化。

3) 提供高效优质供能服务的管控新中心:拓展综合能源、碳排放监测等服务功能,实现多种能源融合互补,推动高效清洁、安全经济的能源体系建设,满足变电站建设、运行以及运维过程中的碳排放分析、监测和管理,满足政府对主要碳排放单位的监测需求,促使电网业务效益的显著提升,形成供能服务高效优质的管控中心。

4) 能源数字化多元要素资源融合新枢纽:融合能源互联网、数字中心等多元要素,按照电网发展布局,推动由传统电网企业向能源互联网企业转变,积极培育新业务、新业态、新模式、延伸产业链、价值链,容纳其它资源信息接入变电站,构建能源数字化多元要素资源融合枢纽。

3 新型电力系统变电站的建设方案

根据新型电力系统变电站的新角色与新功能定位,提出 1 种新型电力系统变电站全生命周期绿色低碳的建设方案,聚焦电气设备、建筑结构、建筑设备、综合能源等方面,降低变电站全生命周期碳排放,支撑新型电力系统变电站建设及运行全环节绿色低碳^[19-21]。

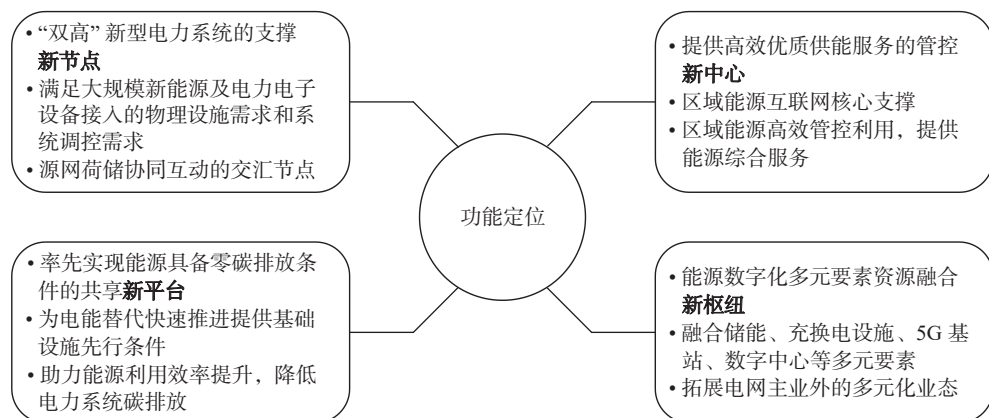


图 2 新型电力系统变电站的功能定位

Fig. 2 Functional orientation of the new power system substations

以北京市怀柔区永胜 110 kV 变电站为例,对其工程实践过程进行分析与讨论。永胜 110 kV 变电站位于北京市怀柔区科学城区域,怀柔科学城作为“十二大特色示范区”之一,涵盖了地上、地下变电站、开关站、综合管廊、电力隧道等多种类电力设施,主配网接线形式多样,运行方式多变,能源供应多元,是构建首都新型电力系统的重要窗口。基于永胜 110 kV 变电站,将新型电力系统变电站绿色低碳技术与建设需求相互结合,分析其中的关键技术。

3.1 电气设备

变电站内采用天然酯绝缘油的环境友好型变压器,此类变压虽然不会降低防火要求,但天然绝缘油变燃点高,同时不会对环境造成影响,为建设绿色环保低碳的新型变电站提供技术方案^[22-23]。

灯具采用 LED 灯具,实际效率约是金卤灯的 2.42 倍,荧光灯的 2.78 倍。实现“绿色照明”的标准设计,电能消耗相较于传统灯具大幅度降低,热量排放少,减小空调能耗,实现二次节能。

目前,城市户内变电站 110 kV 及以上电压等级的配电装置主要选用气体绝缘金属封闭开关设备(Gas Insulated Switchgear, GIS),其内部采用一定压力的 SF₆ 气体作为绝缘介质。在变电站运行过程中,由于设备故障, SF₆ 气体产生有毒分解物排放到大气中,造成环境污染。因此,绿建融合的零碳化变电站采用混合环保气体无 SF₆ 的 GIS,从源头入手,显著减少设备碳足迹,降低对环境的污染;相比于含 SF₆ 的 GIS,温室气体当量排放减少幅度较大。

3.2 建筑结构

屋面采用保温防水一体化材料及施工工艺,由水泥、膨胀珍珠岩加特殊防水添加剂晶体,混合成防水保温砂浆,铺设在屋面上,逐层施工,构造紧密结合为整体,兼有保温层、防水层功能。

对于变电站有保温要求的建筑物外窗采用低辐射玻璃隔热膜及隔热夹胶玻璃。通过控制红外反射率的溅射技术、纳米涂布技术、紫外阻隔技术等,降低建筑物窗体热损失,与低辐射玻璃(low-E 玻璃)相比,能够进行低成本节能。此外,钢结构构件连接节点均采用高强螺栓连接,实现现场施工无焊接作业的同时,提高建筑装配率,达到绿色建造。

