

# $\pm 1100$ kV 准东—四川特高压直流输电工程主回路参数设计

邓旭<sup>1</sup>, 王东举<sup>1</sup>, 沈扬<sup>2</sup>, 周浩<sup>1</sup>, 陈锡磊<sup>3</sup>, 孙可<sup>4</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310014;

3. 浙江省慈溪市供电局, 浙江 慈溪 315300; 4. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 根据直流输电理论并结合特高压直流输电系统特点设计准东—四川 $\pm 1100$  kV 直流输电工程的主回路参数。给出了换流站换流器等关键设备的基本参数, 换流器的接线方案推荐双 12 脉动换流器串联的接线方案。研究表明: 系统最大直流运行电压为 1112 kV, 最大直流电流为 5.357 kA, 最小直流电流为 0.44 kA; 两端换流站换流变压器的短路阻抗均取为 24%, 整流站和逆变站变压器额定容量分别为 542.11 MV·A 和 521.59 MV·A, 分接头档位分别为 +28/4 和 +20/5; 额定运行工况下, 整流站和逆变站的无功消耗分别为 6916 Mvar 和 6693 Mvar。

**关键词:** 特高压输电; 直流输电; 参数设计; 整流器; 逆变器; 空载直流电压; 无功消耗

**中图分类号:** TM 72

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.023

## 0 引言

由于我国的能源资源和经济逆向分布, 通过远距离、大容量输电将西部大型能源基地的能源向能源匮乏的中东部地区输送已成为一种趋势。特高压直流输电作为一种远距离、大容量输电技术, 是实现我国能源资源优化配置的有效途径<sup>[1-6]</sup>。目前我国已有 2 条  $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程正式投运, 此外还有多条特高压直流工程正在规划建设中<sup>[7-10]</sup>。随着  $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程的顺利开展和实施, 以及为了满足未来更大容量、更远距离的输电需求, 有必要进一步研究更高电压等级的直流输电技术。 $\pm 1100$  kV 直流是我国正在研究的一个全新输电电压等级, 对于提高我国直流输电技术的自主创新能力具有重大意义<sup>[11-16]</sup>。准东—四川特高压直流输电工程计划采用  $\pm 1100$  kV 电压等级, 输送容量达 10 450 MW, 建成后将成为世界上电压等级最高、输送容量最大的直流输电工程, 目前国内外均无设计和实际运行经验可供借鉴。

直流系统主回路参数设计是特高压直流输电工程研究的重要组成部分, 是进一步开展特高压直流输电各项研究的基础<sup>[17-21]</sup>。主回路参数设计的主要内容包括: 换流站主接线及运行方式的确定; 直流系统稳态运行参数的计算, 如直流电压、电流、输送功率以及换流站消耗的无功功率等; 换流器和换流变压器等关键设备的基本参数。这些计算结果将为直流输电系统的深入研究, 如无功功率补偿与控制、换流站的过电压与绝缘配合等提供基础条件。

本文依托准东—四川 $\pm 1100$  kV 特高压直流输电工程, 对该工程的主回路参数进行了设计, 得到了换流器和换流变压器等关键设备的基本参数, 并计算了典型运行工况下两端换流站的无功消耗以及直流系统的稳态运行特性。

## 1 系统基本参数

### 1.1 换流站主接线及运行方式

在我国常规  $\pm 500$  kV 高压直流输电工程中, 换流站主回路接线采用每极 1 个 12 脉动换流器的接线方式, 即单 12 脉动接线。对于  $\pm 800$  kV 特高压直流工程, 由于受系统过电压和换流变压器制造和运输条件的限制, 换流器接线与常规  $\pm 500$  kV 高压直流输电工程不同, 在我国已投运的云南—广东和向家坝—上海  $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程中, 换流站均采用 2 个 12 脉动换流器串联 (400 kV + 400 kV) 的接线方案, 即双 12 脉动接线。根据现有技术条件和制造水平, 特高压直流换流站采用双 12 脉动换流器串联的接线方案已基本成熟。对于  $\pm 1100$  kV 特高压直流输电工程, 电压等级更高、输送容量更大, 换流站换流器的接线方案主要有每极 2 个 12 脉动换流器串联和每极 3 个 12 脉动换流器串联 2 种接线方案, 本文针对每极采用 2 个 12 脉动换流器串联的接线方案进行研究, 每组 12 脉动换流单元的额定电压为 550 kV。

由于每极采用 2 个 12 脉动换流器串联接线, 系统运行方式灵活多样, 有双极和单极等多种运行方式<sup>[18-19]</sup>, 具体主要有: 完整双极平衡运行方式, 每站每极 2 个 12 脉动换流器均串联投入运行; 不完整 (1/2 极) 双极平衡运行方式, 每站每极均投入 1 个 12 脉动换流器; 完整单极大地回路运行方式, 一极停运, 另一极 2 个 12 脉动换流器串联运行, 经大地返回; 不

收稿日期: 2013-01-18; 修回日期: 2013-12-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2011CB-209405)

Project supported by the National Basic Research and Development Program of China (973 Program) (2011CB209405)

完整(1/2 极)单极大地回路运行方式,一极停运,另一极 1 个 12 脉动换流器运行,经大地返回;完整单极金属回路运行方式,一极停运,另一极 2 个 12 脉动换流器串联运行,经金属回线返回;不完整(1/2 极)单极金属回路运行方式,一极停运,另一极 1 个 12 脉动换流器运行,经金属回线返回;不完整双极运行方式,双极中一极 2 个 12 脉动换流器串联运行,另一极只有 1 个 12 脉动换流器运行。其中,直流系统单极金属回线运行方式下,逆变站为接地站。

计算工程主回路参数时需同时考虑以上各种运行方式,在计算系统额定参数时,应以完整双极平衡运行方式且准东换流站作为整流站(即功率输送方向为准东至成都)为基础。

## 1.2 交直流系统基础条件

准东—四川 $\pm 1100$  kV 特高压直流工程双极额定输送功率为 10 450 MW,直流额定运行电压为 $\pm 1100$  kV,直流额定电流为 4.75 kA,送端位于新疆准东煤电基地,受端位于成都,送电距离约为 2 418 km。换流站内平波电抗器按户外干式绝缘考虑,每极平波电抗器电感量按 240 mH 考虑,并采用分置于直流极母线与中性母线(简称平抗分置)的布置方式,各为 120 mH(60 mH+60 mH)。

