

# 特高压输电技术的发展

汪秀丽 编

(武汉大学图书馆工学分馆信息咨询部)

[文 摘] 文章介绍了中国发展特高压输电技术的必要性,特高压输电技术需研究的几个重点技术问题、国内外特高压技术发展研究概况,特高压输电对环境的影响等。指出特高压输电技术在中国具有广阔的应用前景。

[关键词] 特高压 输电技术 环境影响

随着电力系统的不断发展,为了适应大容量远距离输电的需要,世界上一些国家如俄罗斯、美国、日本、意大利、中国等都在致力于特高压(UHV)输变电系统的研究。所谓特高压是指交流1000kV、直流±800kV及以上的电压等级。可以说,特高压代表了当今世界输电技术发展的方向,具有非常明显的经济性和可靠性。

## 1 中国发展特高压技术的必要性

### 1.1 建设特高压电网是实现资源优化配置的重要途径

中国是电能生产大国和使用大国,地域广阔,发电资源分布和地方经济发展极不平衡。全国可开发水电资源近三分之二在西部的四川、云南、西藏;煤炭保有量的三分之二分布在山西、陕西、内蒙三省区;而全国三分之二的用电负荷却分布在东部沿海和京广铁路沿线以东等经济发达地区。如在经济发达地区建设火电厂,巨量的煤炭运输将是个棘手问题。因此,必须在发电资源丰富的地区建设大煤电基地、大水电基地,实现煤电就地转换和水电大规模开发,再通过建设坚强的国家电网特高压骨干网架,将清洁的电能从西部和北部大规模输送到中东部地区,实现跨地区、跨流域水火互济,既解决东部能源短缺问题,减轻运输和环保压力,又促进西部资源优势转化为经济优势,实现经济社会协调发展,从而在全国范围内实现资源的优化配置。

### 1.2 有利于优化我国电网和电源布局,促进电力工业整体协调发展

长期以来“重发(电)轻供(电)”,造成电网建设投入不足,电网发展严重滞后,成为电力供应的瓶颈。近年来,随着电源建设步伐的加快,电网规划建设滞后和输电能力不足的问题日益突出,加剧了电网与电源发展不协调的矛盾。为尽快扭转这种状况,必须加快建设坚强的国家电网,从根本上解决我国电网建设滞后问题,引导电源合理布局,促进电源集约化建设和规模化经营,减少投资和运营成本,促进电网与电源协调发展。同时还可以提高电力和社会综合效益。随着电网规模的不断扩大,目前负荷密集地区电网出现诸多问题。负荷中心的大规模电厂建设使地区电网短路电流控制困难,如华东、华北电网已经出现部分500kV母线的短路电流超过断路器的最大遮断电流能力。特高压电网建设将根本性地解决此问题,并提高电网运行的稳定性。

### 1.3 特高压输电具有明显的经济效益

一回1000kV交流特高压输电线路的输电能力接近500kV交流输电线路的5倍,

$\pm 800\text{kV}$  直流特高压的输电能力是 $\pm 500\text{kV}$  直流线路输电能力的 2.1 倍;在输送相同功率的情况下,  $1000\text{kV}$  交流特高压的最远输电距离可达  $500\text{kV}$  交流输电线路的 4 倍,  $\pm 800\text{kV}$  直流的经济输电距离达到 2 000km 以上;此外, 还可减少铁塔用材三分之一, 节约导线二分之一, 节省包括变电所在内的电网造价 10~15%。这对于人口稠密、土地宝贵或走廊困难的国家和地区会带来重大的经济和社会效益。

## 2 特高压输电技术需研究的重点技术问题

特高压输电技术是事关电力工业建设大局和长远发展的一项国家级技术政策, 也是一项重大基础设施建设, 必须深入讨论, 科学决策。

### 2.1 重点研究的特高压输电技术

(1) 无功平衡措施的研究: 特高压线路的充电功率很大(约为  $500\text{kV}$  线路的 5 倍), 无功平衡问题尤显突出。固定电感值的电抗器可限制甩负荷时的工频过电压和正常运行时的容升效应, 但这可能降低特高压线路的输送能力。为有效解决这一问题, 需重点研究可控电抗器的技术要求、参数及对潜供电流和工频、操作过电压的作用。

(2) 消除潜供电弧措施的研究: 特高压线路的潜供电流大, 恢复电压高, 潜供电弧难以熄灭, 会影响单相重合闸的无电流间歇时间和成功率, 需研究快速消除潜供电弧的措施, 以确保故障相在两端断路器跳开后熄灭潜供电弧。

