

中国特高压交流输电工程技术发展综述

韩先才, 孙昕, 陈海波, 邱宁, 吕铎, 王宁华, 王晓宁*, 张甲雷

(国家电网有限公司, 北京市 西城区 100031)

The Overview of Development of UHV AC Transmission Technology in China

HAN Xiancai, SUN Xin, CHEN Haibo, QIU Ning, LYU Duo, WANG Ninghua, WANG Xiaoning*, ZHANG Jialei

(State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China)

ABSTRACT: Many ultra high voltage (UHV) AC power transmission projects have been put into commercial operation successfully in China. By the end of 2019, a backbone of UHV AC power grid has been built in the vast area of Sanhua (North, Central and East China). China proposed the target of developing UHV transmission technology at the end of 2004. The first UHV AC transmission project was put into service in January 2009 named as Jindongnan-Nanyang-Jingmen UHV AC demonstration project. At present, a lot of UHV AC transmission projects have been finished step by step in China which has experienced three stages of technological breakthrough, scale construction and improvement. Relying on engineering practice, China has mastered a full set of core technologies for UHV AC transmission from planning and design, equipment manufacturing, construction, installation, commissioning and testing to operation and maintenance, and a complete set of UHV AC equipment representing the highest level of international electrical equipment manufacturing has been successfully developed, and established the high voltage and strong current test capability with the most complete function and the highest test parameters as well as the standard system of UHV AC transmission technology. In this paper, China's UHV AC transmission technology and its engineering application achievements were presented including the UHV AC engineering design, equipment development, construction and standard system construction etc.

KEY WORDS: ultra high voltage AC; project design; equipment development; construction; standard system

摘要:截至2019年,中国已成功投运多个特高压交流输电工程,在广阔的三华(华北、华中、华东)地区已经初步建成特高压交流电网骨干网架。中国2004年底提出发展特高压输电技术,首个特高压交流输电工程——晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程于2009年1月投运,至今已陆续建成多个工程,经历了技术突破、规模化建设和完善提升3个阶段。依托工程实践,中国全面掌握了特高压交流输电从规划设计、设备制造、施工安装、调试试验到运行维护

的全套核心技术,成功研制了代表国际电工装备制造最高水平的全套特高压交流设备,具备了国际上功能最全、试验参数水平最高的高电压、强电流试验能力,建立了特高压交流输电技术标准体系。该文从特高压交流工程设计、设备研制、施工建设和标准体系建设等方面介绍了中国特高压交流输电技术及其工程应用成果。

关键词:特高压交流;工程设计;设备研制;施工建设;标准体系

0 引言

特高压交流输电是指交流1000kV及以上电压等级的输电技术,与常规500kV交流输电相比,1000kV交流输电线路自然输送功率为4~5倍,输电距离为2~3倍,输送相同容量时的损耗只有1/3~1/4、走廊宽度只有1/2~1/3,具有大容量、远距离、低损耗、省占地的突出优势^[1-2]。

20世纪60年代末、70年代初,美国、前苏联、意大利、日本、加拿大等国在大规模建设超高压输电电网的同时,根据电力需求持续快速增长需要下一代更高电压等级输电的预期,先后启动了特高压输电的技术基础及规划、设计等工程应用研究。这一研究热潮在国际电力工业界持续了近20年时间,后因石油危机等因素影响,这些国家的经济增速大幅放缓、电力需求萎缩,特高压输电研究热潮减退,没能发展出成熟的技术和设备、建成商业化运行的工程。而近年经济增长较快的印度、巴西、南非等国则开始积极研究特高压输电技术^[3-8]。

经过30多年的前期研究,特别是几个试验、示范项目的推动,国外对特高压交流线路和设备在各种电压、各种环境因素作用下的机电性能和电磁环境特性等进行了大量试验研究,一批特高压设备样机通过了长时间带电考核,初步证明了特高压输电的技术可行性,积累了宝贵经验。国际大电网委

员会(CIGRE)成立专门工作组对各国特高压输电技术研究和工程应用成果进行了持续跟踪研究,1988年国际大电网委员会38委员会发布正式报告,明确提出:“可以确认,特高压交流输电技术现在已经可用于实际应用”^[9]。

中国自1986年起开始启动特高压交流输电技术研究,先后经历了技术突破、规模化建设和完善提升等3个发展阶段。技术突破阶段以试验示范工程、试验示范工程扩建工程、皖电东送工程为标志,重点是技术研发;规模化建设阶段以浙北-福州、淮南-南京-上海、平圩电厂三期送出、锡盟-山东、蒙西-天津南、榆横-潍坊等一批工程为标志,重点是检验技术成熟度、批量设备稳定性和规模化建设能力;完善提升阶段则包括其后的锡盟-胜利、直流配套以及电源接入等工程,重点是网架的完善、特高压输电技术和建设管理水平的提升。

作为世界能源消费大国,中国的发电电源分布和经济发展极不均衡,水能、煤炭和风能等主要分布在西部和北部,能源和电力负荷需求主要集中在东部和中部经济发达地区,能源产地与能源消费地区之间的能源输送距离远,主要能源基地距离负荷中心约800~3000km,同时经济高速发展对能源的需求也越来越大。

具有送电距离远、输送功率大、输电损耗低、走廊占地少、联网能力强等优点的特高压交流输电技术可连接煤炭主产区和中东部负荷中心,使得西北部大型煤电基地及风电、太阳能发电的集约开发成为可能,实现能源供给和运输方式多元化,既可满足中东部的用电需求、缓解土地和环保压力,又可推动能源结构调整和布局优化、促进东西部协调发展。通过建设以特高压电网为核心的坚强国家电网,有力促进了煤电就地转化和水电大规模开发,实现了跨地区、跨流域水火互济,将清洁的电能从西部和北部大规模输送到中、东部地区,满足了中国经济快速发展对电力增长的巨大需求,实现了能源资源在全国范围内的优化配置,成为保障能源安全的战略途径。

1 特高压交流工程发展情况

2004年底,国家电网公司提出发展特高压输电技术、建设坚强国家电网的战略发展目标。在全面论证的基础上,国家发改委于2006年8月9日核准建设晋东南-南阳-荆门特高压交流试验示范工程,并于2009年1月6日建成投运。截至2019年

12月,中国已陆续建成投运23项特高压交流工程,在建5项,线路总长度超过1.4万km,已建和在建变电站(含开关站、串补站)32座。在广阔的三华(华北、华中、华东)地区已经初步建成特高压交流电网骨干网架,对于保障中国能源安全、推动绿色发展、促进雾霾治理发挥了重大作用。中国特高压交流工程简要情况见表1和图1。

表1 中国已建和在建的特高压交流工程列表

Tab. 1 List of UHV AC transmission projects already built and under construction in China

	工程项目	线路	变电容量/	投运
		长度/km	MVA	
1	特高压交流试验示范工程	640	6000	2009.01
2	试验示范工程扩建工程	—	12000	2011.12
3	皖电东送工程	2×649	21000	2013.09
4	浙北-福州工程	2×603	18000	2014.12
5	平圩电厂三期送出工程	4.8	—	2015.04
6	锡盟-山东工程	2×730	15000	2016.07
7	淮南-南京-上海工程	2×780	12000	2016.09
8	蒙西-天津南工程	2×616	24000	2016.11
9	榆横-潍坊工程	2×1059	15000	2017.08
10	锡盟-胜利工程	2×240	6000	2017.07
11	青州换流站-潍坊工程	2×74	3000	2017.09
12	临沂-临沂换流站工程	2×56	6000	2017.12
13	泰州站主变扩建工程	—	3000	2018.02
14	苏州站主变扩建工程	—	6000	2018.05
15	皖南换流站-皖南工程	2×5.5	—	2018.04
16	赵石畔电厂送出工程	19.5	—	2018.06
17	横山电厂送出工程	41.5	—	2018.06
18	大唐锡林浩特电厂送出工程	14	—	2018.12
19	神华胜利电厂送出工程	18.5	—	2018.12
20	北方胜利电厂送出工程	20	—	2018.12
21	苏通 GIL 综合管廊工程	2×6	—	2019.09
22	北京西-石家庄工程	2×224.9	—	2019.06
23	山东-河北环网工程	2×825.9	15000	2019.12
24	蒙西-晋中工程	2×304	—	在建
25	张北-雄安工程	2×319.9	6000	在建
26	驻马店-南阳工程	2×190.3	6000	在建
27	长治站配套电厂送出工程	105	—	在建
28	苏州站第三台主变扩建工程	—	3000	在建
合计		14230.3	177000	

1.1 技术突破阶段

1.1.1 特高压交流试验示范工程

1000kV 晋东南-南阳-荆门特高压交流试验示范工程起于山西晋东南(调度名长治,下同)变电站,经河南南阳开关站,止于湖北荆门变电站,线路全长640km,单回路架设。该工程是中国首个特高压交流输电工程。依托工程,中国研发、掌握了