为方便叙述,下文下标 R 表示整流侧,下标 I 表示逆变侧,下标 N 表示额定,如 $d_{rN}$ 为逆变侧 6 脉动换流器的额定相对阻性压降。

换流站接入交流系统的电压参数为:送端换流站和受端换流站的额定运行电压分别为 770 kV 和 525 kV;送端换流站和受端换流站的最高稳态电压分别为 800 kV 和 550 kV;送端换流站和受端换流站的最低稳态电压分别为 750 kV 和 500 kV;送端换流站和受端换流站的最高极端电压分别为 800 kV 和 550 kV;送端换流站和受端换流站的最低极端电压分别为 713 kV 和 475 kV。

特高压设备在制造中会产生与设计参数间的误差,这些误差确定了系统各运行参数极值,而这些极值是直流系统设计的重要参考依据。根据现阶段特高压设备的研制生产能力,该特高压直流输电工程中采用的控制系统参数、设备制造公差和测量误差如下。

控制系统参数:

a. 额定触发角 $\alpha_N=15^\circ$ ,触发角 $\alpha$ 的稳态波动范围 $\Delta\alpha=\pm 2.5^\circ$ ,最小触发角 $\alpha_{\min}=5^\circ$ ;

b. 额定熄弧角 $\gamma_N=17^\circ$ ;

c. 分接头变化一档对应的整流侧直流电压变化 $\Delta U_d=\pm 1.25\%U_{dN}/2$ ,分接头变化一档对应的整流侧直流电流变化 $\Delta I_d=\pm 0.86\%I_{dN}/2$ ,其中, $U_{dN}$ 为整流侧额定直流电压, $I_{dN}$ 为整流侧额定直流电流。

设备公差和测量误差:

a. 正常直流电压运行范围内换流变压器相对感性压降 $d_x$ 的最大制造公差 $\delta_{dx}$ 为 $-7\%d_{xN}\sim 5\%d_{xN}$ ;

b. 直流电压 $U_d$ 的测量误差 $\delta_{U_{dmax}}=\pm 0.5\%U_{dN}$ ,直流电流 $I_d$ 的测量误差 $\delta_{I_{dmax}}=\pm 0.3\%I_{dN}$ ;

c. 逆变侧熄弧角的测量误差 $\delta_{\gamma I}=\pm 1.0^\circ$ ,整流侧触发角的测量误差 $\delta_{\alpha R}=\pm 0.5^\circ$ ;

d. 电容式分压器电压互感器测量误差 $\delta U_{dio}=\pm 1.0\%U_{dioN}$ 。

## 1.3 直流电压、电流

该工程双极额定直流电压为 $\pm 1100$  kV,额定输送功率为 10 450 MW,额定直流电流为 4.75 kA。考虑到换流变压器分接头档位和电压测量误差,直流电压的误差范围为:

$$\delta U_{dR}=\Delta U_d+\delta U_{dmax} \\ 1100\times(0.00625+0.005)=12.375\text{ (kV)} \quad (1)$$

故考虑误差的最大直流运行电压 $U_{dmax}$ 为:

$$U_{dmax}=1100+12.375=1112.375\text{ (kV)}$$

小于规定的直流电压最大值 1 122 kV。

工程额定直流电流为 4.75 kA,送端换流站的整流器一般作为直流电流的控制端,考虑到在恒功率控制方式下当直流电压低于额定值时,控制系统会发出一个大于额定电流值的直流电流指令,且存在电流测量误差。因此,双极额定运行方式下,最大连续直流电流 $I_{dmax}$ 为:

$$I_{dmax}=I_{dN}+\Delta I_d+\delta I_{dmax} \\ 4.75\times(1+0.0043+0.003)=4.785\text{ (kA)} \quad (2)$$

同理,在输送功率最小,即 $P_{dmin}=1045$  MW(即 0.1 p.u.)时,对应的最小直流电流 $I_{dmin}$ 为:

$$I_{dmin}=4.75\times(0.1-0.0043-0.003)=0.44\text{ (kA)}$$

在 1.1 倍连续过负荷时, $U_{dioR}$ 不应超过其在额定功率时的值,保持整流器触发角、换流器相对感性压降和整流侧空载直流电压为额定值,计算得到 $U_{dR}$ 将下降至 1080.8 kV,故过负荷运行时直流电流为:

$$I_{d,overload}=1.1\times\frac{10450}{2}\times\frac{1}{1080.8}=5.318\text{ (kA)}$$

考虑误差后,过负荷运行时,系统最大直流电流 $I_{dmax,overload}$ 为:

$$I_{dmax,overload}=5.318\times(1.0+0.0043+0.003)=5.357\text{ (kA)}$$

## 2 换流器基本参数设计

### 2.1 换流器直流电压降

特高压直流输电工程中采用 6 英寸晶闸管换流阀,在主回路计算中需考虑各种电阻性损耗和压降。每个 6 脉动换流器的额定相对阻性压降 $d_{rN}$ 定义为:

$$d_{rN}=\frac{P_{cu}}{U_{dioN}I_{dN}}+\frac{2R_{th}I_{dN}}{U_{dioN}} \quad (3)$$

其中,  $P_{cu}$  为换流变压器和平波电抗器在 6 脉动换流器额定运行工况下的负载损耗;  $R_{th}$  为晶闸管上与电流相关的电压降;  $U_{dioN}$  为换流变压器阀侧额定空载直流电压; 因子 2 是由于在 6 脉动换流器中, 总是有 2 个换流阀同时导通。

根据换流阀特性及以往工程经验, 并考虑各种阻性损耗, 换流站的相对阻性压降  $d_r$  和换流阀前向压降  $U_T$  的取值分别为 0.3% 和 0.6 kV。