在合理位置开窗,并计算合理开窗面积,有效组织建筑内部气流流动,在不利用通风设备的情况下,

达到建筑通风次数要求。建筑遮阳是在建筑外墙设置百页、遮阳棚等构件,从而减少房间太阳辐射热,控制房间温度。

3.3 建筑设备

利用雨水入渗海绵技术,在站区内设透水铺装,减少雨水径流,并且根据变电站的占地面积与规模设置雨水调蓄池,把雨水径流的高峰流量暂留池内,待最大流量下降后再从调蓄池中慢慢排出,将雨水处理后作为多种用途的非饮用水,既能规避雨水洪峰,提高雨水利用率,又能控制初期雨水径流污染。

围绕变电站噪声控制需求进行噪声治理,使变电站噪声目标控制在环评要求范围内,兼顾变电站设备的安全运行,有效提高变电站全生命周期的综合性能和技术水平,促进资源节约型、环境友好型变电站的建设运维。

3.4 综合能源

在变电站、附属建筑物的屋顶、站内空地安装分布式光伏或分布式风力发电,为站内提供分布式新能源发电,并且实现站内就近消纳利用,减少站用电或附属建筑用电消耗,使站内及附属建筑的分布式新能源发电与站用电及附属建筑用电消耗平衡。

4 结论

通过分析电力系统中变电站的角色转换、功能定位与建设方案可知,新型电力系统变电站的建设与发展是大势所趋。提出 1 种新型电力系统变电站全生命周期的绿色低碳建设方案,通过绿色低碳技术与设备以及数字化新技术的应用,建设具有零碳化的绿建融合新型电力系统变电站,不仅提高可再生能源开发利用水平,加快电网低碳升级,还能够推动电网设备节能降耗,降低变电站碳排放与运维成本,提高变电站基础资源利用水平,从而显著提升新型电力系统变电站的综合效益,推动大国首都、国际一流的和谐宜居之都的发展。

参考文献:

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.
XI J P. Address at the general debate of the 75th United Nations General Assembly [J]. The bulletin of the state council of the People's Republic of China, 2020(28): 5-7.
- [2] 习近平. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议

- [EB/OL]. (2021-03-15) [2023-04-03]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm.
- XI J P. The ninth meeting of the Central Financial Leading Group [EB/OL]. (2021-03-15) [2023-04-03]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm.
- [3] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1671. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221407.
- SHU Y B, ZHAO Y, ZHAO L, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1663-1671. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221407.
- [4] 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学问题与研究框架 [J]. 电网技术, 2022, 46(3): 821-833. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2550.
- KANG C Q, DU E S, LI Y W, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems [J]. *Power system technology*, 2022, 46(3): 821-833. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2550.
- [5] 黄雨涵, 丁涛, 李雨婷, 等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊1): 28-51. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211016.
- HUANG Y H, DING T, LI Y T, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(Suppl.1): 28-51. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211016.
- [6] 中国电力报. 北京电力打造首都新型电力系统创新示范区 [EB/OL]. (2022-04-29) [2023-04-03]. https://cpnn.com.cn/news/nyqy/202204/t20220429_1508107.html.
- China Electric Power News. State Grid Beijing Electric Power Company has built a demonstration area for innovation of the capital's new power system [EB/OL]. (2022-04-29) [2023-04-03]. https://cpnn.com.cn/news/nyqy/202204/t20220429_1508107.html.
- [7] 吴珊, 边晓燕, 张菁娴, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1662-1677. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211730.
- WU S, BIAN X Y, ZHANG J X, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving flexibility of new power system [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2023, 38(6): 1662-1677. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211730.
- [8] 武昭原, 周明, 王剑晓, 等. 双碳目标下提升电力系统灵活性的市场机制综述 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7746-7763. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212117.
- WU Z Y, ZHOU M, WANG J X, et al. Review on market mechanism to enhance the flexibility of power system under the dual-carbon target [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(21): 7746-7763. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212117.
- [9] 马钊, 张恒旭, 赵浩然, 等. 双碳目标下配用电系统的新使命和新挑战 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6931-6944. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.213091.
- MA Z, ZHANG H X, ZHAO H R, et al. New mission and challenge of power distribution and consumption system under dual-carbon target [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(19): 6931-6944. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.213091.
- [10] 陈皓勇, 谭碧飞, 伍亮, 等. 分层集群的新型电力系统运行与控制 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 581-594. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.213324.
- CHEN H Y, TAN B F, WU L, et al. Operation and control of the new power systems based on hierarchical clusters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2): 581-594. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.213324.
- [11] 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]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20210809.
- HAN X Q, LI T J, ZHANG D X, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals [J]. *High voltage engineering*, 2021, 47(9): 3036-3046. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20210809.
- [12] 王刘旺, 周自强, 林龙, 等. 人工智能在变电站运维管理中的应用综述 [J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 1-13. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20191227001.
- WANG L W, ZHOU Z Q, LIN L, et al. Review on artificial intelligence in substation operation and maintenance management [J]. *High voltage engineering*, 2020, 46(1): 1-13. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20191227001.
- [13] 汤振鹏, 刘泽庭, 胡中, 等. 移动变电站技术进展综述 [J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3415-3423. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1741.
- TANG Z P, LIU Z T, HU Z, et al. Overview on technology progress in mobile substation [J]. *Power system technology*, 2019, 43(9): 3415-3423. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1741.
- [14] 潘博, 张弛, 张华, 等. 数字孪生变电站在电网企业数字化转型的探索与应用 [J]. 电力与能源, 2020, 41(5): 558-560, 590. DOI: 10.11973/dlyny202005006.
- PAN B, ZHANG C, ZHANG H, et al. Exploration and application of digital twin substation in digital intelligent transformation of power grid enterprises [J]. *Power & energy*, 2020, 41(5): 558-560, 590. DOI: 10.11973/dlyny202005006.
- [15] 齐宁, 程林, 田立亭, 等. 考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 193-207. DOI: 10.7500/AEPS20191030003.
- QI N, CHENG L, TIAN L T, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load [J]. *Automation of electric power systems*, 2020, 44(10): 193-207. DOI: 10.7500/AEPS20191030003.
- [16] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构

