

“双碳”目标下新型电力系统典型特征与发展挑战综述

范荣全¹, 杨云², 许珂¹, 胥威汀¹

(1.四川省新型电力系统研究院有限公司, 四川 成都 610041; 2.国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要:构建新型电力系统是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要举措。为了更好地开展新型电力系统的规划发展研究工作,从多个角度阐述了对新型电力系统的认识,提出了新型电力系统的典型特征;并进一步从管理与体制机制、经济性、技术性3个方面,剖析了当前构建新型电力系统面临的主要挑战。

关键词:碳达峰、碳中和; 新型电力系统; “源-网-荷”侧典型特征

中图分类号: TM 711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)06-0010-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230602

A Review of Typical Characteristics and Development Challenges of New Power System Considering "Dual Carbon" Goal

FAN Rongquan¹, YANG Yun², XU Ke¹, XU Weiting¹

(1. Sichuan New Electric Power System Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The construction of new power system is an important measure to achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality. The differences between new power system and traditional power system are analyzed. Afterwards, the understanding of new power system is described from multiple angles, and the typical characteristics of new power system are put forward. Finally, the main challenges for the construction of new power system are analyzed from the management, economy and technology, which will be a kind of reference for the planning and research of new power system.

Key words: carbon peaking and carbon neutrality; new power system; typical characteristics of "source-grid-load" side

0 引言

随着全球气候关注度以及可持续发展呼声的提高,能源转型成为各国政府和能源行业的重要议题,而电力系统作为关键的能源基础设施,扮演着重要的角色。在实现“碳达峰、碳中和”目标的指引下,构建以新能源为主体的新型电力系统应运而生^[1-4]。

为应对全球气候变化和可持续发展,中国明确提出2030年“碳达峰”和2060年“碳中和”的目标。在实现“双碳”目标的战略背景下,旧有的电力系统无法满足日益严格的碳排放要求。为了应对这一挑

战,构建新型电力系统已成为不可避免的趋势。

为此,中国已采取了诸多政策和措施,包括鼓励可再生能源的开发和利用、推动能源转型以及加强能源效率等,促进新型电力系统的建设。同时,在智能电网技术和能源储存技术方面加大研发,以提高电力系统的灵活性和智能化水平,实现供需平衡和能源管理的优化。

下面在相关新型电力系统研究的基础上,结合国家能源政策与形势的最新变化,对电力系统的发展历程、新型电力系统的认识、典型特征及构建新型电力系统面临的挑战4个方面进行了综述研究,以期“双碳”目标下新型电力系统的规划发展及相关研究工作的开展提供参考与借鉴。

1 认识新型电力系统

1.1 新型电力系统的多层含义

在国家能源政策与形势变化的背景下,对新型电力系统的认识也不断更新。目前还没有针对新型电力系统的统一定义和描述。

部分大型能源企业提出了相关的认识:国家电网以新能源为主要供给,形成了以能源电力安全为基本前提,以满足经济社会发展的电力需求为首要目标的结构化认识^[5];南方电网从绿色高效、柔性开放和数字赋能^[6]3个方面体现了对新型电力系统的认识。

中国科学院院士提出新型电力系统包含以下主要特征:高比例可再生能源、高比例电力电子装备、多能互补综合能源、信息物理融合智慧能源、清洁高效低碳零碳、高韧性本质安全可靠。国家气候战略中心学术委员会采用清洁化、低碳化和智能化来概括传统电力系统和新型电力系统的本质区别。清华四川能源互联网研究院提出了新型电力系统的“四新”,即新结构、新形态、新技术以及新机制。

2022年5月《新型电力系统导论》提出:新型电力系统以绿色低碳、安全可控、智慧灵活、开放互动、数字赋能、经济高效为基本特征^[7],结构上有更强新能源消纳能力,形态上源网荷储深度融合互动,技术上各环节数字化和智能化,经济上电力和碳市场协同发展。

