

国家电网公司



STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

特高压直流输电技术

研究成果专辑

(2012年)

国家电网公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特高压 直流 输电技术

研究成果专辑

(2012年)

国家电网公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是国家电网公司对 2012 年特高压直流输电工程建设情况和特高压直流输电技术研究成果的全面回顾和总结。

本书共分 8 章,介绍了 2012 年度完成的特高压直流输电关键技术课题和单项专题的研究成果,主要内容包括 $\pm 800\text{kV}$ 、8000MW 特高压直流输电工程成套设计、设备技术规范、换流站工程专题研究、线路工程专题研究; $\pm 1000\text{kV}$ 特高压直流输电关键技术研发与设备研制;锦苏 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程系统试验研究与实践。

本书可供从事特高压直流输电技术设计、研究、工程建设方面的技术人员和相关管理人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

特高压直流输电技术研究成果专辑. 2012 年 / 国家电网公司组编. —北京: 中国电力出版社, 2015.9

ISBN 978-7-5123-7988-6

I. ①特… II. ①国… III. ①特高压输电-直流输电-输电技术-研究
IV. ①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 148495 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 9 月第一版 2015 年 9 月北京第一次印刷

880 毫米 $\times$ 1230 毫米 16 开本 19.25 印张 356 千字

定价 110.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

编写人员名单

主 编	刘振亚					
副 主 编	郑宝森					
编委会成员	刘泽洪	伍 莹	赵庆波	王益民	丁广鑫	郭剑波
	刘开俊	肖世杰	梁政平			
编写组组长	刘泽洪	丁永福	蓝 海	高理迎	种芝艺	文卫兵
	马为民	李 正				
编写组副组长	王祖力	郭贤珊	黄 勇	宋胜利	孙 涛	但 刚
	余 军					
编写组成员	张燕秉	赵大平	王 庆	丁一工	卢理成	张 进
	段 昊	肖 鲲	丁赞成	周立宪	孟华伟	吴自强
	朱 聪	鲁 俊	周海鹰	杨博林	黄兴怀	邵洪海
	高 振	武俊义	钱雪锋	郭咏华	丁玉剑	刘 臻
	童雪芳	杨万开	于昕哲	刘操兰	刘胜春	董晓辉
	朱艺颖	朱宽军	杨一鸣	张 涛	蒋维勇	吴方劼
	张宗鑫	申笑林	赵 峥	李亚男	邹 欣	蒲 莹
	卢亚军	谢 龙	曾 静	戚 乐	邹荣盛	张 瑚
	李学鹏	何 岩	汪 伟	张鹏姣	姜俊柏	何洪波

前 言

特高压直流输电技术是目前世界上最先进的输电技术,具有超远距离、超大容量、低损耗等特点。国家电网公司实施“一特四大”发展战略,加快发展特高压电网,促进大煤电、大水电、大核电和大型可再生能源基地建设,对于保障能源安全、防治大气污染、解决电网安全问题、促进经济增长都具有重要意义。

2012 年是国家电网公司“十二五”电网规划实施的关键一年,也是特高压直流输电工程建设攻坚克难、创新奋进的一年:一是锦屏—苏南±800kV 特高压直流输电工程和高岭背靠背扩建工程按期投产;二是在建工程快速推进,哈密南—郑州±800kV 特高压直流输电工程超额完成全年形象进度目标;三是宁东—浙江、锡盟—泰州、上海庙—山东工程等新开工工程超前组织关键技术研究;四是国产化取得重大进展,锦屏—苏南±800kV 特高压直流输电工程首次实现两种自主化特高压换流阀工程应用,高岭背靠背扩建工程首次实现全部设备国内自主研制生产,哈密南—郑州±800kV 特高压直流输电工程、溪洛渡—浙西±800kV 特高压直流输电工程首次实现了直流场设备除穿墙套管外的所有设备立足于国内供货方式;五是直流工程质量目标大幅提高。

为及时总结特高压直流输电技术研究工作取得的成果,优化工程技术应用,应对特高压直流规模化建设的需要,国家电网公司组织相关科研、设计等单位编写《特高压直流输电技术研究成果专辑(2012 年)》,对 2012 年特高压直流输电技术