(3) 限制过电压措施的研究: 过电压是指由于内部故障、开关操作或遭受雷击, 而造成瞬时或持续时间较长的高于电网额定允许电压并可能导致电气装置损坏的电压升高。限制特高压输电系统过电压对于降低工程造价和保证系统安全稳定运行具有重要意义。因此需进行限制工频暂态过电压、各类型的操作过电压(包括线路和变电站合闸过电压, 线路单相重合闸过电压, 线路接地故障发生和消除过电压及解列过电压)、系统防雷、潜供电流和恢复电压的措施的研究。

(4) 绝缘配合的研究: 绝缘配合是指在考虑运行环境和过电压保护装置特性的基础上, 根据电网电气设备上可能出现的电压, 科学合理地选择电网中电气装置的绝缘水平。随着电网电压等级的提高, 特别是在特高压电网中, 空气间隙的放电电压在操作过电压下呈现饱和特性, 这使得电网中电气装置的绝缘占据电网设备投资的份额越来越大。而特高压电网因其输送容量巨大, 绝缘故障后果将非常严重。因此, 绝缘配合问题在特高压输电领域更值得关注。特高压设备绝缘水平和绝缘配合原则的研究, 对变电(换流)设备的价格和安全都有重大影响。要重点研究特高压输电在高海拔地区的过电压与绝缘配合研究。

(5) 串联电容补偿装置的研究: 串联电容补偿可提高特高压线路的输送容量和增强系统稳定度, 需研究特高压系统的串联补偿装置及相关参数和技术要求。

(6) 外绝缘的研究: 外绝缘特高压线路和变电站中各种电极结构空气间隙的放电特性, 各类送、变电设备外绝缘的放电特性, 不同海拔高度下的海拔修正系数等需结合具体情况试验研究, 另外特高压线路的防雷、防污、带电作业也需结合沿线路的雷电活动情况、土壤电阻率情况、污源分布状况专题研究合理的绝缘配合原则并结合具体的带电作业方式、工具特点研究最小安全距离和组合间隙, 为设计、运行维护提供技术依据。

## 2.2 重点研究的输变电设备

(1) 变压器: 重点进行大容量单项自耦变压器漏磁场的研究, 特高压套管及柱间高电压连接强绝缘结构的研究等。

(2) 特高压开关设备: 特高压输电需提高断路器断口电压, 同时要求灭弧室能开断大的短路电流。如研究 1 100kV 50/63kA 双断口 SF<sub>6</sub> 断路器和 GIS。

(3) 避雷器: 特高压避雷器对特高压等级的绝缘配合起着十分重要的作用。如研究 MOA 避雷器的电位分布, 热损耗特性、耐污特性、抗震特性等, 最好研制出电阻片晶粒细化的高电位梯度 MOA 避雷器, 以提高避雷器的性能和缩小其尺寸。

## 2.3 开展研究的输电线路设备

(1) 绝缘子设备的研究: 绝缘子主要用于高压输电线路和各种电器设备中, 起绝缘、机械联接和支撑作用。使用时将避雷器安装特高压输电线路的绝缘子要求有更高的机械强度, 良好的电气性能和防污秽性能, 同时考虑特高压线路绝缘子串更长, 检测和更换极不便利, 因此要求绝缘子有更高的运行可靠性。

(2) 导线、金具和杆塔的研究: 特高压线路的导线应满足输送容量、机械荷载和电磁环境等多方面的要求。由于特高压线路导线分裂数多、导线截面大、金具承受的荷载也随之增大, 因此对特高压线路金具的结构型式、工艺质量和机械强度也会有更高的要求。

# 3 中国特高压发展研究概况

## 3.1 特高压输电技术研究概况

从 1986 年开始, 特高压输电技术研究就被连续列入国家“七五”、“八五”和“十五”科技攻关计划。中国电力科学研究院、武汉高压研究所、电力建设研究所和有关高等院校相继开展了我国特高压远距离输电方式和电压等级选择的研究, 进行了特高压输变电设备、线路、铁塔、典型变电所的分析论证和特高压输电系统过电压、绝缘配合及输电线路对环境影响的研究工作。

为了在中国及早开展特高压输电的技术研究, 推动中国特高压输电的发展, 1994 年初原国家电力部“全国联网和高一级电压输电领导小组”通过专家认证, 决定在武汉高压研究所户外高压试验场建设特高压试验研究线段, 并于 1996 年 6 月建成了中国第一条百万伏级特高压试验研究线段。该试验线段可以开展特高压输电技术外绝缘放电特性和线路对环境影响的研究, 也可对部分电器产品和部件进行考核性试验研究。它的建成为中国开展更高一级输电技术的研究提供了有利的条件。