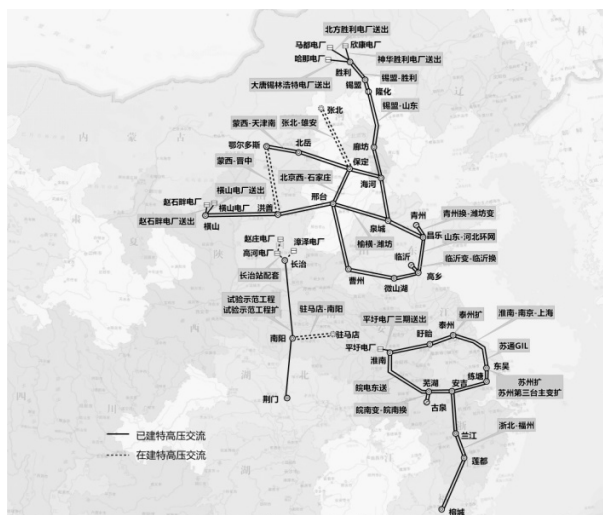


图 1 中国已建和在建的特高压交流工程示意图

Fig. 1 Diagram of UHV AC transmission projects already built and under construction in China

全套特高压交流输电技术，建立了世界最高参数的高电压、强电流试验能力和大电网安全稳定分析能力，研制了全套特高压交流设备，实现了科研、设计、设备、施工、调试和运行的全面自主化，全面验证了特高压交流输电技术的工程应用可行性。

1.1.2 特高压交流试验示范工程扩建工程

试验示范工程 2009 年 1 月投运后，为进一步发挥输电能力，验证特高压交流大容量、远距离、低损耗的输电优势，国家发改委于 2010 年 12 月核准建设特高压交流试验示范工程扩建工程。工程在世界上首次研制了特高压串补装置，晋东南至南阳段线路装设补偿度 40% 的串补(两侧各 20%)，南阳至荆门段线路装设 40% 的串补(集中布置于南阳侧)。投运后进行了大负荷试验，最大输送功率达 572 万 kW，创造了单回交流输电工程输送能力的世界纪录。

1.1.3 皖电东送工程

皖电东送工程包括淮南、皖南(芜湖)、浙北(安吉)、沪西(练塘)4 个变电站，线路全线采用钢管塔和同塔双回架设，是世界上首个商业运行的同塔双回特高压输电工程。依托皖电东送工程建设，全面掌握了特高压交流同塔双回路输电技术，实现特高压设备大批量稳定生产，工程建设的组织管理、科研、设计、制造、施工和运行各环节实现了新的提升，为特高压工程规模化建设奠定了坚实基础。

1.2 规模化建设阶段

1.2.1 浙北-福州工程

浙北-福州工程扩建浙北(安吉)站，新建浙中(兰江)、浙南(莲都)、福州(榕城)3 个变电站，全线

单、双回路混合架设。工程首次因地制宜混合应用同塔双回、两个单回路，进一步丰富、完善了系统研究、工程设计、设备研制、施工和运行维护技术。

1.2.2 “四交”工程

2014 年 5 月，国家能源局围绕国务院发布的《大气污染防治行动计划》出台配套措施，建设 12 条贯穿我国东西部的输电通道，其中包含 4 个特高压交流双回工程，即淮南-南京-上海、锡盟-山东、蒙西-天津南和榆横-潍坊工程。

淮南-南京-上海工程扩建淮南、沪西(练塘)变电站，新建南京(盱眙)、泰州、苏州(东吴)3 个变电站，与皖电东送工程组成华东特高压交流环网，提高华东地区接纳区外电力的能力。锡盟-山东工程包括锡盟、承德(隆化)、北京东(廊坊)、济南 4 站，其中承德为串补站，装设补偿度为 40% 的串补装置，集中布置在锡盟-北京东段线路距锡盟变电站 68km 处。蒙西-天津南工程包括蒙西(鄂尔多斯)、晋北(北岳)、北京西(保定)、天津南(海河)4 站，并将锡盟-山东工程的北京东-济南线路开断环入天津南站。榆横-潍坊工程包括榆横(横山)、晋中(洪善)、石家庄(邢台)、济南(泉城)、潍坊(昌乐)站，其中榆横为开关站，济南为扩建。3 个工程通过济南、天津南站实现了相互联通，奠定了华北特高压交流电网的基础。同时期，平圩电厂三期送出工程扩建淮南站，建设双回线路(导线单回架设)，是世界上首个发电厂直接升压至 1000kV 接入特高压交流电网的工程，减少输变电中间环节，提高电源送出通道输送能力，具有重要示范意义。

从淮南-南京-上海工程 2014 年 4 月核准，到榆横-潍坊工程 2017 年 8 月投运，用三年多时间建成了 4 个大规模工程，标志着中国特高压交流工程应用技术已经成熟。

1.3 完善提升阶段

1.3.1 苏通 GIL 综合管廊工程

淮南-南京-上海工程泰州-苏州段在苏通大桥上游穿越长江，原工程可研方案为大跨越(江中立塔 2 基)，位于长江下游黄金水道，工程难度大，行政审批困难。经综合论证，2016 年 1 月决定采用特高压 GIL(刚性气体绝缘输电线路)替代架空线方案，在江底隧道中敷设特高压 GIL。隧道工程穿越长距离密实砂层和有害气体地层，是穿越长江的大直径、长距离隧道之一，也是国内最深的水下隧道，隧道总长 5468.5m，水土压力超过 0.9MPa。GIL 双回路敷设，全长约 34200m(单相米)，是目前世界上

电压等级最高、输送容量最大、输送距离最长、技术水平最先进的 GIL 工程,工程已于 2019 年 9 月建成投运。

1.3.2 山东-河北环网工程

山东-河北环网工程新建枣庄和菏泽变电站,扩建石家庄、潍坊、济南变电站,全线同塔双回架设。工程于 2019 年 12 月投运,建成后将优化华北电网结构,满足多个特高压直流工程分层接入要求,提高系统安全稳定水平。

1.3.3 其它工程

锡盟-胜利工程扩建锡盟站,新建胜利站,目前胜利站周边大唐锡林浩特、神华胜利和北方胜利 3 个电厂送出工程,通过 1000kV 输电线路接入胜利站。青州换流站-潍坊、皖南换流站-皖南、临沂-临沂换流站工程分别扩建潍坊和皖南站,新建临沂站,是相关特高压直流输电工程的配套工程。泰州站主变扩建工程和苏州站主变扩建工程分别扩建泰州和苏州站的主变,提高电力交换和消纳能力。扩建榆横站,榆横站周边赵石畔和横山两个电厂送出工程通过 1000kV 输电线路接入榆横站。蒙西-晋中、北京西-石家庄工程分别扩建蒙西、晋中、北京西、石家庄站,加强了蒙西-天津南、榆横-潍坊两个输电通道之间的联络,提高了送电能力。张北-雄安工程可满足张北地区清洁能源外送及雄安新区清洁能源供电需要。驻马店-南阳工程是华中“日”字型环网的重要组成部分,为河南乃至华中电网安全稳定运行和大规模接受区外来电做好系统支撑和网架基础。扩建长治站,将漳泽、高河和赵庄 3 个电厂通过 1000kV 输电线路接入长治站。

2 特高压交流工程设计关键技术

2.1 特高压交流系统设计

2.1.1 无功平衡及稳态电压控制

特高压输电线路长、潮流变化范围大,系统无功平衡及稳态电压控制问题更突出。长度较长的特高压线路配置特高压并联电抗器,限制工频过电压;主变第三绕组配置低压感性和容性无功补偿设备,控制电网电压水平。采用高抗可降低线路轻载时的感性无功需求,但增加了重载时的无功损耗。特高压高抗补偿度一般为 80%~90%,系统较强区域补偿度可适当降低。特高压系统的无功容量按分层分区平衡原则配置,高、低压感性无功补偿度按 100%配置,容性无功补偿可保证线路重载时与外部系统的无功交换最小^[10]。

通过变压器低压侧无功补偿设备投切和变压器分接头调整,可实现系统稳态电压控制,电压控制范围为 1000~1100kV。

2.1.2 过电压与绝缘配合

特高压系统操作冲击电压进入空气间隙放电特性饱和区,设备内绝缘耐压水平的提高也受到极限尺寸限制,需深度控制过电压,降低设备和线路绝缘水平,节省工程投资^[11-12]。

1) 工频过电压限制:主要措施是特高压线路装设高抗。限值为:线路断路器变电站侧不大于 1.3pu,线路侧不大于 1.4pu(1pu=1100/ $\sqrt{3}$)。

2) 操作过电压限制:主要措施是采用断路器合闸电阻和金属氧化物避雷器。相对地操作过电压的限值为:线路沿线不大于 1.7pu,变电站不大于 1.6pu,相间操作过电压不大于 2.9pu(1pu= $\sqrt{2} \times 1100/\sqrt{3}$)。