研究成果进行全面回顾和总结，专辑凝聚着各级领导和工作人员的汗水，是参与特高压直流输电技术研究的全体人员的劳动和智慧的结晶。

本专辑系统介绍了 2012 年度完成的 36 项研究成果，共分为 8 章：第 1 章主要回顾了 2012 年特高压直流输电工程建设工作情况以及特高压直流输电技术发展方向；第 2 章介绍了 $\pm 800\text{kV}$ 、8000MW 特高压直流输电工程成套设计方案；第 3 章介绍了 $\pm 800\text{kV}$ 、8000MW 特高压直流输电工程主要设备技术规范；第 4 章介绍了 $\pm 800\text{kV}$ 、8000MW 特高压直流输电工程换流站和线路工程设计方案；第 5 章介绍了 $\pm 800\text{kV}$ 、8000MW 特高压直流换流站工程专题研究内容；第 6 章介绍了 $\pm 800\text{kV}$ 、8000MW 特高压直流输电线路工程专题研究内容；第 7 章介绍了 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输电关键技术研发与设备研制情况；第 8 章介绍了锦屏—苏南 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流工程系统试验研究与实践。本书不仅可供读者全面了解 2012 年度特高压直流输电技术研究取得的成果和进展情况，同时还为今后特高压直流建设提供了统一的基础条件和数据平台。

特高压输电技术研究的参与者付出了辛勤的劳动，换来了累累硕果，承担研究任务的单位全力以赴，克服重重困难，圆满完成了既定的研究任务，在此表示衷心感谢，并向为本书编辑出版提供支持和帮助的单位和个人致谢！

国家电网公司

2015 年 6 月

目 录

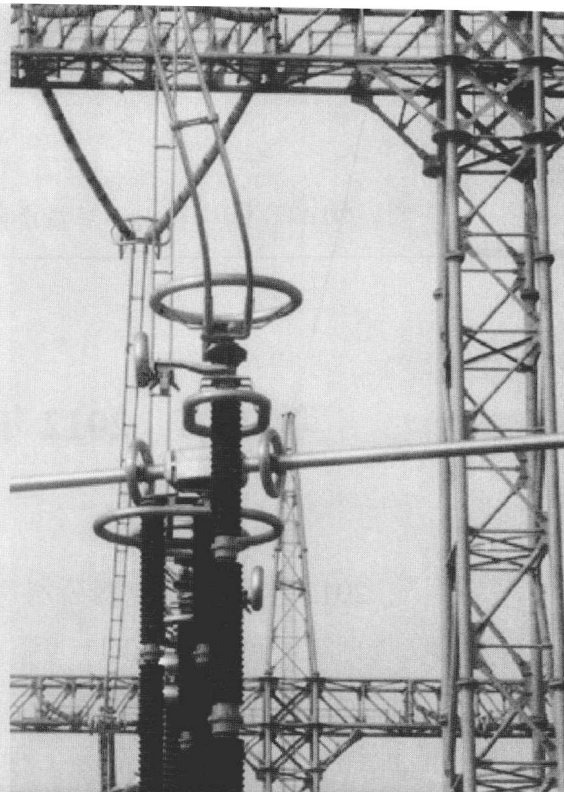
前言

第 1 章	绪论	1
第 1 节	2012 年特高压直流输电工程建设工作回顾	2
第 2 节	2012 年特高压直流输电技术主要研究成果概述	3
第 3 节	特高压直流输电技术发展方向	4
第 2 章	±800kV、8000MW 特高压直流输电工程成套设计	7
第 1 节	直流系统参数	8
第 2 节	过电压与绝缘配合	14
第 3 节	污秽及外绝缘	22
第 4 节	无功补偿和控制	26
第 5 节	交流滤波器设计	29
第 6 节	直流滤波器设计	32
第 7 节	控制保护成套设计优化	34
第 3 章	±800kV、8000MW 特高压直流输电工程设备技术规范	37
第 1 节	换流变压器	38
第 2 节	晶闸管及换流阀	55
第 3 节	平波电抗器	65
第 4 章	±800kV、8000MW 特高压直流输电工程换流站和线路工程设计	71
第 1 节	哈密南换流站设计方案	72

