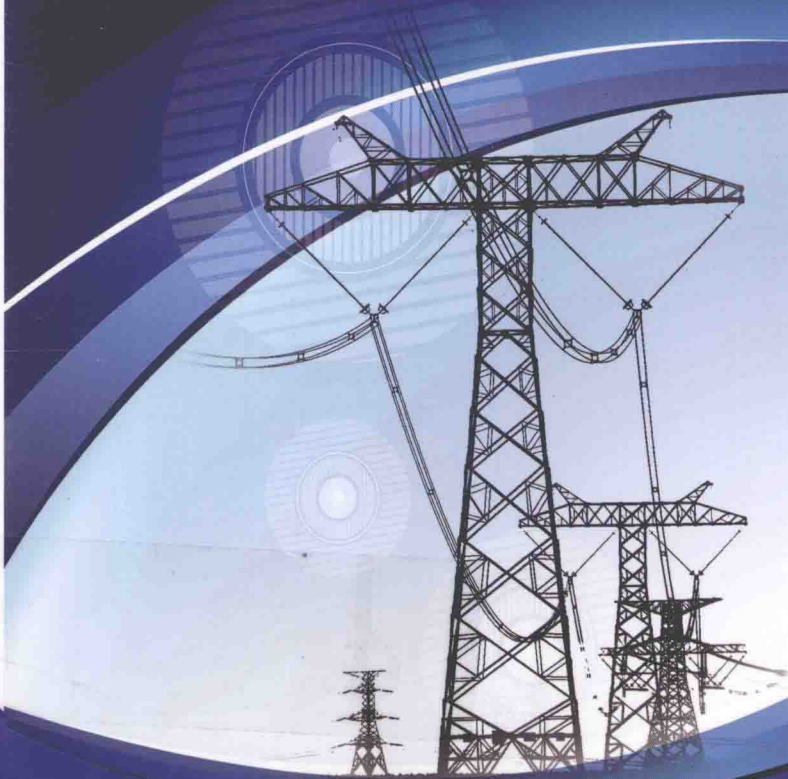


±660kV ZHILIUSHUDIANXIANLU  
DAIDIANZUOYE JISHU

# ±660kV直流输电线路 带电作业技术

卢刚 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

±660kV ZHILIUSHU DIANXIAN LU  
DAIDIANZUOYE JISHU

# ±660kV 直流输电线路 带电作业技术

---

卢 刚 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内容提要 ◀

本书主要介绍了±660kV 直流输电线路带电作业技术，主要包括带电作业基本原理、±660kV 直流带电作业特点及难点、±660kV 直流带电作业研究、±660kV 直流输电线路带电作业项目及作业指导书、±660kV 直流输电线路带电作业工具等。

本书内容理论联系实际，既可供电力系统从事运行维护和管理的相关人员使用，也可供高等院校相关专业师生阅读参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

±660kV 直流输电线路带电作业技术/卢刚主编. —北京: 中国电力出版社, 2013. 4

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4311 - 5

I. ①6… II. ①卢… III. ①高压输电线路—直流输电线路—带电作业 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 071064 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 5 月第一版 2013 年 5 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 10.625 印张 184 千字 4 插页

印数 0001—3000 册 定价 35.00 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

## 编 委 会

主 编 卢 刚

副主编 刘洪正

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 编 委 | 李 龙 | 王振河 | 雍 军 | 乔耀华 | 孟海磊 |
|     | 段建军 | 张天河 | 刘 凯 | 肖 宾 | 郑连勇 |
|     | 韩正新 | 刘兴君 | 毕 成 | 毕 斌 | 贾明亮 |
|     | 李冰冰 | 王玉华 | 马玮杰 | 孟令国 | 付以贤 |
|     | 周 洋 | 张 民 | 王洪川 | 李晓毅 | 王 进 |

2011年的10月17日,山东电力集团公司检修公司成功完成了世界首次“ $\pm 660\text{kV}$ 直流输电线路带电作业”,中央电视台现场直播了作业全过程,人民日报、科技日报等国家主流媒体和许多地方媒体同期进行了报道,引起了社会各界和业内同行的高度关注,全国带电作业技术标准化委员会也发电表示了祝贺。