1.2 哲学中的新型电力系统

中国传统文化与哲学观点一脉相承,讲究矛盾的双方既是相互对立,又是相互依存的,不能消除任何一方,须达到相互平衡。

电力系统的对立统一关系如图1所示。电力系统的发展来源于需求,发展与需求是相互促进依存的关系。直流和交流是相互对立又相互依赖的,没有绝对的优劣之分,应在不同应用场景下发挥最佳优势。电力的供应和需求是既相互对立又相互依赖的。电力系统的发展与技术进步紧密相关,而技术的发展并不是单一走向、单一维度、一往直前的,而是有上升、有回落,有横线、有曲线,呈螺旋式上升发展的。

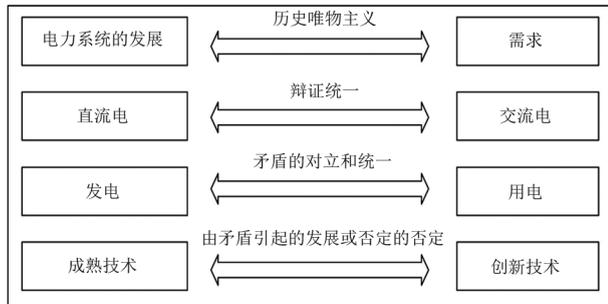


图1 电力系统的对立统一关系

在电力系统发展的过程中,安全-经济-环保的“矛盾三角形”将长期存在,如图2所示。在新型电力系统中:从安全角度考虑,需要解决系统转动惯量下降、宽频振荡以及高/低电压穿越等问题,需要通过合理设计和控制策略来解决,以确保系统的稳定运行和电力供应的安全性;从环保角度,需要在能源安全稳定保供的前提下,逐步稳步替代传统能源,实现新能源的大规模应用和发展,同时不断释放负荷侧电气化水平潜力;在经济方面,不仅要考虑到新能源发电、电网接入以及系统调节的成本,还应顾及到灵活调节资源、清洁能源外送以及环境属性所带来的效益。三者相互对立又相互统一,需要找到最佳的平衡点,才能实现可持续发展。

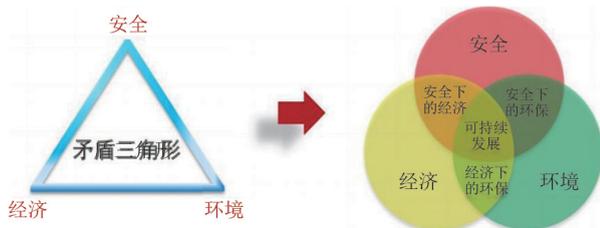


图2 安全-经济-环保“矛盾三角形”

哲学方法论与人文结合指出新型电力系统的发展与人类社会进步、先进技术迭代以及消费行为习惯紧密相关。另外,哲学和传统文化为新型电力系统的发展指明了方向,即电力系统的技术发展是与需求紧密相关、相互促进的,通过如交直流之争等矛盾引起的发展或否定之否定,最终将呈螺旋式迭代上升。

2 新型电力系统的典型特征

与传统电力系统相比,新型电力系统在电源侧、电网侧、负荷侧具有新的典型特征。

2.1 电源侧典型特征

1) 电源类型发生转变

以往电力系统使用的一次能源主要是化石能源,而在构建的新型电力系统中,新能源将逐步成为新的电源主体,主要包含风能、太阳能等清洁能源。

2) 电源布局发生转变

根据中国风能、太阳能等新能源的资源分布情况,新能源在开发过程中主要以集中式、分散式为主。

2.2 电网侧典型特征

在主网侧将呈现更大规模的超、特高压交直流互联。超大规模同步电网改异步电网,设备也更加智能化、小型化、分散化。

同时,随着新型源荷主体的大量接入,配电网形态特征也将发生重大变化。从电源结构来看,具有“主网+分布式电源”、储能^[8]、能源产消者、供给多元化等新要素;网架结构和运行方式有变化,电力潮流从单向变为双向^[9];负荷类型方面,各类柔性负荷接入使负荷特性愈趋复杂;电力装备方面,大量电力电子装备并网,各环节的电力电子化进程加快。

新型电力系统通过运用 5G、人工智能、大数据、数字孪生等新一代信息通信技术^[10],达到广泛互联互通、智能友好互动以及全局协同计算的目的,实现可控负荷智能感知、虚拟电厂自动响应、分布式电源智慧上网,从而形成如图 3 所示的数字化主动配电网,以提升电网的智能化水平。

