

特高压输电建设及其对江苏电网的影响探讨

王成亮¹, 黄磊¹, 向昌明¹, 翟学锋¹, 卫志农², 孙国强²

(1.江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2.河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 特高压输电具有输电容量大、距离远、效率高、损耗低等优势, 发展特高压输电技术, 符合我国国情和国家能源发展战略, 是中国能源和经济社会协调发展的必然要求。与国外相比, 我国特高压输电工程起步较晚, 但是发展较快。通过整理国外特高压输电建设的发展历程、影响因素、发展趋势和相关的研究工作, 总结了其相关经验, 以期为我国特高压输电工程建设和研究提供借鉴。“十二五”期间, 江苏将开工建设特高压电网, 本文最后简要分析了特高压接入对江苏电网的影响。

关键词: 特高压输电; 特高压建设; 运行经验

0 引言

建设特高压交流输电骨干网替代超高压交流电网是我国电力工业发展的必然趋势。近年来, 随着我国国民经济的高速持续发展, 各行业的电量需求也愈来愈大, 但是我国电网建设相对滞后, 电力供应和需求不平衡的矛盾因此越来越突出, 而我国能源和负荷的地理分布极不均衡, 决定了我国要解决 21 世纪上半叶的电力供应问题, 就必须在大力开发水电和火电的同时, 建设全国能源传输通道, 实现长距离大容量的“西电东送”和“北电南送”, 从而实现全国联网, 充分发挥电网的水火互补调剂及区域负荷错峰作用^[1-3]。

根据国家电网公司发展规划, 2009 年, 国家电网公司将全面加快向家坝-上海、锦屏-苏南特高压直流工程建设, 并开工建设淮南-上海、锡盟-上海、陕北-长沙特高压交流工程。根据特高压电网在江苏电网的规划, 到 2012 年, “三纵三横”规划中的锡盟-上海和雅安-南京工程将使特高压交流系统直接进入江苏电网, 并将分别在南京北、泰州、苏州和徐州建立落点, 同时形成徐州-南京北双回线路和芜湖-南京北-泰州-苏州-上海双回线路。2012 年特高压直流锦屏-苏南工程已在江苏吴江落点, 直流输送容量为 7200MW^[4-5]。

随着特高压电网逐步建设, 江苏电网将于 2012 年开始同特高压交直流电网密切衔接, 并成为特高压交、直流大电网的一部分。届时, 江苏电网将逐步开始由 500kV 骨干网架转变为特高压骨干网架,

对外受电容量和距离将分别大幅增加, 同外界电网的联系更趋紧密, 这些情况的出现将对江苏电网带来巨大的影响。在此前提下, 分析特高压接入前后的运行工况, 从江苏电网的潮流分布、短路电流、稳定分析等几个方面进行计算分析并给出建设性的意见, 这对江苏电网的安全可靠经济运行具有重大意义。

本文总结了特高压工程建设和研究, 提出了对我们特高压建设可借鉴的经验, 并简要分析了特高压接入对江苏电网的影响。

1 国内外特高压工程建设和研究综述

特高压电网有利于能源资源的优化配置, 更有利于西部、中部和北部地区将资源优势转化为经济优势, 满足未来我国电力需求持续增长的需要, 促进电网与电源协调发展, 特高压电网主要具备以下优势^[6-9]:

- (1) 提高输送容量。
- (2) 提高电网的安全性和可靠性。
- (3) 改善电网结构。
- (4) 节省输电占地面积, 节约大量土地资源。
- (5) 产生显著的经济效益。
- (6) 有利于能源优化配置。
- (7) 减轻其他能源运输压力。
- (8) 带动我国电力工业制造业的产业技术全面升级。

表 1 所示为国外的特高压工程概况。

表 1 国外的特高压工程概况

序号	工程名称	长度 /km	电压等级 /kV	时间 /年
1	埃基巴斯图兹-科克契塔夫(前苏联)	494	1150(现 500kV 运行)	1985
2	科克契塔夫-库斯坦奈(前苏联)	396	1150(现 500kV 运行)	1985
3	西群马干线(日本)	138	1000(现 500kV 运行)	1992
4	南新泻干线(日本)	49	1000(现 500kV 运行)	1993
5	南磐城干线(日本)	194	1000	1999
6	东群马干线(日本)	44	1000	1999

1.1 美国的特高压输电技术研究

美国是研究特高压输电最早的国家，在特高压输电技术方面进行了深入的研究，其中AEP、BPA、GE和EPRJ等公司和机构围绕特高压开展了大量的科研和试验验证工作并做了大量的试验。尽管美国迄今为止尚未在工程中采用特高压输电技术，但其研究和试验是非常完善的^[6,10]。表 2 所示为美国的特高压工程研究和建设概况。