为促进带电作业技术的交流和推广,山东电力集团公司检修公司结合 $\pm 660\text{kV}$ 直流线路带电作业的研究成果和现场应用经验,组织编写了《 $\pm 660\text{kV}$ 直流输电线路带电作业技术》一书。

为确保电网持续可靠供电,需对电气设备开展不停电检修,带电作业是作业人员直接接触带电体或通过绝缘工具开展设备检修、检测或带电更换的专项作业技术。带电作业在中国已有五十多年的发展历史,从20世纪50年代初开始探索性实践研究,1953~1957年试验成功33、66kV带电作业方法及专用工具,1957年在220kV高压线路上开展了带电检修,1958年又进一步研究等电位作业的技术问题,并成功在220kV线路上首次进行了等电位作业。随后,带电作业在全国得到了广泛的推广应用。1979年,我国开始建设500kV输变电工程,相关单位对500kV电压等级的带电作业开展了大量研究并成功应用于线路检修,目前已实现常态化作业。进入21世纪后,我国带电作业人员又相继开展了紧凑型、同塔多回、交流750kV、交流特高压和直流超/特高压带电作业技术的研究。五十多年来,我国带电作业人员自主创新,走出了一条来源于生产实践,经过不断研究、试验、改进、提高又应用于生产实践的带电作业发展之路,这一切,对确保带电作业安全、促进带电作业发展起到了积极推动作用。

$\pm 660\text{kV}$ 银东直流输电系统西起宁夏银川东换流站,东至山东胶

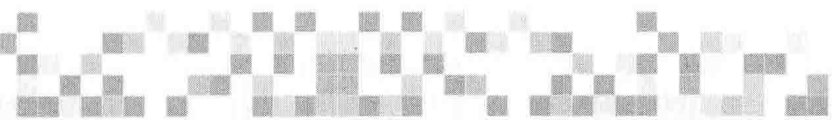
东换流站，线路全长 1333km，途经宁夏、陕西、山西、河北、山东等五省区，是我国西电东送的重要通道之一。该工程将西北地区的清洁水电送往山东，有效缓解了山东省用电紧张难题。±660kV 银东直流输电系统是世界上首次采用±660kV 电压等级，采用了多项新技术、新设备，拥有完全自主知识产权。输电线路采用  $4 \times 1000\text{mm}^2$  大截面导线，额定输送功率 400 万 kW，作为大功率输电线路，停电检修将对山东电网产生较大影响，因此带电作业意义尤为突出。根据国家电网公司安排，山东电力集团公司检修公司与国网电力科学研究院等联合开展了“±660kV 直流输电线路带电作业方式研究及带电作业工具研制”项目的研究，取得了关键技术的重大突破并成功应用于工程实际。

《±660kV 直流输电线路带电作业技术》一书，内容涵盖了±660kV 直流输电线路带电作业安全距离的研究、安全防护的研究、作业工器具的研制、作业项目及操作规程的编制等。该书凝聚了参与研究全体技术人员和应用操作人员的辛勤劳动和智慧，是带电作业技术人员和输电线路运行管理人员的一本重要的参考书。

全国带电作业技术标准化委员会主任委员



2013 年 3 月 28 日



# 前言

2010年11月28日,±660kV银东直流输电正式投入商业运行。±660kV银东直流输电工程是世界上第一个±660kV电压等级的直流输电工程,是国家“西电东送”战略的重点工程,是山东省实施“外电入鲁”战略的标志性工程。该工程的建成,实现了宁夏东部煤炭基地的火电、黄河上游的水电“打捆”外送,是国家电网公司继1000kV特高压交流和±800kV特高压直流工程之后取得的又一重大成果。该工程投运后,输电能力达400万kW。

±660kV银东直流输电工程在世界上首次采用了±660kV电压等级、1000mm<sup>2</sup>截面的导线等诸多新技术,常规带电作业工具无法在±660kV直流输电线路应用。基于上述考虑,本书在力求保证完整的理论性和系统性的同时,尽可能多地介绍±660kV直流线路特殊带电作业安全距离、操作导则和带电作业工具等。目的在于为从事带电作业的人们提供参考和借鉴,推动±660kV及其他电压等级直流输电线路带电作业工作。

