

上海具有人口密集、产业密集、负荷密集、碳排密集的特点，上海电网是一个典型的外部馈入强、本地机组弱、资源禀赋低、新兴负荷占比高、供电需求多样的超大型受端城市电网，科技创新需求旺盛。

# 上海：超大型城市电网如何“反脆弱”

文 / 陈昊南 时志雄

2月22日，35千伏春漕超导3E346的设备主人通过高温超导电缆监测平台开展巡视，温度、振动等信号均未报警，超导电缆运行一切正常。截至这天，世界首条35千伏公里级超导电缆已在上海平稳运行了整整两个月，总计输送电能4618.6万千瓦时。

虽然只有短短的1.2千米，但超导电缆无疑已成为国网上海市电力公司（以下简称“国网上海电力”）在科技创新领域的一张新名片。

## 超导电缆：形成电网坚强支撑

上海具有人口密集、产业密集、负荷密集、碳排密集的特点，上海电网是一个典型的外部馈入强、本地机

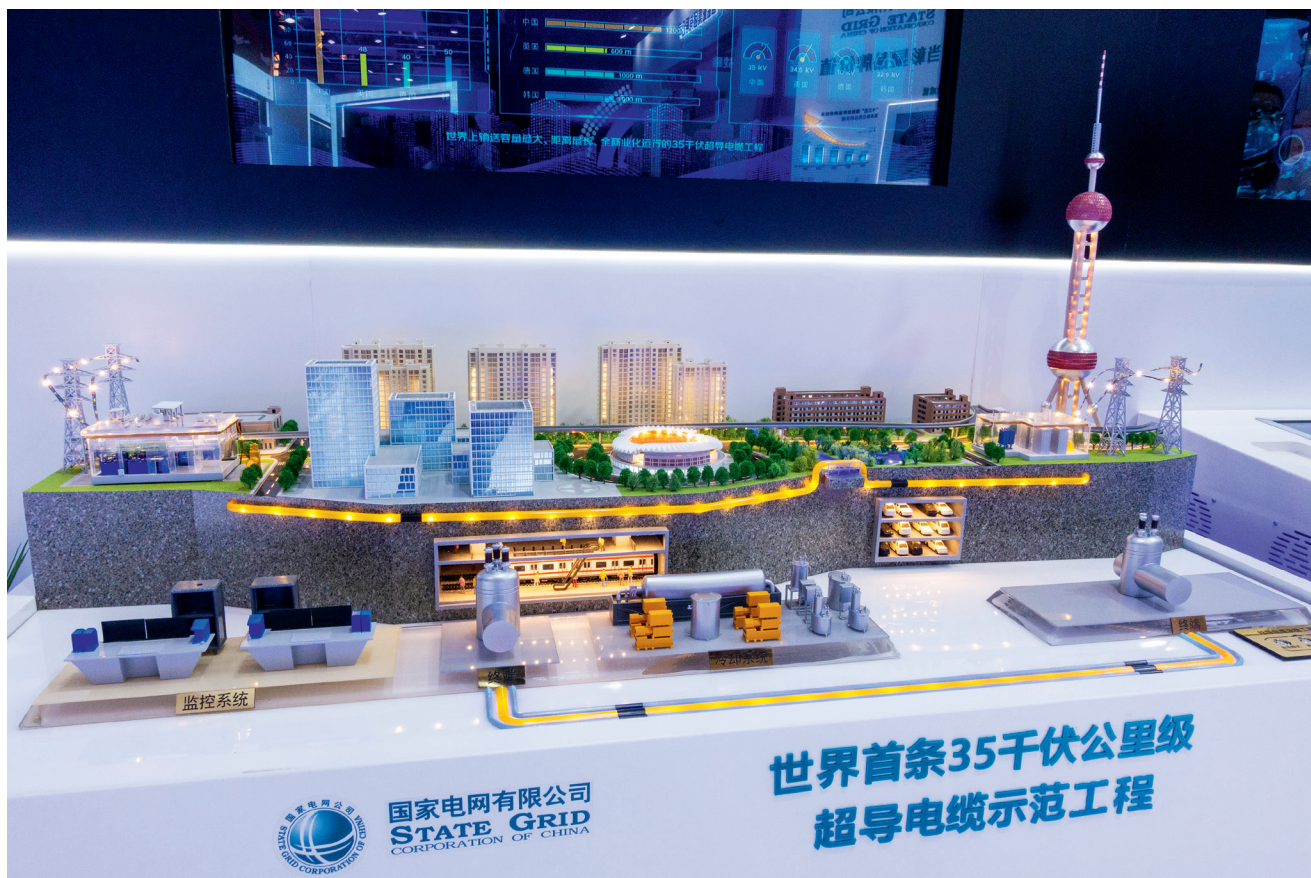
组弱、资源禀赋低、新兴负荷占比高、供电需求多样的超大型受端城市电网。在这样的背景下，寻求技术突破，建设超导电缆就显得更有意义。

