

# 换流站 现场运行技术

(入门篇)

中国南方电网超高压输电公司 编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 换流站 现场运行技术

## (入门篇)

中国南方电网超高压输电公司 编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书站在实习人员的立场, 引用大量的现场设备实际图片, 讲述换流站运行技术相关的理论和现场知识, 以期加深对现场设备的了解, 尽快掌握在换流站从事运行工作中应知应会的知识。

本书主要介绍换流站直流设备和交流设备的结构原理、典型故障分析及运行工作。主要包括高压直流输电系统概述, 高压直流输电系统典型运行方式, 换流变压器, 换流站阀厅相关设备, 直流场主要设备, 交、直流滤波器, 高压直流极控系统, 高压直流站控系统, 高压直流保护系统, 高压直流监控系统, 换流站主接线, 交流断路器, 电压互感器和电流互感器, 电力变压器, 站用电系统, 母线保护, 线路保护, 断路器保护以及交流站控系统。附录部分主要讲解运行实际业务工作, 如二次回路图纸如何查阅、SER 信息识别等。

本书可供从事高压直流输电技术运行、检修、试验、研究、培训及管理工作的相关技术人员使用, 也可供高校电力相关专业的在校本科生、研究生和教师参考, 还能满足社会各界对高压直流输电感兴趣的非电力专业人士的学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

换流站现场运行技术. 入门篇/中国南方电网超高压输电公司编. —北京: 中国电力出版社, 2013. 2

ISBN 978-7-5123-3997-2

I. ①换… II. ①中… III. ①换流站-电力系统运行 IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 013996 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2013 年 4 月第一版 2013 年 4 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 21.375 印张 376 千字 1 插页

印数 0001—3000 册 定价 53.00 元(含 1DVD)

### 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



# 前言

本书主要解决换流站现场实习人员培训中存在的一些较突出的实际问题。由于实习人员多由学校直接进入换流站，对换流站设备缺乏直观的了解，在学习过程中缺少积极的引导，导致学习效率较低。本书试图改变以往换流站现场运行技术培训书籍与现场安全生产实际联系较少的现状，站在实习人员的立场，引用大量的现场设备实际图片，讲述换流站运行技术相关的理论和现场知识，以期加深换流站实习人员对现场设备的了解，在了解的过程中，找准钻研的方向，提高学习的效率，成“才”成“家”。

由于直流输电和交流输电各自独有的特性，换流站内除有直流系统外，还有交流系统，所以本书分为直流设备运行（第一～十章）和交流设备运行（第十一～十九章）两个部分，并给出了必要的附录。

每章的编写以设备（系统）概述、设备（系统）结构原理、典型故障分析以及运行相关工作三个部分为主线。设备（系统）概述部分可以让实习人员对每一章所要讲解的设备有一个大致的了解，知道设备存在的作用；设备（系统）结构原理部分结合现场设备图片讲解，实习人员可以通过这一部分了解设备存在的理由；典型故障分析以及运行相关工作部分则列出设备（系统）会出现的典型故障，讲解如何处理以及相关的规定，即教会读者如何保证设备的安全运行。

本书在撰写时，对各种平台的设备（系统）进行了有选择的介绍；本书还配有光盘，内有部分典型直流操作的视频，方便读者理解。

本书正文部分共 19 章，附录 3 篇，具体内容及编写情况如下：

第一章、第四章由樊道庆编写；第二章由杨海峰编写；第三章由黄

徐编写；第五章由李勇、杨健编写；第六章由陈图腾、陈小平编写；第七章由杨贵军、罗培辉编写；第八章由李耀钟编写；第九章由朱春松编写；第十章由刘洋编写；第十一章由王林编写；第十二章由吴胜鹏编写；第十三章由农绍培、高玉亮编写；第十四章由陈彬编写；第十五章由雷鸣东、罗培辉编写；第十六章由郑丰、任飞编写；第十七章由杨海峰、向权舟编写；第十八章由李林编写；第十九章由王金雄编写。附录部分：附录 A 由李标俊编写；附录 B 由杨跃辉编写；附录 C 由樊道庆编写。

本书在编写过程中得到了南方电网科学研究院直流技术专家、教授级高级工程师傅闯博士；广西大学电气工程学院李晖老师；南京南瑞继保研发中心柔性输电研究所李海英所长、直流系统部刘海彬经理；南方电网生技部王琦高级工程师，超高压输电公司顾振洁女士，生技部直流科贺智高级工程师、王朝硕高级工程师，超高压输电公司广州局郑望其高级工程师，安宁局林睿高级工程师、常开忠高级工程师等的支持和帮助，谨在此表示由衷的感谢。