第2节	双龙换流站设计方案	89
第3节	哈密南—郑州±800kV 直流输电工程一般线路设计	98
第4节	溪洛渡左岸—浙江金华±800kV 直流输电工程一般线路设计	107
第5章	±800kV、8000MW 特高压直流换流站工程专题研究	119
第1节	特高压直流输电工程容量提升专题研究	120
第2节	特高压换流站智能一体化辅助系统研究	138
第3节	共用接地极均流电阻配置方案及试验研究	147
第4节	特高压换流站模块化设计专题研究	152
第5节	换流站防风沙研究	166
第6节	换流站阀外冷系统风冷研究	181
第6章	±800kV、8000MW 特高压直流输电线路工程专题研究	196
第1节	线路过电压和绝缘设计深化研究	197
第2节	Y型绝缘子串工程应用关键技术研究	207
第3节	提高特殊气象条件下线路金具可靠性与耐久性研究	214
第4节	特高压直流线路与同走廊交直流线路接近距离研究	221
第5节	特高压直流线路取消人工接地装置研究	226
第6节	基于真型试验的旋转90°双十字组合角钢铁塔设计研究	235
第7章	±1100kV 特高压直流输电关键技术研发与设备研制	244
第1节	换流变压器	245
第2节	换流阀	250
第3节	平波电抗器	254
第4节	直流开关	256
第5节	支柱绝缘子	259
第6节	避雷器	266
第8章	锦屏—苏南±800kV 特高压直流输电工程系统试验研究与实践	268
第1节	站系统试验	269
第2节	端对端系统试验	277
第3节	解决的主要技术和设备问题分析	284
第4节	站系统和端对端系统试验结论	297

2012

特高压直流输电技术研究成果专辑



第 1 章

绪 论



第 1 节 2012 年特高压直流输电工程建设工作回顾

2012 年是国家电网公司“十二五”电网规划实施的关键一年，也是直流工程建设攻坚克难、创新奋进的一年。这一年里，国家电网公司紧紧围绕全年直流工程建设工作目标，克服建设任务繁重、管理体制变革的困难，实现锦屏—苏南±800kV 特高压直流输电工程（简称锦苏工程）、高岭背靠背直流扩建工程（简称高岭扩建工程）提前建成投产，哈密南—郑州±800kV 特高压直流输电工程（简称哈郑工程）、溪洛渡—浙西±800kV 特高压直流输电工程（简称溪浙工程）建设取得重要进展，±1100kV 直流新技术研发取得关键突破。

一是投产工程按期完成。锦苏工程：克服成昆铁路换流变压器大件运输受阻和高端换流变压器生产制造过程中因质量问题无法按时出厂等困难，于 2012 年 11 月 28 日顺利投入运行，刷新了特高压直流工程在输送容量、送电距离和输电效率等方面的世界纪录，成为目前世界上电压等级最高、输送容量最大、送电距离最远的高压直流输电工程。高岭扩建工程：克服设备供货期短、全新控制保护新平台应用存在适应期等困难，仅用 10 个月的有效时间，优质高效地将扩建工程投入运行，在 2012 年冬季来临前将东北电网富余的火电风力输送到华北京津唐地区，缓解了京津唐地区冬季电力紧张局面。

二是在建工程快速推进。哈郑工程：自 2012 年 7 月开工至 2012 年年底，历时不到 5 个月时间，通过优化方案、科学组织，克服设备招标滞后、施工图纸紧张、冬季施工环境恶劣等重重困难，超额完成全年形象进度目标。

三是新开工工程超前组织关键技术研究。宁东—浙江工程：按照送端接入 750kV、受端接入 500kV 的可研方案完成了换流站预成套设计，直流主设备采购技术规范编制发布。锡盟—泰州、上海庙—山东工程：按照受端按照接入 1000kV 交流的可研方案开展选站选线工作，换流变压器研制方案论证可行，关键技术研究工作取得阶段性成果。

四是国产化取得重大进展。锦苏工程首次实现两种自主化特高压换流阀工程应用。高岭扩建工程首次实现全部设备国内自主研制生产，换流阀控设备、直流套管在工程中首次成功应用。第二种全国产化的直流控制保护软件平台成功在工程中应用。哈郑、溪浙工程首次实现了全部特高压直流主设备公开招标采购，首次实现了直流场设备除

穿墙套管外的所有设备立足于国内供货方式；低端换流变压器引进更多制造厂家参与竞争。

五是直流工程质量目标大幅提高。深入贯彻落实国家电网公司《关于进一步提高工程建设安全质量和工艺水平的决定》，以全面提高直流运行可靠性和换流站主要设备使用寿命为目标，大力推行工程全寿命周期管理理念。组织设计、设备等工程建设主要环节系统梳理影响工程寿命和质量的设备、材料、工艺等关键点，在设计方案和设备采购中落实反事故措施和质量提升要求；深入推程序化工作流程、标准化设计模块、通用化设备接口、典型化施工工艺，科学提高工程建设各个环节的工作质量水平。