2021年12月22日，世界首条35千伏公里级超导电缆投运，标志着国网上海电力在新型电力系统建设领域核心技术方面取得了重大突破。该工程位于上海市徐汇区，全长1.2千米，全程排管敷设，配置两个中间接头，相当于4~6回同电压等级传统电缆的输电能力，可为4.6万户用户提供优质电能，是目前世界上输送容量最大、距离最长、接头数量最多的全商业化运行35千伏超导电缆输电工程。

“超导电缆系统是开发难度极大

的多学科复杂系统，在电缆设计与制造、通道建设、制冷系统、性能试验、工程运维等多方面面临挑战。”国网上海电力科技部智能电网及环保处处长郑健表示，从2016年起，国网上海电力就在国家电网有限公司和上海市委、市政府的支持指导下，携手上海电缆研究院等科研、制造单位，组成联合攻关团队，对超导电缆系统的设计、施工、运维等六大环节进行了系统研究。

工程所采用的超导电缆基于全国产化超导带材，在装备研制过程中攻克了大长度绝热管制造、大长度超导带材绕包接续、大温差终端绝缘设计等一系列难题，实现了超导电缆及其



立足于“世界观察中国电力的窗口”定位，国网上海电力持续强化科技创新策源功能，在新型电力系统核心技术供给、双碳与数字化转型及技术标准创制等方面取得突破。

>> 2021年5月10日，上海，中国品牌日展，国家电网超导电缆示范工程模型。

生产装备自主可控，整体制造水平跻身国际一流行列。

工程实施过程中，通过超导电缆试拉试放试验、新型工器具的研发与应用、泥水平衡顶管施工工艺等手段，克服了由于工程位于上海市中心城区而导致的施工作业空间小，由全程排管敷设而导致的内部敷设空间小，由超导电缆本体存在内外部绝热管而导致的弯曲半径大，由超导电缆本体重量大而引起的牵引难度高等一系列建设难题，保障了工程的顺利实施。

示范工程投运后，超导电缆系统

运行稳定，整体制冷效率达到设计指标，工程技术指标达到了国际领先水平。

“该工程确立了我国在超导技术应用领域的国际领先地位，开创了大城市中心区域小通道大容量输电的先河，为大城市电网发展提供了新的技术支撑，为城市新型电力系统发展增添了新的动能。”郑健说。

### 虚拟电厂：开启电网“无感调控”

如果说，超导电缆是基于上海的城市背景，对超大容量电能输送方式的一种探索，那么“虚拟电厂”技术

则是国网上海电力多年来在能源需求侧领域开展的有益实践，并已积累了大量的实践经验。

2022年2月6日凌晨，正值春节长假期间，国网上海电力开展了2022年首次填谷需求响应。此次“虚拟电厂”的常态化启用，不仅完成了低谷时段负备用调控能力的技术测试，为电网运行的安全性和经济性提供了技术储备，而且验证了“无感调控”模式的应用可行性，使上海电网的“虚拟电厂”技术继续走在全国前列。

上海是国内目前负荷峰值、区域负荷密度、负荷峰谷差最大的城市。依托“虚拟电厂”理念，发挥需求侧管理“电网可预控、用户愿参与”的优势，既可实现特定时段内的负荷调节，保证电网的安全稳定运行，又可以削峰填谷，提升电网的经济运行水平。此举已成为匹配上海超大型城市电网运行的一项重要手段。

在2月6日实施的响应中，国网上海电力采用“日前邀约、日内定时调用”的模式，要求建筑用能控制系统及电动汽车有序充电等应邀资源需具备“无感调控”能力，即在不影响用户正常生产、生活秩序的前提下，用户侧智能终端自动接受需求响应调控指令，按照预置策略本地分解执行，事后按照预定计划自动恢复，全程无人工现场干预。与传统调用模式相比，“无感调控”户均影响更小、用户积极性更强、调控精度更高、响应时效更快、电网调控更可靠。