限于编者水平，书中不妥之处在所难免，恳请读者不吝赐教。

编 者

2013 年 2 月



# 目录

前言

## **第一章 高压直流输电系统概述**

---

- 第一节 高压直流输电系统简介..... 1
- 第二节 高压直流输电系统结构原理..... 2
- 第三节 中国南方电网..... 5

## **第二章 高压直流输电系统典型运行方式**

---

- 第一节 高压直流系统运行方式概述..... 9
- 第二节 高压直流系统运行方式结构原理 ..... 12
- 第三节 高压直流系统运行方式典型故障分析及运行工作 ..... 22

## **第三章 换流变压器**

---

- 第一节 换流变压器概述 ..... 24
- 第二节 换流变压器结构原理 ..... 27
- 第三节 换流变压器典型故障分析及运行工作 ..... 38

## **第四章 换流站阀厅相关设备**

---

- 第一节 阀厅相关设备概述 ..... 42
- 第二节 阀厅相关设备结构原理 ..... 45
- 第三节 阀厅相关设备典型故障分析及运行工作 ..... 60

## **第五章 直流场主要设备**

---

- 第一节 直流场主要设备概述 ..... 66
- 第二节 直流场主要设备结构原理 ..... 69
- 第三节 直流场设备典型故障分析及运行工作 ..... 77

## **第六章 交、直流滤波器**

---

第一节 交、直流滤波器概述 .....	82
第二节 交、直流滤波器保护结构原理 .....	89
第三节 交、直流滤波器典型故障分析及运行工作 .....	99

## **第七章 高压直流极控系统**

---

第一节 高压直流极控系统概述 .....	107
第二节 高压直流极控系统结构原理 .....	111
第三节 高压直流极控系统典型故障分析及运行工作 .....	124

## **第八章 高压直流站控系统**

---

第一节 高压直流站控系统概述 .....	128
第二节 高压直流站控系统结构原理 .....	129
第三节 高压直流站控系统典型故障分析及运行工作 .....	140

## **第九章 高压直流保护系统**

---

第一节 高压直流保护系统概述 .....	142
第二节 高压直流保护系统结构原理 .....	145
第三节 高压直流保护系统典型故障分析及运行工作 .....	154

## **第十章 高压直流监控系统**

---

第一节 SIEMENS 监控系统结构原理 .....	160
第二节 PCS—9550 运行人员控制系统结构原理 .....	169
第三节 高压直流监控系统典型故障分析及运行工作 .....	192

## **第十一章 换流站主接线**

---

第一节 电气主接线主要类型 .....	198
第二节 换流站各种电气主接线的应用 .....	201

## **第十二章 交流断路器**

---

第一节 断路器概述 .....	205
-----------------	-----

第二节	断路器结构原理·····	212
第三节	断路器典型故障分析及运行工作·····	217
<b>第十三章</b>	<b>电压互感器和电流互感器</b>	
第一节	电压互感器及电流互感器概述·····	224
第二节	电压互感器及电流互感器结构原理·····	226
第三节	电压互感器和电流互感器典型故障分析及运行工作·····	230
<b>第十四章</b>	<b>电力变压器</b>	
第一节	电力变压器概述·····	234
第二节	电力变压器结构原理·····	236
第三节	电力变压器典型故障分析及运行工作·····	241
<b>第十五章</b>	<b>站用电系统</b>	
第一节	站用电系统概述·····	246
第二节	站用电系统结构原理·····	250
第三节	站用电系统典型故障分析及运行工作·····	252
<b>第十六章</b>	<b>母线保护</b>	
第一节	母线保护概述·····	255
第二节	母线保护结构原理·····	255
第三节	母线保护典型故障分析及运行工作·····	258
<b>第十七章</b>	<b>线路保护</b>	
第一节	线路保护概述·····	265
第二节	线路保护结构原理·····	266
第三节	线路保护典型故障分析及运行工作·····	267
<b>第十八章</b>	<b>断路器保护</b>	
第一节	断路器保护概述·····	275
第二节	断路器保护结构原理·····	275
第三节	断路器保护典型故障分析及运行工作·····	281