3) 雷电过电压限制:采用金属氧化物避雷器限制雷电侵入波过电压,避雷器保护水平与其额定电压有关。避雷器额定电压的选择主要取决于工频过电压的大小和持续时间。母线侧避雷器的额定电压按母线侧最大工频过电压 1.3pu(826kV)选为 828kV;线路侧最大工频过电压为 1.4pu(889kV),但持续时间较短(不超过 0.5s),因此线路侧避雷器的额定电压也可选为 828kV,从而降低了特高压变电站设备的绝缘水平要求。

4) VFTO 限制:VFTO 是由于隔离开关操作产生的特快速瞬态过电压。VFTO 的幅值、频率受多种因素影响。通过开展特高压 GIS 中 VFTO 的真型试验研究,确定了 VFTO 特性和规律,以此提出了有效的仿真计算方法。特高压交流系统采用带投切电阻的隔离开关以及慢速隔离开关,有效限制了 VFTO^[13-14]。

5) 绝缘配合:特高压系统的绝缘配合方法与超高压系统相比有一定变化,一是引入了线路和变电站并联间隙数对空气间隙放电电压的影响,单个间隙的 50%放电电压要求值需相应提高;二是采用真型塔或仿真塔试验得出的工频、操作冲击和雷电冲击下空气间隙放电电压试验曲线用于线路绝缘配合。特高压系统操作过电压的波前时间在 1500 μ s 左右,考虑试验设备条件限制及裕度,操作冲击试验电压波形采用波前时间 1000 μ s 下的长波前试验波形,与采用波前时间 250 μ s 的标准电压波形相比,在满足技术要求的同时,提高了经济性。安装地点海拔高度 1000m 及以下 1000kV 系统用主要电气设

路采用“GIS套管—避雷器—CVT—高抗套管”的“四元件”设计,取消支柱绝缘子和敞开式接地开关,纵向尺寸减少,既节省占地,又提高了回路抗震水平,后续工程均全面沿用了这一设计方案。从浙北—福州工程开始,1000kV间隔宽度从54m优化至51m。枣庄站采用了110kV单塔电容器,可进一步减少占地。

特高压并联电抗器布置在靠近变电站围墙侧,有的变电站为满足噪声控制标准要求,需根据噪声计算结果,采取围墙上加装隔声屏障、电抗器加装隔声罩等特殊降噪措施。

2.2.4 抗震设计

特高压设备高、大、柔、重,抗震问题比超高压设备更突出。在参照国内外电气设备抗震设计规范、原则和方法基础上,提出了特高压电气设备抗震设防的新要求,开展了真型抗震试验,验证了设备和连接系统的抗震能力,提出了设备隔、减震技术,提升了抗震水平^[19-23]。

特高压变电站抗震设防标准由“50年超越概率为10%”提高到“50年超越概率为2%”。根据特高压变电站配电装置全场域互联系统抗震计算的结果提出了相关技术要求,瓷外套避雷器额定弯曲负荷不低于34kN、瓷外套CVT额定弯曲负荷不低于23kN,设备支架采用钢管格构式、动力放大系数不大于1.4。优化了1000kV设备布置和连线方案,并相应开发了新型金具。

为满足不同工程的抗震设防烈度要求,根据试验结果,确定了特高压设备减、隔震装置设计和安装工艺要求,对体形细长、重心高、重量大的特高压支柱类电气设备,如避雷器、电压互感器等可采用减震技术,对主变压器、高压电抗器等可安装隔震装置。

2.3 特高压线路设计

2.3.1 导地线选择

综合考虑经济电流密度、导线最高允许温度和电磁环境限值等,结合线路的系统条件、导线的电气和机械特性,综合计算不同导线型号和分裂根数组合对应的工程本体投资和功率损耗,通过年费用最小法选定导线型号和分裂根数。单回线路主要采用8分裂JL/G1A-500/45钢芯铝绞线,同塔双回线路主要采用8分裂JL/G1A-630/45钢芯铝绞线。在锡盟—胜利、山东—河北环网、北京西—石家庄等工程中推广应用8分裂JL1/LHA1-465/210铝合金芯铝绞线^[24]。

2.3.2 绝缘配合

通过现场污秽调查,结合污区分布图、沿线已建线路污区及运行情况,进行污区划分。对比不同型式绝缘子的绝缘性能、机电性能、耐气候性能等,确定选用绝缘子的型式;并结合线路的杆塔规划及导地线型式相关结论确定绝缘子强度配置方案;采用爬电比距法和人工污耐压法,确定绝缘子片数。悬垂串主要采用210kN、300kN和420kN复合绝缘子,结构高度一般为9m。耐张串主要采用300kN、420kN、550kN瓷和玻璃绝缘子。以1000m海拔、d级污区耐张串为例,根据承力情况,一般采用60片420kN双伞型绝缘子或50片550kN三伞型绝缘子^[25]。

从皖电东送工程开始研究新型复合绝缘子方案,在保证整塔绝缘安全的前提下,成功实现杆塔小型化设计。绝缘子串长从9.75m成功压缩至9m,缩短7.7%,并通过十字联板等配套金具优化,铁塔横担宽度减小4~5m,单、双回路铁塔塔高分别降低约2m、4m,塔重降低约8%。

2.3.3 防雷接地

特高压交流输电线路杆塔的高度和宽度均较超高压输电线路增加较多,因此线路遭雷击的概率也会增加。通过研究,交流特高压输电线路的防雷保护应以防雷电绕击为主。采用电气几何模型法等方法对特高压线路的雷击跳闸率进行了计算研究,得出合理的地线保护角,有效降低雷电绕击率。全线架设双地线,地线保护角取值:双回路线路保护角,在平原丘陵地区不宜大于 -3° ,在山区不宜大于 -5° ;单回路线路保护角,平原丘陵地区不宜大于 6° ,在山区不宜大于 -4° ;耐张塔地线对跳线保护角,平原单回路不大于 6° ,山区单回路和双回路不大于 0° ;变电站2km进出线段地线保护角不宜大于 -4° ,单回路采用三地线方案加强对中相的保护^[26-28]。

2.3.4 铁塔设计

特高压工程铁塔设计包含塔型选择、材质选择、节点及布置优化等方面内容,随着近年来多条特高压工程的建成投运,已形成较为完备的设计体系并积累了丰富的工程经验^[29]。

同塔双回线路采用钢管塔。为提高钢管塔加工效率,并充分保障加工质量,特高压钢管塔改变以往相贯焊、加劲法兰连接的传统构造方式,全面采用锻造法兰和插板连接,每基塔大幅降低焊接工作量60%以上,并且主要焊缝质量均可有效检测,有

效提升了钢管塔产能、保障了钢管塔加工质量。目前特高压钢管塔已形成标准钢管库以及典型节点库,极大地提高了设计和加工效率。随着加工工艺和生产能力的提高,高强度钢材在钢管塔中规模化应用。在山东—河北环网、北京西—石家庄工程中大批量应用 Q420 钢管 18.6 万吨,占总量 54%,降低塔重约 5%。特高压钢管塔平均单基塔重约 190 吨。

单回线路主要采用角钢塔。随着电压等级提高和生产能力的进步,角钢塔设计历经四代塔型变化,普通采用 Q420 高强度大角钢,经济性进一步提升。特高压角钢塔平均单基塔重约 136 吨。

3 特高压交流设备研制

依托特高压交流工程建设,自主研制了世界上技术参数最高的全套特高压设备,带动国内骨干制造厂的硬件条件(厂房规模、工装设备、环境条件、试验设备等)和软实力(设计、制造、检验、试验水平,质量管控水平,人员队伍建设)大幅提升,形成了特高压设备批量生产能力。

3.1 特高压变压器

特高压交流工程采用的 1000MVA 特高压变压器(图 3)是世界上电压最高、单体容量最大的变压器,在运输条件的严格限制下,解决了全场域电场控制、无局放绝缘设计、减振降噪、漏磁和温升控制等一系列技术难题。2009 年 1 月投运的试验示范工程特高压变压器采用了三柱设计,单柱容量 330MVA,已达当时世界最高水平。在此基础上,又集中解决漏磁控制难题,2010 年研制成功双柱 1000MVA 特高压变压器,进一步提升单柱容量至 500MVA,成功应用于 2011 年 12 月投运的试验示范工程扩建工程。双柱产品难度更大,但尺寸、重量、成本均优于三柱产品,逐步成为主流方案,从榆横—潍坊工程起全面替代三柱方案。皖电东送工程皖南站应用



图 3 试验中的特高压变压器(左)和并联电抗器(右)

Fig. 3 UHV transformer(left) and shunt reactor(right) in testing

有载调压,其它均采用无载调压。目前特高压交流工程已采用特高压变压器 193 台^[30-34]。

在主流产品研制经验基础上,还研制了一系列新产品:解体运输、现场组装式特高压变压器^[35],为运输特别困难地区应用提供了解决方案,已在晋中站应用;1000kV/400MVA 升压变压器^[36],可将 20kV 级的发电机输出电压直接升至 1000kV 级,使发电厂可一级升压、直发直送,以 1000kV 直接接入特高压变电站,已在多个电厂工程应用;1000kV/1500MVA 三柱特高压变压器^[37],进一步大幅提升单体容量,为变电站设计提供了新选择。特高压变压器和并联电抗器采用的特高压套管、出线装置^[38]、硅钢片等关键组件最初均为进口,试验示范工程后组织开展了国产替代产品研制,从皖电东送工程起试用并逐步增加,目前均已实现了大比例替代进口。

