

# 特高压输电技术的进展和应用

我国幅员辽阔，资源分布不均匀，80%的水能资源分布在西南部，76%的煤炭资源和绝大部分的陆地风能资源分布在北部和西北部；而中部和东部地区人口稠密、产业集中，目前电力的需求量占全国的69%，电力常常供不应求。因此，亟需发展能够满足远距离、大容量输电要求的特高压输电技术，加快特高压输电工程的建设，实现全国范围内的资源优化配置，保证能源的安全稳定供应。

文 / 中国电力科学研究院 申洪 印永华 /



前，中国电网骨干网架的电压为500千伏，将交流500千伏输电进一步提升至1000千伏，在相同输送距离下输送功率可提高至500千伏线路的4~5倍，输电距离和单位走廊容量提高至3倍，损耗仅约1/3；将直流±500千伏提升至±1100千伏，输电距离可达3000公里，显著提升了高压输电远距离、大容量、低损耗的技术优势。

## 1 特高压交直流输电技术研究成果及应用

近七年来，我国全面地开展了特高压重大技术问题研究，包括技术可行性、设备国产化、试验示范工程等一系列研究论证。国网公司先后下达了特高压交、直流关键技术及工程研究课题159项，覆盖了规划、系统、设计、设备、施工、调试、运行维护等各个方面。

通过这些关键技术研究，取得了一系列成果：

(1) 建成特高压交流试验基地、直流试验基地、工程力学试验基地、高海拔试验基地、大电网仿真中心、特高压直流输电工程成套设计研发（实验）中心、开关试验中心和工厂试验站，形成了世界上功能最完整、技术水平最先进的高电压、强电流实验研究能力。深入开展重大关键技术研究，取得全面突破并经过了工程验证。申报中国专利691项，已获授权441项，其中发明专利90项。

(2) 在电磁环境影响、过电压与绝缘配合、潜供电流控制、系统无功补偿、系统稳定控制技术、变电站和线路设计技术、施工技术等方面取得重要成果；研究确定了交直流特高压示范工程的重大技术方案和设计原则，全面掌握了特高压输电系统核心技术。

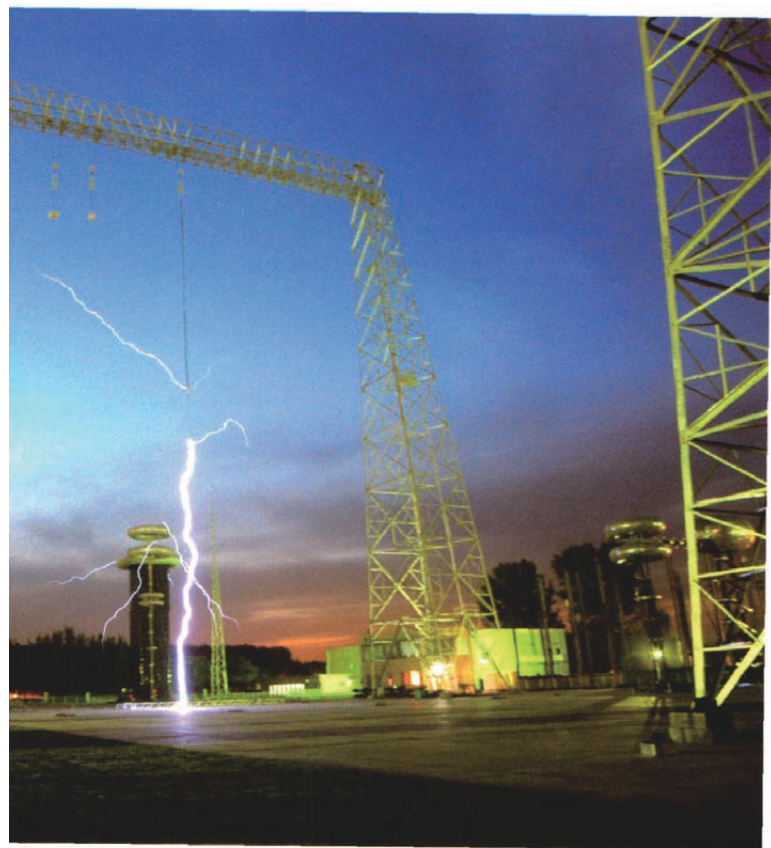
(3) 自主研发成功全套特高压设备，成功研制了包括大容量特高压变压器、电抗器、换流变压器、换流阀、6英寸晶闸管、平波电抗器、气体绝缘组合电器、套管、绝缘子等世界最高水平的全套特高压关键设备和元器件。通过工程实践，自主创新能力和制造水平显著提升，实现了产业升级。

(4) 建立了特高压技术标准体系，研究形成了从系统成套、工程设计、设备制造、施工安装、试验调试到运行维护的全套技术标准和试验规范，建立了特高压交、直流输电技术标准体系，已发布国家标准16项，主导编制国际标准3项，其中中国的特高压交流标准电压已被推荐为国际标准电压。