本书由卢刚、刘洪正组织编写,并负责书稿的统稿及校核工作。具体分工如下:第一章由李龙、雍军、张天河、李冰冰、毕斌、孟令国编写,介绍银东直流输电工程概况、带电作业及发展史、带电作业基本原理及±660kV直流带电作业特点及难点;第二章由王振河、孟海磊、刘凯、肖宾、付以贤、王玉华、韩正新编写,介绍±660kV直流带电作业研究;第三章由乔耀华、郑连勇、贾明亮、王进编写,介绍±660kV直流输电线路带电作业项目及作业指导书;第四章由段建军、刘兴君、马玮杰、李晓毅编写,介绍±660kV直流输电线路带电作业工具;附录由毕晟、周洋、张民、王洪川编写,介绍±660kV银东直流输电带电作业开展情况及带电作业指导书。在此,感谢全国带电作业技术标准化委员会秘书长、中国电力科学研究院易辉教授级高级工程师在本书成文过程中给予的帮助和指导。同时在本书的编写过程中,参考了有关资料、文献,对资料和文献的作者表示感谢。

由于编者水平有限,在本书编写过程中,难免会出现一些不当和错漏,诚盼读者指正。

编者

2013年4月

序  
前言

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| <b>第一章 概论</b>                                           | 1   |
| 第一节 $\pm 660\text{kV}$ 银东直流输电工程概况 .....                 | 1   |
| 第二节 带电作业及其发展史 .....                                     | 13  |
| 第三节 带电作业基本原理 .....                                      | 19  |
| 第四节 $\pm 660\text{kV}$ 直流带电作业特点及难点 .....                | 44  |
| <b>第二章 <math>\pm 660\text{kV}</math> 直流带电作业研究</b>       | 49  |
| 第一节 带电作业安全距离及检修方式研究 .....                               | 49  |
| 第二节 $\pm 660\text{kV}$ 直流输电线路带电作业安全防护 .....             | 66  |
| <b>第三章 <math>\pm 660\text{kV}</math> 直流带电作业项目及作业指导书</b> | 91  |
| 第一节 直线塔带电作业项目 .....                                     | 91  |
| 第二节 耐张塔带电作业项目 .....                                     | 105 |
| 第三节 地电位带电作业项目 .....                                     | 111 |
| <b>第四章 <math>\pm 660\text{kV}</math> 直流线路带电作业工具</b>     | 117 |
| 第一节 带电作业工具常用材料 .....                                    | 117 |
| 第二节 $\pm 660\text{kV}$ 直流线路带电作业工器具研制 .....              | 130 |
| 第三节 工具试验及保管 .....                                       | 143 |



附录 A 士660kV 银东直流输电带电作业

146

参考文献 ..... 159

# 概 论

## 第一节 $\pm 660\text{kV}$ 银东直流输电工程概况

### 一、工程建设的必要性

我国西北地区能源丰富,水电调节性能优越,但经济发展相对落后,用电水平低且增长缓慢,且用电结构单一,造成了西北电网水电资源利用率较低、调峰资源大量闲置的现象。华北地区经济发展较快,用电需求较大,但华北电网资源结构单一,几乎是纯火电系统,系统调峰手段有限,火电深度调峰经济性又差。因此,作为相互毗邻,同处我国北部的两大电网,无论从资源优化配置、水火电互补运行看,还是从西部大开发、西电东送的能源流向看,西北电网和华北电网的联网运行都是必要的。

华北的山东电网位于我国电网的东部末端,是华北地区经济发达地区之一,同时是煤炭资源供不应求的省份,随着山东经济的快速发展,煤炭净调入呈逐年增加趋势。2004年山东省煤炭净调入量为3816万t标煤,2006年煤炭净调入量超过10000万t标煤,占到煤炭消费总量的50%左右。根据《“十一五”及2015年山东省能源发展战略规划纲要》,“十一五”期间,山东省原煤产量将稳定在15000万t左右,能源产量远不能满足需要。充分利用我国西部地区丰富资源优势,转变一次能源为电力,向山东负荷中心输电,对于满足山东省经济发展对电力的需求,调节能源结构,减轻一次能源运输压力,加强环境保护,实现经济可持续发展具有十分重要的意义。