## **第十九章 交流站控系统**

---

第一节 交流站控系统概述·····	288
第二节 交流站控系统主要功能·····	291
第三节 交流站控系统典型故障分析及运行工作·····	295
附录 A 电气二次回路图及其查阅方法 ·····	300
附录 B 西门子系统 SER 信息识别 ·····	320
附录 C PCS—9550 系统 SER 信息识别 ·····	327
参考文献·····	333

## 高压直流输电系统概述

本章简要介绍高压直流输电系统，解释高压直流输电系统的概念、组成部分，使读者有初步认识。本章的重点是高压直流输电系统的概念和组成部分。

### 第一节 高压直流输电系统简介

高压直流（High-Voltage Direct Current, HVDC）输电系统，由高压、直流、输电系统三个主要部分组成。

电能由发电厂生产，经过各种电气设备处理之后，通过电力线路将电能送至用户端。这个传输电能的过程称为输电；传输电能的系统称为输电系统。传输电能需要用到多种电气设备，这些设备按照电压等级可以分为高压设备、低压设备；传输电能时可根据设计需要选择交流输电或是直流输电。

我国 1991 年实施的《电业安全工作规程》规定：电气设备分为高压和低压两种：高压电气设备指对地电压在 250V 以上者；低压电气设备指对地电压在 250V 及以下者。

在输送的功率、输电距离、输电材料一定的前提下，电压等级越高，输电线路的电功率损耗越低。因此随着技术的进步，输电系统使用的电气设备电压等级也在不断提高。目前我国交流输电的电压等级最高有 1000kV，直流输电的电压等级最高已达 ±800kV。国家电网公司晋东南—南阳—荆门特高压 1000kV 交流输变电工程已于 2008 年 12 月投入试运行；南方电网 ±800kV 云广特高压已于 2009 年 12 月单极投产。

直流电的电压方向和大小保持不变，电流随负荷的调整而变化；交流电电压的方向和大小则是做周期性变化的。交流输电与直流输电线路所用杆塔是不同的，如图 1-1 所示。

直流输电线路造价远低于交流输电，但是直流输电需要建造换流站，换流

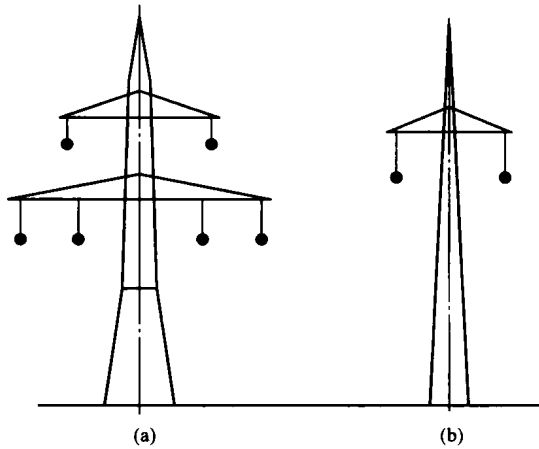


图 1-1 交流输电与直流输电线路所用杆塔区别  
(a) 交流杆塔；(b) 直流杆塔

站的造价要高于普通变电站。在某一特定输电距离，建造直流输电线路及相应换流站与建造交流输电线路及相应变电站所需的费用是等价的，这一距离称为等价距离。超过等价距离使用直流输电可以降低工程造价，反之则使用交流输电造价较低。因此，直流输电比较适合远距离送电。

通过直流输电，两端交流系统可以实现非同步联网，不受稳定性限制；直流负荷可以实现迅速调节；直流线路短路电流较小；两端交流系统通过直流线路互联后，短路容量改变很小。因此，直流输电比较适合大容量送电。

我国的能源分布形势是西部水电、煤电资源丰富，电力需求量少；东部电力资源匮乏，电力缺口大。鉴于此，自 2001 年开始，“西电东送”工程蓬勃发展起来，高压直流输电在“西电东送”中发挥了很大的作用。

