

Study on Main Circuit Parameters for ± 800 kV DC Transmission Project

Tao Niu¹, Kang Qian¹, Yingjiao Zhang²

¹Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing

²Nanjing Power Supply Company, Nanjing

Email: niutao@jspd.com.cn

Received: Dec. 18th, 2012; revised: Jan. 5th, 2013; accepted: Jan. 13th, 2013

Copyright © 2013 Tao Niu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The main circuit parameters of converter station equipments are very important for Ultra-High Voltage Direct Current (UHVDC) transmission system design. Taking ± 800 kV DC project from Hami to Zhengzhou for example, the key parameters such as short-circuit impedance, OLTC steps of converter transformer, no-load direct-current voltage of converter valve, smoothing reactor inductance are selected. Finally, the parameters selected are checked out through calculations of main circuit steady-state in different operation modes.

Keywords: UHVDC; Main Circuit Parameters; Converter Transformer; Converter Valve

± 800 kV 直流输电系统主回路参数研究

牛涛¹, 钱康¹, 张英娇²

¹江苏省电力设计院, 南京

²南京市供电公司, 南京

Email: niutao@jspd.com.cn

收稿日期: 2012年12月18日; 修回日期: 2013年1月5日; 录用日期: 2013年1月13日

摘要: 换流站主回路设备参数选择对直流输电系统的设计十分重要。本文以哈密 - 郑州 ± 800 kV 直流输电工程为例, 对换流变压器短路阻抗、换流变压器分接开关级数、换流阀空载直流电压、平波电抗器电感值等关键参数进行了选择, 并通过多种运行方式下的主回路稳态特性计算来校核主回路设备参数是否合理。

关键词: 特高压直流; 主回路参数; 换流变压器; 换流阀

1. 引言

直流输电系统主回路包括换流器、换流变压器、交/直流滤波器以及平波电抗器等电气设备, 是直流输电系统最主要的组成部分。主回路参数计算是进行直流输电系统设计的基础, 关系到整个直流输电系统的运行性能和技术经济指标。主回路参数计算的目的是: 为制定直流系统的控制策略提供基本的稳态控制参数; 计算换流阀、换流变压器的基本参数; 为无功

补偿及其控制、交流滤波器研究、过电压和绝缘配合研究提供基本的输入条件^[1-4]。

主回路参数计算是基于一定的交流系统和直流系统参数条件的。交流系统条件包括两端换流站接入交流系统的电压等级、电压运行范围、短路容量等; 直流系统条件包括直流运行接线方式、直流电压、线路参数(含接地极参数)等。主回路参数计算依据直流系统的运行接线方式, 不同运行接线方式对设备参数

的要求不同。特高压直流系统有 3 种基本的运行方式：双极运行、单极大地返回、单极金属返回。主回路参数计算需要满足以上 3 种运行方式的要求^[3]。

哈密 - 郑州直流输电工程额定容量为 7500 MW，额定直流电压为±800 kV，额定直流电流为 4.6875 kA。本文以该直流输电工程为例，对换流变压器、换流阀、平波电抗器等关键设备的参数进行计算选择，并进行了主回路稳态特性计算，以确定选取的设备基本参数的合理性。

2. 系统条件

2.1. 交流系统条件

换流站交流系统的电压及运行范围见表 1，系统短路特性见表 2。

2.2. 直流系统条件

2.2.1. 直流运行接线方式

哈密 - 郑州采用双 12 脉动阀组串联接线结构，可以考虑 7 种运行方式：双极全压运行方式；双极半压运行方式；双极一极全压一极半压运行方式；单极全压金属返回方式；单极全压大地返回方式；单极半压金属返回方式；单极半压大地返回方式。

2.2.2. 直流电压

正常全压运行方式下哈密站的直流电压为±800 kV，正常半压运行方式下哈密站的直流电压为±400 kV，定义在线路端极母线与中性点之间。每极都应具有在直流降压至 70%~100%正常直流电压内连续运行