开发西北电力东送华北是西部大开发战略的重要环节,电力外送是西部地区的支柱产业之一,对于促进西部地区的社会经济发展将会发挥极其重要的作用。西北电网与华北电网联网工程也是构建国家电网骨干网架的重要组成部分,符合全国联网的总体格局和规划目标,是西北地区西电东送的重要输电通道项目。据初步推算,山东接纳西北宁东来电后,每年可节省煤炭消耗792万t标准煤,折合原煤1120万t,使全省万元GDP能耗下降1.8%。按高效脱硫大机组排放水

平测算,可使得二氧化硫排放量降低约 1.1%。

根据电力系统扩大联网的理论,由于被联网的两端系统负荷性、电源结构及其调节特性的差异,西北华北电网联网后联合系统将获得包括社会效益、经济效益在内的多种联网效益。

(1) 西北电网 4000MW 水、火电打捆送电,其中水电容量 2000MW,可参与山东电网高峰负荷时的平衡,替代山东电网部分调峰能源,具有一定的水电容量效益,水火电比例取 1:1 也是合适的。

(2) 西北电网水火电打捆 4000MW 装机向华北山东电网送电,可获得一定的送电量效益。

(3) 西北电网年最大负荷一般出现在 11 月,而山东电网年最大负荷一般在 8 月和 12 月,由于负荷特性不同及高峰负荷存在时差,银东直流输电工程将获得一定的错峰效益。

(4) 作为电源结构、负荷特性水平均有不同的送受端电网,其联网之后通过统一调度运行、检修安排,将获得一般大系统之间联网可获得的互为备用和紧急事故支援等效益。

目前国际上普遍采用的根据具体输电工程确定直流输电电压等级,通过现有的 $\pm 500\text{kV}$ 和 $\pm 800\text{kV}$ 两个电压等级进行组合匹配获得的质量输电容量方案有限,建立直流电压等级序列,形成级差合理的多个电压等级,可以获得多种不同的输电容量组合,可涵盖 3000~10 000MW。针对不同的直流输电工程可以得到更加准确、合理的容量匹配结果,使得工程在电压等级选择时具有更强适应性。同时通过直流电压等级序列的建立,实现工程标准化和系列化的有机结合,避免直流输电电压等级和设备型式过多导致的重复研究,降低研发费用,通过直流工程的通用设计和设备的标准化制作,有助于实现设备标准备品备件管理,有利于直流工程的运行维护,提高直流运行可靠性,降低运行费用,形成规模效益。

在我国直流输电工程中,有多个工程的输电距离为 1000~1500km,当采用 $\pm 500\text{kV}$ 电压等级进行直流输电时,输电距离较远,损耗相对较大,经济性偏差。当采用 $\pm 800\text{kV}$ 电压等级进行直流输电时,工程单位造价相对较高。在 $\pm 500\text{kV}$ 和 $\pm 800\text{kV}$ 两个电压等级之间引入 $\pm 660\text{kV}$ 电压等级,可以获得较好的适应性。从技术上看, $\pm 660\text{kV}$ 输电技术在国际上已经得到应用,系统设计和关键技术相对成熟;从电压等级看, $\pm 660\text{kV}$ 处于 $\pm 500\text{kV}$ 和 $\pm 800\text{kV}$ 的中间点附近,与交流电压序列的确定基本一致,符合直流电压序列合理电压级差的要求;从电流看,选择 5in 晶闸管、额定电流 3000A 时,可以直接采用 $\pm 500\text{kV}$ 的

成熟设计,技术上不存在很大困难,有利于推动我国直流输电的国产化进程;从输送容量看,±660kV 输送容量约为 4000MW,输送容量比±500kV 提高了 30%,可较好地与交流电网衔接,并且直流电压的提高有助于降低输电损耗,延长经济输电距离,工程经济性较好,是较为合理的技术升级方案。