## 第二节 高压直流输电系统结构原理

高压直流输电系统可以分为两端直流输电系统、多端直流输电系统两种类型。高压直流输电系统一般由送端交流系统、换流站、直流输电线路、受端交流系统组成。

### 一、两端直流输电系统

两端直流输电系统由两个换流站以及连接换流站之间的高压直流线路组成，与交流系统有两个连接端口，可分为单极系统、双极系统以及背靠背直流系统三种类型。

## 1. 单极系统

单极系统的接线方式有单极大地（海水）、单极金属两种分别如图 1-2、图 1-3 所示。

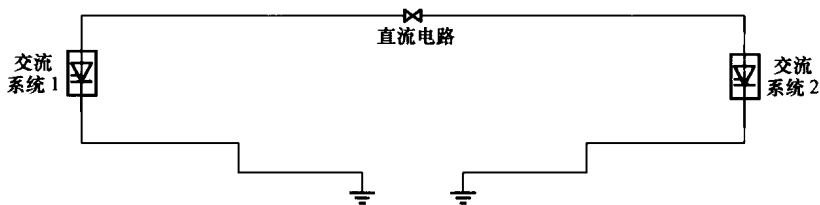


图 1-2 单极大地（海水）接线方式

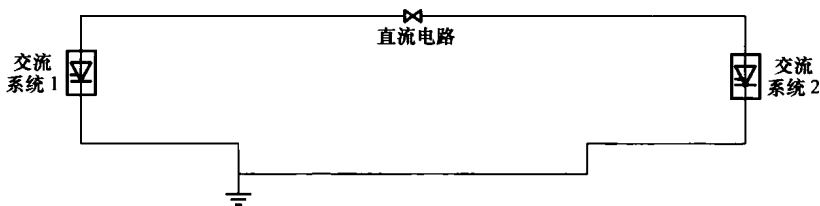


图 1-3 单极金属接线方式

## 2. 双极系统

双极系统的接线方式有三种类型，即双极两端中性点接线方式、双极一端中性点接线方式和双极金属中线方式，如图 1-4~图 1-6 所示。

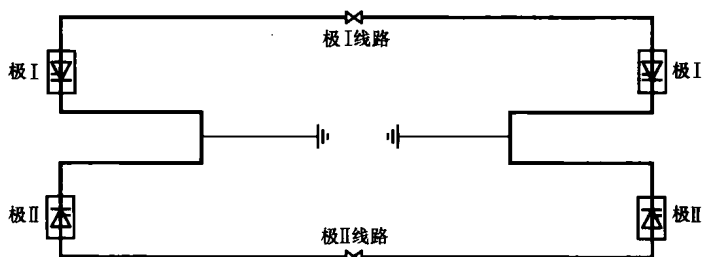


图 1-4 双极两端中性点接地方式

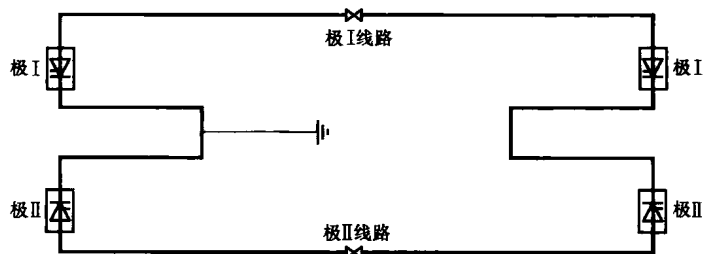


图 1-5 双极一端中性点接地方式

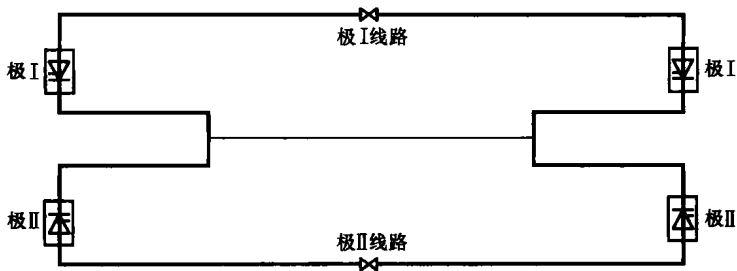


图 1-6 双极金属中线方式

双极系统一极不可用时，可以作为单极系统运行，此时单极大地、单极金属回线方式可以根据需要相互转换。

双极系统可靠性好，灵活性高，因此在工程实际中获得较多应用，本书主要介绍双极系统。

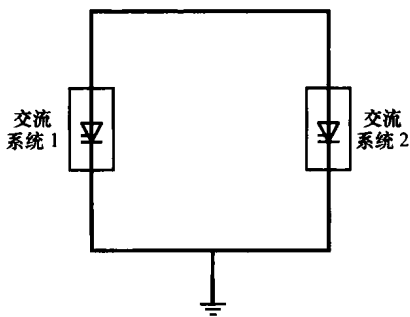


图 1-7 背靠背直流系统

### 3. 背靠背直流系统

背靠背直流系统的整流站和逆变站装设在一个站内，没有通常意义上的直流线路，如图 1-7 所示。其主要用于不同频率电网之间的联网和送电，因此也称为变频站。

## 二、多端直流输电系统

多端直流输电系统由两个以上的换流站以及连接换流之间的高压直流线路组成，与交流系统有两个以上的连接端口。由于其控制保护系统较为复杂，运行操作风险较高，该种类型的直流输电系统在我国目前没有实际应用。