Table 1. AC system voltage
表 1. 交流系统电压

换流站	哈密	郑州
正常运行电压	525 kV	510 kV
系统最高电压, 稳态	550 kV	550 kV
系统最低电压, 稳态	500 kV	500 kV
系统最大极端电压, 长期耐受	550 kV	550 kV
系统最小极端电压, 长期耐受	475 kV	475 kV

Table 2. Short-circuit characteristics
表 2. 短路特性

换流站	哈密	郑州
三相对称最大短路电流	63 kA	63 kA

的能力。

2.2.3. 线路参数

直流线路导线型号为 LGJ-6 × 900，线路长度约 2300 km；接地极线路采用双回导线，导线型号为 LGJ-2 × 500，哈密站接地极线路长度约为 66 km，郑州站接地极线路长度约为 38 km。主回路计算中采用的直流电阻值见表 3。

2.2.4. 控制策略

常规的直流控制模式是整流侧定电流控制，逆变侧定电压或定熄弧角控制。

换流变压器分接开关是调节稳态运行时直流电压的主要手段之一，通常有两种调节控制方式：电压控制，保持换流变压器阀侧或直流空载电压恒定；角度控制，保持直流系统的运行参数(如 α 和 γ)在给定的范围内。

哈密 - 郑州主回路设备设计考虑的控制策略暂定为：整流侧定电流控制，换流变压器调节分接头为角度控制；逆变侧定电压控制，换流变压器调节分接头为角度控制。实际控制策略应综合考虑系统运行要求、主回路参数计算结果、主设备参数等因素而制定，本文暂不研究。

3. 换流变压器阻抗选择

3.1. 换流变压器型式选择

对于每极 2 组 12 脉动换流阀组串联接线，上、下两组换流阀有(400 + 400) kV 和(300 + 500) kV 两种电压组合方案。(400 + 400) kV 的阀组方案具有阀塔结构相同、换流单元一致、备用元件少、系统运行灵活性高、设计简单等优点，因此目前都采用该方案。

若采用单相三绕组的换流变压器，则单台换流变容量大于目前的生产能力，且对运输条件要求较高，因此，目前已投运的±800 kV 换流站均采用单相双绕组变压器。

Table 3. DC resistance
表 3. 直流电阻

运行方式	电阻
双极	12.31 Ω
单极大地返回	14.87 Ω
单极金属返回	24.61 Ω

3.2. 换流变压器短路阻抗选择

换流变压器短路阻抗的计算选择是一个反复优选的过程, 需要综合考虑如下制约因素:

1) 满足换流阀对短路电流(也称浪涌电流)水平的要求

换流变压器短路阻抗与短路电流之间的关系如下^[4-6]:

$$I_k = \frac{2I_{dN}}{\left[u_k + \frac{S_N}{S_{kmax}} \right]} \quad (1)$$

式中: u_k 为换流变压器短路阻抗; I_{dN} 为直流额定电流; I_k 为换流阀侧的短路电流; S_N 为单桥换流变压器额定容量; S_{kmax} 为交流系统最大短路容量。可见, u_k 越大, 则 I_k 越小。

2) 换流器消耗的无功功率最小

换流器消耗的无功功率随 u_k 的增大而增大, 因此从减小无功消耗的角度考虑, 希望 u_k 越小越好。

3) 换流站费用最低

换流变压器及无功补偿设备随 u_k 的增大而增大, 因此从减小换流站综合费用的角度考虑, 也希望 u_k 越小越好。

综合以上因素, 对换流变压器短路阻抗 u_k 的选取原则应为: 在满足换流阀对短路电流水平要求的前提下, u_k 越小越好。

目前 6 英寸换流阀可承受的最大短路电流水平为 48~50 kA, 则由公式(1)计算得出, 哈密、郑州两侧换流变压器短路阻抗取 16% 时, 短路电流超过 50 kA; 当短路阻抗取 18% 时, 两侧短路电流均低于 48 kA。短路阻抗计算结果见表 4。因此, 两侧换流变压器短路阻抗均宜选择 18%。