3.2 特高压并联电抗器

特高压并联电抗器(图 3)是世界上电压最高、容量最大的并联电抗器。特高压交流试验示范工程研制应用了 320Mvar、240Mvar 和 200Mvar 三种额定容量的产品。此后根据不同工程需求,研制了额定容量 280Mvar 和 160Mvar 的产品,实现了从 160Mvar~320Mvar 全系列产品的研制应用。按照不同的设计理念,有单柱、双柱单器身和双柱双器身等不同结构。目前特高压交流工程已采用特高压并联电抗器 251 台^[33-34]。此外,还研制成功本体额定容量 200Mvar、三级容量可调的特高压可控并联电抗器,并计划在张北站示范应用,为实现特高压柔性输电提供了技术基础^[39]。

3.3 特高压开关设备

特高压 GIS 开关设备(图 4)的研制,解决了高电压绝缘、高效能灭弧室、大容量高可靠性分合闸电阻装置、大功率操作机构、VFTO 控制等技术难题。最初采用了中外合作研发制造的技术路线,试验示范工程成功投运后,国内开关厂基于各自不同情况,分别提出了自主化设计方案并通过型式试验,从皖电东送工程开始试用并逐步扩大比例。目前特高压交流工程共采用 296 间隔特高压 GIS/HGIS/GIL,其中约 20%为自主化设计方案^[40-44]。

特高压 GIS 额定电流 6300A(母线 8000A),断路器额定短路开断电流最初为 50kA,从试验示范工程扩建工程起全部提升采用 63kA 断路器。断路器有双断口和四断口两种方案,双断口方案合闸电阻与灭弧室在同一罐体内,四断口方案合闸电阻与



图4 运行中特高压 GIS 开关设备

Fig. 4 UHV GIS in operation

灭弧室在不同罐体内、合闸电阻合后即分。隔离开关有立式带电阻和卧式无电阻两种方案,卧式无电阻隔离开关合闸速度相对较慢,有效解决了无电阻合闸的 VFTO 问题。

特高压 GIS 用盆式绝缘子最初均采用进口产品,在试验示范工程后成功实现了国产化研制,并通过皖电东送工程组织开展的专项提升工作,产品机械和绝缘特性和稳定性方面显著提高、超越了进口产品,从“四交”工程开始,特高压 GIS 绝大部分盆式绝缘子采用了国产产品。

3.4 特高压串补

为了提高特高压交流线路输电能力,依托特高压交流试验示范工程扩建工程研制了特高压串补装置(图 5)^[45]。串补装置是由多种设备构成的系统,在研制过程中解决了关键技术参数优化选取,超大容量电容器组的设计和保护,控制保护和测量系统的强抗电磁干扰能力,串补火花间隙动作可靠性和通流能力,限压器均流性能和压力释放能力,旁路开关快速开合能力,以及阻尼装置、光纤柱、电流互感器的结构设计等关键技术问题。在试验示范工程扩建工程后,锡盟-山东工程也应用了特高压串补。特高压串补为特高压电网的经济运行和系统稳定水平提升提供了有力支撑。



图5 运行中的特高压串补

Fig. 5 UHV series capacitors in operation

3.5 特高压避雷器

特高压避雷器(图 6)研制采用了通流能力大、残压比低、非线性及抗老化性能优异的金属氧化物电阻片;采用四柱并联结构大幅降低残压水平,与 750kV 和 500kV 避雷器相比,压比分别降低 9%和 16%,能量吸收能力达 40MJ;通过外部均压环和内部均压电容,把避雷器电压分布不均匀系数控制在 1.10 以内^[46-48]。为满足 1000kV 出线回路“四元件”设计中,避雷器兼做支柱绝缘子的要求,优化了瓷套设计,提升了特高压避雷器抗弯和抗震性能,通过了 0.3g 地震试验。此外还研制了适用于 e 级污秽地区特高压避雷器、复合外套特高压避雷器、特高压线路避雷器等,已投入运行;研制了特高压可控避雷器,采用开关控制避雷器,实现了正常工况下低荷电率和暂态工况下低残压,可深度抑制操作过电压、替代断路器合闸电阻方案,将在北京西—石家庄工程中示范应用。



图6 运行中的特高压避雷器和 CVT

Fig. 6 UHV arresters and CVTs in operation

3.6 特高压 CVT(电容式电压互感器)

特高压 CVT(图 6)额定电容量 5000pF,计量用准确级 0.2 级、测量及保护组合准确级 0.5/3P 级、保护用准确级 3P 级。每绕组额定二次容量 15VA。电磁单元设外部调节端子,方便检修调试^[49]。在变电站 1000kV 出线“四元件”方案中,特高压 CVT 兼作支柱,瓷套型通过了 0.2g(无减震器)和 0.4g(带减震器)抗震试验,复合外套型通过了 0.3g(无减震器)和 0.5g(带减震器)抗震试验。

3.7 低压无功补偿和开关设备

特高压变电站低压无功补偿设备主要有 110kV 并联电抗器、电容器和专用开关(图 7)。

特高压变电站 110kV 并联电抗器单组容量 240Mvar,采用单相两台电抗器串联设计,单台容量 40Mvar,连续最高工作电压 $115/\sqrt{3}$ kV,额定电

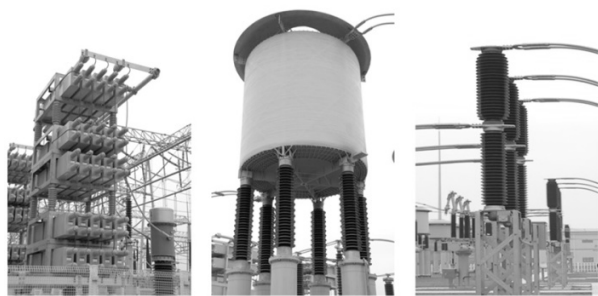


图 7 运行中的 110kV 电容器组、电抗器、专用开关

Fig. 7 110kV capacitor banks, shunt reactors and special-use switches in operation

流 1320A, 损耗不大于 2.45W/kvar。采用特殊的“轴向并列导线分级起绕”的线圈绕法和独特的环流调整技术, 使各支路不平衡电流严格控制在 5% 以内; 采用全绝缘换位导线有效降低了电抗器的涡流损耗和附加损耗; 严格准确控制各层绕组的几何尺寸, 制造误差在 $\pm 1.5\%$ 之内, 每组单相产品电抗与三相平均值偏差在 $\pm 2\%$ 以内; 通过了水平加速度 0.5g 抗震真型试验。

特高压变电站 110kV 并联电容器装置单组容量 240Mvar、单台电容 556kvar。电容器组电容偏差控制在 3% 以内。为满足不平衡保护性能要求, 各串联段的容差由常规的 1% 减少到 5‰, 各臂间容差由 5‰ 降到 1‰, 并采用国际首创的双桥差不平衡电流保护, 有效提高了不平衡保护整定值及抗扰能力。电容器单元采用高灵敏、高可靠的内熔丝保护技术, 有效动作电压范围较常规提升 46%, 解决了电容器单元外熔丝性能差而无熔丝电容器内部元件串联数要求大等问题。电容器组一直采用双塔结构, 为进一步减小占地, 还研制了单塔结构、每组电容器占地减少约 40%, 将在山东—河北环网工程试用。

特高压变电站 110kV 开关主要用于投切 110kV 电容器和电抗器。为满足频繁投切需要, 要求电气寿命大于 5000 次, 且额定电容器组开断电流 1600A, 关合电容器组涌流高达 9.3 kA, 远大于常规要求。工程采用了瓷柱式断路器和 HGIS 负荷开关两种技术方案, 断路器方案配选相控制器、通过选择分合闸相位减少触头烧蚀, 负荷开关方案采用高耐烧蚀的触头、但不能切除故障短路电流。产品性能经过 5000 次连续开合电寿命试验的严格考核。

3.8 控制保护设备

特高压交流工程均采用我国自主研发的全数字化保护控制装置。特高压交流输电系统的分布电容大、线路阻抗小、相间耦合作用强, 电磁暂态过

程十分复杂, 呈现新的电气特性, 与常规电压等级工程有明显区别。为此, 根据工程设计方案, 基于对暂态电容电流、高频分量、非周期分量等电气特征量的仿真分析, 研发了保护新原理和新算法, 优化完善系统设计, 改进硬件结构、处理技术及加工工艺, 提高装置采样精度、抗干扰性能和可靠性, 解决了保护动作快速性和可靠性、分布电容电流特别是暂态电容电流对保护的影响、高频分量特别是非整次谐波对保护的影响、短路过程中衰减缓慢的非周期分量对保护的影响、特高压变压器保护配置、特高压变压器励磁涌流的影响、电抗器保护匝间短路灵敏度、串补装置联动线路保护以及二次系统的电磁兼容性能等一系列关键技术难题。特高压交流工程控制保护设备在运行中表现良好, 发挥了重要作用^[50]。