该试验研究线段的主要特点有: (1) 满足特高压输电相关技术的研究。该线段具有应用研究的电压范围大、调整灵活方便等特点, 可满足电压范围为 800~1 200kV 等级的有关外绝缘和环境影响等项目的试验研究。(2) 采用真型模拟拉 V 型塔。利用该塔可以较真实地模拟实际线路杆塔, 以对线路杆塔的绝缘特性和绝缘子串放电特性进行试验研究。(3) 可改变塔窗间隙尺寸。真型模拟拉 V 型塔在设计时, 将塔型的尺寸留有裕度, 铁塔边相横担上设有多个吊点, 以便试验时可以改变间隙尺寸。(4) 可改变绝缘子长度及型式。可通过一定的施工手段改变绝缘子串长度。(5) 可悬挂不同型号的导线。可悬挂 8 分裂或 10 分裂的 LGJ400、LGJ500 或 LGJ630 等型号的导线, 以研究不同导

线的电晕特性及间隙的绝缘特性。

电力建设研究所在 2004 年建设的杆塔试验站,进行了特高压单回路  $8 \times 800\text{kV}$  分裂导线,  $30^\circ \sim 60^\circ$  转角杆塔原型强度试验和特高压输电线路防振设计方案试验。

国家电网公司在 2005 年工作会议上明确提出:在今后几年内,我国需要建设全国特高压电网,它是我国当前电网建设工作的重中之重。按照国家电网公司的计划,目前交流百万伏级特高压示范试验工程—晋东南—南阳—荆门特高压输电工程(该工程包括晋东南、荆门两座  $1000\text{kV}$  变电站,变电容量各  $3000\text{kVA}$ ,南阳  $1000\text{kV}$  开关站,线路长度约  $670\text{km}$ ,预计 2008 年建成,工程总投资约 62 亿元)的系统论证及可研工作已经完成。这意味着我国对  $1000\text{kV}$  交流输变电技术科研工作将从前几年的科研前期准备工作阶段进入工程建设实质性阶段。今后几年将陆续建设陕北—晋东南—南阳—荆门—武汉的中线工程及淮南—皖南—浙北—上海的东线工程。

与此同时,特高压直流输电工程也在按计划稳步推进。目前金沙江和雅砻江一期  $\pm 800\text{kV}$  直流特高压送出工程的前期工作进展顺利,溪洛渡( $1260$  万  $\text{kW}$ )、向家坝( $600$  万  $\text{kW}$ )、锦屏一级( $360$  万  $\text{kW}$ )水电站外送华东、华中的 4 回  $\pm 800\text{kV}$  特高压直流输电工程分别为:向家坝—上海,溪洛渡左—株洲,溪洛渡右—浙西,锦屏—苏州南,每回输送容量都在  $620 \sim 640$  万  $\text{kW}$ 。

目前我国已完成了部分特高压关键技术的研究工作,确定了交流特高压和直流特高压的主要参数;在绝缘配合、高海拔研究、防雷研究等领域已达到国际先进水平;在备受关注的特高压电磁环境影响方面,提出了符合国家标准电磁环境控制指标,并于 2005 年 7 月 13 日通过国家环保总局审查。同时,在特高压系统论证、特高压输电技术经济性、特高压输变电设计技术、特高压设备国产化、直流特高压输电技术等方面,也获重要进展。

### 3.2 特高压电力设备概况

近年来,随着我国电网技术装备水平的不断提高,相关设备制造企业的技术水平和国产化能力也不断提升。目前除断路器等少量设备外,国内企业对大多数特高压输变电设备已具备生产制造的技术条件和能力。

#### (1) 变压器

从现有变压器厂的生产条件和技术能力来看,通过  $500\text{kV}$  和  $750\text{kV}$  变压器的研制和生产,已具备了研制特高压变压器的技术基础和条件。

#### (2) 避雷器

已经具备研制、生产超高压避雷器的能力。近几年来国产  $500\text{kV}$  避雷器已得到了广泛应用,最近又研制完成了  $750\text{kV}$  金属氧化物避雷器(MOA)的研制,着重研究了避雷器的电位分布、热耗散特性、耐污特性、抗震性能等。为研制特高压 MOA 积累了一定的经验。