## 二、工程简介

2010 年 11 月 28 日 19 时 12 分,±660kV 银东线极 I 系统正式投入商业运行;2011 年 2 月 28 日,极 II 线路投入运行,3 月 25 日正式带负荷运行。

### 1. 银川东换流站

银川东换流站位于银川市灵武市临河镇,与已投产的 750kV 银川东变电站同址建设,全站总建筑面积 22 393m<sup>2</sup>。额定输送容量 4000MW,换流变压器 14 台,每台容量 400MVA,低压电抗器 2×90Mvar,直流开关场主接线采用双极典型直流接线,换流阀组接线采用双极、每极 1 组 12 脉动换流器的接线方式。换流变压器侧直流在站内接入 750kV 银川东变电站,750kV 出线远景 10 回、本期 6 回,220kV 出线远景 13 回、本期 7 回。

### 2. 胶东换流站

胶东换流站位于青岛市胶州市胶西镇,与青岛 500kV 变电站同址建设,全站总建筑面积 12 508m<sup>2</sup>。额定输送容量 4000MW,换流变压器 14 台,每台容量 386.4MVA,直流开关场主接线采用双极典型直流接线,换流阀组接线采用双极、每极 1 组 12 脉动换流器的接线方式。换流变压器侧直流在站内接入 500kV 胶东变电站,500kV 出线远景 6 回、本期 5 回、220kV 出线远景 14 回、本期 8 回。

### 3. 直流线路

±660kV 银东直流输电线路起于宁东回族自治区灵武市境内的银川东换流站,止于山东省青岛胶东换流站,线路总长 1333km,共有铁塔 2807 基,其中耐张塔 414 基,直线塔 2393 基,全线基础混凝土用量 187 677m<sup>3</sup>。

### 4. 接地极线路

银川东换流站接地极线路起点为银川东换流站,途经灵武市、盐池县,终点为盐池县高沙窝镇的红柳沟接地极极址,线路全长 63.93km,共有铁塔 160 基,其中共塔段 80 基,新建段直线塔 68 基,耐张塔 12 基。银川东换流站接地极为双圆形水平浅埋沟型,设计运行年限 40 年。

胶东换流站接地极线路起点为胶东换流站,途经胶州市、诸城市,终点为峡山水库南部的诸城接地极极址,线路全长 46.879km,共有铁塔 144 基,其中直

线塔 125 基，耐张塔 19 基。胶东换流站接地极为双圆形水平浅埋沟型，设计运行年限 40 年。

#### 5. 配套光通信工程

配套光通信工程共设光通信站 8 个，其中光纤中继站 6 个，沿直流线路架设 1 根 OPGW 光缆，长度为 1401.8km。

#### 6. 设计参数

设计风速取值为离地 10m 高、50 年一遇、10min 平均最大风速，即设计基准风速取 27、30、32m/s 三种。设计覆冰有 10mm 轻冰和 15mm 中冰两种冰区。

系统标称电压：±660kV；

最高运行电压：±680kV；

额定输送容量：4000MW；

极导线电流：3000A；

最大负荷利用小时数：5000、5500h。

(1) 导线。导线采用 4×JL/G3A-1000/45-72/7 型钢芯铝绞线，分裂间距 500mm。JL/G3A-1000/45-72/7 导线参数见表 1-1。

表 1-1 JL/G3A-1000/45-72/7 导线参数表

| 项目                            |         | 参数                                  |
|-------------------------------|---------|-------------------------------------|
| 结构<br>[股数×直径 (mm)]            | 铝 (铝合金) | 72×4.21                             |
|                               | 钢       | 7×2.8                               |
| 截面 (mm <sup>2</sup> )         | 铝 (铝合金) | 1002.28                             |
|                               | 钢       | 43.10                               |
|                               | 总截面     | 1045.38                             |
| 外径 (mm)                       |         | 42.08                               |
| 计算质量 (kg/m)                   |         | 3.14                                |
| 拉断力 (kN)                      |         | 226.15                              |
| 弹性模量 (MPa)                    |         | 60.6                                |
| 线膨胀系数×10 <sup>-6</sup> (1/°C) |         | 21.5                                |
| 20°C 直流电阻 (Ω/km)              |         | 0.028 62                            |
| 最大使用应力 (N/mm <sup>2</sup> )   |         | 75.9~76.1 (10mm 冰区)/82.2 (15mm 冰区)  |
| 安全系数                          |         | 2.7 (10mm 冰区)/2.5 (15mm 冰区)         |
| 年平均应力 (N/mm <sup>2</sup> )    |         | 51.3 (10mm 冰区)/46.8~47.2 (15mm 冰区)  |
| 年平均应力百分比                      |         | 25% (10mm 冰区)/22.8%~23.0% (15mm 冰区) |