4. 换流变压器分接开关级数

4.1. 额定直流空载电压计算和额定角度选择

哈密、郑州站额定直流空载电压 U_{dioNR} 、 U_{dioNI} 分

Table 4. Short-circuit resistance selection
表 4. 短路阻抗选择

换流站	换流变短路阻抗	
	18%	16%
哈密	47.26 kA	52.56 kA
郑州	46.91 kA	52.13 kA

别按照公式(2)、(3)进行计算^[4-6], 哈密站额定触发角 α_N 选取为 15° , 逆变站额定熄弧角 γ_N 为 17° 。

$$U_{dioNR} = \frac{\frac{U_{dNR}}{n} + U_{TR}}{\cos \alpha_N - (d_{xNR} + d_{rNR})} \quad (2)$$

$$U_{dioNI} = \frac{\frac{U_{dNR} - R_{dN} \cdot I_{dN}}{4} - U_{TI}}{\cos \gamma_N - (d_{xNI} - d_{rNI})} \quad (3)$$

式中: U_{dNR} 为整流侧直流正常运行电压; n 为阀组数; I_{dN} 为额定直流电流; R_{dN} 为直流电阻; d_x 和 d_r 分别为换流变压器感性和阻性压降; U_T 为换流阀通态压降, 下标 N 表示额定, R 表示整流侧, I 表示逆变侧。

4.2. 换流变阀侧空载直流电压

晶闸管换流阀应能在预定的外部环境及系统条件下按规定要求安全可靠运行, 并满足损耗低、安装及维护方便、投资少的要求。

在直流空载电压计算时, 考虑各种测量误差、设备制造公差以及触发角、熄弧角的调整范围等因素组合形成的 U_{dio} 的偏差, 根据公式(4)、(5)计算出两侧 U_{dio} 的上、下限值(U_{diomax} 、 U_{diomin}), 及分接头调节的最大空载直流电压 $U_{diomaxOLTC}$ ^[4-6]。直流空载电压计算结果见表 5。

$$U_{dioR} = \frac{\frac{U_{dR}}{n} + U_{TR} + (d_{xR} + d_{rR}) \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot U_{dioNR}}{\cos \alpha} \quad (4)$$

$$U_{dioI} = \frac{\frac{U_{dR} - R_d \cdot I_d}{n} - U_{TI} + (d_{xI} - d_{rI}) \cdot \frac{I_d}{I_{dN}} \cdot U_{dioNI}}{\cos \gamma} \quad (5)$$

4.3. 换流变压器分接开关级数选择

换流变压器分接头是调节稳态运行时直流电压的主要手段之一, 分接头的设计需要结合换流母线电压稳态运行范围、直流系统全压和降压运行要求、

Table 5. DC no-load voltage
表 5. 直流空载电压

换流站	哈密	郑州
U_{dioN}	229.84 kV	212.78 kV
U_{diomin}	207.77 kV	198.40 kV
U_{diomax}	232.84 kV	219.64 kV
$U_{diomaxOLTC}$	232.84 kV	212.41 kV

换流阀大角度运行能力以及换流变压器制造能力等方面的要求。

换流变压器分接开关最小档位由最大空载直流电压决定；分接开关最大档位由单极金属返回、70%降压运行方式下的最小空载直流电压决定。

换流变压器的最大及最小变比 η 按如下公式计算[2,3,6]：

$$\eta_{\max} = \frac{U_{I\max}}{U_{IN}} \cdot \frac{U_{dioN}}{U_{diomin}} ; \quad \eta_{\min} = \frac{U_{I\min}}{U_{IN}} \cdot \frac{U_{dioN}}{U_{diomax}}$$

换流变压器调节开关级数的计算公式为：

$$TC_{step} = \frac{\eta-1}{\Delta\eta}$$

式中： $\Delta\eta$ 为分接头步长。

按照上述计算，哈密、郑州换流站换流变压器调节开关级数如表 6 所示。

5. 换流变压器额定参数计算

换流变压器阀侧额定电压、额定容量按如下公式计算[4,6]：

$$U_{vN} = \frac{\pi U_{dioN}}{3\sqrt{2}} \quad (6)$$

$$I_{vN} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{dN} \quad (7)$$

$$S_N = \frac{\sqrt{3}}{3} U_{vN} I_{vN} \quad (8)$$

根据公式(6)~(8)，由额定直流空载电压，计算出换流变压器阀侧额定电压 U_{vN} ；由额定直流电流得出换流变压器阀侧额定电流 I_{vN} ；然后计算出换流变压器额定容量 S_N 。