#### (3) 绝缘子设备

从国内技术水平和生产能力来看,已具备生产  $300\text{kN}$ 、 $400\text{kN}$ 、 $530\text{kN}$  瓷绝缘子和  $300\text{kN}$ 、 $400\text{kN}$  玻璃绝缘子以及  $400\text{kN}$  合成绝缘子的能力,其中瓷绝缘子可生产普通型、钟罩型、双伞型、三伞型,玻璃绝缘子可生产普通型、钟罩型,已有多家单位研制完成了  $750\text{kV}$  线路合成绝缘子,一旦特高压工程上马,可满足特高压输电工程对绝

缘子设备的需要。

#### (4) 输电线路设备

目前国内有一部分企业通过改进设备和技术改造,已具备生产 600-1 400mm<sup>2</sup> 大截面导线的能力,部分产品已应用于三峡、二滩电站等电力输出工程;金具制造能力与国外处于同一水平,有较多企业已生产出 750kV 线路金具产品,部分企业已研制出 1150kV 线路配套金具,并已应用在国内的特高压试验线段上;从国内各企业的制造水平来看,已具备大型铁塔的制造能力,可满足特高压线路杆塔的制造要求。

## 4 国外特高压技术发展研究概况

自 20 世纪 50 年代开始,电力系统开始采用 380kV 和 500kV 输电。60 年代,苏、美、加等国采用 750kV 输电之后,由于电网输电容量的增大、输电走廊的布置日益困难,以及短路电流接近开关极限等原因,美、苏、日、意等国开始研究 1 000kV~1 200kV 高压交流输电技术,并建设了试验室及短距离试验线路。

### 4.1 前苏联地区

#### (1) 前苏联地区特高压技术研究和工程概况

20 世纪 60 年代,前苏联为了解决特高压输电的工程设计和设备制造问题,组织全苏联(现在是全俄)电工研究院、“Energosetproject”研究院,列宁格勒工艺研究院(LPI),直流技术研究院(NIPT),全苏联变压器研究院(VIT,扎布洛热),扎布洛热和莫斯科变压器制造厂(ZTZ and MEZ)等相关科研部门进行了特高压输电的基础研究,其中包括设备的绝缘试验、操作过电压的研究、可听噪声、无线电干扰、变电站内电场、设备安装、运输和检修等方面的广泛试验。在 60 年代末,苏联关于交流 1000kV~1 200kV 输电线路的初步技术和经济参数已经有了明确的定义。1978 年着手建设了从伊塔特到新库茨涅克长 270km 的工业性试验线路,进行了各种特高压设备的现场考核试验。另外还建设了 3 台 1 200kV、10kA~12kA 串级试验变压器和 10 000kV 冲击发生器的试验基地,进行了 1 800kV~2 000kV 电压等级输电技术的试验研究。前苏联从 1985 年 8 月至今共建成 2 350km、1 150kV 输电线路和 4 座 1 150kV 变电站,有 907km 线路和 3 座 1 150kV 变电站(其中一座为升压站)从 1985~1990 年按系统额定电压 1 150kV 运行了 5 年。之后由于前苏联经济上的解体和政治原因,卡札克斯坦中央调度局将全线降压为 500kV 电压等级运行,在整个运行期间,过电压保护系统的设计并不需要进行修改,至今运行情况良好。

#### (2) 特高压电力设备概况

前苏联早在 1985 年设计制造了全套工程用特高压输变电设备,并在 1 150kV 输电系统工程中运行。

##### 1) 变压器

前苏联从 20 世纪 70 年代初开始研制特高压大容量 1 150kV 变压器。1971 年已研制出 210MVA、1 150/500kV 单相自耦变压器样机(等比例模型);1979 年研制完成第一台试验用 667MVA、1 150kV / 500kV 单相自耦变压器,后生产了 20 多台特高压工程用 1150kV / 500kV 变压器,共装备了 3 个 1 150kV 电站,2 个发电厂升压站,1985 年投入运行。1990 年曾生产过 4 台 417MVA、1150/20kV 的单相发电机升压变压器,作

为工业试验用样机,进行长时间带电考核,可以直接升压送至 1 150kV 线路。1992—1993 年又按另一种设计方案生产了 16 台容量仍为 667MVA 的特高压单相自藕变压器,其目的在于设计改型、降低损耗和提高质量、简化结构、保证产品可靠性。这些特高压变压器结构合理,都经受了各种运行条件的考验。

### 2) 开关设备

早期曾采用压缩空气断路器。压缩空气断路器 500kV 等级为单柱 4 断口,750kV 等级为四柱 8 断口,1 150 kV 等级为六柱 12 只断口,现均已在系统中运行。还研制开发出 500/750/1150kV 等级 GIS。制成的单极 1 150kV 等级 GIS 早已投入试运行,其开断电流为 40kA。