研究成果在特高压交、直流示范工程中得到应用，在设备研制、工程建设和安全稳定运行中发挥了技术支撑作用。

特高压交流试验示范工程自山西省晋东南、经河南省南阳至湖北省荆门，连接装机总容量超过3亿千瓦的华北和华中两大电网，线路全长640公里，共有铁塔1284基，平均塔高77米，是目前世界上运行电压最高、技术水平最先进的交流输电工程。工程于2009年1月建成投运以来，经受了雷雨、大风、高温、严寒等气象条件的考验，保持安全稳定运行，成为我国南北方向一条重要的能源输送通道。

特高压交流输电试验示范工程对促进我国能源资源优化配置、推动经济社会发展和节能减排发挥了重要作用。截止2010年底，工程累计送电207亿千瓦时。其中华北火电送华中128亿千瓦时，华中水电送华北79亿，减排二氧化碳694万吨；实测输电损耗率仅为1.7%，节能降耗效果显著。



在冬季,通过该工程向华中电网输送电力,有力地缓解了湖北等缺电的局面,起到了雪中送炭的作用。

特高压直流输电示范工程西起四川宜宾复龙换流站,东至上海奉贤换流站,输送容量达700万千瓦级。线路途经四川、重庆、湖南、湖北、安徽、浙江、江苏和上海八省市,全长1907公里,共有塔基3939基,承担金沙江下游大型水电站的送出任务,是世界上电压等级最高、输送容量最大、送电距离最远、技术水平最先进的直流输电工程。工程于2010年7月建成投运,已安全稳定运行超过9个月,成为我国东西方向一条重要的能源输送通道。

特高压直流输电示范工程每年可向上海输送约350亿千瓦时的清洁电能,减排二氧化碳超过3000万吨,在节能减排、保护环境等方面的经济社会效益极为显著。

## 2 特高压交直流输电技术的推广价值

特高压交、直流示范工程的成功实践,实现了中国能源科技领域的重大创新,引领了国际高压输电技术的创新和进步,是中国具有良好经济性和环境友好性、满足电力工业可持续发展需要的重大实践,也是国际能源领域的重大创新实践。

特高压输电技术的全面突破,为中国乃至世界电力领域的创新变革和可持续发展提供了重要战略选择。

当前,在全球范围内正经历着一场以能源多元化、清洁化为方向,以优化能源结构、实现能源转型为目标,以清洁能源和智能电网为特征的新一轮能源变革。在这场能源变革中,特高压输电将发挥重要的作用。

转变电力发展方式,优化电源结构和布局,是实现电力工业可持续发展的必然选择。随着我国能源开发向西部和北部的转移速度加快,能源产地和能源消费地之间的输送距离越来越远、能源输送的规模越来越大,500千伏电网已经无法满足电网发展需要。要促进大型能源基地集约化开发及全国范围的资源优化配置,必须加快发展特高压电网,促进大煤电、大水电、大核电、大可再生能源基地的集约化开发,保证能源的长期稳定供应。

未来五年,我国预计新增装机近5亿千瓦,全社会用电量新增近2万亿千瓦时,加快建设以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展,具有信息化、自动化、互动化特征的坚强智能电网的任务十分紧迫,特高压交、直流输电技术具有重要的推广价值。

## 3 特高压交直流输电技术研究新进展

目前,正在进一步深入研究特高压交直流输电的新技术,主要包括:

### (1) 特高压串补技术

采用串补技术,可减小线路阻抗,提高输送能力和安全稳定水平。目前正在对特高压试验示范工程进行扩建,采用扩建主变、线路加装串补(串补度40%)的扩建方案。

特高压串补在世界上首次研制,前一阶段对串补系统关键技术和设备研制等开展了大量的试验研究工作,突破了170千安旁路开关、63千安保护间隙、高TRV耐受能力特高压开关和系统集成等关键技术,建成了1:1真型串补平台。

目前,特高压串补已进入工程实施阶段,计划2011年12月投入运行。在特高压串补技术取得突破以后,大电源基地外送输电工程中将广泛应用这一技术。

### (2) 大容量特高压开关

额定电流6300安、额定短路开断电流63千安的特高压开关是后续特高压工程用主力设备,属世界首次研制。

为突破这一技术,我国在国际上率先建立了63千安特高压开关的试验能力,目前样机已通过型式试验,为后续特高压工程应用这一新技术设备打下了坚实的基础。

### (3) 特高压升压变压器

能源基地大型发电机组通过特高压升压变压器直接接入电网,有利于提高电源送出通道输送能力,发挥特高压大容量输电的优势。

特高压升压变压器属世界首次研制。国网公司会同五大发电公司,组织三大变压器厂开展联合攻关。目前,首台样机已通过



型式试验,代表了国际同类设备制造的最高水平。

#### (4) 特高压同塔双回路输电技术

特高压同塔双回路的走廊宽度与两个单回路相比,可以从140米下降至80米。结合后续特高压输电工程,对特高压同塔双回路输电的关键技术进行了深入研究,已攻克了过电压绝缘配合、导线排列、雷电防护、潜供电流、杆塔设计等关键技术,已具备在后续特高压输电工程中推广应用的条件。