3.9 特高压 GIL

苏通 GIL 综合管廊工程是世界上首个特高压 GIL 工程, 与特高压 GIS 母线相比, 特高压 GIL 的技术难度主要体现在: 技术要求显著提升, 1 分钟工频耐受电压从 1100kV 提升至 1150kV, 气体年泄漏率从 0.5% 提升至 0.01%, 伸缩节机械寿命从 10000 次提高到 15000 次; 单相长度达 5.7km, 约为 GIS 母线的 20 倍; 标准气室长 108 米, 约为 GIS 母线的 3 倍, 需沿着不断三维变角的江底隧道敷设, 两端还有 20~30m 深的竖井, 工程设计、施工难度大。世界上尚没有成熟的特高压 GIL 技术方案, 我国依托淮南—南京—上海工程研制试用了特高压 GIL, 确认了基本的技术可行性, 但其技术水平实际仍不满足苏通工程要求。

苏通工程特高压 GIL 采用了中外合作技术路线, 以发挥各自技术优势。与 GIS 盆式绝缘子法兰外置的常规设计不同, 特高压 GIL 的盆式绝缘子均采用内置式, 外部仅有筒体之间的密封面, 从而大幅减少密封面、改善泄漏率。双回路特高压 GIL 分别采用了两种技术路线, 一种是导体固定、支持绝缘子(三柱形)可滑动, 另一只是支持绝缘子(三叉星形、盆形交替)固定、导体可滑动^[51]。工程已于 2019 年 9 月建成投运。通过特高压 GIL 的研制供货, 将显著提升国内设备厂在国内外各电压等级 GIL 市场上的竞争力。

4 特高压交流工程建设

4.1 施工安装

特高压交流工程建设过程中高度重视施工管

理和技术创新,解决了制约工程建设的核心技术难题,形成了完整的施工工艺导则、施工及验收规范、施工质量检验及评定规程、标准工艺等技术标准体系,为工程建设及启动投运提供了一整套技术标准,为规模化、标准化建设提供了支撑。

4.1.1 变电工程安装施工关键技术

与500kV设备相比,特高压设备尺寸大、重量重、工艺要求高,现场施工难度更大。

特高压交流工程主设备基础体积大、精度要求高。如特高压GIS基础要求表面平整度控制在3mm范围内、任意两块预埋件标高偏差不大于2mm,因此在混凝土浇筑过程中,用水准仪严格跟踪控制顶面标高和预埋件标高,为设备安装提供无垫铁施工条件,保证设备安装后稳定运行。

1000kV构架安装高度最高达77.9m,要求整体垂直度 $\leq H/1500$ (H为构架柱总高),且不大于30mm,根开偏差 $\leq 5\text{mm}$,构架柱组立的精度控制和钢梁的就位安装是两大难点。通过必须注意合理调整构件组立顺序、优化构件组合方式。

特高压变压器与高抗现场安装工艺要求十分严格,各项指标对确保设备安全稳定运行十分关键,必须严格确保绝缘油的颗粒度、微水及含气量指标,抽真空真空度和维持时间、注油速度、热油循环油温和循环量、静置时间等要求。现场需配备全封闭的变压器油处理系统,和高性能的真空滤油机、真空泵等设备。在高寒地区开展安装,需采用保温棚保温和防风沙,必要时还需采用加热装置加热油箱,保证热油循环温度。特高压变压器套管最重达6t,长约14m,采用瓷外套,细长结构,吊装风险大,必须严格遵守制造厂规定,采用专用工装进行吊装,确保不损坏瓷套。

特高压GIS在现场对接,对温湿度和降尘量等环境条件要求高。GIS对接安装时,一般在对接处搭设简易塑料安装棚,难以保证环境控制效果。为此,依托浙北—福州工程创新研发了特高压GIS现场安装用移动式装配厂房,厂房为硬质全封闭,可同时横跨三相GIS串内设备和六相主母线,可在轨道上沿GIS安装方向移动,内设行车用于吊装,车间内的温湿度、降尘量可控制达到工厂车间的水平,完全实现了“工厂化”安装。该方法从浙北—福州国内工程起全面应用,对确保特高压GIS安装质量起到了重要作用^[52]。

4.1.2 线路施工关键技术

特高压交流工程双回路钢管塔平均每个塔腿

50m³混凝土,塔高平均110m、塔重190余吨,采用八分裂导线,安全风险大、精度要求高,施工技术总体呈现机械化、自动化、装备化趋势^[53-54]。

1) 基础施工关键技术。

重点针对人工掏挖(挖孔)等高风险作业基础,研制应用新型旋挖钻机等专用施工装备实现机械开挖、机械成孔,积极探索推进山区基础施工装备的轻型化、小型化。基础钢筋全面采用工厂化(集中)加工、配送,主筋连接采用机械连接工艺。混凝土浇筑全面采用预拌混凝土(商混或集中搅拌)。积极研发应用PHC管桩、锚杆基础、微型桩基础等新型环保基础相应施工工艺。

2) 组塔施工关键技术。

针对同塔双回路钢管塔铁塔高、重、大,组立技术难、安全风险大、质量要求高的特点,全面推广使用落地抱杆(含落地双平臂抱杆、落地摇臂抱杆、单动臂抱杆等),严控安全风险、确保施工质量,提高组塔施工机械化水平。

针对山区地形酒杯型角钢塔窗口高度大、组立技术难度和安全风险大的特点,开展了系列化研究,提出了改进型落地双平臂抱杆、高强辅助臂架、辅助人字抱杆在酒杯型角钢塔横担上移动技术等,解决酒杯型直线塔超长横担吊装难题,提高施工安全性和效率。针对特殊困难地段,研制应用附着式自提升抱杆技术,为解决高山大岭、无法打拉线等特殊施工难题提供了解决方案。

组织实施了“直升机组塔”试点应用,为规模化推广应用直升机辅助电力工程建设,解决特殊困难地区组塔难题积累了经验,在交通条件较好的地区,广泛应用大吨位汽车起重机组塔技术。

同时,针对8.8级大扭矩螺栓紧固难题研发了电动扭矩扳手,满足紧固力矩、保证紧固精度、降低劳动强度;针对铁塔过高、作业人员登高困难的情况,研发了轻型升降机,降低劳动强度、提高施工安全水平;针对铁塔高、通讯困难,开发了高塔组立施工通讯指挥系统,实现了高处作业点位的可视化,提高了指挥人员指令下达的及时性和准确性;研究了“悬浮抱杆受力监控系统”,实现监控参数的自动预警和过载保护功能。

3) 架线施工关键技术。

针对八分裂导线放线施工,全面采用导引绳腾空展放技术,并研制应用了2×一牵四、一牵八、二牵八等放线工艺,解决了特高压导线展放和质量控制难题。研究应用了直升机展放导引绳施工技术,

研究探索了直升机展放导引绳直接入滑车技术和过酒杯型直线塔中相技术。

针对“三跨”等重要交叉跨越，开展跨越重要设施新技术研究，在设计优化、施工方案优化、装备提升等方面系统提出解决方案。发布《跨越重要输电通道和重要铁路设计与施工指导意见》，明确设计边界条件、施工组织与技术原则；形成标准化跨越施工工艺；形成《跨越施工边界条件与方案优化原则意见》等；组织研制旋转臂式、吊桥式、伸缩臂式跨越装置，解决快速封网、带电跨越等难题，具有安全可靠、机械化程度高、施工效率高等特点，在工程中试点应用并推广，实现了跨越施工的规范化和标准化。

研制了“多轮组合式放线滑车”，体积小、重量轻，两种类型的多轮组合式滑车可覆盖目前所有类型的导线，提高机具利用率，降低整体成本。研制了“液压紧线器(液压葫芦)”，实现了导地线提升、收紧等作业的机械化，显著提高了施工效率。

4) 材料运输关键技术。

针对河网、泥沼地区，研制了轻轨、气囊、旱船等配套机具解决塔材运输问题；针对山区，研究了标准化货运索道、履带式运输车等，解决了塔材运输难题，并制定了索道管理规定、索道部件标准化图册等，实现索道运输的规范化和标准化；在无人区等运输特别困难的地带，研究探索了直升机大规模运输物料工艺。

5) 施工培训关键技术。

开发应用了覆盖索道运输、铁塔组立、放线施工等环节的虚拟现实仿真培训系统，将主要施工技术、工艺和安全质量要求可视化，并实现人机交互，有效提升了技术培训和安全教育效果。

4.2 现场交接试验

特高压设备的交接试验中难度较大的主要有特高压变压器局部放电试验、特高压 GIS 现场耐压试验和特高压 CVT 准确度测量。

4.2.1 特高压变压器局部放电试验

特高压变压器的现场长时感应耐压带局部放电试验，电压略低于出厂试验电压，激发电压为 $953\text{kV}(1.5 \times 1100/\sqrt{3}\text{kV})$ ，激发时间按 $120\text{s} \times \text{额定频率}/\text{试验频率}$ 做频率折算，局放测试电压 $826\text{kV}(1.3 \times 1100/\sqrt{3}\text{kV})$ ，测试时间为 60min (不做频率折算)。试验示范工程采用发电机组加压，试验示范工程扩建工程的南阳站扩建工程首次采用了变频电源法，由于设备轻便、可靠性高，从皖电东送工程