### 3) 避雷器

已制造出特高压避雷器并在实际工程中得到了运用。

### 4) 绝缘子

1 150 kV 线路全线采用 210kN、300kN、400kN 的玻璃绝缘子。

### 5) 输电线路

特高压线路的导线采用的是  $8 \times 330\text{mm}^2$  导线;特高压线路的金具采用了两种型式的间隔棒,一种是 8 分裂的环型间隔棒,一种是由两分裂间隔棒组合而成的 8 分裂间隔棒;前苏联均已将特高压线路的操作过电压倍数限制在 1.6 p u 以下,因此塔头各部分空气间隙可限制在 6—7m 之间;特高压杆塔的塔材多采用角钢塔。

## (3) 1 150kV 工程(科克切塔夫变电站)简介

### 1) 建设规模

前苏联已建成 4 座 1 150kV 变电站,其中有代表性的是科克切塔夫 1 150kV 变电站,它包括 1 150kV 和 500kV 两级电压等级,1 150kV 部分建设规模为:2 回 1 150kV 出线、2 回备用出线;2 组 1 150/500kV 200MVA 主变压器;2 组 900Mvar1150/1.732kV 并联电抗器。该变电站 1985 年 8 月建成后按系统额定电压 1 150kV 运行了 5 年之久,1990 年以后降为 500kV 运行至今,为以后建设的 1 150kV 变电站积累了很多施工、设备调试以及运行的经验,并进行了大量的试验和测试工作。日常运行和紧急事故模拟试验研究结果表明,在绝大多数情况下电力系统实际的操作过电压水平不会超过 1.6 p u,因此前苏联后期 1 150kV 系统的过电压设计,从原来操作过电压 1.8 p u 降到 1.6 p u。

### 2) 电气主接线

1 150kV 配电装置采用一种新型的双母线双断路器电气主接线,即每个出线回路采用双断路器,主变压进线回路不装断路器直接接入母线。这种主接线主要是考虑输电线路的故障率大于主变压器故障率。尽管主变压器回路不装断路器,如果主变压器故障相当于母线故障,但是由于苏联 1 150kV 主变压器十分可靠(查波罗什变压器厂生产 19 台单相 667MVA 1150kV 主变压器运行了 185 台年,故障率为 0),发生上述这种情况的概率是很小的。而在故障率相对高一些的出线回路安装 2 台断路器分别接入两条主母线,可以提高运行的灵活性和可靠性。同时由于 2 个主变压器进线回路不装断路器,应尽量在出线回路安装 2 台断路器,但是整个 1 150kV 配电装置的断路器数量并没有增加(本期工程)。因此前苏联通过技术经济比较在 1150kV 不采用一个半断路

器接线,而要用新型的双母线双断路器接线,这种做法值得国内 1000kV 交流变电站设计时借鉴。

### 3) 主要电气设备

前苏联 4 个 1 150kV 变电站的 1 150kV 配电装置都采用屋外中型布置方案,安装了常规敞开瓷柱式 1 150kV 电气设备,包括 4 柱 8 断口空气断路器、双柱垂直开启或隔离开关等各种电气设备。

## 4.2 日本

### (1) 日本特高压技术研究和工程概况

日本关于特高压的基础研究始于 1974 年,日本中央电力研究所于 1980 年在赤诚建立了长 600m 的两档双回路 1 000kV 试验线段,进行了特高压线路的施工和维修技术、可听噪声、无线电干扰及电磁场对于蔬菜、家禽的生态影响等方面的研究。在东京电力公司的高山石试验线段上,进行了分裂导线和绝缘子串的机械性能的研究和相应的技术开发。同时还进行了线路的操作、雷电、工频过电压和相对地空气间隙以及在污染条件下外绝缘的闪络特性试验。

日本 1988 年开始建设 1 000kV 输变电工程,1999 年建成两条总长为 430km 的输电线路和 1 座 1 000kV 变电站。此外还建成 1 座 1100kV 新棒名变电站,所有的 1 000kV 线路和变电站从建成后都一直降压为 500kV 电压等级运行,该工程原本考虑配合太平洋沿岸和东北地区原子能发电厂的建设拟升压至 1000kV 运行,但由于负荷增长停滞不前,预计在 2010 年左右才能升压至 1 000kV 运行。

### (2) 特高压电力设备概况

日本的特高压变电设备是由日本国内多家制造企业分别研制开发的,从 1995 年以来在新棒名特高压全 GIS 变电站进行了长达 5 年的全电压运行考核,基本没有出现大的故障。