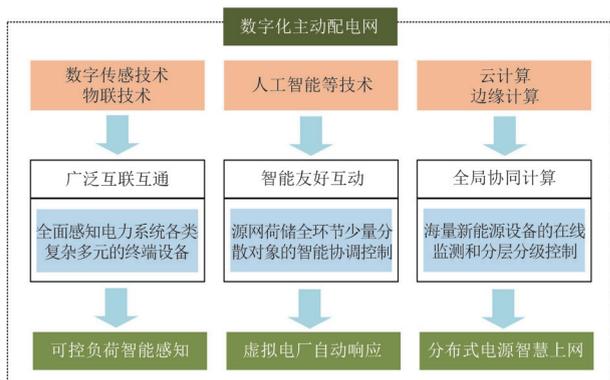


图 3 数字化主动配电网框架

另外,新型配电网具备灵活调节能力,能够更好地利用负荷侧资源,通过源网荷储多向互动的方式,进一步加强电源、电网和负荷之间的协调与交互。通过引入虚拟电厂等一体化聚合模式,新型配电网能够参与电力市场的中长期交易、辅助服务交易和现货交易等。这样的安排可以实现电网资源的全局统筹、跨区协同和区域自治,形成一个如图 4 所

示的多元源荷储聚合的新型能源自治体系,促进能源的高效利用和可持续发展。



图 4 多元源荷储聚合的新型能源自治体系

2.3 负荷侧典型特征

传统负荷体量不断增大,用户用电需求也越来越高。近年来,随着经济社会发展和人们生活水平提高,传统负荷体量庞大,如空调的社会保有量估计约 5.4 亿台。2022 年,经济复苏带来用电高需求,全社会用电量 8.6 PWh,同比增长 3.6%;据中电联预测,2023 年全社会用电量将达到约 9.15 PWh,全年增速在 6% 左右^[11]。

新型负荷如雨后春笋般快速发展。近年来,分布式电源、电动汽车和储能等新型负荷快速发展,在配电侧接入的容量越来越大,更多新型用能场景涌现。预计到 2025 年,电动汽车作为移动分布式储能装置,其充换电服务电量将超过 50 TWh。因此可以预见,新型负荷的比例在未来会继续增加,具备高随机性、高灵活性和高可靠性的特点,传统负荷与新型负荷将长期交织并存。

在某些场景下负荷可以转换为电源。分布式电源、用户侧储能、电动汽车反向放电^[12]、虚拟电厂^[13]等逐步应用推广,部分负荷不再是单一流向而是参与电网侧的双向能量互动。同样的,抽水蓄能通过消耗电能,在低负荷时抽水至上水库储能,并在高负荷时放水发电,实现了双向能量互动。

3 构建新型电力系统面临的挑战

随着新型电力系统电源侧、电网侧、负荷侧新特征的出现,构建新型电力系统也将面临许多新的挑战^[14-16],主要包括管理及体制机制、经济性、技术性三类挑战。

3.1 管理及体制机制挑战

1) 经济属性、社会属性和政治属性交织带来的关联影响问题。新型电力系统集经济属性、社会属

性和政治属性于一体,引起新的更为复杂的管理及体制机制挑战,超越通常的工程技术经济研究领域和理论。

2) 新型电力系统安全、经济、环保的对立和统一问题。如何在保障能源安全供应(保供应、保安全)的前提下,经济高效地实现双碳目标,是一个复杂的系统性问题,经济-安全-环保“矛盾三角形”将长期存在。

3) 适应新型电力系统发展的配套政策、机制问题。《新型电力系统发展蓝皮书》^[17]提出:配套政策与体制机制是构建新型电力系统的制度保障,是充分发挥市场在资源配置中的决定性作用。

4) 非对称信息带来的管理技术和利益分配博弈问题。新型电力系统背景下,用户数据更加多元化,电网在需要获取传统的用户负荷数据外,还需要获取光伏、储能等数据,在获取过程中由于技术、管理等原因可能会出现与用户之间信息不对称的问题,进而导致产生难以解决的正和博弈问题。