表 2 美国特高压工程概况

时间/年	内容
1967	美国通用电气公司雷诺特高压试验场进行 1000~1500kV 架空线路的研究计划
1974	美国电力研究院建设 1000~1500kV 三相试验线路并投入运行
1974	美国电力公司和瑞典通用电气公司进行可听噪声、无线电干扰及其他环境效应的实测
1976	俄亥俄铜公司的弗朗克·毕·布兰克试验室进行特高压长空气间隙试验
1976	美国邦纳维尔电力公司进行莱昂斯试验场和莫洛机械试验线段上进行特高压线路的广泛研究和开发

1.2 前苏联的特高压输电技术研究

前苏联是世界上第一个建成交流特高压工程并投入工业化运行的国家，从 1981 年开始，先后动工建设了 5 段特高压线路，总长度 2344km，表 3 所示为前苏联的特高压工程研究和建设概况。

表 3 前苏联特高压工程概况

时间/年	内容
1960	开展特高压输电的基础研究
1973	白利帕斯特变电站建设特高压三相试验线段
1978	着手建设从伊塔特到新库茨涅克长 270km 的工业性试验线路，后来作为埃基巴斯图兹到西伯利亚的 1150kV 输电线路的部分
1981	开工建设了 5 段 1150kV 特高压输电线路，总长 2344km
1990	哈萨克斯坦境内的埃基巴斯图兹中部产煤区的煤电向欧洲部分负荷中心输送的特高压直流输电工程

1.3 日本的特高压输电技术研究

日本通过对不同电压等级交流和超高压直流输电方式进行反复比较论证，日本得出结论认为：800kV线路输送能力较低，单位传输功率成本高，从经济、环境以及占用土地几方面看都不适合日本的情况。1500kV线路虽然需要的回路数少，输送容量大，但从输电线路设计、设备制造等方面看，存在难以预料的困难。采用 1000kV特高压交流(最高运行电压 1100kV)方案是最经济的。表 4 所示为日本的特高压工程研究和建设概况^[11]。

表 4 日本特高压工程概况

时间/年	内容
1972	启动了特高压输电技术的研究开发计划
1972	开展了特高压输电技术研究
1980	CRIEPI 在赤诚建立了长 600m、双回路、两档距的 1000kV 试验线段
1980	东京电力公司在高山石试验线段上，进行了分裂导线和绝缘子串的机械性能，如舞动和覆冰等性能的研究和技术开发
1988	动工建设特高压输电线路
1992	建成从西群马开关站到东山梨变电站 138km 线路
1993	建成南新泻干线中 49km 的特高压线路部分
1995	特高压成套设备在新棒名变电所特高压试验场安装完毕，随即进行带电考核
1999	完成东西走廊的南岩木干线 194km，东群马干线 44km，两段特高压线路全长 238km

1.4 意大利的特高压输电技术研究

意大利国家电力局(ENEL)根据本国电网发展经验，认为电力负荷每 20 年翻两番，需要同步引入新的电压等级。ENEL通过技术经济比较，认为在已有的 400kV电网上叠加百万伏级的新电压等级电网是最好的选择。意大利公司确定了它的 1000kV 研究计划后，在不同的试验站和试验室进行特高压的研究和技术开发^[11]。表 5 所示为意大利的特高压工程研究概况。

表 5 意大利特高压研究概况

序号	内容
1	在萨瓦雷托试验场有研究计划的 1000kV 主要试验设施
2	在米兰的意大利电力中心试验室、普拉达纳帕斯机械试验场和布鲁亥利欧机构试验室也对操作和雷电过电压进行了试验
3	在萨瓦雷托试验线段上进行了可听噪声、无线电杂音、电晕损失测量；对特高压绝缘子和金具的干扰水平也进行了试验
4	90 年代中期，意大利完成了所有设备的研发和试验，以及 1000kV 示范工程的建设和现场试验

1.5 加拿大的特高压输电技术研究

表 6 所示为加拿大的特高压工程研究概况，研究工作由加拿大魁北克水电局高压试验室开展。

表 6 加拿大特高压研究概况

序号	内容
1	进行了电压达 1500kV 额定电压的输电设备试验
2	进行了高达 1500kV 的线路和变电站空气绝缘试验
3	在魁北克水电局户外试验场对四种分裂导线结构进行研究
4	对 $\pm 600 \sim \pm 1200$ kV 直流输电线路的电晕、电场和离子流特性进行研究