#### 1) 变压器

3 台 1 000kV / 1 000 MVA 单相自耦变压器分别由 3 家企业(东芝公司、三菱公司和日立公司)独立研制生产。特高压变压器高中低绕组额定电压分别为 1050/1.732±70%、525/1.732 和 147kV,一、二次绕组每相容量为 1 000MVA,三次绕组容量为一次的 40%,用于配合大容量调相设备。为了生产容量高达 3×1 000 MVA 的超大型变压器,需要对缘子结构、磁路结构、冷却方式、机械强度等进行综合分析研究。日本的研究路线是首先研制试验模型,对各主要元件和性能分别进行试验研究;第二步是研究原型特高压变压器,进行整体试验研究。

#### 2) 开关设备

在特高压 GIS 的开发应用方面,日本有 3 家企业(三菱、东芝、日立)都研制出了配双断口 SF<sub>6</sub> 断路器的特高压(1 100kV) GIS 设备,已应用在特高压输电工程中,并已进行了长达 8 年的全电压带电考核。装在 1 100kV GIS 中的双断口 SF<sub>6</sub> 断路器,也是目前世界上断口电压等级最高的断路器。

此外,日本有 3 家企业均已生产制造出用于 1 000kV 系统的高速接地开关并配有监测系统,检查和确认故障相两端断路器已经分闸后才投入高速接地开关(HSGS)。

#### 3) 避雷器

开发了有优良保护特性的氧化锌避雷器,并应用于 1 000kV 系统。

#### 4) 绝缘子

日本已有 330kN、420kN、540kN 瓷绝缘子用于 1 000kV 输电线路,并已开发出 700~840kN 瓷绝缘子产品,为了避免瓷绝缘子在雷击闪络时造成损坏,日本在特高压线路绝缘子两端均装上了引弧间隙,悬垂串的引弧间隙为 6.3m,耐张串为 5.9m。

#### 5) 输电线路

日本特高压线路的导线采用的是  $8 \times 810\text{mm}^2$ ; 在 1 000kV 线路中,金具均是采用环型间隔棒;铁塔基本型式采用自立式双回路铁塔,日本的双回路铁塔平均高度为 110 多 m,已将特高压线路的操作过电压倍数限制在 1.6 p u 以下,因此塔头各部分空气间隙可限制在 6—7m 之间。特高压杆塔的塔材均采用钢管塔。

### (3) 1 000kV 工程(新榛名)简介

#### 1) 建设规模

日本已在东京电力公司建成 1 座新榛名 1 000kV 变电站,其建设规模为:1 000kV 4 回出线,4 台 3 000MVA 1000/500kV 主变压器,不安装并联电抗器。

#### 2) 电气主接线

1 000kV 配电装置采用日本在 500kV 变电站广泛使用的双母线双分段电气主接线(采用 SF<sub>6</sub> 断路器分段)。电气主接线中避雷器 MOA 配置原则经过详细的雷电侵入波过电压计算分析后采用 2+1+2 的方案,即每个出线回路加 2 组 MOA,每个主变进线回路加 1 组 MOA,每四分之一段母线加 2 组 MOA,其结论是虽然 MOA 总数量比常规 1+1+1 方案有所增加,增加了 MOA 部分的投资,但是采用本方案可以将电气设备绝缘水平从 2 900kV (雷电冲击)下降至 2 250kV,使电气设备的投资下降很多,其最后总投资比常规方案可以节省 9%。

#### 3) 主变压器

三大制造厂三菱、日立和东芝公司各分别生产一台单相 1 000MVA、1 000kV 主变压器,安装在新榛名 1 000kV 变电站。

## 4.3 意大利

### (1) 意大利特高压技术研究概况

20 世纪 70 年代,意大利和法国受西欧国际发电联合会的委托进行欧洲大陆选用交流 800kV 和 1 050kV 输电方案的论证工作。然后,意大利特高压交流输电项目在国家主持下进行了基础技术研究和设备制造等一系列的工作,并于 1995 年 10 月在意大利 Suvereto 建设 1 050kV 试验工程。1997 年 12 月起,试验工程在 1 050kV 电压下进行了两年时间的试验运行,取得了一定的运行经验。

### (2) 特高压电力设备概况

#### 1) 变压器

至 1987 年意大利共生产了 3 台单相 (1000/1.732) / (400/1.732) /24kV 自耦变压器,于 1990 年投入试运行,积累了一定的运行经验。但由于意大利的用电量没有显著增长,所以不曾建立商业运营线路。