(2) 地线。一根采用 JLB20A-150 铝包钢绞线, 另一根采用 OPGW-150 光缆, JLB20A-150-19 地线参数见表 1-2。

表 1-2 JLB20A-150-19 地线参数表

| 项目                            | 参数                                              |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|
| 结构 [股数×直径 (mm)]               | 19×3.15                                         |
| 截面 (mm <sup>2</sup> )         | 148.05                                          |
| 外径 (mm)                       | 15.75                                           |
| 计算质量 (kg/m)                   | 0.9894                                          |
| 拉断力 (kN)                      | 178.57                                          |
| 弹性模量 (MPa)                    | 147 200                                         |
| 线膨胀系数×10 <sup>-6</sup> (1/°C) | 13.0                                            |
| 20°C 直流电阻 (Ω/km)              | 0.5807                                          |
| 最大使用应力 (N/mm <sup>2</sup> )   | 302 (10mm 冰区)/347 (15mm 冰区)                     |
| 安全系数                          | 4.0 (10mm 冰区)/3.47 (15mm 冰区)                    |
| 年平均应力 (N/mm <sup>2</sup> )    | 144.8~164.9 (10mm 冰区)/<br>130.0~154.7 (15mm 冰区) |
| 年平均应力百分比                      | 12.0%~13.6% (10mm 冰区)/<br>10.8%~12.8% (15mm 冰区) |

(3) 绝缘子串。该线路直线塔均采用复合绝缘子, 串型为单、双联 210、300kN 和 400kN 合成 V 型悬垂绝缘子串。导线耐张串采用双联 550kN 盘式或长棒型瓷绝缘子, 进龙门架松弛档采用双联 160kN 盘式瓷绝缘子。跳线采用笼式硬跳线, 跳线串采用 160kN 双 V 型悬垂绝缘子串。线路采用的各种绝缘子参数见表 1-3~表 1-5。

表 1-3 盘型绝缘子主要参数一览表

| 绝缘子代号                   | U550BP/240H | U160BP/170T |
|-------------------------|-------------|-------------|
| 盘径 $D$ (mm)             | 380         | 360         |
| 公称结构高度 $H$ (mm)         | 240         | 170         |
| 公称爬电距离 $L$ (mm)         | 635         | 545         |
| 连接标记                    | 32          | 20          |
| 规定机电 (械) 破坏负荷 (kN)      | 550         | 160         |
| 逐个拉伸试验负荷 (kN)           | 275         | 80          |
| 正极性直流 1min 湿耐受电压 (kV)   | 60          | 55          |
| 雷电冲击耐受电压 (kV)           | 150         | 140         |
| 正、负极性直流 1min 干耐受电压 (kV) | 150         | 140         |
| 瓷劣化率/自爆率 (%)            | 0.01        | 0.01        |

表 1-4

长棒型瓷绝缘子主要参数一览表

| 绝缘子型号              | LG125/20+19/1730 |
|--------------------|------------------|
| 额定机械破坏负荷 (kN)      | 550              |
| 逐个拉伸试验负荷 (kN)      | 440              |
| 最小电弧距离 (mm)        | 1362             |
| 最小公称爬电距离 (mm)      | 5625             |
| 直流 1min 湿耐受电压 (kV) | 165              |
| 雷电冲击耐受电压 (kV)      | 750              |
| 结构高度 (mm)          | 1730             |
| 杆径 (mm)            | φ125             |
| 小伞径 (mm)           | φ239             |
| 大伞径 (mm)           | φ269             |
| 连接标记               | 32L              |
| 单只质量 (kg)          | 129              |

