

# 前沿周刊 / 科技

## 全球首台 750 兆伏安大容量柔性直流换流变压器落地绍兴

# 甘电入浙特高压,装入一颗“超级心脏”

■ 本报记者 胡静漪 孙良  
通讯员 刘煜谦 朱肖和 陈靖 吴米佳

一颗重达 553.5 吨的“超级心脏”，将被装入特高压工程的“胸腔”。

3月25日，全球首台 750 兆伏安大容量柔性直流换流变压器将运抵绍兴上虞的越州换流站。这是国家“西电东送”工程甘肃—浙江±800 千伏特高压直流输电工程（下称“甘电入浙特高压”）的核心设备，单台容量创下了世界之最。

甘电入浙特高压全长约 2370 公里，横跨 6 个省份，如果把它比作运输通道，那么两端的换流站就像大型物流枢纽，换流变压器则是装卸中枢：在西部把电能“打包、装车”，到东部再“卸货、分发”，送入长三角地区的千家万户。

工程投运后，每年将有约 360 亿度电送来浙江，约占全省年用电量的 5%；越州换流站将配置 14 台运行换流变压器，共同承担起“装卸”任务。

## 身兼数职的“巨无霸”

个头和分量，本身就是一种“实力宣言”。

设备研制企业——常州西电变压器有限责任公司（下称“西电常变”）总工程师李猛告诉记者，这样的“巨无霸”，从设计、制造到运输，每一步都在逼近行业极限。

为什么非要造这样一个“大家伙”？这要从变压器的基础作用说起。

简单来说，变压器就是一个“电压调节器”。日常生活中，手机充电器里就有一个小型变压器，它能把插座里的 220 伏电压，变成手机能用的 5 伏低电压。

在电力系统里，情况要复杂得多。从家庭用电的 220 伏、380 伏，到特高压直流的 ±800 千伏，电压等级差别巨大。电能传输过程中，还分为直流和交流两种形式。增高电压、采用直流输电，电就能传得更远、损耗更小；到了用户端，要转换成较低电压的交流电，才能安全、稳定地被各种电器使用。

正因如此，我国大规模“西电东送”工程，普遍采用 ±800 千伏特高压直流输电技术，把西部的电能高效送到东部，实现点对点的“千里闪送”。

在这条“电力快线”的终点，直流电并不能直接使用，必须完成“直变交、高变低”的转换。这一关键任务，就落在换流站里。在越州换流站，来自远方的特高压直流电，先通过换流阀完成“变身”，再经过换流变压器调压，最终送入浙江电网。

要实现这样一套接力，换流变压器必须具备过硬的本领：既要能承受极高电压而不被击穿，又要具备可靠的绝缘性能，让电流始终沿着设定路径运行，同时能够长期满负荷稳定运行。

可以说，它就像整个特高压工程中的“压舱石”，关系到整条电力通道乃至电网运行的安全与稳定。

甘电入浙工程的首创突破还在于“柔性”。

“风、光等新能源发电受天气影响，波动性强。随着新能源大规模接入电网，电力系统对灵活性、稳定性的要求越来越高，已成为全世界共同的挑战。”国网浙江建设公司越州换流站项目副经理段尧说。

作为全球首条双端柔性直流特高压工程，甘电入浙特高压从“刚”到“柔”，就是要让电流运输更具自主性——常规直流好比用水管送水，输送能力强、损耗小，但没有弹性；柔性直流则是自带阀门和水泵，可以主动控制电压和频率，面对新能源的大幅波动也能应对自如。

以往，柔性直流技术为了平衡成本与技术难度，采用过多种结构，比如“一刚一柔”的折中方案，也就是送端用常规直流、受端用柔性直流。

不过，甘电入浙工程每年输送的新能源电量占到近六成，对柔性的需求达到了前所未有的高度。因此，工程规划在送受两端均采用特高压柔性直流输电技术，首次突破了“双八百”（±800 千伏/800 千瓦）特高压柔直技术。与之配套，换流变压器也必须适应双端柔性直流输电功能的要求。

这样的关键设备，造价不低。据悉，甘电入浙工程投资达到 353 亿元，换流站投资成本约占整个特高压工程的 40%。

“大”，往往意味着“更省”。

在柔性直流换流站中，换流变压器容量翻倍，所需设备数量可以从原来的 28 台减少到 14 台。设备数量减少，原本必须预留的设备间隔数量和距离也随之缩小，换流站整体占地面积大幅压缩。对于土地资源紧张的浙江来说，这一点尤为关键。

“设备做大之后，单位容量的损耗也



甘浙±800 千伏特高压直流输电工程浙江段线路在绍兴上虞完成首基铁塔组立。 通讯员 方峥 摄



开展越州换流站高端阀厅屋面网架整体提升工作。

通讯员 朱肖和 摄

更低，整体效率更高。”李猛介绍，“设备少了，后期运维的工作量也明显减少，管理起来更简单可靠，从建设到运行都更经济节能。”