自2002年以来，我国直流输电事业迎来了一个空前发展的黄金10年。截至2012年，国家电网公司建成了向家坝—上海±800kV特高压直流输电工程（简称向上工程）、锦苏工程，创造了直流输电电压等级、输送容量和送电距离的世界纪录；成功建设了世界上首个±660kV直流输电工程，在世界海拔最高、接入系统十分薄弱条件下建成了青藏联网工程；三峡—常州、三峡—广东、三峡—上海、宝鸡—德阳、呼伦贝尔—辽宁、葛沪综合改造、灵宝、高岭、黑河背靠背等一批具有重要意义的直流工程相继建成投运；有力地促进了三峡、向家坝、溪洛渡、锦屏等大型水电基地和北部大型火电基地的集约开发和规模外送，结束了西藏电网长期孤网运行的历史，开启了国际能源输送通道，实现了全国电网的互联互通。2012年，国家电网直流工程共输送电量1301亿kWh，占当年国家电网跨区交易电量的71%。直流工程已成为西电东送、北电南送的重要通道，是国家跨区电网的重要组成部分，成为全国乃至更大范围能源资源优化配置的大平台。

通过10年来的奋发努力，我国已成为世界上投运直流工程最多、直流输电技术应用最全面、技术创新最前沿的国家！

第2节 2012年特高压直流输电技术主要研究成果概述

2012年，国家电网公司勇于挑战和敢于挑战技术极限，从交流电压、直流电压、直流电流三个方面的提升着手研究提升特高压直流技术水平的方案，进一步发挥特高压直流在远距离、大容量、高效率能源配置方面的技术优势，坚持以创新促发展、提升直流工程技术水平的理念，深入开展科研攻关和优化创新，直流技术创新取得新成果。

一是依托锦苏工程进一步推动特高压技术进步和质量提升。通过深入开展技术创



新与优化，在向上工程基础上进一步挖掘潜力，提升输送容量和质量技术水平，提高特高压直流的输电效率和效益，实现特高压直流工程输电技术的跨越式发展。

二是 $\pm 1100\text{kV}$ 直流输电技术研发取得重大进展。 $\pm 1100\text{kV}$ 电压等级输电技术的过电压绝缘配合、空气间隙、防雷、电磁环境等关键技术研究取得阶段性成果。两种不同技术路线的换流变压器模型样机通过了试验考核，穿墙套管样机研制成功，换流阀、直流隔离开关、避雷器、直流绝缘子等多个设备已通过或正在进行型式试验。深入推进换流变压器现场组装研究，现场组装方案实现工程科研逐步向工程应用的实质性转化。

三是 $\pm 800\text{kV}$ 、800 万 kW 直流输电技术应用在工程实践阶段不断完善。依托哈郑、溪浙工程，结合工程直流通流能力提升，全面梳理相关设备与设计方案，提出了全套设备技术规范，引导设备厂家对关键设备的关键环节通流能力提升及散热措施进行完善和优化。针对哈密南换流站缺水问题，实践优化完善空气冷却器加自然通风板翅式换热器的新型冷却方案。深入推进模块化设计工作，构建换流站主控楼、阀厅、直流场、换流变广场、滤波器场等区域施工图设计的模块化和标准化，总结继承优良设计方案，为后续更多设计单位参与直流工程设计提供技术支撑。

第 3 节 特高压直流输电技术发展方向

在未来几年里，我国特高压直流输电工程将继续坚持以安全可靠为前提，以提高工程质量和寿命为目标，深入推行技术创新。

一是从交流电压、直流电压、直流电流三个方面的提升着手研究提升特高压直流技术水平的方案，进一步发挥特高压直流在远距离、大容量、高效率能源配置方面的技术优势。

（1）加快特高压直流送端接入 750kV 和受端分层接入 1000kV 、 500kV 交流电网的设备研制和工程应用。按照宁东—浙江工程建设需要，加快推进交流侧 750kV 换流变压器、 750kV 交流滤波器小组断路器等关键设备研制，确保满足工程建设的顺利推进。依托锡盟—泰州、蒙西—武汉特高压直流工程，提前开展工程（预）成套设计，深入优化直流系统技术方案，优化 1000kV 交流配电装置、滤波器及其小组断路器、换流变压器等关键设备参数；加快开展 1000kV 滤波器小组断路器、交流侧 1000kV 低端换流变压器、交流滤波器等新设备的设计和研发工作，组织各科研单位深入开展直流场设备空气间隙、设备抗震等关键技术研究；根据工程需要，开展换流站设