换流器额定相对感性压降  $d_{xN}$  定义为:

$$d_{xN} = \frac{3}{\pi} \frac{X_l I_{dN}}{U_{dioN}} \quad (4)$$

其中,  $X_l$  为换相电抗, 包括换流变压器漏抗和其他在换相电路中可能影响换相过程的电抗。

换流器额定相对感性压降  $d_{xN}$  与换流变压器短路阻抗  $u_k$  之间的关系如下:

$$d_{xN} \approx \frac{1}{2} u_k + u_{PLC} \quad (5)$$

其中,  $u_{PLC}$  为回路中 PLC 滤波电抗器的相对电压降。

不采用 PLC 滤波器时,  $d_{xN} = \frac{1}{2} u_k$ , 在本工程主回路参数设计时暂不考虑 PLC 滤波器。根据下文 3.1 节给出的换流变压器短路阻抗值, 可得两端换流站的相对感性压降:

$$d_{xNR} = d_{xNI} = 0.12$$

其中,  $d_{xNR}$  和  $d_{xNI}$  分别为整流站和逆变站的额定相对感性压降。

## 2.2 换相角

换相角是指换流器换相过程所经历的时间用相应的相角表示, 是换流器的重要参数之一。整流器换相角  $\mu_R$  的计算公式为:

$$\cos(\alpha + \mu_R) = \cos \alpha - 2d_{xNR} \frac{I_d}{I_{dN}} \frac{U_{dioNR}}{U_{dioR}} \quad (6)$$

逆变器换相角  $\mu_I$  的计算公式为:

$$\cos(\gamma + \mu_I) = \cos \gamma - 2d_{xNI} \frac{I_d}{I_{dN}} \frac{U_{dioNI}}{U_{dioI}} \quad (7)$$

其中,  $U_{dioR}$  和  $U_{dioI}$  分别为整流器和逆变器的理想空载直流电压。额定双极平衡运行方式下, 式(6)、(7)中的  $U_{dioR}$ 、 $U_{dioI}$  和  $I_d$  均为额定值, 故由计算公式可得  $\mu_R = 28.5^\circ$ 、 $\mu_I = 27.2^\circ$ 。

## 2.3 换流变阀侧空载直流电压

由于特高压直流输电工程中采用了双 12 脉动换流器的接线方案, 主回路参数设计中需要确定 6 脉动换流器的空载直流电压, 包括整流站和逆变站的额定空载直流电压、空载直流限值等, 这些参数的计算是确定换流变相关参数的基础, 同时也可以为换流站过电压与绝缘的配合提供依据。

根据直流输电的基本理论可知, 每个 6 脉动换流器两端的直流电压计算公式为:

$$\frac{U_{dR}}{n} = U_{dioR} \left[ \cos \alpha - (d_{xR} + d_{rR}) \frac{I_d}{I_{dN}} \frac{U_{dioNR}}{U_{dioR}} \right] - U_{TR} \quad (8)$$

$$\frac{U_{dI}}{n} = U_{dioI} \left[ \cos \gamma - (d_{xI} - d_{rI}) \frac{I_d}{I_{dN}} \frac{U_{dioNI}}{U_{dioI}} \right] + U_{TI} \quad (9)$$

其中,  $U_{dR}$  和  $U_{dI}$  分别为整流侧和逆变侧双 12 脉动换流器两端的直流电压;  $n$  为每站每极 6 脉动换流器的数量, 在该特高压直流工程中  $n=4$ 。

### 2.3.1 额定空载直流电压

对式(8)、(9)进行变换整理, 可得两端换流站的额定空载直流电压。

整流侧准东换流站的额定空载直流电压为:

$$U_{dioNR} = \frac{U_{dNR}/n + U_{TR}}{\cos \alpha_N - (d_{xNR} + d_{rNR})} = \frac{1100/4 + 0.6}{\cos 15^\circ - (0.12 + 0.003)} = 326.96 \text{ (kV)} \quad (10)$$

逆变侧成都换流站的额定空载直流电压为:

$$U_{dioNI} = \frac{(U_{dNR} - R_{dN} I_{dN})/n - U_{TI}}{\cos \gamma_N - (d_{xNI} - d_{rNI})} = \frac{(1100 - 8.735 \times 4.75)/4 - 0.6}{\cos 17^\circ - (0.12 - 0.003)} = 314.58 \text{ (kV)} \quad (11)$$

其中,  $R_{dN}$  为直流输电线路额定直流电阻。

### 2.3.2 整流站空载直流电压限值

整流站换流变最大空载直流电压  $U_{dioRmax}$  为:

$$U_{dioRmax} = \frac{\frac{U_{dR}}{n} + U_{TR} + (d_{xR} + d_{rR}) \frac{I_d}{I_{dN}} U_{dioNR}}{\cos \alpha} \quad (12)$$

$$n=4$$

$$U_{dR} = U_{dNR} + \Delta U_{dolTC} + \delta U_{dmax} =$$

$$1100 \times (1.0 + 0.00625 + 0.005) = 1112.4 \text{ (kV)}$$

$$d_{xR} = d_{xN} + \delta_{dx} = 0.12 \times (1 + 0.05) = 0.126$$

$$I_d = I_{dN} - \Delta I_{dolTC} + \delta I_{dmax} =$$

$$4.75 \times (1.0 - 0.0043 + 0.003) = 4.744 \text{ (kA)}$$

$$\alpha = \alpha_N - \Delta \alpha = 15^\circ - 2.5^\circ = 12.5^\circ$$

其中,  $\Delta U_{dolTC}$ 、 $\Delta I_{dolTC}$  分别为分接头变化一档对应的直流电压和电流变化。

可得  $U_{dioRmax} = 328.61 \text{ kV}$ 。

将  $U_{dioRmax}$  的值作为分接头开关选择的阀侧最大空载直流电压, 用于设计换流变分接头负的最大档位。

整流站换流变最小空载直流电压  $U_{dioRmin}$  的计算公式同式(12), 其计算条件如下:

$$n=4$$

$$U_{dR} = U_{dNR} - \Delta U_{dolTC} - \delta U_{dmax} =$$

$$1100 \times (1.0 - 0.00625 - 0.005) = 1087.6 \text{ (kV)}$$

$$d_{xR} = d_{xN} - \delta_{dx} = 0.12 \times (1 - 0.07) = 0.1116$$

$$I_d = I_{dN} + \Delta I_{dolTC} - \delta I_{dmax} =$$

$$4.75 \times (1.0 + 0.0043 - 0.003) = 0.481 \text{ (kA)}$$

$$\alpha = \alpha_N + \Delta \alpha = 15^\circ + 2.5^\circ = 17.5^\circ$$

将上述参数代入式(12)得  $U_{dioRmin} = 289.71 \text{ kV}$ 。

将  $U_{dioRmin}$  的值作为分接头开关选择的阀侧最小

空载直流电压,但是在换流变分接头设计时,此值只用于确定可接受的最小正向换流变分接头档位,最大正向分接头档位数由降压运行方式下的最小空载直流电压确定。

空载直流电压  $U_{dio}$  限制器是为了防止稳态运行时设备的过电压,它优先于正常的换流变压器分接头控制,其动作逻辑包含 2 个限值:禁止分接头动作以降低空载直流电压的上限值  $U_{dioG}$  和使分接头动作以降低空载直流电压的下限值  $U_{dioL}$ 。动作逻辑<sup>[18-19]</sup>具体如下:当  $U_{dioG} < U_{dio} < U_{dioL}$  时,限制器禁止提高换流变阀侧换相电压  $U_{dio}$  的分接头动作;当  $U_{dio} > U_{dioL}$  时,限制器调节换流变分接头动作,以降低  $U_{dio}$ 。

此外,  $U_{dioL}$  的值应足够大,以防止换流变压器分接头频繁动作。

在确定这 2 个限值时,  $U_{dioGR}$  应选为换流变最大空载直流电压 328.61 kV,  $U_{dioLR}$  计算公式为:

$$U_{dioLR} = U_{dioG} + 1.5\Delta\eta U_{dioN} = 328.61 + 1.5 \times 0.0086 \times 326.96 = 332.82 \text{ (kV)}$$

其中,  $\Delta\eta$  为换流变分接头档距,整流侧取 0.86%。

考虑测量误差的绝对最大直流空载电压  $U_{absR}$  为:

$$U_{absR} = (1/\delta_{U_{dio}})U_{dioLR} = (1+0.01) \times 332.82 = 336.15 \text{ (kV)}$$

因此,整流站绝对最大直流空载电压设计值可选为 337.0 kV。

### 2.3.3 逆变站空载直流电压限值

逆变站换流变最大空载直流电压  $U_{dioLmax}$  为:

$$U_{dioLmax} = \frac{U_{dR} - R_d I_d}{n} - U_T + (d_x - d_r) \frac{I_d}{I_{dN}} - U_{dioLI} \quad (13)$$

$$n=4$$

$$U_{dR} = U_{dNR} + \Delta U_{dioLTC} + \delta U_{dmax} = 1100 \times (1.0 + 0.00625 + 0.005) = 1112.4 \text{ (kV)}$$

$$d_{xI} = d_{xNI} + \delta_{dx} = 0.12 \times (1 + 0.05) = 0.126$$

$$I_d = I_{dN} - \Delta I_{dioLTC} + \delta I_{dmax} = 4.75 \times (1.0 - 0.0043 + 0.003) = 4.744 \text{ (kA)}$$

$$\gamma = \gamma_N + \delta_\gamma = 17^\circ + 1^\circ = 18^\circ$$

$$R_d = R_{dmin} = 7.955 \Omega$$

可得  $U_{dioLmax} = 322.49 \text{ kV}$ 。

取如下计算条件代入式(13):

$$n=4$$

$$U_{dR} = U_{dNR} - \Delta U_{dioLTC} = 1100 \times (1.0 - 0.00625) = 1093.125 \text{ (kV)}$$

$$d_{xI} = d_{xNI} + \delta_{dx} = 0.12 \times (1.0 + 0.05) = 0.126$$

$$I_d = I_{dN} + \Delta I_{dioLTC} + \delta I_{dmax} = 4.75 \times (1.0 + 0.0043 + 0.003) = 4.785 \text{ (kA)}$$

$$\gamma = \gamma_N + \delta_\gamma = 17^\circ + 1^\circ = 18^\circ$$

$$R_d = R_{dmin} = 7.955 \Omega$$

可得逆变站分接头开关选择的最大空载直流电

压为 317.69 kV。

取如下计算条件代入式(13):

$$n=4$$

$$U_{dR} = U_{dNR} + \Delta U_{dioLTC} = 1100 \times (1.0 + 0.00625) = 1106.875 \text{ (kV)}$$

$$d_{xI} = d_{xNI} - \delta_{dx} = 0.12 \times (1 - 0.07) = 0.1116$$

$$I_d = I_{dN} - \Delta I_{dioLTC} + \delta I_{dmax} = 4.75 \times (1.0 - 0.0043 + 0.003) = 4.744 \text{ (kA)}$$

$$\gamma = \gamma_N - \delta_\gamma = 17^\circ - 1^\circ = 16^\circ$$

$$R_d = R_{dmax} = 10.607 \times 2 = 21.214 \Omega$$

可得  $U_{dioLmin} = 296.57 \text{ kV}$ , 直流回路电阻乘以 2 是因为计算该参数时所选取的系统运行方式为单极金属回线运行, 2 条直流线路均接入回路, 此时逆变侧对应的空载直流电压最小。逆变站分接头开关选择的最小空载电压也取 296.57 kV。

逆变侧空载直流电压  $U_{dio}$  限制器选取如下:

$$U_{dioLI} = U_{dioLmax} = 322.49 \text{ kV}$$

$$U_{dioGI} = U_{dioLI} - 1.5\Delta\eta U_{dioNI} = 322.49 - 1.5 \times 0.0125 \times 314.58 = 316.59 \text{ (kV)}$$

考虑测量误差的绝对最大空载直流电压计算值  $U_{absI}$  为:

$$U_{absI} = (1 + \delta_{U_{dio}}) U_{dioLI} = (1 + 0.01) \times 322.49 = 325.71 \text{ (kV)}$$