2 国外特高压输电对江苏电网可借鉴的经验

从 20 世纪 70 年代开始，前苏联、日本、美国、意大利等国家出于满足国内电力供应，实现电能的长距离、大负荷输送，解决输电走廊不足等不同原因，集中开展了特高压输电的研究和建设，取得了丰富成果^[11-12]。经过近半个世纪的发展和实践考验，其中的成败得失和经验教训，为江苏电网的特高压电网建设提供了有益的借鉴和参考。

2.1 前苏联

前苏联特高压建设的特点有^[11]：

(1) 前苏联发展特高压输电，是由其能源分布和负荷中心位置所决定的，这一特点同江苏电网苏南、苏北的电力输送格局相似。

(2) 强调前期工作的重要性，开展了大量基础研究和产品开发。

(3) 在前期工作充分准备的基础之上，开展了一系列实际工程实验和建设。

(4) 前苏联解体后，由于国民经济条件的恶化，用电及发电量长期停滞不前，送端电源因资金短缺而无法按预计目标建设，导致特高压线路负载过轻，输送容量仅为额定容量的 20%~30%，已经建成的工程被迫降压运行，原计划扩建的特高压线段也不能按计划建设。

2.2 日本

日本决定采用百万伏级交流输电技术，主要也是从解决线路走廊紧张、电网的稳定性和短路电流超限等角度考虑的，这和我开展特高压的需求类似^[11]。

日本从 1972 年第一条 500kV 交流输电线路投入运行开始，就启动了特高压输电技术的研发计划，其特高压输电技术研究和设备研制经历了三个发展

阶段：第一阶段（1972 年~1978 年）围绕输变电技术和设备的调查研究，第二阶段（1978 年~1982 年）围绕特高压输电技术开展基础性研究，第三阶段（1982 年~1985 年）围绕输电线路和变电站设备开展实用性试验研究^[11]。

值得关注的是，为适应日本国情，满足对特高压设备小型紧凑化的要求，以及解决地形、气候、污秽等特有问题的需要，日本在特高压输电方面采用了许多新技术，包括新材料、新设备和新工艺，这也给予我国建设特高压紧紧围绕我国特有国情的启示。另外，日本人口稠密，环保要求高，为了研究公众能接受而经济上又合理的输电技术，他们针对特高压输电的电磁环境影响开展了深入研究^[11]。

2.3 美国

美国特高压研究包括两个电压水平，一个是以美国电力公司（AEP）为代表的 1500kV 特高压（最高电压 1600kV），另一个是以邦德维尔电力局（BPA）为代表的 1100kV 特高压（最高电压 1200kV）。通过建设特高压试验场，美国对包括线路、变压器、避雷器、断路器等设备在内的关键问题以及特高压线路的环境影响进行了逐一研究，证明了交流特高压输电技术的可行性，取得了较全面的成果，大量的试验研究成果对我们有借鉴意义。

20 世纪 80 年代末 90 年代初，美国经济增长速度下降，产业结构发生重大调整，电力需求发展趋缓。同时，美国能源资源分布状况适合发展分布式能源，电源结构也相对合理。这几大因素降低了长距离大容量输电的需求，延缓了特高压技术的应用^[11]。

2.4 巴西

目前，巴西正积极开展国际合作，参与我国主导的特高压直流输电研究，这对特高压接入江苏电网具有重要的工程实际借鉴意义。

3 特高压接入对江苏电网的影响

特高压交流系统接入江苏电网以后，将对江苏 500kV 电网的潮流分布产生较大的影响。随着特高压电网的逐渐增强，江苏 500kV 电网潮流将从原先的“北电南送”和“西电东送”方式下的单方向流动，逐渐转变为以特高压变电站为中心的多点辐射。特高压交流系统进入江苏电网后，江苏电网的短路电

流水平将有一定程度的提高。对于江苏电网而言,特高压交直流系统接入之后,无论是区外来电的规模和受电比例,还是江苏电网的网架结构、潮流分布以及同外界电网的电气联系,都将同接入之前发生较大变化,这些因素将对江苏电网的稳定性产生影响^[13]。

目前国内电网的网架结构薄弱,稳定性问题比较突出,有功调峰、无功补偿和电压调整手段欠缺,使得发展特高压直流、特高压交流输电技术势在必行。根据特高压电网在江苏电网的规划,锡盟-上海和雅安-南京工程将使特高压交流系统直接进入江苏电网,在南京北、泰州、苏州和徐州建立落点,形成徐州-南京北双回线路和芜湖-南京北-泰州-苏州-上海双回线路,特高压直流锦屏-苏南工程在江苏吴江落点,直流输送容量达7200MW,形成如此大规模交、直流电力系统,系统的安全稳定就显得极为重要。