3.2 经济性挑战

1) 目前,新型储能发展亟需成本疏导。锂、钒等电化学储能和盐穴、飞轮等物理储能设施均缺乏高效的成本回收机制。特别是氢能源和燃料电池等虽清洁低碳、存用灵活,但成本高且配套设施不完善,目前普及程度有限。然而,随着市场规模扩大以及政府对储能技术的持续支持,氢能发电技术将更加成熟、成本也会大幅降低。在未来,预计氢能等技术可能在电力行业得到广泛应用,例如小型便携式氢储能。当然这种发展趋势也将给电力系统的安全生产运营提出巨大挑战。

2) 微电网“自平衡”导致的经济性问题。微电网“自平衡”是能源电力发展新的形态,是行业适应社会发展的趋势之一。但能源电力也是国家安全的基本要素,如何在满足清洁能源分布式开发与就地消纳的基础上,保障缺电等特殊时期的供电需求和成本的合理疏导,需要统筹兼顾其政治、社会和经济性。

3) 新型电力系统发展的投资和收益的平衡问题。新型电力系统规划、建设、运行等环节的投资决策对于其可持续发展至关重要。在开展大规模特高压建设、电网改造、电网智能化设备配置、储能等灵活性资源的投资和考虑多元主体参与电力市场建设等多方面,需要兼顾投资和收益的平衡。

4) 人工智能等前沿技术的投资收益问题。人

工智能等技术的不断成熟,使其将逐步渗透到电力系统发电、输电、配电、用电等各个环节,实现提升设备工作效率、辅助智能监控和决策、解决人工误操作等问题。这些环节涉及的设备规模和消耗的人力资源都非常庞大,形成一定的市场规模后,能带来不错的投资收益。

3.3 技术性挑战

1) 分布式光伏接入配电网带来的挑战^[18]。分布式光伏电源接入配电网是一种新兴的能源发电方式,可以有效地利用太阳能资源并分散能源生产,减少对传统能源的依赖。但同时也给配电网带来了一些问题。

首先,分布式光伏电源接入配电网可能引发电压调整问题。由于光伏电源的功率波动性较大,接入配电网后,可能会导致电压不稳定,尤其在光照强度变化较大的情况下。因此,需要配电网进行相应的电压调整和稳定措施,以确保电力供应的可靠性和稳定性。其次,保护配置是分布式光伏电源接入配电网所面临的另一个问题。在传统的电力系统中,保护配置主要是针对集中式发电系统设计的,而分布式光伏电源的接入会导致电力流向的变化且不确定性增加。因此,配电网需要重新评估保护配置,确保对分布式光伏电源的故障进行及时的隔离和保护,以防止故障扩散并影响整个配电网的运行。此外,分布式光伏电源接入配电网还涉及电能质量、电量计量计费 and 供电可靠性等问题。

总而言之,分布式光伏电源接入配电网为能源领域带来了新的发展机遇,但也面临着一系列问题;需要合理的规划和技术措施来解决相关问题,实现分布式光伏电源与配电网的有机融合,推动清洁能源的可持续发展。

2) 新能源出力损失与电能质量问题^[19]。在新能源发电装机规模达到一定比例后,在通常气象变化下存在新能源出力损失以及与其他能源发电的补位能量平衡和电能质量问题。图5展示了在一天中风能、光伏等新能源的发电量与电网的实际出力及负荷曲线,新能源发电并网会带来间歇性和波动性的问题,同时还可能存在孤网问题、谐波问题等,影响电网的电能质量。

3) 适应新型电力系统发展的各类发电机组配置比例问题。新型电力系统的核心特征之一,是新能源如风能和太阳能等,逐渐成为主要的电力供应

来源。这种转变是为了减少对传统化石燃料的依赖,降低碳排放,实现清洁能源的可持续利用。而新能源发电的随机性、波动性以及带来的安全问题都需要一定的调节性资源进行补充。因此,为了确保新型电力系统的安全和稳定运行,需要适量的水电、火电等可控电源作为基石,提供基础的调节服务,同时,一定配比的储能也将发挥全时间尺度的系统调节能力,以满足系统的需求。