特高压换流、柔性直流叠加大容量，这些标签不只是功能的简单相加，更是技术原理的颠覆性升级。国网浙江超高压公司越州换流站筹备组组长黄养信表示，这极大提升了特高压直流的输送能力和经济性，为我国更大规模开发西部“沙戈荒”能源基地、建设“西电东送”工程，提供了关键装备支撑。

## 全产业链迭代创新

去年初，西电常变接到研发任务，当时在国际上，这一容量等级还没有工程经验可供借鉴。

2025 年 12 月 2 日，第一台 750 兆伏安柔性直流换流变压器一次性通过全部出厂试验，关键性能指标达到国际领先水平，标志着这一世界首台（套）正式研制成功。

不到一年的研发时间，体现了国产自主创新的速度。

“首先要解决的，是漏磁和散热问题。”李猛说，可以把变压器理解为一个被铜线层层包裹的“能量中转站”，电能在其中不断通过并完成转换，电流越大，产生的热量也就越多；一旦遇到极端工况，还会产生巨大的电磁力冲击。变压器容量翻倍后，发热量和受力都大幅增加，如果处理不好，不仅效率下降，还会影响设备寿命。

怎么给这个“大家伙”降温？工程师们在设备内部布置了更加复杂精细的油道系统，让绝缘油像“血液循环”一样流动，把热量带走。同时，优化内部各类通道的布局，让散热更快、设备运行更稳。

“我们真正的难点在于，设备体型和结构一旦发生变化，很多问题就无法完全依赖经验判断。

由于甘电入浙特高压项目工期紧、任务重，没有试错的时间和机会，研发团队把大量工作搬进“虚拟世界”，利用多物理场仿真技术，对电、磁、力、热等多种因素进行联合分析，相当于在电脑中先“造”出一台变压器，再反复试验、不断优化。

“我们还对关键核心部件制作 1:1 模型进行实际验证，把虚拟结果和实际情况一一对照，确保设计可靠可行。”李猛说。团队最终找到了散热更好、损耗更

低、运行更稳定的设计方案，高频电压、直流偏磁等一系列问题都被逐一解决。

创新之路上，也离不开电力产业链的整体升级。

近些年，全控型电力电子器件，如 IGBT（绝缘栅双极型晶体管）在电力系统得到广泛应用。这类器件不再依赖外部“喂”电压，而是能自主关断、自己产生电压。就算遭遇雷击或电网波动，也能在毫秒级内稳住阵脚，甚至反向输出能量“拉”电网一把，这让特高压变成了最可靠的支撑。

“电力电子器件能替代传统开关，实

现柔性功能，适应波动的新能源。”黄养信介绍，此前受材料和工艺限制，IGBT 只能达到 3 千安级，而在甘电入浙工程中，国家电网研发团队研发出 5 千安级的 IGBT 及换流阀，首次实现了“双八百”特高压柔性直流技术。

另一个难题是国产化，电力行业一度依赖进口 IGBT 产品，造成柔性直流换流站的造价极高，通常是常规直流换流站的 1.5 至 2 倍。近年来，核心零部件逐步实现自主研发生产，随着性价比提升，这项技术才加快从实验室走向应用场景。

这和我们的“主角”——换流变压器有什么关联？“依托 IGBT 器件和调制技术实现的自我调节控制能力，让柔直特高压不再像常规直流那样依赖换流变压器来调节，这为换流变压器数量减半、单台容量提升至 750 兆伏安筑牢了技术根基。”他说。

此外，在一台长期稳定运行的变压器里，一种承担调压功能的切换开关是少数需要频繁动作的部件之一，也更容易出现磨损、卡涩等问题。工程大规模应用 IGBT 器件后，调压的功能将被 IGBT“电子化”替代，本次换流变压器在设计上直接取消了这种切换开关，这在全球特高压柔直换流变压器中还是首次，意味着可靠性提升、运行风险下降。

未来，电力电子器件和柔直技术还将“抢回”大量原本会被浪费的风电、光伏，这笔“绿色收益”足以覆盖成本溢价。“如果用降本增效来衡量这些成果，那只看到了冰山一角。”国网浙江电力三级专家刘超说，750 兆伏安换流变



全球首台 750 兆伏安大容量柔性直流换流变压器运抵绍兴上虞，通过巨型人字桅杆吊装到重型卡车上。 本报记者 郑培庚 摄

压器和它背后电力产业链的整体迭代，意味着从设计、制造、运维到升级，我国已经具备自主创新能力和产业竞争力，拥有柔直特高压全链条的话语权。

## 柔直技术在浙江

3月13日，上虞一处码头迎来首台换流变压器的登陆。

一周前，它从常州生产基地出发，途经京杭大运河、钱塘江、浦阳江和杭甬运河，全程超过 410 公里。在码头边，高约 54 米、最大起吊能力达 600 吨的巨型人字桅杆吊将它从船上吊起，在空中旋转 90°，平稳落在重型卡车上——这套动作足足耗费了 3 个小时。