## 三、换流站

换流站分为整流站、逆变站两种。换流站由换流器、换流变压器、平波电抗器、交流场开关设备、交流滤波器及无功补偿设备、直流滤波器、光 TA、光 TV、保护及安全自动装置、接地极、辅助系统等组成。

(1) 换流器。换流站装有换流器，换流器可以实现交直流的相互转换，将交流电整流为直流电的换流站称为整流站；将直流电逆变为交流电的换流站称为逆变站。整流站和逆变站可以相互转换。换流器的基本组成单位是晶闸管。

(2) 换流变压器。换流变压器与换流器组合在一起，共同实现交直流的相互转换。换流变压器可以为两个串联的 6 脉动换流器提供  $30^\circ$  相角差，形成 12

脉动换流器结构；还可以提供换相阻抗，避免换流器损坏。

(3) 交流滤波器及无功补偿设备。换流器在实现交直流转换的过程中，需要从交流系统吸收大量的无功，交流滤波器及无功补偿设备可以供给换流站所需的无功，交流滤波器还可以滤除有害的谐波。

(4) 直流滤波器。直流滤波器与平波电抗器构成滤波回路，用于滤除直流中的谐波电压产生的谐波电流。

(5) 光 TA：用于采集换流站一次直流设备中的电流量。

(6) 光 TV：用于采集换流站一次设备中的电压量。

(7) 保护及安全自动装置。用于实现直流的相关控制，及设备故障及时动作，保护一、二次设备，降低经济损失。

(8) 接地极。接地极是 HVDC 系统不可缺少的一部分，它是高压直流系统电流回路的组成部分（单极金属回线方式除外），也是系统电位的基准点。由直流换流站至接地极本体的线路称为接地极线路。根据直流系统的输送容量和直流换流站附近地质条件不同，接地极选址远近不一样，接地极线路长度相应也不相同。

高压直流输电系统接地极通常使用大地或者海水作为载体，大多数直流联络线设计采用大地作为中性导线。与大地相连接的导体需要有较大的表面积，以便使电流密度和表面电压梯度最小，这个导体被称为电极。如果必须限制流经大地的电流，可以用金属性回路导体作为直流线路的一部分。

(9) 辅助系统。换流站的辅助系统包括阀冷却系统、阀冷却控制保护系统、站用交流系统、站用直流系统、UPS 系统、消防系统、换流站安全监视系统（CCTV）、中央空调系统等。

### 第三节 中国南方电网

#### 一、中国南方电网概况

中国南方电网覆盖五省区，面积 100 万 km<sup>2</sup>，供电总人口 2.3 亿人，占全国总人口的 17.8%；2010 年 GDP 总量 68 841 亿元，占全国 GDP 总量的 17.3%；2010 年全社会用电最高负荷 11 250 万 kW，全社会用电量 7093 亿 kWh。

中国南方电网东西跨度近 2000km，网内拥有水、煤、核、抽水蓄能、油、气、风力等多种电源，截至 2010 年底，全网总装机容量 1.7 亿 kW，220kV 及以上变电容量 3.6 亿 kVA、输电线路总长度 8.4 万 km。目前西电东

送已经形成“八交五直”13条500kV及以上大通道，每条都在1000km及以上，最大输电能力达到2415万kW。

中国南方电网远距离、大容量、超高压输电，交直流混合运行，既有电触发直流技术，又有光触发、可控串补、超导电缆等世界顶尖技术。南方电网是国内结构最复杂、联系最紧密、科技含量最高的电网，也是“西电东送”规模最大、效益最好、发展后劲最强的电网。中国南方电网是国内率先“走出去”的电网。

