

中国工程院院士江亿：

## 电气化是建设零碳能源系统的关键

■本报记者 朱妍

“在我看来，低碳发展实际就是一场能源革命，把现在以燃煤等化石能源为主的碳基能源系统转换为以可再生能源为主的零碳能源系统。其中，包括建设新型电力系统、零碳热力系统、工业生产流程再造等具体内容，每一项又包括很多子任务。”在近日举行的2022绿色转型与高质量发展国际研讨会上，中国工程院院士、清华大学建筑节能研究中心主任江亿讲述了他对“双碳”的思考。

江亿认为，推进“双碳”工作，首先应将最主力量放在新型电力系统的建设上。“这也是能源革命的中心任务，不是说一下子铺开、一窝蜂上马，而要坚持先立后破，只有建立起可靠的新能源供给，才能停掉原系统。其过程非但不会影响能源安全供应，反过来还要带动大量新兴产业，促进国民经济发展。”

## 零碳系统需解决供需不匹配问题

如何稳步有序推进？江亿表示：“我们看得见的零碳能源，包括水电、核电、风电、光伏发电及生物质能等。这意味着，未来主要一次能源都是电力，而非现在的燃煤、燃油、燃气等燃料。因此，当前面临的重要任务是实现全面电气化，尽可能地利用电力替代燃料。”

影响替代的关键，在于零碳电力供给与用电需求之间存在不匹配性。“不同于相对稳定的煤电系统，零碳电力一年



江亿

到头的供给量并不一样。比如到冬天，水资源较枯竭，光资源比夏天差一大截，水电、光电短缺。一旦遇到连阴天、静风天，旬内日总量还会变化。除了季节差，光伏电力日夜不同，日内逐时变化也是问题。”江亿举例。

根据未来能源总需求预测，江亿算了一笔账：当零碳电力系统满足夏季用能需求时，冬季约产生6-7亿千瓦用电缺口。若以风光装机填补，对应新增近10万亿元初投资，此外还会埋下夏季弃风弃光的隐患；如果大上储能装置，春夏储、冬季用，以当前技术来看，转换效率低，初投资也要增加近10万亿元。换言之，上述方式并不现实。

“解决季节差，可保留部分火电用于冬

季补缺。其他季节出现电力短缺时，其也能作为供电保障。”江亿提出解决方案。不过，这些火电不是只烧煤，建议燃煤、燃气和生物质燃料各占1/3。由此产生的二氧化碳，再通过碳捕集封存与利用技术进行回收。“北方调峰火电在冬季运行，恰好排放大量余热，同时还能作为供热热源。”

大比例风光发电带来的日内逐时供需差，则可通过储能方式解决。其中，水电和抽水蓄能电站可解决约20%的问题，其余依靠电化学储能，以及终端柔性用电方式。

## 电动汽车在未来系统中大有可为

终端柔性用电方式指什么、如何用？在江亿的构想中，可采用“建筑+充电桩+电动汽车”的模式。按照到2035年，全国约有3亿辆电动汽车，每辆车有50-100度电的电池容量计算，加起来平均对应30亿千瓦的调峰能力，进而可解决60%-70%的调峰能力。

“有人说车在路上跑，怎么拿来储能？要让电动汽车充分铺开、真正发挥作用，前提是由目前的单向充电，转为双向充放电服务，需要建设覆盖合适的充电桩网络。停车场一位一桩，即插即停，车主停下即可接上充电，保持车载电池与电网的连接。是否充电、甚至反向放电，是根据电网供需关系而决定，电池就成了很好的储电资源。”江亿表示，电动汽车还能与建筑搭载，后者本身也具备一定的电力调蓄能

力。二者优化组合，在未来电力系统中潜力巨大。

新问题接踵而至——如何接入这些柔性用电资源？江亿进一步提出“光储直柔”的理念。光和储分别是指分布式光伏和分布式储能，作为建筑配用电系统组成部分；“直”是指建筑配电网的形式发生改变，由传统交流配电网改为低压直流配电网；“柔”说的是建筑用电设备可中断、可调节，使建筑用电需求从刚性变为柔性。