因此,逆变站绝对最大空载直流电压的设计值可选为 326.0 kV。

综上所述,两端换流站的换流变压器阀侧空载直流电压如表 1 所示。

表 1 换流变阀侧空载直流电压  
Tab.1 No-load DC voltage of converter transformer

| 变量               | 描述               | 数值 / kV |        |
|------------------|------------------|---------|--------|
|                  |                  | 整流站     | 逆变站    |
| $U_{dioN}$       | 额定空载直流电压         | 326.96  | 314.58 |
| $U_{dioLmin}$    | 最小空载直流电压         | 289.71  | 296.57 |
| $U_{dioLmax}$    | 最大空载直流电压         | 328.61  | 322.49 |
| $U_{dioOLTCmax}$ | 分接头调节达到的最大空载直流电压 | 328.61  | 317.69 |
| $U_{dioG}$       | 分接头上调的空载直流电压限值   | 328.61  | 316.59 |
| $U_{dioL}$       | 分接头下调的空载直流电压限值   | 332.82  | 322.49 |
| $U_{abs}$        | 绝对最大空载直流电压计算值    | 336.15  | 325.71 |
| $U'_{abs}$       | 绝对最大空载直流电压设计值    | 337.00  | 326.00 |

## 3 换流变压器参数设计

换流变压器是特高压直流工程换流站内最重要的关键设备之一,其设计、制造技术难度较大,设备费用昂贵,并且其可靠性对整个直流输电系统的安全稳定运行起着至关重要的作用<sup>[18]</sup>。换流变压器类型的选择需要综合考虑设备制造能力、运输条件和投资费用等各个因素,由于受到单台单相三绕组变压器容量生产能力和运输条件的限制,目前特高压

直流工程均采用了单相双绕组变压器<sup>[22-23]</sup>。与±800 kV 特高压直流工程相比,±1100 kV 特高压直流工程换流变的容量更大,绝缘水平也更高,因此本工程换流变推荐采用单相双绕组形式。

换流变压器的基本参数包括短路阻抗、有载调压分接头范围、额定线电压和额定容量等,下面分别对这些参数进行设计。

### 3.1 换流变压器短路阻抗

换流变压器短路阻抗的选取对直流系统故障时阀所承受的最大阀侧短路电流、换流器消耗的无功以及换流变压器相关设备的制造成本和运输条件等都有影响<sup>[17-18,23]</sup>。短路阻抗的确定首先需要确保换流阀短路后的阀侧短路电流不超过换流阀允许的最大短路电流值。但是短路阻抗过大,会使换流器消耗的无功功率增大,换流器换相过程中的换相压降过大。综合考虑换流变压器的设计优化,并结合实际运行经验以及设备的制造水平、运输条件等因素,该工程换流变压器短路阻抗  $u_k$  选为 24%。

### 3.2 换流变压器分接头设计

换流变压器分接头是调节直流系统稳态运行时直流电压的主要手段之一,当交流电压和直流功率在给定范围内变化时限制换流器触发角或熄弧角在一定范围。换流变压器分接头的设计包括分接头调节步长和档位选择。

分接头调节步长的选择与直流系统的控制策略密切相关,需要考虑换流变压器分接头调节一档所引起的换流器控制角度的变化大小,在角度控制范围内要防止分接头频繁动作。结合已有或在建特高压直流工程的运行经验,整流侧准东换流站交流侧接入为 750 kV 系统,换流变分接头调节步长取为 0.86%,逆变侧成都换流站交流侧接入为 500 kV 系统,换流变分接头调节步长取为 1.25%。换流变压器分接头调节范围的确定需要综合考虑换流母线电压稳态波动范围、直流系统运行方式、全压以及降压运行要求、换流阀允许的最大触发角(关断角)限制和换流变压器的制造能力等方面的要求。

相对于 0 分接头位置的额定换流变压器变比  $n_{nom}$  计算如下:

$$\begin{aligned} n_{nom} &= \frac{U_{IN}}{U_{vN}} = \frac{U_{IN}}{\frac{\pi}{3} \frac{U_{dioN}}{\sqrt{3}}} \\ n_{nomR} &= \frac{770}{\frac{\pi}{3} \frac{326.96}{\sqrt{2}}} = 3.1804 \\ n_{nomI} &= \frac{525}{\frac{\pi}{3} \frac{314.58}{\sqrt{2}}} = 2.2538 \end{aligned} \quad (14)$$

其中,  $U_{IN}$  为换流站交流母线额定运行电压。

换流变压器最大变比  $n_{max}$  计算如下:

$$\begin{aligned} n_{max} &= \frac{U_{Imax}}{U_{IN}} \frac{U_{dioN}}{U_{dioNmin}} \\ n_{maxR} &= \frac{800}{770} \times \frac{326.96}{289.71} = 1.1725 \\ n_{maxI} &= \frac{550}{525} \times \frac{314.58}{296.57} = 1.1112 \end{aligned} \quad (15)$$

其中,  $U_{Imax}$  为换流站交流母线最高稳态运行电压。

换流变压器最小变比  $n_{min}$  计算如下:

$$\begin{aligned} n_{min} &= \frac{U_{Imin}}{U_{IN}} \frac{U_{dioN}}{U_{dioOLTCmax}} \\ n_{minR} &= \frac{750}{770} \times \frac{326.96}{328.61} = 0.9691 \\ n_{minI} &= \frac{500}{525} \times \frac{314.58}{317.69} = 0.9431 \end{aligned} \quad (16)$$

其中,  $U_{Imin}$  为换流站交流母线最低稳态运行电压。

换流变压器有载调压分接头档位数  $T_{step}$  计算如下:

$$T_{step} = \frac{n_T - 1}{\Delta\eta} \quad (17)$$

其中,  $\Delta\eta$  为分接头调节步长,整流侧取 0.86%,逆变侧取 1.25%;  $n_T$  为换流变压器变比。

将式(15)、(16)中的变比数据代入式(17),计算得准东站换流变压器的分接头档位数分别为+21/-4,成都站换流变压器的分接头档位数分别为+9/-5。但是,在实际工程中,由于直流降压运行的要求,需要增加换流变压器正向分接头档位数,来达到降压运行要求,并且满足换流器的控制角在规定范围之内。±1100 kV 特高压直流系统的降压运行水平最低为 70%,即为 770 kV,在此工况下对换流变压器分接头档位数重新进行计算,可得到两端换流站换流变压器的最大正分接头数。最终得到两端换流站换流变压器的分接头档位数分别为:整流站+28/-4,逆变站+20/-5。