在这样大规模的复杂系统的稳定与控制问题的研究中,机网之间的相互作用、交直流系统的相互作用需要进行大量的研究工作。其中,直流输电的控制系统与交流系统相配合时可能诱发的次同步振荡(SSO)就是一类严重的系统稳定性问题。高压直流输电系统的换流器能够产生很宽频带的电流,如果由于采用了不恰当的控制策略使得HVDC系统的控制回路对次同步电流呈现正反馈,则有可能会激发汽轮发电机组的轴系扭振。此外,电力系统稳定器(PSS)在电力系统中已获得广泛的应用,在保证电力系统的稳定运行中占有重要的地位。但PSS对系统低频振荡模态(振荡频率为0.1-2.0Hz)提供良好阻尼的同时,可能将一个或多个对应于轴系次同步扭振模态频率的振荡信号注入发电机励磁绕组,从而激发轴系扭振模态的次同步振荡。此外,各种特高压交流中采样的FACTS控制器(如TCSC装置)的引入也可能造成SSO现象的产生。因此有必要进一步分析特高压交直流机网协调研究,对保障江苏电网安全稳定运行具有十分重要的现实意义。

特别是1000kV的电厂升压变压器已经研制成功,采用电厂直接出口到1000kV电网的接入方式,有许多厂网协调的新课题值得研究。

特高压进入江苏电网,对已有江苏电网的系统等值带来了影响。如何改进已有的态等值方案对江苏电网的若干个500kV母线进行等值,进而总结等

值工作经验,是实现适用于电磁暂态仿真的动态等值方法的基础工作。

利用实时数字仿真系统RTDS平台编制程序,实现动态等值是特高压接入江苏电网稳定分析的重要工作。特高压接入江苏电网,亟待开展在RTDS实时数字仿真系统上建立包括特高压在内的江苏交直流电网等值系统,并分别对该系统采用考虑和不考虑串补装置方案进行实时仿真试验和比较。基于RTDS实时数字模拟的试验仿真主要包括以下内容:①TCSC基本特性试验;②固定串补的潮流和暂态稳定试验;③可控串补(内部控制)控制策略及系统暂态稳定试验;④可控串补(外部控制)控制策略及系统暂态稳定试验。并且,在仿真试验中,分孤岛运行方式和交直流混合运行方式,同时考虑了串补装置对次同步振荡的影响,并定量评估仿真结果的准确度。

4 结束语

特高压在我国电力行业的影响越来越大,本文概述了国外特高压工程的研究和建设情况,分析了对我国特高压建设可借鉴的经验,同时讨论了特高压接入对江苏电网的影响,包括潮流、规划、机网协调等内容,以期有助于促进我国的特高压输电的研究和工程建设。

参考文献:

- [1] 周浩,余宇红.我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J].电网技术,2005,29(12):1-9.
- [2] 中国电力科学研究院.“十一五”国家重点图书出版规划项目·特高压输电技术:直流输电分册[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [3] 中国电力科学研究院.“十一五”国家重点图书出版规划项目·特高压输电技术:交流输电分册 中国电力科学研究院[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [4] 曾南超.国内外高压直流输电国内外高压直流输电概况[R].中国电力科学研究院:2011-09-06.
- [5] 郑晓冬,邵能灵,杨光亮,等.特高压直流输电系统的建模与仿真[J].电力自动化设备,2012,32(7):10-14,61.
- [6] 娄欣.中国特高压与超高压输电方式的技术经济分析及方案设想[D].北京:华北电力大学(北京),2010.
- [7] 牛林.特高压交流输电线路电磁环境参数预测研究

- [D]. 济南:山东大学, 2008.
- [8] 牛林, 杜至刚, 赵建国. 特高压输电线路分裂导线表面电位梯度的计算及其特性分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (10): 5-9.
- [9] Tiwari S N, Bin Saroor A S. An investigation into loadability characteristics of EHV high phase order transmission lines [J]. IEEE Trans. On Power Systems, 1995, 10 (3): 1264-1270.
- [10] 胡白雪. 超高压及特高压输电线路的电磁环境研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [11] 刘泽洪, 李晨光, 陈葛松, 等. 点击国际特高压[J]. 国家电网, 2006(02): 68-71.
- [12] Dudurych I M, Gallagher T J, Rosolowski E. Arc effect on single-phase reclosing time of a UHV power transmission line [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, 19(2): 854-860.
- [13] 刘建坤, 胡亚山, 赵静波, 等. 特高压接入对江苏电网的影响展望[J]. 江苏电机工程, 2010, 29 (1): 1-3.

作者简介:

王成亮(1981-), 男, 高级工程师, 主要从事高压设备故障诊断、绝缘监督管理及机网协调的研究工作。