开始，绝大多数工程均采用变频电源法。最初并未严格规定局放测试时间是否进行频率折算，从锡盟—山东工程后，严格规定了测试时间为 60min 、不做折算^[55-57]。

4.2.2 特高压 GIS 现场耐压试验

特高压 GIS 单元数量多、现场安装施工周期长，因此现场耐压试验采用分阶段方式，每三到四间隔进行一次耐压试验。试验电压最初为出厂试验电压(1100kV)的 80% 。皖电东送工程特高压 GIS 现场耐压试验放电极少，但系统调试时放电较多，为此从浙北—福州工程起，将试验电压提升至 1100kV ，与出厂相同，试验把关作用更明显，实践证明有效解决了系统调试放电率高的问题，并引导了设备质量提升。此外，为排除在分阶段耐压后开关的多次传动操作可能导致在系统调试时开关气室内部异物放电的隐患，从浙北—福州工程起，明确在系统调试前增加全站带电试验，对全站特高压 GIS 进行 $762\text{kV}/1\text{h}$ 耐压试验^[58-59]。

4.2.3 特高压 CVT 准确度测量

特高压 CVT 准确度试验采用差值法，在 80% 、 100% 和 105% 额定电压下进行测量，核心试验设备是适合现场使用的 1000kV 、准确级 0.05 级标准电压互感器。在试验示范工程之前，国际上尚无此类设备，为满足现场试验需要，先后研制出准确级 0.05 级液压升降的单极式标准电压互感器和便于运输、组装的串级式标准电压互感器。皖电东送工程开始，开展了特高压 CVT 准确度在线测试技术研究，研发出了全套新型的在线校验装置，以在线比对的方式对高抗侧 CVT 进行校准，这样既解决了高抗侧 CVT 全电压下误差测试问题，又减小了邻近效应影响，使测试结果更符合实际情况^[60-61]。

4.3 系统调试

特高压系统调试的作用是考核检验工程各项功能和设备状态正常。特高压交流试验示范工程系统调试项目包括 3 大类^[62]：零起试验类，包括零起升流和零起升压试验；设备投切试验类，包括投切空载变压器、空载线路、高抗和低压无功补偿设备等；联网试验类，包括线路并、解列试验，联络线功率控制试验，联网方式下拉环流试验，人工短路接地试验，系统动态扰动试验，大负荷试验，二次系统抗干扰试验。在各类试验中，开展交流电气量谐波测试、线路人工单相接地试验测试、CVT 暂态响应特性测试、继电保护核相测试、电磁环境测试、架空地线感应电压测试、暂态电压/电流测量、

主变高抗振动测试、变电设备红外和紫外测试、计量装置测试等测试项目。

后续特高压交流工程,根据系统及工程特点,不再开展零起类试验;简化了联网类试验,从浙北—福州工程起不再进行地线感应电压测试,从淮南—南京—上海工程起不再开展大负荷试验、且除串补和 GIL 工程外不再开展人工短路接地试验;部分工程增设 VFTO 测试、断路器选相测试、特高压同塔双回线路感应电压电流测试等项目。

5 特高压交流技术标准体系建设

依托特高压交流试验示范工程建设,我国全面掌握了特高压交流输电从规划设计、设备制造、施工安装、调试试验到运行维护的全套核心技术,成功研制了代表国际高压设备制造最高水平的全套特高压交流设备,具备了国际上功能最全、试验参数水平最高的高电压、强电流试验能力,建立了特高压交流输电技术标准体系^[63]。

2007 年 2 月国家电网公司依托试验示范工程建设成立了特高压交流输电标准化技术工作委员会,研究提出了由七大类 79 项国家标准和行业标准组成的特高压交流技术标准体系,全面涵盖系统研究、工程设计、设备制造、施工安装、调试试验到运行维护等内容。

2014 年 6 月在国际电工委员会(IEC)第二次全体会议上成立了 TC122 特高压交流系统技术委员会,由中国担任主席。2015 年 6 月在瑞士进行的 TC122 第二次全体会议及技术研讨会中,首批成立特高压交流输电系统规划与设计、变电站与线路设计以及调试 3 个工作组,推动特高压交流标准国际化工作。

2017 年 10 月,国家标准委批准成立全国特高压交流输电标准化技术委员会,主要负责 800kV 以上特高压交流系统(包括规划、设计、技术要求、可靠性、建设、调试、运行检修等)的标准体系建设、制定/修订、标准宣贯等工作,同时承担 IEC/TC122 对口的标准化技术业务工作,有利于特高压交流输电标准体系完善,相关标准制定和维护,标准国际化等相关工作开展。

6 结论

1) 基于中国主要能源资源与需求中心呈远距离逆向分布的国情,满足经济社会发展对电力不断增长的需求,2004 年底提出了发展特高压输电技

术、建设坚强电网的战略。

2) 2009 年初特高压交流试验示范工程建成投运,至 2019 年 12 月已陆续建成投运 23 项特高压交流工程,经历了技术突破、规模化建设和完善提升 3 个阶段。

3) 依托工程建设,中国全面掌握并不断优化提升工程设计、设备研制、施工安装、调试试验等全套特高压交流输变电技术,解决了特高压技术大规模工程应用的各种难题,形成了工程设计的典型方案和施工安装的标准工艺,研制了世界上最高电压等级、最高参数的全套特高压设备,建立了完整的特高压交流技术标准体系。

4) 中国特高压交流工程的成功实践充分验证了特高压交流输变电技术规模化应用的可行性,为特高压交流输电技术未来的进一步发展和应用储备了技术和人才,奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005:1-19.
Liu Zhenya. Ultra-high voltage grid[M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2005: 1-19(in Chinese).
- [2] 关志成,朱英浩,周小谦,等.中国电气工程大典 第10卷 输变电工程[M].北京:中国电力出版社,2010:727-738.
Guan Zhicheng, Zhu Yinghao, Zhou Xiaoqian, et al. China electrical engineering canon-vol.10, transmission and distribution engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 727-738(in Chinese).
- [3] 刘振亚.国家电网观点:特高压输电是必然选择[J].瞭望新闻周刊,2006,49:20-21.
Liu Zhenya. View of State Grid Corporation of China: UHV transmission is the inevitable choice[J]. Outlook Weekly, 2006, 49: 20-21(in Chinese).
- [4] 王凤鸣.苏联1150kV输电的现状[J].高电压技术,1991,4:80-83.
Wang Fengming. Current status of 1150kV transmission in the Soviet Union[J]. High Voltage Engineering, 1991, 4: 80-83(in Chinese).
- [5] 中国电工技术学会特高压输变电技术考察团.俄罗斯、乌克兰超、特高压输变电技术发展近况[J].电力设备,2003,4(2):49-56.
Delegation on UHV Power Transmission and Transformation technology of China Electrotechnical Society. Recent development of EHV and UHV power transmission and transformation technologies in Russia and Ukraine[J]. Electrical Equipment 2003, 4(2): 49-56(in Chinese).