哈密 - 郑州工程的换流变压器额定参数如表 7 所示。

Table 6. OLTC steps of converter transformer
表 6. 换流变压器调节开关级数

换流站	哈密	郑州
换流变抽头调节级差	1.25%	
换流变主抽头	525 kV	510 kV
抽头级数(触发角最大允许角度 40°)	+26/-5	+30/-6
抽头级数(触发角最大允许角度 45°)	+18/-5	+21/-6

6. 平波电抗器参数

平波电抗器参数的选取主要考虑以下因素：1) 抑制故障电流的上升速度，避免逆变器故障时可能引起的继发性换相失败；2) 平抑直流电流的纹波，防止直流轻载时的电流断续。

从平波电抗器的性能角度考虑，希望其电感越大越好，但电感过大会造成如下影响：1) 导致直流输电系统自动调节速度下降；2) 电流迅速变化时引起的平波电抗器过电压增加；3) 增加平波电抗器投资。

因此，平波电抗器的选取应在能满足性能要求的前提下，电感越小越好。参照以往工程经验，初选平波电抗器的电感值为 300 mH。

7. 主回路稳态特性计算

按照文献[7]介绍的主回路稳态特性计算方法，编制了相应的计算程序。对双极全压、双极降压 70%、单极金属降压 70%三种运行方式下的稳态特性进行了计算，结果见表 8。主回路稳态特性计算表明了本文所选取的主回路设备参数是合理的。

Table 7. Rated parameters of converter transformer
表 7. 换流变压器额定参数

换流站	哈密	郑州
阀侧额定电压	170.19 kV	157.56 kV
额定容量	376.07 MVA	348.16 MVA

Table 8. Calculation results of main circuit steady-state characteristic
表 8. 主回路稳态计算结果

$P_d/p.u.$	I_d/A	U_{dR}/kV	U_{dI}/kV	$\alpha/(^\circ)$	$\gamma/(^\circ)$	TC_R	TC_I
双极全压							
0.1	0.570	658	717.4	37.59	18.36	7	1
1	4.688	800	793.8	15.00	17.00	0	0
1.05	4.922	800	793.4	13.92	16.79	0	0
双极降压 70%							
0.1	0.694	540	531.8	37.01	25.27	26	30
0.4	2.679	560	555.7	28.36	23.56	26	30
0.7	4.688	560	551.4	21.03	21.71	26	30
单极金属降压 70%							
0.1	0.694	540	559.2	37.01	15.29	26	30
0.4	2.679	560	552.8	28.36	21.47	26	30
0.7	4.688	560	542.6	21.03	26.29	26	30

8. 结论

哈密 - 郑州±800 kV 直流输电工程主回路参数计算结论如下:

1) 换流变压器短路阻抗值取 18%, 可使短路电流均低于 48 kA。

2) 换流阀最大允许触发角越大, 则换流变压器分接开关级数范围越小, 当最大允许触发角为 40°时, 哈密侧、郑州侧抽头级数分别为+26/-5、+30/-6。

3) 平波电抗器的选择参考以往工程经验, 暂取 300 mH。

4) 哈密侧、郑州侧换流变压器额定容量分别为 376.07 MVA、348.16 MVA。

5) 主回路稳态特性计算结果表明上述主回路设备参数的选取是合理的。

通过本文主回路参数的计算结果, 为哈密 - 郑州

直流输电工程制定直流系统的控制策略提供了依据, 并为下一步开展无功功率补偿及控制研究、交流滤波器研究、过电压和绝缘配合研究等提供基本的输入条件。

参考文献 (References)

- [1] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2005 年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [2] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
- [3] 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.
- [4] 黄莹, 黎小林, 饶宏. 云广±800kV 直流输电工程主回路设备参数选择[J]. 南方电网技术, 2010, 4(4): 56-59.
- [5] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] DL/T 5223-2005, 高压直流换流站设计技术规定[S].
- [7] 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.