计研究，研究换流站优化布置方案，减小 1000kV 交流滤波器场占地，全面支撑工程建设。

(2) 研究提高特高压直流工程的输送能力，推广应用大截面导线。进一步优化工程成套设计，深入落实设备研制可行性，大力开展设备设计研究，尽快确定换流变压器阀侧套管、换流阀、直流高速开关、隔离开关和平波电抗器等设备技术路线，开展换流变压器现场组装等设备相关技术研发，全面支撑工程可研。组织科研、设计、施工单位开展 1250mm² 和 1520mm² 大截面导线研发工作，完成导线、配套金具、施工机具的研制和施工、防振技术研究，为在宁东—浙江及后续特高压直流工程中的推广应用做好科研支撑。推广采用节能导线及以铝合金材料为主的新型导线，应用型线制造技术。

(3) 推进±1100kV 特高压直流工程成套设计 and 应用。深入推进直流场空气间隙、外绝缘、电磁环境等关键技术研究；结合工程送端具体条件，继续研究换流变压器现场组装，进一步简化现场工作，降低管理难度，确保设备现场制造的质量；紧密跟踪工程可研，根据确定的可研方案，进一步优化工程成套设计方案，推动研究成果向工程应用转化。

(4) 继续完善±800kV、800 万 kW 容量直流输电技术。在哈郑工程、溪浙工程的基础上，系统梳理并研究解决与输送容量提升有关的系统安全稳定问题、无功配置与优化问题，设备容量与通流能力提升带来的设备研制与大件运输问题，以及阀厅金具优化设计等问题。结合不同的系统与外部环境条件，形成兼顾差异化的±800kV 特高压直流工程通用化设计模块与通用化设备选型。

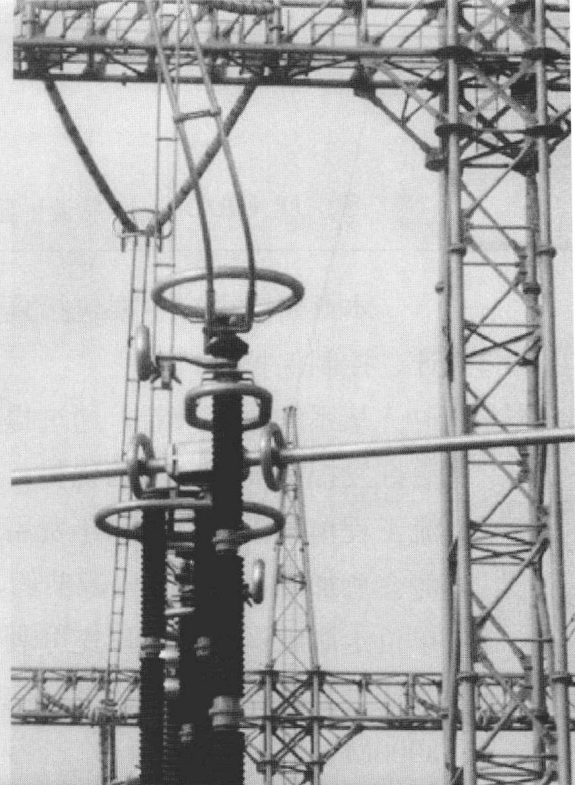
二是持续开展设计优化创新和通用设计的总结提升。牢固树立“设计为龙头”的指导思想，以设计优化创新和标准化设计为技术手段保安全、求质量、促速度、增效益。结合工程实际持续开展设计优化创新，将优化创新贯穿成套设计、初步设计和施工图设计的全过程，既不墨守成规、因循守旧，也不过度激进、盲目冒进。在设计优化过程中，始终牢固树立安全第一的意识，充分认识设计工作对于工程安全可靠、优质高效建设的重要作用，充分重视特高压直流工程设计工作的复杂性和艰巨性，细化分解和深入落实设计责任，严格分级审查和专家把关制度，深入、正确理解和科学落实各项反措要求和隐患排查整改措施，坚决杜绝和彻底消除影响安全可靠的设计风险。正确把握设计优化与投资控制的关系，既不能片面追求优化设计指标和降低造价水平而牺牲工程的安全可靠性和运行维护的便捷性，又不能过度追求系统性能而盲目增加投资水平。要注重从延长工程寿命和提高工程可靠性两方面求效益，在直流控制保护、水冷、空调、站用电等制约工程可靠性的薄弱环节上下功夫、做改进，减少直流强迫停运造成的损失；通过适当提高建筑材料规格等手段提高工程使用寿命，增加工程运