- [6] 陆宠惠, 万启发, 谷定燮, 等. 日本 1000kV 特高压输电技术[J]. 高电压技术, 1998, 24(2): 47-49.
Lu Chongyu, Wan Qifa, Gu Dingxi, et al. The 1000kV UHV Transmission Technology in Japan[J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(2): 47-49(in Chinese).
- [7] 贺以燕. 意、日、俄、乌特高压输变电设备科研、制造及输电系统简介(上)[J]. 变压器, 2003, 40(1): 26-30.
He Yiyan. Introduction to research, manufacture of UHV transmission and transformation equipment and transmission system in Italy, Japan, Russia and Ukraine (Part one) [J]. Transformer, 2003, 40(1): 26-30(in Chinese).
- [8] 贺以燕. 意、日、俄、乌特高压输变电设备科研、制造及输电系统简介(下)[J]. 变压器, 2003, 40(2): 26-28.
He Yiyan. Introduction to research, manufacture of UHV transmission and transformation equipment and transmission system in Italy, Japan, Russia and Ukraine (Part two) [J]. Transformer, 2003, 40(2): 26-28(in Chinese).
- [9] Manzoni G, Annestrand S A, Cardoso R, et al. Electric power transmission at voltages of 1000 kV AC or ± 600 kV DC and above—network problems and solutions peculiar to UHV AC transmission[R]. CIGRE: Working Group 38.04, 1988.
- [10] Shen Hong, Ban Liangeng, Zhang Jian, et al. Study on reactive power balance and steady voltage control of large-scale long-distance AC Transmission System[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission. Beijing, 2009.
- [11] 谷定燮, 周沛洪, 修木洪, 等. 交流 1000kV 输电系统过电压和绝缘配合研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 1-6.
Gu Dingxie, Zhou Peihong, Xiu Muhong, et al. Study on overvoltage and insulation coordination for 1000 kV AC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 1-6(in Chinese).
- [12] Lin Jiming, Wang Shaowu, Ban Liangeng, et al. Limitation of the overvoltages in 1000 kV pilot project in China[C]//Proceedings of International Symposium on International Standards for Ultra High Voltage. Beijing, 2007.
- [13] Ban Liangeng, Xiang Zutao, Wang Sen, et al. Estimation of VFTO for GIS and HGIS of China 1000 kV UHV pilot project and its suppressing counter measures[C]//Proceedings of IEC/CIGRE UHV Symposium. Beijing: IEC/CIGRE UHV Symposium, 2007.
- [14] Gu Dingxie, Zhou Peihong, Dai Min, et al. Study on VFTO characteristics of 1000 kV GIS transformer substation[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission. Beijing, 2009.
- [15] Zhao Luxing, Wu Guifang, Lu Jiayu, et al. Measurement and analysis on electromagnetic environments of 1000 kV UHV AC transmission line[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission. Beijing, 2009.
- [16] Liu Yunpeng, You Shaohua, Wan Qifa, et al. Study on corona loss of China's 1000kV UHV AC power transmission demonstration project[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission. Beijing, 2009.
- [17] Zhao Zhibin, Cui Xiang, Zhang Xiaowu, et al. Calculation and analysis of passive interference from UHV AC transmission line[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission. Beijing, 2009.
- [18] 武守远, 戴朝波, 等. 特高压串联电容器补偿装置电容器研究报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
Wu Shouyuan, Dai Chaobo, et al. Research report on capacitor of compensation device of UHV series capacitor [R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2010(in Chinese).
- [19] 程永锋, 王海菠, 卢智成, 等. 特高压电抗器-套管体系抗震性能及本体动力放大作用计算方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 6109-6117.
Cheng Yongfeng, Wang Haibo, Lu Zhicheng, et al. Seismic performance and calculation method of dynamic amplification of body research of UHV reactor-bushing system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 6109-6117(in Chinese).
- [20] 孙宇晗, 程永锋, 卢智成, 等. 1100kV 复合外绝缘套管地震模拟振动台试验研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3224-3230.
Sun Yuhan, Cheng Yongfeng, Lu Zhicheng, et al. Study on earthquake simulation shaking table test of 1100 kV composite external insulation bushing[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3224-3230(in Chinese).
- [21] 孙宇晗, 卢智成, 刘振林, 等. 1100kV 特高压套管地震模拟振动台试验[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 4139-4144.
Sun Yuhan, Lu Zhicheng, Liu Zhenlin, et al. Earthquake simulation shaking table test for 1100kV UHV bushing [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 4139-4144(in Chinese).
- [22] 孙宇晗, 程永锋, 王晓宁, 等. 1100kV 气体绝缘封闭开关复合外绝缘套管地震模拟振动台试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2179-2187.
Sun Yuhan, Cheng Yongfeng, Wang Xiaoning, et al. Studies on earthquake simulation shaking table tests of 1100kV gas insulated switchgear composite external insulation bushings[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2179-2187(in Chinese).

- [23] 孙宇晗, 程永锋, 卢智成, 等. 特高压 GIS 瓷质套管与复合套管抗震性能试验研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 541-548.
- Sun Yuhan, Cheng Yongfeng, Lu Zhicheng, et al. Experimental research on seismic performance of UHV GIS porcelain bushing and composite bushing[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 541-548(in Chinese).
- [24] Li Yongwei, Liang Zhengping, Yuan Jun, et al. Design of 1000kV UHV transmission line[C]//Proceedings of IEC/CIGRE International Symposium on International Standards for Ultra High Voltage. Beijing, 2007.
- [25] Su Zhiyi, Zhou Jun. Pollution external insulation design for UHV AC project in China[C]//Proceedings of IEC/CIGRE International Symposium on International Standards for Ultra High Voltage. Beijing, 2007.
- [26] Ge Dong, Zhang Cuixia, Yin Yu, et al. Lightning performance estimation on river crossing of UHVAC transmission line[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission. Beijing, 2009.
- [27] He Hengxin, Chen Jiahong, He Junjia, et al. Study on the lightning shielding performance of double circuit UHVAC overhead transmission line[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission. Beijing, 2009.
- [28] Feng Wanxing, Chen Jiahong, Fang Yuhe, et al. Design of lightning detection network for transmission line of 1000kV UHV AC demonstration Project[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission. Beijing, 2009.
- [29] Chen Haibo, Li Qinghua, Li Maohua, et al. Load consideration of the Chinese UHV AC transmission towers[C]//Proceedings of IEC/CIGRE International Symposium on International Standards for Ultra High Voltage. Beijing, 2007.
- [30] Li Guangfan, Wang Xiaoning, Li Peng, et al. Insulation level and test technology of UHV transformers[C]//Proceedings of 2006 International UHV Power Transmission Technology. Beijing, 2006.
- [31] Zhong Juntao, Wang Xiaoning, Luo Jun. Development of UHV AC transformers[C]//Proceedings of International Symposium on Standards for Ultra High Voltage Transmission. New Delhi, India, 2009.
- [32] 李光范, 王晓宁, 李鹏, 等. 1000kV 特高压电力变压器绝缘水平及试验研究[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 1-6, 40.
- Li Guangfan, Wang Xiaoning, Li Peng, et al. Insulation level and test technology of 1000kV power transformers[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 1-6, 40(in Chinese).
- [33] Han X C, Wang X N, Wang N H, et al. Research and application of UHV AC transformers and shunt reactors [C]//Proceedings of 2016 CIGRE Session. Paris, France: CIGRE, 2016.
- [34] 王晓宁, 王绍武, 韩先才, 等. 特高压变压器及并联电抗器研制及应用[C]//2015 年(第二届)全国电网技术交流会论文集. 北京: 中国电力规划设计协会, 2015: 5-9.
- Wang Xiaoning, Wang Shaowu, Han Xiancai, et al. R&D and engineering application of UHV AC transformers and shunt reactors[C]//Beijing, 2015: 5-9(in Chinese).
- [35] Wang X, Wu J, Sun G, et al. A study on key technology and demonstration application of UHV AC site assembled transformers[C]//Proceedings of 2018 CIGRE Session. Paris, France: CIGRE, 2018.
- [36] 王绍武, 孙昕, 王晓宁, 等. 发电机用特高压交流升压变压器研制[C]//2015 年(第二届)全国电网技术交流会论文集. 北京: 中国电力规划设计协会, 2015: 1-4.
- Wang Shaowu, Sun Xin, Wang Xiaoning, et al. R&D of UHV AC step-up transformers for generators[C]//Beijing, 2015: 1-4(in Chinese).
- [37] 王宁华, 王晓宁, 王绍武, 等. 大容量特高压交流变压器关键技术研究[C]//2015 年(第二届)全国电网技术交流会论文集. 北京: 中国电力规划设计协会, 2015: 10-14.
- Wang Ninghua, Wang Xiaoning, Wang Shaowu, et al. Key technology study on UHV AC transformers with large capacity[C]//Beijing, 2015: 10-14(in Chinese).
- [38] 王晓宁, 陈维江, 孙建涛, 等. 特高压出线装置国产化研制及工程应用[C]//2015 年(第二届)全国电网技术交流会论文集. 北京: 中国电力规划设计协会, 2015: 15-17.
- Wang Xiaoning, Chen Weijiang, Sun Jiantao, et al. R&D and engineering application of home-made UHV AC lead exits[C]//Beijing, 2015: 15-17(in Chinese).
- [39] 韩先才, 王晓宁, 孙岗, 等. 特高压交流可控并联电抗器关键技术及工程应用研究[C]//中国工程院/国家能源局第四届能源论坛暨“能源革命与电力创新”国际工程科技发展战略高端论坛. 北京, 2017.
- Han Xiancai, Wang Xiaoning, Sun Gang, et al. Study on key technology and engineering application of UHV AC controlled shunt reactors[C]//The 4th Energy Forum and "Energy Revolution and Power Innovation" International High-End Forum on Engineering Technology Development Strategy, Jointly Organized by Chinese Academy of Engineering and National Energy Administration. Beijing, 2017(in Chinese).
- [40] 姚斯立. 1100kV 高压交流断路器的开断型式试验研究 [C]//2009 特高压输电技术国际会议论文集. 西安: IEEE, 2009: 181-185.
- Yao Sili. Power test of 1100kV high-voltage alternating-current circuit-breakers[C]//2009 UHV