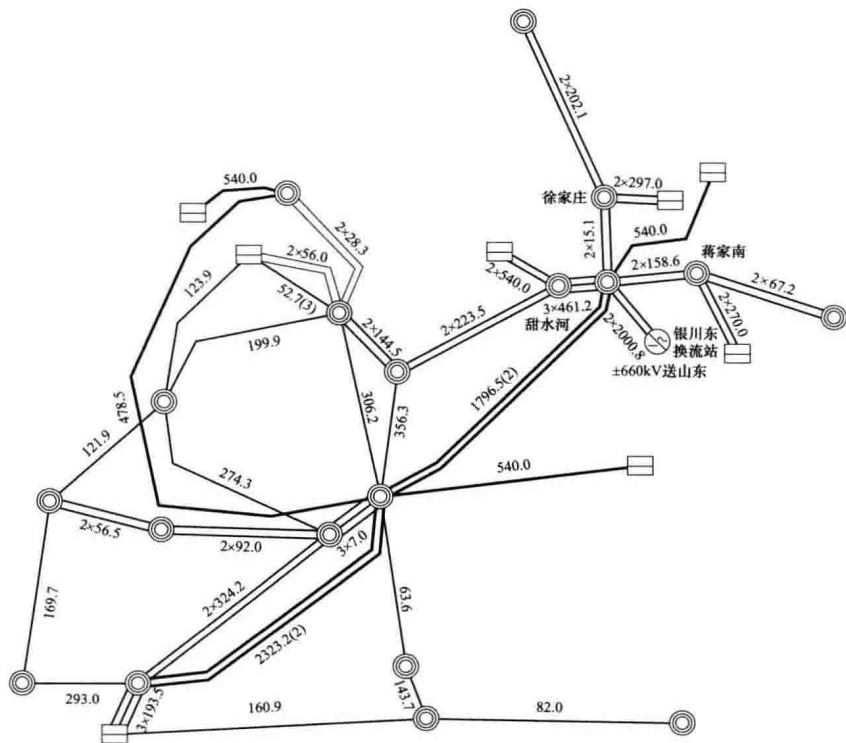
表 1-5

复合绝缘子主要参数一览表

| 绝缘子型号              | FXBW-±660/160                             | FXBW-±660/210                             | FXBW-±660/300                             | FXBW-±660/400                             |
|--------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 额定电压 (kV)          | ±660                                      | ±660                                      | ±660                                      | ±660                                      |
| 公称结构高度 (mm)        | 9200                                      | 9200                                      | 9200                                      | 9200                                      |
| 绝缘距离 (mm)          | 8654                                      | 8654                                      | 8522                                      | 8467                                      |
| 均压装置间距离 (mm)       | 8504                                      | 8504                                      | 8372                                      | 8317                                      |
| 公称爬电距离 (mm)        | ≥38 400                                   | ≥38 400                                   | ≥38 400                                   | ≥38 400                                   |
| 连接标记               | 20                                        | 20                                        | 24                                        | 28                                        |
| 芯棒直径 (mm)          | 28                                        | 28                                        | 30                                        | 34                                        |
| 额定机械负荷 (kN)        | 160                                       | 210                                       | 300                                       | 400                                       |
| 逐个拉伸试验负荷 (kN)      | 80                                        | 105                                       | 150                                       | 200                                       |
| 湿直流 1min 耐受电压 (kV) | 750                                       | 750                                       | 750                                       | 750                                       |
| 雷电全波冲击耐受电压 (kV)    | 2800                                      | 2800                                      | 2800                                      | 2800                                      |
| 湿操作冲击耐受电压 (kV)     | 1800                                      | 1800                                      | 1800                                      | 1800                                      |
| 可见电晕电压 (kV)        | 750                                       | 750                                       | 750                                       | 750                                       |
| 伞形结构               | 一大两小                                      | 一大两小                                      | 一大两小                                      | 一大一中四小                                    |
| 均压装置材料             | 铝合金                                       | 铝合金                                       | 铝合金                                       | 铝合金                                       |
| 均压装置外径/管径 (mm)     | 高压端小环:<br>φ232/φ32;<br>低压端大环:<br>φ560/φ60 | 高压端小环:<br>φ232/φ32;<br>低压端大环:<br>φ560/φ60 | 高压端小环:<br>φ232/φ32;<br>低压端大环:<br>φ560/φ60 | 高压端小环:<br>φ232/φ32;<br>低压端大环:<br>φ560/φ60 |
| 防鸟害型均压装置 (是/否)     | 是                                         | 是                                         | 是                                         | 是                                         |
| 每只质量 (含均压装置) (kg)  | 76.1                                      | 76.1                                      | 78.9                                      | 84.7                                      |