“八交五直”中，八交指500kV天广交流一~四回，500kV贵广交流一~四回，五直指天广直流、高肇直流、兴安直流、三广直流、云广直流。

## 二、中国南方电网所辖直流工程

### 1. 天广直流工程

天广直流输电工程西起贵州天生桥，东至广州北郊，电压等级±500kV，双极额定容量180万kW，线路全长980km。天生桥换流站接地极线路长约53km。该工程于1998年4月16日开工，2000年12月底单极投产，2001年6月26日双极投产。整流站为天生桥换流站，位于广西壮族自治区隆林县天生桥镇，距天生桥一级水电站大坝3km，离天生桥二级水电站大坝9.6km。逆变站为广州北郊换流站，位于广州市白云区蚌湖镇，直流线路全长960km。天广直流建成后，南方电网成为我国第一个交直流并列输电系统。西南水力资源丰富的广西、贵州和云南三省的电力，通过天广直流和已投运的天广两回交流输送到广东负荷中心，对实现西电东送大战略，提高天广走廊输送能力和加强南方电网的稳定性都将发挥重要作用。

### 2. 三广直流工程

三广直流输电工程2002年4月动工，2003年12月实现单极投运，2004年4月实现双极投运，实际建设比三常直流输电工程缩短了10个月，创造了大型超高压直流输电工程建设史上工期最短的纪录。该工程北起三峡，途经湖北、湖南、广东三省，跨越长江、湘江、资水、沅水、澧水，南至广东惠州，直流输电线路长达940km。该工程具有规模大、系统复杂、技术先进、可靠性高等特点，在国产化方面有很大提高，实现了成套设计技术的转让和消化，自主完成了功能规范书的编制，换流阀实现了国内组装，可控硅晶闸管原件国产化率达到50%，其他主要直流设备的国产化率也达到30%，为中国全面实现直流输电技术国产化奠定了良好的基础。

### 3. 高肇直流工程

高肇直流输电工程（贵广Ⅰ回直流）西起贵州安顺高坡换流站，东至广东

肇庆换流站，电压等级±500kV，输电容量为300万kW。2004年9月24日贵广直流系统双极建成投入运行，与贵广Ⅰ、Ⅱ回交流线路构成南网第二个交直流并联系统。

#### 4. 兴安直流工程

兴安直流输电工程（贵广Ⅱ回直流）西起贵州兴仁换流站，东至深圳宝安换流站，电压等级±500kV，输电容量为300万kW，输电线路1194.08km，兴仁换流站接地极线路76.745km。兴安直流是“十一五”黔电送粤交直流输变电工程的重要组成部分，是实现南方电网公司“十一五”期间贵州电网在“十五”送广东4000MW基础上再增加送电4000MW西电东送容量规划的关键。在直流输电设备采购和国产化方面，认真贯彻以我为主、联合设计、自主生产、全面实现直流系统设计、换流站设备成套设计和直流工程设计自主化和设备制造自主化，国产化率达到70%。该工程于2007年6月21日极2系统调试结束投入运行，2007年12月22日双极投运。

#### 5. 云广特高压直流工程

云广特高压直流工程是世界上第一个±800kV直流输电工程，于2006年12月19日开工建设，这是我国电网建设史上一个里程碑，在世界电力工程史上也是一个重大突破。该工程是南方电网“十一五”“西电东送”的主要输电通道，汇集云南小湾、金安桥等水电站的电力输送广东。工程西起云南楚雄州禄丰县，东至广州增城市，线路全长1438km，额定输电电压±800kV，额定输送容量500万kW。2009年12月28日单极投产，2010年6月18日双极投产。

#### 6. “两渡”直流工程

“两渡”直流工程，指的是南方电网公司云南普洱至广东江门±800kV直流输电工程，以及溪洛渡右岸电站送电广东双回±500kV直流输电工程，两个工程分别简称为糯扎渡直流工程和溪洛渡直流工程。因为工程规模庞大，意义非凡，两个工程均被国家发展和改革委员会（简称发改委）确定为“十二五”期间国家重点工程。

根据“十二五”“西电东送”框架协议，中国南方电网“十二五”期间“西电东送”新增输电能力1700万kW，其中“两渡”直流工程就达到1140万kW。溪洛渡直流工程在世界上首次采用了“两站合一”的方式建设换流站，而且也是中国南方电网首次以同塔双回的方式架设±500kV输电线路。

在工程规模上，糯扎渡直流工程起于云南普洱换流站，止于广东江门换流站，线路全长1451km，额定输送容量500万kW，动态投资159亿元；溪洛



渡直流工程起于云南昭通换流站，止于广东从化换流站，线路全长  $2 \times 1286\text{km}$ ，额定输送容量 640 万 kW，动态投资 171 亿元。

### 思考

1. 什么是交直流输电的等价距离？
2. 两端直流输电系统与多端直流输电系统的区别？
3. 双极系统有哪三种接线方式？
4. 何谓“八交五直”？