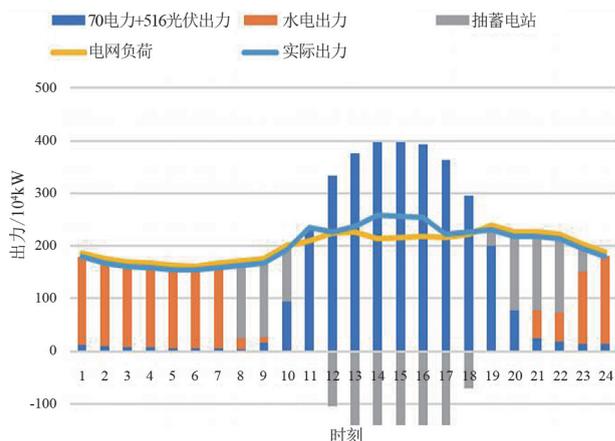


图 5 新能源参与的电网出力及负荷曲线

4) 多重复杂特性电源共存状态下发电连续性出力的协同控制问题。新型直流汇集接入技术能解决新能源间歇性问题,高比例新能源将极大增加电源侧的不可控性。传统电力系统多种电源简单叠加的形态将不再适应新型电力系统的要求,风光互补、新能源+水电、新能源+储能、新能源+氢能、风光水火储一体化等多元协同开发模式的创新能更好地实现多时间尺度下的优化配置。

5) 超大范围、超大规模同步电网的系统稳定^[20]、短路电流和安全问题。从安全性角度来看,大同步电网具有短路电流问题突出和大面积停电的风险。由于大同步电网存在大量的电力设备和复杂的电力传输网络,发生短路故障时会导致巨大的短路电流,对电力设备和系统造成严重的冲击;发生故障或其他意外情况时,可能会导致整个区域范围内的停电。同时,大同步电网还存在连锁反应事故的问题。与中小同步电网相比,大同步电网的影响范围更广,可能会造成巨大的损失。

此外,还存在交直流并存和大量电力电子元器件所带的协同控制与系统振荡问题、新型电力系统抵御自然灾害的能力问题、多重因素耦合下的总能量需求预测问题、适应新型电力系统发展的储能布

局与配置问题^[21]、大规模储能带来的协同控制问题以及大规模、大容量、快充动力电池对配电网带来的问题等。

4 结 语

综上所述,新型电力系统是由多种复杂特性电源共存,具有自主可控的超大规模交直流电能传输分配网络,庞大灵活多变的的不同能量形态转换终端集群,集经济属性、社会属性、政治属性为一体的高安全可靠的能量转换、传输和分配的超大规模智慧系统。

上面从电力系统的发展历程和形势入手,提炼了关于新型电力系统的认知,建议采用“对立统一、相互促进”的发展观来看待并指导新型电力系统建设;并总结了新型电力系统在电源侧、电网侧、负荷侧的典型特征,梳理了电源类型和布局、主配网形态、多要素接入与聚合、源网荷储互联互通等重要转变趋势;最后,从管理及体制机制、经济性、技术性 3 个角度阐述了构建新型电力系统所面临的挑战,也从中捕捉到了一系列关键的发展机遇和突破重点,为今后的相关研究提供参考和建议。

参考文献

- [1] 舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.
- [2] 徐三敏,张云飞,赵添辰,等.“双碳”目标下新型电力系统发展综述[J].水电与抽水蓄能,2022,8(6):21-25.
- [3] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
- [4] 华志刚,侯勇,吴水木,等.我国电力行业碳达峰实施路径研究[J].能源,2022(4):44-49.
- [5] 袁士超,朱耿,严勇,等.台湾省 303 大停电后面向新型电力系统建设的思考与建议[J].农村电气化,2022(10):30-34.
- [6] 郭卫华.绿色高效 柔性开放 数字赋能[N].中国电力报,2022-04-15(1).
- [7] 电力装备助力“碳达峰·碳中和”途径与措施研究(上)[J].电器工业,2022(6):1-7.
- [8] 张文亮,丘明,来小康.储能技术在电力系统中的应用[J].电网技术,2008,32(7):1-9.