(5) 基础。基础采用岩石嵌固基础、全掏挖基础、柔性大板基础、岩石锚杆基础、土锚杆基础等型式。

银川东换流站接入西北电网示意图如图 1-1 所示。



◎—变电站；▢—发电厂



胶东换流站接入山东电网示意图如图 1-2 所示。

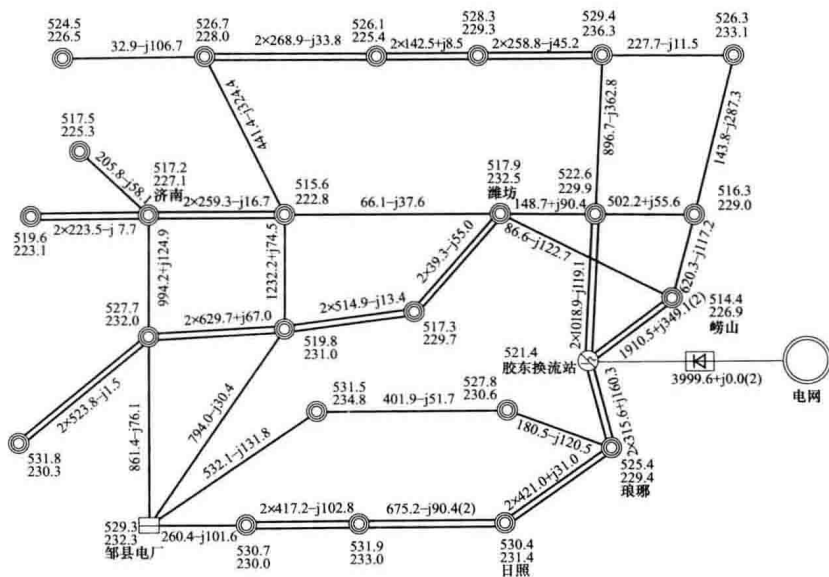


图 1-2 胶东换流站接入山东电网示意图

◎—变电站

换流站交流母线的稳态电压变化范围和换流站交流母线的短路电流水平见表 1-6。

表 1-6 交流系统电压和换流母线短路电流

| 交流系统电压 (kV) |     |     | 换流母线短路电流 (kA) |      |     |      |      |
|-------------|-----|-----|---------------|------|-----|------|------|
| 参数          | 银川东 | 胶东  | 参数            | 水平年  | 银川东 | 水平年  | 胶东   |
| 额定运行电压      | 345 | 515 | 三相最大          | 2020 | 63  | 2020 | 63   |
| 最高稳态电压      | 363 | 525 | 三相最小          | 2020 | 30  | 2020 | 17.5 |
| 最低稳态电压      | 330 | 500 | —             | —    | —   | —    | —    |
| 最高极端电压      | 363 | 550 | —             | —    | —   | —    | —    |
| 最低极端电压      | 315 | 475 | 单相最大          | 2020 | 63  | 2020 | 63   |

换流站双极每极 1 个 12 脉动换流器接线。银川东换流站的直流额定运行电压为  $\pm 660\text{kV}$ ，在功率正送方式下，降压方式除外，传输功率从最小功率至额定功率时，考虑所有可能误差在内的直流运行电压最高不应超过  $680\text{kV}$  [1.03 倍 (标么值)]，定义为平波电抗器出线侧直流极母线与直流中性点间的电压。在规