“不是简单组合，而是有机融合构成一个整体，集发电、用电、储电和调节功能为一体，实现建筑与电网之间的友好互动。建筑也将随之由单一的消费者变成能源电力生产者。”江亿解释称，风、光伏发电多即多用，并蓄存多余电力；遇到发电少、不发电时，靠蓄电装置、电动汽车的电池和负载调节维持建筑运行。由此，构成一个容量巨大的分布式虚拟储能系统，平衡电源与需求变化。

## 应重视农村新能源系统建设

谈及新型电力系统，江亿还提出一个关键问题：风电、光伏发电属于低密度能源，空间利用密度只有约100瓦/平方米，大规模安装空间何在？

西北地区风、光资源较好，未利用地多，但项目全部建设在此，长途输送成本高。河西走廊空间狭窄，不能容纳大量千万千瓦输电线路，也难以利用风光电变化

与负荷侧需求变化的一致性来减缓日内调蓄压力。“事实上，我们不能忽视中东部的高密度区域。在这些寸土寸金的区域，不仅能在屋顶安装光伏，建筑立面也可考虑。再加上海上风电，以及城市100公里以外周边地区适当布局集中风电、光电项目。”江亿称。

在江亿看来，另一空间资源出自农村。“充分开发利用农村各类闲置屋顶资源，发展光伏发电项目，户均装机容量至少在20千瓦以上。其发电量可满足农户炊事、采暖等生活用能，及农机具、交通工具等用电需求，如有余量还能公用或送电上网。”

江亿表示，构建新型电力系统，农村新能源系统的建设不可忽视。“随着拖拉机、插秧机等农业机械逐步电气化，我们还可以发展标准化的电池及换电方式。这些农机不是天天使用，既是用电设备也是蓄能装置，每户配备两三组电池，相当于拥有了60千瓦时的蓄电池。哪台设备需要，直接安装电池即可，不用时则作为家庭储能单元。”

值得注意的是，农村丰富的生物质资源亦有零碳属性。“待全面电气化后，生物质资源不再大量自用，即可商品化进入能源市场。例如，林业枝条、玉米秸秆加工成小颗粒，作为燃料清洁高效利用；湿的垃圾、粪便先制成沼气，再变身高质量燃气。加工后的生物质燃料既能存储，也好运输，便于使用，进而成为零碳能源系统的组成部分。”

上接1版

立足全年，从电力需求来看，经济方面，稳增长政策持续发力，四季度经济增速继续回升；气温方面，国家气候中心预计今冬明春气温较常年同期略偏高，但仍可能发生阶段性强降温过程。采暖电量将平稳增长，预计2022年我国全社会用电量增长3.8%左右。从电力供应看，预计全国新增发电装机总规模约2.8亿千瓦，年底装机容量为26.4亿千瓦，比上年增长11.1%。从电力供需平衡看，预计今冬明春全国电力供需总体平衡偏紧，华东、华中、西南电网电力供需紧张。

## 2023年能源供需形势研判

## (一)经济稳步回升，能源消费总量持续增长。

总体来看，2023年，国际环境和新冠肺炎疫情仍存在不确定性。全球经济下行风险加大，外需动能减弱，我国出口难以保持较快增长。国内疫情管控更加科学，疫情对经济的影响逐步减弱，国内消费、投资成为国内经济平稳增长的主要动力，消费的支撑作用增强。政策持续支撑，投资保持平稳。先进制造业投资增速提升，新型基础设施投资快速增长，稳地产政策下房地产投资恢复性增长。疫情防控更加精准，疫情对消费及服务行业活动影响进一步减小，消费增速将显著回升。参照权威机构预测结果，预计2023年全国GDP增速为5.0%左右，三次产业对GDP增长的贡献分别为5.8%、41.0%和53.2%。综合考虑经济发展、能耗双控考核方式调整、新基建发展、能效提升、能源替代等因素，预计2023年能源消费总量达到55亿吨标准煤左右，增速达3%左右，单位GDP能耗持续下降，非化石能源占比达到18%以上。