在中转基地停留 12 天后，它再通过公路运输，来到 14.6 公里外的越州换流站。为了让这件“超级快递”顺利送达，浙江省送变电工程有限公司、国网绍兴市上虞区供电公司和本地相关部门的工作人员提前加固沿途桥梁、提升部分道路等级，对 200 多处空中障碍进行抬升改造，确保“大国重器”安全准时抵达。

接下来，还有 6 台相同型号的大容量换流变压器陆续抵达越州换流站。

可以说，浙江电力领域多年来的自主探索，抢抓了全国特高压发展的风口。

早在 10 多年前，浙江就在舟山建设了五端柔性直流输电工程，这也是世界首个多端柔性直流输电工程。它连接定海、岱山、衢山、泗礁、洋山区域 5 座换流站，让舟山海岛电网结构呈现环网“手拉手”模式，供电更灵活可靠。

2022 年 5 月投运的杭州钱塘多能互补零碳柔直示范工程，发挥了柔性直流在新能源消纳方面的优势。它将钱塘江边的风电和光伏汇聚起来，为附近的工业区、电车充电桩等提供绿色电力。

值得一提的是，此前西电常变已参与浙江多个创新项目建设——在台州 35 千伏、杭州 220 千伏等全球首创的柔性低频输电工程中，企业就曾提供关键设备低频变压器，双方在技术创新协同

## 链接

## 我国柔性直流技术应用

在全球能源转型的宏大背景下，特高压与柔性直流输电技术已成为推动清洁能源高效配置、构建新型电力系统的核心引擎。我国在这一领域不仅实现了从追赶者到领跑者的跨越，更以一系列超级工程重塑着世界电力技术的版图。

从全球视野来看，欧洲是柔性直流技术的先行者。为解决可再生能源分布不均的问题，欧盟于 2010 年启动了北海超级电网计划，旨在将北海的海上风电与欧洲大陆的负荷中心连接起来，其输电距离最长可达 5000 公里。

在国际高端市场中，中国技术已崭露头角。2022 年，我国团队成功中标德国 BorWin6 海上风电柔性直流输电工程，这是中国高端输电技术首次进入欧洲市场，其核心设备已于 2024 年通过德方验收，目前进入设备安装高峰期。

上已形成默契。

“浙江在新型电力技术方面投入力度很大，也积累了丰富的工程经验。”李猛说。

本次研发过程中，来自国网浙江电科院、国网浙江超高压公司的技术团队，直接进驻西电常变，双方并肩工作整整一年。比如，国网浙江超高压公司的技术团队发现，换流变相关部件在长期运行中有变形和渗漏油的隐患。对此，他们提出创新方案，给关键部位加强“筋骨”，提升了设备整体的安全稳定性。这些细微却精准的“实用主义”创新，都源于他们多年来在换流站的实践经验和深入思考。

从“各自攻关”到“联合研发”，浙江的一线需求与央企的制造能力深度融合，也成为这项世界级装备顺利落地的原因。

浙江是资源小省、用能大省，每年外来电占到全省用电需求的三分之一，正在加快布局沿海风电和核电，继续推进各类光伏建设，无论是跨省特高压柔直，还是省内低压柔直，都有丰富的应用场景和迫切的需求。

此次甘电入浙为柔直技术再添特高压等级的应用场景，将为全国各地新能源发展和电网稳定外送提供可推广的设计理论和工程技术方案。

“随着新能源大规模跨区域输送需求不断增长，柔性直流已成为特高压发展的重要方向，电力装备也在向电压更高、容量更大、运行更可靠的方向不断升级。”李猛表示。

本次成功研制不仅是单一设备的突破，更是整个产业生态的升级——从高端电工材料、绝缘技术，到检测检验能力和智能制造水平，都在共同进步。“这为后续向更大容量等级迈进打下了基础，也让我国关键装备的自主可控能力进一步增强。”

不过，设备大型化总有“天花板”。毕竟，铁路、公路等运输尺寸和载重存在物理极限，推动着未来的创新者们将在结构设计和材料迭代上更进一步。

同年底，首条柔直输电工程——±500 千伏张北柔性直流电网示范工程，突破了柔性直流组网等技术难题。

当前，一批新的国家重点工程正在加速推进。2025 年 9 月，藏东南至粤港澳大湾区±800 千伏特高压直流输电工程启动建设。该工程输送容量达 1000 万千瓦，建成后将是世界上输电能力最强、技术最先进的柔性直流工程。预计 2029 年投运后，每年可向粤港澳大湾区输送超 430 亿度的清洁电能。

与此同时，甘电入浙特高压工程作为世界首条送受两端均采用柔性直流技术的工程，已于 2024 年开工。其核心设备——世界首套±800 千伏/8 吉瓦柔性直流换流阀已成功研制，创下全球容量最高纪录。该工程计划 2027 年投运，届时每年可为浙江输送清洁电力超 360 亿度，有力支撑东部地区的能源结构优化。这一系列工程实践，标志着中国正以领先的技术实力，为全球能源绿色转型贡献不可或缺的“中国智慧”。

（本报记者 胡静漪 整理）