#### 2) 开关设备

采用 SF<sub>6</sub> 断路器。意大利 NMGS SBE 公司研制开发的 72-800/1 050kV 等级的 GIS,

其额定电流为 2 500-8 000A, 开断电流为 63kA。

### 3) 输电线路设备

特高压线路导线的试验推荐值是  $8 \times 560 \text{mm}^2$ 。

### (3) 1050kV 试验工程简介

该试验工程位于意大利 Suvereto 1 000kV 试验站内, 包括两部分: 1050/400kV 变电站和 2.8km 1050kV 输电线路。

#### 1) 建设规模

变电站包括 1 050kV 和 400kV 两级电压。1 050kV 部分包括 3 台单相 400MVA 主变压器, 1 套双母线接线、1 个进线回路的金属封闭开关设备 GIS, 1 段长 0.6km 充油电缆, 1 套架空出线隔离开关和快速接线开关。

#### 2) 主变压器

意大利制造商生产了 3 台单相 1 000kV 主变压器。

#### 3) 气体绝缘金属封闭开关设备 GIS

在变电站内安装了 1 套 1 100kV GIS, 采用双母线电气主接线, 包括双母线、母线电压互感器、断路器、隔离开关及接地开关、电流传感器和避雷器, 所有设备封闭在金属外壳内, 采用  $\text{SF}_6$  气体绝缘。

$\text{SF}_6$  断路器为单相四断路器结构, 带合、分闸共用的  $500 \Omega$  并联电阻, 同时为了使触头四周的电场更加均匀, 在断口间加装了均压电容器。隔离开关带  $110 \Omega$  并联电阻。

#### 4) 敞开瓷柱式电气设备

在变电站出线回路的线路侧加装了 1 套 1 100kV 隔离开关和快速接地开关, 以解决 1 000kV 系统单相重合闸的潜供电流和恢复电压的问题。

#### 5) 金属氧化物避雷器

采用  $\text{SF}_6$  气体绝缘的金属氧化物避雷器作为雷电侵入波的保护装置, 具有较好的保护特性:  $20 \text{kA}$ 、 $8/20 \mu \text{s}$  波形的雷电冲击残压为  $1 800 \text{kV}$ ;  $3 \text{kA}$ 、 $30/60 \mu \text{s}$  波形的雷电冲击线压为  $1 450 \text{kV}$ 。

#### 6) 充油高压电缆

从变电站 GIS 的出线套管至架空线路之间约 0.6km 安装了 3 根单相充油 1 000kV 高压电缆, 每相电缆包括 1 个电缆接头和 1 个独立的冷却系统, 电缆内部依靠油冷却, 电缆外部采用水冷却方式。

1 000kV 充油式高压电缆包括所带的 6 套终端装置, 运行 2 年多时间, 情况良好。意大利 1 000kV 高压电缆是世界上唯一投入工业试运行电压等级最高、在额定电压 1050kV 下运行时间最长的充油式电缆, 具有一定的代表性。

## 4.4 美国

美国的特高压试验研究始于 1974 年, 进行了可听噪声、无线电干扰、电晕损失以及其他环境效应的实测, 还进行了各种导线结构的试验。

从 1976 年开始, 邦纳维尔电力局 (BPA) 在莫洛试验线段上进行了机械结构研究, 主要是线路载荷 (风和冰载荷)、导线运行 (风吹振动、子导线振荡和舞动) 对杆塔、导线、金具和绝缘的影响, 还研究了 1 100kV 铁塔和线路检修技术。在莱昂斯特试验线段, 对 1 200kV 线路电晕和电场对庄稼、蔬菜、蜜蜂、野生动物、家禽等生态影响

进行了研究；对 1 200kV 变电站的噪声和工频电场进行了试验研究；还对变压器、避雷器和 SF<sub>6</sub> 气体设备技术指标进行了评价。

#### 4.5 其它国家

加拿大在特高压方面做了大量的研究工作，在 IREQ 建立了试验场和试验线段，对 1 500kV 交流和 ±1 200kV 直流系统进行了电晕、电场、导线舞动及直流离子流等方面的研究工作。

巴西的 Adrianopolis 建立了一条 360m 试验线段，用于开展 1 500kV 交流和 1000kV 直流输电系统的研究工作。

印度建立了特高压户外试验场，试验线段长 720m（3 个档距，中间档距长 360m，两边的各长 180m），建有 ±900kV 直流污秽试验室（圆柱形，直径 24m，高度 27m）。该户外场主要用来进行 ±800kV 双极导线电晕特性和风摆的研究。