## (二)煤炭供需基本平衡，煤价逐渐进入合理区间。

2023年大概率煤炭产量同比上升，进口同比减少，产能投放力度和供应能力增量较大。今年上半年煤炭需求较弱，明年煤炭需求主要受“保交楼”政策、疫情、国际形势的影响。目前来看，稳住基本盘最有效、最见效的手段还是基础设施建设，预计明年传统经济对煤炭的需求比今年5-9月中旬的情况要强，但是全年整体需求与今年基本持平。电力行业主要决定了需求的总量，随着风光核发电占比上升，预计明年电煤需求增幅较小。综合来看，供给侧增速较快，需求侧增速较低，煤炭供需朝宽松方向发展，叠加油气价格高位运行挤压进口量，明年煤炭供需基本平衡，煤价逐渐进入合理区间。

## (三)油气供需博弈加剧，价格持续高位震荡。

欧盟对俄罗斯原油的禁令临近，且OPEC收紧原油供给端，但出于对经济衰退的担忧，近期原油市场疲软。中短期，原油价格仍将围绕80-100美元/桶高位震荡，甚至仍有上涨的可能性。当前美国天然气库存持续维持历史较低水平，受地缘政治影响，欧洲将持续维持增加LNG进口以减少对俄罗斯管道气依赖，而美国为欧洲LNG进口主要供应国，不能排除2023年全球天然气荒的可能性。在当前全球供需格局下，叠加地缘政治的影响尚未消退，油气价格仍将在未来一段时期处于高位震荡区间，我国进口量可能进一步缩减。

## (四)电力需求稳步增长，供需平衡偏紧。

从电力需求来看，经济方面，稳增长政策持续发力，国内经济逆势上行，但仍落后于潜在增长水平；气温方面，根据国家气候中心预测，当前拉尼娜事件将延续到2023年冬季，通常发生拉尼娜事件后，我国大部地区冬季气温将较常年同期偏低；加之全球变暖背景下，夏季气温较常年同期大概率偏高，气温因素仍将在2023年用电增长中发挥正向作用，预计2023年我国全社会用电量增长5.5%。从电力供应看，预计全国新增发电装机约3.2亿千瓦，年底装机容量为29.6亿千瓦，比上年增长12.2%。从电力供需平衡看，迎峰度夏和迎峰度冬期间，预计全国电力供需平衡偏紧，华北、华东、华中、西南高峰时段电力供需紧张。

## 能源形势应对建议

一是做好极端天气下能源供需形势分析研究。气象因素对能源电力系统的影响日益增大，极端天气下能源供应难以保障。今年夏季受罕见高温干旱天气影响，四川部分主力水电站水库相继见底，8月中旬四川水电日发电量较7月初断崖式下降5成左右。预计2023年夏季气温接近常年同期到偏高，大概率出现大范围持续性高温天气，亟需建立极端天气下能源供需分析的研究框架和方法理论，提高能源供需预测准确度。

二是构建能源安全预警体系。建立健全能源安全信息沟通制度，加强煤炭、石油、天然气等能源供应、消耗、存储监测，加强水情跟踪监测，提升水情预报准确性。加强能源安全应急保障制度建设，针对安全警戒线下的供应主体企业进行必要的监督考核，保障能源安全供应和国民经济稳定运行。

三是提高新能源消纳能力。加强风电、太阳能等新能源发展规划，进一步明确新能源新增建设规模、装机布局和开发时序，深化水新联动柔性调度机制应用，推动风电、光伏电站按需配置储能装置，引导社会资本有序参与建设储能电站，不断拓展清洁能源消纳空间。