- [14] MITRIDATI L, TAYLOR J A. Power systems flexibility from district heating networks [C]//Power Systems Computation Conference, 2018:1-7.
- [15] 韩赫,张沛超,杜炜,等.量调节方式下区域热电系统的联合最优潮流[J].电力系统自动化,2021,45(2):30-36.
- [16] HUANG S J, TANG W C, WU Q W, et al. Network constrained economic dispatch of integrated heat and electricity systems through mixed integer conic programming[J]. Energy, 2019, 179: 464-474.
- [17] LIU X Z, WU J Z, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
- [18] MCCORMICK Garth P. Computability of global solutions to factorable nonconvex programs: Part I—Convex underestimating problems [J]. Mathematical Programming, 1976, 10(1): 147-175.
- [19] CAO Y, WEI W, WANG J H, et al. Capacity planning of energy hub in multi-carrier energy networks: A data-driven robust stochastic programming approach [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 3-14.
- [20] 赵剑波,王蕾.“十四五”构建以新能源为主体的新型电力系统[J].中国能源,2021,43(5):17-21.
- [21] 葛晓琳,王云鹏,朱肖和,等.计及差异化能量惯性的电-热-气综合能源系统日前优化调度[J].电网技术,2021,45(12):4630-4642.

作者简介:

邓靖微(1996),女,硕士,助理工程师,从事电力系统规划工作;

曹敏琦(1995),女,硕士,助理工程师,从事电力系统规划工作;

晁化伟(1995),男,硕士,工程师,从事新能源并网工作;
陈大为(1993),男,博士研究生,研究方向为电力能源系统规划与运行;

胡涛(2000),男,硕士研究生,研究方向为电力系统规划。

(收稿日期:2023-06-06)

(上接第 14 页)

- [9] 杨媛平,杨扬,全相军,等.“光伏扶贫”场景下配电网台区电压质量综合治理方案研究[J].浙江电力,2022,41(9):40-49.
- [10] 江秀臣,许永鹏,李曜丞,等.新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J].高电压技术,2022,48(1):1-10.
- [11] 中电联:2023年度全国电力供需形势分析预测报告[EB/OL].(2023-1-19)[2023-06-30].http://www.indaa.com.cn/zz/nypl/=nyp_l202302/202302/P020230216513268767807.pdf.
- [12] CHOENG Chivon, KRY Meng Leang, LEE Young-II. Robust Tracking Control of a Three-Phase Bidirectional Charger for Electric Vehicle [J/OL]. Journal of Advanced Transportation, 2022, Carpus ID: 251996578 [2023-06-30]. <https://semanticscholar.org/parer/Robust-Tralking-Control-of-a-Three-Phase-Charger-Choeng-Kry/02594013452c46c2e72853fac44ce1197c9cbfb3>.
- [13] 张慧,李健,吴青青,等.虚拟电厂通信网络体系架构及通信方式适配方法[J].电力信息与通信技术,2022,20(12):47-54.
- [14] 张逸,吴逸帆,陈晶腾.新型电力系统背景下电压暂降风险评估技术挑战与展望[J].电力建设,2023,44(2):15-24.
- [15] 马睿,程硕.新型电力系统面临的挑战以及有关机制探讨[J].工程建设与设计,2022(23):242-244.
- [16] 周劼英,张晓,邵立嵩,等.新型电力系统网络安全防护挑战与展望[J].电力系统自动化,2023,47(8):15-24.
- [17] 国家能源局.新型电力系统发展蓝皮书[M].北京:中国电力出版社,2023.
- [18] 林原,顾涛,仇向东,等.分布式光伏对户用配电网电能质量影响研究[J].电子器件,2023,46(2):561-566.
- [19] 王黄磊,江涛,吴玉玲,等.计及新能源并网发电的配电网电能质量分析[J].电气自动化,2021,43(4):20-23.
- [20] 郭小江,郑超,尚慧玉,等.西藏中部同步电网安全稳定研究[J].电网技术,2010,34(6):87-92.
- [21] 李相俊,马会荫,姜倩.新能源侧储能配置技术研究综述[J].中国电力,2022,55(1):13-25.

作者简介:

范荣全(1966),男,硕士,正高级工程师,研究方向为柔性输电、智能电网、设备在线监测、电网防灾减灾、新型电力系统等方面的科学理论和工程应用;

杨云(1975),男,硕士,高级工程师,研究方向为新型电力系统、智慧配电网等方面的规划与应用;

许珂(1991),女,硕士,工程师,研究方向为新型电力系统发展模式 and 数字化转型。

(收稿日期:2023-07-12)