行年限。不断总结设计优化成果并做好提升，推进设计标准化工作。加强设计回访，及时总结设计中的经验教训，严格防止重复性质量问题的发生。同时，还要全面、深入地总结特高压直流设计成果，在此基础上形成典型性的、通用性的设计方案，用于指导后续工程的设计工作。

2012

特高压直流输电技术研究成果专辑



第 2 章

$\pm 800\text{kV}$ 、8000MW 特高压 直流输电工程成套设计



本章研究内容主要包括直流系统参数、过电压和绝缘配合、无功补偿、滤波器设计、控制保护等。

从系统角度来看，通过提高直流工程的输送能力，有利于促进交直流协调发展，更好发挥特高压电网的优势。从经济性角度来看，通过提高直流工程的输电能力，直流工程单位千瓦投资和年费用均明显减小。随着设备制造技术的不断进步，经济性优势会愈加凸显。从“资源节约、环境保护”角度来看，通过提高直流工程的输送能力，单位走廊输送能力得以充分利用，走廊利用率得到明显提高。因此为了节省输电走廊，降低直流系统损耗，提高送电经济性，哈郑工程与溪浙工程第一次将输送能力提高至 8000MW。由于两工程输送容量与电压等级相同，本章将以哈郑工程为主，结合溪浙工程，对主回路、过电压与绝缘配合、无功补偿、滤波器设计、控制保护等方面的直流输电工程成套设计参数进行整理与计算。

第1节 直流系统参数

1 引言

由于哈郑工程的输送功率为 8000MW，较以往的 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程在直流系统参数方面发生了较大的变化，需要对直流电流、整流器电压、逆变器电压、运行特性等进行计算与研究。

2 系统接线

哈郑工程在哈密南换流站和郑州换流站都含有双极每极 2 个串联的 12 脉动换流器，直流线路长度为 2210km，每端换流站都设置接地极。每个 12 脉动换流器两端的直流电压为 400kV，输送功率为 8000MW。

3 运行接线与运行控制模式

哈郑工程设计要求实现以下运行接线：

- (1) 双极全压运行；
- (2) 双极混合电压运行（一极双换流器运行，一极单换流器运行）；
- (3) 双极半压运行（每极一个换流器运行）；
- (4) 单极金属返回全压运行；

- (5) 单极金属返回半压运行（只有一个换流器运行）；
- (6) 单极大地返回全压运行；
- (7) 单极大地返回半压运行（只有一个换流器运行）；
- (8) 单极金属返回运行方式下，郑州换流站接地。

在换流站临时接地时，可以运行于双极平衡方式。但是在这种运行方式下，如果一极跳闸应该立即闭锁另一极，定义为单极停运。

哈郑工程直流系统应能实现下列运行控制模式：

- (1) 全电压运行；
- (2) 降压运行。

每极一个换流器时，不考虑降压运行。

直流系统可以从郑州向哈密南输送功率，即功率反送运行方式。此运行方式不确定设备额定值。

4 直流电压与输送能力

哈密南换流站的直流额定运行电压为±800kV，定义为平波电抗器出线侧直流极母线与直流中性母线之间的电压。在每极双换流器串联运行方式下，计及所有误差，直流电压最高不超过816kV，最低不低于560kV。每极一个换流器运行时，换流器两端最大电压不超过412kV。

当功率从哈密南换流站送往郑州换流站时，两端换流母线电压在连续稳态运行范围内（哈密南换流站500~550kV，郑州换流站500~550kV），直流电压降压至额定电压的70%~100%（±800kV），每一极都应能够连续运行。

在单极金属回路运行方式下，由于存在额外的金属返回导体压降，而整流器两端的电压没有升高，逆变侧的直流电压允许低于额定运行时逆变侧的额定电压。

功率从郑州换流站送往哈密南换流站时，直流额定电压定义为郑州换流站在正送时的额定电压，即747kV。

双极运行时，额定功率传输能力为8000MW（ P_N ）；单极运行时，额定功率传输能力为4000MW。传输能力定义为在环境温度不高于45.0℃，交流系统电压在规定的稳态运行范围内，哈密南换流站直流平波电抗器线路侧对中性母线额定电压下传输的功率。

哈郑工程功率正送方式时，从哈密南换流站向郑州换流站传输功率能力如下（不投入备用冷却设备）：双极全压运行输送8000MW；双极混合电压运行输送6000MW；双极半压运行输送4000MW；单极金属返回全压运行输送4000MW；单极金属返回半压运行输送2000MW；单极大地返回全压运行输送4000MW；单极大地返回半压运行