(作者均供职于国网能源研究院)

## 新型电力系统技术创新联盟专栏 15

## 争当新型储能产业链链长

——访中国绿发天津中绿电投资股份有限公司总经理孙培刚

■本报记者 董梓童 苏南

储能作为新型电力系统的重要组成部分，能为电网运行提供调峰、调频、需求响应支撑等多种服务，是提升电力系统灵活性、经济性和安全性的重要手段。随着可再生能源并网规模不断增加，配储成为新要求，储能产业迎来快速发展阶段。

作为一家以绿色发展为主线的央企，中国绿发投资集团有限公司(以下简称“中国绿发”)一直以“推进绿色发展、建设美丽中国”为使命，聚焦发展绿色能源、低碳城市、幸福产业、战略性新兴产业。中国绿发在不断推进可再生能源项目落地的同时，布局了包括液化空气储能等在内的新型绿色技术。那么，储能在构建新型电力系统的过程中将扮演何种角色？未来应如何布局新型储能技术？中国绿发在新型电力系统建设过程中开展了哪些技术攻关？带着这些问题，本报记者日前采访了中国绿发绿色能源产业的专业平台公司——中国绿发天津中绿电投资股份有限公司董事、总经理、党委副书记孙培刚。

## ■加快新能源产业转型升级

中国能源报：在“双碳”目标驱动下，我国新能源行业呈高速发展态势。作为以绿色发展为主线的中央企业，中国绿发对新能源发展进行了哪些布局？

孙培刚：中国绿发是根据党中央、国务院深化国资国企改革部署，于2020年12月整合重组成立的一家股权多元化中央企业，致力于建设世界一流绿色产业投资集团。目前中国绿发布局国内12个新能源资源富集省份，在建运营项目57个，装机718万千瓦，业务涵盖陆上风电、海上风电、光伏发电、光热发电、储能等，先后投资开发了国内第一批陆上风电、海上风电、第二批光伏发电特许权项目。

在青海格尔木，中国绿发承建了国网首个光伏扶贫项目；在江苏东台，建成当时国内离岸距离最远、单位规模最大、施工条件最复杂、电压等级最高的海上风电项目，项目获国家优质工程奖；在江苏如东，建成国内首个全生命周期数字化智慧型如东海上风电场，创造国内海上风电行业首个超视距通讯、国内首个基于北斗定位的救援系统等多项第一。

“十四五”期间，中国绿发将以“厚植基础、示范引领、特色发展”为总体思路，系统谋划大型风电光伏基地和海上风电基地项目，通过建购并举、广泛合作，加快产业转型升级，形成海陆齐发、多能互补、科技赋能的产业布局，实现基地化、规模化、精益化发展。预计到“十四五”末，中国绿发建设运营新能源装机容量将达3000万千瓦。

中国能源报：针对新型电力系统建设，中国绿发做了哪些工作？

孙培刚：中国绿发积极探索新型电力系统建设，在青海海西建设了鲁能海西多能互



孙培刚

补集成优化示范工程，打造电网友好型清洁能源项目，取得了良好的示范效果；作为集风、光、热、储、调、荷于一体的创新项目，实现多种电源优化组合、互补运行及多种能源深度融合，达到1+1>2的效果，有效改善风电和光伏输出不稳定、不可调节的缺陷，提升电网对新能源的接纳能力，解决当前阻碍新能源大规模并网的技术难题，为世界能源革命提供了中国样本。

## ■拓展新型储能技术热门赛道

中国能源报：如何看待储能在构建新型电力系统中的地位和作用？

孙培刚：未来新型电力系统将以新能源为主体，为解决新能源的不稳定性和间歇性等问题，在电力系统配置一定储能，发挥削峰填谷、辅助服务等作用十分必要。

目前储能技术种类较多，包括抽水蓄能、飞轮储能、压缩空气储能、锂离子电池、液流电池等，其中抽水蓄能、锂离子电池等储能技术已实现商业化，其他储能技术尚处于示范应用或实验室阶段。相比之下，抽水蓄能地理条件要求高(需要上下水库)，投资大、建设工期长，而电池储能面临运行安全、废旧电池需回收等问题。