- 与评估体系综述 [J]. *高电压技术*, 2022, 48(11): 4330-4341. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20220532](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220532).
- LI J L, GUO Z D, MA S L, et al. Overview of the "source-grid-load-storage" architecture and evaluation system under the new power system [J]. *High voltage engineering*, 2022, 48(11): 4330-4341. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20220532](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220532).
- [17] 胡帆. 常规变电站如何向综合能源站转型升级 [J]. *中国电力企业管理*, 2018(1): 54-57. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3361.2018.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3361.2018.01.013).
- HU F. How do conventional substations transform to integrated energy stations [J]. *China power enterprise management*, 2018(1): 54-57. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3361.2018.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3361.2018.01.013).
- [18] 赵冬梅, 徐辰宇, 陶然, 等. 多元分布式储能在新型电力系统配电侧的灵活调控研究综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(5): 1776-1798. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.220778](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.220778).
- ZHAO D M, XU C Y, TAO R, et al. Review on flexible regulation of multiple distributed energy storage in distribution side of new power system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1776-1798. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.220778](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.220778).
- [19] 钱康, 苗安康, 周江山, 等. “双碳”背景下多站融合方案及关键技术研究 [J]. *供用电*, 2022, 39(9): 11-17, 34. DOI: [10.19421/j.cnki.1006-6357.2022.09.003](https://doi.org/10.19421/j.cnki.1006-6357.2022.09.003).
- QIAN K, MIAO A K, ZHOU J S, et al. Research on the fusion scheme and key technology of multi-station integration under the targets of carbon peak and carbon neutrality [J]. *Distribution & utilization*, 2022, 39(9): 11-17, 34. DOI: [10.19421/j.cnki.1006-6357.2022.09.003](https://doi.org/10.19421/j.cnki.1006-6357.2022.09.003).
- [20] 朱克亮, 张李明, 石雪梅, 等. 基于“双碳”目标的变电站建设过程中“永临结合”探索与实践 [J]. *电力与能源*, 2022, 43(1): 13-17. DOI: [10.11973/dlyny202201004](https://doi.org/10.11973/dlyny202201004).
- ZHU K L, ZHANG L M, SHI X M, et al. Exploration and practice of permanent-temporary combination during substation construction based on "dual carbon" target [J]. *Power & energy*, 2022, 43(1): 13-17. DOI: [10.11973/dlyny202201004](https://doi.org/10.11973/dlyny202201004).
- [21] 王安, 薛峰, 聂建春, 等. 智能变电站模块化建设在内蒙古电网的应用 [J]. *电力勘测设计*, 2022(8): 39-44. DOI: [10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2022.08.008](https://doi.org/10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2022.08.008).
- WANG A, XUE F, NIE J C, et al. Application of modular construction of smart substation in Inner Mongolia power grid [J]. *Electric power survey & design*, 2022(8): 39-44. DOI: [10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2022.08.008](https://doi.org/10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2022.08.008).
- [22] 孙国庆, 雷鸣, 李男, 等. 国内地下变电站建设现状与发展趋势 [J]. *电力勘测设计*, 2020(1): 68-73. DOI: [10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2020.01.014](https://doi.org/10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2020.01.014).
- SUN G Q, LEI M, LI N, et al. The current station and development trends of underground substation construction [J]. *Electric power survey & design*, 2020(1): 68-73. DOI: [10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2020.01.014](https://doi.org/10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2020.01.014).
- [23] 夏泉, 杨然静. 城市户内变电站设计建设与发展趋势 [J]. *电力勘测设计*, 2018(增刊2): 24-28. DOI: [10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2018.s2.006](https://doi.org/10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2018.s2.006).
- XIA Q, YANG R J. Construction & prospect of urban indoor substations [J]. *Electric power survey & design*, 2018(Suppl.2): 24-28. DOI: [10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2018.s2.006](https://doi.org/10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2018.s2.006).

作者简介:



顾靖达

顾靖达(第一作者, 通信作者)

1994-, 女, 工程师, 博士, 主要从事电力系统规划等方面工作(e-mail: mingmei_gu@sina.com).

(编辑 孙舒)