### 3.3 换流变阀侧额定线电压和额定容量

换流变压器阀侧线电压计算如下:

$$\begin{aligned} U_v &= \frac{\pi}{3} \frac{U_{dio}}{\sqrt{2}} \\ U_{vNR} &= \frac{\pi}{3} \frac{U_{dioNR}}{\sqrt{2}} = 242.11 \text{ (kV)} \\ U_{vNI} &= \frac{\pi}{3} \frac{U_{dioNI}}{\sqrt{2}} = 232.94 \text{ (kV)} \end{aligned} \quad (18)$$

换流变压器阀侧交流电流有效值  $I_v = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d$ , 故可得连接 6 脉动换流器的换流变压器三相容量额定值  $S_N$  为:

$$S_N = \sqrt{3} U_{vN} I_{vN} = \frac{\pi}{3} U_{dioN} I_{dN} \quad (19)$$

由于特高压直流工程中采用单相双绕组变压

器,其额定容量应为三相容量额定值的 1/3。故可得  
两端换流站换流变压器额定容量的计算如下:

$$S_{\text{NwR}} = \frac{\pi}{9} U_{\text{dioN}} I_{\text{dN}}$$

$$S_{\text{NwR}} = \frac{\pi}{9} \times 326.96 \times 4.75 = 542.11 \text{ (MV} \cdot \text{A)} \text{ (20)}$$

$$S_{\text{NwI}} = \frac{\pi}{9} \times 314.58 \times 4.75 = 521.59 \text{ (MV} \cdot \text{A)}$$

综合上述各节计算结果,±1 100 kV 准东—四川  
特高压直流输电工程两端换流站换流变压器的主要  
参数如下,阀侧绕组为星三角接线,以阀侧绕组(Y)  
和阀侧绕组(Δ)表示。

整流站换流变压器参数如下。

a. 额定相电压:网侧绕组,444.56 kV;阀侧绕组  
(Y),139.78 kV;阀侧绕组(Δ),242.11 kV。

b. 最大稳态相电压:网侧绕组,461.88 kV;阀侧  
绕组(Y),144.07 kV;阀侧绕组(Δ),249.54 kV。

c. 额定容量:网侧绕组,542.11 MV·A;阀侧绕组  
(Y),542.11 MV·A;阀侧绕组(Δ),542.11 MV·A。

d. 双极运行、分接头在额定位置时额定电流:网  
侧绕组,1.219 kA;阀侧绕组(Y),3.878 kA;阀侧绕组  
(Δ),2.239 kA。

e. 分接头档位数为+28/-4,分接头调节步长为  
0.86%,分接头在额定位置时的阻抗为 24%。

逆变站换流变压器参数如下。

a. 额定相电压:网侧绕组,303.11 kV;阀侧绕组  
(Y),134.49 kV;阀侧绕组(Δ),232.94 kV。

b. 最大稳态相电压:网侧绕组,317.54 kV;阀侧  
绕组(Y),139.37 kV;阀侧绕组(Δ),241.40 kV。

c. 额定容量:网侧绕组,521.59 MV·A;阀侧绕组  
(Y),521.59 MV·A;阀侧绕组(Δ),521.59 MV·A。

d. 双极运行、分接头在额定位置时额定电流:网  
侧绕组,1.721 kA;阀侧绕组(Y),3.878 kA;阀侧绕组  
(Δ),2.239 kA。

e. 分接头档位数为+20/-5,分接头调节步长为  
1.25%,分接头在额定位置时的阻抗为 24%。

## 4 直流系统无功消耗及稳态特性

### 4.1 换流站无功消耗

换流站在换相过程中会消耗大量的容性无功功

率,通常整流器、逆变器消耗的无功功率达直流输送  
功率的 30%~50%、50%~60%。换流站消耗的无功  
功率大小与直流输送功率、直流电压、直流电流及换  
相角等运行参数有关<sup>[24-25]</sup>,换流站的无功消耗计算  
可为换流站的无功补偿设计提供依据。整流侧 1 个  
12 脉动换流器所消耗的容性无功功率可根据式  
(21)计算:

$$Q_d = 2\chi I_d U_{\text{dio}} \\ \chi = \frac{1}{4} \frac{2\mu + \sin(2\alpha) - \sin[2(\alpha + \mu)]}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)} \quad (21) \\ \mu = \arccos\left(\cos \alpha - 2d_x \frac{I_d}{I_{\text{dN}}} \frac{U_{\text{dioN}}}{U_{\text{dio}}}\right) - \alpha$$

其中, $U_{\text{dio}}$ 取换流器理想空载直流电压。

对于逆变站,将上述公式中的触发角  $\alpha$  换成熄  
弧角  $\gamma$  即可。

由于特高压直流输电系统中换流器采用双 12  
脉动换流器串联接线方式,每个换流站 2 极共 4 个  
12 脉动换流器,因此换流站消耗的无功功率是式(21)  
的 4 倍。根据上述公式,分别对换流站额定运行工  
况、长期过负荷运行和双极最小输送功率 3 种运行  
方式下的无功消耗进行计算。由计算结果可知:直  
流输送额定功率 10450 MW 时,整流站、逆变站消耗  
的无功功率分别为 6 916 Mvar 和 6 693 Mvar;直流  
1.05 倍过负荷运行时,直流输送功率为 10972.5 MW,  
两端换流站的无功消耗分别增至 7 407 Mvar 和  
7 147 Mvar;直流 10% 小负荷运行方式下,直流输送  
功率为 1 045 MW,两端换流站消耗的无功功率分别  
为 295 Mvar 和 344 Mvar。