中国能源报：在新型储能技术中，压缩空气储能和液化空气储能是热门赛道。两种技术有何优劣？

孙培刚：压缩空气储能由压缩单元、储气室和膨胀发电单元组成。储能时，在电动机驱动下，压缩单元将空气压缩至高压状态，然后进入储气室进行存储；释能时，储气室内的高压空气进入透平驱动其做功，并带动发电机发电。

液化空气储能是通过压缩空气方式储存电能，并经降温液化后以液态空气形式进行存储的新型储能方式。在储能阶段，该技术利用电能驱动压缩机对纯净的常压常温空气进行压缩，并通过蓄热介质存储压缩热，压缩空气流经冷箱进行多级预冷后液化，液态空气以常压低温形态存储于低温储罐中。在释能阶段，液态空气经低温泵增压后，经多级升温后汽化，并通过

蓄冷器存储液态空气冷量，汽化后的常温高压空气经加热后产生高压高温气体，驱动透平发电机发电。

压缩空气储能需要大容量高压储气条件，通常采用地下洞穴来满足储气要求，地理条件限制明显，而建立地面高压储气设施成本过高。无论哪种存储方式，压缩空气储能技术都存在储能密度低的问题。相比之下，液化空气储能系统基于低温空气液化和蓄冷技术，将电能以常压、低温、高密度的液态空气形式存储，储能密度是压缩空气储能的10-15倍，解决了空气存储和恒压释放的问题，具有可实现大规模长时储能、不受地理条件限制等突出优点。因此，液化空气储能系统可广泛且灵活应用于可再生能源并网及电网侧和用户侧的削峰填谷等场景。

## ■积极布局液化空气储能

中国能源报：中国绿发重点布局开发了哪种储能技术？

孙培刚：我们通过多方面调研、比选、论证，重点布局液化空气储能。与其他储能技术相比，液化空气储能具有大规模长时储能、安全、长寿命、不受地理条件限制等优点，与绿色能源产业互补性强、技术关联度高，具有广阔的发展前景。

截至目前，在液化空气储能技术领域，国内外尚无成熟的商业化项目在运，仅有少数单位开展了实验平台和示范项目建设。在国内，中国科学院理化技术研究所(以下简称“中科院理化所”)建成了100千瓦液化空气储能实验平台，蓄冷效率90%，并成功研制间歇运行深冷液化冷箱。在国外，英国建成了5000千瓦/1.5万千瓦时液化空气储能项目，并从2020年11月开始建设5万千瓦/25万千瓦时液化空气储能项目，目前已进入安装调试阶段。

中国能源报：未来，中国绿发将如何推动液化空气储能技术发展和进步？

孙培刚：中国绿发与中科院理化所成立了液化空气储能合资公司和先进储能联合研究中心，致力于实现液化空气储能技术产业化发展。我们将以青海海西揭榜挂帅项目6万千瓦/60万千瓦时液化空气储能项目为依托，建设国内首台(套)液化空气储能示范项目。目前项目已完成选址、技术方案论证，并通过青海省能源局委托电规总院组织的可研评审，正在办理环评、安评、接入系统批复等前期手续。项目将于近期开工建设，计划2024年投运，届时将成为世界上功率最大的液化空气储能电站。

通过示范项目实施，中国绿发将开展大功率液化空气储能关键工艺研究、冷能多级储存利用技术研究、高效宽工况压缩/膨胀技术研究、系统集成及运行控制技术研究，掌握液化空气储能核心技术，打造绿色能源产业原创技术策源地，争当新型储能产业链链长。