瑞典的查麦斯大学高电压试验场可进行交流 1 000kV 电气试验，试验场内建有 240m 特高压试验线段，另有 180m 的绝缘子试验线段。

瑞典 ABB 公司设计建造的 ±600kV 直流输电系统自 1985 年在巴西伊泰普运行至今。ABB 于 1993 年与巴西 Furnas 合作，进行了 ±800kV 直流输电系统的设计和研究，认为与 ±500kV、±600kV 直流输电相比，±750kV 或 ±800kV 的换流站设备没有任何技术难题，但最好还是建立一个简化的 ±750kV 级直流设备（如换流变、直流套管、避雷器、互感器等）长期带电考核试验站。

目前，南非和印度在总结 ±800kV 直流输电技术的前期研究基础上，已将建设 ±800kV 直流输电系统列入电力发展规划中。

国际大电网组织（CIGRE）专题工作组在综合分析各国对特高压技术的研究工作后指出：特高压技术没有难以克服的技术问题。并确认：“特高压交流输电技术实际应用已经成熟，根据现有的知识和经验，±800kV 是特高压直流输电确实和有把握的可行电压等级”。

## 5 特高压输电对环境的影响

特高压线路和设备长期带电运行，再加上由于输电电压的提高，必然导致导线表面电场强度以及输电设备周围的空间电场强度的升高，而特高压输电线路和变电站出现的电晕现象和强电场效应是否会对人体和生态环境带来危害，越来越成为人们十分关注的问题。从上世纪 60 年代开始，前苏联、美国、日本等国利用试验线段和电晕笼，就线路和变电站内地面场强、导线引起的可听噪声、无线电干扰和电视干扰等进行了大量的研究。

### (1) 电晕放电

电晕的产生是因为不平滑的导体产生不均匀的电场，在不均匀的电场周围曲率半径小的电极附近当电压升高到一定值，输电线路表面电场强度超过空气分子的游离强度（一般为 20~30kV/cm）时，就会发生放电，形成电晕。电晕要消耗能量，会使导线表面发生腐蚀，从而降低导线的使用寿命。电晕放电产生的脉冲电磁波对无线电和高频通信会产生干扰，可听噪声会产生声频干扰，它是特高压输电的特有问题，而且高压输电的低频噪声问题也是近年来环境保护和环境纠纷的一个突出的问题。特高压

输电线路由于电压等级太高,电晕的产生往往是无法避免的,而且随电压等级的提高会越来越明显。

为了防止或减轻电晕放电的危害,最根本的途径就是设法限制或降低导线表面的电场强度。在输电线路额定电压确定的情况下,增大导线线径是一个有效的方法,通常是采用分裂导线来降低导线表面电场强度的。对于特高压线路来说,按电晕要求所需的导线线径往往大大超过按经济电流密度所选得的数值。

## (2) 强电场对人体的影响

几十年来,世界各国关于特高压输电产生的强电场对人体的影响进行了大量的试验研究,一般输电电压越高地面电场强度越强。有人认为工频高压电场有较明显的刺激作用,对机体存在不良影响;也有人认为现有的输电线路下方的电场对人体不会有明显的直接影响。目前不少问题还正在继续研究中。

为慎重起见,目前对于输电线路走廊和变电所范围的最大场强给予了一定限制;对人员来往频繁的地方或某些特殊场所,则要求采取屏蔽措施以降低场强。

许多国家进行的大量试验观测结果表明,如果特高压线路采用合理的导线结构和布置方式,不会对人类生活和生态环境造成危害,各项环境影响的控制指标甚至低于已运行的500kV、750kV超高压线路。

## 6 结束语

特高压输电具有输电容量大、送电距离长、线路损耗低、工程投资省、土地利用效率高和联网能力强六大优势,代表了当今世界输电技术的最高水平。国外研究特高压输电至今已有将近四十年的历史,有大量的研究成果可供应用和借鉴。再加上20世纪80年代特高压输电工程的试验研究和输电设备研制技术的积累,目前中国已具备特高压输电工程的建设条件,中国能源与负荷分布的严重不平衡以及未来电力发展的巨大空间迫切需要特高压输电技术。特高压输电技术符合电力工业发展规律和电网技术的发展方向,在技术上没有不可逾越的障碍,在中国有广阔的应用前景。

### 参考文献

- [1] <http://www.sp.com.cn>
- [2] <http://www.cnki.net>
- [3] <http://www.cepee.com>
- [4] <http://www.hc360.com>
- [5] <http://www.cec.org.cn>
- [6] <http://www.cae.cn>
- [7] <http://www.autoage.net>
- [8] <http://www.sgccbidding.com>
- [9] <http://www.jsepc.com.cn>