#### (5) 特高压电网动态无功补偿技术

动态无功补偿技术能够加强无功电压支撑,提高输电能力及受端系统的电压稳定裕度,改善用户的电压质量。对特高压电网中应用动态无功补偿技术已开展深入研究。

研究表明,在直流换流站附近装设一定容量的动态无功补偿设备,可明显提高严重故障情况下受端系统的电压稳定性,改善多馈入直流系统的安全性。

#### (6) 特高压可控高压电抗器技术

采用可控高抗技术,能够动态调整线路或母线高抗的电抗,从而动态补偿输电线路的容性充电功率,平衡无功分布,稳定系统电压,解决长距离重负荷线路无功调节和过电压抑制之间的矛盾。在暂态时也可限制系统过电压、抑制潜供电流,提高系统暂态稳定性。

特高压可控高抗在世界上属首次研制,中国电科院、制造厂和高等院校集中攻关,现已全面突破系统集成、600MVAR可控高抗本体研制、3500安培大功率自冷式晶闸管阀研制、快速旁路开关研制、双冗余控制保护研制等核心技术,设备研制工作正在进行之中,即将具备工程应用条件。

#### (7) $\pm 1100$ 千伏特高压直流输电技术

$\pm 1100$ 千伏特高压直流输电关键技术研究已取得重大进展,包括:主回路、过电压及绝缘配合、系统运行方式及控制策略、主设备技术规范研究等等。

2011年5月 $\pm 1100$ 千伏特高压直流输电技术规范已正式发布,为全面开展设备研制和成套设计和试验打下了坚实的基础。根据“十二五”规划,新疆准东—重庆将采用 $\pm 1100$ 千伏特高压直流输电技术,实现疆电远距离、大规模外送。

#### (8) 特高压多端直流输电技术

特高压多端直流输电技术研究已全面展开,主回路结构、主接线方式、过电压及绝缘配合、系统运行方式及控制策略等试验研究工作已取得初步成果。

在能源基地多个电源协调外送、向多个受端系统供电、以及在受端电网合理分散接入等方面具有应用价值,将提高特高压直流输电系统的灵活性和安全性。

随着紧凑型、同塔多回、柔性交流和直流输电新技术及其复合技术在特高压电网中得到应用,以大容量、远距离、节约走廊、降低损耗、保护环境、智能化为核心目标的特高压交、直流输电技术将得到全面发展,形成由先进的传感测量、通讯、信息、计算机和控制等技术与物理电网高度集成的坚强智能电网,具有自愈、兼容、经济、集成、优化等特征。

## 4 特高压电网安全性研究

2004年以来,国家电网公司在大力开展特高压技术创新过程中,同时建成了目前世界上最大的电网仿真系统,集中了我国著名的电力系统分析专家,多次听取各方意见,采用基于数字仿真和数模混合仿真相结合的研究方法,反复论证,多方案对比,对我国电网规划、电网构建方案 and 安全性开展了深入研究。

研究表明:

(1) 500千伏电网不能满足我国电源基地远距离、大规模输送的要求,无法解决多馈入直流带来的受端电网安全稳定问题。主要表现为,交流系统对直流电压支撑能力不足,系统发生故障会导致多回直流闭锁,引发连锁反应,造成大停电;不能解决多馈入直流稳定性与交流电网控制短路电流之间的矛盾,也无法克服500千伏输电通道潮流转移能力不足的本质问题。(2) 华北—华中—华东采用特高压同步电网方案,形成“强交强直”混合电网结构,直流馈入规模合理、受端电网支撑能力强,承受严重故障能力强,能够保证多馈入直流系统的安全稳定运行,满足我国《电力系统安全稳定导则》的要求。(3) 建设特高压电网,构建能源电力综合运输体系,满足大型能源基地集约化开发要求,实现电力安全、经济输送,从根本上解决煤电油运紧张矛盾,扩大水电消纳范围,提高风电、太阳能等清洁能源消纳能力,获取错峰、水火互剂、减少备用、减少弃水电量等诸多综合效益,还可获取节约占地、减少环境污染等社会效益。

目前,发展特高压已纳入国家“十二五”规划纲要。在特高压交、直流示范工程顺利投运以后,通过总结经验和深化研究,我国在特高压技术研究、装备制造和工程应用方面又取得了新的进展,推动国际特高压输电技术水平达到了新高度,为后续特高压输电工程建设奠定了坚实的基础。

(本文根据作者在2011中国清洁电力论坛上发言整理,未经作者审核。)