“本次需求响应基于全业务流程线上贯通，通过资源直控能力测试，

验证了‘无感调控’模式的应用可行性。”国网上海电力客服中心需求侧管理中心主任郑庆荣说，“这也是我们加快数字化转型，促进‘双碳’目标实现的一项举措。”经统计，本次需求响应最大填谷容量为4.1万千瓦，累计填谷电量为7.1万千瓦时，消纳清洁能源2.2万千瓦时，

近年来，国网上海电力积极实施数字化赋能工程，促进“双碳”目标在电力行业的落地，实现了产品创新数字化、生产运营智能化、用户服务敏捷化、产业体系生态化。除了“虚拟电厂”技术以外，国网上海电力还建设智慧保电体系，实现保电业务与“大云物移智”新技术的融合运用，升级智慧平台，打造保电最强大脑；建设“智慧城市能源云平台”，使电网能源大脑与城市管理大脑深度融合，服务上海城市数字化转型。

## 储能标准：让中国技术引领世界

作为“世界观察中国电力的窗口”，不仅要靠可见的技术，还要拿出标准。

2021年9月，由国网上海电科院储能团队编制的《电力储能系统-2-200部分：设备参数和测试方法-电力储能系统在光储充电站的案例研究》正式出版，这是国内首个IEC TC 120电力储能国际标准。

这份标准的制定者、储能团队负责人方陈介绍说，该标准自2017年开始筹备，中间历经多次提案变更、工作组变化等一波三折，通过5次会议讨论后，于2019年7月正式立项。标

**作为一座国际化的超大型城市，上海有着更多走在世界前列的电力应用场景。这也为国网上海电力开展国际标准制定带来了便利。**

>> 超导电缆试拉试验现场（张孟超 / 摄）。



准编制过程中，针对案例数据不够、代表性不足等难题，项目组对国内外电力储能系统在光储电站的案例开展了广泛调研，补充了丰富的国内外案例数据。“在标准进入TC120流转后，项目组全力以赴，及时响应，对来自三个国家共计47条修改意见进行认真修改完善。最终，标准以全票赞成的结果发布出版。”方陈说，“能为我国创造在该领域的一项‘第一’，此前的辛苦都不算什么。”

标准，这是国网上海电力正在发力深耕的领域。2018~2021年，由国网上海电力主导或参与编制的国际标准共有13项，其中IEC标准6项、IEEE标准6项、CIGRE报告1项。今后，全

世界在开展光储电站建设、变压器直流偏磁抑制装置制造等工作时，都将依据这些出自国网上海电力人之手的标准。

“身在上海这样一座国际化的超大型城市，有着更多走在世界前列的电力应用场景，这为我们开展国际标准制定带来了便利，我们也将此项工作视作应尽之责。”国网上海电力科技部科研及成果管理处主管陆启宇表示，“目前，我们已主动布局，提出电力机器人、超导电缆、碳足迹、配网PMU等国际标准提案5项。相信在不久的将来，将有越来越多的中国标准成为世界标准。”

2021年，国网上海电力大力推进

成果转化应用。21项科技成果在上海市知识产权交易中心挂牌交易，转化收益310.5万元；浦东供电公司依托成果“临港新片区综合能源管控平台”开展技术服务，收益149万元；华东电试院“电网网源协调能力评价及性能提升技术”等6项转化成果开展项目收益分红。

2022年，国网上海电力将继续围绕新型电力系统建设和新技术发展，坚持“攀高峰”和“接地气”相结合，推动科研一体化接力运作，开展谋划大项目、打造大示范、培育大成果、塑造大专家的“四大布局”，提升“精准投入、精心培养、精品产出”的“三精管理”，构建具有韧性电网特征的上海城市新型电力系统，持续提升新能源接入消纳与低碳减排能力、电网安全稳定经济运行能力、终端电气化和能源高效利用能力“三大能力”，打造世界观察中国城市新型电力系统建设的窗口，为构建城市新型电力系统和公司高质量发展提供坚强的科技支撑，为实现碳达峰、碳中和目标做出积极贡献。

科技是第一生产力，创新是第一动力。当下，国网上海电力立足“世界观察中国电力的窗口”定位，实施创新驱动发展战略，持续强化科技创新策源功能，在新型电力系统核心技术供给、双碳与数字化转型及技术标准创制等方面取得突破，加快打造新型电力系统技术新高地，全力支撑以“新能源高效消纳”“打不垮”和“不停电”的韧性电网为特征的上海城市新型电力系统建设。■

（作者均供职于国网上海电力）