### 4.2 直流系统稳态特性计算

特高压直流输电系统的稳态特性参数是进一  
步分析特高压直流输电系统的动态行为以及进行  
系统暂态过电压分析计算的基础。在计算直流系统  
稳态运行参数时,整流侧交流母线电压采用 770 kV,  
逆变侧交流母线电压采用 525 kV,并且需要确保  
在各种运行方式下,整流侧空载直流电压  $U_{\text{dioR}}$  不  
大于 326.96 kV,逆变侧空载直流电压  $U_{\text{dioI}}$  不大  
于 314.58 kV。表 2 列出了直流系统双极平衡运行方  
式下几种典型运行工况的系统稳态运行参数,其中输  
送功率为标么值,0.90 p.u. 为反送功率,其他为正送功率。

表 2 双极平衡运行方式下系统稳态运行参数

Tab.2 Steady-state operating characteristics of system under bipolar operation

| 输送功率 | $I_d/\text{kA}$ | $U_{\text{dIR}}/\text{kV}$ | $U_{\text{dioR}}/\text{kV}$ | $U_{\text{dioI}}/\text{kV}$ | $P_{\text{dIR}}/\text{MW}$ | $\alpha/(^\circ)$ | $\gamma/(^\circ)$ | $T_{\text{sepr}}$ | $T_{\text{depl}}$ |
|------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0.10 | 0.475           | 1 100                      | 289.5                       | 289.7                       | 1045.0                     | 15                | 17                | +15.100           | +6.900            |
| 0.25 | 1.188           | 1 100                      | 295.7                       | 293.8                       | 2612.5                     | 15                | 17                | +12.300           | +5.600            |
| 0.50 | 2.375           | 1 100                      | 306.1                       | 300.8                       | 5225.0                     | 15                | 17                | +7.900            | +3.700            |
| 0.75 | 3.563           | 1 100                      | 316.5                       | 307.7                       | 7837.5                     | 15                | 17                | +3.800            | +1.800            |
| 1.00 | 4.750           | 1 100                      | 327.0                       | 314.6                       | 10450.0                    | 15                | 17                | 0                 | 0                 |
| 1.05 | 5.031           | 1 090.5                    | 327.0                       | 313.7                       | 10972.5                    | 15                | 17                | 0                 | +0.217            |
| 0.90 | 4.396           | 1 069.8                    | 314.6                       | 306.0                       | 9405.0                     | 15                | 17                | +7.953            | 0                 |

## 5 结语

对准东—四川 ±1100 kV 特高压直流输电工程的主回路参数进行了设计,根据交直流系统基本条件,计算确定了换流器、换流变压器等关键设备的基本参数,以及换流站消耗的无功功率。计算结果可为该工程设备设计、选型等后续研究提供重要依据,也可对相关特高压直流工程主回路参数设计提供参考。

## 参考文献:

- [1] 张文亮,于永清,李光范,等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.  
ZHANG Wenliang, YU Yongqing, LI Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22):1-7.
- [2] 舒印彪,张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(31):1-6.  
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31):1-6.
- [3] 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.  
ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, YANG Guangliang, et al. Modeling and simulation of UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7):10-14, 61.
- [4] 黄道春,魏远航,钟连宏,等. 我国发展特高压直流输电中一些问题的探讨[J]. 电网技术,2007,31(8):6-12.  
HUANG Daochun, WEI Yuanhang, ZHONG Lianhong, et al. Discussion on several problems of developing UHVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(8):6-12.
- [5] 陈仕龙,束洪春,谢静,等. 特高压直流输电线路和边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):134-139,153.  
CHEN Shilong, SHU Hongchun, XIE Jing, et al. Frequency characteristics of UHVDC transmission line and its boundary[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11):134-139, 153.
- [6] 汤广福. 高压直流输电装备核心技术研发及工程化[J]. 电网技术,2012,36(1):1-6.  
TANG Guangfu. R&D and application of key technologies for HVDC equipment[J]. Power System Technology, 2012, 36(1):1-6.
- [7] 莫丽琼. ±800 kV 特高压直流输电系统谐波不稳定研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):118-122,146.  
MO Liqiong. Study of harmonic instability for ±800 kV UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5):118-122, 146.
- [8] 李新年,李涛,吕鹏飞,等. 向家坝至上海特高压直流输电工程换流器投退策略分析[J]. 高电压技术,2011,37(5):1232-1238.  
LI Xinnian, LI Tao, LÜ Pengfei, et al. Analysis on the strategy of converter entry/exit for Xiangjiaba to Shanghai UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5):1232-1238.
- [9] 陈仕龙,束洪春,甄颖. 云广特高压直流输电负极运行换相失败及控制研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):128-133.  
CHEN Shilong, SHU Hongchun, ZHEN Ying. Commutation failure of Yun-Guang UHVDC transmission system running in negative pole state and its control measures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6):128-133.
- [10] 王东举,邓旭,周浩,等. ±800 kV 溪洛渡—浙西直流输电工程换流站直流暂态过电压[J]. 南方电网技术,2012,6(2):6-13.  
WANG Dongju, DENG Xu, ZHOU Hao, et al. On the DC transient overvoltage in the converter stations of ±800 kV Xiluodu-Zhexi HVDC project[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2):6-13.
- [11] 张运洲,韩丰,赵彪,等. 直流电压等级序列的经济比较[J]. 电网技术,2008,32(9):37-41.  
ZHANG Yunzhou, HAN Feng, ZHAO Biao, et al. Economic comparison of HVDC voltage class sequence[J]. Power System Technology, 2008, 32(9):37-41.
- [12] 张文亮,周孝信,郭剑波,等. ±1000 kV 特高压直流在我国电网应用的可行性研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(28):1-5.  
ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, GUO Jianbo, et al. Feasibility of ±1000 kV ultra HVDC in the power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28):1-5.
- [13] 刘泽洪,高理迎,余军,等. ±1000 kV 特高压直流输电技术研发思路[J]. 中国电机工程学报,2009,29(22):76-82.  
LIU Zehong, GAO Liying, YU Jun, et al. R&D ideas of ±1000 kV UHVDC transmission technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(22):76-82.
- [14] 许钊,周会高,刘朴,等. ±1100 kV 特高压直流输电晶闸管阀运行试验系统设计[J]. 高电压技术,2012,38(2):400-406.  
XU Fan, ZHOU Huigao, LIU Pu, et al. Design for ±1100 kV UHVDC thyristor valve operational test circuit[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2):400-406.
- [15] 张学成,檀金华,牛万宇,等. ±1100 kV 直流输电工程换流变压器阀侧套管的设计[J]. 高电压技术,2012,38(2):393-399.  
ZHANG Xuecheng, TAN Jinhua, NIU Wanyu, et al. Bushings design of converter transformer's valve side of UHVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2):393-399.
- [16] 汤广福,刘泽洪. 2010 年国际大电网会议系列报道:高压直流输电和电力电子技术[J]. 电力系统自动化,2011,35(5):1-4.  
TANG Guangfu, LIU Zehong. A review of CIGRE 2010 on HVDC transmission and power electronic technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5):1-4.
- [17] 常浩,樊纪超. 特高压直流输电系统成套设计及其国产化[J]. 电网技术,2006,30(16):1-5.  
CHANG Hao, FAN Jichao. System design and its localization of UHVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2006, 30(16):1-5.
- [18] 陈锡磊,周浩,沈扬,等. 溪洛渡—浙西 ±800 kV/7500 MW 特高压直流输电工程主回路参数设计[J]. 电网技术,2011,35(12):26-32.  
CHEN Xilei, ZHOU Hao, SHEN Yang, et al. Study and design of main circuit parameters for ±800 kV/7500 MW DC power transmission project from Xiluodu to Zhexi[J]. Power System Technology, 2011, 35(12):26-32.
- [19] 刘宝宏,殷威扬,杨志栋,等. ±800 kV 特高压直流输电系统主回路参数研究[J]. 高电压技术,2007,33(1):17-21.  
LIU Baohong, YIN Weiyang, YANG Zhidong, et al. Study on main circuit parameters for ±800 kV UHVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1):17-21.
- [20] 段玉倩,饶宏,黎小林. 高压直流输电系统主回路参数稳态特性