- Electric Power Transmission Technique Conference. Xi'an : IEEE , 2009 : 181-185(in Chinese).
- [41] Zhong Lei ,Feng Jianqiang ,Hao Yuliang ,et al .Research on combined voltage test techniques for UHV switchgear [C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [42] Zhang Meng , Xia Wen , Li Xinyi , et al . Testing for the 1100 kV gas-insulated metal-enclosed switchgears[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [43] Halaus W , Xia Wen , Sologuren D , et al . Development of 1100kV GIS equipment : up-rating of existing design VS . specific UHV design[C]//Proceedings of IEC/CIGRE International Symposium on International Standards for Ultra High Voltage . Beijing , 2007 .
- [44] Han Shumo , Fang Yuying , Tan Shengwu , et al . Development , manufacturing and commissioning of 1100kV gas insulated switchgear[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [45] Dai Chaobo ,Yang Jingqi ,Wu Shouyuan .Review on UHV series compensation installation[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [46] Wang Baoshan ,Xiong Yi ,Tang Lin ,et al .The summary and conclusion of Chinese 1000 kV ultra high voltage porcelain housed metal oxide surge arrester's development and type test[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [47] Che W ,Chiba T ,Zhang X ,et al .The potential distribution research of 1000 kV metal-oxide surge arresters with porcelain housings[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [48] Li Minggang ,Song Jijun ,Han Shumo ,et al .Development and application of tank type surge arrester for 1100 kV system in China[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [49] Lu Youmeng ,Wang Zengwen ,Li Xiaoyan .Development on 1000kV ultra-high voltage capacitor voltage transformer[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [50] 詹荣荣,周泽昕,杜丁香,等.特高压交流动态模拟系统的研制[J].电网技术,2009,33(15):71-75.
Zhan Rongrong , Zhou Zexin , Du Dingxiang , et al . Development of UHV AC dynamic simulation system[J] . Power System Technology , 2009 , 33(15) : 71-75(in Chinese) .
- [51] Sun G ,Ban L ,Wang N ,et al .Determination of the main parameters of UHV AC GIL[C]//Proceedings of 2018 CIGRE Session . Paris , France : CIGRE , 2018 .
- [52] Zhang Jiankun , Sun Zhusen , Zheng Huaqing , et al . Research and application of key construction techniques for 1000 kV Jindongnan-Nanyang-Jingmen UHV AC demonstration project[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [53] Miao Qian , Jiang Ming . The study of tower crane for assembly and erection in UHV steel towers construction [C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [54] Liang Zhengping , Li Xilai , Chen Haibo , et al . Target reliability evaluation of UHV tower structures[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [55] 胡晓岑,贺虎,连建华,等.1000kV 变压器带局部放电测量的长时感应耐压现场试验[J].电网技术,2009,33(10):34-37.
Hu Xiaocen , He Hu , Lian Jian-hua , et al . On-site long-duration induced AC voltage withstand test with partial discharge measurement of 1000kV transformer[J] . Power System Technology , 2009 , 33(10) : 34-37(in Chinese) .
- [56] Li Bo ,Chao Hui ,Li Guangfan ,et al .P1861™/D5.1-draft guide for on-site acceptance tests of electrical equipment and system commissioning of 1000 kV AC and above[R] . Ultra-High Voltage AC Standards Working Group of the IEEE Power and Energy Society , 2013 .
- [57] Li Guangfan , Li Jinzhong , Li Bo , et al . Study on site ACLD test and PD measurement technology of UHVAC transformers[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [58] Zhang Hai , Lian Jianhua , Hu Xiaocen , et al . Study on 1100kV GIS main circuit insulation on-site test[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [59] Jun Chen , Ling Ruan , Jun Wang , et al . Research and application on the UHVAC GIS on-site insulation test[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [60] Wu Shipu ,Wang Xiaoqi ,Li Xuan ,et al .Research on site test method of error for 1000kV capacitor voltage transformer[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [61] Wang Xiaoqi , Jiao Baoli , Li Gang , et al . Development and application of 1000 kV standard voltage transformer for field test[C]//Proceedings of 2009 International Conference on UHV Transmission . Beijing , 2009 .
- [62] Wang Xiaogang , Yin Yonghua , Ban Liangeng , et al . Commissioning test summary of 1000 kV UHV AC pilot project[C]//Proceedings of 2009 International Conference

on UHV Transmission . Beijing , 2009 .

- [63] Fan Jianbin , Yu Yongqing , Liu Zehong , et al .
Standardization of UHV AC transmission technology
field[C]//Proceedings of IEC/CIGRE International
Symposium on International Standards for Ultra High
Voltage . Beijing , 2007 .



韩先才

在线出版日期：2020-05-18。

收稿日期：2019-07-01。

作者简介：

韩先才(1963)，男，正高级工程师，研究方向高电压技术建设管理，现从事特高压交流工程建设管理工作，Xiancai-han@sgcc.com.cn；



孙昕

孙昕(1955)，男，博士，教授级高工，国务院特殊津贴专家，长期从事电力工程技术和建设管理工作，13911152778@163.com；



陈海波

陈海波(1976)，男，高级工程师(教授级)，研究方向输电线路设计与优化，现从事特高压交流工程及抽水蓄能工程建设管理工作，Haibo-chen@sgcc.com.cn；



邱宁

邱宁(1973)，男，高级工程师，研究方向变电站设计与优化，现从事特高压交流工程建设管理工作，ning-qiu@sgcc.com.cn；



吕铎

吕铎(1978)，男，高级工程师，研究方向土木工程，现从事特高压工程建设管理工作，Duo-lv@sgcc.com.cn；



王宁华

王宁华(1978)，男，博士，高级工程师，研究方向高电压与绝缘技术，曾长期从事特高压交流工程开关设备技术管理和特高压交流工程建设管理工作，ninghua-wang@sgcc.com.cn；



王晓宁

*通信作者：王晓宁(1971)，男，工学博士，高级工程师，长期从事特高压设备研制质量、科研攻关、工程建设及调试等管理工作，Xiaoning-wang@sgcc.com.cn；



张甲雷

张甲雷(1980)，男，高级工程师，研究方向为工程管理和输电线路建设施工，现从事电网规划管理工作，13901075359@163.com。

(责任编辑 乔宝榆)

The Overview of Development of UHV AC Transmission Technology in China

HAN Xiancai, SUN Xin, CHEN Haibo, QIU Ning, LÜ Duo, WANG Ninghua, WANG Xiaoning*, ZHANG Jialei
(State Grid Corporation of China)

KEYWORDS : ultra high voltage AC; project design; equipment development; construction; standard system

As a big energy consuming country in the world, the energy distribution of power generation and economic development in China is very uneven. Being the two pillars of power generation energy supply, water energy and coal are mainly distributed in the western and northern regions, and the demand for energy and electricity is mainly concentrated in the economically developed areas in the eastern and central regions. The distance between the energy source and the energy consumption area is very long, at the same time the demand for energy is also increasing more and more with the rapid development of economy. The imbalance between the energy distribution and consumption determines that the energy resources should be optimized throughout the country. Through the construction of a strong national grid based on the UHV power grid, the coal and electricity in situ transformation and large-scale development of hydropower has been promoted vigorously to realize the coordinated development between hydropower and coal power across regions and basins. As a result, the clean electricity has been transmitted from the western and the northern regions to the northern and eastern regions in order to meet the great demand for the growth of electricity in China's rapid economic development.

After extensive and in-depth demonstration, the UHV transmission technology has become an inevitable requirement for the development of China's power industry which has the prominent advantages of large transmission capacity, long transmission distance, low line loss and saving land resources, etc.

Since 1986, China has started the research on UHV AC transmission technology, which has gone through three stages including technological breakthrough, large-scale construction and improvement & promotion. The technical breakthrough stage is marked by demonstration project, expansion project of demonstration project and Anhui power east transmission project with the focus on technology research and development. The large-scale construction stage is marked by a series of projects including Zhebei-Fuzhou, Huainan-Nanjing-

Shanghai, third phase power supply of Pingwei power plant, Ximeng-Shandong, Mengxi-Tianjin Yuheng-Weifang, etc. The goal is to verify technology maturity, stability of batch equipment manufacturing and large-scale construction capacity. The improvement & promotion stage includes subsequent projects of Ximeng-Shengli, supporting for DC transmission projects and power supply of power plants etc. The emphasis is on the improvement of grid structure, the management level improvement of UHV transmission technology and construction.

Since the first UHV AC demonstration project of Jindongnan via Nanyang to Jingmen in China was approved to start construction in August 2006, there have been 23 UHV AC power transmission projects to be put into commercial operation successfully by the end of 2019 and the backbone of UHV AC power grid has been initially built in the vast area of Sanhua (North, Central and East China), which played a major role in ensuring China's energy security, promoting green development and haze governance. Those UHV AC transmission projects in operation totally increased a power transformation capacity of 177,000MVA and a total line length of 14,230km converted to single line length.

As a result of a series of UHV AC engineering practice, China fully mastered a full range of core technologies of the UHV AC transmission from planning and design, equipment manufacturing, construction, installation, commissioning, test to operational maintenance, successfully developed a full set of UHV AC equipment on behalf of the highest level of international electrical equipment manufacturing, established the testing capacity on behalf of the international highest capability with the most complete function, high voltage and strong current, and also the standard system of UHV AC transmission technology has been finished.

The UHV AC transmission technology and its engineering application achievements in China is presented in this paper from the aspects of UHV AC engineering design, equipment development, construction and standard system establishment, etc.