- 计算方法[J]. 电力系统自动化,2007,31(16):53-56,69.
- DUAN Yuqian,RAO Hong,LI Xiaolin. Computational method of main circuit parameters of HVDC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(16):53-56,69.
- [21] 王峰,徐政,黄莹,等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报,2009,24(5):135-140.
- WANG Feng,XU Zheng,HUANG Ying,et al. Calculation of main circuit parameters for HVDC transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(5):135-140.
- [22] 王峰,徐政,薛英林. 高压直流输电换流变压器参数确定方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(22):98-102,107.
- WANG Feng,XU Zheng,XUE Yinglin. Calculation of converter transformer's parameters for HVDC transmission[J]. Power System Protection and Control,2011,39(22):98-102,107.
- [23] 陈锡磊,周浩,王东举,等. 溪洛渡—浙西  $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程浙西换流站绝缘配合[J]. 电网技术,2012,36(2):7-12.
- CHEN Xilei,ZHOU Hao,WANG Dongju,et al. Insulation coordination for Zhexi converter station of  $\pm 800$  kV DC power transmission project from Xiluodu to Zhexi[J]. Power System Technology,2012,36(2):7-12.
- [24] 邱伟,钟杰峰,伍文城.  $\pm 800$  kV 云广直流换流站无功补偿与配置方案[J]. 电网技术,2010,34(6):93-97.
- QIU Wei,ZHONG Jiefeng,WU Wencheng. Reactive power compensation scheme and its configuration for converter station of  $\pm 800$  kV DC power transmission project from Yunnan to Guangdong[J]. Power System Technology,2010,34(6):93-97.
- [25] 张啸虎,曹国云,陈陈. 高压直流系统低功率运行时的无功控制策略[J]. 电网技术,2012,36(1):118-122.
- ZHANG Xiaohu,CAO Guoyun,CHEN Chen. Proposal on reactive power control of HVDC system during low power transmission[J]. Power System Technology,2012,36(1):118-122.

#### 作者简介:



邓旭

邓旭(1990-),男,湖南永州人,硕士研究生,研究方向为高压、特高压直流输电的过电压与绝缘配合(E-mail:dengxu926@163.com);

王东举(1984-),男,河南南阳人,博士研究生,主要从事电力系统过电压方面的研究工作;

周浩(1963-),男,浙江绍兴人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统过电压、直流输电等方面的研究工作(E-mail:zhouhao\_ee@zju.edu.cn)。

## Main circuit parameter design of Zhundong-Sichuan $\pm 1100$ kV UHVDC power transmission project

DENG Xu<sup>1</sup>,WANG Dongju<sup>1</sup>,SHEN Yang<sup>2</sup>,ZHOU Hao<sup>1</sup>,CHEN Xilei<sup>3</sup>,SUN Ke<sup>4</sup>

(1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University,Hangzhou 310027,China;

2. Zhejiang Electric Power Design Institute,Hangzhou 310014,China;

3. Zhejiang Cixi Power Supply Bureau,Cixi 315300,China;

4. Zhejiang Electric Power Company,Hangzhou 310007,China)

**Abstract:** The main circuit parameters are designed based on the DC transmission theory and characteristics of UHVDC transmission system for Zhundong-Sichuan  $\pm 1100$  kV UHVDC transmission project. The basic parameters of key equipments are given and the wiring scheme of two twelve-pulse converters connecting in series is suggested. Research results show that,the maximum DC operating voltage is 1112 kV,the maximum DC is 5.357 kA,the minimum DC is 0.44 kA. The short circuit impedance of converter transformer is taken as 24% for both ends of transmission line;the rated capacity of converter transformer at rectifier station is 542.11 MV·A and that at inverter station is 521.59 MV·A;the transformer tap position of rectifier and inverter stations is +28/4 and +20/5 respectively;the reactive power consumption of rectifier and inverter stations is 6916 Mvar and 6693 Mvar respectively under rated power operation.

**Key words:** UHV power transmission; DC power transmission; parameter design; electric rectifiers; electric inverters; no-load DC voltage; reactive power consumption